

# 簡易な地山補強土工法による安定効果に関する遠心場掘削実験

伊藤和也\*1 吉川直孝\*1 林豪人\*2 堀智仁\*1  
平原直征\*2 小浪岳治\*2 丸山憲治\*3

地震や豪雨災害による地すべり・崖崩れ・落石などの土砂崩壊災害，それに伴う河道閉塞等による交通網やライフラインの寸断は，迅速かつ確かな復旧工事が必要とされる．本研究では通常時だけでなく災害復旧工事のように斜面崩壊によるリスクが高いと判断された斜面を簡易的・仮設的に補強する斜面補強工法について，(1) 斜面勾配の違い，(2) 補強材の有無等を変化させた遠心場掘削実験を行い，せん断ひずみ分布や変形挙動を各種変位計測および PIV 画像解析等から斜面安定効果を把握した．その結果，1m 程度の補強材設置でも斜面補強効果があることが分かった．

キーワード：斜面補強，労働安全，遠心模型実験，PIV 画像解析

## 1 はじめに

地震や豪雨災害による地すべり・崖崩れ・落石などの土砂崩壊災害，それに伴う河道閉塞等による交通網やライフラインの寸断は，迅速かつ確かな復旧工事が必要とされる．写真 1 は新潟県中越沖地震にて被災した国道 8 号線（長岡市大積）での応急復旧工事の様子を示したものである．道路近傍で発生した災害復旧工事は，崩れやすい斜面下における土砂の撤去を伴うため，作業員が二次災害に巻き込まれる危険性が高い工事と言える．土砂崩壊による交通網やライフラインの寸断による影響は，その重要度に依存する．特に基幹をなす交通網やライフラインであれば，より早急な復旧が必要となることから応急復旧対策が必要となる．そのため，養生期間が短く専用の機材が必要とならない工法が望ましい<sup>1)</sup>．斜面の切土掘削工事では，災害復旧工事だけではなく通常時においても，自然斜面の下方部分を掘削したり，斜面勾配をより急勾配にしたりする作業が伴うことから多くの労働災害が発生している．伊藤らの調査・分析によるとこれらの災害は，(1) 崩壊土量が 50m<sup>3</sup>以下の小規模崩壊が多く，退避する時間的余裕も無く被災する場合が多い，(2) 崩壊形態の規模としては表層崩壊が 6 割以上を占めている，(3) 崩壊形態の地質としては崩壊土・風化表層土が 4 割弱を占めている，といった特徴が挙げられる<sup>2)</sup>．また，災害の多くが中小規模工事であり，それらは重力式擁壁やもたれ式擁壁を築造するための工事に付随して斜面の切土掘削が行われることが多く，構造物の施工にかかる作業手順や安全対策については検討されているが，斜面崩壊に対する危険性の認識が必ずしも高くない現状がある．このような現状に対して，(独)労働安全衛生総合研究所では「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」を設置し，様々な検討を行った<sup>3)</sup>．その中で，斜面崩壊による労働災害を低減するこ



写真 1 新潟県中越沖地震にて被災した国道 8 号大積の応急復旧工事

とを目的とするハード対策として，下記の観点・概念による整理を行なった．すなわち，

- (1) 作業時に作業員が切土部の下部に進入しない又は短時間の進入ですむ方法，
- (2) 斜面（残斜面と切土部）を補強する方法（変状が生じて避難する時間を確保し崩壊土砂が可能な限り拡散しない方法を含む）

本研究では，通常時だけでなく災害復旧工事のように斜面崩壊によるリスクが高いと判断された斜面を簡易的・仮設的に補強する斜面補強工法について，(1) 斜面勾配の違い，(2) 補強材の有無等を変化させた遠心模型実験を行い，せん断ひずみ分布や変形挙動を各種変位計測および PIV 画像解析<sup>4)</sup>等から斜面安定効果について検討した．

## 2 実験概要

実験は，(独)労働安全衛生総合研究所所有の遠心模型実験装置（JNIOOSH NIIS Mark-II Centrifuge）を使用した<sup>5)</sup>．遠心模型実験装置の詳細は文献に譲る．使用した実験土槽は，幅 450mm×高さ 270mm×奥行き 150mm のアルミ製土槽であり，土槽の側面は強化ガラス面により内部の様子を観察できる．模型地盤は法面高さ 5m の斜面を 1/40 縮尺モデルとして作製した．試料は，最大粒径が 2.0mm となるように粒度調整した成田砂（土粒子

\*1 労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

\*2 岡三リビング（株） 技術部

\*3 （株）ジオデザイン 技術部

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 伊藤和也\*1

E-mail: k-ito@s.jniosh.go.jp

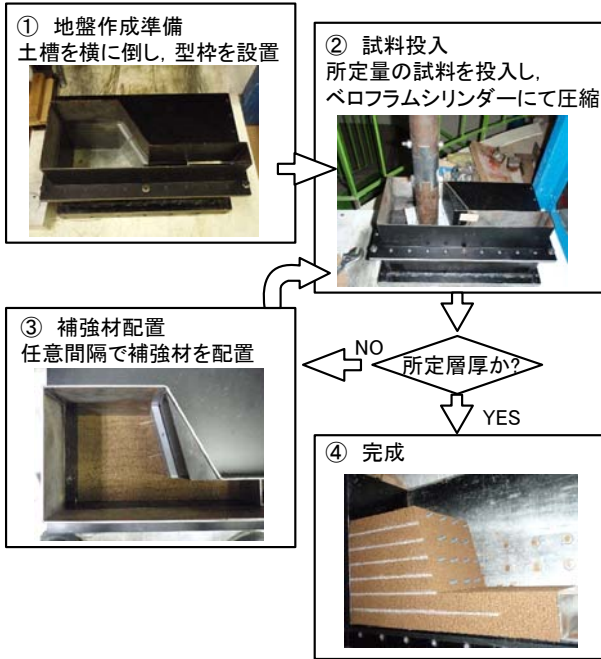


図1 模型地盤作成方法

密度 $\rho_s=2.66(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，最大粒径 2mm，均等係数  $U_c=40.7$  である。

地山補強土工法は、水平方向に補強材が配置される盛土補強土工法とは異なり、任意角度にて打設されることが多い。このような地山補強土工法の補強材設置をモデル化するために、本研究では地盤を図1 ②に示すように側方方向から作製することとした。載荷方向が異なることにより強度や変形の異方性が見られることは、Odaらの研究等によって明らかにされている<sup>6)</sup>。本研究では、同一地盤の比較実験であるため、強度・変形の異方性については問題にはならない。補強材を設置した模型地盤を作成する流れを図1に示す。まず、模型土槽を横に倒し、実験ケースの斜面勾配となる型枠を設置する(図1 ①)。次に型枠内に所定量の試料を投入し、ペロフラムシリンダーにより圧縮して地盤を作製する(図1 ②)。その後、なじむように表面を野書いた後、所定の箇所に補強材を斜面と直行方向に配置する(図1 ③)。その後、再び試料を投入して地盤を作製する。このような一連の流れにて模型地盤を作製した。本研究にて実施した実験ケースを表1に示す。斜面勾配の違いと補強材の有無に着目して計5ケースの実験を行った。本研究で使用した補強材は、 $\phi 3.0\text{mm}$ のMCナイロンでありその周囲には成田砂を接着して完全粗の状態とした(図2 ①)。一般的な地山補強土工法ではモルタルやセメントミルク等の定着材を使用して周辺地山と一体化させているため、完全粗と近いと考えられる。また、補強材間隔は、経験的手法<sup>7)</sup>から“ $2\text{m}^2$ に1本”とした「密」(図2 ②)と、それよりも間隔を広げ“最大 $4\text{m}^2$ に1本”とした「疎」(図2 ③)の2種類について実施した。なお、本研究にて対象とする地山補強土工法は、棒状補強材を地山に挿入するため、現象的に2次元問題には帰着できず3次元問題として扱うべきものである点に注意が必要である。

表1 実験ケース

ケース	勾配	補強材
1	60	-
2		1m, 密
3	75	-
4		1m, 密
5		1m, 疎

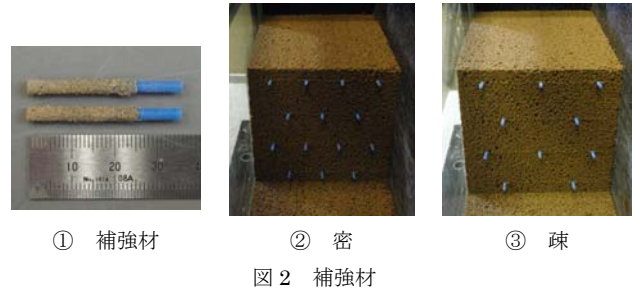


図2 補強材

本研究では、地山補強土工法の補強原理を模型実験にて一定レベルで再現させるために、遠心場にて地盤を掘削することが可能な遠心場掘削シミュレーターを使用した。この遠心場掘削シミュレーターは、2007年に(独)労働安全衛生総合研究所に導入され、制御システムの改造等を経て、本研究にて新たに用いられた。遠心場掘削シミュレーターを写真2に示す。掘削は、1度～80度までの任意の勾配にて可能となるようにシステム化されており、斜面勾配に沿った掘削が可能である。斜面の掘削は、斜面高さ100mm(実地盤高さ4.0m)まで設置した乾燥成田砂を掘削ブレードによって12.5mm(実地盤換算で0.5m)ずつ段階的に掘削することによって再現した。図3に計測器の配置図および模型寸法を示す。各掘削では掘削が完了してから約2分間放置し、小崩落の発生の有無を観察し、計測データの変化等を確認した。なお、何らかの変化が見られる場合は、その動きが平衡となるまで待機した。これを繰り返し、斜面高さ125mm(実地盤換算で5.0m)となるまで掘削を行った。以下の実験結果にて呼称される掘削高さは図3右側に示したように掘削後の斜面高さとした。計測項目は、法面天端の図3に示す位置の鉛直変位(天端から5mm程度)と法面天端の水平変位(天端)である。また、土槽正面には、PIV画像解析用の高解像度カメラ(2048×1536pixel)を設置して掘削過程の地盤変形を撮影している。なお、本研究の画角と画素数からPIV画像解析の変位精度は0.168mmである。PIV画像解析の詳細については文献に譲る。なお、PIV画像解析の精度を確保するためにガラス面にはシリコングリス等の摩擦低減措置は行っていない。これによって、側面摩擦の影響が多少発生するが、本実験の崩壊が表層で発生することから大きな影響は無いと判断した。また、最終的な崩壊では、地山補強土工法を対象としているため、3次元的な崩壊挙動(例えば補強材間から発生する中抜け崩壊)が見られるが、PIVは掘削段階での斜面全体の動きを把握するために使用している。以下、実験結果は全て実地盤換算に

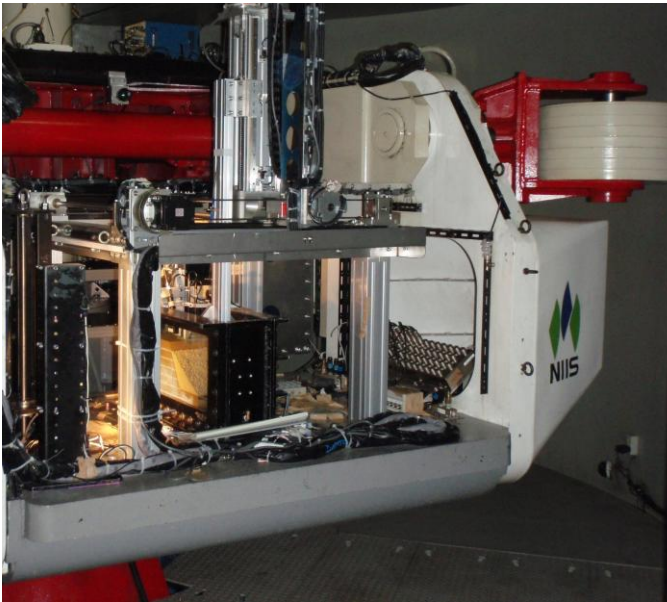


写真2 遠心場掘削シミュレーター

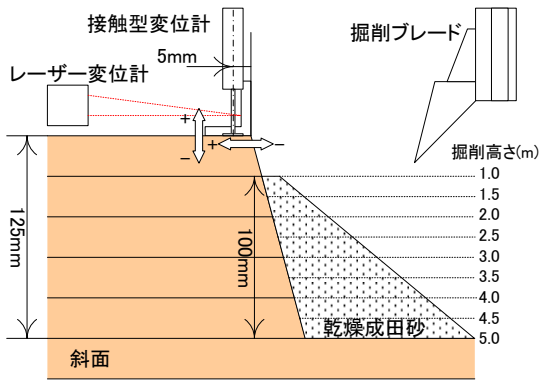


図3 模型寸法および計測器等配置図

て表記する。

### 3 実験結果と考察

#### 1) 斜面勾配の違い

図4に斜面勾配が異なる2種類の無補強地盤の掘削段階毎における法面天端の水平変位と鉛直変位をそれぞれ示す。両ケースとも掘削が進むにつれて変位量が大きくなり、ケース3(75度斜面)では3.5m掘削直後に崩壊したが、ケース1(60度斜面)では5.0m掘削後も崩壊しなかった。図5はケース1(60度斜面)におけるPIV画像解析から得られた変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)とその写真(右)である。ここで、最大せん断ひずみは、割合であり初期値からの累積表示としている。これを見ると、各掘削段階の法尻付近から最大せん断ひずみが卓越し、ひずみ領域が天端に向かって広がっていることが確認できる。なお、法尻から右側の底盤部にて最大せん断ひずみが卓越しているのは、高解像度カメラの撮影間隔の影響によって掘削ブレードの有無によって生じるものであり、地盤変形とは無関係である(他のケースも同様)。図6はケース3(75度斜面)におけるPIV画像解析から得られた変形挙動(等倍)と最大せ

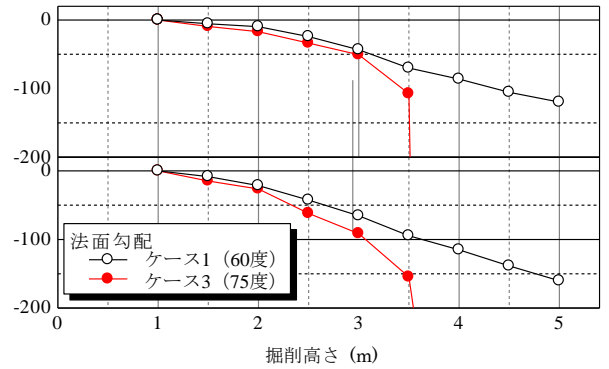
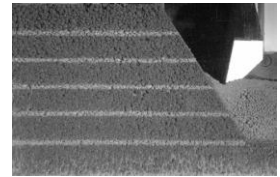
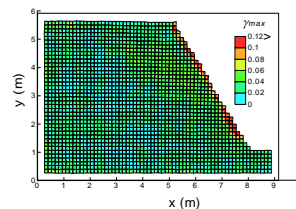
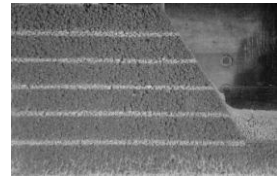
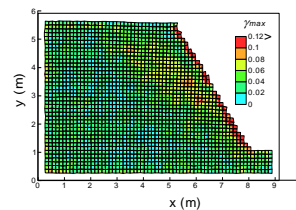


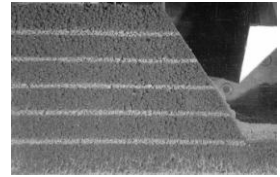
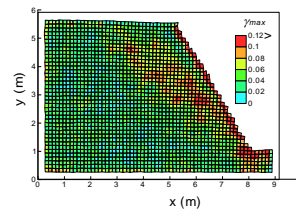
図4 無補強地盤の各段階の鉛直・水平変位



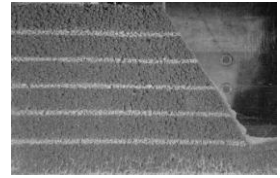
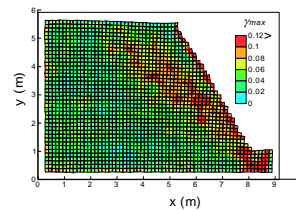
2.5m 掘削



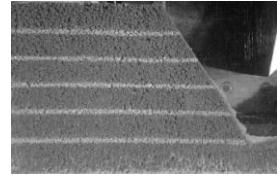
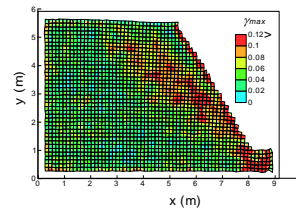
3.5m 掘削



4.5m 掘削



5.0m 掘削



最終状況

図5 PIV画像解析による変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)の推移およびその写真(右)(ケース1, 60度斜面)

ん断ひずみ分布の推移である。最大せん断ひずみの発現はケース1と同様の傾向を示している。しかし斜面勾配が急勾配であるケース3のほうが各掘削段階によって最大せん断ひずみの挙動は大きく変化している。いずれのケースにおいても段階的に斜面上部から切土掘削作業を行うことによってせん断ひずみの集中を避けることが確

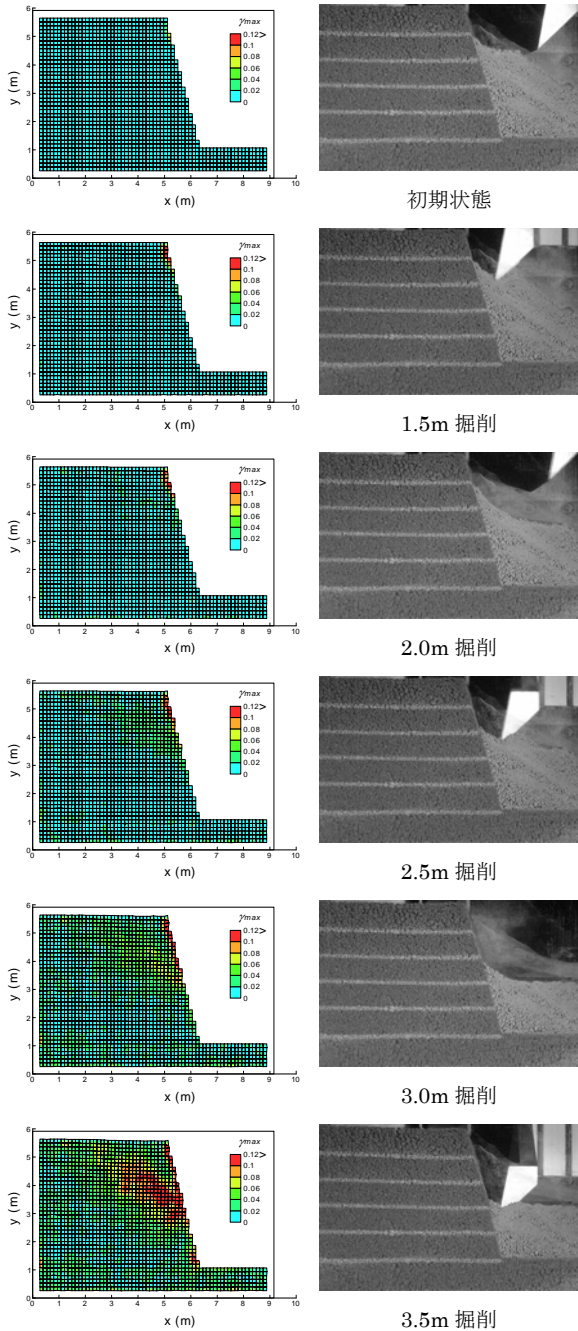


図6 PIV画像解析による変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)の推移およびその写真(右)(ケース3, 75度斜面)

認められた。これは、田山らが示した掘削斜面の挙動<sup>8)</sup>と一致しており、段階的に掘削する「逆巻き施工」によってせん断ひずみの集中を抑えることができることを示した結果とも言える。

## 2) 補強材の有無による斜面補強効果

図7~8に斜面勾配毎の各掘削段階における法面天端の水平変位と鉛直変位をそれぞれ示す。補強材設置によって掘削初期段階では変形が抑制されていることが分かる。ここで、75度斜面の補強材間隔の違いについて、PIV画像解析から得られた変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)とその写真(右)を図9~10に示す。両ケースとも無補強地盤であるケース3(図6)と比較して補強材設置により最大せん断ひずみ分布が斜面の奥

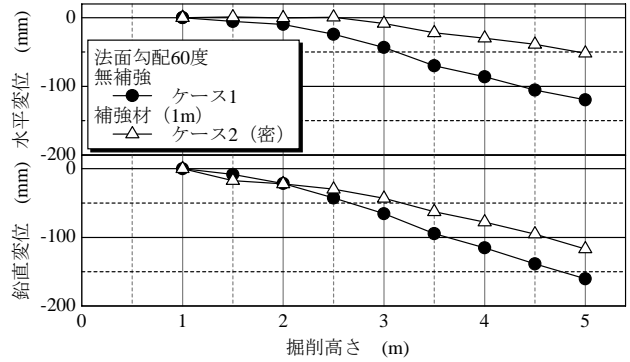


図7 補強材有無の違い(60度斜面)の各段階の鉛直・水平変位

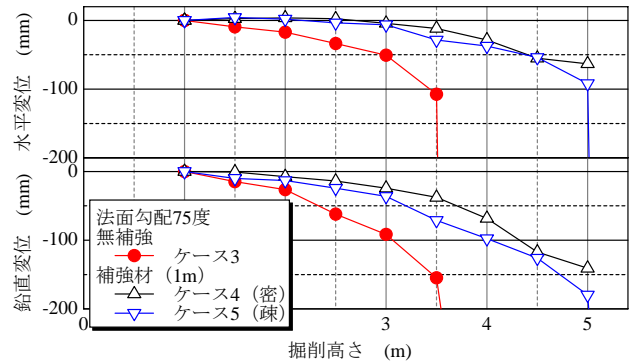


図8 補強材有無の違い(75度斜面)の各段階の鉛直・水平変位

側に移動していることが分かる。このことから1m程度の補強材でも補強材を設置することで補強効果を発揮する事が分かった。なお、補強材間隔の違いは5.0m掘削後に発現し、補強材間隔が疎の場合には補強材の間から中抜けするように小崩壊が発生し、それを起点として全体崩壊に至った。補強材の間隔については各基準等にて目安が決められているが<sup>9)</sup>、中抜けしない程度の補強材間隔を選択する事が斜面安定上重要である。

## 4 まとめ

本研究は、斜面崩壊によるリスクが高いと判断された斜面を簡易的もしくは仮設的に補強する斜面補強工法について、掘削徐荷過程における斜面安定効果を把握するための遠心場掘削実験を実施した。本研究の実験は条件が限定的であるが、得られた知見は以下の通りである。無補強地盤の掘削実験より、

1. PIVによる画像解析結果から、段階的に切土掘削作業を行うことによりひずみが集中せず、せん断帯が広範囲に分布する事を確認した。これは、せん断ひずみの集中を抑えることができることを示した結果とも言える。

補強材設置地盤の掘削実験結果より、

2. 補強材を設置することにより深く掘削出来たことから1m程度の補強材設置でも斜面補強効果があることを確認した。
3. 補強材の設置により最大せん断ひずみ分布が補強材長(1m)程度深くなった。

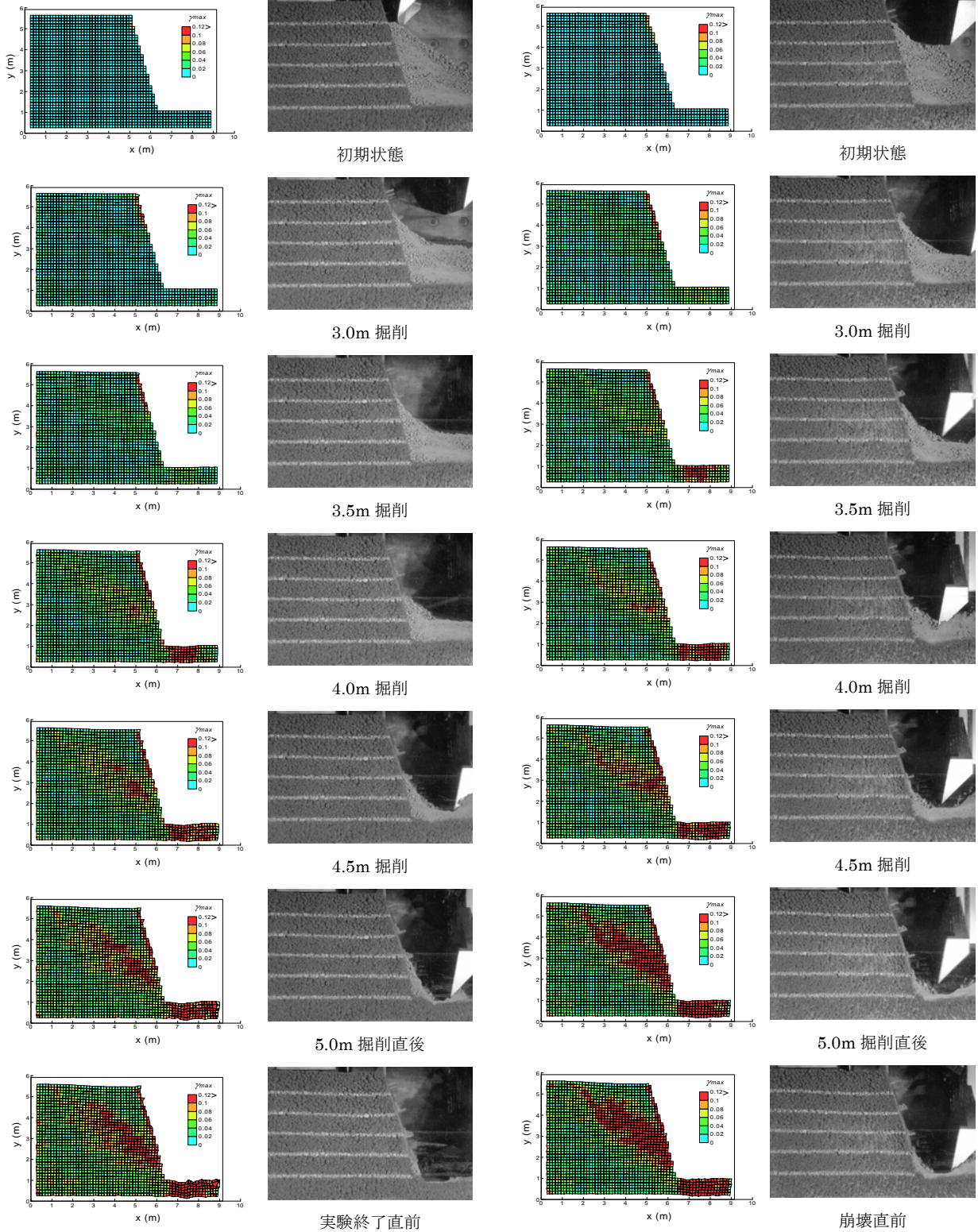


図9 PIV画像解析による変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)の推移およびその写真(右)(ケース4, 75度斜面・密)

図10 PIV画像解析による変形図(等倍)と最大せん断ひずみ分布(左)の推移およびその写真(右)(ケース5, 75度斜面・疎)

- 補強材間隔によっては、中抜けによる小崩壊が起点となり大崩壊となることから補強材間隔の検討も重要である。

今後、法面工の違いによる影響などについても検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 小浪岳治, 小林悟史: ねじり平鋼の引抜き強度特性, 第 46 回地盤工学研究発表会講演集, pp.533-534, 2011
- 2) 伊藤和也, 豊澤康男, Tamrakar S. B., 堀井宣幸: 建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 17-26, 2005.
- 3) (独) 労働安全衛生総合研究所 斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会: 「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関する調査研究会」報告書, [http://www.jniosh.go.jp/results/2010/0407/pdf/report\\_slope\\_201004\\_2.pdf](http://www.jniosh.go.jp/results/2010/0407/pdf/report_slope_201004_2.pdf)
- 4) 吉川直孝: 画像解析による局所変形計測法を用いた砂質土の浅い基礎の支持力発現機構に関する研究, 山口大学博士論文, pp.27-52, 2007.
- 5) 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.
- 6) Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T.: Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test, Soil and Foundation, Vol. 18, No. 1, pp. 25-38, 1978.
- 7) 東日本・中日本・西日本高速道路: 切土補強土工法設計・施工要領, 2007
- 8) 田山聡, 緒方健治, 永吉哲哉, 竹内孝光: 地山補強土工法を用いた掘削斜面の変形計測による安定管理, 土木学会論文集, No.644, VI-46, pp.113-122, 2000.
- 9) 地盤工学会 地盤設計・施工技術委員会編: 地山補強土工法設計・施工マニュアル, 171p, 2011.