

高層建築物における中間期での換気システムについて

北野 規城

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)

高層建築物においては、物の落下防止、人の転落防止などの理由により、通常は窓を開けることが出来ないような設計となっている。このような高層建築物において、冷暖房シーズン以外の中間期の換気方法としては、冷暖房に使用している空調機器を換気モードにより運転を行い対応しているのが一般的であるため、エネルギーを消費することになる。今回、空調機器を運転せずに外部の風力による自然換気システムを採用した庁舎で、同システムの運用実態を調査、検証したので報告する。

キーワード 高層建築物、自然換気システム、エコボイド、中間期

1. はじめに

市街地の高層建築物において、省エネルギーの手法で自然換気システムを採用する事例がみられるが、シャフトや窓に接する室のみを対象としたものが多い。今回、大阪府堺市に完成した庁舎も、自然換気システムを採用しているが、本庁舎では外部に面していない無窓の室も自然に換気が出来るように、空調用ダクトを利用した自然換気システム（以下、エコボイドシステム）を採用して、2013年より運用を開始している。

本稿ではエコボイドシステムの概要と本庁舎での運用実態により確認出来たシステムの有効性について報告するとともに、得られた結果を整理することにより、類似建物に同様のシステムを導入する場合の指標になればと考えている。

2. 建物概要

エコボイドシステムを採用した庁舎の建物概要を以下に示す。

<建物概要>

- 用途：事務所
- 所在：大阪府堺市
- 敷地面積：約 6,135 m²
- 延床面積：約 22,900 m²
- 階数：地下 2 階，地上 14 階，塔屋 2 階
- 建物高さ：69 m
- 竣工：2013年10月



図-1 外観写真

3. エコボイドシステム概要

(1) システムの特徴

本庁舎が立地する地域で年間を通して最も頻度が多い風向きは西風であり、建物西面には風による正の風圧力が、建物上面には風が通過することによる負の風圧力が働く。一方、室内では事務機器や人員による熱が発生し、建物内外で温度差が発生する。エコボイドシステムとは、この風圧力と温度差を利用した自然換気システムのことである。

建物の外壁面四隅に、地域の特産品である刃物をイメージした建築意匠としての斜め壁があり、その内側を空気が流れる空間とし、それをエコボイドと称した。西側のエコボイドを給気用、東側のエコボイドを排気用とし、西側から取り込んだ外気が空調用ダクトにより室内へ供

給され、その後、東側に抜けるようになっている。(図-2) 敷地は幹線道路に近いので、西側エコボイドは排ガス汚染空気を取り込まないように4階以下の低層部分には開口を設けず、5階以上に給気口を設置して西風により発生する正の風圧を利用して空気を取り込んでいる。東側エコボイドは各階に排気口を設けているが、エコボイド側面には開口を設けず閉鎖した空間として屋上まで立ち上げ、屋上でのみ開放して屋上水平面に発生する負の風圧力を利用した誘引により排気している。また、各階で発生する熱を排気しているため、温度上昇によりエコボイド内に発生する上昇気流(煙突効果)も利用している。

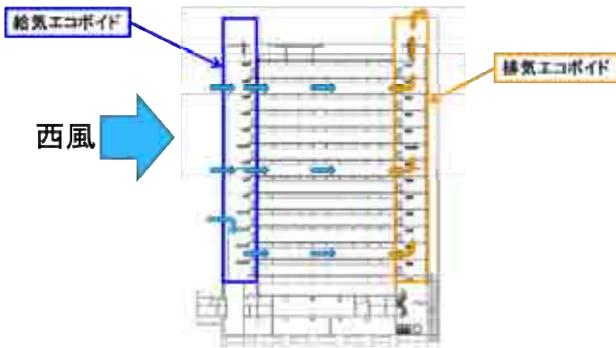


図-2 空気の流れのイメージ

(2) エコボイドの形状の検討

給気側エコボイドの形状について、コンピューターによる気流解析を行い、西風を有効に取り込むことが出来るようなエコボイドの形状を検討した。計算モデル及び計算パターンを図-4に示す。

建物南側外壁からエコボイドパネル端部までの距離(開口幅)を『開き』と称し70cm, 90cmの2パターンとし、エコボイドパネル端部の西側外壁面からの距離を『離れ』と称し、西壁面を0として外壁より西側に突き出る場合をマイナス、引っ込める場合をプラスとし、-20cm, 0cm, 20cmの3パターンとし、建築意匠性を損なわないような計6パターンでの検討を行った。(図-5)

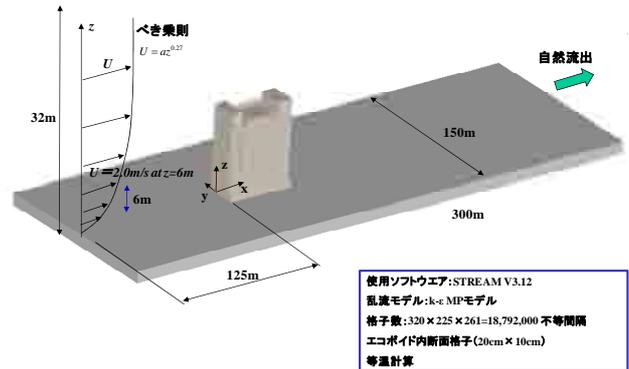


図-4 気流解析計算モデル

室内における自然通風経路としては、通常の空調に使用する空調用ダクト、パスダクト、及び換気用排気ダクトを経由するようにしているため、自然換気システム専用のダクト経路を設置していない。(図-3)

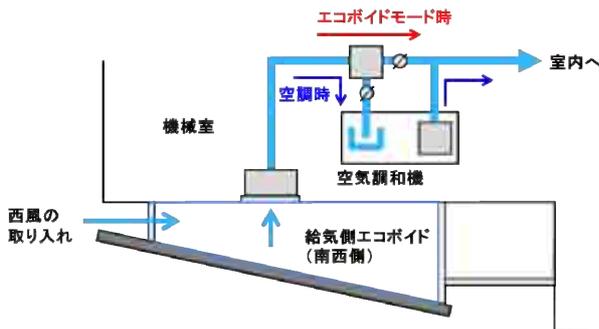


図-3 エコボイド、空調機廻りイメージ

本エコボイドシステムの効果、及び利点としては、換気モードで空調機器を使用しない事によるエネルギーの削減に加えて、以下の2点が考えられる。

- ・空調用ダクトを使用する事で、外部に面していない無窓の室に対しても、自然換気が可能となる
- ・空調機器を使用せずに室内を外気により冷やす効果(外気冷房システム)がある

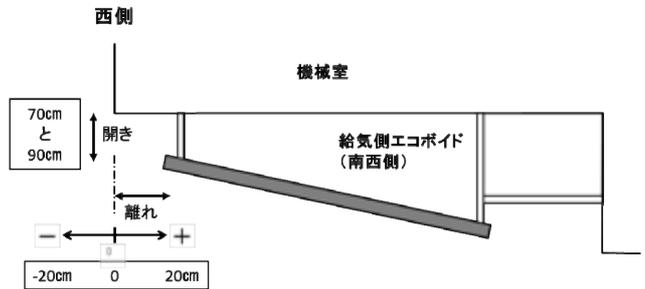


図-5 エコボイド形状検討パターン

気流解析により得られる給気側エコボイドと排気側エコボイド間の差圧を図-6に示す。

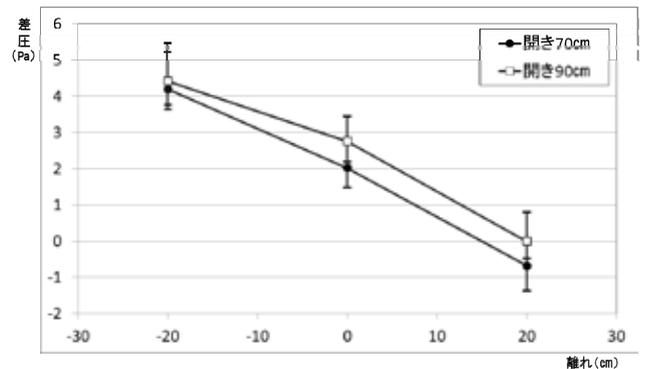


図-6 エコボイド形状検討の解析結果

図-6より、西側からの『離れ』がマイナスになれば（外壁よりも西側に突き出る）、南壁からの『開き』の2パターンでの差圧の違いはほとんどなく、また、『開き』よりも『離れ』の寸法を変える方が差圧に与える影響は大きくなった。エコボイド間の差圧が大きくなればなるほど、取り込める風の量が多くなるため、給気側のエコボイドの形状は西壁からの『離れ』を-20cm（西壁から20cm西側へ突き出す）とした。また、南壁からの『開き』については、『離れ』を-20cmに決定したことで大きな差がなくなったこともあり、建築の意匠性を損なわないように70cmに決定した。

4. 運用実態調査と結果

(1) 測定方法概要

a) 測定期間

- ・2013年秋季：2013年10月26日
- ・2014年春季：2014年 4月 8日～ 4月10日
- ・2014年秋季：2014年11月 5日～11月13日

b) 測定対象フロア，測定位置（図-7）

3階，8階，13階

c) 計測項目

<中央監視計測ポイント>

- ・外部風速，外部風向，外気温度，外気湿度
- ・室内温度，室内湿度
- ・給気エコボイド-室内間差圧，排気エコボイド内-室内間差圧

<手動計測ポイント>

- ・OAダクト内風速（期間中に風速計を臨時設置）

d) 計測時間間隔

- ・2013年秋季：中央監視-1分計測による10分平均
：手動計測-10分瞬時値
- ・2014年春季：中央監視-1分計測による30分平均
：手動計測-30分瞬時値
- ・2014年秋季：中央監視-1分計測による15分平均
：手動計測-15分瞬時値

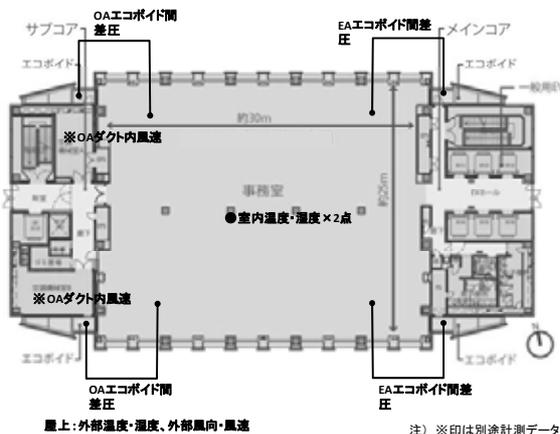


図-7 計測位置

(2) 測定結果

a) 外部風速，風向について

風速の検証については、風速により取り込める風量に変動があると考えられるため暫定的に1m/s以下，1m/s～4m/s，4m/s以上の3つの区分に分けて整理を行った。

風向の検証については、西風とそれ以外に分けて整理を行った。なお、西風については、図-8のように西南西と南西の間(236°)から西北西と北西の間(304°)を西風と定義した。

この地域のアメダス気象データの標準年気象データを用いて頻度が多い風向を算出したところ、西北西から西南西までの間に風が多い事と、給気のエコボイドは北西角と南西角にあり、形状の検討により決定した通り西壁より20cm突き出ているため、真西から南北方向に範囲が広がりすぎると、両方のエコボイドで有効に外気を取り込めないと考えられるため、自然換気に有効な風向を図-8のように定義してデータの整理を行った。

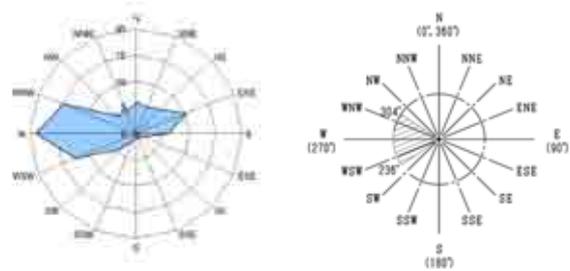


図-8 アメダスデータによる風向分析

各測定期間における測定結果を風速毎の構成比としてグラフにしたものを図-9に示す。

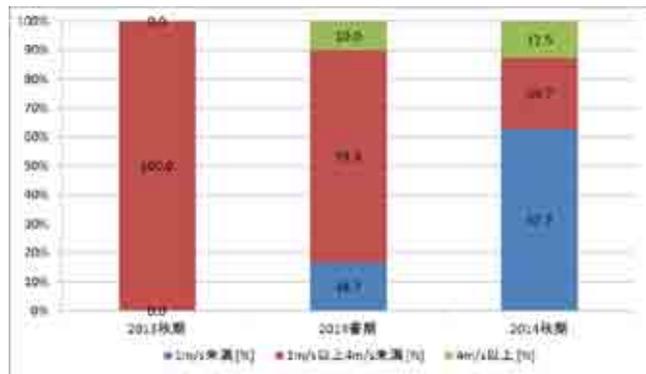


図-9 外部風速

2014年春季は、1m/s～4m/sの風速の割合が全体の約73%で、4m/s以上の場合には10%であり、全体的に風速が速い割合が多かった。2014年秋季は、1m/s未満の風速の割合が全体の約63%で、春期よりも穏やかな風の割合が多い結果であった。

次に、各測定期間における測定結果を風向毎の構成比としてグラフにしたものを図-10に示す。

2013年も2014年も秋期については、西風の割合は少なかった。しかし、2014年春については60%であり、西風の割合が多かった。

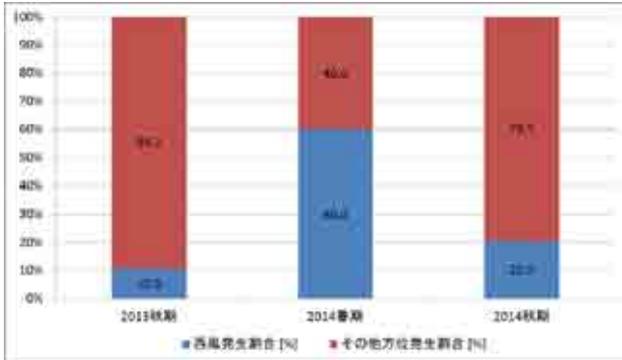


図-10 外部風向

各計測期間の風速毎における風向毎の構成比としてグラフにしたものを図-11に示す。

風速と風向の関係としては、2013年秋期は風速にあまりばらつきがなく1m/sから4m/sの範囲で、西風は約11%と割合としては少ない結果であった。2014年春期は、1m/sから4m/sの西風の割合が約66%で、4m/s以上の場合は100%西風で、西風の頻度は多く風速が速い傾向にあった。2014年秋期は、一番割合が多かった風速は1m/s未満だったが、その時の西風以外の場合は約93%であった。1m/sから4m/sの場合も西風の割合は約28%と少なかった、しかし、4m/s以上に絞ると西風の割合は約76%と多く、秋期の西風は頻度は少ないが、西風の時は風速が速かった。

以上より、秋期よりも春期の方が西風の頻度も多く、風速も速い割合が多いため、エコボイドシステムとしては、より有効に働いていたのではないかと考えられる。

なお、計測期間における同市の気象庁データを確認したところ、風向、風速共に今回計測した結果と同じような傾向の結果となっていたことが確認出来た。

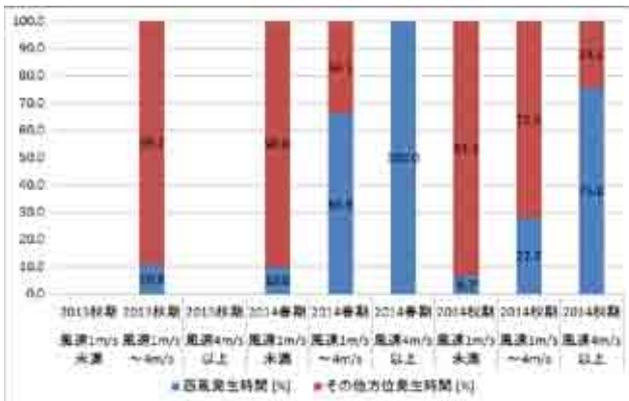


図-11 風速と風向の関係

b) ダクト内風量について

各階のダクト内風量について、風速や風向との関係について検証を行った。ダクト内風速の測定結果にダクト面積を乗じ各ダクト内の風量を算出した。各測定期間において、外部の風速と各ダクト内風量の関係を示したグラフが図-12になる。また、風向とダクト内風量の関係を示したグラフが図-13になる。

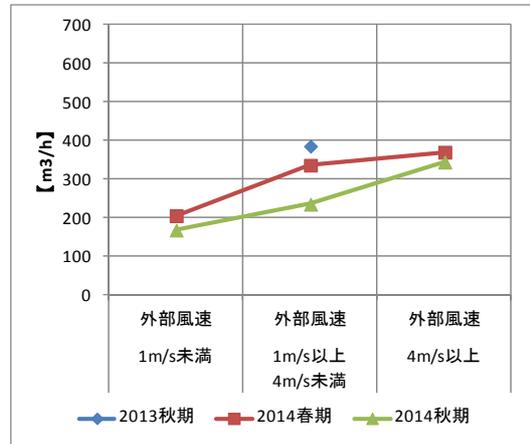


図-12 風速毎のダクト内風量

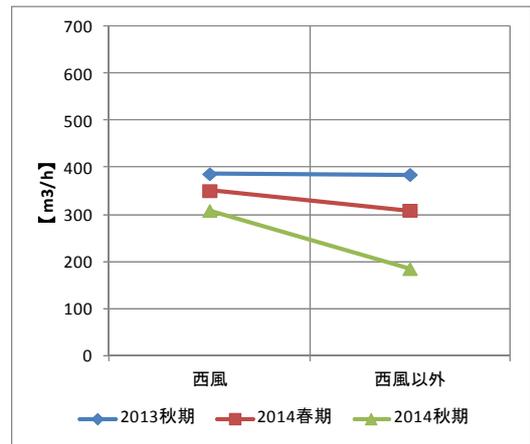


図-13 風向毎のダクト内風量

外部の風速の増加に伴い、取り込めるダクト内風量が増加する傾向となった。この時のダクト内風量は、空調時の風量と比較すると、外部風速が4m/s以上の場合で約10%であった。

また、風向との関係について、風向が西風の場合は、西風以外の時と比較すると、ダクト内風量は大きくなる傾向がみられた。空調時の風量に対する割合は、風向が西風の場合で約10%であった。

以上より、風速、風向による変動はあるが、ほぼ想定通りに風を取り込めている事が確認出来た。

c) 換気量について

ダクト内風量の検証で、風速や風向によって取り込め

る風量の割合に変動があることは確認出来たので、次に取り込めている風量がどの程度であるかについて検証を行った。

建築基準法では、シックハウス対策として建材等から発散されるホルムアルデヒドを排出するため、換気設備の設置が義務づけられている。本庁舎のような空調方式の場合は、以下の式によって算出した数値以上の有効換気量を確保しなければならないことになっている。

$$V = 10 (E + 0.02 nA)$$

V：有効換気量

E：内装仕上げのホルムアルデヒドの発散量

n：住宅等の居室の場合は3，その他の居室の場合は1

A：居室の床面積

表-14に計算結果と測定したダクト内風量を示す。外部風向が西風の場合、又は外部風速が4m/sの場合にシックハウス対策として必要となる換気量を上回っている結果が得られた。なお、この有効な換気量が確保出来た場合の割合としては、前述の風速と風向の検証から全測定期間に対して約35%であった。

表-14 シックハウス対策換気量とダクト内通風量

	ダクト通風量 測定値		シックハウス対策 換気量	
	西風の 場合 m3/h	風速4m/s以上 の場合 m3/h	面積	必要換気量
			m2	m3/h
2013秋期 3階	577	なし	810	162
2014秋期 3階	321	343		
2013秋期 8階	272	なし	779	156
2014春期 8階	239	266		
2014秋期 8階	165	196	734	147
2013秋期 13階	310	なし		
2014春期 13階	462	473		
2014秋期 13階	438	492		

d) エコボイド稼働時の外気冷房効果について

エコボイドシステムが稼働することにより、室内より環境の良い外気を取り込み、人が発する熱や事務機器等の熱により上昇している室内空気を排出することで、外気による冷房を行う事が出来ているかを、以下の期間の中央監視データにて確認した。

- ・期間：2014年 4月1日～ 4月30日 平日8時～18時
：2014年11月1日～11月30日 平日8時～18時
- ・使用データ：エコボイド稼働時間、各室・外気温度

4月のエコボイド稼働時間は174時間で全開庁時間の約83%で、11月は159時間で全体の約88%であった。

図-15にエコボイド稼働時の室内の温度傾向を示す。

表-15 エコボイド稼働時の室内の温度傾向

	室温と外気温度との温度差(°C)					
	3階		8階		13階	
	稼働時	停止時	稼働時	停止時	稼働時	停止時
2014年春期	4.2	6.8	5.5	7.3	5.6	7.6
2014年秋期	5.7	7.1	7.5	9.3	7.2	8.8

全ての階と時期において、エコボイド稼働時の方が停止時よりも室温が外気温度に近づく結果となり、空調機器を使用せず自然に外気を取り込むだけで、外気による冷房が行えていることが確認出来た。

e) 費用対効果について

エコボイドシステムを形成するのに要したイニシャルコストとエコボイドを使用することで削減出来たランニングコストを算出し、どの程度の費用対効果があったかを検証した。

エコボイドシステムに要したイニシャルコストとしては、外気取り入れダクトと給気ダクトを接続するパイプダクトと、経路切替え用の電動ダンパーと、これらに関連する制御機器を計上した。なお、エコボイドを形成している外壁は、計画当初から意匠として設置を予定していたものなので、イニシャルコストからは除いた。

削減出来たランニングコストについては、エコボイドシステム稼働時は換気モードで使用する空調機器を停止するため、空調機器を停止した時間分にあたるエネルギー使用量から削減量を算出した。なお、エコボイドシステム稼働時間のうち、建築基準法の規制による有効換気量が確保できていた西風の場合と風速4m/s以上の場合に削減効果があったとして、ランニングコストを算出した。

また、環境に対する効果の指標として、CO2排出量の削減効果も算出した結果を表-16に示す。

電気の従量料金は15円/kW（2014年電力契約単価）、CO2排出係数0.516kg-CO2/kWh（関西電力2013年実績）を使用した。

表-16 年間の費用対効果

イニシャルコスト	1,670 千円
ランニングコスト削減	226 千円
単純回収年数	7.4 年
CO2削減量	9,102 kg-CO2

ランニングコスト削減量からイニシャルコストの回収年数を算出したところ、約7年で回収できる結果となった。機器等の法定耐用年数が約15年なので、約半分程度の年数で回収できる結果となった。

5. まとめ

高層建築物における中間期での換気システムとして、自然エネルギーを利用したエコボイドシステムの運用を開始した2013年、2014年に実施した測定結果と中央監視データを用いて、外部風の状況、自然換気風量、室内環境について検証を行った結果、以下において有効である結果が得られた。

エコボイド稼働時に取り込めている風量については、風向が西風の場合、又は風速が4m/s以上の時に、建築基準法を満足する風量が確保出来ていた。

エコボイド稼働時の外気による冷房効果についても、室温が外気温度に近づいており、外気冷房の効果があっ

たことが確認出来た。

また、費用対効果についても、実際には約8割以上エコボイドは稼働しているが、有効な換気量が確保できている時だけに絞ってランニングコストを算出した場合でも、7年程度でインシヤルコスト分を回収できる結果となった。

各検証結果より、今回の建物において、エコボイドシステムの採用は有効であったと言える。

今後の課題としては、運用実態調査を継続して行い効果が維持できているかを確認することと、外部に面していない無窓の室に対して安定した効果が発揮できれば、類似の高層建築物にも今回のシステムを採用していくことが出来ると考えている。

商用車の経路データ等を活用した 大規模補修工事の交通影響分析について

井上 徹¹・兒玉 崇²

¹阪神高速技研株式会社 技術部 技術課 (〒550-0011 大阪府大阪市西区阿波座1-3-15)

²阪神高速道路株式会社 保全交通部 交通企画課 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)

阪神高速道路では、10日間程度の通行止を伴う大規模補修工事を定期的実施することで、工事回数の削減と工事施工の効率化を図っている。その交通影響を最小限に留めるため、並行街路の信号調整や利用者への適切な情報提供・広報が極めて重要である。本稿では、車両IDと走行経路が分かる商用車プローブデータを用いて、大規模補修工事の交通影響を分析する。同一車両の工事前と工事中の利用経路を比較するといったデータ特性を活かした分析を通じて、経路データの活用可能性を検証する。また、通行止開始後の経時的なサービス水準変化についても検証することで、特定の日を対象とした従来型の交通調査に対する優位性評価も試みる。

キーワード 都市高速道路, 交通影響, プローブ調査

1. はじめに

阪神高速道路では、道路ネットワークの機能保全のために行う維持・補修工事を、10日間程度の通行止を伴って定期的実施してきている。直近では、平成26年に12号守口線にて、8日間の全線通行止を伴う工事が実施された。通行止を伴う大規模補修工事は、通常車線規制を伴う補修工事に比べ、工事回数・日数の削減と、工事自体の効率化を図るために実施してきている¹⁾。

このような通行止を伴う工事を行う場合には、その交通影響を最小限に留めるため、通行止により交通が集中することが予測される出口交差点や迂回交通が集中することが予測される並行街路における信号調整を行うとともに、利用者への適切な情報提供や工事を周知させるための広報を検討・実施することが極めて重要である。また、次回以降の予定工事による交通影響を、より精緻に予測するため、実際に生じた交通影響を詳細に把握することも同様に重要である。

本稿では、車両IDと走行経路がわかるプローブデータを用いて、2014年に行われた12号守口線全線通行止を伴う大規模補修工事の交通影響を分析した結果を報告する。なお、この内容は過去の発表論文²⁾で課題としてあげられていたものである。



図-1 阪神高速道路12号守口線の位置

2. 使用したプローブデータの概要

今回使用したプローブデータは、富士通製の運行記録計(ネットワーク型デジタルタコグラフ)を搭載し、特定の運行管理システムを利用している貨物車などの商用車から収集されたデータである。これは、道路交通の安全性向上や環境保全などを目的に事業者の許諾を得て収集・蓄積し、営業秘密情報等を秘匿化・抽象化した上で、交通分析に活用可能な形式にして提供されたものである。

主に8トン以上の貨物車を中心に全国で約5万台（2015年4月末時点）が稼働中であり、台数は増加傾向である。このうち、2014年11月の阪神高速道路利用トリップ数は約15.2万トリップであり、同月の阪神高速道路の大型車通行台数（約192万台）の約8%を占めている。

このうち、1秒ごとに緯度、経度、時刻等が記録された点列型データを「マップマッチング」処理により、デジタル道路地図上のリンクに吸着した車両ID付の「経路データ」を用いた。

対象期間は、12号守口線全線通行止工事が行われた2014年11月26日(水)～2014年12月3日(水)のうち平日6日間を「工事中」とし、比較対象の平常日として2014年11月12日(水)～2014年11月19日(水)のうち平日6日間を「工事前」とし、比較分析した。

なお、阪神高速道路全線を含む二次メッシュに含まれるリンクを通過した全トリップを対象とした。

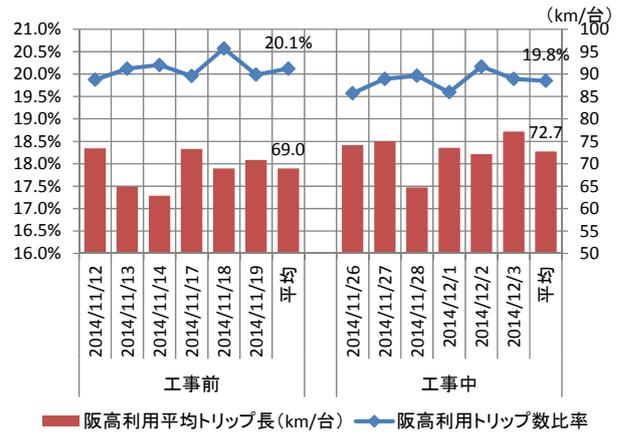


図-2 工事前と工事中のトリップ数

3. 工事前と工事中の交通状況比較

(1) トリップ数・長

対象とした全トリップ数に対する阪神高速道路利用トリップ数の比率は、「工事前」の20.1%に対して「工事中」は19.8%と0.3ポイント低下した（図-2）。これは、阪神高速道路を利用しない経路利用への転換や、車利用自体のとりやめにより低下したことが考えられる。

阪神高速利用車両の平均トリップ長は、「工事前」の69.0kmに対して「工事中」は72.7kmと3.7km長くなった。これは、通常12号守口線を利用している車両が、13号東大阪線等への迂回のため長くなったり、阪神高速道路の利用をとりやめた車両のトリップ長が短かったりすることが考えられる。

(2) 交通量

「工事中」の高速道路の交通量は、「工事前」に比べて、阪神高速13号東大阪線（近畿道以西）・11号池田線（名神以南）・近畿道・名神・中国道等で200台以上多く、阪神高速1号環状線、16号大阪港線で200台以上少ない（図-3）。守口線通行止により、広域的な高速道路網へ利用経路が転換したものと考えられる。

「工事中」の一般道路の交通量は、「工事前」に比べて、12号守口線と直結する国道1号（近畿道以西）等で200台以上少なく、近畿道に並行する大阪中央環状線（守口・門真間）等で200台以上多い（図-4）。通常12号守口線を利用している車両が、近畿道大東鶴見IC等まで大阪中央環状線利用したことなどが考えられる。

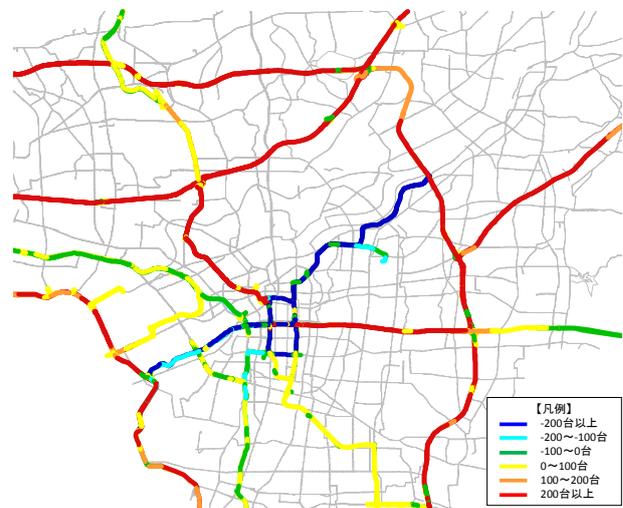


図-3 高速道路の交通量差（工事中計－工事前計）



図-4 一般道路の交通量差（工事中計－工事前計）

(3) 平均速度

「工事中」の高速道路の8時台平均速度は、「工事前」に比べて、近畿道・名神（吹田・豊中間）等で20km/h以上の低下があり、阪神高速3号神戸線（海老江・阿波座間）・15号堺線（住之江・津守間）等で20km/h以上の上昇がある（図-5）。守口線通行止により、広域的な高速道路網へ利用経路が転換した結果、近畿道・名神等の分岐部・合流部手前にて速度低下が生じたことなどが考えられる。

「工事中」の一般道路の8時台平均速度は、「工事前」に比べて、大阪中央環状線（摂津付近）等で20km/h以上の低下があり、12号守口線と直結する国道1号（近畿道以西）等で20km/h以上の上昇がある（図-8）。一般道路の8時台平均速度が10km/h未満の区間長を見ると、「工事前」（図-9）に比べて「工事中」（図-10）の方が長くなっている区間が多くみられる。

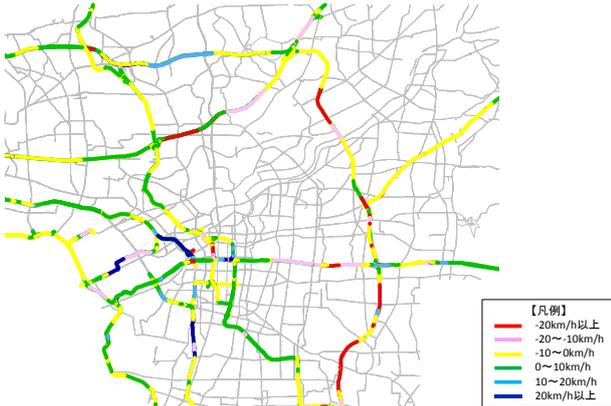


図-5 高速道路の速度差（8時台平均；工事中－工事前）

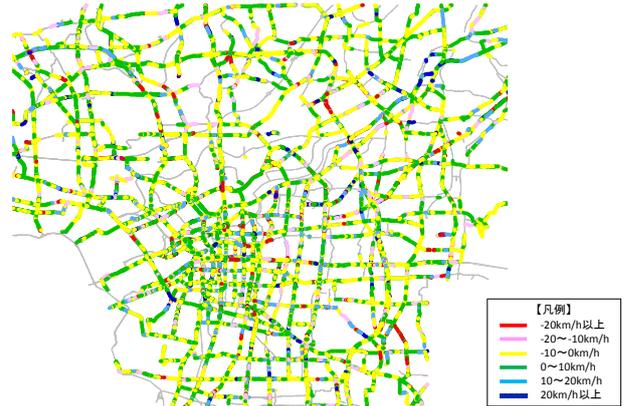


図-8 一般道路の速度差（8時台平均；工事中－工事前）

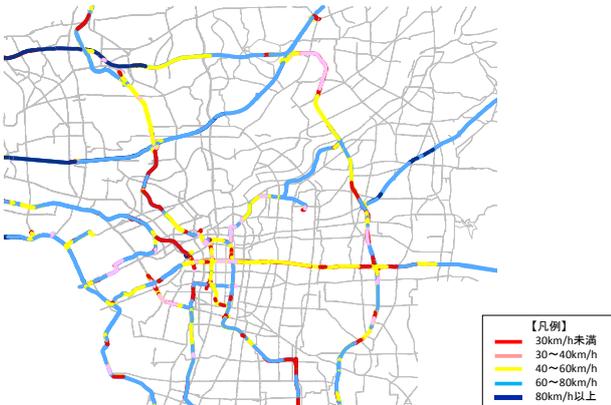


図-6 高速道路の速度（8時台平均；工事前）



図-9 一般道路の速度（8時台平均；工事前）

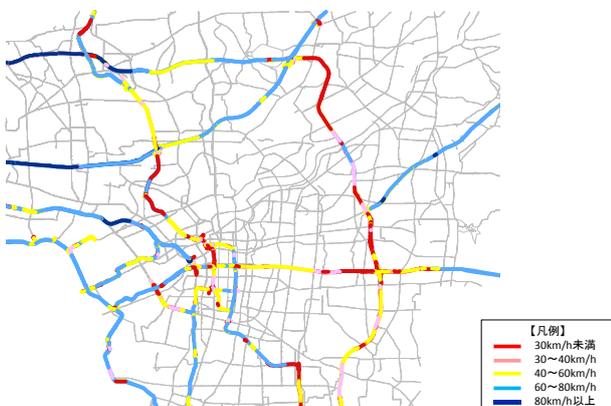


図-7 高速道路の速度（8時台平均；工事中）



図-10 一般道路の速度（8時台平均；工事中）

4. 工事中の経時的なサービス水準変化

これまでの阪神高速道路での通行止を伴う大規模補修工事において、「工事中」のうち初日が最も混雑し、2日目以降は初日より混雑が緩和していることが多い。ただし、高速道路上の混雑状況は、トラフィックカウンターデータ等により経時的に把握できたが、一般道路上の混雑状況は、公益財団法人日本道路交通情報センターが提供している道路交通情報等より把握できる程度であった。そこで、商用車プローブデータを用いて、経時的なサービス水準変化の把握を試みた。

「工事中」の高速道路の8時台平均速度を日別にみると、阪神高速12号守口線と並行する13号東大阪線では、工事初日の11月26日(水)は1号環状線から近畿道と接続する東大阪JCTまで30km/h未満の区間が繋がっているが、27日(木)、28日(金)の順に30km/h未満の区間が短くなっている。週明けの12月1日(月)は初日と同様に1号環状線から近畿道と接続する東大阪JCTまで30km/h未満の区間が繋がるものの、2日(火)、3日(水)の順に30km/h未満の区間が短くなっている(図-11)。



図-11 高速道路の速度 (8時台平均; 工事中の日別)

「工事中」の一般道路の8時台平均速度を日別にみると、阪神高速12号守口線と並行する国道1号等の東西方向の道路のうち、大阪中央環状線付近において、工事初日の11月26日(水)、27日(木)、28日(金)の順に10km/h未満の区間が短くなっている。週明けの12月1日(月)は初日と同様に10km/h未満の区間が長くなるものの、2日(火)、3日(水)の順に10km/h未満の区間が短くなっている。

5. 守口線利用車両の工事中の利用状況

(1) 工事前の守口線利用OD

「工事前」の守口線利用ODのうち、トリップ数が最も多いのは「大阪市住之江区」発「大阪府摂津市」着(78台)で、次いで「大阪府高槻市」発「大阪市住之江区」着(76台)、「大阪府摂津市」発「神戸市」着(61台)の順に多い(表-1)。

(2) 利用経路の変化・とりやめ状況

「工事前」の守口線利用ODのうち、トリップ数上位10位(表-1)の中で「工事中」のとりやめ率が34%と最も高い「大阪府摂津市」発「大阪市住之江区」着のトリップについて、「工事前」と「工事中」の利用経路を整理した。ここでは、「大阪府摂津市」発「大阪市住之江区」着のトリップのうち、「工事前」に守口線を利用したことのある車両のみを抽出し分析した。

「工事前」は、「大阪府摂津市」を出発後、大阪中央環状線を経て守口入口から12号守口線に入った後、16号大阪港線の南港北出口から一般道路へ出て「大阪市住之江区」へ到着するトリップがかなり多い(図-12)。

「工事中」は、「大阪市摂津市」を出発後、摂津北ICから近畿道へ入った後、東大阪JCTを通り13号東大阪線、16号大阪港線を経て、4号湾岸線の南港中出口から一般道へ出て「大阪市住之江区」へ到着するトリップが比較的多い(図-13)。

表-1 工事前の守口線利用OD (上位10位まで)

順位	集約発ゾーン	集約着ゾーン	工事前		工事中		とりやめ率 (A-B)/A
			守口線利用 トリップ数	全 トリップ数	全 トリップ数	A	
1	大阪市住之江区	大阪府摂津市	78	2.2%	92	74	20%
2	大阪府高槻市	大阪市住之江区	76	4.3%	83	69	17%
3	大阪府摂津市	神戸市	61	6.0%	104	104	0%
4	大阪府摂津市	大阪市住之江区	54	7.5%	71	47	34%
5	大阪市此花区	大阪府摂津市	54	9.0%	74	66	11%
6	大阪市住之江区	大阪府高槻市	49	10.4%	65	59	9%
7	大阪府茨木市	大阪市住之江区	42	11.5%	83	80	4%
8	大阪府高槻市	神戸市	42	12.7%	81	68	16%
9	大阪市住之江区	京都市	42	13.9%	111	124	-12%
10	京都市	大阪市住之江区	41	15.0%	100	79	21%

工事前 守口線利用トリップ数 全数 | 3,592

「工事前」のトリップ数は54台であるが、「工事中」は12台と約8割減少した。発着地におけるリンク利用率を「工事前」（図-12）と「工事中」（図-13）とで比較すると、一般道路の利用区間がかなり減っており、「工事中」に車利用のとりやめが多いことが分かる。

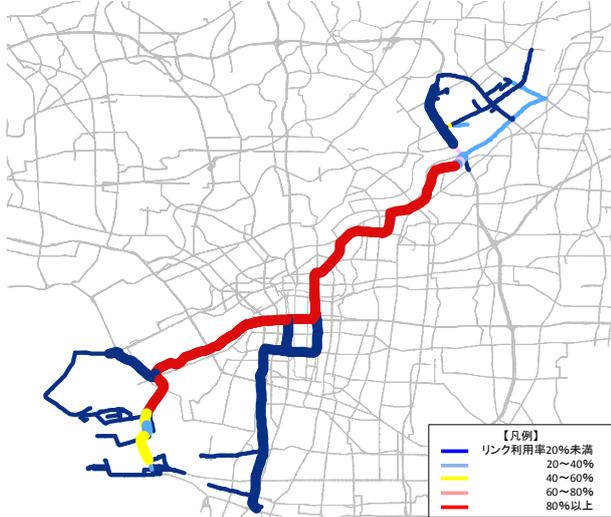


図-12 摂津市→住之江区 利用経路（工事前守口線利用のみ）

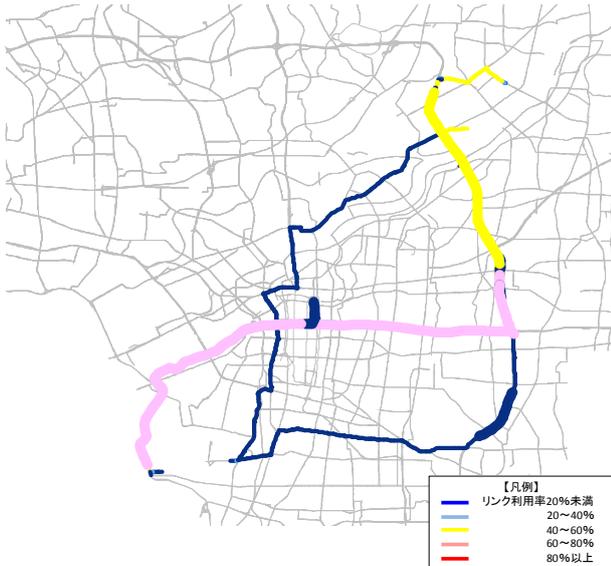


図-13 摂津市→住之江区 利用経路（工事中）

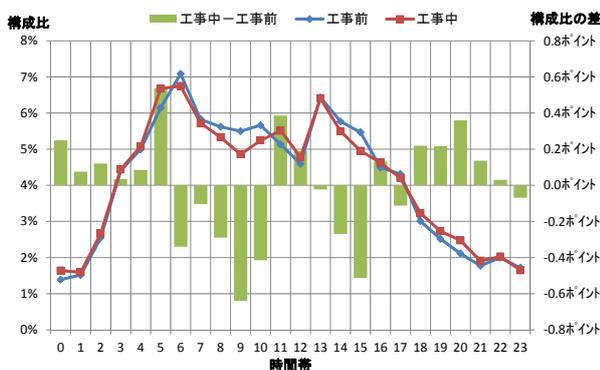


図-14 出発時間帯（工事前守口線利用のみ）

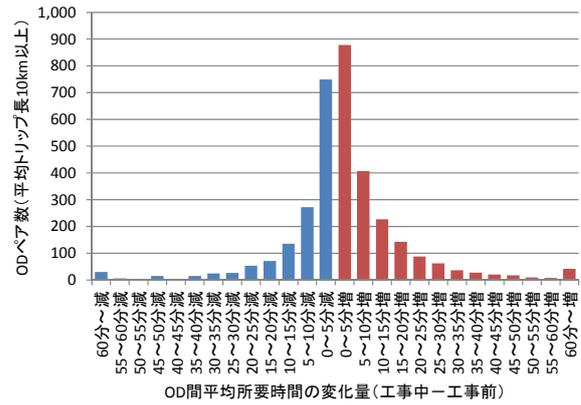


図-15 OD間平均所要時間の変化量

(3) 出発時間帯の変化

「工事前」の守口線利用があり、「工事中」も同じODペアで利用がある車両のうち、トリップ長が10km以上のトリップについて、「工事前」と「工事中」の出発時間帯を整理した。

「工事前」に比べて、「工事中」は朝夕ピーク時間帯を中心に、昼間の混雑時間帯を避け、夜間利用にシフトしている様子がうかがえる（図-14）。

(4) 所要時間の変化

「工事前」の守口線利用があり、「工事中」も同じODペアで利用がある車両のうち、トリップ長が10km以上で「工事前」・「工事中」ともに2トリップ以上のODペアについて、「工事前」と「工事中」の平均所要時間の変化量を整理した。

「工事前」に比べて、「工事中」は6割のODペアで平均所要時間が増加している。一方、残りの4割のODペアでは平均所要時間が減少している。これは、夜間利用へシフトしている出発時間帯の変更等が、影響している可能性が考えられる。

6. 従来型の交通調査に対する優位性評価

(1) 交通量

従来は、高速道路上の交通量はトラフィックカウンター等により継続的に把握することが可能であったが、一般道路上の交通量は、ごく少数の限定された国道上のトラフィックカウンターデータの他は、特定時間帯の特定箇所における交通量観測により把握できる程度であった。このような交通量観測の場合、事故などの突発事象に起因する特異な交通状況を観測してしまうリスクがある。

今回用いたプローブデータを活用することで、一部の商用車に限定されるものの、道路種別に関係なく道路網全体を面的に把握できることが分かった。

(2) 速度・渋滞状況

従来は、高速道路上の速度・渋滞状況はトラフィックカウンター等により継続的に把握することが可能であったが、一般道路上の速度は、特定時点の特定経路における走行速度調査により把握できる程度であった。このような走行速度調査の場合、事故などの突発事象に起因する特異な交通状況を観測してしまうリスクが比較的高い。一般道路上の渋滞状況は、公益財団法人日本道路交通情報センターが提供している道路交通情報等より把握できる程度であった。この道路交通情報は、一定程度は面的に網羅されているが、知りたい箇所のデータが存在しない場合もあり得る。

今回用いたプローブデータを活用することで、一部の商用車が通行したリンク・時間帯に限定されるものの、道路種別に関係なく道路網全体を把握することができ、経時的なサービス水準変化も把握できることが分かった。

(3) OD・トリップ数・長・利用経路

従来は、ETC統計データを用いて阪神高速道路の出入口ODについてのトリップ数・長を把握することは可能であったが、利用出入口の組み合わせにより利用経路が特定できない場合があった。また、阪神高速道路を利用しないODについては把握できなかった。

今回用いたプローブデータを活用することで、一部の商用車に限定されるものの、阪神高速道路を利用しないODのトリップ数や、阪神高速道路以外の道路を含めたトリップ長が概ね把握できることが分かった。また、道路種別に関係なく、特定ODの利用経路変化や車利用のとりやめ状況を把握できることも分かった。

7. おわりに

今回の分析により、車両ID付の経路データを活用することで、大規模補修工事による交通影響をこれまでよりも面的かつ経時的に把握できることが分かった。

このような車両IDが分かるプローブデータを用いることで、出発時刻や到着時刻の変化などのこれまで把握が困難だった内容や、社会的損失のより精緻な把握など、大規模補修工事による交通影響を今後、よりの確かつ明示的に捉えることが考えられる。また、これらの結果を受けて、次回以降の予定工事による交通影響を、より精緻に予測し、よりの確な対策の検討・実施に繋げ、交通影響を最小限に留めるように努めたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、貴重なプローブデータを提供していただいた富士通株式会社の皆様、適切なご指導・ご協力を賜った阪神高速道路株式会社の皆様、データ分析作業に多大なご協力をいただいた株式会社地域未来研究所の皆様には、この場をお借りし、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井上徹，北澤俊彦，鈴木健太郎：湾岸線における大規模補修工事のあり方検討，阪神高速道路第44回技術研究発表会，阪神高速道路株式会社，2012.5.
- 2) 小島悠紀子，兒玉崇，井上徹，田名部淳：プローブデータの交通安全対策等への活用可能性検討，第50回土木計画学研究発表会，公益社団法人土木学会，2014.11.

構造物とりこわし工における 既存杭の引抜工事について

桑原秀一¹・濱田聡一郎²

^{1,2}株式会社 マルシン（〒531-0076 大阪府大阪市北区大淀中3-9-10）

本技術「杭先端パワーチャッキング（PG）工法」は、既存杭引抜工事の品質向上・技術革新を目指し、従来工法「ワイヤーロープ玉掛け引抜方式」で頻繁に発生していた施工トラブルや様々な問題点の解決のために、考案・開発された技術です。従来工法では、既存杭の取り残しが発生しやすいですが、本技術「杭先端パワーチャッキング（PG）工法」は、既存杭の先端をチャック爪で抱え込みケーシングに内包した状態で引抜くため、既存杭の取り残しが無く、完全撤去が可能となります。更に、充填材注入においては、「従来工法」の引抜孔口からの流し入れとは違い、引抜孔最深部より注入し、引抜孔の全長に均一な充填が可能となります。

キーワード 完全撤去工法，引抜・注入同時作業，既存杭引抜工法協会

1. はじめに

高度経済成長期に建設された大量の建築物の更新、同じく大量に建設された道路構造物（橋梁・トンネル等）の高齢化が今後集中的に進む中、東日本大震災を機に防災意識が高まり、老朽化したビルやマンションの建て替え需要が増加しております。

更には、人口減少や施設の老朽化により、全国の自治体を取り壊しを検討する公共施設が総務省のまとめでは、計1万2251棟にもなると発表されております。

解体後の跡地利用の際に、地中の産業廃棄物の残存（既存杭やコンクリートガラ）は、非常にやっかいな問題であり、更に土地売却取引等では「隠れた瑕疵」として、トラブルの発生が多く見られます。

そのような、様々な問題点の解決の一助として、本技術「杭先端パワーチャッキング（PG）工法」が開発されました。

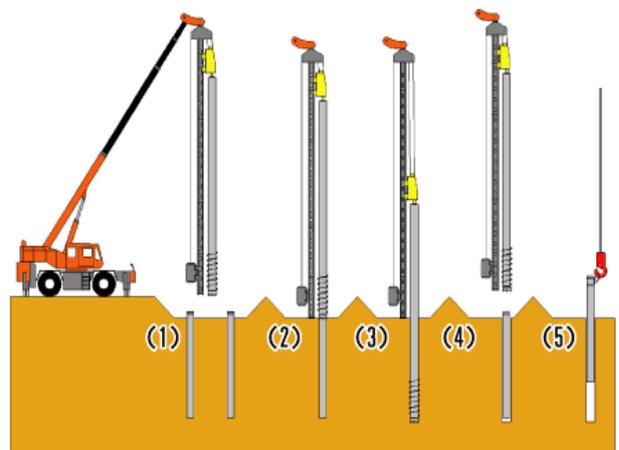
2. 既存杭の引抜きについて

既存杭の引抜きという工種が普及する以前は、ロックオーガー工法等により杭を破碎する工法が一般的に採用されておりました。しかし破碎する工法では、継ぎ杭の場合、継手フランジ部分の破碎に時間を要したり、ロックケーシングが杭から外れてしまう危険性がある等、施工上の問題点が多数ありました。また、杭先端のペンシル部や先端フランジを地中に残存させるなど、いわゆる産業廃棄物（コンクリートガラや鉄筋クズ）の地中残存といった環境面の問題点もありました。これら問題点の

解決に既存杭を引抜くという発想が生まれました。

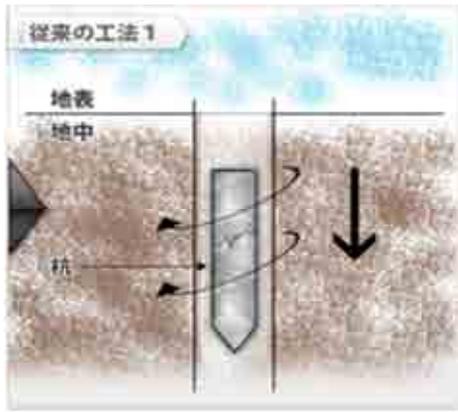
(1) 「従来工法」の杭抜き工法

杭抜き工事が普及し始め、当時より一般的に施工されていた「従来工法」は、既存杭の外周をケーシングで削り出し、杭周囲の摩擦抵抗を解放し、ケーシングを引上げた後に、地中の既存杭にワイヤーロープを取付け、クレーン又は本体機で引き抜く工法で、現在でも多数の現場で採用されております。

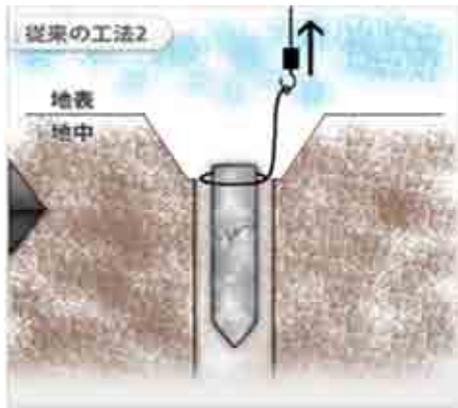


参考資料-1：杭頭部ワイヤーロープ玉掛け引抜方式
しかしながら、「従来工法」には致命的な問題点があります。例えば「打撃工法」等による中折れ等破損状態の杭、継手不良等による上下接合不良杭では、引き抜き時に既存杭を地中に残存してしまうケースが発生しております。

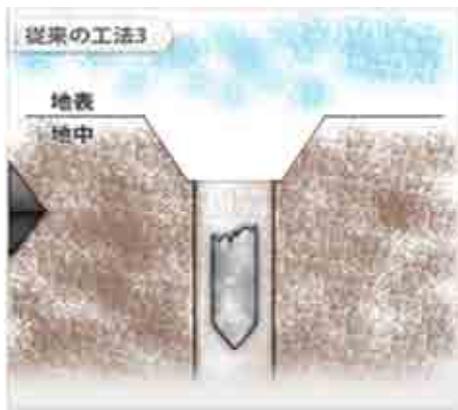
「従来工法」イメージ図



(ケーシング掘削)



(ワイヤー掛けする)



参考資料-2: 残存杭 (イメージ図)

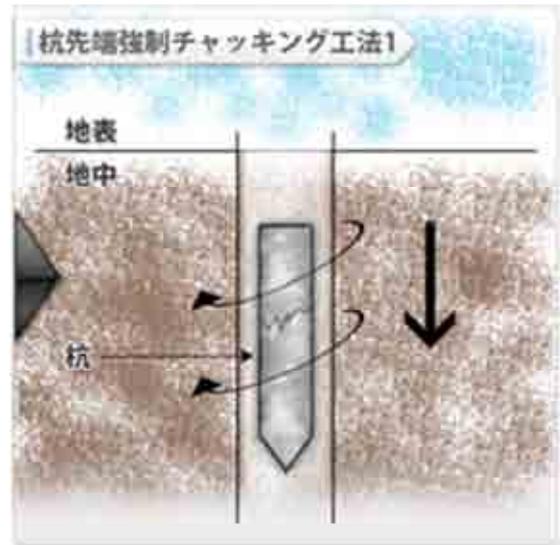
(2) 「新工法」杭先端パワーチャッキング (PG) 工法

杭先端強制チャッキング方式は、従来工法での致命的な問題点の解決が可能となる工法です。

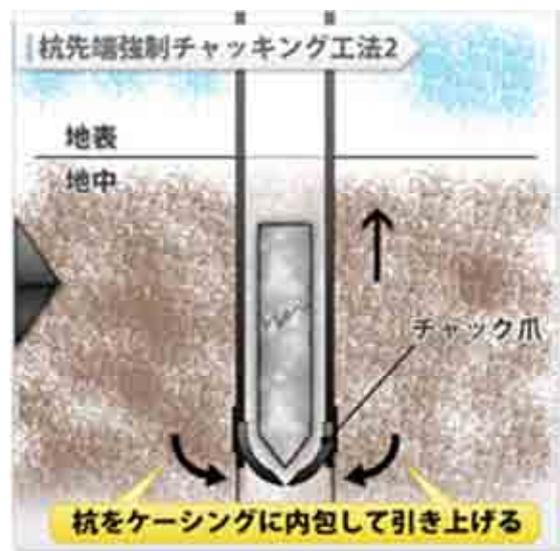
杭先端パワーチャッキング (PG) 工法は、ケーシング上部に特殊スイベル・押圧 (油圧) 装置を装着、既存杭の先端部にケーシングが到達した時点で、既存杭の先端部を抱え込む様に、ケーシング先端部でチャック爪をケーシング内に突き出し、ケーシング内に既存杭を内包したまま引上げます。

その為、杭の折損や継手不良で上下杭が未接合の場合でも、取り残すことなく確実に撤去ができます。

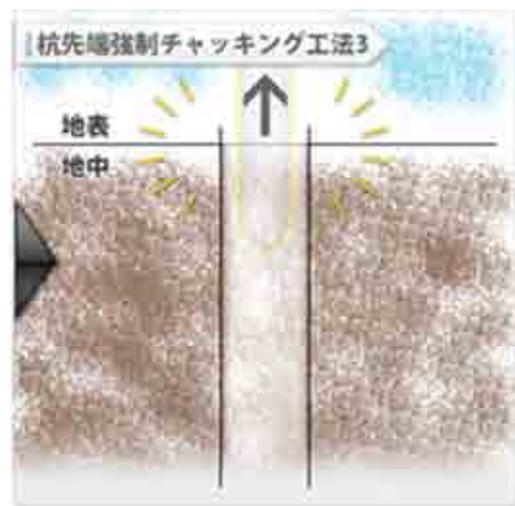
「新工法」杭先端パワーチャッキング工法イメージ図



(ケーシング掘削)



(チャック爪で、杭先端部を抱え込む)



参考資料-3: 撤去 (イメージ図)

3. 施工品質

(1) 抜き跡(引抜孔)の充填材注入について

杭抜き工事に於いて、現在では抜き跡(引抜孔)の確実な充填材注入が重要視されております。

抜き跡(引抜孔)への不確実(不均一)な充填材注入から起こり得る事象として、以下の事象が挙げられます。

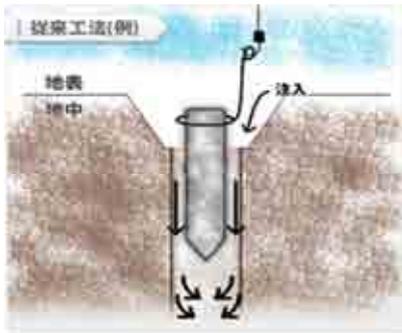
- 周辺地盤の地盤沈下。隣接家屋の傾斜・倒壊。
- 新築工事に於ける新設杭の施工品質及び工期への悪影響。既製杭施工における杭芯ズレ、場所打ち杭における使用生コンのロス。
- 空隙発生等による作業地盤不良化に伴う施工重機の転倒など。

(1)-1 「従来工法」の注入方式の問題点

全国的に見れば、現在でも杭抜きの主流である「従来工法」では、その工法の性質上、抜き跡(引抜孔)の最深部より注入が不可能であり、抜き跡(引抜孔)の孔口からの流し入れとなります。

このような注入方法では、抜き跡(引抜孔)の全長にわたり確実に注入することは困難であり、土塊やガラ破片等の落ち込みが懸念されます。

- ・ 孔口からの流し入れ方式。



- ・ 不確実な注入、土塊やガラ破片等の混入。



(1)-2 「新工法」の注入方式の利点

杭先端パワーチャッキング(PG)工法では、ケーシング先端からの吐出注入が可能で、杭引抜作業と注入作業を同時に行う事(同時注入方式)が出来、抜き跡(引抜孔)の最深部からの充填注入も可能となります。引抜スピードに合わせて吐出し、孔口で注入液の液面管理を行い、周辺地盤の崩落や土塊の落ち込み等を防止します。

また、ケーシング削孔の際に、孔壁地盤の崩落等で削孔穴が拡大した状況でも、注入時に液面管理を行うことにより、抜き跡(引抜孔)に確実に必要量を注入することが可能となります。

- ・ 杭先端パワーチャッキング(PG)工法の同時注入方式



削孔完了



注入状況 オーバーフロー確認



注入継続 液面管理を行いながら引き上げ



注入完了

・杭先端パワーチャッキング（PG）工法の注入方法である同時注入方式では、新設杭打設に伴う様々なトラブルの発生を抑制することが可能となります。

「実施工例」①

既存杭	φ 400-32.0m
新設杭	φ 7080-33.0m（SUPERコーディング工法）
状況	新設杭と既存杭が接円状況
注入方式	同時注入方式
配合	W/C 196% ベントナイト有り （目標1週強度：1N/mm ² ）
養生期間	3日
効果	杭芯ズレの発生無し



参考資料-4：従来工法の玉掛作業。

「実施工例」②

既存杭	φ 350-27.0m
新設杭	φ 1500-30.0m（アースドリル拡底工法）
状況	新設杭と既存杭が接円状況
注入方式	同時注入方式
配合	W/C 295% ベントナイト有り （目標4週強度：0.5N/mm ² ）
養生期間	20日程度
効果	削孔トラブル及び生コンの食い込み無し

※実際の施工例

対象の既存杭	φ 500-6m	杭重量	1.62 t
対象の土質	砂質土		
使用ワイヤー径	φ 18mm		
実際の引抜荷重	≒18.0 t		
結果	玉掛ワイヤーの破断		

また、既存杭を引抜き始めると、最初は浮力が働き、引抜荷重も軽くなりますが、最終、削孔穴から杭を引き抜く際に、最大荷重が掛かります。よって、既存杭を全長引き抜いた最も危険な状態・瞬間に、ワイヤーが破断する可能性が高くなります。

4. 杭抜き工事の安全性

(1) 「従来工法」の杭引抜時の危険性

従来工法「ワイヤーロープ掛け引抜方式」では、ケーシングで、既存杭周囲の摩擦力解放の為の削孔が完了すると杭体にワイヤーロープを玉掛けする必要があるため、一旦ケーシングを全長にわたって、地上に引き上げます。

その際に、地盤（孔壁）の崩壊・土砂の落ち込み等により既存杭周囲の摩擦力が再び増加し、ワイヤーで既存杭の引抜きを開始すると予想以上の負荷が発生します。

- ・杭引抜時に予知される危険性。
 - 玉掛ワイヤーの甚大な損傷。
 - 玉掛ワイヤーの破断。
 - 玉掛ワイヤーの破断による引抜杭の落下。
 - 玉掛ワイヤーの破断の反動による重機の転倒。

既存杭への玉掛けは、施工方式の性質上、目通し絞り一本掛けとなり、また、あだ巻き掛けをすることは非常に難しく、相当量の負荷を想定した玉掛けワイヤーを使用する以外に対処法はありません。

しかし、その場合に使用するワイヤー径は大きくなり、想定した負荷がかからない場合は、既存杭杭体の締め付け不足が発生し、確実な玉掛けとはならず、ワイヤーが抜ける等のトラブルの原因にもなります。

※玉掛作業の参考画像

- ・引抜杭の地上での引き倒し時に予知される危険性。
 - 引抜杭を地面に接地する際、玉掛ワイヤーが抜ける。
 - 引き倒し中に引抜杭が折れる。
 - 引き倒し中に玉掛ワイヤーが破断する。

※既存杭引き倒し作業の参考画像



施工時品質の悪い既存杭を引抜く際には、引き倒し中に杭が折れる場合があります。これは、引抜杭を鉛直に吊っている場合は、クラック等が存在していてもRC棒鋼・PC鋼線によって繋がっていますが、引き倒しを開

始するとRC棒鋼・PC鋼線では支えきれず折れてしまう場合があります。引き倒し中に杭が折れた場合は、ワイヤーにも瞬時に負荷が増大して破断する場合があります。



(損傷したワイヤーロープ)

(2) 「新工法 (PG工法)」の杭引抜時の安全性

杭先端パワーチャッキング (PG) 工法では、「従来工法」のようにケーシングを一旦地上に引上げる必要が無く、削孔完了後、ケーシング引上げと同時に杭をケーシングに内包したままの状態で行抜きます。

引抜き時に玉掛ワイヤーを使用しない為、「従来工法」のような危険性を回避できます。

引抜杭の取り出しは、既存杭をケーシングに内包している状態ですので、クレーンで吊る必要は無く、引き倒すこともありません。ケーシングに内包している杭は、ケーシングの下部からの排出となる為、杭の折損があっても安全に取り出すことができます。



(折損している杭を内包した状態)



(PG工法によるケーシングからの杭の排出)

5. 杭先端パワーチャッキング (PG) 工法の特徴

旧建築物を解体撤去し、新設建物を建設する工事が増加しています。その際に、以前に打込まれていた杭と新規に打設する杭の位置が干渉するケースが多数見られます。既存杭の確実な引抜撤去が出来ないと、新設杭打設の支障となり品質及び工期に悪影響を与えます。

特徴①：「新工法」杭先端パワーチャッキング (PG) 工法は、先端ケーシングにチャック爪を装備し、既存杭先端部を抱え込みケーシングに内包した状態で、引き抜く方式の為、既存杭の取り残しの無い完全撤去工法であります。

特徴②：「新工法」杭先端パワーチャッキング (PG) 工法は、既存杭の引抜作業と同時進行の充填材注入作業が可能です。引抜孔の最深部から注入が出来、注入材の液面管理を行うことにより、孔壁の崩落や土塊の混入等の無い、引抜孔全長への均一な注入が出来ます。

特徴③：「新工法」杭先端パワーチャッキング (PG) 工法は、引抜+注入作業が同時に行える為、作業時間の短縮が出来、工程の縮減及びコスト低減が可能となります。

特徴④：「新工法」杭先端パワーチャッキング (PG) 工法は、杭頭部ワイヤーロープ掛けを要しない為、既存杭の杭頭が深い場合 (地盤面より-3m以深) であっても、地盤面からの引抜施工をより確実に行う事が出来ます。「新工法」では地盤面から-10m程度に杭頭がある場合でも引抜施工が可能となります。

杭頭が深い場合や湧水により崩壊する場合には、既存杭の位置確認のための事前測量を行い、施工地盤面の復旧後に施工を開始します。また、隣接構造物に近接して施工する場合、杭頭が深い場合でも頭出しの為の、掘削は不要であり、隣接構造物への影響を抑制できます。

特徴⑤：既存杭の杭長が不明な場合の確認が容易に

行えます。

杭抜き工事では、過去の記録・資料等が無く周辺の施工実績をもとに、杭長を仮定して工事に着手する場合があります。実際に施工して杭長が短い場合は問題ありませんが、長い場合は、何メートルまで打設されているのか判断に困ります。

「従来工法」での施工の場合、ケーシング内に杭があるのか、又は杭先端を越えて削孔しているかの判定は不可能です。予定深度削孔後、ケーシングを引き上げワイヤーロープ掛けによる引抜作業時に負荷で抜けない、そこで初めて杭はまだ長いのではとの判断となります。

杭先端パワーチャッキング（PG）工法の場合は、削孔中の確認作業として、チャック爪の突出し操作を行い確認出来ます。

ケーシング内に杭がある場合は、チャック爪の突出し中途で止まり、ケーシング削孔が杭先端の所定位置を通過している場合は、チャック爪が全長突出します。

これらの確認は、押圧装置にある突出確認部のストローク幅により、地表にて目視で確認することが出来ます。

このような装置で、杭長の確認が容易に、また確実に、スムーズに工事を進めることが出来ます。

参考資料－５：チャック爪突出状況の確認



6. 施工実績（以下に主要な施工実績を示す。）

1. 有田市民病院増築工事・公共機関・2011年
2. 全農鳴尾浜食品施設解体撤去工事・民間・2011年
3. サムソー住金海南工場解体撤去工事・民間・2012年
4. 鷺の森宿舍解体工事・公共機関・2013年
5. 枝川浄化槽急速ろ過施設附帯工事・公共機関・2013年
6. 大阪市小松南住宅1号建設工事・公共機関・2013年
7. 福知山市旧消防署解体工事・公共機関・2013年
8. 和歌山市汚泥再生処理槽解体工事・公共機関・2013年
9. 朝日新聞四国工場解体工事・民間・2013年
10. 仙溪学園本部他解体撤去工事・公共機関・2014年

11. 大阪市伝法住宅1号館建設工事・公共機関・2014年
12. 和歌山地家簡裁庁舎外構工事・公共機関・2014年
13. サノヤス造船土壌汚染対策他工事・民間・2014年
14. 旧和歌山赤十字血液センター解体工事・民間・2014年
15. 和歌山市汚泥再処理センター・公共機関・2014年
16. 海草橋島崎町線橋梁下部工事・公共機関・2015年
17. コスモ石油坂出製油所改築工事・民間・2014年～

7. おわりに

当工法は、この度、NETIS登録の通知を受領致しました。（登録番号：KK-150013-A、平成27年6月20日より閲覧可能）

また、当工法における更なる発展への重要な課題である抜き跡（引抜孔）の管理（注入方法・充填注入材の強度管理等）について、地盤工学の学識者との研究・開発を開始しております。

今後も再開発事業が増加し、既存杭の撤去工事は不可欠な分野となります、更なる技術・技能の習得・改善を目指し、需要家の要望に充分答えられる施工法として邁進して参りますので、「既存杭引抜工法協会」共々、ご指導の程、宜しくお願い申し上げます。

堺泉北港堺2区における生物共生型護岸の実証実験について

井口 薫

近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町7番30号)

堺泉北港堺2区は、海水の停滞性の強い大阪湾奥部に位置しているため、周辺海域の水質汚濁が進行している。この様な中、海域環境改善の一方策として、環境と共生する港湾を整備し、生物の生息環境の形成を図ることを目標に、現地実験により生物共生型護岸の環境改善効果等について検証するため、当地区において、2009(H21)年度に3タイプの護岸断面の生物共生型護岸が築造された。

本研究では、生物共生型護岸のモニタリング内容と評価、市民連携等について考察を行う。

キーワード 海域環境, 生物共生型護岸, モニタリング, 市民連携

1. はじめに

護岸や防波堤等、海岸を守る施設は直立式で整備されているところが多く、砂浜や岩礁と違い、潮間帯に生息する多くの生物が定着しにくい構造となっている。そこで護岸の老朽化対策や耐震性向上とあわせて護岸に、干潟等の機能を持たせる生物共生型護岸の整備を行い、生物相の改善効果等を調査する実証実験が、堺泉北港堺2区で取り組まれている。

本論文は、その取り組みについて報告するものである。

2. 実験場所について

実験場所である堺泉北港堺2区は、大和川河口部の南に位置し、鉾津等により築堤された護岸等による埋立地である。護岸の前面水深は、かつて大型船の泊地であったため、-15m程度と深い。

当該地区は、水質汚濁が著しい大阪湾奥部でも、特に埋立地に囲まれているため、地形的に海水の停滞性が強い閉鎖海域となっている。

一方、大和川河口部は、海水と淡水が入り混じった汽水域であり、浅場や海浜の整備などにより多様な生態系が期待される海域でもある。

生物共生型護岸は、2009(H21)年12月末に完成し、翌年の2010(H22)年1月から継続的に海生生物等のモニタリング調査が行われている。



写真-1 堺泉北港堺2区

3. 実験断面について

堺2区の海域特性、形状の普及性等を踏まえ、既存護岸の前面に前出しする構造で「ブロック型」、「干潟型」、「捨石緩傾斜型」の3つの護岸タイプを設置し、環境改善効果の評価が比較ができるように各々の延長は約40~50mとした。¹⁾

(1)ブロック型護岸

護岸に生物の生息空間(魚礁ブロック及びカゴ枠)を設けることにより、多様な生物相の創出を期待した。

(図-1, 写真-2, 3)

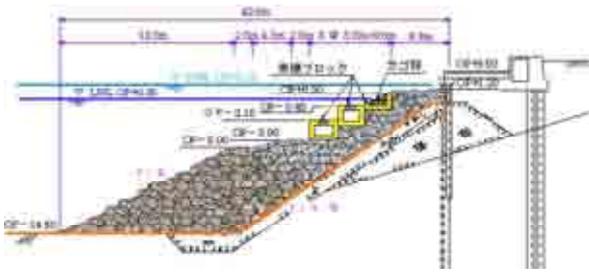


図-1 ブロック型護岸断面図

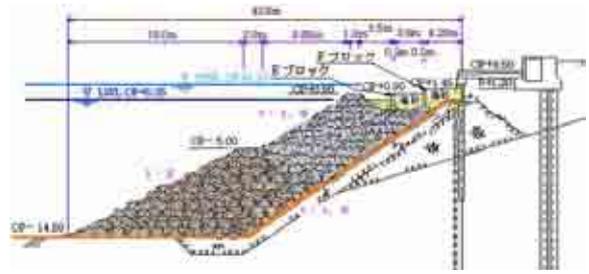


図-3 干潟型護岸断面図



写真-2 カゴ枠



写真-4 階段状の干潟



写真-3 魚礁ブロック

4. モニタリング 調査結果

(1)干潟型護岸の測量・粒度組成・酸化還元電位調査

「干潟型護岸タイプ」の干潟部については、構造上、沈下や波浪による干潟砂面の流出等の変動が考えられるため、護岸の測量、砂泥の粒度組成調査及び酸化還元電位（砂泥中に含まれる酸素量の目安）測定を行った。

(2)捨石緩傾斜型護岸

捨石緩傾斜護岸は、岩礁に近い環境機能を有しており、関西国際空港の捨石緩傾斜護岸に代表されるように、環境にやさしい護岸として、海藻類や付着動物の生息を期待した。（図-2）

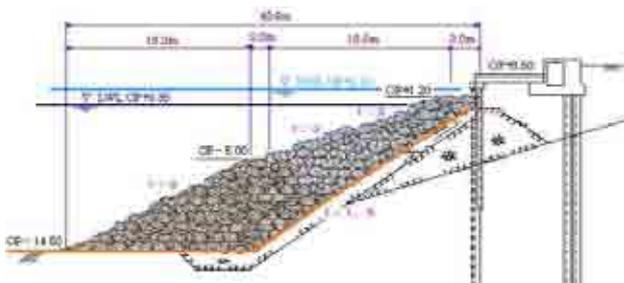


図-2 捨石緩傾斜型護岸断面図

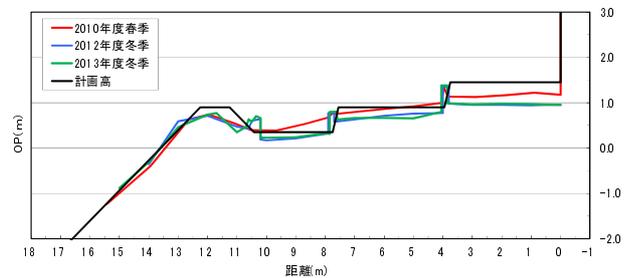


図-4 干潟部の測量結果

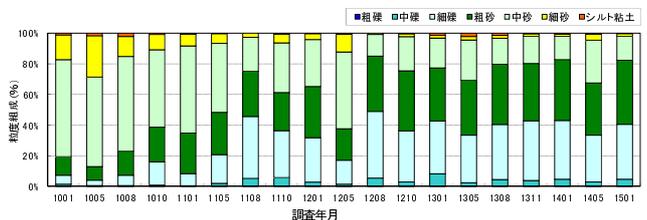


図-5 干潟部の粒度組成

(3)干潟型護岸

潮間帯付近に干潟部を設置することで、砂泥性のゴカイ類、二枚貝類やカニ類などの生息を期待した。干潟は海砂を投入し、水深を変化させた3段の階段状にした。（図-3、写真-4）

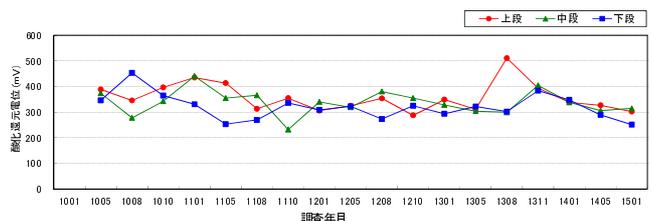


図-6 干潟部の酸化還元電位

干潟部は竣工後から上段，中段，下段とも0.1～0.4m程度，砂面が沈下していた。測量の結果を図-4に示す。

干潟部は粗粒分の割合が増加する傾向がみられ，この要因としては，砂面が沈下していたことから細粒分の流出が考えられる。粒度組成調査の結果を図-5に示す。

酸化還元電位は200mV以上で生物生息環境の酸素量としては良好を保っている。²⁾ 酸化還元電位を図-6に示す。

(2)生物生息状況

1) 植物

植物の生息状況は3つの護岸タイプ間で差はほとんどみられず，3タイプの護岸ともに投入している巨礫(10～200kg)部分の-5m程度まで，表-1に示すとおり，10～15種類が出現した。主な出現種は，珪藻綱，藍藻綱，アオノリ属，シオグサ属やイトグサ属である。また，準絶滅危惧種である海藻のホソアヤギヌもみられた。

表-1 植物の出現種類数

年度	2010	2011	2012	2013	2014
種類数	11	15	14	10	12



アオノリ属(緩傾斜部)



ホソアヤギヌ(緩傾斜部)



コウロエンカワヒバリガイ



ヤマトシジミ(干潟部)

写真-5 植物の出現種の例

(緩傾斜部)

写真-6 動物の出現種の例

2) 動物

付着生物等のうち動物の生息状況を図-7に示す。動物は，軟体動物としては主に貝類，環形動物としては主にゴカイ類，節足動物としては主にエビ・カニ・フジツボ類が，種類数・個体数とも生物共生型護岸の造成後の1年目で大きく増加し，2年目以降ではやや緩やかになったものの，順調に動物が増加した。2年目以降は，春に多く，水環境の悪化する夏に減少する季節変動が見られた。

ブロック型と捨石緩傾斜型の動物生息状況は，種類数・個体数・湿重量とも似かよっており，ともに投入している巨礫(10～200kg)部分の-5m程度までに，岩礫性の海岸の動物が生息している。主な出現種は，付着性動物の代表的な種のコウロエンカワヒバリガイ，ヨーロッパフジツボやアメリカフジツボ等である。

一方，干潟型の動物生息状況は，砂質干潟の生物相を呈し，ゴカイ類，貝類，エビ・カニ類等の出現がみられ，準絶滅危惧種であるヤマトシジミもみられた。

なお，干潟型においては，動物は種類数・個体数・湿重量ともに他の護岸タイプより少ないが，基質が砂であ

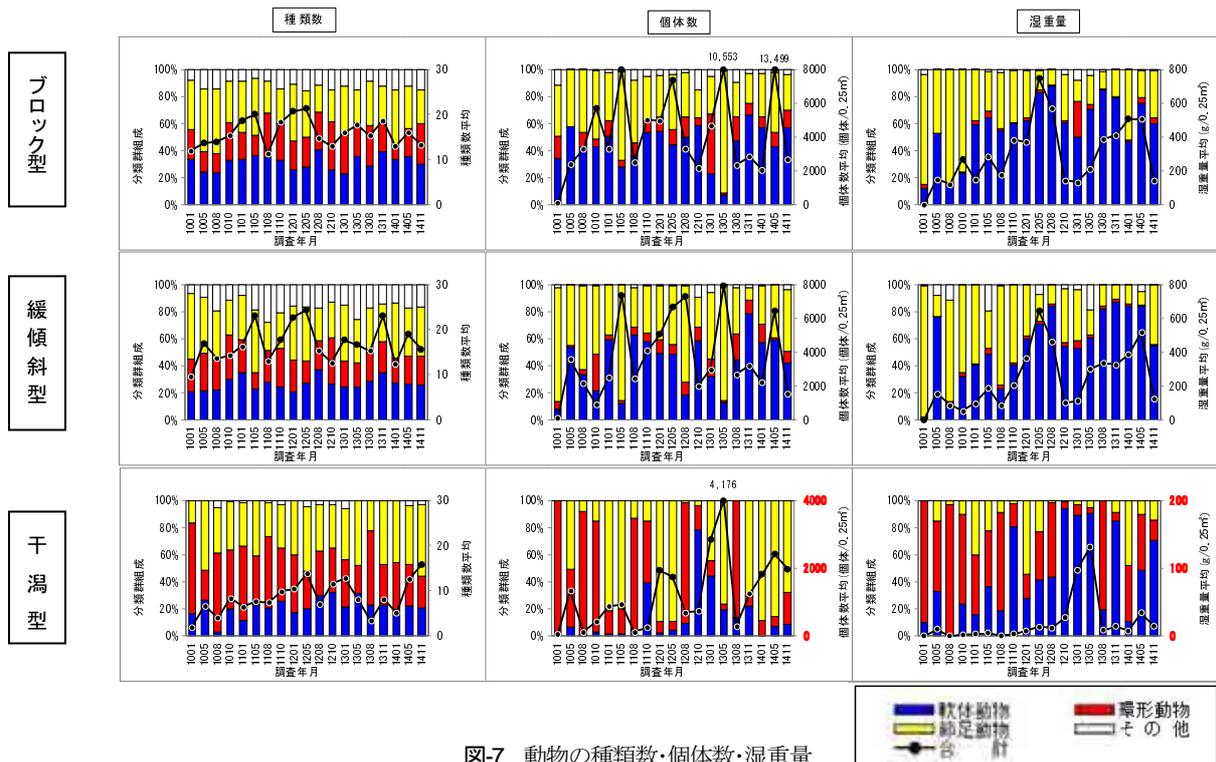


図-7 動物の種類数・個体数・湿重量

ることから、付着性の動物が主体であるブロック型・緩傾斜型とは異なってゴカイ類やエビ等の表在性・埋在性の動物が主となった生物相を呈しているためである。

3) 魚介類

春季の干潟型の小型地曳き網を潜水士により曳網した魚介類採取調査結果では、表-2に示すとおり、9~17種類が出現し、ボラ、クロダイ、マハゼ等が多く採取された。この他、個体数は少ないが、アユ、ウナギ(準絶滅危惧種)やイシガレイの幼稚魚も確認され、干潟型を一時的な生育の場として利用している様子がみられた。

一方、ブロック型と緩傾斜型での小型地曳き網による魚介類採取調査結果では、魚介類の出現は1種類(2013(H25)年度)、4種類(2014(H26)年度)とわずかであった。

表-2 春期の干潟型の魚類採取調査による出現種類数

年 度	2010	2011	2012	2013	2014
種類数	17	15	12	9	15



アユ イシガレイ クロダイ

写真-7 魚類の出現種の例(すべて干潟型の幼稚魚)

(3)各護岸タイプごとの生物生息状況の評価

モニタリング結果から、3つのタイプの護岸の生物生息状況の評価は、2つに大別できる。

ブロック型と捨石緩傾斜型の生物生息状況は、種類数・個体数・湿重量とも似かよっており、内湾の岩礁性の海岸の生物が生息している。

一方、干潟型の生物生息状況は、砂質干潟の生物相を呈している。

1) 干潟型護岸の評価

砂質干潟特有の出現生物として、厳しい水環境にもかかわらず、期待どおり、ゴカイ類、貝類、エビ・カニ類等の出現が見られた。

また、ボラ、マハゼ等の魚類やアサリ、ヤマトシジミなどの貝類等の汽水域としての生物も見られた。

生物生息機能として、多くの種類・個体数の魚類の生息が認められたが、とりわけ、幼稚魚の一時的な生息機能がみられアピール性が高いものと言える。

2) 捨石緩傾斜型護岸の評価

内湾の岩礁性特有の植物や動物の生物生息状況が見られた。

なお、堺2区の捨石緩傾斜型の生物生息状況は、先行事例である同じ大阪湾の関西国際空港の捨石緩傾斜護岸に較べて、生物相の多様性は少なかった。

これは、同じ大阪湾でも関西国際空港の捨石緩傾斜護岸は南部の外洋に近い水環境の清浄な海域に位置しており、カジメ等の大型海藻の海中林を形成することができ、そのような海中林に棲みつく巻貝類やメバル等の魚類もいる生物相であるが、堺2区では水環境が内湾性で厳しく、生息できる種類に制約があることや、海藻では珪藻綱、藍藻綱等の小型海藻を主体とした空間的な多様性の乏しい生物相が一因と考えられる。

3) ブロック型護岸の評価

ブロック型護岸の生物生息は、捨石緩傾斜型と種類数・個体数・湿重量とも似かよっており、内湾の岩礁性の植物や動物の生物生息状況が見られた。

なお、ブロック型は魚礁を設けたが、魚類の蟄集は、小型地曳き網を潜水士により曳網した魚介類採取調査及び潜水士による目視観察では明瞭には認められなかった。

これは、魚類の忌避行動(潜水士が近寄ると逃げてしまうなど)が観察されていることから、別の調査方法を工夫する必要がある。潜水士による調査以外の方法としては、地曳き網ではなく魚礁を取り巻くように定置網(刺網等)を設置した漁獲調査、魚礁に無人VTRカメラを取り付けて魚群行動を記録する調査等の事例³⁾があるが、今後の課題である。

(4) 水質調査の概要と生物相との考察

生物共生型護岸における水質調査は、2011(H23)年度と2012(H24)年度に、5月、11月、1月に各1回、6~8月は数週間ごとに調査頻度を密に実施した。水質調査の結果は、季節的な変動のみならず、6~8月の調査頻度を密にした調査でも週によってはデータに開きがあるなど、短期的な変動もしばしば見られた。

以下に水質調査の各項目ごとの結果の概要を示す。

- ① 塩分は、表層部分(概ね海面下2m以浅)で極端に低い値となっている回次が多く確認され、表面では、1(無単位:塩分濃度計により海水の電気伝導度から塩分を測定したため)程度の場合もあり、これは大和川からの河川水の淡水による影響等が考えられる。
- ② DO(溶存酸素)は、5月調査開始時は水深6m付近以深から貧酸素状態(DO飽和度40%以下程度⁴⁾)、水深11m付近以深が無酸素状態となっていた。6月前半から8月後半までは水深4m付近以深で貧酸素あるいは無酸素状態となっていた。
- ③ 濁度は、概ね、上層が下層より高い結果となり、場合によっては、表層は50度・カオリン程度と極端に高く、これも大和川からの河川水による影響等が考えられる。
- ④ 相対光量子密度は、表層部分(概ね海面下2m以浅)では、水中に到達する相対光量子密度の低下が確認された。補償深度(海藻等が光合成

して自身が必要とする有機物を作るために、ある一定量以上の光の明るさが届く深度)は、生物によって異なるが、一般に海面が受ける光の0.1~1%の相対光量子密度の光の届く層であるとされている。⁵⁾ 生物共生型護岸では、補償深度の相対光量子密度を1%とすれば、概ね、補償深度が海面下2~6mまで上昇する結果となった。

- ⑤ 透明度は、概ね1m~2.5mであった。透明度と補償深度の関係式については、表層の光の1%の相対光量子密度が到達する深さは透明度を2.7倍して求められることが経験的に知られている。⁶⁾ この関係式を当てはめた場合、補償深度は海面下約2.7~6.8mになり、相対光量子密度から求めた補償深度と良く整合する。

以上の水質調査の結果から、生物共生型護岸の位置する海域の水質は生物生息環境の特徴として、次のとおり考察できる。

- ・大和川の淡水による影響の他、気象擾乱等によって海水の流れの一時的变化等が原因と考えられる水質の変動が大きい。
- ・塩分等のデータから表層付近に密度躍層が形成されやすいと考えられ、そのため海水の貧酸素水塊、または無酸素水塊が発生し、夏場は水深4m以深で貧酸素、無酸素状態となる。
- ・水中照度が悪く、補償深度は概ね海面下2~6mである。

一方、生物相と水質環境との考察としては、(2).1)及び(2).2)で述べたように、植物(海藻)及び付着動物は-5m程度までしか生息しておらず、その原因は水質調査の結果から、海水の貧酸素・無酸素化及び補償深度により説明できる。

(5)生物相の遷移の考察

大阪湾で藻場を創出し長期間モニタリングした事例としては関西国際空港の捨石緩傾斜護岸の事例がある。その事例では生物相の遷移が8年程度で極相(ピーク)に至った。⁷⁾

しかし、堺2区の本生物共生型護岸の5年間のモニタリング結果では、種類数の変化が小さくなったこと、主な出現種の構成や分布が安定的になったことなど、一見極相に近い状態を示唆する現象が見られるが、未だ明瞭には現れていないと考察される。

その理由として、同じ大阪湾でも南部の外洋に近い関西国際空港と湾奥部の堺2区とは水環境の大きな違いがあり生物相も異なることから、このまま明瞭な極相を迎えずに遷移する可能性もあるが、今後も遷移を継続的にモニタリングする必要がある。

5. 生物共生型護岸の市民連携

生物共生型護岸の完成直後の2012(H22)年度から、市民の方々による生き物観察会やモニタリング調査が行われている。ここではそれらの市民連携について紹介する。

(1) 市民連携を促進するWGの設置

堺2区生物共生型護岸は、堺市域において市民が海に触れあえる貴重な場になっている。そこで、学識研究者、関係自治体、漁業関係者、市民団体、周辺企業などで構成する「堺2区生物共生型護岸における市民連携・協働のあり方を検討するワーキンググループ」(以下、「WG」と言う。事務局：神戸港湾空港技術調査事務所)を設置して、市民利用、市民調査(市民が主体となったモニタリング調査)の促進、さらには市民連携・協働についての方策を関係者で議論した。

(2)市民による友海ビーチの命名

WGの議論で、市民から生物共生型護岸の愛称を公募することが提唱され、全13通の応募から2011(H23)年9月11日「友海(ゆかい)ビーチ」に決定された。



写真8 「友海(ゆかい)ビーチ」命名式

(3) 市民調査・市民連携

堺2区生物共生型護岸では、WGの提言を受けて市民利用・観察会・市民調査を促し、その結果、参加者・見学者が2013(H25)年度は約280名、2014(H26)年度は約170名あり、堺市域のみならず、大阪府沿岸の北部域の貴重な人が立ち入れる、砂質干潟及び大小の捨石を設置した岩礁性海岸から構成される多様な海岸環境の観察の場として活用されている。

市民による生き物観察会や市民調査では生物共生型護岸の多様な環境を反映し、干潟及び岩礁に棲んでいる生き物や海に棲んでいる生き物のみならず、大和川河口の汽水域に位置しているため汽水に棲んでいる生き物、大雨の後には川や沼に棲んでいるフナ属、メダカなどの生き物もみられ、神戸港湾空港技術調査事務所が実施している生物調査を補完する役割を果たしている。



写真-9 市民調査の様子



写真-10 干潟の生き物観察 写真-11 岩礁の生き物観察

市民調査のうち、例年6月初旬頃に実施されている「大阪湾生き物一斉調査」について紹介する。^{8) 9)}

堺2区生物共生型護岸の生き物一斉調査では、公益社団法人大阪自然環境保全協会、NPO法人釣り文化協会等が主体となり、マガキやユビナガホンヤドカリ、スズキ等の生き物が確認されており、種類数は2013(H25)年度が45種類、2014(H26)年度が43種類であった。これは、神戸港湾空港技術調査事務所の調査の46種類(2014(H26)年度結果)とほぼ同等である。

また、生き物一斉調査では大阪湾の海岸生物に詳しい大阪湾海岸生物研究会、大阪市立自然史博物館等の学術専門家の協力を得て、種の同定をして調査精度を確保している。

生き物一斉調査の参加者の感想としては、「大阪湾をもう少しきれいにしていきたいと思います。」、「人工の場所にこれほど生き物がいることに驚きました。」などの声が寄せられた。

今のところ、生き物一斉調査をはじめ堺2区生物共生型護岸における市民調査からは、次の3点の市民連携の成果が得られた。

- ① 大阪湾の生物に関する専門家との協力・連携
- ② 大阪湾に対する住民意識の醸成
- ③ 市民団体ネットワークを通じた大阪湾の生物に係る知識・調査ノウハウの水平展開

今後も市民団体、市民、学識者、行政等がそれぞれの特徴を活かして調査に参加することにより、よりいっそうの多様な主体の協働・連携による調査については環境保全などの活動にも向けた方策を検討していきたい。

6.おわりに

本研究では、3タイプの生物共生型護岸の有効性を、実証実験のモニタリング結果から述べた。生物の加入は、1年目から認められ、アピール性の高い準絶滅危惧種の高藻類のホソアヤギヌや貝類のヤマトシジミ、魚類のウナギも出現した。干潟タイプ護岸では、春季にはアユ等の幼稚魚も確認されている。堺2区は大和川の河口に位置していることから、海と川のネットワークが発揮され、アユ等が遡上することを期待したい。

本研究は、大阪湾のなかでも著しく劣悪な水環境と考えられる堺東北港堺2区における5年間の生物相のモニタリング結果をとりまとめたものであり、当該海域と同様に劣悪な水環境の海域での環境や生物相の改善検討の一助となれば幸甚である。

市民調査をはじめとした市民連携は、着実に成果をあげてきているが、現在のところ生物共生型護岸への市民の立ち入りは、安全上や、公物管理の観点から、神戸港湾空港技術調査事務所の職員の立ち会いのもとで行っている。この施設の将来的な市民開放に向けての検討は別途必要と考えられる。また、市民調査などの結果のレビューはHP等で行っているが、もっと地元をはじめ広く一般市民に届くような工夫も課題である。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、「大阪湾見守りネット」会員 藤井清香氏をはじめとする関係各位から貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高木裕子: 生物共生型護岸による港湾の環境改善について、2010年度近畿地方整備局研究発表会論文集(調査・計画・設計部門I)
- 2) 風呂田利夫: 干潟生態系の特徴と底生動物調査法、2001年度第1回日本環境アセスメント協会技術セミナー講演録
- 3) 片山貴之, 加村聡, 原口浩一, 伊藤靖: 貝殻魚礁における魚類の摂餌状況、2008年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp.83-86, 2008.
- 4) 中嶋昌紀: 大阪湾東部沿岸域における貧酸素水塊について、大阪府立水産試験場研究報告 第9号, 1995
- 5) 徳田廣, 大野正夫, 小河久朗: 海藻資源養殖学, pp.20
- 6) 西澤一俊, 千原光雄: 藻類研究法, pp.439
- 7) 日下部敬之: 海藻・稚魚にとっての人工護岸、2008年度日本水産学会近畿支部前期例会シンポジウム, 2008年7月
- 8) 橋本愛: 「大阪湾生き物一斉調査」における協働のあり方について、2013年度近畿地方整備局研究発表会論文集(地域づくり・コミュニケーション部門)
- 9) 近畿地方整備局: 大阪湾生き物一斉調査情報公開サイト, <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/life>

浄水処理施設における 汚泥掻寄機の軽量化について

大嶋 裕也¹

¹奈良県 広域水道センター 工務課 (〒639-1041大和郡山市満願寺町444-3)

奈良県営水道事業（以下、「県営水道」という）は、大和平野への広域的な水道用水の供給を目的とし1966年に発足した。創設から50年弱が経過した現在、安全で強靱、かつ持続的な水道事業運営を目指し、老朽化した施設の本格的な更新や修繕に取り組んでいるところである。本論文では、その施設更新の一環として行われた、本県浄水処理施設での汚泥掻寄機の更新事業について紹介する。

キーワード 上水道、汚泥掻寄機、ノッチチェーン式汚泥掻寄機、軽量化

1. はじめに

県営水道は、1966年12月、厚生大臣より事業認可を受け、翌1967年4月に広域水道として発足した。その後、県が策定した広域的な水道整備計画のもと、水需要の増加に備え進めてきた施設整備はほぼ完了し、浄水場の拡張や送水施設の新設・増設の時代から、維持管理の時代へとシフトしてきている。

県営水道では、近年の人口減少、節水意識の高まりなど、社会情勢やライフスタイルの変化を受けて水需要が

減少し、財政状況が厳しくなる中、健全な水道事業経営を目指して、施設更新費や維持管理費等事業のコスト削減に取り組んでいる。また、施設更新に関しては、2007年度に設定した独自の更新基準に基づき、2016年度までの更新計画を策定し、老朽化した水道施設について順次更新を図っているところである。

本論文では、その施設更新の一環として行われた奈良県御所浄水場（以下、「御所浄水場」という）における汚泥掻寄機の更新工事を取り上げ、今回工事で採用したノッチチェーン式汚泥掻寄機について従来型との比較を行い、その導入効果について述べる。

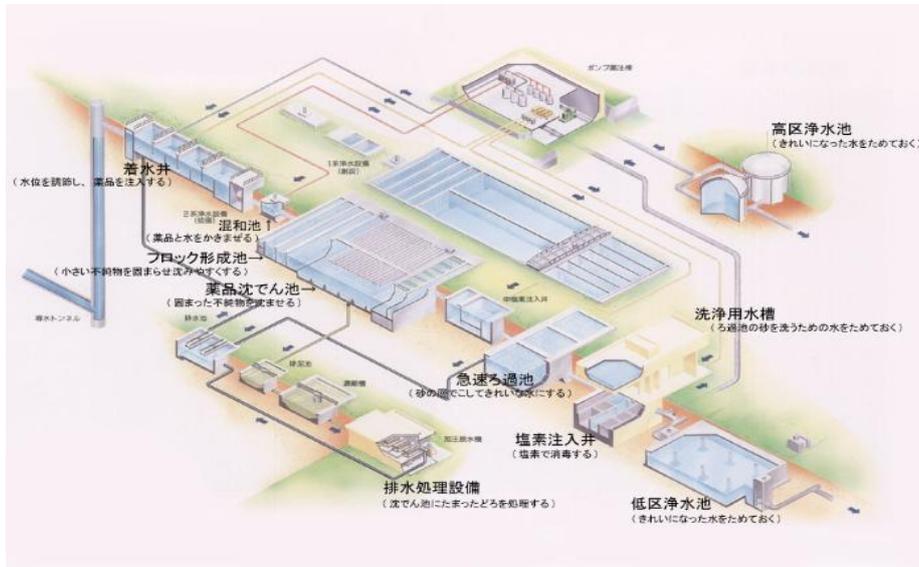


図-1 御所浄水場 浄水処理フロー図

2. 御所浄水場における排泥設備

御所浄水場の浄水処理フローを図-1に示す。着水井から薬品沈澱池（以下、「沈澱池」という）までの処理区間においては、取水した原水に対し不純物を取り除くため凝集剤（PAC）を注入し、沈澱池で不純物のかたまりを沈澱させる事により浄水処理を行っている。時間経過に伴い、沈澱池の底には汚泥が堆積するが、汚泥掻寄機によりこれを掻き寄せ、ピットから排泥することにより連続的な浄水処理を可能としている。

3. ノッチチェーン式汚泥掻寄機の導入

(1) 汚泥掻寄機の更新

県営水道では更新改良事業計画に基づき、2012年度から2013年度にかけて、御所浄水場2系沈澱池において汚泥掻寄機の更新を行った。その事業概要、設計条件及び設備仕様を以下に示す。また、既設汚泥掻寄機及び今回導入した汚泥掻寄機をそれぞれ図-2及び図-3に記載する。

a) 事業概要

工事名：御所浄水場沈澱池（汚泥掻寄機）浄水設備更新工事（機械）
 工期：自 2012年10月31日
 至 2014年3月20日
 工事箇所：御所市戸毛 地内

b) 設計条件

設計対象水量：86,400m³/d
 （水処理2系1号池，2号池）
 池数：水処理2系1号池，2号池 計2池
 池寸法：幅25m×長24m×深さ5.05m
 （有効水深4.4m）
 掻寄池幅：3.46m×5

c) 設備仕様

形式：ノッチチェーン式汚泥掻寄機
 （2連1駆動方式，3連1駆動方式）
 掻寄池長：22.25m（軸間距離）
 掻寄速度：約0.2～0.6 m/min

チェーン：ステンレスブッシュドチェーン(駆動用)
 樹脂チェーン(掻寄用)
 駆動装置：電動機直結形サイクロ減速機(インバータ)
 減速比 1/2537
 電動機 0.4kW×4P×220V×3φ×60Hz
 フライト：寸法 高187mm×厚60mm×長3360mm
 材質 FRP
 安全装置：トルクリミッタ（減速機内蔵）
 電源：220V×3φ×60Hz

(2) 機器構成及び設備重量比較

今回の更新工事において更新を行った既設の汚泥掻寄機（①従来式汚泥掻寄機）及び更新機器（②ノッチチェーン式汚泥掻寄機）の主要機器構成及び設備重量を表-1に記載する。



図-2 更新前



図-3 更新後

表-1 汚泥掻寄機の機器構成及び設備重量比較表

項目		型式	①従来式汚泥掻寄機（金属チェーン式）	②ノッチチェーン式汚泥掻寄機
機器構成	本体チェーン		SUS304	合成樹脂
	フライト		合成木材	FRP
	水中軸受		FC250	PE（ポリエチレン）
	地底レール		レール鋼	プラスチック
	シユール		FCD600	合成樹脂（ポリアミド）
設備重量（単位：t）			26	7.4
重量比較（②/①）			28.5%	

従来式汚泥掻寄機を構成する主要部材がSUS304やFC250等の金属で製作されているのに対し、ノッチチェーン式汚泥掻寄機は本体チェーンやフライトなど、主要部材の多くに樹脂を用いているのが特徴で、その設備重量についてみると、従来式の26tに対して、ノッチチェーン式では7.4tとなっており、約70%軽量化されている。

(3) ノッチチェーン式汚泥掻寄機の導入効果

前節(2)において、既設の従来式汚泥掻寄機とノッチチェーン式汚泥掻寄機の機器構成の差異と軽量化について述べた。本節では、経済性、施工性、安全性及びその他の観点から、軽量化による導入効果について述べる。

a) 経済性について

設備導入にかかるインシヤルコストと、設備運用開始後にかかる、ランニングコスト（電力費及び部品交換費等）の比較表を表-2に記載する。

まず、インシヤルコストについて比較すると、機器費及び工事費共に従来式に比べてノッチチェーン式汚泥掻寄機の方が安価である。工事費については、主要部材が金属製から樹脂製に代わったことで大幅に軽量化され、機器の運搬据付費用の削減に繋がっている。

一方、ランニングコストについて、チェーン駆動装置の定格出力が下がるため、電力費が150,000円/年（3,000,000円/20年）削減され、池底レールやシュー等の部品交換頻度の減少や駆動装置用スプロケットの交換が不要になること等により補修費用が2,060,000円/年（41,200,000円/20年）削減されている。

b) 工期の短縮について

浄水場は浄水処理施設として地域のインフラを担っている。その性質上、浄水場設備の稼働停止期間の短縮は、更新を行う上で重要な要素の1つである。

汚泥掻寄機の更新を行う場合、更新機器をノッチチェーン式汚泥掻寄機とすることにより、金属チェーン式汚泥掻寄機と比較して、施工期間の大幅な短縮を見込むことができる。具体的には、主要部材の軽量化により運搬・組立等の作業性が向上すること、池底レール据付の

施工が容易になること等により、施工期間の短縮が可能となっている。

c) 安全性の向上

樹脂製のかき寄せチェーンはステンレス製のかき寄せチェーンと比較して、伸び量が大きく、軽量であるため、歯飛び現象が生じやすい。しかし、ノッチチェーン式汚泥掻寄機では、駆動ホイールの外周にチェーンガードを取り付け、物理的に歯飛びを防止する構造とし、運転上の安全性を高めている。

なお、従来の金属チェーン式汚泥掻寄機については、フライト板の取付け部が、チェーンの進行方向に対して垂直方向に大きく張り出しているため、チェーンガードを取り付けることができない。

d) その他

設備の主要構成部材に樹脂を用いているため、軽量であるだけでなく耐食性が高い。また、駆動軸などの主要部にはステンレスを使用し、耐食性及び強度を高めている。

なお、今回導入した、かき寄せチェーン、かき寄せフライト及び池底レール等の設備構成部品に関しては、JWWA規格（JWWA Z 108「水道用資機材—浸出試験方法」）に基づいた浸出性能試験を実施することにより、水道用資機材としての安全性を確認している。また、部品の材質については、ポリアミド(PA)やポリエチレン(PE)等、全て浄水場で使用実績があるものであり、耐薬品性についても問題がない。

4. 導入実績

奈良県では、下水処理施設である奈良県第2浄化センターにおいて、2008年及び2010年にノッチチェーン式汚泥掻寄機を導入した実績があるが、県営水道においては初めての導入となった。

表-2 汚泥掻寄機の経済性比較表

型式		従来式汚泥掻寄機（金属チェーン式）	ノッチチェーン式汚泥掻寄機
項目	イニシヤルコスト		約16%減
	経済性	1日4回転運転とする。 運転時間 = $44.5\text{m} \div 0.2\text{m}/\text{min} \div 60 \times 4 = 14.8\text{h}/\text{d}$ $(1.5+0.75)\text{kW} \times 14.8\text{h}/\text{d} \times 0.8 \times 12\text{円}/\text{KWh} \times 365\text{日}/\text{年} \times 2\text{式}$ = 233,366 → 233,000円/年	1日4回転運転とする。 運転時間 = $44.5\text{m} \div 0.2\text{m}/\text{min} \div 60 \times 4 = 14.8\text{h}/\text{d}$ $(0.4+0.4)\text{kW} \times 14.8\text{h}/\text{d} \times 0.8 \times 12\text{円}/\text{KWh} \times 365\text{日}/\text{年} \times 2\text{式}$ = 82,974 → 83,000円/年
	維持管理費	73,600,000円/20年	32,400,000円/20年

下水処理施設で使用される汚泥掻寄機について、下水中という比較的厳しい腐食環境下で長期間にわたり使用されることから、耐摩耗性及び耐腐食性に優れた樹脂製のものを開発・採用し始めたという背景があり、下水処理施設と比較して、浄水処理施設での採用は数が少ないようである。

参考までに、今回工事受注者の他府県納入実績（2013年5月時点）を表-3に示す。上水道・工業用水道施設における納入実績は、下水道施設の約4%程度に留まっており、上記を裏付ける結果となっている。

5. おわりに

ここまで、県営水道における汚泥掻寄機の更新事業紹介を通して、汚泥掻寄機の軽量化による経済性や施工性等における様々な利点を示してきた。下水処理施設に比べ、浄水処理施設における導入事例は依然として少ないが、そこにはデータに裏打ちされた有益な導入効果が存在している。

県営水道では、今後も更新改良事業計画に基づいた施設更新を進めていくことになるが、今回取り上げたような新技術の導入には、単なる設備更新に留まることなく、その最先端技術の恩恵を受け、より良い浄水処理システムを構築できるという可能性が秘められている。

水処理を同じく生業とする上水道・下水道が、その垣根を越え、持ち得る技術を共有することによって、互いにとっての最適化、効率化に繋がる相乗効果が発揮され、全体の発展に繋がると考えられる。

参考文献

1)財団法人 下水道新技術推進機構：ノッチチェーン式汚泥かき寄せ機 技術資料

納入先施設分類	納入先数
①上水道・工業用水道	11
②下水道	269
導入割合（%）	4%

滋賀県におけるCIM推進の取り組みについて

足立 憲悟¹・赤田 憲俊²

¹滋賀県 土木交通部 監理課 技術管理室（〒520-8577滋賀県大津市京町4-1-1）

²（公財）滋賀県建設技術センター 技術課（〒525-0059滋賀県草津市野路6-9-23）

関係者間や事業プロセス間（調査・設計・施工・維持管理）で共有する情報を高度化（ex. 3次元データ）し、公共事業の更なる効率化を図るCIM（Construction Information Modeling/Management）。CALSの次のステージとして、国土交通省をはじめ官民各方面で導入促進の取り組みが進められている。滋賀県でも2014年8月28日、滋賀県CIM推進勉強会を設立し、これまで約10ヶ月間にわたってCIM推進に向けた各種の検討を進めてきた。

建設生産システムの最先端ともいえるCIMについて、地方公共団体の立場でのこれまでの取り組み成果について、実業務への適用の可能性にも触れつつ、報告を行う。

キーワード CIM, 3次元データ, フロントローディング, 全体最適化

1. はじめに

「CIM」は2012年度、建築事業で導入が進む「BIM」を土木分野にも展開すべく、国土交通省で提唱された。

CIMとは、「フロントローディング」による「全体最適化」である。プロジェクトの初期工程（front）に負荷をかけ（loading）、課題を早期に発見することで、プロジェクト全体のコスト・時間を圧縮し「全体最適化」を図ることができる。

くしくも、改正品確法が2014年6月に施行され、担い手確保が発注者の責務として規定された。担い手不足の一因として、建設産業の生産性の低さも指摘されており、CIMによる生産性向上への期待も大きい。

2. CIMとは

(1) CIMの概念

CIMとは、計画・調査・設計段階から3次元モデルを導入し、その後の施工、維持管理の各段階でも、更新・発展させ、事業全体の関係者間で情報を共有することにより、建設生産システム全体での効率化・高度化を図るものである。

(2) CIM導入により期待される効果

CIM導入により、各事業プロセス段階で、次のような効果が期待されている。

a) 調査・設計段階での効果

設計の可視化によるミスの防止、設計の自動化による比較検討作業の省力化や数量算出ミスの防止など。

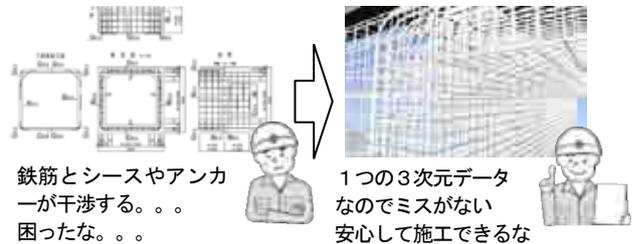


図-1 調査・設計段階でのCIM効果イメージ

b) 施工段階での効果

3次元データの活用による情報化施工の促進や安全性の向上、施工計画の精度向上による工期の短縮など。（図-3および図-19参照のこと）

c) 維持管理段階での効果

施工段階からの引継情報の高度化による維持管理の効率化やアセットマネジメントシステムの確立・運用など。

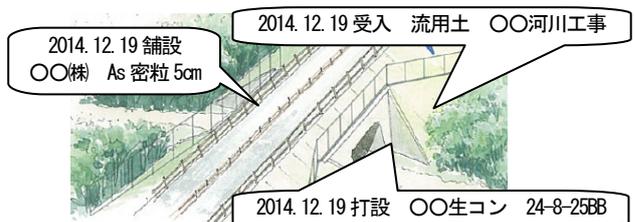


図-2 維持管理段階でのCIM効果イメージ

d) 各段階に共通した効果

3次元CGや模型を活用した意思決定の迅速化，関係機
関協議や住民合意形成の円滑化など。
(図-9, 10, 12, 14, 15参照のこと)

(3) CIM推進に向けた国の取り組み

民を主体とし技術開発の検討を行う「CIM技術検討
会」と，官を主体とし制度の検討を行う「CIM制度検討
会」が2012年度に設立され，2016年度の導入ガイドラ
イン策定に向けて，検討が進められている。

2012年度には試行設計が全国で11件，2013年度には試
行設計および試行工事がそれぞれ全国で19件ずつ実施さ
れ，効果や課題の検証が行われている段階である。

滋賀県内でも，2012, 2013年度の試行設計，2013年度
の試行工事の対象として，高島市青柳地先の国道161号
交差点の立体化事業が選定されている。

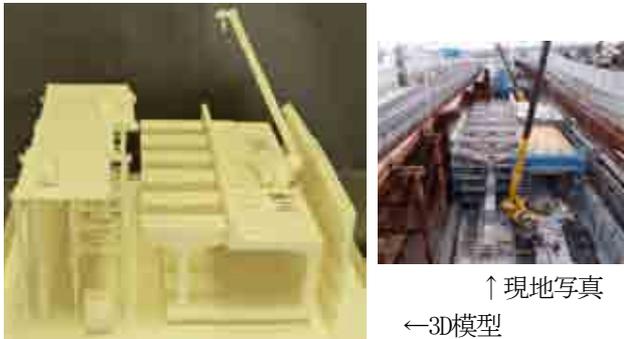


図-3 試行工事におけるCIMの事例

3. 滋賀県の取り組み方針

(1) 取り組みの方向性

- 県の取り組みの方向性として，次の3点を設定した。
- ①国における検討状況（導入効果や課題の検証など）
や導入工程の把握
- ②県独自課題の洗い出しと対策の推進
（ハードウェア，ソフトウェア，スキル，コンセ
ンサス〔意識〕の向上など）
- ③部分先行導入に向けた取り組み
（3D模型を活用した合意形成など）

(2) 滋賀県CIM推進ロードマップ（案）

取り組みの方向性と国のロードマップを踏まえ，滋賀
県におけるCIM推進に向けたロードマップ（案）を策定
した。

(3) 滋賀県CIM推進勉強会

滋賀県におけるCIMの推進に向けた取り組みを行うこ
とを目的とし，「滋賀県CIM推進勉強会」を2014年8月に
設立した。

様々な立場の意見を持ち寄るため，また検討状況の情
報共有化を図るため，県庁各課および各土木事務所等
から若手職員2名前後が参加する体制とした。

当面，この検討会でロードマップに沿って検討を行
いながら，得られた知見に基づき随時ロードマップ（案）
の見直しも行っていくこととしている。

		平成26年度 2014	平成27年度 2015	平成28年度 2016	平成29年度 2017	平成30年度 2018	
勉強会 (主任技師～主査程度)		委員会の下部組織へ移行					
委員会 (事務所次長)		主に工事・委託の発注関係にかかる審議					
取り組み①	国の動向把握	先行的導入事業 ガイドライン策定(予定) ↓ 県ロードマップ の更新					
取り組み②	職員スキル の向上	セットアップ(土台作り) 【3次元CAD訓練、各種研修会への参加】		勉強会委員のスキル向上 【3次元CAD演習、勉強会での知識習得】		職員のスキル向上 【各種研修の一般化】	
	職員意識 の向上	CIMの周知 【勉強会からの発信、研究発表会】		CIMの効果浸透 【勉強会からの発信、研究発表会】		CIMの定着	
取り組み③	部分 先行 導入	3次元測量 (写真・レーザ)	デモンスト レーション	試行による効果・課題の把握 【指定発注】			マニュアル化
		3次元設計 (説明用簡易モデル)	デモンスト レーション	試行による効果・課題の把握 【指定発注】			マニュアル化 機器の増強
		情報化施工	先行事例 の視察	プレ試行による効果・課題の把握 【総合評価 特別簡易型A 特別設定項目の活用】			試行による事例の蓄積 【総合評価 別枠加算化】
		3Dモデル の活用	先行事例 の視察	プレ試行による効果・課題の把握 【総合評価 特別簡易型A 特別設定項目の活用】			試行による事例の蓄積 【総合評価 別枠加算化】
		維持管理 (3次元写真等)	デモンスト レーション	試行による効果・課題の把握 【直営作業】			マニュアル化 機器の増強

図-4 滋賀県CIM推進計画 ロードマップ（案）

4. 2014年度の取り組み報告

(1) 試行設計への取り組み

試行設計に先立つプレ試行設計として、次の2つの作業を実施した。

a) インハウス作業

CIM導入における県独自課題の洗い出しのうち、ハードウェア・ソフトウェア・スキルの面で必要な水準を確認するため、県に導入済の3次元CADを用いた図面作成を行った。

題材は、構造が比較的単純な砂防施設とし、3次元化のメリットも併せて模索することとした。

まずは、既存の平面図・縦断図・構造図などの2次元図面から、立体形状を把握する必要があるが、土木技術者でも初見の図面では時間を要することが再認識された。地元住民の方々などが、図面から立体形状を想像することは、かなり困難と思われる。

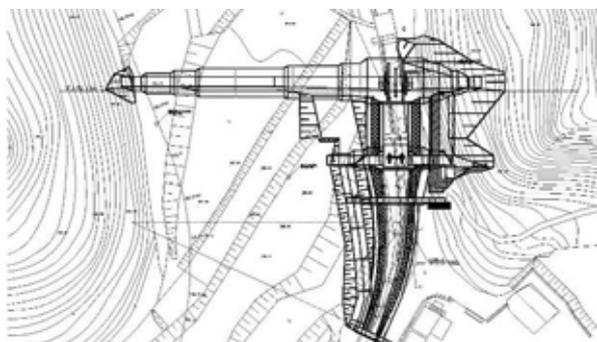


図-5 砂防施設 計画平面図

実際に作図すると、これまでの図面作成とは全く方法が異なり、頭の切り替えが必要であることが分かった。

2次元での図面作成では、基準線を距離指定して複写（オフセット）した下書線を作成し、下書線の交点を結んで対象物を作図する方法が一般的である。

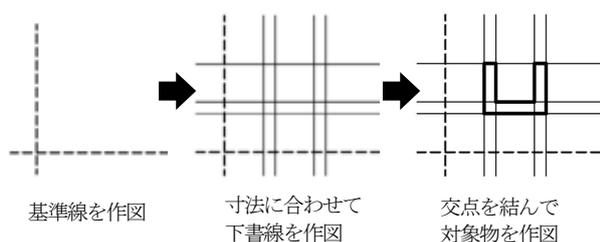


図-6 一般的な2次元CADの作図方法

この考え方を3次元作図に適用すると、下書線から3次元の辺を作成する形になる。この場合、作成した辺から面（サーフェス）、面から立体（ソリッド）に合成していく必要があるため、作業時間がかかり、接続漏れなどのミスも生じやすい。接続漏れがあると、各合成段階でエラーが発生し、3次元の造形までたどり着くことができなくなってしまう。

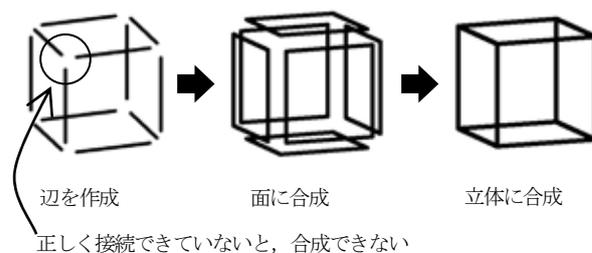


図-7 3次元CAD作図 失敗例

そのため、3次元作図は、初めから立体で作図する方法が一般的になっている。一本の木材をカットして部材を作成し、部材を接着して全体を作成するイメージであり、図面の作成方法が、実際の“ものづくり”に近づいて来たような感覚をおぼえる。

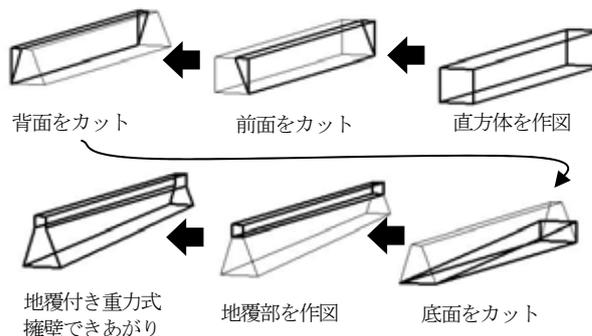


図-8 一般的な3次元CADの作図方法

筆者も例に漏れず、当初は慣れた2次元作図の方法をそのまま3次元に持ち込み、立体化ができず失敗を繰り返した。慣れた方法を捨てることに抵抗はあったが、3次元作図に適した方法に切り替えることで、砂防施設の主たる部分について、3次元化することができた。

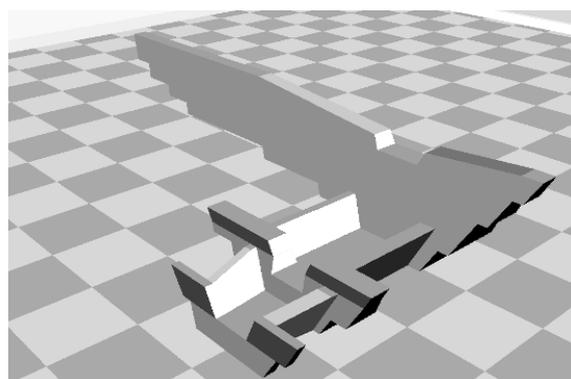


図-9 砂防施設 3次元モデル

図-5と9を比較すれば、形状を感覚的に理解するうえで、3次元モデルが非常に優れていることは明白である。さらに、3Dプリンタを使用すれば、簡単に立体印刷を行うことができ、合意形成などに大きな力を発揮する可能性が高い。



図-10 砂防施設 3Dプリンタ印刷物

操作に特殊な知識は不要であり、2次元CADを利用できる職員であれば、慣れれば同程度の作業は可能である。また、この作業では、ソフト・ハードの面で不都合を感じることはなかった。

ただし、平面縦断線形に沿いながら横断勾配や幅員のすりつけがあるような道路や、線形に沿いながら断面が変化する水路などについては、汎用のCADだけでは作図にかなりの時間を要するため、土木CADの独自機能を活用することが現実的である。また、3次元の地形データなど、サイズの大きなデータの取り扱いについても、併せて今後検討していく予定である。



図-11 作図にスキルが必要な構造物の事例

b) 瀬田唐橋[※] 図面の3次元化

CIMの部分先行導入に向けた課題と効果を検討するため、瀬田唐橋の紙図面から3次元図面を作成した。

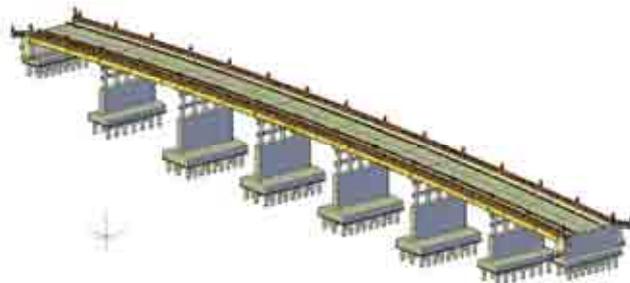


図-12 瀬田唐橋 3次元モデル (全景)

地形図は、後述の地上レーザ計測による3次元測量データから作成したサーフェスモデル（表面だけで中身が詰まっていないモデル）を基に、手作業による修正を加えながら、ソリッドモデル（中身が詰まったモデル）への合成を行った。

その結果、既存の作図ツールが不足しているため作業時間がかかることや、職員一人ひとりに配布されているレベルのハードでは処理遅れが生じること、3D印刷の倍率によっては部材の寸法がプリンタの再現能力を超え

てしまい造形できない場合があるなどの課題も見えてきた。

一方、3次元化によって、2次元の図面では確認できなかった構造物間の不整合、例えば構造物同士の干渉や接続部分の延長不足などが確認された。作図の基になった紙図面は、実際に工事発注されたものであり、これらの不整合は施工段階で発覚し、急遽あわてて現場で対応されたと推測される。

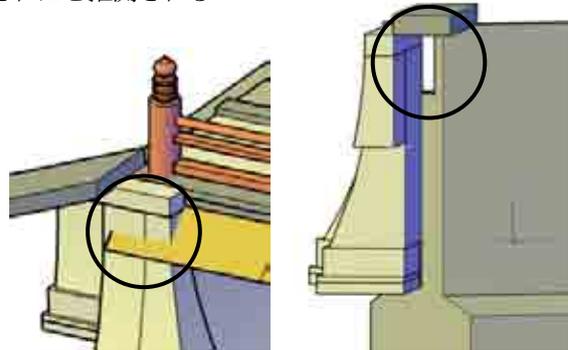


図-13 3次元化により発見された図面の不具合

作成したモデルには、紙図面にはない分かりやすさとインパクトがあり、意思決定や合意形成の場において、大きな力を発揮するものと思われる。

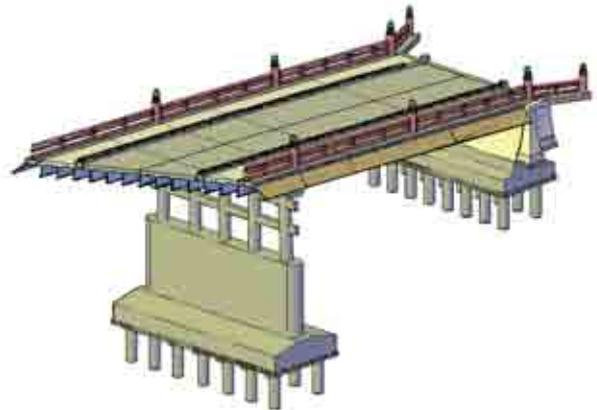


図-14 瀬田唐橋 3次元モデル (細部1)

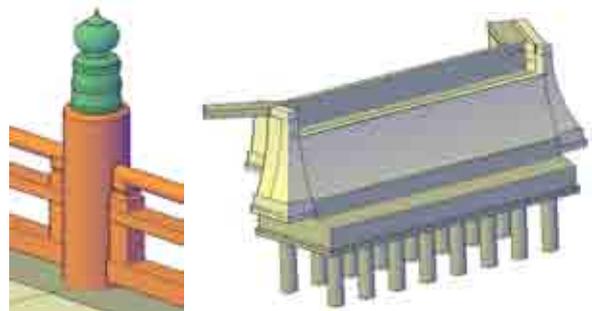


図-15 瀬田唐橋 3次元モデル (細部2)

この取り組みを通じ、地形も含めた細密な3次元モデルを構築・印刷する場合には、作図ツールの充実が不可欠であること、ハードウェアは一般に市販されている最上位程度のものが望ましいこと、また、場合によっては3D印刷用にデフォルメしたデータが必要であるなど、

課題も少なからずあるが、構造物間の不具合が発見できることや、意思決定や合意形成に活用できるなどの効果が確認できた。

今回の作業内容は、通常は設計会社が担う部分である。これを踏まえて、発注者側にどの程度の質・量のハード・ソフト・スキルが求められるのか、インハウス作業による検討や国の制度設計の動向も踏まえながら、引き続き検討していきたい。

(2) 維持管理への活用に関する検討

CIMの部分先行導入の可能性を探るため、非接触による3次元面計測技術の活用を検討した。

a) 写真による3次元モデル化

近年、デジタル写真から3次元モデルを作成するツールが登場し始めている。実際の状況が通常の写真では分かりにくい場合でも、3次元モデル化することにより、円滑で正確な情報共有化を行うことができる。

ツールは多数存在するが、現在のところ、次のように大別され、特性に応じた使い分けが必要である。

表-1 写真の3次元モデル作成ツール大別表

		標定点（ポール・的など）の現地設置	
		あり	なし
ソフトウェア	要操作	高精度 (mm単位図化可能)	中精度 (cm単位図化可能)
	半自動	中精度 (cm単位図化可能)	撮影環境が良ければ 低精度ながら作成可

例えば、災害時であれば、初動時は低精度でも簡易なもの、応急対策の検討には中精度のもの、などステージに応じて活用すれば、強力なツールになり得る。

簡易なものでは、20枚前後の写真を撮影してクラウド上にアップロードすることで、自動的に3次元モデルを作成する無料のアプリケーションが存在する。動作確認を行った結果、屋内で近距離から対象物の全周囲を撮影できる場合は、簡単に3次元モデル化が可能であった。



図-16 簡易アプリによる写真の3次元モデル化の例

土木の現場で、屋外・遠距離・撮影角度限定という条件下にある場合は、現在のアプリではモデル化は難しいが、現場で写真を撮影し、その場でアップロードすることで、県庁や事務所から現地の状況を3次元ですぐに確認することも夢ではなくなりつつある。

また、写真の撮影方式として、ドローンによる航空撮影も注目されている。ジャイロセンサーや加速度センサー技術の進歩により、機体の安定性や操縦性の改良が進み、実際の業務で活用されるケースも増えている。

土木現場特有の遠距離・撮影角度限定といった条件に縛られずに写真を撮影する方法として有効と考えられ、勉強会でも先進企業に依頼して講義・実演を行ってもらい、情報収集に努めているところである。



図-17 勉強会でのドローン実演デモ

ソフトウェア、撮影方式とも、日進月歩の技術であることから、最新の動向に注目しながら、県の実務への導入の可能性について、引き続き検討を進めたい。

b) 地上レーザ3次元測量

3次元面計測で、現在最も精度が高い方法が、地上レーザ計測による3次元測量である。1秒間に3万点のスキニングができ、150m離れた場所から4mmの精度で観測が可能とされる。また、デジタルカメラを内蔵しており、カラーの点群データ（3次元の座標を持った無数の点の集まり）を取得することができる。

点群データから、平面図や任意の断面図を作成することも可能であり、立入りが難しい軌道や接触が難しい高圧線などの測量にも有効である。



図-18 鉄道高架の点群データ

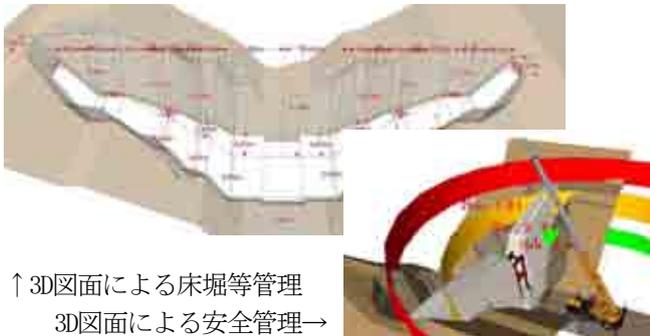
公共測量作業規程の準則第17条特例の代表的な手法となっているが、現場条件によっては、現地計測やデータ処理作業に時間を要すことや、機器検定の基準がないなどの課題が残る。これらの利点と課題を理解したうえで使用すれば、現時点でも効果的な測量手法といえる。

(3) その他の取り組み

a) 各委員の取り組み

各委員もそれぞれテーマを持って作業にあたり、勉強会での報告を行っている。過去3回の勉強会では、3次元CADのトレーニング、CIM関連の情報収集、写真による3次元モデル化の試行、CIMを活用した施工事例の報告などがなされた。

特に、CIMを活用した施工事例報告は、県発注工事での実例であり、業界の取り組み速度と進捗に対して、勉強会でも驚きの声が上がった。



↑3D図面による床掘等管理
3D図面による安全管理→

図-19 勉強会で報告されたCIMを活用した施工事例

砂防施設の工事において、床掘の寸法や切り出し位置の確認やクレーン能力図による安全管理など、様々な場面で3次元図面を活用しながら施工が進められており、先進的なモデルケースになる事例である。

勉強会の委員は、CIMが差し迫った話であることを、肌で感じるようになった。それぞれの所属で情報の共有化が図られ、県の技術職員に認識が広まっていくことを期待している。

b) 現場見学会（2014年10月27日実施）

勉強会の委員をはじめ18名の参加のもと、国のCIM試行工事（2(3)参照）である国道161号交差点立体化事業の現場見学会を実施した。2012年度に行われたCIM試行設計の成果を基とした高架橋の下部工事であり、CIMの施工段階における課題や効果の検証が行われている。

CIMの効果面としては、3次元モデルを活用することで、複雑な配筋施工に関する協議や、新規入場者への安全教育を円滑に実施できるところが挙げられた。

課題としては、維持管理段階へ引き渡すために施工情報をモデルに反映していく必要があるが、現場で実施できる作業の質・量の限界がある一方、その効果が限定的である面が挙げられた。

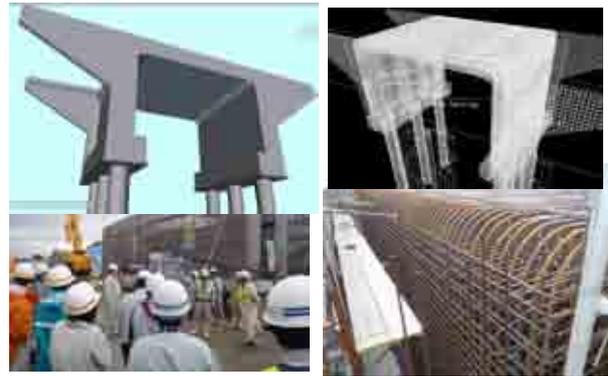


図-20 国のCIM試行工事 現場見学会

5. 2015年度の取り組み予定

(1) 試行測量および試行設計の実施

2014年度に説明力を確認した3次元モデルや、地上レーザ3次元測量・3次元写真測量などの最新測量技術について、その効果と課題を検証するため、試行測量・設計を行う予定である。

(2) 試行工事の実施

総合評価方式の加点措置を活用して、3次元モデルによる施工管理を行う試行工事を実施し、効果と課題の検証、県内事業者の現状把握と意識向上を図る予定である。

(3) 維持管理への活用検討

ドローン、3Dハンドスキャナを試行導入し、維持管理や災害時の状況確認への活用を検討する予定である。

6. おわりに

CIMが産声を上げて、まだ数年である。しかし、各方面での動きは速く、CALISが建設生産システムにもたらしたようなイノベーションが、CIMによって再び、あるいは上回って訪れることは確実である。

滋賀県として、この技術革新の恩恵をいち早く享受するため、流れの最先端に身をおきながら、今後も検討を進めていきたいと考えている。

<付録 ※瀬田唐橋について>

瀬田の長橋として、日本書紀にも登場する名橋。京都の喉元に当たる交通・軍事の要衝で「唐橋を制するものは天下を制する」と言われた。ことわざ「急がば回れ」は、「武士（もののふ）のやばせの舟は早くとも急がば廻れ瀬田の長橋」の歌が語源と言われる。

<参考文献>

- 1) 国土交通省における CIM の取り組みについて（土木学会 CIM 講演会 2014 資料）
- 2) CIM 技術検討会：CIM 技術検討会 平成 25 年度報告

山岳道路工事における情報化施工の試みについて

山本 一浩¹

¹近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 (〒668-0025豊岡市幸町10-3)

情報化施工は、建設事業における「施工」において、情報通信技術（Information and Communication Technology：以下ICT）の活用により、各プロセスから得られる電子情報をやりとりして高効率・高精度な施工を実現するものであり¹、近畿地方整備局管内においても多くの工事で実施され、一般化に向けた取組が行われている。

本報告は、急峻な地形における掘削工事及び汎地球測位航法衛星システム（Global Navigation Satellite System：以下GNSS）が利用できないといった条件のもとで、マシンガイダンス技術を活用した情報化施工を行い、マシンガイダンスによる工事实施に向けた、データ変換や現場での施工状況及び課題についてとりまとめたものである。

キーワード：情報化施工，3DバックホウMG，データ変換

1. はじめに

近年、建設施工の分野にも情報通信技術が積極的に導入されるようになり、国土交通省においても情報化施工の実施を推進している。情報化施工とは、電子情報技術の活用によって建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図るものであり、建設機械のマシンコントロール技術やTS・GNSS等による出来形管理技術、各種センサー等を用いた品質管理技術などが実用化されている。情報化施工には、現場作業の効率化（工期短縮・省人化）や熟練作業員不足の解消、工事現場の安全性向上、建設現場のイメージ改善、技術競争力の強化など多くの効果が期待されており、道路工事においては路床・路盤の敷均しや転圧回数管理、出来形管理などが、大規模工事現場を中心に導入されつつある²。

一方、小規模な現場においては、導入コスト等に対してメリットが小さくなる傾向にあるため、あまり導入は進んでおらず、実績が少ないのが現状である。

このように、情報化施工導入のメリットが小さいと考えられる小規模工事において、情報化施工の目的のひとつである工期短縮やコスト削減について、足羽川ダム建設事業に伴う工事用道路を対象として、情報化施工を試みた。

2. 情報化施工の対象工事

足羽川ダム計画は、足羽川、日野川、九頭竜川の下流域における洪水被害の軽減を目的として、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）に洪水調節専用のダム（以下：流水型ダム）と併せ

て、他流域の4河川（水海川、足羽川、割谷川、赤谷川）の洪水を導水するための分水施設（堰・導水路）を整備するものである。（図-1、表-1）



図-1 足羽川ダム建設予定地

表-1 足羽川ダムの諸元

目的	洪水調節専用
ダム形式	重力式コンクリートダム
規模	ダム高：約96m、堤頂長：約460m、貯水面積：約94ha 導水施設：1期工事(水海川・径約10m) [全体計画：4川導水]

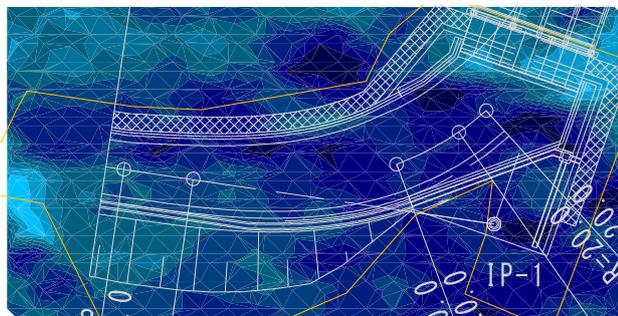
この足羽川ダム事業は2026年度（平成38年度）完成を目指し、2014年度（平成26年度）に工事用道路とともに付替県道に着手した。この工事中で急峻な山岳地形において、補強土壁の床堀と道路本体の切土が存在し複雑な土工が必要となる、足羽川ダム進入部3号工事用道路（以下：3号工事用道路）を情報化施工の対象とし施工を試みた。

3. 対象工事の特徴

3号工事用道路は、部子川左岸に計画されている付替県道を施工するための道路であり、右岸側にある現県道から対岸に渡る仮橋を設置し、付替県道までのアクセス道路の一部を施行するものである。この道路部の箇所が急峻な地形（最大44度、平均34度）であるとともに、渡河橋から半径20mの平面線形での計画となっている。

（図-2）また、地形が急峻であるため盛土構造での施工は不可能であることから、補強土壁による計画となっている。

したがって、この箇所の掘削工事は、道路切土の施工と補強土壁の床堀が混在する複雑な施工となるため、通常施工で丁張りを数回に分けて設置する必要がある。前述しているように当該工事箇所は急峻であるため、丁張り設置及び重機による施工において安全性を確保するため、慎重に進める必要があり、工程に大きく影響することとなる。なお、当該地区は豪雪地帯であるため、12月までには完成させる必要があり、工期を少しでも短縮する必要がある。



凡例 (度) 21 24 28 31 34 38 41 44

図-2 掘削範囲の勾配分布

このような条件の下において、安全かつ工期短縮が可能である工法を考慮し、本工事において小規模工事に一般的に向いていないとされている情報化施工を導入することとした。なお、情報化施工に用いる工法としてはバックホウによるマシンガイダンス（以下：3DバックホウMG）とした。

3DバックホウMGは、3次元の設計データを用意することで、高さガイダンスを行うことができ、丁張りなしで切り出し位置を決定できる。また、従来施工のような「丁張り間」は存在しなくなり、どこにでも架空の丁張りが存在するのと同様の状態が生成され、高精度な仕上げが可能となる。丁張りの設置は形状が複雑な現場では大変な負担となるほか、本工事箇所のような急斜面での設置は安全面においても注意を払う必要があるが、3DバックホウMGを使用することにより、測量作業から解放されるとともに、安全性も確保できることとなる。また、丁張り作業で測量及び設置作業を待たずに次の工程に進むことが可能であるため、工期短縮が期待できる。3DバックホウMGの概要を図-3に、従来施工との工程比較を図-4に示す。なお、重機の位置情報については、工事箇所が山間部でGNSSが利用できないため、今回はTS追尾型とした。

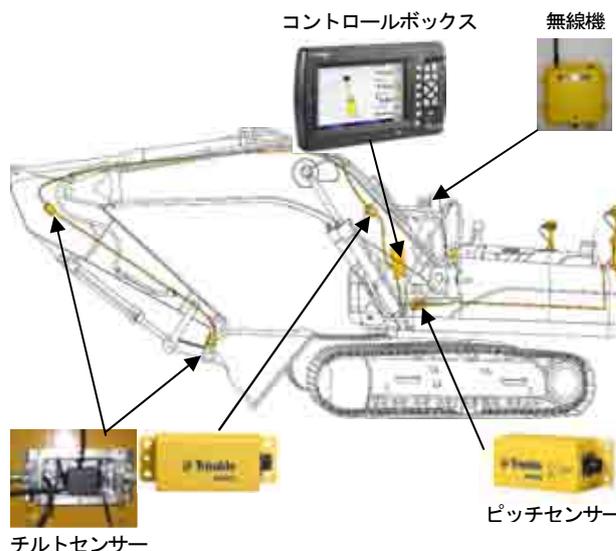


図-3 3DバックホウMGの概要

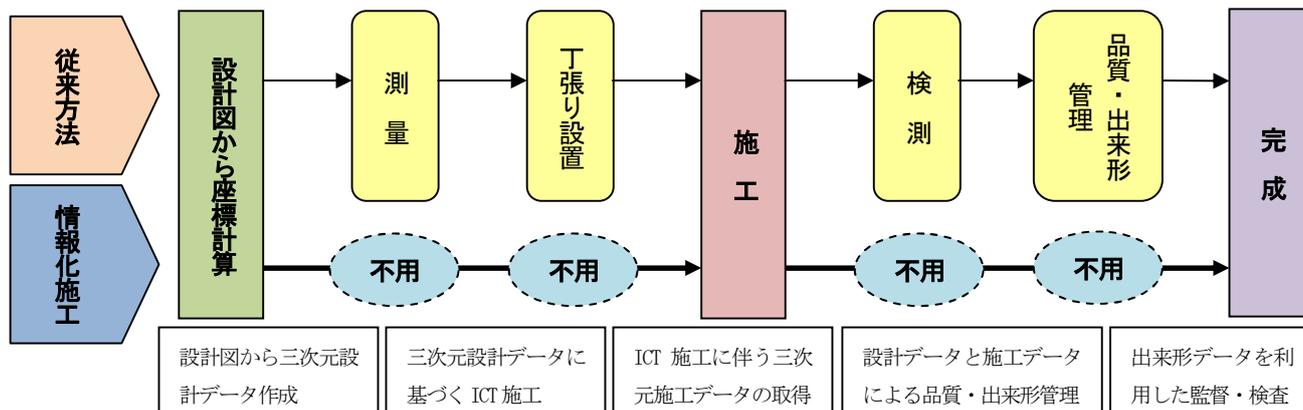


図-4 従来方法との比較

4. 3次元データの生成

(1) データの生成

前章でも述べたとおり、道路部の土工では、道路法面の切土(1:1.0)と補強壁の床堀(土砂部1:0.6, 軟岩部1:0.3)と同じ断面において3つの掘削勾配が存在する。情報化施工を行うためには、それぞれの工程に合わせた、切土及び床堀の3次元のアウトラインデータが必要となる。

今回は、地形データにLPデータを使用しサーフェスから計画掘削勾配を元にそれぞれの3次元アウトラインを生成した。これにより生成された3次元データを図-5に示す。

(2) システム入力用データ変換

前項で生成された3次元データのフォーマットはCADソフト固有のものであり、マシンガイダンス用のフォーマットに変換する必要がある。今回は、LandXMLを中間フォーマットとし機械の制御データ交換を行った。データの流れを図-6に示す。

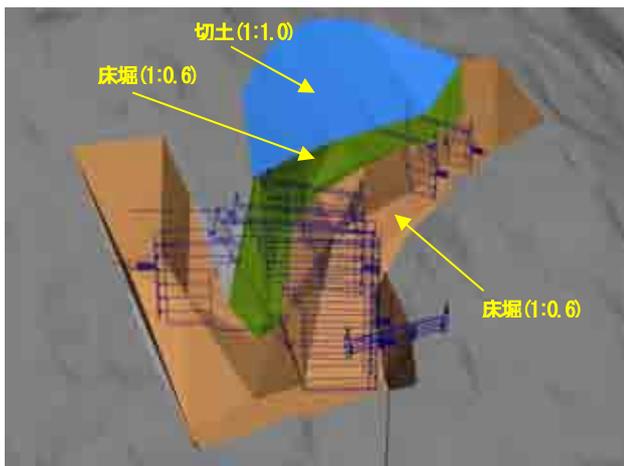


図-5 3次元モデル生成

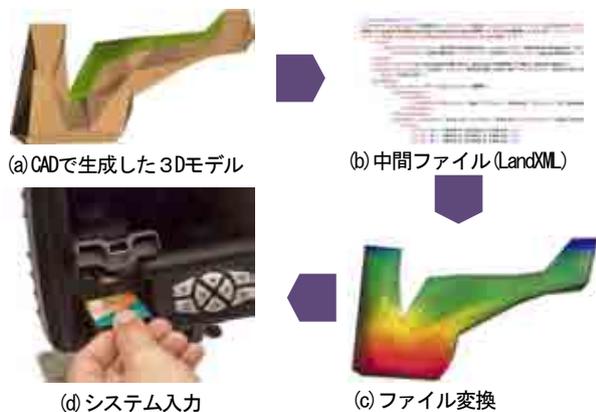


図-6 システム入力用データ変換

5. 工事の実施

3DバックホウMGによる工事は道路の切土法面の切り出しからとなる。通常なら丁張りの目視操作での施工となるが、3DバックホウMGの場合はコントロールボックスからの誘導を画面上で確認しながらの操作となる。(図-7)



図-7 コントロールボックスによるガイダンス

オペレータは運転席で入力されている3次元データに基づいた仕上がりラインの表示画面と、仕上がり高さとの差分が表示され、これらの情報に基づき機械操作を行う。(図-8) この繰り返しにより、土工部の完成形へと近づいていく。情報化施工による施工中及び完成後の土工部の画像を図-9に示す。

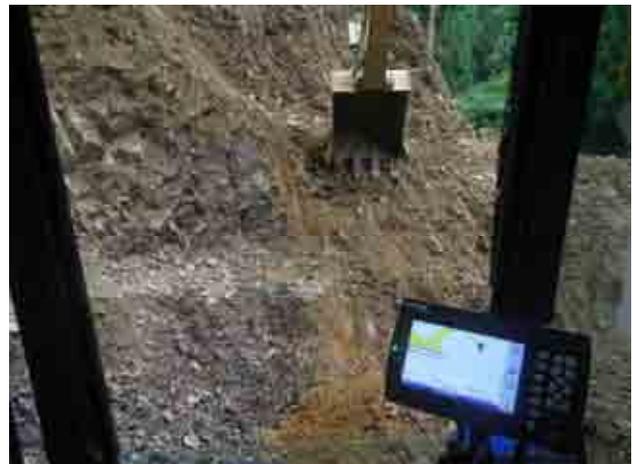


図-8 ガイダンスによるバケットの操作状況

6. おわりに

掘削や法面整形作業においては、熟練度が必要なオペレーターや、個人の技量により仕上精度と施工速度に大きなばらつきが発生するが、3DバックホウMGによる施工では、非常に良好な施工が出来ることが確認できた。なお、今回のオペレーターは3DバックホウMGでの操作は、はじめての操作であったが、工程の初期の段階から



図-9 施工中及び完成後の状況

最終までスムーズに施工が実施できた上に、作業範囲内ではバックホウのみで作業が可能であるため、安全に作業を進めることができた。また、丁張りの設置作業が省かれたことで、工期短縮も図ることができた。

一方デメリットとしては、①慣れるまではモニタに注意を取られ周囲確認が不十分になりがちとなる、②システムに異常があった場合、作業が停止するといった2点が上げられるが、今回の工事においては、前述のデメリットについては、支障なく工事を進めることができた。

本工事は大規模ではなく、山間部の急峻な狭い範囲での施工であったが、3DバックホウMGによる効果が確認できたことで、他の同じような場所での工事にも活用できるものと思われる。

今後、情報化施工の普及により、早く、高品質で、かつ、安全な工事ができることを期待したい。

なお、本論文は前所属である近畿地方整備局足羽川ダム工事事務所の所掌内容について述べたものである。

謝辞：本工事の受注者である(株)道端組及び工事担当者の各位におかれましては情報化施工実施に向けて多大なご協力を頂いたとともに、本報告を作成するにあたり各種データの提供を頂いたことに対し、この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略，pp1, 2013
- 2) 小川裕樹：情報化施工の普及に発注者は何ができるかー現場を中心に考えるー，国土交通省国土技術研究会，2009.

流域における水循環系理解のための同位体技術の適用 —福井県大野盆地における事例—

池田 浩一

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 (〒305-0821茨城県つくば市天王台1-1-1)

地下水資源は有限であり、適切な管理が必要である。地下水は、地域特有の地質および水循環と人為的な水循環の影響を受け成り立っている貴重な水資源と認識することが極めて重要である。同位体技術を用いた検討では、山地から平野への地形的な変換域が地下水涵養域として重要であることが示され、これらを意識した理解が、持続可能性を検討する際には重要となる。

キーワード 地下水, 水循環, 水素・酸素安定同位体比, ストロンチウム同位体組成

1. はじめに

地下水資源は有限であり、適切な管理が必要である。しかし、近年、地下水位の低下に伴う井戸枯れ、湧水の枯渇、あるいは水質汚染などの問題が発生している。魅力的な地域づくりを進めるためには、地下水を将来にわたって活用できる状態にしていくことが不可欠である。

大野市では、1960年代から地下水位低下の問題が発生している。これは、上流域における電源・農業開発に伴う地下水涵養量の減少および下流域における繊維工業の発展に伴う地下水揚水量の増加が素因として影響していることが報告されている¹⁾。また、地下水による融雪を誘因として突発的に井戸枯れが発生していることが述べられている¹⁾。

そのため、近年、大野市では地下水が地域特有の地質および水循環と人為的な水循環の影響を受け成り立っている貴重な水資源と認識(図-1参照)し、「持続的な地下水の保全と利用の調和」を基本理念として、地域全体で保全対策に取り組んでいる²⁾。その一環として、大きな保水能力を持つ森林や水田の涵養機能を可能な限り保全していく施策が挙げられ²⁾、その過程において涵養による機能を最大限活用するためには、大野市全域を考慮した水循環系の理解が極めて重要になってくる。

そこで本稿では水の挙動に依存する特性を持ち、涵養標高や地下水流動過程を検討する際に用いられる水素・酸素安定同位体比と水中に溶存する形態で存在し、流域を構成する岩石の同位体比を反映するストロンチウム同位体組成(以下Sr同位体組成)を用いて、流域における水循環系の検討を行った事例について報告する。

2. 同位体技術の適用

水循環系の理解に用いられる水素・酸素安定同位体を含む軽元素同位体が、地表水や地下水などの各種環境水を対象に研究され始めたのは1960年代であり、主に国際原子力機関(IAEA)を中心に推進され、1970年代には同位体水文学という新しい学問分野を生み出した³⁾。

同位体は、同じ元素でありながら、質量が異なる原子を表しており、その同位体には、放射性を発生して壊変する不安定な放射性同位体と、常に安定な安定同位体が存在する。質量数の違いにより物質の物理的・化学的性質が異なる現象は同位体効果と呼ばれ、軽元素において顕著であることが知られている⁴⁾。一般的に地下水や地表水のトレーサーとして用いられる水素・酸素安定同位体比は、水の涵養源やプロセスなどを検討するために利用される⁵⁾。

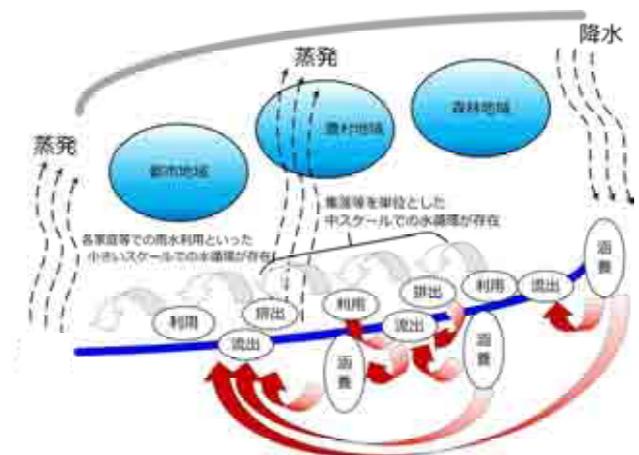


図-1 流域スケールにおける水循環系の概念

これは、同位体比における同位体分別を利用して、水が涵養された標高や地域、また、降水量による影響を検討するのに有効である⁶⁾。

近年では、水の挙動に依存する軽元素同位体とは異なる挙動を示すSr同位体がトレーサーとして利用されている⁷⁾。Sr同位体は水中に溶存する形態で存在し、軽元素安定同位体で見られるような蒸発・拡散・酸化還元といった物理化学過程や生物における代謝過程での同位体分別が無視できると考えられており、異なるSr同位体組成をもつ物質の混合過程によってのみ値が変化するという特徴がある。

3. 大野盆地および周辺地域概要

福井県大野市で利用される地下水は大部分が不圧（浅層）地下水であり、市街地において盛んに利用されている。市街地には名水百選の一つである「御清水」や、イトヨの生息地として国の天然記念物に指定されている「本願清水」をはじめ、数多くの湧水が点在する。

福井県地方気象台の観測によると、大野市は年間2368mm（昭和52年～平成13年平均値）の降水があり、全国平均の約1800mmを大きく上回っている⁸⁾。

大野市で見られる地形は、山地、段丘、および低地に大別される⁸⁾。図-2に示すように山地は大野盆地の周囲を占め、北東部は加賀越前山地、南部は美濃越前山地、西部は越前中央山地が連なる。また、大野盆地は主に段丘（中位・低位面）と岩層なだれ（火山性泥流堆積物）、氾濫原により構成される。表層地質についてみると、大野盆地の四囲の山地を構成する地質は図-3に示すように、飛騨片麻岩・結晶片岩地から成る変成岩類、砂岩・頁岩などの堆積岩、これらに貫入する花崗岩・閃緑岩、あるいは安山岩ならびに火山性碎屑岩類などから構成される⁸⁾。また、中生代より古い地層は大野盆地の東～南域に分布し、新第三紀以降の安山岩やこれに伴う火山性碎屑岩類は分地の北～西域に広く分布する⁸⁾。盆地内を流れる九頭竜川、真名川、清滝川、赤根川の4河川について地形的流域で分類し、各々の流域面積を算出すると、それぞれ597.66km²、259.85km²、40.48km²、44.53km²となる。

4. 調査概要

同位体技術の適用による水循環系の理解の手法において、現地調査、室内分析、降水採取を行い、それらの結果を基に解析を行った。詳細については、以下に示す。

(1) 現地調査

調査は2013年10月21日から11月21日にかけて実施した。

地下水255地点、湧水3地点、地表水112地点を対象に調査を行った。採水地点については、図-2に示しており、赤い●印は地表水調査地点を、黒い●印は地下水調査地点を示す。

(2) 室内分析

現地で採取した水試料について、水素・酸素安定同位体比は、水同位体アナライザー（Picarro L2130-i）を用いて $\delta^{18}\text{O}$ および δD の同位体比を測定した。また、Sr同位体組成は、高分解能マルチコレクターICP-MS（サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社二重収束型マルチコレクターICP-MS NEPTUNE）を用いて $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ について測定した。

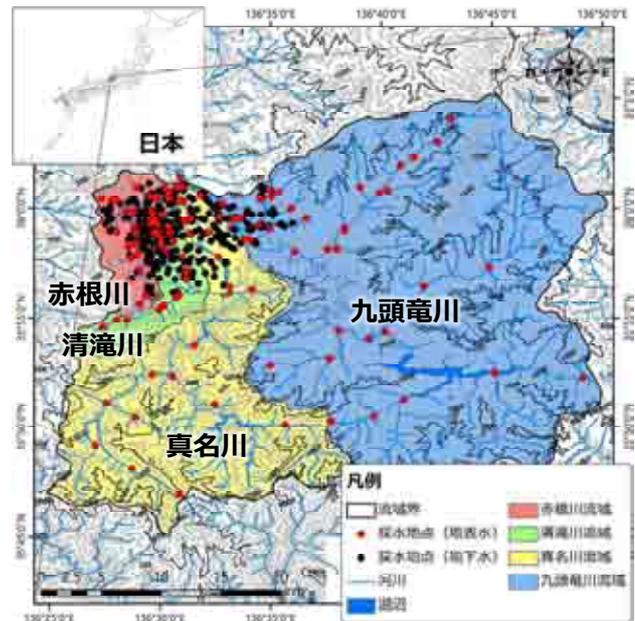


図-2 大野盆地を含む流域の地形図

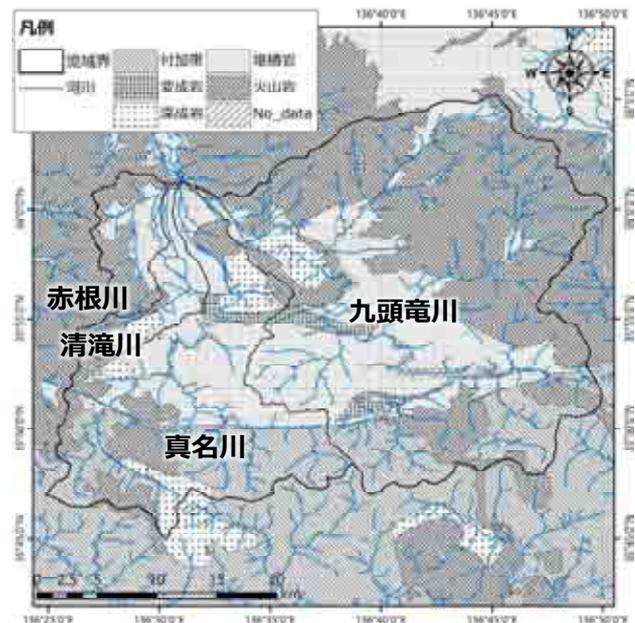


図-3 大野盆地を含む流域の地質図
（産業総合研究所より作成⁹⁾）

5. 同位体マッピングによる水循環系の把握

(1) 涵養域における地表水の同位体の特徴

a) 酸素安定同位体比の空間分布

各流域の地表水の酸素安定同位体比は、涵養された平均標高を反映する。複数の支流が流下し、さらに本流と合流する過程において各々の河川の同位体比が特徴づけられる。図-4で示すように、標高が低い赤根川で最も高い値を示し、東に進むに従い同位体比は低くなり、九頭竜川において最も低い値を示す。

b) Sr同位体組成の空間分布

Sr同位体組成は、地質の形成年代に依存し、形成年代の若い火山岩地域が卓越する赤根川流域において、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は低い値を示す。形成年代の古い地質が卓越する地域において $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は高くなる。同様に、形成年代の若い火山岩が卓越する九頭竜川支流の唐谷川流域において、0.7072-0.7076程度を示す。堆積岩や付加帯が卓越する地域において、相対的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高い値を示す傾向にあるが、流域全体の示す傾向として、地質の形成年代が西から東に向かって古くなる傾向に則り、赤根川において $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が低い値を示し、東に進むに従い高くなり、九頭竜川において最も高い値を示す。

(3) 盆地域における地下水の同位体の特徴

a) 酸素安定同位体比の空間分布

大野盆地における地下水の酸素安定同位体比の空間分布を図-5に示す。赤根川流域は、盆地南部において河川から涵養が強い傾向がみられ、流域の涵養標高により特徴づけられた地下水の流動が支配的である。ただし、赤

根川流域の地下水および河川水と降水の $\delta^{18}\text{O}$ の差が小さいことから、明瞭な差があるように見えない特徴を有する。清滝川流域は、盆地南部において、降水と河川水との混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられ、地形勾配に則り、南から北へ向かう地下水の流動が支配的であることが示唆される。真名川流域は、左岸と右岸では地形的特徴が異なるため、各々考察する必要がある。左岸側は地形区分では氾濫原として、右岸側は段丘の中位面として扱われている⁹⁾。左岸は清滝川流域のプロセスと同様に、盆地南部において相対的に同位体比の低い河川水と降水の $\delta^{18}\text{O}$ の混合により地下水の同位体比が特徴づけられ、それらが地形勾配に則り、南から北に向かう地下水の流動が支配的である。右岸は局所的に $\delta^{18}\text{O}$ の高い地点が確認され、降水による涵養の影響が強く見えるが、詳細については検討が必要である。九頭竜川流域においても左岸と右岸では地形的特徴が異なるため、各々考察が必要である。左岸側は氾濫原として、右岸側は火山泥流により形成される地域として扱われている⁹⁾。左岸側は盆地南部において相対的に $\delta^{18}\text{O}$ の低い河川水と降水の同位体比の混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられ、それらが地形勾配に則り、南から北に向かう地下水の流動が支配的である。右岸側は、上流域で涵養され特徴づけられた地下水が地形勾配により東から西に向かって流下し、その後標高の低い地点において降水との混合により地下水の $\delta^{18}\text{O}$ が特徴づけられる。また盆地北部において、河川水に比べて相対的に $\delta^{18}\text{O}$ の高い地下水が河川へ流入することにより、河川水の値が高くなる地点が確認された。

b) Sr同位体組成の空間分布

赤根川流域は、盆地南部において河川から地下水へ涵養され、それが流下する傾向と、西側山地から地質を反

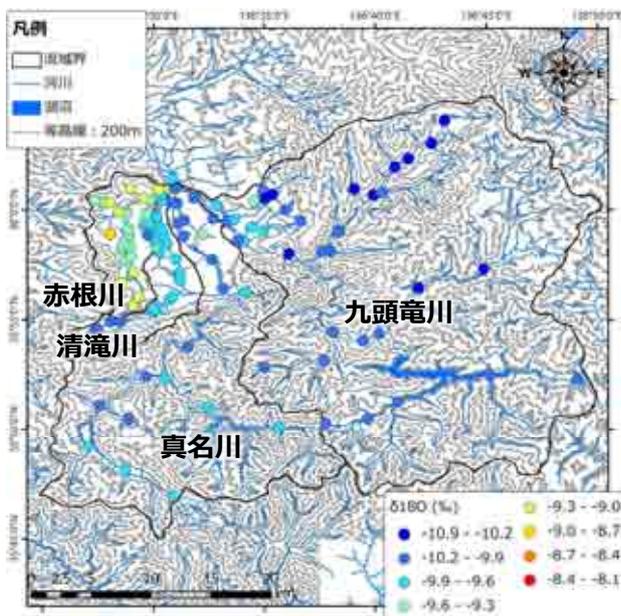


図-4 涵養域における地表水の酸素安定同位体比

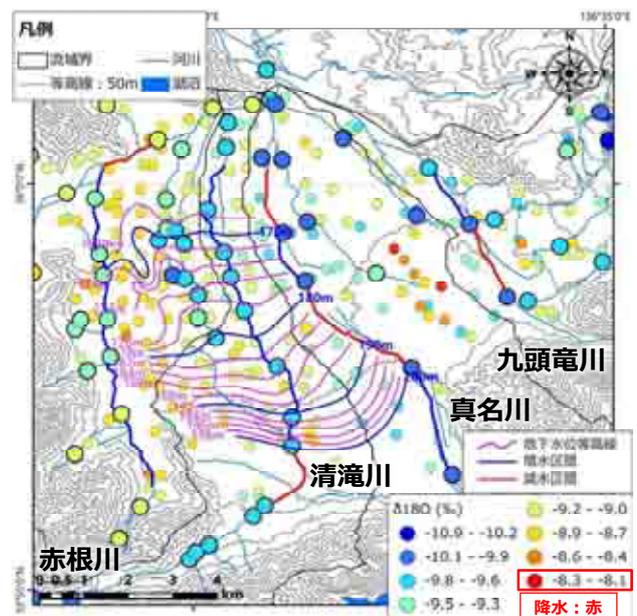


図-5 大野盆地における地下水の酸素安定同位体比

映した地表水および地下水の流入により流域内の地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられている。清滝川流域は、盆地南部において、河川水と降水との混合により地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられ、地形勾配に則り、南から北へ流下する。盆地中央部において、真名川流域で特徴づけられた地下水の影響により、盆地中央部から北部の狭窄部に向けて高い値を示す。酸素安定同位体比では変化が明瞭に見られなかったが、清滝川の河川水は真名川流域の地下水の影響により、流下に伴い河川水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高くなる傾向を示す。また、これらは現地で測定した地下水位の空間的な特徴および河川流量の状況から見られる結果と概ね一致している。真名川流域の左岸側は、盆地南部において河川から涵養が強い傾向がみられ、降水との混合により特徴づけられた地下水の流動が支配的である。右岸側では、段丘の中位面の南部に位置する荒島岳において特徴づけられた地下水が段丘方向に流下し、その後、降水との混合により、段丘の地下水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が特徴づけられている可能性が示唆されるが、詳細については検討が必要である。九頭竜川流域の右岸側は、地質を反映した $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の低い地下水が東から西に向かう流動が支配的であると示唆される。また酸素安定同位体比の傾向と同様に、盆地北部において、河川水に比べて相対的に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が低い地下水が河川へ流入することにより、河川水の値が低くなる地点が確認された。左岸側では、盆地南部で河川水と降水との混合により特徴づけられた地下水が南から北に向かって流下する。後に盆地北部において河川から地下水への涵養が支配的な地点が見受けられ、その影響により特徴づけられた地下水が、狭窄部に向かう流動が支配的であることが示唆される。

5. まとめ

各同位体より推定される大野盆地における各河川とその近傍の地下水の関係について、以下のような特徴を持つ。

- 1) 赤根川流域の地下水は、盆地南部で涵養された地下水と西側山地より流下する地表水および地下水を受け特徴づけられている。
- 2) 清滝川流域の地下水は、盆地南部において河川水と降水の混合により特徴づけられ、それらが南から北へ向かう流動が支配的である。盆地中央部において真名川流域の地下水の影響を受けている傾向がみられ、それらの地下水が河川に流入することにより、河川の同位体組成は流下に伴い変化する。よって、清滝川は得水河川として機能している可能性が示唆される。
- 3) 真名川流域の左岸側の地下水は、盆地南部において南から北へ向かう流動が支配的である。右岸側の地下水は、段丘南部に位置する荒島岳から流下する地

下水が、段丘地域において降水による涵養の影響を受けている可能性が示唆されるが、詳細については更なる検討が必要である。

- 4) 九頭竜川流域の左岸側地下水は、盆地南部において河川水と降水の混合により特徴づけられ、盆地中央部に向けて南から北に向かう流動が支配的である。盆地中央部にて、河川からの涵養による影響を受けた地下水が、狭窄部に向かう流動が支配的であることが示唆される。右岸側は、標高の高い地域で涵養された地下水が、地形勾配に則り東から西に向かう流動が支配的である。
- 5) 河川からの影響度合いは各々の河川により異なるが、盆地南部、すなわち山地から平野への地形的な変換域が地下水涵養域として重要である。これらを意識した水循環系の理解が、水資源の持続可能性を検討する際には重要となる。

謝辞：大野市役所 産経建設部の職員の方々をはじめ、地下水調査にご協力いただいた大野市の住民の方々、分析にご協力いただいた総合地球環境学研究所の中野孝教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 杉谷 隆 (2001) : 福井県大野盆地の家庭浅井戸枯渇問題に見る住民の環境認識. 地学雑誌, 110 (3), 339-354.
- 2) 大野市役所生活環境課 (2006) : 大野市地下水保全計画. 41p.
- 3) 水谷義彦 (1989) : 環境水の地球化学的研究における水素同位体の役割. 富山大学トリリウム科学センター研究報告. 9, 23-37.
- 4) 松尾禎士 (1989) : 地球化学. 講談社, 266p.
- 5) 田瀬則雄 (2003) : 水文学における環境同位体の利用. 工業化学, 67, 97-99.
- 6) Tsujimura, M., Ikeda, K., Tanaka, T., Janchivdorj, L., Erdenchimeg, B., Unurjargal, D. and Jayakumar, R. (2013) : Groundwater and surface water interactions in an alluvial plain, Tuul River Basin, Ulaanbaatar, Mongolia. Sciences in Cold and Arid Regions, 5 (1), 126-132.
- 7) Nakano, T., Saitoh, Y., Tokumasu, M. (2008) : Geological and human impacts on the aquifer system of the Saijo basin, western Japan. Proceedings of 36th IAH Congress.
- 8) 大野市 (2003) : 大野市地下水総合調査業務概要報告書, 57p.
- 9) 産業技術総合研究所 (2014) : 日本シームレス地質図. <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (2015/6/5 閲覧) .

FRP合成床版を用いた人力施工による 床版拡幅について

久保 圭吾

宮地エンジニアリング(株) 橋梁営業部FRP・保全開発グループ (〒103-0006東京都中央区日本橋富沢町9-19)

FRP合成床版は、耐久性に優れ、長支間床版にも適用できるが、鋼コンクリート合成床版などと比べ初期コストが高いことから、適用実績は少ない。しかしながら、耐食性に優れ塗装の塗り替えが不要となることから維持管理が容易であり、施工時のFRPパネルが軽量となることから、跨道橋や跨線橋などの一括架設、送り出し架設などの橋梁での適用が増加しつつある。ここでは、国道2号線菅公橋でFRP合成床版を人力施工した事例をもとに施工性について報告する。

キーワード FRP, 合成床版, 床版拡幅, 人力施工

1. はじめに

菅公橋は、図-1に示すように国道2号のJR塩屋駅東側の海岸線に位置しており、JR神戸線と交差する跨線橋である。本橋は、昭和6年に竣工し、供用後約80年経過しており、昭和53年にRC床版がI型鋼格子床版に取り替えられている。

本工事は、神戸市須磨～垂水区泉が丘1丁目の現況2車線を3車線化する事業の一環で橋梁部の拡幅を行うものであり、床版部の拡幅は既設部と同様にI型鋼格子床版で計画されていた。しかし、菅公橋は、JR・山陽電車に



図-1 菅公橋の位置

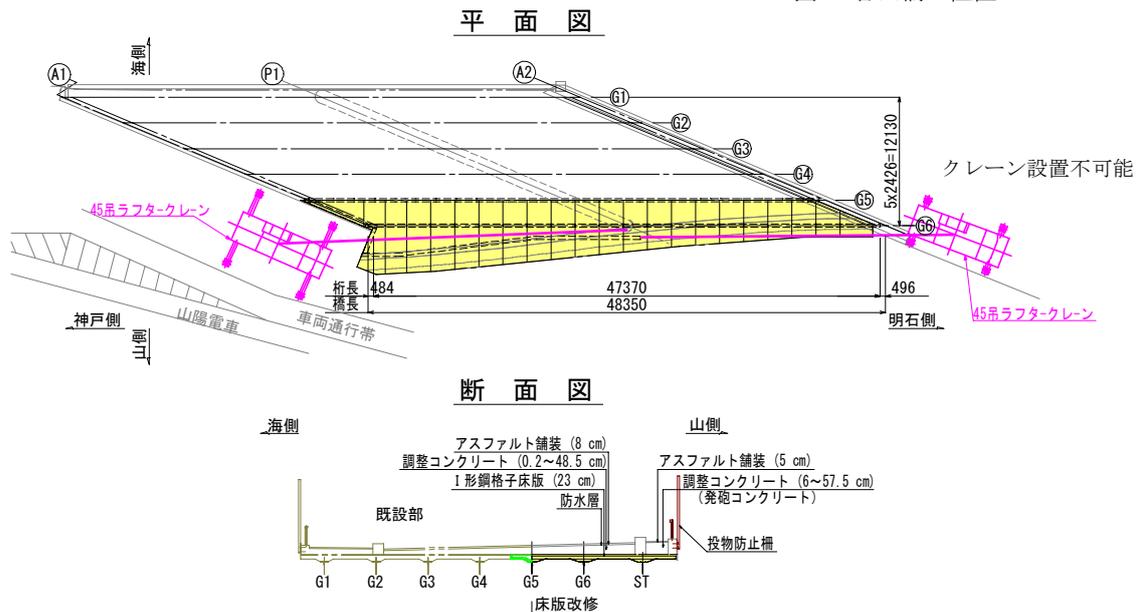


図-2 床版拡幅の範囲とI型鋼格子床版の架設計画

挟まれた狭隘なスペースでの施工であり、図-2に示すようにI型鋼格子床版のパネルを設置するためのクレーンが設置できないことから、施工方法の見直しが必要となった。また、本橋は、海から近く飛来塩分の影響により既設のI型鋼格子床版の底鋼板が腐食しており、維持管理の面でも課題となった。このような背景のもと、架設時の床版パネルが軽量で人力施工が可能となり、耐食性にも優れたFRP合成床版¹⁾が採用された。ここでは、FRP合成床版を人力施工した施工状況について報告する。

2. 床版形式の選定

本工事の床版形式は、既設床版に合わせるためI型鋼格子床版で計画されていた。既設床版は、昭和53年の床版取り替え時に、JR上での施工となることから急速施工が求められたこと、床版死荷重を増やさず耐久性が向上できることなどの理由により選定されたものと考えられることから、本施工においても同様の性能を確保する必要がある。また、既設のI型鋼格子床版は、飛来塩分の影響により、図-3に示すように底鋼板に腐食が生じており、腐食が進行すると錆片の落下が懸念されるだけでなく、検査路も設置されていないことから十分な点検が実施されず、コンクリート片の線路上への落下などによる重大事故にも繋がる可能性も考えられる。

このため、表-1に示すように、施工性のみならず、維持管理性についても比較検討を行った。この結果、当初計画されていたI型鋼格子床版と比較し、FRP合成床版は、床版パネル架設時の重量が軽く人力施工が可能となり、耐久性の向上、維持管理性の向上などが図れるこ

とが確認されたことから、本橋の床版形式として、FRP合成床版が採用された。

3. FRP合成床版の施工

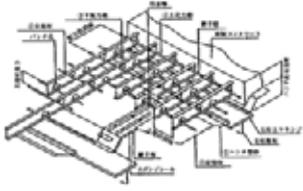
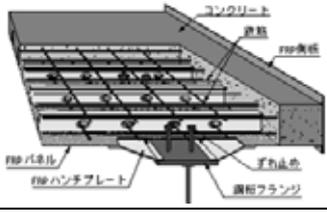
(1) FRPパネルの配置

FRPパネルの配置は、人力施工とするため、1つのパネル重量が80kgを超えないように分割した。このときのFRPパネルはコンクリート打設時の型枠・支保工としての機能も確保する必要があることから、幅員方向には分割せずFRP材料の成形幅(600mm)とし、幅員が狭くなる部分については80kgを超えない範囲で複数枚を工場で組み合わせた。なお、桁端部については、形状が複雑となることから一般部と平行に配置し、主桁や端横桁で支持できない箇所に対しては、コンクリート打設時に橋台から支持することで対応した。このときのFRPパネルの配置を図-4に示す。



図-3 底鋼板の腐食状況

表-1 床版形式の比較

	I型鋼格子床版	FRP合成床版
構造図		
構造概要	I型鋼を主部材とし、これに異形鉄筋を交差配置した鋼格子骨組みとコンクリートの合成床版で、コンクリート打設用の型枠として薄い亜鉛メッキ鋼板が取り付けられている。	リブ付きで一体成形されたFRP材を支保工兼用の永久型枠として使用し、コンクリート硬化後はRCと合成して後死荷重・活荷重に抵抗する合成床版。
床版厚	230mm	230mm
床版死荷重	5.98 kN/m ²	5.63 kN/m ²
パネル重量	85kg/m ² (鉄筋含)	20kg/m ² (鉄筋除く)
施工性	クレーンを使用した夜間施工となり、作業時間が非常に短いことから、一日の施工量が極端に減少する。	昼間の手運び作業であるが、床版パネルを人が運べる重量にする必要があるため、通常の床版よりパネル数が多くなる。鉄筋がリブを貫通するため、設置毎に鉄筋を差し込む必要がある。
安全性	夜間のクレーン作業になるため、部材の取り扱いには細心の注意が必要となる。(上空の電線・第三者交通との接触)	人力による運搬となるため、電線・第三者交通との接触の可能性は少ないが、運搬経路に注意が必要である。
耐久性	下側かぶり分を加えた厚さのRC床版と同程度の耐久性を有する。	移動繰り返し荷重に対して、RC床版の10倍以上の耐久性を有する。
維持管理性	底板がうすく、飛来塩分により腐食する場合がある。この場合、底板を撤去することで対応できるが、線路上であるため施工が困難。主部材のI型鋼が腐食した場合は、床版を全面的に取り換える必要がある。	耐水性、耐食性に優れており維持管理が容易となる。特に、塩分に対しては優れた耐食性を有する。コンクリートが破壊してもFRPが健全であるため、部分的な打ち換えて対応可能。
工程	作業可能日が、JR、山陽電鉄との協議に左右されるため、間延びした工程となる。	昼間作業のため、作業時間に制約はない。

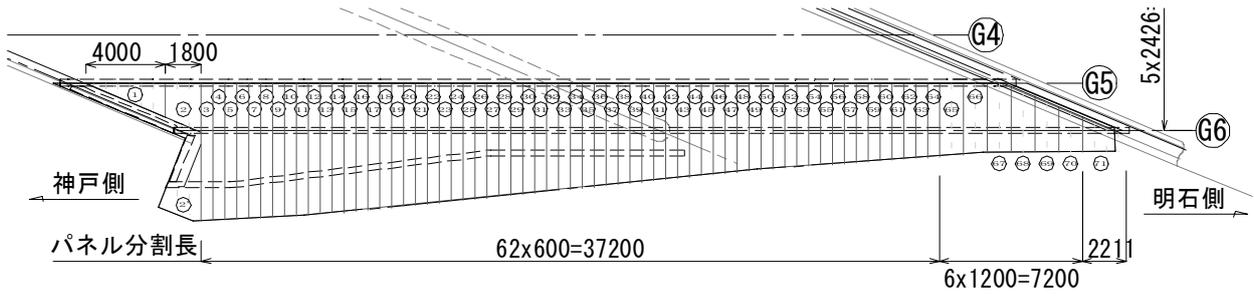


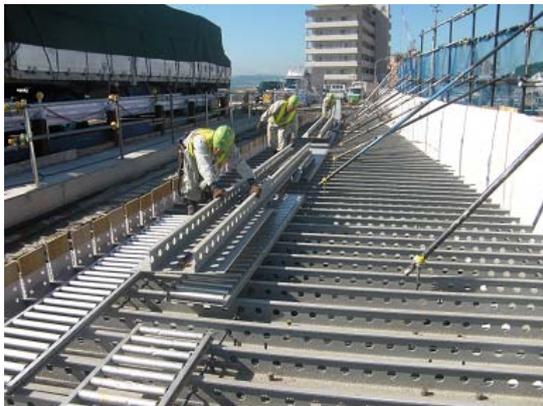
図-4 FRP 合成床版のパネル配置



①設置前の状況



②パネルの運搬



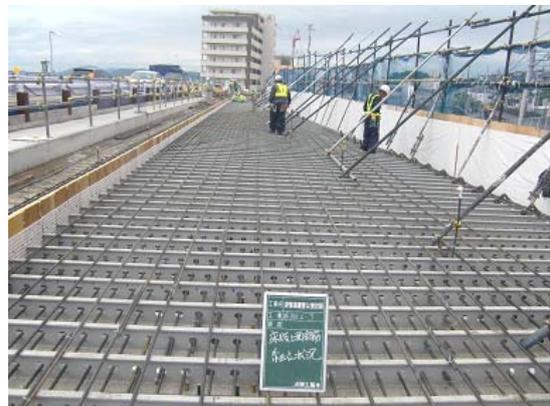
③パネルの運搬 (パネル上)



④パネルの架設



⑤下側鉄筋の配筋



⑥上側鉄筋 (床版下面)

図-5 施工段階毎の状況

(2) 施工手順

FRP 合成床版の新設床版への適用事例は 17 橋あるものの、床版取り替えに適用した事例としては、兎尻橋²⁾ (秋田県)、関門トンネル床版³⁾ (NEXCO 西日本) の 2 橋のみであり、床版の拡幅に適用するのは今回が初めてとなる。しかしながら、FRP 合成床版の施工に関しては、拡幅であっても、新設、取替えの場合と同様であり、図-5 に示す手順で施工を行った。ただし、通常の施工では、FRP リブを貫通する下側鉄筋を予め工場で配置するが、今回のような人力施工ではパネル幅が狭く、パネル毎に配力鉄筋を重ね継手とすることは困難となる。また、桁端部の床版はハンチ分打ち下ろすことから、ハンチ部での鉄筋の挿入が困難となることから、図-6 に示す配筋手順を作成することで、鉄筋を挿入できなくなることを防止した。

(3) 主桁上の構造

合成床版では、床版の高さ調整を行わないのが一般的であるが、床版取り替えの場合、既設床版を撤去しないと設置高さが決まらないことから、ハンチ高で調整する必要がある。このため、図-7 に示すように、床版パネル下面に配置した山形鋼により床版パネルを支持し、この山形鋼と FRP ハンチ板の間をボルトで支持する構造とすることで、ハンチ高さの調整を行う構造とした。

また、本橋の拡幅が、片持部の床版張出幅を長くする方法であるため、張出幅が、床版支間と比べ大きい傾向にある。このため、床版コンクリート硬化までの間に片

持ち部に荷重をかけた場合、既設床版側が浮き上がる恐れがある。したがって、施工時の安全性を確保するため、既設床版と接続する G5 桁上のスラブアンカーをスタッドボルトに変更し、これに押さえ金具を設置することで浮き上がり防止構造とした。

(4) 既設床版との接続構造

当初の既設床版との接続は、図-8(a)に示すように 1m 程度 I 型鋼格子床版のコンクリートをはつり出し、継手筋により接続する構造となっていた。しかしながら、この構造では配力鉄筋が配置された I 型鋼の間のコンクリートをはつり出す必要があり、非常に作業性が悪い上、この部分の底鋼板も撤去するため、別途、支保工・型枠が必要となる。このため、図-8(b)に示すように、上側継

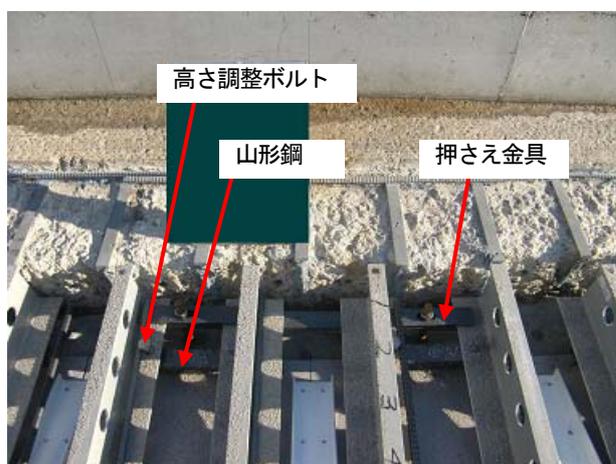


図-7 G5 主桁上の構造

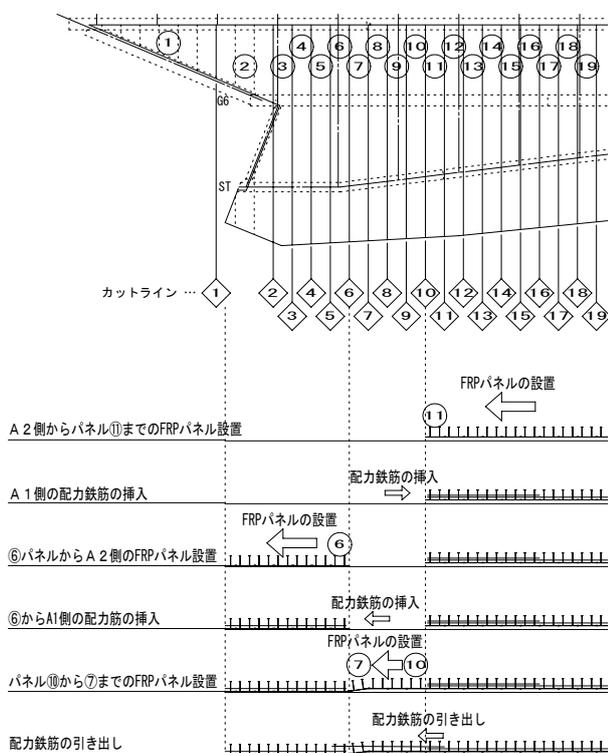
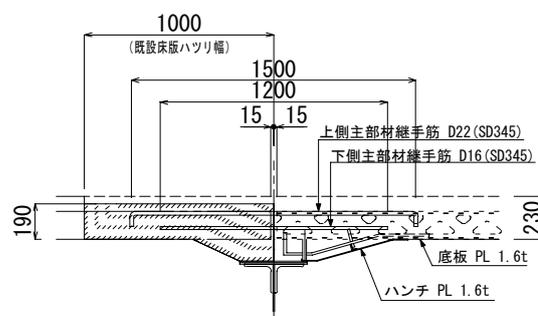
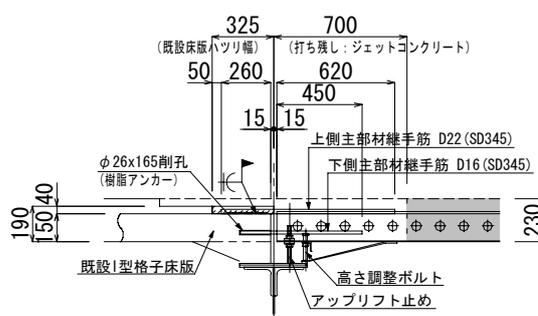


図-6 鉄筋の配置方法



(a) 当初計画



(b) 今回施工

図-8 G5 桁床版接続部の構造

表-2 FRP 合成床版の工程表

		2014年				
		7月	8月	9月	10月	11月
工場製作	FRP材料成形	■	■			
	FRPパネルの工場製作		■	■		
	FRPパネルの輸送			■	■	
現場施工	FRPパネル設置				■	
	配筋				■	
	コンクリート打設					■
	既設接続部の配筋					■
	接続部コンクリート打設					■

手筋を既設 I 型鋼上面に溶接し、下側鉄筋を既設コンクリートに樹脂アンカーで接続する構造とすることで、既設コンクリートのはつり量を大幅に削減し、施工性の向上を図った。なお、既設床版の I 型鋼上のコンクリートは、40mm とうすく、ひび割れが生じる可能性があるため、溶接金網を配置し、既設床版上面に接着剤を塗布した。

接続部のコンクリートは、供用中の既設床版と一体化するため、走行車輛の振動により硬化中のコンクリートに悪影響を及ぼすことが懸念される。このため、拡幅部のコンクリートは 700mm 程度既設側を打ち残し、この部分をジェットコンクリートにより施工した。

(5) 施工工程

表-2 に、本工事の工程表を示す。FRP 合成床版のパネル設置は、パネル数が 72 枚と I 型鋼格子床版 (22 枚) の 3 倍以上となったが、昼間の人力施工としたことで、約 10 日で設置が完了した。

4. まとめ

FRP 合成床版は、RC 床版と比べ床版厚をうすくでき、I 型鋼格子床版より単位体積重量が小さいことから、床版死荷重を最軽量にすることが可能となる。このため、

床版の拡幅や取り替え工事に適用した場合、支持桁や下部構造への負担を最小限にする事が可能であり、床版の補修・補強に対して有効な床版構造といえる。

今回の施工を通して、FRP 合成床版を人力架設できることが確認でき、施工上の制約が厳しい場合での適用が可能となる。また、耐食性に優れる FRP 材で下面が覆われることから、コンクリート片の剥落がなく FRP 材が絶縁材料であることから、跨線橋への適用に適しているといえる。

今後は、FRP 合成床版の特性を生かした適用方法の検討を行い、実橋への適用を図っていく必要があると考えられる。

謝辞：本工事のFRP合成床版の計画・施工にあたり、ご指導いただいた、兵庫国道事務所、西日本旅客鉄道、大鉄工業の方々に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 久保圭吾：FRP 合成床版，コンクリート工学，Vol.51，No.1，pp.108-114，2014.1
- 2) 久保圭吾，松田芳昭，山口雅弘：FRP 合成床版を用いた床版の打換え（兎尻橋），宮地技報，No.21，pp.14-17，2006.1
- 3) 久保圭吾，儀保陽子，木村光宏：関門トンネルにおける FRP 合成床版による床版打替え，宮地技報，No.26，pp.34-42，2012.11

T-iROBO UW（シャフト式水中作業機）の開発

蒲谷 大輔¹・水野 智亮²

¹、²大成建設(株) 天ヶ瀬ダム放流設備建設工事作業所 (〒611-0021京都市宇治市宇治金井戸15-4)

T-iROBO UWは、水上の台船から地盤にシャフトを降ろし、そのシャフトを昇降する作業機に様々なアタッチメントを取り付けて破岩、掘削、ズリ処理、精密測深、撮影などの一連の水中作業を遠隔操作で安全かつ確実に行える機械である。水中の各作業を、ダイバーを使わずに施工するために開発された機械で、ダム湖のように深く、急峻で、視界の悪い場所での施工に威力を発揮できる。可視化技術と情報化施工により遠隔で操作を行うため、安全性と施工性が大幅に向上する。今後増加する既存ダムのリニューアル工事等、さまざまな工事に対して有効利用が期待できる。天ヶ瀬ダム再開発事業において、平成27年6月頃の施工を予定している。

キーワード 新技術、情報化施工、工期短縮

1. はじめに

国内には、洪水調節・灌漑用水・上水道用水・工業用水・水力発電など多くのダムがあり、建設当時から50年以上が経過したダムも少なくない。これらのダムを延命・長寿命化し、さらに活用するため、機能・能力向上や多目的化などによる再開発、補修・補強が必要となる場合があり、多くのダムにおいてリニューアル工事が計画・実施されている。

既存ダムのリニューアル工事は、ダム機能を維持する必要があることから、貯水位を下げることなく、大水深下での施工を余儀なくされることが多い。そのため、施工に伴う大規模な仮締切り、高橋脚の仮設栈橋、大水深での潜水士による作業が必要となる。

当社では、これらに伴う工事費の増大、工期の長期化、長時間にわたる危険作業を解決するため、本四架橋工事やボスポラス海峡横断鉄道沈埋トンネル工事などの大水深での海洋工事経験を活かして、「T-iROBO UW（シャフト式遠隔操縦水中作業機）」（特許第4792123号）を開発した。

今後、天ヶ瀬ダム再開発トンネル放流設備流入部建設工事において実施工に使用する。本稿ではその開発概要を紹介する。

なお、「T-iROBO UW」は大成建設株式会社、株式会社アクティオ、極東建設株式会社による3社の共同開発である。

2. 主な特徴

T-iROBO UWは、図-1、2に示すように、水上の台船と湖底で鉛直に支持されたシャフトに、バックホウタイプの水中作業機を取り付け、昇降・旋回しながら一連の水中作業を遠隔操作によって施工できる機械である。



図-1 T-iROBO UW 全体構成



図-2 水中作業機

そのシャフトに水中作業機を取付け、台船の操作室に配置した操作盤・操縦装置・施工支援装置を使用して、水中作業機本体の昇降、取り付けた各種アタッチメントの遠隔操作、精密測深・撮影ができる。

水中の各種作業を、潜水士を使わずに施工するために開発された機械で、ダム湖のように深く、湖底地盤が急峻な場所、視界の悪い水中での施工に威力を発揮する。さらに、精密計測や可視化を含めた情報化施工技術により遠隔で操作を行えるため、施工性と安全性が大幅に向上する。工費の縮減や工期の短縮、危険作業の軽減に寄与するものと期待される。

主な特徴を以下に示す。

①ダイバーに頼らない大水深における安全施工

可視化を含めた情報化施工技術により遠隔で操作を行うため、潜水士に頼ることなく作業を安全に行うことができる。

②水中オーガーによる急傾斜地盤での確実な安定支持

急傾斜地盤に作業機を設置することは従来の水中機械ではできなかったが、本機はシャフト先端に水中オーガーを配置して、シャフトを地盤に固定し、水中作業機はそのシャフトを昇降するため、急傾斜地盤でも安定した姿勢で施工ができる。

③各種アタッチメントの搭載による多機能作業の実施

水中作業機はバックホウ・タイプであるため、従来からある多種多様なアタッチメントを取り付け、多工種の施工が可能である。

④水中可視化技術の搭載による施工精度・施工性の向上

マルチファンビームを使用した三次元画像表示や超音波水中カメラを使用した画像表示により、暗く透明度の低い湖底でも可視化して、水中作業機オペレーターがモニター画面の画像を見ながら遠隔操作でき、施工精度・施工性を向上させることができる(図-3, 4参照)。

⑤高精度位置出しシステムの搭載による施工精度の向上

シャフト天端の位置をGPSまたはトータルステーションにて位置を計測し、シャフトに取り付けた傾斜計やロータリーエンコーダー、および水中作業機に取り付けた角度計等により水中作業機の先端位置を正確に把握して作業ができる。

⑥情報化施工(マシン・ガイダンス)による出来形精度の向上

マルチファンビームによる三次元計測データと、予め入力した設計掘削形状を比較しながら施工する情報化施工(マシン・ガイダンス)により、出来形精度を向上させることができる。

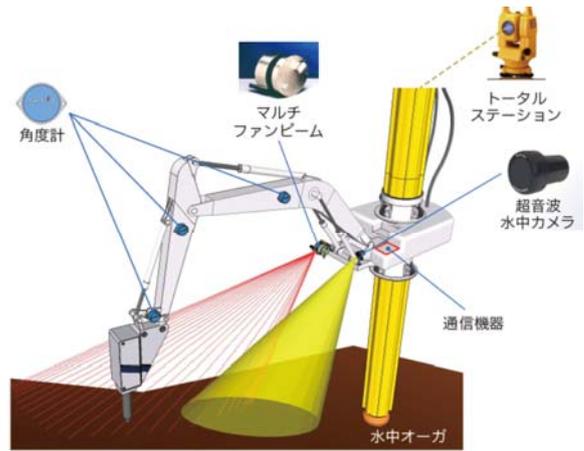


図-3 水中作業可視化装置の概要



図-4 遠隔操作室

3. 主な仕様および機能

(1) 水中作業機

シャフトを昇降する水中作業機は、バックホウ・タイプの作業機械であり、その主な仕様を表-1に示す。台船からのケーブルによる電力供給と電動油圧変換方式により水中での稼働を可能にし、かつ油漏れ対策を講じ環境に配慮している。

表-1 水中作業機の仕様

許容最大水深	-50m (-100mオプション対応可)
バケット容量	0.8m ³ (20ton級)
定格出力	掘削用水中モーター 110kw
	昇降用水中モーター 45kw
昇降速度	4.2m/min
旋回角度	300°(電動ケーブル保護の為)
動力伝達方式	電動油圧変換方式
操作方法	遠隔操作

(2) シャフト、シャフト固定装置

シャフトは、1本が9m、φ914mmの補強を加えた鋼管を接続する組立式で、水中作業機が昇降できるようラックを取り付けている。また、重量軽減のため浮力を利用できるように密閉構造にしている。

シャフトは、上下両端を固定し、支持される。上部の固定は、台船に設置された櫓状のシャフト固定装置に、下部は、シャフト先端の水中オーガーによって湖底地盤に先端のケーシングを挿入して、それぞれ固定する。

上部のシャフト固定装置は、上下キーパーとシャフト固定ピンで構成されており、台船上のクローラクレーンにて吊り込まれたシャフトを固定ピンで保持しながら、順次シャフトの継足しや取外しを行う。上下キーパーはシャフトの振れ止めや水中作業機使用時の固定の役割をし、キーパー部を水中作業機が通過している間も固定できるように、上下の2箇所を設置されている。

(3) 遠隔操作

水中作業機オペレーターは、マシン・ガイダンスのモニターを見ながら遠隔操作を行う。モニターには、水中オーガー・平面位置・断面高さ・掘削状況・超音波水中カメラによる映像などが表示され、施工精度の高いオペレーションシステムを構築している(図-5, 6参照)。



図-5 遠隔操作画面(水中オーガー・超音波水中カメラ)

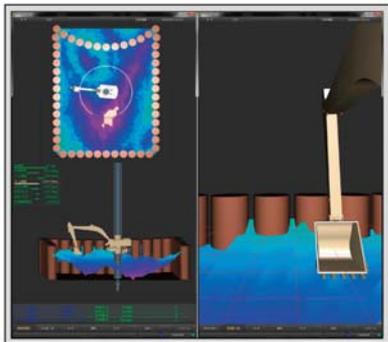


図-6 遠隔操作画面(掘削画面情報)

(4) 各種アタッチメント

水中作業機先端には、作業に応じた各種のアタッチメントが装着可能である(表-2参照)。

表-2 各種アタッチメント使用例

アタッチメント	用途
バケット	掘削、掻き寄せ
水中ブレーカー	岩盤掘削、コンクリート掘削
ツインヘッダー	岩盤掘削、コンクリート掘削
サンドポンプ	浚渫、ずり処理
リッパー	岩盤掘削、コンクリート掘削
コンクリートドレッサー	コンクリート表面切削
エジェクター	浚渫、ずり処理
ダウンザホールハンマー	小口径削孔、岩盤削孔
エアドリフター	削孔、構造物縁切り
回転ブラシ	表面掘削、付着物除去



4. 実物大実証試験

2014年6~7月、栃木県佐野市の試験ヤードにおいて各種アタッチメントを使用して、作業性と施工能力の確認試験、並行してオペレーターによる習熟運転訓練を実施した。試験装置は実物大とし、水上の台船に見立てた架台(地上高さ約15m)にシャフトを固定し、水中作業機を昇降させ、取り付けた各種アタッチメントの遠隔操作等、各種試験を行った。機器の性能や作動範囲、アームの抵抗耐力・振動やシャフトの抵抗力の計測を実施して確認作業を行った(図-7, 8, 9参照)。

なお、水中作業を想定した耐圧試験・水密試験については、別途、装置ごとに実施して確認した。



図-7 実物大実証試験全景



図-8 水中作業機昇降状況



図-9 コンクリート破砕状況

5. 実施施工予定および施工方法概要

2015年6月頃、国土交通省近畿地方整備局発注による天ヶ瀬ダム再開発トンネル放流設備流入部建設工事にてT-ROBO UWによる施工を予定している。

本工事は、ダムの放流機能を高めることでダム湖の水をより効率的に使えるようにするための「トンネル式放流設備」を建設するものである。このダム再開発事業により、(1)洪水調節機能の向上、(2)京都府の水道水の確保、(3)発電能力の向上などが図られる。

このうち、流入部の建設における前庭部掘削に使用する。

施工手順は、図-10 に示す 6 ステップからなっている。

- ①水上に係留された台船から、クローラークレーンを使用してシャフトを下方に吊り下げ、シャフト固定装置で固定しながら全長のシャフトを組立て、シャフト先端ケーシングを水中オーガーにより湖底地盤に挿入して固定する。
- ②水中作業機を水中に降下させて、アームに取り付けたマルチファンビームにより地形を計測する。
- ③岩盤を水中ブレイカーにより破砕・掘削する。
- ④アタッチメントをバケットに換え（気中で交換）・掘削土を掻き寄せ集積する。
水中作業機を台船上に引き上げ仮置きする。
- ⑤台船を移動する。
- ⑥クローラークレーンで掘削土のグラブ浚渫を行う。

このステップをくり返して、所要の深さまで掘削していく。

現地での作業状況のイメージを、図-11 に示す。

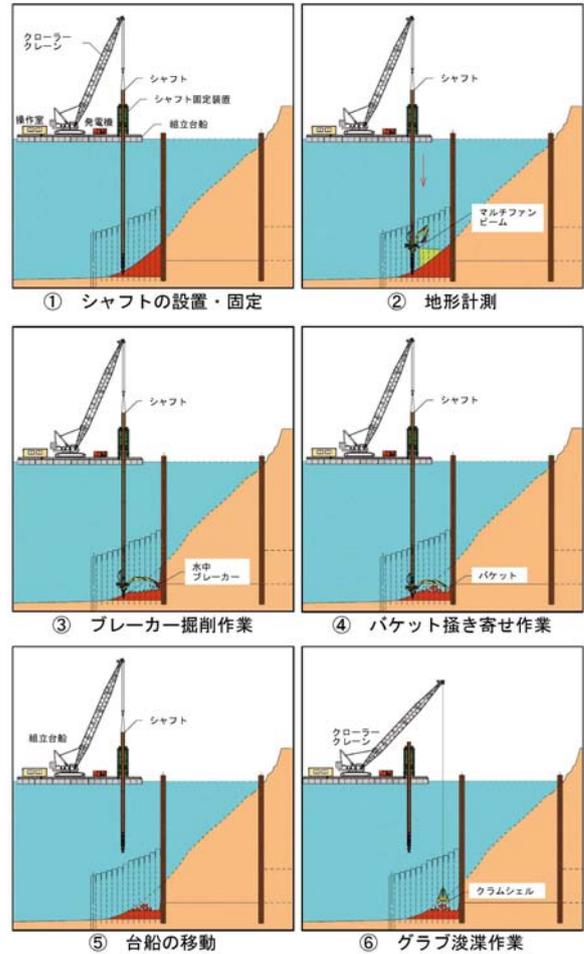


図-10 天ヶ瀬ダム流入部建設工事の前庭部掘削における施工手順

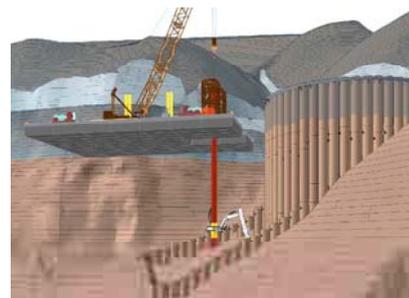


図-11 作業状況のイメージ

6. おわりに

T-iROBO UW の開発は、既存ダムのリニューアル工事特有の大水深での作業において、施工に伴う仮締切りや仮設栈橋の削減、潜水士の作業の低減により、工費縮減や工期短縮、危険作業の軽減に寄与するものと期待される。

また、高度かつ高機能な機械の開発により、作業員の高齢化、水中重機オペレーターや潜水士といった高技能者や熟練工の不足への対応策の一助になると考えられる。

2015年6月頃からの天ヶ瀬ダム再開発工事におけるT-iROBO UWによる実施施工では、その能力と施工性・安全性の確認、施工効率の向上を目指す所存である。

今後、ますます増加する既存ダムのリニューアル工事をはじめ、本作業機を有効利用できるさまざまな工事に対して適用の提案をしていき、技術の活用を通じて持続可能なインフラ整備に貢献して参りたい。

最後に、T-iROBO UWの開発にあたり、長年、多岐に渡りご指導、ご支援を頂戴した関係各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

1)国土交通省 近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所

天ヶ瀬ダム再開発事業

HP : <http://biwakokasen.go.jp/amadam/index.html>

都心部における道路プローブの適用に関する 課題と解決法に関する一考察

内田 佳希

近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 防災課 (〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

実際に道路上を走行する車両の車載器やセンサーから収集される車両挙動や移動軌跡といった「プローブデータ」は、道路行政分野における有用性が高い。国土交通省においては2011年度から「ETC2.0プローブデータ」の収集を開始し、2013年度から活用に向けた取り組みが積極的に行われ始めたところであり、その活用方法に関する知見が蓄積されつつある。本稿では、特に都心部に着目した「ETC2.0プローブデータ」の適用課題とその解決の方向性について、事例分析に基づく検討結果を報告する。

キーワード ETC2.0プローブデータ, 質的データ, 都心部交通解析

1. はじめに

本格的な人口減少の局面を迎え、また財政状況が厳しさを増す状況下では、既存の道路ストックの有効かつ効率的な利用が求められる。そのためには、現在の「道路の使われ方」を把握しておかなければならない。

道路の使われ方に関するデータは、交通量といった「量的データ」から、利用経路といった交通量の内訳に関するデータ、いわゆる「質的データ」まで存在する。既存の道路ストックの有効利用を図る上では、特に質的データが重要となるが、量的データに比べて質的データは観測が容易ではないため、その収集には多くの労力とコストを要し、調査も限定的とならざるを得なかった。

一方で、近年のICT技術の進歩により、質的データを従来よりも安価かつ精緻に収集することが可能となっている。その中でも、実際に道路上を走行する車両の車載器やセンサーから収集される車両挙動や移動軌跡といった「プローブデータ」については、道路行政分野における有用性が高まりつつある。時々刻々の個々の車両の移動や挙動に関するプローブデータを用いれば、理論上は従来のように特定の観測箇所や観測時間に捉われず、必要な時間や場所における交通量や旅行速度を把握できる。さらに、急制動データをもとに交通安全に課題を抱える箇所を把握したり、移動軌跡情報データをもとに利用経路やODを把握したりすることも可能となる。

プローブデータに関しては、官民においてそのデータ取得方法や利活用に関する技術開発が積極的に行われてきており、国土交通省においては2011年度から「ETC2.0プローブデータ」の収集を開始し、2013年度から活用

に向けた取り組みが行われ始めたところである。それに合わせて道路プローブデータを活用した検討も行われつつあるが^{1,2)}、ETC2.0プローブデータの新たな価値を見出し、その有用性をさらに高めるためには、ETC2.0プローブデータの適用可能性に関する知見を十分に蓄積しておくことが重要である。

この要請を受けて、2014年度に都心部の交差点を対象に、ETC2.0プローブデータを用いた「交差点方向別流動」と「利用経路」に関する集計を試みた。都心部の交差点は、交通事故や渋滞などの交通課題を併せ持つ一方で、道路整備における制約が大きいことから、既存ストックの有効活用が求められることから、交通の質的分析を可能とするETC2.0プローブデータの有用性は高いと言える。本稿は、その際に直面した課題とその解決法についてとりまとめたものである。

以下では、2.においてETC2.0プローブデータの概要について整理したあと、3.で都心部でのETC2.0プローブデータの適用可能性について事例分析をもとに考察し、4.で本稿で得られた知見と今後の課題について述べる。

2. ETC2.0プローブデータの概要

(1) データの特徴

ETC2.0とは、従来のETCの高速道路利用料金収受だけではなく、道路側のアンテナであるITSスポットとの高速・大容量、双方向通信で、世界初の路車協調システムによる運転支援サービスを受けることを可能とするサービスであり、2011年から国土交通省により運用が開始さ

れている³⁾。ETC2.0プローブデータとは、このETC2.0に対応した車載器・カーナビを搭載した個々の車両から収集される走行履歴や挙動履歴等に関するデータである(表1参照)。ITSスポットの通信領域を通過した際に、電波(5.8GHz)により、上限を80km程度として、直前のITSスポットから当該ITSスポットまでに蓄積されたデータがITSスポットにアップリンクされる(図1参照)。ITSスポットは全国的高速道路上に約1,600箇所設置完了済みであり、今後、新しく開通する高速道路や有料道路にも設置される予定である⁴⁾。なお、データの蓄積可能量は概ね80kmとなっていることから、これまで一般道については、高速道路上で初めて通過するITSスポットから80km圏内のみ、ETC2.0プローブデータの取得が可能であった。

これに対し、2014年度から国土交通省では一般道におけるデータをより多く収集すべく、ETC2.0プローブデータをアップリンクさせるための「経路情報収集装置」の設置を進めている。これにより、普段高速道路を利用しない車両の走行データを含む幅広い走行データの収集体制が構築されつつある。収集されるETC2.0プローブデータのデータ数の充実とともに、危険箇所の把握や渋滞箇所の把握など、より正確な交通分析が可能となるほか、これらを活かしたまちづくりやITSスポットを利用した情報提供・ルート案内による事故防止、渋滞緩和、CO2の発生抑制など幅広い分野への活用が期待されているところである。

表-1 ETC2.0プローブデータの内容

項目	内容
走行履歴	時刻, 位置情報(緯度経度), 道路種別
挙動履歴	時刻, 位置情報(緯度経度), 道路種別, 進行方向, 速度, ヨー角速度, 前後・左右加速度
基本情報	車載器の情報など固定情報



資料: 国土交通省HP

図-1 ETC2.0プローブデータの収集方法

(2) 各種プローブデータとの比較

ETC2.0プローブデータの運用に先立ち、これまで大手自動車メーカー、地図サービス会社、ナビゲーションサ

ービス会社等によるプローブデータを用いたサービスが提供されてきている。これら民間によるサービスは、各々の登録会員や端末利用者からプローブデータを収集し、それを加工して会員向けに渋滞情報や運行管理情報等を提供することを基本としているが、一方で道路行政分野でも活用されている。

民間企業によるプローブサービスのうち、特に道路行政分野にかかわりの深いプローブサービスの概要について整理したものを表2に示す。表2で示されているように、プローブデータの位置情報取得周期や分析対象は、それぞれで異なっており、このうち国土交通省では、これまでに主として民間プローブデータ(HONDA)の旅行速度や急制動に関するデータを用いて円滑性や安全性に関する分析を行ってきている。しかし、移動軌跡に関する情報は提供されてこなかったため、利用経路に関する分析は行われてこなかった。こういった中で、ETC2.0プローブデータは各プローブデータの特性を兼ね備え持つデータであると言える。

表-2 各種プローブデータの比較

データ	位置情報取得周期	分析			活用場面
		速度	経路	対象	
民間プローブデータ【HONDA】	3秒	○	×	乗用車	面的な損失時間の変化 ヒヤリ・ハット分析 等
商用車プローブデータ【富士通】	1秒	○	○	トラック	物流経路の把握 等
混雑統計データ【ゼンリン】	5分	×	○	人	観光行動の変化 等
携帯カーナビプローブデータ【ナビタイム】	1秒	○	○	乗用車 トラック	交差点分析 等
ETC2.0プローブデータ【国土交通省】	基本的に200m毎	○	○	乗用車 トラック	面的な損失時間の変化 ヒヤリ・ハット分析 利用経路分析 等

(3) 都心部の交通状況把握におけるETC2.0プローブデータの有用性

ETC2.0プローブデータの大きな有用性の一つとして、利用経路やOD(出発地・目的地)などの交通の質的データを用いた分析が可能になったことが挙げられる。

一般に、都心部においては渋滞や事故などの交通課題を併せ持つものの、その解消に向けては用地取得等の様々な制約のある場合が多く、既存ストックを有効活用した対策が求められる。その一方で、交通の発着地が多く存在することや、とりうる利用経路が多様となることから、交通流動は複雑な形態をとる場合が多く、交通状況の質的把握には多くの労力と費用を要することとなる。一方、ETC2.0プローブデータを用いることで、従来の集計化された量的データによる分析では特定できなかった交通課題の原因となる交通の対象(例えばある利用経路を持つ交通)を特定し、それに直接的に作用する対策を講じられるようになることが期待できる。

ただし、一般道でのETC2.0プローブデータの収集機器である経路情報収集装置は2014年度から積極的な運用が始まったばかりであるため、ETC2.0プローブデータの利用価値をさらに高めるためには、その適用可能性につい

て幅広い観点から知見の蓄積が求められているところである。

3. 都心部でのETC2.0プローブデータの適用可能性

(1) 事例分析の概要

ETC2.0プローブデータを用いた分析は、兵庫県における行政及び商業の中心地に位置する三宮交差点（神戸市）を対象として実施した。

三宮交差点は、東西および南北交通の要衝であり、周辺には大型商業施設や鉄道4路線が乗り入れする三ノ宮駅を有する。さらに、周辺には国道2号と阪神高速道路のランプが近接していることから日常的に交通が集中し、周辺には主要渋滞箇所や事故危険区間を抱えるなど、都心部によく見られる交通課題を有している。

集計項目は、一般に課題を抱える交差点や区間での対策を検討する際に必要となる「交差点方向別流動比率」と「利用経路」である。

交差点方向別流動比率とは、交差点の流入部交通量に対する各流出方向の台数の割合であり、例えば「交差点西側流入部からの右折車割合、直進車割合、左折車割合」といったものである。ETC2.0プローブデータは標本データであるため、ここでは比率に関する集計を行った。

利用経路とは、道路上の特定箇所を通過する交通が「どの道路を使ってどこからどこへ向かうのか」を知りたいときに必要となる情報である。

集計に際しては、ETC2.0プローブデータのうち、走行軌跡を走行履歴地点ごとに表示した点群データである「ID03データ」と、走行軌跡を車両ごとにDRMのリンク単位で表示した「ID12データ」を用いることとした。なお、いずれのデータもDRMリンクに対するマップマッチングは既に行われており、「ID03データ」には緯度・経度に関する情報に加えて、各々の点群データがマッチングするDRMリンク情報が付与されている。

これらデータを用いた集計を行っていくうちに、いくつかの都心部に特有の課題に直面することとなった。具体的には、「マップマッチングに関する課題」、「走行履歴データの取得間隔に関する課題」、「都心部の複雑な流動に関する課題」である。これら課題に関する内容と解決法について、次項以降で述べることとする。

なお、分析の根幹にかかわる課題として、2014年度以前のETC2.0プローブデータは高速道路上に設置されたITSスポットのみから収集されたものであるため、サンプルが高速道路を利用する車両に偏り、また一般道路上のサンプル数は高速道路の出入り口が近接しているかどうかによって依存するといったものがある。これについては、2015年度以降、一般道路上に設置が進められている経路情報収集装置からETC2.0プローブデータのアップリンク

が可能となっていることから、本稿では課題の解決が図られつつあるものと見做し、サンプル特性については取り扱わないものとする。

また、ETC2.0プローブデータは標本データであるため、「量」として扱う場合には拡大処理が求められることとなるが、本稿では拡大処理方法については扱わないものとする。

(2) 道路網密度が高い地域でのマップマッチングに関する課題とそれへの対応

特定車両の利用経路については、走行軌跡の生データである「ID03データ」の緯度・経度に関する情報を用いることで、車両単位で正確に捉えることができる。一方、利用経路については、各車両の利用経路の本数をDRMリンク単位で合計し、その数に応じて道路の太さを変えて表示することで、対象箇所を通過する交通が主として利用する経路と目的地を視覚的に示した図を用いる場合が多い。この場合、利用交通量が限られていれば「ID03データ」の緯度・経度に関する情報を用いて各車両の利用経路を点列で描画し、それをDRMリンク毎に目で見て積み上げる方法もとりえるが、都心部のように利用交通量が多い場合は、このような方法は現実的ではない。

一方で、「ID12データ」は走行軌跡の全てを車両ごとにDRMのリンク単位で表示したものであることから、対象箇所を通過する車両を抽出したうえで、DRMリンク毎に当該リンクを利用経路として選択している車両の台数を合計すれば、利用台数に応じた利用経路図を図示することができる。

「ID12データ」を用いて三宮交差点の西側流入部を通過する交通の利用経路を集計した結果を図2に示す。都心部における多様な利用経路が示されているが、一方でやや不自然な経路が見られた（赤線囲み）。そこで、地図で道路状況を確認したところ、明らかに利用経路とはなりえない規格の街路であることが確認された。さらに、走行軌跡の生データである「ID03データ」の緯度・経度情報に基づいて走行軌跡を確認したところ、実際には青矢印の経路を利用していることが明らかとなった。

あくまでも想定であるが、都心部では道路ネットワークが並行して密に形成されているため、マップマッチング段階で本来とは異なるDRMリンクに走行履歴データが吸着されてしまったものと考えられる。

この課題への対応としては、道路ネットワークが密に形成されている都心部における集計では、「ID12データ」を用いた集計結果に対して、その利用経路で不自然な流動がないかどうかを調べ、必要に応じて「ID03データ」の緯度・経度情報から真の利用経路を確認し、利用経路を補正するといった方法が考えられる。もしくは、走行履歴データの蓄積間隔を短くし、マップマッチング精度の向上を図るといった方法も考えられる（走行履歴データの蓄積間隔の課題については次項(3)参照）。



図2 ID12データを用いた利用経路集計結果

(3) 道路網密度が高い地域での走行履歴データの取得間隔に関する課題とそれへの対応

交差点方向別流動比率の集計において、「ID03データ」の点群データに記載されているマッチング対象のDRMリンク情報の活用を試みた。具体的には、まず交差点流入部直近のDRMリンクに走行履歴データがマッチングされている車両を当該流入部の利用交通として抽出し、次に各車両について交差点を通過した後の座標から利用方向（左折、直進、右折）を特定し、最後にそれを集計化して各交差点流入部の方向別交通量を求めるといったものである。

しかし、走行履歴データは、前回のデータ蓄積時から200m走行後、もしくは進行方向が45度以上変化した際に蓄積される。一方で、都心部では道路ネットワークが密に形成されているため、交差点間隔が200m未満となる場合が多い。仮に、交差点流入部の直近リンクの延長が90mの場合、実際には当リンク上を走行していても走行履歴地点が吸着しない車両が出現することとなるため、機械的に交差点流入部直近のDRMリンクを通過する全車両を特定するだけでは、本来の対象車両すべてを特定できない可能性がある（図3参照）。

この課題への対応としては、走行軌跡を車両ごとにDRMのリンク単位で表示した「ID12データ」を用いる方法がある。「ID12データ」では、車両ごとの走行軌跡の全てがDRMリンクで示されているため、ID03データのように交差点間隔が200m以上かどうかにとらわれる必要はない。もう一つの解決法は、利用経路上の1つのDRMに対して少なくとも1つ以上走行履歴データが吸着するくらいまで走行履歴データの蓄積間隔を短くするといったものである。ただし、これについてはデータ蓄積量とのバランスが重要となる。

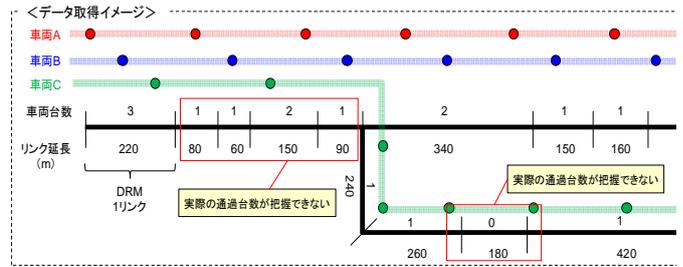


図3 点群データによる車両台数の把握

(4) 都心部の複雑な流動に関する課題とそれへの対応

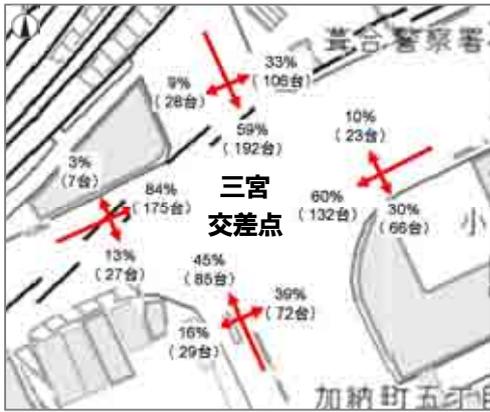
都心部においては、同じ車両が同じ交差点を異なる方向から利用するといった周遊交通の存在が想定される。図4は、三宮交差点を東から西に向かって直進後に下流側の交差点で右折し、今度は三宮交差点の北から南へ直進する車両の動きを模式的に示したものである。商業施設や主要駅を抱える都心部では、このような周遊交通は少なからず存在すると考えられる。この場合、東側流入部からの車両の交差点の通過方法は、「東から西への直進」のみであるが、「ID03データ」を用いて機械的に同一車両IDの走行履歴地点の組み合わせで処理を行う場合、「東から西への直進」、「東から南への左折」、「東から北への右折」の3つとして誤って集計されてしまう可能性がある。

この課題への対応としては、交差点通過直前の走行履歴地点の時刻（交差点の流入時刻）と交差点通過直後の各走行履歴地点の時刻（交差点の流出時刻）を比較し、交差点の流出時刻は交差点の流入時刻の後となるという条件を満たしたうえで、最も時間差が最小となる組み合わせを抽出することで、誤って「東から南への左折」として集計されることを機械的に回避することができる。

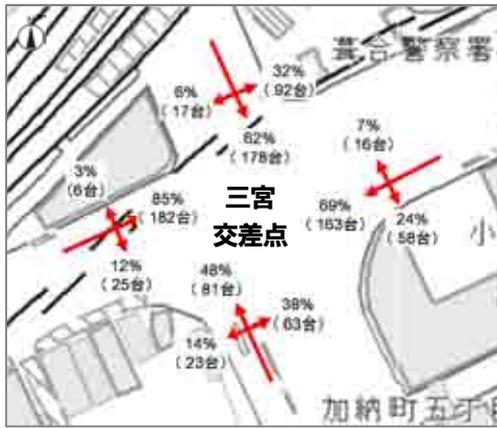
交差点の流入時刻に基づく補正前後の三宮交差点における交差点方向別流動比率をそれぞれ図5と図6に示す。方向別比率およびサンプル交通量ともに補正前後で数値が変化しており、都心部では少なからず複雑な動きをとる車両が存在していることがうかがえる。



図4 方向別交通量の集計における課題



※2013.3～2014.9の平日6～19時における集計結果
 図-5 交差点方向別流動比率（補正前）



※2013.3～2014.9の平日6～19時における集計結果
 図-6 交差点方向別流動比率（補正後）

ングにおいて、本来とは異なるリンクに走行履歴データがマッチングされる場合のあることが確認された。これについては、走行履歴データの蓄積間隔を200mよりも短くすることで、道路ネットワークが密に形成されている都心部におけるマップマッチングの精度向上を図ることが考えられる。データ蓄積量と蓄積間隔はトレード・オフの関係にあるが、一般道における経路情報収集装置の設置数の増加に伴い、データ蓄積量の制約は緩和されることを付け加えておく。

次に、都心部での交通流動分析では、都心部に特有の車両の複雑な流動が存在するため、集計に際してはこれら複雑な流動を考慮した処理を行う必要がある。

このように、本稿では、事例分析を通じて都心部におけるETC2.0プローブデータを用いた分析に関する適用課題とその解決法に関する1つの方向性を示したが、実績データとの比較による精度検証については実施できていない。今後、一般道での経路情報収集装置の整備が進み、ETC2.0プローブデータのサンプル数の偏りが改善されるのに合わせて、例えば交差点方向別流動であれば実績データの方向別比率との比較検証を行うなど、定量的な観点から適用可能性について確認する必要がある。

ETC2.0プローブデータは、これまで収集が困難であった質的データをはじめとする各種データの収集を可能とすることで、新たな分析を可能とすることが期待される。本稿の成果がETC2.0プローブデータの新たな価値をうみだす一助となれば幸いである。

謝辞：本稿の執筆にあたり、多大なるご協力をいただいた（株）長大の皆様にご心より感謝申し上げます。

4. おわりに

本稿は、都心部の交差点を対象に、ETC2.0プローブデータを用いた「交差点方向別流動」と「利用経路」に関する集計を試みた際に直面した課題と解決法についてとりまとめたものである。その結果をまとめると、以下のとおりである。

まず、道路ネットワークが密に形成されている都心部では、走行履歴データのDRMリンクへのマップマッチ

参考文献

- 1) 田中良寛, 金沢文彦, 澤田泰征, 佐治秀剛: 道路プローブ情報の道路管理への活用に関する検討, 第 49 回土木計画学研究発表会・講演集, 2014
- 2) 渡辺大輔, 佐治秀剛, 田中良寛, 鹿野島秀行, 牧野浩志: 道路プローブデータの分析による有効な活用方法の検討, 第 50 回土木計画学研究発表会・講演集, 2014
- 3) 国土交通省 HP: <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/etc2/jyouhou.html>
- 4) 国土交通省 HP: <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/etc2/panf.pdf>

斜め・水平施工を可能とする 機械攪拌系地盤改良工法について

佐藤 潤¹

¹日特建設株式会社 技術本部 設計部 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋3-10-6)

著者らは、新たな機械攪拌方式の原位置攪拌改良工法として、地中拡翼型の攪拌装置を用いた工法“WinBLADE工法”(以下本工法と言う)の開発にあたっている。本工法では、閉じた状態の攪拌翼を地中に挿入し改良範囲端部で直径1.2mに拡翼した後、固化材を供給しながら原位置攪拌を行い、円柱状の固結改良体を造成する。斜め・水平の改良も容易に行えることが特徴で、既存施設周辺、直下を対象とした液状化対策、耐震補強への適用を想定している。

本報では、本工法の概要と特徴を説明する。

キーワード 地盤改良, 液状化対策, セメント, 機械攪拌

1. 工法概要

本工法は、開閉可能な攪拌翼を用いた機械攪拌工法である。挿入したビットを地中に直径1.2mもしくは0.8mに拡径し、セメント等の固化材をスラリーとして吐出し、地盤と攪拌混合することにより、ソイルセメント改良体を造成する。

小型の機械を使用することにより機動性に優れ、角度を調整することにより、鉛直だけでなく従来工法では対応出来なかった斜めや水平方向の改良体を造成することを可能としている。また、併せて開発した監視・自動制御システム(FRP制御システム)を使用し、効率的かつ安定的に改良体を造成することができる。

本工法は以下の手順で行う。施工手順の概要を図-1に示す。

- ①マシンセット (角度調整)
- ②直径165mmのケーシングで所定の深度まで削孔
- ③先端に拡径ビットを取り付け、直径96mmのロッドを継ぎ足しながら挿入後、ケーシングを改良上端深度まで引抜く
- ④造成下端にて拡径(直径1,200mm, 直径800mm)
- ⑤改良上端まで造成
- ⑥造成完了
- ⑦攪拌翼を縮径後、ビットおよびロッド引抜き
- ⑧ケーシング引抜き、次孔へ移動

2. 工法の特徴

本工法の特徴は、“開閉可能な攪拌翼”, “特殊小型機械による機械攪拌” および “自動制御システムによる施工管理” である。以下にそれぞれの特徴についての詳細を述べる。

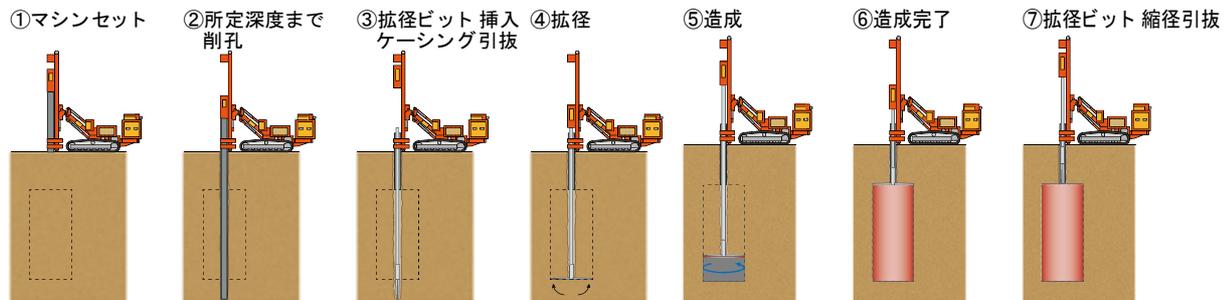


図-1 WinBLADE 工法施工手順

(1) 開閉可能な攪拌翼

写真-1に攪拌翼の開閉状況を示す。この攪拌翼に開閉機構を設けたことが、本工法の最大の特徴である。従来の攪拌翼を使用した機械攪拌工法は、改良径＝攪拌翼長さであり、直径1,200mmの改良体を造成する場合の攪拌翼長さは1,200mmとなる。そのため土被り部（未改良部）は貫入・引抜時に改良径と同等の地盤が乱され、場合によっては貧配合の固化材にて土被り部を改良しなければならない場合がある。それに比べ、本工法は攪拌翼が開閉可能であり、直径1,200mmの改良体を造成する場合でも、土被り部の乱される範囲は、削孔用ケーシングの直径である165mmのみとなる。また、従来工法では地中埋設物が改良範囲上部や改良範囲内に存在する場合、施工不可能であった。本工法は攪拌翼の開閉を行うことにより、地中埋設物をかわした改良が可能である（図-2）。

(2) 特殊小型改良機による機械攪拌

本工法で使用する改良機は、改良型のロータリーパーカッションドリル（RPD-150CLF）を標準としている（写真-2）。自走することが可能であり、ガイドセルを鉛直から水平まで傾けることが可能である。により、狭隘な現場でも対応可能であり、従来工法が鉛直施工のみを標準としているのに対して、本工法は鉛直、斜め（写真-3）および水平の改良体を造成することが可能である。これを利用して、今まで困難であった既設構造物直下の改良を行うことができるのも、本工法の特徴である。



写真-1 攪拌翼開閉状況

(3) 自動制御システムによる施工管理

本工法は均質な改良体を造成するべく、自動制御システム（FRP制御システム）を搭載している。

従来工法では、セメントスラリーの単位時間あたりの吐出量は一定であり、硬質地盤により貫入・引抜の速度が一定に保てず延びた場合、改良対象土への固化材添加量は過大となる。また、改良対象土と固化材の攪拌混合回数（羽根切り回数）は機械式攪拌工法の改良品質に大きな影響を及ぼし、この制御が改良体の均質性を左右すると言える。

図-3に自動制御システム概要を、図-4に操作パネル画面を示す。回転駆動装置に設置した回転計にて回転速度を計測し、その情報を制御装置に伝達する。次に、回転



写真-2 ロータリーパーカッションドリル(RPD-150CLF)



写真-3 斜め施工状況



図-2 地中埋設物をかわした施工状況

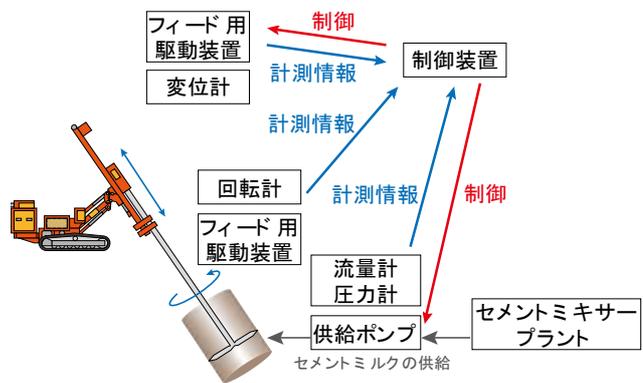


図-3 自動制御システム概要

速度をもとに、単位改良長あたりの攪拌混合回数が一定値を保つフィード速度に制御される。さらに、そのフィード速度から単位体積あたりの固化材添加量が一定に保たれるように、供給ポンプの吐出量が自動制御される。

これらの一連の流れにより、地盤の変化によって回転速度が変動しても、それに連動するようにフィード速度およびセメントスラリーの供給量が自動制御され、攪拌混合回数および固化材添加量の最適化を図ることが可能となる。また、施工時の管理が自動化されることにより、省力化や安全性の向上にもつながっている。

3. 造成実験

本工法にて浚渫土層、沖積砂層を対象として造成実験を行った内容を報告する。¹⁾

(1) 対象地盤概要

造成実験で改良対象となる地盤の基本物性、地層構成および造成位置を図-5に示す。造成体は2.0m/リフト×4リフトで合計8.0mとなる。対象地盤は下層から順に、1リフト目が位置するGL-7m以深には自然堆積の沖積砂層(A_s)が存在し、2リフト目以下は、砂層、粘土層が互層に存在する浚渫土層(Fs1, Fc1, Fs2, Fc2)である。東日本大震災の際の噴砂跡が実施箇所周



図-4 制御システム操作パネル

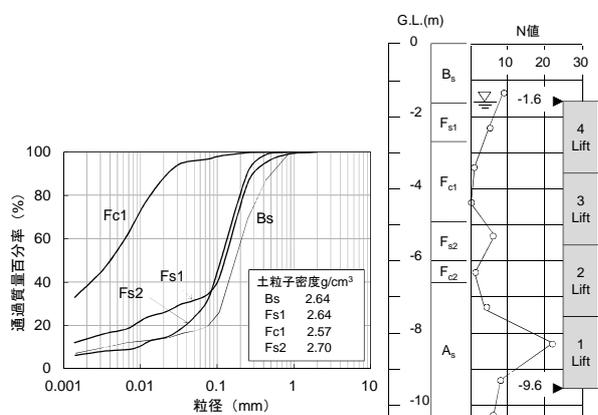


図-5 粒度分布・土粒子密度、地層構成造成位置

辺に残っており、Fs1, Fs2層が液状化したことが確認されている。

(2) 施工状況

図-6に1リフト目、図-7に3リフト目のモニタリング・制御結果を示す。ここで、左軸の移動距離は各リフト下端位置を0として、2mの引き上げ、押し下げの動きを示し、回転速度とセメントミルクの吐出量を併記している。沖積砂層を対象とした1リフト目では、終始計画通りの回転速度、セメントミルク吐出量が確保できた。これに対して、浚渫砂・粘土層を対象とした3リフト目では、一回目の引き上げ時にフィード速度、回転速度が低下し、それに連動してセメント吐出量も抑えられ、その後の押し下げ、引き上げ時は、1リフト目と同様に安定した動作が確保された。

(3) 事後調査

7日程度の養生後、Fs1層からFc1層にかかる深度まで掘り起こし、造成体上部1mほどを目視観察し直径1.2mの造成体を確認した(写真-4)。その際、周辺の掘削箇所から木片、植生跡が認められ、上記で示した不規則な施

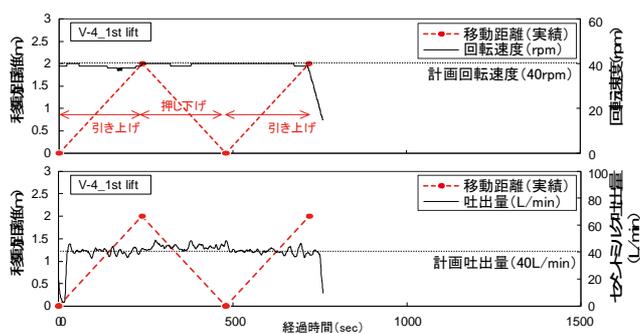


図-6 1リフト目 回転速度とセメント吐出量の推移

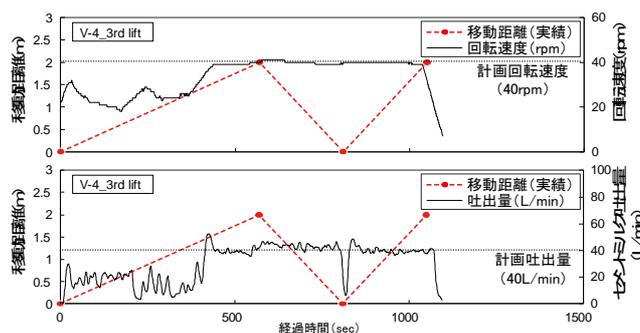


図-7 3リフト目 回転速度とセメント吐出量の推移



写真-4 改良体上部の状況

工動作の要因であると推測した。

その後、造成部分全長にわたりロータリー式スリーブ内蔵サンプラーにてコアを採取し、コア採取率（コアの断面の50%以上が固結したと認められる長さの割合）を確認したところ、全体では89%となり品質の良否の目安となる90%²⁾をほぼ満たすことができた。ただし、各地層で評価すると、沖積砂層では全体が100%であったのに対して、浚渫土層では80%を切る箇所がFc1層に生じ、粘性の高い層では品質改善の必要性が認められた。また、本コアより試料を採取し、一軸圧縮強さを求めた結果を、図-8に示す。本結果では特に層区分による著しい強度差は認められず、Fs1層、Fc1層について行った室内配合強度との比較により、現場室内強度比は1/3程度であることを確認した。

(4)造成実験結果および課題

施工実験を通して、浚渫土層、沖積砂層での施工動作の違い、改良品質の傾向をまとめた。沖積砂層については既存の攪拌改良工法と同等の改良が達成される一方、不均一性、不純物の混入が見られる浚渫土層については、攪拌回数の割り増し等による品質向上の必要性が認められた。

4. 施工事例

本工法を用いた施工事例を以下に示す。

改良の目的は、既設盛土のり面の安定化である。本現場の問題点は、地震時に既設盛土のり面内部に円弧すべりが発生するというものであり、り面の背面直近を改良する必要があった。改良断面図を図-9に示す。

対策工法としての条件は①盛土上部から斜めに改良で

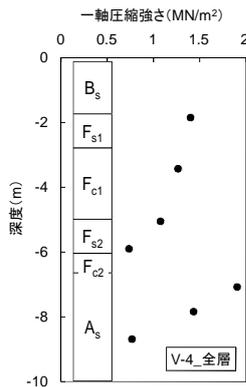


図-8 一軸圧縮強さの分布

表-1 工法比較表

条件 工法名	①斜施工	②小型施工機械	③のり面への影響
WinBLADE工法	○	○	○
薬液注入工法	○	○	△
高圧噴射攪拌工法	×	○	×
中層混合処理工法	×	○	○
深層混合処理工法	×	×	△

きる、②小型の施工機械での施工が可能である、③施工時に既設のり面への影響が抑制できる、というものであった。地盤改良工法の固結材等を添加することによる固結工法には大きく分けると“薬液注入工法”，“高圧噴射攪拌工法”および“機械攪拌工法”の3種類がある。従来の固結工法（機械攪拌工法は中層混合処理工法と深層混合処理工法に分類される）および本工法の現場条件への適応性を比較したものを表-1に示す。比較表からも分かるように、本現場条件に適応可能な工法は本工法以外にはなく、こういった特殊な現場にて本工法の長所が活用されることになった。

施工の結果としては、盛土内に混在していた一部の硬質土により、攪拌翼が損傷する事象はあったものの、改良体を無事に造成することができ、目的を達成することができた。

5. まとめ

造成実験から、本工法による地中内での攪拌翼の開閉を用いた改良体造成の確実性と、自動制御システムによる施工管理の有効性を確認できた。また、実施工では、既存の地盤改良工法では対応の難しかった斜めの改良体を造成するという本工法の特徴を最大限に活かした工事を行い、工事目的を達成できたことを確認した。新たに開発した工法として、今後施工実績を重ねていくうえで、様々な課題が生じていくことが考えられる。それらに対応しつつ、よりよい工法となるよう改善を進めていきたい。なお、造成実験の一部は、国土交通省の助成事業である「平成23年度震災対応型液状化対策技術の開発」、 「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」から得られた成果である。関係各位のご協力に感謝申し上げます。

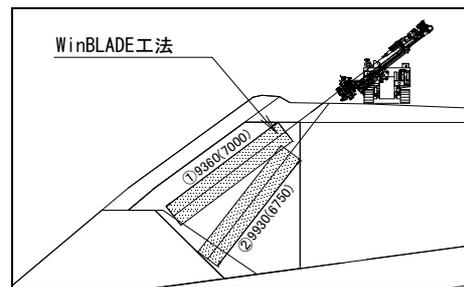


図-9 標準断面図

参考文献

- 1) 石井裕泰, 藤原斉郁, 小林真貴子, 青木智幸, 立石洋二, 菅浩一, 三上登, 佐藤潤: 地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発～浚渫土層、沖積砂層での造成～, 土木学会第 68 回年次学術講演会 pp. 591-592, 2013.
- 2) 建築のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 日本建築センター, 2002

全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」の開発 —山岳トンネル工事における 穿孔誘導技術及び地山診断技術—

若林 宏彰¹

¹(株)鴻池組 土木事業本部技術部 (〒136-8880 東京都江東区南砂2-7-5)

山岳トンネル工事で多く採用される発破工法では、余掘りが増大することで、材料コストや施工サイクルのロスが問題になっている。また、山岳トンネルは地下深部にある線状構造物であり、事前に地表から十分な地質調査を行えないため、切羽前方の地質を適切に評価しながら掘進することが重要である。全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」は、山岳トンネルで標準的に使用するドリルジャンボを高度化することで、これらの課題を解決したものである。本報告は、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」のシステム概要と、九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事における本システムの導入効果について紹介する。

キーワード 山岳トンネル, 発破工法, 穿孔, 余掘り低減, 地山診断

1. はじめに

国内大型プロジェクトとして期待されるリニア中央新幹線では、路線の大半を長大トンネルが占める。

このような山岳トンネル工事で多く採用される発破工法では、一般的に余掘りが課題となっている。この余掘りの増大は、材料や施工サイクルのロスになるほか、トンネル周辺地山を痛め、安全性や品質の低下の原因となる可能性がある。

一方、山岳トンネルは地下深部にある線状構造物であり、事前に地表から十分な地質調査を行えないのが一般的であり、トンネルの品質を確保しながら安全に施工するためには、トンネル施工中に切羽前方の地質を適切に評価しながら掘進することが重要である。

今回開発した全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」は、山岳トンネルで標準的に使用するドリルジャンボに、①自動追尾式トータルステーションと位置検知用センサーにより削岩機の穿孔位置を把握し、ガイド用モニターにしたがって予め計画した穿孔位置へ誘導する穿孔誘導技術と、②定期的な切羽前方探査と日常の穿孔作業で取得した位置情報を持った穿孔データを活用した地山診断技術を搭載することで、山岳トンネル工事における品質や安全性の確保、コスト縮減や工程確保を可能としたものである（図-1）。

本報告は、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」のシステム概要と、九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事における本システムの導入効果について紹介したものである。

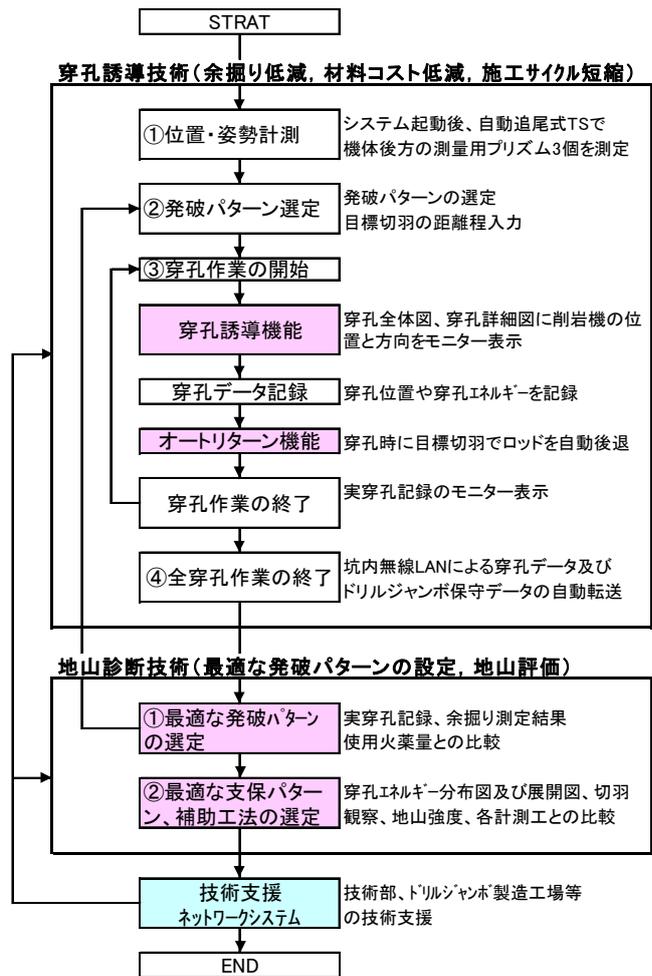


図-1 全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリルNAVI」の概要



図-6 穿孔探査器

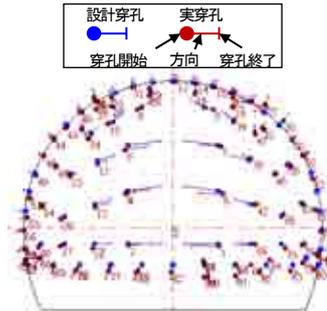


図-7 実穿孔記録表示例

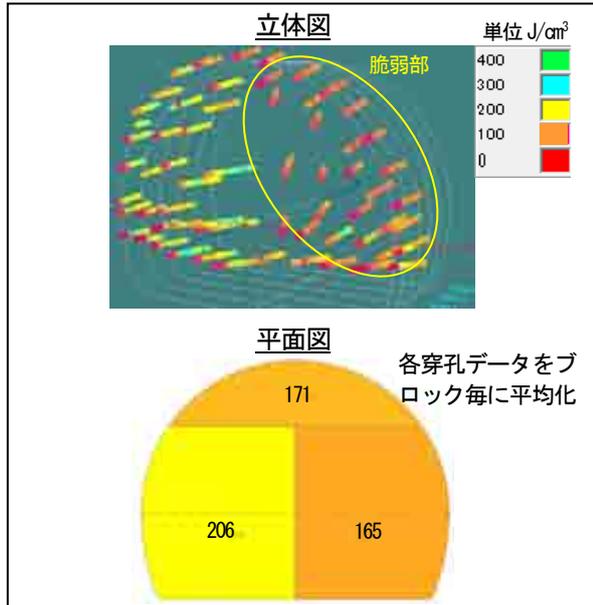


図-8 穿孔エネルギー分布図

(4) 穿孔誘導技術の運用手順

- a) ドリルジャンボが切羽に到着後、機体後尾に設置した3箇所の測量用プリズムを自動追尾式トータルステーションで測定し、機体の位置座標を確定する。
- b) 操作席に設置されたガイダンス用モニターに、目標切羽の距離程を入力するとともに、計画した発破パターンやロックボルト打設位置を表示する。
- c) ガイドシェル後端に設置した測量用プリズムのTS測量と、各削岩機のブームに設置した9箇所の位置検知用センサーにより、削岩機の位置座標をリアルタイムに検知し、ガイダンス用モニターに±5cmの高精度で表示する。
- d) オペレータは、全体画面を見ながら計画した穿孔位置に削岩機を誘導後、詳細画面(平面図、縦断図)に切り替え、穿孔位置と角度を正確に合わせながら穿孔を開始する。
- e) 全削岩機に搭載した穿孔探査器により、穿孔時の油圧データ(打撃圧、フィード圧、穿孔速度、打撃数等)を取得し、地山状況の指標となる穿孔エネルギーを算定する。算出された穿孔エネルギーと位置情報デ

ータを統合し、穿孔データとしてドリルジャンボのシステムパソコンに記録する。

- f) 穿孔ビットが目標切羽位置に到達すると、オートリターン機能により、自動的に穿孔を終了しロッドが後退する。
- g) 穿孔作業中は、ガイダンス用モニターに実穿孔記録をリアルタイムに表示する。オペレータは、c)~g)を繰り返しながら穿孔作業を行う。
- H) 全穿孔作業終了後は、e)で統合した穿孔データとドリルジャンボの保守データ(電力過負荷や油温上昇などの異常履歴)を、坑内無線LANを経由して、工事事務所や、ドリルジャンボ製造工場、本社技術部等の技術支援ネットワーク関連部署のパソコンへ自動転送する。

(5) 地山診断技術の運用手順

- a) 工事事務所のパソコンにおいて、実穿孔記録や余掘り測定結果、使用火薬量等を比較して、最適な発破パターンを作成する。
- b) 位置情報を持った穿孔データを、立体図やブロック毎(天端、右側、左側)に平均化した平面図で表示し、地山状況を定量的に評価する。
- c) 切羽前方探査で得られる長尺の穿孔データと、発破孔やロックボルト等の穿孔作業で得られる短尺かつ複数の穿孔データを蓄積し、最適な支保パターンや補助工法を検討する。
- d) 掘削中の地山トラブルやジャンボの機械トラブルが発生した場合、技術支援ネットワークシステムを活用し、各専門分野の技術支援を受けることで早期解決を図る。

3. 現場実証試験

(1) 工事概要

九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)他工事の57km850m~58km500mの650m間において、全断面穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の現場実証試験を実施し、本システムの導入効果を確認した。

表-1に工事概要、図-9に地質縦断図及び平面図、図-10に支保パターンを示す。

表-1 工事概要

工事名称	九州新幹線(西九州)新長崎トンネル(東)
発注者	鉄道建設・運輸施設整備支援機構
施工者	鴻池組・日本国土開発・西武建設・竹下建設 共同企業体
工事場所	長崎県長崎市現川町地内
工期	2013年3月~2018年2月
穿孔機械	3ブーム2バスケットドリルジャンボ 170kg級
工事概要	・工事延長3900m、トンネル延長3870m (NATM、発破掘削、内空断面積66.8m ² 、補助ベンチ付き全断面工法) ・地質状況: 変朽安山岩、角閃石安山岩、輝石安山岩、凝灰角礫岩



図-9 九州新幹線（西九州）新長崎トンネル（東）他工事 地質縦断面図及び平面図

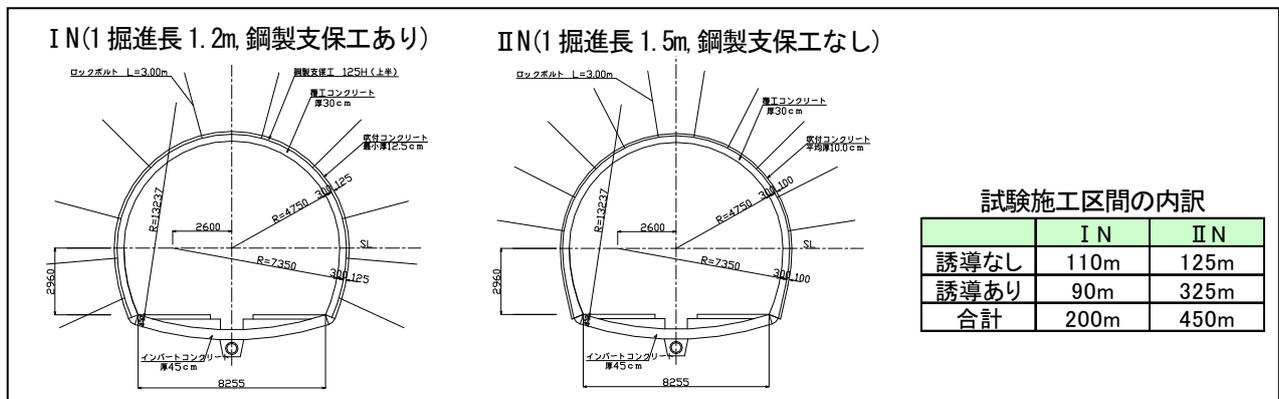


図-10 支保パターン図

(2) 穿孔誘導技術の効果確認方法

a) 余掘り量測定方法

余掘り量は、吹付け面の凹凸をレーザースキャナーで測定し、設計吹付けラインと実吹付けラインとの差分をトンネル周方向で平均化して算出した。

b) サイクルタイム測定方法

穿孔、装薬、発破、ずり出し、吹付け及びロックボルトの施工時間を測定した。また、発破孔の穿孔作業に着目し、削岩機の穿孔速度や移動時間、発破孔数を分析して、施工時間の短縮要因を確認した。

(3) 地山診断技術の効果確認方法

a) 最適な発破パターンの作成方法

掘削を担当する協力業者の2班それぞれにおけるオペレータの実穿孔記録を分析し、ガイダンス用モニターに表示する計画発破パターンを作成した。その後、余掘り測定結果とオペレータによるヒヤリングを重ね、最適な発破パターンに修正した。

b) 地山の評価方法

全削岩機に搭載した穿孔探査器で取得した油圧データから地山状況の指標となる穿孔エネルギーを次式で算出し、穿孔位置データと統合した。

$$\text{穿孔エネルギー}(\text{J}/\text{cm}^3) = \frac{\text{打撃エネルギー}(\text{J}) \times \text{打撃数}(\text{bpm}) \times \text{損失係数}K}{\text{穿孔速度}(\text{cm}/\text{min}) \times \text{孔断面積}(\text{cm}^2)}$$

$$\text{平均穿孔エネルギー}(\text{J}/\text{cm}^3) = \text{各孔の穿孔エネルギーの和} / \text{孔数}$$

次に、支保パターン毎に平均穿孔エネルギーの分布状況を確認するとともに、短尺かつ複数の穿孔データを、穿孔エネルギー立体図や、ブロック毎の平均穿孔エネルギー平面図に表示し、切羽観察記録と比較した。

さらに、切羽前方探査で取得した長尺の穿孔データと日常の穿孔作業で取得した短尺かつ複数の穿孔データを、切羽においてロックシュミットハンマーで測定した岩盤強度と比較し、相関性を確認した。

4. 本システムの導入効果

(1) 穿孔誘導技術の導入効果

a) 余掘り量測定結果

図-11に余掘り量測定結果を示す。

鋼製支保工のあるINパターンにおける平均余掘り量は、誘導なしで5cm、誘導ありで1.7cmとなり、約66%低減することができた。また、鋼製支保工のないIIパターンにおける平均余掘り量は、誘導なしで20.5cm、誘導ありで10.3cmとなり、約50%低減することができた。

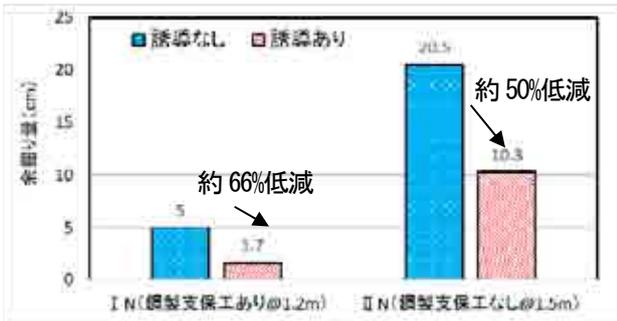


図-11 余掘り測定結果

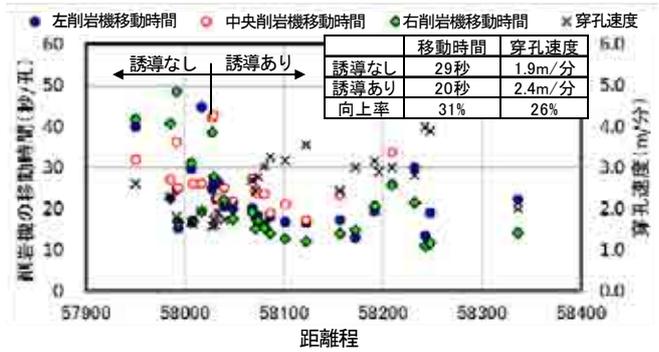


図-13 穿孔速度測定結果

b) サイクルタイム測定結果

図-12 にサイクルタイム測定結果を、図-13 に穿孔速度測定結果を、図-14 に発破孔数測定結果を示す。

図-12 より、サイクルタイムは、誘導なしで 5.2 時間、誘導ありで 4.4 時間となり、約 15%低減した。

図-13 より、削岩機の平均移動時間は、誘導なしで 29 秒、誘導ありで 20 秒となり、約 31%低減した。また、穿孔速度は、誘導なしで 1.9m/分、誘導ありで 2.4m/分となり、約 26%向上した。

図-14 より、地山の平均穿孔エネルギーが 100～400J/cm³ の範囲における発破孔数は、誘導なしでは、穿孔エネルギーが大きくなるにつれて増加傾向にあったが、誘導ありでは、穿孔エネルギーの大小にかかわらず、ほぼ一定孔数で推移していることがわかった。

これらの測定結果とオペレータへのヒヤリングにより、誘導ありでは、ガイダンス用モニターに表示される計画発破パターンや実穿孔記録を参考に穿孔するため、削岩機の移動時間や孔数を抑制できること、オートリターン機能により、穿孔時間や掘り過ぎを抑制できることがわかった。

特に図-14 に示すように、誘導なしでは、オペレータは地山が硬くなると孔数を増やす必要があると思いついでいたが、誘導ありでは、ガイダンスとそれまでの発破結果から、その必要性がないことを確認した。その結果、孔数抑制による装薬時間の短縮や、余掘り低減によるずり出し時間や吹付け時間の短縮にも効果があった。

今後は、これらの結果に基づき、穿孔エネルギーに応じて最適な孔数を割り出し、施工効率の向上に繋げていく方法を検討していきたい。

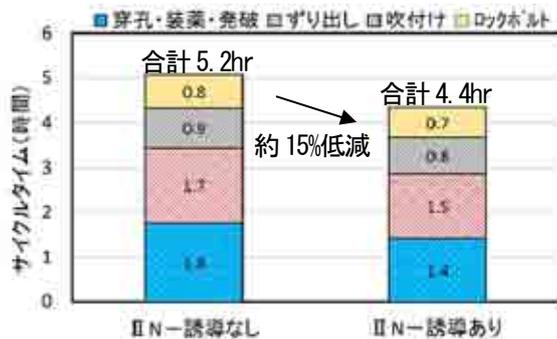


図-12 サイクルタイム測定結果 (IINパターン)

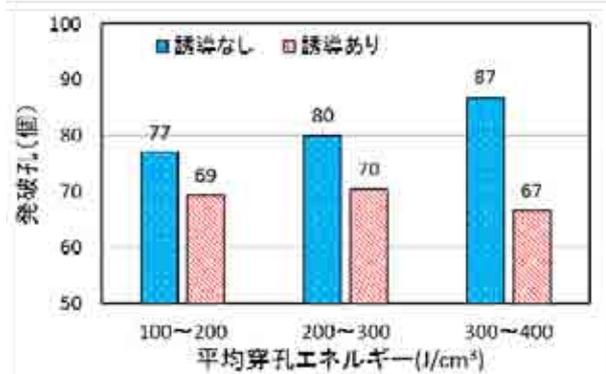


図-14 発破孔数測定結果 (IINパターン)

(2) 地山診断技術の導入効果

a) 最適な発破パターンの作成

図-15 に掘削担当の A 及び B 班の実穿孔記録 (誘導前) と計画発破パターンを示す。

誘導前の実穿孔記録結果によると、同一支保パターンにおいて、A 班より B 班の方が孔数が多く、穿孔長も長いこと、また、同一班でも左右のオペレータによって、孔数、位置、間隔等が異なることを確認できた。このことから、実際の発破パターンは、各オペレータの感覚、経験や技量によって大きく異なることがわかる。

最適な発破パターンの作成にあたっては、余掘り測定結果と実穿孔記録を比較し、オペレータへのヒヤリングを重ね、芯抜き孔やトンネル外周孔の間隔、穿孔長さやさし角を調整しながら修正していった。

なお、現在、B 班は、孔数が少なく、穿孔長の短い A 班の発破パターンを参考に穿孔し、効率化を図っている。

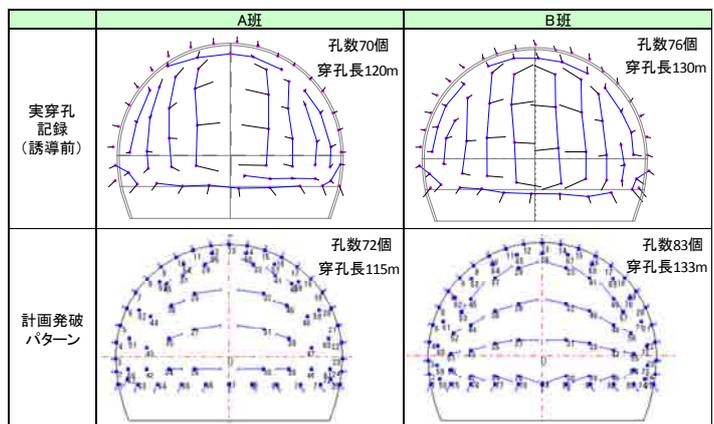


図-15 実穿孔記録と計画発破パターン (IINパターン)

b) 地山評価

図-16 に支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況を、図-17 に切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係を、図-18 に穿孔エネルギーと岩盤強度の関係を示す。

図-16 より、平均穿孔エネルギーは、IN パターンで 100 未満～300J/cm³ (平均 159J/cm³)、II N パターンで 100～400J/cm³ (平均 283J/cm³) の範囲に分布していることがわかった。

図-17 より、切羽での肌落ちや崩落箇所が、穿孔エネルギーの低い箇所と概ね一致していることがわかった。

図-18 より、切羽前方探査 (L=30m×1 本) で取得した穿孔エネルギーよりも、日常の穿孔作業で取得した平均穿孔エネルギーの方が、切羽における原位置での岩盤強度との相関性が高いことがわかった。このことから、切羽前方探査は、長尺かつ単数の穿孔エネルギーで地山評価するため、発破や掘削による緩みや切羽全体の地山状況を適切に把握できないこと、一方で、日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーは、短尺かつ複数の穿孔エネルギーを平均化して評価するため、切羽全体の地山状況を面的かつ定量的に把握できることがわかった。

以上より、定期的な切羽前方探査で前方地山の概要を把握し、日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーで直近切羽の地山状況を詳細に把握することで、トンネル全長にわたって高精度な地山診断が行え、最適な支保パターンや補助工法の選定に活用できることがわかった。

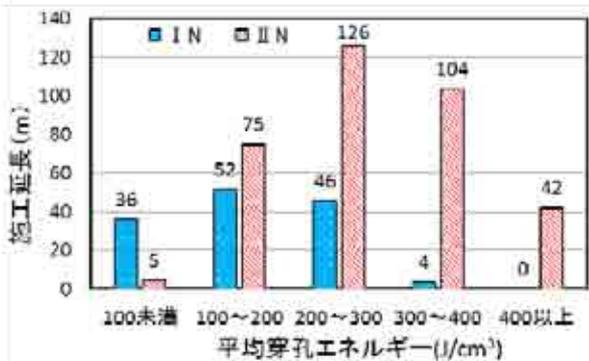


図-16 支保パターン毎の穿孔エネルギー分布状況

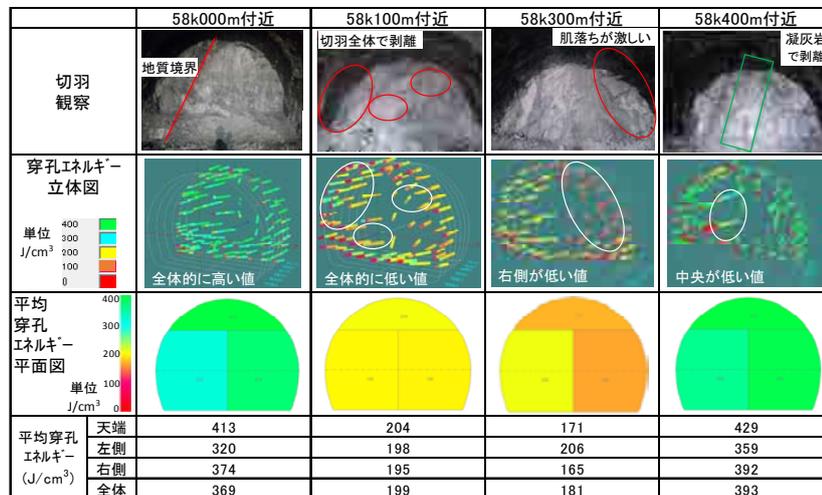


図-17 切羽観察記録と穿孔エネルギーの関係

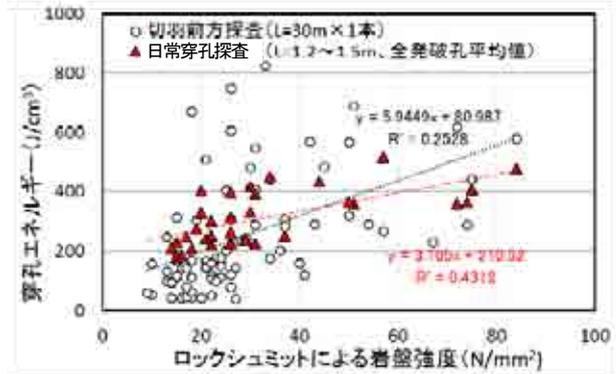


図-18 穿孔エネルギーと岩盤強度の関係

(3) 本システムの導入効果まとめ

九州新幹線 (西九州) 新長崎トンネル (東) 他工事での現場実証試験における全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の導入効果を以下にまとめる。

- a) 穿孔誘導技術により、オペレータの経験や技量によらず、余掘りを約 50～66%、サイクルタイムを約 15% 低減できる。
- b) 地山診断技術により、日常の穿孔作業において、特別な探査時間を要することなく、高精度な地山診断が行える。
- c) 定期的な切羽前方探査と日常の穿孔作業で取得した穿孔エネルギーを様々な方法で図化することで、切羽前方、切羽全面、トンネル周辺を含むトンネル全長について高精度かつ詳細な地山診断ができ、最適な支保パターンや補助工法を選定できる。

5. おわりに

九州新幹線 (西九州) 新長崎トンネル (東) 他工事での現場実証試験により、全断面追尾式穿孔誘導システム「ドリル NAVI」の優れた導入効果を確認できた。

今後は、切羽観察記録、岩盤強度や計測結果等の施工データを蓄積し、穿孔データとの相関性を把握することで、支保パターンの選定精度の向上を図るとともに、工事完了後は、これら穿孔データを含む施工記録を CIM 化し、発注者に引き継ぐことで、山岳トンネルの維持管理に活用していくことを目標としている。

最後に、本技術の現場適用をご承認頂いた (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構、並びに、共同開発者である古河ロックドリル(株)、マック(株)、カヤク・ジャパン(株)の関係各位に感謝の意を表します。

車両プローブデータを活用した 入口案内の最適化検討について

兒玉 崇¹・井上 徹²

¹阪神高速道路株式会社 保全交通部 交通企画課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

²阪神高速技研株式会社 技術部 技術課 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)

近年社会問題化している高速道路の逆走について、阪神高速道路では入口の間違いに起因する案件が多くみられるが、その実態を把握するには通報に頼る現状の手法では限界がある。

本研究は、潜在的な案件も含め、高速入口の間違について、車両プローブデータを活用し、状況を把握することを試みるとともに、既存の案内標識の設置の妥当性について検証を行い、今後の対策の方向性について提案するものである。

キーワード 高速道路, 逆走, 誤進入, プローブデータ

1. はじめに

近年、高速道路の逆走が社会問題化している。

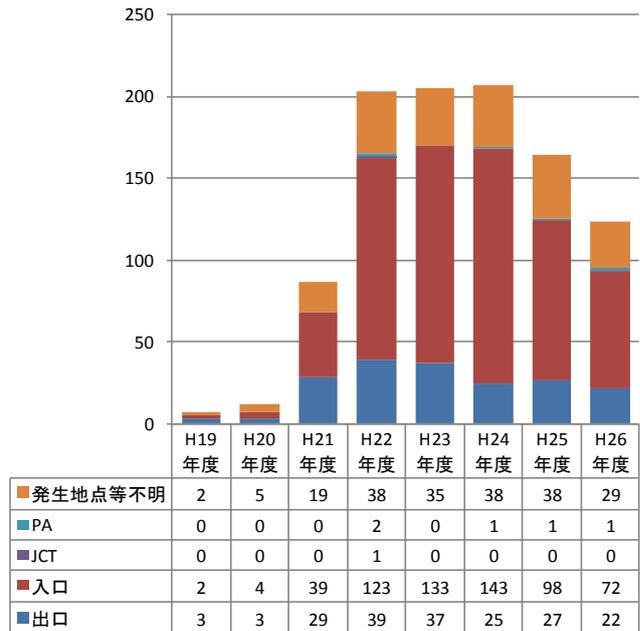
高速道路会社各社も逆走案件の認知に注力しているが、現状の通報等による認知手法では全数を完全に把握することは困難であり、また詳しく間違いの経緯等を聞き取れた案件に限れば、さらにそのごく一部に過ぎない。

阪神高速道路で把握している逆走事例の内訳は、図-1に示すとおり、出口から進入して本線を逆走する事例よりも、入口へ進入後に間違いに気付いて入口を逆走する事例の方が圧倒的に多い。この理由としては、都市高速道路である阪神高速道路では基本的に料金所は入口にしかないため、入口での逆走事案を発見しやすいことも影響しているが、都市内の複雑な道路環境による高速入口案内の分かりにくさにも原因があると考えられる。

高速入口の進入間違いには、阪神高速道路を利用したい車両が誤って意図せぬ出入口に誤進入する場合と、一般道路と誤認して進入する場合に大別される。しかしながら、状況が多岐にわたるにも関わらず、前述の手法では確保して間違いの経緯等を詳しく聞き取れた案件が少なく、実態を十分把握できていないことが課題であった。

ここで、これらの事例が発生する状況について、考えられるものを以下に示す。

- ①高速入口と隣接する高速出口に誤って進入したもの
(例：3号神戸線生田川入口)
- ②意図とは逆方面の高速入口に誤って進入したもの
(例：4号湾岸線貝塚入口)
- ③高速入口を一般道路と誤認して進入したもの
(例：15号堺線堺入口)



注) 逆走の件数(管理隊の出動件数)は、H21年度下期から認知件数も含めてカウント。故意等によるものを含む。

図-1 発生地点別逆走件数の推移

本研究は、通報等により現場に駆け付けた管理隊員による当事者への聞き取りだけでは十分な状況把握が困難な高速入口の進入間違い案件に着目し、車両プローブデータを活用して、同案件(潜在的なものも含む)を合理的な手法で抽出し、間違いが発生した経路上の入口案内標識の設置状況や一般道路の状況を検証して、入口案内の改善につなげていくことを目的とする。

2. 誤進入案件の抽出手法の検討

(1) 分析に用いたプローブデータ

プローブデータを用いて阪神高速道路利用車両の入口間違いの発生状況を分析するには、実際に入口間違いを起こした車両のデータを抽出し、アクセス経路や誤進入するまでの運転挙動の特徴を捉えるのが最も直接的かつ信頼度の高いアプローチである。

しかしながら、同案件の発生頻度はそれほど高くないため、現状におけるプローブデータ取得車両数を鑑みると、実際に誤進入した車両のデータが得られる可能性は極めて低いと考えられる。

そこで、本研究では、逆走が多発している入口利用トリップに着目し、その中から入口間違いを起こした蓋然性が高いものを効率的に抽出・分析することを考えた。

具体的には、トリップの出発地と目的地の位置関係から、当該入口を利用することが明らかに不合理となる条件を設定し、データベース上のプログラム処理で誤進入案件を判定する抽出手法を採用することとした。

なお、同抽出手法を実装するには、プローブデータにトリップごとのOD及びOD間経路が分かる情報が含まれていることが必要となる。さらに、誤進入・逆走につながるという稀な現象を捉えるという観点を踏まえて、本研究では、商用車に限定はされるがサンプル数が多い、富士通(株)が提供する商用車プローブデータを用いることとした(表-1参照)。同プローブデータは、富士通製のネットワーク型デジタルタコグラフを搭載し、特定の運行管理システムを利用する貨物車などの約5万台の商用車から収集されたデータである(2015年4月末時点)。

阪神高速道路を利用したトリップ数は、2014年11月の1ヶ月間で約15.2万トリップであり、これは、同年月の阪神高速道路の大型車通行台数(約192万台)の約8%にあたる。なお、この商用車プローブデータは利用用途に応じた数種類のフォーマットで提供されるが、本研究では分析の目的を鑑みて、1秒単位で取得されたドットデータをデジタル道路地図のリンクにマップマッチングした車両ID付きの経路データを用いることとした。データの取得期間は2014年11～12月の2ヶ月間である。

次項に同データを用いた入口間違い案件の抽出手法を示す。

表-1 本分析に必要なプローブデータの要件

データ項目	備考	データイメージ
車両ID	車両固有のID	711974851840
トリップID	トリップを特定するためのID	1416270368
二次メッシュ番号	DRMリンクが存在する二次メッシュ番号	523500
DRMリンク番号	DRMのリンク番号	02730636
リンク進行方向	1:順方向, 2:逆方向	2
リンク進入時刻	yyyy/mm/dd hh:mm:ss形式	2014/11/18 9:29:27
リンク所要時間	秒単位	26.7

(2) 誤進入の判定方法

本研究で用いたプローブデータを活用した入口間違いの抽出手法について、11号池田線(大阪市内方面)の塚本入口を例に概説する(図-2, 図-3)。

まず、当該入口で誤進入が発生するトリップ特性とメカニズムについての仮説を立てる(Step1)。

塚本入口は大阪市内方面の南向きの入口であるが、取り付け口は淀川通の北側に位置しており、ランプに流入後にUターンするようなアプローチで本線と合流する形状となっている。この接続形状が故に、大阪市内とは逆の豊中・池田方面に向かう車両が、北向きの入口と勘違いして流入する状況が発生していたと想定される。

次に、誤進入した車両が、リカバリーのためにとるであろう行動を想定する(Step2)。

豊中・池田方面に向かう車両が塚本入口に誤進入した場合、下流側の出口である福島や梅田から流出し、11号池田線下りの福島入口から再流入する、もしくは一般道路を経由して豊中・池田方面に向かうといった行動をとることが想定される(リカバリー行動として、一般道路に引き返した場合が逆走である)。あるいは、阪神高速道路からは流出せずに、1号環状線を周回して11号池田線下りに入るというパターンが考えられる。

上記のようなリカバリー行動は、経路データをGISで図化すれば、目視で容易に把握できる(図-3)。しかしながら、全てのトリップを図化して目視確認することは現実的ではない。そこで、データベース処理が行えるように、上記の行動を特徴づけるDRMリンクを複数選択して、その時間的な通過順序を定める(Step3)。

塚本入口の場合、入口リンクの選択は必須であり、また、誤進入したことで淀川を越えてしまうため、本来の目的地に向かうためには淀川を再度越える必要がある。これを捉えるためには、淀川に架かる道路の大阪市内方面リンクを指定すればよい(11号池田線下り、国道2号下り、国道176BP下りなど)。この場合、リンクの流入時刻は「入口リンク<橋梁リンク」とならなければならない。最後に、データベース上でプログラム処理を行い、Step3で定めた条件(指定リンクを全て利用し、かつ、指定リンクの流入時刻の大小関係が指定した順序となっていること)に合致するトリップを抽出する(Step4)。

本研究では、以上の抽出ステップで入口間違いの抽出を行った。次頁に多発入口を対象にした抽出結果を示す。

- Step1 当該入口で誤進入が発生するトリップ特性とメカニズムを仮説
- Step2 誤進入車両のリカバリー行動(トリップ)を推定
- Step3 行動が特定できるDRMリンクを複数抽出して通過順序を設定
- Step4 Step3で定めた条件に合致するトリップをデータベース上で抽出

図-2 プローブデータ活用による入口間違い案件の抽出ステップ

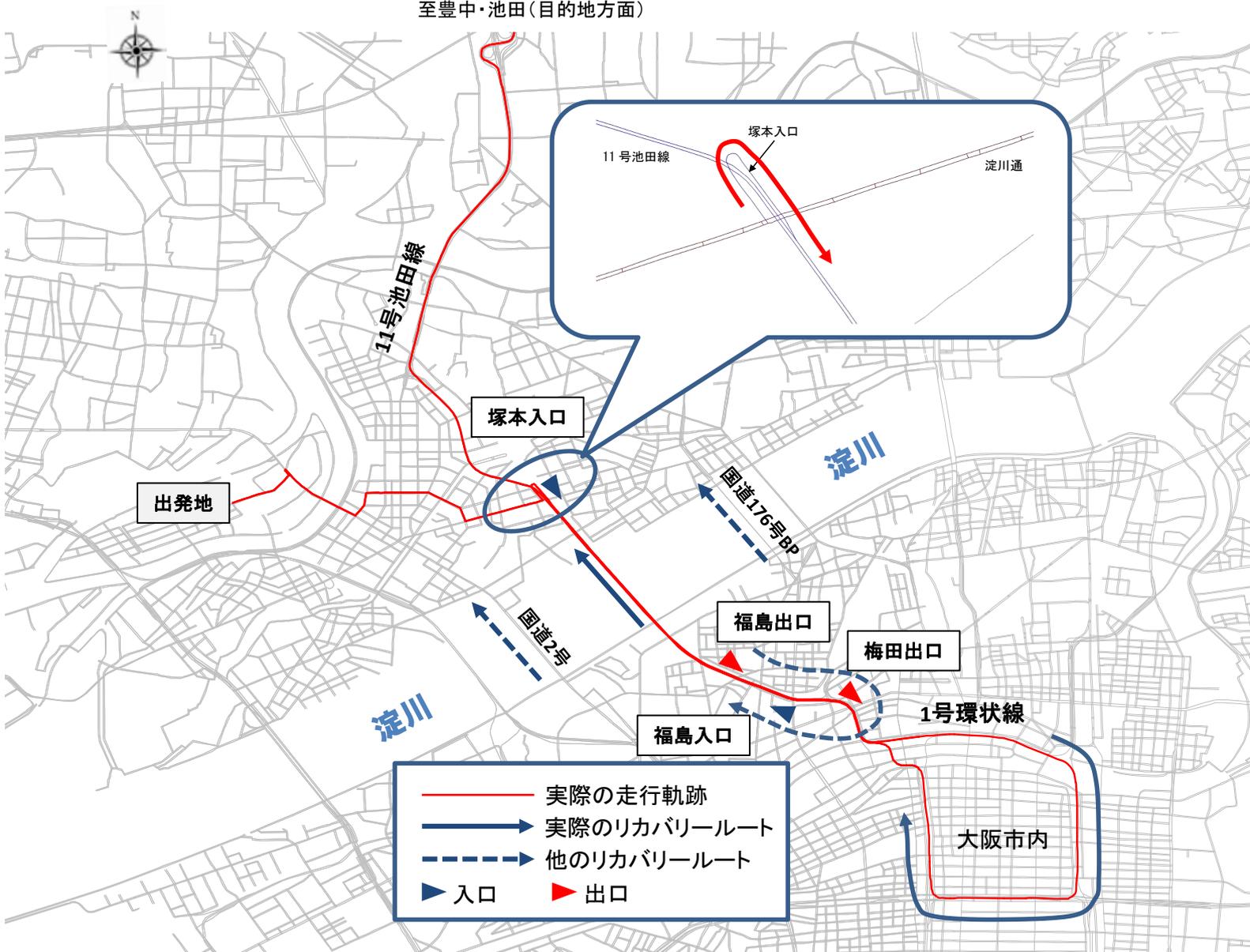


図-3 プローブデータを活用した入口間違い抽出のイメージ（11号池田線（大阪市内方面）塚本入口での間違いの例）

3. 検証事例

前述した3つの高速入口の進入間違いについて、多発入口を対象に実施した、プローブデータを用いた案件の抽出について、その検証結果を示す。

(1) 3号神戸線生田川入口

3号神戸線生田川入口は、進入路が交通量の多い国道2号に直交しており、国道2号からの右左折で進入する。生田川入口に隣接する一般道路は3号神戸線上り生田川東行出口から国道2号へのアクセス道路となっており、同出口からの逆走進入案件が散見されている。

このため、生田川入口利用車両が同入口への進入路を誤り、同出口に進入した可能性が指摘されていた。

プローブデータによる入口間違いトリップを抽出した結果、分析期間中に生田川入口を利用した760トリップのうち3トリップで不合理な入口進入をしている案件を抽出できた。

図-4にその一例を示すが、抽出された3トリップのうち2トリップが、国道2号からの右折進入であり、手前の隣接道路に誤って進入（生田川東行出口には進入していない）し、迂回して生田川入口に進入したものであった。

同アクセス経路上の入口案内標識は図-5のとおりであり、生田川入口への進入路も今回間違いの起こった隣接道路も右折レーンがあることを踏まえると、勘違いが生じた原因が伺えた。今後は標識の分かりやすさの向上を検討するとともに、路面表示等での補足を国道2号の管理者と協議するなど、対策を検討していきたい。

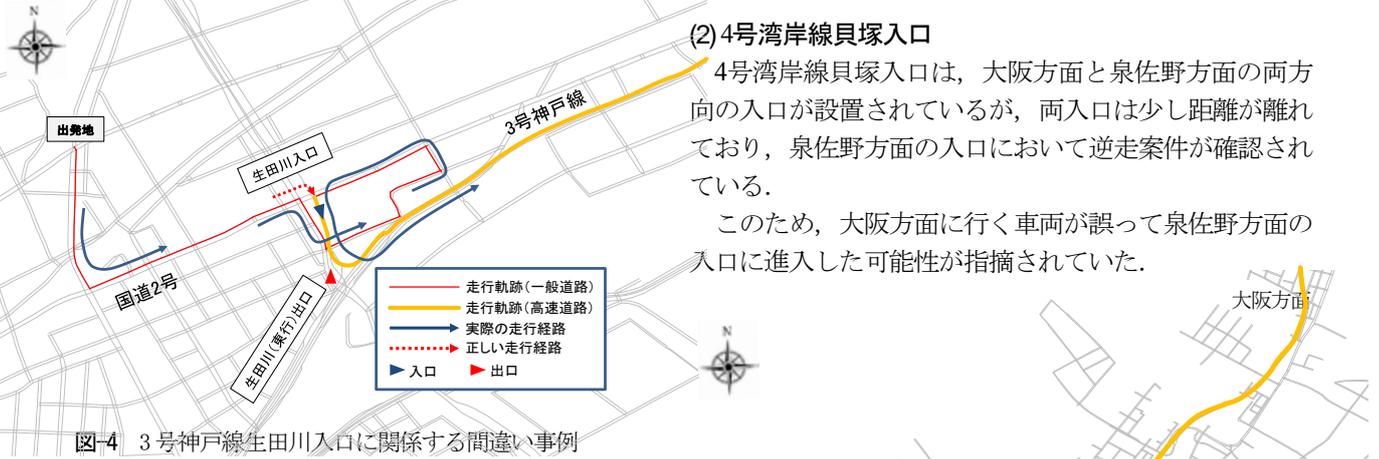


図-4 3号神戸線生田川入口に関する間違い事例



図-5 3号神戸線生田川入口へ右折進入を案内する標識



図-6 4号湾岸線貝塚入口に関する間違い事例

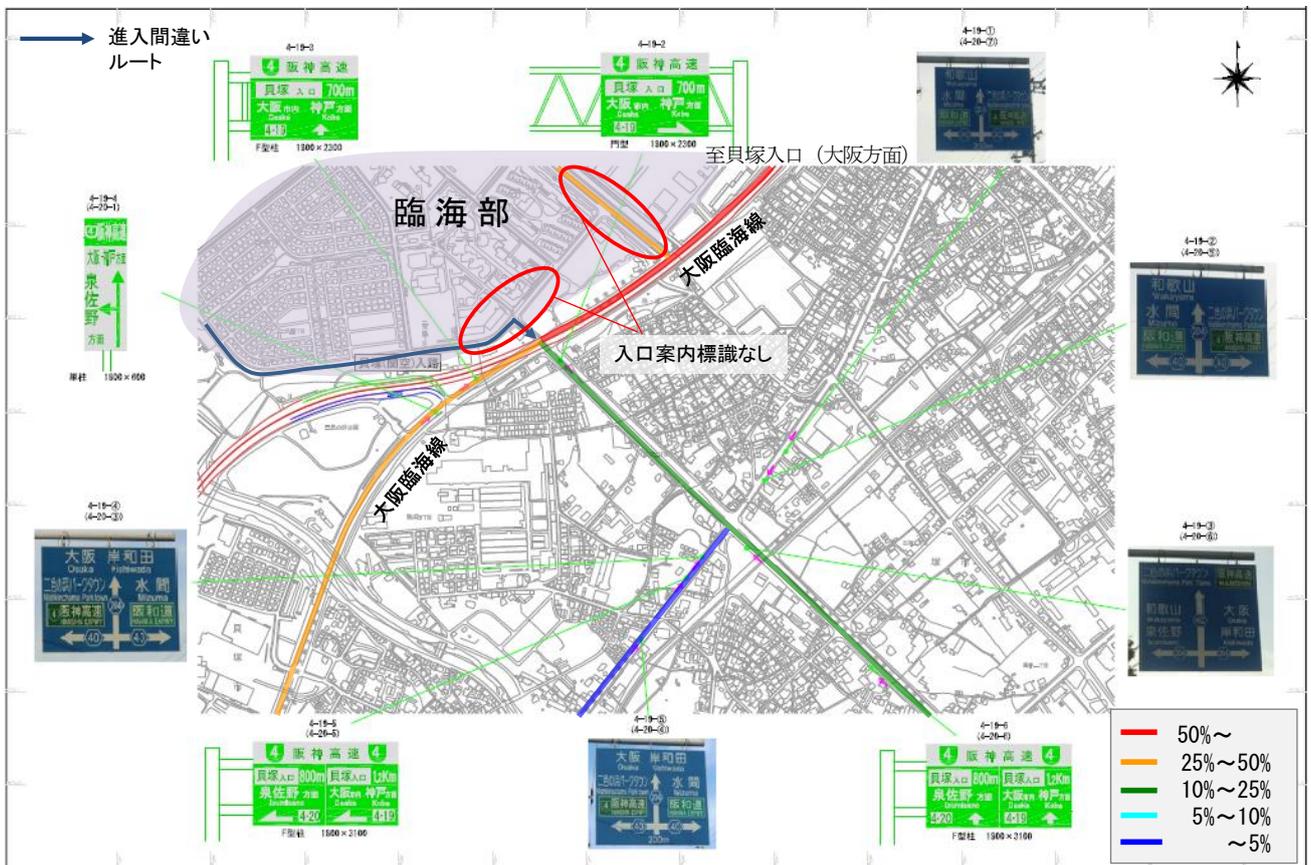


図-7 4号湾岸線貝塚入口 (大阪方面) を案内する入口案内標識の設置位置と同入口利用トリップのアクセス状況

プローブデータによる不合理な入口利用トリップを抽出した結果、分析期間中に貝塚入口（泉佐野方面）を利用した151トリップのうち1トリップで不合理な入口利用をしている案件を抽出できた（図-6参照）。同事例は、両入口の間に直交する街路から大阪臨海線に進入しており、その際により近傍にある貝塚入口（泉佐野方面）に誤って進入して泉佐野方面に走行し、次の泉佐野北出口でUターンして、泉佐野北入口から再度高速を利用して大阪方面に向かったものであった。

同アクセス経路上の入口案内標識の設置状況は、図-7に示すとおりであり、貝塚入口（泉佐野方面）直近に泉佐野方面の入口案内標識があるものの、両入口にアクセスする大阪臨海線に臨海部から直交する街路上には入口案内標識がないことがわかった。さらに、貝塚入口（大阪方面）の利用経路トリップを確認すると、同様な臨海部からのアクセス車両が全体の31%を占めており、湾岸線建設後に開発された臨海地区の影響による交通状況の変化に、貝塚入口の案内が対応できていないことが明らかになった。今後、臨海部から同入口へのアクセス経路における入口案内標識等の追加設置について検討していきたい。

(3) 15号堺線（大阪方面）堺入口

15号堺線（大阪方面）堺入口は、進入路が交通量の多い国道26号の「安井町」交差点直後に位置し、同交差点を境に4車線のうち左側2車線が堺入口への進入路に変わる（図-8参照）。しかも堺入口から進入した車両は、本線合流後に堺本線料金所で通行料金を収受されるため、一般道路からは料金所が視認できない。このため、堺入口と気付かずに進入した可能性が指摘されていた。

プローブデータによる入口間違いトリップを抽出した結果、分析期間中に堺入口を利用した2,695トリップのうち1トリップでその後不合理な経路を辿っている案件を抽出できた（図-9参照）。

同事例は、国道26号と直交する宿院通から国道26号に左折して入り、キープレフトしたまま誤って堺入口に進入して、そのまま堺本線料金所を通過して堺線を走行し、津守出入口をUターンして再び堺線を走行した後に、最終的に玉出口で降りて目的地に向かったものであった。



図-8 15号堺線堺入口付近（国道26号「安井町」交差点直後）

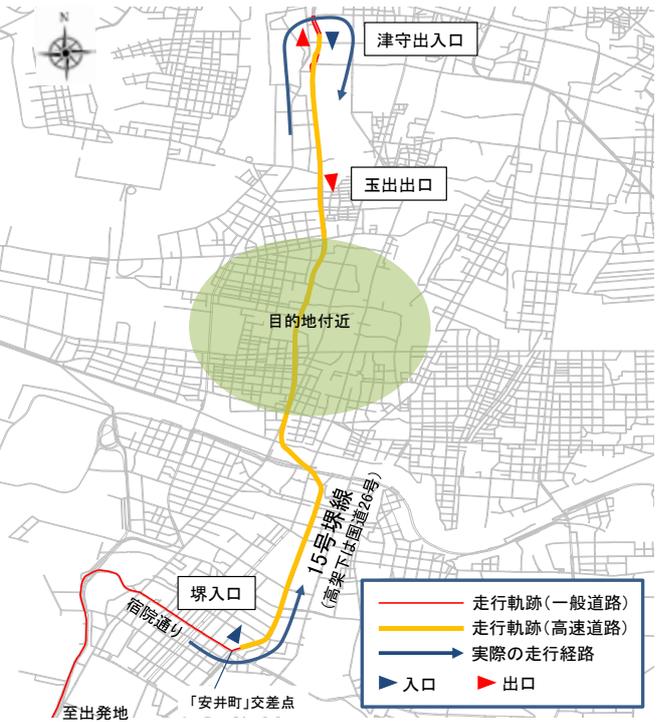


図-9 15号堺線堺入口に関する間違い事例

しかしながら、本事例のように、本線料金所手前で引き返さずにそのまま本線を走行し、Uターンできる出入口で一旦高速を下りて、安全にUターンする車両ばかりではないと思われ、その場合、本手法は堺入口の利用（正確には堺本線料金所の通過）をトリガーにしているため、料金所通過前に引き返した案件を抽出することはできない。

今回間違いが発生したアクセス経路上は、入口案内標識は充実しているものの、国道26号に左折後の車線構成（左側2車線が阪神高速堺入口専用）まで表現するには限界があり、今後、国道26号の管理者と路面表示等の追加設置について検討・協議を進めていきたい。

4. 本研究の成果と課題

本研究では、逆走案件が多発していた入口に着目し、経路情報を有するプローブデータを活用して、当該入口を利用した車両に対して、明らかに不合理な利用を高速入口の進入間違いとして機械的に抽出を行い、数件の事例を抽出するなど、同手法が利用入口間違いに起因する逆走案件の詳細把握に寄与し、その実用性も高いことを実証することができた。

また、間違った経路が明確になることで入口案内上の問題点が明らかとなり、さらに、利用入口への進入経路の利用率と入口案内の標識位置を図化することで、実際の利用状況に応じた道路案内がされているかの検証ができ、これまで見落としていた入口案内の不足箇所も抽出

可能となった。この結果は、今後の追加対策の検討や一般道路の管理者との協議を進めるうえで有効な基礎資料となる。なお、今回抽出された不足箇所は道路建設時には想定されていなかった経路であり、このことは、後開発による入口付近の交通状況変化に伴う入口案内ニーズの変化を、本研究で用いたデータ分析手法等を用いて定期的に確認する必要があることを示唆するものである。

以上をまとめると、近年社会問題化している高速道路の逆走について、高速入口への進入間違いに起因する逆走案件は詳細な状況把握に限界があるという現状の課題に対し、プローブデータの活用という新しい手法による状況把握の実用性を実証できたこと、それにより現状の道路案内の妥当性の検証や、その定期的な検証の必要性を確認できたことは、プローブデータを活用した逆走案件の詳細把握に向けた第1歩として、十分評価できると考える。

一方で、昨今の逆走対策（図-10参照）の推進により、間違いにすぐ気づき退去するケースが増加しているが、こうした軽微案件は潜在的な危険をはらんでいるにも関わらず、現場で見過ごされている可能性も否定できない。しかも本手法はマップマッチングを前提としているため、こうした軽微案件を機械的に抽出することに課題が残る。また、本手法は入口通過をトリガーにしているため、料金所手前で逆走する案件の抽出には向いていない。



図-10 高速入口における誤進入（逆走）対策

この課題に対しては、プローブ情報としてシフト情報（バック）等、車両を切り回した情報が提供されれば補完できる可能性がある。一般的に、これらのプローブデータでは、個人情報や営業情報を秘匿する観点からOD付近の情報は秘匿されているため、シフト情報（バック）等は通常走行中に限定された情報であると思われる。しかも走行中の運転挙動としては、稀で、かつ不可解な運転挙動（例えば、誤進入後のUターンやバック）と捉えることができる。そのため、上記の課題解決に寄与する可能性が期待できることから、既存データの組み合わせによる逆走判定も含め、引き続き検討していきたいと考える。

5. まとめと今後の展開

本研究では、近年社会問題化している逆走について、現状の通報等による状況把握の限界という課題に対して、詳細把握に向けた第1歩として、まずは阪神高速道路で多い高速入口での逆走に着目し、間違いの多い入口を対象にプローブデータを活用して、機械的に誤進入案件の抽出が可能であることを実証した。また、当該入口への進入経路の利用状況から既存の道路案内の妥当性を検証するとともに、同手法等を用いた定期的な検証の必要性を確認することができた。ただし、本研究は2か月間のデータを用いて実施しており、抽出の漏れも懸念される。

そのため、今後は本研究で用いた分析手法のさらなる効率化を図るとともに、分析期間と範囲を拡げ、阪神高速道路の全入口を対象に、事案の実際の発見件数との関係を検証しつつ、同案件の詳細把握に努めたい。

また、次のステップとして、本手法では抽出困難な軽微案件についても、プローブデータの今後の充実を期待しつつ、既存データを有効に活用した抽出手法について、引き続き検討を進め、合理的な道路案内の改善につなげていきたい。

謝辞：本研究の実施にあたり、富士通(株)新規ビジネス開発室の平賀氏、(株)地域未来研究所の田名部氏には多大なる協力を賜った。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

貴志川堤防における浸透対策としての ウェルドレーン工法の効果について

福島 教之

近畿地方整備局 姫路河川国道事務所 工務第一課 (〒640-8227 兵庫県姫路市北条1丁目250)

紀の川水系貴志川では、2011年台風12号の出水により、堤防法尻部および堤内地の水田や畑等の10箇所超で噴砂跡が発見された。本報告は一連の詳細点検結果を踏まえて、その対策工の検討を行うとともに、対策工の選定については、現地における施工性、経済性および維持管理等を考慮した新工法(ウェルドレーン工法)を適用した。検討にあたっては三次元飽和-不飽和浸透流解析を実施し、対策工の配置検討を行い、対策工費の大幅な削減が可能となった。また対策効果を確認する目的で水位観測井を設置しており、対策後顕著な出水が2回あり水位観測記録とデータ分析を行いウェルドレーン工法の対策効果を確認した。

キーワード 河川堤防, 浸透流解析, 浸透対策, ウェルドレーン工法, 効果モニタリング

1. はじめに

紀の川水系貴志川は和歌山県北部を北流し、紀の川本川19.4k付近で合流する支川であり、合流点から5.2kまでが国管理区間である。

2011年9月に発生した台風12号による出水では、紀の川本川及び支川貴志川においても避難判断水位を超過する水位を観測した。支川貴志川においては、最高水位と堤内地盤の比高差は約2.6mとなった。これにより、堤防法尻部および堤内地の水田や畑等で噴砂跡が発見された。

また、2012年6月の梅雨前線による出水においても同様に噴砂が確認され、地元からは早急な対策を講じるよう要望があがっており、これら被害の防止・軽減に向けた対策が急務となっている。

昨年度、九州の矢部川において出水時法尻のパイピングにより堤防が破堤し、堤内地に浸水被害が発生したことで、堤防の質的強化対策についてさらに関心が高まってきている。本報告は貴志川丸栖地区で実施した「ウェルドレーン工法」について紹介するものである。



図1 紀の川流域概要及び貴志川位置図

2. 貴志川での噴砂

(1)2011年(平成23年)9月の台風12号時の被災状況

台風12号の出水による紀の川流域の2日間平均雨量は船戸地点上流で415mmであり、1959年(昭和34年)9月伊勢湾台風時の2日間雨量313mmを大きく上回り、戦後最大値を更新する雨量であった。また、降り始めから5日間で年間雨量の4分の3が集中している。

紀の川水系の支川である貴志川においても流域平均で334mmの雨量があり、水位は5.65mを観測し、避難判断水位5.50mを超過した。貴志川左岸0.2k付近(紀の川市丸栖地区)においては、内水被害が発生し、排水ポンプ車による排水作業が実施された。¹⁾



図2 2011年(平成23年)9月台風12号時の噴砂状況

この出水において左岸丸栖地区（1.2k~2.0k）で地盤の隆起、噴砂が確認されたため、稲刈りに実施した現地調査の結果、大きく分けて3点で10箇所の噴砂を確認した。

3. 浸透に対する照査

(1) 土質調査

堤防の浸透流解析にあたり、検討対象地点における土層の堆積状況およびその連続性を確認する目的で土質調査を行った。調査結果より透水性が高い砂礫層が堤防下を横断的に分布し、川裏側では基礎地盤表層にやや透水性の低い中間土（砂質土～粘性土）が分布しており、河川水位上昇時には川裏側の砂礫層が被圧状態になりやすい地盤条件であることが判明した。

(2) 地盤モデル化

図-3に地盤モデル図を示す。地盤特性値の設定には当該箇所における試験値を採用することを基本とした。

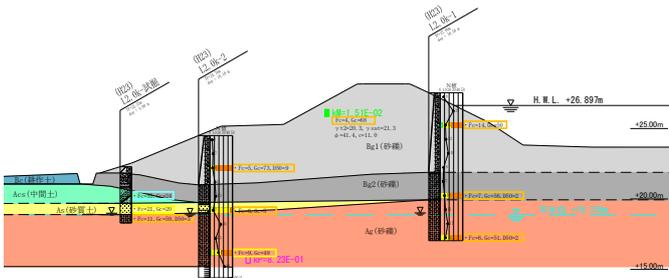
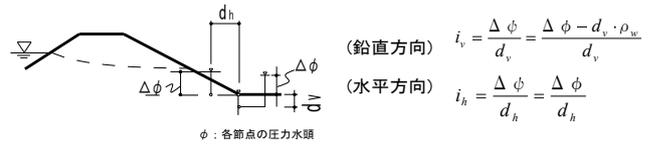


図-3 地盤モデル図
表-1 地盤定数一覧

層区分	湿潤単位体積重量 γ_r (kN/m ³)	飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	透水係数 k (cm/s)
Bg1	20.3	21.3	1.0	41.1	1.51E-02 現場にて水置換法により体積・比重を把握。種分検調試料の三軸試験結果（CD条件） 1.2k-2.0kの堤防 透水試験値
(Bg2)	Bg1層と粒度分布および平均N値（平均N=10）が類似することから、同等の透水性・力学特性を有すると判断し、Bg1層に含めてモデル化を行う。				
Acs	19.8	20.1	24.0	17.2	1.00E-06 1.1.6k-2Sの室内試験結果から設定。
(As)	粒度試験結果より帯水層と判断し、Ag層に含めてモデル化を行う。				
Ag	-	20.0	0.0	34.6	1.63E-01 平均N値18から推定。 道路橋示方書(IV, 下部構造編)に準拠。 (手引き中のDunhamの式)に準拠。 黄忠川下流地区の別場透水試験平均値

(3) 詳細点検結果

堤防の浸透に対する安定性検討は「河川構造の構造検討の手引き²⁾」（以下「手引き」）に準じ、降雨・洪水を外力として非定常飽和-不飽和浸透流解析を実施する。詳細点検では、すべり安定性照査と堤内法尻部におけるパイピング破壊に対する照査をそれぞれ行った結果、すべり破壊および鉛直方向の局所動水勾配に対する安全性が確認されたものの、水平方向の局所動水勾配(ih)および、盤ぶくれに対して所要の安全率を満足しない結果となった。



パイピング破壊(浸透破壊)に対する安全性	被覆土なし	$i < 0.5$ i : 裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値
	被覆土あり	$G/W > 1.0$ G : 被覆土層の重量 W : 被覆土層基底面に作用する揚圧力

図-4 パイピング破壊に対する安全性照査の考え方

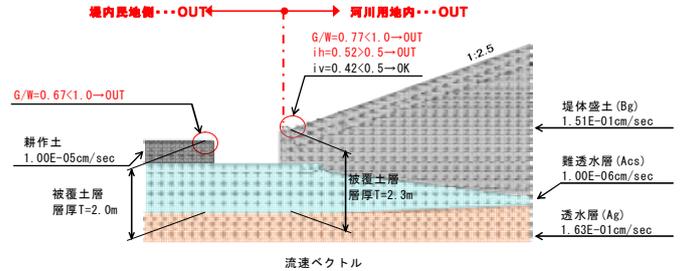


図-5 現況堤防の安全性評価結果

4. 浸透対策工法の検討

(1) 周辺条件

a) 堤内地の地下水利用状況

左岸丸栖地区には農業用水および水道の揚水ポンプが点在しており、地下水位は河川水位と連動していることから、浸透対策として遮水矢板を設置すればポンプからの揚水量が低減する可能性が考えられた。



図-6 堤内地の揚水ポンプ位置図

b) 内水被害の発生区域

堤内地の丸栖地区は内水区域で、ドレーン工法を適用した場合には内水流量がどの程度増えるか留意する必要があった。

また、近畿地方農政局により農地浸水軽減を目的とした農地防災事業が実施中であり、対策工として丸栖地区下流域で排水ポンプの設置が計画されており、ドレーン排水量により、農地防災事業計画にどの程度影響を与えるか把握する必要があった。

5. モニタリング計画

ウェルドレーン対策工の効果確認および設計方法の妥当性確認を目的としてモニタリング調査を行う。モニタリング項目は表-4に示す項目について実施する。図-9に示すモニタリング実施位置は噴砂発生箇所近傍となる1.7k付近と2.0k付近の2地点において計画した。

表4 モニタリング項目一覧

分類	モニタリング項目	使用器材	設置数量	適用
ウェルドレーン	ウェルドレーンの効果確認と設計妥当性確認	水位計	5点×2箇所(上下流)	・堤防横断方向における河川側堤防内と堤内側法尻部での砂礫層内の被圧水位の比較 ・ウェルドレーン延長方向におけるドレーン間の砂礫層内の被圧水高さ分布の確認
	1本のウェルドレーンの排水能力確認	流量計	1箇所	ウェルドレーン1本あたりの排水量の確認
排水路	全体のウェルドレーンの排水能力確認	流量計	1箇所	対策区間末端部での流量確認



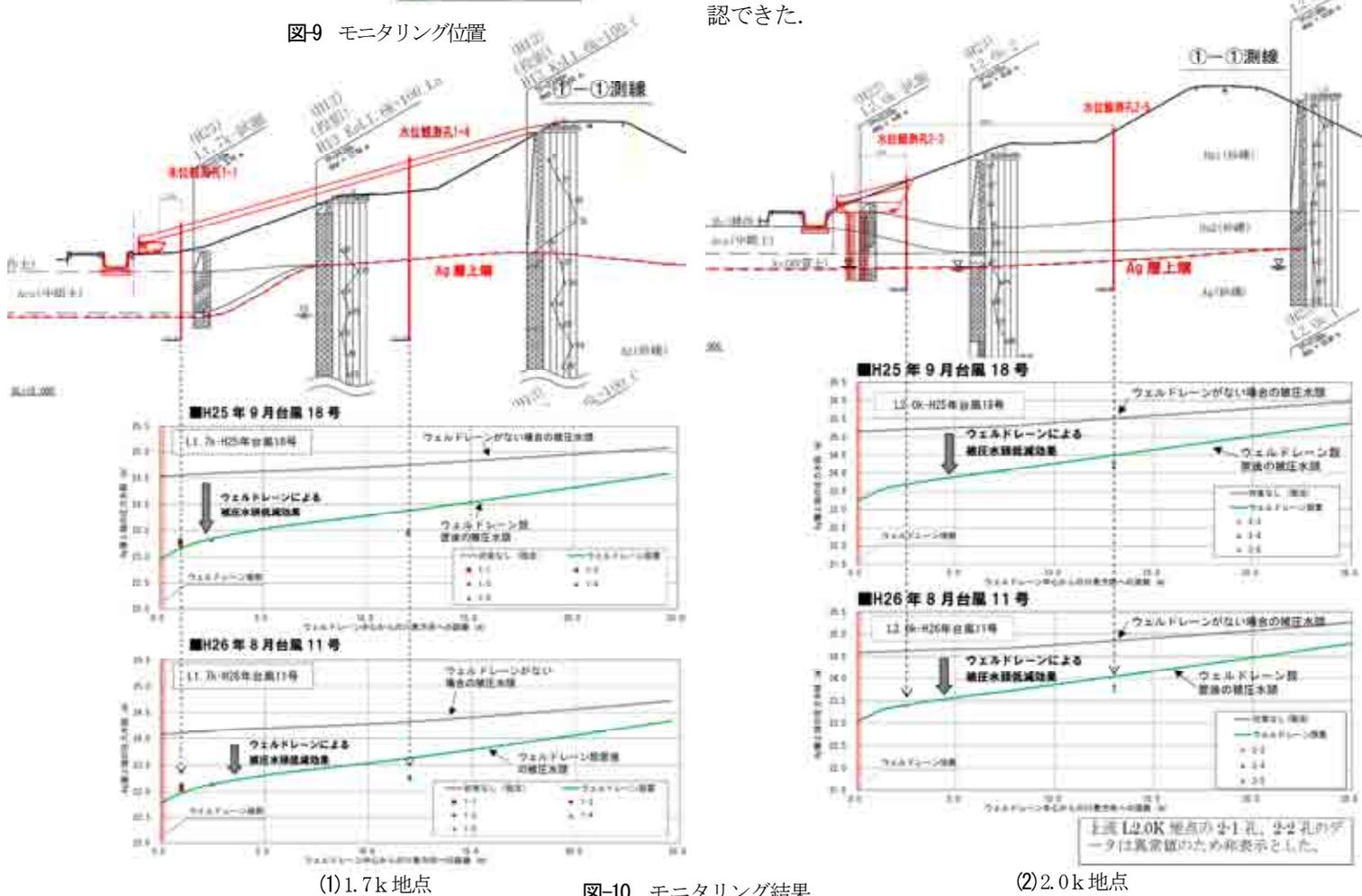
図9 モニタリング位置

6. モニタリング結果と考察

対策工設置以降、顕著な出水として平成 25 年台風 18 号、平成 26 年台風 11 号がある。モニタリング施設で自動観測したこれら出水時の地下水位変動を整理・分析し、各出水時の河道内水位を外力として、飽和-不飽和浸透流解析により、堤体内水位のシミュレーションを行い、対策工の有無のモデルにより対策効果を確認した。その際対策工を設置した現況モデルにおいて観測された堤体内水位と浸透流解析結果を比較することにより現況モデルの妥当性を確認している。

本検討の結果、2.0k 付近のモニタリング結果より、2-1 と 2-2 の観測孔における計測水位は出水時は示されているものの、その前後の平水位における計測水位が他の観測孔と乖離があるため計測異常として検討から除いた。

1.7k 付近のモニタリングでは H.W.L.=T.P. 26.366m に対し、台風 18 号で 25.65m、台風 11 号で 25.33m の河道内水位となり、堤内法尻付近の地下水位は台風 18 号で 23.3m 程度、台風 11 号で 23.0m 程度となっており、無対策ではそれぞれ 24.5m 程度、24.1m 程度で対策効果が確認できた。



(1) 1.7k 地点

図-10 モニタリング結果

(2) 2.0k 地点

2.0k 付近のモニタリングでは H.W.L.=T.P.26.897m に
対し、台風 18 号で 26.78m、台風 11 号で 25.97m の河道
内水位となり、堤内法尻付近の地下水位は台風 18 号で
23.6m 程度、台風 11 号で 23.4m 程度となっており、無対
策ではそれぞれ 25.2m 程度、24.6m 程度で対策効果が確
認できた。

7. まとめ

紀の川水系貴志川における河川堤防を一事例として盤
ぶくれに起因する浸透破壊に着目し、その強化対策とし
て近畿地方整備局管内で初めてウェルドレーン工法を適
用した。本検討で明らかになったことを列挙する。

- (1) 三次元の飽和-不飽和浸透流解析より、ウェルドレ
ーンピッチにおける水頭低下量を算出した結果、
当該箇所において必要なピッチは約 20m となるこ
とを確認した。
- (2) 対策工の比較検討より、貴志川丸栖地区の堤防漏
水対策として、ウェルドレーン工法は、掘削機械
に汎用機（ケーシングマシン）を用いるため施工
性、経済性に優れ、また特に維持管理の必要性な
いことから適していることを確認した。
- (3) 出水時における堤体内水位のモニタリングの結果、
堤体法尻付近の被圧水頭が無対策時に比べ低下が
認められ、対策工の効果が確認できた。

8. おわりに

本工法は、川裏部における浸透対策として、その掘削
深が大きくなる場合に有効な工法であることが確認され
た。

直轄河川において堤防質的強化対策工の詳細設計およ
びその施工を実施されているところであり、本工法は他
河川に対しても、十分に適応性があるものと考えられる。

今後、モニタリングを継続しウェルドレーン工の効果
の検証を行うとともに、その結果を関係者で共有し、効
果的な堤防質的整備の技術向上に努めるものとする。

謝辞：本箇所の浸透対策工検討およびモニタリング検証
にあたって、国立研究開発法人行政法人土木研究所の土
質・振動チームには種々指導、助言を頂いた。記して感
謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長尾壮治：貴志川における噴砂と堤防の応急対策につい
て、平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会論文
- 2) 中野 彩：地下水利用を考慮した貴志川漏水対策につい
て、平成 25 年度近畿地方整備局研究発表会論文
- 3) 河川堤防の構造検討の手引き、財団法人国土技術センタ
ー、平成 24 年 3 月
- 4) 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント、独立行
政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チ
ーム、平成 26 年 7 月

トンネル掘削発破を利用した 切羽前方探査技術の開発と適用

中谷 匡志¹・浅野 雅史²

¹安藤ハザマ 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658東京都港区赤坂6-1-20)

²安藤ハザマ 大阪支店 安宅トンネル作業所 (〒649-2621和歌山県西牟婁郡ささみ町周参見2829)

トンネル掘削発破を起振源とすることで、施工サイクルに影響を与えずに坑内での弾性波探査が可能な「トンネル フェイステスター」を開発した。本システムでは、切羽付近の地山状況をリアルタイム評価すると同時に、未掘削区間の断層などの位置を予測することが可能となる。

本検討では、近畿自動車道紀勢線安宅トンネル工事の一部において適用し、切羽付近の弾性波速度を算出することで、地山状況を的確に評価できることを確認した。さらに本システムを用いた切羽前方探査を実施し、予測精度を確保するために必要なデータ数の検討を行い、20データ程度必要であることが判明した。

キーワード 山岳トンネル, 掘削発破, 切羽前方探査, 弾性波

1. はじめに

山岳トンネルの事前調査では、通常地表からの調査ボーリングや弾性波探査などを実施し、その結果に基づき地山区分を行い支保パターンが設計される。

ここで、支保パターン設計において、重要な要素である弾性波速度は、地表からの屈折法弾性波探査などにより求められる。これに対し、トンネル坑内で切羽評価の妥当性の検証として弾性波速度を求める場合、簡易弾性波探査などがあるが、切羽で実施するには崩落などの安全上の問題から、日常的に用いることは極めて難しい。

また、山岳トンネルにおける切羽前方探査は、水平ボーリングが最も確実で精度が良いものの、長尺の場合、長期間掘削を中断することとなることから、比較的短時間で実施できるさまざまな前方探査が開発されている。

しかし、探査事例の多いTSP前方探査の場合でも、起振源として探査用発破を用いるなど、準備工を含めて1.5日程度掛かることから、日常管理として行うことは極めて困難である。

このような状況から筆者らは、掘削発破を起振源とした坑内弾性波探査システム「トンネル フェイステスター (TFI)」を開発した¹⁾。本システムは、掘削発破を利用することで施工サイクルに影響を与えずに、安全に切羽近傍の弾性波探査を可能としたものである。測定概念図を図-1に示す。

本検討では、開発したシステムの構成と、実際の現場での適用事例について報告する。

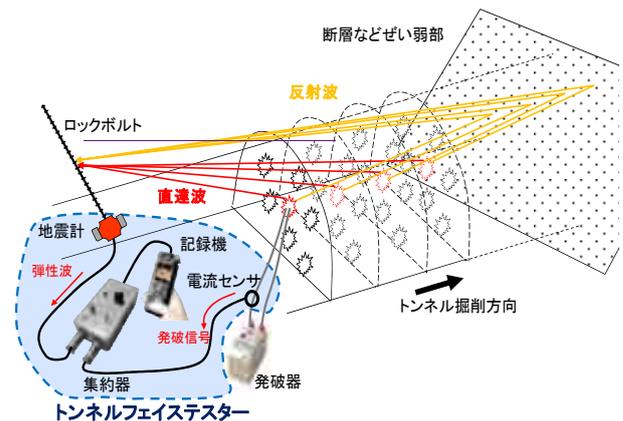


図-1 トンネル フェイステスター測定概念図

2. システムの概要

(1) システム構成

本システムは、写真-1に示すように①本体（集約器）、②電流センサ、③記録器（24bit/96kHz）、④地震計（固有周波数28Hz）から構成される。

探査方法は、切羽から10～50m程度後方の支保工として設置されるロックボルトの頭部に、防爆養生を施した地震計を固定する。掘削発破毎に、発破母線に取り付けた電流センサから得られる発破信号（トリガー）と、地震計から得られる弾性波（直達波、反射波）を、集約器を通じて記録器で同時収録する。本システムにより記録される計測波形例を図-2に示す。

(2) 切羽近傍の弾性波速度の算出と地山評価

発破毎に、切羽～地震計までの弾性波（直達波）の到達時間と切羽～地震計までの距離をプロットすることで、図-3に示すような走時曲線を描くことができる。走時曲線の相関が高い場合、その勾配から探査区間の弾性波速度を算出することができる。

また、勾配の変化点を境に、掘削の影響を受けた第1速度層と、掘削の影響を受けていない地山深部の第2速度層を求めることができる。さらに、トンネル周辺地山の速度領域を水平2層構造とした場合、以下の式で、屈折距離： l 、第1速度層： V_{p1} 、第2速度層： V_{p2} より、第1速度層厚： d を算出することができる²⁾。

$$d = l/2 \sqrt{(V_{p2} - V_{p1}) / (V_{p2} + V_{p1})} \quad (1)$$

(3) 切羽前方の地質状況の予測

本システムを用いた反射法弾性波解析では、瞬発雷管を起振源とする弾性波のみを使用する。つまり、2段目雷管による初動が到達するまでの約250msec間で測定される反射波のみを用いて反射法弾性波解析を実施する。

解析は、連続的に計測した複数のデータを用いて、デフラクシオンスタックマイグレーション（以下、DS法）により、各解析点における反射エネルギーを算出することで、反射面の出現位置を予測する。

また、反射法弾性波探査の一つであるTSP法では、探査精度を確保する上で必要なデータ数が18以上とされている。

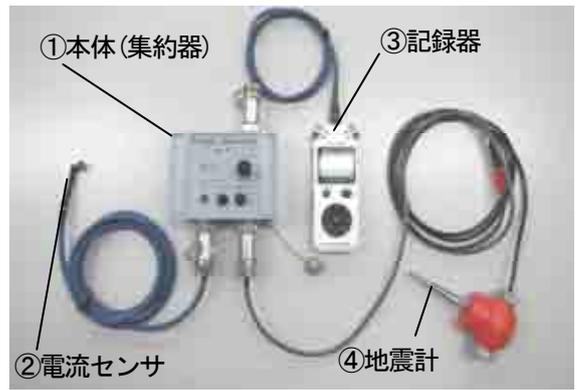


写真-1 トンネル フェイステスター全体図

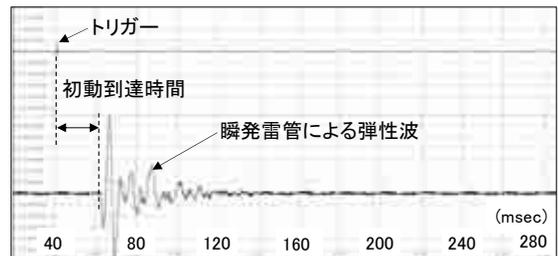


図-2 計測波形例

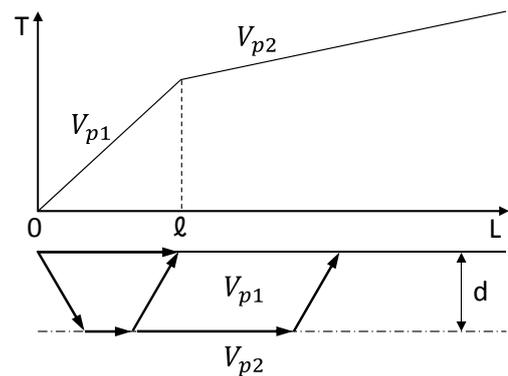


図-3 水平2層構造の走時曲線

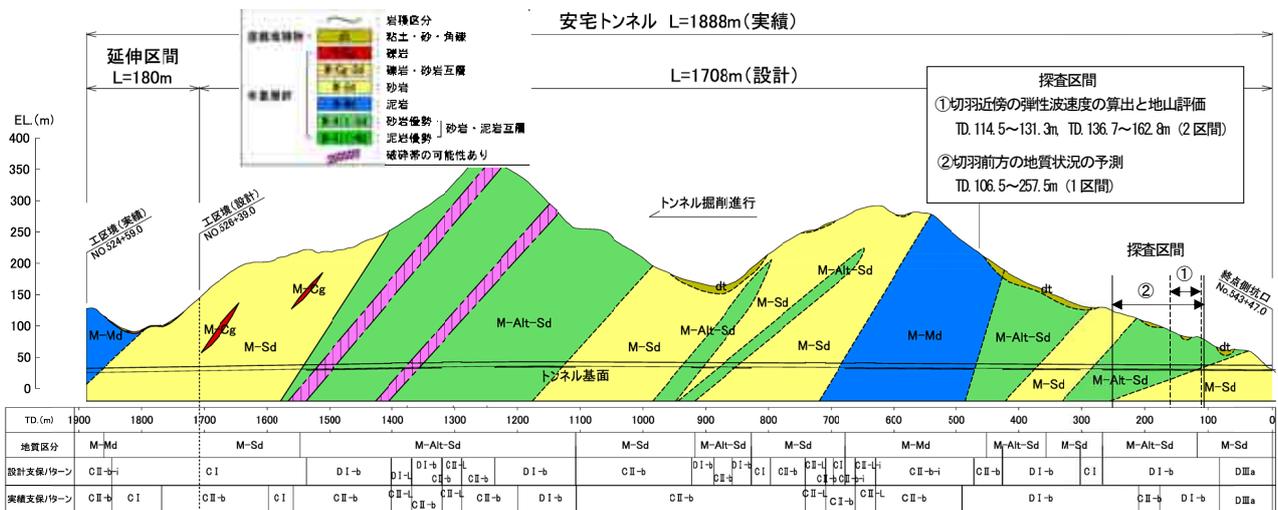


図-4 地質縦断図 (設計-実績)

3. 適用事例

(1) 地質状況

近畿地方整備局発注の安宅トンネル工事 (L=1,708m, 内空断面=66m²) は、古第三紀四万十累帯牟婁層群の砂岩優勢・泥岩互層から構成されている。本トンネルの地質縦断面図を図-4に、設計支保パターンと弾性波速度との関係を表-1に示す。

表-1 安宅トンネルにおける支保パターンと弾性波速度

設計支保パターン	弾性波速度	
	泥岩 砂岩優勢・泥岩互層	砂岩
C I	3.8~5.1km/sec	3.6 km/sec 以上
C II	3.0~4.1 km/sec	2.8~3.4 km/sec
D I	2.0~4.0 km/sec	3.1 km/sec 以下
D II	2.0~4.0 km/sec	2.7 km/sec

(2) 切羽近傍の弾性波速度の算出と地山評価

a) 探査方法

探査区間は、図-4に示すTD.114.5~131.3m, TD.136.7~162.8mの2区間で実施した。地震計はそれぞれTD.107.5m, TD.129.5mに設置した。また、上記2区間の設計支保パターンは、D I -bパターン (Vp=2.0~4.0km/sec) であった。

b) 探査結果

地震計の位置を原点とした、走時曲線を図-5に示す。勾配変化点がℓ=21m付近で得られており、近似式より算出した弾性波速度は、Vp1=2.1~2.2km/sec, Vp2=3.1~3.8km/secとなる (相関係数r>0.92)。

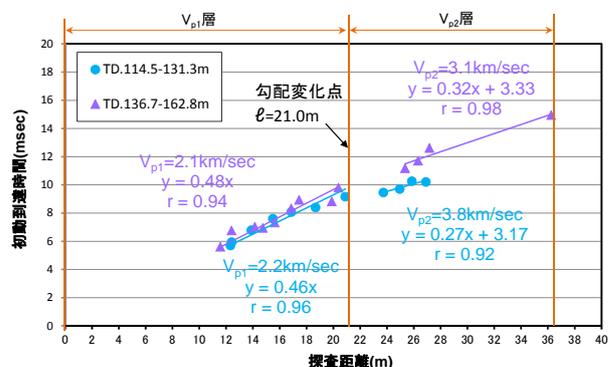


図-5 探査結果 (走時曲線)

ここで、掘削による弾性波速度の低下領域である第1速度層を「緩み領域」とした場合、式 (1) より第1速度層厚はd=4.6~5.4mとなる。探査結果をまとめた速度領域モデルを図-6に示す。なお、探査区間の実績支保パターンはD I -bパターンであり、探査結果で得られた第1速度値Vp1とほぼ整合する。

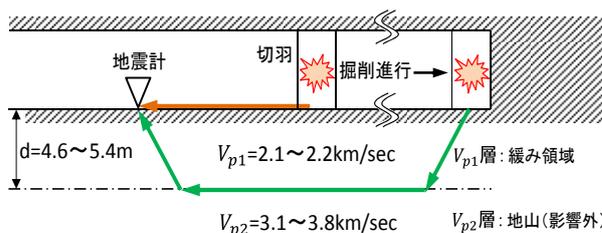


図-6 速度領域モデル

(3) 切羽前方の地質状況の予測

a) 探査方法

探査区間は、図-4に示すTD.106.5~257.5m区間で実施した。地質は砂岩優勢砂岩・泥岩互層 (M-Alt-Sd) で、設計支保パターンはD I -bパターンであり、断層破砕帯、岩種境界などの不連続面は想定されておらず、探査区間の土被りは50~100m程度であった。

探査方法は、TD.106.5mおよび107.5mのほぼ同位置における2箇所のロックボルトに地震計を設置し、以下の2ケースで探査を実施し、解析データ数による探査精度について検証した。

CASE1 : 14回の掘削発破 (4日分) で解析した場合

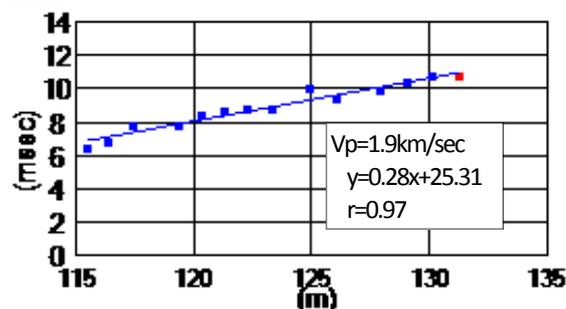
CASE2 : 24回の掘削発破 (8日分) で解析した場合

b) 探査結果

CASE1, 2について、解析プログラム上で出力された計測結果 (走時曲線) を図-7に示す。

図-7より、両ケースとも相関係数r>0.97を示しており、精度良く探査が実施されていることが確認された。また、得られた弾性波速度は1.7~1.9km/secであり、実績支保パターンとして採用されているD I -bパターン (2.0~4.0km/sec) に対して、やや低い値を示すものの概ね整合した数値が得られている。

CASE1 : 14回の掘削発破 (4日分)



CASE2 : 24回の掘削発破 (8日分)

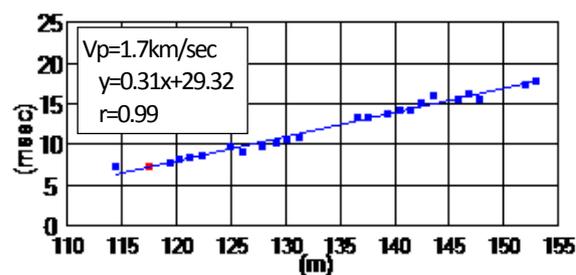


図-7 探査結果 (走時曲線)

c) 解析結果

各ケースで得られた弾性波速度を用いて、DS法による反射法弾性波解析を行った。解析点については、受振点（地震計）を原点とする半径 r ($0 \leq r \leq 260\text{m}$) が 2m 、中心角 θ ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$) が 2° 間隔毎の座標点 ($r \cos \theta$, $r \sin \theta$) として設定した。解析結果を図-8, 9に示す。

図-8, 9中のバブルチャートは、各解析点における反射エネルギーの大きさを表示しており、大きなエネルギーが集中する箇所に断層破碎帯などの不連続面が存在するものと想定される。

これに対してバーチャートは、バブルチャートの反射面接線方向とトンネル軸方向とが交差する位置での反射エネルギーの大きさを示している。すなわち、バーチャートの反射エネルギーが大きい範囲が、断層破碎帯など不連続面が切羽に出現する予測位置となる。

解析結果については、図-8に示すCASE1では、TD.200～250m区間全体に反射面が分布しており、反射面位置の特定が難しい。また、縦軸50～140m付近で、地表面とS波の影響によるものと推定される反射面が見られる。

これに対し、図-9に示すCASE2では、反射エネルギーの差が明確になり、トンネル軸上での反射面はTD.242～248m付近に集中した結果が得られた。

実際の掘削では、D I -b パターンで掘削しており、TD.242～247m区間において、砂岩優勢の砂岩・泥岩互層（灰色）中に、剥離性を有する泥岩層（黒灰色、粘土挟在）が出現し、肌落ちが著しい状況であった。これにより、データ数が多いCASE2の方が精度良く予測できることが確認された。予測された位置における切羽状況を図-10に示す。

4. おわりに

掘削発破を起振源として、施工サイクルに影響を与えずに切羽近傍の地山評価および切羽前方探査が行える「トンネル フェイスタスター」を開発した。さらに、本システムの探査精度を確認するため、施工中のトンネル現場において、いくつかの検証実験を行った。

その結果、探査結果は、相関係数 $r > 0.92$ を示し高精度での探査が可能であり、実績支保パターンと整合した速度領域（第1速度層）を正確に捉えられることを確認した。また、切羽前方探査については、予測精度を確保するためには20データ程度必要であることが確認された。

今後は、さまざまな岩種や地質構造を持つトンネル現場で実験を行い、精度の検証を進めていく計画である。

参考文献

1) 中谷ほか：掘削発破を用いた反射法弾性波によるトンネル前方探査技術の開発と適用事例，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，VI-036，pp.71-72，2014。

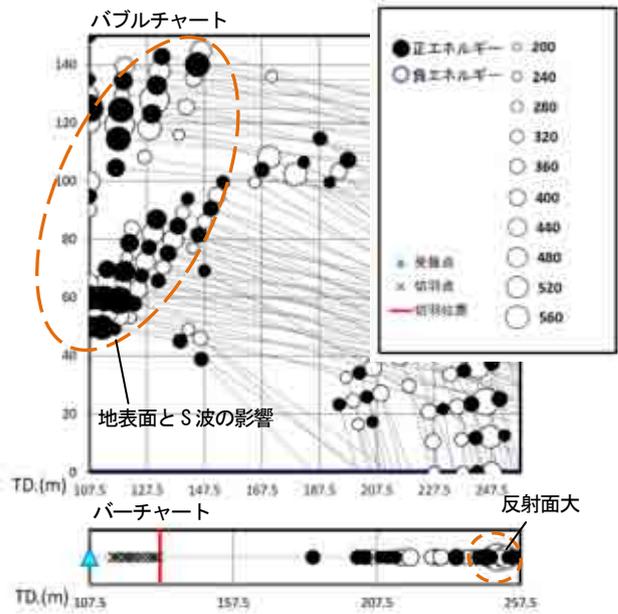


図-8 解析結果 (CASE1: 14回の掘削発破 (4日分))

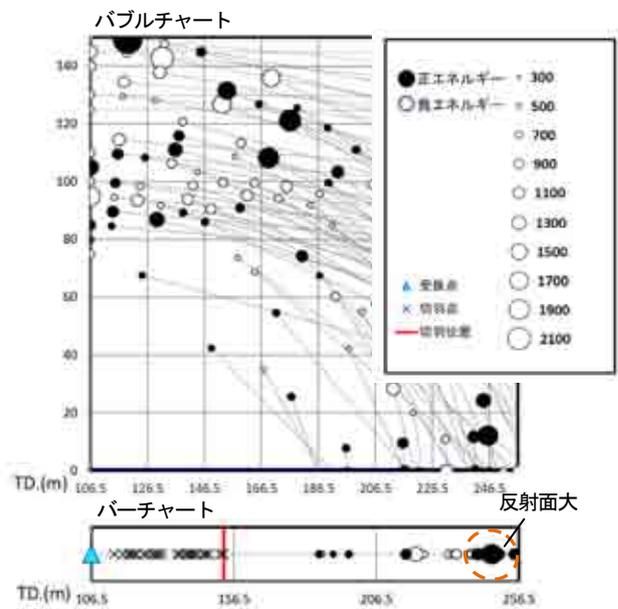


図-9 解析結果 (CASE2: 24回の掘削発破 (8日分))

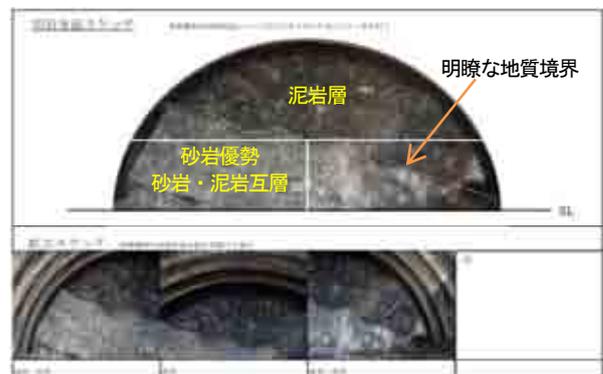


図-10 予測位置における切羽状況 (TD.242～247m付近)

密閉型矩形シールド工法の開発 (パドル・シールド工法)

大木 智明¹

¹清水建設(株) 土木技術本部 技術開発部 (〒104-8370東京都中央区京橋二丁目16-1)

都市内では輻輳する埋設物や低土被りといった厳しい施工条件、また、トンネル断面の有効活用のために、矩形断面シールド工法の実用化が進んでいる。しかし従来の矩形シールド機は、矩形端部まで掘削するため掘削機構が複雑で高価になるという課題や、円形断面に比べてアーチ効果による地表面変状抑制効果が期待できないという課題があった。そこで、汎用品の使用や機構の単純化を図った軸付き横配置カッタ、強制攪拌によりチャンバー内土砂の塑性流動性を向上させるパドルスクリー、低土被り部での地表面変位を抑制できる上段カッタスライド機構を装備した「密閉型矩形シールド工法（パドル・シールド工法）」を開発実用化した。

キーワード 軸付き横配置カッタ、パドルスクリー、スライド機構、地表面沈下抑制

1. はじめに

従来の矩形シールド機は円回転のカッタ方式を採用しているものが多く、コーナー部分まで掘削するためには機構が複雑となり、矩形シールド機の製造に多くの時間とコストを要していた。

また低土被りにおける矩形断面の掘削は、円形断面に比べて、掘削部上部のアーチ効果による変状抑制が期待できないため地表面変位が大きくなる。

そこで、汎用品（汎用モーターや減速機）の使用や横配置カッタを採用して掘削機構の単純化・コストダウンを図り、さらに上段カッタのスライド機構により低土被り部での地表面変位を抑制する「密閉型矩形シールド工法（パドル・シールド工法）」を開発・実用化した。

(図-1)



図-1 パドル・シールド工法イメージ

2. 技術の概要

本工法のシールド機形式は密閉型泥土圧式である。カッタは円筒形の横軸にビットを装備し、軸の回転により地山を切削する。カッタ面の縦方向には、カッタを複数段配置している（図-2）

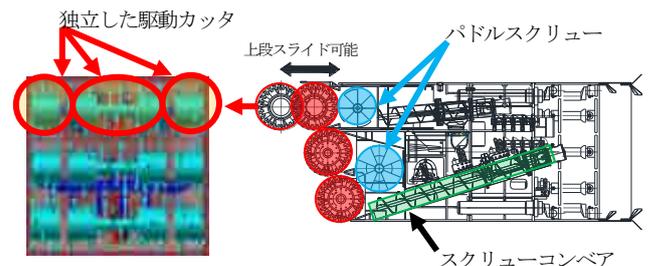


図-2 機構詳細図

各段カッタは各々独立した駆動カッタから構成されており、各々のカッタは回転方向や速度が制御できる。チャンバーは最上段の1本のカッタには1つのチャンバー、2段目以下は複数のカッタ（2～3本）で1つのチャンバーを構成し、各チャンバーにはこの工法のポイントの一つであるパドルスクリーと、従来の泥土圧式と同様にチャンバー内土砂排土のためのスクリーコンベアを装備している。パドルスクリーは、カッタで切削した土砂とカッタ付近で吐出される添加材の攪拌混合および、

攪拌混合した土砂をスクリーコンベアの取込口まで横移動させる機能を有している。

チャンバーのカッタからスクリーコンベアまでは前後にスライド可能な一体構造となっており、低土被り地盤においては、掘進始めは最上段カッタをスライドしながらセグメント1リング分の長さまで掘進し、以下順に各チャンバーのカッタでスライド掘進を繰り返すことで、地表面の沈下を抑制する。(写真-1)



写真-1 カッタのスライド機構

以下に本工法の特徴を述べる

- ・カッタ構造：ドラム形状の複数段横配置カッタにより端部まで掘り残しのない合理的構造
- ・シールド機製作コスト：従来比約3割減（汎用モーターや減速機を使用するため）
- ・シールド機製造工期：工期は短い（シンプルな軸付き横配置カッタの採用と汎用品モーターや減速機等を使用するため）
- ・土圧管理：上下に独立した複数のチャンバーを保有し、それぞれの土圧を綿密に管理
- ・チャンバー内の攪拌方法と土砂状況：カッタと独立したパドルスクリーにより攪拌性能が高い
- ・低土被り掘進時の地表面変状抑制方法：上段カッタの前方へのスライド機構を使用した段差形状の掘削による先受け効果により変状抑制効果が大きい

3. 開発経緯

(1) 要素実験

本工法の掘削機構の特徴は、軸付きの横配置カッタとチャンバー内のパドルスクリーによる強制攪拌である。この機構を確立するために4回にわたり要素実験をおこない、カッタ形状の改良やスクリーコンベアによる排土制御方法を改良し、安定した掘削能力、排土性能を確立し、地表面沈下が抑制できること及び良好な排土状況を確認した。

(2) 実証実験

実証実験は、断面が2.1m×2.1mの土圧シールド機を新規に製作して実施した。シールド機には、上段1段の

スライド機構付きチャンバーと中下段の固定チャンバーを装備した。パドルスクリーは各々のチャンバーに各1基ずつ装備した。

上段チャンバーのスライドは、実験に使用されるセグメントの幅に合わせて50cmのスライドが可能な構造とした。土圧計は上段チャンバーに2台、中下段のチャンバーに4台を装備し、土圧計を常時監視してスクリーコンベアの排土量を調整しながら所定の土圧を維持し実験を実施した。(写真-2、図-3)



写真-2 実証実験機

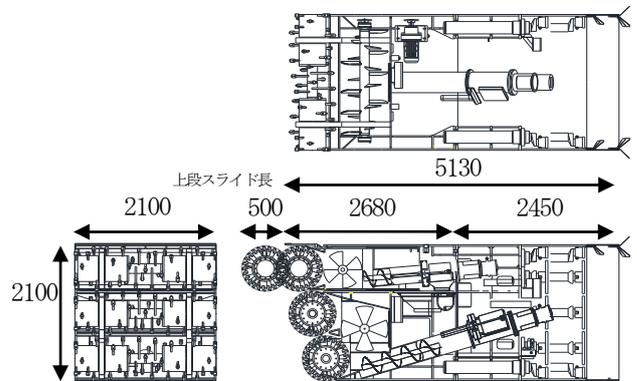


図-3 実証実験機概要図

a) 目的

- ①低土被り部掘進時、周辺地盤への影響を抑制しながら、掘進可能であること
- ②従来の円形泥土圧シールド機と同等の掘削管理が可能であること
- ③排土状況が良好であること（土砂の均一な塑性流動性の確保）

b) 掘進線形

実験の掘進線形は地表面付近から5%の下り勾配で掘進し、R=150mの縦断曲線を経て1D(2100mm)の土被りで水平に掘進する。掘進延長は2.8m、掘削地盤は主にN値1の軟弱地盤（沖積シルト・粘性土）であ

る。(図4)

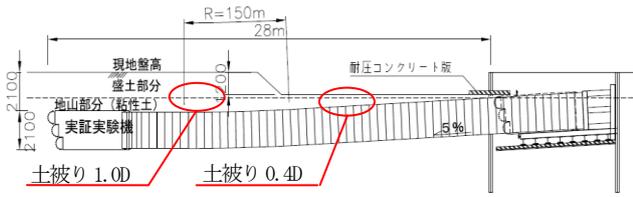


図4 掘進縦断面図

掘削方式は添加材に気泡を使用した。切羽安定管理は、掘進中隔壁に設置した土圧計を常時監視し、スクリーコンベアの排土量を調整しながら所定の土圧を維持した。トンネルの覆工として矩形のスチールセグメントを使用した。

掘進は、上段掘削部を先行して50cm掘進し、本体と一体構造である中下段掘削部は、上段掘削部終了後シールドジャッキを伸張して掘進した。裏込めは可塑性裏込材を使用し、下段掘進時に即時注入で行った。

計測は地盤変状(地表面沈下量等)、掘削機各機能(カッタトルク、推進力等)、計画線との変位を主に測定した。

(3) 実証実験結果

地上変状に関しては、以下の傾向が認められた。

低土被り0.4D(D=2100mm)の地点において最大変位は切羽通過直後に発生し、シールド機テール通過後に収束する傾向が確認された。また土被り1.0Dの地点においても上述した同様の傾向が認められた。最大変位は極めて微小であり、2地点ともシールド機幅2100mm範囲内直上に集中し45°の影響範囲内に収まっている。

これより上段カッタスライド機構の地盤変状抑制への有効性が確認できた。(図5、図6)

以上の実証実験により得られた成果を以下に記す。

- 上段カッタスライド機構による先受け効果が有効であり地表面沈下が抑制できることが可能となった。
- 平面及び縦断線形において、計画線形に対して、共に誤差±30mm以内に収まっており、従来の円形泥土圧式シールド機と同等の掘削管理が可能であることが確認できた。(図7、図8)
- パドルスクリーとカッタの独立制御が可能のため、チャンバー内での安定した攪拌混合が可能となった。
 - チャンバー内でのパドルスクリーの強制攪拌により、土砂の均一な塑性流動性が得られ、安定した地山の保持が可能となった。
 - 上下に独立した土砂チャンバーを保有し、緻密な土圧管理が可能となった。

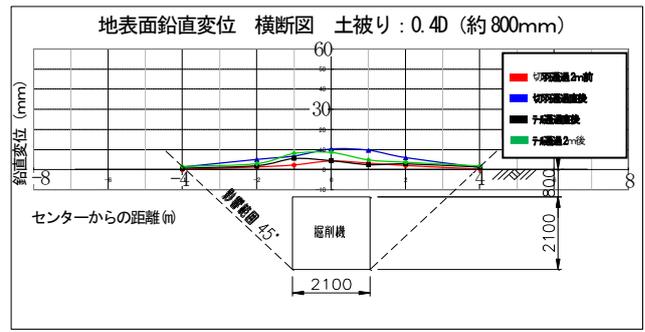


図5 地表面鉛直変位 (土被り0.4D)

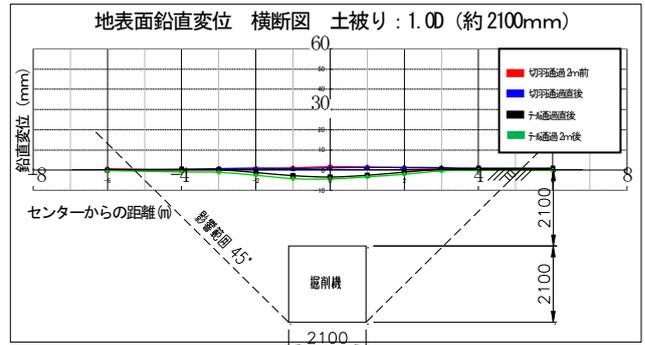


図6 地表面鉛直変位 (土被り1.0D)

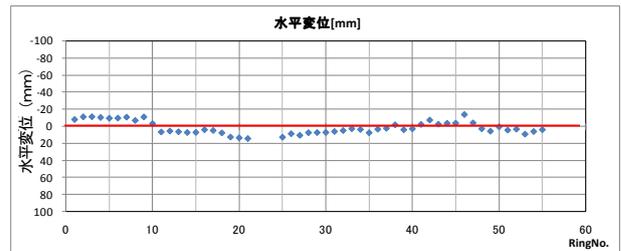


図7 平面線形出来形図

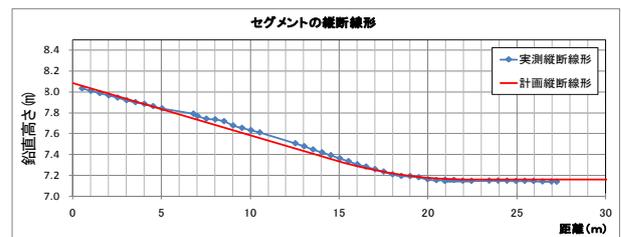


図8 縦断線形出来形図

4. 施工実績

(1) 工事概要

本工法を、千葉県茂原市と長生村の境界を流れる一宮川を横断する地下送水管敷設工事に適用した。

以下に工事概要を示す。

- 工事名称：合同長生送水管工事

- ・用途：送水管配管洞道
- ・形状：内寸1.7m×1.7m，外寸2.1m×2.1m
（ボックスカルバート（函体）長 2.0m）
- ・施工延長：70m（35函体，直線）
- ・施工方式：
パドル・シールド機を使用した推進工法
- ・対象土質：硬質地盤 土丹（N値=50）
- ・土被り：最大14m，最小（河床部）5.4m
- ・工期：2012年9月～2013年12月
（写真-3，図-9）

(2) パドル・シールド機の概要

本工事に適用したパドル・シールド機の仕様および全体図をそれぞれ表-1，図-10に示す。なお，本工事は十分な土被りが確保されている硬質地盤のため上段カッタスライド機構は装備しなかった。

表-1 シールド機仕様

項目	単位	仕様	
シールド機外径	m	縦2.1×横2.1m	
掘削断面積	m ²	4.41	
掘進速度	mm/min	15	
カッター			
最大回転数	rpm	センター	サイド
装備数	台	3	6
最大トルク	kN-m	17.5	8.7
パドルスクリー			
最大回転数	rpm	20	
装備数	台	2	
最大トルク	kN-m	20.8	
排土スクリー			
最大回転数	rpm	20	
装備数	台	1	
方向修正装置			
推力	kN	1188	
装備数	本	6	
ストローク	mm	150	



写真-3 パドル・シールド機

横断面図

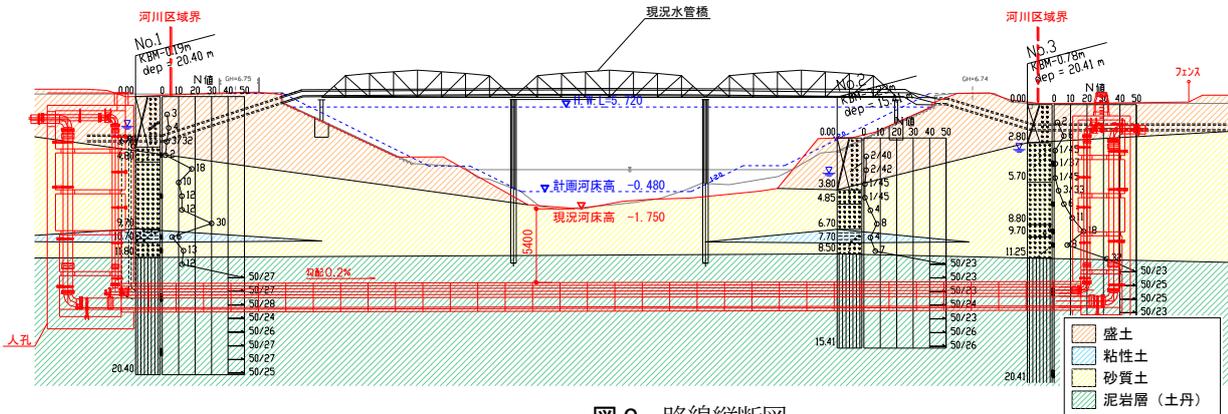


図-9 路線縦断面図

- 凡例
- 盛土
 - 粘性土
 - 砂質土
 - 泥岩層（土丹層）
 - 自然水位

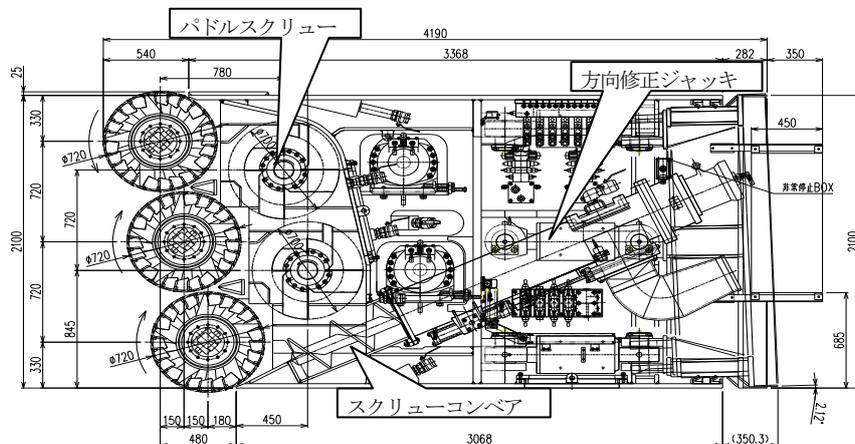


図-10 パドル・シールド機全体図

(3) 施工概要

掘削はパドル・シールド機で行い、シールド機に後続する函体を立坑で押し出しながら函体を順次継ぎ足す推進工法で施工した。シールド機先端から添加材を注入しチャンバー内パドルスクリーで混練された土砂は、スクリーコンベアを通り直結した圧送ポンプで立坑の下まで送られ、初期掘進時にはバケットで地上まで揚重し排土した。(写真4, 写真5) なお、坑内設備台車がすべて設置できる本掘進時には、土砂圧送ポンプにより直接地上の土砂ピットまで土砂圧送をおこなった。



写真4 坑内掘進時状況



写真5 立坑下排土状況

(4) 施工結果

以下に施工結果を記す。

a) 地山安定

掘進土層は土丹で、チャンバー内やスクリーコンベアの閉塞が懸念されたが、排土した土砂はよく塑性流動化しており、チャンバー内でのパドルスクリーの強制攪拌が地山安定に寄与していることが確認できた。

b) 線形管理と姿勢制御

管路の計画線形は、縦断・平面ともに直線で0.2%の上り勾配であった。この線形管理とそのためピッチング制御は、パドル・シールド機に装備した方向修正ジャッキが有効であった。

出来形(函体中心)を図-11, 図-12に示す。

管路の計画線形に対して、掘進時の矩形の出来形(センター部)は、平面線形、縦断線形ともに±15mm以内に収まっており、従来の円形シールド機同等の高精度な掘進管理が可能になったことが確認できた。

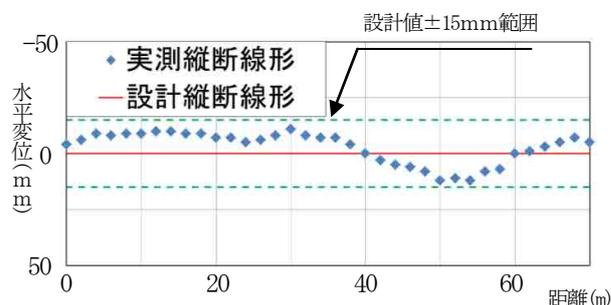


図-11 函体平面線形図

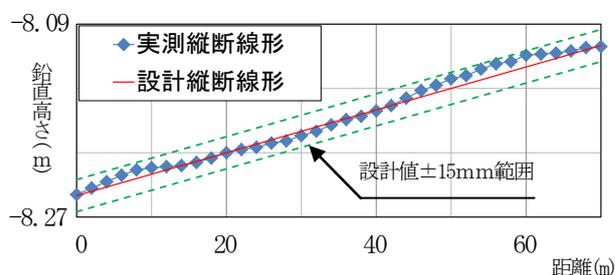


図-12 函体縦断線形図

c) 掘進推力

掘進推力の計画値と実績値の推移を図-13に示す。計画値は一般に密閉型の推進工で適用される計算方法に基づいたが、概ね計画値以下であった。

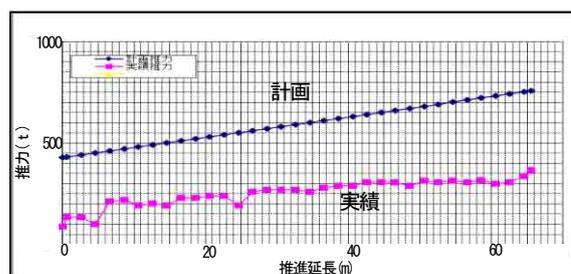


図-13 推力の計画と実績

d) 到達～パドル・シールド機引出し

本機は傾斜したカット面と矩形形状のため、一般の円形シールド機と比べ到達引出しが困難となるが、到達坑口パッキンのワイヤーからの押しつけ力発生を図る(写真6 囲い部)等の諸策により、上部地盤の崩壊、河川水の引き込み等が発生させることなく安全にパドル・シールド機を引出し回収した。(写真7)



写真-6 到達時状況



写真-7 到達時マシン全景

5. おわりに

今回開発した本工法は、汎用品の使用とシンプルな掘削機構の採用により、コストダウンを実現した。

また、上段スライド機構を装備することにより、低土被り部での地表面沈下抑制に効果があることが確認された。さらに、掘削性能についても一般の円形土圧式シールド機と同等の掘削性能を持つことが確認された。

これらの実績が評価されH25年度土木学会技術開発賞を受賞した。

今後は、道路のアンダーパスや地下通路、電力やガス等の地下管路等に展開し、高品質な社会インフラ構築に貢献する所存である。

参考文献

- 1)金丸清人,小高宏幸他：矩形断面トンネル構築技術「パドル・シールド工法」の開発（その1），土木学会第65回年次学術講演会，VI-470,2010.
- 2)金丸清人，小高宏幸他：矩形断面トンネル構築技術「パドル・シールド工法」の開発（その2），土木学会第65回年次学術講演会，VI-471,2010.
- 3)金丸清人：パドル・シールド工法の開発，建設の施工企画，20109
- 4)白井健太郎,立花博令,中谷武彦,小野塚直紘：パドルシールド工法による河川横断，土木学会第69回年次学術講演会，VI-609,2014.

防波堤形式のチャート式耐震診断システムの開発について

平井 淳¹

¹近畿地方整備局 神戸港湾技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

沿岸構造物のチャート式耐震診断システムは、耐震性が脆弱な護岸等を、高度なFEM解析等によらずに「簡単に」、「早く」抽出できるツールとして開発し、適用可能な構造形式を広げてきた。また2011年の東北地方太平洋沖地震を契機に、防波堤の耐震性能に関心が向けられた。しかし、現行のチャート式耐震診断システムでは、傾斜型護岸形式を準用して防波堤形式に対応させていた。そこで、防波堤の施設形状と地盤条件、地震動条件を基に二次元有効応力解析(FLIP)を用いたパラメトリックスタディを実施し、地震時の防波堤形式の挙動を精度良く把握できるよう改良を行った。

キーワード 簡易耐震診断手法, 地震応答解析, 防波堤形式

1. はじめに

中央防災会議によると、2043年までに南海トラフの海溝型巨大地震が発生する確率は、南海地震で60%程度、東南海地震で70~80%程度と言われている。2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と同じように、近畿地域においても近い将来、この大規模地震に伴い発生する津波により広範囲に甚大な被害が発生することが予想されている。

海溝型巨大地震に伴う津波から人命や資産を守るためには、防波堤や護岸をはじめとした沿岸構造物の耐震性や安全性の確保が必要不可欠である。沿岸構造物が巨大地震に対してどの程度沈下変形するかにより津波が越流するかが決まり、越流防止機能を保持しているかどうかにより背後への浸水被害が大きく異なってくる。

沿岸構造物が地震によりどの程度沈下、変形するかを把握し、津波に対して高さが足りない構造物について対策する必要がある。

しかし、2006年(平成18年)3月に海岸事業を所管する省庁で、全国の海岸堤防の状況を調査したところ、全国で約6割の海岸堤防が耐震性の確認ができていないという結果が出ている。この原因としては、我が国の海岸堤防の延長は約15000kmと広範囲に及び、構造形式も様々な形式が採用されていること(図1参照)。さらに地震後の施設の変位量を算定するためには、二次元有効応力解析(FLIP)による地震応答解析を実施する必要があり、膨大な時間と費用、高度な動的解析の専門知識を必要とすることからである。

そこで、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所ではこの問題を解決するため、地震発生時の構造物の変位量(沈下量)を算定し、地震に対する危険性が高い施設のみを「簡単に」、「早く」抽出できるチャート式耐震診断システムを開発した。

本稿では、傾斜型堤防形式を準用して防波堤形式に対応させていたチャート式耐震診断システムにおいて、防波堤形式の精度向上に係る改良を行ったことから、その結果と今後の課題について述べるものである。

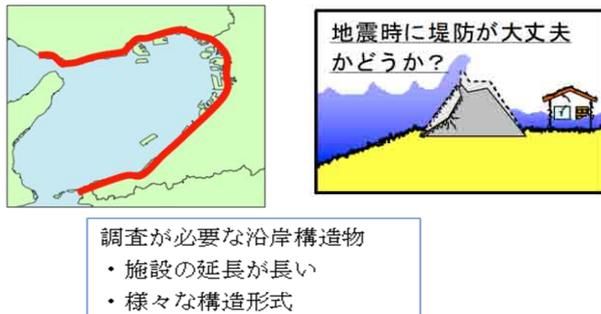


図1 広域な海岸保全施設

2. チャート式耐震診断システムの概要

チャート式耐震診断システムとは利用者が、耐震診断を実施したい沿岸構造物の規格形状や構造諸元、その地域の地震動の情報を入力するだけで地震後の変位量が算定されるシステムである。

チャート式簡易耐震診断システムで対応可能な構造形式は8つあり、直立型重力式護岸、傾斜型護岸、傾斜型堤防、自立式矢板護岸、控え直杭式矢板護岸、控え組杭式矢板護岸、栈橋式護岸、重力式防波堤に対応している。

チャート式耐震診断システムを開発するにあたって、まず全国の既存沿岸構造物の施設に関する情報を収集し、構造形式毎に平均な断面となる標準タイプの断面を決定した。チャート式耐震診断システムは、この標準タイプの断面の残留変位を基本変位量とし、これに補正係数の傾向を乗じることにより利用者が診断を実施する施設の残留変位量が決定される。

補正係数の傾向とは、標準タイプの断面を基に、地盤条件、施設形状、地震動条件について様々な組み合わせによる計算を予め実施し、その結果をデータベース化することにより基本変位量に対する補正係数としてとりまとめたものである。

利用者は構造物の情報を入力するだけで、対象構造物の地震による変位量が算出され、危険性を判断できる。以上の開発検討フローを図2に示す。

チャート式耐震診断システムは簡単に地震時の挙動を予測することが可能なため、港湾管理者や全国の整備局などを対象に貸出を行い全国で広く使われている。貸出を開始した2007年度から2015年度までに150件を越える実績があり、技術支援として出張講義等も行っている。

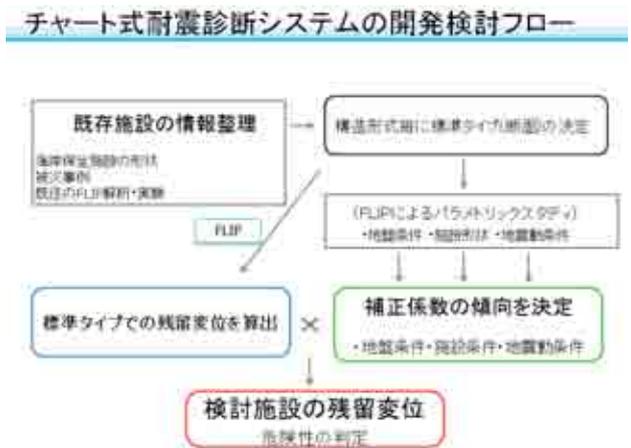


図2 チャート式診断システム開発フロー

3. 既往の防波堤形式の課題

既往のチャート式耐震診断システムの防波堤形式は、傾斜型堤防タイプのものを準用する形で作成されたものであり、より防波堤形式に適したシステムへと改良を行うための課題を下記に示す。

(1) 課題の抽出と整理

既往の防波堤形式の課題として以下に示す項目が挙げられる。

a) 簡易モデルの改良

既往の剛梁と質点を用いた簡易モデルでは形状が無く、動水圧を考慮できないため改良を行った。

b) 施設形状の検討

防波堤形式で特徴的な床掘置換層、パラペットの形状について施設形状として考慮されていなかったため、地震後の沈下量にどのような影響を与えるのか照査、検討を行った。

c) 傾斜型堤防の耐震診断手法を準用した補正係数

補正項目（施設形状、地盤条件、地震動条件）の検討をして防波堤形式に適切な補正係数を設定する。

4. 課題の対応

(1) 簡易モデルの改良

既往の防波堤形式では簡易モデルが使われており、動水圧の影響を考慮できなかった。そのため、新しく線形平面モデルを作成し、動水圧の考慮、FLIPに対応を可能とした。改良前と改良後のモデルを図3に示す。

(2) 施設形状の検討

a) 液状化層の形状の検討

既往の重力式防波堤のチャート式耐震診断システムでは傾斜型護岸を準用していたため、液状化層については水平成層地盤としてモデル化をしている。しかし、重力式防波堤では、床掘置換工法により粘性土層に地盤改良を行う構造体であることから、床掘置換と水平成層地盤の断面による解析を行った。解析の結果に基づき、より安全側となるように、残留変位量に影響が大きい床掘置換の

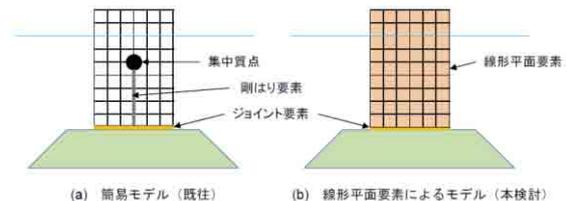


図3 防波堤形状のモデル改良

形状を採用した。

b)パラペットの有無に関する検討

パラペットの有無が防波堤の沈下量にどの程度の影響を与えるのか把握するために、高さや幅を変化させてFLIP解析を実施した。解析の結果、パラペットを考慮した方が沈下に影響を与えることがわかり、施設形状にパラペットの項目を取り入れた。

5. 防波堤形式の補正係数の設定

(1) 標準形状の設定

a)資料の収集・整理

各地方整備局から収集した合計114施設の第一線防波堤の資料の収集・整理を行った。表1に整理項目を示す。

b)防波堤形式の標準形状と解析範囲の設定

収集・整理した防波堤形状のデータの頻度分布から標準形状と解析範囲として適切であると考えられる最大値、最小値を設定し、標準形状は中央値から設定した。表2に設定した値を示す。

c)地震情報の収集・整理

全国の港の予測地震動を収集・整理した。収集した地震動の数は、51港312成分である。

(2) 防波堤形式に適したシステムへの変更

a)防波堤沈下挙動の影響因子と地震後の変位算出方法

チャート式耐震診断システムによる変位算定にあたり、地震時の沈下挙動に対する影響項目の抽出を行った。

それらは、施設形状による影響、地盤による影響、地震動による影響の三つの影響が想定される。本検討ではこの中で地震動条件と地盤条件が密接に関係していることから、この二つから定まる標準形状の変位量を基準変位とし、形状に関する補正を行うことで地震後の変位量の評価をすることとした。

表1 防波堤の施設形状整理項目

防波堤形状に関する項目	整理項目	備考
パラペット	上端、下端のD.L.	
上部工	上端、下端のD.L.	
ケーソン	上端、下端のD.L.	
	堤体幅	フーチング除く
マウンド	マウンド高	
	堤体から港外側マウンド法肩までの距離	
	堤体から港内側マウンド法肩までの距離	
	港外側法勾配	
地盤	港外側法勾配	
	液状化層厚	
腹付工	有無	
消波ブロック	有無	

・地震後の変位

=基準変位 (地震動条件,地盤条件により定まる標準形状の変位量)

×補正係数 (形状に関する係数)

b)施設形状に関する補正項目の検討

施設形状に関する補正項目として、①防波堤幅②水面から防波堤天端までの距離③マウンド高、④堤体からマウンド法肩までの距離⑤マウンド法勾配⑥液状化層厚⑦防波堤高パラペットの形状の7項目を想定した。補正係数については防波堤高Hで正規化したもの、及び防波堤高Hを用いるものとした。各項目を図4に示す。

表2 補正項目の標準形状と解析範囲の整理結果

形状に関する補正項目	標準形状	検討範囲		備考
		最小値	最大値	
ケーソン高さ H	15.0 (m)	3.9	30.4	
防波堤幅 W/H	0.7	0.2	1.5	
天端高-水面 H1/H	0.4	0.0	1.0	※1
マウンド高 D2/H	0.3	0.1	1.74	※2
マウンド法方までの距離 L/H	0.6	0.6	1.9	※3、 ※4
マウンド法勾配1:n	1:2.0	1:4/3	1:3.0	
液状化層厚 D1/H	0.4	0.1	2.2	

※1：浮力を考慮するため最小値0.0、最大値1.0と設定
 ※2：港湾基準より最小値0.1と設定
 ※3：港湾基準より最小値0.2と設定
 ※4：港内側の最大値で評価できると判断し最大値1.9と設定

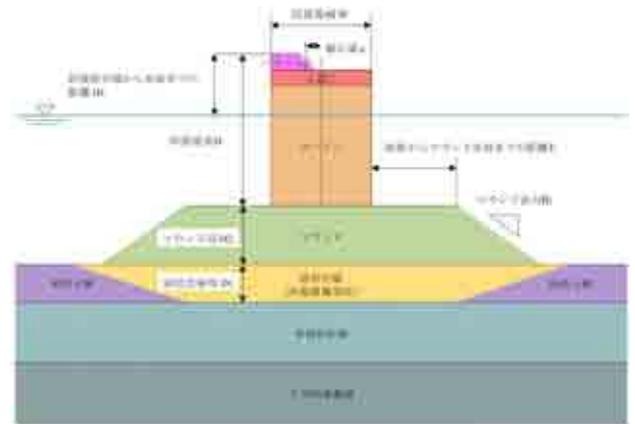


図4 施設形状に関する補正項目

(3) 解析ケース

標準形状 (図5) を基準として,表3に示す基準変位算定チャートの解析ケースを設定した。

(4) 基準変位算定チャートの検討

a)地震動指標の設定

重力式防波堤において,地震動と鉛直変位との関係が最も良い指標を選定することとし,検証の結果,最も相関が高い速度のPSI値を採用した。速度のPSI値とは地震動が港湾構造物の変形量に与える影響について評価する指標のひとつであり,フーリエスペクトルの二乗の周波数に対する積分値として定義される。したがって,加速度の最大値による評価よりも,スペクトル全体(全周波数領域)を対象に評価することができ,より地震動の特徴を含んだ評価指標といえる。

b)地震動条件,地盤条件による基準変位算定チャートの設定

速度のPSI値を地震動指標とし,地盤条件毎に基準変位

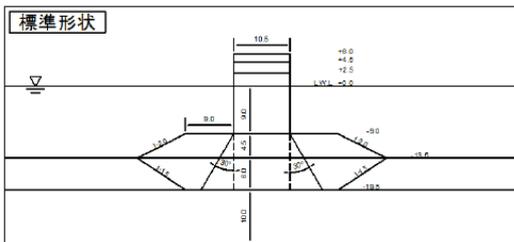


図5 標準形状

● : $N_{65}=5$ ● : $N_{65}=8$ ● : $N_{65}=10$ ● : $N_{65}=15$ ● : $N_{65}=20$ ● : $N_{65}=25$
 ——— : 基準変位算定チャート

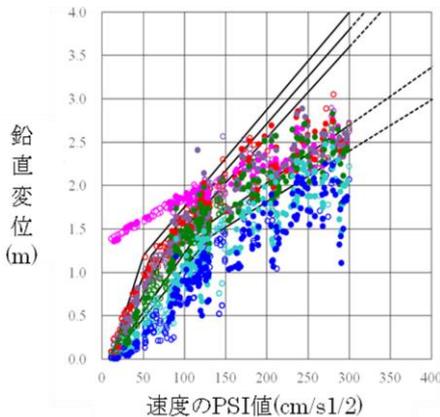


図6 基準変位 (速度のPSI値) と鉛直変位の関係

算定チャートを設定した。基準変位算定チャートは解析結果全体を包絡できるようなバイリニア型の直線により設定した。

図6に速度のPSI値による地震動指標と全地盤条件の鉛直変位との関係を示す。

(5) 施設形状に関する補正係数算定チャートの検討

a)防波堤高 (H)

施設形状に関する補正係数の検討例として,防波堤高Hの変化に対する鉛直変位,補正係数を図7,図8に示す。鉛直変位はHに比例して大きくなる傾向にあるが,速度のPSI値が45m/s^{1/2}の場合,Hが20mを越えたあたりから変化が見られなくなった。

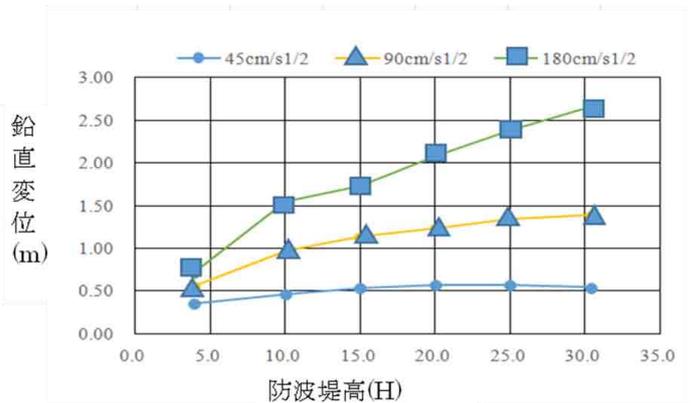


図7 鉛直変位の変化

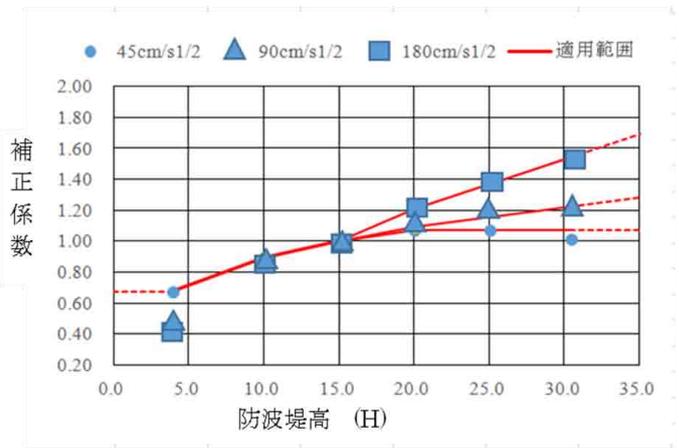


図8 補正係数への影響

表3 基準変位算定チャート

case No.	防波堤高		防波堤幅		防波堤天端から水面までの高さ		マウンド高		堤体からマウンド法肩までの距離		マウンド勾配		液状化層厚		地震動条件	地盤条件
	H	W	W/H	H1	H1/H	D2	D2/H	L	L/H	1:n	D1	D1/H				
	(m)	(m)		(m)		(m)		(m)			(m)					
地盤条件、地震動条件による基準変位	15	10.5	0.7	6	0.4	4.5	0.3	9	0.6	1:2	6	0.4	312ケース	6ケース		

補正係数は $H=15m$ を境に分布傾向が異なるため、それぞれで補正係数を設定している。 $3.9m \leq H \leq 15m$ では地震動レベルの違いによる影響があまりみられないため、全ての地震動で最大となる補正係数を設定した。 $15m \leq H \leq 30.2m$ においては地震動レベル毎に傾向が異なるため、それぞれの地震動に応じた補正係数を設定した。また、今回の解析範囲外については、 $3.9m > H$ では一定とし、 $30.2m < H$ ではそれぞれの外挿計算とし、安全側の設定とした。

6. チャート式耐震診断システムの精度検証

(1) 被災事例等の比較検証

本業務で作成したチャート式耐震診断システムを用いて被災事例及び実験結果との比較検証を行った。比較対象は被災事例2例と模型実験1例である。全ての事例に対してチャート式耐震診断システムの予測沈下量は安全側の評価となった(図9)。

(2) 二次元地震応答解析による解析結果との比較

防波堤を対象にFLIPによる二次元応答解析が実施されているKB港,S港,KT港の防波堤断面に対して、本チャート式による沈下量予想を実施し二次元応答解析結果との比較を行った。

比較検討の結果を図10に示す。これより、FLIP解析より安全側となる結果が得られることが確認できた。

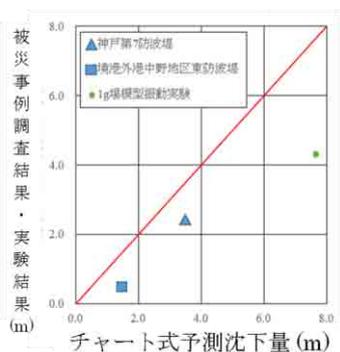


図9 被災調査・実験結果とチャート式との比較

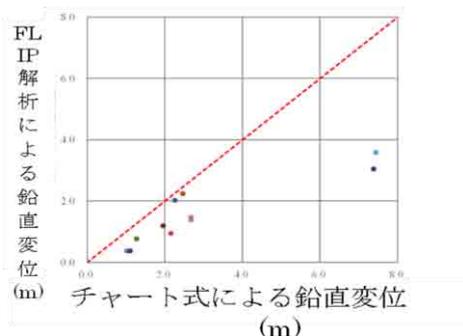


図10 チャート式と二次元地震応答解析の比較

7. 更なる精度向上への課題整理

(1) 更なる精度向上への課題整理

今後さらなる精度向上を検討する際の基礎資料となるように整理した。課題は施設形状への対応と、地盤条件への対応の2種類の課題に大別することができる。それぞれの課題と想定される対応策を表4にまとめた。

表4の課題に対して試験的にFLIP解析を実施し、防波堤天端位置における変位量を比較し、課題に対する重要度を整理した結果、鉛直変位は施設形状に比べ地盤条件の変化が大きく影響していることがわかったことから、今後さらなる精度向上を検討するには地盤条件について優先的に検討するべきであると考えられる。

8. まとめ

チャート式耐震診断システムの対象断面の中でも防波堤形式については、傾斜型護岸タイプを準用した簡易的なものだった。

本検討ではこの問題に対応すべく、防波堤形式の改良を行った。全国の第一線防波堤の資料を収集・整理し、防波堤形式に適した施設形状、補正係数の設定を行った。改良した防波堤形式のチャート式耐震診断システムの精度確認のため、被災事例や二次元応答解析と比較した結果、安全側となる結果が得られた。

今後の課題として、チャート式耐震診断システムの貸出先から診断結果を収集・整理し、本システムの精度確認を行ったうえで、更なる精度向上に向けて取り組む必要がある。

表4 更なる精度向上への課題

分類	項目	課題
施設形状	腹付工	FLIP解析による再現性の確認
	消波ブロック被覆ブロック	・消波ブロックのパラメータ設定方法 ・FLIP解析による再現性の確認
地盤条件	液状化が発生しない硬質な砂地盤	・基礎マウンドの沈下特性の把握 ・FLIP解析による再現性の確認
	高置換SCP工法	・SCP地盤の物性値 ・FLIP解析による再現性の確認
	互層地盤	・FLIP解析による再現性の確認

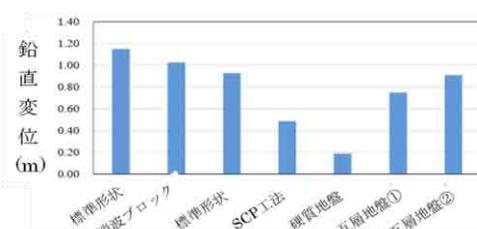


図11 各項目の防波堤形式に与える影響

周辺環境に配慮したワイヤー連結工の 施工事例について

木村 智宏

ライト工業株式会社 西日本支社 施工技術部 (〒564-0063大阪府吹田市江坂町1-16-8)

大手町地区斜面对策(その2)工事は、神戸市須磨区大手町地先において六甲山系グリーンベルト事業により、山腹斜面の土砂災害防止を行うものであり、斜面の浸食防止、表層崩壊防止として、吹付のり砕工、鉄筋挿入工、ワイヤー連結工の施工を行った。なかでもワイヤー連結工には、新技術であるESネット工法(NETIS登録 No.KK-120057-A)を採用し、既存樹木の伐採を最小限に抑え、根系による土壌緊縛作用を生かしつつ、斜面の安定性を向上させることができた。本稿では、ESネット工法(以下、本工法と略す)を施工するに当たり現場で工夫した点やその施工事例を紹介する。

キーワード 斜面安定工, 自然地山, ロックボルト, 環境

1. はじめに

我が国は国土の7割が山地であり、台風をはじめとする豪雨が発生しやすい気象条件と相まって、斜面災害が頻繁に発生する。これらを防止する斜面安定工は、豪雨や地震等の自然災害より道路や建築物を保護するために行われるが、近年では周辺環境や景観に配慮して、樹木の伐採が好ましくない箇所が増加しており、ワイヤロープを使用したのり面保護工の重要性が高まっている。

現場周辺の地質は、強風化した六甲花崗岩であり、風化が進むとマサ化し、表層崩壊が発生しやすい状況にあった。当該工事についても、表層崩壊の防止を目的としている。図-1に工事位置を示す。



図-1 現場位置図

2. ESネット工法の機能

(1) 工法概要

本工法は、ワイヤロープを主材としたコンクリートを使用しないのり面保護工で、ワイヤロープとロックボルトを相互に結合することで斜面の表層崩壊を防止する効果がある。また、ワイヤロープを現地で加工しながら施工を行うため、既存木を残した施工が可能である。図-2に本工法の概要図を示す。

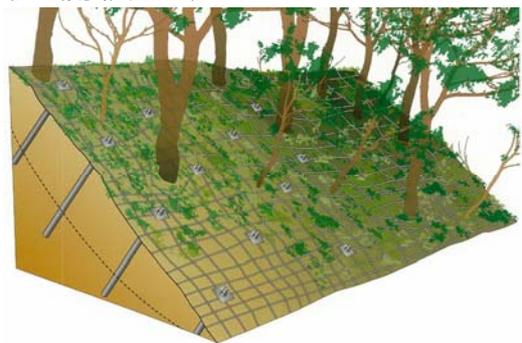


図-2 概要図

(2) 構成と機能

本工法は次のような部材で構成される。φ10mmのワイヤロープを0.5m間隔に斜面へ配し、各交点をクロスクリップで固定する。鉄筋挿入工の頭部にはESプレートを設置し、ES-Uボルトを使用してワイヤロープとESプレートを連結している。このような相互連結により、ロックボルトの応力を地山へロス無く伝達することができる。また、補強材締付け時にESプレートを地山へ押し込

むことで、連結されたワイヤロープが地山を緊縛し、土塊を主導的に押さえ込むため崩壊を防止する効果が高い。

(3) 実物大載荷試験による検証

本工法に使用する部材は、作用荷重に対して十分な強度を有する必要があるため、工法開発時に部材の単体強度試験に加え、実物大載荷試験を実施し、部材及び工法としての機能を確認している。

実験は、実際に使用する材料を組立て設置した実物大の架台に斜面崩壊土砂に模した錘を載荷する方法で行った。写真-2.1に実物大載荷試験状況を示す。



写真-2.1 実物大載荷試験状況

実験では、補強材から作用すると想定される最大荷重においても、部材の変形や移動など、工法の機能が損なわれる変状が生じないことが確認された。

(4) のり面工低減係数

開発時には、設計に必要なのり面工低減係数についても確認している。のり面工低減係数は、室内模型試験を行って求めている。実験は、試験土層を徐々に傾斜させてせん断破壊を起こさせる方法(写真-2.2)で行い、予め配置したロックボルトに作用する引張り荷重を測定した。ワイヤロープの有無による比較を行ったところ、ワイヤロープにより抵抗力が増加し、ワイヤロープの補強効果が確認された。



写真-2.2 土層試験状況

また、試験から得られた本工法ののり面工低減係数は0.86であった。したがって本工法の設計に用いるのり面工低減係数は0.7程度とすることが妥当であることが確

認された。

3. 現場での工夫

大手町地区斜面对策(その2)工事では、ESネット工法を施工するに当たり、次のような工夫を行っている。

(1) 工事概要

表-1に本工事の工事概要を示す。

表-1 工事概要

工事名称		大手町地区斜面对策(その2)工事	
工期	2014年8月~2015年3月		
施工場所	兵庫県神戸市須磨区大手町地先		
工事内容	砂防土工(掘削・埋め戻し)	20m ³	
	吹付のり砕工(F300 2.0m×2.0m)	1555m ²	
	アンカー工(鉄筋挿入A)	511本	
	足場工	1.0式	
	ワイヤー連結工	649m ²	
	アンカー工(鉄筋挿入B)	192本	

本工事では、斜面崩壊防止対策として、急勾配範囲を吹付のり砕工、緩斜面をワイヤー連結工にて施工を行う計画であった。工事着手後に現地踏査を行ったところ、吹付のり砕工を施工する急勾配範囲は、寺院裏での施工となるため、安全性を考慮し吹付のり砕工を先行して施工する必要が生じた。

そこで、ワイヤー連結工と吹付のり砕工の施工境界においては、当初と異なる方法で連結することとなった。

(2) 吹付のり砕工との連結

設計時に計画されていたワイヤー連結工と吹付のり砕工との連結方法は、のり砕工下部にワイヤーを巻き込むこととなっていた。

前述の理由から吹付のり砕工が先行施工されるため、以下の連結方法を検討した。

- ①のり砕組立て時(モルタル吹付け前)に連結金具を梁内部に@0.5mにて設置しておき、ワイヤーとの連結を行う。
- ②吹付のり砕工の施工後(モルタル吹付け後)に、あと施工アンカーを削孔・設置し、ワイヤーとの連結を行う。

協議の結果、事前の連結金具の出シロがばらつく可能性が高いことや出来映えを考慮し、②のあと施工アンカーによる連結を選定した。

(3) 連結箇所の検証

あと施工アンカー方式にて連結を行うに当たり、作用荷重より必要なアンカーの間隔、埋込み長を計算し、あと施工アンカーの仕様を表-2のように決定した。なお、定着はセメントカプセルによる。

表-2 あと施工アンカーの仕様

材質	D19 SD345 HDZ-35
全長	200mm
埋込み長	170mm
設置間隔	500mm

これまで、あと施工アンカーによる連結を行った実績がなかったため、吹付にて水切りモルタル同様の試験体を作成し、実際に引抜き試験を実施した。



写真-3.1 試験体作成

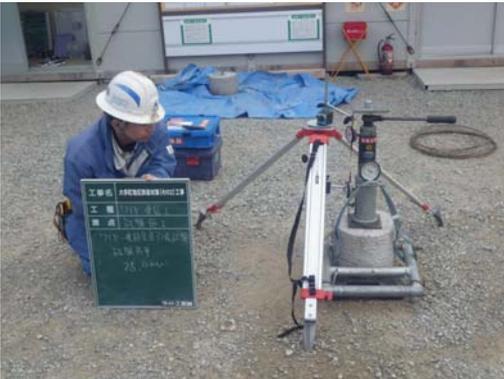


写真-3.2 引抜き試験状況

引抜き試験では、計画荷重の約5倍まで荷重を載荷したが、引き抜けは起こらなかった。



写真-3.3 連結状況

以上より、あと施工アンカーによる連結部の品質を確認することができた。

4. 施工方法

本工法を適応する箇所は、既存木を極力伐採しないことが求められる斜面である。樹木を伐採した場合には、クレーン式ドリルや足場を使用した軽量型ボーリングマシンなどの施工機械が使用される。本件のように樹木の伐採せずに施工する場合には、無足場による削孔機を使用して施工を実施する。以上を踏まえて、本工法の施工手順について述べる。

(1) 芯出し工

施工の支障となる必要最低限の草本を伐採し、補強材打設位置の芯出しを行い、ワイヤロープの設置位置をナイロンロープ等で現地に明示する。

(2) 削孔工

削孔位置に削孔機を据え付け、所定の深度まで削孔を行う。(写真-4.1)



写真-4.1 削孔状況

(3) ケーブル設置工

ケーブルは縦に張ることを基本とし、過度に張りすぎることなく、地山になじむように設置する。

(4) ESプレート設置、頭部締付工

ロックボルト打設位置にESプレートを設置し、プレートの上下左右にES-Uボルトとワイヤロープを結束する。(写真-4.2) 押えパイプの凹部をワイヤロープに合わせて設置し、ロックボルトのナットを締付けることで、押えパイプを地山に押し付ける。(写真-4.3)



写真-4.2 ES-Uボルトの取付け



写真-4.3 押えパイプの取付け

(5) SKクロスクリップ設置工

ワイヤロープを0.5m間隔に配して、緩むことがないようにその交点をSKクロスクリップで固定する。(写真-4.4)



写真-4.4 SKクロスクリップ設置

(6) 頭部処理工

防錆油入りの頭部キャップを取りつける。

(7) 完了



写真-4.5 施工完了

5. 施工事例の紹介

六甲山系のグリーンベルト事業では、同様な表層崩壊防止対策として、本工法の施工を行っている。

(1) 事例1

工事名：角石地区斜面对策（その2）工事
施工場所：兵庫県西宮市
発注者：近畿地方整備局六甲砂防事務所
工期：平成25年7月～平成26年2月



写真-5.1 施工後6ヶ月

(2) 事例2

工事名：渦ヶ森地区斜面对策（その2）工事
施工場所：兵庫県神戸市東灘区
発注者：近畿地方整備局六甲砂防事務所
工期：平成25年9月～平成26年2月



写真-5.2 施工直後

(3) 事例3

工事名：葺合地区斜面对策（その2）工事
施工場所：兵庫県神戸市中央区
発注者：近畿地方整備局六甲砂防事務所
工期：平成26年8月～平成27年3月



写真-5.3 施工直後

6. まとめ

既存木を残したまま斜面補強を行うことができる新しいのり面保護工の施工事例について紹介した。コンクリートを使用しない環境にやさしい工法であり、今後の活用が期待される。また、本工法には耐久性の高い材料が使用されているが、構造物の長寿命化が求められる中、劣化度合いに応じた維持管理手法の確立及びマニュアル化が今後の課題であると考えます。

謝辞：本工事に際して、国土交通省 近畿地方整備局六甲砂防事務所 西六甲出張所には多大なご指導をいただき、ここに記して謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) 九田ら：ES ネット工法ののり面補強効果に関する模型試験 土木学会第69回年次学術講演会，III-259，20149
- 2) 歳藤ら：実物大実験によるES ネット工法の機能確認と施工事例土木学会第69回年次学術講演会，III-260，20149
- 3) 西日本ES ネット工法研究会：ES ネット工法技術資料，2015

局地的豪雨探知システムの精度向上への 取り組みについて

松田 政裕¹・亀岡 博²

¹近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

²近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 防災情報課 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町10-1)

平成25年度に、XバンドMPレーダを活用して豪雨となる可能性がある積乱雲を数分から10分程度前に探知する局地的豪雨探知システムを整備した。本システムを試験運用したところ、①降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落とし、②局地的豪雨とは関係のない層状性雨域等における空振り判定、③降水セルの移動が表示されない点の3つの課題が明らかになった。そこで、局地的豪雨探知システムにおけるこれら3つ課題について改良を行い、平成26年度の降雨事例において局地的豪雨をもたらす積乱雲の判定精度が向上したことを確認した。

キーワード XバンドMPレーダ、豪雨のタマゴ、予測

1. 局地的豪雨探知システムについて

(1) 背景、目的および範囲

2008年7月28日に発生した兵庫県神戸市都賀川の水害を契機に、従来のCバンドレーダよりも高頻度・高分解能で観測を行うXバンドMPレーダが整備された。XバンドMPレーダは上空の高仰角観測を高頻度で行い、上空で発生し、10～20分程度で急発達する積乱雲を早期に探知することができる。そこで、局地的豪雨による災害防止を目的に、XバンドMPレーダを用いて、数分から10分程度先に豪雨となる可能性を予測する局地的豪雨探知システム（以下、本システム）を平成25年度に整備した。

本システムの探知対象は、発生から30分以内に地上付近の降水強度が50mm/h以上に急発達し、その後も降水強度50mm/h以上の強雨が30分以上継続する孤立した積乱雲（以下、豪雨セル）である。対象範囲は、大阪、神戸、京都、堺の重点監視地域を含み、複数台のXバンドMPレーダで観測される図-1の範囲である。

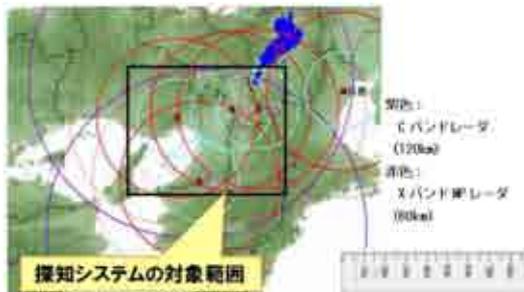


図-1 局地的豪雨探知システムの対象範囲

(2) 豪雨のタマゴ手法

中北ら^{2), 3)}の手法に基づき、上空で発生する積乱雲をレーダで探知し、その内部にドップラー風速から計算される渦が存在すれば、豪雨になる危険性が高い積乱雲（以下、豪雨のタマゴ）として判定する手法である（図-2）。個々の積乱雲（以下、降水セル）が豪雨セルに発達するか否かを3ランクで判定する。本システムでは、判定精度を高めるため、渦に加えて反射強度に関連した指標を用いている。詳細を以下に示す。

a) 等高度面データ（CAPPI）の作成

5台のXバンドMPレーダ（田口（たのくち）、六甲、鷲峰山（じゅうぶさん）、葛城、鈴鹿）から水平・鉛直ともに500mメッシュの等高度面データ（CAPPI）を1分毎に上空10kmまで作成する。

b) 降水セルの抽出および追跡

京都大学防災研究所で開発されたプログラムを基に、反射強度20dBZ（降水強度1mm/h相当）以上の閉曲面を1つの降水セルとして抽出する。抽出された各降水セルについて、1分前に抽出した降水セルの体積と重心位置が最も近いものを検索し、紐付けすることで追跡を行う。

c) 降水セルごとの指標計算

反射強度、渦度、収束量のCAPPIから、図-3のようにエコー頂高度差、鉛直発達速度、鉛直積算エコー強度、渦度、収束量の5指標を各降水セルで計算する。各指標値が大きいほど、豪雨セルに発達する可能性が高い。

d) 危険度判定

c)の各指標について、指標値と豪雨セルになる確率(%)の関係は、式(1a)～(1e)のメンバーシップ関数で表さ

れる。これらの式を加重平均した式(1f)により統合指標値Gが算出される。続いて、図-4に示す3つのしきい値から、危険度ランク①②③、危険性なしを判定する。

$$f_1(x_1) = 21.398x_1 + 23.282 \quad (1a)$$

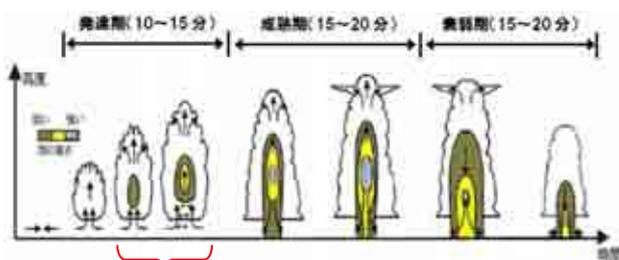
$$f_2(x_2) = 118.548x_2 + 10.734 \quad (1b)$$

$$f_3(x_3) = 0.299x_3 - 5.453 \quad (1c)$$

$$f_4(x_4) = 4.123x_4 + 19.642 \quad (1d)$$

$$f_5(x_5) = 9.560x_5 + 13.614 \quad (1e)$$

$$G = 0.27f_1(x_1) + 0.27f_2(x_2) + 0.24f_3(x_3) + 0.10f_4(x_4) + 0.12f_5(x_5) \quad (1f)$$



この段階の渦度や反射強度から、豪雨になるか否かを判定

図-2 積乱雲の一生と本システムのターゲット

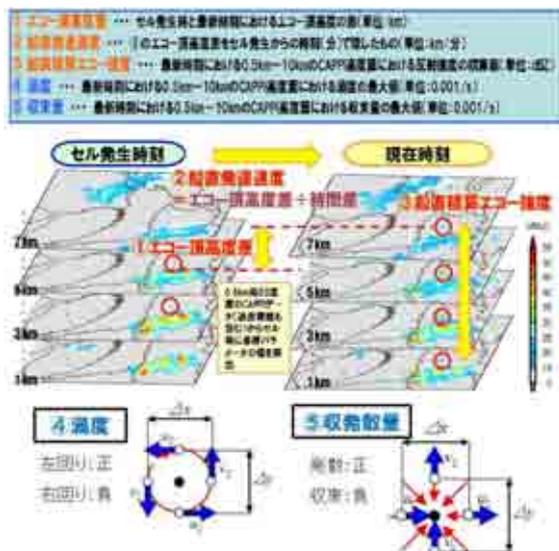


図-3 豪雨の危険度判定に用いる各指標

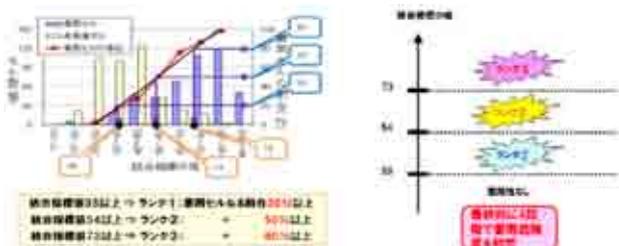


図-4 統合指標値の分布と危険度ランク

(3) Webによる表示

局地的豪雨探知システムの表示画面を図-5に示す。Web表示システムは、降水セルごとに判定された危険度ランクをXRAINの降水分布に重ねて表示する。危険度ランクは色分けした円で降雨域を囲むことにより表現し、追跡終了した降水セルは追跡終了時のランク円を同じ位置に点線で残すようになっている。また、過去1ヶ月程度の履歴表示やGIFアニメの作成も可能である。



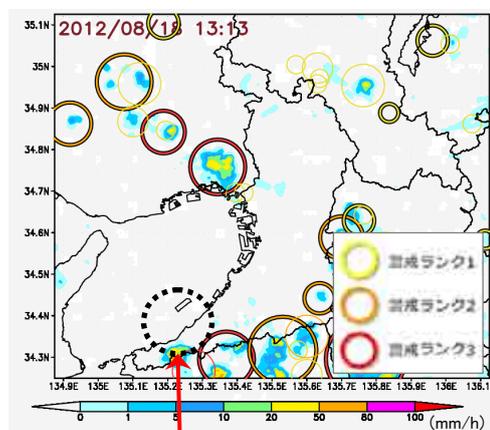
図-5 局地的豪雨探知システムの表示画面

2. 試験運用で判明した課題

平成25年度に整備した局地的豪雨探知システム（以下、H25システム）の課題点を以下に述べる。

(1) 降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落とし

抽出プログラムでは、反射強度20dBZ以上の閉じた領域を1個の降水セルとしているが、すでに発達した豪雨セルの近傍で新たな豪雨のタマゴが出現する場合、両者の反射強度20dBZ以上の領域が結合し、豪雨のタマゴが抽出できないことがある（図-6）。また、抽出できた場合でも、追跡途中に周囲の降水セルと併合すると、以後追跡不能となり、危険度ランク判定が消えてしまう。



隣の降水セルと上空で結合したため、降水セルとして抽出されず、危険度ランクの判定が行われない

図-6 豪雨のタマゴの見落とし事例 (H25システム)

(2) 層状性雨域等における空振り判定

局地的豪雨と関係のない水平規模の大きな層状性雨域に対し、統合指標値が危険度ランクの判定基準を超え、豪雨セルと判定する場合があります(図-7)。また、発達しない降水セルでも、その発生初期に豪雨セルと判定される場合があります。これらの判定は、すべて空振りである。

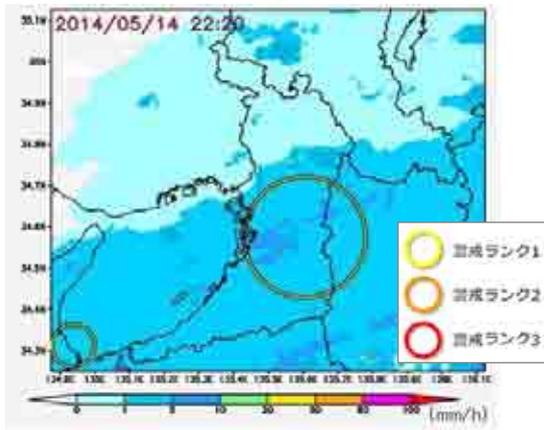


図-7 層状性雨域の空振り判定事例 (H25システム)

(3) 降水セルの移動が表示されない点

H25システムで表示されるのは、豪雨のタマゴの現在位置と危険度ランク情報のみである。しかし、降水セルは時々刻々と移動するため、危険度ランク判定された地点(危険度ランク円の表示位置)と実際に50mm/h以上の豪雨となる地点は異なる場合が多く、閲覧者に誤解を与える可能性がある。

3. システムの改良

(1) 降水セル抽出手法の改良

2(1)で述べた降水セルの不分離による豪雨のタマゴの見落としを改善するため、3段階抽出手法を考案した。

a) 3段階抽出法の概要

豪雨のタマゴが、反射強度のしきい値20dBZで周囲の降水セルと結合している場合、しきい値を大きくすれば両者を分離できるが、大きくしすぎると、豪雨のタマゴの分離に時間がかかり、探知が遅れる。そこで、しきい値を20、25、30dBZの3段階で順次大きくして抽出する手法を考案した。図-8のように、降水セルAの内部に最盛期の対流コアBと、発達中の対流コアC(豪雨のタマゴ)があるとす。まず、Step1ではしきい値20dBZで降水セルAを抽出する。次に、Step2、3でしきい値を25、30dBZと順次大きくし、降水セルAから対流コアB、Cを抽出する。最後に、降水セルAを対流コアB、Cの重心からの等距離面で分離し、降水セルB、Cとする。これにより、豪雨のタマゴの探知遅れを極力抑えつつ、複数の降水セルの塊から豪雨のタマゴを抽出することができる。

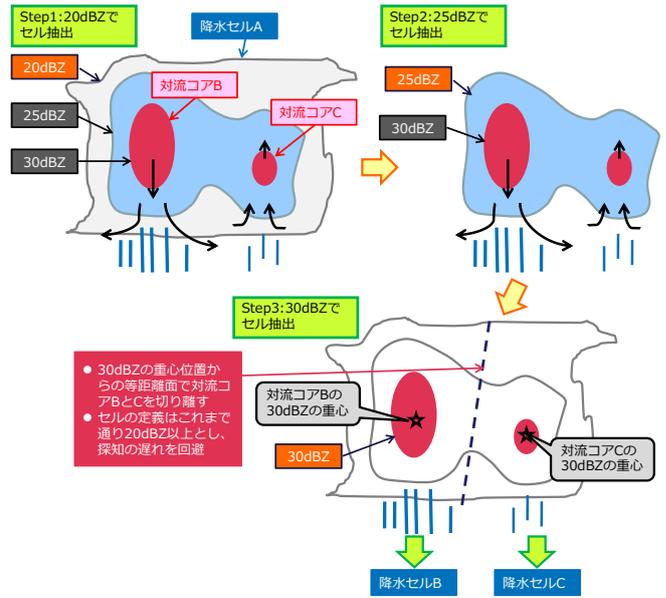
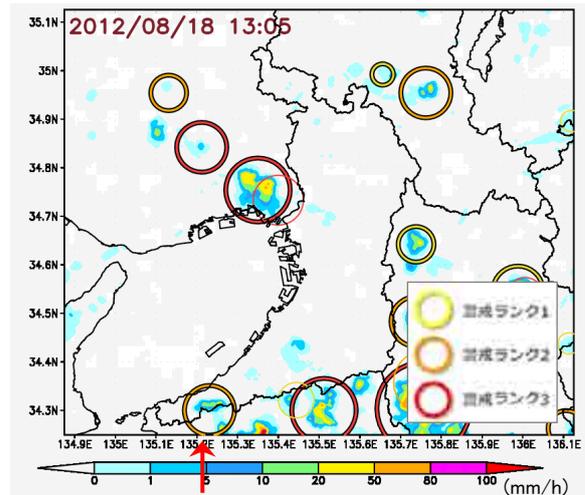


図-8 3段階抽出手法の概念図

b) H25システムで抽出できなかった事例の検証

図-9は、図-6の見落とし事例における、3段階抽出手法の危険度判定結果である。図中の矢印で示した部分にランク②の判定が出ており、見落としが改善している。表-1は、2011年~2013年の3ヶ年において目視で選定した134個の豪雨セルのうち、H25システムで見落としとなった20個について、3段階抽出手法で危険度判定を行った結果である。ランク①~③でそれぞれ13個、10個、8個の豪雨セルに対して危険度判定が行われ、見落としが軽減されている。判定時刻は、地上降雨開始時よりも6~11分遅く、50mm/h到達時よりも4~8分早かった。



50mm/h 到達の 8 分前にランク②で判定できている

図-9 3段階抽出手法を用いた豪雨探知結果 (H25システムの見落とし事例)

表-1 新たに危険度判定された豪雨セル数と判定時刻
(H25 システムで見落としとなった 20 個)

		危険度ランク		
		ランク①	ランク②	ランク③
新たに危険度判定が可能になった豪雨セルの数		13	10	8
判定時刻	地上降雨開始時との差	6分後	9分後	11分後
	50mm/h到達時との差	8分前	6分前	4分前

(2) 層状性判別手法の導入

2(2)で述べた層状性雨域の空振り判定を改善するため、図-10に示す層状性判別手法を考案した。豪雨のタマゴの水平規模が1~数kmであるのに対し、図-7のような温帯低気圧に伴う層状性雨域は、水平規模が10km以上と大きい。そこで、体積が500km³以上の降水セルを対象として対流性/層状性のチェックを行い、層状性と判別された降水セルについては、鉛直方向の発達弱いものを危険度判定の対象外とした。

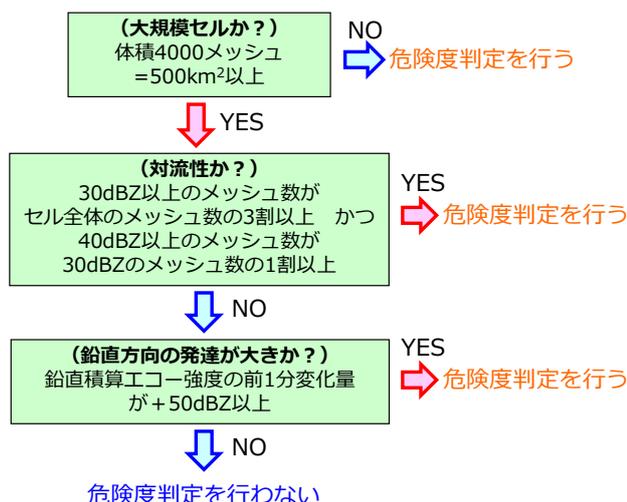


図-10 層状性判別手法のフロー

(3) 危険度ランク判定方法の改修

2(2)で述べた発達しない降水セルの発生初期における空振り判定を改善するため、危険度ランクの判定方法を図-11のように改修した。H25システムでは、渦または収束がない場合でも、統合指標が38以上54未満であればランク①と判定した。しかし、降水セルの発生初期は、統合指標算出に用いる鉛直発達速度が過大に計算され、発達しない降水セルでも統合指標値が38を超えることがある。そこで、渦または収束がなく、統合指標値が54未満の降水セルはランクなしとした。これにより、ランク①の判定条件が厳しくなり空振りが軽減する一方、見落としが増える懸念がある。しかし、中北ら³⁾によると、豪雨セルは100%の確率で渦が存在すると指摘されており、新たな見落としは発生しないと考えられる。

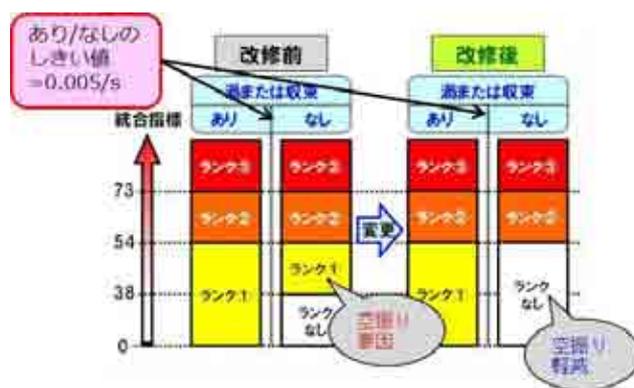


図-11 危険度ランク判定方法の改修

(4) 降水セルの移動を表示する機能の追加

2(3)で述べた降水セルの移動が表現されない点を改善するため、降水セルの移動方向や通過軌跡を表示する機能を追加した。

a) 移動ベクトルの算出方法

降水セルの移動方向を表示するため、降水セルの移動ベクトルを1分毎に計算した。移動ベクトルは、降水セルの現在位置と過去位置の差分から計算されるが、1分毎に求めた移動ベクトルは時間変化が激しく、実際の移動方向がわかりづらい。そこで、過去10分間の移動ベクトルを平均した。ただし、以下2点に該当する移動ベクトルは異常値として平均から除外した(図-12参照)。

- 移動距離が1分あたり2km以上のもの
- 10個の移動ベクトルの移動先を8方位に分類した時、最頻方位から90度以上異なるもの

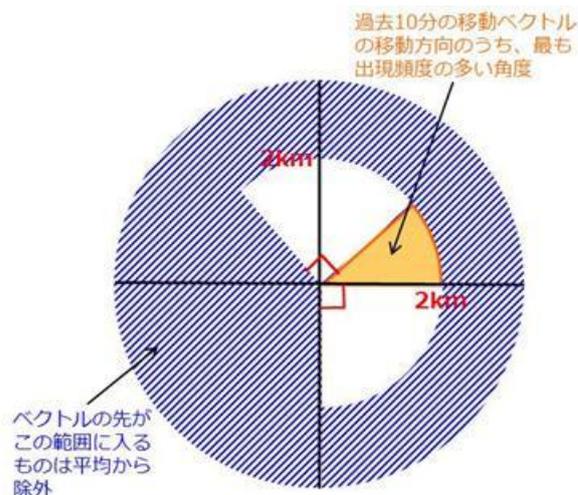


図-12 平均化に用いない移動ベクトルの範囲

b) 移動方向・移動速度の表示

a)で計算した移動ベクトルを局地的豪雨探知システムのWeb画面にて表示する機能を追加した。図-13のように、危険度ランク①～③の各降水セルについて、将来の移動方向の目安になるよう、始点を15分前の位置、終点を現在位置とする移動ベクトルを表示可能とした。



図-13 移動ベクトルのWeb表示画面

c) 通過軌跡の表示

豪雨のタマゴが発達し、周囲の降水セルと併合しだすとそれ以上追跡ができなくなる。そこで、追跡終了となった時刻までの通過軌跡を表示する機能を追加した。図-14のように、追跡終了となった降水セルについて、1分毎の過去位置を折線で結んだ通過軌跡を表示可能とした。



図-14 通過軌跡のWeb表示画面

4. 精度検証

試験運用により得られた事例をもとに、H25システムと3で改良したシステム（以下、H26改良システム）の精度検証を実施した。

(1) 検証対象日

システム改良の効果を検証するには、局地的豪雨と関係のない温帯低気圧などの事例を含める必要がある。そこで、様々な降雨要因の中から局地的豪雨日と非局地的豪雨日を5事例ずつ選定し検証対象日とした（表-2）。

表-2 検証対象 10 事例日

No.	対象日	降雨要因	局地的豪雨日	備考
1	2014/5/26	温帯低気圧	×	
2	2014/6/6	大気不安定	○	大阪府堺市で13.5mm/10分
3	2014/6/26	大気不安定	○	大阪市城東区で冠水被害
4	2014/7/7	梅雨前線	×	
5	2014/7/20	大気不安定	○	奈良市で12.0mm/10分
6	2014/8/23	大気不安定 寒冷前線	○	奈良県天川村で46.5mm/1h
7	2014/9/10	大気不安定	○	大阪府池田市で短時間強雨
8	2014/10/5	台風 18 号	×	
9	2014/10/22	温帯低気圧	×	
10	2015/1/1	冬型	×	

(2) 検証方法

全降水セルを検証することは困難であるため、危険度ランク判定された降水セルのみを対象とした。精度検証イメージを図-15に、検証方法の要点を以下に示す。

- ランク円の出現時刻から30分以内に、円内またはその周囲10km以内に50mm/h以上の降水強度が出現すれば的中、出現しなければ空振りとし、それぞれの数をA、Bとする。周囲10km以内を的中範囲としたのは、降水セルの移動を考慮するためだが、降水セルは30分で30km移動することもあり、移動の影響を完全には考慮できていない点に注意が必要がある。
- 精度指標として、次式に示す的中率 X を用いる。

$$X = \frac{A}{A + B} \times 100 \quad (4a)$$

- ランク円内で降水強度50mm/h以上が出現している降水セルは対象外とする。
- 的中事例について、ランク判定から50mm/h以上の豪雨となるまでの時間差（先行時間）を集計する。

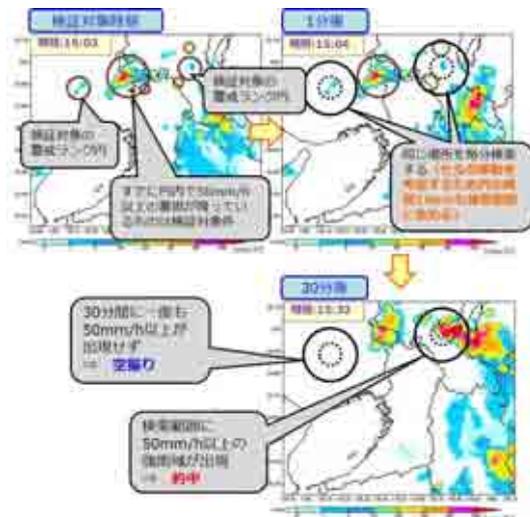


図-15 精度検証方法のイメージ

(3) 検証結果

表-3～表-5にH25システムとH26改良システムの的中率、空振り数、先行時間を示す。層状性判別手法の導入および危険度ランク判定方法の改修により、非局地的豪雨日における空振り数が、各ランクとも5～8割減少した。また、的中率は、全事例日のランク①②で13～14%、ランク③で約20%上昇した。その一方で、全事例日の先行時間は、H25システムの14～16分に対し、H26改良システムは13～15分と1分弱劣っていた。これは、3段階抽出手法で新たに抽出された豪雨のタマゴの検出時間が他と比較して遅いためである。この検証結果から、精度面において、システム改良することのメリットが大きいことが確認された。そこで、H26改良版のプログラムを試験システムに実装した。

表-3 H25 システムと H26 改良システムの的中率

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	30.1	49.6	51.9	59.0	80.1	81.2
非局地的豪雨日	2.1	4.3	4.1	6.7	6.3	21.1
全事例日	15.1	28.9	31.8	45.7	54.0	74.5

単位：%

表-4 H25 システムと H26 改良システムの空振り数

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	5035	2782	1784	1597	139	136
非局地的豪雨日	8135	4451	2572	1236	356	71
全事例日	13710	7233	4356	2833	495	207

単位：事例数

表-5 H25 システムと H26 改良システムの先行時間

	ランク 1		ランク 2		ランク 3	
	H25	H26	H25	H26	H25	H26
局地的豪雨日	15.5	14.8	15.3	14.7	14.2	13.5
非局地的豪雨日	16.1	12.4	12.6	11.8	13.6	11.7
全事例日	15.1	14.6	15.1	14.6	14.2	13.5

単位：分

5. 今後の取り組み

都賀川水害のような痛ましい災害を防止するための監視体制強化など中小河川における安全対策に資するため、今後も以下の取り組みを行っていく予定である。

(1) CバンドMPレーダを用いた適用エリアの拡大

平成 26 年度に深山の Cバンドレーダが MP 化され、同じく近畿にある城ヶ森山レーダとともに 1 時間に 3 仰角の立体観測を開始した。これらのレーダから得られる観測値を追加することで、本システムの適用エリア拡大

を検討する。また、今後全国的にも Cバンドレーダの MP 化が進む予定で、近畿のみならず他地域においても、本システムを適用できる可能性がある。

(2) 局地的豪雨の探知結果の一般公開

今年度より、自治体など外部機関に対して、局地的豪雨探知システムの公開を開始する予定である。その後は一般公開を視野に、さらなる探知精度の向上や利用実績のモニタリング、通信ネットワークおよび周辺機器の構成などについて検討を進める予定である。

(3) 自治体の警報システムとの連携

現在、自治体では気象庁が大雨・洪水注意報又は警報を発表すると信号が自動発信され、回転灯が作動するシステムを導入している。本システムはこれら警報システムとの連携を目指し、降水セルの危険度ランクを 500m メッシュの 2次元データとして配信可能となっている。今後、目先 30分程度先までの移動を考慮した情報を検討し、自治体システムとの連携を図る方向である (図-16)。

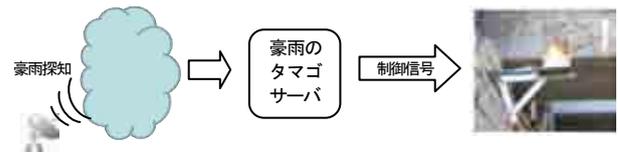


図-16 警報システムのイメージ

謝辞：本研究において、京都大学防災研究所の中北研究室の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, 2010
- 2) 中北英一・山邊洋之・山口弘誠：XバンドMPレーダを用いたゲリラ豪雨の早期探知と追跡, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 2011
- 3) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 水工学論文集, 第57巻, 2013
- 4) 中北英一・西脇隆太・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発, 河川技術論文集, 第20巻, 2014
- 5) 中小河川における水難事故防止検討WG報告書, 2009.
- 6) 中小河川における局地的豪雨対策WG報告書, 2009.

浸透系エポキシ樹脂による コンクリート補修技術について

山内 匡¹

¹日本国土開発（株） 技術センター （〒243-0303神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1）

エポキシ樹脂の低粘度化を図り、0.2mm以上のひび割れ補修はもちろん、0.2mm未満の微細なひび割れに対しても塗布するだけで含浸接着することが可能な浸透系エポキシ樹脂が開発されている。この浸透系エポキシ樹脂を、塗膜系床版防水層のプライマーとして、既設コンクリート床版の表面に塗布することにより、エポキシ樹脂はひび割れ部に含浸してコンクリート床版の補修効果を発揮する。また、浸透系エポキシ樹脂は、床版表面に樹脂膜による防水層を形成し、塗膜系防水層と併せた複合的な防水層を構築できることが小型輪荷重走行試験装置によって確認された。

キーワード 浸透系エポキシ樹脂, 床版防水, 複合防水, 小型輪荷重走行試験装置

1. はじめに

粘度 550mPa・s のエポキシ樹脂に溶剤ではなく、反応性の希釈剤を加えて低粘度化を図り、コンクリートの0.2mm以上のひび割れ補修はもちろん、0.2mm未満の微細なひび割れに対しても塗布するだけで含浸接着が可能な浸透系エポキシ樹脂が開発されている。本エポキシ樹脂は、一般的なエポキシ樹脂が低温時では硬化不良や接着不良の原因となるため、その作業環境が5.0℃以上に推奨されているのに対して、-5℃までの低温作業環境でも使用できる特長を持つ。

本論文では、浸透系エポキシ樹脂の品質や性能について述べると共に、このエポキシ樹脂を、既設道路橋の舗装打換などの修繕工事に伴い施される塗膜系床版防水層のプライマーに代わり、浸透系防水材料として適用した床版防水の効果について述べる。

2. 浸透系エポキシ樹脂の品質

浸透系エポキシ樹脂の品質を表-1に示す。同表には、建築補修用注入エポキシ樹脂（JIS A 6024）の硬質形エポキシ樹脂（低粘度形）の規格値を併せて示す。

なお、本エポキシ樹脂はA剤（主剤）とB剤（硬化剤）を体積比2:1で混合・攪拌して使用する。

表-1 浸透系エポキシ樹脂の品質

試験項目	試験条件	試験値	規格値
粘度(mPa・s)	23℃	250	100~1000
接着強さ(N/mm ²)	23℃	8.3	6.0以上
硬化収縮率(%)	23℃	1	3.0以下
引張強さ(N/mm ²)	23℃	60.1	15.0以上

3. 浸透系エポキシ樹脂の性能

(1) ひび割れ含浸性能

250mPa・sまで低粘度化を図ったエポキシ樹脂のひび割れ含浸性能の判定を、NEXCOの「JHS 426：ひび割れ含浸材料の試験方法」に従って行った。

0.2mm程度のひび割れを再現したコンクリートはり（断面：100×100mm、長さ：400mm）の下面に、上向き施工でエポキシ樹脂0.2kg/m²を塗布し、7日間の養生（温度20℃、湿度65%）後に曲げ試験を行った。

その結果、ひび割れ部への含浸深さは50mm程度まで達し、曲げ試験結果（表-2）は評価基準2.0N/mm²を十分に満足する結果であった。

表-2 ひび割れ含浸性能試験結果

供試体	試験値	評価基準
1	2.55	2.0 N/mm ²
2	2.70	
3	2.38	
平均値	2.54	

* (財) 日本塗料検査協会にて実施

また、ひび割れの発生しているコンクリート表面に浸透系エポキシ樹脂を塗布することによる、ひび割れ含浸性能を確認するため、以下の試験を実施した。

確認試験はコンクリート平板 (JIS A 5371 ; 300×300×60mm) に幅 0.2mm 程度のひび割れを発生させ、表面に浸透系エポキシ樹脂を塗布 (0.25kg/m²) し、硬化後に塗布面に対して垂直にコンクリート平板を切断し、その断面について顕微鏡による観察を行った。幅 0.2mm 程度のひび割れを発生させたコンクリート平板の塗布面および塗布後の切断断面を図-1 に示す。

目視で確認できたひび割れは深さ 25mm 程度までであったが、同図からは浸透系エポキシ樹脂は断面を貫通する深さ 60mm 程度まで含浸していることが確認できる。

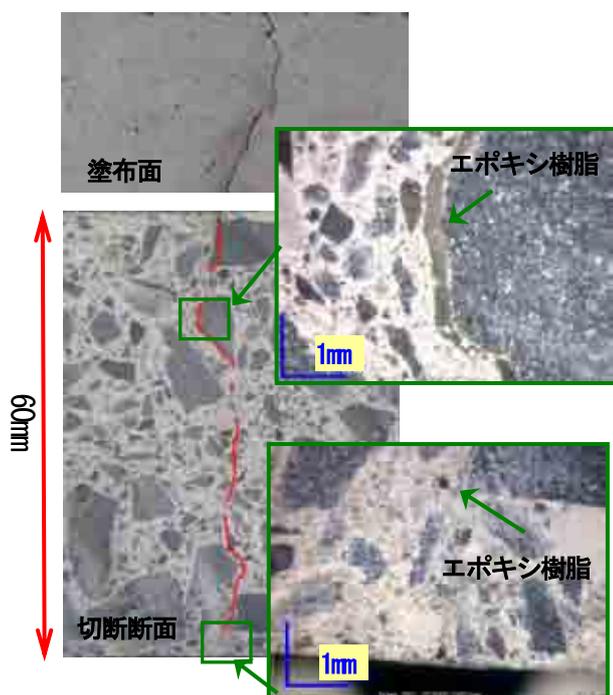


図-1 幅 0.2mm 程度のひび割れへの浸透系エポキシ樹脂の含浸状況

(2) 寒冷地性能

-5℃までの低温作業環境での浸透系エポキシ樹脂の接

着性能を確認するため、建築補修用注入エポキシ樹脂 (JIS A 6024) の「接着強さ試験」に準拠した寒冷地性能試験を行った。

本寒冷地性能試験の環境条件は、標準 (23℃) および低温 (5℃) が示されている JIS A 6024 「接着強さ試験」の環境条件に準拠し、-5℃の氷点下で全ての作業を実施した (表-3) 。試験は、写真-1 に示すように、2 個のモルタルバー (断面 : 40×40mm, 長さ 80mm) で接着層の厚さが 1.0mm になるように鋼線をスペーサとして挟み、粘着テープで三方をシールした試験体に、浸透系エポキシ樹脂を流し込み、養生後に曲げ接着強さ試験を実施した。表-4 に試験結果を示す。

環境条件が標準 (23℃) および低温 (5℃) の場合はもちろん、-5℃の氷点下の環境条件においても、曲げ接着強さは JIS A 6024 硬質形エポキシ樹脂の接着強さの規格値 (標準 (23℃) および低温 (5℃)) を十分に満足する結果であった。

表-3 環境条件

環境条件	作業前養生 (24時間)	接着作業	養生	曲げ接着強さ試験
標準	23℃	23℃	23℃	23℃
低温	5℃	5℃	5℃	5℃
氷点下	-5℃	-5℃	-5℃	-5℃

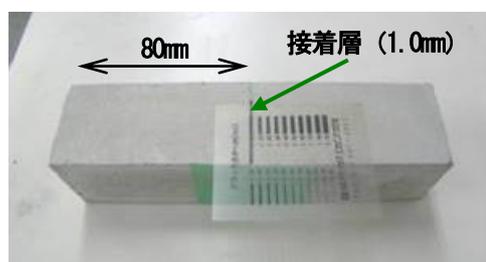


写真-1 試験体

表-4 寒冷地性能試験結果

環境条件	養生期間	曲げ接着強さ (MPa)		
		試験値	規格値	
標準	23℃	7日間	8.6	6以上
低温	5℃	14日間	7.3	3以上
氷点下	-5℃	7日間	8.8	なし
		14日間	9.7	なし

* 国立大学北見工業大学にて実施

4. 浸透系防水材料（複合防水層）への適用

様々な利点から透水性舗装が全国的に普及し、それに伴い床版防水層の設置が必要不可欠となってきている。既設道路橋での舗装打換などの修繕工事に伴い、床版防水層を設置する場合には、交通規制に伴う施工時間の制約、また既設床版にひび割れが発生している場合の対策などについて、十分に考慮した施工が求められている。

こうしたなか、舗装打換時の床版防水層としては、図-2 に示す構成からなるアスファルト加熱型の塗膜系床版防水層の採用実績が多い¹⁾。しかし、近年では、特に積雪寒冷地において、床版の損傷原因である凍害による床版上面のスレーキングに対して、より防水効果が高く、またひび割れ含浸性能を有する浸透系防水材料をプライマーとして適用した複合防水層（図-3）が採用れる場合が増えてきている。

以下では、浸透系エポキシ樹脂を浸透系防水材料へ適用した複合防水層としての品質や施工方法、また床版防水への適用効果について検証した結果を示す。



図-2 塗膜系床版防水層（アスファルト加熱型）の構成

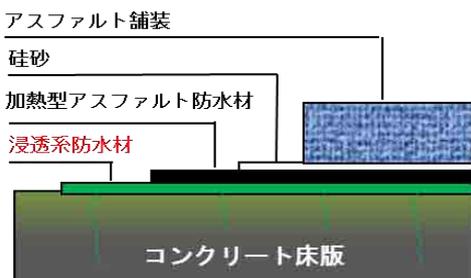


図-3 複合防水層の構成

(1) 複合防水層としての品質

「道路橋床版防水便覧（平成 19 年 3 月）」に準じて、（財）土木研究センターで実施した各種試験結果を表-5 に示す。複合防水層としての各種試験は、浸透系エポキシ樹脂と加熱型アスファルト塗膜系防水層との構成（図

-3）で実施した。

各種試験結果は、いずれも合否判定の目安を満足するものであった。

表-5 各種試験結果

試験項目		試験値	合否判定の目安	
防水性試験 I	減水量(ml)	0.0	0.2 以下	
ひび割れ追従性試験 II	ひび割れ幅 (mm)	1.3	0.3 以上	
せん断試験	強度 (N/mm ²)	23°C	0.26	0.15 以上
		-10°C	1.3	0.8 以上
	変位量 (mm)	23°C	1.73	1.0 以上
		-10°C	1.8	0.5 以上
引張接着試験	強度 (N/mm ²)	23°C	1.01	0.6 以上
		-10°C	2.54	1.2 以上
水浸引張接着試験	水浸前の強度保持率(%)	85.3	50 以上	

(2) 施工方法

浸透系エポキシ樹脂の散布は、舗装切削後に床版上の塵埃・油脂をはじめとする付着物をブローアなどで取り除いた後、主剤と硬化剤の体積比が 2:1 になるように二液連続計量混合（ギアポンプ及びミキシングブロックを使用）しながら、エアレス式ノズルで散布（0.25kg/m²）し、ローラで均す方法である。急速施工が可能のため、これまでの実績では 300m²を約 1 時間で散布・均すことができる。その後、加熱溶解したアスファルト防水材を塗布（1.2kg/m²）し、直ちに珪砂（表面改質材）を散布（0.7kg/m²）する施工である。

(3) 床版防水への適用効果の検証

浸透系エポキシ樹脂の床版防水への適用効果の検証は、疲労作用下で防水効果を評価できる小型輪荷重走行試験装置（写真-2）^{2),3)}を用いて行った。

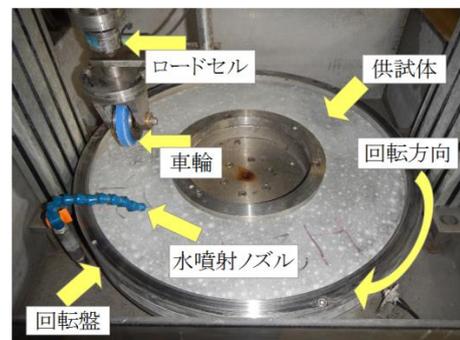


写真-2 小型輪荷重走行試験装置

本装置は、円盤状のモルタル供試体を回転させることにより、直径90mmの車輪によって最大荷重3kNまでの載荷と主軸回転数の制御が可能であり、水張り状態の試験も行うことができる。供試体は外径550mm、内径250mm、厚さ10mmの形状であり、水セメント比を60%として、練混ぜ時において鋼繊維（繊維長30mm）を混入したものである。既往の研究³⁾では、乾燥状態および水張り状態においても、輪荷重走行試験を実施した供試体は、回転数が増加するに伴い疲労破壊に至る走行回数が減少するといった傾向を示し、また同じ回転数で比較すると、水張り状態では乾燥状態の約1/10程度の走行回数で破壊に至る結果が示されている。なお、乾燥状態および水張り状態ともに、供試体の破壊状況は、車輪直下と円周直角方向にひび割れが発生し、最終的に輪走行直下が押抜かれて破壊に至っている。

検証実験は、静的載荷試験によって得られた輪荷重の25%相当の0.6kNに設定²⁾し、回転数は420rpmに固定した。動的載荷（0.6kN、走行回数約2,100回）によってひび割れを発生させた供試体と、ひび割れ無しの供試体について、浸透系エポキシ樹脂塗布（0.25kg/m²）の有無による、水張り状態での輪荷重走行試験を実施した。なお、浸透系エポキシ樹脂の塗布は、供試体表面をサンダーにてケレンし、汚れを取り除いた後に行っており、建研式引張試験による供試体と樹脂の付着強度は平均0.77N/mm²、全て母材破壊しており、付着性には問題ないことを確認している。

各ケースと、試験開始から各供試体の下面に漏水を確認した時点までの漏水時間との比較を図-4に示す。

ひび割れの有無に関わらず、浸透系エポキシ樹脂を塗布したことにより、漏水時間は樹脂を塗布しない場合に比べ約2倍となっている。つまり、既設床版にひび割れが発生している場合においても、浸透系エポキシ樹脂を塗布することにより、疲労作用下においてひび割れ無の床版と同等以上の防水効果が期待できると考えられる。

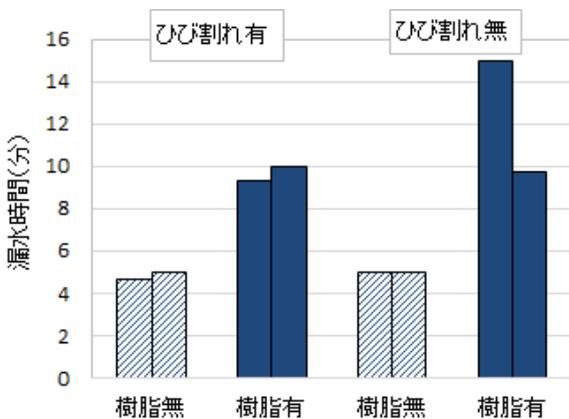


図-4 漏水時間の比較(水張り状態)

また、図-5には、乾燥状態において輪荷重走行試験を実施した供試体の破壊までの走行回数を示す。同図からは、ひび割れの有無に関わらず、樹脂を塗布したことによる耐疲労性の向上はみられない。つまり、浸透系エポキシ樹脂の塗布は、耐疲労性の向上に直接的に寄与するものではなく、水の存在下で水の侵入を防止することによって、間接的に耐疲労性の向上に寄与できるものと考えられる。

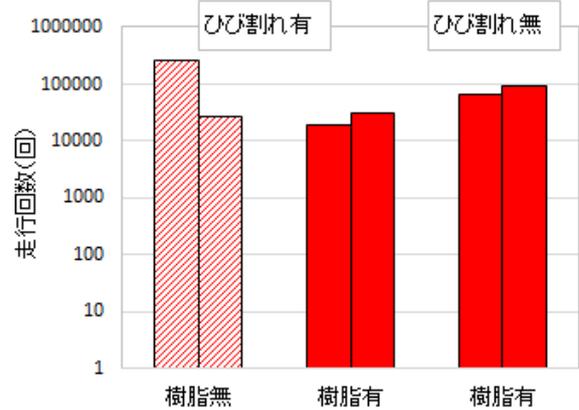


図-5 破壊走行回数の比較(乾燥状態)

おわりに

低粘度化を図った浸透系エポキシ樹脂の各種試験を実施し、-5℃まで使用できる寒冷地性能、またひび割れ含浸性能について確認した。

この浸透系エポキシ樹脂を浸透系防水材料として適用した複合防水層の品質は、各種試験の規格値を満足し、小型輪荷重走行試験装置を用いた本実験の範囲では、浸透系エポキシ樹脂の床版防水への適用は、樹脂を塗布しない場合に比べて約2倍の防水効果があることが確認された。舗装打換時の床版防水層の設置、特に既設床版にひび割れが発生している場合においては、浸透系エポキシ樹脂の適用効果は大きいと考えられる。現在、この複合防水層の採用、特に浸透系防水材料への浸透系エポキシ樹脂の適用は、北海道などの寒冷地、また西日本においても増加している状況にある。

参考文献

- 1) 道路橋床版防水便覧。(社)日本道路協会、平成19年3月、p.61.
- 2) 前島拓也, 子田康弘, 岩城一郎: 小型輪荷重走行試験機を用いたモルタル版の疲労耐久性に及ぼす水と輪走行速度の影響評価, 土木学会第68回年次学術講演会, V-136
- 3) 三浦優人, 子田康弘, 岩城一郎: 高速条件下における水と輪走行速度がモルタル版の耐疲労性に及ぼす影響, 平成26年度土木学会東北支部技術研究発表会, V-7