

気象台の災害時の機能維持について —奈良地方気象台の電気設備の対応—

泉屋 勇斗

¹近畿地方整備局 営繕部 整備課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

奈良地方気象台は、奈良県内の気象観測、天気予報、警報・注意報、気象情報、地震に関する情報などの発表および気象資料の照会、気象に関する相談などの窓口業務を行っている。災害発生時や災害発生のおそれのある時には、防災気象情報の発表や国・地方自治体、防災機関等への情報提供を行っている。2016年度に新築した当該施設は、災害時でも、業務継続が可能な機能を確保すべく施設整備を行っている。本研究では、今後の電気設備設計の参考とするため、電力の確保、通信・連絡網の確保など、奈良地方気象台の災害時の機能維持方法について、電気設備の設計上の課題と、それらの検討・対応状況についてを報告する。

キーワード 気象台, 災害時, 電気設備, 機能維持

1. 奈良地方気象台の概要

(1)施設概要

所在地：奈良市西紀寺町1 2-1
庁舎：鉄筋コンクリート造2階建
延べ面積：1,388.25㎡
敷地面積：1,741.87㎡
完成：2017年2月



図1-2 奈良地方気象台(東側) (新築)

図1-1 (図1-2)



図1-1 奈良地方気象台(西側) (新築)

2. 本研究の目的

気象台は災害応急対策活動を行う重要官署であり、災害時においても冒頭に示す気象台の業務を継続する必要がある。そのため、奈良地方気象台の新築にあたっては、電気設備の機能維持を念頭においた整備を行った。

本研究は、設計上の課題と、それらの検討・対応状況について報告するものである。

本施設は「官公庁施設の建設等に関する法律(以下官公法)」及び「官庁施設の総合耐震・耐津波計画基準(以下基準)」において、災害応急対策活動が必要な施設(甲類施設)に該当しており、その機能を確保するために設計検討を行った。

3. 課題

建設地における災害応急対策活動として、災害時でも業務継続が可能な設備機能を確保するため、災害を(1)大地震に対する課題(2)その他の災害に対する課題に大別し、それぞれにおいて果たすべき課題を整理した。

(1)大地震に対する課題

- a)機器の転倒や配管等の破損
- b)商用電源の途絶
- c)公衆通信網の途絶

(2)その他の災害に対する課題

(2-1)大雨洪水に対する課題

- a)設備諸室の浸水による商用電源の途絶

(2-2)落雷に対する課題

- a)直撃落による建物と機器の破壊
- b)誘導雷による機器の破壊

4. 課題別の検討内容とその対応

(1)大地震に対する課題検討・対応状況

地震に対しては、建築設備の耐震安全性を確保するため、甲類施設の建築設備としては大地震動後の人命の安全確保及び二次災害の防止が図られていると共に大きな補修をすることなく、災害応急対策活動に必要な設備機能を相当期間継続し機能維持できることを目標としている。電気設備としての大地震に対する具体的な対応としては、地震による機器等の転倒破損防止、電力の確保、通信連絡網の確保などがあげられる。

a)機器の転倒や配管等の破損対策—耐震設計—

機器の転倒や配管等の破損対策としては以下の2つがあげられる。

①機器固定

・検討内容

建築設備耐震設計・施工指針では、設備機器固定における重要度による分類を「重要機器」及び「一般機器」の2分類としており、重要機器としたものは、より高い地震力でも転倒（取付ボルトの破損）しないように計算式が示されている。今回は災害応急対策活動するにあたり必要不可欠な設備機器を重点的に固定が必要な重要機器とした。

・対応状況

電源と公衆通信網の確保に必要な配電盤、発電機、電話装置などを重要機器とした。

②配管固定

・対応状況

建築設備耐震設計・施工指針に基づき、配管等の耐震性確保に必要な措置を行った。

b)商用電源の途絶対策—電力の確保—

電力の確保は業務継続の最重要課題のため、商用電源の途絶対策として複数の停電時の電源のバックアップ検討を行う。検討項目は対策順に以下の4つがあげられる。

(図4-1)

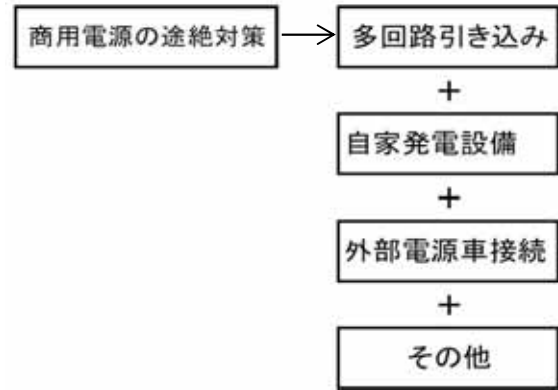


図4-1 停電時の電源確保の考え方

① 電力の多回路引き込み

・検討内容

電力の多回路引き込み（電力会社から高压ケーブルを2本引き込む）の検討を行った。

・対応状況

敷地西側の電柱からの引込については、引込用開閉器がすでに付いているため問題はなかった。

一方、東側の電柱からの引込は、配電線が民地上空にかかるため、T分岐で供給する手段しかなく、かなりの施工時間を要すること、また、維持経費上(ランニングコスト)も引き込み二重化は高額になることから、今回は採用しないこととした。

しかしながら、将来的な対応が可能となるよう、多回路引き込み可能なスペースを設けることとした。

② 自家発電設備の設置

・検討内容

災害応急対策活動を行うのに必要な負荷に電源供給するため、自家発電設備を設置することとした。加えて、自家発電設備の出力及びタンクの燃料備蓄量の検討を行った。

・発電回路とする負荷

自家発電設備の容量計算をするため、本施設で停電時、発電回路とする負荷を決定する。

气象台へのヒアリングより、災害応急対策活動をするための室を以下のように選定した。

活動拠点室：災害対策室

現業室（気象業務を行う室）

事務室

活動支援室：設備諸室、便所、

上記の室に通ずる廊下

活動拠点室とは、大地震動後に災害応急対策活動の拠点となる室であり、活動支援室とは拠点室を支援する室で、通信、連絡、水、電気の確保に関する業務に関する室である。施設の目的及び必要とされる機能を勘案し、災害応急対策活動に必要な室に対しての照明、コンセント、通信連絡用機器、エレベーター、ポンプ等を発電機回路とした。基準に従って検討し、燃料タンク容量を3日分、発電機の連続運転時間を1週間(168時間)とした。これは、概ね3日程度以内で交通網の復旧により燃料供給が再開され、1週間程度以内で商用電源が復電すると想定しているためである。

・対応状況

以上より自家発電設備を以下のように選定した。

相線：三相3線式

容量：100kVA 電圧210V 周波数60Hz

燃料小出槽：軽油 950L

地下燃料槽：タンク室式 2000L

連続運転時間：1週間(168時間)

燃料備蓄量：72時間分

(図4-2) (図4-3) (図4-4)



図4-2 自家用発電機(100 k VA)



図4-3 燃料小出槽 (950L)



図4-4 地下タンク埋設(2000L)

③ 外部電源車接続機能

・検討内容

自家発電設備が使用できなくなった場合に備えて、外部電源車からの引き込み及び接続対応の検討を行った。業務継続のための最低限必要な機能を選定し、それらに対して電源供給を行うことにした。

・対応状況

外部電源車が来車可能な国道に隣接していることから、引き込み及び接続対応を採用した。対象機器としては現業室の照明及び観測機器、災対室の照明及びOA機器などとした。以上より外部電源車接続盤の仕様は以下となった。

相線：単相3線式

電圧：100/200V

遮断器[定格電流]：

150AT×1 (2F現業室観測機器、災対室OA機器用)

75AT ×1 (2F現業室災対室等照明用)

(図4-5)



図4-5 外部電源接続箱図

④ その他—遠隔操作盤

・検討内容

災害時でも、業務継続が可能な機能を確保すべく、今回、奈良地方気象台独自の検討をした。

通常、停電時においては、商用電源側から発電機側への電源切り替えは自動で行われるが、自動起動しない場合には手動で切り替えをすることとなるため、職員が2階現業室から地下発電機室の操作盤へ移動し、機器を操作する必要があった。

しかし、災害時の職員の安全確保の観点や、気象業務の継続性の観点から、職員が2階現業室を離れることは難しく、2階現業室で職員が発電機を遠隔操作できる方法を検討した。

・対応状況

発電機操作用遠隔操作盤を2階現業室に設置した。自動起動しない場合に手動で切替をする場合など、2階現業室から遠隔で発電機の起動、非常用電源の切替をできるものとした。

(図4-6)



図4-6 遠隔操作盤

⑤ その他-コンセントの色分け

・検討内容

停電時、発電機で供給されているコンセントが職員には分からなくなる可能性があり、職員が使用するのに混乱が生じる可能性があった。

・対応状況

停電時電源が必要な負荷に対して、発電機からの供給により、停電時電源が使えるコンセントを赤色で区別することにより停電時、混乱が生じないよう配慮した。



図4-7 非常用コンセント

また、災害対策室に太陽光発電(容量5kW)の自立運転用コンセント2P15AE×2(一箇所)を設置し、コンセントを緑色で区別した。平常時は太陽光で発電された電力は施設内の負荷に分担されるが、停電時は自立運転となり、災害対策室内の下図のコンセントに供給

される。

(図4-8)



図4-8 自立運転コンセント

c)公衆通信網の途絶対策—通信・連絡網の確保

・検討内容

通信・連絡網の確保するため、公衆通信網の途絶対策としては、光ケーブルとメタルケーブルの2重引き込み対応が可能かどうかと、通信配線ルートの2重化の検討をした。

・対応状況

通信業者との協議で、庁舎へ通信回線を引き込む際は、光ケーブル、メタルケーブルの引き込み対応が可能であることがわかった。引き込み線の工事を行うのは気象台となったため、整備局工事では、引き込みができるよう、2重で配管対応をおこなった。加えて、災害時等の電柱の倒壊なども想定し、東西2ルート(別の電柱)で庁舎へ引き込めるよう配管対応を行った。

(図4-9)

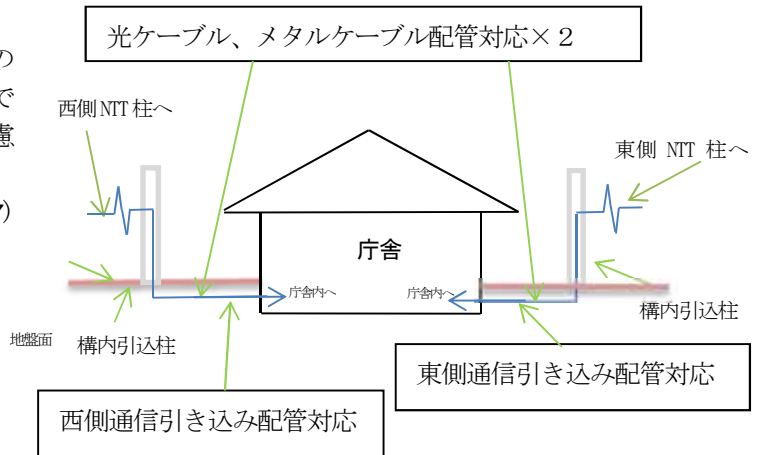


図4-9 屋外通信引き込み対応図

(2)その他の災害に対する課題

その他の災害に対する課題検討を以下に述べる。

(2-1)洪水浸水に対する課題検討・対応状況

a)設備諸室の浸水対策

洪水浸水対策をするため、以下の2つの検討をおこなった。

①ハザードマップ上での検討

・検討内容

大雨洪水対しては、奈良市洪水ハザードマップにて検討を行う。

・対応状況

ハザードマップによると、奈良市街を流れる川が50～100年に一回おこる大雨で堤防決壊したとしても、洪水浸水域にはっていない。よって、引き込み部の雨水侵入対策等をすればリスクは低減される。

②引き込み部の浸水対策

・検討内容

大雨洪水における引き込み部の浸水対策を検討した。

・対応状況

建物を2重壁とし、引き込み部は防水スリーブとし建物内部にプルボックスを設け、配管内浸水を水抜きパイプから2重壁内に落とすようにした。

(図4-10)

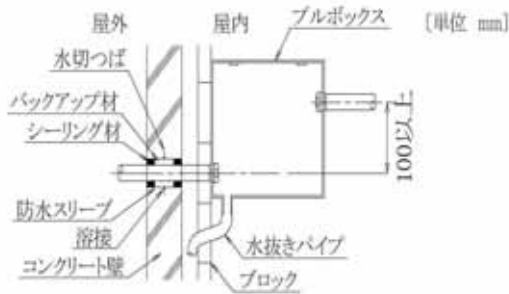


図4-10 引き込み部の浸水対策

(2-2)落雷に対する課題検討・対応状況

・避雷対策

避雷対策としては以下があげられる。

a)直撃雷による建物と機器の破壊対策—雷保護設備

・検討内容

落雷については通常、地域の環境条件や建物の高さなどで対策検討を行う。今回、建物の高さが20m以下なので、建築基準法上では雷保護設備は必要ない。しかし、建築物の構造・用途、建物内外の財産の重要度、落雷密度、環境条件を考慮した保護レベルはIVであり雷保護をする必要があると考えられること、及び、落雷からの機器保護の観点で、内部雷保護設備及び外部雷保護設備を採用することにした。保護レベルとは、雷保護システム(LPS)が雷の影響から被保護物を保護する確率を表しており、レベルをI、II、III、IVの4段階に設定している。レベルの値が低いほど、高度な雷保護システム設計をする必要がある。

・対応状況

建物を外部雷から保護するため測風塔上部に避雷突針の設置を行った。さらに庁舎内に設置するOA機器、観測機器については低圧用サージ保護デバイスを採用した。サージとは、雷などにより短時間で一時的に生じる、過渡的な異常高電圧、異常大電流であり、接続されている機器を破損することがある。サージ保護デバイスは、保護素子を用い、サージを大地に放流して電圧を抑制し機器を保護する物である。通信についても、通信用サージ保護デバイスを採用した。

(図4-11)



図4-11 避雷突針

b)誘導雷による機器破壊対策—耐雷トランス

・検討内容

誘導雷とは敷地周辺に落雷した場合、雷放電路に流れる電流による電磁場の乱れにより、構造物、送電線通信線などに雷サージ(過電圧、過電流)が発生する現象である。通常、誘導雷に対しても、落雷からの機器保護のためサージ保護デバイスを採用するが、加えて、当該施設は観測機器への悪影響を低減させるため、さらなる対策を検討した。

・対応状況

地下受変電設備に耐雷トランスを設置した。耐雷トランスとはサージ保護デバイスでサージを放流すると共に、トランス(変圧器)でサージを絶縁して機器を保護する物である。サージ保護デバイスに加えて耐雷トランスをも導入することで、保護性能を更に強化し、観測機器等の安定稼動・信頼性の向上を図った。

(図4-12)



図4-12 耐雷トランス

5. まとめ

災害時でも業務継続が可能な機能を確保するための課題検討とその対応について、奈良地方気象台の設計を通して、一つの流れを整理することができた。

本研究が今後の電気設備設計の参考になれば幸いである。

速効的な渋滞対策案の検討について

西田 拓二¹・今城 由貴²

¹近畿地方整備局 道路部 道路管理課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 京都国道事務所 (〒600-8234京都府京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動町808)

奈良県内の国道24号奈良市域、橿原市域では慢性的な混雑状況を呈しており、早急に渋滞対策を実施することが喫緊の課題であった。対策の早期実施を念頭に、時間・コストのかかる用地取得を行わず、既存の道路幅員の中で効果的な対策案を立案することにポイントを置き、「①現況調査の実施」「②渋滞要因の分析」「③効果的な速効対策案の検討」「④対策効果の検討」「⑤関係機関との協議、合意形成」のステップに沿って検討を実施した。その結果、速効対策案について関係機関との合意の上、早期の実現に向けて推進していくこととなった。

キーワード 渋滞 速効対策 合意形成

1. はじめに

国道24号は京都市を起点とし、奈良県奈良市、橿原市等を経由して和歌山市に至る一般国道で、奈良県北部平野部における南北方向の主要幹線道路として機能している。当道路は地域の骨格として重要な役割を担う一方で、並行する幹線道路網が十分ではなく、多くの交通が集中し混雑が常態化した状況となっている。

このような状況に対し、国道24号では高規格幹線道路である京奈和自動車道が整備中であり、2017年3月には和歌山側で阪和自動車道に接続するなど、全体の約3分の2の区間が開通したところである。奈良県内では、御所南IC～五條北IC間が2017年夏に開通予定であり、奈良市域（大和北道路）や橿原市域（大和御所道路の橿原北IC～橿原高田IC間）については事業が進められているが、整備にはまだ時間を要するものと見込まれる（図-1）。

H22（2010）道路交通センサスによる国道24号の交通量を図-2に示す。奈良市域の観測地点（柏木町交差点付近）の昼間12時間交通量は45,869台/12hと、県内の全観測地点の中で最も多く、非常に交通が集中する区間である。橿原市域（土橋町南交差点付近）では19,899台/12hと、2010年時点ではそれほど多くないが、京奈和道の橿原高田IC～御所南IC間の開通もあって2016年10月6日（木）の調査では29,615台/12hまで増加している。これらの区間では複数の主要渋滞箇所¹が連続しており、県内でも特に渋滞が著しい区間といえる。加えて2017年夏の御所南IC～五條北IC間の開通により、更なる交通の集中が見込まれることから、当区間の渋滞対策は喫緊の対応課題となっている。



図-1 京奈和自動車道の整備状況

2. 国道24号の速度低下状況

国道24号の奈良市域・橿原市域におけるボトルネックを把握するため、2015年度の民間プローブデータより旅行速度の整理を行った（図-3）。区間別の旅行速度を見ると、南北方向ともに奈良市域では三条大路二丁目、柏木町北、柏木町の各交差点、橿原市域では土橋町南、曲川町東、新堂ランプの各交差点で顕著な速度低下が生じている。そこで、これらの交差点を対象に渋滞対策を検討するものとした。



図-2 国道24号の交通量

3. 対策検討の考え方

(1) 対策立案の基本方針

国道24号に関しては、長期的には京奈和自動車道の整備による抜本的な改善が期待されるため、過大なコストを要する対策は非効率になってしまう恐れがある。一方で、直面する激しい渋滞への対処は喫緊の課題であり、早急に効果が発現できるものとする必要があった。これらを踏まえ、「現道の用地内で実施可能」で「低コストかつすぐ実施できる対策」を立案することを基本方針とし、少しでも効果が期待できるのであれば前向きに取り組むものとした。

(2) 対策立案の手順

国道24号奈良市域・橿原市域の渋滞対策立案は以下の手順に従って実施した。

a) 現況調査の実施

対象箇所における交通量等の調査は、一部を除いて2013年以降実施されておらず、やや古い情報となっていた。そのため、交通実態調査を実施し、平休の交差点方向別交通量、信号現示、渋滞長に関する最新のデータを把握した。

b) 渋滞要因の分析

渋滞長調査時に記録された渋滞要因について現地踏査

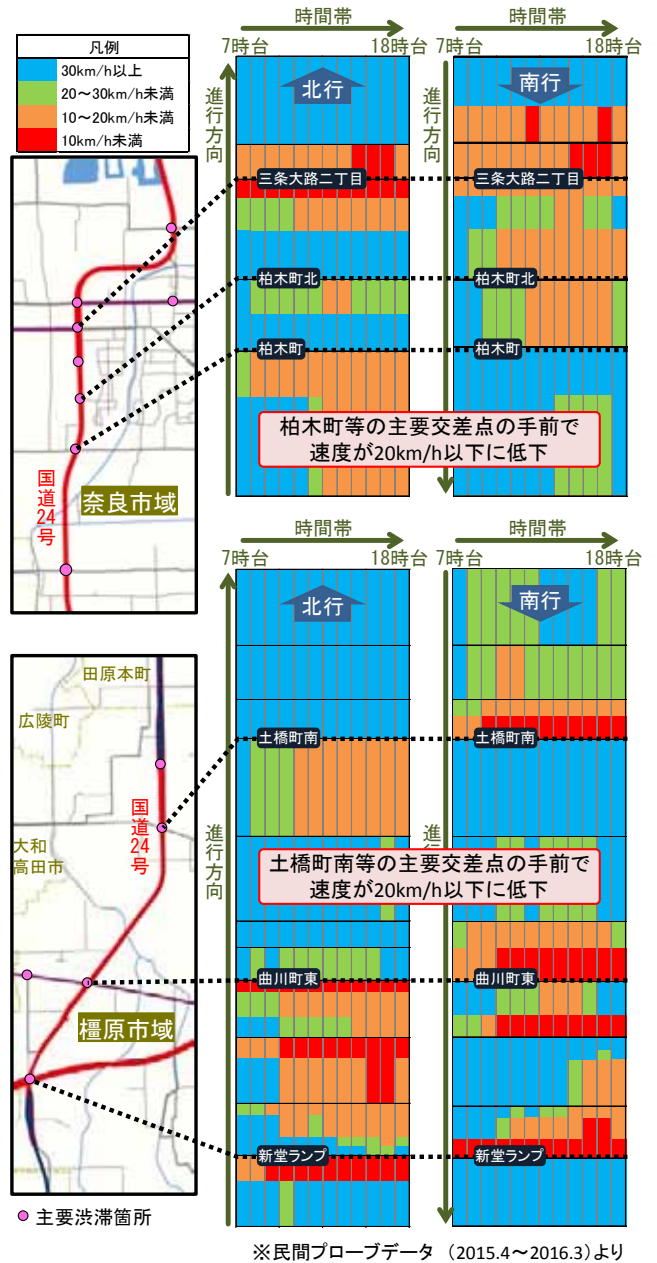


図-3 国道24号 (奈良市域・橿原市域) の休日時間帯別旅行速度の状況

時の状況と突き合わせて確認するとともに、隣接交差点からの先詰まりや信号の連動状況など、プローブデータや現地状況等から推察される要因を含めて整理した。

また、渋滞要因のうち右折車・左折車に起因するものなど、ETC2.0データより分析可能なものについては定量化を図り、対策の必要性を示す基礎資料とした。

c) 効果的な速効対策案の検討

渋滞要因を踏まえ、速効的な対策案の検討を行った。新たな用地買収を行わないことから、現道の幅員構成の見直しによる付加車線の設置、信号の見直しによるソフト的対策が主なものとなっている。

d) 対策効果の検討

対策案については交差点解析を実施し、需要率による

チェックを行った。また、以下のような対策については交通流マイクロシミュレーションにより、より詳細な対策効果の検討を行った。

- ・対策の実施により下流側交差点における先詰まりが生じ、効果が相殺される懸念があった箇所（柏木町北～柏木町交差点）
- ・国道24号に左折レーンを設置する案に関し、直進主体の交通状況に対して実際に効果が見込まれるか検証する必要があった箇所（柏木交差点・土橋町南交差点）

e) 関係機関との協議、合意形成

対策案は、幅員構成の変更により自動車交通だけでなく歩行空間やバス停位置などへの影響があるものであったため、警察やバス事業者等の関係機関と協議を行い、案の調整を行っている。また、国・県・市・警察により構成される奈良県渋滞対策協議会の地域別専門部会（奈良市域渋滞対策専門部会、橿原市域渋滞対策専門部会）に諮り、対策案を進めていく方向性について合意形成を行った（写真-1）。



写真-1 奈良市域渋滞対策専門部会の様子

4. 対策検討の実施例

(1) 三条大路2丁目交差点

三条大路2丁目交差点は国道24号奈良市域の交差点である（図-4）。当交差点は奈良高架橋の側道部に位置しており、国道24号の通過交通は高架橋を通行している。また、東西方向には三条通り（交差点東側は（主）奈良生駒線、西側は国道308号）が通っており、こちらも4車線の幹線道路である。

三条大路2丁目交差点の渋滞要因を整理したものを図-5に示す。幹線道路同士の交差点であるため、信号時間に対して各側の交通量が多く交通容量を超過し、信号時間の青時間内で交通が捌けないことが根本的な要因である。しかし、北行に関しては右折レーンからはみ出した右折待ち車両による直進車阻害、南行に関しては直進車の先詰まりが見られ、これらが渋滞に拍車をかけているものと見受けられた。南行の先詰まりに関しては下流（南側）の柏木町北交差点や柏

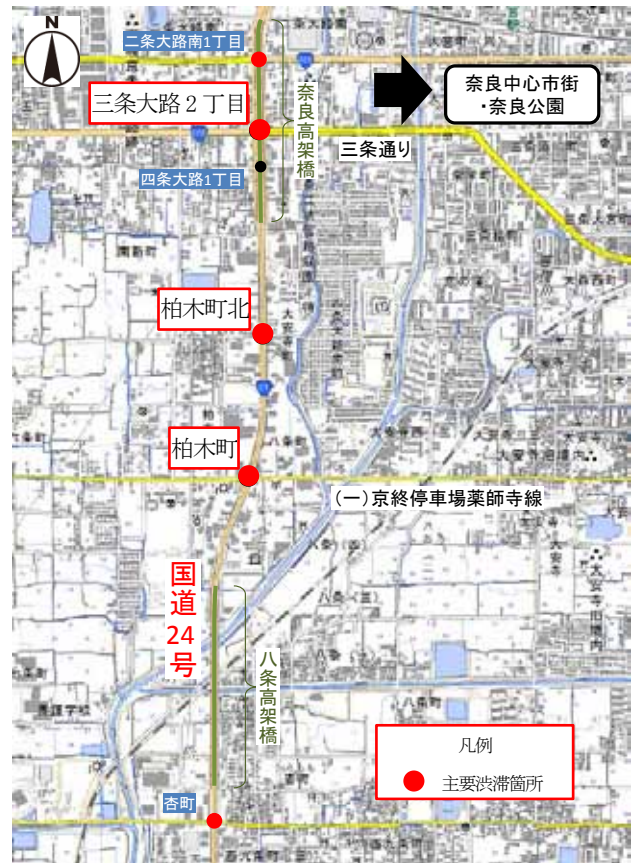


図-4 国道24号奈良市域の交差点位置図

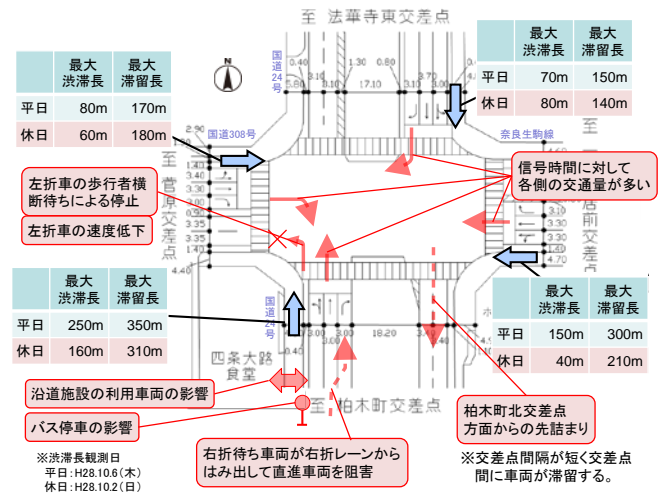


図-5 三条大路2丁目交差点の渋滞長・渋滞要因



写真-2 右折待ち車両による直進阻害

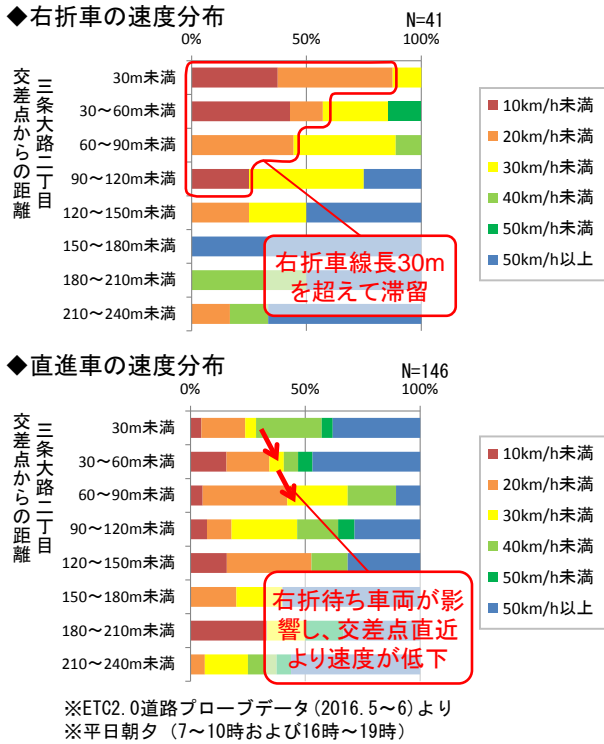


図-6 三条大路2丁目交差点北行(南側流入部)における直進車・右折車の速度分布

木町交差点の対策により改善を図るものとし、三条大路2丁目交差点では北行の右折待ち車両に着目することとした。なお、交差点各側の最大渋滞長を見ると、北行が平日で250mと最も長くなっている。

右折待ち車両による直進車阻害状況については、2通りの方で確認を行った。一つはETC2.0データの分析、もう一つはVTR調査の実施である。図-6は、ETC2.0データより三条大路2丁目交差点北行における右折車と直進車の速度分布を集計し比較したものである。グラフの上方が交差点直近で、下に行くほど交差点から離れた箇所の速度分布を示している。右折車は交差点直近ほど速度が低く、交差点から離れていくほど速度が高くなっている。右折車線の滞留長である30m以上離れた箇所でも速度が低い車両が見られ、右折レーンをはみ出して停止しているものと考えられる。更に直進車の速度分布を見ると、交差点直近(30m未満)より、30~90m離れた箇所の速度が遅くなっており、右折待ち車両の影響によって速度低下していることを示唆している。VTR調査の結果は写真-2で示したとおりであり、実際に右折待ち車両が直進車を阻害している状況が確認された。

三条大路2丁目交差点の渋滞対策は、右折滞留スペースの確保することにより、右折車両のはみ出しを回避し北行交通の円滑化を図ることとした。しかし、高架橋の橋脚が支障するため、右折レーンを延長することは困難であった。そのため、奈良高架橋の高架下スペースを活用し、右折車線を2車線に増設するものとした(図-7)。

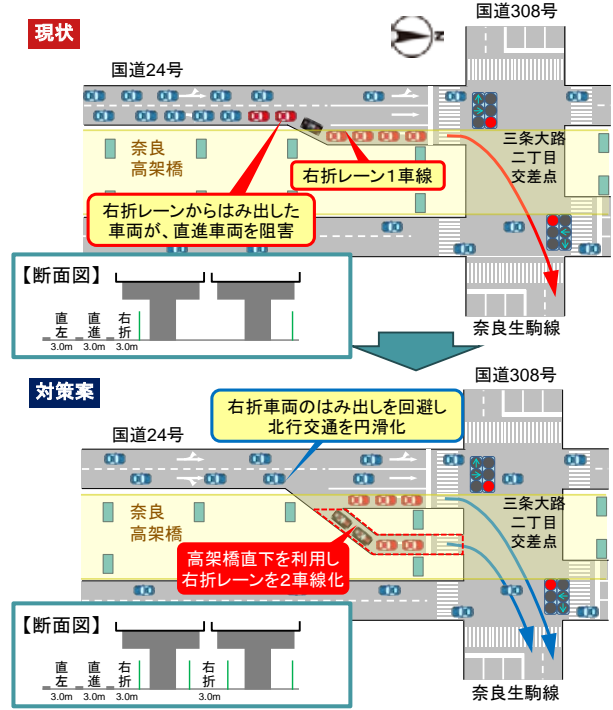


図-7 三条大路2丁目交差点の渋滞対策案

(2) 柏木町北・柏木町交差点

柏木町北・柏木町交差点も国道24号奈良市域の交差点であり、前者は市道と、後者は一般県道と交差している(図-4)。また、奈良高架橋と八条高架橋との間に位置しており、交通量が特に集中する区間となっている。

柏木町交差点の渋滞要因を整理したものを図-8に示す。こちらも幹線道路同士の交差点であり、各側の交通量が交通容量を超過し信号時間の青時間内で交通が捌けないことが根本的な要因である。

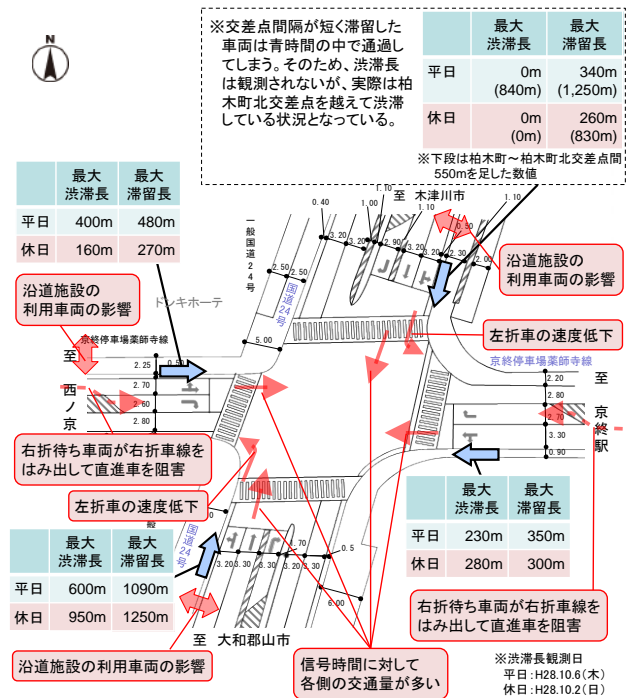


図-8 柏木町交差点の渋滞長・渋滞要因

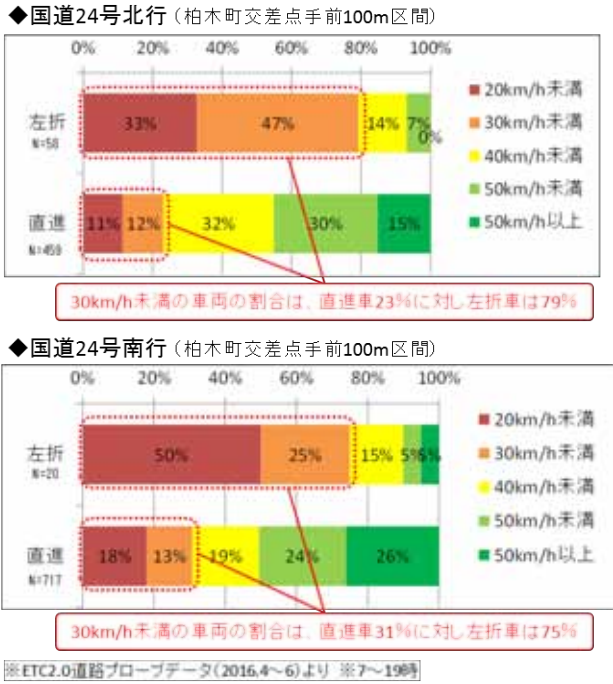


図-9 柏木町交差点（北行・南行）の左折車・直進車の速度分布

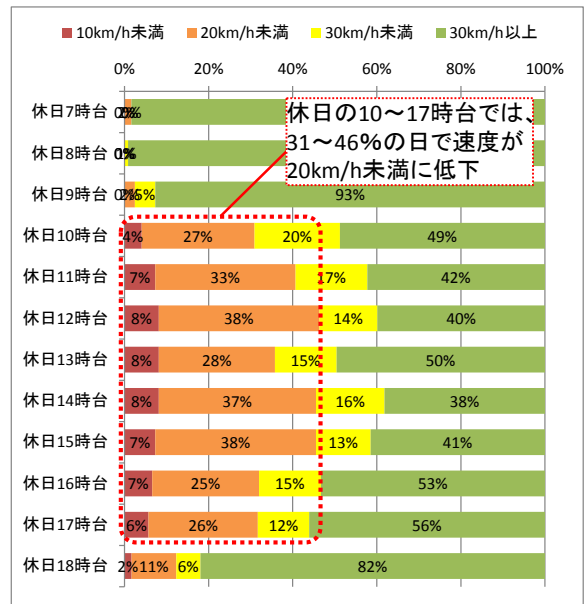
特に国道24号南北方向の交通量が多く、信号時間をぎりぎりまで南北方向に割り振っても渋滞が生じる状況となっている（東西方向の歩行者横断時間の制約のため、これ以上南北方向の青時間割合を増やせない）。一方、柏木町北交差点は交差道路の交通量が少なく、柏木町交差点と比較すると交通処理の余裕がある交差点となっている。柏木町北交差点では南行の速度低下が顕著である（図-3）が、柏木町交差点からの先詰まりの影響が大きいものと考えられる。

柏木町交差点では南北方向の直進交通が卓越しており（北行・南行ともに直進が約9割）、これをいかに円滑化するかが課題であった。また、東西方向でも渋滞が生じていること、すでに南北方向の青時間が限界まで確保されていることから、信号時間の調整による改善は見込めない状況であった。そこで、以下の2点を対策の方向性として検討を行った。

- ・左折車を直進車と分離して直進車の円滑化を図る
- ・奈良高架橋～八条高架橋間の国道24号部分拡幅

ETC2.0データを用いて、柏木町交差点における左折車・直進車別の速度分布を比較したものを図-9に示す。左折車の方が明らかに低速であり、連続して車両が走行する混雑時には左折車が直進車の阻害要因となっているものと考えられる。

部分拡幅は現況で片側2車線となっている国道24号を、現道敷地内の幅員構成見直しにより3車線に拡幅するものであるが、用地の制約から両側を拡幅することは困難であった。そこで、以下の点を考慮し南行を3車線化するものとした。



※民間プローブデータ(2015.4~2016.3)より

図-10 2015年度の休日（123日）における奈良高架橋南行き（高架部）の時間帯別平均旅行速度の分布

- ・国道24号南行では柏木町交差点からの渋滞が延伸し、上流（北側）の渋滞箇所（柏木町北交差点・三条大路2丁目交差点）の交通処理に影響している
 - ・奈良高架橋高架部にも影響が及んでおり、平日7時台や休日昼間にはほぼ2日に1回の頻度で奈良高架橋南行の平均旅行速度が20km/h未満に低下（図-10）
- 以上より柏木町交差点の渋滞対策案は、暫定案として南北方向に左折レーンを設置し（図-11）、その後南行を3車線化するものとした（図-12）。柏木町交差点について

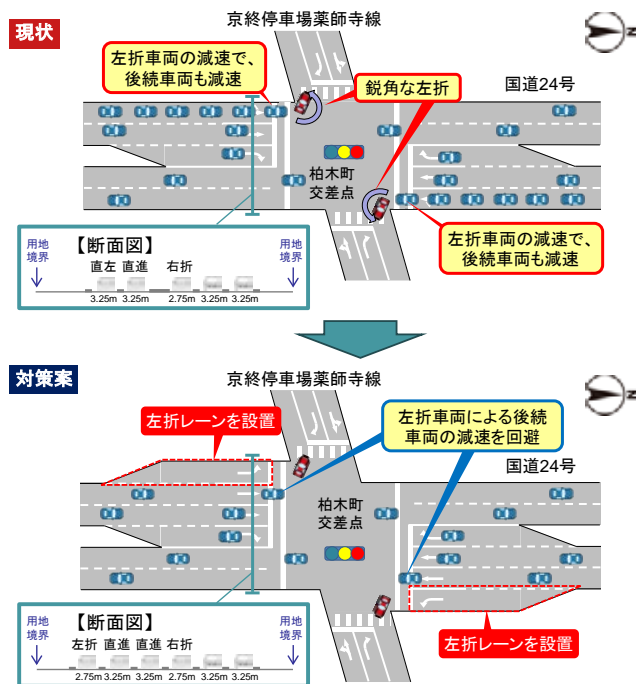


図-11 柏木町交差点の渋滞対策案（1）

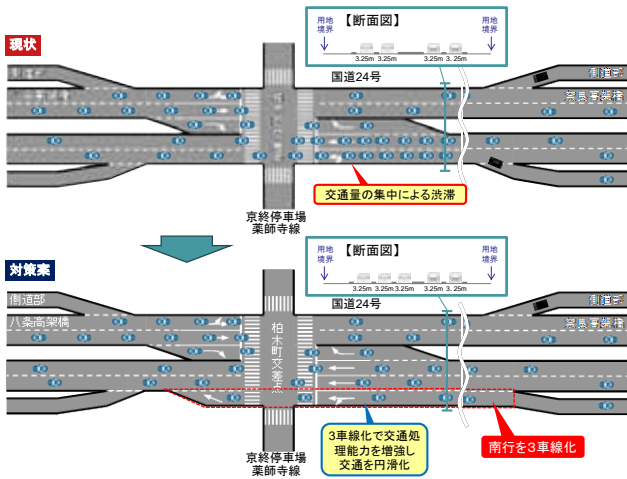


図-12 柏木町交差点の渋滞対策案 (2)

では、奈良県による対策案として東西方向の右折レーン2車線化も計画されている。

対策案の効果や影響を検証するため、交通流シミュレーションを実施した(図-13)。なお、南行3車線化については柏木町交差点の流れが良くなる一方で、南側(下流)の杏町交差点での先詰まりが懸念されたため、杏町交差点までを含めた範囲で検討を行った。結果は以下の通りであり、一定の効果があることが認められた。

- ・南行では完成形(奈良県の対策含む)の場合、ピーク時(7:30~7:45平均)の奈良高架橋~杏町交差点間のトータルの所要時間が現況の907秒から756秒へと約150秒(2割)短縮。
- ・北行では、ピーク時(8:15~8:30)の杏町~三条大路二丁目交差点間のトータルの所要時間が現況の476秒から433秒へと約40秒(1割)短縮。



図-13 交通流シミュレーションの実施状況

5. 国道24号奈良市域、橿原市域の速効対策方針

対策検討結果をもとに、奈良市域渋滞対策専門部会(2017年1月)、橿原市域渋滞対策専門部会(2016年12月)において関係機関との協議を行い、表-1に示す内容を渋滞の速効対策方針として、実施に向けて取り組んでいくこととなった。なお、本方針については2017年2月に公表を行っている。

表-1 国道24号奈良市域、橿原市域の速効対策方針

	交差点	速効対策方針
奈良市域	三条大路2丁目交差点	・(北行)右折レーン2車線化
	柏木町北交差点	・(南行)3車線化
	柏木町交差点	・(南行)3車線化 ・(南北方向)左折レーン設置 ・(東西方向)右折レーン2車線化【県】
橿原市域	土橋町南交差点	・(南行)左折レーン設置 ・(東西)左折レーン設置【県】
	曲川町東交差点	・信号連動の調整(ソフト対策)【警察】
	新堂ランプ交差点	・(南行)右折レーン延伸 ・信号青時間の調整(ソフト対策)【警察】
	葛本町交差点	・(西行)左折レーン設置【県】

6. とりまとめ

奈良県内の国道24号では慢性的な混雑状況を呈している中で、京奈和自動車道の部分開通(御所南IC~五條北IC)が差し迫っており、早急に渋滞対策を実施することが喫緊の課題であった。対策を早期に実現するためには、時間・コストのかかる用地取得を行わず、既存の道路幅員の中で効果的な対策案を立案することにポイントを置くとともに、対策検討に関係機関とともに行うことで合意を図り、スムーズな対策実施につなげていくよう努めた。

個別箇所の検討に際しては、軽微な対策でも少しでも効果的なものとなるよう、最新のデータを把握するための現況調査を実施するとともに、近年データ及び利用例の蓄積が進んでいるビッグデータを活用した分析を行い、渋滞要因の分析及び対策立案を行った。

今後は対策の早期実現にむけて詳細設計や細部条件の関係機関との協議・調整、工事を実施するとともに、実施後のモニタリングを行っていく必要がある。

本稿では、検討の手順及び内容について事例紹介を行ったが、速効的な渋滞対策案を検討する上での参考として頂ければ幸いである。

なお、本論文は筆者が奈良国道事務所調査課に在籍した際に取り組んだ内容をもとに作成したものである。

謝辞: 本論文の対象となった渋滞対策は、奈良県、奈良県警察本部をはじめ、奈良県渋滞対策協議会の専門部会メンバーの助言、協力を受けて策定し、公表に至ったものである。また、本論文の作成にあたり(株)ニュージェックの方々から資料の提供や助言など様々な面で協力をして頂いた。皆様の多大な協力に対し、ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 奈良県渋滞対策協議会:「地域の主要渋滞箇所」の公表について(2013.1)

主要地方道浜丹後線 新宇川橋（仮称）の維持管理に関する工夫について

大橋 健一

京都府丹後土木事務所 道路計画室 (〒626-0044 京都府宮津市宇吉原2586-2)

京都府では府政運営の指針である「明日の京都」に基づき、丹後半島の各観光地を結ぶアクセス道路の整備を進めている。事業の一つである浜丹後線上野平バイパスでは新設橋梁を計画しており、海岸部に位置することから冬季の風浪等の影響、凍結防止剤散布等による塩害の影響など、厳しい気象条件が予測される。このため、維持管理を十分に考慮した構造・仕様を設計に反映しており、今回はその維持管理の工夫として桁端部の構造、防食法、点検計画等について報告するものである。

キーワード 維持管理の工夫, 金属溶射, 点検計画

1. はじめに

「明日の京都」とは、だれもがしがあわせを実感できる希望の京都をめざして策定している府政運営の指針です。また、北から南までの豊かな自然や長い歴史に磨かれた京都の強みを活かし、「海」、「森」、「お茶」をテーマに「3つの京都プロジェクト」を推進しています。

丹後地域には伊根の舟屋や経ヶ岬のほか、海水浴場・温泉など魅力的な観光資源が多数分布しているため、上記の計画に基づき、各観光地を結ぶアクセス道路の整備を進めているところです。

今回は、各事業の紹介とともに、事業の一つである上野平バイパスの事業概要、二級河川宇川に新しく架ける橋梁の維持管理に関する工夫について紹介させていただきます。



図-1 明日の京都マップ



図-2 丹後半島の各観光地



図-3 主要事業の位置図

2. 主な事業の概要

(1) 主な事業の概要

a) 間人大宮線 丹後工区

第2次緊急輸送道路であるものの、線形不良で道路幅員も狭く、竹野川増水時には冠水区間が発生する状況であることから、バイパス道路の整備を行っている。

(図-4, 5, 6参照)



図-4 丹後弥栄道路の位置図

b) 浜丹後線 宮バイパス

大型車との離合困難な幅員狭小であり、また線形不良、歩道未整備となっている区間であることから、歩行者及び自動車の安全性を確保し、地域内の通過交通を排除するとともに、観光拠点間等の連携強化を促進している。

(図-7, 8, 9参照)



図-7 宮バイパスの位置図



図-5 現道の状況



図-8 現道の状況

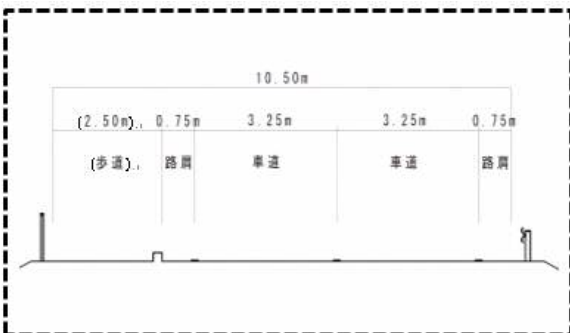


図-6 計画横断面図

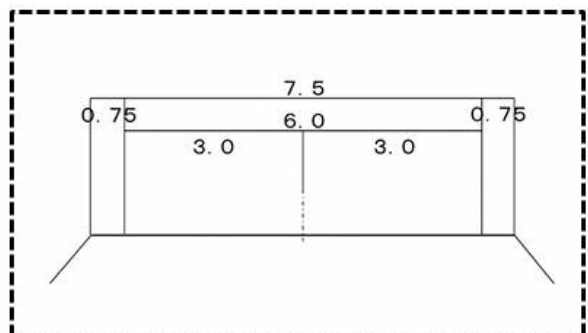


図-9 計画横断面図

c) 浜丹後線 上野平バイパス

第2次緊急輸送道路に指定されているが、人家が連たんし幅員狭小で、急カーブ・急勾配区間が連続していることから、バイパス道路を整備することにより、現道部における歩行者の通行の安全を図るとともに、通過車両の通行の安全性及び走行性の向上を図っている。

(図-10, 11, 12参照)



図-10 上野平バイパスの位置図



図-11 現道の状況

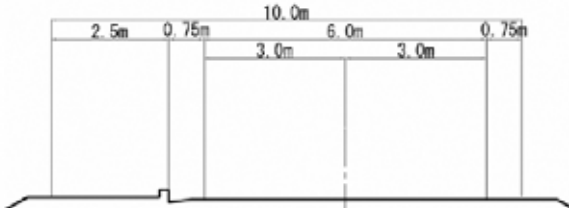


図-12 計画横断面図

3. (仮称) 新宇川橋の概要について

(1) 架橋位置

当該橋梁は、海岸（河口）部より200m程度を渡河する位置にあり、冬期の風浪等の影響、凍結防止剤散布等による塩害の影響など、厳しい気象条件が予測される。このため、維持管理（塩害対策、凍結防止対策等）を十分に考慮した構造・仕様を設計に反映していく。

また、道示IV6.2における地域区分Cに位置し、海岸から約200mの距離にあるため、対策区分Ⅲに該当する。(図-13, 14参照)

(2) 橋梁形式選定

[採用形式]

- ・鋼3径間連続細幅箱桁橋 (図-15, 16, 17参照)
(L=115m, W=11.0m, 鋼重=242t)

[形式選定]

- ・PCの直線桁では、R=300により、張出が大きくなり施工が困難
- ・軟弱地盤が広がる本地域において耐震性の面を勘案
- ・細幅桁は部材数も少なく工数が減り、比較的安価
- ・曲線橋であり、剛性面でねじりも有利
- ・概算工事費、維持費等を含めて判断

[比較案(他5案)]

- ①非合成鈹桁橋、②鋼非合成箱桁橋、
- ③PC連結コンボ橋、④PC連結ボステンT桁橋、
- ⑤PC連続箱桁橋



図-13 海岸からの位置図

地域区分	地域	海岸線からの距離	塩害の影響を及ぼす可能性	影響度
A	沖積浜	海上部及び海岸線から100mまで	S	影響が激しい
		100mを超えて300mまで	I	影響を受ける
		上記以外の距離	II	影響を受ける
B	表-6.2.3 に示す地域	海上部及び海岸線から100mまで	S	影響が激しい
		100mを超えて300mまで	I	影響を受ける
		300mを超えて500mまで	II	影響を受ける
C	上記以外の地域	海上部及び海岸線から20mまで	S	影響が激しい
		20mを超えて50mまで	I	影響を受ける
		50mを超えて100mまで	II	影響を受ける

表-14 塩害の影響地域区分



図-15 新宇川橋平面図

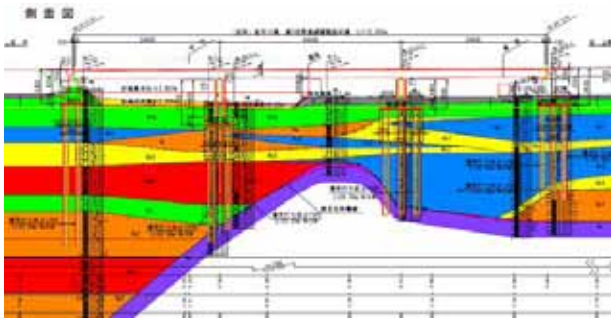


図-16 新宇川橋縦断面図

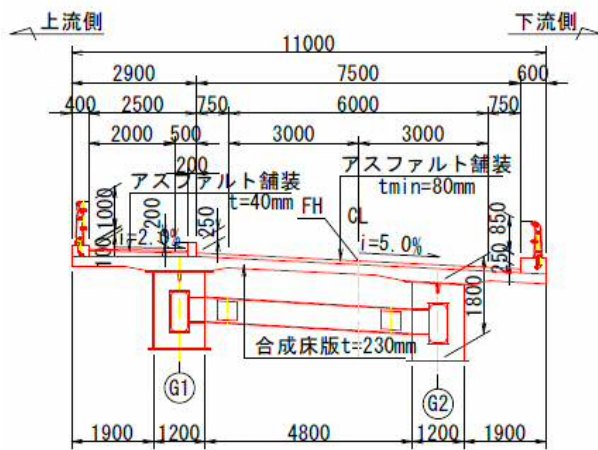


図-17 新宇川橋横断面図

4. 維持管理の工夫について

(1) 各種指針等の改定について

橋梁の長寿命化については、道路橋示方書の平成24年2月の改定から、「設計段階から維持管理を考慮して橋の設計を行うことを基本的な考えとする」と記載されていることを踏まえ、各地方整備局でも設計便覧、設計要領等で橋梁の細部構造についての見直しが行われている。

- ・道路橋示方書 平成24年2月改定
- ・近畿地方整備局 設計便覧 平成24年4月改定
- ・設計便覧に係る京都府の運用について 平成27年8月改定

<本設計での参考資料>

- ・橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き(案) (中部地方整備局道路部) 平成25年3月作成
- ・新設橋梁の設計時留意点(案) (北陸地方整備局道路部) 平成26年3月作成

(2) 宇川橋における工夫について

a) 桁端部の塗装

伸縮装置からの漏水等による腐食しやすい桁端部、表面の凹凸形状によって湿潤状態が長く続き腐食しやすい添接部や主桁の下端について、塗装が劣化しやすい環境にあるため、塗装の耐久性向上を目的に、塗装を増塗りする。(図-18参照)

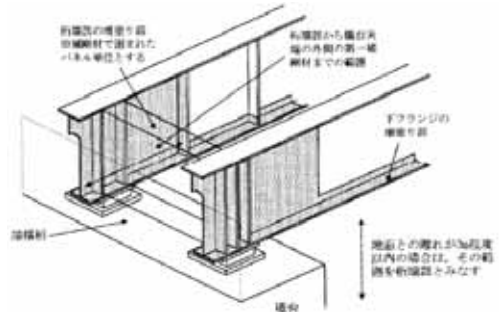


図-18 桁端部の増塗範囲

b) パラペット形状

パラペット形状は、維持管理の作業空間を確保するため、桁端部からパラペット前面に750mmを確保する方針とする。(図-19参照)

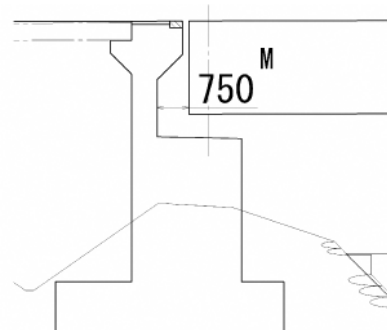


図-19 桁端部の構造

c) 桁端部構造

縦断勾配が低いA1橋台の桁端部では、支承部に漏水がかからないように主桁下フランジに止水板を設置する方針とする。(図-20参照)

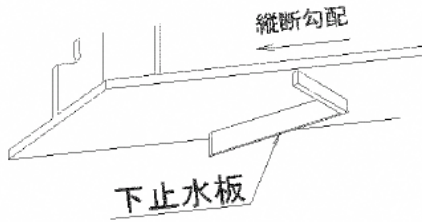


図-20 桁端部の止水板

d) 橋座面保護

伸縮装置の非排水構造が損傷した場合に影響を受けやすい橋座周辺部は、コンクリート表面保護のために表面含浸材を塗布する。(図-21参照)

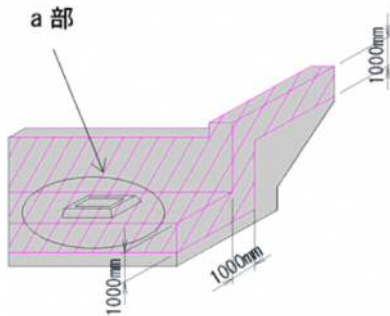


図-21 表面含浸材の塗布範囲

e) 伸縮装置

伸縮装置からの漏水の影響により、主桁端部付近の部材の損傷を発生させている事例が多いことから、伸縮装置の漏水対策を施す。(図-22参照)

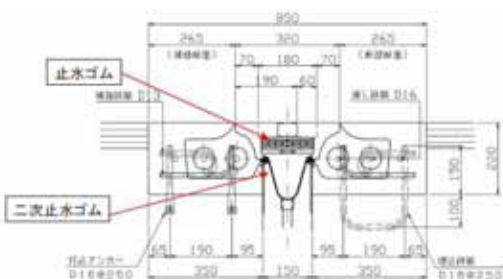


図-22 伸縮装置の二重防水

f) 点検計画

橋梁点検車として、BT-200 およびBT-400 を対象車両とする。BT-400 の場合には、3m 程度の離隔を確保して点検作業が可能である。一方、BT-200 では、歩道側にアウトリガーを配置して点検作業が考えられる。

歩道幅員+歩道地覆幅=2.9m であることから、歩道側の車道端に橋梁点検車を据えて、点検作業は可能と判断できるが、汎用規格であるBT200に対してBT400は賃料が非常に高いことから、BT200が利用可能な構造となるよう車両防護柵を選定している。

(図-23, 24, 25参照)

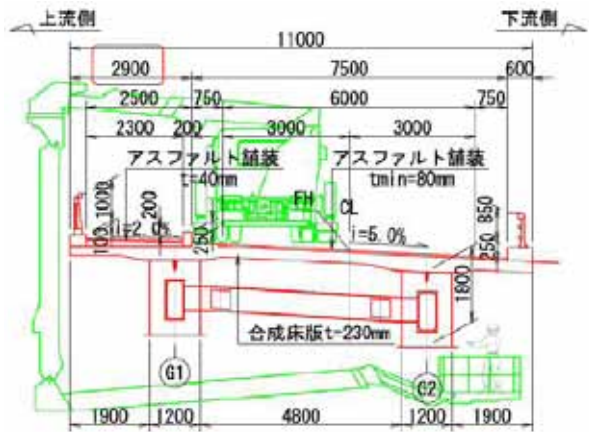


図-23 BT-400での作業可否

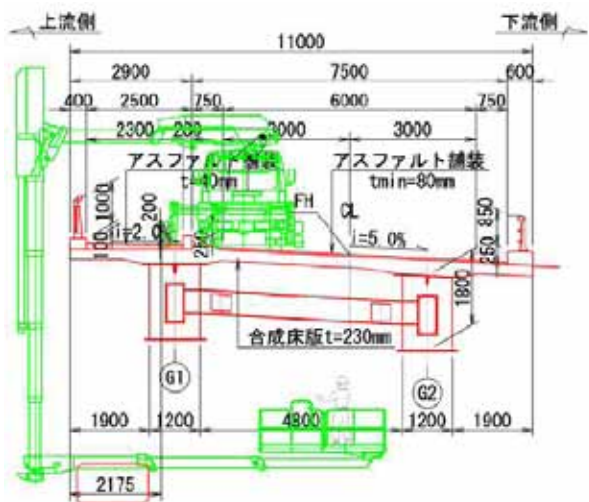


図-24 BT-200での作業可否

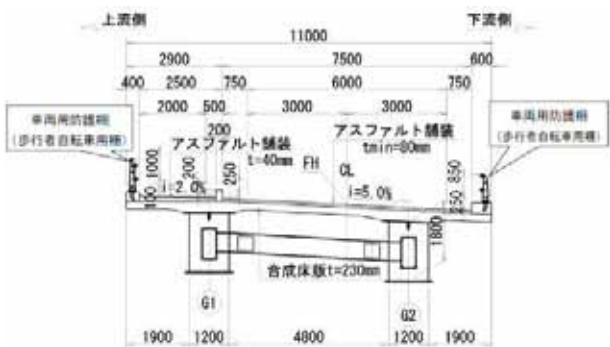


図-25 防護柵の設置方針

(3) 防食法の金属溶射採用について

a) 防食法の選定

塗装と金属溶射について、ライフサイクルコスト(LCC)の比較を行い最適な防食法を選定する。比較検討案は、塗装と金属溶射にそれぞれ景観への配慮を加えた表に示す4案とする。(表-26参照)

ここで、景観維持と防食維持の状態は、技術短信No.10 鋼橋のライフサイクルコスト(日本橋梁建設協会, 2009.10)より以下のとおりとする。

- ・景観維持：塗装が防食機能を維持している状態で塗替えをする。
- ・防食維持：塗膜が防食機能を失い錆発生が10～15%になった時点で塗替えをする。

なお、塗装の塗装系は、鋼道路橋防食便覧より以下のとおりとする。

- ・一般外面塗装系には、架橋地点の厳しい腐食環境に十分耐えられる防食性能を有していると同時に美観・景観性をできるだけ長期間保つために耐候性の良好な上塗塗料を用いたC-5塗装系を適用する。
- ・塗替え塗装系には、旧塗膜がC 塗装系の塗替えは、防食下地が劣化していない状態が多いことから、素地調整程度4種で下塗り・中塗り・上塗りを行う Rc-IVを適用する。
- ・溶射上に塗布する塗装は、フッ素樹脂塗装を施す方針とし、塗替え塗装は、Rc-IVを適用する。

(表-27参照)

b) 比較結果

比較結果を表に示す。(表-28, 図-29参照)

これより、初期費用は高いがLCCでは「第2案 塗装【防食維持】」と同程度となり、塗装案と比較して、30年毎に約6ヶ月を要する塗替え作業を省略できる「第4案 溶射+塗装【防食維持】」を選定する。

5. おわりに

京都府では平成29年4月30日に新名神高速道路 城陽JCT・IC～八幡京田辺JCT・ICが開通し、京都府内の南北に位置する木津川市から京丹後市まで約140kmが高速道路でつながりました。

高速道路の整備により、舞鶴港と京都市内を結ぶ観光ツアーも増加しており、丹後地域にもインバウンド観光の増加が期待されるようです。

地域の安心・安全に資する道路整備について、今後も維持管理に配慮しながら円滑に事業進捗を図っていきたいと思いますので、関係者の皆様には引き続きご指導よろしくお願ひします。

比較案	防食法	塗装系		
		新設塗装	塗替え塗装	塗替えサイクル
第1案	塗装【景観維持】	C-5	Rc-IV	20年
第2案	塗装【防食維持】	C-5		30年
第3案	溶射+塗装【景観維持】	ふっ素		20年
第4案	溶射+塗装【防食維持】	ふっ素		30年

表-26 比較検討案

工程	作業内容
素地調整	ブラスト処理 ISO Sa 2 1/2以上
	表面粗さ Rz ₂₅ 50μm以上 (又は、粗面化処理 Rz ₂₅ 50μm以上)
金属溶射	最小皮膜厚さ 100μm以上
	封孔処理 ニボキシ樹脂塗料下塗などを用いる。
塗 装	ニボキシ樹脂下塗塗料 120μm
	ふっ素樹脂塗料中塗 30μm
適用箇所	ふっ素樹脂塗料上塗 25μm
	腐蝕調和のため着色する必要がある場合、海水飛沫帯に該当する場所、塩分が堆積する場所。
備 考	色鮮付与が可能 耐塩性、耐薬品性の向上が可能

表-27 溶射+塗装の仕様

比較案	防食系	単価 [円/m ²]	耐久年数 [年]	LCC(100年) [百万円]	
				初期費用	LCC
第1案 塗装【景観維持】	新設初期 C-5	8,100	20	初期費用 23.8	LCC 91.0
	塗替え Rc-IV	5,700	20	初期費用 23.8	LCC 74.2
第2案 塗装【防食維持】	新設初期 C-5	8,100	30	初期費用 23.8	LCC 125.7
	塗替え Rc-IV	5,700	30	初期費用 58.6	LCC 75.4
第3案 溶射+塗装【景観維持】	新設初期 溶射+塗装	19,900	20	初期費用 58.6	LCC 125.7
	塗替え Rc-IV	5,700	20	初期費用 58.6	LCC 75.4
第4案 溶射+塗装【防食維持】	新設初期 溶射+塗装	19,900	30	初期費用 58.6	LCC 75.4
	塗替え Rc-IV	5,700	30	初期費用 58.6	LCC 75.4

表-28 防食法のLCC比較

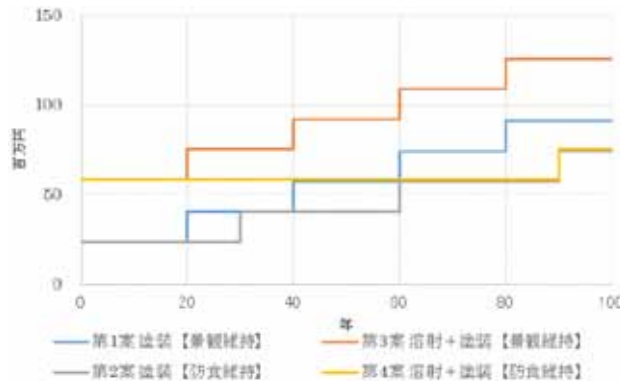


図-29 防食法のLCC比較図

山間部の地すべり地形に配慮した ルート決定手法について

神谷 毅¹・森 俊彦²

¹近畿地方整備局 奈良国道事務所 計画課 (〒630-8115奈良県奈良市大宮町3-5-11)

²近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 工務第二課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

急峻な山間地域では、近年のゲリラ豪雨等の異常気象とも相まって、潜在的な地すべりや深層崩壊など土砂災害発生リスクの高い箇所が多い。

道路計画においてルートを検討する場合には事前にこれらの土砂災害リスクを把握していなければ、トンネル掘削時に地すべりを誘発し、事後の調査と対策に多大な費用と工期を費やすことになりかねない。また、供用後においても土砂災害による円滑な交通確保に支障をきたしたり、維持管理費の増大を招く恐れがある。

本稿では、2011年の紀伊半島大水害により深層崩壊が多発した山間地域に計画された長殿道路のルートの決定にあたり調査・計画段階でのプロセス事例を報告するものである。

キーワード 地すべり, 防災検討会, ルート決定

1. はじめに

長殿道路を含む一般国道168号五條新宮道路は和歌山県新宮市と奈良県五條市を結ぶ延長約130kmの地域高規格道路である。「紀伊半島アンカールート」の一部を形成し、高規格幹線道路の空白地帯である紀伊半島内陸部を南北に縦貫する極めて重要な幹線道路である。住民の生活と安全を守る「いのちの道」として、防災面のみならず、人と物の流れを活発化し、地域の活性化を図るうえで必要不可欠な道路であるが、現在も未改良区間が多く有り、国と県で早期完成に向けて整備中である。

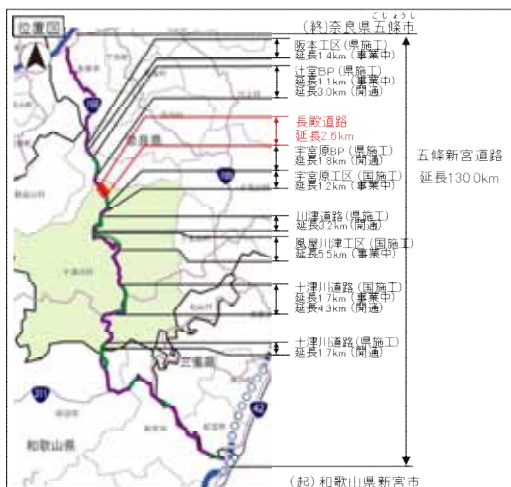


図-1 五條新宮道路 (位置図)

長殿道路は、通行止めによる迂回の回避等を目的に、地形条件が厳しく整備に高度な技術を要する区間であることから国土交通省権限代行事業として、整備を進めている延長2.6kmの道路である。

2. 地形・地質概要

(1) 地形

当該地域の東側には、紀伊山地中央を南北に走る大峰山系が、西側には護摩壇山・伯母子岳を中心とした山系がそびえる。紀伊山地は第四紀地殻変動による隆起帯に当たり、山地の隆起に伴い、大峰山系と護摩壇山・伯母子岳山系の間を南流する十津川は、穿入蛇行をして深い渓谷を形成している。

十津川流域の山地では、1889年の明治十津川大水害及び2011年の紀伊半島大水害で、河川閉塞を伴う深層破壊が多発した。同地域では、深層崩壊跡地の他、地すべり地形や岩盤クリープ地形といった斜面変動地形が認められる。また、将来的に深層崩壊が発生しうる斜面にしばしば認められる微地形(山頂緩斜面、多重山稜、線上凹地、円弧状クラック)も多く見られ、斜面変動のポテンシャルが高い地域であることが想定される。

(2) 地質

当該地域の山地を構成している基盤岩は白亜紀の四万十帯日高川層群美山層と呼ばれる砂岩・頁岩・チャートなどの堆積岩からなる。地質構造は、走行が概ね、北へ45°～70°程度で傾斜する。従って、北向きの斜面では流れ盤となってくる。被覆層は、崩積土が広く分布しており、谷部及び凹状の斜面ではやや厚く分布している。



図-2 標高区分図¹⁾

- ・落石崩土発生履歴箇所 : 2箇所 (2006～2015年)
- ・狭隘な幅員 (W<5.5m) : 18区間
- ・急カーブ (R<50m) : 36箇所

また、紀伊半島大水害で甚大な被害が生じており、現国道沿いにおいてテラ谷、濁谷で大規模な土砂崩れが発生し、国道168号が崩壊した。また、長殿谷川及び赤谷で河道閉塞が起こり、大規模な土砂ダムが発生し、周辺地区への長期間の避難指示など甚大な影響が生じた。



図-4 紀伊半島大水害 長殿地区の被害状況

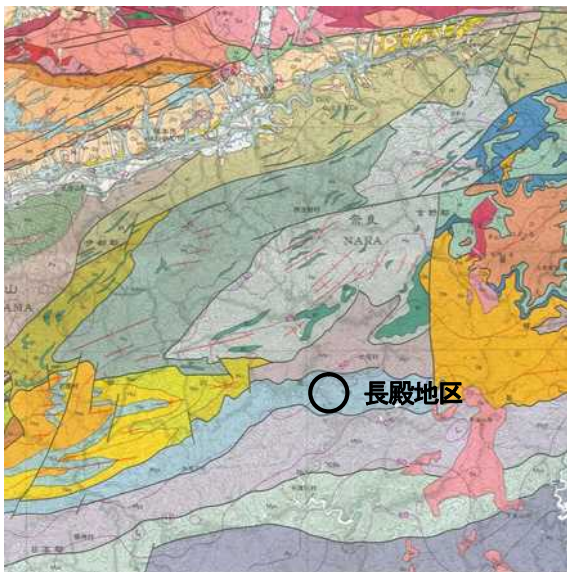


図-3 地質図²⁾

4. ルート設定検討の経緯

奈良県では、2004年8月に発生した国道168号宇井地区地すべりの発生を契機として、国道168号防災検討会を立ち上げ、道路防災事業を推進している。抽出した不安定斜面で、地すべりの可能性がある斜面については、防災検討会で現地を確認し、現状の安定度、今後の調査方針等について提言を頂いている。

長殿道路のルート検討は、2010年より開始され、最終のルート決定は2016年までと約7年に渡り実施されているが、その間防災検討会において防災上の観点から提言を頂きながら、必要な地質調査を行い進めてきたところである。

(1) 紀伊半島大水害前のルート検討 (2010年以前)

整備効果が早期に発現できるように、順次施工、供用ができる現道拡幅を基本ルートとして、長殿地区の不安定斜面、長殿発電所の重要施設をコントロールとしてルートの比較検討を進めていた。

防災検討会からは、地元への影響、利便性を考慮すること及び不安定斜面について橋梁への影響や右岸側斜面の安定性についても調査し比較検討するよう指摘を受けているところであった。

- ルート1 : 左岸BP+現道拡幅
- ルート2 : 右岸BP (発電所) + 現道拡幅
- ルート3 : 右岸BP (発電所・集落) + 現道拡幅

3. 国道168号 (長殿地区) の交通上の課題

国道168号の長殿地区は、大半が災害に脆弱な区間である。

- ・防災点検要対策箇所 : 7箇所

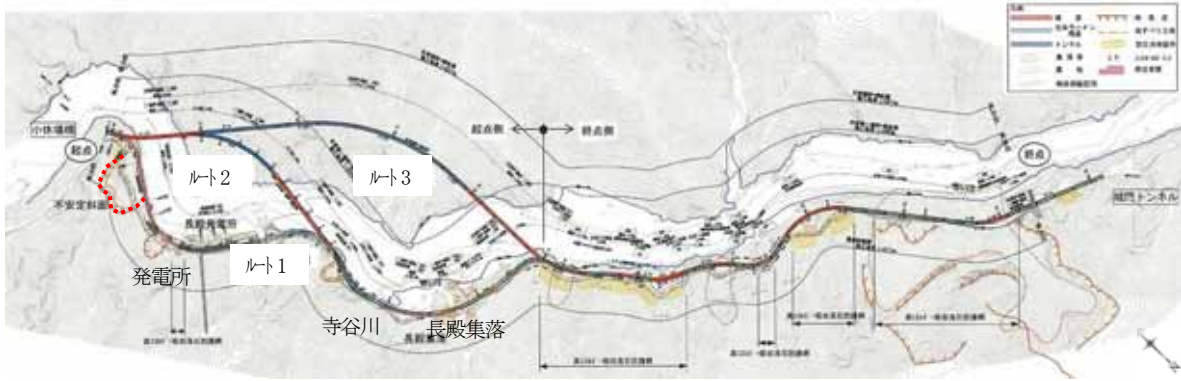


図-5 ルート検討図（紀伊半島大水害前）

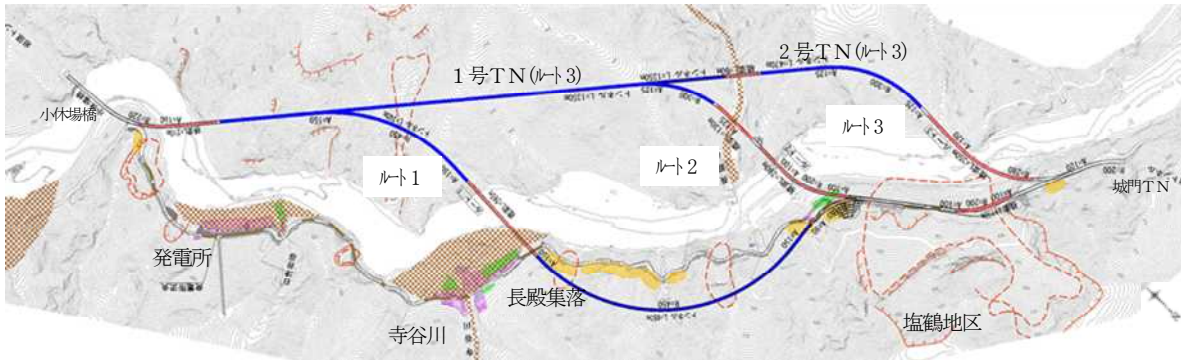


図-6 ルート検討図（紀伊半島大水害後）

(2) 紀伊半島大水害後のルート検討(2011年以降)

紀伊半島大水害によって、周辺に多数の崩壊、土石流が発生し、国道168号が通行不能となったことから、奈良県南部の主要幹線道路である重要性を鑑み、橋梁とトンネルを主体とした極力土砂災害のリスクを回避する方針に転換され、以下の条件を満たすルートを検討することとなった。

1. 被災した寺谷川及び長殿発電所を回避
2. トンネル坑口については、斜面傾斜が比較的緩い斜面を選定
3. 十津川をできる限り直角にかつ短く渡河
4. 起点側（新宮側）は現道線形に沿った形で擦付け
5. 現道沿いの集落（長殿地区）を避ける

以上の条件を踏まえて設定したルート3案を比較した結果、経済性も安価で現道交通への影響や地すべり等の対策が最も少ないルート3を基本ルートとして進めることとした。

ルート1：被災箇所を回避し現道沿いにBP整備

ルート2：被災箇所及び防災点検要対策箇所を回避

ルート3：被災箇所を回避し、塩鶴地区の地すべり地を回避（十津川右岸をトンネルで抜く）

5. トンネル坑口の安定度検討

基本ルートは橋梁とトンネルが連続し、長殿地区の斜面崩壊懸念箇所を回避する計画であるため、特にトンネル坑口の安全性に配慮した線形の設定を行った。

まず、地形判読や現地踏査結果をもとにした安定度の概略評価を行い、防災検討会においても現地確認を行い、提言をいただいた。

表-1 トンネル坑口の安定度検討

位置	地層の傾斜	トンネル軸線と地形との関係	安定度の評価（地質調査前 2012年）		安定度の評価（地質調査後 2013年）
			概略評価（地形判読、現地踏査）	防災検討会（検討会及び現地検討会）	
1号トンネル南坑口	受け盤	斜面斜交型	斜面に地すべり地形は認められず、特に大きな問題はない。	特に問題はない。	坑口斜面には未固結で崩壊しやすい礫・転石からなる崖錘が10m程度堆積しており、安定対策の検討が必要である。
1号トンネル北坑口	流れ盤	斜面直交型	斜面が急勾配を呈しているが、地すべり地形は認められないことから特に大きな問題はない。	斜面として特に問題はない。	岩盤がほぼ表層から分布するため、坑口斜面は安定している。
2号トンネル南坑口	受け盤	谷部進行型 ↓ 尾根部進入型	斜面に地すべり地形は認められず、特に大きな問題はない。	沢状の崩壊跡地形となっており、崖錘堆積物が上方斜面から落石等の恐れがあることを指摘。 ↓ 坑口を西側の尾根部部分に移動	岩盤がほぼ表層から分布するため、坑口斜面は安定している。
2号トンネル北坑口	流れ盤	尾根部進入型 (尾根幅は数十m)	斜面に地すべり地形は認められず、特に大きな問題はない。	上方斜面に分布している緩斜面について、トンネルとの位置関係を把握するよう指摘	坑口斜面の表層から約19mの層厚で崖錘が堆積しており、その下部の深度50m付近までは攪乱された土砂をはさむ岩盤が確認された。(図-7)

その後、坑口付近を中心とした地質調査を行い、坑口の安全性や計画上の新たな不安定斜面に対する知見が得られた。特に、2号トンネルの北側坑口付近については攪乱された土砂を挟む岩盤の層が谷底から尾根地形上部まで連続することが判明したため、深層の岩盤すべりによる移動岩塊と推測するに至った。(表-1)

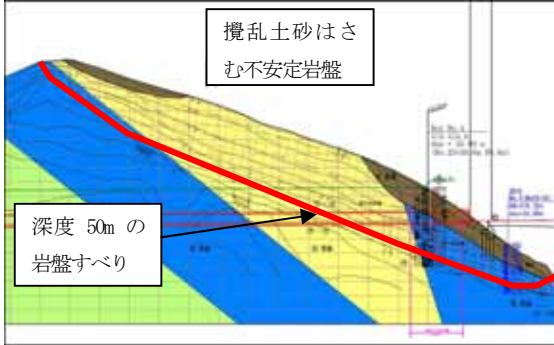


図-7 地質断面図(2号トンネル北側坑口)

6. 2号トンネル ルート変更の検討

地質調査で得られた2号トンネル坑口付近で確認された大規模な岩盤地すべりブロックについては、不安定化した場合の影響が大きいことから、2号トンネルのルートは回避する方針とした。

(1) 岩盤地すべりのすべり面の設定

基本ルートの課題を解消する新たなルート導入の検討に際し、岩盤地すべりブロックを回避するため、その形状を把握する必要があった。

a) 岩盤地すべりのブロック形状の精査

LPデータ計測を用い、微地形判読を行うとともにブロック形状を設定した。

頭部：尾根末端部に滑落崖、その基部に緩斜面
(岩盤地すべりの存在を示唆)

中腹部：不明瞭ながら滑落崖ができ、その直下に凹状地形(岩盤クリープの進行)

末端部：小崩壊地形が発達(斜面の不安定化が進行)

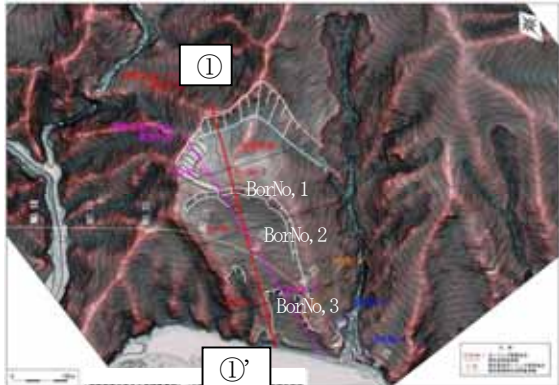


図-8 地形表現図による微地形判読結果

b) すべり面形状の精査と現況の活動度の評価

すべり面の深度を確認するためさらなるボーリング調査や弾性波探査を行い、ボーリング孔を活用して孔内傾斜計観測などにより岩盤地すべりの機構を把握した。

①-①'断面における弾性波探査の結果からは、BorNo. 1及びBorNo. 2地点表層付近は低速度部分が厚く岩盤が緩んでいるかあるいは崖錘性の堆積物が分布するような地質状況を示唆していた。(図-9)

また、BorNo. 1~BorNo. 3の地点において孔内傾斜計で初期値と約1ヶ月後の値を観測したが、いずれの地点においても変位は認められず、現況においては不安定化の兆候は見られない状況であった。(図-10)

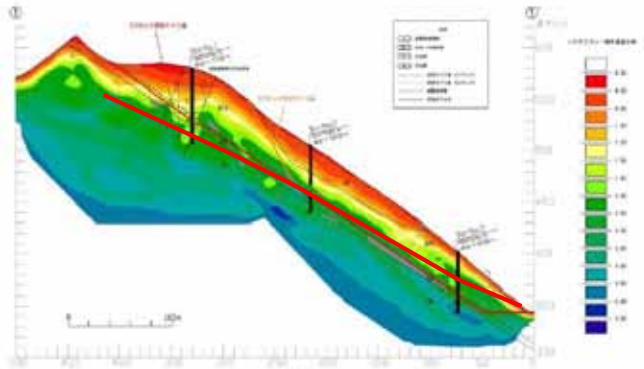


図-9 弾性波探査トモグラフィー解析断面図(①-①'断面)

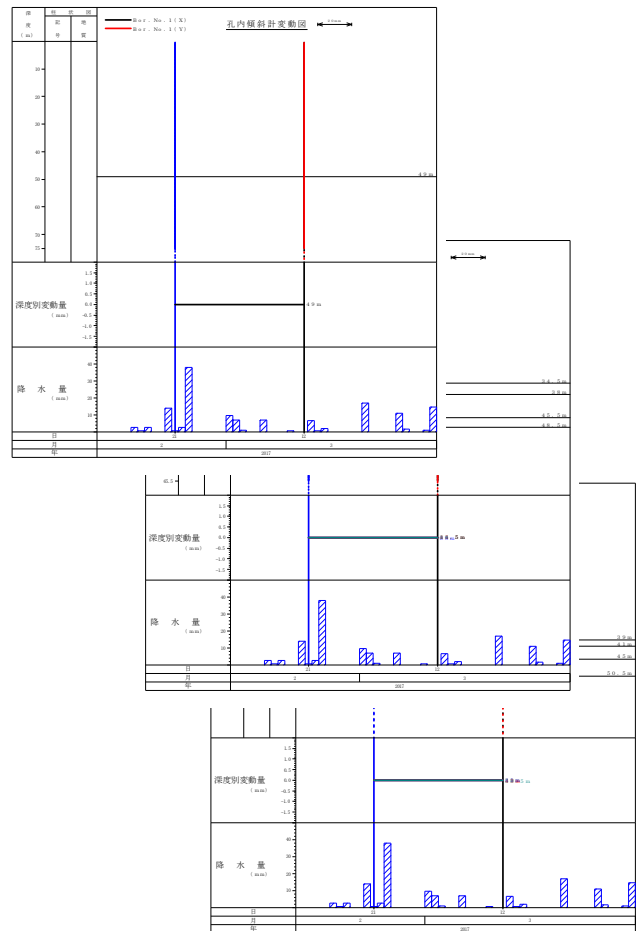


図-10 孔内傾斜計観測結果(上No. 1、中No. 2、下No. 3)

(2) 変更ルートの検討

起終点および2号トンネル起点側坑口の制約から、線形検討の基本方針は、以下の平面・縦断コントロールポイントに留意し前後の影響を最小限に抑えることとした。

- ① 1号トンネルの平面・縦断線形を固定
- ② 城門トンネルの平面・縦断線形を固定
- ③ 想定すべり面以深を通過 (40m以上)
- ④ 沢部トンネル土被り 3m以上の確保

ルート検討に際し、防災検討会からはすべり面から2D (Dはトンネル掘削幅) 以上の離隔を取るよう指摘をうけた。

比較ルートについては、比較的線形が現行ルートに近く沢部の低土被りをさけるため沢部を橋梁で渡河させる1案と防災検討会の意見を踏まえすべり面から2D以上の離隔を取り曲線半径をそれぞれ変えた3案を設定した。

(表-2)

表-2 比較ルートの概要

ルート	曲線半径	概要
ルート1	650	沢部のトンネル低土被りを避けるために、沢部を橋梁で渡河
ルート2	285	トンネル内視距幅が不要な曲線半径で設定
ルート3	230	沢部におけるTN土被りを極力確保しつつ、片勾配を極力抑えた平面線形
ルート4	200	設計速度60km/hに対する望ましい曲線半径で設定

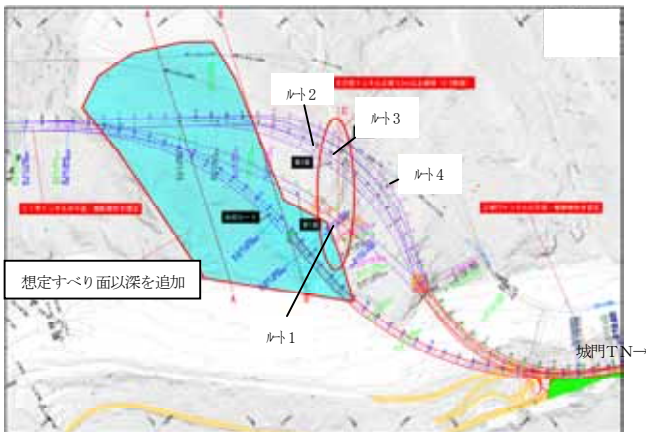


図-11 2号トンネルルート検討のコントロールポイント

a) トンネル掘削の影響評価

線形的に基本ルートに近いルート1は岩盤地すべりのすべり面にトンネル掘削に伴うゆるみが生じ、安定性を低下させる可能性があり、また、防災検討会から指摘を受けているすべり面から2Dの離隔が確保できていないことからトンネル掘削に伴うゆるみを考慮した安定解析を実施することとした。

安定解析は図-13に示す緩みゾーンを考慮して行った。解析結果は、表-3に示すように現況より安全率が低くなり、トンネル掘削により大きく不安定化する可能性がある結果となった。

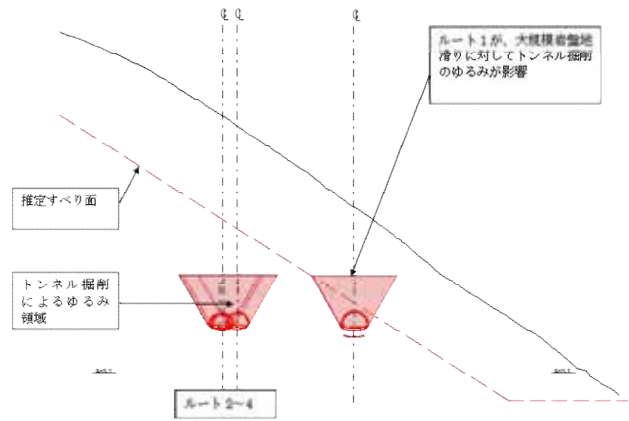


図-12 B-B断面図

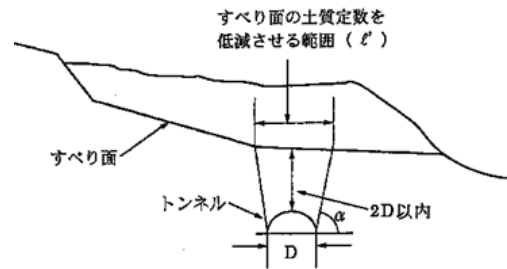


図-13 地すべり地外にトンネルがある場合のゆるみゾーン³⁾

表-3 安定解析結果

項目	安全率(Fs)	計画安全率(Fsp)	必要抑止力(kN/m2)
現況での安定解析	1.10	1.20	15,432
トンネル掘削を考慮した安定解析(ルート1)	1.08	1.20	17,227

b) 変更ルートの比較検討

岩盤地すべりに影響があるルート1は危険と判定し、地すべり面から2Dの離隔を確保するルート2～4より選定することとした。

比較検討の結果、沢部でのトンネル土被りが1.5D以上確保でき、防災機能面及び対策工費が少なく経済性に優れたルート3を採用した。

7. まとめ

一般的に深層崩壊の危険性が認識され出したのは2011年の紀伊半島大水害による深層崩壊の多発が契機となっている。このような状況により、2012年度頃までのルート検討時点では深層崩壊に対する配慮が一般的ではない状況であった。また、大規模な不安定斜面はすべり面深度が深いこともあり既往資料調査や現地踏査だけでは、ルートとの関係が検討し難い面もあり、地質調査等が実施されるまでは十分な検討が実施できなかった面がある。

長殿道路のルート決定までの経緯を踏まえ、今後、このような地すべりが懸念される山間地域で道路事業を推進していくための留意点を以下に整理した。

(1) 概略設計段階における地すべり発生リスクの把握

五條新宮道路のような斜面変動のポテンシャルが高い地域では、概略設計段階で周辺地域の地すべり等の懸念地の分布を明らかにしておくことが、ルートを検討する上で有効である。

例えば、ダム計画時に行われる概査のように、机上調査や現地踏査、空中写真判読の結果から、不安定化する可能性のある地すべりブロック等の範囲を図に明示するとともに、得られた情報や地すべりの規模等をカルテに整理し、それぞれの地すべり箇所が不安定化した場合のリスクを把握しておく、ルート検討時に精度の高い比較ルートが選定できる。

(2) 沢地形部の坑口計画の是正

五條新宮道路の場合、急峻地形が多く、尾根谷が複雑に入り込んでいることから「尾根部進入型」や「谷部進入型」の坑口計画とすることが多くなっている。しかし、「尾根部進入型」では、崖錘が浸食を受けて凸形状を呈している場合がある。急峻な地形では大規模土工の採用は困難な場合が多く、ルート変更を選択せざるを得ない可能性が高いので、横断方向の土被りの確認や凸部の不安定斜面の可能性の有無を把握しておく必要がある。

また、「谷部進入型」で計画されている場合には、地下水位が比較的高い場合が多く、土石流などの自然災害を受けやすい斜面となるので、尾根部に移す結果となることも多いため極力避けた計画とすることが望ましい。

(3) 坑口部の不安定地形の把握

ルート検討段階においては大規模な不安定斜面はすべり面深度が深いこともあり既往資料調査や現地踏査だけでは、ルートとの関係が検討し難い。そのため、ボーリングによる概略把握を早期の段階で実施することが事業進捗を早める手立てとなる。

さらに、不安定斜面が想定される場合には、「回避」するか「対策」で対応するかの判断が必要となる。

特に地すべりブロックの深度が深い深層崩壊が発生しう斜面上においては大規模土工の採用は困難な場合が多いため、概略でも安定計算を行い抑止力の規模や概算の対策費用を把握したうえでルートを検討する必要がある。

(4) 不安定地形とトンネル本体部との位置関係の把握

トンネル本体部の場合、概略調査も大規模なものが主体となるため広域の地形判読や現地踏査が特に重要となる。ルート検討段階では崩壊深度とトンネルの位置関係の検討が困難な場合も多いが、空中電磁探査を活用して概略の深度を把握することも有効である。

8. おわりに

長殿道路の場合、起終点取りつき位置の制約から、ルート変更検討は基本的には平面線形の変更で対応したが、土被りやすべり面の位置想定により縦断線形の変更で対応可能な場合もある。

ルート選定にあたっては不安定化が懸念される箇所を早期の段階で立体的に把握・評価することにより、安全性が高くかつ経済的なルートを選定でき、事業進捗に寄与することができると考えられる。

参考文献

- 1)近畿地方土木地質図編纂委員会：近畿地方土木地質図解説書，1981年3月
- 2)地質調査所：20万分の1地質図幅「和歌山」，1997年
- 3)東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）：設計要領 第一集 土工編，2014年

丹生トンネルにおける水枯れへの対応 ～丹生川上神社下社の神様「水」を守る～

去来川 里加

奈良県 地域デザイン推進課 (〒630-8501 奈良県奈良市登大路町30番地)

昨年8月、奈良県吉野郡下市町丹生～長谷において、一般国道309号 丹生バイパスのL=1.1km区間が供用開始し、これにより丹生バイパスは全線開通となった。当バイパスはトンネルを含んだバイパスであるが、トンネル掘削が及ぼす水枯れの影響が重要な課題の一つであった。この課題に対し、水質調査等の調査を行い、トンネル掘削が及ぼす水枯れの影響についての検証を慎重に行った。また、水位の変化を把握するため、トンネル掘削前から継続的に水位観測を行ってきた。これらの調査及び継続的に行ってきた水位観測の結果がとりまとまったため、それらについて報告する。

キーワード 調査, 損失補償, 設計

1. はじめに

昨年8月、吉野郡下市町丹生～長谷において、一般国道309号 丹生バイパスのL=1.1km区間が供用開始され、これにより丹生バイパスが全線開通となった。

当バイパスは、現状の道路が急峻な地形に位置し幅員が狭小ですれ違いが困難であるとともに緊急車両の通行にも支障をきたしているため、平成14年度に事業化され

た。事業延長はL=2.4kmであり、一部供用開始を行いながら、事業を進め全線開通に至った。

当バイパスはトンネルを含んだバイパスであるが、トンネル掘削が及ぼす水枯れの影響が重要な課題の一つであった。この課題に対し、水枯れの影響を把握するため、トンネル掘削前から継続的に水位観測を行ってきたところであるが、これまでの調査結果について報告する。



2. 丹生バイパスの線形決定について

当バイパスの線形を決めるにあたり、現道拡幅案とトンネル案で比較検討された。表-1の検討結果により、トンネル案が採用された。

表-1 比較検討

比較案	現道拡幅案	トンネル案
自然環境への影響	切土長大法面が発生し、自然環境へ及ぼす影響が大きい	トンネルが主体となり、自然環境へ及ぼす影響が少ない
施工性	現道拡幅であるため、一般交通を確保しながらの施工となる	トンネル単独施工であるため、一般交通への影響がほとんどない状態での施工が可能
周辺の井戸に及ぼす影響	特になし	周辺の井戸に影響を及ぼす可能性がある
費用	トンネル案の費用に比べ高い	現道拡幅案の費用に比べ安い

3. 課題

トンネル施工において課題となる事項は、土砂搬出時の粉じん、発破による騒音・振動、トンネル掘削による水枯れなどが挙げられるが、当施工現場においては、トンネル掘削が及ぼす水枯れの影響が重要な課題であった。

なぜならば、トンネルルートの上には、日本最古の「水」の神様を祀る丹生川上神社下社があるためであった。

当神社は生命の源である水を主宰される女性の神様、閻魔神(くらかみのかみ)を祀っている。国史・古典にみる丹生川上神社は祈雨・止雨の祈祷に効験があり、奈良時代・平安時代を通じて、祈雨には黒馬、止雨には白馬を献じていたとされている。この歴史的な丹生川上神社下社の神様である「水」を絶対枯らしてはいけないことが、この現場特有の課題であった。



図-1 トンネルルートと丹生川上神社下社の位置関係

4. 対応

この課題に対し、水質調査等の調査を行い、トンネル掘削が及ぼす影響についての検証を慎重に行った。

(1) 影響範囲の検討

トンネル掘削による水枯れの影響範囲を図-2に示す。この赤色で着色された範囲においては、トンネル掘削により、トンネル内に地下水が引き込まれ、水枯れの影響が出ると思われる範囲である。この結果より、当神社の井戸の位置は影響範囲外であることがわかった。しかし、図-3に示す位置に起源となる地下水が流れている場合、トンネル位置より下流への水の供給量が減少すると考えられた。

(2) 水質調査

当神社の井戸水の起源を把握するため、水質調査を行った。調査結果を図-4に示す。

図-4は、採取した水を分析し、各イオンの数を調



図-2 水枯れ影響範囲

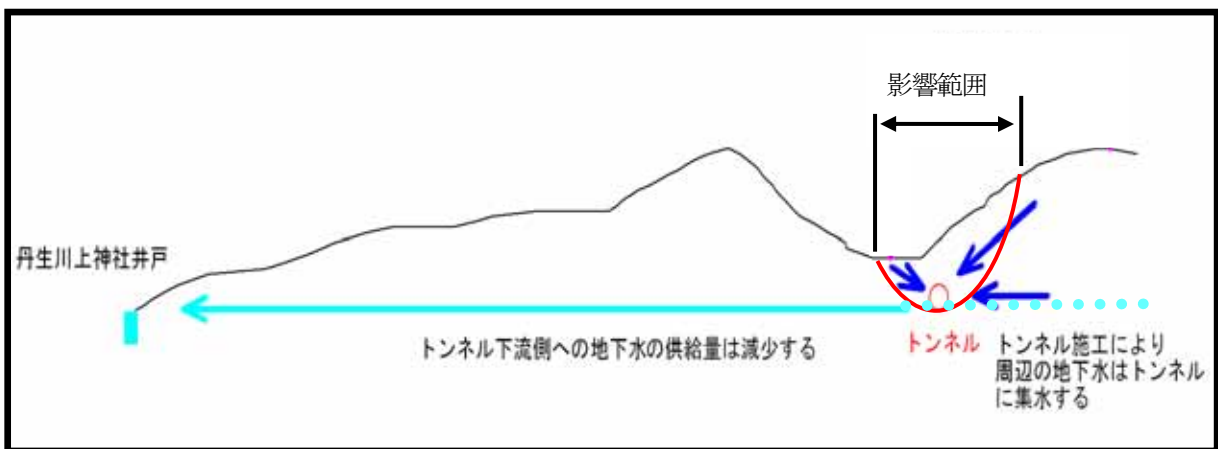


図-3 丹生川上神社の井戸と影響範囲との位置関係

ベグラフィ化したものである。センターラインから右に陰イオン、左に陽イオンをとり、センターラインから離れるほど溶存しているイオンの数が大きいことを示したグラフである。緑枠が丹生川から採取した水の結果であり、赤枠が当神社の井戸から採取した水の結果である。このグラフの形状より、丹生川の水質と当神社の井戸の水質が異なることが読み取れる。この結果により、当神社の水は丹生川からの流入ではなく、山側からの地下水が流入している可能性が高いと考えられた。

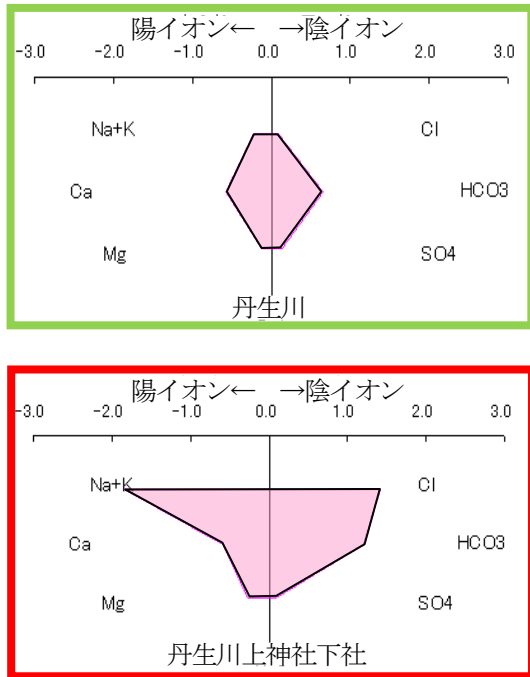


図-4 水質調査の結果

(3) 電気探査

地下水の状況の把握のためトンネルルートから当神社の断面において電気探査調査を行った。この調査結果を図-5に示す。電気探査は、岩石の鉱物組織や間隙、地下水といった多くの要因によって異なる比抵抗をもつ性質を利用し、地盤の比抵抗分布構造を把握する手法で、地下水分布状態を把握するのに有効であると考えられる。

図-5は、黄色～赤色系の高比抵抗値ゾーン、青色～緑色系の低比抵抗値ゾーンに色分けしている。この電気探査結果図より、丹生川上神社下社の北側の丘陵地の表層部には、高比抵抗ゾーンが分布することがわかった。この範囲は間隙の多い土砂部で構成されていると考えられ、山地に降った雨が、この間隙を鉛直下方に浸透し、不透水層の上面付近に地下水として滞留し、その地下水が当神社の井戸へ流動している可能性が高い。また、上記(1)に示すトンネル掘削による水枯れの影響範囲をプロットし、位置関係を比較したところ、影響範囲内に水源と考えられる範囲は含まれていなかった。この結果より、当神社の水枯れの影響の可能性は低いと考えられた。

5. 結果

上記の調査結果が得られたが、地盤の中という目に見えない部分の調査の結果であるため、トンネル施工前から井戸の水位観測を開始した。その結果を図-6に示す。赤線で示したものが水位観測の値であり、オレンジの枠内がトンネル掘削期間である。当神社の井戸の深さは約6.5mであり、施工前はおおむね水深2.0m～2.5mで保た

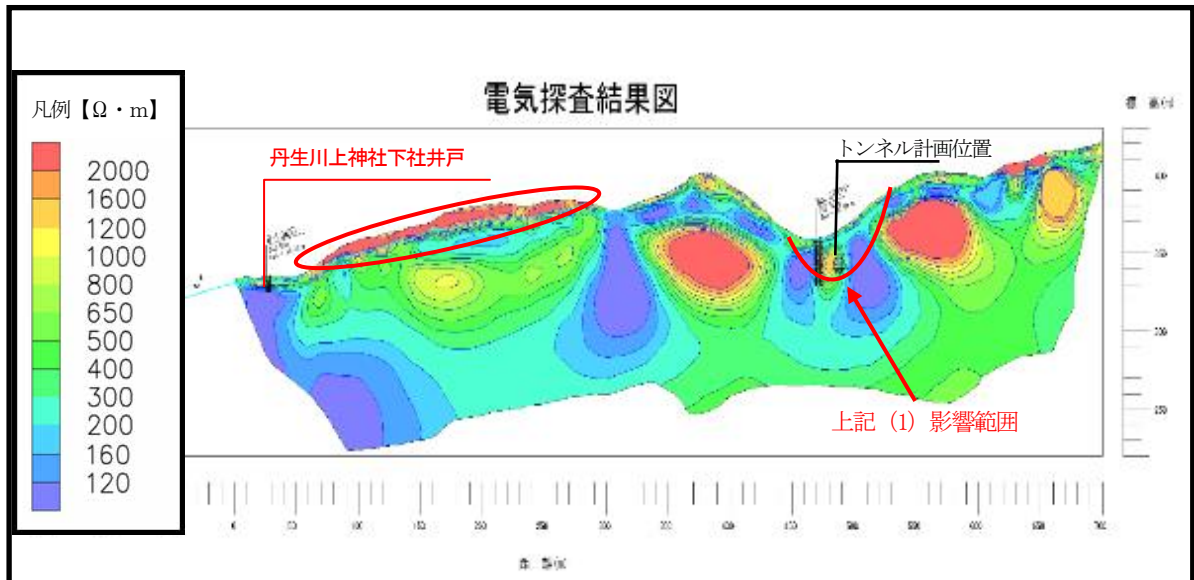


図-5 電気探査結果図

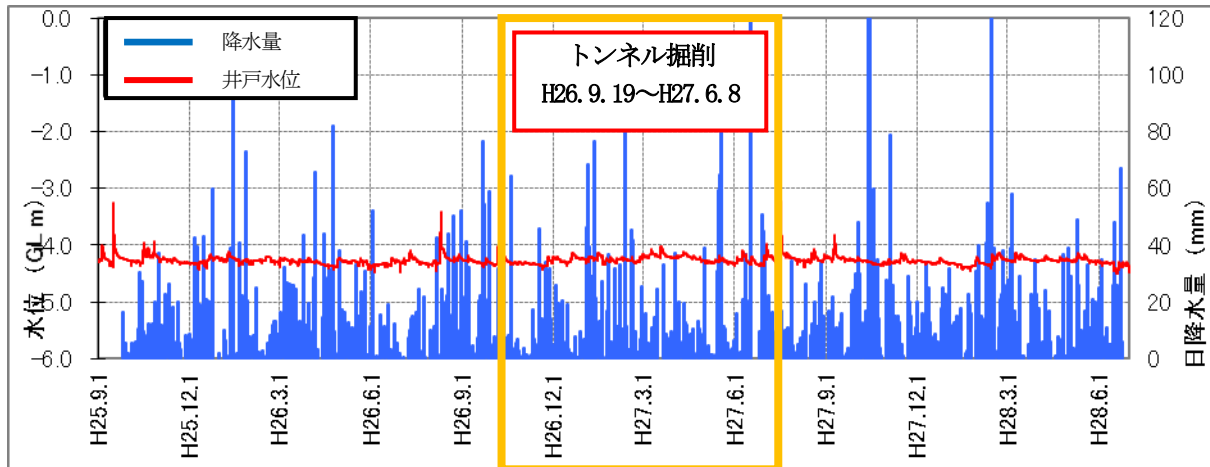


図-6 水位観測結果

れていることがわかる。施工中、施工後においても同様の値を示しており、水位が変化していないことが見て取れる結果となった。

6. おわりに

当該施工現場のように、水の神様を祀る歴史的な建造物を背面に持つ山において、水枯れが懸念されるトンネル掘削を行うのは希であると考えられる。しかし、丹生川上神社下社の神様である「水」に影響がなく施工が完了できた。事前の調査の結果が証明できたと考えられる。さらに、当初の計画段階で調査し検討を行うだけで終わるのではなく、施工中、施工後まで継続的に調査を行うことによって数値による結果を得られ、明確な説明ができる痛感できた。今後、水位観測の結果のとりまとめを行

っていく予定である。

また、本研究とは別の視点になるが改善すべきであると感じたことがある。長期にわたる事業においては、調査及び測量、設計等の業務の成果品が膨大になる。しかし、それらの成果品の整理が煩雑であり、知りたい情報を得るのに非常に時間がかかり、問題点であると感じた。長期にわたる事業においては、定期的に過去の業務のとりまとめ業務を行う必要があると考える。さらに、調査結果の報告だけでなく、調査に至った経緯及び結果までの経緯についても残しておくことが重要であると感じた。長期にわたる事業においては、成果品とは別に、概要版を綴っていき引き継ぎを行うのが簡易な解決策であると考えられる。今後の業務において実行していきたいと思う。

謝辞：本論文の作成にあたり、ご協力いただいた方々へ、心より御礼申し上げます。

※本論は、著者が前所属（奈良県吉野土木事務所工務第一課）で担当した内容についてまとめたものである。

空中電磁探査を活用した 深層崩壊危険度評価事例の報告

田中 健貴¹

¹近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター
(〒649-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

深層崩壊による被害を防ぐ、あるいは軽減するためには事前に深層崩壊が発生するおそれのある斜面を抽出する必要がある。一方で、紀伊山地のような広範囲を対象とする場合、調査に多大な労力がかかる。そこで本検討では、広範囲にわたって地盤状況を把握することができる空中電磁探査を活用した深層崩壊が発生するおそれのある斜面の抽出を試みた。その結果、空中電磁探査による地盤状況の推測はボーリング調査によって把握した地盤状況と比較すると、崩壊面となりうる箇所が抽出できる可能性があることなどが示唆され、深層崩壊が発生するおそれのある斜面の抽出に有効であることが示された。

キーワード 深層崩壊, 空中電磁探査, 比抵抗, LP計測

1. はじめに

平成23年台風12号をはじめ、近年各地で深層崩壊が多発している。深層崩壊は、崩壊規模は極めて大きく、被害が大きくなる事例がみられる。このような深層崩壊による被害を軽減するには、深層崩壊発生危険斜面（以後、危険斜面）を抽出した上で詳細な災害シナリオを想定し対策を行う必要がある。これまで危険斜面の抽出手法としては斜面の変形の程度（ひずみ率）をレーザープロファイラによる平面的な微地形判読、地形解析によって評価する方法や、変形が進行した斜面の末端において湧水の電気伝導度などを分析することによる地盤内部の推定方法などが検討、開発されてきた¹⁾。しかし、このうち危険斜面の地盤内部を評価する手法は、湧水箇所の調査を含め現地での詳細調査が主体であり、広い範囲からの抽出を行う場合は、多大な労力が求められる。

一方で近年、ヘリコプターを用いて広範囲の地下情報を得られる空中電磁探査が注目されている^{2)~6)}。危険斜面と考えられる斜面では、崩壊前に地盤内部における風化や重力変形による緩み域が存在すると考えられるため、この緩み域を空中電磁探査によって抽出することが出来れば、現地調査を行う必要のある斜面を従来よりも、さらに絞り込むことが可能となる。

そこで本研究では、空中電磁探査による地下の比抵抗分布に着目した、危険斜面抽出技術について検討したので、その結果について報告する。

2. 研究方法

本研究は図-1に示す空中電磁探査取得範囲において実施した。この範囲において微地形判読などから危険斜面であると考えられる1斜面を抽出した上で、空中電磁探査によって得られた比抵抗データを基に、対象斜面の緩み域を推定した。さらに対象斜面においてボーリング調査、孔内傾斜計による地中変位観測を行い、比抵抗データから推定される緩み域の妥当性を検証した。

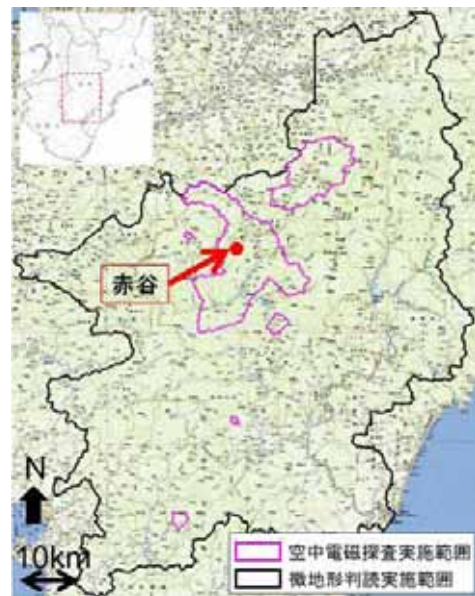


図-1 調査対象範囲

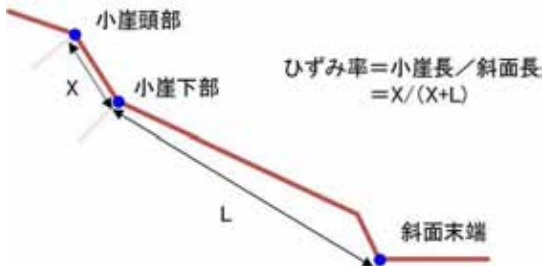


図-2 ひずみ率の算出

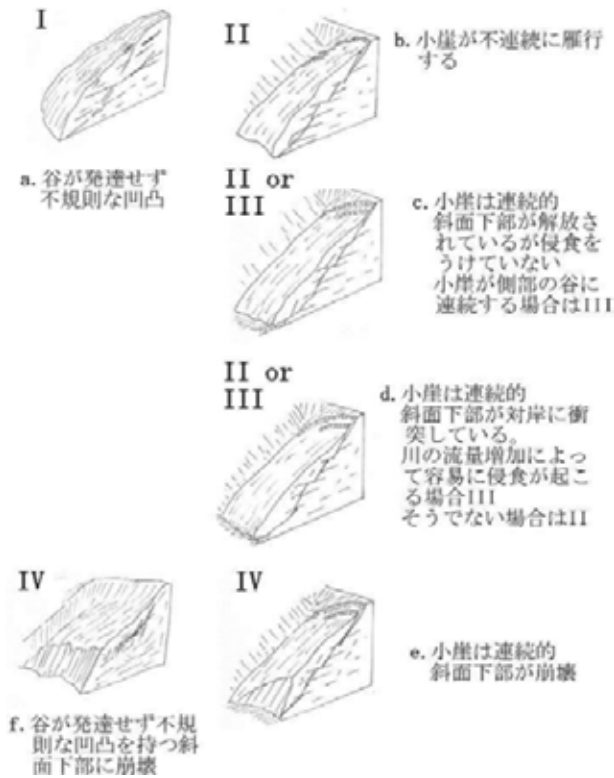


図-3 微地形判読に基づく危険度評価
千木良ら⁷⁾から一部引用

3. 対象斜面の抽出

対象斜面はレーザープロファイラを用いたひずみ率計測や微地形判読を基にした危険度評価によって抽出した。微地形判読は図-1に示す範囲で実施し、重力変形斜面を抽出した。その上で、抽出された斜面についてひずみ率および微地形判読による危険度評価を行った。なお、孔内傾斜計による観測をあわせて実施した。ここでひずみ率は図-2に示す通り小崖の斜面方向の長さを斜面長で除した値であり、斜面の重力変形の程度を示す指標である¹⁾。また微地形に基づく危険度評価は既往研究⁷⁾を参考にした(図-3)。抽出された斜面の中から、現地調査ならびにボーリング調査のアクセスを考慮し、対象斜面を1斜面選定した。選定された斜面は深層崩壊発生箇所である赤谷崩壊地の西に位置する(以後、赤谷西と

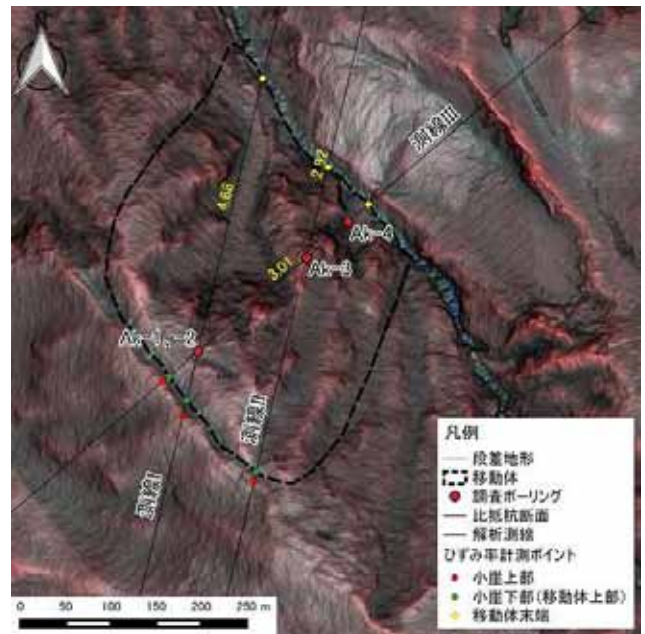
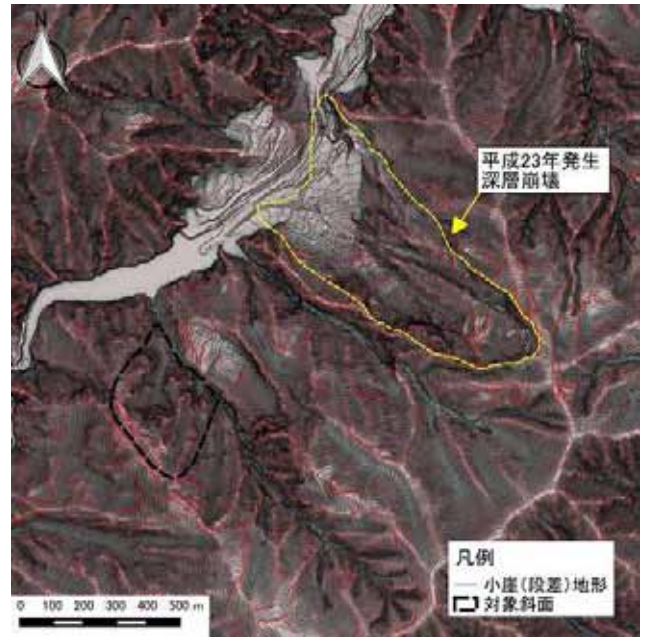


図-4 対象斜面概要

(上:対象斜面周辺 下:対象斜面詳細)

呼ぶ) (図-4)。赤谷西のひずみ率は4.7%で、紀伊山地で崩壊前の斜面で確認された5~21%とほぼ同様であった⁸⁾。また微地形に基づく危険度評価では、斜面末端での崩壊が認められ図-3で示す危険度IVと評価される。

4. 空中電磁探査の実施および比抵抗分析

紀伊山地における空中電磁探査は平成24年から平成26年にかけて図-1に示す範囲で実施された。空中電磁探査は、電磁誘導現象を利用する電磁探査の一つで、ヘリコプターに曳航した電磁センサーを用いて地中の電磁場応答を測定し、現地に立入ることなく、広域斜面の比抵抗3次元構造を把握する探手法である。本研究で使用し

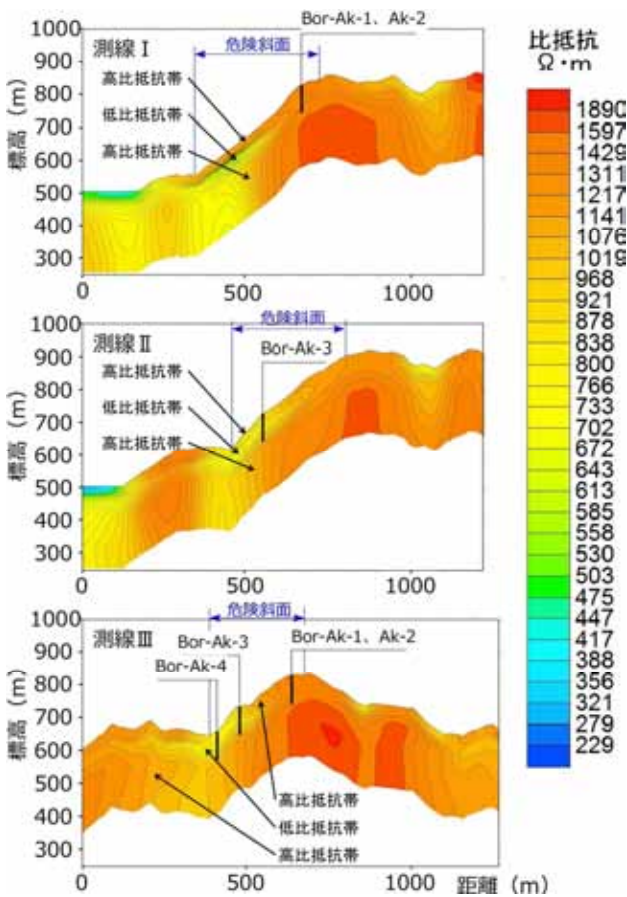


図-5 各測線の見掛比抵抗

た空中電磁探査のデータは、周波数領域タイプの測定システムで取得されたものである。当該測定システムでは、人工的に送信コイルから発生させた一次磁場が、地中を通過する際に磁束の変化を打ち消すように渦電流（誘導電流）が流れ、その渦電流による二次磁場の強さを受信コイルで測定し、一次磁場に対する二次磁場の割合から比抵抗を算出する。その際、使用する周波数によって探査深度が異なることから、複数の周波数で測定することで一度に複数深度の比抵抗データが得られるため、周波数毎に計算した比抵抗を該当する探査深度にプロットし、周波数間の比抵抗を比例補間して比抵抗断面図を作成する。比抵抗は、主に単位体積当りの含水量と粘土の含有量によって支配される物性値である。間隙率が大きく地下水で飽和した地質ほど、あるいは粘土が多い地質ほど比抵抗は低い。また新鮮で間隙が少ないか、間隙率が大きくても地下水が不飽和な地質ほど比抵抗は高くなる。なお、本研究では、測定データから算出した見掛比抵抗を使用した。また見掛比抵抗は理論値であり、絶対値の分布を示すデータではない。そこで分析では相対的な変化に着目し、地盤の不連続面に対応する見掛比抵抗の変化に注目した。比抵抗の分析は測線を図-4に示すように設け、実施した。まず各測線の見掛比抵抗を示す（図-5）。斜面内ではいずれも深度方向に同様の比抵抗変化を示し、地表より深度30m付近まで高比抵抗、深度30m

表-1 ボーリング調査箇所の見掛比抵抗変化深度

ボーリング箇所	Ak-1	Ak-3	Ak-4
高比抵抗域	不飽和な緩み岩盤		
変化域 (最大変化深度)	38m	29m	
低比抵抗域 (最低値深度)	51m	42m	33m
	飽和度の高い緩み岩盤		
変化域 (最大変化深度)	69m	59m	
変曲部	117m	102m	
高比抵抗域	不飽和な新鮮岩盤		

深度は微分フィルタに基づく

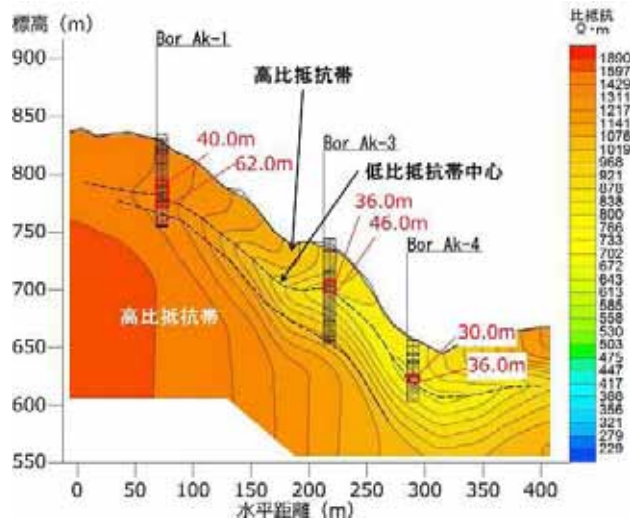


図-6 比抵抗の分布とボーリング調査位置（測線Ⅲ）

深度は図-9から図-11に示すコアの深度を示す

～60m付近で低比抵抗、深度60m以深で相対的に高比抵抗でかつ高角度の比抵抗変化を示す3層構造と、それぞれ間に低角度の変化を示す比抵抗領域が存在する。

5. 比抵抗分析とボーリング調査の比較

(1) 見掛比抵抗構造から推定される地盤状況

表-1に各箇所での見掛比抵抗変化面の深度を示す。見掛比抵抗の相対的な変化は、地盤の抵抗値に影響する含水率、粘土鉱物含有量、構成物質そのものの比抵抗特性等の相対的な違いに影響されると考えられる。そこで、見掛比抵抗構造から鉛直方向の地盤状況を推察すると、浅部の高比抵抗領域は開口や間隙の多い不飽和な緩み岩盤、低比抵抗領域は地下水飽和帯や粘土鉱物が多い地層、砂岩に比べ相対的に比抵抗が低い泥岩や凝灰岩層の分布、深部の高比抵抗は比較的新鮮で間隙が少なく不飽和な岩盤であると推定される。このうち、緩み域の下端に相当するのは、低比抵抗と深部の高比抵抗の境界と考えられる。なお、高角度の比抵抗変化は断層等の地質構造に起

因する不連続面の存在を示唆している可能性がある。

(2) ボーリングコアで確認される地盤状況

ボーリング調査は3か所（4孔）において実施した。

Ak-1のボーリングコアを図-7に示す。深度51m周辺に低比抵抗帯の中心が位置していたが、ボーリングコアでは凝灰質頁岩を含む泥質岩が分布し、上下に砂岩層が存在する。また低比抵抗帯の中心周辺ではX線回析の結果、粘土鉱物の緑泥石が消失し、スメクタイトが形成されていた。またボーリングコア深度72m付近では、深度70.1～73.52mにかけて砂岩層が破碎され岩片状となっており、脆弱な岩盤が分布する。

次に Ak-3 のボーリングコアを図-8 に示す。低比抵抗帯の中心は深度 42m 周辺に見られたが、ボーリングコアでは開口亀裂やせん断面が発達する泥質岩が分布していた。深度 40.65m～41.08m 間は、破碎状の細礫からなる。低比抵抗帯の中心周辺は、岩石の有効間隙率が他の深度より大きかった。また X 線回析結果では、粘土鉱物の緑泥石が消失してスメクタイトが形成されており、崩壊面になりやすいと考えられる。また Ak-3 における孔内傾斜計の観測では、深度 41m 付近において 2 月 8 日から 3 月 7 日にかけて 0.12mm 程度の変位が見られた。

最後に Ak-4 についてボーリングコアを図-9 に示す。深度 33m 周辺に低比抵抗帯中心が位置したが、深度 30.6m で砂岩優勢層から泥質岩に変化している。また、深度 31.26～31.65m が破碎状の細礫からなり、32.65m で擦痕が確認された。低比抵抗帯中心よりも深い領域では、破碎度の比較的進んでいない棒状コアが分布する。また X 線回析結果では、粘土鉱物の緑泥石が減少している。

(3) 地盤状況による推定崩壊面と見掛比抵抗変化面

比抵抗の分析、比抵抗とボーリング調査の比較から、相対的に比抵抗の低い低比抵抗帯は、破碎状の細礫を狭在し、スメクタイトが見られるなど崩壊面となりうる緩み域を表現している可能性があることが分かった。

6. まとめ

本研究では、比抵抗の分析による緩み域の推定を行うとともに、ボーリング調査によってその妥当性を検証した。その結果、比抵抗の分析による緩み域の推定では、1 斜面の検討において、浅部から深部に向かって高比抵抗、低比抵抗、高比抵抗に比抵抗が変化している様子が見られ、ボーリング調査との比較から、このような変化において低比抵抗領域は緩み域を表現している可能性が示唆された。一方で、今回の検討は重力変形が比較的明瞭な 1 斜面のみの検討であり、他の斜面での有効性についても検討する必要がある。

今後、地形解析による方法や水質分析による方法との

組

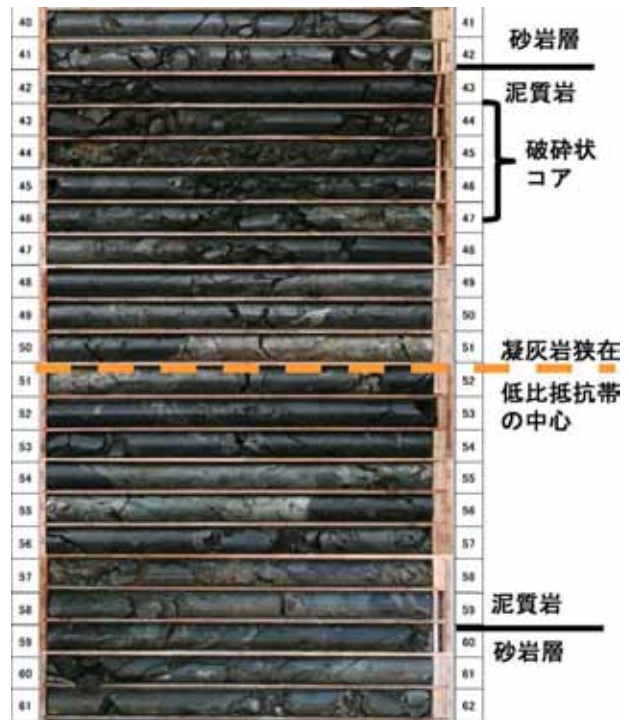


図-7 Ak-1 ボーリングコア



図-8 Ak-3 ボーリングコア



図-9 Ak-4 ボーリングコア

み合わせにより、さらに詳細に危険斜面の抽出ができる可能性もある。さらに検討を進め、危険斜面のより精密かつ効率的な抽出につなげたい。

謝辞：京都大学防災研究所千木良教授には微地形に基づく危険度評価について、丁寧にご指導いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所: 深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究, 土木研究所資料 第4333号,2016.
- 2) 鈴木隆司, 内田太郎, 田村圭司: 深層崩壊発生斜面の特定に向けた地盤構造調査法, 土木技術資料, Vol.51, No.7, pp.8-13, 2009.
- 3) 横山修, 内田太郎, 中野陽子, 田村圭司, 笠井美青, 鈴木隆司: 急勾配斜面における岩盤クリープの表面構造と内部構造, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, pp.410-411, 2010.
- 4) 桜井亘, 酒井良, 奥山悠木, 小川内良人, 眞弓孝之, 横山修, 河戸克志, 奥山稔: 平成23年台風12号で発生した深層崩壊の地質・地下水特性と空中電磁探査との関連性について, 平成27年度砂防学会研究発表会概要集B, pp.102-103, 2015.
- 5) 桜井亘, 酒井良, 奥山悠木, 河戸克志, 奥山稔, 小川内良人, 眞弓孝之, 横山修: 新宮川流域における比抵抗ウェッジとその抽出手法の提案, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集A, pp.172-173, 2015.
- 6) 坂井佑介, 河戸克志, 佐渡耕一郎, 平川泰之: 阿蘇西麓熱帯地帯における空中電磁探査を用いた水理地質構造の推定, 砂防学会誌, vol.69, No.1, pp.20-29, 2016.
- 7) 千木良雅弘, 坂島俊彦, 渋谷研一: 深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について, 平成26年度砂防学会研究発表会概要集A pp.16-17, 2014.
- 8) 千木良雅弘, 松四雄騎, ツオウチンイン, 平石成美, 松澤真, 松浦純生: 2011年台風12号による深層崩壊, 京都大学防災研究所年報 第55号A, 2012.

すさみ串本道路事業における地質リスクの 試行的導入と調査・設計への適用について

芝山 功

近畿地方整備局 紀南河川国道事務所 工務第三課 (〒646-0003 和歌山県田辺市中万呂142)

紀南河川国道事務所では、一般国道42号すさみ串本道路で早期供用を目指し、事業に取り組んでいるところであるが、先に供用した紀勢線では、道路施工中に調査設計時に想定していない法面崩壊等が発生し、工事費の増加がみられた。隣接する区間である一般国道42号すさみ串本道路では、これらの地形や地質等を素因として生じるものを「地質リスク」と捉まえ、各種基準類、既往の文献調査に加えて、紀勢線での事例を分析・抽出し、対策を行うことを目的として地質リスク検討業務を試行的に導入し、今後の調査・設計に反映することを試みた。本論文では、紀南河川国道事務所管内のすさみ串本道路において地質リスク検討業務で試行的に行った検討内容について事例的に紹介する。

キーワード パイロット事業、地質調査、設計

1. はじめに

和歌山県南部地域では、近い将来発生すると予想される南海トラフ大地震による津波の影響で、すさみ町から串本町を繋ぐ唯一の幹線道路が浸水し、通行不能になると予測されている。そこで、紀南河川国道事務所が進める一般国道42号すさみ串本道路は救命・救助及び復旧支援活動を支える「命の道」として一日も早い供用が望まれるところであり事業を進めている。

先に開通した紀勢自動車道では、**図-1** に示す写真のように、荒堀地区の切土工事施工中に調査・設計段階では予想していない法面崩壊が発生し、対策の実施等により工事費の増加や工事進捗の遅延が見られることがあった。

一方で、**図-2** に示す江住地区では、法面段数13段(高さ約90m)の大規模な切土であるため、高品質ポーリング等、詳細な調査・解析を行い施工を行った。

その結果、施工中に崩壊することはなく、現在も安定した法面を構築している。

荒堀地区のような箇所では一般的な調査・設計を行い施工を行った場合、崩壊が発生した一方で、条件が厳しくても詳細な調査・解析を行った箇所では、崩壊が発生しなかったことがわかる。このことから、詳細な調査を行い、地質の状況を把握することにより、対策を行うことができるものと考えられる。

図-1 で紹介した事例のような道路事業における地質や土質、地下水を素因として施工段階以降で生じる事象を「地質リスク」と捉まえ、当事務所では、一日も早い供用が望まれているすさみ串本道路において、紀勢自動車道施工中に生じたような現象を少しでも低減し事業を進めていくため、地質リスク検討業務を発注し、調査検討を行った。本論文では、その内容について事例的に紹介する。



図-1 紀勢自動車道荒堀地区の崩壊事例

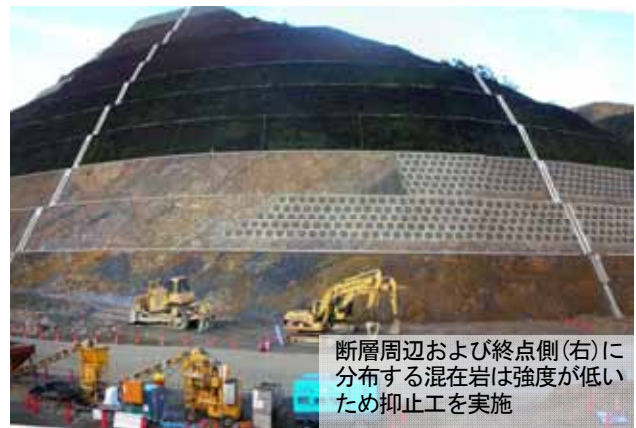


図-2 紀勢自動車道江住地区の法面对策状況(施工中)

2. すさみ串本道路の概要

すさみ串本道路は、すでに供用している近畿自動車道紀勢線に接続し、国道42号の和歌山県域における、異常気象時通行規制の解消、防災・災害時の代替道路確保等を主な目的とした延長19.2km、完成2車線の自動車専用道路であり、2014年4月に事業化された。災害復興に加えて、救急医療及び観光客活性化の面でも地元からの期待が高く、早期に開通が望まれる道路である。



図-3 すさみ串本道路位置図

3. 地質リスク検討業務について

地質リスクは、1. はじめに述べたように、工事段階において、地質や土質、地下水に起因した崩壊等の諸現象を起こしうるリスクである。設計、施工が進むにつれ、並行して調査や経過観察等により、そのリスクは変動する。

本検討は、幅杭設置位置を設定するために、構造形式を決定する予備調査・設計段階にあったすさみ串本道路において、現段階での地質リスクの抽出・検討を行い、今後の調査計画、詳細設計及び施工時への留意点をまとめたものである。結果として、想定されるリスクの最小化を目指し、リスク対応（保有、低減、回避、移転）を試行的に行うものである。図-4にすさみ串本道路での地質リスク検討業務を取り入れたフロー図を示す。

地質リスク検討の内容は主に以下に行った。

- (1) 既往の調査・事例による地形判読・分析
- (2) 現地調査
- (3) 地質リスク評価検討
- (4) 後続調査計画の立案

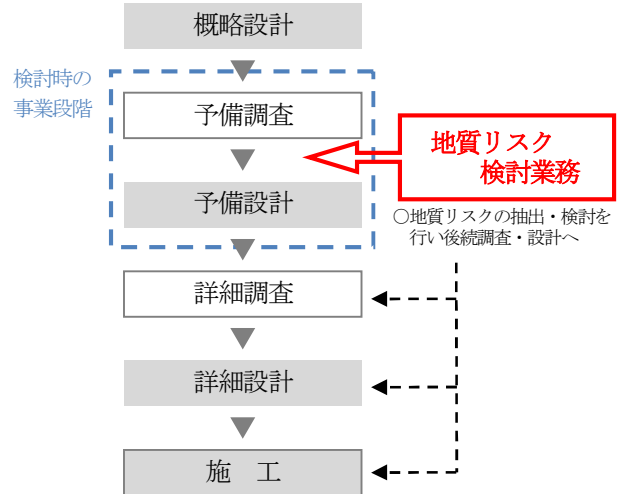


図-4 地質リスク検討業務を取り入れた流れ

4. 地質リスク要因の抽出・分析

(1) 近接道路の地質リスク発現事例の解析

今回、地質リスク検討業務を試行的に導入したすさみ串本道路事業計画箇所周辺では平成27年度に紀勢自動車道(田辺～すさみ区間)が供用している。紀勢自動車道では道路施工中に調査設計時に想定していない地すべり等が発生する事象が見られた。すさみ串本道路は紀勢自動車道と同様の地形地質を有することから、これらの地質リスクを踏まえた調査設計が必要と考えられる。特に、切土法面の変状は増工や工期の遅延を招くだけでなく、安全管理上も重要な課題となる。ここでは、周辺道路施工時に於ける切土法面の地質リスク発現事象について事例解析を行った結果を示す。

図-5に紀勢自動車道全94法面の地質構造別変状記録を示す。紀勢自動車道では全体の17%、16箇所に変状が記録されている。このうち14箇所は地質構造が流れ盤を呈する法面で発生しており、特に標準貫入試験が貫入不能となる岩盤中で発生したものが多く見られた。

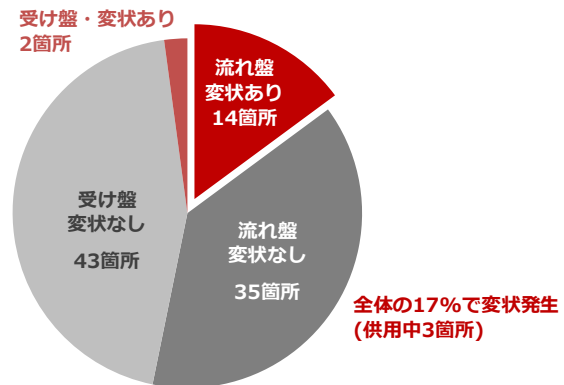


図-5 地質構造別変状記録

一方、受け盤の2箇所は、表層崩壊と断層が複数分布する脆弱部で発生している。また、地質構造が流れ盤構造を呈する法面における見かけ傾斜と変状箇所の関係を図-6に示す。変状箇所の見かけ傾斜は、10~20°と緩傾斜なものが最も多く9箇所となっている。

つづいて、図-7に紀勢自動車道の変状1箇所ずつのデータと田辺西BPや那智勝浦道路の変状事例を加えて、土質工学会(1976)²⁾による各崩壊事例における見かけ傾斜と法面傾斜の関係にプロットした。法面勾配1:1.2よりも急勾配の切土では、この事例と同様の結果を示すものの1:1.2より緩傾斜、特に見かけ傾斜20°以下の領域では、境界域や安全側の範囲で多くの変状が発生していることがわかる。次に、すべり面の性状と変状規模(切土段数)の関係を図-8に整理した。すべり面に断層破砕帯や層理面沿いの破砕泥岩が狭在する箇所は全28箇所中の18箇所であった。特に3段以上の変状のケースではすべて破砕帯等の狭在が確認されている。

これらのことから、切土時の地質リスク要因として下記に留意する必要があると考えた。

- ・土軟硬による評価のみでは地質構造的素因によるリスクを見逃す可能性が高い。
- ・見かけ傾斜が10~40°までの流れ盤構造を呈する法面では変状・崩壊のリスクが高い。
- ・特に破砕した泥岩や断層破砕帯を狭在する箇所は、法面勾配のみで対応できない可能性が高いため、抑止工の計画が必要となる。

以上より、切土法面の地質リスク抽出時は、①地質構造に着目して地表地質踏査を実施する必要がある、②破砕帯の狭在の有無に着目して調査を行い、その時点で確認できない部分については、後続調査計画に申し送りを行う必要がある。

(2)事業計画箇所の地質リスク要因の抽出

ローカルな地質リスク要因を漏れなく把握するため、事業計画箇所周辺の地形判読、地表地質踏査を行った。地形判読は、計画路線周辺のLPと空中写真を用いて、断層、地すべり地、崩壊地形、土石流、段丘面、植生、微地形、後背低地、自然堤防などの判読を行った。これらの地形情報を踏まえたうえで、地表地質踏査を行い、地すべりや断層の有無を確認した。

地表地質踏査は斜面部(切土)は尾根までとし、落石発生源の有無や土砂水の発生状況を確認した。谷部は土石流発生源の領域までとし、広域の地形解析の結果から、堆積物の性状を推定した。道路施工後に残る自然斜面についても、表層崩壊、頭部からの落石の可能性を確認のための踏査を実施した。また、露頭が不足する箇所では海岸露頭等の広域の情報を収集し、解析精度の向上を図った。

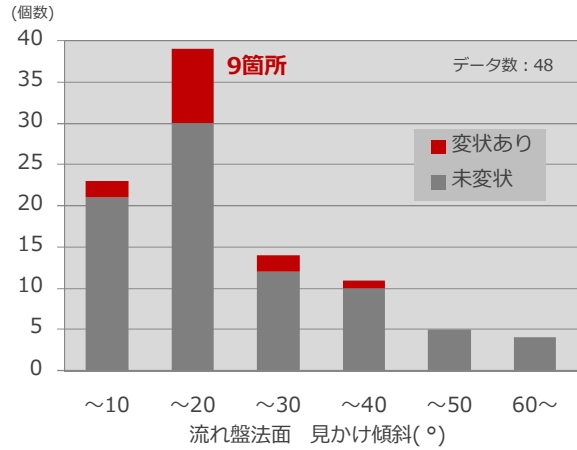
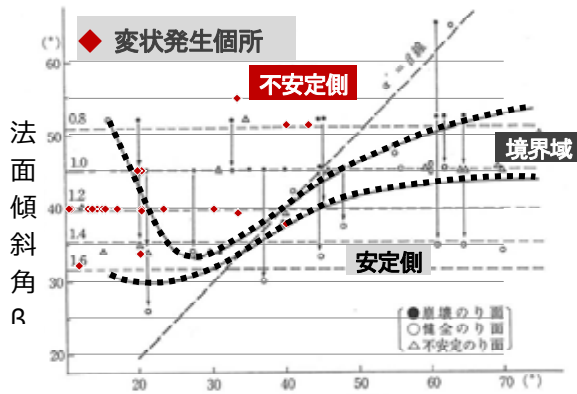


図-6 見かけ傾斜別変状記録



見かけ傾斜角α'

図-7 各崩壊事例における見かけ傾斜と法面傾斜の関係

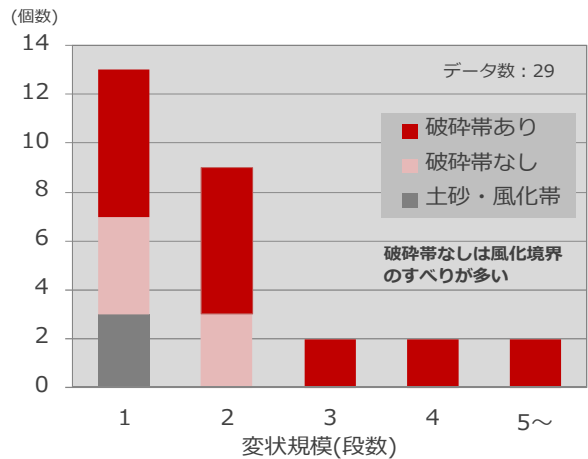


図-8 すべり面の性状と変状規模

事業計画箇所が発現する可能性がある地質リスク要因は、次の7つに大別して整理した。

- ①主に法面・自然斜面の不安定化に関わる事象
- ②主に土石流、土砂水流入に関わる事象
- ③落石に関わる事象
- ④主に支持地盤の不確実性に関わる事象
- ⑤主に沈下、液状化に関わる事象
- ⑥主に地下水、土壌汚染に関わる事象
- ⑦トンネル施工に関する特有の事象

5. 地質リスク対応方針の検討

本検討では、事業期間や事業費に多大な影響を与える可能性のある地質リスクに対しては早期にリスク対応方針を決めておき、リスクの分析による不確実性の評価と、優先度を定めることが重要となると考えた。

道路事業における地質リスク評価事例はほとんどないことから、一般的なリスクマネジメントの手法を取り入れ、既往文献¹⁾³⁾⁴⁾⁵⁾によるリスク評価手法を参考に、リスク対応策(保有、低減、回避)を作成した。

(1) リスクランクの設定

一般的なリスクマネジメントでは、リスクへの対応として「保有」「低減」「回避」「移転」がある。このうち、「移転」は保険を掛けるなどでの対応であり、PFI事業等を除けば道路事業への適用が難しいため、「保有」「削減」「回避」について表-1のとおり設定した。

本検討でのリスクランクは、できる限り客観的に定量評価するため、既往文献を参考として「影響度」×「発生確率」でマトリクス表を作成して評価を行うこととした。(表-2)。

(2) 影響度の設定

影響度は、土木学会の事例では「費用(コスト)」と「期間」で、地質リスク学会の事例では「衛生面と安全面」「イメージと世評」「環境」「利害関係者の関心」「コスト」「期間」で評価され、それぞれに点数が割り振られている。本業務では、紀勢自動車道(田辺～すさみ区間)、那智勝浦道路、周辺の道路維持管理の経験から「費用」「期間」「安全」「環境」の4項目について、既往文献を例に基本方針(めやす)を設定し、本検討での各事象(落石、崩壊、土石流、支持地盤の不確実性など)の閾値を設定し、検討を行った。

例えば、法面・自然斜面の不安定化に関わる事象では、法面が5段以上及び「コスト」として対策費が事務所発注上限額である3億円を超える場合は影響度を「大」とした。

(3) 発生確率の設定

発生確率は、土木学会の事例では「%」で、地質リスク学会の事例では「%」と「確率年」で評価されている。一方、%や確率年の設定は多くの事例が必要であり、現段階で本事業に合わせた解析は難しい。このため、本検討では、紀勢自動車道(田辺～すさみ区間)に加えて各事象における技術指針等を参考に、個別に発生確率を整理するものとした。

例えば、法面・自然斜面の不安定化に関わる事象では、3章に示した事例解析結果を踏まえ、地質構造が流れ盤で見かけ傾斜10~40°、破碎帯等の弱面を狭在する場合は発生確率を「大」とした。

表-1 本事業における地質リスクランクの定義

手法	リスクランク	想定事象と対応方針	発現事象の例
回避	AA	事象が発現した場合、通常計画可能な構造物や対策工による対応が困難。通常容認される以上の事業費がかかる。⇒路線を変更する等により回避する。	大規模な地すべりが発生し、通常計画可能な対策工での対応が困難になる。
低減	A	事象が発現した場合、構造形式の変更が必要となる場合や、安全性が著しく低下する可能性がある。⇒詳細な調査を実施して、完全なリスク低減を講じる。	支持層が予定より深く基礎形式が変更となる。 切土により地すべり(法面崩壊)が発生しグラウンドアンカー工が必要となる。
	B	事象が発現した場合、軽微な追加対策や、対策範囲の変更により対応できる。⇒通常の地質調査を行い、調査結果に応じて対策工を検討する。	軟弱地盤の範囲が予定より広くなり改良範囲が変更となる、 崖錐堆積物層の分布範囲が広くなり鉄筋挿入工の範囲が変更となる、
保有	C	事前の低減対策等の必要性が低いため、施工段階や維持管理段階にリスクを保有する。(構造物の規模が小さいものを含む)	擁壁基礎地盤に不陸があり置き換えにより対応した。 切土法面からの湧水が著しく認められたため、水抜きを行った。

表-2 リスクランク設定例
(主に法面・自然斜面の不安定化に関わる事象)

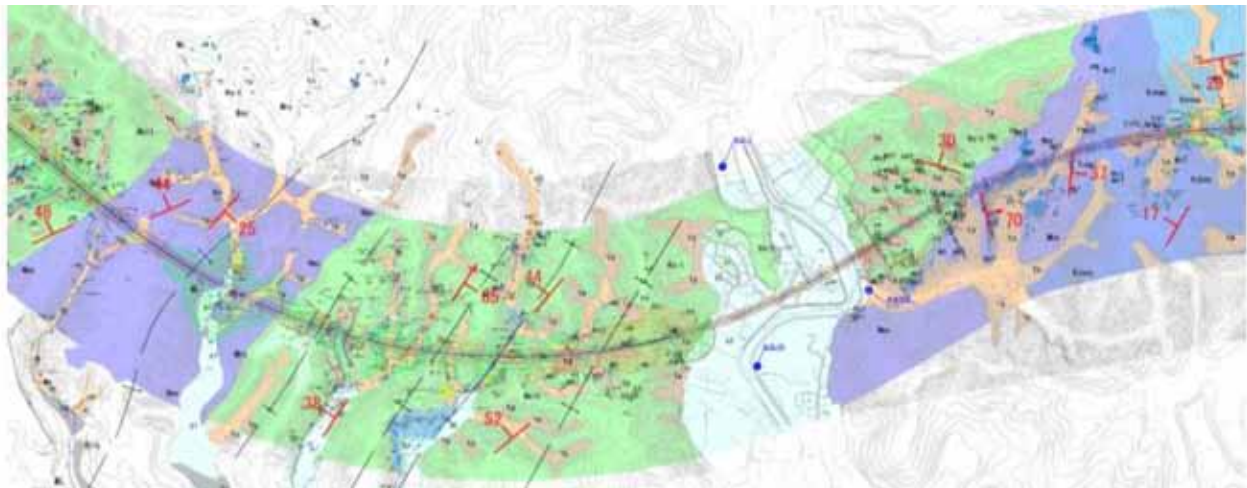
		発生確率		
		小	中	大
影響度	特大	B	A	AA
	大	B	B	A
	中	B	B	A
	小	C	B	B

6. 地質リスク評価結果

地質リスク評価結果は、地質リスク管理表として、地質図、地質リスク要因、発現事象、リスクランク、リスク措置計画等を一覧表として整理した(表-3)。並行して実施したボーリング調査の結果も踏まえ地質リスクを評価し、並行して実施した予備設計に反映した。例えば、トンネル坑口等で落石リスクが高い箇所は予備設計の中に落石対策工を計画し、必要な用地幅を設定した。また、切土法面の不安定化リスクが懸念される箇所では、法面勾配を1:1.2と緩く計画する等、地質リスク要因を盛り込んだ計画を策定した。なお、本検討の評価手法によると、影響度「特大」の箇所は見られず、リスクランク「回避:AA」の箇所はないと考えられる。

次に、すさみ串本道路(L=19.2km)の地質リスク要因別のリスクランクを表-4に示す。本検討の評価手法に基づくリスクランクAの箇所は14箇所あり、これらの箇所では事前に詳細な調査を実施して地質リスクを把握し、リスクランクを低減する必要があると考えられる。特に、法面・自然斜面のリスクランクAの8箇所はいずれも切土法面での流れ盤構造を素因とした地すべりリスクが高い箇所であり、紀勢自動車道での経験を踏まえ、対策が必要となる可能性が高いと考えられる。事前に変状を予測して予め対策を行うことにより、工事遅延、工事対策費の増加を防ぐことができると考える。

表-3 地質リスク管理表の例



構造物	切土(4段)	盛土(両盛7段)	切土(6段)
地質リスク要因	①浮石・転石(20cm~1m) (特に中央の沢状凹地) ②流れ盤構造	①軟弱地盤(沢部) ②上流沢部に酸性水	①流れ盤、ゆるみ
発現事象	①法面上部からの落石 ②法面崩壊	①盛土の沈下、横断管の破損 盛土のすべり ②地下水汚染	①法面崩壊(地すべり)
発生確率	①大(安定度2) ②中(見かけ傾斜35°)	①大(粘性土地盤有、湿地帯) ②中(赤水発生)	①大(見かけ傾斜16°)
影響度	①中(直接被災の可能性はあり) ②中(4段)	①中(高盛土) ②中(直接被害の可能性は小さい)	①大(長長大法面)
リスクランク	①B(落石調査) ②B(ボーリング)	①B(ボーリング) ②B(試験、モニタリング)	①A(詳細調査:高品質ボーリング、ポアホールカメラ)
リスク措置計画	①【設計】落石対策の検討 ※原位置対策が必要な巨石あり ②【調査】ボーリング調査により弱面の有無、構造を確認 【設計】法面対策の検討 【施工】法面観察により節理面等の不連続面を確認	①【調査】軟弱地盤の調査 ①【設計】基礎処理の検討 ※起点側袖部の沢状凹地もあり、十分な暗渠排水の設置が必要 ②汚染範囲の特定と、施工前からの環境モニタリングが必要	①【調査】詳細なボーリング調査により地質性状の確認 【設計】予備設計段階:軟岩の最緩傾斜1:1.2で計画 ※破砕帯等を挟在する場合は抑止対策が必要

表-4 地質リスク要因別リスクランク

リスク ランク	(単位:箇所)						合計
	法面・ 自然斜面	土石流	落石	支持地盤	沈下・ 液状化	地下水・ 土壌汚染	
A	8	0	4	0	0	2	14
B	96	13	24	50	19	27	229
C	39	2	16	22	11	12	102
合計	143	15	44	72	30	41	345

7. 後続調査計画

リスクランクは対策を行うことによりランクダウンを図る。例えば、切土による法面5段の崩壊が発生する可能性が考えられる場合(ランクA)は、グラウンドアンカー工などの対策を行うことにより、ランクダウン(C)を図れる。また、地表踏査の結果から地質構造等が予測しづらい法面では、後続調査による地質の確認により、ランクの見直しを行う必要がある。

切土や盛土区間のこれまでの地質調査は、ボーリングによる土軟硬確認に主眼が置かれることが多く、地質構造を踏まえた調査場所や方法を検討するプロセスは軽視されていた。地質リスク検討業務では、地質リスク評価の結果を踏まえ、構造物ごとに予想されるリスクを踏まえた調査地点・方法を提案する。

図-9に長大切土法面での後続調査計画例を示す。この法面では、地表地質踏査の結果により熊野層群の砂泥互層(泥勝ち互層)の層理面が南東傾斜で出現することが想定される。露頭の一部では層理面沿いに破砕帯を狭在しており、北側の法面では見かけ傾斜が16°前後の流れ盤構造を呈することが予想される。

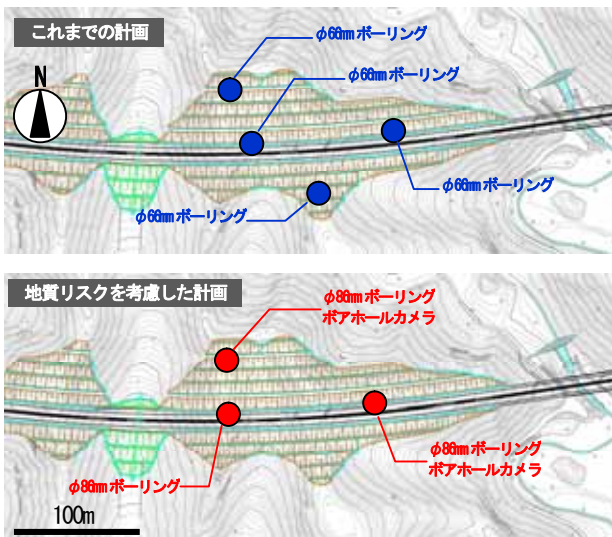


図-9 長大切土法面での後続調査計画例

当初の調査計画では北側南側ともに長大切土となること、切土区間の延長が100mを超えることから4箇所程度のボーリング調査を計画していたが、地質リスク評価を踏まえた後続調査計画では、周辺の熊野層群の地質構造は連続性がよく、南側の法面が緩傾斜の受け盤構造となる可能性は極めて高いことから、南側のボーリングを省略できると判断した。一方、北側の法面では、道路土工指針等に示される詳細調査項目の高品質ボーリング(φ86mm)とボアホールカメラ(孔内画像撮影)を実施することにより見かけ傾斜の取得と弱面の有無を確認する計画した。これにより、コストを縮減した上で、対策工検討に必要な地質地盤情報を取得することができる。

8. おわりに

一旦地質リスクが発現すると、その規模によっては事業全体の見直しや大幅な変更が必要なケースも少なくない。

例えば、道路土工 切土工・斜面安定工指針(平成21年度版)には、すべりの可能性がある場合は「詳細な調査が必要」とされている。しかし、これまでの地質調査や設計業務プロセスでは詳細な調査が必要な箇所を抽出したり、対応優先度を決定するプロセスが軽視されていた。

本業務では、すさみ串本道路の全線に渡り、地質リスクに対する検討を試行的に行った。今後、調査-設計-施工-維持管理と移行する各段階において検討を行った箇所の状況・影響等を確認し、本検討が有効なものであったのかを検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：道路事業におけるリスクマネジメントマニュアル(Ver. 1), 2010. 3
- 2) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー12 切土ノリ面, 1998. 12
- 3) 地質リスク学会：地質リスクマネジメント体系化委員会報告書, 2014. 12
- 4) 地質リスク学会・一般社団法人全国地質調査業協会連合会：地質リスクマネジメント入門, 2010. 4
- 5) C. R. I. Clayton：ジオリスクマネジメント-地質リスクマネジメントによる建設工事の生産性向上とコスト縮減-, 英国土木学会(編集)全国地質調査業協会連合会(翻訳), 古今書院, 2016. 12

環境DNAによるヨシ帯の モニタリングについて

後藤 彦幸¹・帰山 淳²

¹近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 河川環境課 (〒520-2279 滋賀県大津市黒津 4-5-1)

²近畿地方整備局 九頭竜川ダム総合管理事務所 真名川ダム管理支所 (〒912-0423 福井県大野市下若生子 25-1-36)

近年、個体を捕獲せずに魚類の生息状況を把握する新たな手法として環境 DNA 分析が注目されている。自然再生事業の順応的管理として、市民と連携したモニタリング調査が行われている滋賀県・野洲川河口部に再生されたヨシ帯を調査地として、「河川水辺の国勢調査マニュアル」に準拠した採捕調査によって確認される魚種と環境 DNA 分析により検出される魚種を比較することで、魚類相調査における環境 DNA 分析の性能評価を行った。その結果、総種数、重要な種数、特定外来種の種数のいずれでも、環境 DNA 分析による確認種数は、捕獲確認による確認種数を上回り、環境 DNA 分析が魚類相を把握する強力なツールとなりうる可能性が示された。

キーワード ヨシ帯, 環境 DNA, 魚類相, モニタリング, 河川水辺の国勢調査, 性能評価

1. はじめに

近年、個体を捕獲せずに、水域の生物の生息状況を把握する新たな手法として環境 DNA 分析が注目されている¹⁾。環境 DNA 分析による調査は、現地調査は採水のみであるため、専門的なスキルが必要とされる従来の採捕調査と比較して、調査結果が調査員の技能に依存しないことが期待されることから、市民が参加する調査での利用も検討されつつある²⁾。

一方で、環境アセスメント等で実施されている従来の標準的な採捕による調査手法と、環境 DNA 分析による生物の検出力を比較した事例が少ない。そこで、自然再生事業の順応的管理としてモニタリング調査の簡易手法を検討している滋賀県・野洲川河口部に再生されたヨシ帯を調査地として、従来の標準手法である「河川水辺の国勢調査マニュアル」に準拠した採捕調査によって確認される魚種と環境 DNA 分析により検出される魚種を比較し、環境 DNA 分析の魚類相調査における性能評価を行った。

2. 方法

(1) 捕獲調査

捕獲調査は、2016年の夏季(7月28日~29日)及び秋季(10月12日~13日)に、琵琶湖に流入する一級河川である野洲川の河口の両岸、約360m区間で実施した(図-1)。

調査範囲は、河川水辺の国勢調査の調査地点でもあり、「河川水辺の国勢調査マニュアル」(以下、水国マニュアル)に準拠した採捕調査が経年的に実施されている。本調査でも同様にタモ網、投網、定置網、刺網、はえなわ、どう、地曳き網、カゴ網、セルビンを使用した捕獲調査を、マニュアルに準拠した努力量で行った(表-1)。

(2) 環境 DNA 分析

a) 環境 DNA 試料の採水

各季に実施した採捕調査の初日(調査開始前)に、環境 DNA 分析のため、1検体あたり1Lの表層水をポリエチレン製容器に採水した。野洲川河口左右岸で、ヨシ帯の水際(植生外)5箇所各1検体(合計10検体)の採水を行った(図-1)。

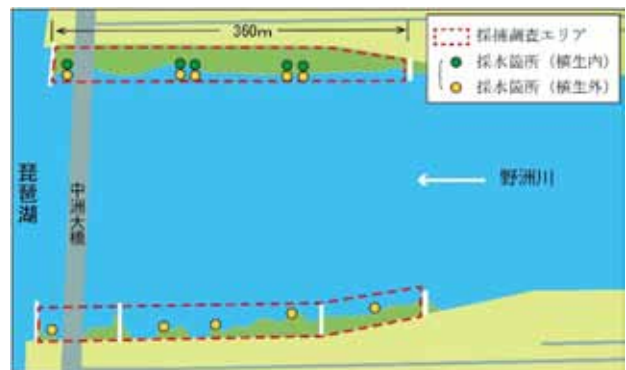


図-1 捕獲調査範囲と採水箇所の配置

表-1 使用漁具の仕様と努力量

漁具・漁法	規格	努力量
タモ網	袋網は目合いが 2mm 程度	1人×60分 (／岸)
投網	目合 12mm	10投 (／岸)
	目合 18mm	10投 (／岸)
定置網 (大)	袖部 3m×2m 目合 12mm わたり目合 12mm 袋部径 60cm (3段) 目合モジ 7mm	1張り×一晚設置 (／岸)
刺網 (一枚網)	目合 15~20mm 丈 1~2m 長さ 20~30m	1張り×一晚設置 (／岸)
刺網 (三枚網)	内目 40~50mm 外目 200~250mm 丈 1m 長さ 20~30m	1張り×一晚設置 (／岸)
はえなわ	幹縄 20m 針 10本 小魚等を餌として使用	1張り×一晚設置 (／岸)
どう	径 10cm×60cm 程度 小魚等の餌を入れて使用	2統×一晚設置 (／岸)
地曳き網	袖部 3m×50cm 目合 3mm	1回×5m 程度 (／岸)
カゴ網	25cm×25cm×35cm 程度 さなぎ粉等の餌を入れて使用	3個×120分設置 (／岸)
セルびん	直径 18cm 長さ 25~30cm さなぎ粉等の餌を入れて使用	3個×120分設置 (／岸)

b) DNA 分析

採水した試料水は、採水から 24 時間以内に濾過・冷凍し、分析時まで-20℃以下で保存した。

試料に含まれる魚類のミトコンドリア 12SrRNA の遺伝子を対象として、ユニバーサルプライマー MiFish³⁾により約 172 塩基対の領域を増幅後、次世代シーケンサーを用いて配列を決定し、データ・ベースと照合し 97%以上の相同性を基準として同定し、魚種の検出を行った。

3. 結果

(1) 確認状況

a) 捕獲調査

調査の結果、右岸では 4 目 6 科 15 種、左岸では 3 目 5 科 16 種、両岸を併せた、野洲川河口全体では、4 目 6 科 18 種の魚類が確認された (表-2)。主に、琵琶湖に流入する河川の中流域から下流域、及び琵琶湖沿岸に見られる種が確認された。

個体数として最も多かったのはカネヒラで、合計 355 個体が確認された。次いで多かったのはニゴイ属 (323 個体)、オイカワ (197 個体)、ブルーギル (110 個体)、オオクチバス (75 個体) で、これら 5 種 (分類群) で、全捕獲個体数の 80%以上を占めた。

b) 環境 DNA 分析

次世代シーケンサーを用いた環境 DNA 分析では、4 目 9 科 32 種の魚種が検出された (表-2)。

琵琶湖に流入する河川の中流域から下流域、及び琵琶湖沿岸に生息している種が網羅的に検出された。

捕獲調査のみで確認された種は、ヤリタナゴ 1 種であったが、環境 DNA 分析のみで検出された魚類は、16 種 (フナ属を除く) であった。分類群 (科) 単位で見ると、いずれの分類群 (科) でも環境 DNA 分

表-2 採捕調査及び環境 DNA 分析による確認状況

水国 No.	種名	夏季		秋季		2季	
		環境DNA	捕獲	環境DNA	捕獲	環境DNA	捕獲
1	コイ	○	●	○	●	○	●
2	ゲンゴロウブナ	○		○		○	
3	ニゴロブナ	○		○		○	
4	キンギョ	○		○		○	
	フナ属		●		●		●
5	ヤリタナゴ				●		●
6	カネヒラ	○	●	○	●	○	●
7	ハス	○		○	●	○	●
8	オイカワ	○	●	○	●	○	●
9	カワムツ			○		○	
10	モツゴ	○	●	○	●	○	●
11	ビワヒガイ			○		○	
12	タモロコ			○		○	
13	ゼゼラ	○				○	
14	カマツカ	○		○	●	○	●
	カマツカ属			○		○	
15	ズナガニゴイ			○		○	
16	コウライニゴイ	○	●	○	●	○	●
	ニゴイ属		●		●		●
17	コウライモロコ	○		○		○	
	スゴモロコ類	○	●	○	●	○	●
18	ドジョウ	○				○	
	ドジョウ属	○		○		○	
19	アジメドジョウ			○		○	
20	シマドジョウ属			○		○	
21	ナマス	○		○	●	○	●
22	アユ		●		●	○	●
23	ビワマス			○		○	
24	オヤニラミ	○		○		○	
25	ブルーギル		●		●		●
26	オオクチバス		●		●		●
27	コクチバス	○		○		○	
28	ウキゴリ		●		○		○
29	イサザ	○				○	
	ウキゴリ属		●				●
30	ヨシノボリ属	○	●	○	●	○	●
31	ヌマチチブ	○	●	○	●	○	●
	ハゼ科		●				●
32	ドンコ			○		○	
33	カムルチー	○	●	○	●	○	●
計	33種	24種	14種	30種	17種	32種	18種

析によって、捕獲調査による確認種数と同程度か、より多くの種数が検出された (表-3)。特にコイ科では、捕獲調査と比較して 5~6 種、多く検出された。

捕獲調査では魚類を外部形態で分類するため、主要な分類形質が発達していない仔稚魚についてはコイ科やフナ属と記録することが多いが、環境 DNA 分析の場合には、基本的に種まで同定が可能である。

表-3 分類群別確認状況

分類群 (科)	夏季		秋季		合計		内容
	環境DNA	採捕	環境DNA	採捕	環境DNA	採捕	
コイ科	12	7	15	10	16	10	
コイ科 (ドジョウ類)	1	0	3	0	3	0	
ナマズ科	1	0	1	1	1 ^b	1 ^b	b. ナマズ
アユ科	1	1	1	1	1 ^d	1 ^d	d. アユ
サケ科	0	0	1	0	1 ^e	0	e. ビワマス
ケツギョ科	1	0	1	0	1 ^f	0	f. オヤニラミ
サンフィッシュ科	3	2	3	2	3 ^g	2 ^h	g. オオクチバス、コクチバス、ブルーギル h. オオクチバス、ブルーギル
ハゼ科	4	3	3	2	4	3	
ドンコ科	0	0	1	0	1 ⁱ	0	i. ドンコ
タイワンドジョウ科	1	1	1	1	1 ^j	1 ^j	j. カムルチー
合計	24種	14種	30種	17種	32種	18種	-

表-4 重要種の確認状況

No.	目名	科名	種名	環境DNA				捕獲調査		環境省 RL	滋賀県 RDB	外来 生物法
				野洲川河口		新庄大橋		野洲川河口	野洲川河口			
				夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季			
1	コイ	コイ	コイ	○	○	○	○	○	○	LP ^{注2}	希少 ^{注2}	
2			ゲンゴロウブナ	○	○					EN	希少	
3			ニゴロブナ	○	○		○			EN	希少	
			フナ属					○	○	注	注	
4			ヤリタナゴ						○	NT	危増	
5			カネヒラ	○	○			○	○		危増	
6			ハス	○	○	○			○	VU	希少	
7			ヌマムツ				○				分布	
8			モツゴ	○	○			○	○		希少	
9			ビワヒガイ		○						希少	
10			ゼゼラ	○						VU	希少	
11			ズナガニゴイ		○		○				危増	
12			コウライニゴイ	○	○	○	○	○	○		要注	
13			ドジョウ	○						DD	要注	
14			アジメドジョウ		○					VU	希少	
15	ナマズ	ナマズ	ナマズ	○	○	○			○		要注	
16	サケ	アユ	アユ	○	○	○	○	○	○		分布	
17		サケ	ビワマス		○		○			NT	要注	
18	スズキ	サンフィッシュ	ブルーギル	●	●			●	●			特定
19			オオクチバス	●	●		●	●	●			特定
20			コクチバス	●	●							特定
21		ハゼ	イサザ	○						CR	危惧	
22		ドンコ	ドンコ		○		○				その他	
計	4目7科22種		重要種	12種	14種	5種	8種	5種	8種	10種	19種	3種
				17種	10種	8種						
			特定外来生物	3種	3種	0種	1種	2種	2種			
			3種	1種	2種							

表-5 確認種数の比較

項目	捕獲調査	環境 DNA
確認種数	18 種	32 種
希少種	8 種	17 種
特定外来生物	2 種	3 種

c) 希少種の確認状況

環境 DNA 分析により検出された重要種は、ゲンゴロウブナ、カネヒラ、ハス、ナマズなど夏季・秋季を通じて合計 17 種であった。

一方、捕獲調査ではヤリタナゴ、ナマズ、アユなど 8 種が確認された (表-4)。確認された 8 種のうち、ヤリタナゴを除く 7 種は、環境 DNA 分析でも検出された。

環境 DNA 分析では、捕獲調査で確認されていない

重要種として、ビワヒガイ、ゼゼラ、ズナガニゴイ、ドジョウ、アジメドジョウ、ビワマス、イサザ、ドンコを検出した。

d) 特定外来生物の確認状況

捕獲調査ではブルーギル及びオオクチバスの 2 種が確認された (表-4)。

一方、環境 DNA 分析では、捕獲調査で確認されたブルーギル、オオクチバスに加えて、コクチバスが検出された。

以上、捕獲調査、及び環境 DNA 分析で確認された総種数、希少種の種数、特定外来生物の種数は表-5 のとおりである。総種数、重要な種数、特定外来種の種数のいずれでも、環境 DNA 分析による検出種数は、捕獲調査による確認種数を上回った。

(2) 魚類相調査における採水地点数の検討

季節別・左右岸別の捕獲調査による確認種数は、表-6 のとおりである。

季節別・左右岸別に集計した、環境 DNA 分析による 1 検体（ヨシ帯外側の検体）あたりの平均検出種数は 13.1 種であり、捕獲確認種数（全ての漁法による確認種数：平均 11.8 種）より多い値となった。

ただし、従来の漁獲手法に代替可能な手法としての環境 DNA 分析による検出効果を評価するために、環境 DNA 分析による確認種が、捕獲確認された魚種のどれくらいの割合を検出しているか（捕獲種適合率）をみると、1 検体あたりで平均 68.3%（最大 82.0%、最小 58.5%）であった。

本業務では、右岸・左岸のヨシ帯の外側で各 5 検体を採水しており、5 検体に含まれる種を合わせた捕獲種適合率は、平均 87.2%（最大 100%、最小 76.9%）であった。さらに、右岸では補足的にヨシ帯の内側でも採水していたことから、ヨシ帯の内側の検体を加えた合計 10 検体に含まれる捕獲種適合率をみると、平均 90.5%（夏季 90.0%、秋季：90.9%）を検出していた。

1 検体平均の捕獲種適合率が 68.3%であり、5 検体で 87.2%、10 検体で 90.5%に達することから、この間の増加を対数モデルで近似すると図-2 のようになる。この推定に基づけば、野洲川河口ヨシ帯の左右岸スケールの魚類相については、1Lの採水容器 3 検体程度の環境 DNA を分析することにより、従来の漁獲調査で確認できる魚種の 80%を網羅する種を検出することが期待できる。

また、5 検体から 10 検体に増加することで、捕獲種適合率について 3.3%の上昇が期待されるが、これは実質的に 1 種数の増加にとどまっており、5 検体より多い検体数による適合率向上の効果は限定的であると考えられる。

(3) ヨシ帯の内側と外側で検出される種の比較

多くの種で、夏季・秋季のいずれかの季節ではヨ

シ帯の内外いずれでも確認されていたが、ビワヒガイ、タモロコなど 9 種は、両季を通じて、ヨシ帯の内外いずれかのみで検出された（表-7）。

このうち、ヨシ帯の外側でのみ検出されたのは、ビワヒガイ、タモロコ、ズナガニゴイ、スゴモロコ類、アジメドジョウ、シマドジョウ属、コクチバスであった。一方、ドジョウおよびイサザは、ヨシ帯の内側でのみ検出された。

外側でのみ検出された種には、ビワヒガイ、ズナガニゴイ、シマドジョウ属、コクチバスなど、主に砂～砂礫底で、比較的、流れのある開放水面側の環境を好む種が多く含まれている。また、採水箇所はヨシ帯の外側ではあるが、抽水植物の近傍であったことから、タモロコやスゴモロコ類等の生息環境の付近であり、採水環境と検出された種は概ね整合的であるといえる。また、止水の泥底環境を好む種であるドジョウはヨシ帯の内側でのみ確認されており、ドジョウについても、生息環境と採水箇所の環境は整合的であるといえる。

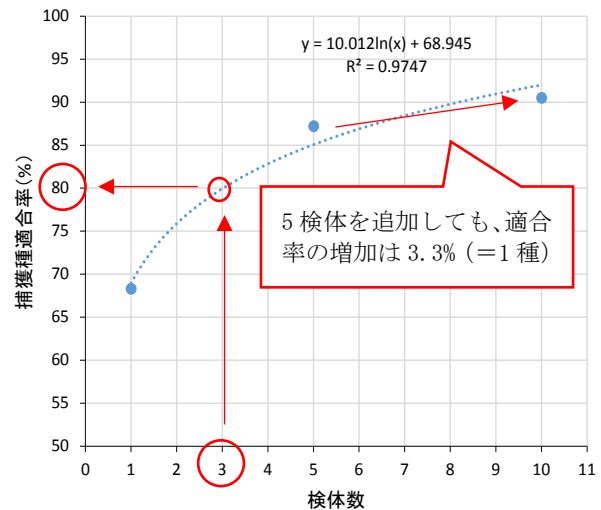


図-2 検体数の増加の効果に関する対数モデル

表-6 季節別の検出種及び捕獲確認種

項目	夏		秋		平均
	右岸	左岸	右岸	左岸	
捕獲確認種数	10 種	13 種	11 種	13 種	11.8 種
環境 DNA 分析による 1 検体あたりの平均検出種数(ヨシ帯外側の検体)	15.2 種	10.2 種	13.2 種	13.6 種	13.1 種
1 検体平均・捕獲種適合率 ⁽¹⁾	82.0%	58.5%	63.6%	69.2%	68.3%
5 検体に含まれる捕獲確認種数	9 種	10 種	9 種	13 種	10.3 種
5 検体合計・捕獲種適合率 ⁽²⁾	90.0%	76.9%	81.8%	100%	87.2%
ヨシ帯内側を含めた 10 検体に含まれる捕獲確認種数 ⁽³⁾	9 種	-	10 種	-	9.5 種
ヨシ帯内側を含めた 10 検体合計・捕獲種適合率 ⁽⁴⁾	90.0%	-	90.9%	-	90.5%

(4) 種別の検出箇所数の季節変化

環境 DNA で検出された種が、各調査時期にどれくらいの箇所で検出されたかを、表-8 に示した。

表では、右岸のヨシ帯外側 5 箇所、ヨシ帯内側の 5 箇所、左岸のヨシ帯外側 5 箇所を単位として、それぞれの種が、5 箇所中の何箇所かで検出されたかを検出箇所の割合として整理し、以下の 3 階級で整理した。

- ・青色：5 箇所中 4~5 箇所検出
- ・黄色：5 箇所中 2~3 箇所検出
- ・薄赤色：5 箇所中の 0~1 箇所検出

秋季は確認種数が多いが、秋のみに確認された種であるビワヒガイ、タモロコ、ズナガニゴイ、アジメドジョウ等は 1 箇所での検出、カワムツは 3 箇所での検出と、検出箇所数が少なかった

一方、ビワマスについては、秋季に全ての検体で検出された。

コイ・フナ類をみると、コイは、夏・秋季いずれも多くの箇所で検出されたが、ゲンゴロウブナとニ

ゴロブナは、夏季には多くの箇所で確認されたが、秋季は確認箇所数が少なかった。

以上の結果から、注目種であるコイ・フナ類や、秋季のみに検出された種について、秋季の検出箇所数は少なく、安定して検出されるかどうかには不確実性が残る。調査結果の安定性の観点からは、夏季調査と秋季調査の両季で調査を実施することが望ましいと考えられる。

表-7 ヨシ帯の外側のみ、または内側のみで検出された種

種名	夏季		秋季	
	外側	内側	外側	内側
ビワヒガイ			1	
タモロコ			2	
ズナガニゴイ			2	
スゴモロコ類	2		1	
ドジョウ		1		
アジメドジョウ			1	
シマドジョウ属			1	
コクチバス	1		1	
イサザ		1		

表-8 ヨシ帯種別の検出箇所数の季節変化

確認種	検出箇所数						検出箇所の割合 (%)								ヨシ帯外側 検出箇所数	
	右岸			左岸			右岸				左岸					
	ヨシ帯外側		ヨシ帯内側	ヨシ帯外側			ヨシ帯外側		ヨシ帯内側		ヨシ帯外側					
	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季		
コイ	5	4	4	3	3	3	100	80	80	60	60	60	5	4		
ゲンゴロウブナ	4	0	3	1	3	0	80	0	60	20	60	0	4	1		
ニゴロブナ	5	0	5	1	3	0	100	0	100	20	60	0	5	1		
キンギョ	5	1	5	0	3	2	100	20	100	0	60	40	5	2		
カネヒラ	5	5	4	5	5	5	100	100	80	100	100	100	5	5		
ハス	5	1	1	0	5	4	100	20	20	0	100	80	5	4		
オイカワ	4	5	0	5	4	5	80	100	0	100	80	100	4	5		
カワムツ	0	2	0	3	0	1	0	40	0	60	0	20	0	3		
モツゴ	0	0	1	1	1	0	0	0	20	20	20	0	1	1		
ビワヒガイ	0	1	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	1		
タモロコ	0	1	0	0	0	1	0	20	0	0	0	20	0	1		
ゼゼラ	3	0	1	0	0	0	60	0	20	0	0	0	3	0		
カマツカ	2	3	1	2	0	5	40	60	20	40	0	100	2	5		
カマツカ属	0	2	0	1	0	0	0	40	0	20	0	0	0	2		
ズナガニゴイ	0	1	0	0	0	1	0	20	0	0	0	20	0	1		
コウライニゴイ	5	5	4	5	5	5	100	100	80	100	100	100	5	5		
コウライモロコ	5	2	0	2	1	2	100	40	0	40	20	40	5	2		
スゴモロコ類	2	0	0	0	0	1	40	0	0	0	0	20	2	1		
ドジョウ	0	0	1	0	0	0	0	0	20	0	0	0	1	0		
ドジョウ属	0	0	3	1	0	1	0	0	60	20	0	20	3	1		
アジメドジョウ	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	20	0	1		
シマドジョウ属	0	1	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	1		
ナマズ	1	0	0	1	0	1	20	0	0	20	0	20	1	1		
アユ	0	5	1	5	0	5	0	100	20	100	0	100	1	5		
ビワマス	0	5	0	5	0	5	0	100	0	100	0	100	0	5		
オヤニラミ	1	2	1	1	0	0	20	40	20	20	0	0	1	2		
ブルーギル	5	3	5	3	2	3	100	60	100	60	40	60	5	3		
オオクチバス	5	4	3	5	5	3	100	80	60	100	100	60	5	5		
コクチバス	1	1	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	1	1		
ヨシノボリ属	5	5	5	5	5	5	100	100	100	100	100	100	5	5		
ヌマチチブ	5	5	5	5	5	5	100	100	100	100	100	100	5	5		
ウキゴリ	3	4	1	3	0	3	60	80	20	60	0	60	3	4		
イサザ	0	0	1	0	0	0	0	0	20	0	0	0	1	0		
ドンコ	0	1	0	1	0	0	0	20	0	20	0	0	0	1		
カムルチー	2	1	2	3	1	0	40	20	40	60	20	0	2	3		

4. 考察

夏季調査では、環境 DNA 分析で検出された 24 種に、捕獲調査で確認された 14 種全てが含まれていた。秋季調査では、環境 DNA 分析で検出された 30 種に、捕獲調査で確認された 17 種のうち、ヤリタナを除く 16 種が含まれていた。以上の結果から、野洲川河口で捕獲確認された魚種は、概ね環境 DNA 分析で網羅的に検出されていたといえる。

また、環境 DNA 分析は、希少種の検出及び特定外来種についても、従来の採捕調査を上回る種数を検出しており、MiFish を用いたメタバーコーディングによる手法が、淡水魚類について高い検出力を持つことが示された。

以上の結果は、野洲川河口で自然再生事業の順応的管理として行われている魚類のモニタリングの場で、環境 DNA 分析の手法が、ヨシ帯を利用している魚種を把握する手法としての利用可能性を示すものである。また、魚類相把握を目的とした環境 DNA 分析用の試料としては、片岸で 5 検体程度の試料数が目安になると考えられる。

季節別での確認状況を見ると、捕獲調査と環境 DNA 分析のいずれでも、秋季の確認種数が多い傾向がみられ、特に、環境 DNA 分析では、秋季調査のみで、夏・秋季の合計の検出種（32 種）のうち 30 種（約 94%）の種が確認できている。ただし、秋季のみに確認された種であるビワヒガイ、タモロコ、アジメドジョウ等は 1 箇所での検出、カワムツは 3 箇所での検出と、検出箇所数が少なかった。コイ・フナ類をみると、コイは、夏・秋季いずれも多く箇所で検出された。ゲンゴロウブナとニゴロブナは、夏季には多くの箇所で確認されたが、秋季は確認箇所数が少なかった。

一方、ビワマスについては、湖の深層に生息する夏季には確認されなかったが、遡上・産卵期の秋季には全ての検体で検出された。

コイ・フナ類や秋季のみに検出された種について、秋季の検出箇所数は少なく、安定して検出されるかどうかにかかわらず不確実性が残ることや、生活史の一時期を

河川で過ごす種がいることから、野洲川河口域の魚類相を環境 DNA 分析により網羅的に検出するためには、複数の季節で調査を実施することが望ましいと考えられる。

一方、河川のような開放水域では、調査地点で捕捉された環境 DNA が、上流から流入してきた分子である可能性があり、検出されても、必ずしも採水箇所を検出された魚種が生息していることを示すものではない。環境 DNA の流下過程における分散や河床への捕捉、及び時間経過に伴う分解等による環境 DNA 濃度の減衰と検出限界の関係については、今後、さらに知見を深めていく必要がある。

謝辞： 調査業務を行ったパシフィックコンサルタンツ(株)、DNA 分析で専門的なご助言をいただいた兵庫県立大学大学院の土居准教授に謝意を表す。

参考文献

- 1) Minamoto T, Yamanaka H, Takahara T, Honjo MN, Kawabata Z. (2012) Surveillance of fish species composition using environmental DNA. *Limnology* 13: 193-197. doi:10.1007/s10201-011-0362-4
- 2) Biggsa J, Ewald N, Valentinib A, Gaboriaudb C, Dejeanb T, Griffithsc RA, Fosterd J, Wilkinsond JW, Arnelld A, Brothertone P, Williams P. (2015) Using eDNA to develop a national citizen science-based monitoring programme for the great crested newt (*Triturus cristatus*). *Biological Conservation* 183:19-28.
- 3) Miya M, Sato Y, Fukunaga T, Sado T, J. Poulsen JY, Sato K, Minamoto T, Yamamoto S, Yamanaka H, Araki H, Kondoh M, Iwasaki W. (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. *Royal Society open science*. DOI: 10.1098/rsos.150088

GPSアンテナ搭載UAV（小型無人航空機）の 写真測量による災害調査について

久堀 貴史

和歌山県 日高振興局 建設部 河港課（〒644-0011和歌山県御坊市湯川町財部651）

要旨：和歌山県県土整備部（土木部署）では、斜面崩壊等大規模災害発生時における円滑かつ効率的な被害調査を目的に、小型無人航空機（以下：「UAV」）を導入した。本稿では、災害現場におけるUAVを活用した調査実績からUAV活用に関する有効性や課題について記述する。

キーワード：UAV（小型無人航空機），写真測量, ダム流木調査

1.UAV（小型無人航空機）導入の経緯等

(1) 導入機種及び台数

α UAV（製造会社：株式会社amuse oneself）1台



図-1 導入機種（α UAV）

(2) 導入時期

2015年 8月

(3) 導入の目的

本県において、2011年9月に発生した紀伊半島大水害では、大規模な斜面の崩壊や河川の氾濫により道路の通行止が多数発生するとともに、河川堤防の決壊・河道の埋塞、深層崩壊による土砂ダムの発生など県内全域に大きな災害が発生した。

当時、道路啓開の速やかな実施、堤防決壊・河道埋塞の緊急対応、土砂ダム等の二次被害防止対策を念頭に、早急な現地状況の把握が必要となった。しかし、斜面が不安定などの問題により、目視等地上から調査を行うにあたり、現地の安全性を判断しながら作業しなければならなかったため、調査に多くの時間を費やした。

このことより、安全性が確認できず地上からの調査が困難な箇所において、円滑かつ効率的な被害状況の把握を目的に、UAVを導入し、UAVが撮影する写真・動画

により斜面等の現地状況の把握を行うこととした。

また、UAVにより撮影した写真を基に、災害復旧工事に必要となる図面（地形図等）を作成し、早期の対策計画の立案や工事の実施を講じることも目的としている。

(4) 導入機種の特徴

本県が導入したUAVの特徴は、次のとおりである。

a) 8枚羽

飛行時の安定性が高く、万が一羽の一部が停止した場合にも墜落の危険性が少ない。

b) 操作の補助機能

操作しなくともその場で留まるホバリング機能があり、操作経験の少ない職員でも安全に操作することができる。

c) 緊急帰還機能

操縦機と機体の通信が途切れた場合、離陸した場所の上空まで自動で帰還する機能があり、機体の紛失等のリスクが小さい。

d) 自動飛行機能

全ての飛行を手動で操作するのではなく、事前に設定した飛行計画に基づき、自動飛行することが可能であり、安定した飛行が確保できるため、飛行の安全性が高い。

e) GPSアンテナ搭載

本県が導入したUAVには、写真・動画撮影を行うためのカメラの他、撮影した写真に世界測地の座標を持たせるためのGPSアンテナ及び装置の搭載が可能であり、写真測量を行うことが出来る。

写真測量で得た結果を、専用のシステムにより写真の合成及び図化作業のための解析をすることで、精度の良い3D画像や地形図等の作成が出来る。

作成した3D画像や地形図は、次ページ図-2のとおりである。

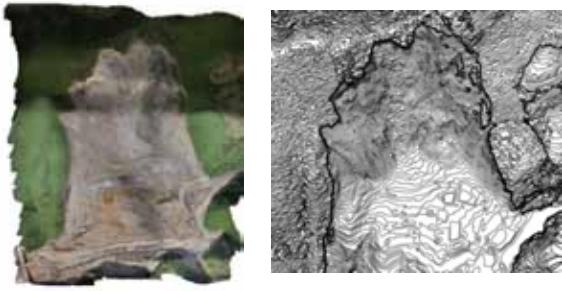


図-2 3D画像及び地形図

2. これまでのUAV活用の取組み

(1) 平常時

本県では、災害時において現地状況を速やかに把握し、早急な応急復旧など実施するため、職員自身がUAVを活用した調査を行えるようにしている。

平常時には、操作可能な職員の育成を図るための航空法に関する事項や図化演習・操作訓練等を定期的実施している。

操作訓練の状況は、図-3のとおりである。

(参考：操作訓練の講師は、操作経験の豊富な職員で対応。)

図-3 操作訓練状況



訓練の実績は、2015年9月～2017年3月までの間で、訓練を41回実施、延べ280人の職員が参加した。そのうち数名は、操作の熟度が一定のレベルまで達することができた。

現在も、操作できる職員の人員拡大並びに操作技術の更なる向上を目的に、訓練内容の充実を図りながら、訓練を実施している。

(2) 災害発生時の対応

災害発生時には、出先機関の建設部職員が現地に行き、UAVを活用した調査など行うこととしている。活用事例について、次章(3章)に記述する。

(3) その他

本県では、近い将来発生が想定されている南海トラフ地震等を想定した地震・津波に関する防災訓練「津波災害対応実践訓練」を実施している。

津波災害対応実践訓練では、県内各地において、国土交通省、市町村、消防、警察、自衛隊等の関係機関と連携し、道路啓開、避難・救助活動等の実演を実施している。

その一環として、UAVを活用した大規模災害の被害調査として、実際に深層崩壊により土砂ダムが発生した箇所(訓練時は対策工事を実施中)等で、UAVによる写真撮影を行うとともに(図-4参照)、撮影した写真から図化ソフトにより現地状況の図化訓練を実施している(図-5参照)。



図-4 防災訓練実施状況 その1



図-5 防災訓練実施状況 その2

3. UAVを活用した現地調査の実績

本章では、UAVを活用した調査実績を記述する。

(1) 実績の概要

a) 災害発生の要因となった気象

2016年9月18日～9月20日 台風16号及び豪雨

b) 調査の概要

台風によりダム貯水池に堆積した流木に関する調査

c) 調査箇所

2級河川 有田川
 県管理ダム施設 二川ダム
 (和歌山県有田郡有田川町二川地内)



図-6 調査箇所

のとおりである。

CADによる面積計算結果は、図-8のとおりである。

UAVの写真測量によって算出した流木の堆積量と、従来の人的な地上測量により算出した流木の堆積量を比較した結果は、表-1のとおりである。

各測量作業に要した時間の比較は、表-2のとおりである。



図-7 解析後画像

(2) 調査の目的

流木の堆積量を把握するために、従来の作業手法であるボートを使用した地上測量に対して、UAVの写真測量を活用した場合、作業の安全性・効率性や測量の精度など実用可能かどうか検討することを目的に調査を行った。

(3) 調査の手順

a) 事前準備

ダム施設上流湖に流れ出た木々を、管理船により1箇所に集積。

ダム施設周辺でのUAV自動飛行計画を作成。

(UAVに搭載できる電池は、0~2本あり、2本搭載で、1回あたり約20分の飛行が可能。)

今回の調査では、3回の飛行に分け、自動飛行計画を作成。

b) 現地調査

2016年10月12日、GPSアンテナ等をUAVに搭載し、電池交換を行いながら3回飛行させ、流木堆積面積の写真測量を実施。

(平行で、従来手法の人的によるトランシットを用いた測量も実施し、堆積面積の比較検討できるようにした。)

写真測量で得た結果を、専用のシステムにより合成及び解析することで、3D画像や地形図等の作成を行った。

作成した地形図を元にCAD (computer-aided design)

(以下: 「CAD」) により堆積面積を計算し、現地計測による厚さを乗じ、堆積量を算出した。

(4) 調査結果の整理

専用システム解析によって作成された画像は、図-7



図-8 求積図

表-1 流木堆積量の比較

測量手法	流木体積面積 (m ²)	流木体積 (m ³)
地上測量	6,080	851
UAV写真測量	6,120	857
差	40	6

表-2 測量作業時間の比較 (外業)

測量手法	作業時間 (時間)
地上測量	7
UAV写真測量	2
差	5

(5) 考察

今回のダム流木堆積の調査結果を整理すると、UAVの写真測量と、従来の測量からの堆積量算出結果の差は、6m³と全体の0.7%以下であり、高い精度を確保できた。

また、UAVの写真測量では測量作業時間が2時間であり、従来のトランシット測量等の地上測量と比べ5時間の作業時間短縮が可能であった。

今回のようなダムの流木堆積量算出において、流木は風の影響により、一度集積しても、すぐに散らばる問題があり、トランシット測量では時間を要するため、測量作業の手戻りが生じる可能性がある。しかし、UAVの写真測量は数時間の飛行で行うことができ、手戻りが無く、精度の良い結果が得られた。

このことより、UAVを活用した調査は、トランシット測量等地上測量が困難な場所においては、非常に円滑かつ効率的な測量手法であることが立証できた。

4. UAV活用の課題と対策

本章では、UAV活用に関する課題と対策について記述する。

(1) 課題

UAVによる現地調査の実績から、以下3点の課題が判明した。

a) 降雨や風速など気象に影響されやすい。

本県では、降雨時や風速が強い（地上風速5m/s以上）場合には、飛行させないこととしている。

今回の調査でも、気象条件が合わず、調査日を変更するなどの対応を行った。

b) 現地条件（地形等）に影響されやすい。

今回調査を行った場所は、山間部に位置するダム施設のため、山尾根が入り混じる地形条件であり、航空法に定めのある「目視ができる範囲での飛行」が可能な飛行ルートの確保が必要であった。このため、飛行ルートの設定には、事前に現地確認を行う等の準備が必要であった。

また、GPSデータの取得に関しても、山尾根が邪魔をし、GPSデータがうまく受信できず、受信を待つまで多少時間を要した。

c) 操作者の操作技術が大きく問われる

見通しの良い広い場所で飛行させるのではなく、限られたスペースで離着陸させなければならないことや、手動操作にて山尾根の影響の無い高度まで上昇させなければならない等、臨機に操作対応できなければならない。このため、操作者の操作経験の蓄積が重要である。

(2) 対策

UAVの写真測量による災害調査では、気象条件や現地条件により影響を受け易いため、臨機に操作対応できるように、操作者の技術力を養成すると共に、現場経験の蓄積が重要である。

このため、本県では平常からUAVを操作できる職員を育成するため、計画的に研修を実施するとともに、その内容の充実化に取り組んでいる。

研修は、二段階に分け、一段階目（初心者向け）では、座学や簡易に飛行できる場所での操作訓練を中心に実施している。二段階目（上級者向け）では、実際の災害調査を想定した飛行ルートの設定、被災箇所等での飛行実践や取得した写真データから連続写真図、平面図横断図作成など実施している。

一段階目に、操作できる職員の人員拡大を図り、二段階目で、操作技量の高い熟練者の育成を図っている。このことにより、各出先機関に操作熟練者を数名養成することで、災害時の対応に備えることとしている。

また、今後は平常時での研修だけでなく、例年発生している災害に対しても積極的にUAVを活用し、調査実績を増やしたい。より多くの災害現場で、UAVを活用することで、操作熟練者の現場経験の蓄積を図り、早期の被害状況の把握および災害復旧に繋げていきたい。

謝辞：本論文を最後までお読み頂きました方々に、厚く御礼申し上げますとともに、本論文作成にあたりご協力頂きました、株式会社amuse oneself関係各位に御礼申し上げます。



図-9 現地イメージ

ETC2.0プローブデータを活用した生活道路 における安全対策の取り組みの紹介について

岡部 浩司¹・武田 英夫²

¹近畿地方整備局 福井河川国道事務所 計画課 (〒918-8015 福井市花堂南2-14-7)

²近畿地方整備局 福井河川国道事務所 (〒918-8015 福井市花堂南2-14-7)

我が国の歩行中・自転車乗車中の死者数は、全交通事故死者数の約半数を占めており、そのうち約半数は、自宅から500m以内の身近な道路で発生している。このため、国土交通省では重点的に取り組むべき施策として「生活道路の交通安全の確保に向けた取り組み」を推進しているところである。今般、直轄国道に隣接する福井県小浜市内の松永地区において、生活道路の安全対策として既に取り組んでいるゾーン30の対策効果を、ビッグデータ（ETC2.0プローブデータ）を用いて検証を行い、また、その結果による対策として走行速度を低減する「ハンプ」の設置を行った取り組みを紹介する。

キーワード 生活道路の安全対策、ビッグデータの活用、地域住民との合意形成

1. はじめに

日本の交通事故死者数は、現在約4,000人（H27）であり、ピーク時の約1/4にまで減少した。特に自動車乗車中の死者数は、G7の中で最も少なくなっている。¹⁾

しかし、歩行中・自転車乗車中の死者数は、G7で最下位となっている。歩行中・自転車乗車中の死者数は、全交通事故死者数の約半数を占めており、そのうち約半数は、自宅から500m以内の身近な道路で発生している。

このため、国土交通省では、生産性革命プロジェクトとして、ビッグデータを活用して、生活道路における速度超過箇所や急ブレーキ多発箇所等の急所を事前に特定し、効果的な速度低減策である凸部（ハンプ）や狭窄などの設置の推進に取り組むことで、生活道路を歩車混在から歩行者中心の空間へ転換を推進しているところである。

平成27年12月に国土交通省道路局より「生活道路の交通安全の確保に向けた取り組みの推進について」の通知が出されるとともに、整備局等から、市町村に対して市町村道の死傷事故に関するメッシュデータ等の提供や対策エリアの登録の依頼を行ってきた。また、国は各市町からの要請に応じ、ETC2.0で収集したビッグデータ等を活用して、対策エリアにおける自動車の速度に関する情報や抜け道利用に関する情報、急挙動情報等を提供することにより、生活道路の効果的な交通安全対策を推進していくものとしている。

2. 生活道路におけるビッグデータを用いた分析

福井県内では生活道路エリア対策として10箇所が登録されており、いくつかの地区では登録時点で、既に区域内の最高時速を30km/hとする「ゾーン30」の指定をするなどの生活道路の安全対策に取り組みが始まっていた。このうち、福井河川国道事務所では技術支援の要請があり、直轄管理路線である国道27号からの流入車両があると考えられる小浜市の松永地区を先行して、ビッグデータによるエリア分析結果の提供と安全対策の技術支援を行うこととした。

小浜市松永地区は福井県嶺南地方の幹線道路である国道27号に隣接しており、国道に面した集落を縦貫する市道がある。地区内には小学校、保育園及び公民館が存在し、住民や児童の市道の利用者も少なくない。生活道路対策エリアの登録に先立って、市道の現状について実施したアンケート調査では、「生活道路や通学路として利用している」「住民の通勤経路とも重複しており、児童を含む歩行者に対し、通過車両の速度が高い」という意見が出されていた。また、通勤時間帯では市道の通過車両が通学時間帯と重複して交通量も多くなり、狭い道路幅員に加え、国道27号に取り付いている市道東側は速度が出やすい鋭角の交差点形状と相まって、地区から歩行者や



図-1 松永地区のゾーン30設定状況

自転車が接触する可能性が高いことも指摘されていた。
 松永地区は平成28年3月に地区内の交通安全確保を目的として、地区内を最高時速30km/hの区域規制「ゾーン30」の指定をしている(図-1)。指定された区域は、国道や県道の交差点部、狭い通学路等を対象としていたところであり、福井河川国道事務所は、ETC2.0車載器及びETC2.0対応カーナビから収集する車両の走行履歴や挙動履歴を蓄積したETC2.0プローブデータの解析結果からを行い、ゾーン30の指定前後車両の交通特性から効果と課

題を検証した。効果検証の方法としては、走行速度、危険挙動の2つの指標により「走行速度が30km/h以下となったか」「速度の抑制により事故発生に結びつきやすい危険挙動が減少しているか」に着目した。また、抜け道走行データの分析により、地区内道路における抜け道利用の実態も整理した。

分析の対象となる期間は、ゾーン30を設定した平成28年3月の前後それぞれ6ヶ月とした。

3. ビッグデータによる分析結果

ゾーン30設定前と設定後のビッグデータ(ETC2.0プローブデータ)を用いて分析を行った。

(1) 走行速度

地区内を5つのゾーンに設定し、走行速度データとして平均速度と最高速度)の2つの分析を行った。

a) 平均速度

区間①は対策前の平均速度が35km/hと制限速度に対しやや高い速度であったが、対策後は20km/hに低減し、速度抑制の効果があつたことが確認できた。一方、区間④の西側区間は平均速度が30km/h未満に低減したが、国道に取り付く東側区間においては、対策前後で速度の変化は確認できず、減速をしない通過車両が多いことが確認でき

効果検証の結果 走行速度【平均速度】

- ゾーン30は、速度を30km/h以下に制限することを目的として設置されている。
- ゾーン30対策前の区間①、④では、平均速度が30km/h以上となっていた。
- ⇒ ゾーン30の対策により、R27南側に並走する区間①では、平均速度の改善が見られた。
- ⇒ 区間④の東側、R27接続部では、依然として速度が高い状況にある。
- ⇒ 区間④のR27接続部は、R27に対してゾーン30の入口が鋭角に接続しているため、速度が出やすい道路構造となっていることが要因と考えられる。



図-2 ビッグデータによる平均速度の分析結果

効果検証の結果 走行速度【①85%タイル速度(最高速度)】

- 区間①、④、⑤では、ゾーン30の指定により最高速度が改善した。
- 一方で、R27取付部では依然として最高速度が高い状況にある。



図-3 ビッグデータによる最高速度の分析結果

た(図-2)。これは、市道と国道とが鋭角に交差しており、特に国道から市道へ進入する際に速度が出やすい交差点形状になっていることが主な要因と考えられる。

b) 最高速度

最高速度は「85%タイル値」を用いて分析を行った。85%タイル値とは異常値を除いた最高速で、計測値の分布を低速度から数えて85番目に当たる速度であり、一般的なドライバーが出しやすい最高速度と考えてられているものである。

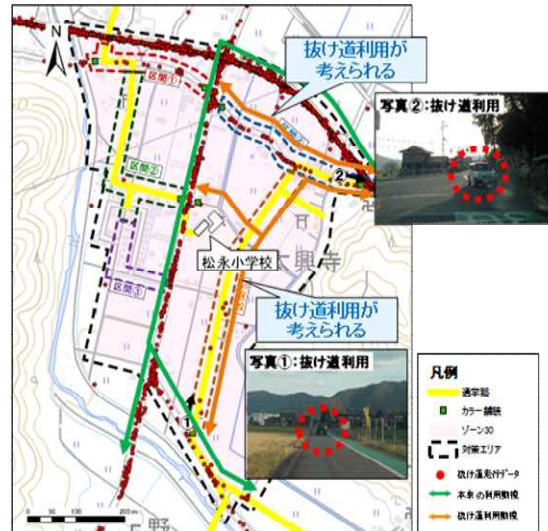
平均速度と同じく区間①については、対策後の最高速度が47km/hから36km/hに低減した。一方、区間④の西側は41km/hから34km/hに低減したが、国道に取り付く東側区間においては、平均速度の分析結果と同じく速度の低減はほとんど確認できなかった(図-3)。

(2) 抜け道利用

車両の走行履歴点から通過交通を抽出し抜け道利用の実態を把握した(図-5)。国道と並行する市道と道幅と小学校前の東側の道路で、広範囲に渡って走行データが記録されており、これにより、本来の利用動線である国道や県道を通過しない車両が抜け道として市道を利用している実態を確認した。また、抜け道利用者の出発地・到着地の内訳は約9割が小浜市を出発地・または到着していることから、主に近隣を含めた地元住民等が抜け

道利用していることが考えられる(図-4)。

○ 抜け道利用の現状



■ 抜け道利用者の出発地・到着地の内訳

抜け道利用者の出発地・到着地を分析すると、約9割が小浜市を出発地・到着地としている。



図-4 ビッグデータによる抜け道利用の分析結果

効果検証の結果【危険挙動】

- 対策前は松永小学校周辺の通学路との交差点において急挙動が発生していたが、対策後はゾーン30のカラー舗装により注意喚起がなされ交通が整流化したため急挙動がなくなったと考えられる。

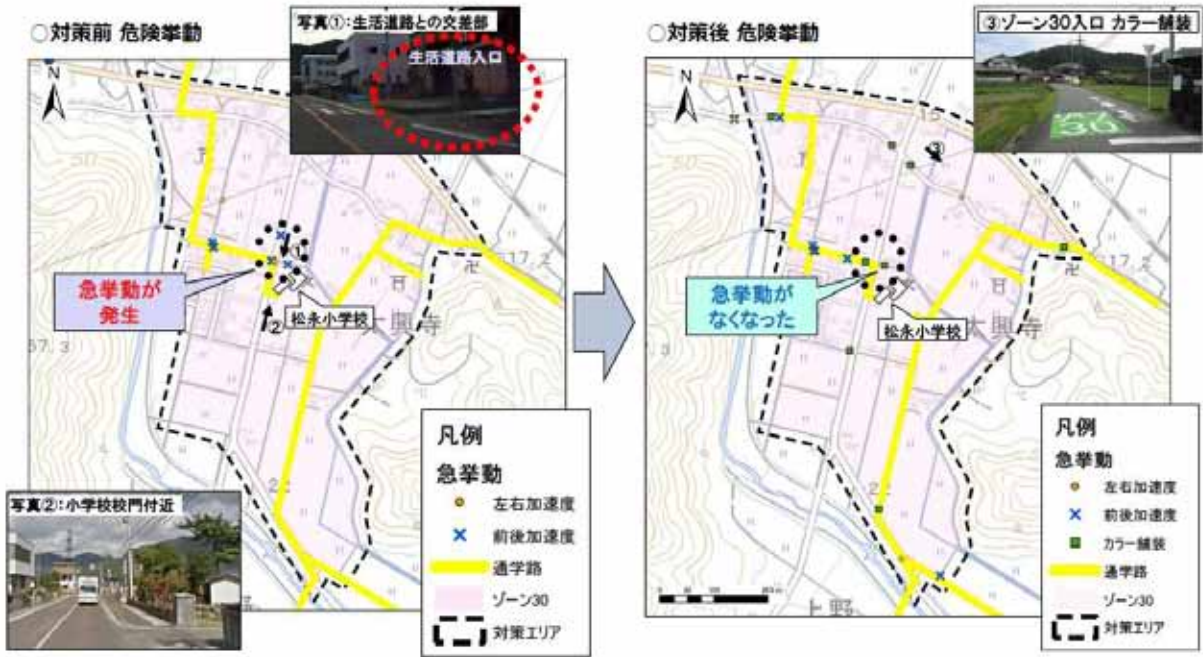


図-5 ビッグデータによる急挙動の分析結果

(3) 急挙動

加速度0.3G以上を急挙動（＝急ハンドル、急制動）と見なし、左右加速度及び前後加速度の回数を計上した(図-4)。対策前は小学校周辺の通学路と交差点において急挙動が発生していたが、対策後は急挙動の回数がゼロとなった。これはゾーン30による路面標示により注意喚起がなされ、交通が整流化したために、急挙動が無くなったと考えられる(図-5)。

4. 住民への公表と安全対策の検討

(1) 事前アンケート調査との比較とハンプの提案

各指標の検証結果により、地区内の多くの区間でゾーン30指定による安全性向上に一定の効果が確認できた一方で、国道27号と鋭角に接続されている付近の市道では速度低減の効果が見られなかった。このことは、事前のアンケートの「通過車両の速度が高い」という危険性の住民的感覚をビッグデータによる客観的なデータで裏付けることになり、当該地区における追加の安全対策の必要性について、住民への説得力のある根拠資料となった。

分析結果と安全対策について小浜市及び地元関係者へ説明するために、平成29年2月に松永地区の公民館において、地元関係者への説明会を開催した。松永地区の区長をはじめ隣接区の区長、小学校関係者、福井県、警察署、市

役所の関係者らが集まり、福井河川国道事務所よりビッグデータによるゾーン30の効果検証結果と安全対策について説明会を行った。

生活道路対策の手法には、進入口を入れなくする「ライジングボラード」、歩行者・自転車中心の幅員構成へ見直す「道路空間再配分」、 「危険箇所を対策する歩行者自転車用柵」などがあるが、市道の幅員が4m余りしかないこと、周辺の住居の立地状況、冬期の除雪作業への影響等の条件を考慮して、市道部に取り外し可能な走行速度を低減する緩やかな突起である「ハンプ」を、国土交通省と小浜市が協力して設置することを提案した。ハンプは永久的な構造物として設置することも可能であるが、設置後の効果検証により効果が確認できなかった場合にも速やかに撤去が可能などすることを勘案して、幅4m×長さ6m×最大高さ0.1mのゴム製可搬式タイプのハンプとした。

先の事前アンケート結果でも指摘があったとおり、地元関係者も当該市道には速度の高い抜け道利用者が存在することを認識しており、過去に小学生が通過車両と接触する事故も発生していたことから、ハンプの設置に理解と同意を得ることができた。引き続いて設置場所を決定する地元関係者等との立会いを行った。現地ではハンプの設置範囲に対し、沿道の家屋または土地からの乗り入れや道路脇の水路、マンホールなどを避けた位置を設置場所として決定した(写真-1)。



写真-1 地元関係者との立会い状況

(2) 地元住民も参加したハンプの設置

平成29年3月27日、地元の住民の方々へ、市道の安全性向上の必要性と対策手法であるハンプ設置の理解を得るため説明を行った後、小浜市と地元の児童も参加し、共同で国道27号と交差する市道にハンプを設置した。当日は、



市道の一時通行止めを行い、現場の一角で小浜市長や地元関係者、松永小学校の児童を招いて松永



写真-3 児童による設置作業

地区において行ったビッグデータの分析結果と、ハンプ設置の説明会を行い(写真-2)、市道を通学路として使用している児童にハンプの設置を手伝っていただき(写真-3)、作業を完了した(写真-4)。また、取付け後には自動車による試走を行い、住民にハンプ設置の効果を確認していただいた(写真-5)。設置に参加した児童からは「車が速いスピードを出さないように願いながら作業した」、区長からは「ここが一番今まででも問題になっていた。いろいろな対策の要望をしてきたわけだが、今回これが設置されたということで効果があるんじゃないかなと期待している。」との感想があり、ハンプの設置効果への地域住民の期待の高さをうかがうことができた。

(3) 啓発と広報

現地での対策はもちろん、このような取り組みを多くの方に知っていただくことが、対策の効果をより発現させるために必要である。

今回行った福井県内で初めてとなる取り組みにあたっては、事前に記者発表を行い、ハンプ設置のスケジュールなどについて公表した結果、事前に新聞社が5社、テレビ局が4社の取材申し込みがあった。いずれも後日、この生活道路の安全対策が各メディアで報道がされており、地元関係者と同様に、マスコミの関心の高さがうかがわれる取り組みであることを再確認できた。

マスコミへの情報提供や記者発表等の公表は施策の周知・浸透に必要であるが、このうち、記者クラブに登録していない地元ケーブルテレビにも個別に情報提供を行った結果、設置時に取材に訪れ、後日、ケーブルテレビで報道が行われた。ケーブルテレビによる放送は、3月29日水曜日から金曜日の毎日、17:30~24:00の時間帯で1日あたり6回放送された。地域のケーブルテレビは通常の民放等と違って、独自の番組構成により、番組が繰り返し放送される。毎日数回の繰り返しの放送となることで、抜け道として多く利用している近隣住民へも、ハンプ設置の取り組みや安全運転意識の向上・啓発に効果があると考えられる。

よって、これら道路事業の取り組みを周知・広報するため、従来のメディアに加えて、ケーブルテレビ等を利用することが、今後、交通安全対策などの様々な取り組みを地域へ浸透させるには適したメディアになっていくと考えている。



写真-4 ハンプ設置完了



写真-5 ハンプ設置後の試走の様子

5. おわりに

交通事故を減少させるためには、交通事故の実態や要因を科学的かつ総合的に解明し、これを踏まえた効果的な交通安全対策を立案、実施することが不可欠である。従来、事故危険箇所や事故ゼロプランを策定にあたっては、主に死傷事故率等の事故データを用いて道路改良や交通安全施設の設置等を行い、対策を行ってきたところであるが、更に近年は事故データ以外として地方自治体や地元の声に加え、ビッグデータを活用する施策にシフトしている。ビッグデータによる分析は、これまでの平面的な事故の多発箇所の整理以外に、事故の原因となる通行車両の走行速度や急制動の実態及び傾向の把握が可能になり、現場の交通状況に即した効果的かつ迅速な事故対策の立案に繋がっていく。

福井河川国道事務所においても今回、小浜市で設置したハンプの設置による効果を検証するため、当該箇所のビッグデータの収集及び分析を行うとともに、県内の各対策エリア登録箇所においても同様の技術支援を行っていくとともに、各市町の生活道路の安全対策の検討をサポートしていきたいと考えている。

参考文献

- 1)国土交通省道路局ホームページより

小型FWDを用いた舗装の調査方法の検討

三田村 文寛¹

¹福井県工業技術センター 建設技術研究部 (〒918-8108福井県福井市春日3丁目303番)

メンテナンスの重要な時代となり、道路舗装も例外ではない。既に道路舗装は何回か修繕を繰り返しているが、舗装の劣化は全層に及んでおり、近年はFWDにより調査を行い修繕を行うようになった。FWDは、県内に保有車が皆無なので、県内では非常に高価であり、代わりに小型FWDを用いて調査を行う方法の研究を積み重ねてきた。舗装計測用小型FWDで載荷重錘を25kgfに増やし、変位センサを載荷位置からの距離に応じて2回に分けて設置する方法で測定を行った。小型FWDの測定結果とFWDの計測結果との関連性をみた結果、完全な相関を得ることができ小型FWDにより舗装調査を行うことが可能と思われる。

キーワード 舗装の修繕、小型FWD、FWDとの相関

1. はじめに

高度成長時代を経て大量にストックされたインフラストラクチャの老朽化が進み、メンテナンスの時代を向えて久しいが、道路舗装についても例外ではない。道路舗装、特にアスファルト舗装は設計期間が短く、既に通常は何度かの修繕を繰り返している。最初の頃は路面性能の回復を重点的に表層のみの修繕を繰り返してきたが、舗装の劣化は徐々に路盤や路床へと全層に及び、近年はアセットマネジメントを考慮し、車載型FWD(Falling Weight Deflectomete, 以降、FWDと称する)による調査を行い、全層を対象として、適切な維持修繕を行うため、構造上必要な性能をも満足するように修繕を行うようになってきた。しかし、FWDはコストが非常に高価で全国的にも台数が50台程度と少なく、福井県は民間を含めて1台もないため調査費用も高価になる。そのため著者は、FWDの代わりに小型FWDを用いて調査を行う方法の研

究を積み重ねて来た。FWDに代わりに小型FWDを用いて調査を行う方法について実用のめどが立ったので報告する。

2. 現状の小型FWDシステムと課題

現在用いている小型FWDシステムは荷重計と加速度計を内蔵した本体と表示器からなり、内蔵の加速度計以外に外部変位センサ(加速度計)を4台設置が可能である(写真-1参照)。小型FWDの載荷荷重(5~15kgf)はFWDに比べて小さいため、主に比較的薄い舗装を対象に用いられており、舗装厚60cmまでが測定対象であるといわれている(メーカー聞き取り)。¹⁾また、載荷の際に載荷板が振動することで載荷点下のたわみが他点のたわみと比較して相対的に大きくなるという課題があった。

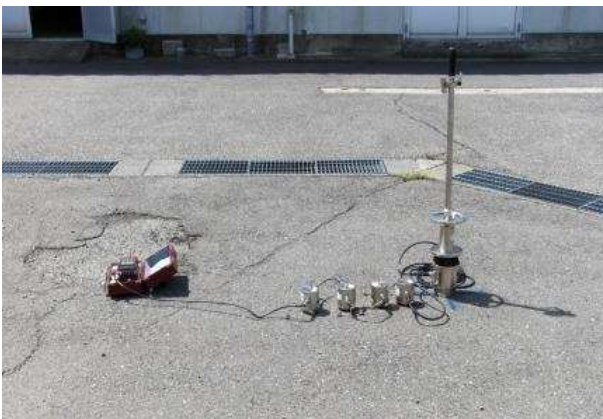


写真-1 現状の小型FWDシステム

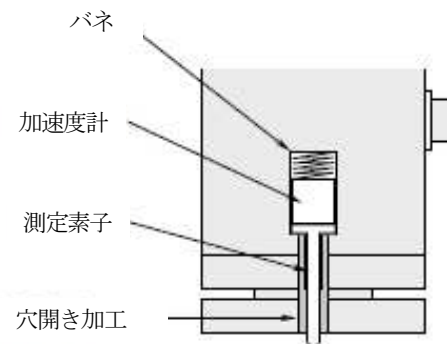


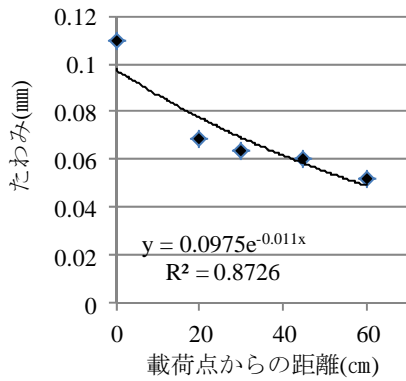
図-1 小型FWDの改良

表-1 地盤計測用計測結果

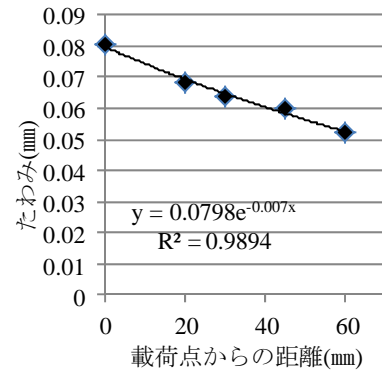
測点	載荷重 (N)	D0 (mm)	D20 (mm)	D30 (mm)	D45 (mm)	D60 (mm)
No0	17,328	0.110	0.068	0.064	0.060	0.052
No1	17,029	0.332	0.165	0.136	0.103	0.073
No2	17,075	0.347	0.189	0.152	0.121	0.087
No3	16,931	0.495	0.248	0.185	0.127	0.085
No4	18,067	0.333	0.202	0.164	0.121	0.087
No5	17,432	0.519	0.322	0.269	0.067	0.055
No6	17,505	0.386	0.203	0.168	0.136	0.096
No7	17,528	0.393	0.187	0.152	0.122	0.094
No8	17,539	0.541	0.232	0.177	0.135	0.093
No9	17,774	0.225	0.131	0.118	0.109	0.096

表-2 舗装計測用計測結果

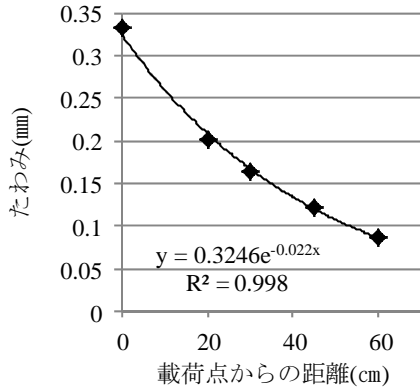
測点	載荷重 (N)	D0 (mm)	D20 (mm)	D30 (mm)	D45 (mm)	D60 (mm)
No0	17,511	0.081	0.069	0.064	0.060	0.052
No1	17,166	0.220	0.166	0.135	0.103	0.073
No2	17,150	0.278	0.188	0.152	0.121	0.087
No3	17,962	0.356	0.248	0.185	0.127	0.086
No4	18,081	0.293	0.202	0.165	0.122	0.087
No5	17,748	0.343	0.322	0.269	0.067	0.055
No6	17,736	0.246	0.203	0.168	0.137	0.097
No7	17,499	0.222	0.187	0.152	0.122	0.094
No8	17,886	0.291	0.232	0.177	0.135	0.093
No9	17,788	0.153	0.131	0.118	0.109	0.096



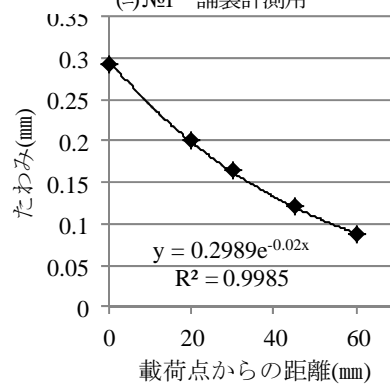
(i) No1 地盤計測用



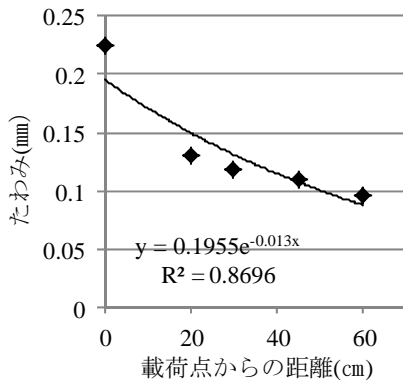
(ii) No1 舗装計測用



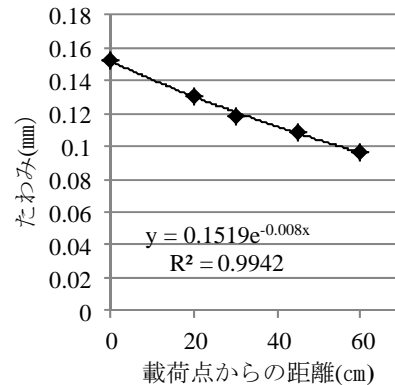
(p) No4 地盤計測用



(q) No4 舗装計測用



(r) No9 地盤計測用



(s) No9 舗装計測用

図-2 載荷点からの距離とたわみ量

3. 舗装計測用の小型FWD本体

従前の小型FWDでは、載荷の際に載荷板が振動することで載荷点直下のたわみが大きくなる。このことを改善するために小型FWD本体の載荷板を開口し、加速度計の測定素子を載荷板から突出して載荷の際に起こる載荷板の振動が加速度計に直接伝わらないように、舗装計測用に改良されたものがある。同じ場所で、舗装計測用と従前のもの(以降、地盤計測用と称する)を用いて測定を行った。結果を表-1, 2に示す。№1,4,9については、載荷点からの距離とたわみの関係を図-2に示す。

4. 舗装計測用と地盤計測用の小型FWD測定値の比較

敷地内に2.0m間隔で10測点設置し、舗装計測用と地盤計測用の小型FWDの測定値の比較を行った。載荷点からセンサまでの距離は0, 20, 30, 45, 60cm(以下ではD0, D20, D30, D45, D60と称する)とした。舗装厚150cmへの対応を見越して、載荷荷重を25kgfに増量した。各測定値の載荷点から計測点までの距離とたわみ値の関係をみるためなので、載荷荷重の補正、温度補正は行っていない。

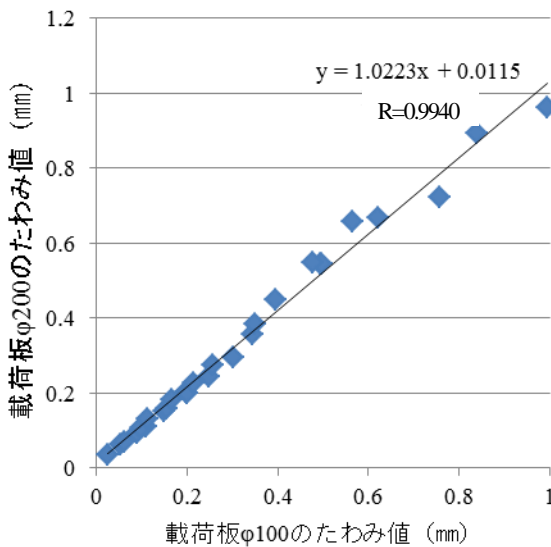


図-3 載荷板の違いと測定値

ない。近似曲線は指数曲線が良く合うので用いた。測定結果を表-3, №0, №4, №9におけるたわみと載荷点からの距離の関係は図-2に示す。舗装計測用と地盤計測用の小型FWDの測定値を測点ごとに比較すると、地盤計測用では、舗装計測用と比較して№0と№9はD0がD20~D60に比べて大きな値を示し、それにともない相関が弱くなっている。№4は、相関係数はほぼ同じであるが、D20~D60がほぼ同じ値であるのに対し、D0は若干ではあるが大きくなっている。したがって、舗装計測用は、載荷点下のたわみが他点のたわみと比較して相対的に大きくなるという前述の課題に対応できている。

5. 小型FWDの載荷板の検討

小型FWDの載荷板は地盤を測定し、K値(支持力係数)を算出する場合は、載荷板の直径は最低でも地盤材料の3倍以上とすることが望ましい^りとある。舗装の測定の場合の基準はないが、載荷荷重を25kgfにしたことにより、載荷板がφ100の場合、重錘を上げた状態の時に重心が上部に偏り転倒しやすくなり測定がやり辛く作業性が悪い。作業性を改善するために載荷板をφ200に取り換えて測定を行い、測定値に影響があるか否か検証を行った。前述の測点の内、№1, №4, №7でD0, D20, D30, D45, D60, D75, D90, D120, D150を比較した。載荷荷重の補正と温度補正を行って比較した。路面温度は現地で測定、気温は当地から400.0m北の福井気象台の観測値を用いた。結果を表-3, 図-3に示す。載荷板がφ100の場合とφ200の場合の測定値は、相関係数R=0.994となり完全な相関であるので、載荷板を変更しても測定値に影響がないことが確認された。

6. 小型FWDとFWDの測定値の相関

小型FWDによる測定を実用化するために、現在信頼して舗装の調査に用いられているFWDと同一箇所を測定して相関をみた。前述と同様に敷地内に2.0m間隔で10測点設置して測定を行った。FWD(写真-1参照)は同時にD0, D20, D30, D45, D60, D75, D90, D120, D150,

表-3 載荷板の違いと測定値

(単位: mm)

	D0	D20	D30	D45	D60	D75	D90	D120	D150
№1	0.756	0.494	0.395	0.301	0.198	0.109	0.089	0.089	0.053
	0.723	0.544	0.450	0.297	0.202	0.151	0.112	0.093	0.062
№4	0.995	0.621	0.498	0.345	0.249	0.199	0.156	0.098	0.026
	0.961	0.669	0.544	0.358	0.243	0.200	0.158	0.106	0.036
№7	0.840	0.565	0.476	0.350	0.257	0.213	0.165	0.112	0.061
	0.893	0.659	0.548	0.384	0.274	0.226	0.183	0.131	0.069

上段: 載荷板φ100 下段: 載荷板φ200

D200と9点測定できる。小型FWDは、舗装計測用を用いる内蔵センサで測定するD0と合わせて5点までしか同時に測定できない。そこで2回に分けて測定する方法を試みた。1回目はD0, D20, D30, D45, D60を測定し(写真-2参照)2回目はセンサを移動してD0, D75, D90, D120, D150を測定する(写真-3参照)。小型FWD, FWDほぼ同時期に各2回ずつ測定をおこなった(表-4参照)。今回は載荷荷重の補正と温度補正は行う。FWDは路面温度、気温とも現地で測定した値を用いたが、小型FWDは前述同様、路面温度は現地、気温は福井気象台の値を用いた。小型FWDは、D0が2個の測定値があるのでそれぞれの値を載荷荷重の補正と温度補正を行った後、平均値を用いた。結果は表-5、小型FWDとFWDの相関は図-4に示す。相関係数 $R=0.987$ で完全な相関があることが明らかになった。小型FWDは載荷荷重が小さいので、載荷点からセンサまでの距離が大きくなるほどばらつきが大きくなると考えられる。そこで、D75~D150の相関は図-5に示す。相関係数 $R=0.921$ となりほぼ完全な相関があったが、D0~D150と比較してFWDとの相関が弱くなることから測点間隔をFWDの半分にすることや、交通規制が簡単なことを活かして道路幅員の比較的狭い道路を中心に行うことが望ましいと思われる。

7. 結論

舗装の維持管理のために調査に多用されているFWDに代わりに、小型FWDを用いて行う方法を研究した。得られた知見を以下に述べる。

(1)D0の値がD20, D30, D45, D60, D75, D90, D120, D150に比べて相対的に大きいことは、測定素子が載荷

表-4 FWD, 小型FWDの測定日

種類	測定日	
	1回目	2回目
FWD	2015.6.17	2017.5.31
小型FWD	〃	2017.5.29



写真-1 車載型FWD

板から突出した舗装計測用の小型FWDを用いることで載荷点下のたわみが他点のたわみと比較して相対的に大きくなるという課題に対応できている。

(2)載荷板の大きさをφ100からφ200に変えても測定値は変わらないことが分かった。

(3)小型FWDとFWDの測定値の相関係数 $R=0.987$ となり完全な相関があった。

(4)D75~D150に限定しても、小型FWDとFWDの測定値の相関係数 $R=0.921$ となりほぼ完全な相関があった。

小型FWDを用いた舗装調査方法は実用上問題ないと思われる。しかし、D75~D150に限定すると、D0~D150と比較して、小型FWDとFWDの測定値の相関が弱くなるため、1)測点間隔をFWDの半分にする、2)交通規制が簡単なことから道路幅員の比較的狭い道路を中心に行うことが望ましいと思われる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、FWDに協力していただいた(株)レインボー・コンサルタント森社長他社員の皆様、また小型FWDについて多大な御指導と御協力をいただいた(株)東京測器研究所河野課長に感謝の意を表す。

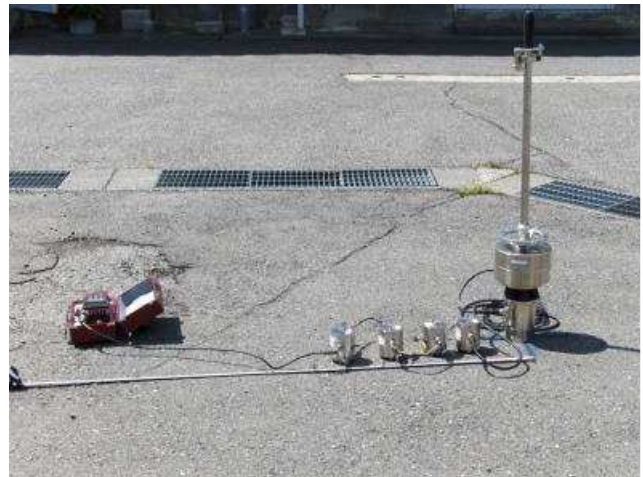


写真-2 小型FWD(1回目)

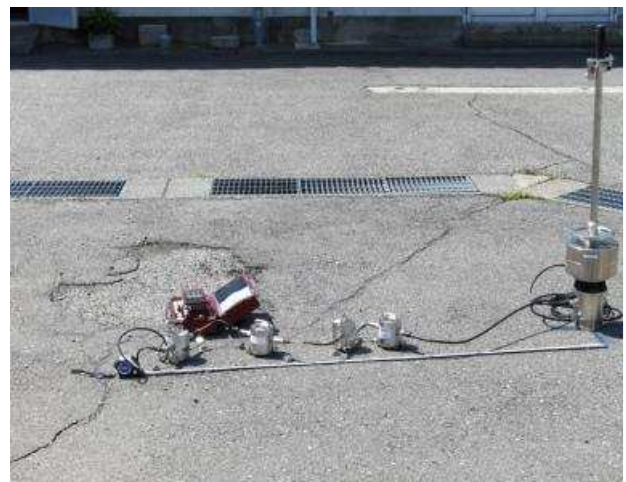


写真-3 小型FWD(2回目)

表-5 小型FWDとFWDの測定値

(単位: mm)

	D0	D20	D30	D45	D60	D75	D90	D120	D150
№0	0.396	0.379	0.365	0.341	0.294	0.270	0.254	0.203	0.147
	0.253	0.211	0.195	0.186	0.158	0.152	0.145	0.118	0.075
№1	0.908	0.787	0.620	0.454	0.350	0.298	0.236	0.182	0.142
	0.722	0.491	0.393	0.305	0.207	0.148	0.118	0.086	0.055
№2	0.963	0.779	0.673	0.525	0.415	0.342	0.277	0.209	0.163
	0.767	0.515	0.420	0.333	0.230	0.148	0.148	0.093	0.055
№3	1.189	0.873	0.697	0.491	0.356	0.236	0.226	0.181	0.148
	0.953	0.583	0.470	0.342	0.237	0.199	0.147	0.098	0.048
№4	1.220	0.943	0.776	0.569	0.435	0.349	0.283	0.218	0.168
	1.066	0.628	0.493	0.354	0.245	0.158	0.155	0.101	0.057
№5	1.189	0.873	0.697	0.491	0.356	0.236	0.226	0.181	0.148
	1.146	0.722	0.560	0.365	0.279	0.199	0.180	0.107	0.038
№6	1.265	1.050	0.897	0.678	0.498	0.417	0.311	0.229	0.180
	1.092	0.750	0.607	0.377	0.296	0.242	0.196	0.113	0.043
№7	1.138	0.926	0.792	0.602	0.469	0.387	0.312	0.228	0.177
	0.882	0.628	0.520	0.396	0.290	0.234	0.184	0.108	0.046
№8	1.226	0.950	0.779	0.567	0.421	0.323	0.264	0.194	0.150
	0.944	0.622	0.504	0.370	0.268	0.213	0.171	0.104	0.064
№9	0.490	0.471	0.457	0.416	0.375	0.338	0.297	0.231	0.169
	0.974	0.544	0.436	0.362	0.290	0.215	0.188	0.122	0.077

上段: FWDの測定値 下段: 小型FWDの測定値

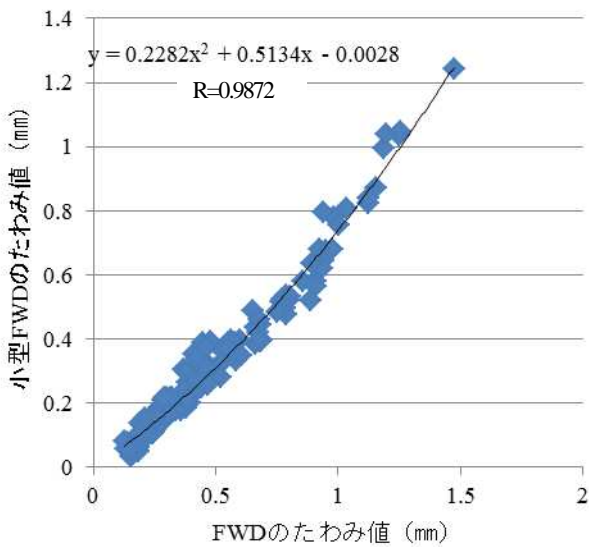


図-4 49kNのFWDと49kN換算のたわみの相関

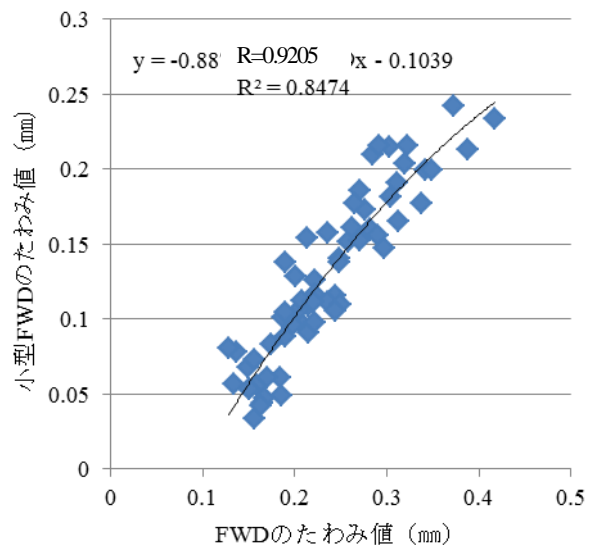


図-5 49kNのFWDと49kN換算のたわみの相関(D75~D150)

参考文献

- 1)FWDおよび小型FWD運用の手引き(2002,.10,土木学会舗装工学会)

足羽川ダム水理模型実験中間報告について

田中 幹¹

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工務課 (〒918-8239福井県福井市成和1-2111)

足羽川ダムは、足羽川、日野川及び九頭竜川の下流区域における洪水被害の軽減を目的として建設が進められている洪水調節専用の流水型ダムである。足羽川ダム本体及び水海川分水施設において、机上の施設設計では確認が困難である流況等の水理特性について、ダム本体の模型及び分水施設（呑口・吐口）の模型を製作した上で、水理模型実験を実施し、確認を行った。本稿は、その実験結果の一部を中間報告するものである。

キーワード 流水型ダム、水理模型実験、フルードの相似則

1. はじめに

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）に建設中の高さ96m、総貯水量28,700千 m^3 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである（図-1及び図-2）。



図-1 足羽川ダム位置図

足羽川ダム建設事業では、重力式コンクリートダムと併せて、図-3に示す他流域の4河川（水海川、足羽川、割谷川、及び赤谷川）の洪水を導水するための導水施設（堰・導水トンネル）を整備するものである。このうち、足羽川ダム本体+水海川導水を河川整備計画期間内に整備する第I期事業と位置付けている。

しかしながら、ダムのような大規模構造物は、机上の施設設計では、実際の水理特性を把握する事は困難である。そのため、ダム本体及び水海川分水施設（呑口・吐口）について、水理模型を製作した上で、水理模型実験を実施し、水理特性の確認を行った。

足羽川ダムの諸元を表-1に示す。

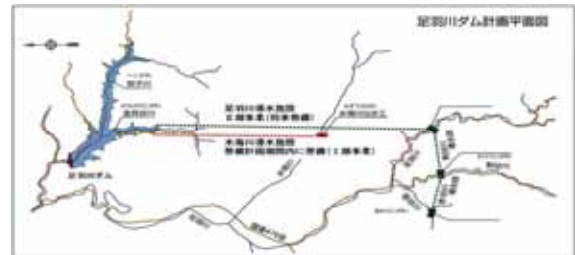


図-3 足羽川ダム計画平面図

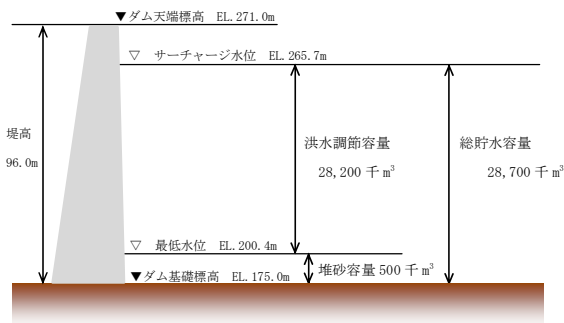


図-2 足羽川貯水池容量配分図

表-1 足羽川ダム諸元

項目		諸元
ダム	堤高	96.00m
	堤頂長	460m
	堤堆積	710,000 m^3
貯水池	流域面積(直接)	34.2 km^2
	流域面積(間接)	71.0 km^3
	湛水面積	0.94 km^4

2. ダム本体水理模型実験

(1) 実験施設

実験は、国立研究開発法人土木研究所水理実験施設内で実施した。ダム本体の全体模型には、給水管、直上流部に給水槽、河道及び排水路を設置することとした。また、模型は形状の検討をする際に改造がしやすい構造とし、実験の実施に必要な階段、計測台、帰還水路等の付属施設についても配慮した。模型の改造・据付精度は±1mm以内とし、実験中もこれを維持するものとした。

水理模型の縮尺はフルードの相似則を考慮し、ダム本体の全体模型を1/62.5とし、詳細な検討を必要とする常用洪水吐き及び河床部放流設備は、抽出模型としてそれぞれ1/20及び1/31.25とした。

なお、本稿に記載されている数字は設計及び実験中のものであり、確定値ではない。

(2) 足羽川ダム本体設計原案の諸元

足羽川ダム本体は流水型ダムであるため、河床標高付近に高圧一面ベルマウス式放流管を1条設置しているのが特徴であり、非常用洪水吐きは左右対称に各5門（13.0m×10門）を配置している。基本的には、左右対称に洪水吐きを配置するという方針の元に設計された形状である。

足羽川ダム設計原案の諸元を表-2に示す。

また、足羽川ダム堤体標準断面図（原案）を図-4に、製作した足羽川ダム本体の全体模型を図-5に示す。

表-2 足羽川ダム諸元（原案）

項目		諸元
ダム	設計洪水位	EL.268.7m
	サーチャージ水位	EL.265.7m
	最低水位	EL.298.5m
非常用洪水吐き	天端標高	EL.265.7m
	越流幅	B=13.0m
	越流水深	H=3.0m
	自由越流	10門
常用洪水吐き	敷高標高	EL.187.0m
	高圧一面ベルマウス式放流管	B:2.4m×H:2.4m×1条
河床部放流設備	敷高標高	EL.181.0m
	高圧一面ベルマウス式放流管	B:4.0m×H:3.0m×1条
減勢工	水叩き長	L=35.0m
	減勢幅	B=20.0m
	副ダム高	h=4.5m

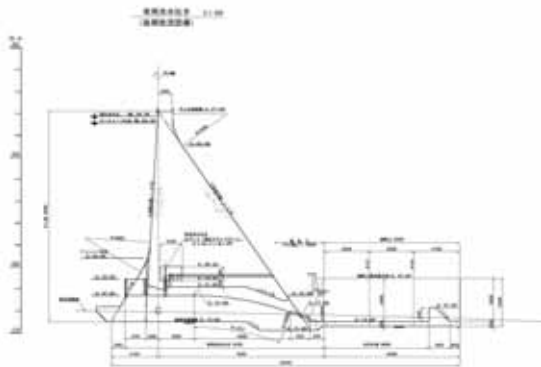


図-4 足羽川ダム本体横断面図（原案）

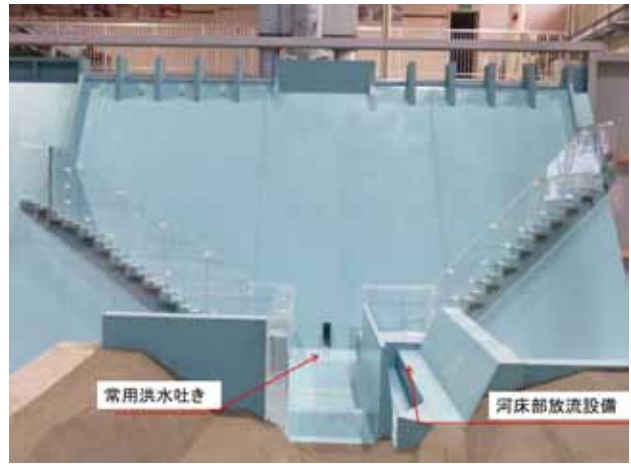


図-5 足羽川ダム本体模型（全体模型）

(3) 実験内容

本実験の目的は、足羽川ダム本体の水理特性を把握することである。そのため、設計原案の形状に水理設計上必要な水量を流して、各設備の水理特性の把握を行った。

実験を実施した各模型の諸量の縮率を表-3に示す。

表-3 諸量の縮率

足羽川ダム本体模型（模型縮尺 1/62.5）の場合

諸量	次元	縮率		原型値	模型値
水深	L	1/n	1/62.5	10m	0.16m
流量	L ³ /t	1/n ^{2.5}	1/30,881	1,400m ³ /s	0.0453m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	1/7.906	10m/s	1.26m/s

常用洪水吐き模型（模型縮尺 1/20）の場合

諸量	次元	縮率		原型値	模型値
水深	L	1/n	1/20	10m	0.5m
流量	L ³ /t	1/n ^{2.5}	1/1,788.85	180m ³ /s	0.1006m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	1/4.472	10m/s	2.24m/s

河床部放流設備模型（模型縮尺 1/31.25）の場合

諸量	次元	縮率		原型値	模型値
水深	L	1/n	1/31.25	10m	0.32m
流量	L ³ /t	1/n ^{2.5}	1/5,459.15	180m ³ /s	0.0330m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	1/5.590	10m/s	1.79m/s

(4)非常用洪水吐き

非常用洪水吐きはダムの計画を超えるような洪水が発生した際に、放流を行う洪水吐きである。足羽川ダムでは自由越流方式を採用している。ここでは、非常用洪水吐きの放流能力について紹介する(図-6)。

実験の結果、設計洪水水位での放流量は1,454 m³/sで放流できることを確認した。



図-6 非常用洪水吐きでの放流能力確認状況

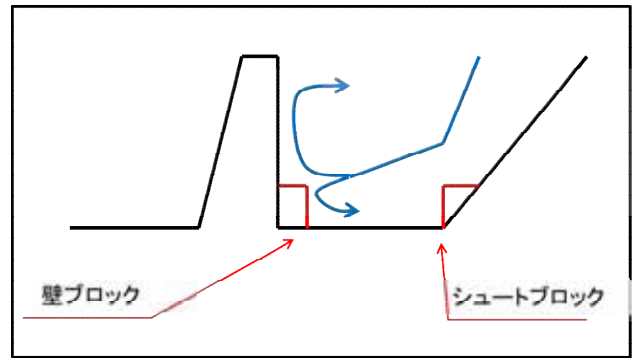


図-8 ブロックイメージ図



図-9 右岸堤趾導部の流況(ブロック有り)

(5)堤趾導流部

堤趾導流部では、設計洪水水位での越流部流下時の水面形を計測し、堤趾導流壁高の検討を行った。原案では壁沿いの水位は導流壁高10mに対し、最大30mとなっており、導流壁沿いの水位の低減が必要であった(図-7)。また、減勢工の流入部では、ステップ形状の影響を受けて水面が大きく上昇していた。そこで、シュートブロックと壁ブロックを組み合わせた改良案とすることで、最大30mあった水位を低減させることができた。(図-8及び図-9)。今後は水理模型実験を通じてさらなる改良案としてデフレクターの規模等詳細の検討を行っていく予定である(図-10及び図-11)。

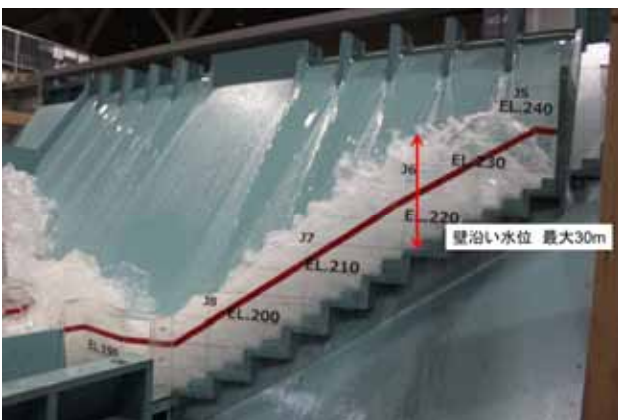


図-7 左岸堤趾導部の流況(ブロック無し)

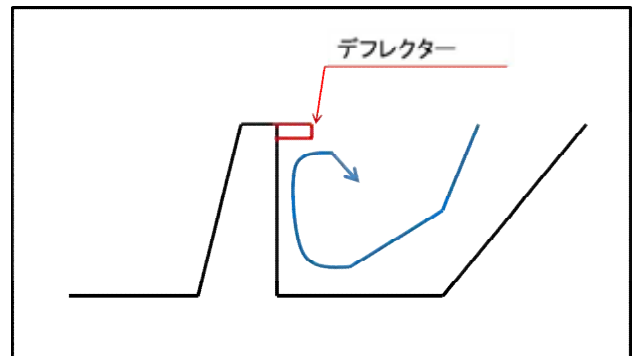


図-10 今後のデフレクター検討イメージ図



図-11 デフレクターの検討状況

(6)減勢工部

減勢工は、計画最大放流量放流時に安定した流況が得られる規模とし、ダム設計洪水流量放流時には、ダム堤体の安全性を損なわないことを基本に水理設計を行う構造物である。ここでは、減勢工部の流況を紹介する。

非常用洪水吐きから1,400 m³/sに相当する水を放流した場合は、減勢工内の流況は十分減勢されているものの、減勢工始端の水位上昇が顕著である（図-12及び図-13）。今後、水理模型実験を通じて壁高等の検討を実施していく予定である。一方、常用洪水吐き単独で180 m³/sに相当する水を放流した実験の結果、水脈の偏りや回転流が生じることはなく、問題ないことを確認した（図-14及び図-15）。



図-12 減勢工部の流況(1,400m³/s放流) 上から



図-13 減勢工部の流況(1,400m³/s放流) 横から



図-14 減勢工部の流況(180m³/s放流) 上から

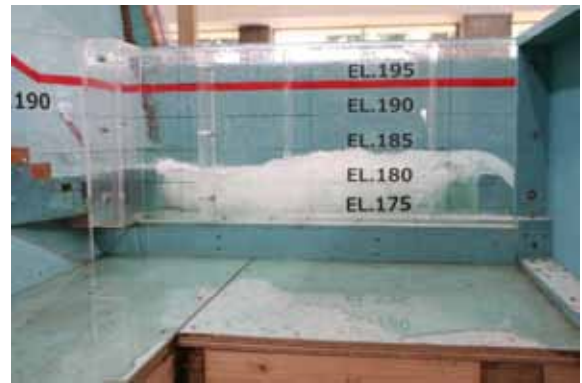


図-15 減勢工部の流況(180m³/s放流) 横から

(6)常用洪水吐き及び河床部放流設備

足羽川ダム本体に設置される常用洪水吐きと河床部放流設備は、ダム本体の全体模型の縮率である1/62.5で模型を製作した場合、模型の寸法が常用洪水吐きは3.84cm×3.84cm、河床部放流設備は6.40cm×4.80cmと規模が小さくなり模型縮尺の影響を大きく受け、十分な水理検討ができない。そのため、常用洪水吐き、河床部放流設備については、抽出模型を製作し、実験を行った。抽出模型は常用洪水吐きの模型の縮率を1/20、河床部放流設備+常用洪水吐きの模型の縮率を1/31.25とした。

実験の結果、常用洪水吐き（図-16）にはコンクリート破損の原因となる負圧が発生することなく、開口幅を調整すれば、180 m³/sの放流が可能となること、河床部放流設備（図-17）についても、開口高を5mとすれば、開水路にて180 m³/sの放流能力が期待できる事を確認した。



図-16 常用洪水吐き(1/20模型)の流況

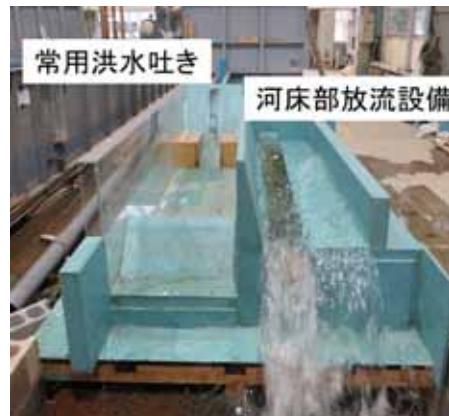


図-17 河床部放流設備(1/31.25模型)の流況

3. 水海川分水施設水理模型実験の概要

(1) 実験施設

実験は、国立研究開発法人土木研究所水理実験施設内及び別棟で実施した。水理模型の縮尺はフルードの相似則を考慮し、水海川分水施設については、1/31.25とし、水海川導水トンネル吐口部については1/62.5とした。

なお、本稿に記載されている数字は設計及び実験中のものであり、確定値ではない。

(2) 水海川分水施設原案の諸元

分水施設は洪水時、足羽川ダムへ洪水を導水するため福井県今立郡池田町水海に建設が予定されている施設である。主に水海川導水トンネル、水海川分水堰、水海川貯砂ダムから構成される。

分水施設の諸元（原案）を表-4に示す。

また、水海川分水施設模型の模型全体図面を図-18に、水海川分水施設の模型を図-19に、水海川導水トンネル吐口部の模型を図-20に示す。

表-4 分水施設諸元（原案）

項目		諸元
水海川分水堰	堰高	H=17.9m
	堰長	B=97m
	自由越流幅	B _f =26.0m
	ゲート付き越流幅	B _g =26.1m
	常用水路ゲート	H4.5m×B9.0m×1門
水海川貯砂ダム	貯砂ダム高	H=23.9m
	堤長	B=88.0m
	越流幅	B _f =40.0m
	天端標高	EL.322.9m
水海川導水トンネル	トンネル勾配	1/170
	トンネル径	8.50m
	インバート径	6.5m
	緊急遮断ゲート	H10.0m×B5.8m×1門
	計画最大放流量	164m ³ /s



図-18 水海川分水施設模型図面（原案）

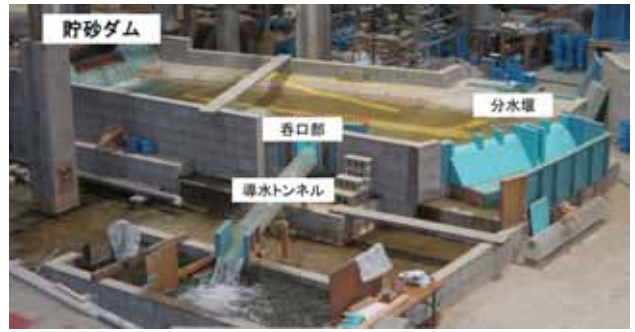


図-19 水海川分水施設模型

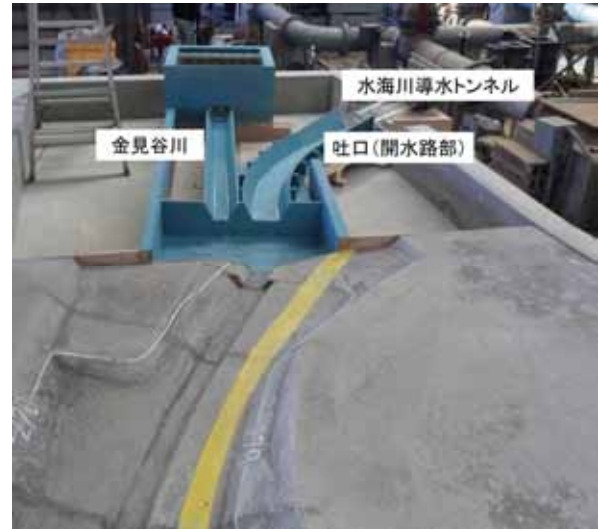


図-20 水海川導水トンネル吐口部

(3) 実験内容

本実験の目的は、水海川分水施設の一部である水海川導水トンネルの水理特性を把握すること等である。水海川導水トンネルは足羽川ダムへ流水を導水する施設であり、呑口部、トンネル部、吐口部より構成される。水海川導水トンネルへの流入条件として、サーチャージ水位（306.0m）で164 m³/sを放流することとするとしている。そのため、設計原案の形状に水理設計上必要な水量を流し、各設備の水理特性の把握を行った。

実験を実施した各模型の諸量の縮率を表-5に示す。

表-5 諸量の縮率

水海川分水施設模型（模型縮尺 1/31.25）の場合

緒量	次元	縮率		原型値	模型値
水深	L	1/n	1/31.25	10m	0.32m
流量	L ³ /t	1/n ^{2.5}	1/5,459.15	582m ³ /s	0.107m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	1/5.590	10m/s	1.79m/s

水海川導水トンネル吐口部模型（模型縮尺 1/62.5）の場合

緒量	次元	縮率		原型値	模型値
水深	L	1/n	1/62.5	10m	0.16m
流量	L ³ /t	1/n ^{2.5}	1/30,881	164m ³ /s	0.0053m ³ /s
流速	L/T	1/n ^{1/2}	1/7.906	10m/s	1.26m/s

(4) 水海川導水トンネル呑口部

ここでは、呑口部を対象とした放流能力の検討について紹介する(図-21、図-22)。

原案形状では、サーチャージ水位で、設計条件とした164 m³/sの放流に対して146 m³/sの導水と10%程度不足していた。これは、流木及び土砂の流入防止を目的とした構造物が支配断面になっていたためである。そのため、流木止め基礎を下流へ10m延長した結果、水位EL306.0mで164 m³/s流入がある場合には、導水トンネルに164 m³/sが導水できることを確認した。



図-21 導水トンネル呑口部



図-22 導水トンネル呑口部(改良形状)

(5) 流木対策

水海川分水施設では、洪水の際の流木の発生により、導水トンネルの呑口が塞がれる事が懸念される。導水トンネルの呑口が流木で閉塞すると導水機能は低下し、足羽川ダムの洪水調節能力にも影響する。そのため、水海川分水施設では放流能力を大きく低下させないための流木対策が必須となる。机上設計では貯砂ダムと導水トンネル呑口部に流木止めを設置し、実験でその機能を確認するため、水理模型に流木模型を流し、流木止めにおける流木の捕捉状況を確認した。なお、導水トンネル呑口部の形状は流木止めを10m延長する前の形状で実施している。

流木のサイズは福井豪雨(2004年7月)の調査結果をもとに製作した。

実験の結果、概ね長い流木(20m以上)は貯砂ダムで捕捉できることを確認した(図-23)。短い流木(5m~10m)は貯砂ダム下流に流下するが、呑口の流木止めによりほとんどが捕捉できることを確認した。



図-23 貯砂ダムの流木実験

(6) 水海川導水トンネル吐口部

水海川導水トンネルは最終的に金見谷川へと合流し、洪水を導水する。導水トンネルと金見谷川の洪水流が衝突し、安定した流況で下流へ流れないことが懸念される。

そこで、本実験では、金見谷川と導水トンネル吐口部の合流部の流況の確認を行った。

実験の結果、金見谷川と導水トンネルの合流部の流況について、導流部を40m、合流部を40m配置することにより流況上問題ないことを確認した(図-24)。

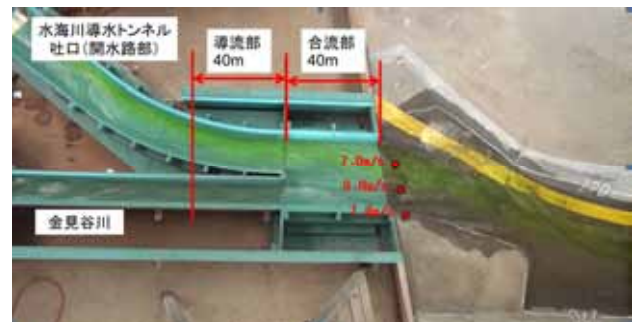


図-24 金見谷川合流部

4. まとめ

(1) 実験結果のまとめ

今回の実施した水理模型実験の結果、机上では確認できない足羽川ダム及び水海川分水施設における水理特性を確認する事ができた。

また、足羽川ダム本体における、非常用洪水吐き、常用洪水吐き、河床部放流設備、減勢工部等の放流設備や、水海川分水施設における水海川貯砂ダム・水海川導水トンネル呑口部及び吐口部についての基本的な水理設計について目処を立てることができた。

(2) 今後の方針

今回の実験結果及び今後の水理模型実験の結果を本体設計及び分水施設設計に反映し、設計の精度を向上させていきたい。

由良川堤防漏水対策による 地下水影響検討の結果について

井上 雅之

近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 福知山出張所 (〒620-0875 福知山市字掘小字今岡2459-14)

福知山市街地に面する由良川左岸では、平成25年台風18号出水時に堤防法尻及び堤内地の20箇所超で漏水、噴砂痕が確認された。それをうけ、由良川堤防では護岸コンクリートのクラック補修と張コンクリート先端から洪積砂礫層に達する鋼矢板打設による遮水対策を講じる計画となり、昨年度は最優先の施工区間について地下水流動実態調査及び影響予測解析を行った。本発表では、全区間の施工に先立ち、残施工区間における施工前データの蓄積ならびに地下水への影響が予測される全範囲における水利用実態調査の実施により、解析モデルの精度向上、施工影響区間全域の地下水流動の把握ならびに残区間施工による地下水利用に対する影響検討を行った結果について報告するものである。

キーワード 河川堤防, 地下水利用, 遮水鋼矢板施工, 三次元モデル解析

1. はじめに

由良川は京都府、滋賀県、福井県境の三国岳に発し、山間部を西流したのち福知山市内で流路を北東に転じ日本海に注ぐ幹線流路延長146kmの一級河川である(図-1)。

平成25年9月に発生した台風18号による出水では、福知山地点で5時間にわたり計画高水位を超過し、由良川の水位と堤内地盤の比高差が約5mに達した。これにより、堤防法尻や堤内地で噴砂痕(水田・畑地)や漏水(堤脚・擁壁)が複数確認されたほか、井戸からの噴砂も発生している(図-2)。

平成16年10月台風23号以来の大規模出水を背景に、特に36.4k上流の特殊堤(カミソリ堤)区間では堤防強化への地元要望が強く、対応が急務となっている。同時にこの区間は寺社・古民家が密集し、井戸が多数分布する特徴がある。



図-1 由良川流域および検討地区位置図

こうした地域特性をふまえ、昨年度においては漏水・噴砂が確認された中で災害対策対応が急務であった区間について地下水影響予測及びモニタリングを実施した。

本発表では、昨年度の結果をふまえ、調査範囲拡大、調査期間延長によって精度の向上した3次元解析モデルを用い、堤内地下水全体の地下水流動の把握、今後の鋼矢板遮水区間拡大における地下水影響予測結果ならびに今後の施工に伴うモニタリングについて検討を行った結果について述べる。

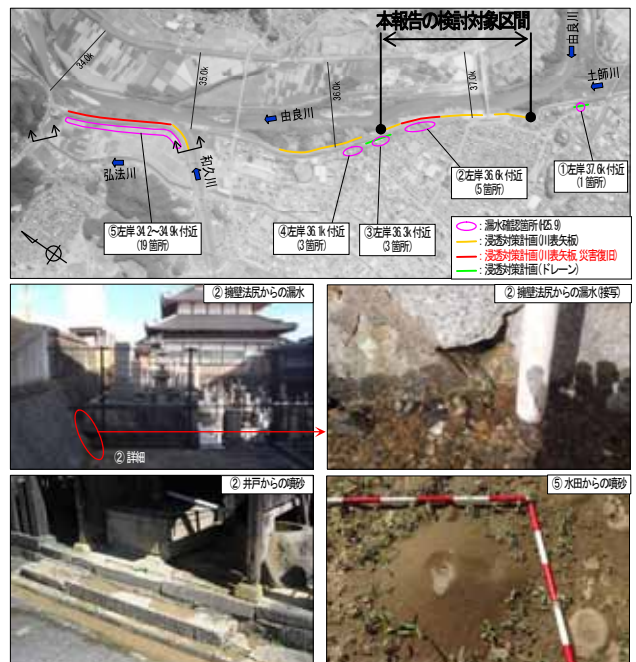


図-2 平成25年9月台風18号時の漏水・噴砂状況

2. 昨年度の検討状況

(1) 堤防地盤モデル

検討区間における堤防地盤について文献地質図および既往堤防調査資料から、堤防下に高透水性を示す層厚 8~10m の沖積砂礫層が、その下位に低透水性の洪積粘土質砂礫層が広範囲に分布することが確認された。

この浸透対策として、護岸コンクリートのクラック補修と張コンクリート先端から洪積砂礫層に達する鋼矢板打設による遮水対策を講じる計画となった(図-3)。

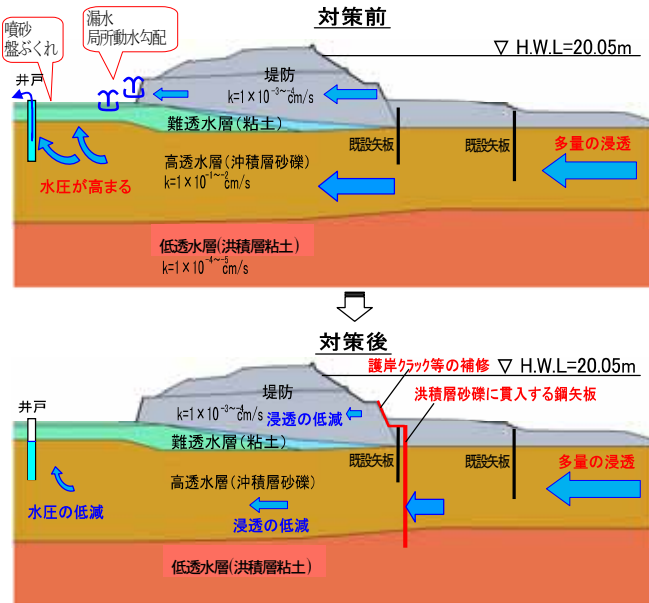


図-3 現況の漏水機構および対策工法

(2) 地下水利用、帯水層構造、流動状況の把握

寺町地区において、保全対象を明確にするため、公共井戸の資料調査及び民生井戸の聞き取り調査を実施した。その結果、施工区間全体で約 111 の井戸が存在し、民生の小規模井戸、一部事業用の中規模井戸が多数確認された。水利用の特徴としては、寺町地区には飲用かつ上水道未使用の民生井戸が確認された(図-4)。

本地域の地質構成は文献地質図および既往堤防調査資料から、上位から①沖積砂礫層(高透水)、②第三紀層や洪積層(低透水地盤)、③基盤岩(難透水)に区分される。主要な帯水層は平野表層に広く分布する沖積砂礫層に特定され、由良川及び各支川と一連の浅層地下水である。地下水の分布や流動を評価・解析するために沖積砂礫層底面の構造を面的に把握した。

施工前の地下水位及び水質の分布を把握するために、ボーリング観測孔及び各支川での一斉観測を行った。その結果、寺町地区及び周辺の地下水は西または南の段丘・丘陵地から由良川へ向かう流れが支配的であり、弘法川からの涵養も受けているものと推定された。

また、連続水位観測により由良川から200m圏内で河川水位との連動性が高いことが確認された(図-5)。

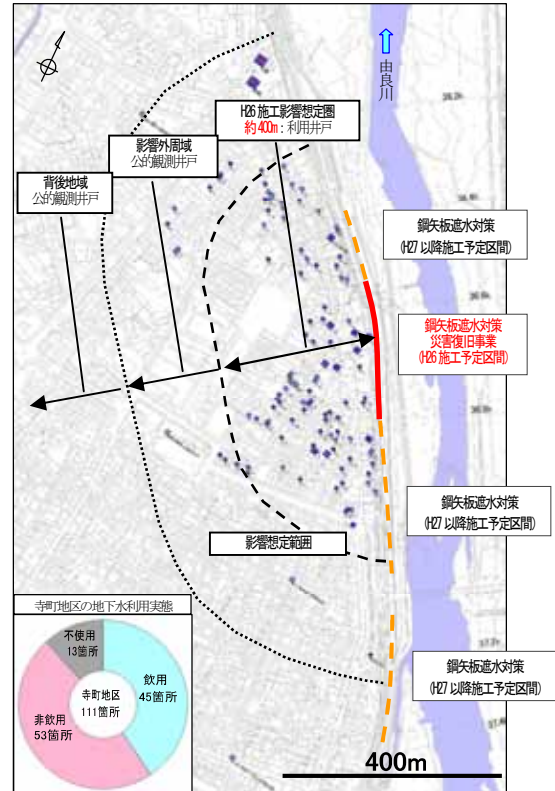


図-4 寺町地区(災害復旧区間)周辺の井戸分布

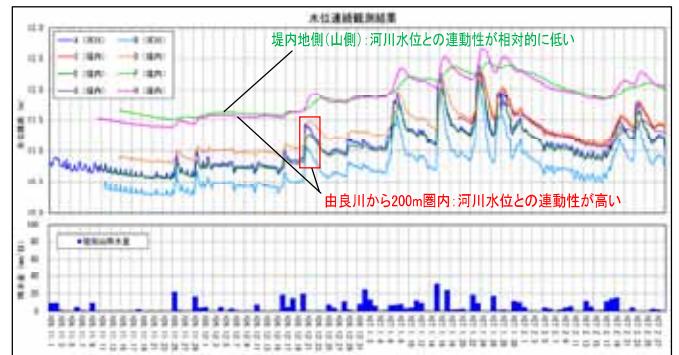


図-5 寺町地区の連続水位変化

(3) 解析モデルの構築

地下水の『利用実態』『帯水層構造』『地下水流動』の基本条件から、寺町地区における鋼矢板遮水により、由良川から200m程度の範囲で地下水位のダムアップと、流速の低下に伴う水質変化の可能性が指摘される。検討地区では①水みちとなり得る旧河道が複雑に分布、②帯水層底面の不陸が激しい、③音無瀬橋付近で河川~地下水の水位(湧出~浸透)が逆転する、④洪積層に達していない既設矢板下側の迂回浸透を正確に再現する必要がある等から、三次元モデルを採用した。

作成したモデルの計算値と実際に観測した地下水位を比較することにより、作成したモデルの再現性を検証した。検証の結果、計算値と観測値の相関が高いことから、モデルの信頼性は十分に確保されていることを確認した(図-6)。

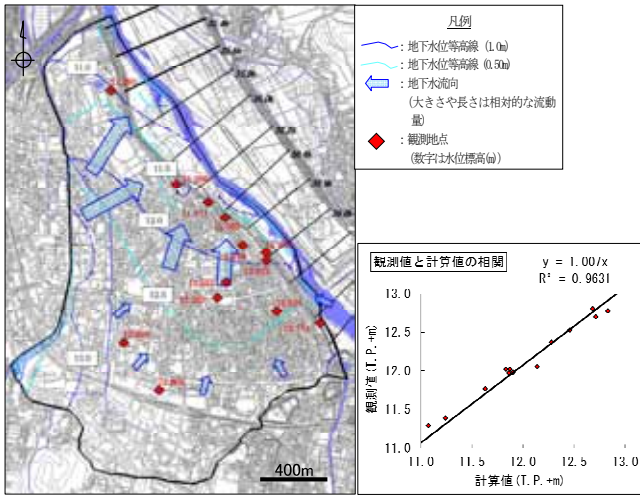


図-6 実測地下水の再現計算結果

(4) 地下水位影響予測

構築した三次元地下水解析モデルを用いて、平成 26 年度施工区間である 36.6k-60 から 36.8k の区間に漏水対策（鋼矢板）を行った場合の影響予測を行った結果、矢板設置箇所から約 30m の範囲で地下水位が最大で 0.20m 程度上昇する予測となった(図-7)。

残施工区間についても同様に、一連区間を遮水した場合の地下水影響予測を三次元解析モデルを用いて行った。その結果、矢板設置箇所を中心として放射状に広がり、地下水位が最大で約 0.45m 上昇する予測結果となった

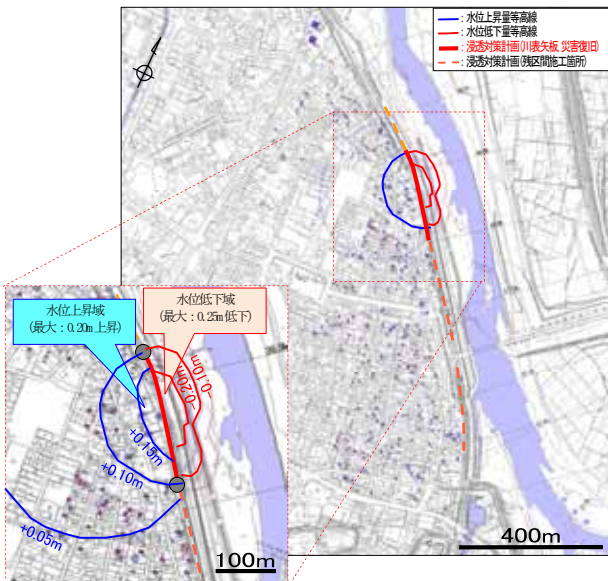


図-7 影響予測結果 (H26 年度施工区間)

(5) 施工モニタリング

施工時の地下水モニタリングの結果、矢板打設前と矢板打設後では由良川水位と代表地点（36.6k+50-堤内）の地下水位の水位差が施工前に比べ0.20m増加した（施工前+0.15m、施工中+0.25m、施工後0.35m）。堤内地の地下水の濁りは施工中において発生しなかった(図-8)。平成 26 年度対策区間施工から 1 年が経過した後、施工前と施工後の水位および水質を比較し、定性的な影響評価を行ったところ、平成 26 年度施工区間に対して当

該地区における地下水位および水質の大きな変化が見受けられないことにより施工影響が収束したことが考えられる(図-9)。

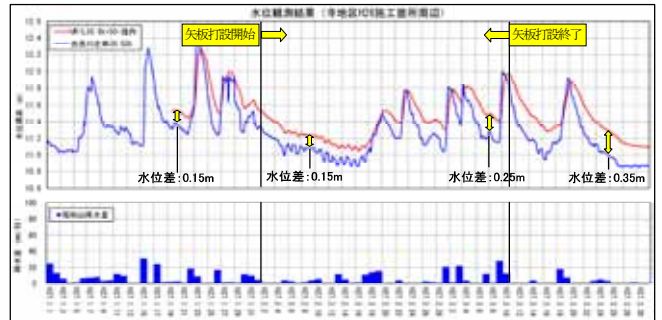


図-8 モニタリング観測結果

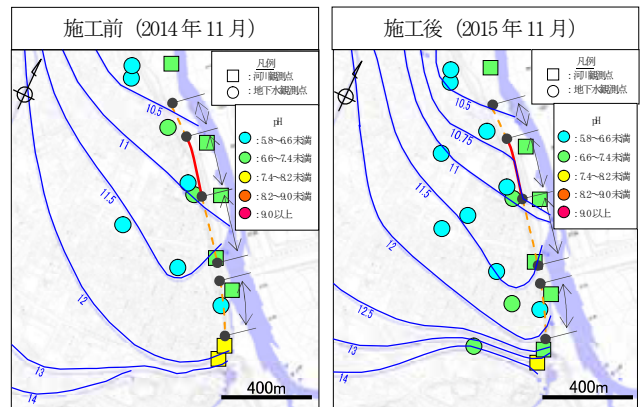


図-9 施工前と施工後 1 年における地下水コンターと水質の変化

3. 全体区間の地下水位分布と流動状況

昨年度の結果をふまえ全体区間の地下水流動の把握、ならびに影響予測を行うため、まずはじめに地下水解析エリア周辺の地下水流動機構を面的な把握を目的とした、地下水位観測および河川水位観測を幅広い流況下で実施した。水位観測では、地下水位・水質の測定を行い、平成 28 年度には新たに地下水調査範囲拡大、調査期間延長により既施工区間での施工後データおよび残施工区間の施工前データの蓄積を目的に地下水利用実態調査を行った。調査より施工区間地域全体での地下水流動状況の把握、後述する 3 次元モデル解析の精度向上に繋がった(図-10)。以下に地下水流動の特徴を記す。

寺町～内記下流

本地域では、背後の山麓及び弘法川から涵養され、沖積平野下を緩やかに流下し、由良川下に湧出する流れが確認されている。鋼矢板遮水ラインから約 50m の範囲では、由良川へ湧出する流れが矢板によって遮断されるため、堤内側で 5～15cm の地下水位上昇がみられる。

内記上流

37.0k の早瀬上流側では、由良川から 100~150m の範囲で地下水が堤内向きの動水勾配を示しており、由良川からの地下水と山地丘陵からの地下水との間に「地下水位の谷」が存在している。この地下水位の谷の位置は流況に応じて変化することが確認されており低流況ほど谷筋が明瞭となる。

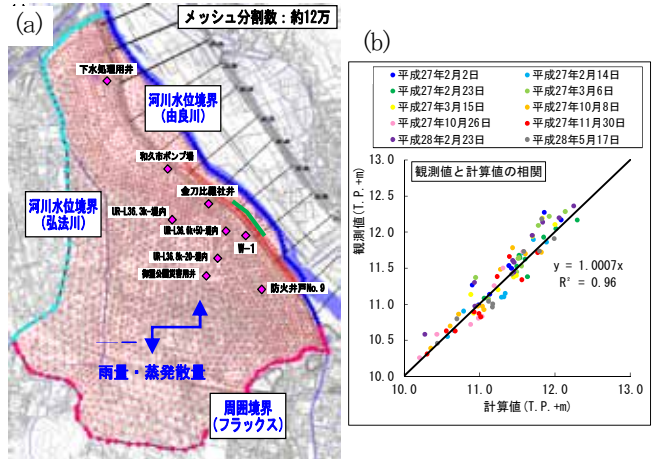
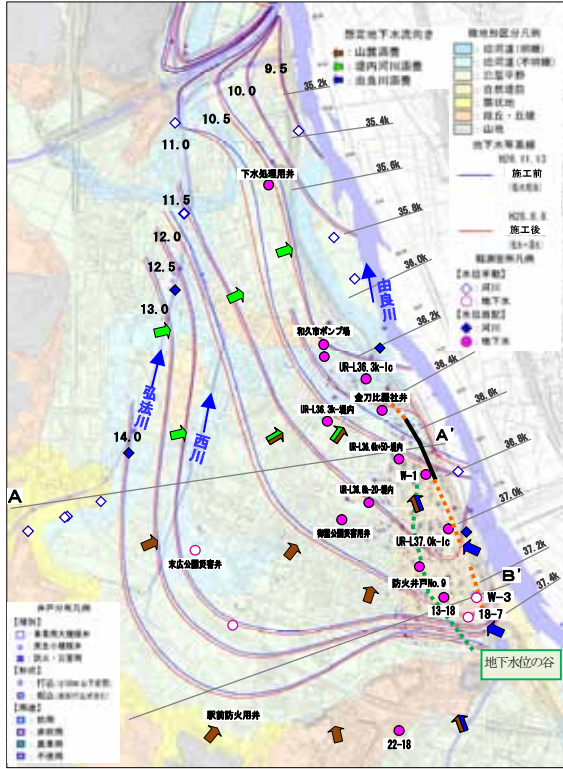


図-11 モデルにおけるメッシュの分割・検証地点および結

5. 過年度および今後の施工影響評価

実測データ及び地下水解析モデル計算に基づき、平成 26 年度施工による影響評価及びび残区間施工時の影響予測結果を踏まえた地下水利用に対する影響評価を行った。

(1)平成 26 年度施工による影響評価

a) 地下水特性に対する影響

鋼矢板打設により由良川へ湧出する流れが遮断（ダムアップ）され、堤内地下水位の上昇・水質変化・出水後（降雨後）における地下水位低下速度の鈍化・地下水流向の変化が懸念された。

まず地下水位の変化については、由良川水位観測地点（国 36.63k）と矢板打設区間近傍観測井（UR-L36.6k+50堤内）の日平均水位を平成 26 年度施工前中で比較検討を行った。その結果、水位差は矢板打設前・中・後にかけて拡大していき、平水位時において施工前後で比較すると 0.05~0.12m の地下水位上昇が認められた（図-12）。施工後 1 ヶ年の観測により、流況変化による影響の拡大等がない「影響の収束」が確認された。また、水質は矢板打設中を含め、有意な変化（濁りの発生や飲用項目の数値悪化）はなく、地元からの施工後における利水障害等の報告もなかった。

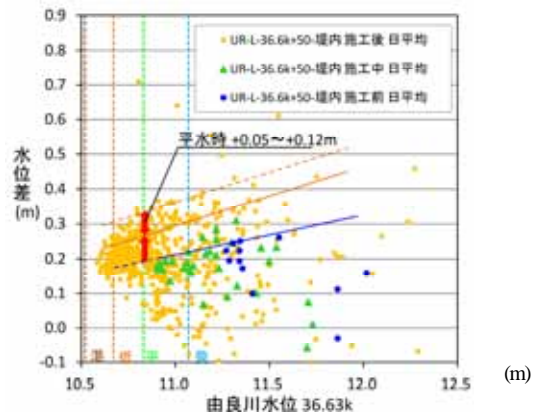


図-12 由良川-地下水水位差分布図

次に、矢板打設前後における出水後（降雨後）における地下水位低下速度鈍化の有無や流向変化について、実

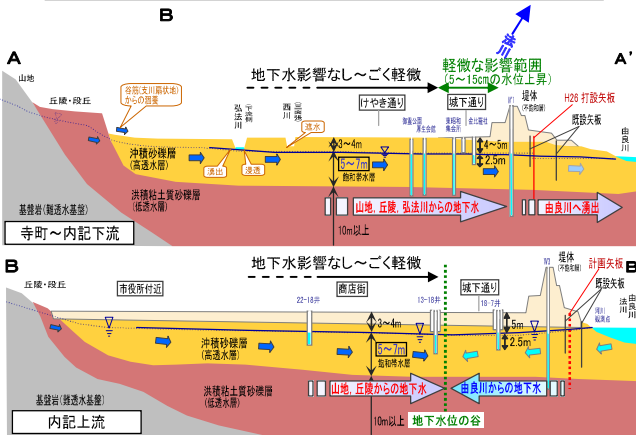


図-10 H26 施工前後における地下水流動平面図・断面

4. 解析モデル

解析モデルについては、昨年度と同様に、三次元モデルを採用した（図-11(a)）。平成 28 年度に調査範囲拡大及び調査期間延長し、実施した水利用実態調査により、より精度の向上した 3 次元モデルを構築した。

作成したモデルの再現性については、実測した地下水位とモデルの計算値を比較し検証を行った。検証の結果、計算値と観測値の相関性が高いことからモデルの信頼性が十分に確保されていることを確認した（図-11(b)）。

測水位データ、解析モデルによる再現計算結果より検証を行った。H26年度矢板打設前後の類似の水位ピークを有する降雨後の地下水位低下速度を比較した。矢板打設区間近傍における水位低下中のハイドログラフは、施工前後で概ね同等の勾配・水位低下時間を示すことから、地下水位低下速度の鈍化は認められない。(図-13) また、施工前後の流向・流速変化は矢板至近部(堤防裏法尻から10m以内)に留まっており、旧河道を通じ、由良川へ排水される流経路に変化はない。(図-14)

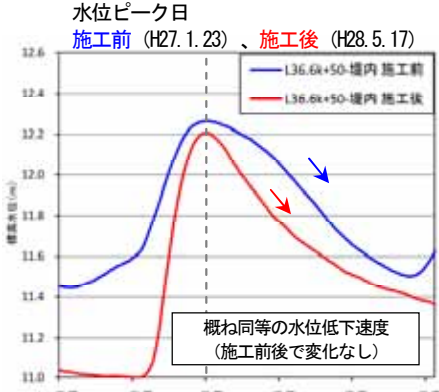


図-13 施工前後の地下水位低下

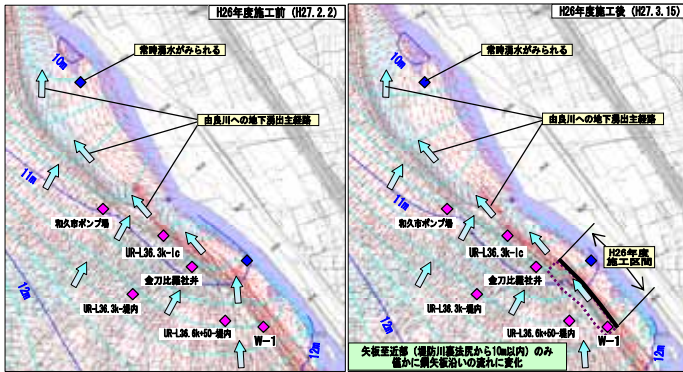


図-14 施工前後の流向分布の変化(モデルによる再現計算)

b) 堤防本体に対する影響

鋼矢板打設により、堤防から10mの範囲で流向・流速が僅かに変化し、地下水の流れが矢板打設箇所近傍に集中することにより堤防本体へ影響が懸念された。当該地の再現計算で得られた最大流速は $V_p=0.03\text{cm/s}$ (砂礫の有効間隙率一般値20%で実流速換算後)であり、既存ボーリングの粒度試験25%粒径 $D_{25}=0.41\text{mm}$ で文献の限界流速と対比した結果、パイピングの安全率としては「安全圏」であると判定した(図-15)。

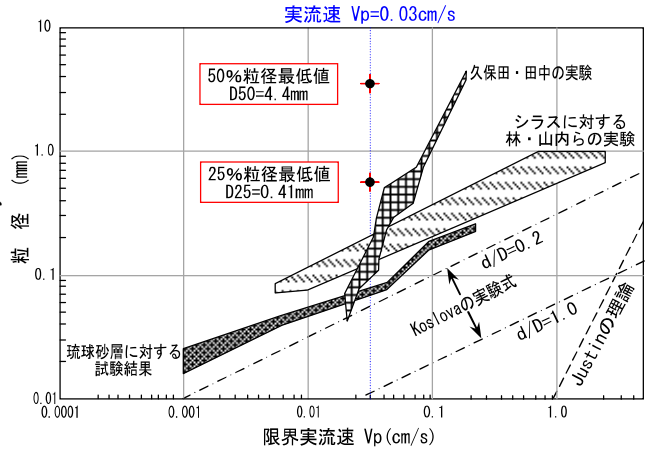


図-15 粒径と限界流速の関係(大野ほか, 1982に加筆)

(2) 全体区間施工後の影響予測と利用への評価

三次元モデルを用い、残区間の施工ステップごとの地下水変動(地下水位・流速・流向)を予測した(図-16)。当該地域では37.0k付近を境に地下水流動のメカニズムが異なるため、施工区間によって予測結果が以下のように分けられる(図-17)。

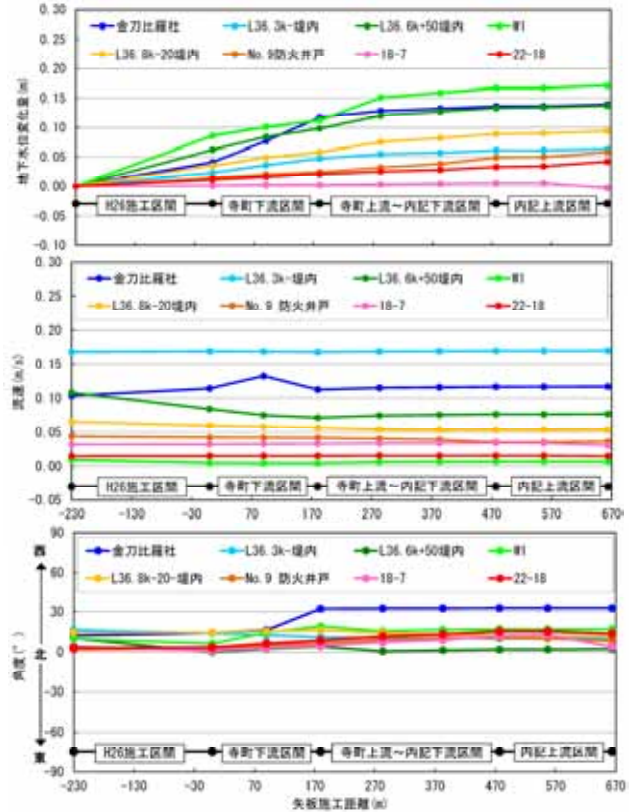


図-16 施工進捗毎の評価地点における水位・流速・流向の変化

寺町～内記下流: 背後地から由良川へ向かう地下水のせき上げにより、鋼矢板打設ラインから概ね250mの範囲で0.1m~0.2mの地下水位上昇が予測される。地下水位が上昇することから、揚程軽減となり取水への量的影響は発生しない。地表付近の土壤水分量については、予測される水位変化量が地下水面の深度(4m前後)と比較して小さく、当該地区の地盤特性(砂礫卓越)からみて影響は極めて小さいと評価される。なお、水質面で

は地下水の流向・流速は有意な変化は予測されず、水質悪化の可能性は低い。

内記上流：由良川・法川から堤内へ向かう地下水の遮断により、鋼矢板打設ラインから概ね 80m の範囲で 0.05~0.1m の地下水位低下が予測される。地下水位の低下範囲は限定的で低下量も小さいため、量的影響は軽微と推定される。水質面では地下水の流向・流速は有意な変化は予測されず、水質悪化の可能性は低い。ただし、当地区では河川から堤内向きの地下水流動が存在することから、施工中における濁水流入の可能性があるので、慎重な施工が必要になる。

地名	矢板からの距離 (m)		地盤高		H26.8 観測 (低水~高水位)		予測水位変化量 (m) (鋼矢板打設前比)	
	H26 区間	全体区間	GL (m)	GL (-m)	GL (m)	GL (-m)	H26 区間	全体区間
室刀比羅社	26.4x30	88	90	15.9	5.211	10.589	+0.041	+0.129
UR-L36.3x-堤内	26.4x-80	275	225	15.48	4.714	10.786	+0.023	+0.063
UR-L36.6x-50-堤内	26.6x+55	100	100	16.117	5.295	10.822	+0.062	+0.137
W1	26.8x-20	25	25	21.289	10.443	10.844	+0.066	+0.171
UR-L36.8x-20-堤内	26.8x+175	300	300	16.15	4.925	11.225	+0.035	+0.094
No.9 防火井戸	27.0x+55	480	180	16.598	5.254	11.342	+0.014	+0.058
18-7	27.2x+25	550	70	16.92	5.198	11.722	+0.001	-0.003
22-18	27.2x+20	710	550	16.215	2.16	14.055	+0.011	+0.042

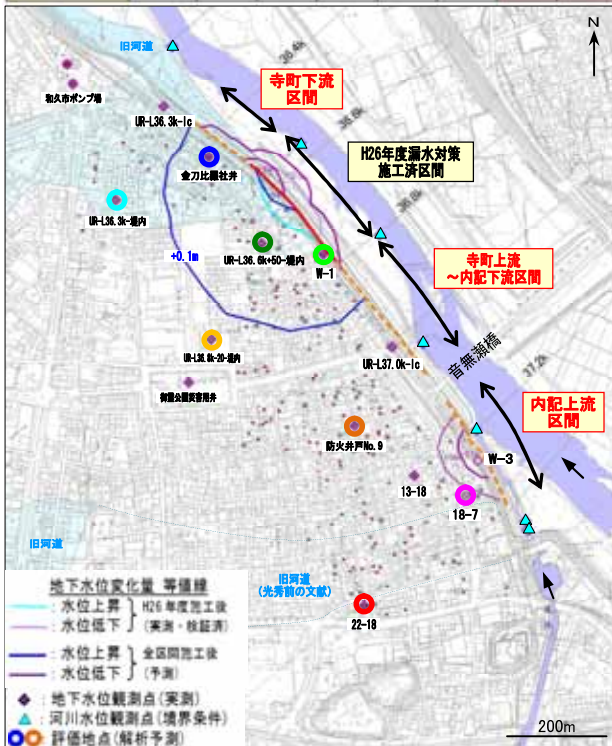


図-17 H26 年度施工影響の再現及び全区間施工後の影響予測

6. 今後の施工にともなうモニタリング計画

鋼矢板遮水区間は最終的に延長約 1km に達するため、施工の進捗に応じて影響が累加すると考えられる。平成 26 年度施工の影響実績、今後の影響予測結果を踏まえ、3 区間が年度別に順次施工されることを想定し、施工区間に重点配置し、施工済み区間では順次観測の項目・密度を低減させていくことにより、影響発生の有無と累積・収束を合理的に把握する（図-18）。施工後の地下水位の上昇・低下は量的に軽微であり利用上の影響は生じないと考えられるが、施工 3 年目の内記上流地区

（由良川近傍範囲）は、由良川から堤内向きの地下水流動が存在するため矢板打設中の濁水流入の可能性があるので、当地区に大規模な取水井はないが、一部銭湯、池水（鯉）、飲食物加工用に常用されている井戸が含まれていることから、リアルタイム水位・濁度監視を含む慎重なモニタリングが必要である。施工時には施工者・地元関係者との情報共有を図りつつ慎重な工事を進めていく。

7. まとめ

○H26 年度施工による施工影響評価

地下水位は平水時 0.05~0.12m の上昇にとどまり、水質についても濁り等の有意な変化は見られなかった。出水時の地下水位低下速度は施工前後で概ね同等となった。

○全区間施工後の施工影響予測

寺町~内記下流

0.1m~0.2m の地下水位上昇が予測される。量的な影響や水質悪化が起こる可能性は低く、土壌水分量も当該地区の地盤特性より影響は極めて小さいと思われる。

内記上流

0.05~0.1m の地下水位低下が予測されるが、範囲が限定的で低下量も小さいため、量的な影響や水質悪化の可能性は低いと思われる。ただし、河川から堤内向きの地下水流動が存在するため、慎重な施工が必要となる。

○今後の施工モニタリング

H26 年度の施工実績や今後の影響予測結果を踏まえ、今後も影響発生の有無と累積・収束を合理的に把握する必要がある。

8. 謝辞

本稿の作成にあたり多くのご指導及びご助言をいただきました平成 26 年度「由良川左岸地下水調査業務」の担当者様、受託者である建設技術研究所（株）に感謝の意を表します。

引用文献

大野睦雄・山崎 弥・トランデュックフィオアン：砂のパイピング特性に関する実験的研究，第 17 回土質工学研究発表会講演集，pp.2317~2320，1982

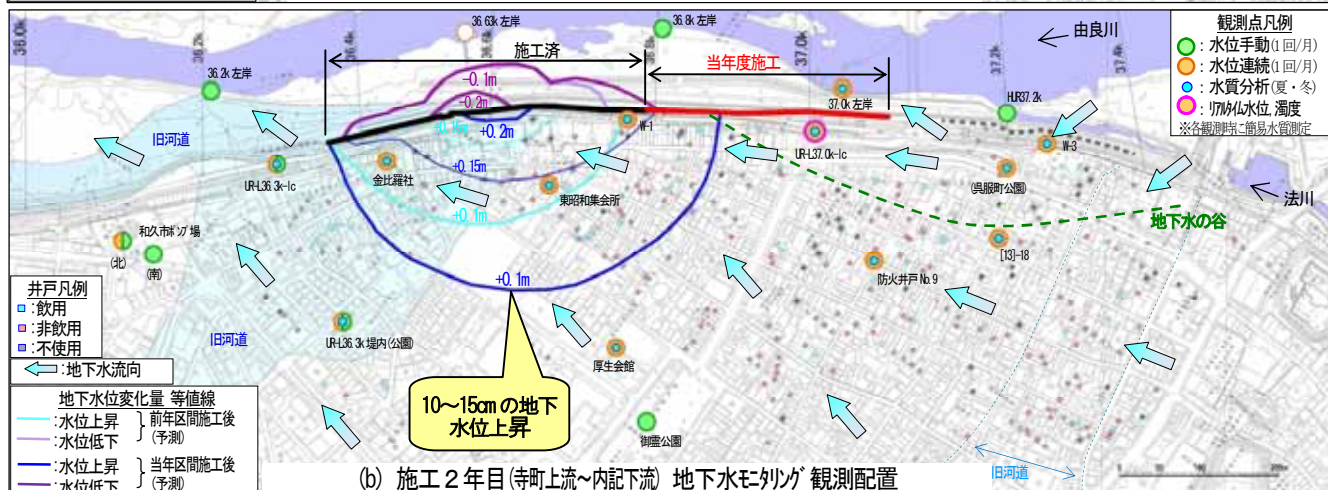
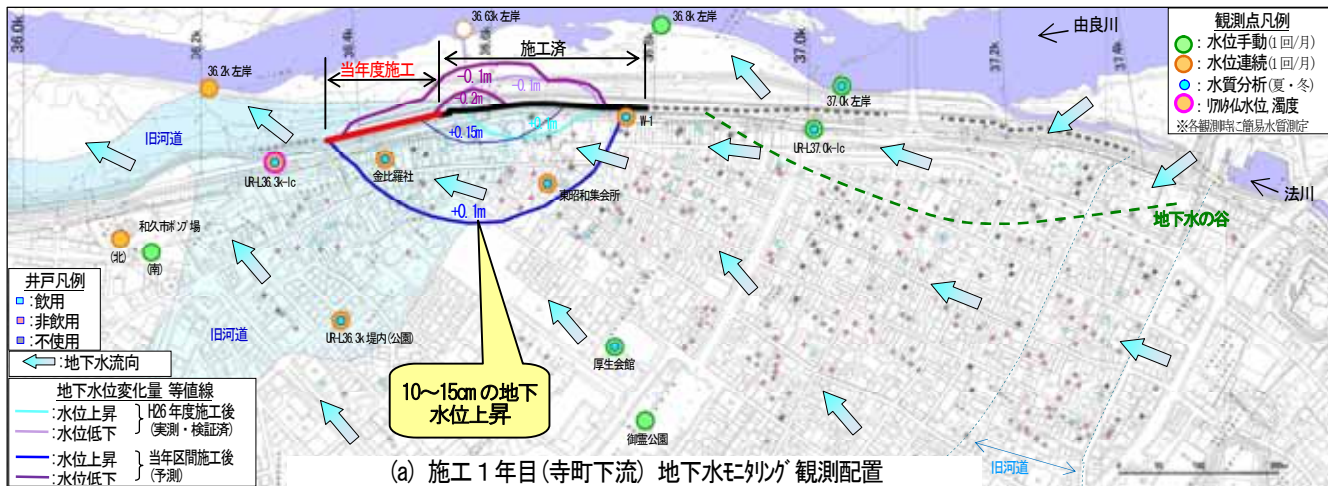


図-18 年度毎の地下水モニタリング観測配置図

高精度 DEM を用いた崩壊地からの土砂移動特性の把握

岸本 昌之

近畿地方整備局 六甲砂防事務所 調査課 (〒658-0052 神戸市東灘区住吉東町3丁目13-15)

本報告は、2014年8月の豪雨による崩壊発生前後と発生から2年後の3時期の航空レーザ計測データを用いて、六甲山系における近年の土砂移動特性を把握したものである。規模の大きい崩壊地を、崩壊区間、流下区間、堆積区間に分け、標高差分値からそれぞれの変動状況を見ると、崩壊深の方が侵食深よりも大きい、崩壊直下流の砂防堰堤では崩壊土砂の多くが捕捉されている、といった特徴が確認できた。崩壊発生直後と2年後の差分解析結果からは、流域内で生産された土砂が、その後下流へと移動している傾向がみられた。また、六甲山系の特徴的な土砂移動現象として、平成7年兵庫県南部地震による崩壊で発生した土砂が、2014年の豪雨で大きく侵食され、下流へ再移動している事例が確認された。

キーワード 航空レーザ計測, 表層崩壊, 差分解析, 土砂移動特性, 地震による崩壊

1. はじめに

六甲山系では、2013年以降の台風等による降雨などにより、急峻な山腹斜面で崩壊が随所で発生した。なかでも、平成26年台風11号による豪雨(以下、「2014豪雨」とする)は時間雨量と総雨量がともに多く、比較的規模の大きい崩壊が多発するとともに、土石流が発生するなど崩壊地からの土砂移動が多数確認されている。

ここでは、六甲山系において2014豪雨で発生した崩壊地を対象に、崩壊発生前後、及び数年経過した後の航空レーザ計測による高精度数値地形モデル(DEM: Digital Elevation Model)を用いた解析を実施し、崩壊による土砂移動特性、崩壊の分布状況、崩壊発生後の土砂移動状況、六甲山系に特徴的な土砂移動についてとりまとめた結果を報告する。

2. 航空レーザ計測の実施

六甲山系で、2011年、2014豪雨直後、2016年の3時期に航空レーザ計測および空中写真撮影を実施した(表-1)。2016年の計測では、10点の調整用基準点と7箇所のキャリブレーションサイトを設置し、標高誤差および水平位置誤差を最小化した。計測データから地盤標高データを作成するためのフィルタリング処理では、処理データから地形表現図を作成し、砂防ダム等の構造物の欠損や植生の残存による精度の低下を防止した(図-1)。また、計測時期による水平位置ずれを確認するために、DEMからレタレーション画像(詳細な標高差で繰り返し色を

変化させた、等高線のような画像)を作成し、2時期の画像を重ね合わせることにより、その影響有無を確認した(図-2)。その結果、水平位置ずれにより発生する干渉縞は見られず、水平誤差は極めて小さいことが分かった。

表-1 使用した空中写真および航空レーザ計測データ

使用データ		撮影時期	仕様
空中写真データ	崩壊前	2011.11.26, 12.14	地上解像度: 50cm以下
	崩壊直後	2014.9.6~9.10	地上解像度: 50cm以下
	崩壊後	2016.8.11	地上解像度: 25cm以下
航空レーザ計測データ	崩壊前	2011.11.27~2012.1.6	1mDEM
	崩壊直後	2014.9.6~9.10	1mDEM
	崩壊後	2016.10.24~11.2	1mDEM

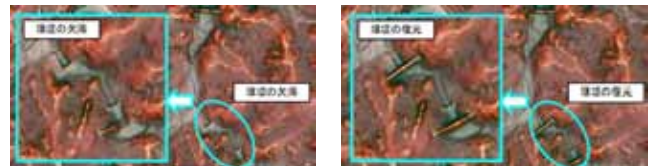
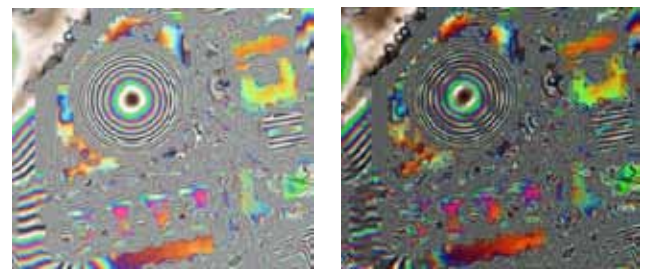


図-1 地形表現図を用いたフィルタリング処理の確認と修正



2 時期のレタレーション画像の重ね合せ
2 時期の水平誤差による干渉縞は見られない
X-Y 方向にそれぞれ 1.0m シフトした画像
干渉縞が発生している

図-2 2 時期の水平誤差の確認

3. 航空レーザ計測データを活用した崩壊地判読

2014 豪雨前後に実施した航空レーザ計測データを用いて、地形表現図作成と差分解析を実施した。その結果を過去に実施された空中写真判読結果と比較対照することにより、崩壊地を、斜面が崩れた区間（崩壊区間）、崩れた土砂が流下した区間（流下区間）、流下した土砂が堆積した区間（堆積区間）の3つに分類し、その範囲を特定した（図-3）。

崩壊地およびその周辺の標高差分図を詳細に見ると、崩壊地内では、明瞭な地盤標高の低下がみられる一方で、その周辺部に地盤が上下する範囲が不規則に表れていた。これらの箇所は、オルソ画像で見ると樹林に覆われていることから、地盤形状は大きく変化しておらず、樹木の繁茂によってレーザが遮蔽された影響で生じる誤差の影響を受けている可能性がある。このとき、図-3の範囲内の崩壊地以外の標高差分値の平均値を算出すると約-7cmであった。

この結果から、崩壊地以外の範囲では、正負の誤差は概ね相殺されているが、場所ごとに見ると誤差を有することを考慮し、崩壊地として抽出した範囲内を対象に土砂移動の検討を行うこととした。また、崩壊地と同様に、堰堤の堆砂地も土砂の堆積等が活発で植生の影響を受けにくいため、その範囲を特定して土砂移動の検討対象とした。

4. 崩壊による土砂移動特性

崩壊土砂量を崩壊面積規模別に集計すると、崩壊面積が1,000m²以上の崩壊地（全259箇所中9箇所（図-4））から生産される土砂量が、全体の30%以上を占めることがわかった。そこで、全体の土砂移動特性に大きく影響すると考えられる1,000m²以上の崩壊地に着目し、崩壊前後の高精度DEMを用いて、詳細な土砂移動状況の把握を行った。

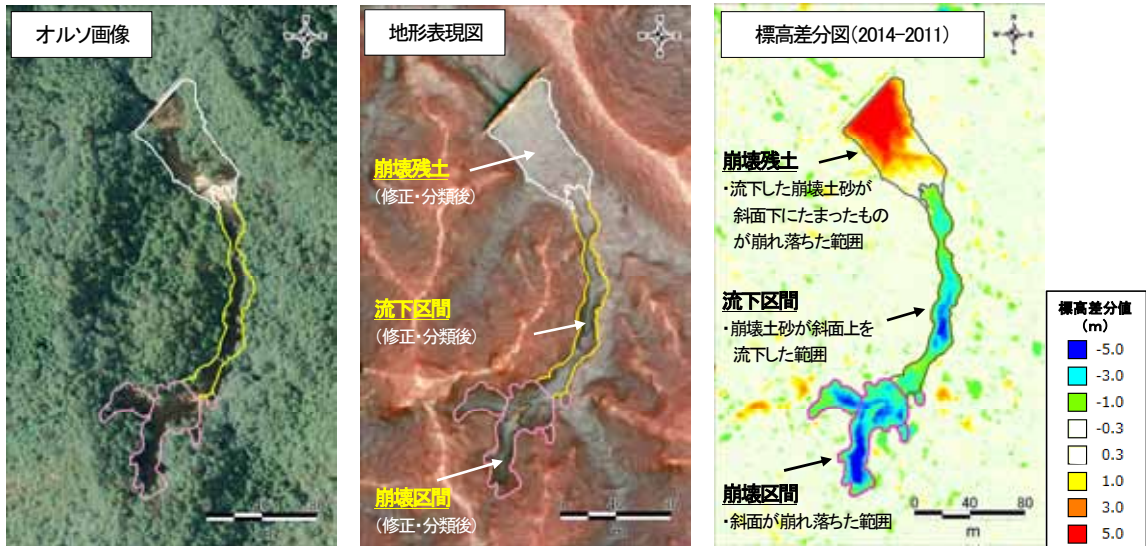


図-3 地形表現図と標高差分図を用いた判読結果の修正と分類

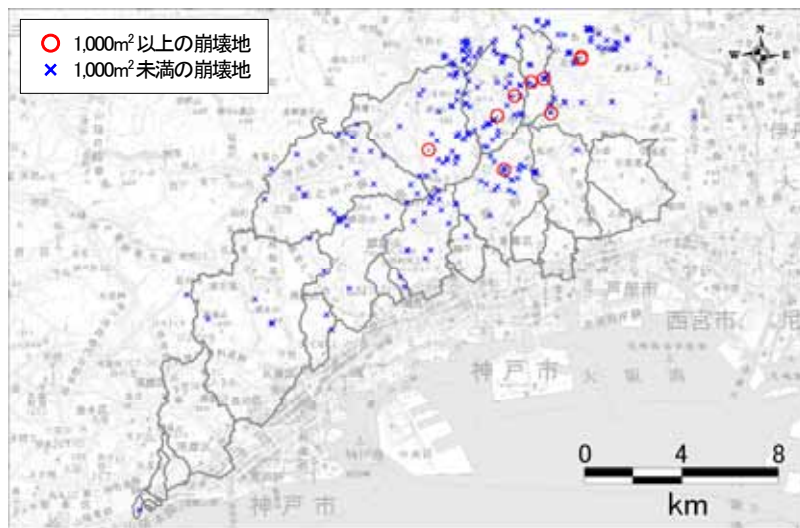


図-4 2014年の豪雨による崩壊地の分布

その結果から、崩壊区間の標高差分値（崩壊深）の方が、流下区間の標高差分値（侵食深）より大きく、崩壊土砂量が侵食土砂量より多い傾向が確認された（図-5）。また、縦断的な土砂収支傾向では、崩壊及び流下区間で生産された土砂が崩壊直下で堆積しているものと、その多くが下流へ流出しているものが確認された。前者は、崩壊直下に砂防堰堤が存在している場合に多く見られ、崩壊土砂を捕捉している様子が確認された（図-6、図-7）。

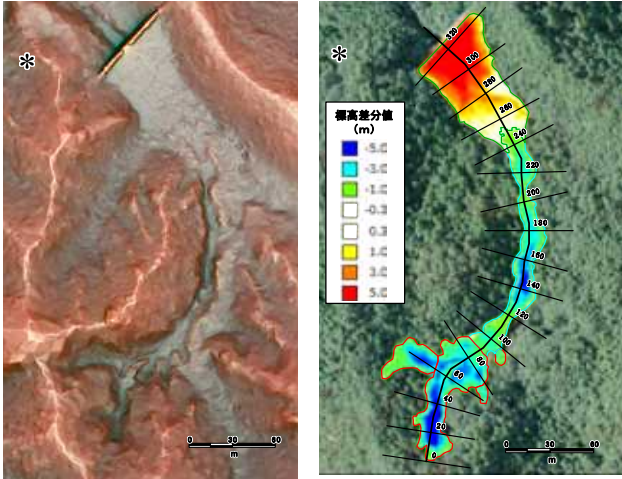


図-5 崩壊地周辺の地形表現図（左）と標高差分図（右）

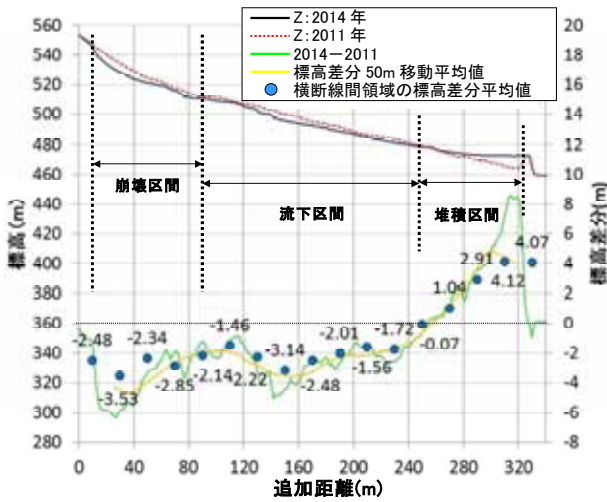


図-6 崩壊地周辺の標高および差分値の縦断面図

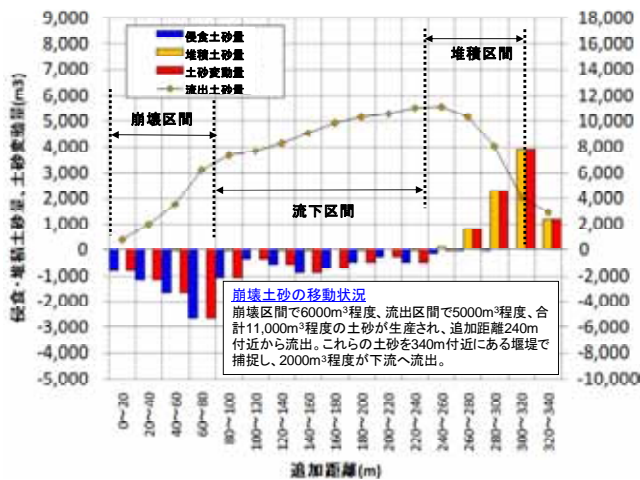


図-7 崩壊地周辺の縦断的な土砂収支傾向

5. 流木堆積状況の把握

2014 豪雨では、土砂とともに流木が発生し、堆砂地上に堆積している状況が確認された（図-8）。そこで、航空レーザ計測による3次元点群データを用いて、堆積箇所の縦横断面図を作成すると、堆積した流木の縦横断面形状が概ね確認できた（図-9）。縦横断面図から堆積物の輪郭を推定すると、概略の体積を知ることができる。



図-8 堆砂地上に堆積した流木

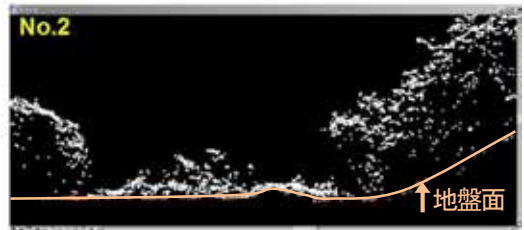
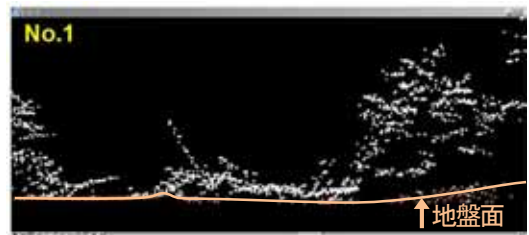
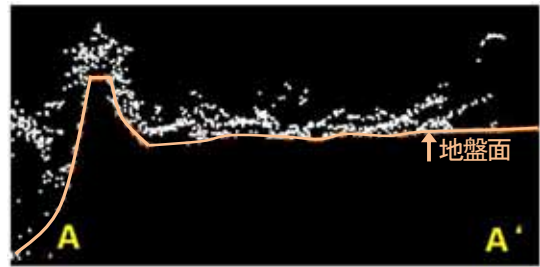


図-9 3次元点群データでみた堆砂地上に堆積した流木

6. 2014 年崩壊発生後の土砂移動状況

2016 年度に実施した空中写真撮影および航空レーザ計測結果を用いて、崩壊地判読と差分解析を行った。その結果、2014 豪雨以降に発生した崩壊は、数が少なく規模も小さいことが分かった。崩壊地と堆砂地は、植生が消失したことにより僅かな土砂の移動変化も把握しやすいことから、標高差分値を流域ごとに集計して土砂移動傾向を確認した。その結果、2011 年から 2014 年崩壊直後は堆積土砂量が多かったのに対し、2014 年崩壊直後から 2016 年にかけては侵食土砂量が多く、多くの流域で土砂が流出する傾向にあることが分かった (図-10)。

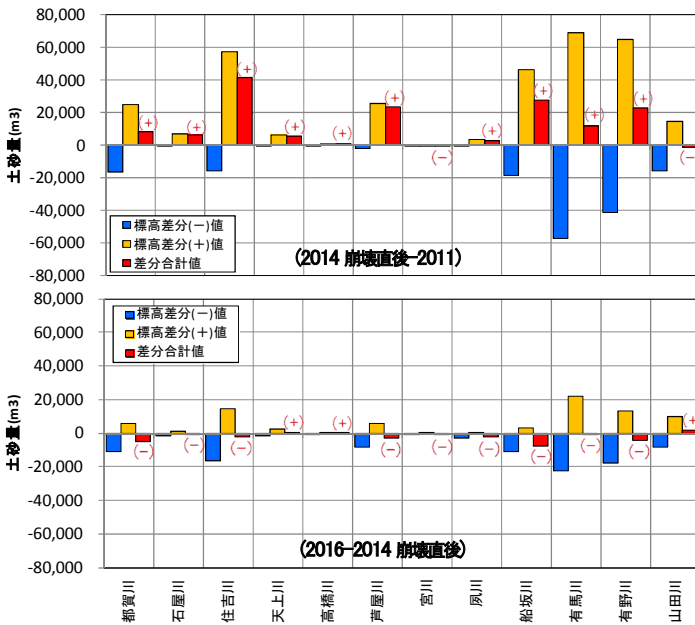


図-10 崩壊前後 (上) と崩壊以降 (下) の標高差分合計値

堆砂地の形状に変化が見られた有馬川流域の白石第二堰堤と白石第三堰堤の堆砂地の標高差分図を図-11 に、それぞれの堰堤堆砂地の縦断形状を図-12 に示す。

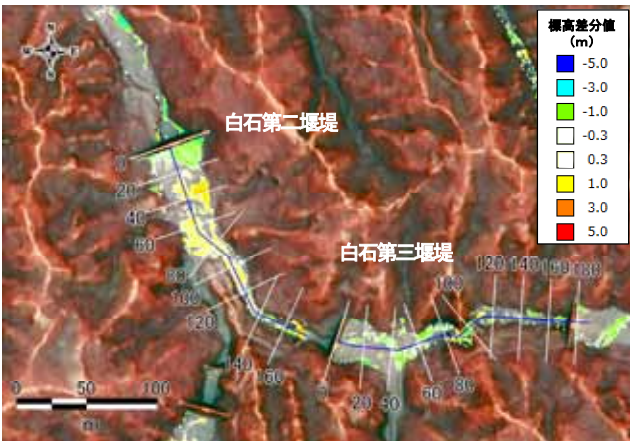


図-11 2014 豪雨以降の堰堤堆砂地の標高差分図 (2016-2014) (有馬川流域 白石第二堰堤と白石第三堰堤)

上流に位置する白石第三堰堤では、2014 豪雨で堆積した土砂の一部が 0.5m 程度侵食されている。一方、下流の白石第二堰堤では、0.5m~1.0m 程度の堆積が見られる。差分図および縦横断面図から、2014 豪雨時に捕捉された土砂が侵食され、下流に流出している状況が分かる。

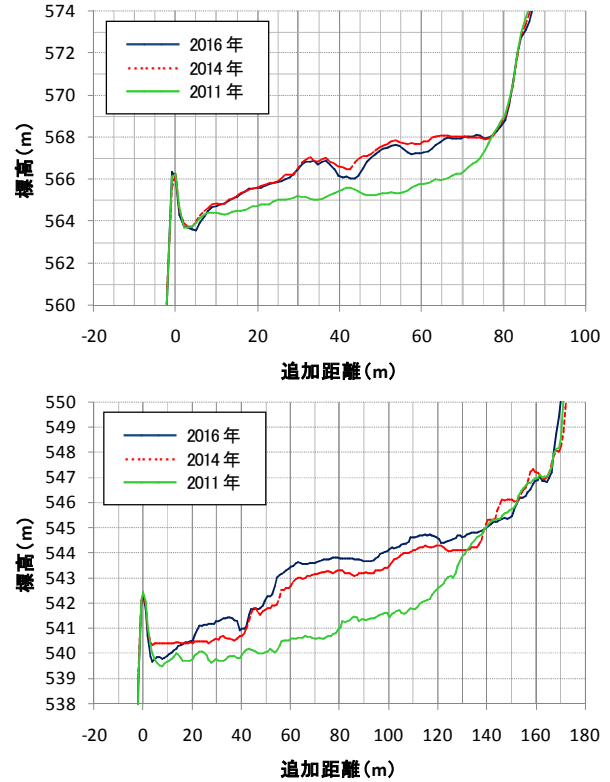


図-12 2014 豪雨以降の堰堤堆砂地の縦断変化 (有馬川流域 白石第三堰堤 (上) と白石第二堰堤 (下))

7. 地震による崩壊残土の再移動

武庫川水系仁川流域の崩壊事例を確認すると、流下区間の上部が平成 7 年兵庫県南部地震により崩壊した箇所であった。地震後に実施された崩壊地調査のスケッチによると、崩壊下部約 25m にわたり、崩壊残土が 0.5m~1.0m 程度堆積していたことが記録されていた。

これに対し、2014 年と 2011 年の縦断図と標高差分図を確認すると、地震による崩壊残土が堆積していたと考えられる範囲付近は 2~3m 程度の侵食が確認された (図-14, 図-16)。また、その下流には過去の豪雨などによる流出土砂が溪床に堆積したと推察される範囲が存在し、2014 豪雨時に両岸が侵食され土砂が流出していた。

流出した崩壊土砂の一部は、下流に設置された不透型砂防堰堤で捕捉された。堆砂地の縦断図を見ると、有効高約 5.0m の不透型堰堤は 2014 豪雨による崩壊前から堆砂しており、崩壊に伴う土砂流出で最大 3.5m 程度、平均 1.0~2.0m 程度まで堆砂が進行したことが分かる (図-15)。

2014 豪雨による土砂の平面的な変動量を示す図-16 と縦断的に示す図-17 から、崩壊時の土砂の移動特性を推定すると、①崩壊上部 (No. 0~No. 80) で生産された崩壊土砂のうち約 1,740m³ が流出、②地震による崩壊残土が堆積する区間付近 (No. 80~No. 160) でさらに 4,550 m³ の土砂が侵食、③残存土砂を除く 6,230 m³ が下流に流出、④過去の地震による崩壊土砂が溪床に堆積している区間 (No. 160~No. 260) で侵食された土砂約 2,100 m³ が加わり約 8,210 m³ の土砂が谷出口 (No. 260) から流出、⑤谷

出口より下流では、不透過型堰堤による捕捉量 2,410 m³ を含む 3,810 m³ の土砂が堆積、⑥河道で侵食された 1,130 m³ を加えた約 5,530 m³ が下流に流出、といった区間毎の土砂移動変化が生じたと考えられる。

この結果から、谷出口から流出した土砂の約 50%が地震による残土を含む溪床堆積物から生産されたこと、堆砂の進行した不透過型砂防堰堤で土砂の捕捉がみられたことが、当該崩壊の土砂移動特性としてあげられる。

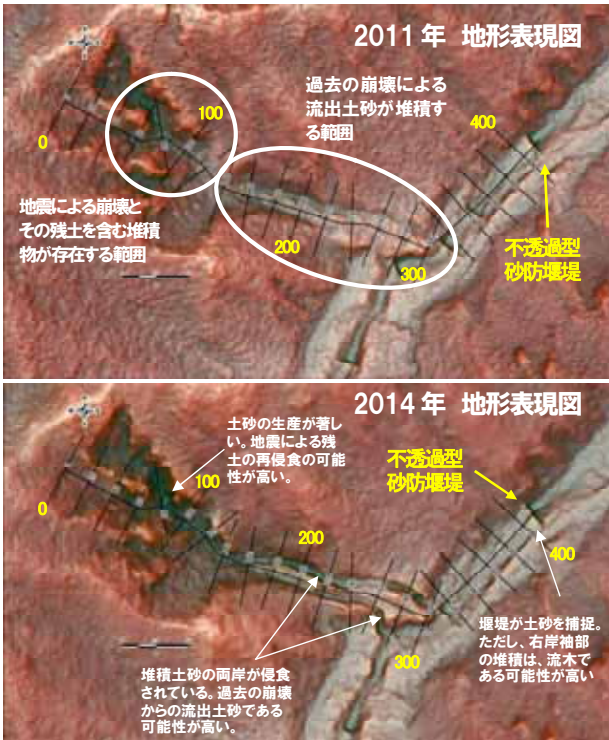


図-13 崩壊発生前後の地形表現図
(上：崩壊発生前，下：崩壊発生後)

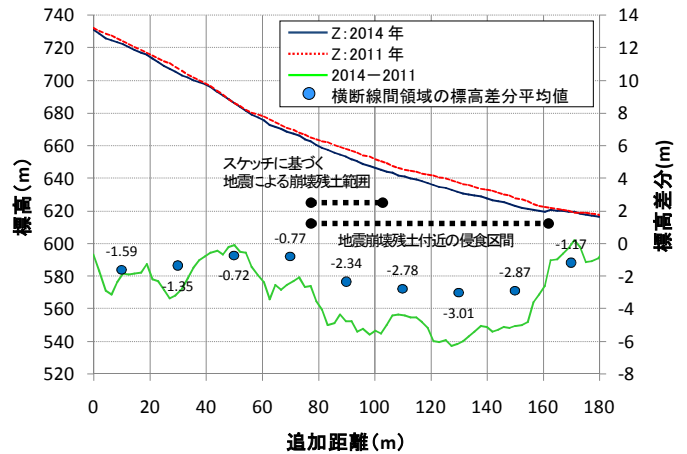


図-14 崩壊上部の縦断形状

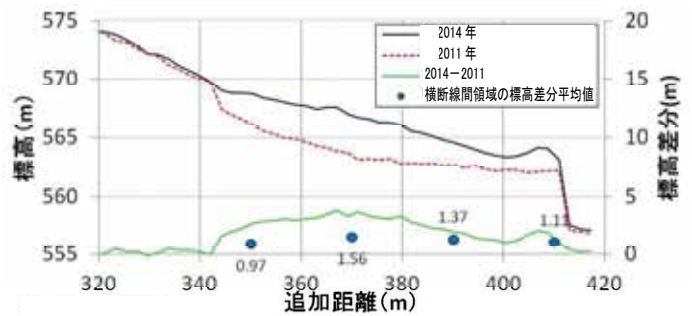


図-15 下流河川に設置された堰堤堆砂地の縦断図

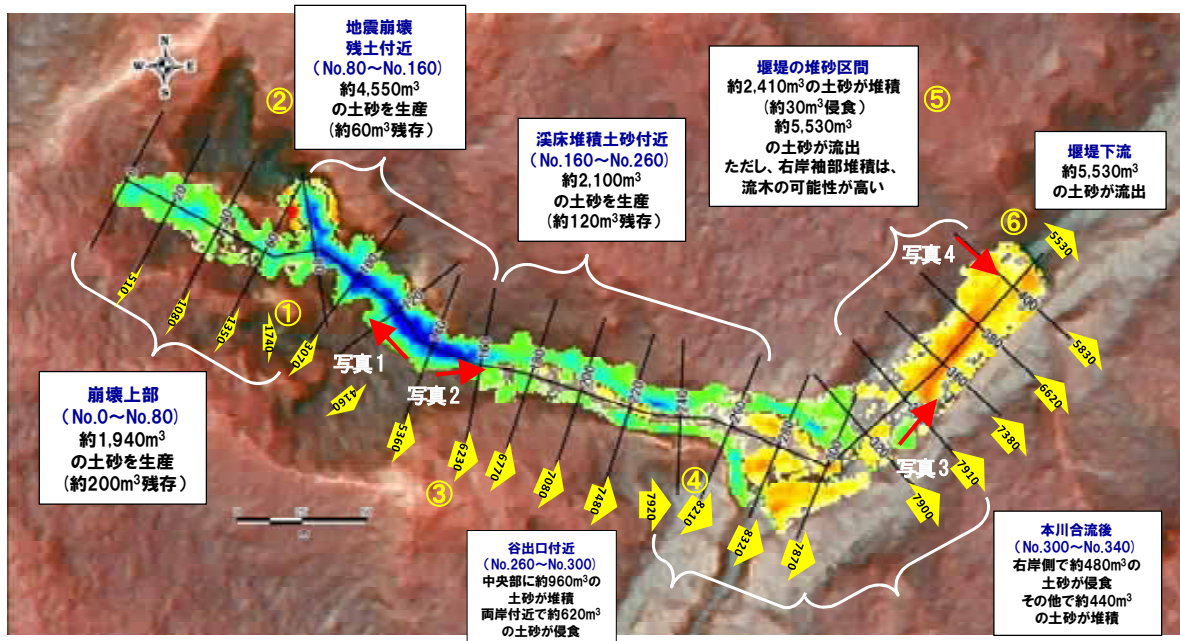


図-16 崩壊による平面的な土砂移動特性

(図中○数字は文中の記述に対応)

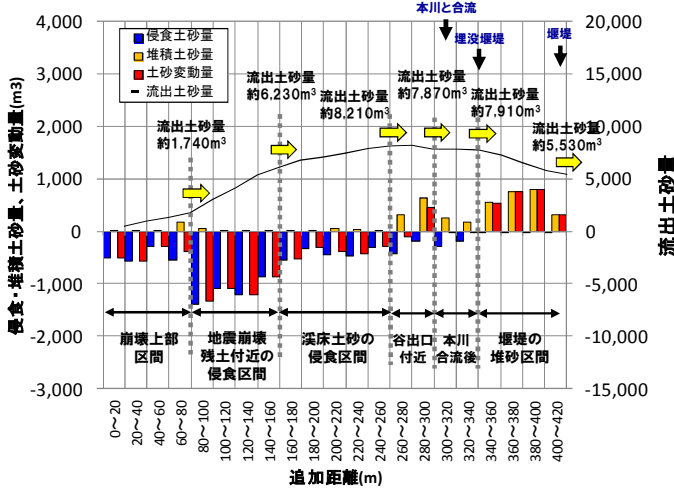


図-17 崩壊による縦断的な土砂移動特性

この結果は、現地調査でも確認されており、数m以上の溪床侵食(写真-1)や、溪岸堆積物の流出(特に左岸側が数m程度侵食)による土砂流出痕跡を見ることができた(写真-2)。さらに、砂防堰堤の堆砂地では、概ね標高差分図が示す堆積域、比較的新しい流出土砂の堆積が確認された(写真-3)。ただし、堆砂地の右岸側袖付近は、流木を多量に含むことも確認された(写真-4)。



写真-1 地震による崩壊残土を含む溪床堆積物の侵食状況



写真-2 溪床堆積土砂の侵食状況



写真-3 下流河川に設置された不透過型砂防堰堤堆砂地の状況



写真-4 堰堤右袖の直上流に異常堆積した流木と土砂

8. おわりに

本報告で示したように、空中写真判読および航空レーザ計測データの差分解析結果から、崩壊地からの連続的な土砂移動特性を把握することが可能であることが確認された。また、複数時期に航空レーザ計測を行うことで、流域内の土砂の流出・堆積変化の傾向も把握できることが分かった。これらの解析結果は、崩壊による土砂生産の規模や土砂量、土砂移動形態やメカニズムに関する重要な資料になると考えられ、砂防計画における土砂量や崩壊危険度評価、数値シミュレーションの検証材料に活用していくことが期待される。

一方で、解析を進めるにあたって、湛水した堆砂地の堆積形状の把握や、植生に覆われた溪床部からの生産土砂量の算出、堆砂地上に堆積した土砂と流木の区別などの技術的課題も確認されている。このため、航空レーザ計測データの解析技術のさらなる改良と開発、検証を進めていくとともに、今後、現地調査やその他の解析技術を併用して活用性を高めていくことが重要であると考える。

インバウンドの道路利用調査について

齊藤 秀樹¹

¹近畿地方整備局 京都国道事務所 管理第二課 (〒600-8234京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町808)

我が国において観光産業分野は成長分野として位置付けられ、国土交通省観光庁を中心としたビジットジャパン事業など、外国人旅行者の訪日促進の取り組みがなされている。その結果、外国人旅行者（インバウンド）は年々増加しており、平成27年には過去最高を記録している。これに伴い、外国人観光客の交通手段として、レンタサイクルやレンタカーの利用も増加しており、近年、外国人レンタカードライバーの交通事故の増加が問題となってきている。これらの状況に対応するために、外国人旅行者の生の声を把握し、道路管理者としてよりよい道路環境の整備・改善につなげることで観光振興に寄与していくべきではないかと考えた。そこで、外国人レンタサイクル利用者、外国人ドライバーを対象として、ヒアリング調査等による意見収集を行った。

キーワード インバウンド（訪日外国人旅行者）、案内標識、交通安全・交通事故対策

1. 京都市の観光動向

(1) 京都市におけるインバウンドの状況について

平成27年京都観光総合調査の結果によると、京都市の外国人宿泊客数は、2011年（平成23年）は東日本大震災により減少したが、その翌年以降は急激に増加している。2015年（平成27年）においては、過去最高となる316万人を記録しており、「京都観光振興計画2020」に掲げる外国人宿泊客数年間300万人の目標を5年早く達成した（図-1）。

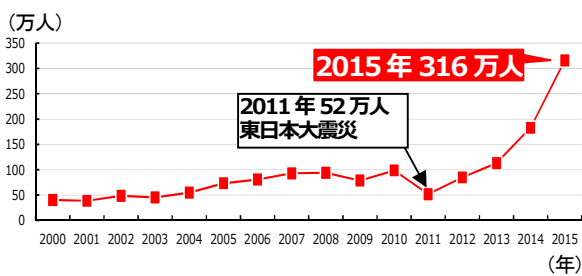


図-1 京都市内における外国人宿泊客数の推移
（「平成27年京都観光総合調査¹⁾」より）

2. 外国人の意見収集調査

(1) 背景と目的

「5000万人観光都市」から「5000万人感動都市」を目指している京都市では、毎年、国内外における観光客に対して満足度を調査し、質を高める取り組みを実施しており、京都市の「平成27年京都観光総合調査」によると、

京都観光について残念だったと感じたインバウンドの数は約2割であり、その内の約13%が「案内・標識・言語」について残念だったと感じていることが分かった（図-2）。道路環境としては、インバウンドにとって分かりにくい案内標識や路面表示などがあり、満足度を下げている可能性が考えられる。

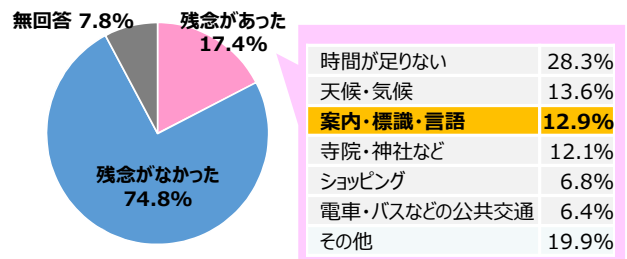


図-2 京都観光の残念度 (外国人)
（「平成27年京都観光総合調査¹⁾」より）

また、インバウンドの移動手段として、あまり利用されることが少なかった自動車（レンタカー）や自転車（レンタサイクル）の利用が増加している。これに伴い、外国人ドライバーの交通事故の増加が問題となってきており、自転車利用者においても今後、懸念されるところである。

そこで、外国人ドライバー、外国人レンタサイクル利用者を対象としたアンケートまたはヒアリングを実施するにより、利用者視点で問題点や課題を把握する事を目的として調査を行った。

(2) 外国人ドライバーを対象とした調査

近年、外国人ドライバーによるレンタカー事故が急増している要因は不慣れな右ハンドルや日本との交通ルールや慣習の相違があると考えられる。

本調査は、案内標識がどの程度理解されているか、また、外国人ドライバーの危険挙動を把握することを目的として、レンタカー店でのアンケート調査及び外国人に人気の観光施設（かやぶきの里）でのヒアリング調査を実施した。調査概要については表-1、表-2に示す。

表-1 レンタカー店でのアンケート調査の概要

調査日	平成28年12月28日(水) ～平成29年2月28日(火)
調査箇所	レンタカー店(6店舗) ※京都駅前2店舗 ※関西国際空港内4店舗
調査時間	各店舗の営業時間
調査手法	アンケート調査

表-2 観光地でのヒアリング調査の概要

調査日	平成28年11月21日(土)
調査箇所	京都府南丹市美山町 かやぶきの里
調査時間	10:00～16:00 ※観光施設営業時間
調査手法	ヒアリング調査

a) 調査手法

① レンタカー店でのアンケート調査

店舗にアンケートを設置し、店員よりレンタカー返却時の外国人にアンケートへの協力を依頼し、調査表の質問に回答を頂いた。



図-3 アンケート設置状況

② 観光施設でのヒアリング調査

自動車で観光施設に訪れた外国人ドライバーに調査員がヒアリング形式でアンケートの質問に回答して頂いた。



図-4 現地調査状況

b) 調査内容

アンケート及びヒアリングに用いた調査票の質問数は全13問で、主に案内標識の分かりやすさに関する質問と遭遇しそうな危険な状況に関する質問である。図-5に実際に使用した調査票を示す。なお、調査票は中国語（繁体字、簡体字）、英語、韓国語を用意した。

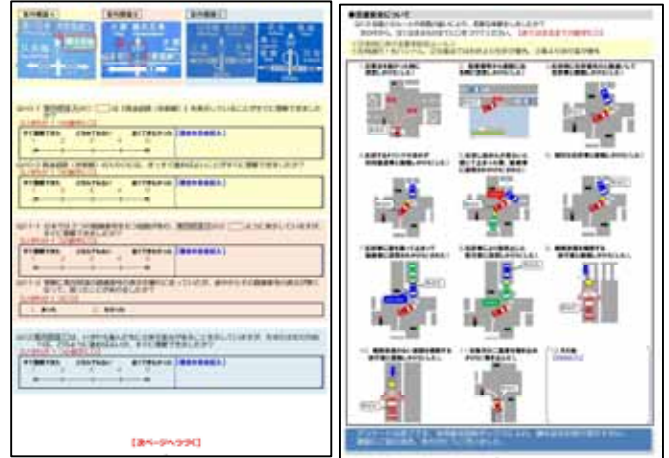


図-5 調査票(サンプル)

c) 調査結果

本調査の結果を以下に示す。

① 取得サンプル数は、レンタカー店（京都駅前、関西空港）で89、観光地（かやぶきの里）で36、合わせて125を確保した。

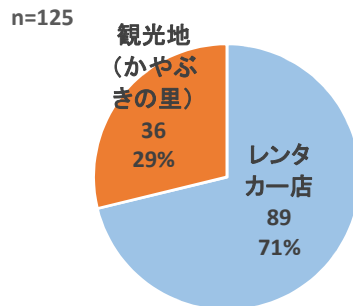


図-6 取得サンプル数

② 回答者の出身国については、香港55%、台湾27%、韓国5%であった。大半を占める香港は、日本と同じ左側通行であるが、台湾、韓国は右側通行であり日本と異なる。

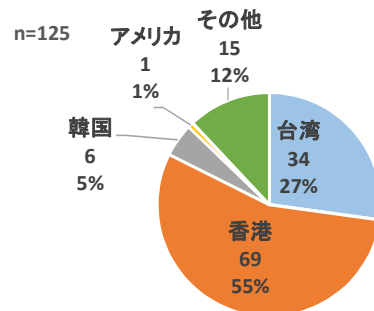


図-7 回答者の出身国

③レンタカーの利用について何回目かという質問に対しては、1回目が58%と多く、次に5回以上が22%であったが、不慣れな状況での利用者が多い事が想定される。

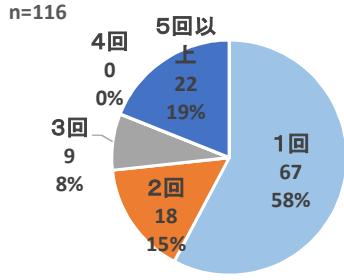


図8 レンタカーの利用回数

④目的地まで何を参考にしたかという質問についてはほとんどの人がカーナビを利用しており、次が多いのがスマートフォンであった。

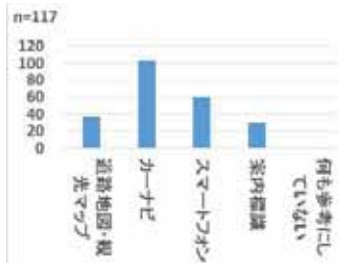


図9 目的地まで何を参考としたか

⑤案内標識（道路の路線番号表示、自分が向かう方面の地名の表示）が役立つとの回答は7~9割であった。

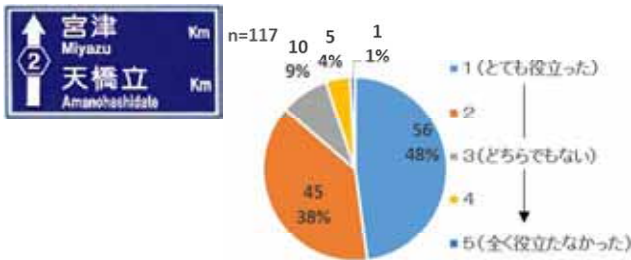


図10 自分が向かっている方面（地名）を示す標識について

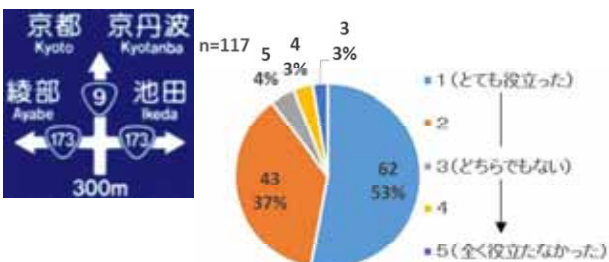


図11 交差点手前で、前もって方面（地名）と方向を予告する標識について

⑥高速道路の標識を理解できた人は、8割であった。



図12 案内標識（高速道路の標示）

⑦号線表示の重複を理解できた人は、8割であり、号線表示が無くなって困った人は、4割であった。



図13 案内標識（号線表示の重複）

⑧立体交差の表示を理解できた人は、7割であった。



図14 案内標識（立体交差の表示）

⑨ルールの違いによる危険な体験の質問については、交差点を曲がる際または駐車場から道路に出る際に逆走しかけたとの回答が右側通行の台湾の人だけでなく、日本と同じ左側通行の香港の人も多かった。右折時に対向左折より優先と勘違いしている人は香港の人に次いで台湾の人が多かった。



図15 逆走の概略図



図-16 右折時に右折優先だと勘違いして左折車と接触しかけた状況の概略図



図-18 調査箇所

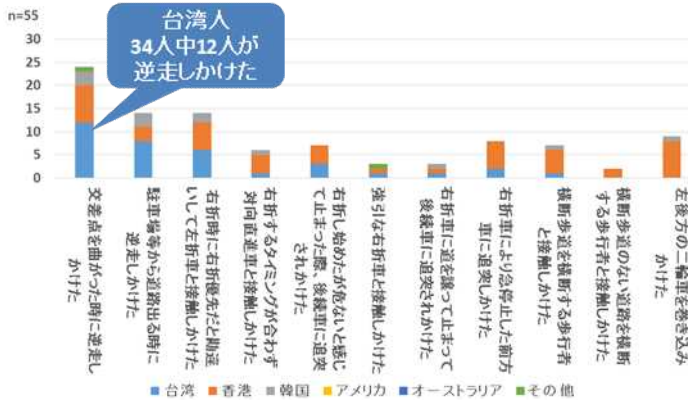


図-17 自国とのルールの違いにより危険な体験をしたか

(3) レンタサイクル利用者を対象とした調査

本調査は、京都市において、外国人の自転車利用状況及び京都市内の自転車通行環境の改善点等について、外国人視点で把握することを目的として、ヒアリング調査を実施した。また併せて、利用者の自転車にGPSプローブ機器を搭載させて頂き、通行経路の把握も行った。調査概要については表-3に示す。

表-3 レンタサイクル店でのヒアリング調査の概要

調査日	平成28年11月28日(月)～11月30日(水) 平成28年12月5日(月)～12月9日(金) ※延べ8日
調査箇所	京都駅前前のレンタサイクル店(1店舗)
調査時間	9時～18時
調査手法	ヒアリング調査

a) 調査手法

外国人にGPSプローブ機器の搭載及びヒアリング調査への協力をお願いし、自転車返却時に機器を回収し、ヒアリング調査を行った。



図-19 ヒアリング実施状況

b) 調査内容(ヒアリング)

アンケートの質問数は全6問で、主に各整備形態(4種類の整備形態)において、自転車が通行する部分の把握(自転車専用レーン通行の遵守)に関する質問、実際にどの部分を通行したかの質問、安全だと思ったかの質問である。

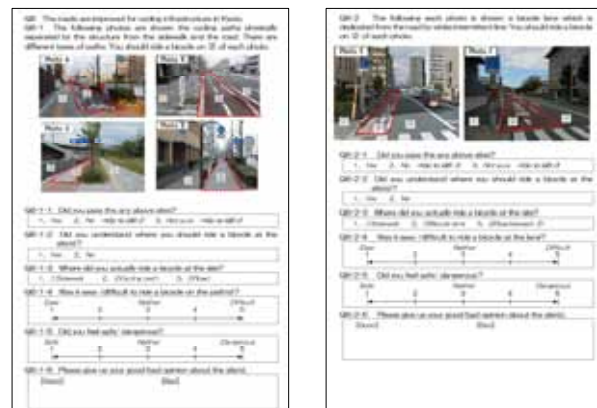


図-20 調査票(サンプル)

c) 調査結果(ヒアリング、GPSプローブ調査)

本調査の結果を以下に示す。

- ①取得サンプル数は116を確保した。
- ②回答者の出身国については、オーストラリア33%、台湾22%、香港、9%、中国・イギリス6%、アメリカ5%、韓国1%と欧米人の利用者も多かった。

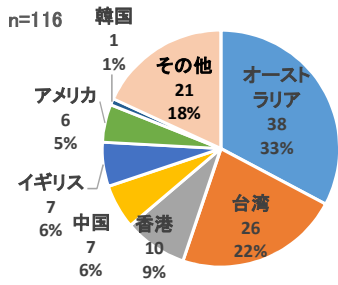


図-21 回答者の出身国

③ レンタサイクルの利用について何回目かという質問に対しては、1回目が77%と大半を占めていた。

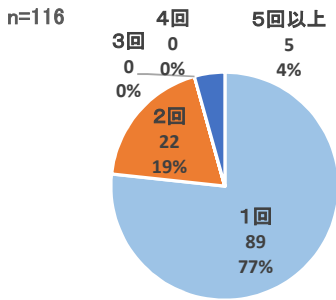


図-22 レンタサイクルの利用回数

④ 自転車通行環境整備の各形態における自転車通行の遵守率については、各形態とも自転車を通行する部分の認識をしている人は7~8割で、整備の部分を守りて通行している人の割合も7~8割であり、通行する部分わからない人が一定数いる結果となった。

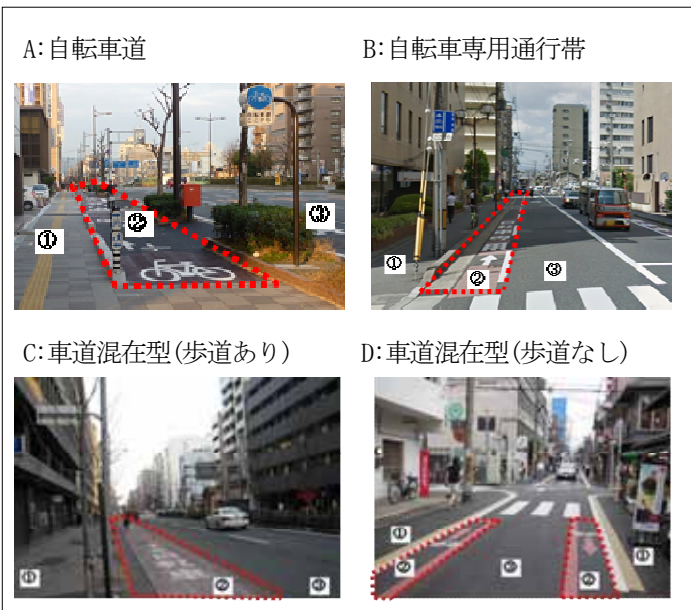


図-23各形態の写真 4形態

Q2. 赤囲みの部分を自転車走るというルールは分かりましたか

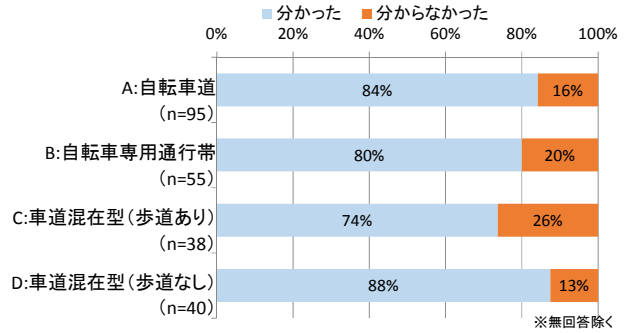


図-24 (図：走る部分は分かったか)

Q3. 実際に写真のどの部分を走りましたか

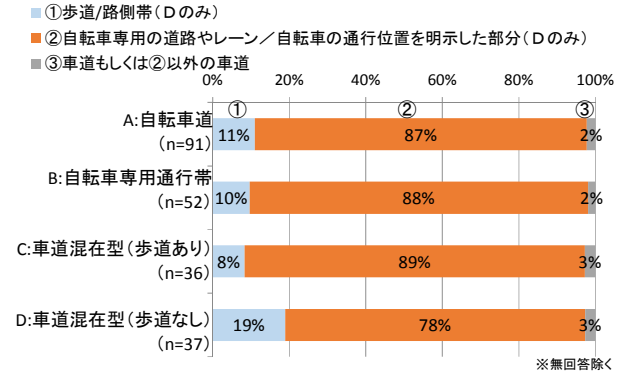


図-25 (図：実際にどこを走ったか)

⑤ 自転車通行環境整備の各形態において安全だと思ったかという質問については、安全であるという回答の割合が多かった。

Q5. 安全だと思えましたか

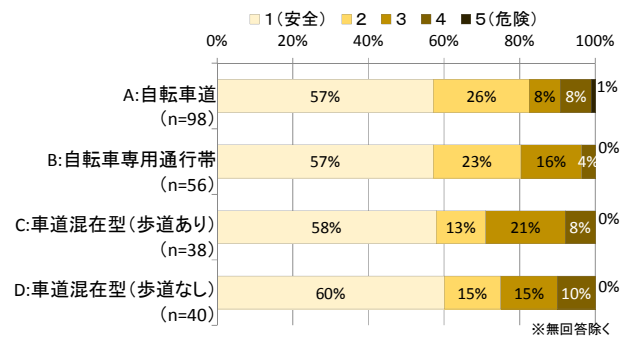


図-26 (図：安全だと思えたか)

⑥ レンタサイクルのGPSプローブ調査について、走行範囲は広範囲で観光地が多い京都駅以北に広がっており、南方面では人気の伏見稲荷神社を訪れている人が多かった。京都市街地部では幹線道路以外の通行も多く見られるが、遠方に行くほど幹線道路を通行する傾向が見られた。走行距離は最短5.1km、最長35.4km、平均18.5kmであった。日本人の平均約7km(過年度調査結果より)と比較して2倍以上であり、外国

人の走行距離が長いことがわかった。自転車通行空間整備区間の走行サンプル数については、国道1号の五条通（堀川通り以東）の自転車道を全体の48%が走行しており、最も多かった。



図-27 (図：GPS経路図)

3. まとめ

レンタカー利用者調査について、案内標識の現在地（地名や交差点名、道路の路線番号や通り名）を示す標識を役立ったという人（約4割）より、自分が向かっている方面や、交差点の道路の行き先を示す標識が役に立ったと回答が約6割と多いことから、主にカーナビを頼りにしながらも、案内標識で方向を確認して運転していることが想定される。

案内標識の路線番号表示について、路線番号が2つ重複する道路の標示を順次整備しており、これを理解できた人は約7割であった。また、路線番号の表示が無くなり困ったことがある人は約4割と路線番号表示を頼りにしていることが想定される。

立体交差を示す標識を理解できた人は約6割と低く、外国人にはわかりづらい表示方法となっている。

自国との習慣やルールの違いに起因するなどの危険な体験については、「交差点を曲がる際に逆走しかけた」が最も多く、特に右側通行の台湾の34%（35人のうち12人）も人が危険な体験をしている。一方、日本と同じ左側通行の香港の人も17%（48人のうち8人）と多く、慣れない環境での運転により進路を誤る状況が想定される。

レンタサイクル利用者調査について、各整備形態とも一定程度（7割～8割）で自転車通行空間整備の通行レーンが理解され、通行について遵守されていることが把握できたが、自転車のピクトグラムの有無により理解度について各整備形態に差があることが想定される。また、自転車道については、歩行者との交錯による接触の危険性、細街路の車道混在型については幅員が狭いため車との接触の危険性を懸念する声があった。

レンタサイクルのGPSプローブ調査について、自転車道を整備している五条通で多くの人がこの区間を通行しており、ヒアリング調査の整備形態毎におけるの安全だと思ったかという質問に対して安全度が1～2段階の人を含めて8割の人が整備した自転車道は安全であると回答しており、安全性に寄与していると考えられる。

4. 今後の課題と方針

レンタカー利用者への調査結果により、標識について行き先を示す標識が役に立ったと回答が多く、また、路線番号の表示を頼りにしていることから、外国人への道路サービス向上において案内標識の理解度の把握と分かりやすい表示の整備の検討が重要である。

外国人が訪れた箇所についての質問を行い、関西空港での調査によると一番多いのは京都であり、次に大阪であった。この結果により京都を訪れている割合が多いことは把握できたが、交通安全確保の対策検討のため外国人が多く通行するルートの傾向把握と急挙動による事故危険性の状況を把握が必要であり、そのためにはETC2.0の活用が考えられる。

自転車通行環境の充実・改善においては外国人にも分かりやすいピクトグラムの整備促進と交通ルールの遵守徹底の対策、自転車と歩行者の分離策、一方通行の自転車通行環境整備の検討が必要である。

謝辞： 今回の調査実施に関して、ご協力いただきました、レンタカー店、レンタサイクル店、観光施設関係者の皆様に厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 京都観光総合調査 平成27年
https://kanko.city.kyoto.lg.jp/chosa/image/kanko_chosa27.pdf

緩勾配落差工の水理模型実験について

前田 恭弘¹・坂中 忠孝²

¹甲賀土木事務所 河川砂防課

²琵琶湖環境部 下水道課

本水理模型実験は、天井川の切り下げ区間に落差処理のため設計された緩勾配落差工について、棧粗度および減勢工の減勢効果の検証を行うため実施したものである。水理模型には縮尺1/25の固定床の模型を用い、計画高水流量について緩勾配落差工に設けた棧粗度による減勢効果並びに段上りの強制跳水による減勢効果が、設計で見込まれた通りの水位・流速等となるか検証を行った。実験の結果、緩勾配落差工に設ける棧粗度の高さ及び設置間隔を見直し変更することで、計画高水流量等に対する安全性が確認された。

キーワード 天井川、緩勾配落差工、水理模型実験、跳水、減勢工

1. 水理模型実験の背景と目的

由良谷川は典型的な天井川で河積が不足しているため、ひとたび洪水が起こったときの被害は甚大なものが想定される河川である。そのため、由良谷川流域を家棟川流域に編入し、放水路計画により現在の天井川を解消する治水対策が策定され、下流より逐次整備されている。

由良谷川を家棟川に流入させるため、現在の天井川から掘込河道にするための落差処理が必要であり、落差処理の高さが約12mと非常に大きく、河川改修事業による落差工(床止め)形式では対応が難しいことから、原設計では「緩勾配落差工(棧粗度¹)」形式による落差処理に加え「段上がり²(減勢工)」を採用した。

一般的な落差工は落差が2.0m～3.0mであるが、本緩勾配落差工は高低差約12m、延長約120mと非常に規模が大きく、机上の設計では想定できない水理事象が発生する可能性が高いと判断し、水理模型実験を実施した。

水理模型実験においては以下の検証を行い設計の妥当性および洪水に対する安全性を確認した。

- ① 計画高水流量の流下に対し、計画高水位を超えないこと。(Q=40.0m³/s)
- ② 護床工設置範囲の妥当性を確認すること。(Q=40.0m³/s)
- ③ 超過洪水時の流況を把握すること。(Q=60.0m³/s)

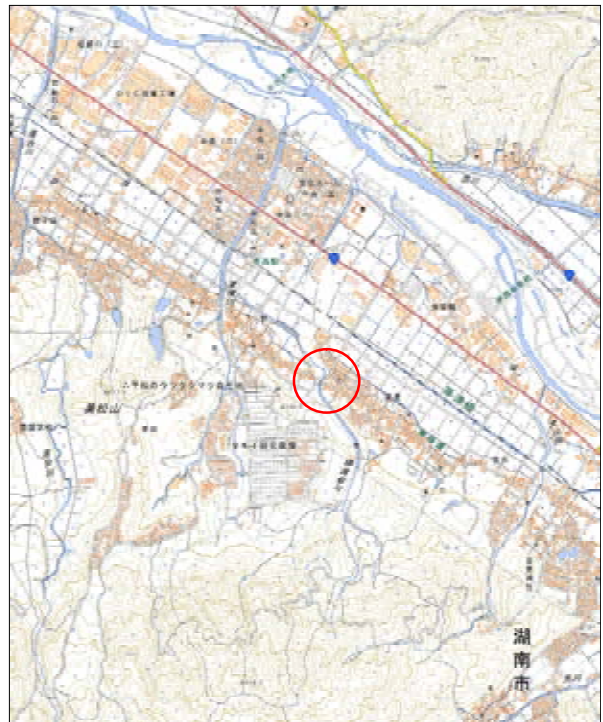


図-1 由良谷川位置図

表-1 フルード相似則による縮尺一覧表

縮尺1/25	縮率	実寸	模型
距離・長さの縮率	1/25	260 m	10.4 m
断面積の縮率 $Ar=Ap/Am=Hr^2$	1/625	15 m ²	0.024 m ²
流量の縮率 $Qr=Qp/Qm=Hr^5/2$	1/3125	40 m ³ /s	0 m ³ /s
流速の縮率 $Vr=Vp/Vm=Hr^{1/2}$	1/5	2.5 m/s	0.5 m/s
勾配の縮率 $Ir=Ip/Im=1.000$	1/1	1	1
粗度係数の縮率 $Nr=Np/Nm=Hr^{1/6}$	1/1.70998	0.03	0.0175
時間の縮率 $Tr=Tp/Tm=Hr^{1/2}$	1/5	60 sec	12 sec

2. 水理模型

水理模型は、上流の既設河道から計画河道への擦り付け区間40mと落差処理のための緩勾配落差工と落差工直下流に設置する段上りによる減勢工区間160mおよび、下流市道橋交差部までの区間60mの合計約260mについて再現するものとし、その他の諸元は以下の通りとした。図-2に平面図、図-3に縦断面図を示す。

(1) 縮尺

模型縮尺は、本実験で想定される緩勾配落差工部の最小水深が3cm以上となるように模型の縮尺の設定を行った。想定される最小水深は $h = 0.75m$ であることから、模型の縮尺は1/25 (0.03m/0.75m) と設定した。表-1に縮尺1/25の場合のフルード相似則による縮尺一覧を示す。

(2) 粗度係数と模型粗度の調整

粗度調整を行っていない原模型の材料であるコルク、モルタル、アクリル樹脂の粗度係数は一般に表-2に示すとおりである。予備実験の結果より、各使用材料の粗度係数は一般に示される値の下限值を採用した。

また、本実験では、河床のコルク版にマップピンを配置し、河道計画で設定している粗度係数を再現することとした。表-3に粗度調整に用いたマップピンの本数を示す。

表-2 模型材料の粗度係数

材料	粗度の縮率 Nr	粗度係数	
		模型	実物量
アクリル樹脂	0.585	0.008(採用値)	0.0137
		0.0085(標準値)	0.0145
		0.009	0.0154
モルタル	0.585	0.010(採用値)	0.0171
		0.013(標準値)	0.0222
		0.015	0.0256
コルク(木)	0.585	0.012(採用値)	0.0205
		0.015(標準値)	0.0256
		0.018	0.0308

表-3 イボ型粗度による模型粗度の調整

項目	下流部	段上り部	斜路部	上流部	上流すり付部	
対象流量	m3/s 40					
粗度係数(計画)	n=0.026					
計算断面	河床幅 (m)	6.50	6.00	6.00	6.00	6.50
	護岸勾配	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:1.0
	等流水深 (m)	1.826	1.923	0.723	1.52	1.359
	河床勾配	1/235	1/235	1/10	1/110	1/110
模型粗度	アクリル粗度	0.0137	0.0137			
	モルタル粗度			0.0171	0.0171	0.0171
	イボ型粗度	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205
	マップピン直径 mm	φ10	φ10	φ6	φ10	φ10
	マップピン個数 個/20m	101	128	144	52	56

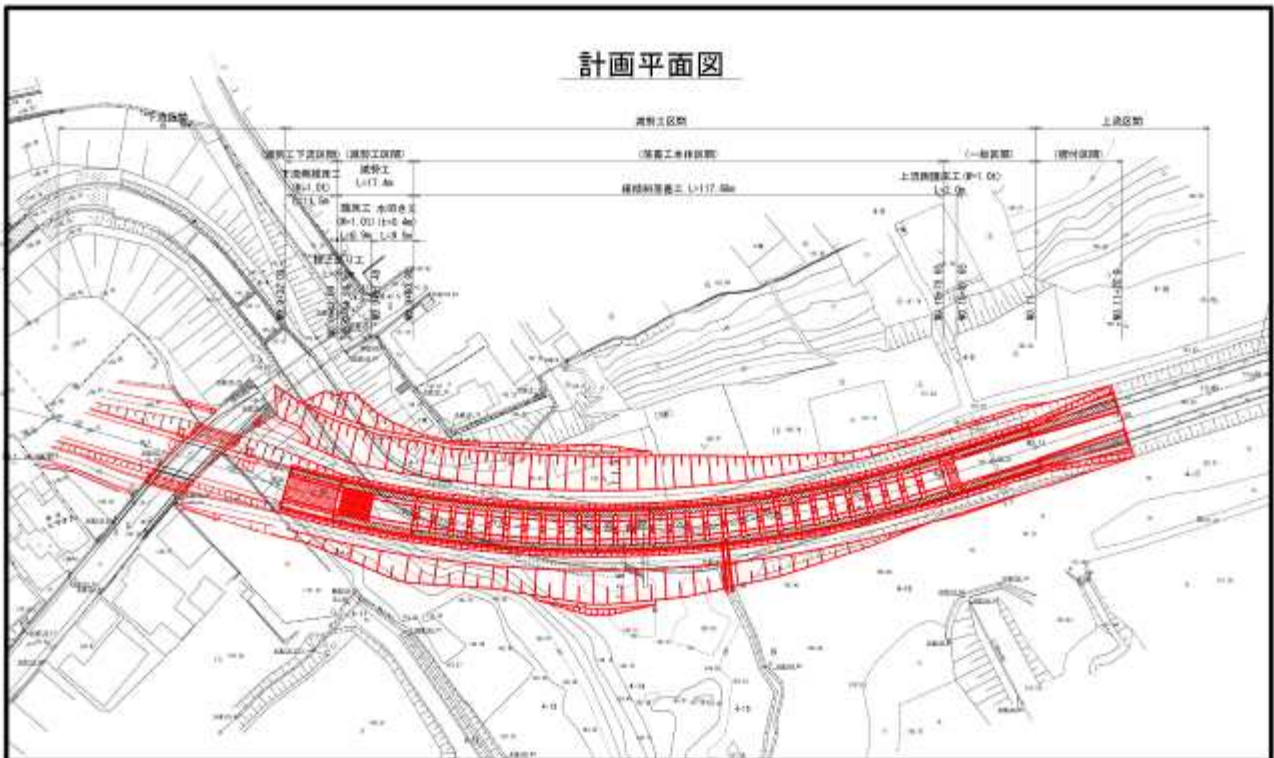


図-2 平面図

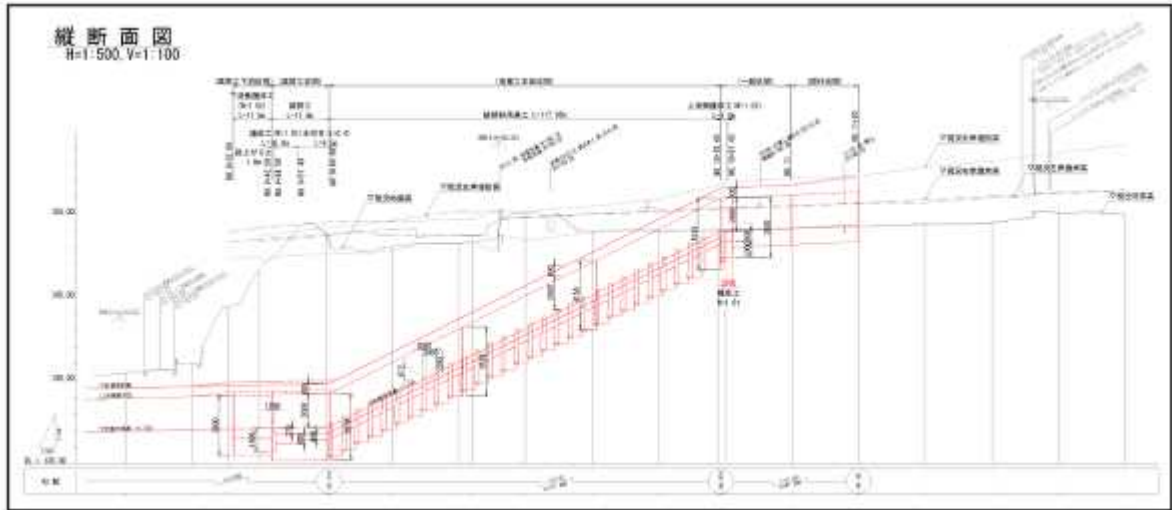


図-3 縦断面図

(3) 実験ケース

(a) 予備実験(粗度係数の検証実験)

制作した原模型(粗度調整前の模型)について粗度係数の算定を行う。算定方法は、原模型の水深観測および観測データ処理を行い、観測水位を用いた等流計算による粗度の逆算を行った。

原模型の粗度係数を把握した後、計画の粗度係数となるように内面加工(河床にイボ型粗度による粗度づけ等)を行い粗度係数を調整した。検証方法は内面加工した模型について上記の等流計算による逆算により粗度係数の確認を行うものとした。

(b) 原設計模型実験

原設計に基づき作成した模型を用いて、「1. 水理模型実験の背景と目的」に示した検証ケース①～③について実験を行った。実験ケースは、栈粗度を設置した場合と設置しない場合、および減勢工を設置した場合と設置しない場合の組合せにより case1.1～case1.4の4ケースに加え、超過洪水時の case2の合計5ケースを設定した。表-4に実験ケースの一覧表を示す。

表-4 実験ケース

実験名(ケース)	目的		流量	粗度係数
予備実験				
予-1	原模型の材料粗度の計測		40m ³ /s	調整なし
予-2	水理模型の粗度調整		40m ³ /s	0.026
現設計模型実験				
	栈粗度	段上がり		
原-case1.1	なし	なし	40m ³ /s	0.026
原-case1.2	なし	有り	40m ³ /s	0.026
原-case1.3	有り	なし	40m ³ /s	0.026
原-case1.4	有り	有り	40m ³ /s	0.026
原-case2	有り	有り	60m ³ /s	0.026

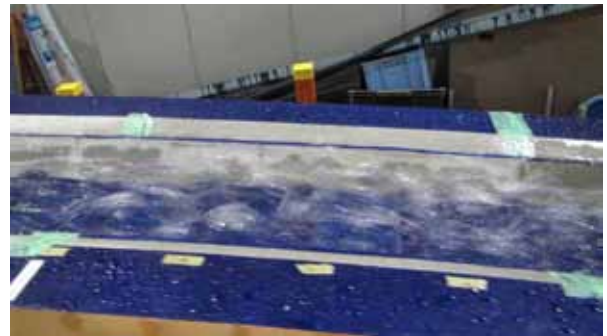


図-4 緩勾配落差工部の栈粗度により生じた「水跳ね現象」

3. 実験結果

原設計模型実験の結果、「緩勾配落差工(栈粗度)」は設計時の水深・流速をほぼ再現できているが、緩勾配落差工延長の上流から1/3の位置にあたる栈粗度以降で流況が乱れ「水跳ね現象」が生じた。また、落差工下流の「段上がり(減勢工)」は、強制跳水による減勢効果が確認できた。

(1) 栈粗度による減勢効果の検証

栈粗度による減勢効果を比較すると、栈粗度がない場合(原 case1.1, 原 case1.2)と栈粗度がある場合(原 case1.3, 原 case1.4)の平均水深は、栈粗度がある場合の $h = 0.994\text{m}$ に対し、栈粗度がない場合 $h = 0.775\text{m}$ と約 22cm の水深差を観測した。また流速も原設計時の 5.554m/s に対し 5.751m/s とほぼ近似しており、栈粗度がある場合はない場合に比べ栈粗度による減勢の効果が認められる。ただし、図4に示すとおり、流況に関しては

栈粗度をジャンプ台とする「水跳ね現象」が生じており、落差工区間全般にわたり乱れた流況である。

(2) 段上りによる減勢効果の検証

段上りに着目した観測結果について表-5に示す。段上りがある場合は、なしの場合に比べ流速が大きく低減されていることから、段上りによる減勢効果は認められる。ただし、原設計の実験ケースである原一case1.4における観測値と設計値を比較すると、跳水前の水深については、ほぼ設計どおりの水深となっているが、跳水後の水深が設計値の1.801mよりも低い1.611mとなっている。このことより、段上りによる強制跳水は所定の位置で発生しているが、減勢効果が十分発揮されていないため、跳水後の水深が設計値より低くなり、case1.4では、図-5に示すように栈粗度の減勢効果が十分でないことから段上り部で大きな跳水が発生した。

表-5 段上りによる減勢効果

実験ケース	水深H(m)	断面積(m ²)	流速(m/s)	フルード数
段上り有り	1.2	1.493	10.27	3.896
なし	1.4	1.611	11.17	3.580
段上り有り	1.1	0.960	6.70	5.969
なし	1.3	1.134	8.01	4.991

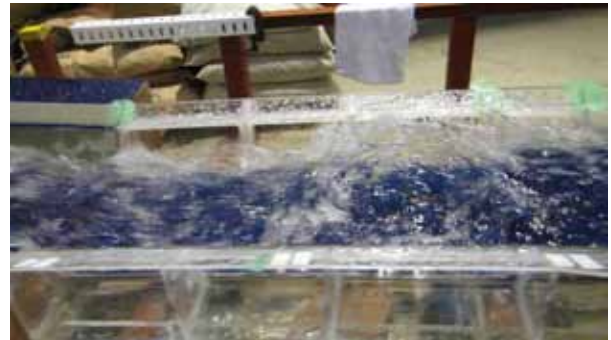


図-5 段上り部の流況

4. 改良模型の実験

(1) 原設計模型における課題抽出

- 実験結果より原設計模型の課題を以下の通り抽出した。
 - 【課題1】 緩勾配落差工部の「水跳ね現象」の発生
 - 【課題2】 段上り部の大きな「跳水現象」の発生

(2) 課題の解決

緩勾配落差工部の「水跳ね現象」は、原設計より減勢効果が高い栈粗度への改良を行うことにより課題の解決を図る方針とした。

段上り部の大きな「跳水現象」については、緩勾配落差工部の流況が改善されることで解消されるとの見通しを立て、改良模型の実験結果より判断することとした。栈粗度の改良は以下のとおりとした。

a) 栈粗度の設置間隔・高さを変化（試行実験）

栈粗度の設置間隔4.0mは、栈高を0.25mとした原設計の場合、最も減勢効果が高い（流速が小さくなる）設置間隔3.0mの場合と同等程度の流速となり、栈高0.25mの場合には、減勢効果が非常に高い領域にあることが水理公式集の既往実験結果より導ける。よって、栈間隔を変えるだけでは原設計以上の効果はあまり期待できないことから、栈粗度の設置間隔だけでなく、栈粗度の高さも変更した試行実験を行った。

試行実験の結果より栈高が0.25m～0.8mの範囲で減勢効果が高くなることが分かったが、栈高が0.25mの場合は設置間隔にかかわらず「水跳ね現象」が発生することから、栈高を0.5m～0.8mとし、栈の設置間隔は「設置間隔C/栈高h g = 5.0～8.0」³⁾となる範囲で設定し、さらに試行実験を実施した。試行の結果を表-6に示す。

b) 改良模型実験ケースの設定

表-6 試行実験結果

試行番号	高さhg m	間隔C m	緩傾斜落差工部の流況	
			流況	評価
1	0.50	2.50	水跳ねなし	○
2	0.50	3.00	水跳ねなし	○
3	0.50	3.50	水跳ね若干あり	△
4	0.50	4.00	水跳ね若干あり	△
5	0.60	3.00	水跳ねなし	○
6	0.60	3.60	水跳ね若干あり	△
7	0.60	4.20	水跳ねあり	×
8	0.60	4.80	水跳ねあり	×
9	0.70	3.50	水跳ね若干あり	△
10	0.70	4.20	水跳ね若干あり	△
11	0.70	4.90	水跳ねあり	×
12	0.70	5.60	水跳ねあり	×
13	0.80	4.00	水跳ね若干あり	△
14	0.80	4.80	水跳ねあり	×
15	0.80	5.60	水跳ねあり	×
16	0.80	6.40	水跳ねあり	×

上記試行の結果より改良模型実験は、緩勾配落差工部で「水跳ね現象」の発生しなかった試行実験3ケースについて実施するものとした。表-7に改良模型実験のケースを示す。

(3) ロールウェーブ現象

模型実験を実施する中で、緩傾斜落差工に設けた栈粗度により河道が縦断的に連続したプールとなり、そこに貯まった水が一斉に流れ出すことにより、波のような流れとなるロールウェーブ現象が発生した。

この現象の発生条件は、実験流量が計画高水流量や超過洪水時の流量のように流量が大きい場合には発生しないが、計画高水流量の1/2程度以下となった時に発生す

る。

ロールウェーブ現象の発生原因は、棧粗度によるプール状の河道と流量であることは明らかであったが、流量は自然現象であり不可避の条件である。よって、棧粗度に切欠きを設けることによりプール状になることを回避する対策とした。切欠きの形状・寸法については、ロールウェーブ現象に関する詳細な文献や資料がないことから、実験により改良方法を確認することとした。

ロールウェーブ現象は小流量でも発生することから、プールが極力できないように切欠きを河床まで設けることとし、複数の寸法の切欠きについて実験を行った。切欠きサイズによる実験結果を表-8に示す。

実験の結果より、棧粗度面積の0.25倍以上の切欠きを設けた場合にロールウェーブ現象の発生がないことを確認できた。

(4) 改良模型実験の結果

改良模型実験の計測結果は、図-6に示す通り全ケースではほぼ近似する結果となった。緩勾配落差工部の流況及び段上がり部の流況についても、ほとんど差はなかった。

表-7 改良模型実験ケース

改良模型のケース	棧高hg(m)	棧間隔C(m)	試行番号
改case-1	0.5	2.5	1
改case-2	0.5	3.0	2
改case-3	0.6	3.0	5

緩勾配落差工部で発生していた「水跳ね現象」については、試行実験で示したとおり改良模型でも発生が抑えられた。段上がり部の大きな「跳水現象」の発生も見られず、設計値の1.801mに近い1.843mの計測値となり減勢効果が確認できた。

改良模型実験の結果より、緩勾配落差工部および段上がり部の減勢効果での面では3ケースとも大差がないことから、下記の通り経済性で最も有利な改case-2が最適案であるとした。

改case-2は、改case-1と棧高が同じ0.5mであるが棧設置間隔が広く、改case-3より棧高が低いことから、工事費の面で経済的に最も有利となる。

表-8 ロールウェーブ現象の対策実験結果

試行実験1-③ (Case改) Q=40m³/s 計測箇所:No.9+51.49

実験Case	切欠きサイズ(幅)			切欠き面積(m ²)	棧粗度面積(m ²)	切欠きの面積比	計測水深(cm)	水深(m)	水跳ね状況	ロールウェーブ
	上段	中段	下段							
A①	1.00	1.00		0.50	4.47	0.11	4.45	1.11	若干あり	あり
A②	2.00	2.00		1.00	3.97	0.25	4.85	1.21	大きい	なし
B①	1.00			0.25	4.72	0.05	4.40	1.10	若干あり	あり
B②	2.00			0.50	4.47	0.11	4.27	1.07	あり	あり
B③	3.00			0.75	4.22	0.18	4.47	1.12	大きい	あり
C①		1.00		0.25	4.72	0.05	4.13	1.03	若干あり	あり
C②		2.00		0.50	4.47	0.11	4.28	1.07	大きい	あり
C③		3.00		0.75	4.22	0.18	4.58	1.15	大きい	あり
D①	2.00	1.00		0.75	4.22	0.18	4.62	1.15	大きい	あり
D②	3.00	1.00		1.00	3.97	0.25	4.48	1.12	大きい	なし
D③	3.00	2.00		1.25	3.72	0.34	4.85	1.21	大きい	なし
D④	5.00	3.00	1.00	2.25	4.50	0.50	4.70	1.18	大きい	なし

棧高はD④=1.00m、その他は全て0.75m

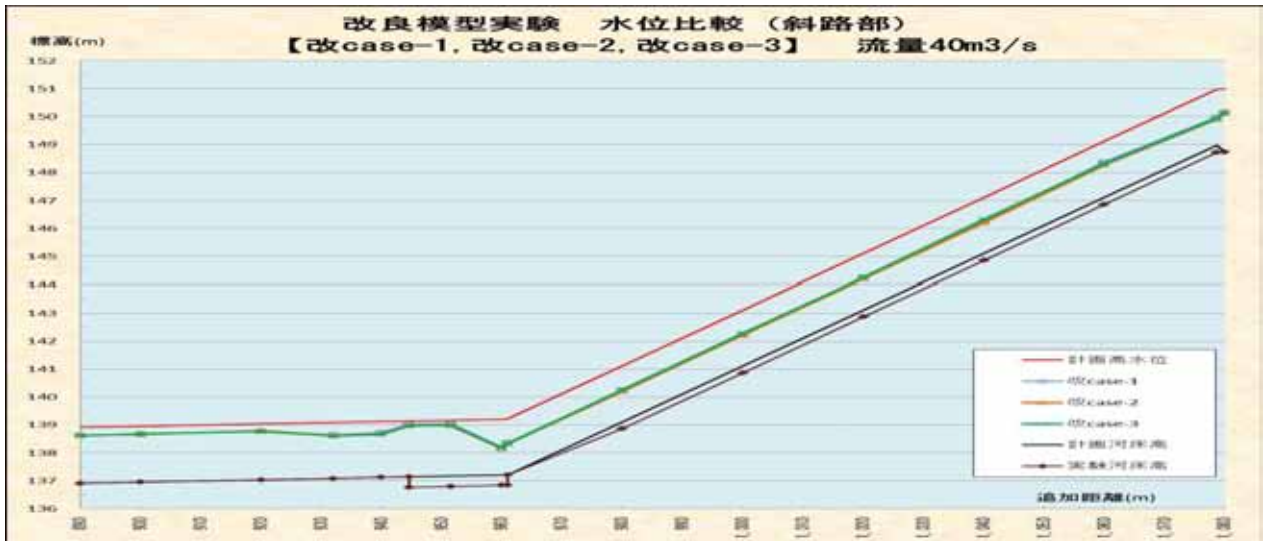


図-6 改良模型実験の水位計測結果

5. 設計の妥当性および洪水に対する安全性確認

改良模型実験より以下の事項を確認した。

(1) 計画高水流量の流下に対し、計画高水位を超えないこと。

前述図-6に示すとおり、改良模型実験の結果はどのケースでも計画高水位を超えないことを確認した。

また、原設計模型で課題となった緩勾配落差工部の「水跳ね現象」および段上がり部の大きな「跳水現象」の発生は見られなかった。

(2) 護床工設置範囲の妥当性を確認すること。

改良模型実験で最適案とした改case-2において、下流部の段上がりを含む護床工区間 (L=27.9m) の護床工粗度を反映しないケース (合成粗度 $n=0.026$) と、護床工粗度を反映したケース (合成粗度 $n=0.028$) の水位計測を行った。

護床工区間の下流側において、護床工粗度を考慮しない場合は、水位が0.20m~0.10m低く、流速が早いことを示している。

また市道橋交差点部付近より下流以降は水位がほぼ一致していることから、跳水の影響で流速が早くなる区間は、上記の区間すなわち護床工設置区間と一致する。護床工粗度の考慮の有無による水位の計測結果を図-7に示す。

以上より、原設計で設定された護床工の設置範囲は改良模型実験の結果から妥当であるといえる。

(3) 超過洪水時の流況を把握すること。

改良模型の改case-2における超過洪水時の水位計測結果は以下のとおりの結果であった。

落差工端部より下流において、余裕高を含めた水深2.6m以上となる箇所はなく、市道橋交差点部において最も高い2.077mを観測した。この結果は、模型粗度を河道計画における粗度係数 $n=0.030$ ではなく、現実的な $n=0.026$ としたことにより河道計画時の水位より低い結果となったと推定されるが、超過洪水時の流況は、粗度に関わらず同様の水位の傾向を示すものと思われる。

すなわち、落差工下流端部及び段上がり部では緩勾配落差工の影響により流速が早く水位は低くなり、市道橋交差点部付近において下流水位の影響を受ける事により水位が高くなる。その結果、最も高い水位となる地点は市道橋下流となることから、計画高水流量より流下流量が大きくなる超過洪水時には、市道橋桁下の水位に留意する必要があるといえる。

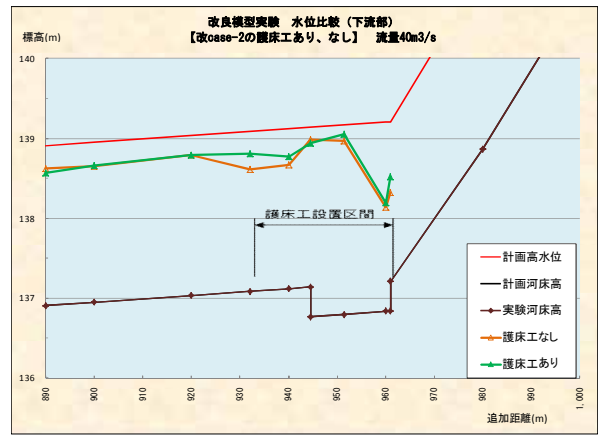


図-7 護床工区間の水位縦断

6. まとめ

机上の設計では想定できない水理事象が発生する可能性が高いと判断し、天井川の落差処理のため設計を行った緩勾配落差工について水理模型実験を実施した。

設計で想定した栈粗度および段上がり工では一定の減勢効果を確認することができたが、緩勾配落差工区間の栈粗度が原因とみられる「水跳ね現象」が発生し、緩勾配落差工および下流区間で大きな流況の乱れが見られた。

栈粗度の設置間隔および栈粗度の高さを改良することで、緩勾配落差工部の「水跳ね現象」は収束し、下流区間の流況の乱れを解消する改良模型実験の結果を得た。

このことにより、水理模型実験の目的としていた3つの事項について確認することができた。

県内にはまだ多くの天井河川があり、天井川の落差処理が必要としている河川が多数残っている。本水理模型実験では、落差処理に対する一事例が示せたのではないかと考察する。

謝辞: 本水理模型実験は、国立大学法人京都大学との共同研究として防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて実施した。

実験の実施にあたっては、防災研究所流域災害センター 中川 一教授に丁寧なご指導を賜り、また同研究所職員の皆様にもご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 栈粗度：水理公式集 [平成 11 年版] 土木学会, 1)不透過越流型水制の抵抗, P214
- 2) 段上がり：床止めの設計手引き (財) 国土技術研究センター編, P66
- 3) 栈の設置間隔 C 栈高 h_g ：水理公式集 [平成 11 年版] 土木学会, 図 2-6.25, P214

「瀬田川洗堰堰桁配置表」から読み解く 設計思想・運用方針について

森田 一彦

近畿地方整備局 淀川河川事務所 調査課 (〒573-1191 枚方市新町 2-2-10)

旧瀬田川洗堰の操作記録である瀬田川洗堰堰桁配置表をもとに、琵琶湖水位と瀬田川洗堰の操作に関する関係を整理した。その結果をもとに、大正6年(1917)洪水後の堰桁の配置状況や、堰操作の通説と実操作の差異、瀬田川改修と洗堰操作の関係等を示した。

また、旧洗堰の敷高の設計思想について、文献と測量結果等をもとに、計画論と施工の差異について考察するとともに、現在も旧洗堰に配置されたままとされている石桁の状況を明らかにした。

キーワード 瀬田川洗堰、淀川改良工事、大正6年洪水

1. 瀬田川洗堰

(1) はじめに

平成29年(2017)は、淀川右岸堤防の決壊により甚大な被害が発生し、また、瀬田川洗堰の操作について上下流の利害の対立が顕然となった大正6年(1917)洪水から100年目の年である。これを機に、大正6年はもとより、明治38年(1905)から昭和36年(1961)までの旧瀬田川洗堰の運用方針を整理するとともに、琵琶湖沿岸の被害軽減に資する瀬田川改修と洗堰の敷高変更について考察する。

(2) 淀川水系の治水システム

淀川水系は、木津川、桂川等の流量が先に増大し、続いて淀川本川がピークを迎え、その後ある時間差をもって琵琶湖水位がピークを迎えるという特性がある。図-1

この特性を活かし、下流が危険な時は、下流の洪水防御のために琵琶湖からの流出量を制御し、下流の洪水がピークを過ぎた後、琵琶湖の水位上昇を抑制するため放流を行うこととしている。

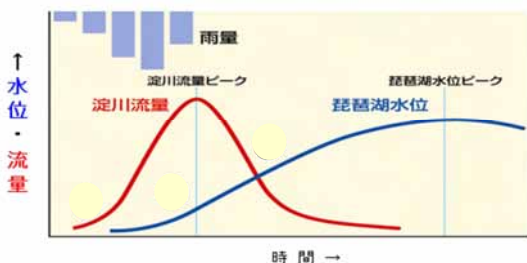


図-1 琵琶湖水位と淀川流量の関係

(3) 瀬田川洗堰の設置目的と操作方法

琵琶湖からの流出量を制御するために設置されたのが、瀬田川洗堰である。以下、明治38年に完成したものを「旧洗堰」、昭和36年に完成したも

のを「現洗堰」とし、現・旧双方に関することは、「洗堰」とする。また、琵琶湖水位については、平成4年(1992)4月から湖内5観測所の平均値としているが、旧洗堰の運用時には、鳥居川観測所の値を琵琶湖水位としていた。本稿ではこれを「水位」とし、B.S.L.で表記する。

淀川の本格的な治水工事は、明治18年(1885)の洪水を契機として明治29年(1896)に着手された「淀川改良工事」で、旧洗堰はこの計画に基づき明治38年に設置された。

旧洗堰は、幅12尺(3.6m)の水通し32門を有し、ピアは無筋コンクリートで表面に煉瓦が貼られていた。水通しに、長さ14尺(4.2m)8寸角の木材を人力で挿入する角式とし式で越流量を調節する構造である。

旧洗堰は1門あたり最大約18本の桁、32門では576本の木材を扱うため、操作に最長20時間程度を要することとなる。そこで昭和36年、より迅速かつ的確に流量制御できる機械式の現洗堰に改良された。現洗堰は、幅10.8mの水通し10門に、鋼製二段式ローラーゲートを備える構造である。

洗堰のゲートを全て閉鎖し放流量を0m³/sにする操作を全閉操作といい、ゲートを全て開放し、放流量を制限しない操作を全開放流という。図-2



図-2 現洗堰のゲート操作

なお、洗堰の操作規則は平成4年3月に制定されており、旧洗堰の運用時には規則はなかった。

(4) 「瀬田川洗堰堰桁配置表」

旧洗堰の堰桁の操作は、現在の近畿地方整備局本局にあたる内務省大阪土木監督署の指示を受け瀬田川看守場が作業を行った。当時の堰桁の配置状況を記録した「瀬田川洗堰堰桁配置一覧表（以下、「配置表）」が、琵琶湖河川事務所の広報施設である水のめぐみ館アクア琵琶に保管されている。図-3

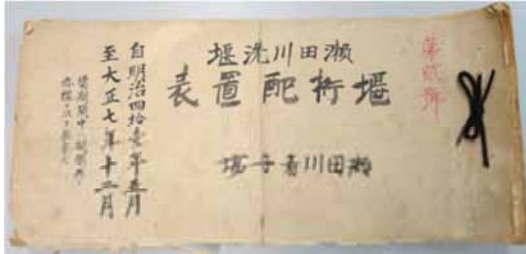


図-3 配置表の表紙

配置表は、明治38年8月2日から昭和36年5月19日まで約56年間分が8冊に分けて保管されている。この配置表を紐解くことで2,333回の桁操作内容と、18,556日分の堰桁配置状況が明らかとなった。

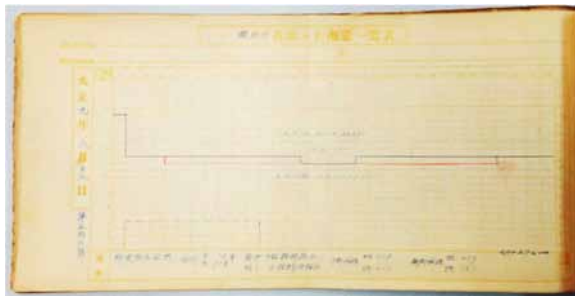


図-4 配置表の例（大正9年8月13日）

様式は、淀川に設置された毛馬洗堰と兼用で、堰桁開放後の桁高を赤線で記入。横軸に左から右に1号から32号の水通しを、縦軸に堰桁を記載。1号水通しは左岸端部であるから、下流を望むように記載しており、この例から読み取れる内容は以下のとおり。

5号～14号、19号～28号において、桁1本ずつ計20本開放。操作後の配置は、木桁358本、石桁10本。操作は10:10着手、10:40終了。

2. 瀬田川洗堰の運用方針

(1) 大正6年洪水における洗堰操作

大正6年9月29日からの豪雨により淀川の枚方水位は5.58mまで上昇し、10月1日右岸大塚地先（現高槻市）をはじめ支川でも複数箇所ですり壊れが壊れた。これにより大阪府では死傷者40名、15,358戸が浸水する甚大な被害が発生した。

琵琶湖周辺においても日野川・高時川・愛知川などで堤防決壊が生じたほか、琵琶湖の水位は10月29日には+143cmまで上昇し沿湖が浸水した。

洗堰は、10月1日桁100本を閉鎖し放流量を制限する操作を実施。今回、この操作が7時に着手され、9時に終了したことがわかった。所要時間は2時間、桁1本あたり1.2分で作業している。

淀川の水位が低下したら桁を開放し、琵琶湖水位を低下させることとしていたが、大塚地先の決壊箇所の締め切り作業が難航したため、洪水前の桁数まで開放できたのは11月8日であった。

この間、沿湖住民は洗堰の開放を訴え沿湖民大会が開催され、天皇・皇后両陛下が視察されるまでのこととなった。9月30日から12月25日までの操作内容を図-5に示す。赤字は桁開放。



図-5 大正6年洪水後の堰桁配置状況

(2) 年間操作回数2回（大正元年）

洗堰の放流量は、洪水時、渇水時における上下流の利害に大きく影響するため、現在も毎日きめ細かに調整している。これに対して、1年の間に2回（10月13日、10月16日）しか操作しない年があった。大正元年(1912)は、9月21日から23日に台風による降雨があったが、水位のピークは+61cmで湖岸に被害がなく堰桁の開放操作は行われなかったと推察する。図-6



図-6 水位と堰桁配置（大正元年）

(3) 終戦前の冬季放流 (昭和 20 年)

終戦を迎えた昭和 20 年(1945)の操作回数は 57 回。特に 1 月から桁開放を続け 3 月 2 日に水位-58cm となって初めて閉鎖している。

戦局の厳しい状況において、琵琶湖の水位が低下し続ける中、電力を供給するため放流量を増加させていたことがわかる。図-7



図-7 水位と堰桁配置 (昭和 20 年)

(4) 全閉操作と全開操作 (昭和 34 年)

昭和 34 年(1959)は、8 月に台風 7 号、9 月に台風 15 号 (伊勢湾台風) とふたつの大きな台風が襲来。全閉操作で下流の流量低減を図り、そのうち全開放流を行っている。図-8。

このように、戦後になって、淀川の治水システムに従った現在の操作規則の基本となっている操作が明確に行われるようになった。

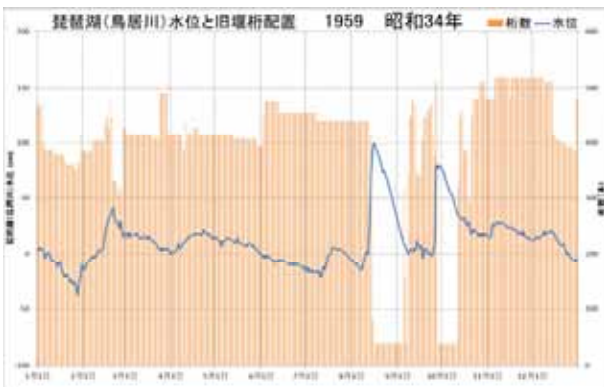


図-8 水位と堰桁配置 (昭和 34 年)

表-1 昭和 34 年の主要台風時の操作状況

洪水名	閉鎖	開放	1 本あたり作業時間
昭和 34 年 台風 7 号	8 月 14 日 104 本 操作 4:30 着手 6:00 完了	8 月 15 日 336 本 操作 0:00 着手 17:00 完了	閉鎖:52 秒 開放:3 分 2 秒
昭和 34 年 台風 15 号	9 月 26 日 136 本 操作 22:45 着手 25:00 完了	9 月 27 日 472 本 操作 15:00 着手 30:35 完了	閉鎖:1 分 0 秒 開放:1 分 59 秒

この頃は、大正 6 年洪水時と比較し桁閉鎖に要

する時間が短縮している。洗堰を閉鎖する場面は、まさに淀川の水位が上昇しようとするタイミングであり、一刻も早く閉鎖しなければならない緊迫した状況である。暴風雨の中、100kgの堰桁を次から次へと運搬し、怒濤の勢い、決死の覚悟で閉鎖し、その数時間後には、水を含み重量の増した桁を開放していたことが想像される。表-1

(5) 通説とかけ離れた操作実態

洗堰が角落とし式から機械式に改良された目的が、操作の敏速性、確実性を向上させることであった。旧洗堰は 32 門、計 576 本の桁を操作し、閉鎖時は浮力に対してモンキー打ちを行う必要がある、開放時は桁が水を含み重量が約 130kgに増加するなど重労働であった。この作業を暴風雨の中で行うことなどから、通説では全閉に 48 時間、全開に 24 時間を要するとされている。

しかし、配置表を整理する過程で、通説よりも短時間で操作していることに気が付いた。

また、昭和 3 年(1928)1 月 1 日には、メンテナンスのためか桁 40 本を 9 時から 9 時 40 分にかけて開放、14 時から 14 時 40 分にかけて閉鎖している。つまり、開放・閉鎖ともに所要時間 40 分、堰桁 1 本あたりの作業時間は 1.0 分で差がない。

そこで、1 回に 96 本以上堰桁を操作した際の所要時間を開放・閉鎖別に集計した。図-9, 10

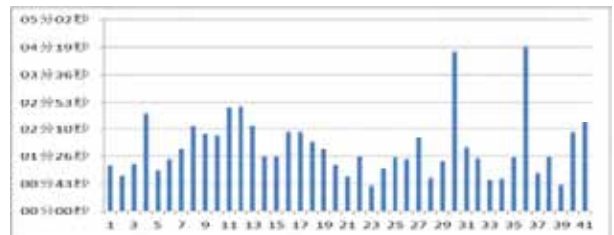


図-9 閉鎖操作における桁 1 本あたり作業時間

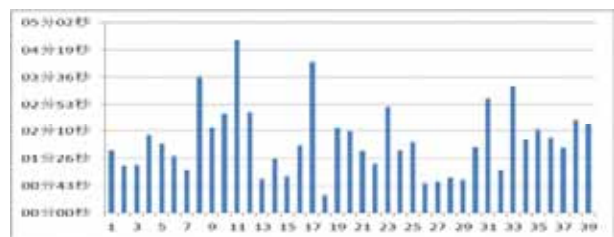


図-10 開放操作における桁 1 本あたり作業時間

それぞれの平均作業時間は表-2 のとおり。仮に、閉鎖・開放にあたり 576 本の桁全てを操作したとしても 24 時間以内に完了することとなる。さらに、開放作業は、閉鎖作業よりも時間を要していたことも明らかとなった。

表-2 桁配置作業に要する時間

作業	回数	1 本あたり平均時間	576 本の操作に要する時間
閉鎖	41	1 分 41 秒	16 時間 10 分
開放	39	1 分 55 秒	18 時間 24 分

(6) 堰桁本数と瀬田川改修の関係

18,556日分のデータから総桁本数の最大値・最小値・最頻値を年平均水位とともに図-11に整理した。縦軸に総桁本数を、横軸は年次を示す。桁の最小値が、水位の年平均値の低下と連動して減少傾向にあることが分かる。

期間を大きく3つに区分することができ、各期間における最小本数は表-3のとおり。

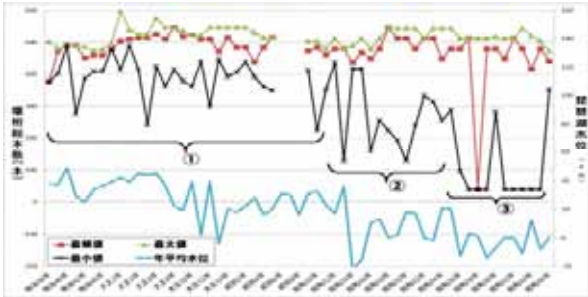


図-11 総桁本数と水位の変遷

表-3 年最小桁数の変遷

期間	本数
① 明治38年(1905)～昭和11年(1936)	243本
② 昭和12年(1937)～昭和24年(1949)	128本
③ 昭和25年(1950)～昭和36年(1961)	40本

淀川改良工事以降の瀬田川改修は、昭和18年(1943)から26年(1951)にかけて実施された淀川第1期河水統制事業がある。当事業は、琵琶湖の水利用により生産力を高めることを主目的とするもので、水位+30cmから-100cmまでの容量を活用すべく、瀬田川の浚渫及び大戸川の付け替えを実施した。これにより、大戸川洪水の背水が洗堰の操作に与えていた制約が解消された。図-12

開放時の配置桁数が小さくなることと連動し、昭和24年以降は、1回あたりの操作本数が顕著に大きくなっている。表-4

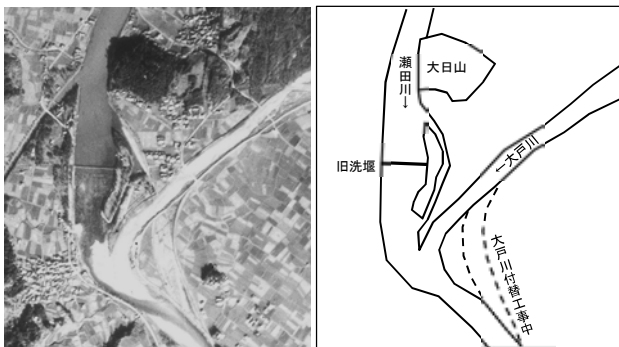


図-12 洗堰付近の航空写真(昭和23年撮影, 国土地理院蔵)(左)と見取り図(右)

表-4 開放時1回あたり最大操作本数

期間	本数
① 明治38年(1905)～昭和11年(1936)	100本
② 昭和12年(1937)～昭和24年(1949)	140本
③ 昭和25年(1950)～昭和36年(1961)	472本

3. 瀬田川洗堰の設計思想

(1) 淀川高水防禦工事計画意見書の“82.81m”

旧洗堰が淀川改良工事の一環で設置されたことは前述のとおりであるが、当該工事の計画は、明治27年(1894)に内務省大阪土木監督署長の沖野忠雄がとりまとめた淀川高水防禦工事計画意見書

(以下、「意見書」)がもととなっており、被害状況の調査結果や施設計画の考え方が記述されている。ここで、瀬田川筋の工事は琵琶湖の水位を低下させ、沿湖の被害軽減を主目的として、併せて下流淀川の洪水を軽減し、そのために、瀬田川を浚渫し起伏自在の洗堰を設置するとしている。

意見書において、琵琶湖の常水位+2.75尺(+0.83m)に対して、洗堰に桁を3尺(0.91m)挿入したうえで、越流水深を9尺(2.73m)確保するとされている。これから旧洗堰の敷高は-9.25尺(B.S.L.-2.80m, O.P.B.+82.81m)となる。図-13

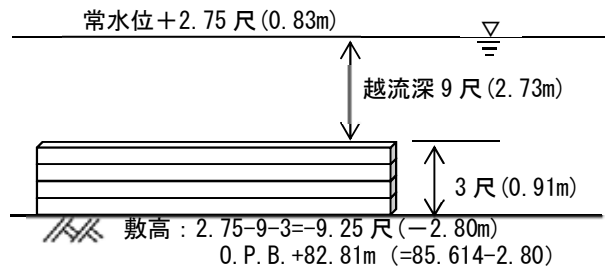


図-13 意見書における敷高

なお、琵琶湖水位B.S.L.±0mは、観測を開始した明治7年(1874)には大阪湾の最低潮位O.P.に対して+85.614mであったが、昭和41年(1966)にT.P.±0mがO.P.+1.3mとされた。しかし、琵琶湖水位は従来の85.614mを採用し、区別するためにO.P.B.と表記している。

(2) 配置表の“81.82m”

一方、配置表にも、O.P.+270尺やO.P.+81.82mと記載されている。

意見書の記述と比較すると0.99mの差異が生じる。図-14, 15

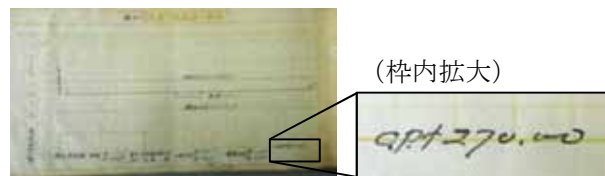


図-14 配置表(大正12年8月11日)

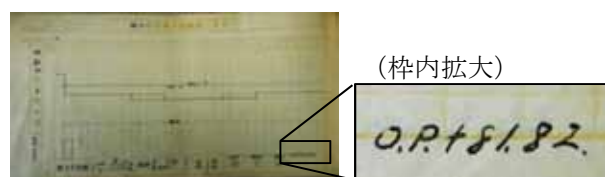


図-15 配置表(昭和4年5月2日)

(3) 簡易測量の “81.73m”

旧洗堰は昭和 39 年(1964)ころ撤去されたが、先人の偉業を後世に伝えるため旧洗堰 32 門のうち、左岸 6 門、右岸 1 門が存置されている。図-16



図-16 旧洗堰左岸 (平成 28 年 4 月撮影)

平成 29 年 3 月 3 日、4 号、6 号水通しについて簡易な測量を実施した。

水面から石桁までの距離は、4 号、6 号とも等しかった。石桁が木桁 4 本分の高さに相当すると仮定すると敷高は 81.73m となる。図-17

石桁については後述する。

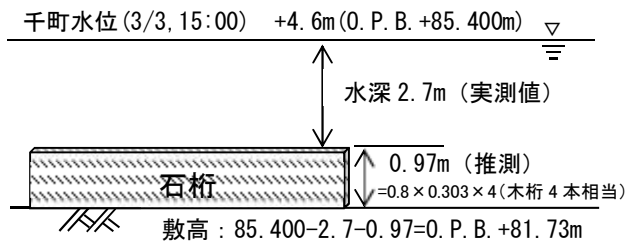


図-17 簡易測量による敷高

(4) 敷高に関する考察

敷高について、整理すると表-5 のとおり。

計画段階には、O.P.B. +82.81m とされていたが、0.99m 低い O.P.B. +81.82m で施工されたことが明らかとなった。

表-5 敷高比較

根拠	敷高 (O.P.B.)
意見書	82.81m
配置表	81.82m
打音調査時測量	81.73m

敷高を変更したことに関する文献や論文がないため、理由はわからないが、淀川改良工事の着手直後に発生した洪水に着目し、理由を推測する。

明治 29 年 9 月 4 日、水位 +161cm と高い状態の琵琶湖に、10 日間で 1,008mm という大きな降雨があり、水位は +3.76m まで上昇した。水位が常水位以下に低下したのは翌 30 年 2 月下旬であり、その間、沿湖では浸水が継続した。

沖野は、この洪水を対象とした洗堰の運用についても検討を行っているが、水位ピークの際に洗堰を全閉するためには 72 時間前から操作しなければ間に合わないことから、それを断念している。

旧洗堰の建設工事は、明治 34 年に起工し明治 38 年に完成した。明治 38 年は、日露戦争が終結した年で、戦争に国力を注ぎ経済力が疲弊する情勢下

において、1m 低く施工することによる事業費増の影響は小さくなかったと想像する。しかし、滋賀県議会での激しい質疑や、洗堰設置に反対した琵琶湖沿岸の住民の声を聴き、被害軽減の一助とすべく洗堰の敷高を低く施工したのかもしれない。

その後、昭和 28 年(1953)には、宇治川の堤防決壊など淀川水系に甚大な被害をもたらす台風 13 号が襲来する。これを受け、昭和 29 年(1954)には計画高水流量の改訂を盛り込んだ淀川水系改修基本計画が決定される。

洗堰については、この計画に基づき敷高をさらに 1m 下げることとなった。沖野が意見書をまとめてから、ちょうど 60 年経過後のことであった。

4. 全開放流時の桁 40 本の理由

(1) 「石桁」の存在

現洗堰では、10 門のゲートすべてを引き上げる操作が全開放流であり、旧洗堰においても 576 本すべての堰桁を開放していたと想像していたが、18,556 日間の配置状況における堰桁本数の最小値は、40 であり 0 ではない。

昭和 35 年(1960)7 月 8 日の操作日誌には「全開放流」という記述があるが、その際の堰桁数も 40 であり 0 ではない。

なぜすべての桁を開放しなかったのか。40 本はどこに配置していたのか。このヒントとなる記述が大正 6 年 5 月 17 日の配置表にあった。図-18

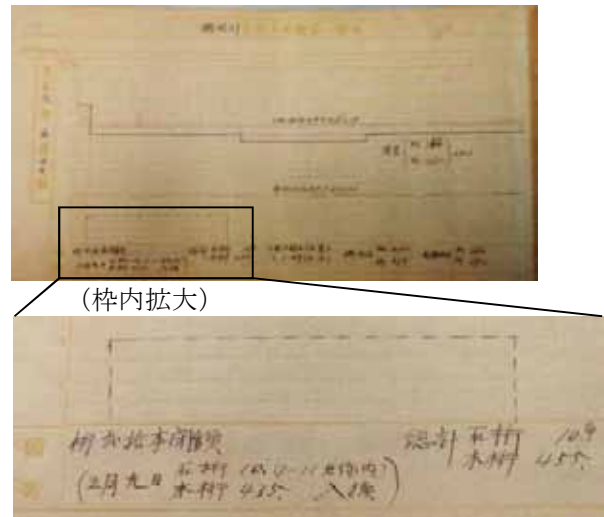


図-18 配置表 (大正 6 年 5 月 17 日)

備考欄に 5 月 9 日「石桁 10 (2-11 点線内) 入換」とある。つまり、2 号から 11 号までの 10 門の 1 段目から 4 段目までは、木桁ではなく石の桁を挿入していたということである。洗堰左岸端部は、瀬田川に張り出した大日山から続く平面的死水域であったことが、図-12 から分かる。大正 6 年以前における堰桁数の最小値は、大正 5 年(1916)7 月 1 日から 7 月 8 日の 243 本であるから、7 段目以下の桁は開放していなかった。

つまり、洪水の流下において影響がなく、洗堰下流の河床が高いため操作の必要性の低かった左岸下部の堰桁を石桁に換えたのではないかと推察する。

(2) 碇を使用した打音調査

石桁を挿入していたとされる2号から11号のうち、2号から6号までが現存しているため、現在も石桁が残されていると想像した。

そこで、簡易測量の際、図-19のように碇を使用し、簡易な打音調査を実施した。

土砂等堆積の影響が少ないと考えられる流心部の6号水通しに碇を沈めたところ、“キン”という金属質の音が聞こえ、鉄と石とがぶつかる感触を確かめることができた。



図-19 打音調査状況（左）と使用した碇（右）

同じく、4号水通しの調査においても、同様の感触を得たことから、石桁の存在に確証をつかむことができた。また、水門の角落とし部に号数が記されていることを発見した。図-20



図-20 旧洗堰1号水通し部

(3) ビデオカメラによる撮影

平成29年3月20日、ビデオカメラで水中部分の撮影を行った。

旧洗堰の6号、3号水通しに配置された石桁を撮影したところ、図-21のとおり状況を確認することができた。石桁の上流側は、堆積物がほとんどなく全体を視認することができ、表面にコケが多く付着していたが、隙間や目地等は見られず、高

さ0.97m、幅4.2mの一枚ものの石板が使用されていたと推察される。

ただ、このような巨石がどのように作られ、運搬されたのかが、新たな疑問となった。



図-21 6号水通しに存置されている石桁

5. まとめ

(1) 考察

旧洗堰は、明治29年洪水を踏まえ計画が見直され、当初計画よりも1m低い敷高で建設された。しかし、戦前には、瀬田川改修が進捗しておらず、洗堰下流の河床が高く、桁と河床との落差が確保できず下段7段を開放する機会がなかった。そこで、操作の必要性が低く、平面的に死水域であった左岸端部10門の下段4段には、木桁の代わりに石桁が配置されていた。

全ての桁を開放する全開放流が可能となったのは、瀬田川改修が大きく進捗した戦後になってからであったと考えられる。

(2) 資料の公表

今回整理した56年間分の水位と堰桁配置本数のグラフは印刷し、8冊の配置表は原寸大で複製し、水のみぐみ館アクア琵琶2階の展示コーナーにて展示している。

また、石桁を撮影した際のオリジナル動画については、1階エントランスにおいて放映している。

謝辞：

百年以上前に計画された建造物の操作実態や設計思想を紐解くことになったきっかけは、琵琶湖工事事務所長や淀川工事事務所長を歴任された宮井宏氏のひとことでした。多くの点で貴重な示唆をいただいたことに謝意を表します。

また、調査を後押ししていただき、休日の調査にもご協力いただいた今中事業対策官に感謝します。

参考文献

- 1) 淀川の河川計画と水管理の研究 近畿地方建設局
- 2) 淀川百年史 近畿地方建設局
- 3) 琵琶湖・淀川の洪水と治水の記録 宮井宏

貨物車プローブデータを活用した 物流課題の把握について

三上 理紗¹・松村 光祐¹

¹近畿地方整備局 企画部 広域計画課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

近畿圏都心部では、一般道路への貨物車の流入や観光交通と貨物車交通の輻輳など、貨物車の流動による都市交通課題がある。現在、貨物車流動に関する調査としては、交通センサス調査や物資流動調査等が行われているが、これらの調査では貨物車の細かな移動ルートの把握は困難である。一方、デジタルタコグラフから取得される貨物車プローブデータは、貨物車両の細かな移動ルートを把握することが可能であり、近年、データの蓄積が進んできている。

本論文では貨物車プローブデータより都心部における貨物車の流動を分析することで、都市交通課題を明らかにするものである。

キーワード 計画, 物流, プローブ

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

近畿圏都心部では、一般道路への貨物車の流入や観光交通と貨物車交通の輻輳など、貨物車の流動による都市交通課題がある。現在、貨物車流動に関する調査としては、交通センサス調査や物資流動調査などが行われているが、これらの調査では貨物車の細かな移動ルートの把握は困難である。

一方、デジタルタコグラフから取得される貨物車プローブデータは、貨物車両の細かな移動ルートを把握することが可能であり、近年、データの蓄積が進んできている。

本論文では貨物車プローブデータより都心部における貨物車の流動を分析することで、都市交通課題を明らかにする。

(2) 既往の研究と本研究の位置づけ

プローブデータを活用した物流に関する研究として、玉川・横田¹⁾や横田・玉川²⁾、横田³⁾は、21社の300台のトラックを対象にGPS機能付き携帯電話を搭載して2009年10月の1ヶ月間のプローブ情報を収集し、物流面における道路交通課題及び道路利用に関する交通特性を検討している。玉川・横田¹⁾は、収集データのうち、定期集配送車両のプローブデータを用いるとともに、阪神高速道路のETCデータを併用し、貨物自動車の道路利用に関する行動特性及び行動意思決定要因を分析している。

横田・玉川²⁾は、京阪神地域の貨物車交通の旅行速度と走行に要した消費時間の関係を考察し、効率面での課題を示している。また、一般道路と高速道路間のアクセス距離とイグレス距離の特性を分析している。横田³⁾は、京阪神地域の物流拠点として重要な南港発のトリップを対象として、方向別の道路網のサービスレベルの格差を調査し、ミッシングリンクの課題が顕在化していることを確認している。

金澤・田中⁴⁾及び松田・田中⁵⁾は、官民共同実験としてITSスポットから収集される特定プローブデータを活用し、物流支援サービスにおける活用可能性を検討している。金澤・田中⁴⁾は、特定プローブ情報を活用し、ボトルネック箇所及び潜在危険箇所の把握しており、また、ヒヤリハットマップの作成・ドライバーへの啓発により、安全運転意識の向上効果を検証している。松田・田中⁵⁾は、物流車両の特定プローブ情報に対して、所要時間の信頼性評価及び織り込み交通による渋滞要因の把握への活用の可能性について考察している。

一方、上記の研究が社会実験的に貨物車のプローブデータを収集し検討に活用していることに対して、柳木・江守⁶⁾及び土屋・金子⁷⁾は、全国の貨物車(事業用トラック)から日々取得・蓄積されている貨物車プローブデータの販売サービスを活用している。柳木・江守⁶⁾は、貨物車プローブデータを活用し、東日本大震災が与えた物流への影響を分析しており、土屋・金子⁷⁾は、道路プロジェクトの整備効果を分析している。

上記において示したように、物流分野においては物資流動調査や物流センサスなどの既存の調査結果及び統計

データを活用した研究以外に、限定的ではあるが貨物車のプローブデータを活用した研究も進められ、既存の調査結果では不十分であった貨物車の流動実態や交通特性も、貨物車プローブデータによる検討が可能となった。しかし、物流政策の検討において、都心部における貨物車の流動実態や都市交通課題、物流課題を検討するため貨物車プローブデータを用いた事例は少ない。

本研究においては、貨物車プローブデータを活用し、物流面における都市交通課題を把握する。また、物流政策の検討において、貨物車プローブデータを活用する際の課題を検討する。

2. 貨物車プローブデータの概要

本研究で使用した貨物車プローブデータは、運行記録計（ネットワーク型デジタルタコグラフ）を装着して日本全国の幹線道路を走行する貨物商用車の走行データから抽出・蓄積したプローブデータを交通現象解析向け用途に提供している民間企業から取得したものである。

本研究で使用した貨物車プローブデータの取得方法及び仕様は以下のとおりである。

(1) データの取得方法

貨物車プローブデータの取得の流れは、上記の民間企業が販売している運行記録計（ネットワーク型デジタルタコグラフ）から運行管理上必要な様々なデータを取得し、同社のデータセンターに一元管理を行うとともに、インターネット回線を通じて物流企業などに、運行管理上の情報を提供できる仕組みになっている。今回はデータセンターに蓄積されたデータのうち、貨物車の交通解析に活用可能な一部のデータを取得している。

図-1 に、本研究で使用した貨物車プローブデータの取得の流れを示す。

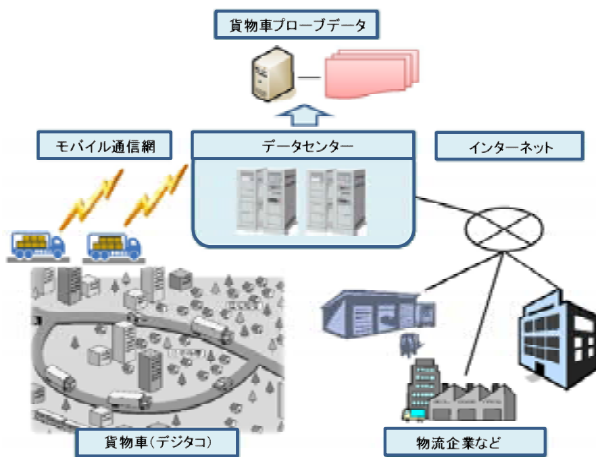


図-1 貨物車プローブデータ取得の流れ

(2) データの仕様

貨物車プローブデータとして取得できる情報は、運行記録計から得られる緯度経度・経路に加え、データ発生の日・月・日・時刻、移動の起点終点、交通状況（速度）などであり、位置情報の取得周期は1秒である。データ収集の対象車両数は全国で6万台（2015年現在）であり、運送事業者に関する秘密情報を秘匿化・抽象化した形となっている。

3. 貨物車の流動分析

(1) 対象地域とゾーン設定、使用データ

本研究では、都心部に着目して、物流面における都市交通課題を把握するため、大阪市北区及び中央区を中心とした大阪市都心部を対象として検討を行う（図-2）。



図-2 本研究で対象とする大阪市都心部の範囲

表-1 大阪市都心部発・着・経由のトリップ数

発 (件/月)	着 (件/月)	経由 (件/月)
大阪市都心部発	大阪市都心部着	大阪市都心部経由
34,581	34,268	67,248

表-2 OD分析のためのゾーン区分

対象地域	ゾーン区分
京都市・大阪市・神戸市	区
京都府・大阪府・兵庫県 (京都市・大阪市・神戸市を除く)	市・町・村
奈良県・和歌山県・滋賀県・福井県	県
その他の地域	東日本(近畿東)、 西日本(近畿西)

ただし、データの収集範囲は、大阪市都心部の全リンクと大阪市都心部を通過する全ての経路が分かるデータとした。表-1 は収集したデータのトリップ数を示しており、大阪市都心部を発・着するトリップに比べて大阪市都心部を経由するトリップが多くなっている。

都心部を発・着及び経由する貨物車OD分布などの貨物車走行実態を把握するためのゾーニングは、表-2 に示すように設定した。

データの収集時期は、第5回近畿圏物資流動調査の実施時期である2015年10月の1ヶ月間とした。

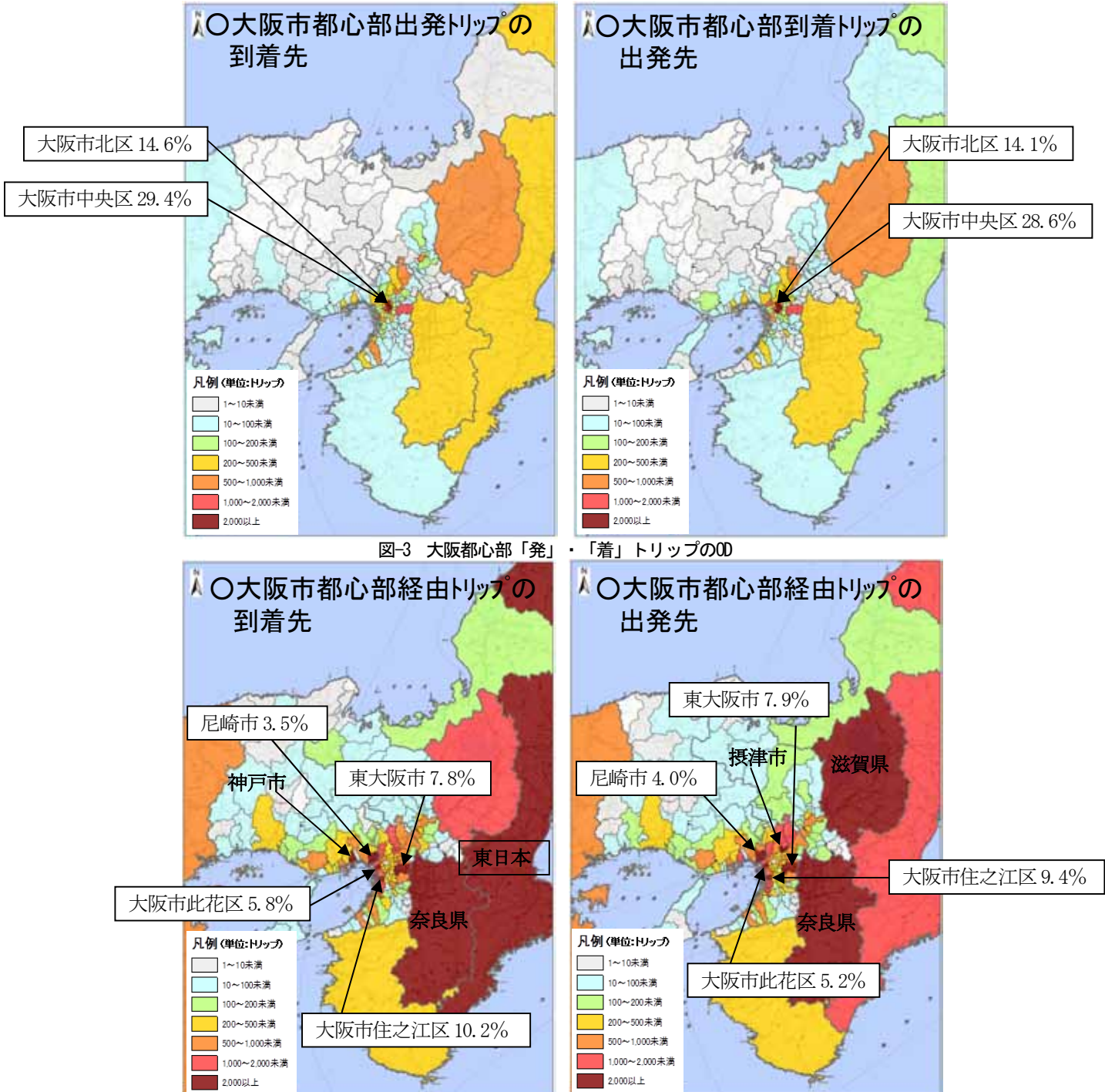
(2) 大阪市都心部を発・着・経由する貨物車のOD分析

大阪市都心部を出発するトリップの到着先は、大阪市

中央区が最も多く29.4%を占める。次に大阪市北区が14.6%、大阪市浪速区が5.4%の順となっている(図-3)。

大阪市都心部に到着するトリップの出発先は、大阪市中央区が最も多く28.6%を占める。次に大阪市北区が14.1%、大阪市浪速区が6.2%の順となっている(図-3)。

大阪市都心部を経由するトリップの到着先は、大阪市住之江区が10.2%として最も多く、次に東大阪市が7.8%、大阪市此花区が5.8%、兵庫県尼崎市が3.5%、以降東日本、神戸市、奈良県の順となっている。また、大阪市都心部を経由するトリップの出発先は、大阪市住之江区が9.4%として最も多く、次に東大阪市が7.9%、大阪市此花区が5.2%、兵庫県尼崎市が4.0%、以降奈良県、滋賀県、摂津市の順となっている(図-4)。



(3) 大阪市都心部を発・着・經由する貨物車の経路分析
 大阪市都心部においては、大阪市都心部を発・着する交通と比べて、阪神高速道路を經由し都心部を通過する交通が多くなっている。一般道路においては、他の路線より、土佐堀通・中央大通・四つ橋筋・御堂筋などの幹線道路の利用が多くなっており、御堂筋を經由し都心部を通過する貨物車も多く見られている(図-5-a, b, c)。



図-5-a 大阪都心部「発」の経路



図-5-b 大阪都心部「着」の経路



図-5-c 大阪都心部「經由」の経路

(4) 大阪市都心部の主要路線に対する貨物車のOD分析
 大阪市都心部における主要路線に対してOD分析を行った。OD分析箇所は、図-6に示すとおり、阪神高速12号守口線、阪神高速13号東大阪線、御堂筋、中央大通の4断面である。



図-6 主要路線のOD分析箇所

検討の結果、阪神高速12号守口線を利用する貨物車は、「大阪市～大阪府」が45.7%として最も多く、次に「大阪府～大阪府」が11.5%の順であり、平均トリップ長は、45.1kmであった。

阪神高速13号東大阪線を利用する貨物車は、「大阪市～大阪府」が32.8%として最も多く、次に「大阪府～神戸市」が13.0%の順であり、平均トリップ長は、57.0kmであった。

御堂筋を利用する貨物車は、「大阪市～大阪市」が36.5%として最も多く、次に「大阪市～大阪府」が24.7%であり、平均トリップ長は、37.3kmであった。

中央大通を利用する貨物車は、「大阪市～大阪府」が45.5%として最も多く、次に「大阪市～大阪市」が35.0%の順であり、平均トリップ長は、22.5kmであった。

上記において示したように、高速道路は大阪市内外及び大阪市通過の長距離トリップの利用が多く、一般道路の場合には、大阪市内々及び大阪市内外の短距離トリップの利用が多くなっている。

(5) 大阪市都心部における貨物車流動の特徴と課題

上記における貨物車の流動に関する検討結果、大阪市都心部においては、大阪市都心部を発・着する流動と比べて、大阪市住之江区や大阪市此花区、兵庫県尼崎市、神戸市などの湾岸地域と東大阪市や奈良県、滋賀県、東日本などの内陸部間の貨物車流動が阪神高速道路を経由し、大阪市都心部を多く通過している。そのため、都心部を経由する交通を迂回させる施策を工夫する必要があると考える。

一般道路においては、他の路線より、土佐堀通・本町通・四つ橋筋・御堂筋などの幹線道路の利用が多くなっており、御堂筋を経由し都心部を通過する貨物車も多く見られている。また、当然ながらも長距離のトリップにおいては高速道路、短距離においては一般道路の利用がなされている。大阪都心部の一般道路の渋滞緩和のため、高速道路の短区間利用の促進などを含めて貨物車の高速道路の利用向上策を工夫する必要があると考える。

4. 物流課題の分析

H22道路交通センサスによる大阪市都心部周辺の道路状況と上記において検討した貨物車プローブデータによる貨物車の利用状況を比較検討し、物流面における都市交通課題を考察した。その結果を以下に示す。

(1) 大阪市都心部における道路交通状況

大阪市都心部の阪神高速道路は、東大阪線の6車線区間と環状線の2車線区間を除いて、殆ど4車線区間である。一般道路は、東西方面の国道1号・国道2号・中央大通・長堀通・千日前通が6車線であり、南北方面の御堂筋が6

車線、四つ橋筋・松屋町筋が5車線である（図-7-a）。



図-7-a 大阪都心部における道路の車線数

阪神高速道路13号東大阪線・16号大阪港線では、混雑度は1.0を超えており、一部1.25を超えている区間もある。阪神高速1号環状線・11号池田線・12号守口線においても混雑度が1.0を超えている区間がある。一般道路の混雑度は、土佐堀通が1.75、中央大通が1.25であり、堺筋は1.0を超えている区間がある。また、阪神高速道路は、殆どの路線で大型車混入率が10%を超えており、守口線・池田線においては20%を超える区間もある。大阪港線の場合は30%を超える区間もある（図-7-b, c）。

上記における混雑度の高い箇所は、3章の(3)において示したように、大阪市都心部を発・着及び経由する貨物車の流動が多い箇所として確認されており、物流円滑化を図る上での課題と考える。

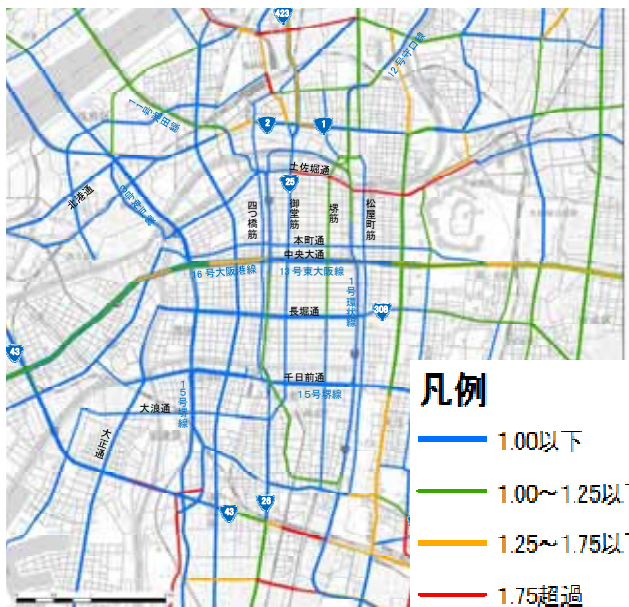


図-7-b 大阪都心部における道路の混雑度



図-7-c 大阪都心部における道路の大型混入度

(2) 物資面における都市交通課題

今までの検討結果とプローブデータによる主要検討箇所OD内訳分析、道路交通センサスによる交通状況などを組み合わせて、物流面における都市交通課題を検討した。その結果を以下に示す。

- 物流の活性化のためには、阪神高速道路の渋滞緩和、特に阪神高速道路13号東大阪線・16号大阪港線の渋滞緩和を図る必要があり、都心部を経由する交通を迂回させる施策を工夫する必要があると考えられる。また、大阪都心部への流入については、一部の路線に交通が集中できないように、流入交通を分散させる施策を工夫する必要があると考える。
- 大阪都心部の一般道路の渋滞緩和のためにも、高速道路の短区間利用の促進などを含めて貨物車の高速道路の利用向上策を工夫する必要があると考える。

5. まとめと今後の課題

本研究においては、貨物車プローブデータを用いることにより、物資流動調査や物流センサスなどの既存の調査結果では分析できなかった「貨物車の流動（OD、経路、平日日別・時間帯別の流動）」「交通特性（OD内訳、トリップ長など）」を明らかにすることができた。

また、貨物車プローブデータと「既存のデータ（道路交通センサスなど）」を組み合わせることにより、物流面における都市交通課題をより詳細に分析することができた。

しかし、課題として下記の点が挙げられており、今後さらに検討を進めたいと考えている。

プローブデータはサンプルデータであるため、その分析結果は、総数（母集団）との乖離が生じる可能性がある。また、地域毎・時間帯毎のより詳細な分析の際に、誤差はもっと大きくなる可能性もある。

また、プローブデータは、車種や業種、荷姿、貨物量（流動ロット）などの情報も明らかではない。そのため、より効果的な分析を行うためには、貨物車プローブデータのみではなく物資流動調査結果などと組み合わせた分析を行うことが望ましい。しかし、第5回近畿圏物資流動調査の結果においては、貨物車の輸送経路を検討するための設問（高速利用最初及び最後ICなど）に答えているサンプル数が非常に少なく、また、車種や発着台数なども、明確になっていないケースが多かった。そのため、物資流動調査結果と貨物車プローブデータを組み合わせて輸送経路における課題を分析するまでには至らなかった。

今後の物資流動調査における設問内容の設計の際には、貨物車の流動に関する質問に対して空欄が最小化できるように、工夫する必要があると考える。

参考文献

- 1) 玉川 大, 横田孝義, 前川和彦, 河本 一郎: プローブデータおよびETCデータを活用した都市内定期集配配送車両の行動特性に関する分析, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No. 5, I_715-I_726, 2011.
- 2) 横田孝義, 玉川 大: プローブ情報による京阪神地域貨物車交通の道路利用特性に関する分析, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No. 5, I_643-I_656, 2011.
- 3) 横田孝義: 貨物車のプローブデータ処理による都市高速道路の利用有無と旅行速度の可能性評価, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 5, I_649-I_657, 2012.
- 4) 金澤文彦, 田中良寛, 澤田泰征: ITS スポットの特定プローブ情報を活用した物流支援サービスの効果と評価検証例, 土木学会論文集 F3, Vol. 69, No. 2, II_19-II_27, 2013.
- 5) 松田奈緒子, 田中良寛, 牧野浩志: 特定プローブ情報を活用した官民連携物流支援サービスの実運用に向けた検討, 第12回ITSシンポジウム, 2014.
- 6) 柳木功宏, 江守昌弘, 野見山尚志, 井上恵介: 特定プローブデータを活用した貨物車交通解析の一事例, 第33回交通工学研究発表会, No. 47, 2013.
- 7) 土屋三智久, 金子玲大, 大井孝通, 河田明博, 笠井徹祐: 貨物車プローブデータを活用した道路整備効果の分析事例, 第49回土木計画学研究発表会(春大会), 2014.

都市交通分野における 混雑統計データの活用について

鎌田 耕平¹

¹近畿地方整備局 企画部 広域計画課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

近畿圏におけるパーソントリップ調査（以下、「PT調査」という。）は、データが10年間隔でしか更新されないため、その活用には、活用時期とデータ取得時期の乖離という問題を抱えていた。

一方、昨今の都市交通分野においては、個々人の24時間・365日分の移動実態を示すビッグデータが登場しており、その活用場面が拡大している。

本論文は、携帯電話から得られるGPSデータを基に作成される混雑統計データと近畿圏PTデータを比較し、混雑統計データの特長を明らかにするとともに、PTデータの時点更新（ある時点の指標を基にして、それ以前のPTデータからある時点でのPTデータを推測する行為）への活用について考察するものである。

キーワード 総合都市交通体系調査、パーソントリップ調査、ビッグデータ、混雑統計

1. はじめに

わが国の三大都市圏におけるパーソントリップ調査（以下「PT調査」という。）は、1968年に東京都市圏で、1970年に京阪神都市圏で、1971年に中京都市圏で第1回目の調査が実施された。以降10年間隔で継続的に実施されており、都市交通分野における中長期的な計画立案及び施策検討に広く用いられてきた。今後も中長期的な都市計画を検討するうえで、PT調査による現状把握、将来分析等のニーズは存在すると考えられる。

近年、人口減少等による地域の活力低下が懸念される中で、インバウンド等も含めた都市圏外居住者の流入やリニア中央新幹線の整備等による都市圏間での交流促進など、PT調査が対象としている都市圏内居住者の移動実態だけでなく、都市圏外からの流入を考慮した都市交通施策の必要性も高まっている。

また、総人口の減少や少子高齢化の進行といった人口動態の変化、個人の価値観の多様化によるライフスタイルの変化等に見られるように、都市交通を取り巻く環境の変化は著しい。このような環境の変化に対応すべく、都市交通の短期的なモニタリングといった新しいニーズが出現している。こうした変化を都市交通計画に反映させるためには、都市交通の実態に係る最新のデータが必要となるが、PT調査の実施によるデータの収集・更新には様々な制約が存在する。

一方、当該分野では、昨今の情報化の進展により、携帯電話網やカーナビゲーションシステムを通じて、人やクルマの24時間365日の活動実態を示す交通関連ビッグ

データが登場している。このうち、携帯電話網の運用データに基づいて作成される「混雑統計①」（以下「混雑統計」という。）は、時間的及び空間的なデータ精度に着目した既往研究を通じて、都市交通分野への適用可能性が検討されている¹⁾。

以上の状況を踏まえ、本研究は第5回（2010年）近畿圏PT調査データを比較し、混雑統計データの特長を明らかにするとともに、PTデータの時点更新（ある時点の指標を基にして、それ以前のPTデータからある時点でのPTデータを推測する行為）への活用について考察するものである。

2. 混雑統計の概要

(1) ビッグデータの選定に関する考え方

本研究で用いる交通関連ビッグデータの選定においては、全ての交通手段を対象として、個人属性と移動実態が紐付いた情報を有しているPT調査データの特長を踏まえる必要がある。また、第5回近畿圏PT調査が実施された2010年時点のデータが蓄積されている必要がある。

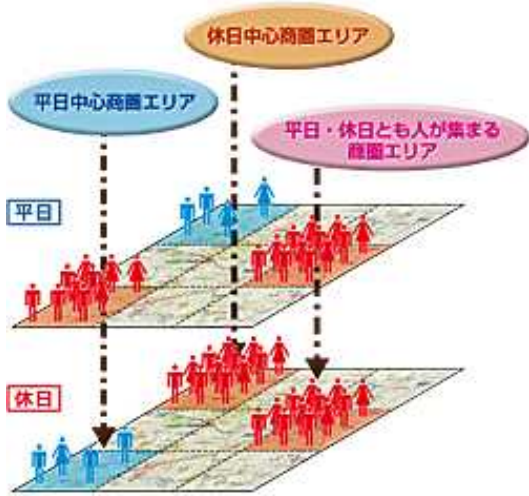
人の移動に係る各種の交通関連ビッグデータのうち、本研究を実施していた2015年度において、利用交通手段の推定が実施されており、かつ、2010年時点からのデータ蓄積がなされていたのは、株式会社ゼンリンデータコムの混雑統計のみであった。そのため、本研究では、同データを用いて、各種検討及び分析を行った。

(2) 混雑統計の概要及びPT調査データとの比較

混雑統計は、地域に流入する人口を見ることが出来る「人の流れデータ」であり、出発地や立寄り場所、交通手段、滞在時間等を集計することが可能である。

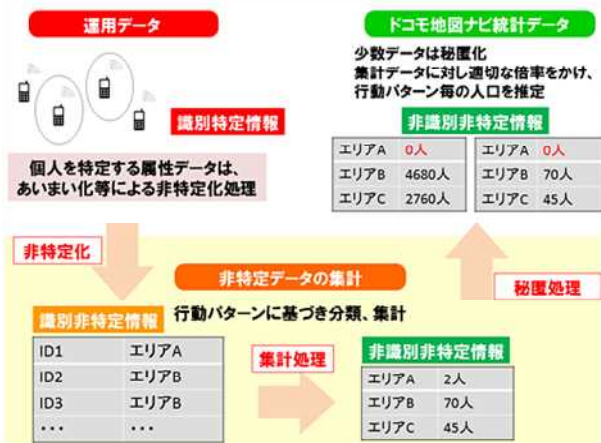
混雑統計の基となる非集計データは、株式会社NTTドコモが提供する「ドコモ地図ナビ」サービスの「地図アプリ」「ご当地ガイド」において、オートGPS機能を利用されている方より、利用許諾を得たうえで送信される位置情報(図-1)である。

この位置情報を基に、株式会社NTTドコモにて、非特定化・集計処理・秘匿処理が施されたうえで、人の動きに関する統計データとして提供されている(図-2)。



出典元：「ドコモ地図ナビ統計に関する情報」
<http://dmapnavi.jp/stc/statistics/index.php>より抜粋

図-1 ドコモ地図ナビ統計情報のイメージ



出典元：「ドコモ地図ナビ統計に関する情報」
<http://dmapnavi.jp/stc/statistics/index.php>より抜粋

図-2 混雑統計のデータ作成手順

混雑統計の概要と第5回近畿圏PT調査データとの違いを表-1に示す。

PT調査データでは、5歳以上の全年齢を対象として市区町村単位での拡大処理が行われている。また、ある1つの目的での出発地から到着地までの移動をトリップと定義されている。

一方、混雑統計では運用データを基に、性別・年齢・外出率は考慮せずに、都道府県単位での拡大処理が行われている。また、最短5分おきに計測される位置情報において、600m以上動いた場合をもって、トリップを定義している。

表-1 混雑統計とPT調査データの違い

比較項目	混雑統計	2010年第5回近畿圏PT調査データ
移動目的	直接的には把握不能	全目的
利用交通手段	位置及び速度情報等から推定(飛行機・鉄道・自動車・その他)	全手段
トリップの定義	最短5分おきに計測される位置情報において、600m以上動いた場合を「トリップ」と定義 ※移動判定距離は任意に設定可能であるが、600mより短く設定することは精度面から不可	ある1つの目的を持った起点から終点への移動を「トリップ」と定義
滞在の定義	最短5分おきに計測される位置情報において、15分(4点)以上動きが無い場合を「滞在」と定義 ※滞在判定時間は任意に設定可能であるが、15分(4点)より短く設定することは精度面から不可	直接的には定義していない ※あるトリップの終わりから次のトリップの始まりまでを滞在として集計
年齢構成	30~50代が主と推測される	5歳以上の全年齢
拡大処理	都道府県単位が基本(※性別・年齢・外出率は考慮していない)	市区町村単位(※性別・年齢等も考慮)
調査対象日	365日いつでも(2010年5月以降)	平日・休日各1日(2010年10~11月)
圏域	日本全国	近畿2府4県全域

3. 混雑統計におけるトリップの定義

(1) 混雑統計とPT調査データの移動・滞在の相違点

PT調査データでは、「ある1つの目的での出発地から到着地までの移動」をトリップと定義している。

一方、混雑統計においては、最短5分おきに計測される位置情報において、600m以上動いた場合を「移動（トリップ）」、15分以上動きが無い場合を「滞在」と定義しており、これを基に任意に設定できる。

都市交通分野における混雑統計の活用を考える際には、PT調査データと混雑統計の相違点を踏まえたうえで、混雑統計におけるトリップの条件設定を行う必要がある。想定される両者の相違点を表-2、表-3、表-4に示す。

a) PT調査データでは「滞在」と定義しているが、混雑統計では「滞在」と定義されない

表-2 条件設定による移動・滞在判定の相違点1

相違点1のイメージ	移動数・滞在数の大小関係
	<p>目的がある短時間の滞在が生じたため、混雑統計のトリップ数の方が少なくなる</p>

b) PT調査データでは1つの「滞在」と定義しているものを、混雑統計では複数の「移動」「滞在」と定義してしまう

表-3 条件設定による移動・滞在判定の相違点2

相違点2のイメージ	移動数・滞在数の大小関係
	<p>一つの目的のなかで長距離の移動（回遊）が生じたため、混雑統計のトリップ数の方が多くなる</p>

c) PT調査データでは複数の「移動」「滞在」と定義しているものを、混雑統計では1つの「滞在」と定義してしまう

表-4 条件設定による移動・滞在判定の相違点3

相違点3のイメージ	移動数・滞在数の大小関係
	<p>短距離の移動において、複数の目的が生じたため、混雑統計のトリップ数の方が少なくなる</p>

上記の相違点を踏まえると、混雑統計の移動判定距離を長くし過ぎると、混雑統計のトリップ数が少なくなるため、混雑統計における移動判定距離の下限値である600mと設定することが望ましい。

また、混雑統計の滞在判定時間については、滞在時間を短くし過ぎることで、休憩や乗換え待ち等のデータを滞在と認識しないよう、かつ、混雑統計の欠損は少なくなるように、両者の集計結果を確認したうえで設定する必要がある。

そのため、本研究における混雑統計のトリップの条件を「移動判定距離：600m、滞在判定時間：20分」と設定した。

なお、前述した通り、混雑統計とPT調査データでは、サンプルの年齢構成や拡大処理の地域区分等に違いがある。ここで、混雑統計とPT調査データの比較を通じて、トリップ特性の差異を検証するためには、同一の定義で拡大処理を行ったデータを用いる必要がある。

そのため、PT調査データのマスターファイルに含まれるサンプルに対して、混雑統計のサンプルにおける年齢構成と拡大処理の地域区分にあわせた拡大処理を行った。本稿では、上記の処理を施したPT調査データのマスターファイルを「混雑統計比較用PTデータ」と称す。

4. 第5回（2010年）近畿圏PT調査データとの比較分析

(1) 発生集中量の比較

発生集中量による混雑統計とPT調査データの比較結果を図-3、図-4、図-5に示す。

PT調査において、近畿圏全体の交通の大きな流れを把握するために近畿2府4県が大きく分割されている大ゾーン別に発生集中量を比較（図-3）した結果、決定係数は0.99以上となっており、混雑統計において、大ゾーンレベルでの統計精度が担保されていることが分かる。

一方、中ゾーン別の発生集中量の比較結果（図-4）や市区町村別の発生集中量の比較結果（図-5）では、大ゾーン別と比較して、かい離が大きい地域が存在していることが分かる。例えば、市区町村単位で最もかい離が大きい姫路市では、両データに約779千トリップエンド/日の差異がみられる。この要因としては、混雑統計では市区町村別のサンプル数に違いがある中で、都道府県単位を基本として拡大処理がなされていることが想定される。

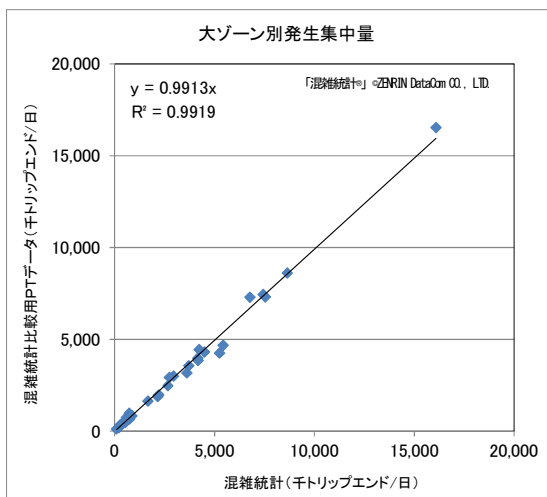


図-3 大ゾーン別の発生集中量の比較

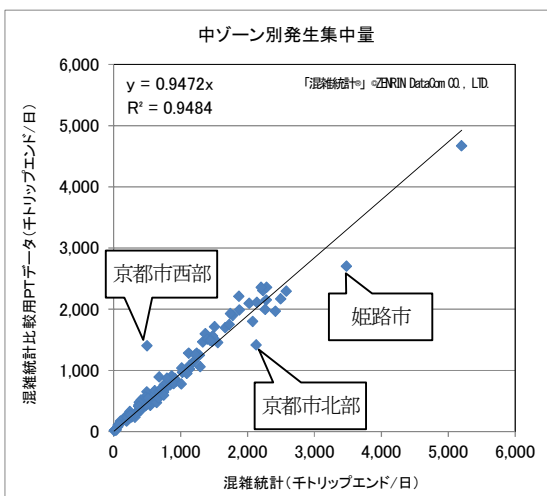


図-4 中ゾーン別の発生集中量の比較

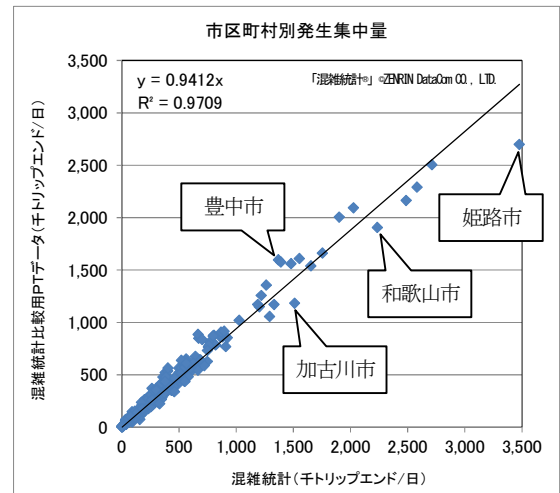


図-5 市区町村別の発生集中量の比較



図-6 第5回近畿圏PT調査における大ゾーン区分

(2) OD量の比較

OD量による混雑統計とPT調査データの比較結果を図-7、図-8、図-9に示す。傾向は発生集中量と同様であり、集計の地域区分を細かく設定した場合には、データのばらつきが生じることが分かる。

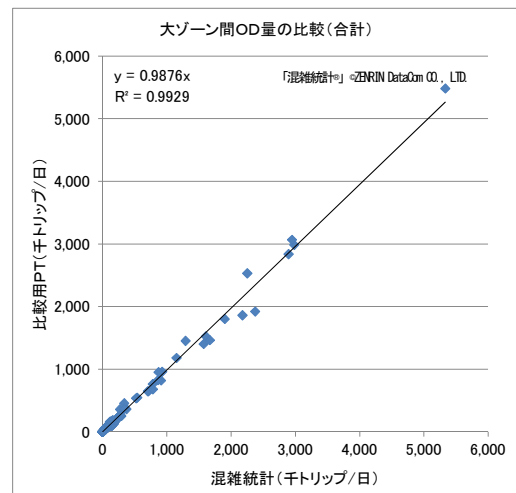


図-7 大ゾーン別のOD量の比較

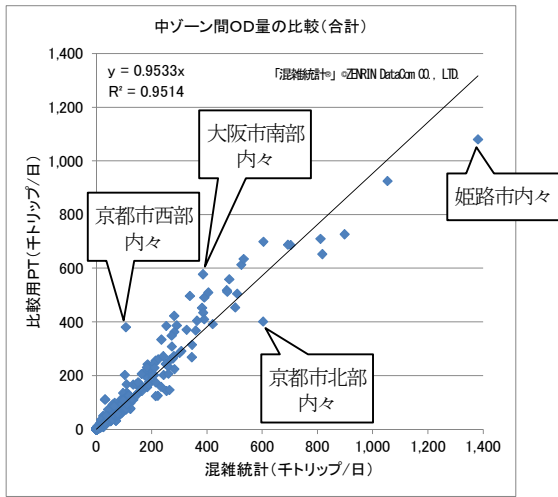


図-8 中ゾーン別のOD量の比較

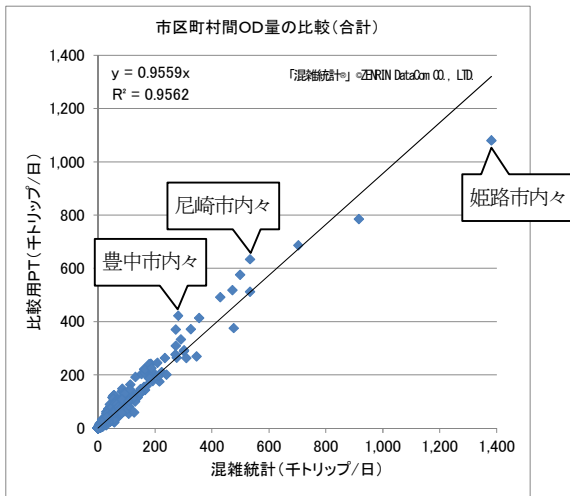


図-9 市区町村別のOD量の比較

(3) 利用交通手段別に見た発生量の比較

利用交通手段別に見た混雑統計とPT調査データの比較結果を表-5に示す。鉄道については両者の相関が高いが、自動車については混雑統計がPT調査データの約1.6倍多くなっている。

表-5 利用交通手段別の発生量の比較 (近畿圏計)

	①混雑統計	②混雑統計比較用PTデータ	①/②
	千トリップ/日	千トリップ/日	
鉄道	10,529	10,216	1.03
自動車	34,580	21,738	1.59
その他	5,712	17,953	0.32
手段計	50,821	49,907	1.02

その他はバス、自動二輪・原付、自転車、徒歩、その他の合計

PT調査データは、回答者の記述結果から利用交通手段を判定している。混雑統計では、位置情報及び速度情報等から利用交通手段を推定している。

混雑統計における利用交通手段の推定フローを図-10

に示す。

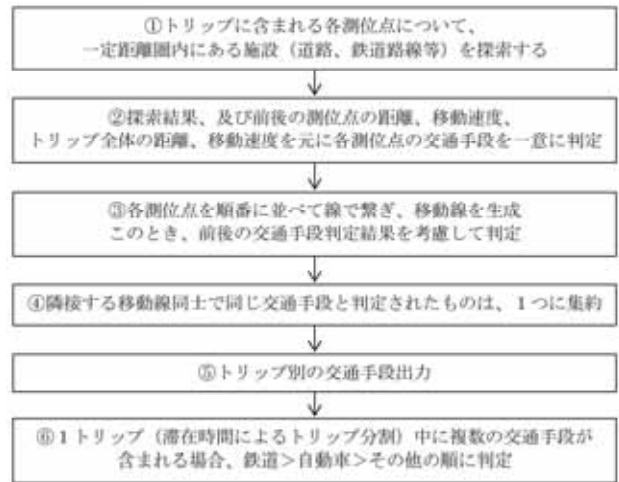


図-10 混雑統計における利用交通手段の推定フロー

鉄道については、ステップ①で施設（鉄道路線等）の探索を行うことで、PT調査データとほぼ同程度の推定がなされていることが分かる。

一方、自動車及びその他の利用交通手段については、道路を探索するステップ①に加えて、ステップ②以降で、移動速度やトリップ距離等を踏まえた判定が行なわれている。移動速度やトリップ長については、自動車とその他の手段（例：バスや自転車等）で、傾向に大きな違いがないトリップが一定量存在していることから推定が難しく、その結果として、混雑統計とPT調査データに差異が生じていることが想定される。

そこで、自動車とバス、自動二輪・原付、自転車を統合して比較した場合には、両者の相関が高くなることが分かる（表-6）。

表-6 利用交通手段別の発生量の比較 (近畿圏計)
(自動車、バス、自動二輪・原付、自転車を統合)

	①混雑統計	②混雑統計比較用PTデータ	①/②
	千トリップ/日	千トリップ/日	
鉄道	10,529	10,216	1.03
自動車+バス+自動二輪・原付+自転車	34,580	32,510	1.06
その他	5,712	7,182	0.80
手段計	50,821	49,907	1.02

その他は徒歩とその他の合計

5. 混雑統計の特長と想定される活用シーン

(1) 混雑統計の特長

混雑統計は表-1に整理したとおり、最短5分おきに計測される位置情報と測位転換の距離や移動速度に関する情報を基に、24時間・365日を対象とした利用交通手段別の人の移動実態を把握することが可能であり、第5回

(2010年)近畿圏PT調査で設定されている大ゾーン単位で、都市圏全体の分析が可能となるサンプルが確保されていると言える。

大ゾーンよりも地域区分が細かい中ゾーン別や市区町村別の発生集中量、OD量の比較結果では、一部のゾーンや市区町村ではかい離が大きい地域が存在するため、近畿圏全体を対象として、一律に中ゾーン単位ないしは市区町村単位で集計・分析を行った場合には、地域ごとにデータ精度のばらつきが生じることが考えられる。

しかし、中ゾーン別や市区町村別に見た場合でも、両データが近似している地域も多数存在している。そのため、混雑統計の活用においては、事前に検討対象とする地域の傾向や差異の程度を確認したうえで、集計・分析する際の地域区分を設定することが有効と言える。

また、PT調査にて設定されている調査圏域という概念がないため、日本全国を対象として、都市圏内居住者と都市圏外居住者の双方による都市圏内の移動・滞在実態を把握できるという特長を有していることは、大きな強みの一つであると言える。

(2) 都市交通分野での想定される活用シーン

京阪神都市圏（近畿圏）や東京都市圏、中京都市圏におけるPT調査は概ね10年間隔で実施されているが、交通行動は土地利用や都市活動のダイナミックな変化に伴って、常に変化しているため、10年ごとの調査では、調査後の時間経過とともに、調査結果と交通実態のかい離が大きくなるケースがある。

特に、近畿圏では2010年に実施した第5回調査以降、大阪駅北地区（うめきた）や大阪市阿倍野区（あべのハルカス等）における大規模開発の進展により、トリップの流動パターンが変化していると想定される。こうした変化を都市交通計画に反映させるためには、都市交通の実態に係る最新のデータが必要となるが、リアルタイムな変化に対応して、PT調査の実施による最新データの収

集・更新には様々な制約が存在する。

混雑統計においては、2010年5月以降の24時間・365日分のデータ蓄積がなされている特長を踏まえると、2010年とそれ以降のある時点における発生集中量やOD量の経年変化を混雑統計から捉え、これをPT調査データに反映することで、「PTマスターファイルの時点更新」に活用するアプローチが挙げられる。

また、調査圏域という概念を有さない特長を踏まえると、PT調査では調査対象にしていない「都市圏外居住者による都市圏内での移動実態把握」が挙げられる。

6. おわりに

本研究は、携帯電話の運用データを基に作成された混雑統計を対象として、人の移動に係る総合都市交通体系調査であるPT調査データとの比較分析を通じて、その特長やデータ内容の検証を行った。そのうえで、混雑統計の都市交通分野における活用シーンを考察した。

今後も混雑統計を用いた分析や検証を深化させることで、都市交通分野において、混雑統計や各種の交通関連ビッグデータの活用の途が広がることを期待する。

参考文献

- 1) 土木学会：大規模・長期間のGPSデータによる観光統計調査の活用可能性～石川県を事例に～
- 2) 国土交通省近畿地方整備局：近畿圏パーソントリップ補完調査業務報告書
- 3) 京阪神都市圏交通計画協議会：近畿圏都市交通体系調査業務報告書

寝屋川北部地下河川における急勾配区間の減勢構造に関する水理模型実験について

矢野 定男¹

¹大阪府寝屋川水系改修工営所 工務課 (〒536-0023大阪市城東区東中浜4-6-35)

寝屋川北部地下河川においては、大深度地下を使用する縦断線形へ見直したことで急勾配区間に高速流が発生する課題に対して、管内に設置した栈粗度等の対策工の減勢効果を模型実験により確認し、減勢可能な構造諸元が得られたことを報告する。

キーワード 大深度地下使用, 地下河川, 水理模型実験, 急勾配, 減勢

1. はじめに

寝屋川流域はその大部分が低平地で、流域面積の約 3/4 は雨水が河川に自然に流れ込まない「内水域」である。また、雨水の出口は寝屋川の京橋口（旧淀川合流点）ただ一か所しかないため、過去からも内水浸水の被害に悩まされてきた。

流域の浸水被害から流域住民の暮らしを守り、安全で快適なまちづくりを行うため、総合治水対策として、通常の河道改修だけではなく、治水緑地や流域調節池等の貯留施設の整備に加えて、道路等の公共施設の地下空間を活用した放流施設である 2 本の「地下河川」の整備を進めている。そのうち北部地下河川では、淀川水系寝屋川ブロック河川整備計画（H27.3）に基づき、30 年の整備期間で鶴見立坑から下流の大川（旧淀川）への排水機場までを整備することとしている（図-1.1）。

本内容では、大深度地下を使用する縦断線形へ見直したことで急勾配区間に高速流が発生する課題に対して、管内に設置した栈粗度等の対策工の減勢効果を模型実験により確認し、減勢可能な構造諸元が得られたことを報告する。

2. 寝屋川北部地下河川の概要

寝屋川北部地下河川は、上流端を寝屋川市讃良東町、下流端を大阪市都島区中野町とし、全長

14.3km、放流量 250m³/s の地下放水路である。

平成 4 年度より工事着手し、完成した一定区間ごとに貯留施設として順次暫定運用している。古川調節池（鶴見立坑～古川取水立坑）、北島調節池（古川取水立坑～北島立坑）および門真調節池（北島立



図-1.1 寝屋川北部地下河川位置図

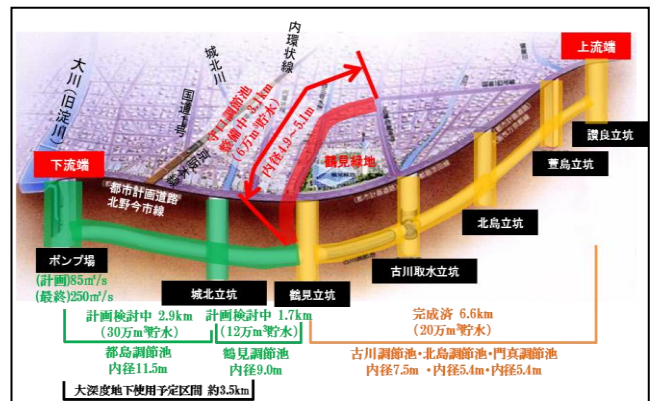


図-2.1 寝屋川北部地下河川の概要

坑～讚良立坑)が供用済みであり約 20 万 m³の雨水が貯留可能である。現在、守口調節池(鶴見立坑～松生立坑)が事業中で、6 万 m³の貯留容量が追加される予定となっている(図-2.1)。

3. 大深度地下使用法の適用

これまでの地下河川事業では、原則として公共用地の地下を占有して整備を進めてきたが、鶴見立坑より下流区間を整備するにあたり、都市計画道路都島茨田線の内環状線(国道 479 号)以西の整備が長期未着手であることが課題となっている。平成 25 年度に、事業主体の大阪市により長期未着手の都市計画道路の見直しが行われた結果、当該路線は存続するものの、概ね今後 30 年程度内に事業着手する方針が掲げられ、寝屋川北部地下河川の進捗との乖離が深刻になった。そこで、上面道路の進捗に影響されずに地下河川を整備できる方法として、大深度地下使用法の適用の手続きを進めている。

4. 急勾配区間の減勢工の検討

鶴見立坑から内環状線交差部の 1.2km の区間で通常深度から大深度へ約 30m 深度を下げるため、急勾配(i=1/37)が生じ、その流速は理論上 13m/s 程度で、河川砂防技術基準(案)同解説・設計編[I]におけるトンネル河川の設計流速 7m/s を大きく上回る。

そこで、水理模型実験を行うことによって急勾配区間の水理現象を把握し、管内で確実に減勢できる構造諸元や維持管理を含めた合理性を見出すとともに、計画縦断線形の妥当性を裏付けることとした。

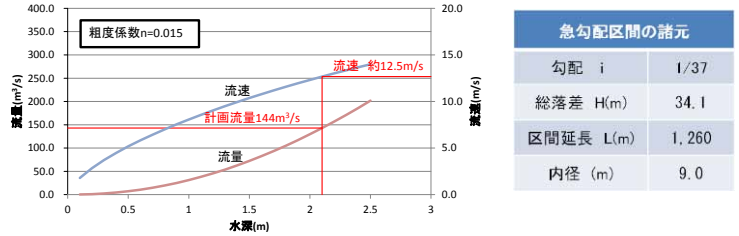


図-4.2 等流計算による理論上の流速

5. 模型実験の概要

(1) 検討の流れ

まず、①基礎模型で減勢工の構造諸元を変化させて、所定の効果が得られた構造について、②全体模型で詳細検討を行い、減勢構造の最適形状を見出すことにした。減勢形式は、階段工と棧粗度の 2 種類で、棧粗度には水平棧粗度と円形棧粗度がある。

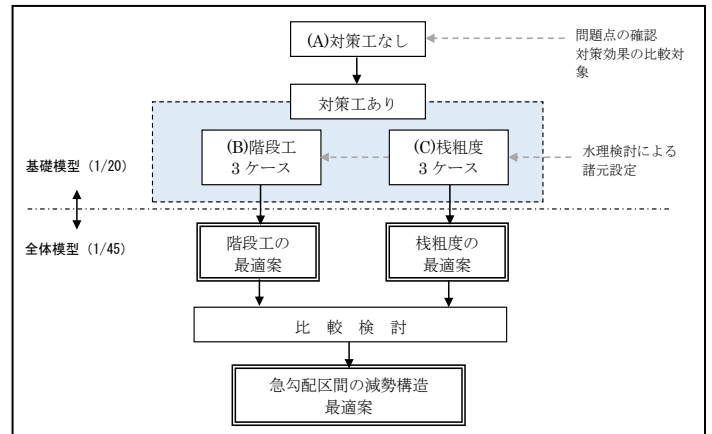


図-5.1 急勾配区間の減勢構造・検討フロー

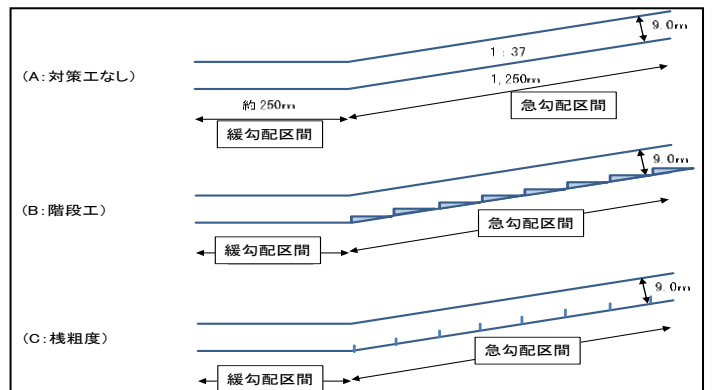


図-5.2 急勾配区間の減勢形式

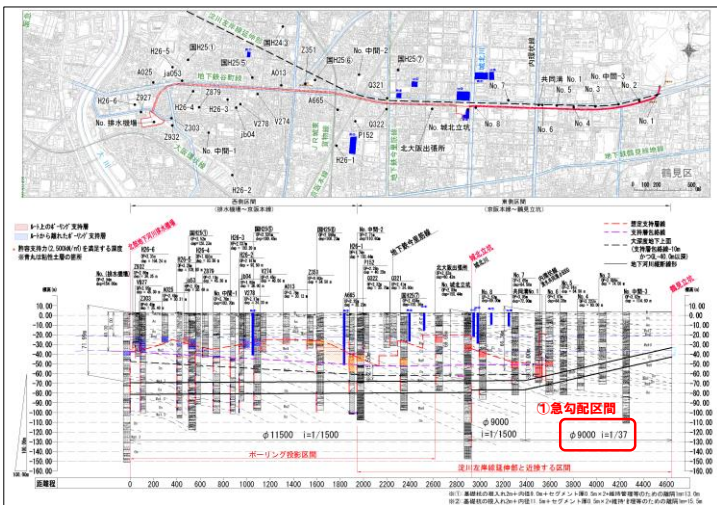


図-4.1 急勾配区間位置図

(2) 模型の概要

実験ではフルードの相似則を用い、表 5-1 に示す模型縮尺を基礎模型では 1/20、全体模型では 1/45 とした。粗度係数を実物とあわせるとともに、乱流を再現するためにレイノルズ数を 10000 以上としている。

模型再現範囲は基礎模型で急勾配部の 300m 区間（概ね流速が安定する長さを半円状の開水路で再現）、全体模型を 1,260m（全区間）と下流水平区間 250m とした。

表-5.1 模型再現諸元 (scale : 1/20, 1/45)

諸元	実物	模型			備考
		1/20	1/45	1/60	
流量 Q(m³/s)	144.0	0.0805	0.0106	0.0052	100%
水路再現長 L(m)	1,510	75.50	33.56	25.17	基礎模型は300m再現
水路高低差 H(m)	34.1	1.70	0.76	0.57	
水路管径 D(m)	9.00	0.450	0.200	0.150	
急勾配部水深 h(m)	3.42	0.171	0.076	0.057	case-3計算値
急勾配部流速 V(m/s)	5.40	1.207	0.805	0.697	"
満管時流速 V ₀ (m/s)	2.26	0.506	0.337	0.292	
満管時のRe数	2.04E+07	2.28E+05	6.75E+04	4.38E+04	≥1.0E+04(乱流)
粗度係数 n	0.015	0.0091	0.0080	0.0076	≥0.009(最小値)
		↑基礎模型	↑全体模型		

表-5.2 検討項目と評価基準

検討項目	評価基準	備考	
開水路時	流速	・急勾配区間及びそれに接続する緩勾配区間で流速が制限値 (7m/s) ※ ¹ 以下となっているか。 ・1段1段で加速することなく、比較的早期に一樣流速 (減速状態) となるか。	主に基礎模型で実施
	流況	・急勾配区間において流れがスムーズか。 (著しい水面変動が生じないか) ・勾配変化後の流況が安定しているか。	フルード数 ※ ³ が 1.0 付近では不安定で水面が波状となりやすい
	作用圧力	・対策工 (階段や棧) に構造上問題となる負圧 (-0.029MPa 以下) ※ ² が発生していないか。	基礎模型で実施
満管時	流水抵抗	・減勢構造が著しい阻害となっていないか (満管時の粗度が大きすぎないか)。 →排水機場地点での揚程高への影響	全体模型で実施
その他	遷移状況	・地下河川の水位変化により、開水路～管路の過渡的な状況下で問題となる現象が生じないか。	全体模型で実施
	維持管理	・泥や水が溜まりにくい構造であるか。 ・点検が容易か (車両の通行等)。	水通し構造付加の可能性

(4) 実験条件

実験は設計流量となる 100%をはじめ 75%、50%、25%および超過流量となる 130%の 5 ケースとし、減勢効果の評価は 100%流量とした。また、130%流量は完全減勢ではないが、構造物の破壊を誘発するような特異な現象が生じないことを確認することとした。主な実験ケースの模型設置状況を写真-5.1 に示す。円形棧粗度では車両通行を踏まえて、水通しを設けている。

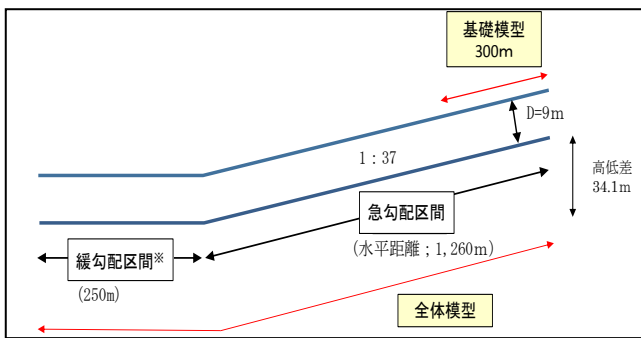


図-5.3 模型再現範囲

(3) 評価

実験での検討項目とその評価基準は表-5.2 に示すとおりである。

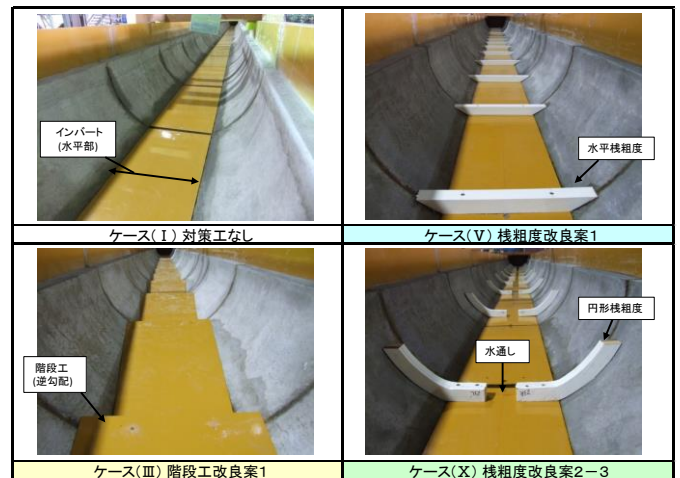


写真-5.1 基礎模型実験の各ケースの模型状況

(5) 基礎模型実験

主な実験ケースの 100%流量時の流況を写真-5.2 に示す。対策工なしでは流速約 13m/s となり、図-4.2 に示す理論上とほぼ同程度となった。階段工は当初目論んだ効果がなかったことから、水平棧粗度および円形棧粗度に変化させて、効果が得られる手法を見出すことになった。

図-5.4 では各ケースでの水深、6割水深での流速に加え、エネルギー線を確認した。階段工については、流速が 7 m/s 以上になることに加え、エネルギー線が再現区間である 300m で収束しないことから、減勢していないことがわかる。一方、水平棧粗度および円形棧粗度では、流速が 7m/s 以下に収まるとともに、エネルギー線も収束し、300m 区間で十分に減勢したと評価できる。

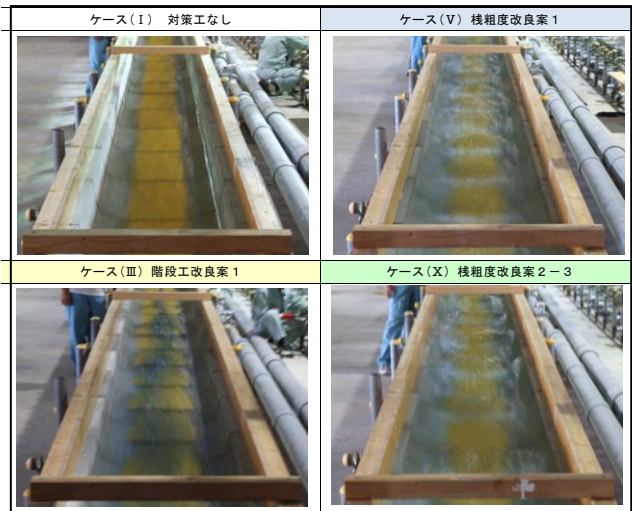


写真-5.2 計画(100%)流量時の流況

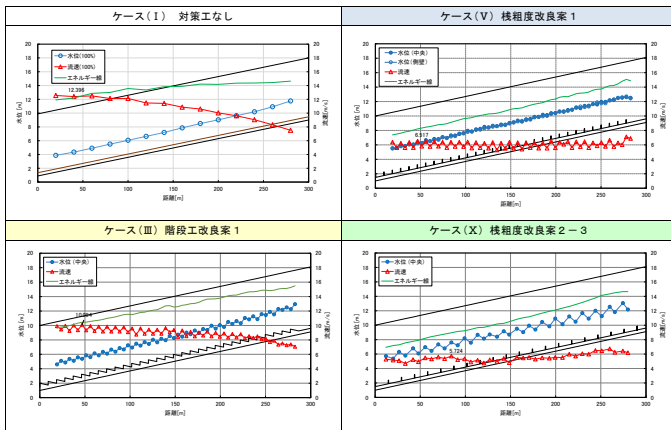


図-5.4 各ケースの水深、流速およびエネルギー線

なお、紙面制約上、その他のケースの結果は掲載できないが、表-5.3 に各ケースの構造諸元および評価をまとめている。なお、効果が得られた水平棧粗度および円形棧粗度のケースでは、1断面 15 点の流速を測定し、6割水深の流速と大差ないこと、また、棧粗度の周辺に発生する負圧を測定し、コンクリートを破壊する規模の負圧が発生していないことを確認している。

表-5.3 各ケースの構造諸元および評価

ケース名	1段の高さ	階段水平区間 または 水平ピッチ	階段段数 または 棧粗度数	備考	評価
ケース(I) 対策工なし	無	無	0	(case-0)	-
階段式 ケース(II) 階段工	50cm	18.5m	68	(case-1)ステップ:水平	没
ケース(III) 階段工改良案1	50cm	9.25m	136	(case-3)ステップ:逆勾配	x
水平棧粗度式 ケース(IV) 棧粗度	50cm	18.5m	68	(case-5)	x
ケース(V) 棧粗度改良案1	50cm	9.25m	136	(case-7)	O
ケース(VI) 棧粗度改良案1-1	50cm	9.25m	136	水平棧粗度 【水通しb=0.5m,中央配置】	x
ケース(VI-2) 棧粗度改良案1-2	50cm	9.25m	136	水平棧粗度 【水通し;千鳥配置】	x
円形棧粗度式 ケース(Ⅶ) 棧粗度改良案2	50cm	18.5m	68	円形棧粗度【水通しなし】	x
ケース(Ⅷ) 棧粗度改良案2-1	50cm	18.5m	68	円形棧粗度【水通しb=1.0m】	x
ケース(Ⅷ) 棧粗度改良案2-2	50cm	14.8m	85	〃 (ピッチ4/5)	Δ
ケース(Ⅷ) 棧粗度改良案2-3	50cm	14.8m	85	〃 (ピッチ4/5) 棧設置高短縮(1/2)	O

・階段式の対策工について、ケースⅢ(改良案)を先行して確認し、減勢効果が認められなかったため、ケースⅡ(原案)は廃案とした。
・円形棧粗度案は、大阪市の実験事例の実験事例に従い、改良案の1つとして設定した。

(6) 全体模型実験

基礎模型実験では、主に流速の低減を中心に減勢効果を確認したが、全体模型実験では、それに加えて、勾配変化点での跳水による影響や下流ポンプ排水時に課題となる満管時の粗度による抵抗の増分を確認している。流速の低減については、基礎模型実験とほぼ同様の結果であった。図-5.5 に示すように勾配変化点での跳水の影響はほぼないこと、また、開水路から満管に遷移する状況で空気が溜まることなく抜けることも確認できた。

満管時の下流端における粗度による抵抗は、水頭差により水平棧粗度で約 0.70m、円形棧粗度で約 1.15m となったが、その対処方法として管径を大きくするか、ポンプ能力を増強するかを比較し、後者の方が経済的であると試算している。







	ケースV[水平棧相度案]	ケースX[円形棧相度案]
Q:100%		
Q:130%		
流況	<p>【流量100%】 勾配変化点で跳水が発生し、やや水面が波状となるものの比較的安定している。</p> <p>【流量130%】 やや波状度合いが大きくなる。 → 流況上の顕著な問題は見られない。</p>	<p>【流量100%】 水面の波状度合いがやや大きく、勾配変化点付近の跳水位置が明確ではない。</p> <p>【流量130%】 100%時より波状度合いは減少する傾向となる。 → 流況上の顕著な問題は見られない。</p>
	ケースV[水平棧相度改良案]	ケースX[円形棧相度改良案]
		

図-5.5 勾配変化点の跳水の影響および開水路から満管への遷移時の流況

6. おわりに

今回の実験結果から、当初目標とした減勢効果を得る2手法が見つかった。今後は、急勾配区間の施工にあわせて、流速等をモニタリングすることで、実際生じる水理的課題を把握・整理し、更に学識経験者にご意見を賜りながら、下流のポンプ施設整備時までには、対応方針を決めたいと考えている。

(謝辞)

今回の実験では、大阪府河川構造物等審議会「大深度地下使用検討部会」で審議をするにあたり、京都大学大学院 戸田教授、関西大学環境都市工学部 石垣教授および京都大学防災研究所 川池准教授には、技術指導や実験指導を含め、さまざまなご指導を賜り、厚く御礼を申し上げます。

在来木本種子を用いた急勾配岩盤斜面の 緑化工について

藤田 智人¹・福田 理司²

¹近畿地方整備局 六甲砂防事務所 工務課 技官 (〒658-0052 兵庫県神戸市東灘区住吉東町3-13-15)

²東興ジオテック株式会社 大阪支店 工務部 課長 (〒531-0075 大阪府大阪市北区大淀南1-4-15) .

本報告は、阪神淡路大震災により被災した六甲山の山腹を復旧する工事において実施した植生工について、適用工法選定までのプロセスと、実際に行った試験施工、さらにその結果を検証して本施工の設計に反映させた経緯をとりまとめたものである。本工事は、近畿地方整備局発注の、苧川谷山腹(その3)工事である。工期は、平成26年2月より4年間で、現在施工中である。施工地は、神戸の市街地から大変よく見える場所に位置している。設計・施工上の問題点として、緑化の限界勾配を超えた急勾配地であること、自然豊かな六甲山系の山腹という立地条件を考慮し周辺環境との調和が図れる植生群落の形成が必要であることがあげられた。

キーワード 植生工選定, 限界勾配, 周辺環境との調和

1. はじめに

本現場は、平成7年1月に発生した阪神淡路大震災で被災した、六甲山の山腹を補強し緑化工で修景する工事である。施工箇所は、六甲山特有の花崗岩を基岩とし、断層、剪断に伴う岩盤の破壊、崩落が全域で見られる。斜面の勾配は場所により大きく異なるが、垂直に近い急勾配箇所やオーバーハング箇所も見られる大変過酷な条件である。この現場において緑化工を施工するにあたって、2つの問題点が浮かび上がった。それは、1) 植物の自然侵入が困難な急勾配斜面、2) 自然豊かな周辺の森林環境との調和である。

2. 植生工の近年の傾向

(1) 2005年 外来生物法施行前の傾向

外来生物法施行前に発行された「生物多様性に関する資料」¹⁾は、「防災目的の場合、イネ科草本を用いた急速緑化の他に代替できるよい工法がないという現状がある。」と記されている。また同書には「新たな工法の検討など早急な技術的対応が望まれる。」とも記されている。生育が早く、強く、安価で十分な供給量がある外来草本種は斜面の浸食防止に最適であるが、環境保全の観点では好ましいとは決して言えないことがわかる。

(2) 2008年生物多様性基本法施行後の傾向

生物多様性基本法施行後に発行された「地域生態系の保全に配慮したのり面緑化工の手引き」²⁾には、生物多

様に有効な工法として、表土利用工、自然侵入促進工、地域性種苗利用工の3工法が記載されている。

a) 表土利用工

表土利用工は、緑化目標とする植生群落が成立している土壌の表土に含まれている埋土種子を活用した緑化工法である。そのため、施工地域外の種苗を使用せずのり面を緑化することが可能であり、地域生態系の遺伝子の攪乱に配慮することができる。一方で、主に埋土種子に成立を委ねているため、発芽・生育する植物の種類や量の予測ができない問題がある。

b) 自然侵入促進工

自然侵入促進工は、緑化目標とする植生群落に近接するのり面を対象として、周辺から自然に飛来する現地種子の定着(発芽・生育)によってのり面緑化を図る工法である。そのため、この工法は地域の自然植生による緑化が可能となる。一方でのり面に飛来する種子を選択できない、種子量を調整できないことから、緑化目標とする植生と異なる群落が成立することが考えられる。

c) 地域性種苗利用工

地域性種苗利用工は、のり面周辺の自然植生から採取した種子、またはその種子から育苗した苗木を利用することにより、表土利用工や自然侵入促進工では自然に委ねている植生導入を、計画的かつ短期間に行うことが可能な工法である。地域性の苗木を育成するには、育成場所や2年程度の育苗期間を要するなどの条件が加わるため、事前の種子採取・育苗計画を立案しておく必要がある²⁾。

(3)もっとも採用されている工法

前述の「地域生態系の保全に配慮したのり面緑化工の手引き」²⁾には、生物多様性に配慮した緑化工の適用範囲として、国立公園や島嶼部等の地域に特有な生物多様性を保全する必要が高い地域と記されている。したがって、前述した3工法は、基本的に限定的な立地に適応される工種といえる。経済性や工期を考慮すると、やはり市場単価方式が適用されている植生基材吹付工が最もポピュラーな工法と言えるが、市場単価方式の植生基材吹付工に適用される種子は外国産が対象となっているため、近年では使用が敬遠される傾向にある。



写真-1 近接する施工済み箇所近景 2014年6月

3. 周辺及び現地調査

(1) 近接施工地の調査

本現場に近接している既施工地では従来型の緑化が行われているが、緑量が最も多い時期においても生育基盤の露出率が非常に高い状態であった(写真-1)。

生育基盤の露出状態が続くと基盤は乾燥収縮し、風化が進行し、いずれ剥離して元の岩肌が露出してしまうことが懸念される。既施工地で確認できるのは外来草本種がほとんどであり、生物多様性保全の上であまり望ましくないといえる。



写真-2 施工対象地全景

(2) 今回の施工対象地の調査

施工地は、正面左側と右側に位置する2つの崩壊斜面で構成されている(写真-2)。垂直に近い急勾配箇所やオーバーハング箇所が見受けられ(写真-3)、六甲山特有の花崗岩を基岩とし、断層、剪断に伴う岩盤の破壊、崩落が全域で確認できる。土壌硬度が高く硬いの脆く、しかしながら節理間隔が広く部分的には一枚岩状を呈している。さらに、斜面は南向きで夏季に強い乾燥条件下に置かれることが想定された。



写真-3 垂直に近い急勾配岩盤斜面の近景

(3) 施工対象地近隣の調査

六甲山系は明治時代におきた過度な森林利用の結果、広大な禿山(はげ山)となった過去があり、現在は一度失われた自然林の代償植生である常緑広葉樹二次林(シイ・カシ林)が広がっている。施工対象地近隣で確認できた植物は図-1のとおりである。



図-1 現地調査で確認できた木本類

4. 適用工法の検討

(1) 環境保全水準(環境区分)の設定

自然回復緑化の検討では、施工対象箇所について、個々の事業ごとに地域の自然生態系の状況や、地域にとっての自然生態系の社会的・文化的位置づけ等を調査した上で環境保全水準(環境区分)を設定する⁵⁾。自然回復緑化のための環境保全水準と留意点を表-1に示す。

環境保全水準は、学術的にも価値が高い原生保全地域や自然公園における特別保護地域などのように、遺伝子レベルでの保全が求められるような地域に移入種が人為的に持ち込まれるのを防止したり、既に人為的影響を強く受けている地域や大規模災害を受けた地域等の緑化において、必要以上に植物材料の調達範囲が制限されることにより、かえって災害復旧や自然回復が遅れてしまう問題を回避するため、施工対象地の緑化目的に合致する適切な植物材料の選定を図ることを目的に設定する。したがって、環境保全水準は、過度の自然保護や経済的理由に左右されることなく、施工対象地の緑化目標や目的に合致するように設定する必要がある。

前述のとおり六甲山は、過去に人為的攪乱を大きく受けた自然林の代償植生である常緑広葉樹二次林(植生自然度6~7に該当)である。また、当該工事は阪神淡路大震災の復旧工事である。こうしたことから考えて、当該

施工地の環境保全水準は「3」に設定するのが妥当と考えられた。したがって、当工事においては、従来の法面緑化で多用されてきた外来種や外国産在来種は使用せず、国内産在来種を使用することを基本方針とするのが望ましいと判断した。

(2) 初期緑化目標の設定

初期緑化目標とは、施工対象地に緑化工によって形成される植物群落のことである。施工対象地は部分的に一枚岩状を呈する部分が見られるが、多くの箇所では節理が発達して樹木根系の伸長は可能と判断された。木本類の根系は深く鉛直方向に伸長するので、基岩に亀裂がある場合には根系の伸長は可能と言われている³⁾からである。したがって、本現場では周辺で確認された落葉広葉樹の「先駆種」を主体とし、周辺のシイ・カシ林を構成する常緑広葉樹の「遷移中後期種」が混成した木本植物群落の形成を初期緑化目標に設定した。(表-2)

表-2 自然回復のための初期緑化目標⁵⁾

初期緑化目標	
目標群落の主構成種	目標群落の外観によるタイプ
草本類 (草本植物主体の群落)	草原タイプ (草原状の群落)
先駆樹種 (先駆樹種主体の群落)	低中木林タイプ (法面で樹高2~3m程度になる群落) 中高木林タイプ (法面で樹高3m以上になる群落)
遷移中後期種 先駆樹種と遷移中後期種が混成する群落	低中木林タイプ 中高木林タイプ

表-1 自然回復緑化のための環境保全水準(環境区分)と留意点(案)(抜粋)⁵⁾

環境区分	【環境区分1】	【環境区分2】	【環境区分3】	【環境区分4】
環境区分設定のめやす	<ul style="list-style-type: none"> 提言の遺伝子保存地域。あるいは系統保全地域に相当する地域 自然公園の特別保護地区、第1種特別地域、あるいはそれに相当する地域 極相植物群落、あるいはそれに近い植物群落の地域 植生自然度が9,10に相当の地域 貴重種・重要種の生育地域 学術上の観点から重要と認められる地域 	<ul style="list-style-type: none"> 提言の系統保全地域。あるいは種保全地域に相当する地域 自然公園の第2種、第3種特別地域、あるいはそれに相当する地域 自然林、あるいはそれに近い二次林地域、二次草原地域 植物自然度が8相当の地域 環境区分1と近接している地域 早急な復旧が求められる自然公園内の大規模災害被災地 	<ul style="list-style-type: none"> 提言の種保全地域。あるいは移入種保全地域に相当する地域 自然公園の普通地域、あるいはそれに相当する地域 二次林、二次草原、人工造成林地域 植生自然度が6,7に相当の地域 人為的攪乱を大きく受けている自然林地域 早急な復旧が求められる自然公園以外の大規模災害被災地 	<ul style="list-style-type: none"> 提言の移入種管理地域に相当する地域 市街地、農耕地、牧草地 人工的景観造成が求められる地域 植生自然度が1~5に相当の地域 浸食防止を目的とする場合
初期緑化目標	<ul style="list-style-type: none"> 【地域性系統のみによる自然回復】 5~20年で地域性系統のみの植生群落を造成・回復する。 自然回復に時間を要しても許容する。 	<ul style="list-style-type: none"> 【地域性系統~自生種(地域区分内)を主体とする自然回復】 5~10年で地域性系統~自生種(地域区分内)が主体の植物群落を造成・回復する。 	<ul style="list-style-type: none"> 【地域性系統~自生種(国内)を主体とする自然回復】 5~10年で地域性系統~自生種(国内)が主体の植物群落を造成・回復する。 	<ul style="list-style-type: none"> 【自生種や移入種による景観の回復】 1~3年で良好な景観造成が可能な植物群落を造成・回復する。
導入植物	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の地域性系統の植物材料のみを用いる。 採取地は、施工対象地の市町村レベルの自治体区分、もしくは森林帯を同じくする同一河川の流域区分内とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の地域性系統の植物材料を用いることが望ましいが、特別な制約がない場合は自生種(地域区分内)の植物材料を用いてもよい。 先駆樹種や短命な植物の植生材料は自生種(国内)の範囲までであれば用いてもよいが、環境区分1地域への逸脱の危険性等がないことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の地域性系統~自生種(地域区分内)の植物材料を用いることが望ましいが、特別な制約がない場合は自生種(国内)の植物材料までの範囲で用いてもよい。 場所により、自生種(国内)、移入種(外来草本等)を用いてもよいが、環境区分1~2地域への逸脱の危険性等がないことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 自生種(国内)までの範囲の植物材料を用いることが望ましいが、特別な制約が無い場合は自生種(国外)、移入種の植物材料を用いてもよい。
	<ul style="list-style-type: none"> 種子・さし穂・苗木(山引き苗・育成苗)など、植物材料の採取地・生産地(育成地)が明確なものを用いる。 			

(3) 導入植物の選定

導入植物は、生物多様性に配慮して外来種を使用せず、国内産在来種を使用する方針とした。国内産在来木本種を主構成種とした初期緑化目標を達成するために、主構成種が成長するまでを補う補全種を混播した。また、木本類が成立するまでの表層保護および生育基盤の乾燥防止対策として草本類を微量混播する計画とした。

(4) 適用工法の選定

ここまで述べてきたとおり、表土利用工や自然侵入促進工では、植生の成立を自然に委ねる部分が大きくリスクが高い。一方で地域性種苗利用工は、植物材料の準備期間が必要であり、環境保全水準の観点から過大設計と考えられた。そのため一般的な植生基材吹付工(市場単価)と地域性種苗利用工の中間的な工法の適用が本現場には適していると判断した。

5. 斜面樹林化工法の選定

斜面樹林化工法 (NETIS QS-980148-VE) とは、1995年に発足した斜面樹林化技術協会が提供する、国内産在来種を用いた播種工による自然回復緑化工法である。生育が遅い在来木本種の性質に最適な、専用基盤材、専用浸食防止材を用いて吹付施工する。特徴的なことは、保存が難しいとされていた在来木本種子を専用冷蔵貯蔵施設と品質保持剤を使用して、保存・検定・供給するシステムを確立していることである(図-2)。国内産在来木本種を斜面防災に長年活用してきた実績や、保管・検定が難しい国内産在来木本種を常時保管・供給できる体制が整っていることから(図-3)、当現場の初期緑化目標達成に最適な工法と判断した。また播種工で導入した木本類は、

植栽工で導入されたものと比較して防災効果が高いことも知られており⁴⁾(図-4)、斜面防災の観点からも有効といえる。

種子採取



最適な種子採取時期に、最適な方法で採種します。

種子保管



種子専用貯蔵施設で、樹種ごとに最適な貯蔵条件で保管します。

種子品質検査



「早期発芽力検定法」により、短期間で木本種子の発芽率を検査し、品質証明書を発行します。

種子計量・袋詰め



自動計量袋詰装置で正確に計量・袋詰めし、品質保持材を混合して出荷します。

図-2 斜面樹林化工法における在来木本種子の保管・検定・供給過程⁴⁾



図-3 斜面樹林化技術協会が専用貯蔵施設で保管し随時供給可能な斜面安定工指針に記載されている在来木本種子⁴⁾

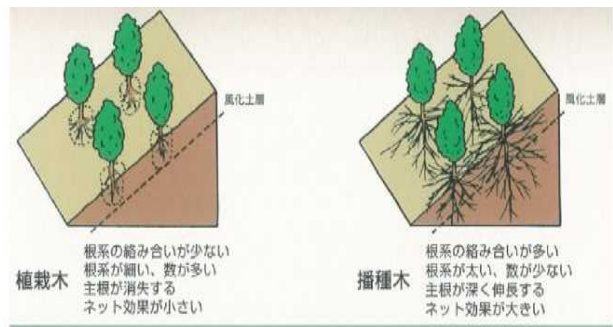


図-4 木本植物の導入方法の違いと根系の状況⁴⁾

6. 試験施工による工法選定の妥当性の検証

斜面樹林化工法の現地における適応性の確認、および最適な種子配合を検証するために、2015年11月に試験施工を実施した。3パターンの種子配合(表-3)を300㎡ずつ、合計900㎡の吹き付けを実施した。吹付厚は100mm、肥料、接合剤は、斜面樹林化工法の標準仕様を用いた。

試験施工の追跡調査と生育判定は、斜面樹林化工法技術資料⁴⁾に基づき2016年7月に実施した(表-4)。その結果、播種した在来木本類は順調に生育し、3配合とも生育判定基準を満たしていることが確認された(表-5)。

表-3 試験施工種子配合表

A配合			B配合			C配合		
植物名	発生期待本数		植物名	発生期待本数		植物名	発生期待本数	
主構成種	スズミナシ 40		スズミナシ 20		スズミナシ 10			
	ヤマハゼ 20		アカマカンゾウ 30		アカマカンゾウ 15			
	スルズ 40		スルズ 40		スルズ 20			
	クサキ 20		クサキ 20		クサキ 10			
補全種	コマツナギ 40		コマツナギ 40		コマツナギ 40			
草本類	コマツナギ 40		コマツナギ 40		コマツナギ 40			
	シバ 300		シバ 300		シバ 300			



写真-4 試験施工実施状況



写真-5 樹林化工法の専用資材

表-4 生育判定の時期と判定基準⁴⁾

施工地域	施工時期	生育判定の時期
北海道～東北	3～6月	10～11月
	7月	翌年の5月
	10月(下旬)～12月(月上旬)	翌年の8月
関東以内	1～2月	7～9月
	3～6月	10～12月
九州～沖縄	11～12月	翌年の7月
	1～6月	7～12月
	10～12月	翌年の7月

植物区分	項目	成立本数
主構成種		3本/m ² 以上
補全種 (草本類) ¹⁾		5本/m ² 以上 (5～100本/m ²)

今回の工事は、遷移中後期種と先駆樹種が混成した植物群落の形成が目標である。A・B・Cいずれの配合も生育判定基準を満たしたが、秋に紅葉するヤマハゼや春に花をつけるフジウツギによる修景効果も期待でき、もっとも多くの主構成種の成立が確認できたA配合が、本現場に最適であると判断した。

7. 学識者による内容確認

試験施工に至る経緯と試験施工の追跡調査による生育判定結果を踏まえ、最終的に採用する配合については、客観性を担保する意味も含め、兵庫県立大学名誉教授の服部学術博士に内容確認とアドバイスをお願いした。頂いたアドバイスの主な内容は2点で、1)常緑樹は植物遷移の最終形であり、鬱蒼とした暗い森を造形してしまい、生物多様性の面で好ましくない。2)フジウツギは本来六甲山系に存在しなかった種であり、たとえ国内産在来種といえど好ましくない、というものだった。このアドバイスをもとに、試験施工の達成率を数値化し、本施工に向けて修正配合を検討した。



写真-6 試験施工の追跡調査状況 2016年7月



写真-7 生育判定近景 2016年7月

表-5 施工8ヶ月後の成立本数

植物区分	項目	成立本数	成立本数		
			A	B	C
主構成種	3本/m ² 以上 (評価)	108.2	67	11	
		○	○	○	
補全種	5本/m ² 以上 (評価)	0.6	0	0	
		△	×	×	
草本類	5～100本/m ² (評価)	141	49	26	
		△	○	○	

表-6 生育判定結果と学識者の提言に基づいた修正配合

	A配合			B配合			達成率の 平均値(%)
	期待本数 (本/m ²)	施工後8ヶ月 (本/m ²)	達成率(%)	期待本数 (本/m ²)	施工後8ヶ月 (本/m ²)	達成率(%)	
ネズミモチ	40	9	22.5	20	6	30.0	26.3
ヤマハゼ	20	19	95.0	---	---	---	95.0
アカメガシワ	30	24	80.0	30	24	80.0	80.0
ヌルデ	40	3	7.5	40	6	15.0	11.3
クサギ	20	52	260.0	20	31	155.0	207.5
フジウツギ	50	1.2	2.4	---	---	---	2.4
コマツナギ	40	0.6	1.5	40	0	0.0	0.8
ノシバ	500	141	28.2	500	49	9.8	19.0

修正事由	修正期待 本数 (本/m ²)
ネズミモチ……達成率3割未満と芳しくない結果であるが、服部先生のご意見を考慮し、B配合値を採用。	20
ヤマハゼ……達成率9割超のためA配合値より修正なし。	20
アカメガシワ…達成率8割の為、期待本数3割増(30本→40本)とする。	40
ヌルデ……達成率1割の為、期待本数5割増(40本→60本)とする。	60
クサギ……良好である為、修正なしとする。(ネズミモチ及びヌルデの未達分補填を考慮し減量もしない。)	20
フジウツギ…服部先生のご意見を考慮し、削除とする。	---
コマツナギ…主構成種でない為、修正しない。	40
ノシバ……主構成種でない為、修正しない。	500

検討の結果、今回の配合の中で唯一の常緑樹がネズミモチであり、周辺の森林が常緑広葉樹で構成され、かつ過酷な立地条件のため自然侵入の可能性が大変低い当該施工地において、常緑樹を削除してしまうと冬季に完全に緑量を失いかねないと考えられた。そのため、ネズミモチは試験施工より減量し、フジウツギは削除することとした。また、成立本数が少なかったアカメガシワとヌルデを増量して確実性を高める方針とした。(表-6)

8. 本施工

試験施工の内容と学識者の意見を取り入れた修正配合を採用し、本施工は2016年12月より開始した。施工は順調に進捗しており(写真-8)、2017年5月に完了の見込みである。工事としては、その後約4ヶ月をかけて足場、モノレール、索道といった仮設備を撤去して、今秋に完成となる予定である。



写真-8 本施工における吹付施工状況

9. おわりに

本報告では、事前調査・検討・試験施工・検証・修正・設計変更・本施工と、実際に行ってきた過程を述べた。過酷な立地条件でも、防災と環境保全を両立した施工が可能であることを証明できた点は、今後の山腹緑化工の検討にあたり大変有用であったと考えている。本報告が今後の緑化工検討の参考になれば幸甚である。

謝辞 試験施工の計画から実施後の現地調査や修正配合の立案まで、兵庫県立大学・服部名誉教授に技術的助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)道路緑化保全協会 生物多様性に関する資料、道路緑化技術資料NO.7 2002
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所 地域生態系の保全に配慮したのり面緑化工の手引き 2013
- 3) (社)日本道路協会 道路土工 切土工・斜面安定工指針 2009
- 4) 斜面樹林化技術協会 斜面樹林化工法技術資料第6版 2015
- 5) 日本緑化工学会斜面緑化研究部会 のり面における自然回復緑化の基本的な考え方ととりまとめ、日本緑化工学会誌29(4) 2004

寝屋川北部地下河川における城北取水立坑の減勢構造に関する水理模型実験について

安岡 政光¹

¹大阪府茨木土木事務所 建設課 (567-0034茨木市中穂積一丁目3番43号)

寝屋川北部地下河川は大深度地下を使用する縦断線形へ見直したが、城北川から地下河川へ取水する減勢施設が従前より高落差になるという課題に対して、従前実験結果を踏まえた模型実験を行い、合理的なドロップシャフト型立坑の減勢構造の諸元を見出したことを報告する。

キーワード 大深度地下使用, 地下河川, 水理模型実験, ドロップシャフト, 減勢

1. はじめに

寝屋川流域はその大部分が低平地で、流域面積の約 3/4 は雨水が河川に自然に流れ込まない「内水域」である。また、雨水の出口は寝屋川の京橋口（旧淀川合流点）ただ一か所しかないので、過去からも内水浸水の被害に悩まされてきた。

流域の浸水被害から流域住民の暮らしを守り、安全で快適なまちづくりを行うため、総合治水対策として、通常の河道改修だけではなく、治水緑地や流域調節池等の貯留施設の整備に加えて、道路等の公共施設の地下空間を活用した放流施設である 2 本の「地下河川」の整備を進めている。そのうち北部地下河川では、淀川水系寝屋川ブロック河川整備計画（H27.3）に基づき、30 年の整備期間で鶴見立坑から下流の大川（旧淀川）への排水機場までを整備することとしている（図-1.1）。

本内容では、大深度地下を使用する縦断線形へ見直したことで、城北川から地下河川へ取水する減勢施設が従前より高落差になるという課題に対して、従前実験結果を踏まえた模型実験を行い、合理的なドロップシャフト型立坑の減勢構造の諸元を見出したことを報告する。

流端を大阪市都島区とし、全長 14.3km、放流量 250m³/s の地下放水路である。

平成 4 年度より工事着手し、完成した区間毎に貯留施設として順次暫定運用している。古川調節

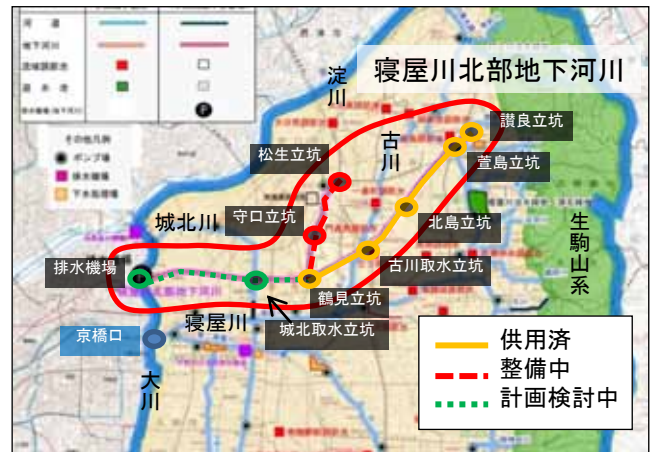


図-1.1 寝屋川北部地下河川位置図

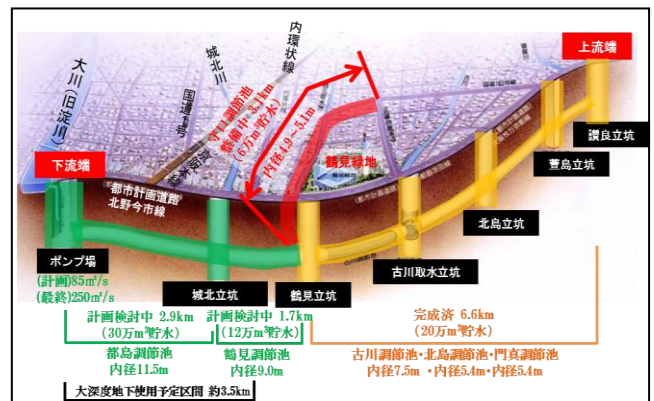


図-2.1 寝屋川北部地下河川の概要

2. 寝屋川北部地下河川の概要

寝屋川北部地下河川は、上流端を寝屋川市、下

池（鶴見立坑～古川取水立坑）、北島調節池（古川取水立坑～北島立坑）および門真調節池（北島立坑～讃良立坑）が供用済みであり、現時点で約 20 万 m³ の雨水が貯留可能である。現在、守口調節池（鶴見立坑～松生立坑）が事業中で、6 万 m³ の貯留容量が追加される予定である（図-2.1）。

3. 大深度地下使用法の適用

これまでの地下河川事業では、原則として公共用地の地下を占用して整備を進めてきたが、鶴見立坑より下流区間を整備するにあたり、都市計画道路都島茨田線（事業主体：大阪市）の内環状線（国道 479 号）以西の整備が長期未着手であることが課題となっている。平成 25 年度に、大阪市により長期未着手の都市計画道路の見直しが行われた結果、当該路線は存続するものの、事業着手は概ね今後 30 年程度内という方針が掲げられ、寝屋川北部地下河川の進捗との乖離が深刻になった。そこで、上面道路の整備に影響されずに地下河川を整備する方法として、大深度地下使用法の適用を進めている。

4. 城北取水立坑の減勢構造の検討

城北取水立坑について、平成 3～4 年に行われた水理模型実験の結果を基に千鳥階段型の減勢工

が採用されたが、大深度地下使用に伴って落差が約 40m から約 70m になり、千鳥階段型の減勢工のライフサイクルコストの増大を考慮すると、より合理的なドロップシャフト型について改めて水理模型実験により再検討することとした。

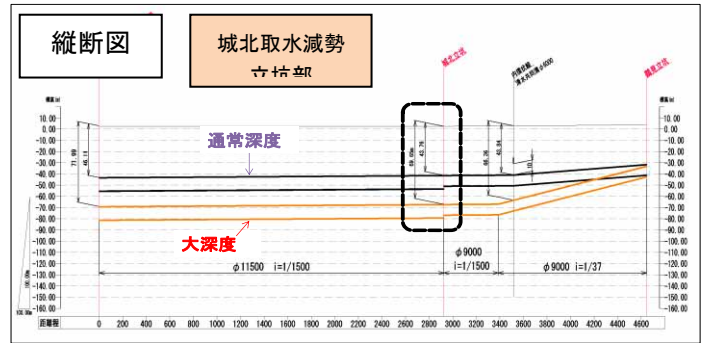


図-4.1(2) 城北川取水減勢立坑部の概要（縦断）

(1) 城北川取水減勢立坑部 (H4)

平成 4 年に通常深度（約 40m 落差）の条件でドロップシャフト型と千鳥階段型の減勢形式を対象として縮尺 1/20 の水理模型実験を行っている。ドロップシャフト型では①MWL 時の空気混入量が多く、②HWL 時に立坑内での激しい回転流に伴う渦糸が形成される等の問題点が解決できず、確実に減勢ができ、空気混入濃度が $1.5 \times 10^{-3}\%$ まで低減した千鳥階段型が最適と判断されている。



写真-4.1 H4 既往実験の状況



図-4.1(1) 城北川取水減勢立坑部の概要（平面）

(2) 古川取水減勢立坑部 (H6)

平成 6 年にドロップシャフト型の減勢形式を対象とした縮尺 1/20 の水理模型実験を行っている。H4 実験時の城北取水立坑に対して減勢池を伸ば

した構造形式に改良し、千鳥階段型に匹敵する空気混入濃度 $1.5 \times 10^{-3}\%$ にまで低減できたことから、採用に至り既に施工済みである。

写真-4.2 H6 古川取水立坑の既往実験の状況

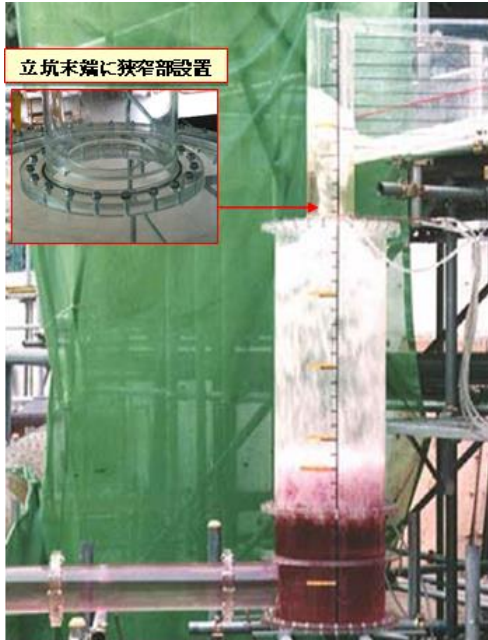


表 - 4.1 に、古川取水立坑と城北立坑（大深度地下使用時）の水力諸元を比較している。フルードの相似則によれば、両者の流量、落差は城北取水立坑が古川取水立坑の約 2 倍の比率であることから、古川取水立坑で採用したドロップシャフト型約 2 倍の寸法の減勢構造を採用することで、同様の効果が期待できると推察した。

表-4.1 古川取水立坑と城北立坑（大深度地下使用時）の水力諸元の比較

諸元	①古川取水立坑	②城北取水立坑	比率(②/①)	フルード則による比率
立坑流量 (m/sec)	15	89	5.93	2.04
地下河川流量 (m/sec)	48	144	3.00	1.55
河川水位 (OP+m)	3.2	3.3		
立坑底面高 (OP+m)	-37.25	-80.00 (概略値)		
落差(m)	40.5	83.3	2.06	2.06
立坑減勢池(m)	8	16		

H4 既往実験の結果を踏まえ、千鳥階段型の落差高が約 70mになっても減勢効果は変わらないと期待できるため、今回はドロップシャフト型に

特化した。また、空気混入濃度はフルード相似則に従わないため、既往実験の結果を目標値とした。

(3) レイアウト

ドロップシャフト型の減勢立坑を採用する場合、シールド発進立坑と減勢立坑は施工時期が異なることや別構造とした方が経済的に有利であることから、図-4.2 に示すレイアウトとした。



図-4.2 ドロップシャフト型減勢立坑の場合のレイアウト

表-4.2 模型再現諸元 (スケール; s=1/20)

諸元	実物	模型	備考
		1/20	
流量 Q(m³/sec)	89.0	0.0498	100%
落差 H(m)	81.6	4.08	
ドロップシャフト案 管径 D1(m)	6.00	0.300	流入部
管径 D2(m)	4.20	0.210	狭窄部 (D2/D1=0.7)
管径 D3(m)	16.00	0.800	減勢池部*
地下河川合流後の管径 D4(m)	11.50	0.575	
満管時流速 V (m/sec)	0.86	0.192	
満管時の Re 数	9.85E+06	1.10E+05	≥ 1.0E+04 (乱流)
粗度係数 n	0.015	0.0091	≥ 0.009 (最小値)

フルードの相似則を用い、表-4.2 に示す模型縮尺を 1/20 とした。粗度係数を実物に合わせるとともに、乱流を再現するためにレイノルズ数を 10000 以上とした。表-4.3 に評価項目を示す。

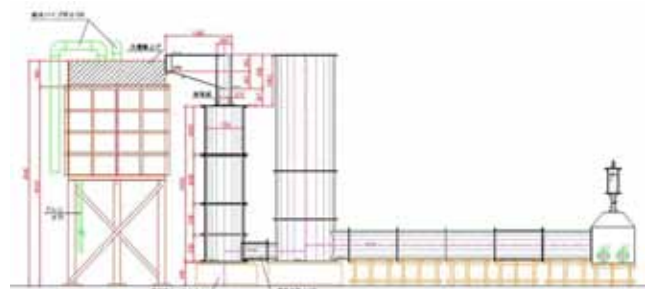


図-4.3 模型再現範囲

写真-4.3 模型製作状況



表-4.3 検討項目と評価

検討項目		評価内容	備考(基準)
LWL	流速	減勢池から本管へ著しく加速していないか。	主に減勢池内
	底面圧力	底面に作用する圧力が過大でないか。またその変動量が比較的小さく、安定しているか。	
	流況	立坑内での流勢が分散しているか。連絡水路への流れがスムーズか。	エアークォアも確認
MWL	空気混入濃度	下流本管へ著しい空気混入がないか。既往実験と同程度※まで低減しているか。	※空気混入濃度 1.5×10 ⁻³ %
HWL	流況	空気吸込み渦等が発生していないか。	
	損失水頭	立坑構造による損失水頭が過大でないか。	本管の流下能力を確認

(4) 流量条件

設計流量となる 100%をはじめ 75%、50%、25%および超過流量となる 130%の 5 ケースとし、減勢効果の評価は 100%流量とした。また 130%流量は完全減勢ではないが、構造破壊を誘発する現象等が発生していないことを確認することとした。

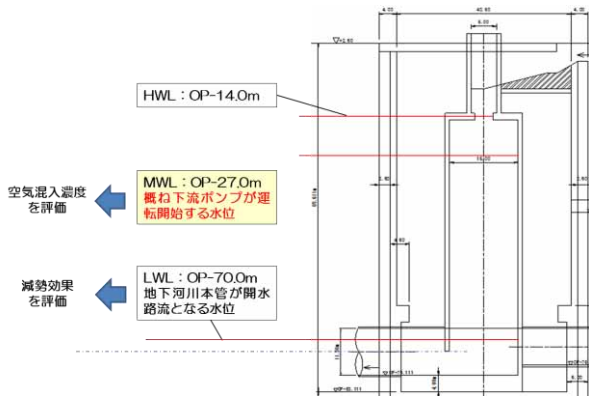


図-4.4 水位条件と評価内容の関係

(5) 水位条件

落差による衝撃が最も大きいと想定される LWL 時に減勢効果の評価し、概ね下流ポンプが運転を開始する MWL 時に空気混入濃度を評価することとした。HWL では 100%流量が立坑に流入できるか(流入部へ背水しないか等)を確認した。

(6) 実験結果

紙面の都合上、すべての実験ケース(表-4.4)について報告はできないが、試行錯誤の結果、原案より立坑の首を長くし、狭窄部の位置を 2.4m 下げた最適案を見出した(図-4.5)。

表-4.4 実験ケース一覧

ケース名	改良箇所					改良内容	評価項目		備考
	流入水路	シャフト部	狭窄部	減勢池	連絡水路		底面圧力	空気濃度	
ドロップシャフト原案						(古川地点の設計形状を踏襲)	○	×	
流入水路改良案①	○					流入水路の絞り幅を絞る 1/30→0.3D (D:立坑径6.0m)	○	×	
流入水路改良案②-1	○					流入水路の勾配を緩くし、立坑部の奥行きを伸ばす(1.0m)	○	×	
流入水路改良案②-2	○					流入水路の勾配を急にし(上流端で+1.0m)、せきあげないようにする	○	×	
立坑改良案①		○				シャフト部の長さを延ばす +12.8m (減勢池長を縮める)	○	×	模型の継手の都合で延長を設定
狭窄部改良案①-1			○			狭窄部の位置、設置数(2つ)を変化させる	○	×	立坑改良(改良案①)後に実施
立坑改良案②			○			シャフト部の長さを延ばす +3.0m 狭窄部位置は 原案+3.0m (減勢池天端から1.2m位置)	○	×	立坑改良案①の結果を踏まえ、必要最小限の延長を設定
狭窄部改良案②-1			○			狭窄部位置変更 原案-3.6m (減勢池天端から0.8m位置)	○	×	立坑改良(改良案②)後に実施
狭窄部改良案②-2			○			狭窄部位置変更 原案-4.2m (減勢池天端から0.2m位置)	○	×	"
狭窄部改良案②-3			○			狭窄部位置変更 原案-2.4m (減勢池天端から1.8m位置)	○	○	"
狭窄部改良案②-4			○			狭窄部位置変更 原案-1.8m (減勢池天端から2.4m位置)	○	×	"

LWL から MWL に遷移する状況を想定し、最適案の空気混入濃度を計測すると、原案に比べて遷移時の低減効果が高い。

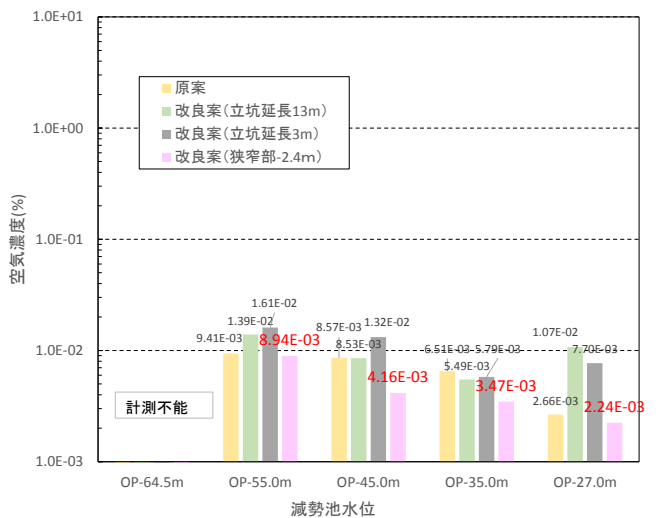


図-4.5 各改良案の空気混入濃度の低減効果

また、最適案に対する図-4.2のレイアウトに示す発進立坑により、およそ2割程度の空気混入濃度の低減効果が見られた(図-4.6)。

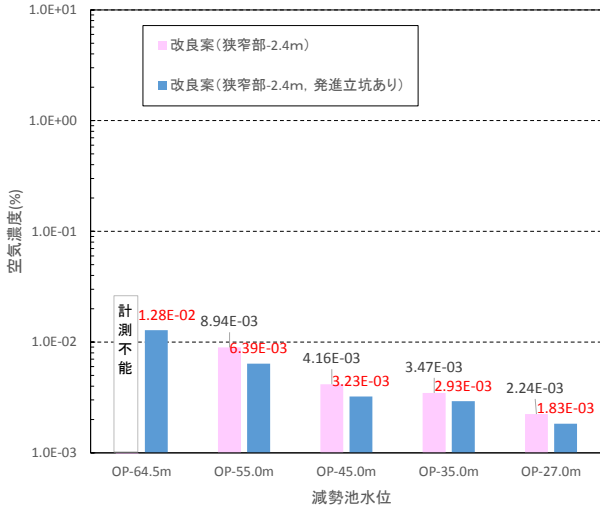


図-4.6 発進立坑による空気混入濃度の低減効果

5. おわりに

古川取水立坑と同形状の原案から狭窄部の位置を2.4m下げた最適案を見出すとともに、発進立坑の空気混入濃度の低減効果により既往の千鳥階段型と同程度にまで低減できるため、城北取水立坑にもドロップシャフト案が採用可能である。なお、取水部の越流構造は別途報告を参考にされたい。

(謝辞)

今回の実験では、大阪府河川構造物等審議会「大深度地下使用検討部会」で審議をするにあたり、京都大学大学院 戸田教授、関西大学環境都市工学部 石垣教授および京都大学防災研究所 川池准教授には、技術指導や実験指導を含め、さまざまなご指導を賜り、厚く御礼を申し上げます。

六甲山系における土石流危険溪流の 土砂流出特性

百瀬 広淳¹

¹近畿地方整備局 国営明石海峡公園事務所工務課

(〒650-0024兵庫県神戸市中央区海岸通29番地神戸地方合同庁舎7階)

砂防堰堤を計画するうえで、土砂・流木整備効果を向上させるため、定期的に除石を行い堰堤の背面に十分な空き容量を確保しておくことが望まれる。除石管理計画に必要な管理頻度を検討するためには、溪流特性を踏まえた土砂の流出状況を把握する必要がある。本論文は、六甲砂防事務所が管理する砂防堰堤において、1992年～2015年の23か年に計測された水通し天端からの空高さにより、背面の堆積土砂量を算出し、その経年変化から流域における土砂の流出特性を評価したものである。532基に及ぶ砂防堰堤と流域に対し、降雨特性、流域面積などとの関係性を取りまとめ、土砂流出特性について考察した。

キーワード 土砂流出, 砂防堰堤, 堆積土砂, 土石流危険溪流, 六甲山系

1. はじめに

六甲山系では、昭和13年阪神大水害以降、直轄で500基以上を超える砂防堰堤が整備(図-1,表-1)され、土石流が発生した際には整備効果を発揮してきている。なお、これらの整備済み砂防堰堤は、不透過型が多数を占めており、堰堤背面には土砂の堆積が進んでいる。

既設砂防堰堤の有効利用として、堰堤背面に堆積した土砂を除石しポケットを確保することで、土石流に対する整備率の向上を図るケースが多数認められる。また、新設堰堤では、定期的な除石により堰堤背面に空間を確保する除石管理型堰堤を計画することが多くなってきている。これらの除石計画を行う上で最も重要な検討事項として、堰堤背面に堆積する上流域からの土砂の流出特性が挙げられるが、詳細に検討された事例は少ない。また、各溪流によって特性が異なり、一様に適用できるものではない。

そこで、このような背景のもと本論文では、六甲山系の23水系における500基以上の既設砂防堰堤に対して、1992(平成4)年から2015(平成27)年まで各年で計測された堰堤背面の空高さを用いて堰堤の堆積土砂量を算出し、その経年変化から流域における土砂の流出特性を評価した結果について報告する。

経年変化は、一定に増加するものばかりではなく、増減を繰り返すなどバラツキが認められるものや、豪雨時等の降雨イベントで土砂の堆積が急激に進んだと考えら

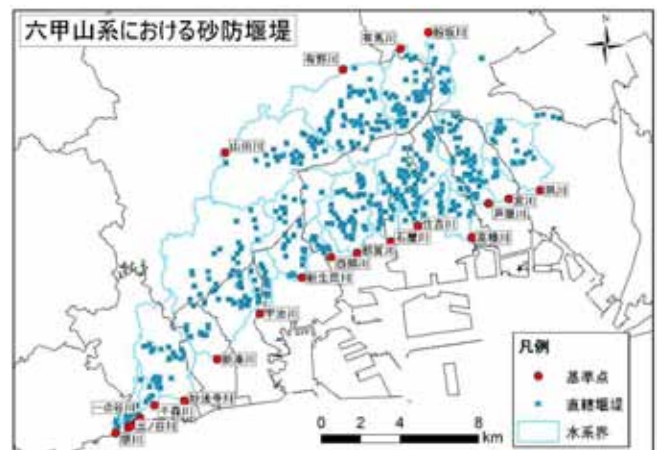


図-1 六甲山系における砂防堰堤位置図

れる特徴が認められた。これらの砂防堰堤の堆積土砂量の変動特性について、検討の方法や結果の概要を取りまとめた。

2. 調査方法

(1) 観測データの利用

1992(平成4)年から2015(平成27)年まで砂防施設の点検時に計測された水通し天端から背面の堆積土砂表面までの空高さ値(図-2)を利用して、堰堤背面に堆積した土砂量を算出した。湛水している堰堤では、湛水位を計測している場合もあるため、評価から除外している。

表-1 六甲山系の堰堤基数 (計測分)

水系名	流域面積 (km ²)	直轄砂防堰堤(基)	水系名	流域面積 (km ²)	直轄砂防堰堤(基)
堺川	0.25	8	石屋川	2.90	16
敦盛塚川	0.04	1	住吉川	11.15	73
三の谷川	0.11	2	天上川	2.60	13
二の谷川	0.25	4	高橋川	2.67	8
一の谷川	0.93	4	芦屋川	8.68	48
千森川	1.38	6	宮川	2.42	5
妙法寺川	10.79	15	夙川	8.07	29
新湊川	29.47	57	山田川	19.96	31
宇治川	3.05	17	有野川	17.35	53
新生田川	11.72	28	有馬川	8.33	45
西郷川	1.48	11	船坂川	3.98	13
都賀川	9.00	47			

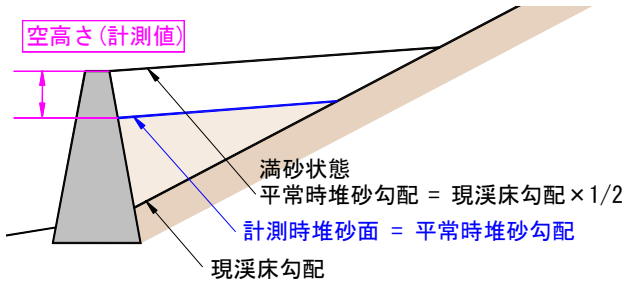


図-2 計測値概念図

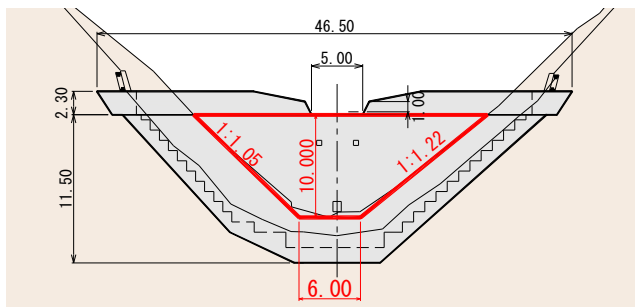


図-3 既設堰堤竣工図の利用例

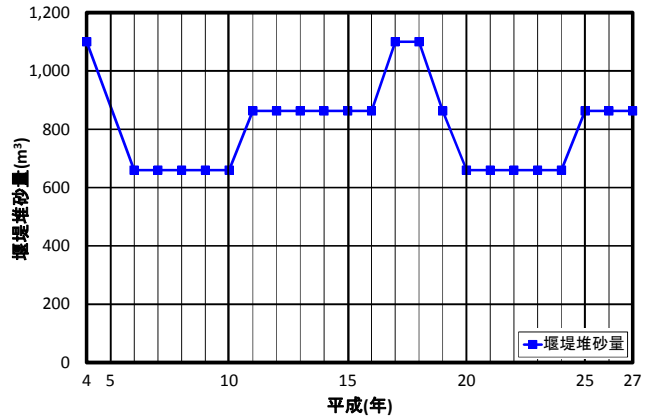


図-4 堰堤堆砂量の経年変化特性①

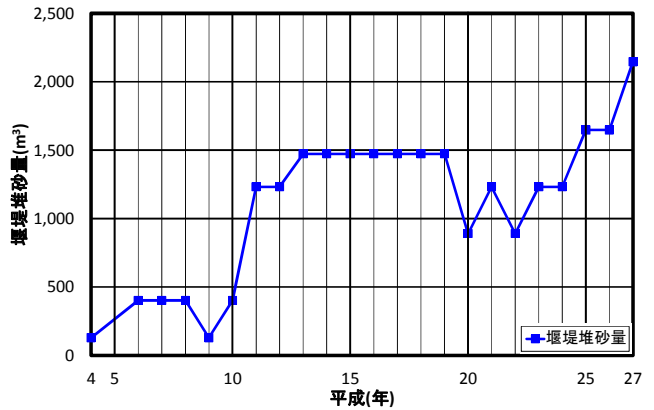


図-5 堰堤堆砂量の経年変化特性②

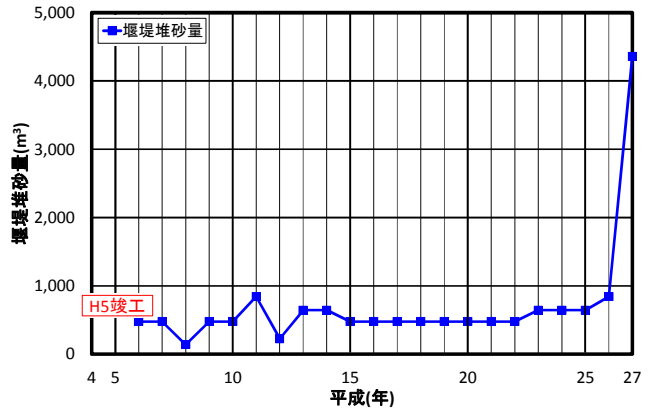


図-6 堰堤堆砂量の経年変化特性③

(2) 堰堤堆積土砂量の算出方法

堰堤背面の堆積土砂量の算出方法として、砂防堰堤の捕捉量を算出する際に利用される簡便式（パラメーター：堰堤背面部の正面積（堰堤竣工図を利用）、堆砂勾配、現溪床勾配）を用いるものとした。堆砂勾配は、平常時堆砂勾配を用いるものとし、現溪床勾配×1/2で設定した。現溪床勾配は、現況では堆積が進んでいるため、既設堰堤の竣工図を参考に堰堤施工前の旧溪床勾配を用いた。（図-2,3）

3. 解析結果

(1) 堰堤堆積土砂の経年変化量の特徴例

a) 土砂量の増減がほとんど無い、もしくはバラツキにより増減を繰り返しているケース①

堰堤背面の空高さの計測値が50cm単位であることや、堆積面も大きな不陸を呈する影響を受けている。図-4のように、増減を繰り返しているケースがあるが、これらは小渓流や谷次数の小さい上流域の堰堤で多くみられ、

土砂の供給量が少ないことと、堆積した少量の細粒土砂が水通しからの越流水や水抜き暗渠からの流水とともに土砂調節¹⁾として流下していることを繰り返して生じているものと考えられる。

b) H7兵庫県南部地震後に土砂の堆積が顕著なケース②

1997（平成9）年～1999（平成11）年にかけて、土砂の堆積量が急激に上昇する現象が認められ、1995（平成7）年兵庫県南部地震による斜面崩壊による土砂流出もしくは不安定化した残積土が、その後の降雨により、下流部に流出した²⁾ものと考えられる。その後は、一定を保っていることから、地震により不安定化した土砂が2～3年かけて豪雨で流出してしまい、残存する不安定土砂がほとんど無くなったものと推定される。（図-5）

c) 豪雨時に急激に土砂堆積が増加するケース③

常時は堆積量の増加傾向が認められないが、2014（平成26）年台風11号などの豪雨イベントで急激に増加した可能性が考えられるケースが認められた（図-6）。高さ10m以上の空容量があった堰堤で、ほぼ満砂状態まで急激に堆積が生じ、約10,000m³の土砂を捕捉した事例も複数認められた。土砂堆積の急増と推定される豪雨イベントでは、その他、2004（平成16）年台風23号、2011（平成23）年台風12号、2015（平成27）年台風11号等である。

(2) 堆積土砂の経年変化量と流域面積との相関検討

図-7に相関図を示す。

流域面積1.0km²以下（約76%）、土砂量300m³/year以下（約90%）に集中していることが確認できた。六甲山系では、急峻な地形を呈しており、狭隘な山間部に土石流危険渓流が多数流下している特徴があり、全体的に流域面積が小さい。また、流路長も短く溪流規模も小さいことから、土砂量そのものも少ない特性によるものと考えられる。全体的にバラツキが生じているが、正の相関関係が認められた。一定の期間の平均を取って経年変化量を算出しており、対数軸での相関性を利用することで、豪雨時での突出した値についても、正の相関性を整理することができた。

(3) 堆積土砂の比経年変化量と流域面積との相関検討

図-8に示す比経年変化量と流域面積との相関性は、やや右肩下がり（負の相関）の傾向にあった。全体として比経年変化量は0～500m³/km²/yearに集中している（約80%）。

4. 砂防堰堤による土砂堆積と設置位置の関係

(1) 土砂堆積の状況と経年変化

前章で示したように、堆砂量の経年変化は砂防堰堤それぞれで独自の変化を示し、複雑なものが多い。

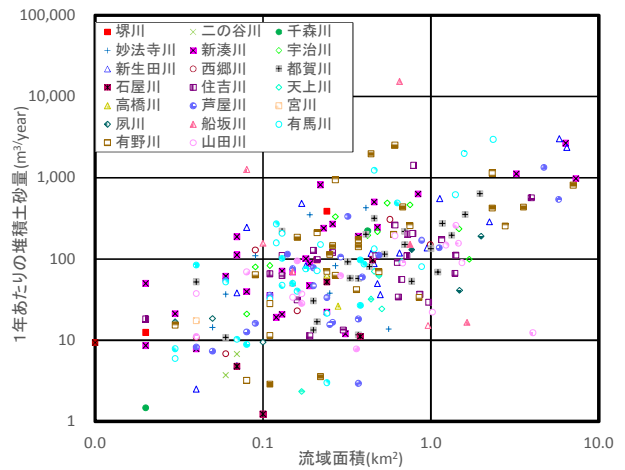


図-7 流域面積と1年あたりの堆砂量

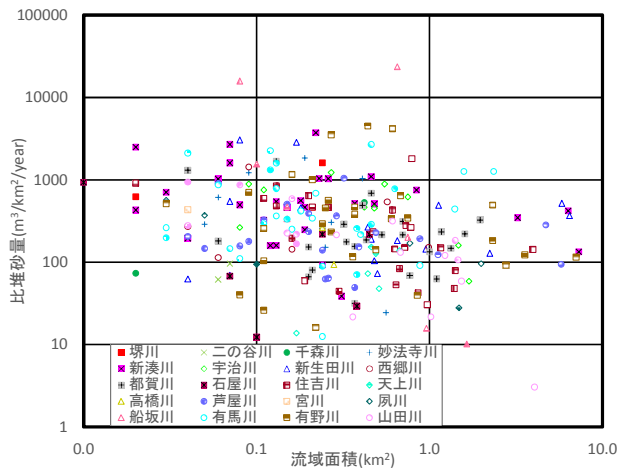


図-8 流域面積と1年あたりの比堆砂量

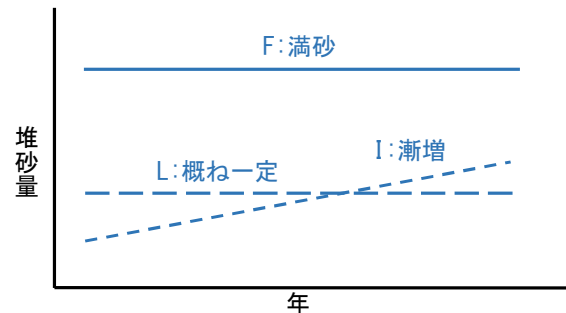


図-9 流域面積と1年あたりの比堆砂量

そこで、六甲山系で流域面積が最も大きい新湊川流域を抽出し、その傾向を把握するために大きく3つのパターンに区分した。図-9は、堆砂量の経年変化を示すパターンを模式的に示したものである。表-2は、これら3つのパターンの概要である。

1つは測定期間を通じて満砂状態のものや、多少の土砂流出により背面に空きが生じたが、満砂傾向にあるものである（記号：F）。また、堆砂の状態あるいは量の変化から堆砂面の上下移動が生じているものが多いが、

表-2 土砂堆積の状況と経年変化のパターン

パターン	砂防堰堤背面の土砂堆積の状況
F(full)	満砂、あるいは多少の変動は認められるが満砂の傾向にある
L(level)	堆砂面の上下移動が認められるが、概ね一定の範囲にあり、未満砂である
I(increase)	堆砂面の上下移動が認められるが、漸増の傾向にあり、未満砂である

測定期間を通じて概ね一定の堆砂量で推移していると考えられるものは、これを記号:Lで表記し、区分した。さらに、Lと同様に堆砂面の上下移動が認められるが、測定期間で堆砂量が増加していると考えられるものを、パターンIに区分した。

図-10はそれぞれの砂防堰堤のパターン区分を流域図に示したものである。表-2に設置場所等の諸元とパターン区分を一覧で示し、流水と湛水池の有無や暗渠工の通水状況を併記した。

(2) 土砂堆積の状況と設置場所などの関係

新湊川流域では砂防堰堤がいずれの場所に設置されているかで、背面の土砂堆積の状況が概ね区分できる。最下流や下流域に設置されているものはパターンFで満砂傾向にある。この傾向は支川でも確認できる。

土石流危険渓流（以下、土危と記載）に設置された砂防堰堤のほとんどは未満砂である。測定期間中に堆砂面の上下移動を生じながらも、概ね一定の堆砂量で推移するパターンLが多い（13/24基）。満砂傾向にあるものもあるが、設-217などは土砂整備率4.2%と施設容量そのものが小さい。

計画流出量100,000m³を超えるものは概ね満砂傾向にある。また、常時の流水が多い場合についても、概ね満砂傾向にある。



図-10 流域における砂防堰堤の堆砂状況

なお、流水があっても未満砂の施設が7基（設備番号-75,102,105,114,144,191,194。以下、設-番号で記載）があるが、これらの内、5基（設-75,102,105,144,191）は暗渠工からの通水量が多い（測定時の写真で判別。以下、同様）。

また、流水があっても貯水池を有し、その規模が大きい場合（設-194）は、パターンLで未満砂である。湛水池を有する設-9,198はパターンFで満砂傾向であるが、近年のデータでは、水通しからの越流によって、洗掘等に

表-3 砂防堰堤の設置場所と土砂堆積の状況一覧

設備番号	竣工年月	流域面積 (km ²)	計画流出土砂量 (m ³)	設置場所 (※1)	背面の土砂堆積の状況	流水 (※2)	湛水池 (※2)	暗渠工の通水量	設備番号	竣工年月	流域面積 (km ²)	計画流出土砂量 (m ³)	設置場所 (※1)	背面の土砂堆積の状況	流水 (※2)	湛水池 (※2)	暗渠工の通水量
65	昭和17年3月	1.41	68,106	最下流	F	○			333	昭和59年5月	0.06		支川・上流域	L			
64	昭和17年4月	13.45	424,478	最下流	F	○			75	昭和17年12月	0.37	26,466	土危	I	○	○	多い
104	昭和25年10月	7.3	226,344	最下流	F	○		多い	207	昭和48年9月	0.08	5,436	土危	L			
9	昭和14年10月	3.54	204,927	最下流	F	○	○		191	昭和46年3月	0.22	14,790	土危	I	○		多い
8	昭和14年10月	8.19	86,251	最下流	F	○			224	昭和50年6月	0.07	5,485	土危	L			
80	昭和19年3月	0.22	17,766	支川・最下流	L				84	昭和26年3月	0.07	5,618	土危	L			
22	昭和14年11月	1.38	66,145	下流域	F	○			370	昭和61年11月	0.13	8,981	土危	L			
56	昭和16年11月	0.14	48,565	下流域	F	○			507	平成13年9月	0.02	1,726	土危	L			
49	昭和16年3月	3.18	167,546	下流域	F	○			184	昭和45年3月	0.02	1,945	土危	I			
108	昭和25年12月	3.16	165,448	下流域	F	○			144	昭和34年7月	0.84	84,835	土危	L	○	○	多い
7	昭和14年10月	7.23	221,696	下流域	F	○			217	昭和49年2月	0.03	2,425	土危	F			
31	昭和16年3月	7.06	208,944	下流域	F	○		多い	198	昭和47年7月	0.46	45,791	土危	F	○	○	
36	昭和15年12月	0.14	11,128	支川・下流域	F	○			361	昭和61年6月	0.04	2,920	土危	L			
74	昭和17年10月	0.28	24,223	支川・下流域	F				261	昭和53年3月	0.19	20,703	土危	L			
55	昭和17年3月	0.19	14,998	支川・下流域	I				519	平成20年7月	0.04	3,574	土危	I			
88	昭和35年3月	7.62	42,338	中流域	F	○			518	平成20年10月	0.11	8,415	土危	I			
105	昭和26年3月	3.23	178,529	中流域	L	○	○	多い	344	昭和60年3月	0.06	4,656	土危	I			
139	昭和30年2月	7.21	5,951	中流域	F	○			114	昭和27年3月	0.26	10,045	土危	L	○	○	
103	昭和26年2月	6.35	146,399	中流域	F	○			115	昭和27年3月	0.23	19,400	土危	L			
102	昭和26年3月	5.42	64,818	中流域	L	○		多い	412	平成4年3月	0.08	7,598	土危	I			
190	昭和46年11月	0.15	12,710	支川・中流域	L				287	昭和55年3月	0.13	11,562	土危	I			
107	昭和26年3月	0.48	38,136	支川・中流域	L				351	昭和60年10月	0.09	8,898	土危	L			
106	昭和26年3月	0.33	16,319	上流	L				194	昭和47年3月	0.88		上流	L	○	○	
179	昭和44年1月	0.18	8,104	支川・上流域	L				394	平成1年3月	0.24	24,551	土危	L			
431	平成6年7月	0.12		支川・上流域	I				520	平成22年4月	0.07	5,515	土危	I			
101	昭和26年3月	0.11		支川・上流域	L				429	平成6年3月	0.31	29,420	土危	L			

※1: 「土危」は土石流危険渓流を示している。 ※2: ○は有を示している。

よる堆砂面の低下と土砂の流出が確認される。

1939 (昭和14) ~1942 (昭和17) 年築造の古い施設は満砂傾向にある。一方、設-55 (1942年竣工) は未満砂で、常時の流水がない。

(3) 堆砂量の変化の傾向

これらのことから、常時の流水が認められる砂防堰堤は満砂傾向にあり、流水があっても満砂傾向にならない要因として、暗渠工からの通水量が多いことと、湛水池の形成が挙げられる。暗渠工には施工時の排水や背面の水圧減少の目的があるが、土砂調整の機能を有することが知られており³⁾、その効果と見られる。また、背面に湛水池を有する砂防堰堤では、洪水により土砂が混入し、水通しから流出している可能性が考えられる。

例えば設-75はすでに築造から60年以上が経過しているが、背面に湛水池を有し、暗渠工からの通水量が多く、未満砂である。

また、常時の流水がない場合、砂防堰堤背面への土砂の堆積は顕著でない。本流域の土石流危険溪流は常時の流水がない場合が多く、平常時の土砂供給は少なく、また、現在のところ、流水があっても満砂傾向にないケースがほとんどである。まとまった土砂の堆積は、台風などの降雨イベントによると推定され、比較的大きな堆砂面の変動が認められるものがいくつかあるが、継続的な観察から、暗渠工レベルで堆砂面が維持されているものがいくつか確認できた。

5. 除石管理型堰堤を計画する場合の留意点

本流域では常時の流水により土砂が運ばれ堆砂が進行する。そのため常時流水がほとんどない土石流危険溪流などでは土砂の堆積が顕著でない。まとまった土砂の流出は台風などのイベント時に限られ、土砂堆積の経年変化は、中期的に、概ね一定の堆砂量で推移する傾向にある砂防堰堤が多い。一方、H7兵庫県南部地震後に、あるいは台風に伴う豪雨によると思われる堆砂面の上下移動が見られるものが複数あり、イベントに応じて、砂防堰堤への堆砂によって下流への土砂の流出が調整された可能性がある。

本流域で除石管理型を採用する場合、常時の流水がなく平常時の土砂供給が少ない土石流危険溪流において有効である。イベントに伴う土砂流出が調整でき、これまでの観測から、中小出水時には暗渠工からの土砂の流下が一定程度期待され、管理頻度は決して高くはないことが推察され得る。

これらの結果を踏まえ、今回、図-11に示す型式「除石管理型+流木捕捉工」の砂防堰堤を計画した。ここでは隣接の既設砂防堰堤の堆砂量の変化から除石頻度を算

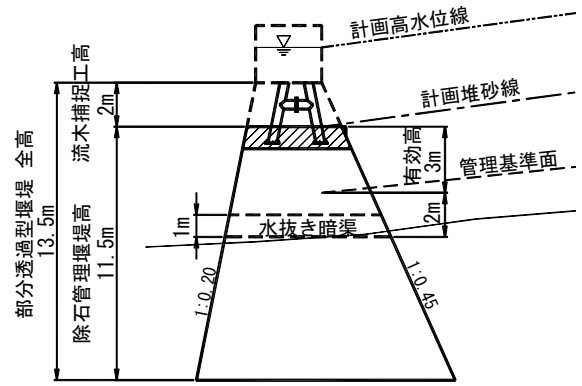


図-11 流域における砂防堰堤の堆砂状況

定したところ、約1回/40年と推定された。近年の土砂流出の傾向⁴⁾や、礫が少なく、巨礫による透過部の閉塞に課題があることから、除石管理型が有効と判断し採用している。

6. おわりに

本論文では、堆積土砂量の解析方法や経年変化の特徴的な例、流域面積と堆積土砂量との相関についての検討結果を示した。

経年変化では、ほとんど堆積土砂量に変化が生じないケースや、豪雨や地震時の影響と考えられる土砂量が急増するケースなどが確認された。堆積土砂量と流域面積の相関は、正の相関が認められた。なお、比堆積土砂量と流域面積の相関は、わずかながらであるが負の相関が認められた。

これらの検討成果を用いて、除石管理計画への適用性を検討した結果、それぞれの相関性を用いて推定した堆積土砂量が概ね同様の値であり、除石管理頻度を検証する一定の目安となりうる事が確認できた。

今後、地形地質特性や降雨量との相関性など、六甲山系における堰堤の堆砂特性を明らかにしていくことにより、より効率的な除石管理計画を策定し得る可能性があり、今後の検証が望まれます。

参考文献

- 1) 建設省河川局 (1997) : 建設省河川砂防技術基準 (案) 解説, 18pp.
- 2) 富田陽子・桜井亘・中庸充 (1996) : 六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 48, No. 6, p.15-21
- 3) 瀬尾克美 (1972) : 砂防ダムの水抜き穴についての一考察, 新砂防, Vol.24, No.4, p.20-22
- 4) 田村圭司・内田太郎・森東哲郎・日野健・小菅尉多・木下篤彦 (2014) : 六甲山系における水文・流砂観測, 砂防学会誌, Vol.66, No.6, p.82-86

城北川から寝屋川北部地下河川へ取水する堰構造に関する水理模型実験について

岡本 歩¹

¹大阪府寝屋川水系改修工営所 工務課 (〒536-0023大阪市城東区東中浜4-6-35)

城北川の計画流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ から約半分に値する流量 $89\text{m}^3/\text{s}$ を地下河川へ取水するという課題に対して、取水形式を越流堰構造とした模型実験を行い、地上河川の水位に応じた取水が可能となる構造諸元（堰高と堰長の適用範囲）が得られたことを報告する。

キーワード 水理模型実験, 越流堰, 越流係数

1. はじめに

寝屋川流域はその大部分が低平地で、流域面積の約3/4は雨水が河川に自然に流れ込まない「内水域」である。また、雨水の出口は寝屋川の京橋口（旧淀川合流点）ただ一か所しかないと、過去からも内水浸水の被害に悩まされてきた。

流域の浸水被害から流域住民の暮らしを守り、安全で快適なまちづくりを行うため、総合治水対策として、通常の河道改修だけではなく、治水緑地や流域調節池等の貯留施設の整備に加えて、道路等の公共施設の地下空間を活用した放流施設である2本の「地下河川」の整備を進めている。そのうち寝屋川北部地下河川では、淀川水系寝屋川ブロック河川整備計画（H27.3）に基づき、30年の整備期間で鶴見立坑から下流の大川（旧淀川）への排水機場までを整備することとしている（図-1.1）。

本内容では、将来的に地上河川である城北川の計画流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ から約半分に値する流量 $89\text{m}^3/\text{s}$ を地下河川へ取水するという課題に対して、取水形式を越流堰構造とした模型実験を行い、地上河川の水位に応じた取水が可能となる構造諸元（堰高と堰長の適用範囲）が得られたことを報告する。

2. 寝屋川北部地下河川の概要

寝屋川北部地下河川は、上流端を寝屋川市、下流端を大阪市都島区とし、全長 14.3km、放流量 $250\text{m}^3/\text{s}$ の地下放水路である。

平成4年度より工事着手し、完成した区間毎に貯

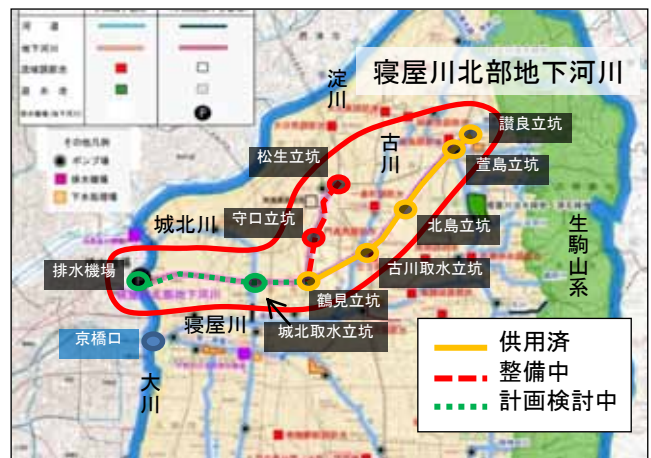


図-1.1 寝屋川北部地下河川位置図

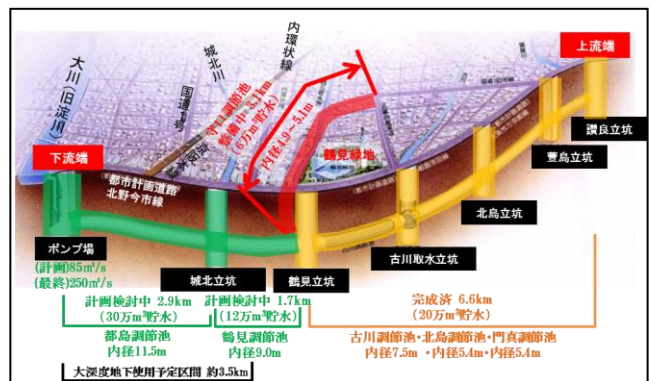


図-2.1 寝屋川北部地下河川の概要

留施設として順次暫定運用している。古川調節池（鶴見立坑～古川取水立坑）、北島調節池（古川取水立坑～北島立坑）および門真調節池（北島立坑～讃良立坑）が供用済みであり、現時点で約 20 万 m³ の雨水が貯留可能である。現在、守口調節池（鶴見立坑～松生立坑）が事業中で、6 万 m³ の貯留容量が追加される予定である（図-2.1）。

3. 既往実験

地上河川である城北川から地下河川へ取水する堰構造については、平成 3～4 年に水理模型実験を実施しているが、事業用地の制約上、サイフォン式の取水構造としたことから、流入堰周辺に渦流が発生する等の課題を残したままであった。その後、事業用地が確保され、比較的広い幅の流入構造も可能となったことから、より合理的な堰の構造諸元を再検討するために水理模型実験を行うこととなった。



図-3.1 城北川から地下河川への取水条件

4. 取水構造の検討

4.1. 水位条件

取水堰の越流水深は、城北川の水位に依存する。城北川の水位は、現在の河川整備計画（期間 30 年）の治水施設等の完成時点の水位として OP+3.66m とし、その時点で未整備の治水施設等が将来的に全て完成した時点の水位においても取水量が確保できるように、将来水位として OP+2.99m とした。

4.2. 構造条件

城北川本川 200 m³/s から地下河川へ 89 m³/s を取水するために、越流堰の門数を最大 9 門（越流幅 5.5m/門）、越流堰高（天端高）、越流頂形状について改良等を行い、計画する取水分流量が得られる構造条件を検討した。ここでは、取水構造の今後の設計に資するため、取水量が確保できる適用範囲（門数と堰高の組合せ）を検討している。実験ケースを表-4.1 に示す。

表-4.1 実験ケース一覧

ケース	流量 取水	流量 本川	構造条件	水位条件
基本案	89 m ³ /s	200 m ³ /s	越流門数：9 門 (1 門越流幅：5.5m) 越流頂高：OP.2.02m 越流頂形状：台形	① op+2.96m ②
改良案			越流門数(幅) 改良 越流天端高 改良 越流頂形状 改良	op+3.66m の 2 条件



写真-4.1 模型製作状況



写真-4.2 通水状況

①河川水位：地下河川完成時（OP+3.66m）

(1) 越流幅、堰高と取水分流量の関係

越流幅、堰高と取水分流量の関係を図-4.1 に示す。地下河川完成時（OP+3.66m）に、堰高 OP+1.80m とした場合は越流幅約 19.3m（3.5 門）、堰高 OP+2.50m とした場合は越流幅約 40m（7.3 門）とすることで計画取水量 89 m³/s が取水可能である。

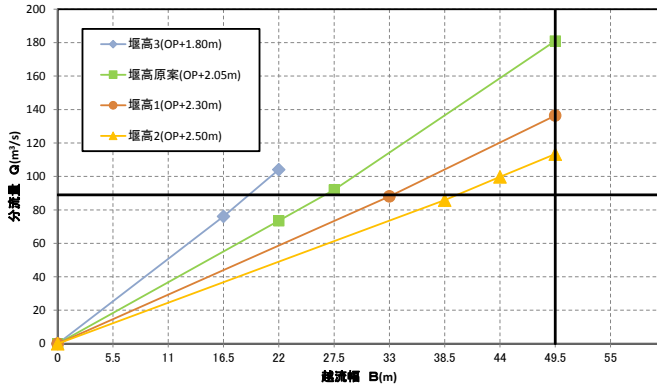


図-4.1 構造条件と取水量の関係（OP+3.66m）

(2) 取水部の流況

越流幅（門数）、堰高の条件の如何に係らず、河川内の取水口周辺の流況は比較的穏やかで、サイフォン式の取水口形式で見られたような渦流の発生等、問題となる流況は見られない。どの条件においても写真-4.2 に示す流況に近い。また、流速分布からも取水部の直上流に位置する橋梁（橋脚）により、若干の流況の乱れが発生するが、取水への顕著な影響は見られない。

②河川水位：将来（op+2.99m）

(1) 越流幅、堰高と取水分流量の関係

越流幅、堰高と取水分流量の関係を図-4.2 に示す。将来（OP+2.99m）にした場合、より取水効率が下がることから取水できる範囲がより限定されるが、堰高 OP+1.80m とした場合には、越流幅 38.5m（7 門）とすることで計画取水量 89 m³/s が取水可能である。

計画取水量を確保できなかった基本案およびその改良案の考察結果は次のとおりである。

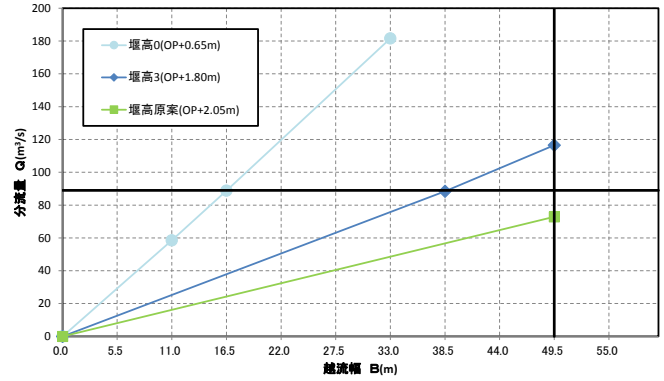


図-4.2 構造条件と取水量の関係（OP+2.99m）

- 基本案（堰高：OP+2.05m、越流門数：9 門、総越流幅：49.5m）の計画流量（河川流量 200m³/s）通水時（河川水位：OP+2.99m）の越流分流量は 72.8m³/s で、計画値より 16.2m³/s 少ない。これは設計値で用いた越流係数（C=1.93～3.04）が大きすぎたことが要因である。
- 改良案（越流幅、堰高を改良）では、地下河川完成時（OP+3.66m）の場合、堰高 OP+1.80m で越流幅約 19.3m（3.5 門）、堰高 OP+2.50m で越流幅約 40m（7.3 門）とすることで計画流量が取水可能となる。
- 将来（OP+2.99m）の場合、堰高 OP+1.80m、越流幅 38.5m（7 門）で計画流量を取水できる。
- 横越流堰の越流係数は C = 1.6 ～ 1.8 程度で概ね一定であり、平均 C=1.71 となった（図-4.3）。
- 越流幅（門数）、堰高の条件に係らず、河川内の取水口周辺の流況は比較的穏やかで、既往実験のサイフォン形式で見られたような渦流の発生となる流況などは見られない。

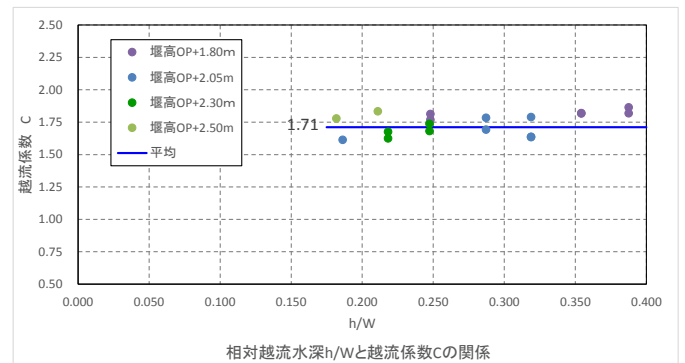


図-4.3 越流係数

(2) 計画取水が確保可能な越流幅と堰高の関係

越流係数を $C=1.71$ (実験平均値) として、計画流量 $89\text{m}^3/\text{s}$ が取水可能となる堰高と越流幅の関係を図-4.4 に示す (図中には設定水位別に表示)。

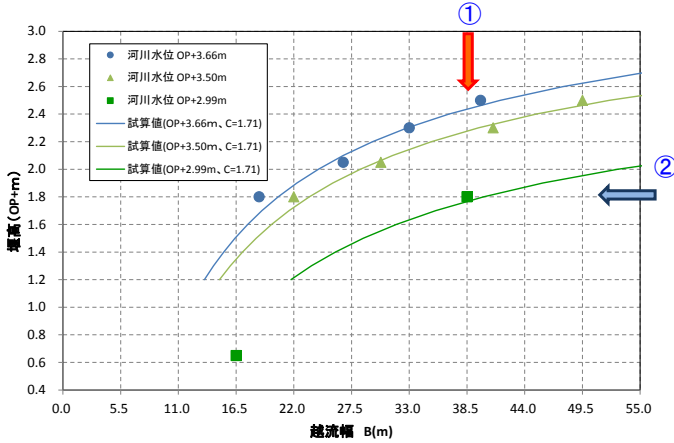


図-4.4 堰高と越流幅の関係

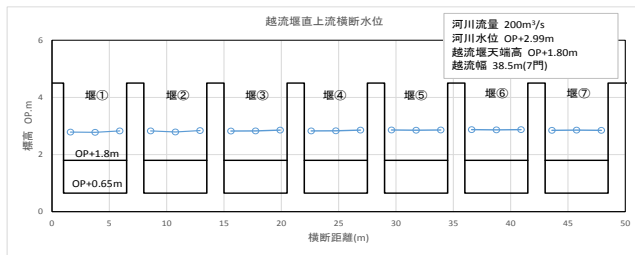


図-4.5 越流水位の事例 (条件は図-4.6 と同じ)

なお、図-4.4 中の試算値の式を以下に示す。

$$d = H - (Q/CB)^{2/3}$$

ここに、 d : 堰高, H : 河川水位, Q : 取水量 ($89\text{m}^3/\text{s}$), C : 越流係数 (1.71), B : 越流幅 (m)

4.3. 堰構造のイメージ

地下河川完成時 (OP+3.66m) から将来 (OP+2.99m) になった場合、堰構造の改良が必要となる。改良を想定した場合の堰構造のイメージは以下のように考えている。

① 堰幅を固定し、堰高で改良する手法

地下河川完成時 (OP+3.66m) に堰幅を 38.5m (7門) とした場合は、堰高 OP+2.5m とし、将来 (OP+2.99m) に、堰高 OP+1.8m に切り下げることで計画流量が取水可能である。

② 堰高を固定し、堰幅で改良する手法

地下河川完成時 (OP+3.66m) に堰高を OP+1.8m とした場合、越流幅 18.7m (3.5門)、将来 (OP+2.99m) 対応時に越流幅 38.5m (7門) に拡幅することで計画流量を取水できる。

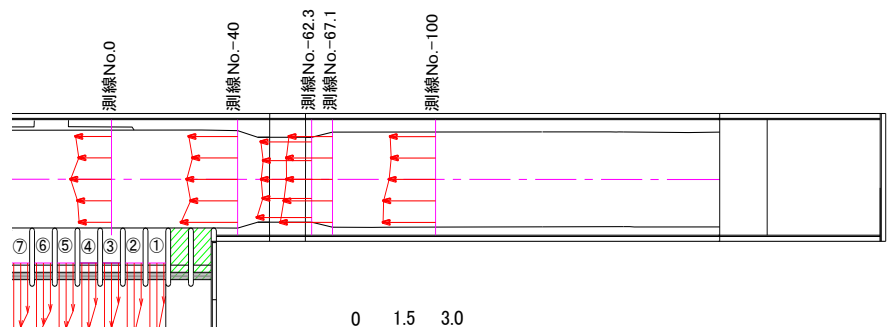


図-4.6 流速分布の事例 (堰高: OP+1.80m, 越流幅: 38.5m (7門), 河川水位: OP+2.99m)

5. おわりに

城北川から地下河川へ安定的に計画分水量を取水できる構造の適用条件（範囲）を見出した。また、地下河川完成時の水位条件で取水堰を整備した場合でも将来の水位に対して取水する構造への改良が可能であることを確認した。なお、この取水量 $89 \text{ m}^3/\text{s}$ が地下河川へ流入する際には、約 80m という高落差となるため減勢施設が必要であるが、その減勢手法については別途報告を参考にされたい。

(謝辞)

今回の実験では、大阪府河川構造物等審議会「大深度地下使用検討部会」で審議をするにあたり、京都大学大学院 戸田教授、関西大学環境都市工学部 石垣教授および京都大学防災研究所 川池准教授には、技術指導や実験指導を含め、さまざまご指導を賜り、厚く御礼を申し上げます。

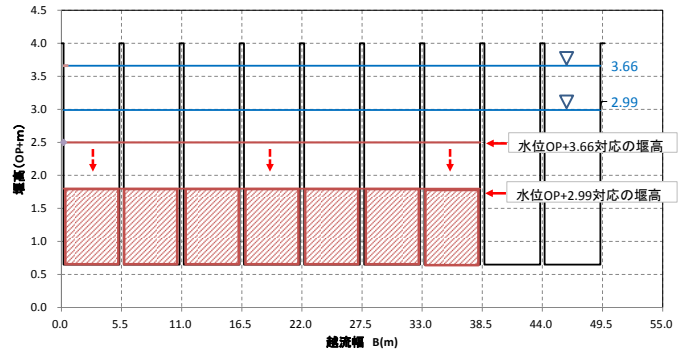


図-4.6 堰幅を固定し、堰高で改良するイメージ

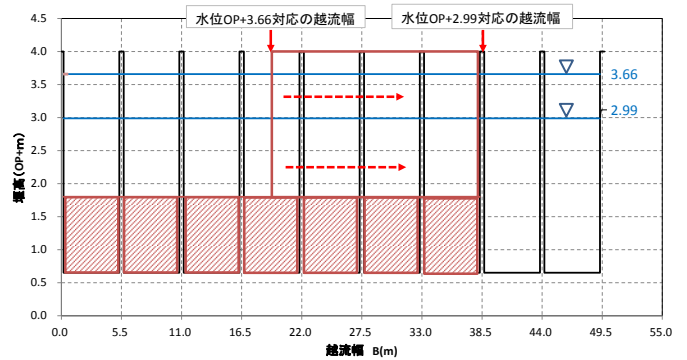


図-4.7 堰高を固定し、堰幅で改良するイメージ

国営飛鳥歴史公園の利用実態を踏まえた 施設改善のあり方について

北野 学¹・塩谷 晋三²

¹国営飛鳥歴史公園事務所 工務第一課 (〒634-0144奈良県高市郡明日香村平田583)

²国営飛鳥歴史公園事務所 工務第一課長 (〒634-0144奈良県高市郡明日香村平田583) .

国営飛鳥歴史公園では年を追って利用者が増加しており、それに伴い利用者へのサービス提供の観点からの課題が浮き彫りになってきた。開園当時に見られた展望台からの眺望が成長した樹木により阻害されたり、樹木の腐朽・病害の進行や、繁茂により広場や園路が日中でも薄暗いなど、利用者へのサービス低下を招くようになっていた。そこで公園利用者が立ち入る範囲の樹木の健全性の診断を行い、危険性のある樹木を把握するとともに、約60年前の甘樫丘展望台からの飛鳥京の眺望の回復や、公園利用の快適性の改善、公園施設の劣化防止等を目的とした樹木の除伐や間伐のあり方の検討を行い、施設の長寿命化など実態に即した予防保全の取り組みとして更新計画をとりまとめた。

キーワード 植物管理、眺望確保、リスクマネジメント、施設の劣化防止

1. はじめに

国営飛鳥歴史公園（以下、本公園）は“日本人の心のふるさと”をテーマとして整備された公園であり、かつて我が国の政治・文化の中心地であった“古都”飛鳥に位置している。祝戸地区、石舞台地区、甘樫丘地区、高松塚周辺地区（概成4地区）に加え、2016年9月24日には新たにキトラ古墳周辺地区が開園したことで、59.9haとなった。

本公園の利用者数は、年間およそ80万人であり、利用者は増加傾向にある。一方で、利用上の課題への対応の重要性も増大している。

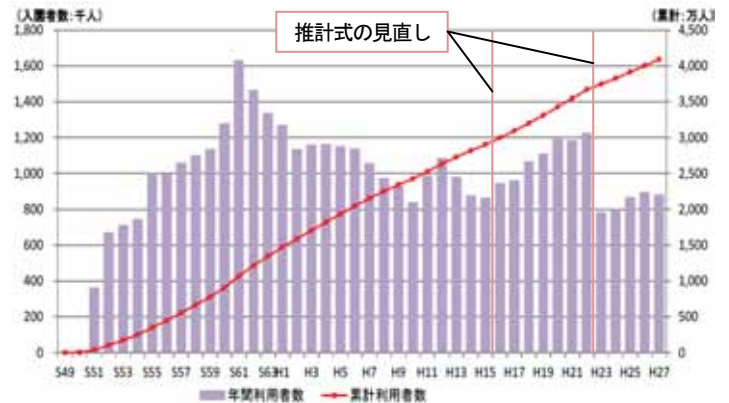


図-1 本公園の年間公園利用者数の推移¹⁾

2. 公園の利用実態と現状の課題

(1) 利用者数の経年変化

図-1は本公園の年間利用者数の推移¹⁾である。本公園では利用者数推計式を用いて各地区および公園全体の利用者数を推計しているが、2004年と2011年に推計式が見直されていることに留意されたい。2011年以降の直近のデータを見ると、年間およそ80万人の利用者があり、緩やかではあるが利用者数は増加傾向にある。

(2) 利用者からの意見

本公園では、毎年四半期ごとに利用実態調査による利用者意見の把握を行っている。表-1は2014～2016年度の利用実態調査結果から本公園の施設、植生に対する代表的な要望意見を抽出したものであるが、展望台の眺望阻害に関する意見や施設の老朽化や破損に関する意見が多くみられた。

表-1 本公園に対する利用者からの主要な要望意見

施設区分	主な内容
園路	<ul style="list-style-type: none"> ・歩道に段差がある ・遊歩道に田地のドロが放置されている ・公園内の舗装された道が所々壊れていて危険である
階段	<ul style="list-style-type: none"> ・階段の段差が不規則である ・階段に水がたまり易い ・階段の補修が必要である
休憩所	<ul style="list-style-type: none"> ・公園内の休憩場所が薄暗い
案内板	<ul style="list-style-type: none"> ・案内板の地図が薄くなっている ・看板の字が薄くなっている
トイレ	<ul style="list-style-type: none"> ・トイレが古い、狭い
その他の施設	<ul style="list-style-type: none"> ・スタンプ台が雨で濡れている ・動物被害がある ・路上の苔で滑って危ない ・側溝上のグレーティングが滑りやすい
樹木区分	主な内容
樹木	<ul style="list-style-type: none"> ・展望台から景色が木で見えにくい ・通路上の落葉の処理が不十分である
植栽	<ul style="list-style-type: none"> ・アジサイ園がイノシシの被害を受けている

(3) 国営飛鳥歴史公園の現状の課題

a) 展望台からの眺望

経年変化に伴い、樹木の成長や腐朽・虫害の発生、公園施設の劣化等が発生しており、サービスの低下や公園利用の安全性の低下要因となっている。

本公園は、飛鳥の歴史的風土の保存・活用と普及啓発の役割を担っている。概成4地区では祝戸地区、甘樫丘地区、高松塚周辺地区に展望台が設けられており、飛鳥の歴史的風土が保存された地区を一望できることを整備目的としている。また、その眺望自体が本公園の資産である。しかし、現在は園内の樹木が大きく成長し、本来の眺望を妨げる状態となっている。図-2は甘樫丘展望台からの眺望を過去と現在で比較したものである。元来の眺望が成長した樹木によって著しく阻害されている様子が分かる。ここで、1975年に策定された甘樫丘地区基本設計計画を見ると、「甘樫丘からの眺望の良さは数多く色々な人達によってほめたたえられてきた。現在は樹木等により一部視野の欠ける場所があるが飛鳥寺を中心とした集落、水田風景等はそのまま歴史のパノラマである。(中略)一方“緑の丘”として、また“見られる甘樫丘”としての役目もある。」と記されている。

甘樫丘展望台の役割は、飛鳥の歴史的風土を先人達が見てきた風景のまま提供することにあると言える。現在はその役割を果たしているとは言い難い。他の展望台においても同様に高木化した樹木による眺望阻害を引き起こしている。元来の展望台の整備目的を踏まえると、眺望資産の回復の必要があると考えられる。

b) 樹木の安全性

自然公園においては、2003年に発生した奥入瀬溪流落枝負傷事故や2007年に発生した尾瀬国立公園内落枝死亡事故のように、落枝による事故が発生した事例がある。

本公園内は、樹木が面積の大半を占めている。その樹木の一部においては老木化や腐朽、病害の進行が見られる。これらは枝の落下や倒木などのリスクの拡大にも繋がっている。

そのため、利用者の安全確保重視の観点から、樹木診断による樹木の健全度の評価の必要性、そしてその対応の緊急度を把握する必要がある。

c) 公園施設の劣化

本公園の施設の多くが樹林中に設置されている。樹木の成長に伴い、園内の日照状態の悪化や、葉から落ちた雨水が乾燥しにくいなど、公園施設周辺環境が変化している。その結果、劣化や腐食が発生しやすくなる等、施設のライフサイクルが短くなっており、維持管理コストも上がっている。

公園施設については、リスク予防およびライフサイクルコストの削減を図る為に、施設補修の対策を講じる必要がある。

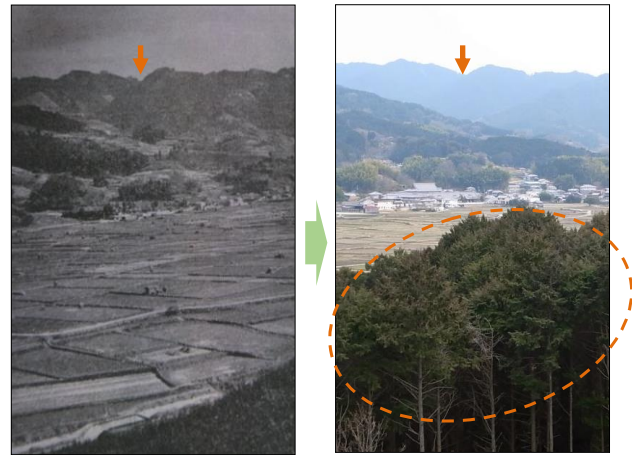


図-2 1955年と現在との甘樫丘展望台からの眺望の比較

3. 公園のサービス向上に向けた施設改善の取り組み

本検討では、特に樹木の多い地区である甘樫丘地区および祝戸地区を対象とした。

(1) 眺望資産の回復

本公園の眺望資産の回復のため、甘樫丘展望台、川原展望台からの眺望改善のための伐木検討を行った。

① 甘樫丘展望台からの眺望改善の検討

眺望改善の検討は、甘樫丘展望台から飛鳥寺方向、石舞台古墳方向の眺望を想定し、そのエリアにかかる樹木について、図-3のような簡易なモデルシミュレーションを行った。モデルシミュレーションは、次のような手順で行った。

- ① 地形の断面図の作成
- ② 樹木の高さを想定
- ③ 眺望阻害要因となる樹林帯の位置の特定

検討の結果、図-4のエリアの樹木が眺望を阻害していることが明らかになった。

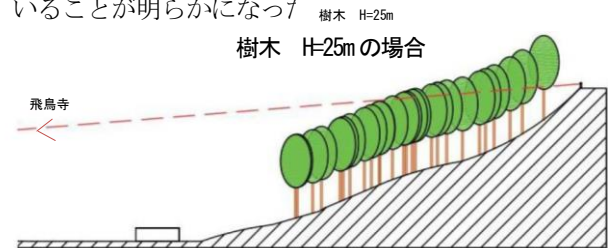


図-3 モデルシミュレーションの一例



図-4 甘樫丘展望台からの眺望を阻害する樹木の範囲

甘樫丘展望台からの眺望を、図-2の1955年と同様に、飛鳥の田園風景を一望できる眺望を長期的に確保するために、眺望を阻害している図-4の範囲の樹木に対して皆伐処理を行うこととした。

②川原展望台からの眺望改善の検討

川原展望台は、元来展望台から確保されていた御破裂山などの眺望が、樹林帯によって阻害されている。また、その樹林帯には園路が設置されているが、高木化した樹木により鬱蒼とした空間となっている。

川原展望台については、遠景となる山の稜線が確認でき、かつ展望台内、園路内の明るさを確保する必要があることから、間伐処理による眺望検討を行った。検討では、断面図によるモデルシミュレーションを行い、さらに間伐率の検討を行った。間伐率の検討は次の手順で行った。

- ①地形の断面図の作成
- ②樹木の立面図の作成
- ③間伐率30～70%のシミュレーション (図-5)

シミュレーションにより、間伐率40%以下の場合、眺望にほとんど変化がないが、50%～70%では樹間から眺望が確保され、60%の間伐率で山の稜線の眺望を確保することができると想定された。さらに、60%の間伐率で鬱蒼とした園路の安全性、快適性の改善や低層植生、林床空間の生育環境改善も十分図ることができると判断された。そのため、川原展望台では眺望を妨げる範囲の樹木を60%間伐することで眺望を確保することとした。

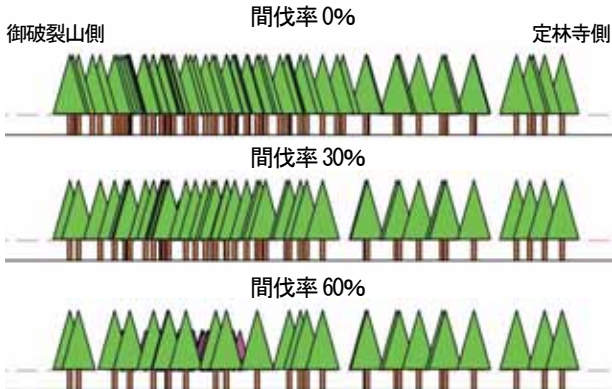
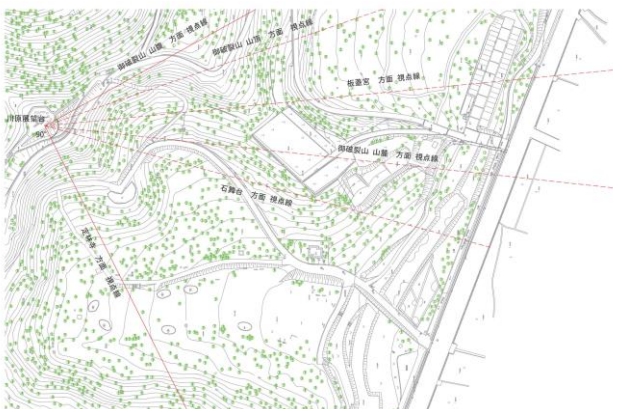


図-5 川原展望台における眺望確保のための間伐率の検討

(2)公園の利用安全性向上のための植生管理

公園利用者の安全性を確保する観点から、樹木の健全度を把握するために、甘樫丘地区および祝戸地区において公園利用者が立ち入ると考えられる園路、広場、休憩所等周辺の樹木を対象に「平成26年度街路樹診断マニュアル(東京都建設局公園緑地部)」の項目に従って簡易診断を行った。簡易診断の結果、355本の樹木を抽出した。

抽出された355本の樹木に対して、表-2のようにA, B, Cの3段階の評価を行った。さらに、危険度の評価を行い、人身事故が発生する可能性のある樹木、樹勢衰退等に繋がる原因を持つ樹木に対して危険度ありと評価した。樹木の異常が目視だけでは判断できない場合は専門診断の必要ありと評価した。これらの評価を踏まえた診断結果を表-3に示す。さらに、これらの樹木の更新を行う場合には優先順位をつける必要があることから、樹木の健全度3段階と危険度2段階での評価フレーム(図-6)を作成し、対象樹木について6段階の優先順位に分類した。

表-2 樹木診断による3段階評価

A(健全か健全に近い)評価
<ul style="list-style-type: none"> ・ほとんど外傷がない樹木 ・先端梢枝が枯死していても落枝事故につながらないと判断した樹木 ※今回隣接のサクラの庇陰になっている健全木の2本を選出
B(ほぼ健全)評価
<ul style="list-style-type: none"> ・樹幹や大枝に強風によりできた亀裂、および同時に樹皮も割れ、その後の肥大生長により広がった樹皮腐朽が周囲長比率 1/3 以下で軽微な被害の樹木 ・開口空洞があるが空洞率が断面積の50%以下で倒木や幹折れ事故につながらないと考え、おおむね3年後再診断を行えばよいと判断した樹木 ・水平枝が分岐点直径の40倍以上ある樹木
C(不健全または不健全に近い)評価
<ul style="list-style-type: none"> ・樹皮腐朽が周囲長比率 1/3 以上の樹木 ・倒木又は幹折れ・枝折れ等開口空洞等で空洞率が断面積の50%以上あり、倒木や幹折れになる危険性が高い樹木 ・今後樹皮腐朽・開口空洞の進行が予想される樹木 ・大枝の枯れがあり、落下するとすぐに事故につながると予想される樹木 ・入り皮、根元貫入異常、打音異常等があり、早急に処置・対策が必要とされる樹木 ・病害の伝播を防止するため伐採又は羅病枝の切除を必要とする樹木 ・樹勢が衰退中で土壌改良など活性化対策が必要な樹木 ・枯死樹木

表-3 樹木診断結果

健全度	危険度	本数	専門診断		
			必要	不要	合計
C	高い	191本	必要 17本	不要 174本	191本
	低い	18本	必要 7本	不要 11本	25本
B	高い	5本	必要 2本	不要 3本	5本
	低い	139本	必要 10本	不要 129本	139本
A	高い	0本	必要 0本	不要 0本	0本
	低い	2本	必要 0本	不要 2本	2本
合計		355本	36本	319本	355本

優先順位 ①: 高(1~3年以内に施設更新を実施)
 ・危険度が高く、健康状態も悪いので優先順位が高く、1~3年以内に樹木更新を実施する。

優先順位 ②: やや高(3~5年以内に施設更新を実施)
 ・危険度は高いが、健康状態は悪いとは言えないので、経過観察を行い、老朽化の進行が見られる場合は3~5年以内に樹木更新を実施する。

優先順位 ③: 中(劣化等の経過を見て必要に応じ、5~7年以内に施設更新を実施)
 ・危険度は低いが、健康状態が悪いので、5~7年以内に樹木更新を実施する。

優先順位 ④: 低(劣化等の経過を見て必要に応じ、7~10年以内に施設更新を実施)
 ・現地調査時点では健康状態に異常は見られなかったが、今後、老朽化が見込まれる樹木については、経過観察を行い、必要に応じ7~10年以内に樹木更新を実施する。

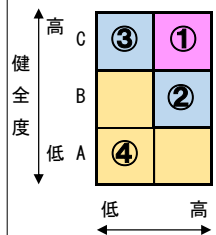


図-6 樹木更新の優先順位の考え方

①に分類される191本の樹木に対しては、さらに優先順位を明確にするために、「1.落枝等で人身事故に繋がる可能性が高い樹木の絞り込み」「2.“1.”の条件に加えて広場や休憩所付近など利用者の滞留時間が長く事故の発生確率が高いと思われる場所を加味して絞り込み」を行い、表-4のようにI～VIの6段階のランク付けと更新計画の優先付けを行い、各樹木において必要な対策を整理した。

表-4 詳細な区分による樹木更新の優先順位付け

ランク	内容	本数	対応年
I	C評価で、危険度が高く、かつ集客率の高い場所(広場、トイレ、ベンチ、展望台等)にかかる樹木(※実施設計対象)	36本	1年以内
II	C評価で、危険度が高い樹木(処置が枝の切除などの樹木、カシナガ被害木伐採)	94本	2年以内
III	C評価で、危険度が高い樹木(伐採処置、その他の樹木)	61本	3年以内
IV	B評価で、危険度が高い樹木	5本	3～5年
V	C評価で、危険度が低い樹木	18本	5～7年
VI	B評価で、危険度が低い樹木 A評価の樹木	139本 2本	7～10年

(3) 公園施設の長寿命化を目指した総合的な取り組み

経年による老朽・損傷・構造上の不具合など、施設利用の安全性確保の観点、管理コストの縮減や施設の長寿命化など管理の効率化の観点から、甘樫丘地区、祝戸地区内で来園者が立ち入る範囲において現地調査による点検を行い、園路、ベンチ、サイン等の公園施設で経年劣化が見られる施設・舗装や、施設利用の安全面から改善が必要なもの、周辺の歴史的風土との調和を図る上で景観上望ましくないものを抽出した。抽出の結果、甘樫丘地区では70箇所、祝戸地区では33箇所の問題箇所が確認された。表-5にそれらの主な問題点とその問題の原因と考えられる事柄を示す。

表-5 主な問題点とその劣化要因

種別	問題点	劣化要因
柵	・杭木の地際(根元)が劣化	・地際は、土の湿気を吸いやすく劣化が進行しやすい。 ・地形から、地際の排水が悪いところは劣化が早い。 ・風雨にさらされているため、木部の割れが生じる。 ・樹木に覆われているなど、乾燥しにくい場所では、より劣化が進行しやすい。
	・杭木の全体に割れ	・歩行による摩擦により、中央部分で割れが生じる。 ・階段両サイドの土や草等が水を含み、乾燥しない状態が続くことで木材の腐朽がおこる。 ・杭木が雨で濡れて、腐朽・割れをおこし、ボルトが露出する。 ・樹木に覆われているなど、乾燥しにくい場所では、より劣化が進行しやすい。
階段	・横木の割れ(中央)	・丸太の両サイドにとめ(緑石)がない場合、降雨で土が流れる。 ・舗装部に傾斜をつけている場合、傾斜がなくなり、土が流れたように丸太横木の下部が露出してくる。
	・横木の割れ(端部) ・杭木の割れ、ボルト露出 ・舗装部・土の流れ	・地際は、土の湿気を吸いやすく劣化が進行しやすい。 ・表面が摩擦して、割れたところに雨で濡れて、腐朽がおこる。 ・特に、樹木におおわれているなど、風通しが悪く、乾燥しにくいと、菌により腐朽し、変色する。 ・利用がされていなくても、黒っぽく汚れやすい。
ベンチ・緑台	・脚部の地際が劣化(割れ・腐朽)	・地際は、土の湿気を吸いやすく劣化が進行しやすい。 ・表面が摩擦して、割れたところに雨で濡れて、腐朽がおこる。 ・特に、樹木におおわれているなど、風通しが悪く、乾燥しにくいと、菌により腐朽し、変色する。 ・利用がされていなくても、黒っぽく汚れやすい。
	・座面の割れ・腐朽 ・全体的な変色(黒)	・縦断勾配があり、表層が流れやすい。 ・水たまりや摩擦しやすい箇所では表層ははがれる。 ・摩擦によりひび割れが生じる。 ・表層近くに、樹木の根が張り、ひび割れが生じる。
舗装	・土系舗装の表層剥がれ、陥没 ・自然色As舗装・コンクリート舗装のひび割れ	・縦断勾配があり、表層が流れやすい。 ・水たまりや摩擦しやすい箇所では表層ははがれる。 ・摩擦によりひび割れが生じる。 ・表層近くに、樹木の根が張り、ひび割れが生じる。

現地調査により把握された公園施設の問題点について、利用の安全性確保の観点に留意した上で利用度3段階および劣化度3段階の評価から更新の優先順位付けを行った。

利用度については、甘樫丘地区と祝戸地区のそれぞれで3段階の利用頻度を設定した。なお、利用頻度の決定については、地区内の箇所別の利用頻度に関する定量的なデータは存在しない為、利用者が目的地へ移動する際に使用するルートを想定することで利用頻度を設定した。劣化度については、各施設に3段階の基準を設定した(表-6)。

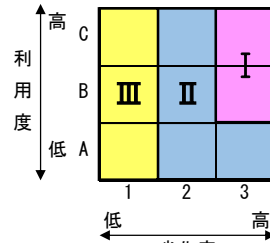


図-7 施設更新の優先順位の考え方

表-6 設定した施設毎の劣化度

施設分類	劣化度判定
木製階段	●劣化度：高(区分3) ・木製階段のうち、ボルトが露出している、踏み面の劣化の進行が大きく、歩行時につまずきや破損のおそれがある箇所を有するもの
	●劣化度：中(区分2) ・区分3に該当する劣化が大きい箇所はないが、階段の木部に割れなどの小さな劣化が確認できる箇所を有する木製階段
	●劣化度：低(区分1) ・区分3、2に該当しないが、経年劣化により劣化することが想定されるため経過観察を要するもの(区分3・2以外の木製階段)
木製柵(支柱)	●劣化度：高(区分3) ・支柱部が劣化によりぐらつきがあり、転落防止の機能に支障がでているもの
	●劣化度：中(区分2) ・区分3に該当するようぐらつきはないが、支柱部の根元に劣化が確認されるなど、劣化が始まっているもの
	●劣化度：低(区分1) ・区分3、2に該当しないが、経年劣化により劣化することが想定されるため経過観察を要するもの(区分3・2以外の木製柵)
ベンチ・緑台	●劣化度：高(区分3) ・劣化が大きいもののうち、座面の木部が劣化しており、ささくれ等が怪我の要因となる可能性があるもの
	●劣化度：中(区分2) ・利用上問題は見られないが脚部が劣化しているもの、座面にささくれ等はないが全体的に老朽化しており景観上望ましくないもの
	●劣化度：低(区分1) ・区分3、2に該当しないが、経年劣化により劣化することが想定されるため経過観察を要するもの(区分3・2以外の木製のベンチ・緑台)
サイン	●劣化度：高(区分3) ・注意喚起など安全性の観点からサインの追加設置を要するもの
	●劣化度：中(区分2) ・不要となったサインなど景観性の観点から撤去を要するもの
	●劣化度：低(区分1) ・サインの倒れや劣化等について、経過観察を要するもの
四阿	●劣化度：高(区分3) ※今回該当なし
	●劣化度：中(区分2) ※今回該当なし
	●劣化度：低(区分1) ・四阿の屋根の金属部分が経年劣化により腐食することが想定されるため経過観察を要するもの
舗装	●劣化度：高(区分3) ・舗装の表層が剥離しており、歩行性に支障がありつまずきの要因となるもの
	●劣化度：中(区分2) ・舗装の仕上げが剥離したものや、隣接した樹木(主に竹)の根により表層に割れ等が発生し、対応が必要な箇所
	●劣化度：低(区分1) ・舗装の仕上げが分断されており、景観上望ましくないもの

これらの評価基準により決定した公園施設の更新必要箇所とその優先順位付けの結果を表-7に示す。

更新が必要な施設については補修設計を行った。本公園は飛鳥の歴史的風土の保存を目的としていることから、歴史的景観に調和する材質を使用することとした。さらに、劣化した箇所については、劣化箇所の補修だけでなく、劣化の要因を明確にした上で、その施設周辺の外部環境への対策も同時に講じることにより、施設の長寿命化を図る工夫を行った。また、補修の際には更新箇所周辺についてもまとめて工事を行うことが想定されることから、エリア設定を行うことで、ある程度まとまった形

で発注、施工が可能になるようにした。

この設計方針を踏まえた上で、更新が必要な施設毎に「①間伐や剪定など、施設劣化要因の除去（外部環境対策）」「②部分補修・交換」「③施設更新」「④その他」の4つの対策のうち、必要となる対策を割り当てた。

設計では、各施設の問題に対し、劣化要因、課題、対応方針を検討し（図-8）、課題解決のための設計をすることで、長寿命化、ライフサイクルコストの削減を図った。

表-7 更新必要箇所の数量及び更新の優先順位付け

地区	優先順位	劣化度・利用区分	箇所数							合計
			木製階段	木製柵(支柱)	ベンチ・縁台	四阿	サイン	舗装	その他	
甘樫丘地区	I:1~2年以内に更新	3B・3C	13	2	4	0	0	2	1	22
	II:3~5年以内に更新	3A・2A・2B・2C	11	6	8	1	1	8	0	35
	III:10年以内に経過を見ながら、必要に応じ更新	1A・1B・1C	0	1	0	0	1	2	2	6
	合計		24	9	12	1	2	12	3	63
祝戸地区	I:1~2年以内に更新	3B・3C	5	2	0	0	1	2	0	10
	II:3~5年以内に更新	3A・2A・2B・2C	7	1	2	0	1	4	0	15
	III:10年以内に経過を見ながら、必要に応じ更新	1A・1B・1C	0	0	0	0	1	3	1	5
	合計		12	3	2	0	3	9	1	30



図-8 施設カルテを用いた劣化要因の把握、課題の設定、対応方針の検討

耐用年数を超過した浮体施設の余寿命予測診断

○岩松 裕二¹

¹独立行政法人水資源機構 琵琶湖開発総合管理所 機械課 (〒520-0243 滋賀県大津市堅田 2-1-10)

琵琶湖開発総合管理所（以下「琵琶湖総管」という。）が管理している安曇川沖総合自動観測所（以下「安曇川沖観測所」）は、現在で 25 年が経過した浮体構造物である。メーカー推奨設計耐用年数を超過した状態であることから現状における劣化状況の把握を行う必要があった。

そこで、定量的な劣化状況を把握し、余寿命予測診断を行った。

本論文は、余寿命予測を推定するに至った調査・計測内容およびその結果と診断内容を報告するものである。

キーワード：浮体構造、余寿命予測診断、準拠基準、健全度評価

1. はじめに

琵琶湖総管では、琵琶湖北湖に安曇川沖観測所を琵琶湖南湖に雄琴沖総合自動観測所を設置し、水質、気象および水理データを定期的に自動観測している。

安曇川沖観測所は、1992 年 3 月に設置され 2017 年 3 月現在 25 年が経過している。安曇川沖観測所は、メーカーが推奨している設計耐用年数の 20 年を超過している状態であることから現状における健全度を把握するとともに余寿命予測診断を行うものとした。調査は水中部を含む劣化状況調査を実施し、調査データを分析・評価して、健全度の整理、課題抽出、余寿命予測診断を行った。

本稿は、耐用年数を超過した浮体施設である安曇川沖観測所について報告するものである。

安曇川沖観測所は、図-1 に示すように北湖中央部に位置し、水質自動測定装置、水質採水分析装置、気象観測装置、太陽電池、自家発電設備および無停電電源装置の電源設備を備えた施設となっており、施設の構造は、浮体部、係留索部、シンカー部より構成されている。型式は、一点緊張係留ブイ方式を採用しており水資源機構では唯一の施設となっている。浮体は普通鋼を使用した鋼殻構造で、気密構造による浮力と、浮体下部に設置されたバラスト水とのバランスによって、湖上で自立している。外力による移動防止のためにシンカーを設け、浮体部とシンカー部は係留索で連結された構造となっている。

安曇川沖観測所の諸元を表-1 に示す。

2. 施設概要



名称	安曇川沖総合自動観測所	
完成年月	平成4年3月	
設置場所	琵琶湖北湖(安曇川～彦根中央) 北緯 35° 18' 29" 東経 136° 08' 51"	
型式	1点緊張係留方式鋼製円筒ブイ(材質SS400)	
係留方式	アンカーチェーン(鋼製型枠コンクリート)	
水深	68m(B. S. L. ±0.00m)	
形式	本体	鋼製円筒形
	係留索	アンカーチェーン方式
	シンカー	鋼製型枠コンクリート製
形状寸法	全高	19.5m
	径	φ2.5m×6.0m
塗装仕様	大気部	エポキシ樹脂+ポリウレタン樹脂 設計塗膜厚285μm
	接水部	タールエポキシ樹脂 設計塗膜厚1,000μm

図-1 安曇川沖観測所位置図

表-1 安曇川沖観測所諸元

3. 準拠基準

現地計測調査をするにあたり、健全度評価の基本的な考え方は「機械設備管理指針」(平成28年3月:水資源機構)によるものとした。一方で、上記指針には浮体構造物に対する維持管理方法は明示されていないことから調査にあたっては港湾関係の技術基準である「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」(平成26年8月:財団法人 沿岸技術研究センター)、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」(平成19年10月:財団法人 沿岸技術研究センター)に準拠することとした。

4. 計測項目、計測目的・方法の選定

表-2 計測項目、計測目的・方法

計測項目	計測目的	計測方法
基準線設定	円筒形の施設形状に対して計測場所特定のため、基準線(四方向)設定	-
移動量、沈下量計測	当初設置位置からの移動量、施設全体の沈下状態計測	移動量はGPSによる計測、沈下量は水面位置の計測
水深計測	当該地点の水深を計測し、施設沈下の有無確認	水中探査装置(以下「ROV」という。)の水深計測機能による計測および船舶に設置している水深計での計測
鋼材腐食、亀裂、損傷点検	浮体鋼殻部の表面状況および物理的な劣化状況調査、点検	気中部、水中部共に目視による調査、劣化位置特定は基準線からの位置計測
鋼材肉厚計測	浮体鋼殻部鋼材の肉厚計測を実施し、減肉量、腐食速度の計測、把握	気中部、水中部共に超音波厚さ計による計測
塗膜厚計測	浮体鋼殻部表面保護塗膜の塗膜厚計測	気中部、水中部共に電磁膜厚計による計測
塗装点検	浮体鋼殻部表面保護塗膜の劣化状況調査	気中部、水中部共に目視による調査、劣化位置特定は基準線からの位置計測
ユニバーサルジョイント計測	浮体と係留索との連結部に設けられたユニバーサルジョイント摺動部品の減耗量計測	ノギスや隙間ゲージを使用して計測、環境が水中であり形状が特殊であるため、形状に応じた計測器具の製作

係留索点検	係留索連結部の摺動部の減耗量計測	ノギス状の計測用器具を製作して寸法を写し計測(一定区間のみ計測。それ以外はROVIによる目視確認)
シンカー点検	シンカー一部の腐食や劣化状況把握、ROVIによる目視点検	ROVIによる目視確認
湖底地盤調査	シンカー一部周辺の湖底状況の変状把握、ROVIによる目視点検	ROVIによる目視確認
バラスト水調査	施設を撤去する際に必要なバラスト水水質分析(水質環境基準)	バラスト水の水質分析(健康28項目、生活環境15項目)

5. 計測結果

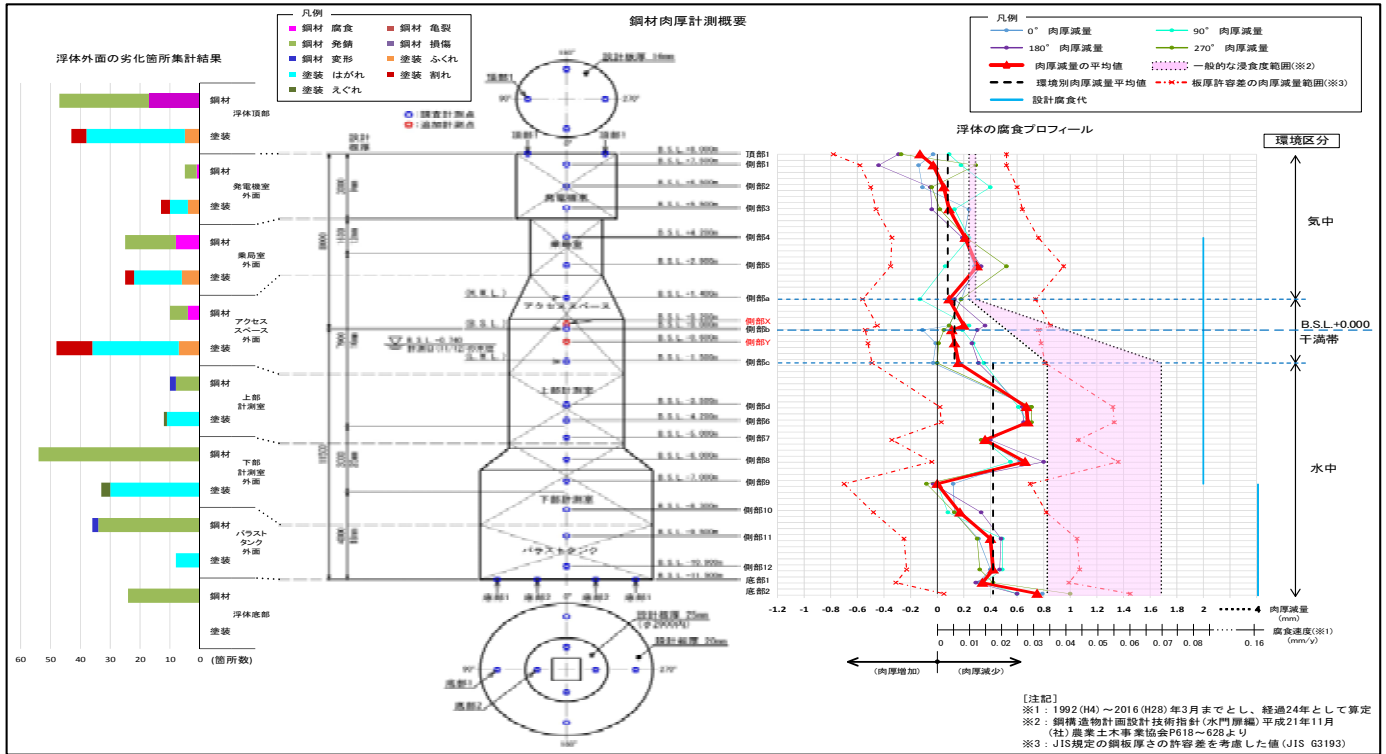


図-2 腐食プロフィール図

計測結果は、技術基準により集計を行った。施設の劣化状況や減肉状況は、図-2に示すように図とグラフにて一元的に表現することで、施設全体の劣化状況を一目で判読できるものとした。

本図では、中央に施設構造を、右に部位毎の減肉量グラフ、左に劣化程度および劣化箇所数をグラフで示している。

計測結果および点検結果を要約すると以下のとおりとなる。

- ① 施設の移動量は、設置当初より北東へ5.3mで浮体揺動の範囲内であることを確認した。浮体部の沈下量は189mmで、設置当時と比較し、浮体内部に設置した電気設備類の重量増によるものと判断され、漏水や損傷による異常な沈下は見られなかった。

- ② 水深は、設置当初よりも0.56m深くなっていた。これは計測を行ったROVIの計測精度が±1.0mであることから計測誤差範囲内であり、設置当時とは差が無いものと判断した。
- ③ 浮体鋼殻部には、亀裂や損傷による顕著な劣化は見られなかった。外面全体の鋼材劣化部面積率(発錆等)は1.7%で問題はないが、「浮体頂部」と「アクセススペース」の部位でみると劣化部面積率がそれぞれ8.79%、6.49%で対策基準である5%を超過しており、補修塗装が必要であると判断した。
- ④ 浮体鋼殻部の肉厚計測結果は、表-3に示す結果となった。「水中部」>「干満帯」>「気中部」の順で肉厚減量が大きくなっているが、いずれも設計腐食代には至っておらず、強度上の問題はないと判

断した。腐食速度(肉厚の年間減量)も一般的な腐食速度は超えておらず、塗膜の防食機能が健全であると判断した。

- ⑤ 係留索部、ユニバーサルジョイント各部の隙間計測結果に異常は見られなかったものの、全体面積に対する劣化部面積率は 4.93%で対策基準の 5%に近接しており、補修塗装の必要があると判断した。
- ⑥ 係留索の計測値に異常は見られなかったが、全面的に塗膜が無くなっており今後は劣化速度が早ま

ること、緊急性は低いものの補修対策の実施が非常に困難な場所であること、施設構造上重要な部品であることから、継続的な定期計測および点検の実施が必要と判断した。

- ⑦ シンカーには顕著な異常は見られず、対策等は不要であると判断した。
- ⑧ バラスト水については、水質環境基準を超過する項目は無く有害性は確認されなかった。

表-3 肉厚計測結果

部位	肉厚減量		腐食速度	
	平均値	設計腐食代	平均値	一般的速度
気中部	-0.08mm	2.0mm	0.003mm/y	0.010~0.012mm/y
干満帯部	-0.13mm	2.0mm	0.005mm/y	0.010~0.070mm/y
水中部	-0.42mm	2.0~4.0mm	0.018mm/y	0.034~0.070mm/y

※ ここで、干満帯とは琵琶湖水位の HWL~LWL 間の部位を示す。

6. 余寿命診断

施設の余寿命診断は、図-3に示すように設置時点からの耐用年数を算定し、今後の余寿命を推算した。耐用年数の推算項目は、これまでの腐食速度が今後も継続するという仮定のもとで、① 設計腐食代に至るまでの余寿命、② 許容応力度に至るまでの余寿命、③ ユニバーサルジョイント部についてはピン部の疲労による余寿命をそれぞれ評価した。

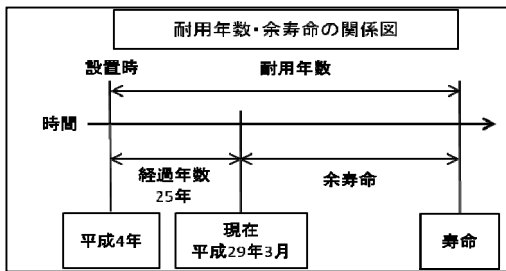


図-3 耐用年数と余寿命との関係

7. まとめ

設計耐用年数を超過した安曇川沖観測所について現状を計測、点検することで劣化状態を把握し、余寿命を推算することで施設を今後も長期間供用できることが判明した。本施設の更新費は、5.5億円程度と試算しており継続供用が可能と判断されたことによりこれらの支出の必要はなくなった。一方で、今回の推算は今後もこれまでと同程度の劣化速度が継続すると仮定した算

定結果である。浮体部や係留索部には既に劣化が散見されており、劣化速度は今後速まるものと予想でき、施設の健全性を維持するためには劣化部の対策が必要であると考えられる。

また、適切な対策や維持管理の継続によって余寿命をさらに長期化、延命化させることが肝要である。加えて、今回行った計測、点検を端緒として今後も継続的にデータを蓄積することで劣化進行の把握や定量的でより正確な余寿命の算定が期待できる。

表-4 余寿命の推算結果

項目	部位	余寿命(年)
① 設計腐食代	浮体本体部	89
	アクセススペース / 上部計測室	89
	下部計測室	89
② 許容応力	ユニバーサルジョイント部	85
	軸受	85
③ 疲労	係留索部	335
	浮体本体部	204
	浮体底部	204 (最小板厚までの年数)
② 許容応力	ユニバーサルジョイント部	71
	ピン支持部	71
③ 疲労	係留索部	260
	ユニバーサルジョイント部	201
③ 疲労	No.1ピン	201

定結果である。浮体部や係留索部には既に劣化が散見されており、劣化速度は今後速まるものと予想でき、施設の健全性を維持するためには劣化部の対策が必要であると考えられる。

また、適切な対策や維持管理の継続によって余寿命をさらに長期化、延命化させることが肝要である。

加えて、今回行った計測、点検を端緒として今後も継続的にデータを蓄積することで劣化進行の把握や定量的でより正確な余寿命の算定が期待できる。