

斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の提案

玉手 聡*1 堀 智仁*1 伊藤 和也*1 吉川 直孝*1

土砂崩壊は建設業における労働災害の多くを占め、その防止は安全行政における重要なテーマのひとつに位置づけられている。斜面工事では、土砂崩壊自体を防止する安全対策の実施が原則として推奨される措置であり、具体的には土止め支保工の採用による仮設設備の導入や掘削勾配の変更によるハード的な対策が講じられる。しかしながら災害復旧工事では、緩みや劣化を生じた斜面近傍でやむを得ず緊急的に作業する場合があります。崩壊を想定した安全対策も必要となる。従って、災害復旧工事では斜面崩壊自体の防止のみではなく労働災害の防止という視点から安全対策を考える必要がある。そこで本研究では労働者が土砂の直撃を受けないように避難させることを目的に、計測的手法により崩壊予兆の把握が可能かについて検討した。特に本研究では、工事中の仮設的な計測を考慮して設置と使用が容易な「表層ひずみ棒」を考案し、その性能を確認するための大型模型実験を行った。本実験では掘削終了から約7分後に小崩壊が再現され、さらにその9分後に大崩壊が観察された。この時に計測されたせん断ひずみ増分は小崩壊の約7分前から0.01%/分以上を示し、約2分前からは加速度的に増加した。すなわち、崩壊プロセスにはクリーブ的破壊モードが確認され、そのモードは比較のため計測した変位のそれとも一致した。以上のとおり、本研究では土砂崩壊による被災防止の観点から表層ひずみ棒による簡易計測を考案し、実験的検討から斜面崩壊の予兆を検知しうる可能性があることを明らかにした。そして警報システムの導入により、崩壊前に現場労働者へ避難を促し、土砂の直撃を受けさせないようにする新たな安全対策を提案した。

キーワード: 土砂崩壊, 2次災害, 大型模型実験, 簡易計測, せん断ひずみ, 崩壊予兆.

1 はじめに

土砂崩壊は建設業における労働災害の多くを占めており、その防止は安全行政における重要なテーマのひとつに位置づけられている¹⁾。斜面の崩壊危険性を施工前、施工中、施工後で比較すると、一般的に施工中は最も危険性が高くなる²⁾。そのため、工事では事前対策が原則となっており、構造的な補強や勾配変更による安定化などのハード的な崩壊防止が行われる。しかしながら、例えば災害復旧のような緊急的な作業では想定外の崩壊が発生する危険性もあり、ハードのみの対策には限界も感じられる。斜面工事の安全をより確実なものにするには、崩壊を抑止するだけでなく、仮に崩壊したとしても労働者の生命を守る方策の検討が必要となる。その一つには崩壊前に避難することが挙げられる。

そこで本研究では、労働者が土砂の直撃を受けないよう避難させることを目的に、計測的手法によって崩壊予兆を捉えられないか実験的に調査した。これは従来、地山監視人が目視で行ってきた斜面の観察を、電気式計測で補助するものである。この検討では工事中の仮設的な使用を考慮して、簡易計測を重要条件に位置づけた。

本論文では初めに斜面工事における安全上の問題点を考察し、次いで大型模型斜面による切土掘削実験の概要を述べる。そして斜面の浅い部分のせん断ひずみ増分と崩壊過程の関係から崩壊予兆の検知に対する適用を考察し、最後に、警報で労働者に避難を促すことによって土砂の直撃を受けさせないようにする安全対策を提案する。

2 研究背景と既往の計測技術

工事中に発生した土砂災害による死因は窒息と圧迫が約5割を占め、またその約6割は崩壊土量が50m³未満の小規模崩壊によるものとなっている³⁾。これは、たと

え小規模な崩壊であっても人間を直撃すると命に関わる重大な災害を引き起こすことを意味している。特に斜面を補強する擁壁工事では先手の切土や基礎部の掘削が行われる。労働者は一時的に不安定な斜面に近接して作業する場合があります。その崩壊予兆に気づかず逃げ遅れて土砂の生き埋めとなっている。

斜面崩壊の計測には、図1に示すような地すべりを対象とする様々な方法が存在する。本節ではまずこれらを概説し、中小規模の斜面工事における適用を考察する。

はじめに、GPS計測は米国が開発した人工衛星から発信される電波を受信し、位置を求める測位の方法である。その実施では上空視界の確保が必要とされ⁴⁾、またmm単位の精度を得るためには1回の計測に1時間以上を要する。即時性にやや劣るために変位が速い急傾斜地での崩壊計測には不向き⁵⁾とされており、工事中の斜面についても適用は容易でないと思われる。

次に、斜面の変位増分を測定する方法がある。そのセンサーは伸縮計とも呼ばれ、またワイヤー式変位計を用いた方法が地盤工学会基準(JGS 1725-2003)に示されている⁶⁾。手法上飛来物等がワイヤーに接触すると誤検知する問題があり、また正確な計測には不動点の確保も課題となる。

さらに、傾斜増分を計測する方法には地表面と地中内の2つがあり、計器はそれぞれ地表傾斜計と坑内傾斜計と呼ばれる。地すべりでは地盤中にひずみが累積し、それが地表面の傾斜変動となって現れることが多い。このような段階では伸縮計の設置は難しく地表傾斜計が地すべりの早期検知に有効と言われている⁷⁾。坑内傾斜の測定では挿入式傾斜計や固定式傾斜計が用いられるが、直径100mm以上のボーリング孔を基盤まで設ける必要があり、作業は比較的大がかりとなる。また、埋設した傾斜計は一般に回収が不可能であるため費用も高くなる。

*1 建設安全研究グループ

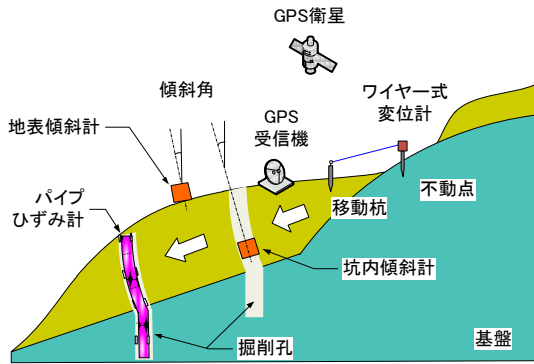


図1 代表的な地すべり計測の方法

また、パイプひずみ計⁸⁾は斜面内部に生じた水平変位の分布を計測して、すべり面の深さを知らるために用いられるセンサーである。測定にはたわみ性パイプをプレボーリングした坑内に設置するが、その深さは基盤までとなるため坑内傾斜計と同様にその計測は大きかりとなる。

以上のように、既往の多くの手法は比較的大がかりであり、コストも要する。施工中の仮設的な計測では簡便で低コストなことが必要条件であり、既往の装置に代わる新たな手法が必要とされている。また災害復旧のような緊急の工事では監視人を配置しつつも不安定な斜面近傍でやむを得ず作業する場合も考えられ、そのような状況では崩壊を想定した安全対策、すなわち人的な被災防止の観点から安全対策を講ずる必要がある。

従来、監視人が目視で斜面を観察してきたが、崩壊予兆の察知には限界もあった。特に微増する初期の変化をいち早く知るためには計測的手法が必要となる。そこで本研究では危険の早期把握により労働者を避難させることを目的に新たな計測的手法を検討することとした。

3 大型模型斜面の切土掘削実験

1) 地盤条件

崩壊土砂の撤去作業を実物大規模で再現する実験を行った⁹⁾。本研究ではこの実験を大型模型実験という。土試料には最適含水比に調整した関東ローム(表1参照)を用い、建設機械で盛土して模型斜面を作製した。図2は模型斜面の概要を示す。模型斜面は土の自重のみで締固め、緩く堆積した崩壊土砂の状態を模擬した。

模型斜面は高さ3.5mに30度の勾配を有し、長さ1.7mの天端が与えられている。斜面の幅は4mであり、擁壁と模型斜面の間には摩擦を軽減するためのブルーシートを配置した。図3は斜面天端にて実施したコーン貫入試験の結果を示す。貫入抵抗(q_c)は貫入深さ(d)に対してほぼ直線的に増加する傾向が見られ、自重による締固めの効果を確認できる。なお $q_c \sim d$ 関係に細かな値の増減が生じているが、その理由は重機による盛土の際に試料の一部がブロック化したためと考えられる。図4はRI法¹⁰⁾と砂置換法¹¹⁾で求めた土の湿潤密度 ρ_t と含水比 w の分布を示す。値に計測手法の違いによる差は見られるが、 ρ_t は1.0から1.2g/cm³であり w は100%前後となっている。

表1 実験に使用した関東ロームの物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.759
砂(0.075~2mm)%	6.2
シルト(0.005~0.075mm)%	45.3
粘土(0.005mm未満)%	48.5
液性限界 w_L (%)	158.3
塑性限界 w_p (%)	97.7
塑性指数 I_p	60.6
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.665
最適含水比 w_{opt} (%)	102.0

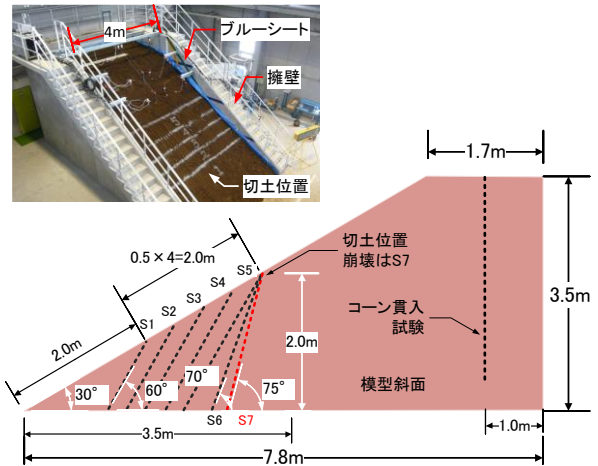


図2 模型斜面の概要切土掘削の位置

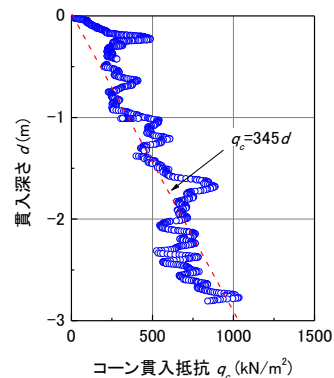


図3 模型斜面の貫入抵抗の分布

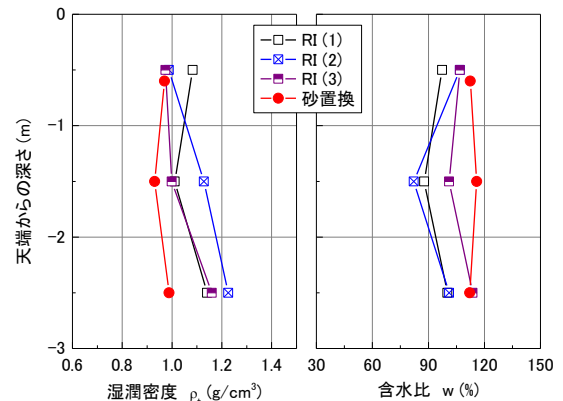


図4 模型斜面の密度と含水比の分布

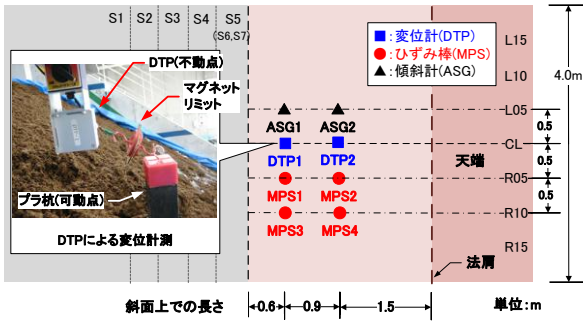


図5 センサーの種類とその配置の平面図

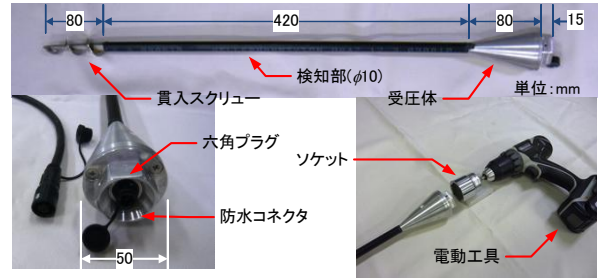


図6 表層ひずみ棒(MPS)の外観

表2 センサーの種類と応答感度

センサー記号	計測項目	応答感度
ASG	傾斜	0.1124 deg/ $\mu\epsilon$
DTP	変位	0.05 mm/ $\mu\epsilon$
MPS	せん断ひずみ	0.0015 %/ $\mu\epsilon$

2) 切土掘削による斜面の不安定化

法先から段階的に切土掘削して模型斜面を不安定化させた。切土は図2に示すようなS1からS7までの7段階である。S1からS5は斜辺長さ0.5m間隔で勾配60度に切土した。S6とS7では、S5と同じ斜面位置から勾配をそれぞれ70度と75度に増加させた。各切土の間に30分のインターバルを設け、この間の変化も計測した。

3) 計測

斜面の変化を記録するために変位計、傾斜計及び後述する表層ひずみ棒の3種類のセンサーを図5のように配置した。変位計(DTP)は斜面中央(CL)の列に2個を0.9m間隔で配置した。DTPによる計測ではセンサー本体を擁壁側不動点に置き、そのワイヤーを可動点と結合させた。また両点の間にはマグネットリミットを配置し、最大伸長後にはワイヤーを分離させてセンサー本体を保護した。傾斜計測には、応答時間を短縮するために加速度計(ASG)を用い、L05列に2個設置した。ASG1とASG2はDTPの位置に対応させた。後述する表層ひずみ棒(MPS)はR05とR10の列に同じくDTPに対応させて設置した。表2はセンサーの種類と計測1 $\mu\epsilon$ 当たりの物理量を応答感度として示す。

4 表層ひずみ棒

1) 装置の概要

本研究では斜面の浅い部分で増加するせん断ひずみを計測するために「表層ひずみ棒」を考案した^{12), 13), 14)}。この装置は短い棒の下端にスクリューを備えたものであり、本稿ではMPSと言う。このMPSは地盤の表面から回転貫入して地中に直接埋設するセンサーであり、斜面内の変位差によって生じるせん断ひずみ増分を棒の曲げで捉えるものである。

2) 装置の形状と構造

MPSは全長595mm、最小直径(棒部)10mm、最大直径(受圧体)質量約3.6Nの小型のセンサーであり、その外観を図6に示す。先端スクリューは長さ80mmであり、



写真1 表層ひずみ棒(MPS)を設置する様子

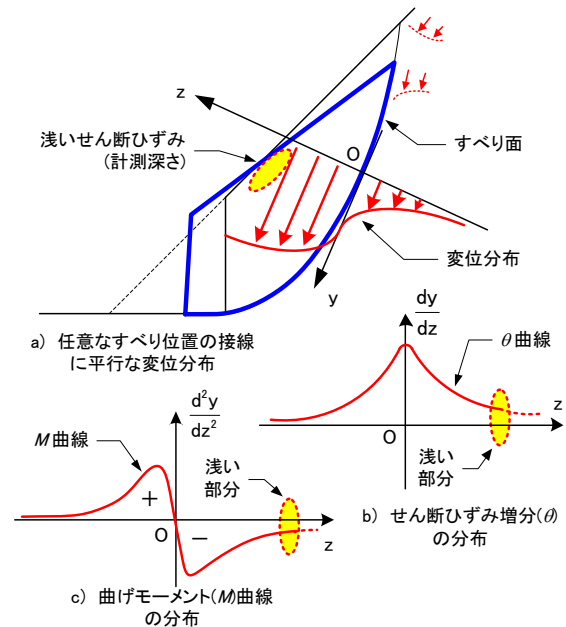


図7 崩壊に伴う浅いせん断ひずみの発生概念

その羽根の高さは約5mm、ピッチは30mmである。検知部は直径(ϕ)10mmであり、構造は中空円筒である。円筒表面にはひずみゲージが貼り付けられ、外側は防水チューブで覆われている。受圧体は円錐状であり、貫入最後に土を押し広げて強く密着する。ひずみゲージからの応答を出力する防水コネクタが受圧体の上面の六角プラグの中央に配置されている。六角プラグの最小直径は32mmであり汎用の電動工具のソケットに契合する。

3) 利便性

写真1はMPSを設置する様子を示す。MPSは下端に

与えたスクリーにより 10 秒程度で設置が可能である。軽量かつコンパクトな構造のため作業員 1 名で持ち運ぶことができ、方法も簡単である。既往の計器の設置ではプレボーリングが必要であったが、MPS では必要無く設置の労力が軽減されている。また、使用する機材は汎用の電動工具のみであり、特別なコストを要しない。さらに、設置に際しては MPS 自身が土を押し広げながら斜面に貫入するため、棒との密着度が高く、さらに最後に上端の逆円錐状の受圧体が強く押し広げて土と一体化する。詳細は後述するがその結果、高い計測感度が得られ、微小な動きにも反応するものとなっている。

4) 検知の概念

図 7 はすべり面上の任意な点 O における変位分布とこれに伴って生ずるせん断ひずみについて、その発生概念を示す¹⁵⁾。すべり面の接線に平行な変位成分はその近傍で急増し、すべり面から離れるにしたがって収束する。ここで着目した変化は、すべり面から離れた場所に関連して生じる微小なせん断変形である。変位分布の接線勾配(1 階微分)はたわみ角、すなわちせん断ひずみ増分(θ)であり、(b)図のように分布する。 θ はすべり面から離れるにしたがって値は急激に減少する。しかし、斜面の浅い部分では値がゼロとはならず、微小なせん断変形は生じていると仮定した。 θ 曲線の接線勾配すなわち変位の 2 階微分は曲げモーメント増分を意味し、(c)図のように分布することとなる。すべり面の前後位置で曲げモーメントは最大となり、距離が増加するに従って値は減少する。しかし、浅い斜面にも小さな曲げモーメント成分は発生すると考え、これを MPS で直接捉えることとした。

5) 表層ひずみ棒の曲げ変形による応答

図 8 は MPS の応答感度と曲げ剛性を示す。(a)は片持ち梁条件を与えた荷重試験の条件を示し、荷重による曲げ変形と換算せん断ひずみを示す。換算せん断ひずみ θ_s は式(1)に示すとおり、MPS の有効長さ L に対するたわみ s の割合と定義し、図に示す曲げ変形(上に凸)による θ_s をマイナスとした。

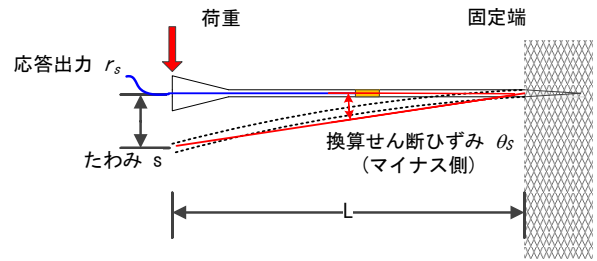
$$\theta_s(\%) = \frac{s}{L} \times 100 \quad (1)$$

(b)は θ_s に対する応答出力 $r_s(\mu\epsilon)$ の関係を示し、 r_s はひずみゲージからの出力である。 $\theta_s < 1$ では θ_s と r_s の間に良好な直線関係が認められ $\theta_s = 1\%$ の時に r_s は $653\mu\epsilon$ 出力する。また、(c)に示す荷重 F とたわみ s の関係もほぼ直線であり、曲げ剛性の計算値は $5.46 \times 10^7 (N \cdot mm)$ である。

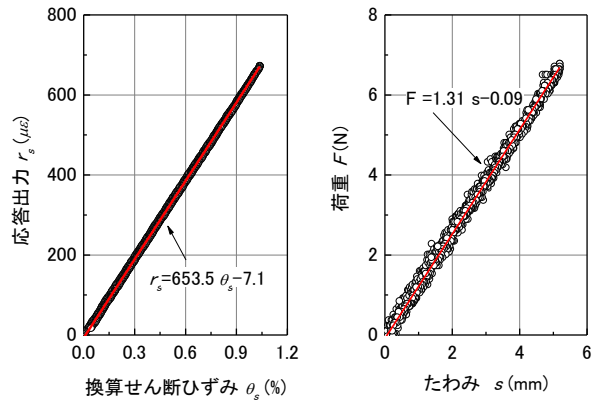
5 崩壊予兆の解析

1) 実験経過と計測反応

図 9 は実験開始から斜面が崩壊に至るまでの各センサーの測定値の時刻歴を示す。13:00 に切土掘削(S1)を開始し、最終の S7 が 16:19 に終了した。写真 2 に示すように崩壊は S7 終了から約 7 分後の小崩壊と約 16 分後の大崩壊の 2 回発生し、その時の反応が各センサーに現れている。MPS による $\Delta\theta_s$ は S4 からマイナス側¹⁶⁾に増加を示しその後 S7 までの間、増加と収束を繰り返す。



(a)表層ひずみ棒(MPS)の曲げ変形と換算せん断ひずみ



(b)換算せん断ひずみと応答出力 (c)たわみと荷重

図 8 表層ひずみ棒の応答感度と曲げ特性

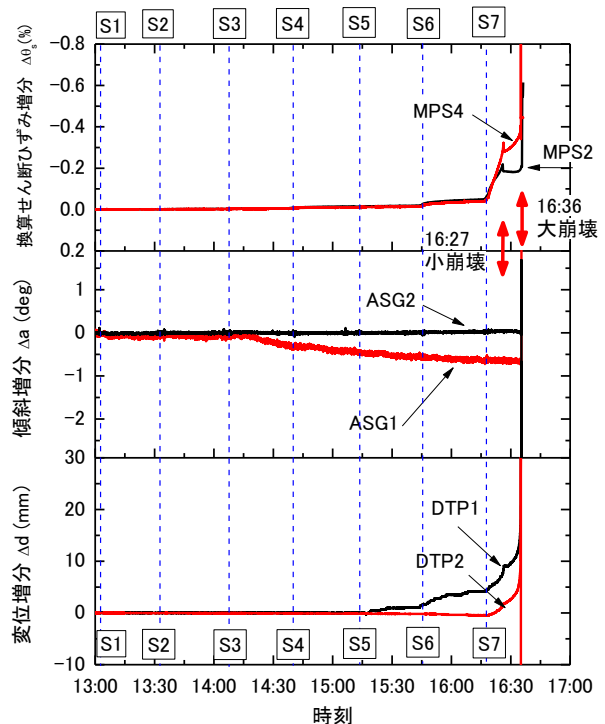


図 9 崩壊に至るまでの各センサーの応答比較

ここで、 $\Delta\theta_s$ の正負は表層ひずみ棒の曲げ方向を意味する。S7 切土を終了しても直ぐには崩壊していない。しかし、 $\Delta\theta_s$ には明確な増加が見られ、約 7 分後に小崩壊が発生した。崩壊ブロックの上部に設置した MPS2 と MPS4 では小崩壊に至るまでの反応がほぼ一致している。さらに両 MPS は小崩壊後も継続した動きを示し、約 9

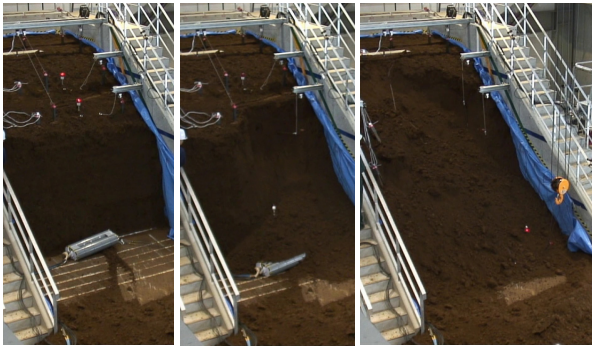


写真2 崩壊する斜面の様子

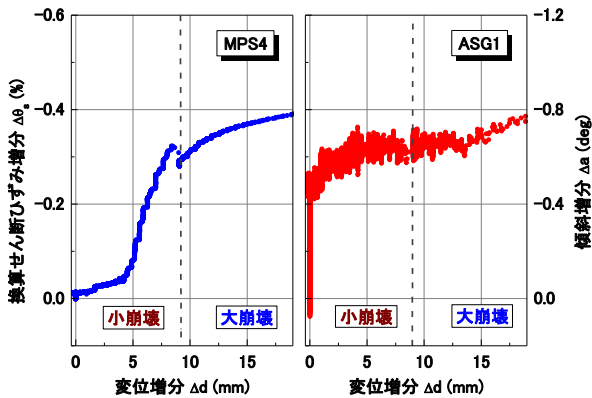


図10 変位増分に対する換算せん断ひずみ増分と傾斜増分

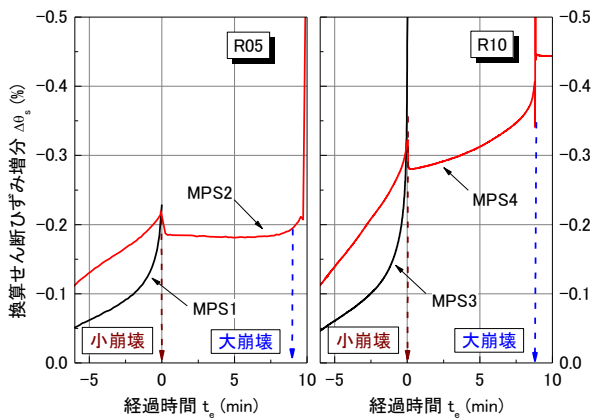


図11 崩壊直前における換算せん断ひずみ増分

分後には再発した大崩壊に対しても数分前から反応が現れている。

傾斜増分(Δa)については斜面下側の ASG1 が S3 からマイナス側に増加を示す。しかしこの反応には、各切土に対するものが確認できず小崩壊に対する変化も見られない。小崩壊の発生場所が斜面に向かって右側であったのに対し、ASG は左側に設置されていたためとも思われるが、その後の全体的な大崩壊に対しても事前の増加は捉えられていない。従って、今回の実験では、両 ASG に共通して大崩壊の発生そのものは知ることができたが、それに至る前の変化を計測することはできなかった。

一方、変位増分(Δd)は斜面下側の DTP1 にまず明確な反応が現れている。S5 では増加後に一旦収束し、S6 で

も同様に繰り返す。しかし S7 以降では DTP1 と DTP2 の増加が継続し、MPS と同様な変化を示している。

2) 変位に対する傾斜とせん断ひずみの反応比較

図 10 は DTP1 の変位増分(Δd)に対する MPS4 の $\Delta\theta_s$ と ASG1 の Δa の反応を示す。 $4 < \Delta d < 7 \text{ mm}$ では $\Delta\theta_s$ がマイナス側に大きく増加しており、小崩壊前の反応が変位と関連を持って敏感に現れている。 $\Delta d > 9 \text{ mm}$ は後の大崩壊に対する反応を意味し、先の小崩壊前の反応に比べて幾分傾きは減少しているものの明確な反応を示している。

一方、 Δa は $\Delta d = 0$ の時に 0 から -0.4 度まで増加しているが、この反応と斜面の不安定化の関係は明確でない。 $4 < \Delta d < 7 \text{ mm}$ における Δa の増分は非常に小さく、その曲線にはデータのバラツキが見られる。

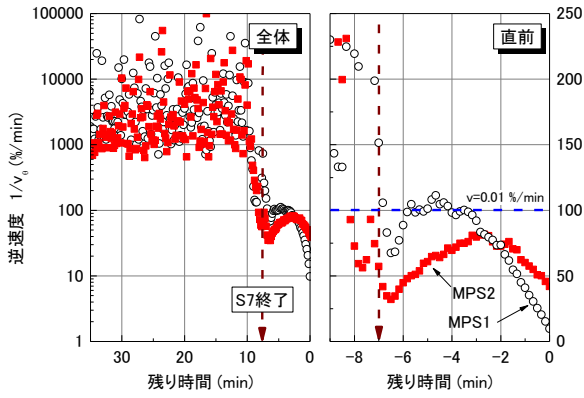
3) 浅い部分のせん断ひずみで検知した崩壊予兆

図 11 は MPS で計測した 2 つの崩壊時の反応を拡大して示し、左が R05 列、右は R10 列のものである。経過時間(t_e)は小崩壊の発生時刻を基準とした値であり、マイナスの値は小崩壊から過去に遡った残り時間を意味する。

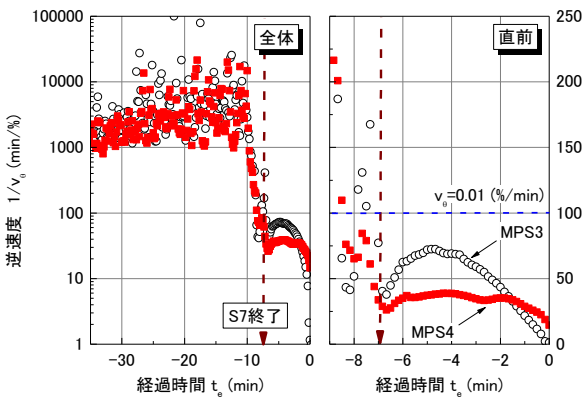
斜面下側に位置した MPS1 と MPS3 は $t_e = 0$ の小崩壊で土砂とともに落下し、MPS2 と MPS4 はその後の大崩壊で落下した。4 つの MPS には小崩壊前に直線的な値の増加が共通して現れている。そして小崩壊のブロック内にあった MPS1 と MPS3 ではその 3 分ほど前から加速度的な増加に変化している。この傾向は大崩壊前の MPS2 と MPS4 に共通している。

図 12 は逆速度と t_e の関係を示す。ここで、せん断ひずみ速度(v_0)を単位時間当たりの $\Delta\theta$ と定義し、この v_0 の絶対値の逆数を逆速度($1/v_0$)という¹⁷⁾。本研究では v_0 を 1 分間に収録したデータから近似計算して求めている。図 12(a)と(b)の左側に示した全体経過の図を見ると t_e は -10 min まで $1/v_0$ が 1000 を超えて分布している。これは v_0 の値が非常に小さく斜面にはほとんど動きがなかったことを意味する。その後 $t_e = -10 \text{ min}$ から $1/v_0$ は劇的な減少を示したが直ぐには崩壊に至らない。この $t_e = -10 \text{ min}$ は S7 を開始した時に対応し、 $t_e = -7 \text{ min}$ はその終了時であるが、 $t_e = -7 \text{ min}$ の時に $1/v_0$ は 100 以下に減少している。右に拡大して示した崩壊直前の図を見ると、 $t_e = -7 \text{ min}$ から -3 min までの間、 $1/v_0$ は 100 以下で停滞するような挙動を示す。この 4 分間、 v_0 は 0.01 から 0.03%/min の速度でせん断ひずみが増加している。その後、崩壊ブロック内にあった MPS1 と MPS3 は共に $t_e = -4 \text{ min}$ から $1/v_0$ が直線的な減少を示しており、すなわち $\Delta\theta_s$ は加速度的に増加して崩壊に至っている。一方、上側の崩壊ブロック外にあった MPS2 と MPS4 ではその直線的な減少が少し遅れて $t_e = -2 \text{ min}$ 頃から現れる。従って、崩壊ブロック内の表層ひずみ棒の方が $\Delta\theta_s$ の加速度的増加は早く現れている。なお、一定速度の定常的なひずみ増加はブロック内と外に共通してほぼ同時に現れており、 $v_0 > 0.01 \text{ \%min}$ を検知した時刻に大きな差は見られなかった。

以上の通り、斜面の浅い部分におけるせん断ひずみの増加を計測したところ、崩壊前にクリープ的破壊傾向が



(a) MPS1 と MPS2



(b) MPS3 と MPS4

図 12 小崩壊までの逆速度の変化

確認された。すなわち、はじめに一定速度でひずみが増加(定常増加)し、その後、加速度的増加へ推移するものであった。今回の実験では崩壊予兆として約 7 分前に 0.01%/min 以上の定常増加が共通して観測され、さらに加速度的増加がブロック内の MPS では 4 分前から、ブロック外(上部)でも 2 分前から捉えられた。

6 危険予測と避難

1) 危険の指標化

大型模型実験では計測した斜面の浅いせん断ひずみにクリープ破壊的な傾向が観察された。そこで、このせん断ひずみの変化と崩壊危険の関係について、齊藤らが示した伸縮量のひずみ速度による破壊の考え方^{18), 19)}を参考に、次のように指標化した。

- ① D1: 一定速度で定常的にせん断ひずみが増加する 2 次クリープ的变化の場合であり、いわゆる黄色信号の状況である。
- ② D2: せん断ひずみが加速度的に増加する 3 次クリープ的变化の場合であり、崩れ始めた特に危険な赤信号の状況である。

D1 と D2 は先の大型模型実験で発生が確認されており、崩壊の予兆を示すものと考えられる。特に D2 は斜面が変形から崩壊に推移した危険な状況である。従って、避難は本来 D2 前に完了すべきものと考えられるが、もし未完了の場合には緊急的な行動が必要な状況である。

表 3 崩壊部と MPS の距離並びに D1 避難の猶予時間

	MPS1	MPS2	MPS3	MPS4
崩壊部と MPS の距離 d (m)	0	0.5	0	0.5
D1 避難の猶予時間 T_{d1} (min)	6.6	8.2	8.5	8.3

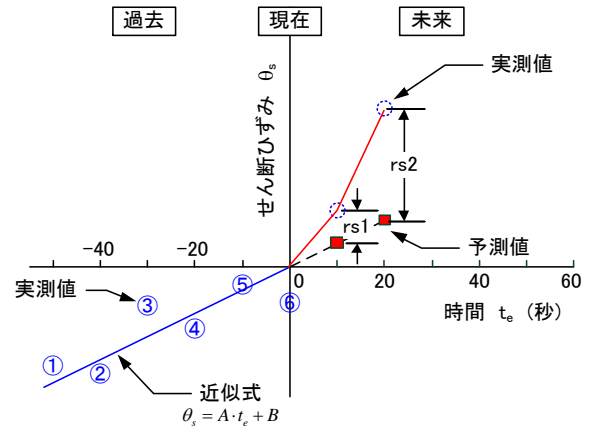


図 13 D2 判別の方法と閾値の設定

2) 危険の判別方法の提案

MPS の計測データから D1 と D2 を判別する解析方法について述べる。収録データから時刻 t_e と換算せん断ひずみ θ_s の回帰分析を行って、式(2)のような直線式の係数 A と B を求める。

$$\theta_s = A \cdot t_e + B \quad (2)$$

ここで、 A はひずみ速度であり先に述べた v_0 と同じ物理量である。なお、後述する警報器では 0.1Hz で収録した 6 組のデータセットに対して回帰分析が行われる。

D1 を判別するための 2 次クリープの変化は A の値が設定した閾値よりも大きくなった場合とし、本研究では先の図 11 の結果を考慮して $|A| > 0.01(\%/min)$ と仮定した。この値は MPS と警報器の電気的な応答感度の性能(表 2 参照)からも検出可能なレベルであり、値は曲げ方向の反転も考慮して絶対値としている。

表 3 は $|A| > 0.01(\%/min)$ と設定した場合の、D1 警報開始から崩壊までの時間を逆解析した結果を示す。ここに示した値は D1 避難の猶予時間を意味するものであり以下、猶予時間 T_{d1} と呼ぶ。また、すべり面と MPS の間の最短距離を d で表し、これがマイナスの値であるものは崩壊ブロック内にあることを意味する。先にも述べたとおり MPS1 と MPS3 は崩壊ブロック内に存在した ($d = -0.4$) が、MPS2 と MPS4 は崩壊ブロック外の上部にあり、 $d = 0.5m$ であった。 T_{d1} は 6.6min から 8.5min となっており、0.5m 程度の設置距離であれば D1 による避難時間に顕著な差は見られない。なお T_{d1} については土の種類や掘削条件によって増減するものであり、さらに 0.5m 以上の平面的な離隔を有する場合の MPS の応答感度については今後調査する必要がある。

D2 を判別するための 3 次クリープ的变化は実測値と予測値の差による評価の方法を用いた。図 13 は 0.1Hz

で計測する場合を例に示す. まず, 直近の1分間に収集した6組の計測データから θ_s と t_e の関係式を式(2)のように求めて先のD1判別を行うが, 同時にこの関係式から10秒後と20秒後のせん断ひずみの予測値を計算させる. そして, 予測時刻となった時に予測値と実測値の差を計算し, 2つの差がともに閾値を上回った場合にD2と判別させる. 従って, D2は10秒後と20秒後の2段階で判別させ, 両方ともに満足した場合のみ一致と判断する. ここで10秒後と20秒後における予測値と実測値の差の閾値をそれぞれ r_{s1} と r_{s2} という.

表4は先の大型模型実験におけるMPSの計測データを逆解析して求めた r_{s1} と r_{s2} の値である. その解析条件は小崩壊発生の60秒前までにD2警報を発することとし, 崩壊80秒前の A 値から予測値を計算し実測値との差を求めた. その結果, 崩壊ブロックの外側にあったMPS2の値が他に比べて小さく現れ, 反応には位置による差も見られた. 崩壊ブロックの内部にあったMPS1とMPS3に着目し, ブロック内設置を前提とした閾値を安全側に選択すると $|r_{s1}| > 2.1 \times 10^{-3} \%$, $|r_{s2}| > 4.0 \times 10^{-3} \%$ となる.

3) 小型警報器の試作

図14は表層ひずみ棒用に試作した小型警報器(以下, 「警報器」という)の構造と斜面に設置した使用イメージを示す. 表5は警報器の諸元と先に提案した警報閾値の設定例を示す. 警報器の接続ケーブルをMPS上端の防水コネクタに接続するとユニットの電源がONとなり, 自動的に計測を開始する. 電源には単2乾電池3本を使用するが, 起動はサンプリング前後の短時間に限定することによって省電力化されており, 通常約20日間の連続運転が可能となっている. なお, 運転中に作動したD1とD2の警報の頻度によって運転時間は減少する. 計測はMPS1本に対して警報器1台の関係であり, サンプリング周波数は0.1Hzである.

警報器の内部には電子回路が組み込まれており, データの収録とD1とD2の判別が自動的に実行される. 警報は, 例えば表5に示す閾値から判別し, 発することが可能である. D1警報では赤色ライトが点滅して現場に第一段の危険を知らせる. さらに, D2警報では赤色ライトの点滅が早くなるとともにブザーが鳴って第2段の警報を知らせる²⁰⁾. なお, パソコンとの接続により, 閾値の変更やデータの回収を行うことができる.

掘削をドラグ・ショベル等の建設機械で行う場合には, たとえ小規模な崩壊が発生しても労働者の直接的な被災には至らないが, 労働者がいるところで崩壊すると命に関わる. そのため, モニタリング位置は掘削後の作業を想定する必要があり, MPSは図5のように最終掘削面の上方へ設置して用いることが有効と考える.

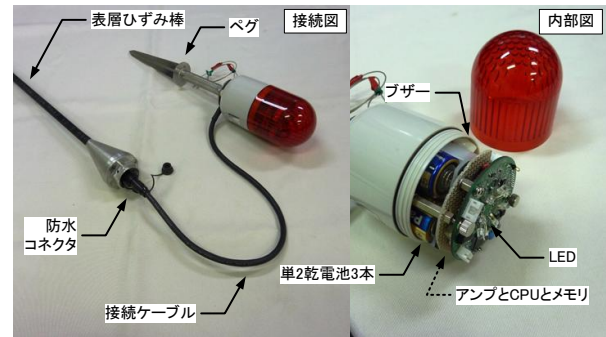
MPSを崩壊ブロック内に設置した場合は, その位置に関わらずほぼ同様な反応が現れることを実験から確認したが, この崩壊ブロックの位置を現場で正確に予測することは容易でない. 従って, 配置場所については「崩壊すると労働者に危害が及ぶ部分」への設置を基本とし, その作業は掘削前に行っておく必要がある.

表4 崩壊60秒前にD2警報させる閾値を逆解析した結果

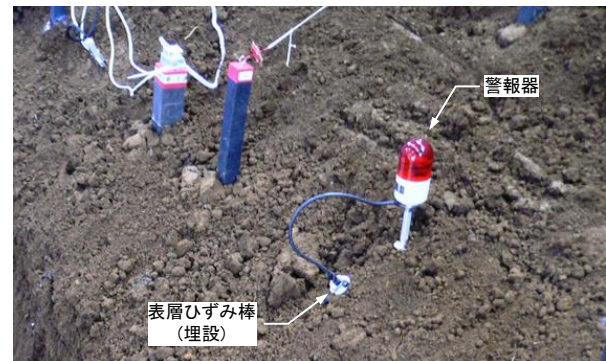
	MPS1	MPS2	MPS3	MPS4
崩壊80秒前の A ($\times 10^{-2}$ %/min)	1.9	1.4	3.5	3.1
r_{s1} ($\times 10^{-3}$ %)	2.1	0.3	5.4	11.1
r_{s2} ($\times 10^{-3}$ %)	4.0	1.5	8.8	9.9

表5 表層ひずみ棒の小型警報器の主な諸元と警報設定例

電源	単2形アルカリ乾電池 連続運転時間	4.5V (3本) 約20日間
データ収録	チャンネル数 サンプリング周波数	1ch 0.1Hz
傾向分析	最小二乗法による 回帰計算	$\theta_s = A \cdot t_e + B$
D1警報 ライト点滅	判別の閾値 $ A > 0.01$ (%/min)	1分間(6点)のデータの直線近似によるせん断ひずみの増加速度から判別.
D2警報 ライト+警報音	判別の閾値 $ r_{s1} > 2.1 \times 10^{-3} \%$ and $ r_{s2} > 4.0 \times 10^{-3} \%$	10秒後と20秒後におけるせん断ひずみの実測値と予測値の差から判別.



(a) 小型警報器の接続と内部の構造



(b) 斜面に設置した表層ひずみ棒と警報器

図14 小型警報器の構造と使用イメージ

斜面現場における避難速度²¹⁾は0.5から1.3m/secと言われており, 中小規模な現場における比較的短距離な避難への適用を前提とすれば, 数分の避難時間は労働者の命を十分救うものとなる. なお簡易計測による予兆把握には性能的な限界があることも頭念におく必要がある. 特に崩壊規模が大きな場合には避難時間も長く必要となるため, 危険レベルの考え方も変える必要がある²²⁾.

以上の通り、施工中における現場斜面の変化を簡易に計測し、その崩壊危険性を知るための表層ひずみ棒(MPS)を開発した。さらにその収録データを現場で直接解析して、危険を D1 と D2 の 2 つのレベルで判別するための警報器を製作した。この作製では、施工中の仮設的な使用を考慮して、コンパクトで簡易に使用できるよう工夫した。このように斜面工事における安全監視の補助と災害復旧のような危険を伴う作業での安全対策を提案した。なお警報ランプとブザーの認知性については改善すべき部分も残されており、引き続き性能的な向上にも取り組みたいと考えている。

7 まとめ

本研究では土砂崩壊による労働者の被災防止をという観点から安全対策を検討した。この検討では労働者が土砂の直撃を受けないように避難させることを目的に、計測的手法による崩壊予兆の把握について実験的に調査した。特に本研究では工事中の仮設的な使用を考慮して、設置と使用が容易な表層ひずみ棒を考案し、その性能を確認するための大型模型実験を行った。本研究で明らかにした主な内容は次の通りである。

- ① 斜面工事中の崩壊は遅れて発生する場合があります、このような時間遅れが現場作業員に誤った安全の判断を与える可能性もあることがわかった。さらに、一度崩壊した斜面には再崩壊の危険があり、不用意に近づくことは危険なことが明らかになった。
- ② 表層ひずみ棒で斜面の浅い部分のせん断ひずみを計測したところ、崩壊の約 7 分前には一定速度の増加が現れ、さらに約 2 分前には加速度的に増加するデータが計測された。すなわちクリープ的破壊モードが斜面崩壊のプロセスに確認され、その増加傾向は比較のため計測した変位のそれとも一致することがわかった。
- ③ 変位計は不動点確保や占有面積の問題から工事現場での使用が容易でないことがある。また傾斜計では、今回崩壊の発生そのものを知ることはできたが、それに至る前の変化を計測することはできなかった。一方、表層ひずみ棒は単体の出力から崩壊前の反応を捉えることができた。表層ひずみ棒の大きさは長さ約 60cm とコンパクトであり工事の妨げにもなりにくいいため、現場での計測に広く適用できる可能性がある。
- ④ せん断ひずみの 2 次クリープの変化と 3 次クリープ的变化の発生をそれぞれ危険レベル D1 と D2 と定義した。D1 はせん断ひずみ速度 A を閾値に、D2 は収録データの傾向から予測した値と実測値の差 r_{s1} 、 r_{s2} を閾値として判別する方法を提案した。
- ⑤ 大型模型実験の計測データを逆解析して求めた D1 警報と D2 警報の設定値を例示した。D2 警報については、予測値と計測値の差を用いた加速度的な増加の判別を導入し、崩壊 1 分前に警報を発するために必要な閾値の試算結果を示した。
- ⑥ D1 警報で数分の避難時間を確保できれば、中小規模の工事現場では労働者をほぼ避難させることができ、

土砂の直撃を受けさせないようにできる。さらに D2 警報では危険の増加を確認することができ、避難が未完了な場合にも緊急的な行動を促して、重篤な人的被災を防げることを述べた。

- ⑦ 表層ひずみ棒に接続して使用する小型警報器を試作し、現場における崩壊監視のコンセプトを示した。本警報器は乾電池 3 本で約 20 日間駆動するものであり、ケーブル接続のみで自動的に計測を開始する。現場で計測して直ちに警報を発することが可能であり、崩壊前に避難させることができる。このように、土砂の直撃による労働災害を防止する安全対策を提案した。

以上の通り、本研究では土砂崩壊による人的被災防止の観点から表層ひずみ棒による簡易計測を考案し、実験的検討から崩壊予兆が捉えられることを明らかにした。そして D1 と D2 の 2 段階で危険レベルを定義し、警報により労働者を避難させる新たな安全対策を提案した。なお表層ひずみ棒による予兆把握には、崩壊機序の違いや装置の簡便さによる性能的な限界があることも念頭に置く必要がある。ここで提案した簡易計測は、従来目視で行ってきた地山監視を補助することが主目的であり、土質や施工条件の違いによって警報時間や反応には差を生じる可能性もあることに注意が必要である。従って、実務では性能を過信せず補助的な利用とすることも提案したい。簡易計測による避難への適用については、引き続き研究を継続させ、崩壊の検知性能と警報の認知性能を向上させたいと考えている。

謝辞

本研究の実施にご協力頂いた東京都市大学大学院生の三國智温さん及び卒業生の野田昌志氏と山本希氏並びにご指導賜った片田敏行教授と末政直晃教授に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 厚生労働省. 労働災害防止計画. 2008 : 1-21.
- 2) 豊澤康男, 伊藤和也, 堀井宣幸. 土砂崩壊災害防止の観点から見た斜面掘削工事における施工上の問題点. 第 41 回地盤工学研究発表会論文集, 2006 : 1-2.
- 3) 伊藤和也, 豊澤康男, 堀井宣幸. 切土掘削工事現場における斜面崩壊による労働災害の調査・分析. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOOSH-SRR-NO.35(2007). 2008 : 7-18.
- 4) 神谷康司, 藤井哲也, 増成友宏. GPS 変位計測による上空障害物の影響調査と精度改善手法の検討. 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集. 2006 : 435-436.
- 5) 古野電気株式会社 : <http://www.furuno.co.jp/product/gps/terrain/principle.html>.
- 6) 地盤調査の方法と解説. 伸縮計を用いた地表面移動測定方法(JGS 1725-2003). 地盤工学会. 2004 : 619-627.
- 7) 地盤調査の方法と解説: 水管式地盤傾斜計を用いた地表面の傾斜変動量測定方法(JGS 1721-2003). 地盤工学会. 2003 : 628-634

- 8) 地盤調査の方法と解説. 地中ひずみ計を用いた地すべり面測定方法(JGS 1731-2003). 地盤工学会. 2003:643-651.
- 9) 玉手聡, 堀智仁, 伊藤和也, 吉川直孝, 三國智温, 末政直晃, 片田敏行. 実大規模実験による斜面の浅いせん断ひずみと崩壊予兆の解析. 第 47 回地盤工学研究発表会論文集. 2012: 1833-1834.
- 10) 地盤調査の方法と解説: RI 計器による土の密度試験の方法(JGS 1614-2003). 地盤工学会. 2003: 592-604.
- 11) 地盤調査の方法と解説: 砂置換法による土の密度試験方法(JIS A 1214-2001). 地盤工学会. 2003: 563-570.
- 12) 玉手聡, 貫入型パイプひずみ計, P4942348, 特許公報. 2012: 1-11.
- 13) Satoshi Tamate, PENETRATION-TYPE PIPE STRAIN GAUGE, US. Patent No. 7,762,143 B2, 2010.7.27.
- 14) 玉手聡, 貫入型パイプひずみ計, P2012-32330A, 公開特許公報. 2012: 1-13.
- 15) 玉手聡, 伊藤和也, Surendara B Tamrakar. 表層ひずみ計測による施工時斜面の崩壊監視に関する実験的研究. 土木学会論文集 C. 2009; 65(1): 1-18.
- 16) 三國智温, 末政直晃, 片田敏行, 玉手聡, 堀智仁. 震災後斜面における土砂撤去の実験的モデル化と崩壊計測. 第 47 回地盤工学研究発表会論文集. 2012: 1647-1648.
- 17) 福園輝旗. 表面移動速度の逆数を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.
- 18) 斉藤迪孝, 斜面崩壊発生時刻の予知, 土と基礎, 1969; 17(2): 29-38.
- 19) 斉藤迪孝, 斜面崩壊の予測について, 土と基礎, 1972; 20(2): 13-19.
- 20) (独)労働安全衛生総合研究所: 土砂崩壊の実大シミュレーション実験, <http://www.jniosh.go.jp/group/construction/simulation/simulation.html>
- 21) 豊澤康男, 堀井宜幸. 現場避難実験による土石流発生時の避難時間の検討. 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.25(2002); 2003: 25-37.
- 22) 玉手聡, 遠藤明. 斜面工事における簡易な安全監視のためのスクリー貫入形表層ひずみ計の開発とその適用性に関する実験的研究, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOOSH-SRR-NO.35(2007); 2008: 107-128.