

5. 法面保護工の維持補修時における斜面安定性に関する検討 *

伊藤和也 **, 豊澤康男 **, 鈴木将文 ***, 末政直晃 ***

5. Stability of Shotcreted Slope During the Maintenance.

by Kazuya ITOH**, Yasuo TOYOSAWA**, Masafumi SUZUKI*** and Naoaki SUEMASA***

Abstract; The maintenance of slope stabilization constructed during the rapid economic growth period of Japan (1955-1973) is increasing in recent years. In that period, most of the slope stabilizations were done by shotcrete, which can protect the slopes from water intrusion and erosion. Every year, some accidents take place during the maintenance of such shotcreted slopes. Hence, it could be said that such type of labor accident might increase from now onward.

In this research, at first, statistical analyses of labor accidents occurred due to the slope failure during construction work within 14 years period from 1989 to 2002 were carried out to explore the basic statistical characteristics of damage consequences during maintenance repairing. And some of labor accidents caused by slope failure, which is covered with shotcrete and which is occurred at the construction sites during the removal of old shotcrete, are examined to find the cause of failure.

Secondly, the results of geotechnical centrifuge model tests which simulated the failure are mentioned. Especially, this paper focuses on the influences of weathered soils which exist behind the shotcrete and the process of the removal of old shotcrete on the stability of slope by conducting a series of centrifugal model tests. In the case of the process for smashing shotcrete from the top of the slope to the downward direction, Slip failure of the weathered soils under separated mortar-shooting is initiated from the top area, leading to unstable behavior of the separated mortar-shooting and the whole slope failure occurred. On the other hands, in the case of the process for smashing shotcrete from the toe of the slope to the upward direction, sliding of the smashed shotcrete occurred all of sudden and smashed shotcrete and the weathered soils behind that also slid down. It is important to consider the thickness of weathered soils behind the shotcrete for the stability of shotcrete. Finally, the results of numerical models using the distinct element method (DEM) which simulated the centrifuge model tests are mentioned to arching effects of particle sizes with weathered soil thickness on the slope failure.

Keywords; Shotcrete, Slope failure, Weathered soil, Maintenance, Centrifuge modelling

* 第50回地盤工学シンポジウム 平成17年度論文集 (pp.257-262) で一部発表

** 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

*** 武蔵工業大学 Musashi Institute of Technology

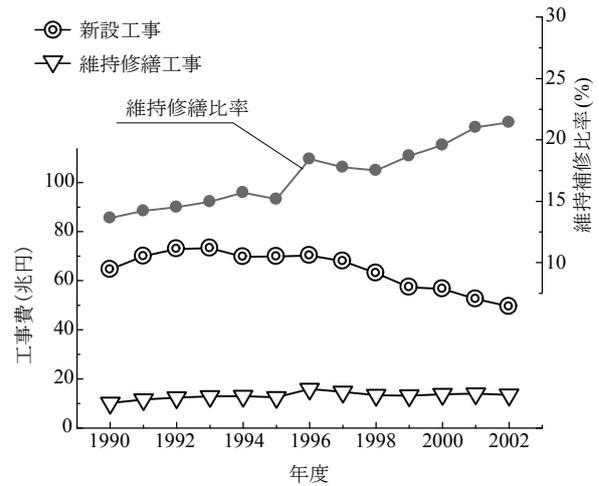
1. はじめに

我が国では、戦後の高度経済成長期に多くの公共インフラを新設してきた。しかし、これから20年後にはこれらが一斉に老齢期を迎え、修繕や大規模な維持補修工事が大量に必要となると言われている¹⁾。Fig. 1は建設工事の1990年から2002年における新設工事と維持修繕工事の工事費の関係、および維持修繕が全体の工事費に占める割合を示したものである²⁾。維持修繕工事の比率が増えているが、これは新設工事が減少しているためで、維持修繕工事の工事費用はほとんど変化していない。昨今の我が国の厳しい財政状況により、老齢期となる公共インフラの修繕や維持補修工事が的確に実行されていないことを示している。

モルタルやコンクリートによる吹付け工に代表される法面保護工は、高度経済成長期の大規模な国土開発に伴い、高速道路や新幹線建設の際の切土斜面や盛土斜面の風化・浸食・落石防止の為に大量に施工された。これら大量に施工されたモルタルやコンクリート吹付け工は施工後40年以上経ち、モルタルやコンクリートの老朽化や背面地山の風化等が進行し、修繕や維持補修工事が必要な箇所が多く存在する。吹付けコンクリート/モルタルの品質は施工条件や施工者の技術に依存する傾向があって、その性能は大きく変動しており³⁾、このような施工時の品質によっては、吹付けたモルタルやコンクリートが変状を来たシクラックが発生するなどして、地山に雨水が浸透し、経年経過により地山が劣化することも報告されている⁴⁾。

斜面崩壊による労働災害についても、維持補修工事中の災害が近年幾つか報告されており、今後の新設工事から維持補修工事への移行により、労働災害はますます増加することが想像される。特に、維持補修工事では、発注額が低いものが多いこと、維持点検・老朽化診断・対策手法を含んだ総合的な維持管理技術に特化した施工マニュアル等が未整備であること、技術力の低い施工業者が施工を行っている場合もあることなど、労働災害の要因が複雑に絡むことによる影響が懸念される。このように建設工事が新設工事から維持補修工事に移行する現状は、今まで潜在的に存在していた危険源が顕在化し、労働災害の発生原因となりうることを踏まえた対策を熟慮する必要がある。

そこで、本研究は法面保護工の維持補修工事中に発生した過去10年間の労働災害事例を調査・分析し、災害の原因となった状況について把握する。そして、それらの状況と文献の結果等を総合して、法面保護工の維持補修工事中における斜面崩壊メカニズムについて遠心模型実験と数値解析により検討を行った。



資料出所：国土交通省（建設工事施工統計）

Fig. 1 Annual change in newly and repair works.
建設工事の維持修繕工事の推移¹⁾

2. 法面保護工の現状と過去の労働災害事例

維持補修時の対策工事は、従来、既設モルタル吹付け面を小割り（50cm×50cm程度に細かくすること）・撤去した後、新たに岩盤にモルタルを吹付ける工法が主であった。この工法では新設法面と同様な検討が行われるため、対策工法の選択肢の幅が広く、劣化要因に対する抜本的な対策を講ずることができる。しかし、撤去したモルタル吹付け殻の廃棄物処理の問題や工期の長期化が懸念される。一方、劣化した既設モルタル吹付け面を残した対策を行う場合には、劣化した既設モルタルの劣化対策と同時に地山の風化層の対策など複数の工法を併用する必要がある、現場の状況に応じて臨機応変に対応することが求められている。

このような現状に対して、(社)物理探査学会斜面等健全性検討研究委員会は、吹付けモルタルの劣化調査や対策工に関わっている企業へアンケート調査を行っている⁵⁾。その回答結果では、変状・崩壊が発生した法面のうち、約2/3が調査時に20年以上経過した1983年以前に施工された法面であった。また、崩壊形態は“モルタル自体の劣化”、“地山とモルタルの密着不足”そして“地山表層の土砂化”が各々1/4を占めていた。また、劣化に対する対策工として再度モルタルを吹付ける工法を選択したものが全体の1/3を占めていた。

過去の法面保護工の維持補修時の代表的な災害事例について災害発生現場と概要をTable 1に示す⁶⁾。これらの災害事例について、花安が提案した災害規模分析手法により、新設工事と維持補修工事における対策工法別に災害規模の把握を行った⁷⁾。Fig. 2は、1989年から2003年における建設工事中に斜面崩壊により労働災害となっ

Table 1 Case history of slope failure due to shotcrete repairing.
過去の法面保護工での災害事例⁹⁾

県	死亡者数 (被災者数)	災害概要
福井	1 (1)	道路側壁の既設モルタル吹き付け面のはつり作業中、約 17m の箇所既設モルタル吹き付け法面箇所が高さ約 3m 幅約 6m 深さ約 0.5m にわたり崩壊し、道路上より約 10m の付近において作業中の被災者が既設モルタル及び崩落岩とともに道路上に墜落。脳挫傷等により死亡。
埼玉	2 (2)	橋の下部工工事現場において、掘削法面にロックネットを張る作業中に、当該法面の地山が崩壊し、労働者 2 名が崩落した土砂に巻き込まれ、それぞれ 40m、100m 下方に滑落し、死亡。
和歌山	3 (3)	掘削法面上部の樹木からつり下げられた親綱を使用して掘削法面の養生のための金網張りの作業中、高さ約 20m 上方の掘削法面の上部から幅約 15m にわたって土石が崩落・崩壊し、ほぼ法面下付近まで下がっていた 3 名が生き埋めとなり死亡。
三重	1 (2)	道路拡幅のため掘削した山側法面に現場打ち法枠工事のため労働者 4 名により、金網張りを固定するアンカーピンを機械削孔並びにハンマーを使って打ち込んでいたところ、法面が突然、高さ 40m、幅 40m にわたって崩壊し、2 人が生き埋めとなり、1 名が窒息死。
長崎	2 (2)	約 10 年前に工事した法面のモルタルが劣化しており、崩壊・落下のおそれがあるため、ブレーカーを使用して改修工事を行っていたところ、突然、地山が上部から崩壊し、法面上で作業していた労働者 4 名のうち、2 名が巻き込まれて死亡。
埼玉	0 (7)	鉄道の軌道横の斜面の崩壊防止のため施工されたコンクリート吹き付け面が老朽化したため、これを張り替える工事において、既存の吹き付け面を剥がすため、ピックハンマー(小型の削岩機)を用いて小割りしていたところ、前日の作業までに小割りを済ませた上方と推定されるあたりから土砂が崩壊し、作業員 7 名とも崩落面とともに滑落し、被災した。

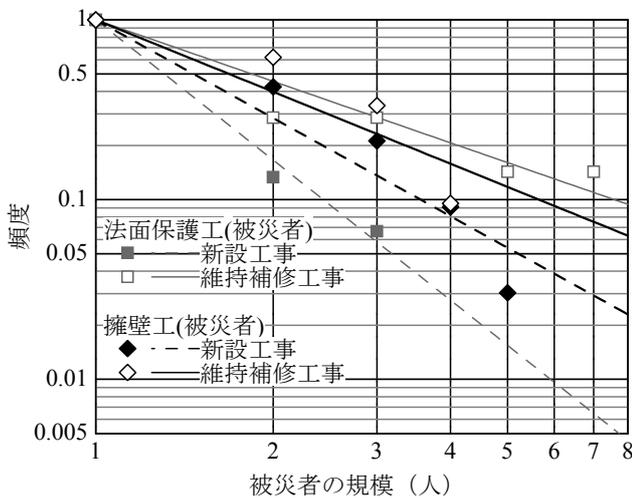


Fig. 2 Frequency-magnitude of accidents.
斜面崩壊による労働災害の災害規模分析

た事例について、工事種別を新設工事と維持補修工事に、対策工法を法面保護工と擁壁工に分類した災害規模と発生頻度の関係を示したものである。この図は、災害規模確率分布の近似直線の傾きが小さくなるほど災害規模の大きな領域に災害が分布する割合が高くなる、すなわち大規模災害が発生しやすいことを示している。対策

工法ごとの新設工事と維持補修工事における災害規模分析から、法面保護工の維持補修工事が他の場合と比較して大規模な災害となりやすい傾向を示していることがわかる。法面保護工の災害事例を詳細に見ると、モルタル吹き付け工の維持補修時における災害は、モルタルの劣化に伴うモルタル吹き付け面の撤去作業中にモルタル吹き付け面背後の土砂を伴った崩壊が発生している。また、モルタルの劣化以外に地山の風化が進行していた現場も確認されている。これらのことから、既設モルタル吹き付け面の小割り作業と地山の風化が斜面崩壊に影響を及ぼしていることが考えられる。

上述のような法面保護工の現状と過去の労働災害事例から、法面保護工の崩壊には地山の土砂化、すなわち経年経過による地山の風化現象が大きく起因している。元来、抗土圧構造物ではない保護工にこのような風化した地山による土圧が作用した場合、どのような前兆現象が起きるのかを把握する必要がある。また、従来から行われている既設モルタルを撤去した後に新たにモルタルを吹き付ける対策工事の場合、既設モルタルの劣化や小割り作業による法面全体の強度低下が崩壊に影響を与えていることが考えられる。そこで、

- ①地山の風化状況、
- ②小割り作業の作業手順

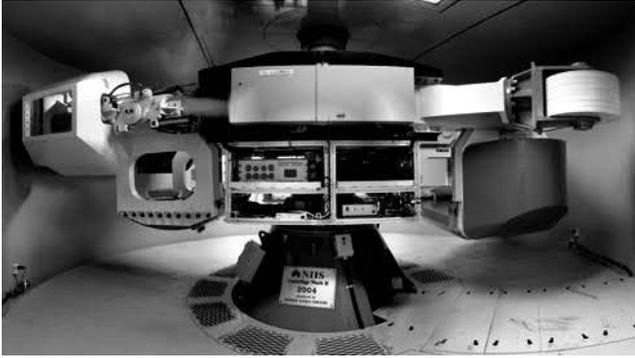


Photo 1 NIIS Mark-II Centrifuge.
遠心模型実験装置
((独)労働安全衛生総合研究所所有)

の2点に着目した遠心模型実験ならびに数値解析を実施し、法面保護工の維持補修工事中の斜面安定性について検討を行った。

3. 遠心模型実験による崩壊シミュレーション

3.1 遠心模型実験装置

実験に使用した遠心模型実験装置 (Photo 1) の主要諸元をTable 2に示す。なお、本遠心模型実験装置の詳細については、文献⁸⁾に詳しい。本実験装置は静的実験と動的实验のプラットフォームを分離・独立させることでそれぞれの要求性能を満足させ、実験の効率を高めている。今回使用した静的実験用プラットフォームの寸法は、1300mm×1100mmであり大型装置並の搭載スペースを有している。なお、計測システムは遠心模型実験装置内に搭載した計測アンプ (64ch) からのデータを無線LANにより外部に伝送し、PCにて収録している。

3.2 モデル化について

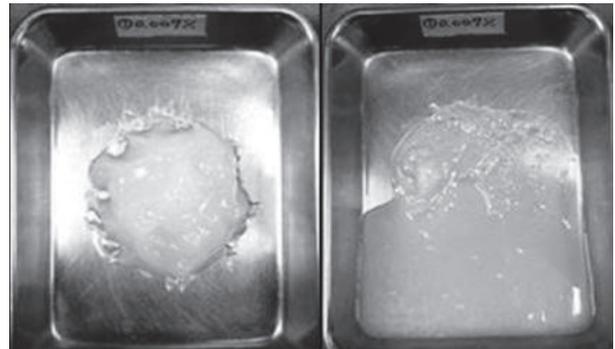
吹付け工の劣化は、モルタル吹付け面自体の劣化と背後にある地山の劣化 (風化度合い) が相互に入り組んだ複雑な問題である。また、それ以外にも吹付け工と地山の密着度 (空洞の有無) も支配的な要因と考えられる。本研究ではこれらの問題から、モルタル吹付け面の背面に経年により存在するようになる風化砂礫と、モルタル吹付けの維持補修工事の小割り作業が斜面安定性に与える影響に着目し、モデル化を行った。

3.2.1 風化砂礫のモデル化

岩石の風化現象を遠心模型実験にて再現するにあたり、水堀らは方解石に硫酸を反応させることで風化現象をモデル化する試みを行っている⁹⁾。しかし、この方法は安全面に問題があり遠心模型実験に適用することは難しい。本研究では、モルタル吹付け背面の岩盤の経年経過による風化現象を、デンプンが消化酵素により糖に分解される性質に着目し、消化酵素としてジアスターゼを

Table 2 Main Specification of NIIS Mark-II Centrifuge.
主要諸元 (静的側)

項目	内容	
回転半径	2.38 m	
最大遠心加速度	100 G (194rpm)	
搭載質量	500 kg	
遠心場能力	50 G-ton	
主電動機	電力容量	直流 90 kW
	電圧	440 V
減速機	潤滑方式	オイルバス潤滑



(a) 反応前 (b) 反応後

Photo 2 Reaction between starch and diastase.
デンプンとジアスターゼの反応

使用した。分解の反応式を (1) 式に示す。

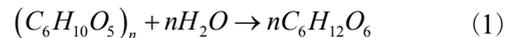


Photo 2は、デンプンにジアスターゼを混ぜて分解させた過程を示したものである。ここで、使用したデンプンはタピオカ澱粉が主成分であるデンプン糊である。遠心模型実験では、母材にこのデンプン糊とジアスターゼを加えることによって、モルタル吹付け背面の岩盤の経年における風化作用を再現した。なお、使用したデンプン糊とジアスターゼの反応時間は、ジアスターゼの希釈濃度が濃いほど早いことを予備実験で確認しており、実験では希釈濃度を35倍と350倍として使用した。

母材はコンクリート部材に用いられる超軽量人工骨材の作成途中のものであり、酸性火山噴出物 (抗化石) を主な原料とし、平均粒径約 $7 \times 10^{-6}m$ に粉碎した後、ベントナイトを3%、発泡剤としてSiO₂を0~0.4%加え混合して球形に造粒されたものである¹⁰⁾。本研究では粒径が10mm以下のものを使用した。

3.2.2 維持補修作業のモデル化

モルタル吹付け面の補修工事は、一般的に既設モルタル吹付け面を小割り・撤去した後、新たに岩盤にモルタルを吹付けることにより法面を保護する。そこで、本研

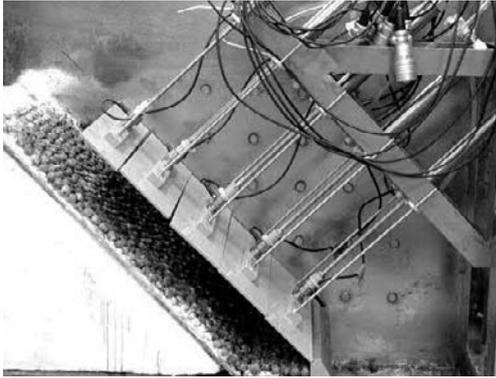


Photo 3 Slope failure control system.
斜面崩壊抑制装置

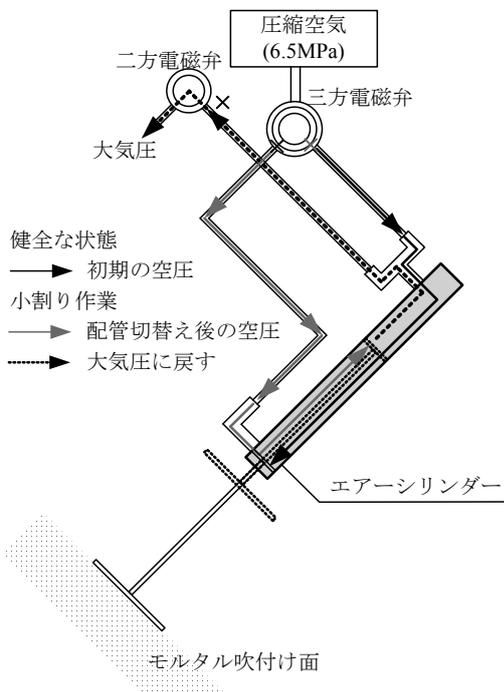


Fig. 3 System device.
斜面崩壊抑制装置の仕組み

究では、このような作業工程をモデル化するために、斜面崩壊抑制装置を作製した。

斜面崩壊抑制装置をPhoto 3に、その仕組みをFig. 3にそれぞれ示す。斜面崩壊抑制装置は、斜面を抑える5つのエアースリンダー、空圧をコントロールする三方電磁弁と二方電磁弁、シリンダーロッドに締結された塩ビ板から構成されている。斜面崩壊抑制装置のロッドを伸ばしてモルタル吹付け面を押さえることにより、側方への変形を抑制し、モルタル吹付け面の一枚岩の状態を再現する。そして、三方電磁弁を切替えて空圧の供給先を変えることによりロッドを収納させて、モルタル吹付け面への拘束力を解放することで、モルタル吹付け面の小割り作業を再現するものである。

3.2.3 モルタル吹付け面のモデル化

モルタル吹付けは、50~100mmの吹付け厚にて施工される。モデル化を行うにあたり、同じ材料によって縮尺寸法を満足することは困難であるため、本研究では、質量と曲げ剛性EIを一致させるように、厚さ0.2mmのアルミニウム板を使用した。また、モルタル吹付け面が小割られている状態を再現するために、アルミニウム板を縦10mm×横200mmの大ききで作成し、両端をそれぞれ接着した。また、アルミニウム板に釘を設置することによって、モルタル吹付け背面のアンカー部分をモデル化した。

3.3 実験方法および実験ケース

実験概略図をFig. 4に示す。本実験では、遠心加速度を40Gに設定し、実地盤高さ8m、斜面角度45°の斜面をモデル化した。風化していない背面地山は、強固な岩盤と仮定して石膏を用いてモデル化した。なお、図中の数字は、小割りするモルタル吹付け面箇所を示している。

実験ケースをTable 3に示す。過去の幾つかの災害事例では、モルタル吹付け面の小割り作業を斜面下部から行っており、この小割り作業手順が斜面崩壊の誘因となっているものと考えられる。そこで本研究は、①小割

Table 3 Test cases.
実験ケース

ケース	風化層の厚さ	ジスターゼの希釈濃度と反応時間	石膏の有無	小割り作業開始位置	
1	5cm	35倍	×	斜面上部→下部	
2					1.5h
3		1.5h			
4		5h			
5	3cm	—		○	斜面下部→上部
6		350倍			
7		—			
8		350倍			
9		350倍			
				斜面上部→下部	

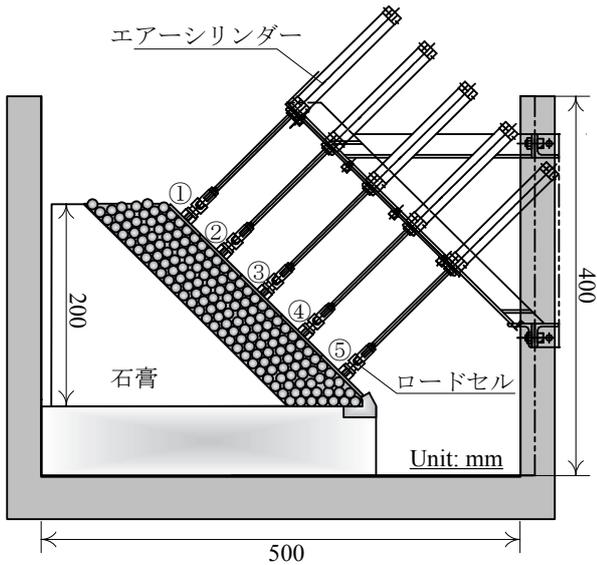


Fig. 4 Experimental setup.
実験概略図

Table 4 Test results.
実験結果

ケース	小割り作業手順	崩壊	崩壊箇所
1	斜面上部→下部	○	③
2	斜面下部→上部	○	③
3		○	②
4		○	③
5		×	—
6		×	—
7	斜面下部→上部	○	④
8		×	—
9	斜面上部→下部	○	⑤

り作業手順の違い、②風化地盤の強度の違いと風化層の厚さの違いによるモルタル吹付け面に作用する圧力変化と変形挙動に着目した実験を行った。

計測項目として、遠心模型実験中のモルタル吹付け面に作用する圧力を測定するために、斜面崩壊抑制装置の各ロッド部にロードセルを、風化砂礫の沈下量を測定するために、変位計を法肩に取り付けた。また、風化砂礫の崩壊形状を視覚的に把握するために、土槽の正面と側面にCCDカメラと高解像度カメラをそれぞれ設置した。

3.4 実験結果

実験結果の一覧をTable 4に示す。小割り作業は、遠心加速度が40Gの一定加速度場に到達した後、沈下量が収束したことを確認して実施した。ここでは、ジラスターゼの希釈濃度が薄く(350倍)反応しづらいケース5～9を(a)風化の進行が少ない地盤とし、同様に濃く(35

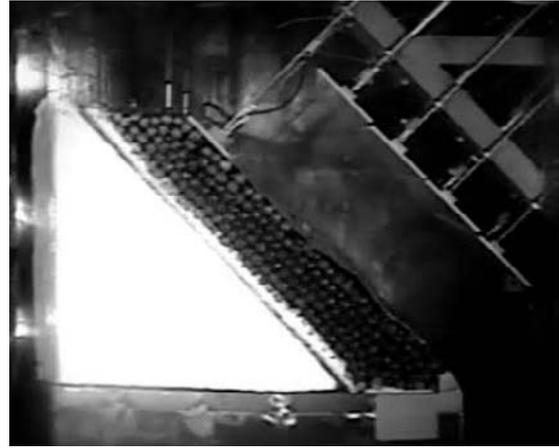


Photo 4 Final deformation in case 5.
最終的な変形形状(ケース5)



Photo 5 Final deformation in case 6.
最終的な変形形状(ケース6)



Photo 6 Final deformation in case 7.
最終的な変形形状(ケース7)



Photo 7 Final deformation in case 8.
最終的な変形形状 (ケース8)



Photo 8 Final deformation in case 9.
最終的な変形形状 (ケース9)

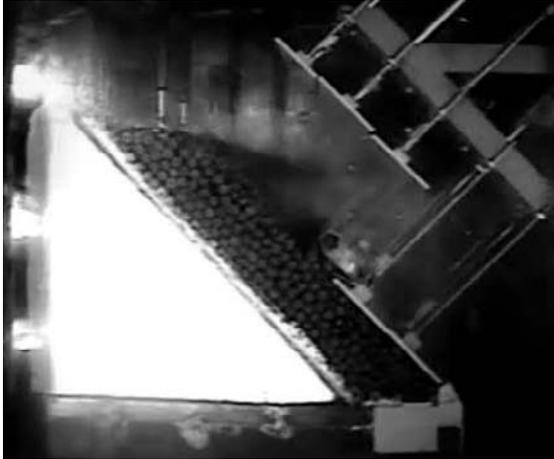


Photo 9 Final deformation in case 1.
最終的な変形形状 (ケース1)

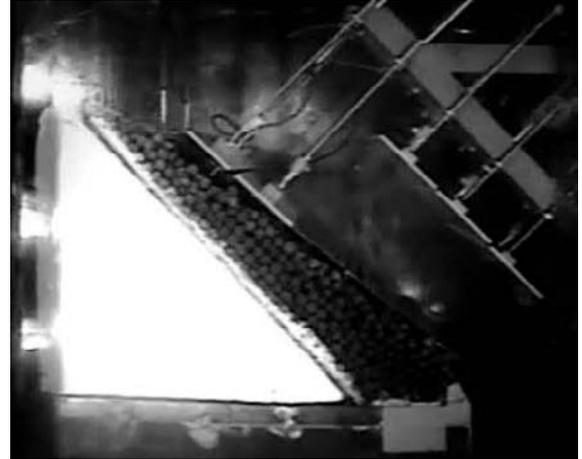


Photo 10 Final deformation in case 2.
最終的な変形形状 (ケース2)

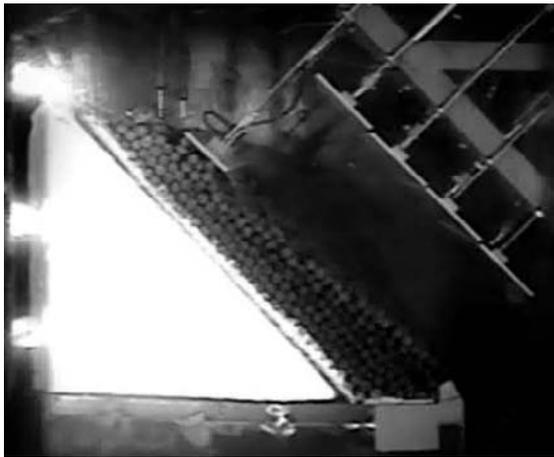


Photo 11 Final deformation in case 3.
最終的な変形形状 (ケース3)



Photo 12 Final deformation in case 4.
最終的な変形形状 (ケース4)

倍) 反応しやすいケース1~4を (b) 風化の進行が大きい地盤 (ケース1~ケース4) と分類して、それぞれ考察を行う。

3.4.1 風化の進行が少ない場合 (ケース5~9)

それぞれのケースにおける最終的な変形形状をPhoto 4~8に示す。風化の進行が少ない場合、ケース5, 6, 8が崩壊に至らなかった。小割り作業を斜面上部から行っ

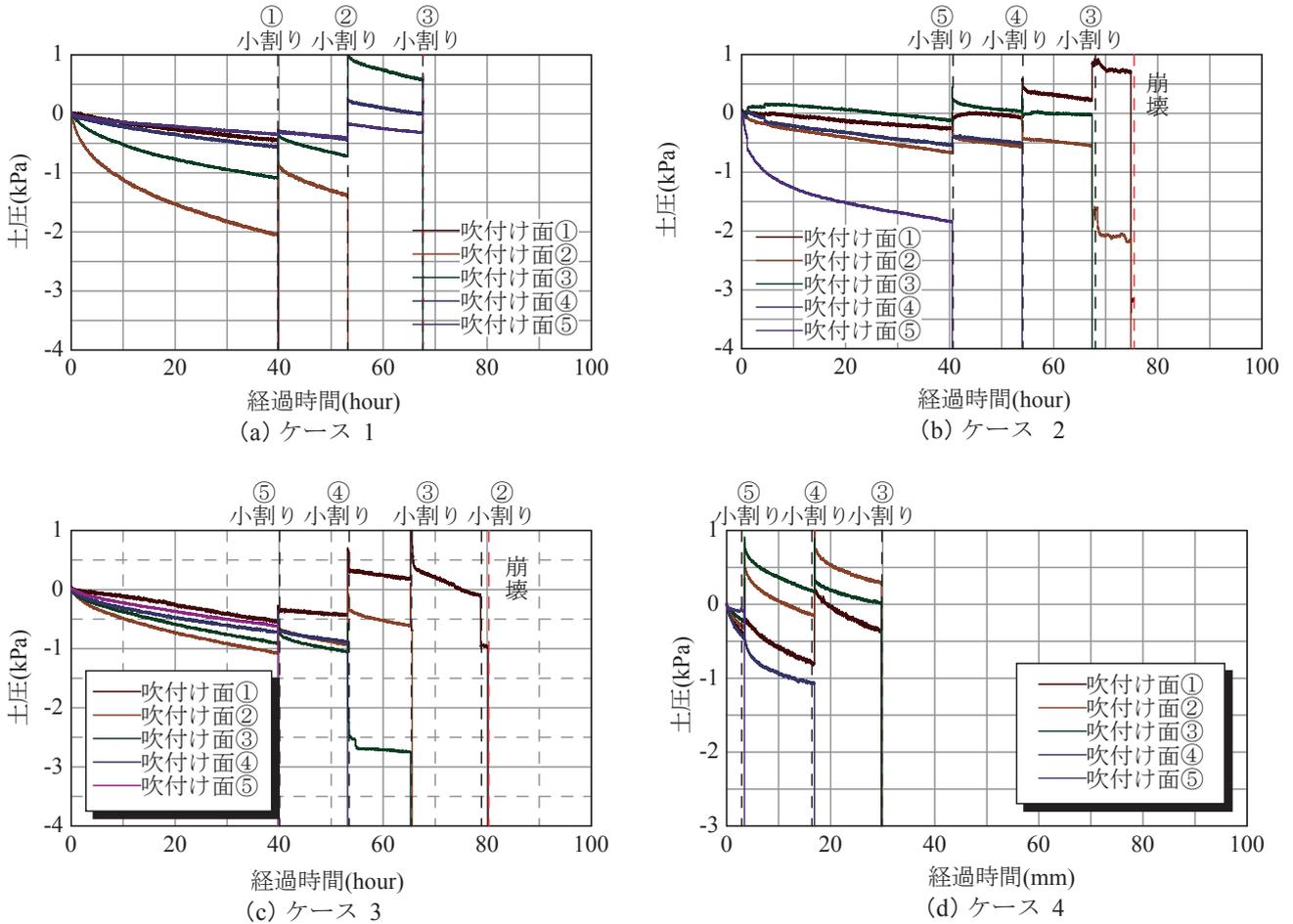


Fig. 5 Change in earth pressure sensors to the process for repairing shotcrete under 40G.
経過時間と40G以降の土圧の増分

たケース9では、モルタル吹付け面をモデル化したアルミニウム板が滑落した後、背面の地山が崩壊に至った。このことから、モルタル吹付け面が滑落したことによって、斜面が不安定化し、崩壊に至ったと考えられる。一方、小割りを斜面下部から行ったケース8は崩壊に至らなかった。これは、実験開始まで、3時間経過していることや石膏を混合していることから、表面が乾燥してしまい、想定よりも高強度となってしまったことが一因として考えられる。また、自立するだけの強度を有したことによって風化砂礫の自重が、集中しなかったことが考えられる。

ケース5, 6は、石膏を混合していないケースであるが斜面は変形するものの崩壊は起きなかった。これは、ジスターゼの希釈濃度が薄いためにジスターゼと反応しないデンプン糊が実験中に乾燥したものと考えられる。一方、完全に風化している風化砂礫をモデル化しているケース7は、モルタル吹付け面②を撤去した直後に崩壊した。

以上のことから、モルタル吹付け背面地山の風化があまり進行していない場合は、小割り作業を行っても崩壊

せず、モルタル吹付け面が孕みだす程度であることが分かった。また、ケース9に見られるようにモルタル吹付け自体の剥落は風化度合いに関係なく、背面地山とモルタル吹付け面の密着度合いによって発生する可能性が示唆される。

3.4.2 風化の進行が大きい場合 (ケース1~4)

風化の進行が大きい風化岩盤を再現するためにジスターゼの希釈濃度を35倍にすることによって、軽量骨材間の粘着力の低下を図った。それぞれのケースにおける最終的な変形形状をPhoto 9~12に示す。これらのケースは全て小割り作業を行うことによって崩壊した。Fig. 5は40G到達後からの経過時間と土圧増分の関係を示したものである。斜面上部より小割り作業を行ったケース1は、モルタル吹付け面③を小割りした直後にモルタル吹付け面とその表層付近の粒子が隆起してモルタルが剥落した(Photo 9)。一方、斜面下部より小割り作業を行った実験ケース2では、モルタル吹付け面③を小割りした約8分後に斜面下部が突然孕み出し、モルタル背面の風化岩盤を伴って広範囲にわたって崩壊した(Photo 10)。他の斜面下部より小割りをを行ったケースについてもモ

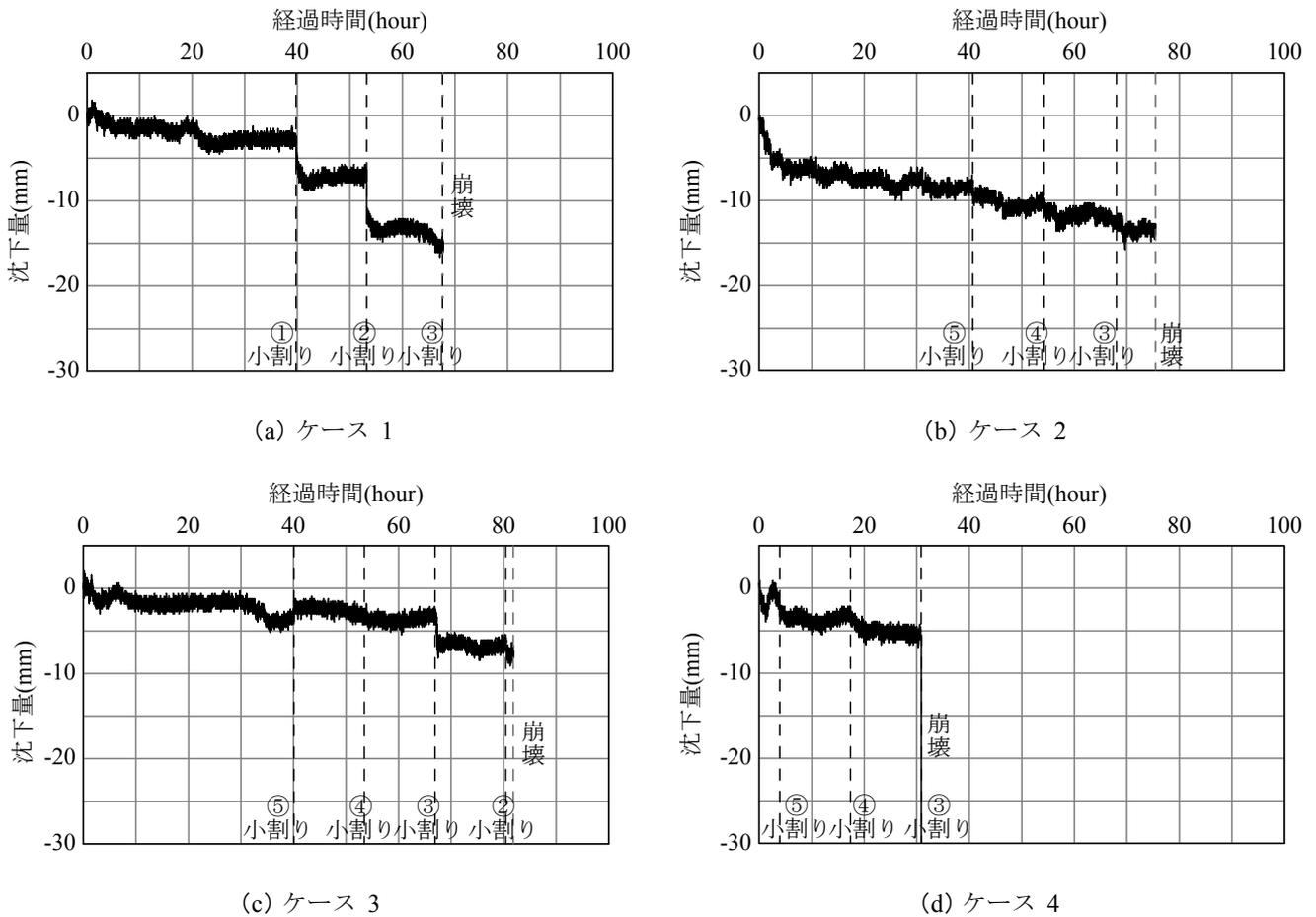


Fig. 6 Change in settlement of slope crest to the process for repairing shotcrete under 40G.
経過時間と40G以降の沈下量の増分の関係

ルタル背面の風化岩盤を伴って大規模に崩壊に至っている。ここで、ケース2とケース3は風化度合いが若干異なり、ケース2のほうが風化の進行が大きい。小割り作業を斜面下部から行った実験結果から、モルタル吹付けの背面地山の風化がある程度進行した場合、仮に小割り作業直後に斜面が安定していても、時間の経過により突然大規模な崩壊に至る場合もあることが分かった。

斜面崩壊抑制装置に設置したロードセルから得られたモルタル吹付け面に作用する土圧は、軽量骨材の接触状況によって異なるが、小割り作業を施すことによって、周辺のモルタル吹付け面の土圧が増加していることが分かる。これは、側面からの拘束がなくなり、風化岩盤が変形することによりモルタル吹付け面に土圧として作用しているものと考えられる。特に、斜面下部から小割り作業を行ったケースでは、モルタル吹付け面⑤を小割りした場合には一番近いモルタル吹付け面④の土圧が増加するのに対して、モルタル吹付け面④を小割りした場合にはモルタル吹付け面③の土圧が低下するような傾向を示しており、風化岩盤の変形に何らかの反応をしているものと思われる。

実地盤換算した経過時間と40G到達後の沈下量の増分の関係をFig. 6に示す。変位計の設置箇所によって変形挙動が異なっているが、これは粒径10mmの軽量骨材の凸凹による影響であると考えられる。ここで小割り作業時の沈下量について着目すると、小割り作業を斜面上部から行った場合には各段階で10mm程度の沈下が見られるが、斜面下部から行った場合には、その変化があまり明確には現れなかった。これは変位計の設置位置が斜面上部にあることに起因しているものと思われる。すなわち、小割り作業による変形は、比較的局所的であり、維持補修作業を動態観測などで監視する場合には、作業箇所周辺を対象としなければ崩壊の前兆現象を把握することが出来ないことを示している。このような局所的な挙動を示すのは、落とし戸実験で現れるようなアーチ作用¹¹⁾の影響が考えられる。そこで、粒状体の数値解析である個別要素法によりシミュレーションを行い、粒子径の影響について検討を行った。

4. 個別要素法による遠心模型実験結果のシミュレーション

4.1 個別要素法の概要

個別要素法は1971年にCundallが亀裂性岩盤を解析するために開発したものであり¹²⁾、粒状体や岩盤ブロックの運動を扱う解析手法として現在利用されている。これは、ブロックなどの離散体を個別要素と呼ばれる剛体要素にモデル化し、各要素の接触面について接触力を求め、得られた各要素の運動方程式を時間積分することにより、動的解析を行う方法である。本研究では、個別要素法による粒状体挙動解析コードPFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) Version 3.1 (HCltasca社)¹³⁾を使用した。

4.2 使用したパラメーターと解析ケースについて

解析モデルは、Fig. 7に示すように、遠心模型実験と同様の形状(斜面勾配45度、風化層厚5cm、斜面高さ20cm)とし、解析中に重力を40倍にすることで遠心模型実験をシミュレーションした。解析ケースは、遠心模型実験にて実施したケース1~4である。また、粒子径の影響を確認するためにケース1と2については、粒子径を2mmと4mmとしたパターンについても解析を行った。それぞれの解析に使用したパラメーターをTable 5に示す。なお、これらのパラメーターは既往の研究¹⁴⁾を参考に二軸圧縮試験を行い、決定したものである。

4.3 解析結果と考察

4.3.1 遠心模型実験のシミュレーション

Fig. 8にケース1と2の各段階での小割り作業直後の変形挙動と接触応力の発生状況を示す。なお、(6)は遠心模型実験での崩壊形状写真を左右反転して示したものである。斜面上部から小割り作業を行ったケース1では、それぞれの箇所を小割り作業することによって小割り作業前に発生していた大きな接触応力が失われ、粒子が六方最密充填構造へ移行する。この移行の際には、体積変化(ダイレイタンス)が起きていることが分かる。この様子は、遠心模型実験の結果とも合致する。一方、斜面下部から小割り作業を行ったケース2では、各箇所に見られる粒子間の接触応力が卓越している箇所が見られ、背面にある健全な岩盤斜面と一体化している。これは、粒子の接触構造であり、一種のアーチ作用が発現したものと考えることが出来る。このアーチ作用により上部からの風化岩盤の自重を支え斜面全体として安定している。しかし、小割り作業箇所の進展により、接触構造が崩れて接触応力の消散・粒子の再配列が起きる。この際に、次のアーチが形成されれば、再び安定するが、形成されない場合にはモルタル背面の風化層全体を伴った

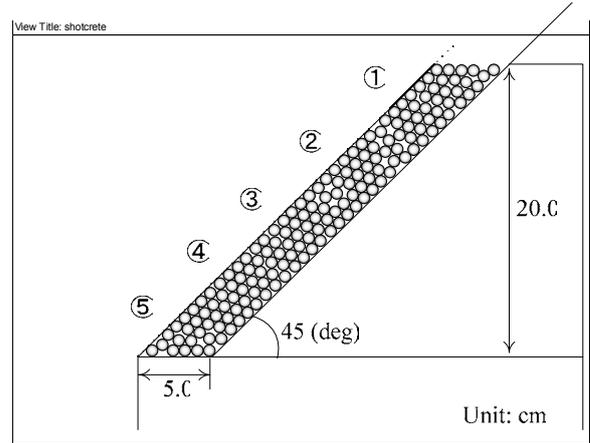


Fig. 7 Analytical model. 解析モデル

Table 5 Used parameters for analysis. 解析に用いたパラメーター

		ケース			
		1	2	3	4
土粒子	粒子径(mm)	2,4,8		8	
	密度(kg/m ³)	1300			
	垂直バネ係数(MPa/m)	1.0			
	せん断バネ係数(MPa/m)	4.0	2.0	1.5	
	摩擦係数	0.6			
モルタル	小割り幅(mm)	10			
	ブロック厚(mm)	0.2			
	密度(kg/m ³)	2690			
地山	引張応力×10 ² (Pa)	5.9			
	垂直バネ係数(MPa/m)	1.0×10 ⁴			
	せん断バネ係数(MPa/m)	2.0×10 ⁴			
	摩擦係数	0.5			

崩壊となる。アーチ作用の発現には粒子径の影響が大きいと思われる。実際の災害現場の崩壊砂礫は一部土砂化しているものも散見される。そこで、ケース1と2について粒子径を遠心模型実験よりも小さくしたシミュレーション解析を行い、粒子径の影響を確認した。

4.3.2 粒子径を小さくした場合

粒子径を4mmとした場合のケース1と2の変形挙動と接触応力の発生状況をFig. 9に、粒子径を2mmとした場合をFig. 10にそれぞれ示す。初期状態では、粒子径の違いによらず接触構造が構築されていることが分かる。遠心模型実験をシミュレートした粒子径8mmのケースと粒子径4mm、2mmのケースを比較すると、粒子径が小さいケースほど変形量が大きい。これは、粒子径が小さい方が変形過程において粒子を乗り越えやすい幾何学的な影響だと思われる。

これらについて小割り作業手順ごとに比較すると、斜面上部から小割り作業を行った場合では、変形性状に



Fig. 8 Analytical results simulated by centrifuge model test.
遠心模型実験のシミュレーション解析

大きな違いは見られない。一方、斜面下部から小割り作業を行った場合では、粒子径が小さいほどアーチ作用が発現せず、小割りされた箇所からの風化砂礫の孕み出しが顕著となる。これは風化が進行することにより局所的

な小割り作業によって斜面全体が崩壊に至ることを示唆している。以上のことから、経年経過や地山種類により風化層が土砂化した場合には、小割り作業手順の違いによって崩壊危険度は大きく異なることが分かった。

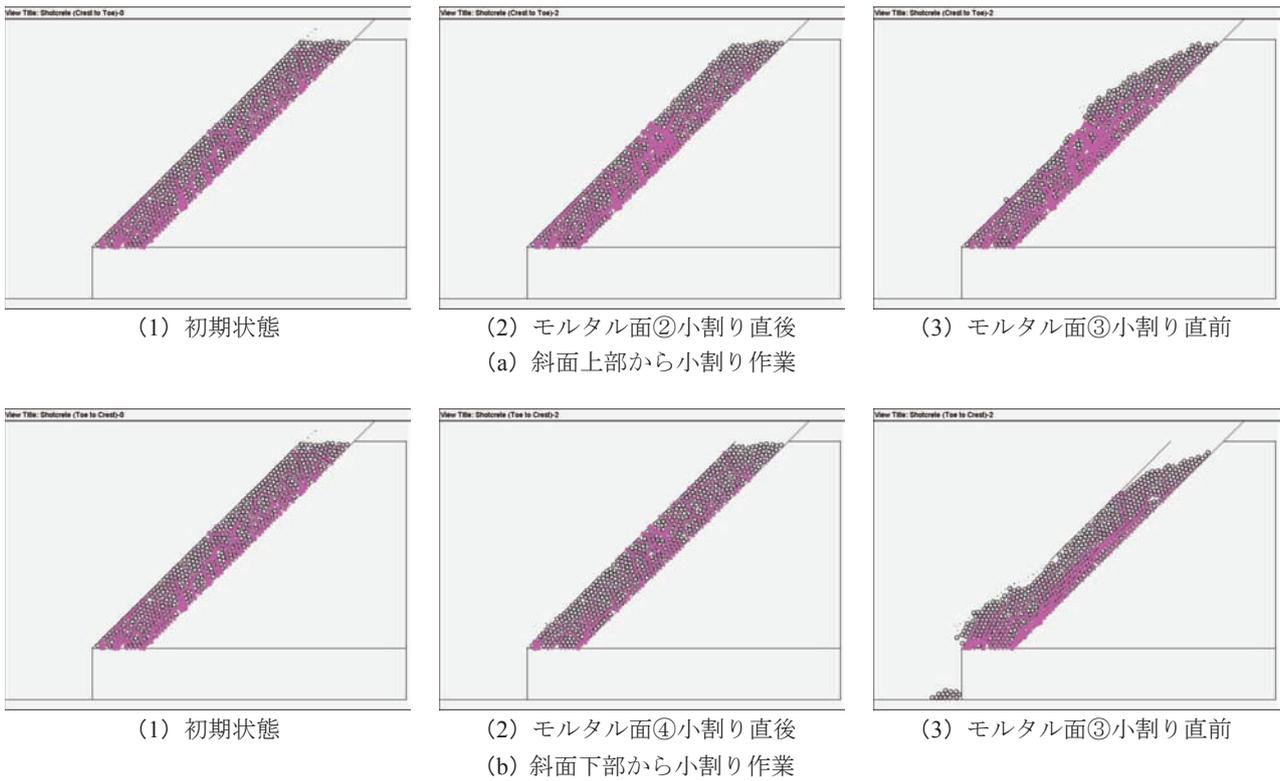


Fig. 9 Numerical simulation using small balls (4mm diameter).
粒子径が小さい場合のシミュレーション解析(4mm)

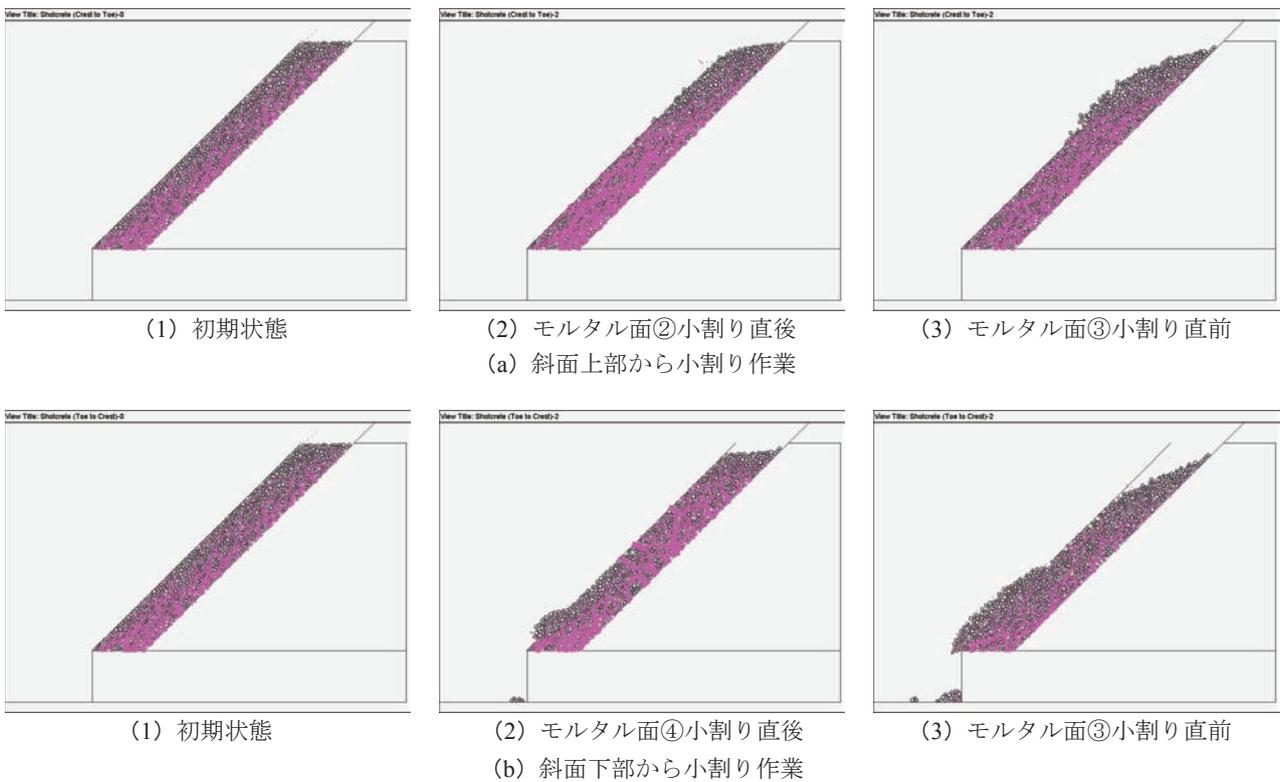


Fig. 10 Numerical simulation using small balls (2mm diameter).
粒子径が小さい場合のシミュレーション解析(2mm)

5. まとめ

法面保護工の維持補修時における斜面安定性について、過去の災害事例調査およびそれをモデル化した遠心模型実験・数値解析によって検討を行った。本研究にて得られた知見は以下の通りである。

過去の労働災害事例の調査より、

1. 新設工事と維持補修工事での災害規模の分析を行ったところ、法面保護工の維持補修工事は新設工事や他の対策工法に比べて大規模な災害となる頻度が高いことが分かった。

遠心模型実験結果より、

2. 地山の風化が進行していない場合、モルタル吹付け面が孕み出すような変形が発生した。この小割り作業箇所の孕み出しにより、小割り作業を斜面上部から行う場合には、モルタル吹付け面自体の剥落の危険性を考慮する必要がある。
3. 地山の風化が進行している場合、小割り作業が斜面上部から行う場合には、風化が進行していない場合と同様に、モルタル吹付け面付近で変形し、モルタル吹付け面が剥落した。一方、小割り作業を斜面下部から行う場合では、突然、モルタル背面の風化砂礫を伴って大規模な崩壊に至ることが分かった。
4. 変位計の結果から、小割り作業による変形は局所的であり、維持補修工事にて動態観測をする場合には、設置場所を熟慮する必要がある。

数値解析結果より、

5. 遠心模型実験に使用した粒子径は、粒子の接触構造が発達・一種のアーチ作用が発現し、崩壊をある程度抑制していることが視覚的に確認できた。
6. 粒子径を小さくした場合、アーチ作用があまり発現せず、より局所的な変形挙動を示して、崩壊しやすくなる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、母材として使用した軽量骨材は、東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻日下部治教授、井澤淳助教より提供して頂いたものである。また、デンプンと消化酵素に関しては女子栄養大学栄養学部 辻村卓教授、および当研究所 水谷高明研究員（化学安全研究グループ）より貴重なご意見とアドバイスを頂戴した。末筆ながら、ここに記して謝意を表する。なお、本研究は、武蔵工業大学大学院との連携大学院制度に基づき実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省編：平成17年度版国土交通白書，ぎょうせい，2005.
- 2) 社団法人日本土木工業協会：建設業データ集，<http://www.dokokyo.or.jp/data/data.html>
- 3) 吉田行，田口史雄，山崎勲：のり面防護用吹付けコンクリートの劣化度調査と性能評価，北海道開発土木研究所月報，No. 617，pp. 17-26，2004.
- 4) 佐藤亜樹男，松山裕幸，長尾和之，山本高司：切土のり面吹付けコンクリートの安定性について（その2）—背面地山の劣化—，土木学会第59回年次学術講演会，CD-ROM-1，pp. 285-286，2004.
- 5) 社団法人物理探査学会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，鹿島出版会，pp9-14，2006.
- 6) たとえば，建設業労働災害防止協会：平成14年度版建設業安全衛生年鑑，建設業労働災害防止協会，247p，2002.
- 7) 花安繁郎：建設工事労働災害の被害強度・規模特性に関する統計分析，土木学会論文集，No. 462，pp. 131-140，1993.
- 8) 伊藤和也，玉手聡，豊澤康男，堀井宣幸：新遠心模型実験装置（NIIS-Mark II Centrifuge）の開発，産業安全研究所研究報告，NIIS-RR-2005（2006），pp. 57-74，2006.
- 9) 水堀拓也，大河原正文，三田地利之：遠心力場における模型地盤の急速風化方法に関する研究-方解石の溶解速度式-，土木学会第60回年次学術講演会，CD-ROM I，pp.331-332，2005.
- 10) 原田至克，菅谷智幸，南部正光，上保知伸，井澤泰雄，寺光泰文：人工軽量骨材の強度評価方法，太平洋セメント研究報告，第136号，pp. 49-57，1999.
- 11) たとえば，Terzaghi, K. and R. B. Peck: Soil Mechanics in Engineering Practice. 1948
- 12) Cundall P.A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Proceedings of the symposium of the international society of rock mechanics (Nancy, France), Vol. 1, Paper No. II-8, 1971.
- 13) HC Itasca Company : Particle Flow Code in 2 Dimensions (Version 3.1) , Theory and background, 50p, 2004.
- 14) たとえば，C. Wang, D. D. Tannant, and P. A. Lilly: Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, pp. 415-424, 2003.

（平成19年11月10日受理）