

災害調査報告書

モルタル法面改修工事 中の土砂崩壊災害



独立行政法人

産業安全研究所

1 調査依頼事項

土砂崩壊災害に関する次の事項.

- (1) 土砂崩壊の原因調査
- (2) 崩壊土砂は岩石が風化したものであるか、否か.
- (3) 崩壊した斜面の地盤構成(層理・節理などの不連続面や断層の有無など)とこれらの層の中に土砂を抱えている層が存在するか、否か.
- (4) 労働安全衛生規則第 534 条において、崩壊が既存のコンクリートモルタル面が転倒したことが要因として全体の崩壊となったものか、コンクリートモルタル面の下の礫状の土砂の崩壊により全体が崩壊に言ったのかについて特定(推定)したい.

2 災害の概要

2.1 災害の種類

土砂崩壊災害

2.2~2.3 略

2.4 事業場名

工事名 : 「モルタル吹付け工事」

2.5 災害発生状況

鉄道敷脇地山の崩壊防止のため施工されたコンクリート吹付け面が老朽化したため、それを張り替える工事を行っていたところ、吹付け面のほぼ全面が崩壊し、作業員 7 名が被災した(内訳 ; 休業見込み 30 日 : 2 名, 休業見込み 20 日 : 1 名, 休業見込み 3 日 : 4 名).

既設吹付け面を剥がすため、被災日 22 日前からピックハンマー(小型の削岩機)を使用し、既設吹付け面を小割り(50cm×50cm 程度の正方形に切れ目を入れ、ラスが出現する程度)をしていた。災害発生前日の同月 25 日までの間に吹付け面施工範囲の約 75%の小割り作業が終了していた。災害発生当日においては、前日までの作業に引き続いて午前 8:50 から当該作業を開始した。午前 9:00 頃になり、突然前日まで小割りを済ませた上方と推測される辺りから吹付け面と同時に吹付け面の裏側に存在した土砂が崩れ落ち、その後、ラス網がつながっていたため吹付け面のほぼ全面が崩壊し、作業員 7 名も崩壊面とともに滑落した。なお、被災者 7 名の内 3 名は、崩壊直後に親綱が破断してそのまま落下した。残りの 4 名は崩落後も一時親綱にぶら下がった状態になったが、親綱を緊結していた落石防護柵が崩落により抜け落ちるおそれがあったため、自らロリップを外し、崩落斜面を滑り降りて避難した。その際、1 名が後から崩落してきた土砂を被り、腰まで埋まる形となった。崩壊状況を写真-2.1~3 に示す。

3 略

図 2.1 略



写真-2.1 災害発生現場遠影



写真-2.2 災害発生現場近影



写真-2.3 災害発生現場近影

4 災害状況および推定される災害原因

本災害の原因はモルタル吹付け面背後の土砂（経年により岩盤が風化した）が小割り作業により法面全体が不安定化し崩壊したものと推測される。また、小割り作業の工程にも問題があったと思われる。これらの要因について、当該災害現場の状況から得られる知見について以下に考察した。さらに、遠心力载荷装置を用いて当該現場をモデル化した小型模型実験を行い、推定した各種要因が法面安定に与える影響について検討を行った。

4.1 災害現場の状況

当該災害現場は鉄道の開業に先立ち、岩盤の風化・浸食・表面水の浸食を防止するためモルタル吹付け工により法面保護を行っている。その後、施工されたモルタル上に表面を覆うようなモルタル吹付けを行って以降、約 22 年間補修は行われておらず、かなり老朽化していた。なお、施工計画は現存していないため、当該災害現場の詳細な施工(アンカーの配置等)は不明である。

4.2 岩盤が風化した土砂の存在

崩壊現場から採取されたアンカーの写真を写真-4.1 に示す。アンカーは長さ 50cm、直径 2.2cm であり頭や先端部に赤錆や腐食が確認された。アンカーの腐食は、水分が存在していたことを意味し、表面水が岩盤とモルタル吹付け面の間に浸入していたことを間接的に示唆している。さらに、「小割りすると、防護面の裏側には土砂があった。これはおそらく元々岩盤であったものが風化したものと思われる」という金子組の現場責任者の証言から、モルタル吹付け面の背後に岩盤が風化した土砂が存在していたことは確実であろう。モルタル吹付け工は表面の小浮石を固定するとともに、不透水性材質によって地山を密閉することにより乾燥を防止し、また降雨の浸透を防ぐ（乾湿繰り返し作用の阻止）ことにより風化を抑制するものであり、モルタル厚さにもよるが抗土圧構造ではない。しかしながら、当該現場のように風化土砂が吹付け面と岩盤の間に存在する場合には、吹付け面は風化土砂から相当量の土圧を受けることになる。奥園らはモルタル吹付け工などの密閉型保護工がどの程度風化を抑制できるのかを東名・中央高速道路を中心に追跡調査を行っている¹⁾。図-4.1 に奥園らがまとめた保護工種別風化量の経時変化を示す。ここで、縦軸の風化帯走時は弾性波探査か



写真-4.1 崩壊現場から採取された錆びたアンカー
(補修の際に打ち込んだものと思われる)

1)奥園誠之：「切取斜面の設計から維持管理まで」，鹿島出版会

ら表層の風化帯を弾性波の低速度帯で表現し、その厚さと速度から風化度合いを推定したものである。風化帯走時は以下の式で表される。

$$t = \frac{d_1}{V_1} + \frac{d_2}{V_2}$$

ただし、 t ：風化帯走時(1×10^{-3} sec)

d_1, d_2 ：第一、第二速度層の厚さ(m)

V_1, V_2 ：第一、第二速度層の P 波伝播速度(m/sec)

この図からモルタル吹付け工のような密閉型保護工は無処理や開放型保護工と比較すると風化度合いは抑制されているが、風化量自体は経年により増加することが分かる。図-4.2 は開放型保護工である植生法面における風化帯走時と法勾配を法面の安定状況別に示したものである。図中の実線は、奥園が概略目視で引いた境界線である。非常にばらつきが大きな結果ではあるが、崩壊した法面は風化帯走時が大きく勾配が急な領域に集中していることが分かる。当該現場の法面勾配は 60 度程度であり、境界線が正しければ風化帯走時 $t=4 \times 10^{-3}$ sec 以上で不安定側に位置することになる。この値は図-4.1 から得られる風化度合いからモルタル吹付け工についても 3 年程度で法面が不安定となる可能性があることを示唆している(図-4.1 および 4.2 に示されている青線参照)。当該現場では、今回の補修工事までモルタル吹付け面の補修工事は行われておらず岩盤はかなり風化が進行していたと考えられる。実際、当該災害発生後に金子組が行ったボーリング調査では鉛直方向に 5~6m まで風化した岩石(既に礫状になっている)となっており、モルタル吹付け面と岩盤の間に風化土砂が存在していたことを証明している(ボーリング調査結果は資料 1 に添付)。既往の研究および現地でのボーリング調査等から、法面は吹付け面背後に“風化土砂”という不安定要因が長期的に進行しながら存在していたものと考えられる。このような状態の当該法面に対して、吹付け面のモルタルを小割りするという法面の安定性を著しく損なう作業を行ったため、風化土砂の存在により不安定となっていた法面をますます不安定化し崩壊したものと推測される。

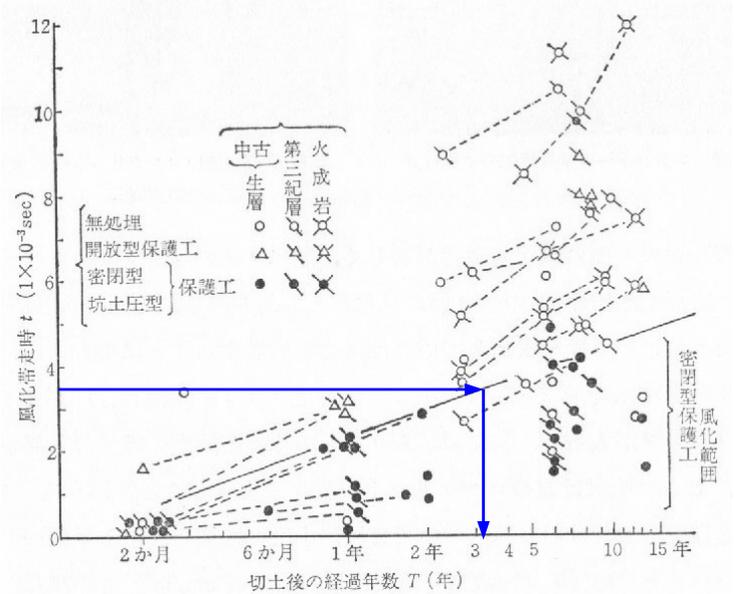


図-4.1 法面保護工の違いによる風化度合いの経年変化の相違

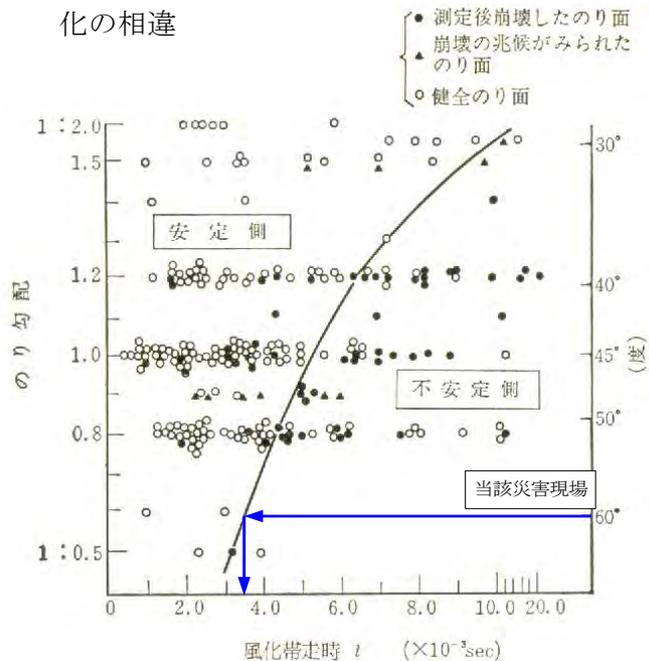


図-4.2 風化度合いと法面勾配による法面安定性

4.3 小割り作業手順

「モルタル吹付工事仕様書」において既設モルタル撤去工について以下のように記述されている。
第2章 工事一般

(既設モルタル撤去工)

第18条 既設モルタル撤去工は、次の各号により施工すること。

(1) モルタル撤去は一工程で広範囲に及ぶことの無いように計画し、事前に監督員の承認を受けること。また、撤去する手順は法面上方から下方に向かって順次実施すること。

当該災害発生前までの当該現場での小割作業の経過状況を図-4.3 に示す。小割作業は図から明確なように常に下から上に向かって行われていた。仕様書では既設モルタル撤去に関して法面上方から下方に向かって実施すると書かれているが、小割作業の順序については言及していない。モルタル吹付け面は一体化することにより岩盤に作用し安定化に寄与しているが、吹付け面を細かく砕き除去しやすくする小割作業は法面を不安定化する。また、モルタル吹付け施工から22年経過している当該現場のような風化土砂が存在すると想定される現場では、風化土砂が吹付け面に相当量の圧力を与えていたと考えられる。特に法面下方部ではその圧力は大きかったものと推測され、小割作業を下から行った施工工程については工学的に妥当ではなく、今後行われる同様の工事では小割作業の施工工程について考慮する必要があるものと指摘できる。

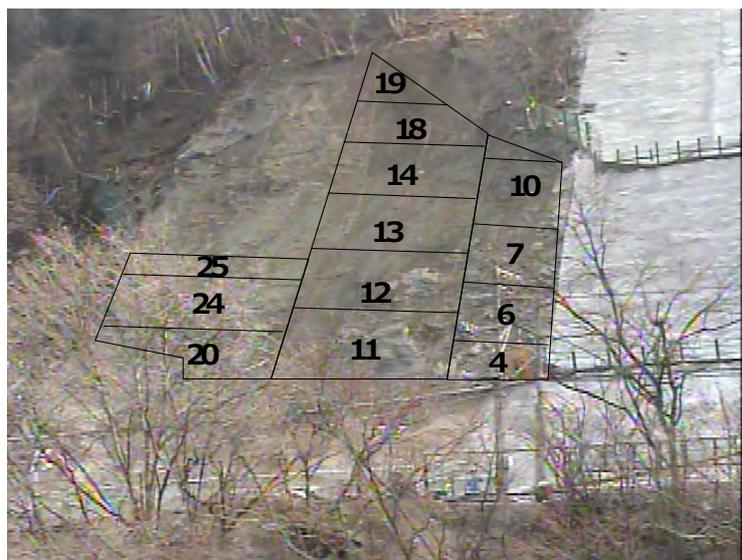


図-4.3 災害発生前日までの小割り作業範囲
(数字は施工日)

4.4 遠心力载荷装置による現場再現模型実験

遠心力载荷装置は重力の n 倍の遠心加速度を付与させることにより実物の $1/n$ 縮尺の小型土槽で実地盤の応力状態を再現できる実験手法であり、地盤の崩壊現象を再現するには最適な手法として多くの研究機関にて行われている。特に斜面崩壊や掘削時の安定性に関して遠心力载荷装置を用いた模型実験（以下、遠心模型実験）は多くの実績を有している。

そこで、本件の災害事例について遠心模型実験を行い、風化土砂の存在とモルタル吹付け面の小割

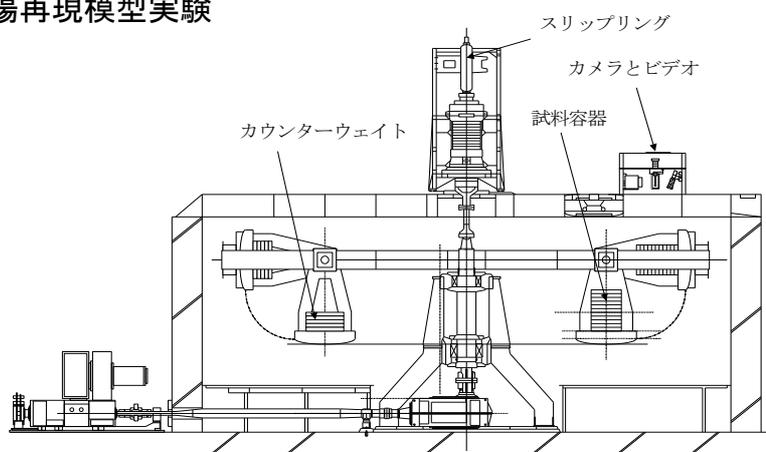


図-4.4 遠心力载荷装置(NIIS Centrifuge)



写真 4.2 遠心力载荷装置(NIIS Centrifuge)

表-4.1 遠心力载荷装置主要諸元

項目		内容
最大遠心加速度(G)		200
最大積載量(kg)		500
回転半径(m)	最大外径	2.68
	載荷面	2.31
	試料容器中心	2.00
最大回転数(r. p. m.)	中心軸	300
	駆動軸	1750
主電動機	容量	直流 150kw
	回転数	定格 1.750 r. p. m.
	回転方向	可(逆)
スリップリング	計測用	80 極
	動力用	100V2 極 (容量 30A)

りが法面の安定性に与える影響について検討した。

4.4.1 実験概要

使用した遠心力载荷装置は(独)産業安全研究所が所有する NIIS Centrifuge である。これらの諸元を表-4.1, 外観を写真-4.2, 概略図を図-4.4 に示す。当該現場の断面図(図-4.5)を図-4.6 のように一般化して実験を行った。風化土砂がモルタル吹付け面と岩盤の間に有する当該現場のようなケースでは以下の 4 箇所の幾何学的条件, 物理・力学的条件が法面の安定性に寄与すると考えられる。すなわち,

(1) 法面保護

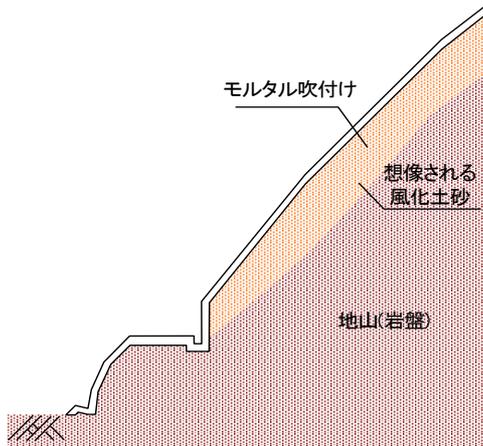


図-4.5 当該現場の断面図

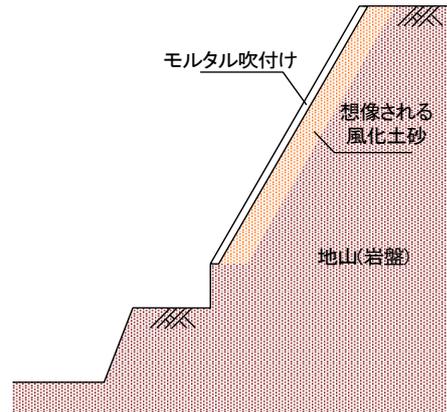


図-4.6 一般化した断面図

- ・ 健全か、老朽化による劣化・亀裂があるか
- ・ 改修による小割り作業
- (2) 風化土砂
 - ・ 層厚
 - ・ 力学特性(内部摩擦角等)
- (3) 法面形状
 - ・ のり面の勾配
- (4) 法先部の固定条件
 - ・ 固定
 - ・ 自由

である。本実験ではこれらのうち(3)は 60° に固定し、主に(1)と(2)に着目し実験を行った。

図-4.7 に実験概略図を示す。地山(岩盤)は強固であると仮定し石膏とし、風化土砂のモデル化には気乾状態の豊浦砂($\rho_s=2.63\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.961$, $e_{\min}=0.593$)を用いた。また、モルタル吹付け面の吹付け厚は当該現場の施工計画書が現存せず、崩壊後の調査でも場所により異なっていたため、モルタルと密度が比較的近いアクリルとした。実験条件を表-4.2 に示す。先に示した(1)法面保護について、“健全”，“小割りされたもの”の

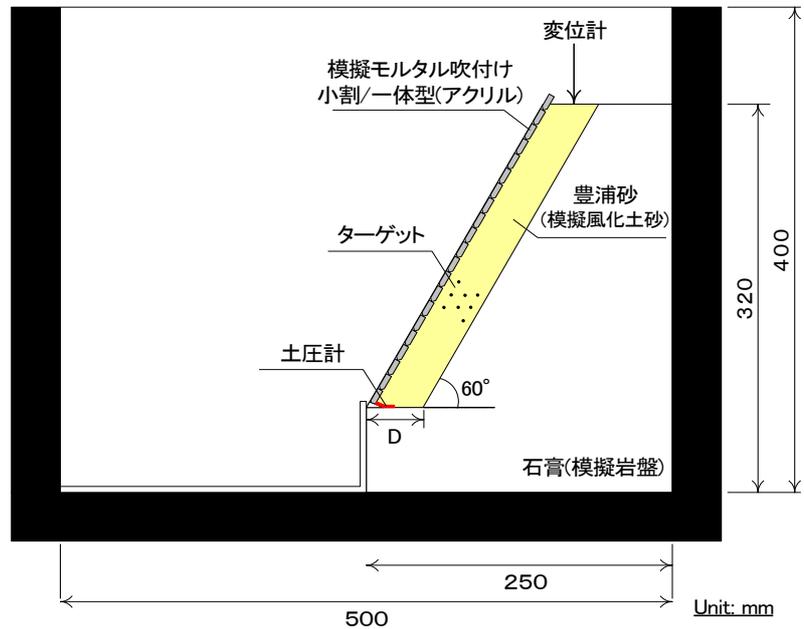


図-4.7 実験概略図

表-4.2 実験条件

		風化土砂層厚 D(cm)			
		3	4	6	
法面保護	健全	固定	-	-	○
		自由	○	○	○
	小割り	固定	-	-	○
		自由	○	○	-

○：実験を行ったケース 単位：模型換算

2種類、(2)風化土砂層厚について、大(模型寸法で6cm)、中(模型寸法で4cm)、小(模型寸法で3cm)の3種類を主に検討した。ここで、風化土砂層厚6cmのケースでは自重で崩壊する可能性があったため、法先を固定したところ、他のケースとは全く異なる挙動を示した。計測について、風化土砂の直上に変位計を設置することで実験時の沈下量を、風化層底盤部に土圧計を設置することで法先付近に加わる圧力変化について計測した。また、風化土砂をモデル化した部分には5mm間隔にてターゲットを設置してあり、それをCCDカメラで撮影することにより変形を逐次把握することができ、画像解析を行うことで各段階での変位量を計測することが出来る。実験は遠心加速度を徐々に増加させ、模型が崩壊するまで行った。

4.4.2 実験結果

(1) 風化土砂層厚の違いが法面安定性に与える影響

法面保護が健全な場合、風化土砂層厚の違いが法面安定性に与える影響について検討した。図-4.8は風化土砂上部に設置した変位計の沈下量と遠心加速度の関係を示したものである。横軸の値が大きいほど斜面高さが高くなっていることを意味している。風化土砂層厚Dが厚いケースほど遠心加速度が低い段階、すなわち斜面高さが低い状態で沈下量が多くなっており、風化土砂層厚の違いは法面安定性に大きく寄与していることが分かる。写真-4.3(1)~(3)は法面保護が健全な場合における風化土砂層厚ごとの変形挙動を示したものである。風化土砂層厚の違いに関係なく、モルタル吹付け部の法先を中心として吹付け面が回転する変形挙動が見受けられる。また、モルタル吹付け面に風化土砂から掛かる土圧が作用しモルタル吹付け面が回転変形し、それに伴い上部の土砂がその変形部分に入り込むことによりモルタル吹付け部にさらなる圧力を与え、モルタル吹付け面の変形を促進するという“進行性の変形挙動”となっていることが分かる。なお、風化層厚D=6cmのケースでは最終的にモルタル吹付け面が90°以上まで回転し倒壊した。

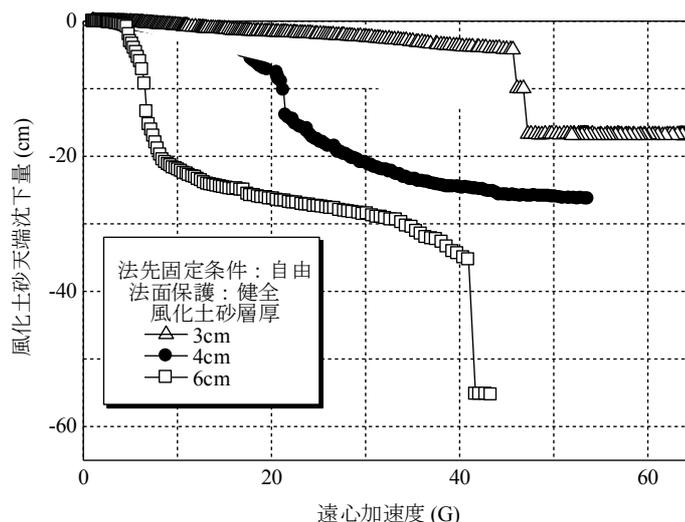


図-4.8 風化土砂層厚の違いが法面安定性に与える影響
沈下量～遠心加速度関係(法面保護が健全な場合)



(i) 実験開始前



(ii) 途中段階の変形形状



(iii) 最終的な変形形状

(a) $D = 3\text{cm}$

(b) $D = 4\text{cm}$

(c) $D = 6\text{cm}$

写真-4.3 風化土砂層厚の違うケースでの変形挙動(法面保護：健全)

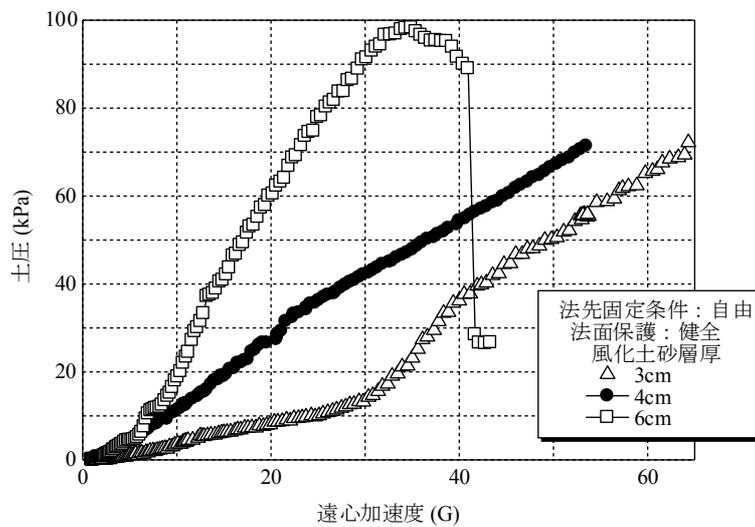


図-4.9 風化土砂層厚の違いが法面安定性に与える影響
風化層底部土圧～遠心加速度関係(法面保護:健全)

図-4.9 は風化層底部に設置した土圧計から得られた土圧と遠心加速度の関係を示したものである。風化層厚が厚いケースほど風化層底部に大きな土圧が作用されていることが分かる。これは、風化層厚が厚いほどモルタル吹付け面が早く変形し、それに伴い風化土砂重量が風化層底盤部に作用したものと考えられる。今回の計測は風化層底部のみであったが、モルタル吹付け面に作用する応力についても風化層厚が厚いほど大きな圧力が作用することは容易に想像できる。このようなことから、風化土砂層厚の違いは法面の安定性に大きく寄与しており、風化層の存在とその層厚について把握し、対処することは法面安定では重要である。

(2) 改修による小割り作業が法面安定性に与える影響

改修による小割り作業が法面の安定性に与える影響について検討する。図-4.10 は天端沈下量～遠心加速度関係を法面保護が健全なケースを含めて示したものである。風化土砂層厚 $D=3\text{cm}$ のケース（△印）では法面保護が健全なケースと比較して4割程度の遠心加速度で崩壊している。同様に風化土砂層厚 $D=4\text{cm}$ では約5割の遠心加速度で崩壊に至っており、風化土砂層厚が同じでも法面保護の状態により崩壊する遠心加速度レベルが大きく異なることが分かる。これは風化土砂から受ける土圧をモルタル吹付け全体で受ける法面保護が健全な状態と比較して、小割りされたモルタル吹付け面は風化土砂から受ける土圧を小割りされた個々の部分で受け、応力の分散をせず個々で変形するため、早く不安定化してしまうと想像される。写真-4.4(a)～(b)に法面保護が小割りされている状態における両ケースの変形挙動を示す。遠心加速度の増加に伴い地表面が徐々に沈下し、11.4G付近において吹付け面背面近傍の砂が沈下し、それとほぼ同時に法先付近の吹付け面がはらみ出した(写真-4.4(a)の(3)(4),写真-4.4(b)の(4)(5))。その後、30秒程度の時間をかけて土砂の沈下と法先部の変形が徐々に大きくなる。モルタル吹付け面自体が不安定となるような変形となった時点で、吹付け面全体が大きく崩壊した(写真-4.4(a)(b)の(10)～(11))。なお、最終形状ではモルタル吹付け面崩壊後残っていた土砂が落ちてくる様子が風化土砂層厚 $D=4\text{cm}$ のケースでは見られたが、薄い $D=3\text{cm}$ のケースでは見られていない。

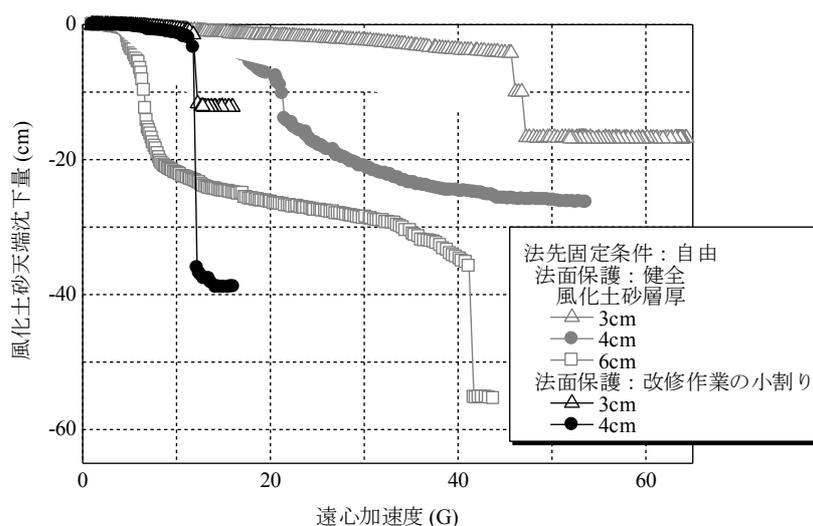


図-4.10 小割り作業が法面安定性に与える影響
(天端沈下量～遠心加速度関係)



(1) 実験前



(2) 10G (ほとんど変化は無い)



(3)吹付け面付近の土が沈下(11.4G)



(4)法先付近の吹付け面がはらむ(11.4G)



(5)(6)法先部に上部の砂が入りさらにはらむ



(7)(8)(9)徐々にほらみだす



(10)(11)土砂に引きずられモルタル吹付け面全体が崩壊



(12)最終形状

写真 4.4(a) 吹付け面が小割りされている場合の崩壊挙動(風化層厚 $D=3\text{cm}$ の場合)



(1) 実験前



(2) 5G (ほとんど変化は無い)



(3) 10G(全体的に沈下)



(4)(5)法先がはらみ, 同時に天端の土砂が沈下(11.4G)



(6)法先部に上部の砂が入りさらにはらむ



(7)(8)法先のはらみと, 土砂の沈下が同時に進行



(9)法先のはらみが限界状態



(10)(11)土砂に引きずられモルタル吹付け面全体が崩壊



(12)最終形状

写真-4.4(b) 吹付け面が小割りされている場合の崩壊挙動(風化層厚 D=4cm の場合)

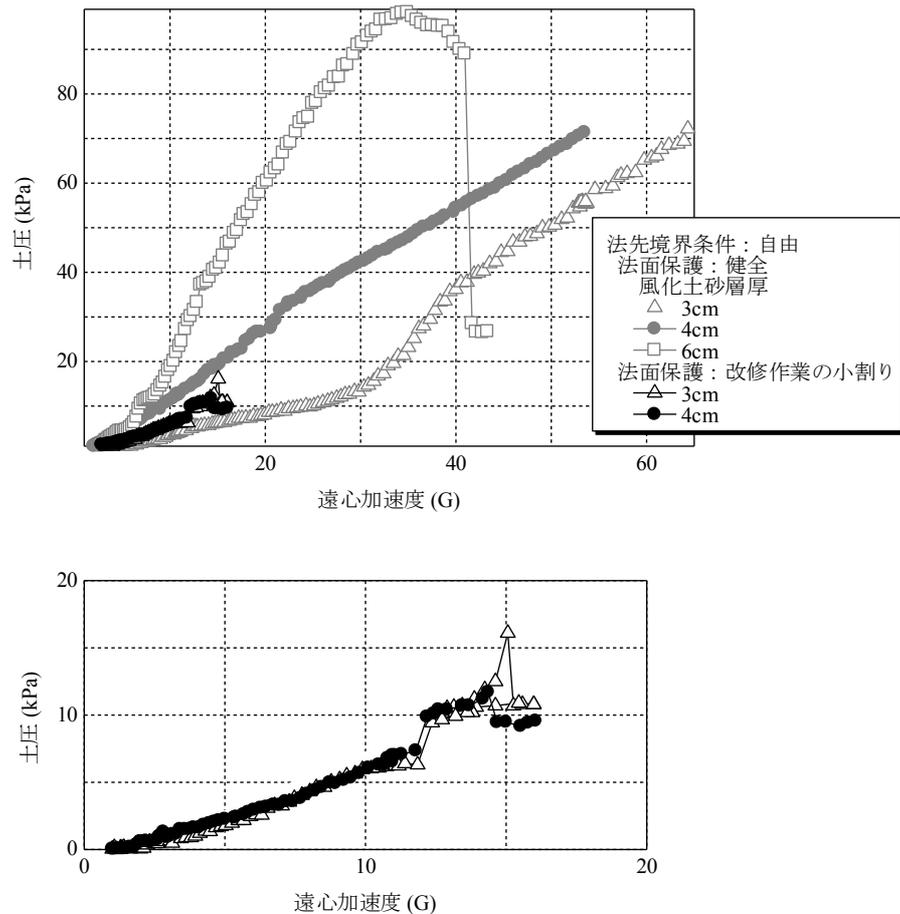


図-4.11 小割り作業が法面安定性に与える影響
(風化層底部土圧～遠心加速度関係)

図-4.11 は風化層底部に設置した土圧計から得られた土圧と遠心加速度の関係を法面保護が健全なケースも含めて示したものである。小割りをしたケースの土圧の増加割合は法面保護が健全なケースの風化土砂層厚 $D=3\text{cm}$ と 4cm の間に位置しており遠心加速度と土圧の増加比率はほぼ同じ傾向にある。今回の実験では土圧が約 8kPa 程度で風化層厚から受ける土圧を法面保護工であるモルタル吹付け面が保持出来なくなり、崩壊に至っていることが分かる。このことから、小割り作業はモルタル吹付け面を弱体化させるものであり、その作業には慎重さを要する必要があるものと指摘できる。

(3) 法先の固定条件の違いが法面安定性に与える影響

前節までの実験ではモルタル吹付け部分を支える斜面法先が変形に追随する形となっていた。本節では法先部を固定した実験を行った(図-4.12 参照)。図-4.13 に風化土砂天端沈下量～遠心加速度関係を示す。法面保護が健全なケースについて法先の固定条件を比較するとその挙動に非常に大きな違いが見られる。すなわち、法先部が固定されている場合には沈下量も微少であり最大 75G まで载荷しても崩壊しなかったのに対し、法先部が固定されていない場合には 10G 付近で大きく変形し、最終的に 40G で倒壊した。吹付け面が小割りされたケースは法先が固定された条件についてのみ実験を行ったが法先が固定されていない他の層厚のケースとは全く異なる挙動を示した。写真-4.5 は小割りされている状態の変形挙動について示したものである。法面が崩壊した 16G 直前まで、変形

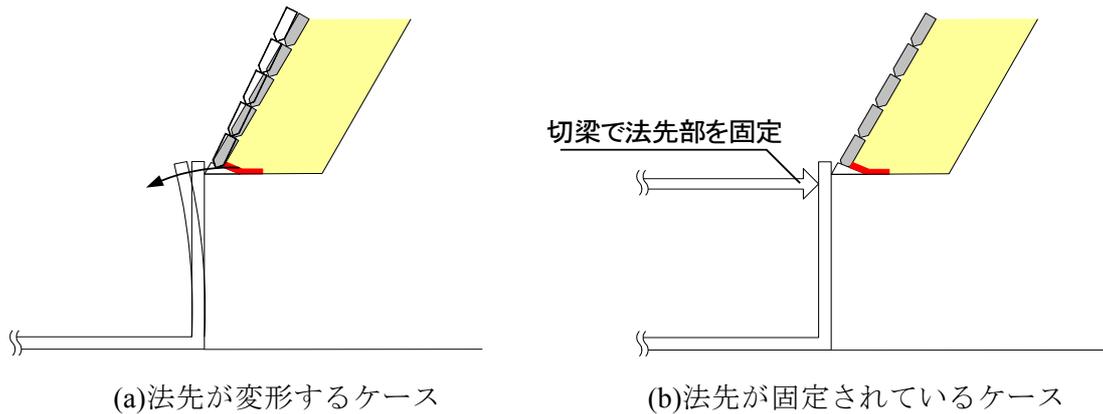


図-4.12 法先部の固定条件の相違

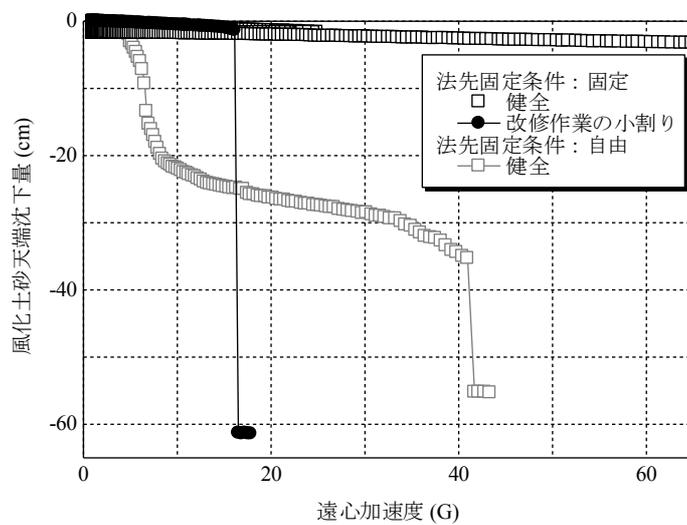


図-4.13 法先の固定条件の違い

(風化土砂天端沈下量～遠心加速度関係)

は全く見られず、突然 16G 付近で吹付け面先端のはらみ出しと吹付け面近傍上部の土砂が動きだし崩壊に至った。その崩壊に要する時間は 1 秒程度(実地盤換算だと約 0.06 秒)であり、前兆現象が見られなかったことから、このような現象が実際に発生した場合には避難することは不可能であろう。本ケースのように突然崩壊する現象は法先が固定されていない他のケースでは見られなかった。

図-4.14 に法先の固定条件の違いによる風化土砂底部の土圧の変化を示す。法面保護が健全な場合、法先の固定条件により土圧の発現に大きな差が出ていることが分かる。法先が固定されている状態では変形が抑制されるため、風化土砂層底部に生じる土圧は低い状態を保っていることが分かる。また、小割りされたケースでは 12G 付近から土圧が増加し崩壊とともに健全なケースと同等の位置まで低下していることが分かる。12G 付近の吹付け面の挙動はほとんど無いにもかかわらず土圧が増加していることから、風化土砂内で土圧の再分配等が行われたものと推測できる。図-4.15 は吹付け面を小割りした全ケースを示す。吹付け面の変形挙動は法先の固定条件により大きく異なるのに対し、遠心加速度の増加と土圧の増加は法先の固定条件に関係なくほぼ同じ傾向を示している。

当該現場の法先部がどのような条件となっていたのか不明である。しかしながら、今回の補修工事での小割り作業範囲(図-4.3 参照)は落石防護柵より上部であることから、法先付近はある程度の固定条件となっていたと推測され、崩壊の前兆現象は見られず突然崩壊したものと推測される。



(1) 実験前



(2) 4G (ほとんど変化は無い)



(3) 8G(変化は見られない)



(4)(5)(6)吹付け面先端(○印)がはらみ, 同時に天端の土砂が沈下(16G)



(7)(8)(9)(10)吹付け面とその背後近傍の土砂が滑りだし吹付け面が崩壊(16.5G)



(11)吹付け面倒壊後, 風化土砂が崩落

(12)最終形状

写真-4.5 吹付け面が小割りされている場合の崩壊挙動(風化層厚 D=6cm の場合)

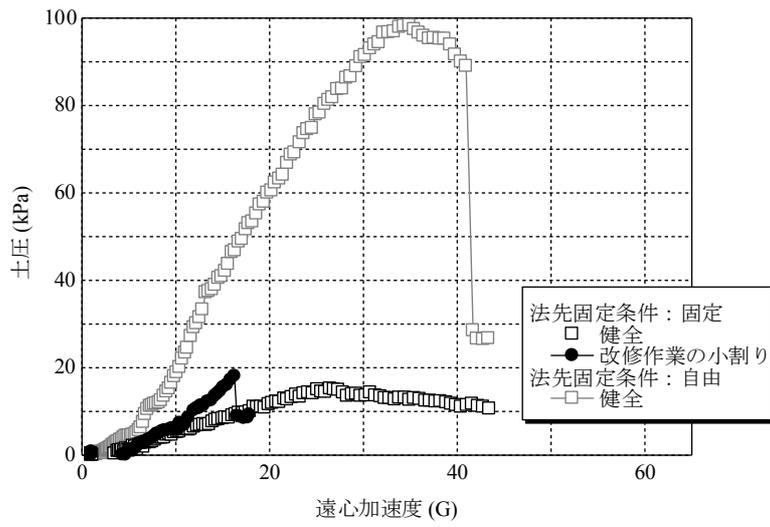


図-4.14 法先の固定条件の違いによる風化層底部土圧の変化

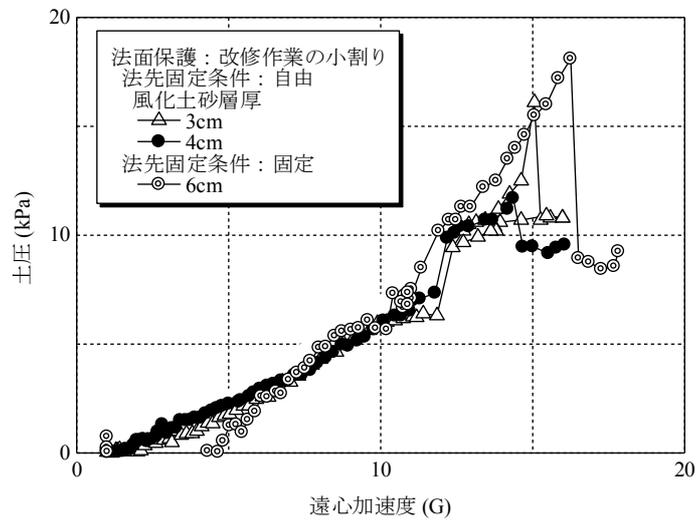


図-4.15 法面保護を小割りした場合の風化層底部土圧の変化

5 調査依頼事項に対する回答および再発防止策

5.1 調査依頼事項に対する回答

(1) 土砂崩壊の原因調査

当該災害は、モルタル吹付け面と密着していた岩盤が経年経過により風化し、モルタル吹付け面に土圧として作用し、モルタル吹付け面を不安定化していたところに、今回の法面補修工事でモルタル吹付け面を小割りする作業を行ったことにより、法面全体がさらに不安定化し、崩壊に至ったものと考えられる。

(2) 崩壊土砂は岩石が風化したものであるか、否か。

当該災害発生後に当該現場にて行ったボーリング調査からも風化土砂が 5～6m 存在することが明らかであり、モルタル吹付け面背後に風化した土砂が存在していたと考えられる。

(3) 崩壊した斜面の地盤構成(層理・節理などの不連続面や断層の有無など)とこれらの層の中に土砂を抱えている層が存在するか、否か。

当該災害現場の地層区分は(独)産業総合技術研究所地質調査総合センター発行の地質図より「古生層」と推測される。一般に古生層の岩石は、平たい板状か厚めの基石状に風化する傾向があり、大きな岩片にはなりにくく、拳大かそれ以下の大きさのものが主で、砂利程度に崩れやすい。当該災害後の土砂の様子もこれと合致する。

なお、調査によると法面の地盤は次のように分類されている。

1. 法面右側：固結度は高いが亀裂の多い軟岩，地質は堆積岩
2. 法面中央：傾斜基盤上の崩積土，地質は堆積岩の強風化土
3. 法面左側：亀裂の少ない固結土の低い軟岩，地質は堆積岩

(4) 労働安全衛生規則第 534 条において、崩壊が既存のコンクリートモルタル面が転倒したことが要因として全体の崩壊となったものか、コンクリートモルタル面の下の礫状の土砂の崩壊により全体が崩壊に言ったのかについて特定(推定)したい。

災害状況から得られた知見および当該災害現場をモデル化した遠心模型実験結果から、後者だと考えられる。

5.2 再発防止策

当該災害の原因は先に示したように、モルタル吹付け面と密着していた岩盤の経年経過による風化した土砂がモルタル吹付け面に土圧として法面を不安定化していたところに、補修工事で小割り作業をしたことにより法面全体がさらに不安定化し、崩壊したものと考えられる。また、小割りを行う作業工程(順序)にも問題があったものと推測される。災害状況から得られた知見と当該災害現場を一般化して行った遠心模型実験結果から、以下に同種災害の再発防止に必要な対策を記述する。

災害状況から得られた知見から、

1. 既往の法面の現場調査から、現場の地盤(岩盤)特性や状況に依存するが、モルタル吹付け工のような密閉型保護工でも風化は起こり、数十年経過した法面では吹付け面裏側が風化していると想定して作業を行う必要がある。
2. 小割り作業の作業工程は上方から行うべきである。なぜならば、風化土砂が存在すれば法面下方のモルタル吹付け面には風化土砂から過大な土圧を受けている可能性があるからである。
※ ちなみに、当該現場にて剥離・空洞を調査するために行った“遠赤外線映像法”は、本件のようなモルタル吹付け面背後の風化土砂の存在を把握するには不向きである。遠赤外線映像法はあくまでも表面温度情報であり、モルタルの表面温度からモルタル背面側の性状を推察できるモルタル厚さの限界は通常 15cm 程度とされている。また、全体的に風化した場合や風化層厚が厚い場合にはその温度差が明確にならないなどの問題があるためである。風化度合いを把握する方法としてはモルタル面を打撃してその音で判断するか、吹付け面を一部剥がし目視調査をすることが確実であろう。また、物理探査法も有効な手法の1つである。

遠心模型実験結果から、

3. 風化土砂層厚が厚いほど早く不安定となり崩壊した。このようなことから補修作業前の風化層厚を物理探査などで把握することは重要である。
4. 小割りを模擬した実験では健全時の 4~5 割程度の法面高さで崩壊した。また、風化層厚が厚いケースほど吹付け面が崩壊した上に土砂が崩落しており、当該災害は風化層厚が厚かったことが指摘できる。
5. 小割りを模擬した実験において、風化層厚の違いに関係なく風化層底部に設置した土圧計は変形が起こる前に圧力が上昇していた。このようなことから、法面底部に土圧センサー等を埋め込むことは崩壊予防対策のひとつとして考えられる。

当該災害の崩壊要因は、①岩盤の風化、②モルタル吹付け面の小割り作業という 2つのキーワードにより集約される。これらの要因は元来斜面崩壊災害ではあまり想定されていなかったものであり工学的な知見も少ないのが現状である。