

## 俵山・豊田道路における関門層群への対応

Design of the Tawarayama-Toyota Road constructed on the Kanmon Group: A Case Study

関 日菜々<sup>1)</sup>, 蔵本 直行<sup>2)</sup>, 石田 高嗣<sup>3)</sup>

1) Hinana SEKI, 国土交通省中国地方整備局山陰西部国道事務所, seki-h87at@mlit.go.jp

2) Naoyuki KURAMOTO, 国土交通省中国地方整備局山陰西部国道事務所, kuramoto-n87ca@mlit.go.jp

3) Takashi ISHIDA, 国土交通省中国地方整備局山陰西部国道事務所, ishida-t87bf@mlit.go.jp

山陰道俵山・豊田道が位置する山口県西部には、関門層群火山岩優勢層（以下、関門層群）が分布しており、山陰西部国道事務所ではその分布域で事業を展開している。

本論文では、関門層群について、施工時に発生した課題事例とその対応、調査、設計段階での検討事例について紹介するとともに、これまでの室内試験等から得られた結果をパラメータとして、関門層群の切土面をモデル解析した。その結果、関門層群のモデル解析の方向性及び法面勾配決定根拠の一手法を示すことができた。しかしながら、施工前段階から法面勾配を決定するには不確実性が多いことや施工途中段階で施工状況に応じた対応を検討していくことが必要不可欠であり、今後詳細な検討が進むことが望まれる。

キーワード：関門層群，山陰道，調査，設計，施工

## 1. はじめに

山陰西部国道事務所は、主に山口県内の山陰道整備を推進するため、令和2年度に開設された事務所である。

木与防災事業（平成27年度事業化）、俵山・豊田道路（平成28年度事業化）は令和2年度起工式を終え本格的な工事を実施。令和3年度には、大井・萩道路、益田・田万川道路が新規事業化された。

俵山・豊田道路は、図-1に示す山口県西部に位置し、山口県長門市俵山と下関市豊田をつなぐ延長約13.9kmの自動車専用道路であり、県西部地域に主として分布している関門層群火山岩優勢層（以下、関門層群）の分布地域内で事業を展開している。本論文では、令和元年度から本格的な工事を実施する中で生じた、関門層群における施工時の課題と対応及び設計における検討事例を紹介するとともに、これまでの室内試験等から得られた結果をパラメータとして、関門層群の切土面をモデル解析したので、その結果を示す。

## 2. 関門層群の特徴

## 2.1 地質概要

関門層群は中生代白亜紀の湖成堆積物であるとされ、上位から下関門層群上部層、下関門層群下部層、脇野亜層群と分類されている。

下関門層群は山口県内白亜紀火山岩のなかでも最も低位に位置し、西日本における本格的な火山活動の開始を示す地層であり、下関門層群上部層の火山岩は関門火山岩

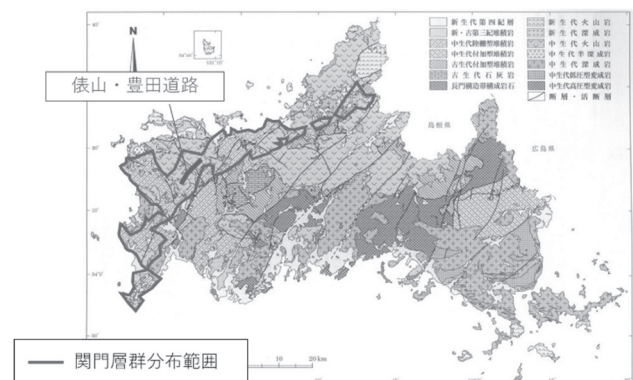


図-1 俵山・豊田道路位置図

と呼ばれている。本件では俵山・豊田道路の豊田地区に主に分布する関門火山岩について記述する。

## 2.2 既往の研究概要

既往研究成果<sup>1)</sup>から、深層風化が著しく進行し岩石が粘土化することが示されている。

また、低丘陵状の地形を呈するため、道路建設や農道整備による大規模な山腹の切土工事が多数されている中、切土後に変状や小崩落が発生するケースが指摘（もしくは報告）されている。

## 3. 施工課題事例

## 3.1 切土法面の亀裂

令和元年度から本格的な工事に着手した中、令和2年

度に切土法面に亀裂が発生した。亀裂の範囲は、横幅25m、高さ6m程度であり、主に風化した赤色泥岩が分布している。

発生地点は、下関市豊田町地内の切土法面で、本線を活用した進入路を先行整備するための暫定切土法面で、亀裂発生位置の法面は、切土高さ9m、法面勾配1:1.0で、岩はなく概ね土砂の区間となっている。

切土工・斜面安定工指針に示される標準法面勾配では、法高10m以下の砂質土（密実なもの）1:1.0~1:1.2、粘性土1:0.8~1:1.2であり、短期的な安定に着目した暫定的な法面として1:1.0を採用した。

現地施工を令和3年1月頃に行い、同年3月5日に亀裂を確認（写真-1）。施工から亀裂確認までの短期間に大きな降雨、積雪等の外的誘因も考えられない中で亀裂が発生した。

工事中進入路としての機能を確保するため、シート遮水、大型土のう等で応急対策を施し、工事車両の通行を確保した。

### 3.2 道路土工材料としての適正

盛土材料の土質特性として、採取箇所による差はあるが、一般的に細粒分含有率が高い。

上八道地区で実施した土質試験では細粒分が約65%を占めており、圧縮性は高く不安定な材料であると想定され、建設発生土の区分では第3b種発生土に準ずる土に位置付けられる。

自然含水比のコーン指数は25回突固めで775kN/m<sup>2</sup>と中位の値を示すものの、建設機械のトラフィカビリティとコーン指数の関係で示されるダンプトラックの走行に必要なコーン指数1200kN/m<sup>2</sup>を大幅に下回る結果であり、現地実走（写真-2）においても、わだち掘れが多数発生しダンプトラックが定常走行することが不可能な状態であった。

また、表-1に示すように金道地区の同じ地点で時期を変え試験を実施した結果、自然含水比が夏場で22%、冬場で49.9%に変化した。夏から秋にかけては第3b種発生土であったが、冬場の試験結果では第4b種発生土に分類されることとなり「適切な土質改良を行えば使用可能なもの」へ悪化した。

自然含水比増加の要因として、下関市豊田地区は山口県内での冬場の気温が低く、12月頃から霜柱が発生し、日々地盤面が凍結融解を繰り返すことが、土質状況の変化に繋がったと推察される。

これまでの施工実績では、細粒分比率が高くコーン指数が低い土の性状を示すものか、降雨時や冬期の自然含水比が上昇する土の性状が多数であり、施工の大半で石灰による土質改良が必要となった。



写真-1 亀裂発生直後



写真-2 ダンプトラック走行状況

表-1 試験地区、月別の土質試験結果

試験年月	R2.8	R3.6	R3.12
試験地区	上八道	金道	金道
自然含水比	29.8%	22.0%	49.9%
細粒分	65.2%	48.0%	—
分類	FSG	GFS	—
CBR	2.1%	7.4%	—
コーン指数 (25回)	722kN/m <sup>2</sup>	2512kN/m <sup>2</sup>	—

## 4. 関門層群の調査

俵山・豊田道路全体に分布する関門層群の切土・盛土施工への対応を図るため、関門層群に精通する山口大学と連携、一部調査を委託し進めており、本項では、その一部を紹介する。

### 4.1 ボーリング調査

本線切土区間の切土高が35m程度となる稲見地区の地質調査について記述する。

地盤面から約20m程度まではN値20以下の層が続き、約30m程度からN値50以上の層で、コアは全体的に赤褐色、砂質シルト状のコアで風化の進行は著しく、岩芯まで軟質化している状況である。風化が著しく進行しているのは、稲見地区の安山岩が分布している範囲である。

一般的なボーリングの掘止め基準は計画地盤より1mとしているが、山口大学の助言により計画地盤面下の風化状況が高い可能性を考慮して5mとした。

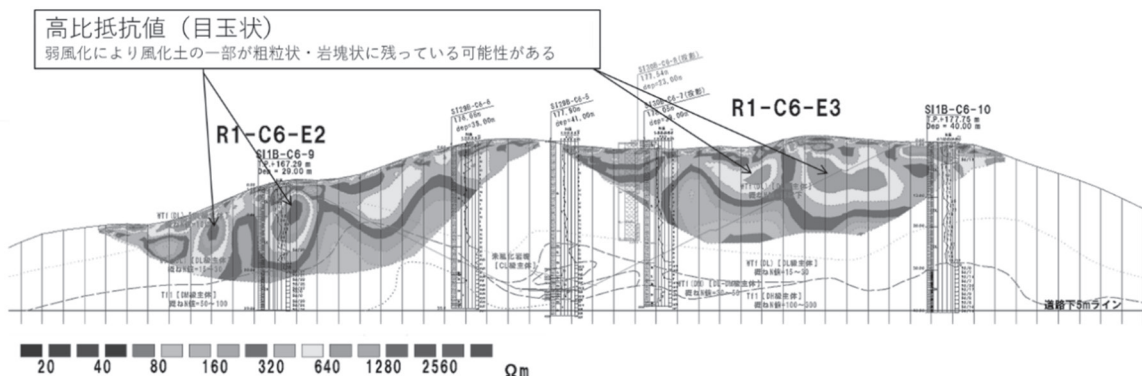


図-2 高密度電気探査図（稲見地区）

## 4.2 スレーキング試験

表-2 に示すように稲見地区調査結果（ボーリングコアを用いた試験）から、地盤面下 26.5m の試料においてもスレーキング指数 4 を示す結果となり、切土面の大半がスレーキングを起こす可能性があり、降雨などによる施工時の影響が懸念される結果となった。

## 4.3 弾性波探査、電気探査

ボーリング調査及びスレーキング試験で確認された軟質化された土層の範囲を把握するため、弾性波探査及び電気探査を実施した。

弾性波探査では下層に行くにしたがって速度が高くなる傾向がみられ、概ねボーリング調査結果と整合が図れる結果が得られた。

電気探査では表層の湿潤土は粘土化しているにもかかわらず 300~600 Ωm の高い比抵抗値を示している一方で、図-2 に示すとおり下方に向かって徐々に風化の度合いが低くなることに反して、比抵抗値では深部に 50~100 Ωm のゾーンが分布している

また、写真-3 に示すように、切土斜面には数カ所で弱風化部が岩塊状に残っている部分が確認されたことから、電気探査結果で見られる目玉状の高比抵抗部分は、この弱風化部分を示していると考えられる。

一般的な掘削施工の場合、岩塊状の土質が出現した場合には、更に下方に岩が出現すると想定するが、調査結果から分かるように下層には、風化が進行した土質が再出現することが分かり、施工時の判定に注意が必要な状況が確認された。

## 5. 切土法面の設計検証

### 5.1 設計段階での配慮事項

切土法面の設計では、切土工・斜面安定工指針に示される標準法面勾配を基に決定するが、切土高約 35m が概ね粘性土又はレキ混じり土となり、標準勾配の適用範囲（切土高の規定 10m 以下）から外れる土質状況となるこ

表-2 稲見地区スレーキング試験結果

GL-(m)	5.45	6.45	12.45	13.45	23.45	24.45	-	-
T.P.+(m)	161.84	160.84	154.84	153.84	143.84	142.84	-	-
S11B-C6-9								
スレーキング試験	4	4	4	4	3	3	-	-
GL-(m)	12.5	14.5	16.5	18.5	20.5	22.5	24.5	26.5
T.P.+(m)	165.40	163.40	161.40	159.40	157.40	155.40	153.40	151.40
SI29B-C6-5								
スレーキング試験	4	4	4	4	4	4	3	4
GL-(m)	-	-	-	-	-	-	-	37.3
T.P.+(m)	-	-	-	-	-	-	-	140.75
SI29B-C6-7								
スレーキング試験	-	-	-	-	-	-	-	2
GL-(m)	-	10.45	13.45	19.45	23.45	26.45	34.45	-
T.P.+(m)	-	167.30	164.30	158.30	154.30	151.40	143.40	-
S11B-C6-10								
スレーキング試験	-	4	4	4	3	4	1	-

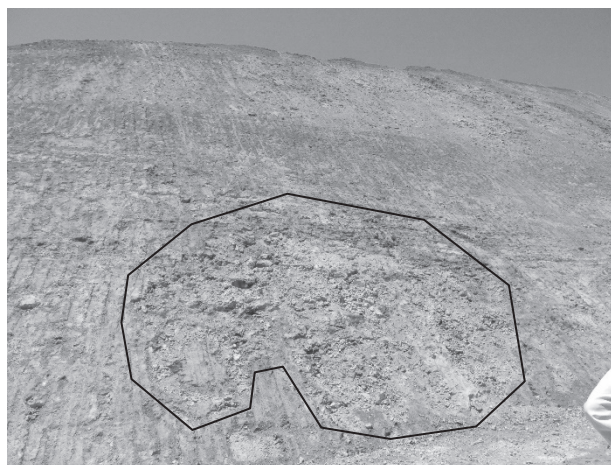


写真-3 目玉状の粗粒・岩塊

とから、室内試験結果を基に、のり面安定性について解析を実施した。

切土斜面の安定検討については、すべり面を地形判読から推定するものや、すべり崩壊後の調査結果を基に解析勾配を決定することが一般的であるが、斜面予定地の後背地に露頭や亀裂を判読できるものが無いことから、概略的に盛土などで一般的に用いられる繰り返り円弧による解析を実施した。

解析で検討した切土勾配は、粘性土の標準勾配範囲の最大値である 1:1.2 と、法面勾配変化による安全率上昇を確認するため、1:2.0 の 2 ケースで解析を行った。図-3 に解析で使用した地盤数  $\gamma$ ,  $c$ ,  $\phi$  及び解析断面図を示す。

また、地盤定数は三軸圧縮試験より得られた全応力を適用し、水浸と非水浸の値と、ボーリング調査結果から得られたN値より求めた定数の3パターンで実施し、全てのケースで安全率1.2以上を確保する結果となった。検討結果は表-3に示す。

関門層群風化部における地すべり崩壊の危険因子との関係が過去の研究<sup>2)</sup>から表-4のとおり挙げられており、稲見地区においては「強風化」「黒色薄層土」「高さ15m以上の切土」が該当することから、一般的な安定解析では評価できない危険因子が多様に該当する。

また、稲見地区近傍同種の地質箇所にて整備された道路を調査した結果、強風化するのり面で概ね切土勾配が1:1.5程度となっているが、のり枠やフトンカゴなど崩壊対策が行われている。

以上の結果をふまえ、切土法面の長期的な安定を確保し、かつ維持管理性に配慮するため、法面保護の解放型を基本とした法面勾配（長大切土面1:2.0）を採用することとした。

### 5.2 暫定切土面での検証

稲見地区に適合する切土法面設計手法はいまだ確立されていない。そのため、施工事例で記述した切土法面の崩壊発生箇所を事例に、切土崩壊の再現検証及び崩落予測を山口大学協力のもと実施した。

これまで山口大学で関門層群を研究されてきた知見では、関門層群風化土は切土掘削時に斜面崩壊が生じやすいことが確認されている地質であり、施工事例で示した箇所の安定評価手法として、通常のFEM解析と比較して大変形、大歪、広範囲の塑性流動、地盤の進行性破壊が扱える、有限差分法による斜面安定解析を実施することとなった。

### 5.3 有限差分法による斜面安定解析モデル

解析では、図-4に示すように関門層群の風化岩と黒色薄層土に着目し、解析ソリッド要素としてモデル化され、施工過程を考慮したモデルとした。

また、これまでの室内試験結果を基に、風化岩と黒色薄層土の強度定数を変化させたパラメータスタディを実施した。入力物性値は、表-5に示すとおりである。

本解析では、現地調査により、鉛直方向と受け盤となる方向に黒色薄層土が介在し、この薄層部に明瞭な節理面が確認されている。図-5に現地調査によって作成された地質構造図を示す。また、受盤となる方向の節理面は水平面から20°程度傾斜し、1.5m程度の間隔の層状となっていることが確認されており、風化岩と黒色薄層土をソリッド要素としてモデル化を行った。

黒色薄層土の強度定数は、既往文献において試験、提案された強度定数を参考に表-6のとおり設定した。

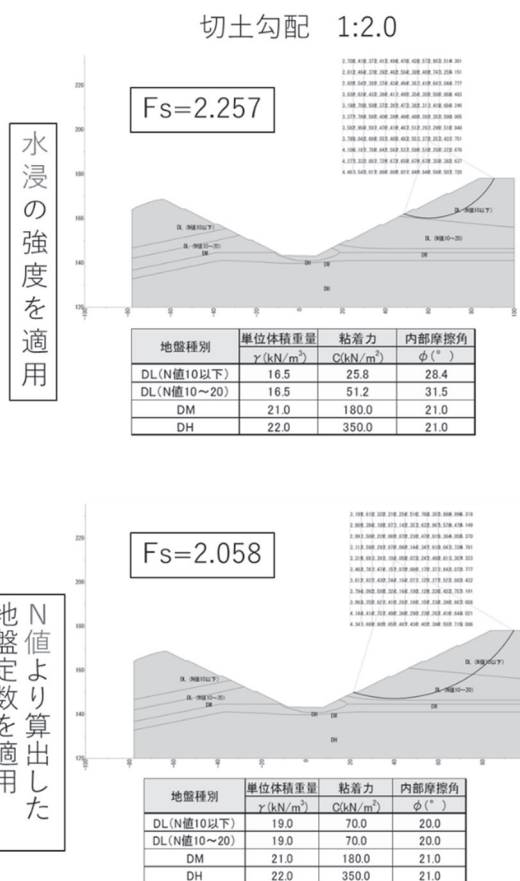


図-3 解析地盤定数 (γ, c, φ) 及び解析断面図 (切土勾配 1:2.0)

表-3 概略安定解析結果一覧

条件		1 : 1.2	1 : 2.0
		地下水位なし	地下水位なし
三軸圧縮試験	非水浸	1.762	2.326
	水浸	1.725	2.257
N値		1.587	2.058

表-4 地すべり崩壊の危険因子

危険因子No.	条件	説明
危険因子①	強風化	深部まで風化することにより土質強度が低下
危険因子②	黒色薄層土	著しく土質強度が劣っており、不連続面となりうる。
危険因子③	高さ15m以上の切土	自然状態から勾配をつけて大きく切ること不安定化
危険因子④	褶曲	褶曲によって発生した引張亀裂が分離面となりうる
危険因子⑤	頭部に断層	頭部の分離面となりうる。
危険因子⑥	豪雨	100mm/日程度。地下水位条件が地表面付近まで飽和となる。

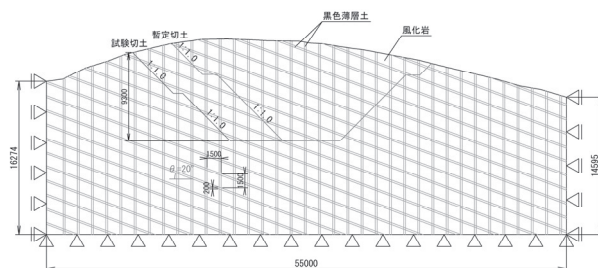


図-4 解析モデル図

5.4 解析結果

図-6に Case-1 の解析結果を示す。

黒色薄層土の粘着力を 0kN/m<sup>2</sup> としたケースでは、風化岩の強度が低下することで、斜面崩落が生じる可能性が確認された。

また、切土高が低い断面（切土段数 1 段）で検証した場合には、塑性領域分の変化も見られない結果となった。

今回の解析は、黒色薄層土に着目し、黒色薄層土位置、角度等を正確に捉えることでモデル解析が可能となっている。

完成断面の解析結果は、解析が収束されなかったため途中結果となっているものの、黒色薄層土の粘性が低下することで法面崩壊を生じさせる可能性が高くなる結果となり、標準法面勾配を採用した場合には、崩落の危険性があることが示された。

また、切土段数が少ない場合には塑性領域の変化が少ない傾向が示され、道路設計段階で計画している切土高さと法面勾配の関係を裏付ける結果が示された。

6. まとめ

今回は、本格的に施工を開始した俵山・豊田道路の施工上の課題及び対応事例と、山口大学に一部研究委託を行っている中間報告である。

切土法面の強度低下については、風化岩と黒色薄層土の詳細な調査を基としたモデル解析の方向性及び法面勾配決定根拠の一手法が示されたが、施工前段階から黒色薄層土の詳細を把握し、モデル解析にて法面勾配を決定するには不確実性が多い。

施工途中段階で関門層群の知見を有する技術者、山口大学との連携を図り、施工状況に応じた対応を検討していくことが必要不可欠であることが分かる。

また、解析手法も研究途上であるため、今後より詳細な検討が進むことが望まれる。

なお、切土勾配による土構造物の安定を踏まえ、切土法面の長期安定性の確保及び、事例でも示した盛土の長期安定性などについても研究が進むことが必要不可欠である。

謝辞

本事例を発表するにあたり、山口大学大学院創成科学研究科工学系学域社会建設工学分野鈴木素之教授他の多大なるご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木素之, 太田岳洋, 中田幸男, 河内義文, 居石和昭: 関門層群安山岩質凝灰岩の道路法面等の安定に関する研究, 2019. (山口大学委託研究)

表-5 黒色薄層土・風化岩の入力物性値

No.	黒色薄層土					
	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ※1	粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	引張強度 $\sigma_t$ (kN/m <sup>2</sup> ) ※1
Case-1	16.58	$15 \times 10^2$	0.35	0	23	0.0
Case-2				4		0.8
Case-3				8		1.6
Case-4				13		2.6
Case-5				18		3.6

No.	風化岩					
	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 ※1	粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	引張強度 $\sigma_t$ (kN/m <sup>2</sup> ) ※1
初期	16.58	$15 \times 10^3$	0.35	29.1	27.6	$0.2 \times c$
強度低下				20		

※1 引用元 鉄道建設・運輸施設整備支援機構山岳トンネル設計施工基準・同解説 p.310, H20.4  
 ※2 室内試験結果より設定  
 ※3 試験値がないため、風化岩の物性値を適用

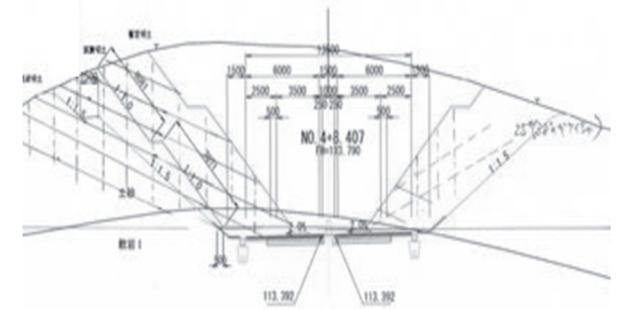


図-5 地質構造断面図

表-6 黒色薄層土の強度定数

No.	引用文献	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	サンプリング	備考
1	山本哲朗, 鈴木素之, 吉原和彦ほか) 不連続面上の光沢黒色薄層土に起因した斜面崩壊と設計強度定数, 地すべり, 第37巻, 第4号, 2001	7.7 (0 ~ 17.6)	23.1 (18.1 ~ 26.7)	アサリ リング フラグ	設計強度定数の提案値, 一面せん断試験
2	河内義文, 山本哲朗, 鈴木素之ほか) 関門層群強風化層の切土斜面に発生する地すべり性崩壊の機構と安定解析法第38回地盤工学研究発表会, 2003年7月	8.0	22.5	記述無	山口県下での選算片岩風化土の水浸時における斜面崩壊時の定数
3	河内義文, 竹田直樹, 鈴木素之ほか) 関門層群黒色薄層土からなる切土法面の崩壊, 第39回地盤工学研究発表会, 2004年7月	32.1 <sup>※</sup>	17.8	攪乱試料	安定解析時の提案値 (地下水位は地表面), 一面せん断試験 (水浸)

※ 突出して大きい値となっているため、除外した  
 ■ 最大値  
 ■ 最小値  
 ■ 設計強度定数として提案されている値

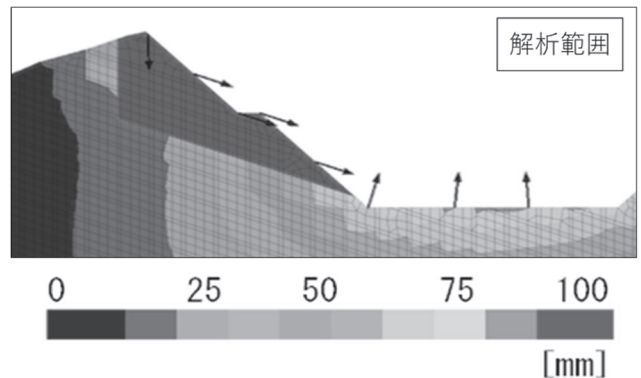


図-6 Case-1 解析結果 (完成切土面での変位)

- 2) 河内義文, 山本哲朗, 鈴木素之, 原田博: 関門層群強風化層の切土斜面に発生する地すべり性崩壊の機構と安定解析法, 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2129-2130, 2003.

(2022年6月17日 受付)

