

地質リスクを考慮した 道路災害復旧案の検討について

冷水 孝太郎¹・中西 誠彦²

¹近畿地方整備局 奈良国道事務所 奈良南部災害復旧対策出張所 (〒638-0821奈良県吉野郡大淀町下淵1000)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 奈良南部災害復旧対策出張所 (〒638-0821奈良県吉野郡大淀町下淵1000)

2023年12月23日、奈良県の管理する国道169号吉野郡下北山村上池原地先において、崩土被害が発生した。崩落原因を調査した結果、深層崩壊の可能性が高く、本復旧にあたっては、高度な技術力が必要であることから、国の権限代行による道路災害復旧事業となった。本論文では、被災箇所の早期復旧に向けて、被災地域及びその周辺の地質調査結果を念頭に、地質リスクの回避・低減の検討に加え、経済性、安全性、維持管理性等を考慮した道路災害復旧案を検討した経緯について報告するものである。

キーワード 道路災害復旧、地質リスク、深層崩壊

1. 概要

(1) 国道169号下北山村（前鬼～上池原）の概要

国道169号は、紀伊半島アンカールートの一部を形成するとともに、第二次緊急輸送路に指定されており、隣接県との連携強化を図り、観光、緊急医療、地域活性化の支援や大規模災害時の緊急輸送路として重要な役割を担う「命の道」となっている。現道の前鬼～上池原間は、池原貯水沿いに整備されており、崩落箇所の北側には、前鬼橋、南側には上池原交差点と、地域の観光拠点のひとつである下北山村スポーツ公園が位置する（図-1）。

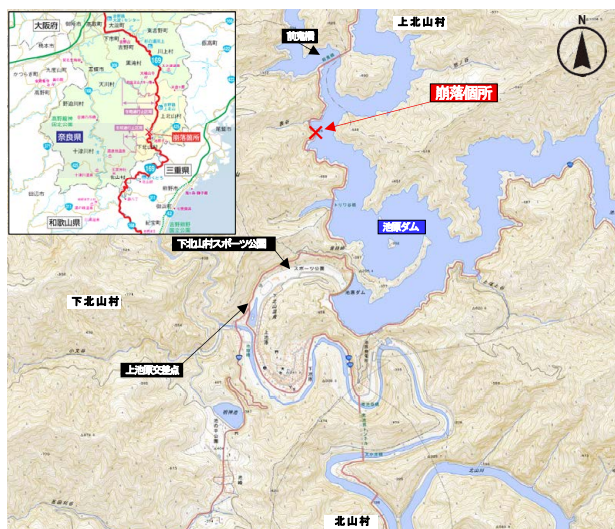


図-1 前鬼～上池原付近の状況

(2) 事故の概要

2023年12月23日、奈良県吉野郡下北山村前鬼～上池原間の国道169号沿いの吹付コンクリートで保護された尾根部の斜面が、幅約20m、長さ約40mにわたり崩壊し、車両2台が巻き込まれ、1名が死亡、1名が重傷を負う事故

となった。被災箇所の状況図を示す（図-2）。



図-2 2023年12月 被災箇所の状況

(3) 事故後の通行規制

一般車両の全面通行止め期間は、6ヶ月以上に及び、地域の生活、経済、観光に多大な影響を与えた。なお、現在は、道路管理者である奈良県が崩落箇所に仮設栈橋を設けて迂回を行い、約160mの信号制御による片側交互通行を行っている。事故発生から現在における通行規制の変遷を以下に示す。

a) 2023年12月23日[事故発生]～

- ・一般車両全面通行止め

- ・緊急対策 2023年12月 崩落直後着工 崩土除去等実施
- ・応急対策 2024年 1月 着工
仮設栈橋[約160m], モルタル吹付け工[t=8cm], 高エネルギー吸収型防護工[L=43m], 鉄筋挿入工[D19, L=5.0m 290本]

b) 2024年4月2日～

- ・消防, 救急等の緊急車両限定での通行可(臨時措置)

c) 2024年6月28日～

- ・仮設栈橋による一般車両の片側交互通行を開始
※通行止め規制基準値
雨量規制: 時間雨量 25mm/hr, 連続雨量 70 mm以上
斜面の異常検知: 地盤伸縮計 2mm/hr以上 (図-3)



図-3 仮橋による片側交互通行の状況と計測器

d) 2024年11月22日～

- ※通行止め規制基準値
- ・雨量規制: 連続雨量 110mm以上に緩和

(4) 崩土の原因

a) 国道169号の過去の被災履歴

国道169号, 及びその周辺での主な道路災害の事例を表-1に示す。落石, 斜面, 法面崩壊, 崩土, 地すべり等により, 人命に関わる重大事故も度々発生している。

表-1 過去25年間の国道169号, および周辺での道路災害事例

発生年月日	発生場所	被害概要
2000年6月	国道169号	落石により通行中の車が衝突, 負傷者1名
2006年12月	国道425号	乗用車が川に転落して1人死亡
2007年1月	国道169号	通行中の車両が崩壊に巻き込まれ3名死亡
2011年9月	国道169号 川上村迫	台風12号紀伊半島豪雨 国道169号を横断して土砂が流下し, 国道が分断
2018年12月	国道169号 川上村迫	高原トンネル南坑口付近の覆工に地すべりに起因する亀裂が発生
2020年4月	国道169号 下北山村上池原	法面の大規模崩壊が発生, 全面通行止め
2023年12月 ※本報告	国道169号 下北山村上池原	同地点で再発 1名死亡, 1名重傷 現在も復旧工事継続
2024年4月	国道169号 下北山村西原	崩土を確認し, 通行止
2024年4月	国道425号 下北山村大瀬	崩土を確認し, 通行止

b) 地形・地質

周辺地域では, 尾根が鋭く深い谷地形が特徴である。深い谷は, 紀伊半島の隆起運動と多量の降雨の影響で, 侵食作用が強く作用するために生じる地形である。南東方向から次々に岩が付け足される形で形成した地層であり「付加体」と呼ばれる複雑な地質構造が特徴で, 砂岩, 泥岩, チャートなどが不規則に分布する。岩自体は硬いが, 亀裂が発達しており脆い部分がある(図-4)。

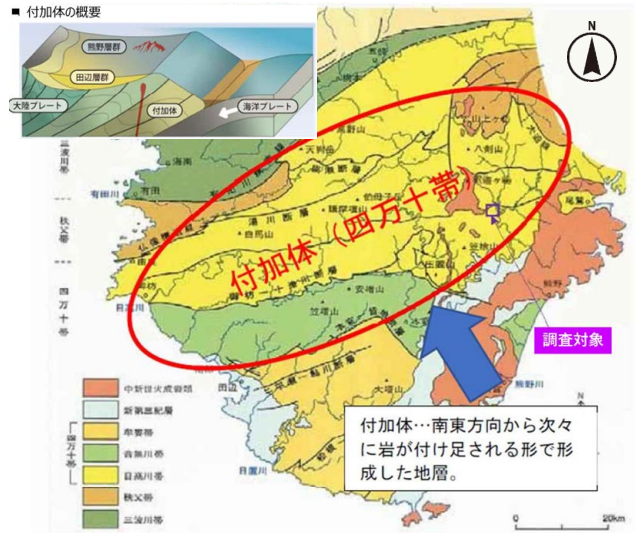


図-4 被災箇所の地質

c) 外的要因

当該箇所は, 岩盤分類が確立されていなかった1970年代にダムの付替え道路として, 発破などの旧来工法で構築された。そのため, 現行の標準勾配の基準が施行される以前に施工された法面であり, 非常に急勾配となっている。建設当初, 法面は安定していたが, その後経年的に地山の風化と岩盤の緩みが進行し, 最終的に凍結融解等をトリガーとして安定性が失われたと考えられる。

d) 地形, 地質的要因

崩壊面に露出した岩盤の地質構造を調査した結果, 当該現象は3つの節理面に規制されたくさび状の岩盤崩壊(岩盤すべり)と考えられる。また, 斜面に認められる層理面は高角度の受け盤構造を成しており, 重力変形により岩盤に緩みが生じやすい地質構造であったと推察される(図-5, 図-6)。

【崩壊面に見られる地質構造から推定した崩壊発生機構の推察】



図-5 崩壊のメカニズム(模式図)

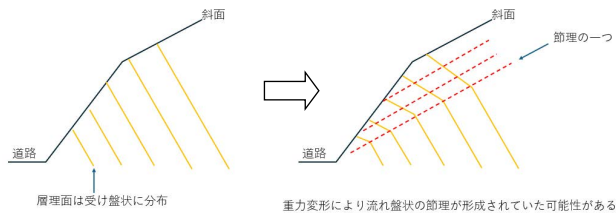


図-6 崩壊イメージ

本格復旧を検討するにあたり、奈良県により被災箇所周辺のボーリング調査が実施された。その結果、地表付近から深度30m付近までの間に、開口亀裂が発達していたり、風化が進行して緩んだ岩盤や、地下水の存在等の特徴が確認された。

一方、既往文献・調査結果レビューでは、2023年12月の崩壊箇所を包括する流域は、深層崩壊危険溪流として抽出されていることが確認された。加えて、奈良県実施のボーリング調査結果から、深層崩壊の発生に寄与する可能性のある特徴が複数確認された。そのため、当該地域では今後、大雨や地震時に深層崩壊が発生し、甚大な被害が引き起こされる可能性が極めて高いと判断した。

(5) 直轄権限代行による事業化

現道復旧を行った場合、深層崩壊危険渓流の地形を改変するため、応力解放等により深層崩壊を誘発する可能性が避けられないと判断された。そのため、本格復旧には高度な技術力を要すると考えられることから、2024年3月27日に道路法 第13条第3項の規定に基づき、直轄権限代行により国土交通省が調査、設計、工事を進めることとなった。

2. 本格復旧に向けた地質調査

(1) 調査箇所を選定

被災箇所を包括する流域は、過去に深層崩壊危険渓流として抽出されており、付近にも同様な地形が認められる。そこで、周辺地域における、深層崩壊をはじめとした地質リスクの広域的な抽出を試みた。概略地形判読を行い、図-7 に示す青破線エリアを調査箇所として選定した。選定の根拠を以下に示す。

a) 崩壊が密集するエリア

- ・崩壊跡やガリーなどの地形が密集しており、周囲と比べて脆弱な地質工学的性質を有する可能性が高いと考えられる。

b) 半島状の尾根地形を呈するエリア

- ・尾根地形は元々硬質な岩盤から形成されていたと考えられるが、ダム建設時の切土以降、経年的な風化が進んだことから、次第に尾根全体が緩み、地盤の強度が低下している可能性があると考えられる。

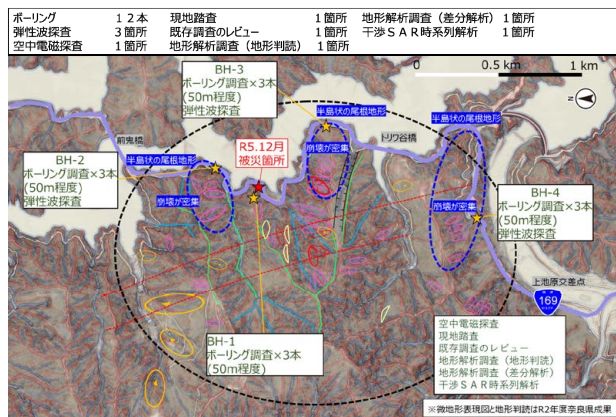


図-7 調査箇所と調査数量

(2) 調査概要

a) 地形解析調査（地形判読）

微地形判読図と現地踏査結果をもとに、地すべり、重力変形斜面等により地山が緩んだ地形（緩み地形）を抽出した。図-8、9に示すように緩み地形が多数抽出された。

b) 地形解析調査（航空レーザ測量データ差分解析）

2013年度と2020年度の航空レーザ測量データを用いて地上標高データの差分をとり、m単位で地形の変化状況を確認し、斜面が変動している可能性のある範囲を抽出した。図-8、9に示すように変動している可能性がある斜面が多数抽出された。

c) 干涉 SAR 時系列解析

過去と約10年間のSAR衛星データを分析し、mm単位で地形の変化を確認した。図-8, 9に示すように変動している可能性のある斜面が多数抽出された。

被災箇所周辺（BH-1）の平均年変動量は、他の調査箇所と比べて2mm/年と大きく、累積性が明瞭であった。また、調査箇所（BH-2～3）の平均年変動量は1mm/年であり、BH-1と同様に累積性が確認された（図-10）。

d) ボーリング調査（ボアホールカメラ撮影）

2-(1)で選定した調査箇所においてボーリングを実施した。コアやボアホールカメラ撮影結果をもとに、岩相や亀裂・風化度合等の状況から、「風化帯」や岩盤に亀裂が多数発達している「緩み域」を推定した。調査箇所BH-1は浅層15mに強風化帯、層厚30m程度の深層に緩み域が確認された。また、調査箇所BH-2では25m、BH-3で層厚40mの緩み域が確認された。

e) 弹性波探查

弾性波探査は、人工震源から弾性波を発生させ、地中を伝播するP波速度を計測し、地盤の強度を推定した。ボーリング結果とキャリブレーションを行い、BH-1～4の緩み域を把握した。

f) 空中電磁波探查

空中電磁探査は、比抵抗値分布を基に、広域的な地質状況や地下水等の分布状況を推定できる可能性がある。そこで、BH-1～4の調査結果の妥当性を含めた総合的な

検証を行った。平面的な比抵抗分布値を確認した結果、BH-1周辺では、周囲と比較して比抵抗値が著しく低いことを確認した。BH-1孔では、地下水が確認されていないことを踏まえると、周辺よりも岩盤の風化が進行している可能性が考えられる。また、BH-1～4の各縦断方向の比抵抗分布を確認した結果、地質調査結果（ボーリング調査・弾性波探査）による緩み域の下端深度とおおよそ同じ深度に比抵抗値が急激に変化する領域が認められた。比抵抗値の変化には様々な要因が考えられるが、岩盤状態の変化として考えた場合、ボーリング調査結果と概ね整合する（図-11）。

(3) 被災箇所周辺の地質リスク

a) BH-1（被災箇所）

地表から深度15mまでの区間に強風化帯が存在していることに加え、干渉SAR時系列解析では平均年変動量が2mm/年と周囲よりも大きな変動傾向が示された。

また、地表から深度30m程度までの比較的深い区間において、深層崩壊の危険性がある緩み域を推定した。

これらを踏まえると、重力変形等による岩盤の緩みが進行している可能性があり、調査箇所の中では崩壊危険度が最も高い斜面と考えられる。崩壊を抑止するためには、浅層の強風化帯の対策が必要であり、浅層部と深層部の対策を併せて検討する必要がある。

一方で、BH-1周辺に着目すると、BH-1箇所地質調査および地形判読により推定された緩み地形と、隣接する斜面において干渉SAR時系列解析で抽出された斜面変動の範囲が重複している状況を確認した。総合的な斜面对策を行うためには、一体の土塊として取り扱う必要があると判断した（図-8、図-11、図-12）。

b) BH-2～4（被災箇所外）

ボーリング調査により、BH-2～4 においても緩み域（層厚 25m～40m）が判明した。

干渉 SAR 時系列解析により、BH-2～3 では平均年変動量が 1mm/年を確認した。差分解析では、BH-4 周辺で変動傾向を確認した。これら調査結果を総合的に検討した結果、深層崩壊の危険性があると判断した。

一方で、各調査結果を踏まえると、BH-1 と比べて直ちに崩壊する可能性は低く、早急な対策の必要性はないと考えられるが、変動が進行すれば BH-1 同様に崩落の危険性が高まるため、継続的な監視を行っていく必要があると判断した（図-8、図-9）。

c) 地質調査結果のまとめ

今回実施した現地踏査、地形判読、地形差分解析、干渉 SAR 時系列解析及び過去の被災履歴の確認の結果、前鬼橋から上池原交差点までの区間における国道 169 号の全線にわたり地すべりや重力性変形に伴う緩み地形が存在することが判明した。

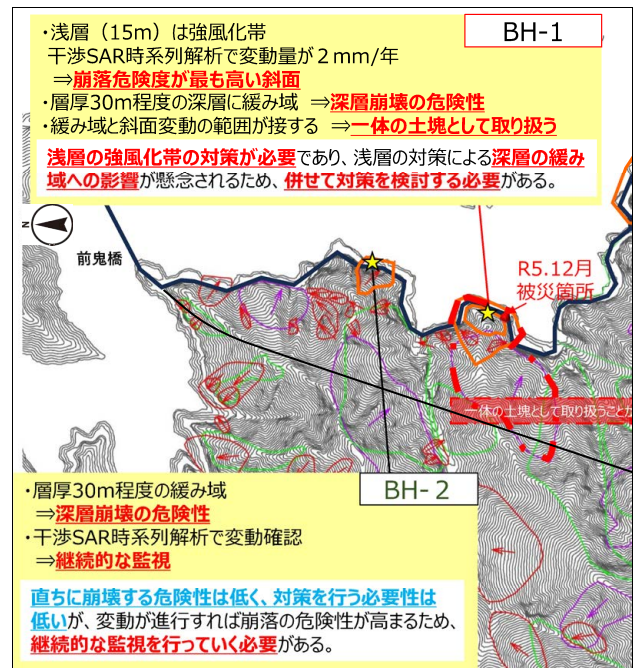


図-8 調査結果概要図 (1/2)

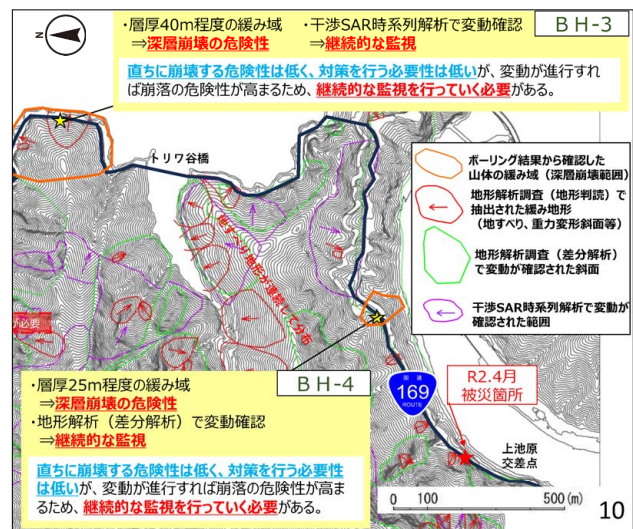


図-9 調査結果概要図 (2/2)

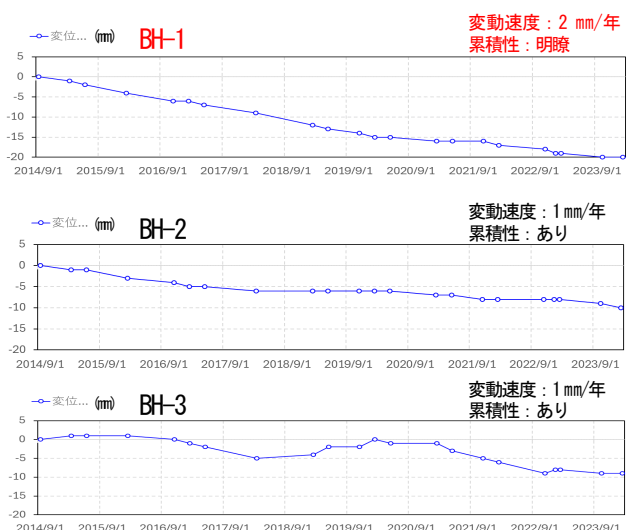


図-10 干渉SAR時系列解析
(BH-1～3) ※BH-4は南向き斜面で解析困難

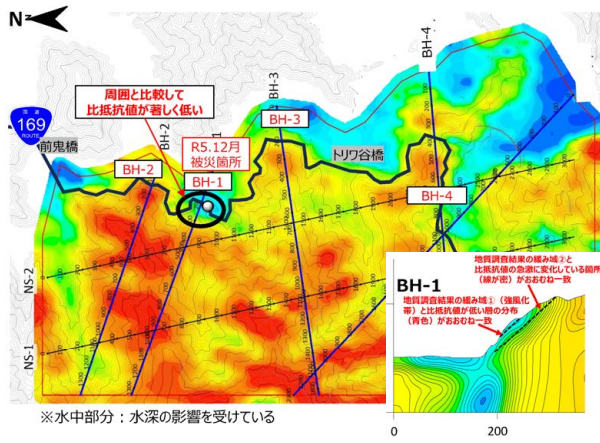


図-11 空中電磁波探査結果 平面図及びBH-1断面の例

【弾性波探査】

【横断面】

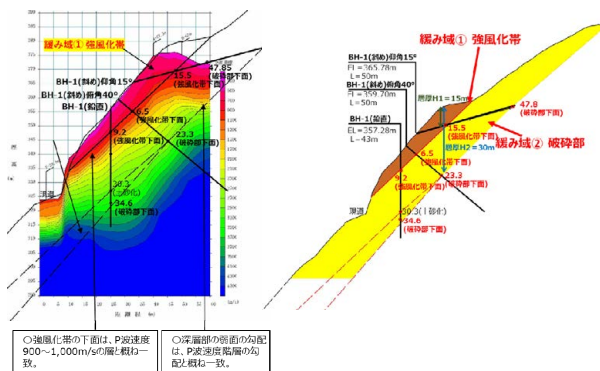


図-12 調査結果の概要(BH-1の例)

3. 本格復旧案の検討

(1) 検討方針及び配慮事項

比較案は、図-13 に示す崩壊箇所を対象とし、斜面崩壊を「抑止」、「回避」の2つの視点から立案した。

具体的には、図-13 に示す原位置復旧（アンカー工）、別線（ダム湖側）橋梁、別線（山側）トンネルを立案した。



図-13 比較案ルート図

a) 原位置復旧（アンカー）

深層崩壊の危険性を有するブロックに対して、地山の切り取りによる応力解放を生じさせず、施工振動を最小限に抑制するためアンカー工により原位置復旧を行う案。アンカー施工面積：約33,000m²（図-14）

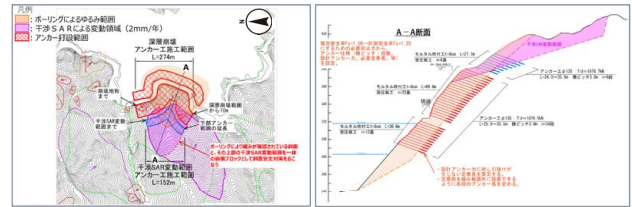


図-14 原位置復旧（アンカー）

b) 別線（ダム湖側）橋梁

深層崩壊が発生しても崩壊ブロックの土砂・岩塊が到達しない範囲を設定し、その範囲を避けた位置（崩壊ブロック下端から最小 50m 離れた位置）に橋梁を設置する案。橋梁延長約 0.5km（図-15）

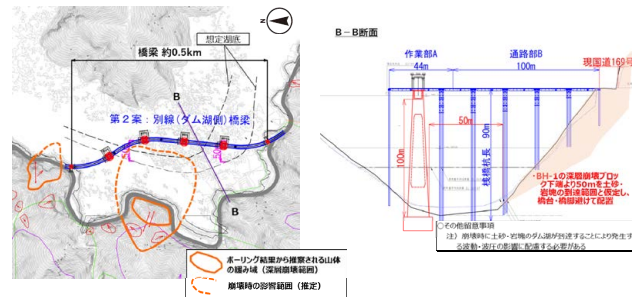


図-15 別線（ダム湖側）橋梁

c) 別線（山側）トンネル

斜面の危険性がないトンネル坑口位置で、深層崩壊が発生しても影響が及ばない離隔距離 2D（D：掘削径）以上を確保した位置（山側）をトンネルで通過する案。トンネル延長約 2.7km（図-16）

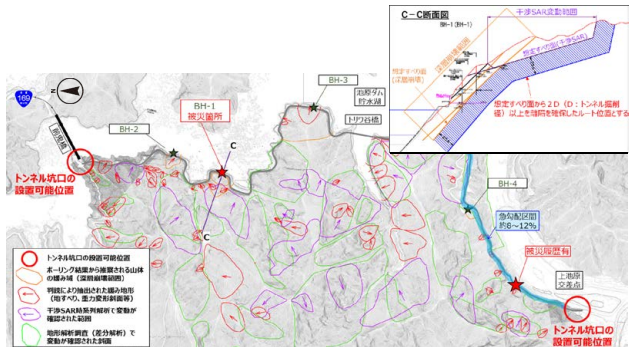


図-16 別線（山側）トンネル

(2) 比較検討

以上の比較3案に対して、施工の難易度、施工安全性、維持管理、工期、経済性の観点から比較、評価をおこなった。

a) 施工の難易度

アンカー工の場合、抑止力が大きくなるため、アンカー配置が密集するとともに、常時満水位以下での施工では、受圧板の品質管理が高度となる。橋梁案では、ダム湖内での施工により仮締切（ケーソン等）の規模が大きく高度な管理が必要となる。トンネルについては、標準的な山岳トンネル工法（NATM）での施工が可能である。

b) 施工安全性

アンカー工の場合、大型の削孔機により打撃振動を与

えるため、崩落を誘発する。直高 50m 超で急斜面に設置される足場が強風時、地震時に安定性を損なう。橋梁、トンネルは、規模は大きくなるが、既往の施工事例等を元に管理することで対応は可能である。

c) 維持管理

アンカー工の場合、ダム湖の常時満水位以下の施工も含まれるため、点検が容易ではない。再緊張の必要性が生じた場合、工事費が高価となる。橋梁は、ダム湖内となり、橋梁の点検知識を有する潜水士が必要となる。一方トンネルは、一般的なトンネル点検で対応が可能である。

d) 工期、経済性

災害復旧事業のため、工期は最短が望ましい。アンカーは打設規模が大きく、橋梁、トンネル案に比べて工期が長い。橋梁は、ダム湖の中央付近を通過し、橋脚高が 100m を超えるため、トンネル案に対して高価となる。

e) 検討結果

以上の比較結果より、施工の難易度、施工安全性、維持管理に問題が無く、工期、工費に優れるトンネル案を選定した。また、結果的に、トンネル案とすることで、地質調査結果で、将来的に崩壊の危険性が残るBH-2～4の半島状尾根付近を回避できる。

4. まとめ

(1) 本格復旧案検討の流れ

地質リスク把握を目的とした地質調査を早期に実施するとともに、その結果を反映した比較案の検討や防災検討会での助言の反映し、設計精度（構造信頼性、概算費用、概算工程）を逐次更新を行い、委員会での合意形成を経て、3 ヶ月の短期間で本格復旧案を確定させることができた（図-17）。

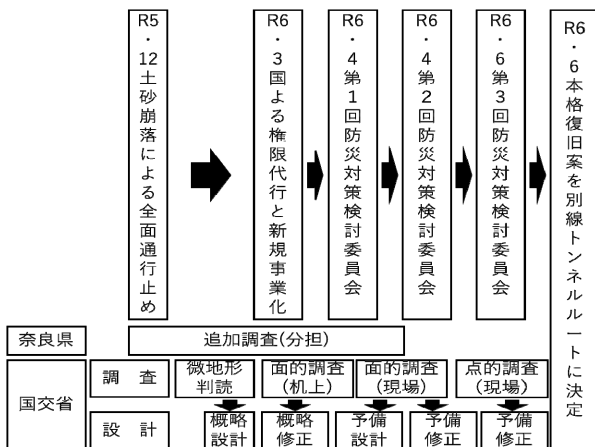


図-17 本格復旧案検討の流れ

(2) 道路早期災害復旧に向けて得た知見

早期に道路災害復旧案を確定するに至った調査、比較検討、及び工程管理で得た知見を以下に示す。

a) 地質調査段階

机上調査の面的、現地調査の面的、現地調査の点的の

順で調査を実施することで、効率的に崩壊地、及びその周辺における地質リスクの内在範囲と影響度を効率的に把握することができる（表-2）。

表-2 実施した調査とその目的

机上調査	調査名	目的	対象	地質リスク 範囲の絞り込み
	① 既存調査のレビュー	過去に調査された広域的な地形地質リスク分析を確認する。	面的	○
	② 地形解析調査 (航空測量データ差分解析)	過去と現在の航空写真測量データから等高線を対比してm単位で地形の変化量、変化状況を確認する。	面的	○
	③ 干渉SAR時系列解析	過去と現在の衛星から地上との距離データを解析してmm単位で地形の変化量を確認する。	面的	○
危険度の高い地形を把握し、詳細調査の範囲を絞る				
現地調査	調査名	目的	対象	地質リスク 危険度
	④ ボーリング調査 (ボアホールカメラ)	地層や亀裂・風化度合によりすべり面を確認し、土塊の厚さを把握する。	点的	○
	⑤ 弾性波探査	地盤から反射される弾性波を確認し、地質の成層状況や地盤の強度を把握する。	点的	○
	⑥ 空中電磁探査	地盤の含水量を3次元で確認し、風化度合や地下水分布状況を把握する。	面的	△ (⑤を補完)
	⑦ 現地踏査	地表に現れる岩盤の走向傾斜を確認し、受け皿が流れ皿かを把握する。	面的	△ (⑤⑥を補完)

b) 比較検討段階

比較案抽出にあたっては、対策の信頼性を踏まえて、比較案を抽出することが重要である。本事業の別線（山側）トンネルのように構造物規模は大きくなるが、斜面崩壊のリスクを回避することで経済性、工期短縮が図れ、かつ、維持管理性においても優位となり、当該地域の抱える地質リスクを回避することができた。

他方、推奨案の選定にあたっては、比較案に対して実現性が担保される必要がある。類似事例、簡易構造計算をもとに、必要な補強構造、ルート、工期などの信頼性を向上させることに留意の必要がある。

(3) 今後の展望

本路線と同様に 1965 年代にダムの工事用道路で建設され、その後国道、県道として利用されている道路や、法面に対する安全基準が十分に整備されていなかった時代に建設された道路については、本路線と同様に斜面の経年劣化が進行しているものと思われる。今回の調査、あるいは復旧対策で得られた知見を基に、災害復旧の迅速化を図るとともに、予防保全の考えも踏まえ、引き続き、安全な道路の整備、管理に繋げていきたい。

謝辞：本論文の執筆にあたり、国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会の京都大学 大西有三名誉教授、関西大学 社会安全学部 小山倫史教授をはじめ、各委員の皆様、並びに奈良県、下北山村の関係者、業務関係者の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

1) 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999

関連資料

- 1) 国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会 会議資料 第1～3回，臨時開催 奈良県
- 2) 国道169号下北山村上池原地区防災対策検討委員会 会議資料 第1～3回 国土交通省