

地震により劣化した斜面の崩壊危険性に関する 実験的研究†

堀 智仁*¹ 玉手 聡*¹ 伊藤 和也*¹ 吉川 直孝*¹

近年、我が国では強震度地震が頻発しており、大きな被害をもたらしている。地震発生直後から被災者の救助や被災地への物資を供給するためには寸断された交通網の迅速かつ確な復旧工事が必要とされる。このような工事は、通常の工事に比べ、斜面の崩壊災害が発生しやすい状況で行われることも多く、その危険性を明らかにする事は喫緊の課題となっている。

本研究では、地震による斜面崩壊を再現した遠心場振動台実験を行うとともに、地震によって損傷を受けた斜面をモデル化した遠心場掘削実験および実大規模の実験を実施した。その結果、地震で損傷を受けた斜面には亀裂や緩みが生じることが明らかになった。そのため、地震により損傷を受けた斜面における災害復旧工事では特に斜面崩壊に注意が必要であることがわかった。

キーワード: 土砂崩壊, 災害復旧作業, 劣化斜面, 遠心模型実験, 実大実験

1 はじめに

我が国は古来より幾度となく大地震に見舞われ、甚大な被害を受けてきた。平成 16 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震以降の 7 年間だけでも最大震度 6 強以上の大地震が 7 回（本震のみ）発生している。そのような中、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震およびその後の大規模余震（以下、東日本大震災とよぶ）は、死者 15,861 名、行方不明者 2,939 名、負傷者 6,107 名（平成 24 年 6 月 13 日現在、警察庁発表）¹⁾ となる戦後最大の震災となった。

このような大地震時には、甚大な人的被害はもとより、津波被害、地すべり・崖崩れ・落石などの土砂災害、それに伴う河道閉塞、橋梁の倒壊等による交通網やライフラインの寸断、住宅などの建築物や構造物の倒壊等の被害、火災による建物の延焼等の被害が広域に発生する。地震発生直後から被災地へ物資を供給するためには、寸断された交通網の迅速かつ確な災害復旧工事が必要とされる。そのため、震災復旧工事は、安全のための十分な調査を待たずして開始されることが多く、震災復旧工事を行う作業員は不安全な状況下で作業を行っている場合もある。また、崩れやすい斜面下における崩土の撤去作業では、いつ崩壊してくるかわからない状況での作業となるため、作業員自身が二次災害に巻き込まれることが懸念される。このような緊急の復旧工事を経験した作業員は少なく、中小地場工事業者による工事が行われる場合も多いため、十分な安全対策が行われず、実際に労働災害に発展した事例もある²⁾。このため、通常の工事に比べ土砂崩壊災害が発生しやすい状況下での震災復旧工事について、その危険性を明らかにし、安全作業に必要な情報を提供する必要がある。

本研究は、震災復旧工事の中でも災害の重篤度が高い土砂崩壊災害に着目して、地震による斜面の崩壊を再現した遠心場振動台実験と、そこから得られた崩壊形状を踏まえ、地震によって損傷を受けた斜面をモデル化した

遠心場掘削実験および実大規模の実験を行い、震災復旧工事中における斜面崩壊の危険性について検討した。

2 遠心模型実験による崩壊実験

1) 遠心場振動台実験による一次崩壊の再現

地震により損傷を受けた斜面（以下「劣化斜面」という）を遠心場振動台実験により再現した。特に本研究では見かけ上損傷が著しくなく、危険とは思われない被害状況を再現し、その復旧工事に存在する危険の解明を行った。

(1) 実験概要

本研究では、図 1 に示す遠心模型実験装置³⁾を用いた。振動台は油圧式であり、50G 場において任意の波形で載荷することが可能である。使用した実験容器（アルミ製）は幅 450mm×高さ 270mm×奥行き 150mm である。容器の側面には強化ガラスが備わり、模型斜面の様子が観察できるようになっている。模型斜面は関東ロームで作製した。表 1 に物理特性を示す。

関東ロームを予め最適含水比になるよう調整し、締め固め圧力 50kPa で静的に締め固め、密度が均一な模型地盤を作製した。締め固めの際は 1 層が約 50mm となるよう所定量の試料を投入して締め固めを行った。また、模型地盤下部第 1 層目については後述する斜面が遠心場で沈下しないよう 150kPa で締め固めた。締め固め終了後、図 2 に示す、高さ 250mm の異なる 2 つの勾配（斜面上部が 30 度、下部が 45 度）を持つ模型斜面を作製した。

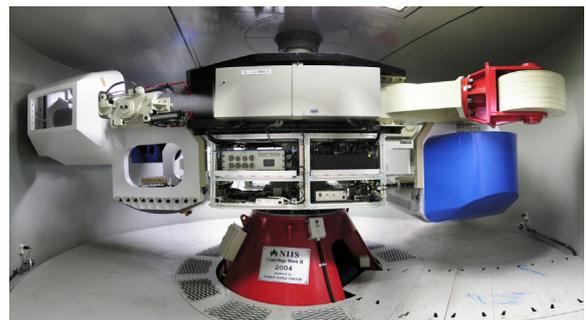


図 1 遠心模型実験装置

*1 建設安全研究グループ

表1 関東ロームの物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.739
液性限界 w_L (%)	158.3
塑性限界 w_P (%)	97.7
塑性指数 I_P	60.6
最適含水比 w_{opt} (%)	102

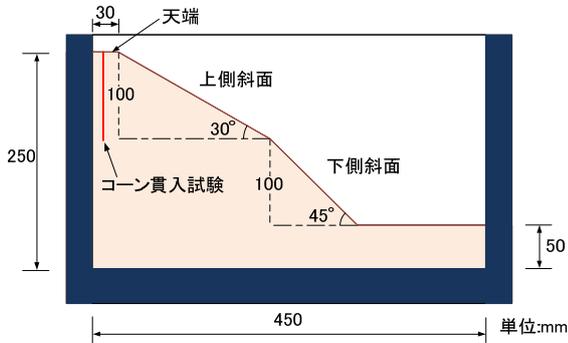


図2 模型斜面の概略図

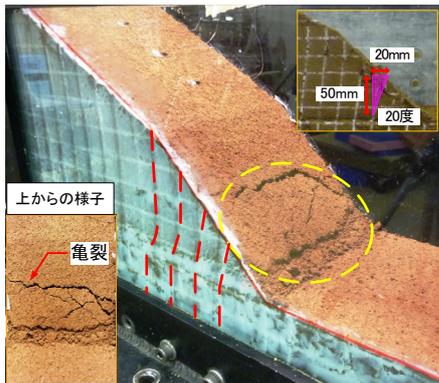


図3 崩壊斜面の様子

加振時に容器壁部と斜面の衝突を緩和する目的で、斜面の上側には30mmの天端を設けた。試料と容器との間には、軟らかなグリス（信越シリコン G-50）を塗布し、さらにその上に透明な食品用ラップフィルムを設置して摩擦を軽減した。

遠心場振動台実験（以下「動的実験」という）は遠心加速度50G場で周波数50Hz、加速度振幅15Gの正弦波を20波与えた。模型実験の相似則から、実大換算値は300gal、周波数1Hzに相当する。

(2) 崩壊斜面の観察

動的実験後の崩壊した斜面の様子を図3に示す。図より下部斜面の中央付近に亀裂が見られ、そこから法先の部分が塊となって移動している。また、斜面側面のグリッドを見ると、縦線が横方向へ湾曲している様子が確認できる。

地表面形状の計測が可能である地表面スキャナにより、崩壊前後の斜面形状を計測した。地表面スキャナには、レーザー変位計が取り付けられており、これを水平方向に一定速度で移動させることにより、斜面の高低とその水平座標が計測できる。計測結果を図4に示す。崩壊前

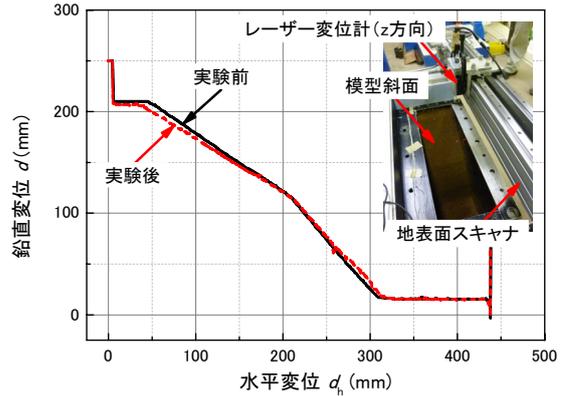


図4 崩壊前後の地表面計測

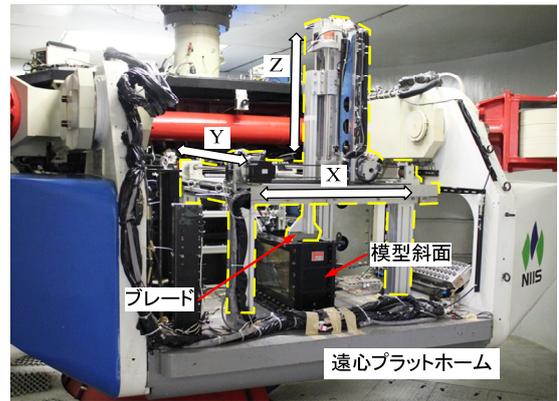


図5 3次元掘削シミュレーター

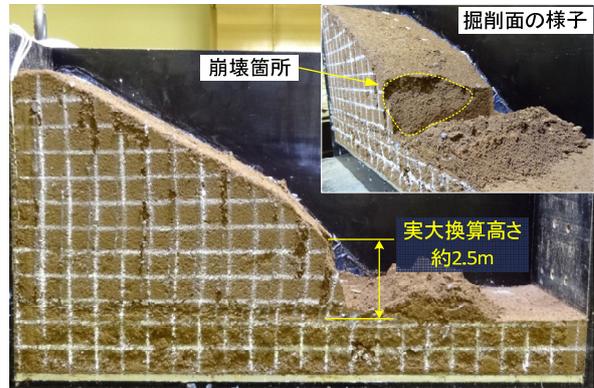


図6 掘削後の模型斜面の様子（動的劣化）

後の形状を比較すると、上側斜面の天端には沈下が見られ、下側斜面の法先付近では変位が生じているものの、斜面は大きな損傷を受けていないように見える。

2) 掘削実験による二次崩壊の再現

動的実験で一次崩壊させた劣化斜面に対して、掘削実験を行い、二次崩壊を再現した。

(1) 劣化斜面の掘削実験

動的実験で劣化した斜面を50Gの遠心場で掘削実験を行った。これは劣化した斜面を地震後に撤去する復旧工事を掘削（切土）で模擬したものである。

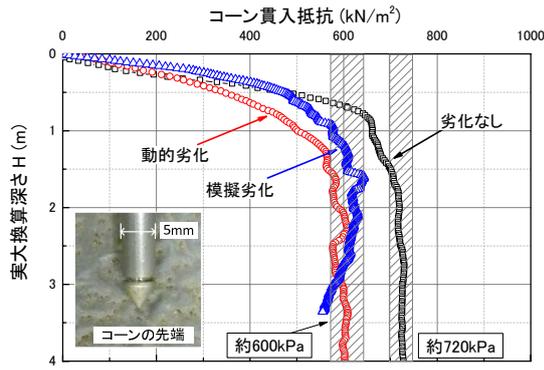


図7 コーン貫入試験結果

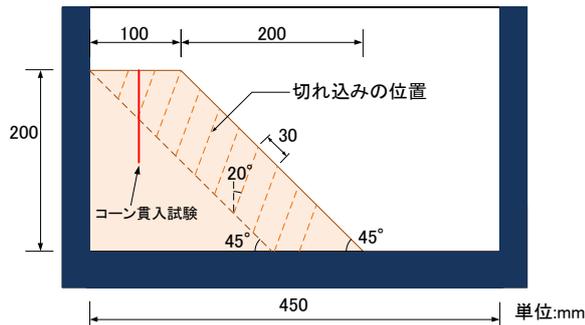


図8 模型斜面の概略図(模擬劣化)

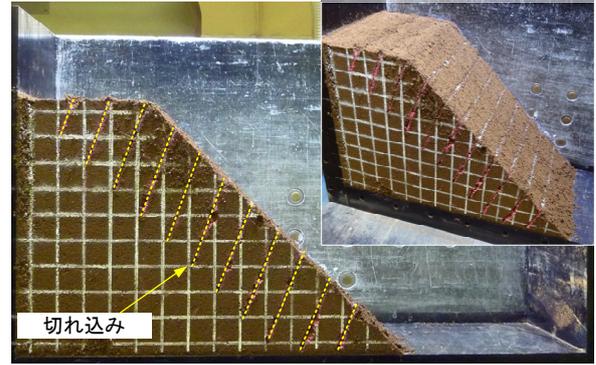
掘削実験には3次元掘削シミュレーター(図5,以下「掘削装置」という)を用いた。この装置は、ブレードをx,y,zの3方向に遠隔操作で稼働することができる。本実験では掘削面の勾配を75度とし、水平方向(y方向)に20mm間隔で実施した。なお、各掘削の間には2分間のインターバルを設け、クリープ的な崩壊の有無についても確認した。

掘削実験の結果、図6に示すように第2切土のときに隣接した上部がブロックとなって崩壊した。

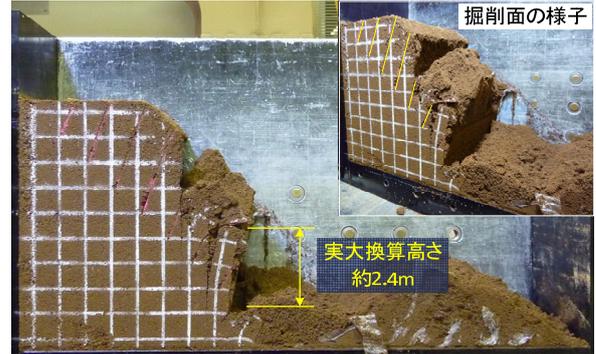
(2) 劣化斜面の調査と分析

先の動的実験で再現された劣化斜面(以下「動的劣化」という)の下側斜面を見ると、図3に示すようにマーキングした縦線が右側に湾曲して水平変位している。この変位は斜面表面で最大となり、法先付近では、亀裂も生じた。この亀裂とマーキング線の傾きを計測したところ、おおよそ20度であることがわかった。

次に動的実験前後の模型斜面にてコーン貫入試験を行い劣化を調査した。本研究で用いたコーンの直径は5mmである。コーン貫入試験の結果を図7に示す。動的劣化によるコーン貫入抵抗は約600kN/m²であるのに対し、劣化していない模型斜面でのコーン貫入抵抗は約720kN/m²であった。その差は120kN/m²であり、動的劣化によって、コーン貫入抵抗が2~3割低下していることがわかった。このことから、劣化に伴う変位はさほど生じていないものの、内部には大きな強度等の変化が生じているといえる。



(a) 掘削実験前



(b) 掘削実験後の様子

図9 掘削前後の模型斜面の様子(模擬劣化)

以上の結果から、地震により劣化した斜面には、亀裂と緩みの2つが生じていることが明らかになった。亀裂は土ブロック間の摩擦が低下していることを、緩みについては動的劣化によるコーン貫入抵抗の低下を意味している。

(3) 人工的劣化の再現と掘削実験

先の実験で明らかになった劣化を人工的に再現して模型斜面(以下「模擬劣化」という)を作製した。その作製では、締固め圧力を50kPaから30kPaに減少させた。これは動的実験後のコーン貫入抵抗値が、動的実験前に比べ2~3割低下していたためである。また、斜面の成形では大きさを1/50モデルから1/20モデルに変更し、先の下側斜面(45度)のみを高さ200mmで作製した。図8に模型斜面の概略図を示す。さらに斜面部分にはワイヤー(線径0.45mm)で切れ込みを与えて亀裂を人工的に再現した。亀裂の角度は動的実験の結果(図3)から20度とした。遠心加速度については実地盤高さが4mとなるよう設定した。

模擬劣化斜面の掘削実験を行ったところ、先の劣化斜面と同様に二次崩壊が再現された。図9に二次崩壊の様子を示す。斜面が崩壊したときの実大換算高さは約2.4mであり、この値は動的実験の結果とほぼ一致した。また、斜面上部が前倒れるように変形しており、亀裂から崩壊が発生していた。損傷を受けていない均質な斜面では、内部に発達したすべり線に沿って崩落するのは異なる現象であり、劣化斜面の特性と考えられる。この結果から、地震後の斜面に大きな変形はなくても、亀裂により土ブロック間の摩擦が低下し、不安定化することがわか

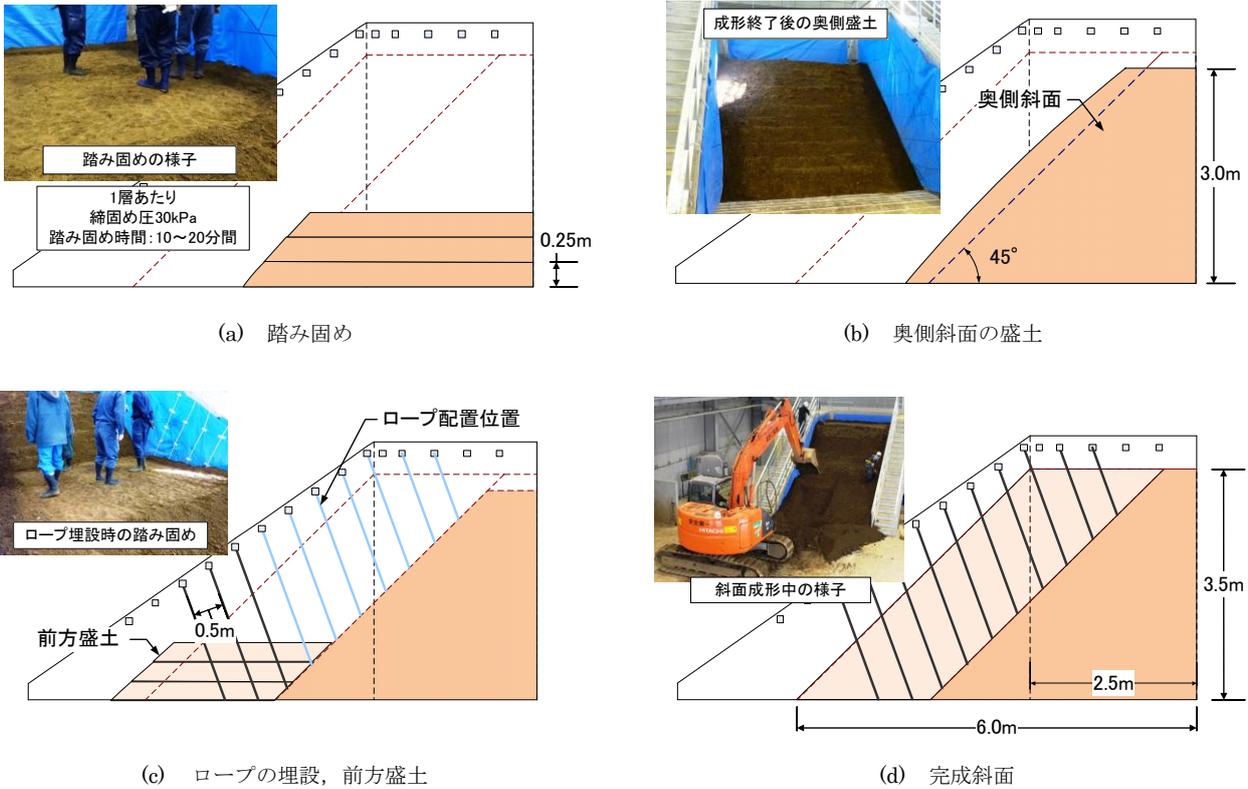
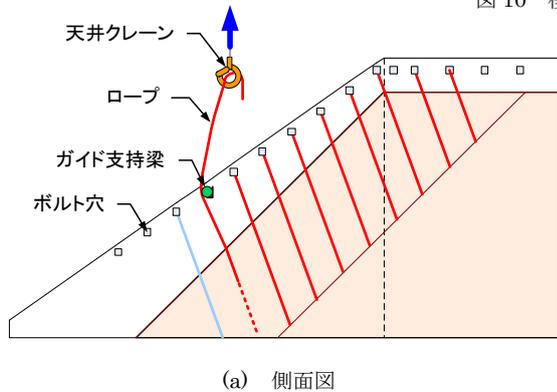
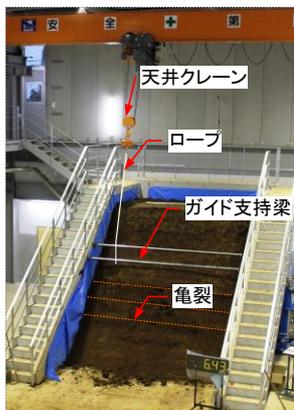


図 10 模型斜面の作製方法



(a) 側面図



(b) 全体図

図 11 ロープ引き抜き作業の概略図

3 大型模型による崩壊実験

1) 実験概要

地震で損傷を受けた斜面を再現し、その震災復旧工事を実大規模で模擬した。今回の実験では前章で示した模擬劣化斜面をモデルに、大型の模型斜面を作製して、崩壊実験を行った。

2) 劣化斜面のモデル化

劣化斜面の大型模型を作製した。その大きさと形状は、斜面高さ 3.5m、幅(横断長) 4.0m、天端長さ(縦断長) 2.5m、斜面勾配 45度である。斜面高さについては、模擬劣化斜面では実大換算 4m の模型斜面を作製したが、コンクリート擁壁の高さが 4m であることから、高さ 3.5m の斜面を作製した。試料には関東ロームを用いた。

図 10 は模型斜面の作製方法を示す。建設機械(以下「ドラグ・ショベル」という)を用いて、最適含水比に調整した試料を三面擁壁内に段階的に投入し撒き出した。1層当たりの撒き出し厚は 0.25m である。締め固めは人間が踏み固めることで行った。これは模擬劣化と同等の圧力(30kPa)で締め固めるためである。踏み固めは 3~5 名で地下足袋を履いて行った。踏み固め時間は、人数と面積に応じて 10~20 分の間で調整した。

盛土は本体となる奥側部分をはじめに作製し、高さ 3m で一旦斜面を 45 度に成形した。続いて亀裂を再現するためのロープを図 11(a)に示すように配置した。ロープは 0.5m 間隔で両壁の内側から床面又は斜面に這うように設置した。その後、本体の前方部に本体と同様に試料を撒き出して踏み固め盛土を高さ 3.5m まで作製した。次に亀裂を再現するためにロープを引き抜いた。図 11(b)に示すように、ロープの片端をクレーンフックに掛け、

った。また先に示した図 7 より、模擬劣化斜面のコーン貫入抵抗は動的劣化と同様の値を示している。

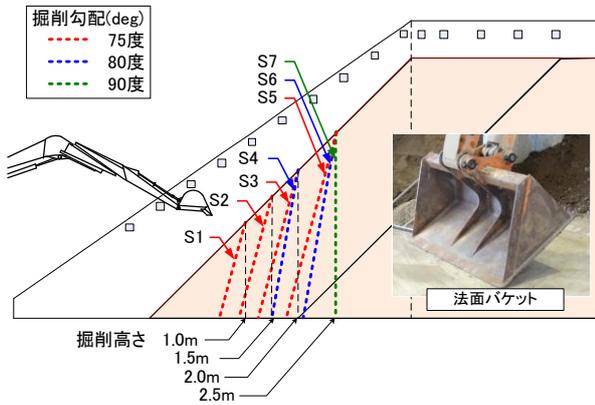


図 12 切土条件の概略図

表 2 切土条件と掘削開始時間

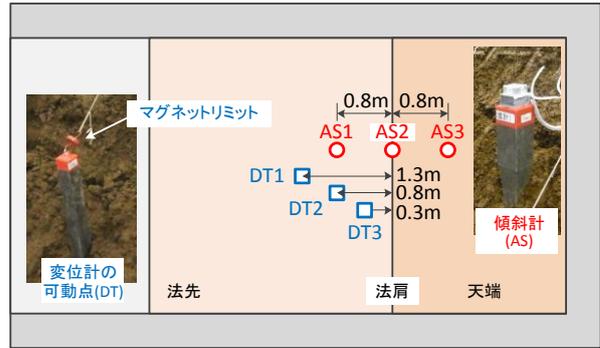
掘削段階	S1	S2	S3	S4	S5	S6
掘削高さ(m)	1	1.5	2	2	2.5	2.5
掘削勾配(度)	75	75	75	80	75	80
開始時間	13:00	13:35	14:09	14:43	15:20	15:49

他端は擁壁上部に固定した。さらに亀裂が所定の角度となるよう、ガイド支持梁を擁壁の左右のボルト穴に固定し、これに沿わせてロープを引き抜いた。

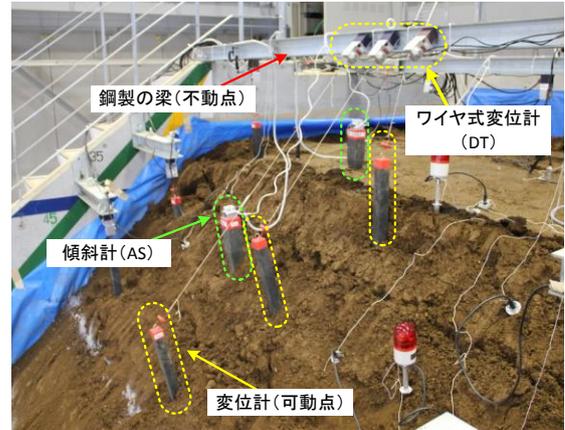
実験は、震災復旧工事の対象作業として劣化斜面の撤去に着目し、この撤去を掘削（切土）でモデル化した。切土作業は、法面バケットを装着したドラグ・ショベルを用いて行った。図 12 は切土条件の概略図を示し、表 2 は切土条件と掘削開始時間を示す。切土は S1~S7 の計 7 段階である。S1 では勾配 75 度、斜面高さ 1m の切土を行った。各段階の切土終了後 30 分間のインターバルを設け、斜面の動きを観察した。斜面が崩壊するまで切土を続け、最終切土の S7 は遠心場での掘削実験と同じ勾配 90 度、高さ 2.5m に設定した。

3) 計測と記録方法

劣化斜面が切土によって不安定化し、崩壊に至る過程を映像とデータで記録した。収録したデータは変位計および傾斜計それぞれ 3 点である。計測機器の配置図を図 13 に示す。変位計測にはワイヤーポテンションメータ（以下「DT」という）を用いた。変位の計測位置は図 13(a)に示す斜面中央の 3 点である。擁壁には図 13(b)に示すように鋼製の梁を両壁に渡し、この不動点に変位計を設置した。斜面には長さ 50cm のプラスチック杭（以下「プラ杭」という）を貫入設置し、これを可動点とした。なお、中間には図 13(a)に示すようにマグネットリミットを配置して、最大に伸長するとマグネットリミット部からワイヤーが分離することで計器等を保護するように工夫した。変位計の可動点は、法肩から 1.3m (DT1)、0.8m (DT2)、0.3m (DT3) の位置にそれぞれ設置した。傾斜計測には三成分加速度計（以下「AS」という）を用いた。AS はプラ杭上面にボルトで固定し、これを斜面に貫入設置した。設置位置は、法肩 (AS2) とその下の 0.8m (AS1) とその上の 0.8m の天端 (AS3) である。



(a)計測機器の配置図



(b)計測機器設置の様子

図 13 計測機器の配置図

またデータ収録では映像と同期させて収録し、映像とデータの比較による分析も行った。

4) 実験結果と考察

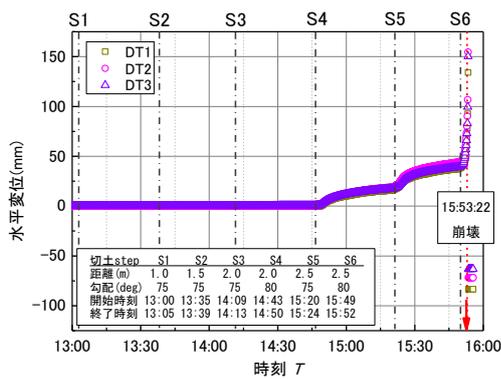
崩壊 3 分前から崩壊までの様子を図 14 にそれぞれ示す。図より、法肩と天端に擁壁の幅 4m にわたってクラックが見られる。クラックは損傷を与えるためにロープを引き抜いた際に発生したものであるが、切土掘削の進行とともに徐々に広がっていった。崩壊直前では、法肩付近から亀裂が大きく開いている様子がわかる。また、崩壊直後は切れ込み部から土塊が倒れ込むように崩壊しており、崩土が広い範囲に堆積している。また、斜面を上方から観察すると、クラックが広がって崩壊に至ることがわかったが、斜面の下方から見た場合にはほとんど変化に気がつかず、斜面の下方から崩壊の危険性を目視で判断することは困難であると感じた。

図 15 は崩壊に至るまでの変位を示す。全体経過を見ると、DT1, DT2, DT3 に共通して、S4 切土終了後から変位は増加している。しかしながら、S4 による変位増加は時間の経過とともに収束している。次の S5 切土でも同様であり、崩壊は S6 切土直後に発生した。図 15(b)に示す拡大図は、崩壊前の 2 分間に着目したものである。変位は崩壊直前に加速度的に増加して崩壊に至っている。また、計測位置の違いにかかわらず、値がほぼ等しいことから、大きな塊状で移動し崩壊したことがわかる。



(a)崩壊 3 分前 (b)崩壊直前 (c)崩壊直後

図 14 崩壊に至るまでの様子



(a)全体経過

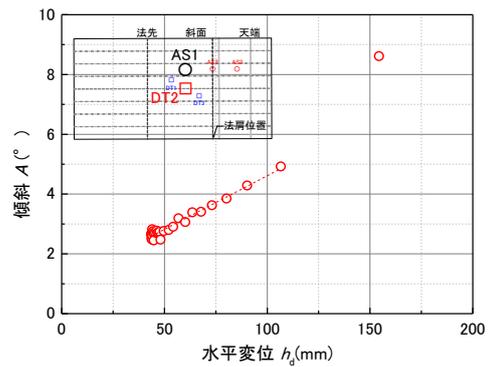
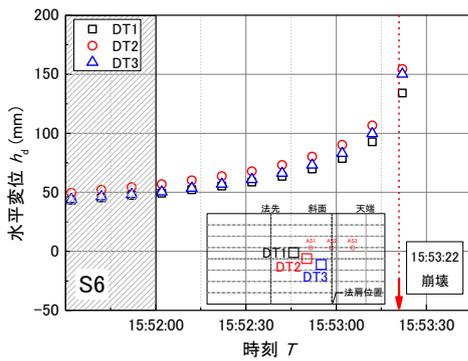


図 16 変位と傾斜の関係



(b)崩壊 2 分前の変位変動

図 15 変位の経時変化

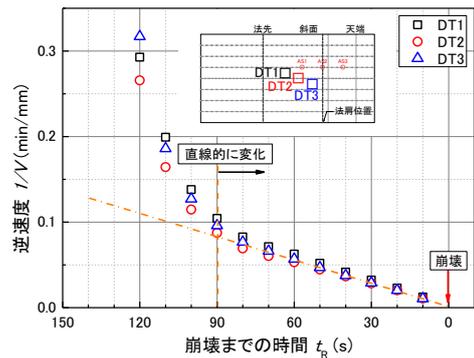


図 17 逆速度と崩壊までの時間の関係

図 16 に、法肩から同じ距離に設置した変位計 (DT2) と傾斜計 (AS1) の計測値の比較を示す。図より、変位と傾斜には概ね直線的な関係が見られる。このことから、今回の劣化斜面モデルでは、一般的な計測方法でも、ある程度崩壊の予兆を捉えることができた。なお、現場での変位計測では不動点の確保を、傾斜計測では建設機械等の振動対策を行うなど、計測精度を確保する必要がある。

図 17 に逆速度 ($1/V$) と崩壊までの時間 (t_R) の関係を示す。 $1/V$ は変位速度の逆数である。図より、崩壊ま

で約 90 秒を境界として曲線から直線的な動きに変化している。この変化は崩壊の予兆と考えられる⁴⁾。

以上の結果から、地震で損傷を受けた斜面においても $1/V$ の変動から崩壊危険性の判定が可能であることが明らかになった。ただし、これは本実験データのみからの結論であるので、一般化にはさらなるデータの集積が必要である。

4 まとめ

本研究では、地震による斜面崩壊を再現した動の実験と、そこから得られた崩壊形状をふまえて地震による劣化斜面をモデル化した掘削実験および大型模型実験を行い、震災復旧工事中における斜面崩壊メカニズムの把握を行った。本研究で得られた具体的な結論を以下に列挙する。

1) 遠心模型実験による崩壊実験

- (1) 地震によって劣化した斜面には、亀裂と緩みの2つが生じていることがわかった。本研究での地盤条件においては、亀裂は約20度の傾きが生じ、緩みについてはコーン貫入抵抗値に2~3割の低下が見られた。
- (2) 動の実験の結果をもとに斜面部分にワイヤーで切れ込みを与えて人工的に模擬した劣化斜面の掘削実験を行ったところ、動的劣化斜面と同様に二次崩壊が再現された。
- (3) 劣化斜面の特性として、地震後に大きな変形はなくても、亀裂と緩みにより斜面が不安定化していることがわかった。

2) 大型模型による崩壊実験

- (1) 亀裂を有する斜面は、不安定化が急激に進行し、トップリング的な崩壊であった。また、斜面上方からの観察ではその変化を知ることができたが、下方からは確認することができず、下方からのみの監視では不十分なことがわかった。
- (2) 劣化斜面が切土によって不安定化し、崩壊に至る過程を変位計および傾斜計により計測した。その結果、変位と傾斜には概ね直線的な関係が見られた。今回の劣化斜面モデルでは、従前からの一般的な計測方法でも、崩壊の予兆を知ることができた。

- (3) 変位計で計測した値から変位速度を算出し、逆速度 ($1/V$) を求めた。その結果、崩壊直前の逆速度は、曲線的な動きから直線的な動きに変化することがわかった。
- (4) 東日本大震災においても、本研究でモデル化した劣化斜面と同様な斜面が多数存在していることが考えられる。表面の植生により、亀裂が目視で確認できない場合もあるため、震災復旧工事では斜面が不安定化していることを想定して、土止め等の十分な安全対策を講じる必要がある。

謝 辞

本研究の実施にあたり、東京都市大学大学院生の三國知温氏、元東京都市大学大学院生の野田昌志氏および元学部生の山本希氏に協力頂いた。この場をお借りして感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 警察庁 東日本大震災について 被害状況と警察措置 <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>
- 2) 伊藤和也, 野田昌志, 吉川直孝, 堀智仁, 玉手聡, 豊澤康男, 末政直晃. 新潟県中越地震・新潟県中越沖地震における災害復旧工事の労働災害に関する調査・分析, 土木学会論文集 F6. 2011; 67,1: 27-40.
- 3) 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, 2006; NIIS-RR-2005, 57-74.
- 4) 福囿輝旗. 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり. 1985; 22(2): 8-13.