

【CO36】

供用開始から長期間経過後に顕在化した路面隆起の発生メカニズムについて

株式会社新協地質 ○高橋 大樹, 増村 通宏, 若杉 肇

1. はじめに

開削により造成された道路において路面の隆起が発生し、動態観測の結果、切土法面の変位も確認された。調査地は新第三紀の泥岩が分布する地域で、当該法面は流れ盤構造と推察される。また、路面の変状（隆起）は、道路の供用開始から約 25 年も経過した後に顕在化している。本稿では、応力開放に起因する風化・緩み領域の経年的な拡大に着目し、変状の発生メカニズムを考察した事例を報告する。

2. 調査地概要

(1) これまでの経緯

- 平成6年 : 道路竣工
- ～令和1年: 多少道路が波打つ程度で顕著な変状なし
- 令和2年～: 路面の隆起が顕在化

(2) 現地状況

現地では、路面隆起の他、法面の押し出し、尾根上の開口亀裂、法枠工の亀裂などの変状が確認された(図-1)。これら変状の発生原因として、応力開放に起因する切土法面のすべり破壊が疑われ、詳細調査を実施した。

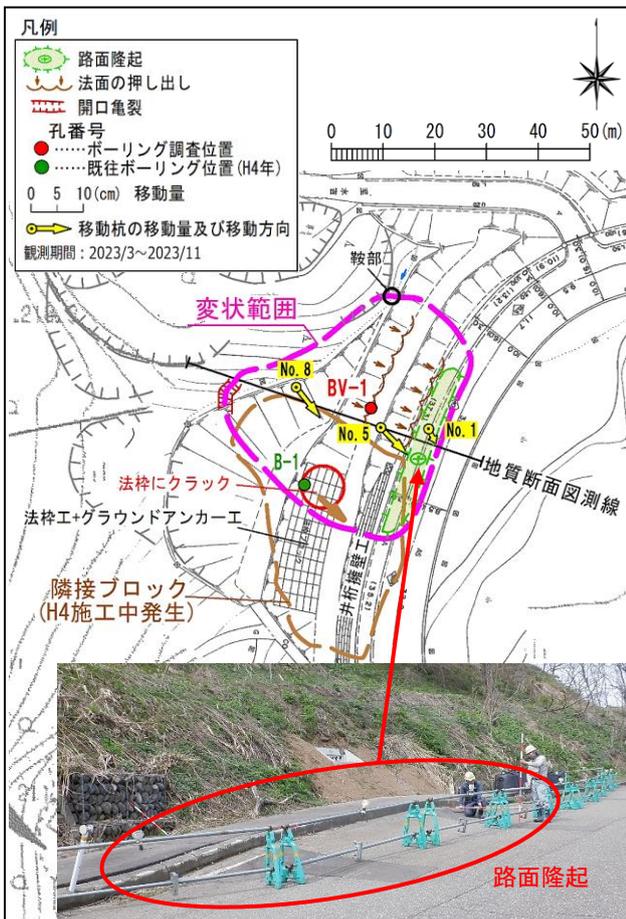


図-1 調査平面図

3. 調査結果

(1) ボーリング結果

本法面には、上位より破碎質風化泥岩 (Ls)、泥岩 (Ms)、凝灰質泥岩 (tMs) の3層が分布する (図-2)。既往の地質図によると、流れ盤構造の法面と考えられる。

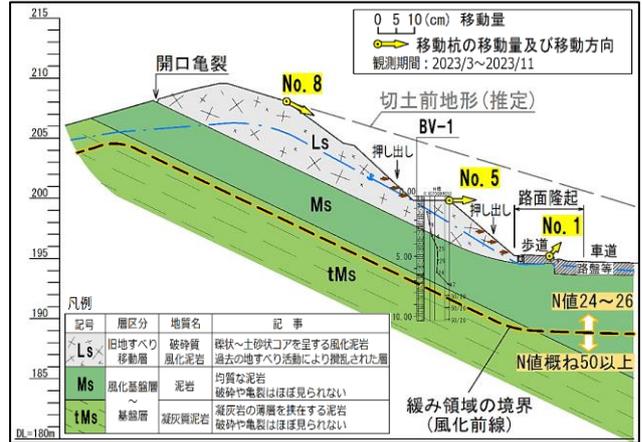


図-2 地質断面図

コアの状況から、破碎質風化泥岩 (Ls) は旧期の地すべり移動層、泥岩 (Ms) と凝灰質泥岩 (tMs) は過去に移動した経験をもたない基盤層と考えられる。

基盤層は新鮮な状態であれば N 値 50 以上を示す岩盤であるが、BV-1 地点では深度 7m 付近 (tMs の上層部) まで N 値が 24～26 程度に低下している。なお、平成 4 年の工事中に実施された B-1 では深度 4m 付近から N 値 50 程度以上が確認されており、本法面では切土当初に比べて N 値の低下領域が深度方向に拡大していると考えられる。また、凝灰質泥岩 (tMs) では乾燥したボーリングコアの表面に針状の結晶 (写真-2) が見られ、特に N 値が変化する深度 7.0m 付近で析出が多い傾向が見られた。

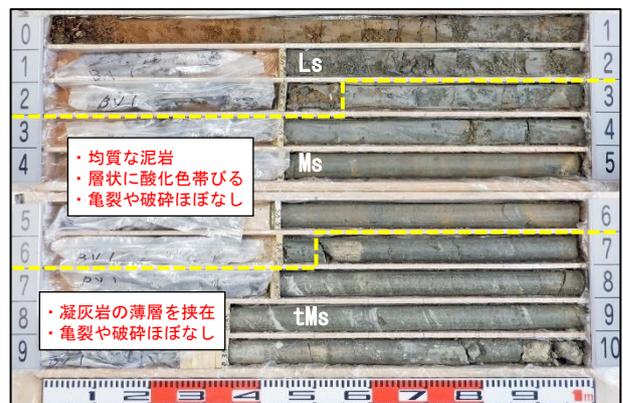


写真-1 ボーリングコア写真 (BV-1)



写真-2 tMs 層表面の析出鉱物 (深度 7.5～7.6m)

(2) 観測結果

①地下水観測、パイプ歪計観測

地下水位は浅部(Ls層内)に位置し、降雨後は地表付近まで上昇する。パイプ歪計は深度3m、7mで累積変動が認められる。特に深度7mは顕著な変動を繰り返し、令和6年能登半島地震発生の際も大きく変動している。

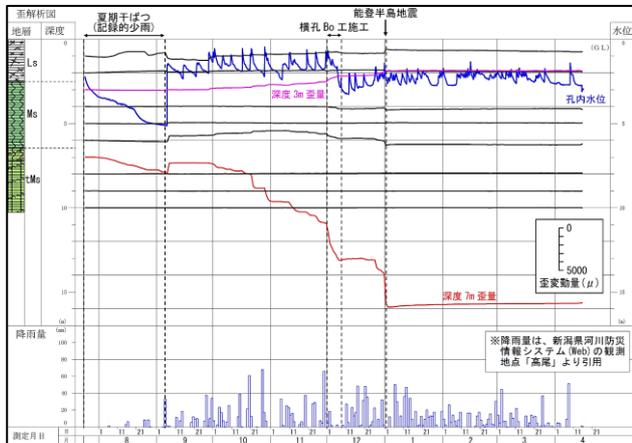


図-3 BV-1観測グラフ(令和5年8月~令和6年4月)

②移動杭観測

移動杭観測は、変状範囲を中心に計6点で実施し、うち3点(No.1、No.5、No.8)で明確な移動を確認した(図-1、図-2)。

水平変位については、いずれも南東側に移動しており、法面の傾斜方向と斜交する。この移動方向は切土前の地表傾斜方向あるいは層理面の傾斜方向を反映したものと考えられる。なお、工事中(平成4年)に滑動した隣接ブロックもこれと同様に南東側へ移動している。

鉛直変位については、No.1は隆起、No.5は水平移動、No.8は沈降の傾向が見られた。

(3) 室内試験結果

地山の膨脹性を評価する目的で、ボーリングコアを用いてCEC試験を実施した。試験結果を表-1に示す。

表-1 CEC試験結果一覧表

試料番号	採取深度	地層区分	陽イオン交換容量 cmol(+)/kg
No.1	4.5~5.0m	Ms	30.4
No.2	6.5~7.0m	tMs	27.5
No.3	8.5~9.0m	tMs	25.5

陽イオン交換容量は、いずれの試料も20cmol(+)/kgを超えており、膨脹発生の可能性がある地山と評価される。また、No.2の試料を用いてX線析出を実施した結果、少量ながらスメクタイトと黄鉄鉱が検出された。スメクタイトの含有は、CEC試験における膨脹性の評価を裏付けるものと考えられる。黄鉄鉱の含有は、その酸化により硫酸が生成されることを示唆しており、硫酸が種々の鉱物を溶解することによる化学的風化の素因になる場合もある。前述のボーリングコアの表面に析出した針状の結晶は、化学的風化の結果として生じた硫酸塩の可能性がある。

4. 変状の発生原因

現地状況と調査結果から、当該箇所に見られる数々の変状は応力開放に起因する切土法面のすべり破壊によるものと考えられる。すべり破壊は、浅いすべり(Ls層の再活動)と深いすべり(基盤層内に発生した初生すべり)の2つが存在すると想定され、路面隆起は主に深いすべりに起因していると考えられる。深いすべりが発生した背景には経年的な地山(Ms層、tMs層)の強度低下があるとみられ、応力開放による緩み、粘土鉱物の膨潤、化学的風化による変質などが地山の強度低下に大きく関与していると考えられる。

5. 路面隆起(深いすべり)の発生メカニズム

路面隆起(深いすべり)の発生メカニズムは図-4のように考えられる。

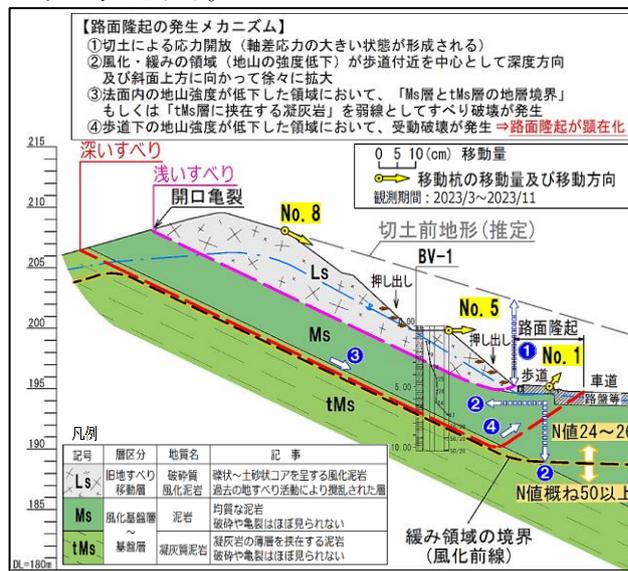


図-4 路面隆起の発生メカニズム説明図

6. これまでの対応と今後の対応方針

浅いすべりは、トップヘビーの不安定な断面形状を呈しており、突発的に滑動して車両の通行に大きな支障が出る危険性が高いと判断されたため、優先的に対策工(横孔ボーリング工)を実施した。

深いすべりは、令和6年能登半島地震以降、歪計の累積変動がなく小康状態となっているが、今後は大雨、融雪期の観測データや現地状況を注視しながら対応を検討する予定である。

7. おわりに

本事例では、道路の供用開始から路面隆起が顕在化するまでに約25年も要したが、この時間的遅れは地山が強度低下する速度に関係していると考えられる。強度低下の速度は地山の応力状態や含有鉱物、気象条件など様々な要素の関与によって変化すると思われる。今後の斜面調査業務でもこのような点に着目して機構解明に取り組んでいきたい。

破碎帯分布地域における斜面変状調査の事例

東邦地水株式会社 ○今村 泰基, 寺地 啓人

1. はじめに

調査対象地は国道沿いの切土のり面に位置する。のり面下部の吹付工にクラック、法尻側溝に押し出し破壊等の変状が発生し、応急対策として法尻部に大型土嚢が設置されていた。対策工検討に必要な地質構成や性状等の基礎資料を得ることを目的として実施した調査の事例を報告する。

2. 地形地質概要

調査地域の地形は標高150~200m 程度の山地と標高50m 前後の台地からなり、調査地では道路建設に伴い高さ約30m の長大切土が施工されている。

調査地は秩父帯と四万十帯の境をなす破碎帯分布域に位置する。調査地点は構造線の北側である秩父帯南帯に位置し、秩父帯南帯は主にチャート、砂岩、砂岩泥岩互層とごく少量の玄武岩および混在岩から構成される。また、発達する層理面等の地質構造は概ね東北東-西南西走向、高角な北傾斜を示す。

調査対象のり面では道路建設時に仏像構造線の露頭が確認されており、切土直後には応力開放に伴う崩壊が発生していた。また、構造線の南側に分布する四万十帯はガウジ化しているが、北側に分布する秩父帯は破碎の程度は弱く、地質により異なることが想定された。

3. 調査方法

地表面に変状が多く確認された範囲(幅約40m)を対象とし、2箇所(No.1, No.2)でボーリングを実施した(図-1)。

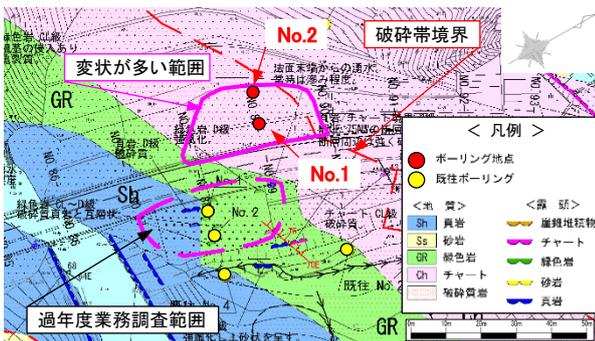


図-1 調査地の地質平面図

業務期間や対策実施の工程を考慮すると、すべり面調査としてパイプ歪計や孔内傾斜計等を用いた動態観測を実施するには十分な観測期間が設けられず、変動を把握できない可能性があった。また、調査地が仏像構造線の破碎帯分布域に位置することから、採取されるコアは破碎の影響を受けていると考えられ、コアの採取率や品質低下により、すべり面深度の判定が困難になる恐れがあった。

以上を考慮し、以下の調査を計画実施した。

- ・コア採取率向上を目的としたφ86mmのコアボーリング
- ・地質状況を把握するためのボアホールスキャナ観測
- ・移動土塊の性状確認を目的とした標準貫入試験
- ・地下水位の変動把握のための地下水観測

なお、ボアホールスキャナ観測、標準貫入試験はNo.1地点のみで実施した。

4. 結果・考察

調査の結果、分布地質と構造に以下の特徴が認められた。

- ・チャート、珪質泥岩、一部緑色岩が分布する。
- ・チャートや珪質泥岩は破碎の程度が弱く硬質。対して緑色岩は破碎の程度が強く、一部粘土状コアとなり、分布地質により破碎の程度が異なる。
- ・地質構造のピークはN30° E30° NW、割れ目のピークはN31° E44° NW、のり面に対し受け盤構造である(図-2)。
- ・開口割れ目が認められない(図-3)。
- ・地下水位観測で降雨に伴う水位の上昇を確認した。

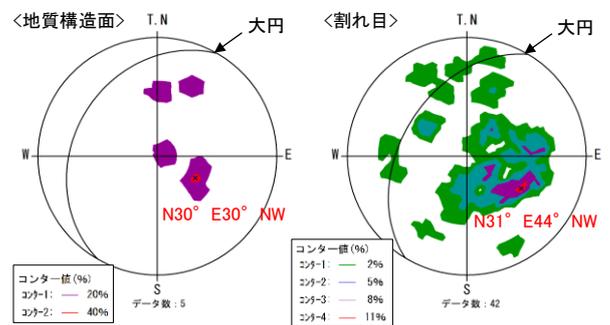


図-2 コンター図(地質構造面, 割れ目)

調査地は破碎帯分布域に位置しており、ボーリングコアおよびボアホールスキャナ解析で確認した割れ目は、主に断層の影響による初生的なものであると考える。

深度2.5mで無構造性破碎が確認され、累積割れ目の増加が認められた。以上より、斜面変状は破碎部を弱部として発生した初生すべりと推測し、対象のり面における地質推定断面図(図-4)を作成した。変状が発生した要因は以下が考えられる。

<素因>

- ・破碎帯分布域に位置し、不安定化しやすい。
- ・切土による応力開放により、緩み域が拡大し、風化進行を助長し、地山強度が低下した。
- ・地下水位が上昇しやすい水理構造であった。

<誘因>

- ・大雨に伴う地下水(間隙水圧)の上昇により不安定化し、滑動した。

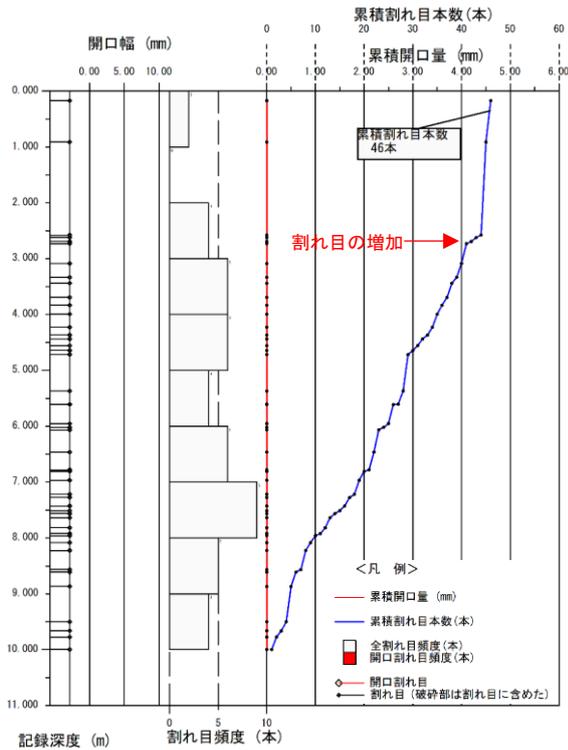


図-3 累積割れ目、累積開口量グラフ



No. 2 コア写真

5. おわりに

調査地は破碎帯分布域に位置しており、得られたボーリングコアは全体に割れ目が発達し、破碎状であった。

割れ目は仏像構造線に起因するものと考えられ、破碎帯分布域という特殊な地質条件で斜面変状調査を実施するに当たり、コア観察のみで破碎帯区分を判定し、すべり面を推定するには限界があったと考えられる。

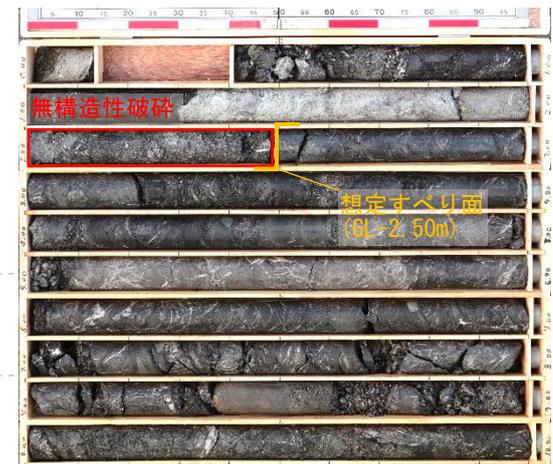
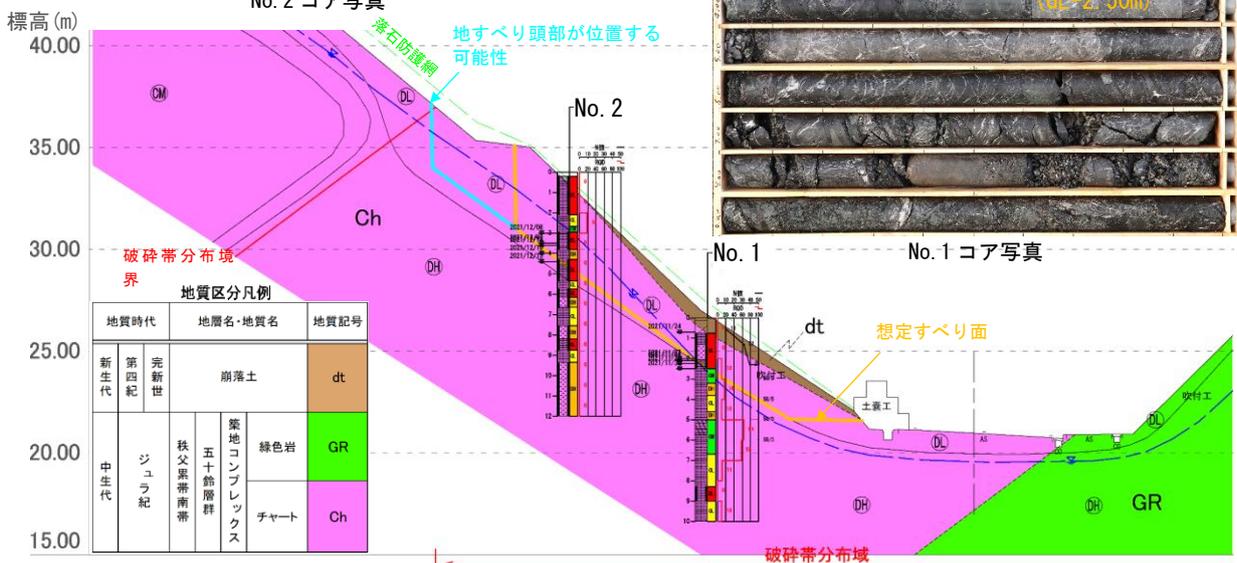
事前に調査地域の地質分布状況を考慮した調査方法を計画し、ボアホールスキャナ観測を実施したことにより、地質構造を詳細に把握することが可能となった。

また、本調査は高品質ボーリングではなく清水掘りによるボーリングであったが、コアの状態は良く、詳細に観察できたことも調査の品質向上につながっていると考える。ボーリングコアの品質は、機械を操作するオペレータの経験によって大きく左右される。現場ではベテランのオペレータが助手を務め、若手オペレータの指導が行われている。また、私たち技術者もオペレータに調査地の地質分布状況を伝え、地質状況に応じた掘削方法を協議した。

以上のように、調査計画段階での地質状況や地域性を考慮した調査手法の選択や現場でのオペレータとの意思疎通が調査の品質を向上させるための要であると強く感じた業務であった。

《引用・参考文献》

- 坂幸恭, 山口宗司 (1985) : 志摩半島中央部, 磯部町における仏像構造線の露頭, 地質学雑誌, 第91巻, 第3号, pp. 235-238.



No. 1 コア写真

地質時代			地層名・地質名		地質記号
新生代	第四紀	完新世	崩落土		dt
	中生代	ジュラ紀	秩父累帯南帯	業地コンプレックス	緑色岩
				チャート	Ch

図-4 地質推定断面図, 調査地点コア写真

四万十帯の長大崩壊法面における法面補強の事例

株式会社 タニガキ建工 ○谷垣 勝久, 田和 照大, 谷垣 嘉基, 高尾 遼大

1. はじめに

被災箇所は、世界遺産「高野山」と橋本市を結ぶ一般国道の道路改良区間である。令和5年4月13日19時頃、法面对策工事の施工区間において、幅約30~40m、高さ約40mにわたり斜面崩壊が発生した。この崩壊に伴い、工事車両進入路の仮設防護柵の無い箇所から崩土が現道に流出し、一部区間で期間通行止めとなった。また、崩壊が夜間であったため一般交通も少なく、工事作業従事者も不在であったため、人的な被害は発生しなかった。

四万十帯(花園付加コンプレックス)の地質に属すこの長大崩壊法面における法面補強事例を報告する。



写真-1 長大崩壊斜面の崩壊状況

2. 地形・地質概要

本地には四万十帯北部の「高野山帯・花園付加コンプレックス」が分布する。この地層は砂岩頁岩互層、砂岩および頁岩が優勢で、チャート・緑色岩類、酸性凝灰岩が頻繁に挟まれる。頁岩は黒灰色のものが多く、凝灰質の緑灰色頁岩および赤色頁岩もみられる。

また、本地周辺には多くの断層が見られることから、岩盤の脆弱化が進んでいるものと考えられる。現地には層理面や節理面が発達する砂岩泥岩互層が露出しており、亀裂が非常に発達している。走向傾斜は N32° W50S~N87° E60S となり、主に「流れ盤構造」となっている。

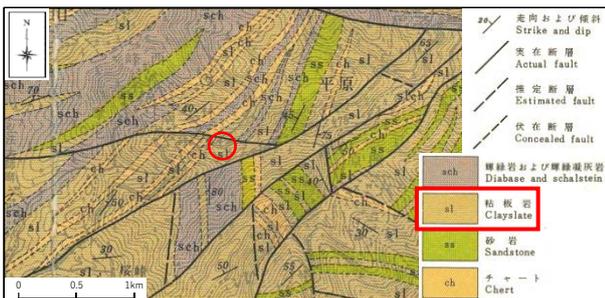


図-1 業務地周辺の地質図¹⁾

3. 当初法面設計の考え方

当初法面設計では、末端部の D~CL 級岩盤の露頭が 1:0.5 以上の勾配で自立していたこと、周辺地の末端に新鮮硬質な CL 級岩盤が複数箇所で見出されていたこと、調査ボーリング結果でも D~CL 級岩盤が N 値 50 以上で岩質も比較的安定していたことから、D~CL 級岩盤では円弧すべりは発生せず、崩積土(dt)のみで円弧すべりが発生すると想定した。また、法面の切土勾配は【1:0.5】であり、「道路土工・斜面安定工指針²⁾」に記載されている【軟岩の標準勾配】を採用した。

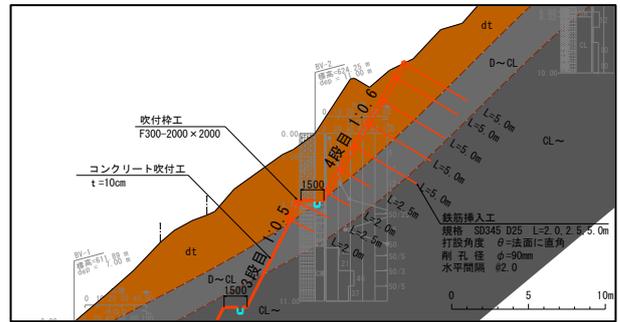


図-2 当初設計の法面工標準断面図

4. 崩壊状況と崩壊のメカニズム

2 段目の吹付け準備を行っている際に、14m を超える切土の応力解放と1週間前の降雨の影響(スレーキング)で岩盤の亀裂が大きく開口し、1 段目~3 段目の岩盤がバラバラと下に崩落した。その後、切土時に確認された「高角な流れ盤」となる 4 段目の法枠背面の D~CL 級岩盤がボロボロと下方に崩落し、法枠工が不安定化した。そして法枠工の自重に耐え切れずに大規模な斜面崩壊が発生し、上方に後退すべりが拡大したと推察される。

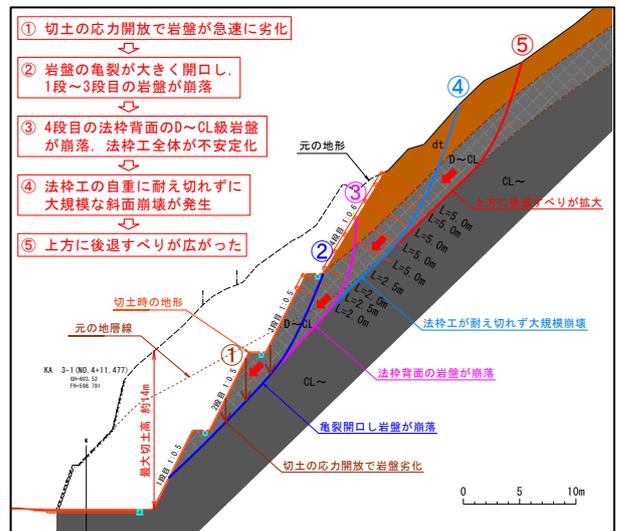


図-3 本現場での崩壊のメカニズム

5. 現地調査と地質調査の概要

現地調査を行って、法面崩壊により緩んでいる箇所の有無と岩級確認するため、法面崩壊上部の2箇所で調査ボーリング、3箇所で地表伸縮計観測を実施した。

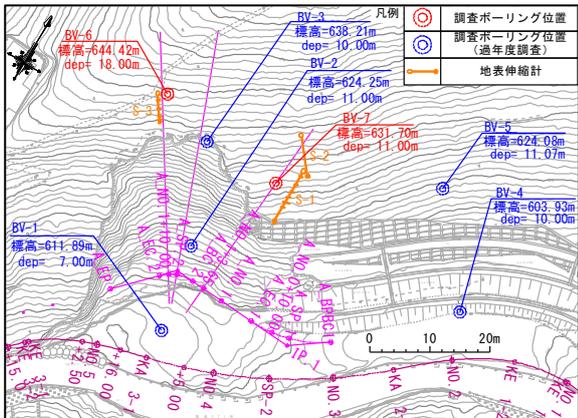


図-4 本現場での調査・観測位置図

6. 崩壊斜面の修正設計

当法面の崩壊斜面は、図-4の測線 NO.3～NO.5 区間の延長約 40m で、崩壊状況から法枠工単独で抑制できない「のり肩からのり尻に及ぶような崩壊や崩壊深さを超える崩壊」が予想された。そのため、崩壊斜面对策として抑止工の鉄筋挿入工とアンカー工を比較検討し、経済性、施工性、安全性で最も優れている工法である「鉄筋挿入工+上部受圧板工、下部法枠工」の対策工を採用した。

安定解析を行う際、崩壊部測線である「最大法高測線 A_SP.2 と、BV-7 通過測線 A_NO.1+3.65, BV-6 通過測線 A_NO.1+10.00」で、崩積土(dt)と D～CL 級岩盤の粘着力 C をそれぞれ逆算し、このうちの低い値を採用すると、安全率が 1.00 を下回ることから高い粘着力を採用した。

表-1 崩積土 (dt) と D～CL 級岩盤の粘着力 C 逆算

法面測線	逆算した粘着力 C (kN/m ²)	
	崩積土(dt)	D～CL級岩盤
最大法高測線: A_SP.2	5.71	9.14
BV-7通過測線: A_NO.1+3.65	5.53	14.13
BV-6通過測線: A_NO.1+10.00	3.93	10.20

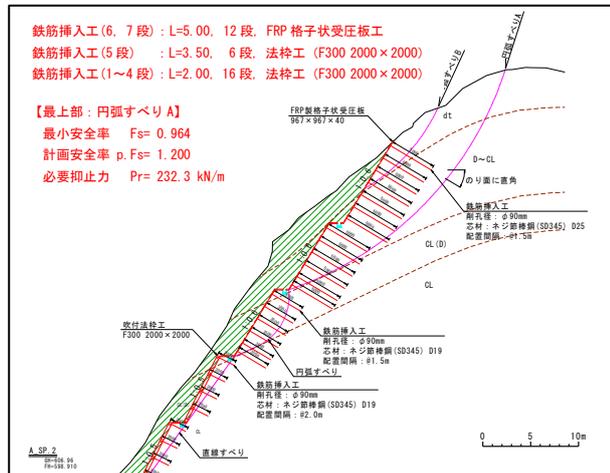


図-5 崩壊斜面对策の標準断面図

7. 未崩壊法面の補強設計

崩壊箇所では、D～CL 級岩盤ですべりが発生していることから、D～CL 級岩盤下部層の CL 級以上の岩盤まで鉄筋挿入工を十分に挿入する必要がある。未崩壊斜面の測線では、鉄筋が「CL 級以上の岩盤」に十分挿入されていないので、鉄筋挿入工での補強が必要である。また、上段 F300 法枠工下部にあるコンクリート吹付工部には、鉄筋挿入工と F300 法枠工の追加施工が必要である。

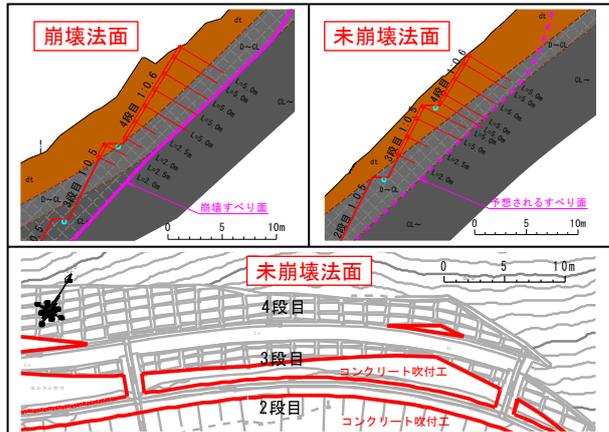


図-6 崩壊法面と未崩壊法面の断面図比較と吹付部

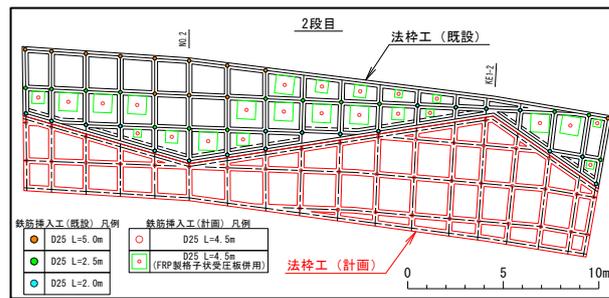


図-7 未崩壊法面の補強計画(案)

8. まとめ・教訓

以上の事例等から、下記のことを教訓としてまとめる。

- ① DH 級岩盤は切土により劣化しやすいので、当初の岩級を低減するか、D 級岩盤として評価を行う³⁾。
- ② 30m を超える長大切土法面で最下部に CL 級岩盤が出現する場合は、応力解放での緩みに注意する。
- ③ 長大切土法面では、岩盤劣化した亀裂の多い D～CL 級岩盤を鉄筋挿入工の定着層とすることは避ける。
- ④ 地層の粘着力 C を逆算する場合、複数斜面で逆算を行い、高い粘着力を採用することが合理的である。
- ⑤ 定着不足で変状が予想される法枠工には、鉄筋挿入工と受圧板等で補強を行うことが望ましい。
- ⑥ 法枠工の下部にコンクリート吹付工部を設けない。

《引用・参考文献》

- 1) 図幅京都第82号「高野山」5万分の1地形図：産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- 2) 道路土工・斜面安定工指針(2009): 日本道路協会, pp.136.
- 3) 谷垣他: 全地連「技術フォーラム2023」横浜

変質安山岩の膨張性地山に起因した道路のり面変状の変状予測と対策工提案

大日本ダイヤコンサルタント(株) ○村上 卓矢, 半田 義人, 福島 剛

1. はじめに

九州地方に広く分布する新第三紀の火山岩は、熱水変質によりしばしば変質帯を形成しており、それらは、膨潤性粘土鉱物に起因する膨張や強度低下など工学的な問題を有する。本論文は、熱水変質を強く受けた変質安山岩が分布する切土法面を対象にアンカーリフトオフ試験、ボーリング調査、吸水膨張試験、X線回析分析の結果から変状要因を特定し、今後の変状予測と対策工の検討を行ったものである。

2. 法面変状状況の概要

(1) 供用前の変状と調査内容

対象の切土は、施工中に変質を被る安山岩部で盤ぶくれが発生しており、盤ぶくれによる斜面崩壊を抑止するため、SEEE アンカー工による対策が行われた。しかし、その後も変状の進行が認められ、アンカーリフトオフ試験によりアンカー荷重の増大が確認されたことから、耐酸性・耐熱性に優れる NM アンカー工の増し打ちが実施された (図-1)。

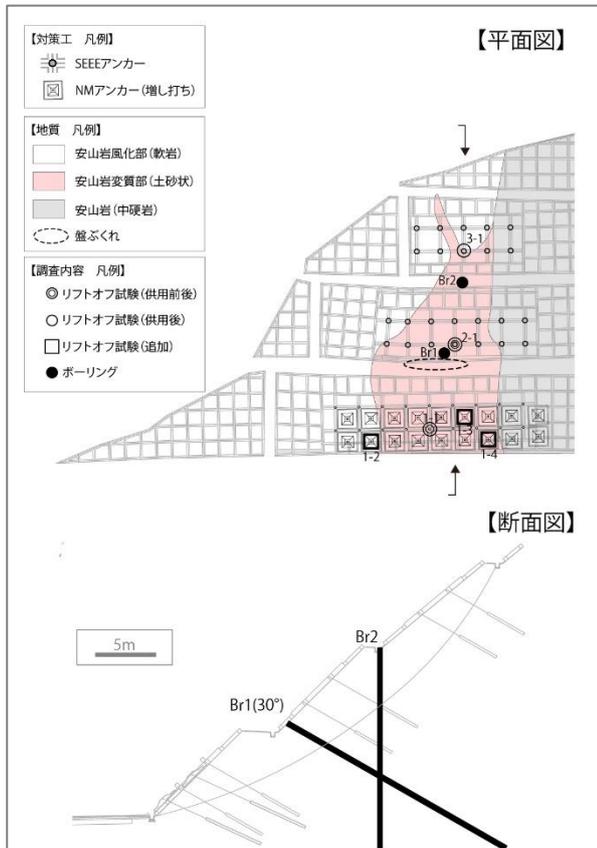


図-1 切土斜面の地質状況と調査概要図

(2) 供用後の変状と調査内容

供用後、斜面点検において亀裂拡大や小段の隆起といった変状が認められたことから、盤ぶくれの進行が予測されたため、追加のリフトオフ試験やボーリング調査、吸水膨張試験、X線回析分析を実施した。

3. 各種調査結果

(1) アンカーリフトオフ試験

グラウンドアンカー工の健全性を評価するため、対象にリフトオフ試験を実施した。その結果、孔番1-3で健全度D以上の過緊張を確認した (表-1)。

表-1 リフトオフ試験結果(過去結果含む)

孔番	タイプ	試験時期	リフトオフ荷重(kN)	設計アンカー力(kN)	健全度
1-1	SEEE	供用前	170	101.5	D
		供用後	199over	101.5	E
1-2	NM	今回	340	270.9	B
1-3	NM	今回	393over (最大試験荷重)	270.9	D over
1-4	NM	今回	311	270.9	B
2-1	SEEE	供用前	185	101.5	C
		供用後	199over	101.5	E
3-1	SEEE	供用後	103	101.5	B

(2) X線回析分析

ボーリング調査による採取したコアを対象にX線回析分析を実施した。その結果、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの含有が確認された。スメクタイトの含有量はチャートのピークから定性的な含有量の区分を行った (表-2)。

(3) 吸水膨張試験(JGS2121-2021)

ボーリング調査により採取した岩石を対象に吸水膨張試験を実施した。その結果、スメクタイト中量程度のBr1孔の1.85~2.00mの試料では23.11kN/m²の膨張圧が認められた。一方、地表付近でスメクタイトを多量に含む試料では膨張圧は0~4.21kN/m²であった (表-2)。

表-2 X線回析分析結果と岩石膨張圧試験結果

孔名	試験深度(m)	吸水膨張応力(kN/m ²)	スメクタイト(量)	コア判定の変質	岩級
Br 1	0.35 ~ 0.40	0.00	多量	h4(強変質)	D
	0.45 ~ 0.60	4.21	多量	h4(強変質)	D
	1.85 ~ 2.00	23.11	中量	h3(中変質)	D
	4.80 ~ 4.90	1.05	微量	h2(弱変質)	CL
Br 2	3.00 ~ 3.10	2.25	中量	h3(中変質)	CL
	4.00 ~ 4.15	1.10	極微量	h3(中変質)	CL
	4.75 ~ 4.85	1.07	中量	h3(中変質)	CL
	6.85 ~ 6.95	0.00	微量	h2(弱変質)	CL

4. 変状要因の検討と今後の変状予測

(1) 変状要因

吸水膨張応力は、Br1孔の1.85～2.00mの試料で最も高く23.11kN/m²であった。既設アンカーは3.0mピッチで打設されていることから、アンカー1本にかかる膨張圧は、3.0m×3.0m×23.11 kN/m²=208.0kN以上と想定される。この荷重は、過緊張状態であったNMアンカーの過緊張を発生させるには十分な値である。したがって、斜面に発生している変状の主な要因は、スメクタイトを含む膨張性粘土の含有とその膨張変化による地盤の盤ぶくれであると判断した。

(2) 今後の変状予測

膨張量は岩盤の吸水率に依存し、吸水率の増加は、乾湿の繰り返しにより増加することが入佐ら(1984)¹⁾で報告されている(図-2)。

上記を考慮すると、最も膨張圧が高いBr1孔の1.85～2.00mの試料はD級岩盤であることから、湿潤と乾燥を繰り返し、土砂状となったことで吸水しやすい岩盤状況であったと考えられる。一方、地表付近の試料はスメクタイトの含有量に関わらず膨張圧が低いため、地表付近は膨張が収束傾向にあると判断できる。これは、地表付近では地表から浸透する降雨の影響により、既に膨張しきった状態にあると考えられる。

スメクタイトの含有量が多い区間は地表付近であり、地表付近の岩盤は膨張が収束傾向にあることから、今後発生する膨張圧は、Br1孔の1.85～2.00mで確認された23.11 kN/m²程度と推定した。

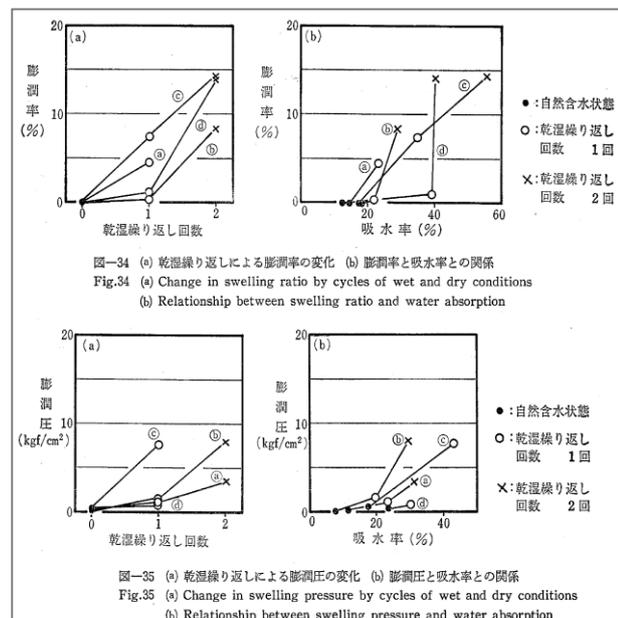


図-2 乾湿繰り返しによる膨張率の変化¹⁾

5. 対策工の検討

検討する対策工検討にあたっては以下を考慮した。

- ①23.11 kN/m²の膨張圧が作用しても問題ない構造とすること
- ②今後の膨張圧の変化により想定より大きな荷重が作用しても、対応が可能な計画とすること
- ③既設の対策工を考慮した対策工であること

以上を考慮し、法面安定化対策として既存対策工のグラウンドアンカー工を生かしたアンカーの増し打ちを提案した。増し打ちアンカーは、膨張圧の増加にも対応した許容アンカー力に余裕をもったアンカーの設置、さらなる増し打ちが必要になる可能性も考慮した追加対策を行なえる余地を残したものとした(図-3)。

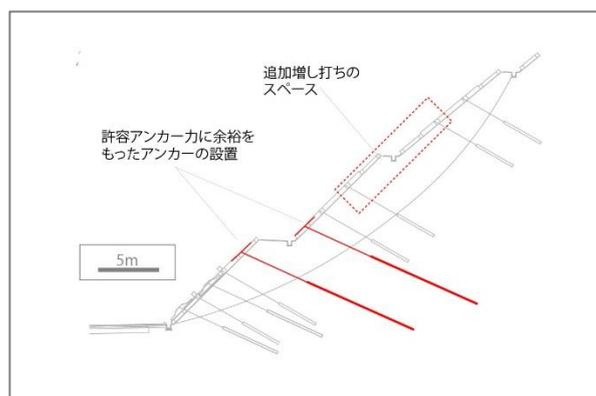


図-3 調査概要図

6. まとめ

切土斜面の変状とアンカー工の過緊張は、本調査解析の結果、スメクタイトを含む膨張性粘土の含有とその膨張変化による地盤の盤ぶくれが要因であることが判明した。

膨潤性粘土鉱物と膨張圧は、入佐ら(1984)¹⁾で報告されているように、湿潤と乾燥を繰り返すによる増加もあり、吸水膨張試験で得られる膨張圧は、風化進行による膨張圧増加の可能性は否定できない。

そのため、対策工の検討においては、湿潤乾燥による膨張圧の変化と、さらなる追加対策工を考慮し、アンカーの増し打ちを提案した。

《引用・参考文献》

- 1) 入佐純治, 麓秀夫, 満弘之 (1984): グリーントフ地域における土木構造物の変状と岩石物性値について, 応用地質調査事務所年報, No. 6., pp. 69-84.