

害が発生しやすい突発的で急激な小規模崩壊についても精度良い計測が可能で、崩壊直前の前兆現象を捉えることが出来ることを確認した。具体的な結論は、以下のとおりである。

- 1) 試料として川砂を用いて行った室内模型実験では、崩壊前に0.1度以下の微小な傾斜を捉えることが出来た。
- 2) 崩壊の前兆現象を表す加速度的な角度の増加を捉えることが出来るかは、設置位置に大きく依存する。今回の一連の実験では、法肩に設置した傾斜計が最も感度が良く崩壊の前兆現象を捉えた。
- 3) 微小な傾斜を計測するため、斜面にはある程度深くロッドなどを差し込むなど、斜面の表層変形を感度良く捉える工夫が必要である。
- 4) 現場における実物大実験から、砂質系地盤では室内模型実験と同様に法肩に設置した傾斜計では崩壊前に加速度的な角度の増加傾向を示し、崩壊の前兆現象を捉えることが出来た。粘性土地盤では、砂質系地盤とは異なり、崩壊する土塊上に設置された傾斜計において崩壊前に加速度的な角度の増加傾向を示し、崩壊の前兆現象を捉えることが出来た。地盤種類の違いなどによって設置位置を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、建設業災害防止協会：平成17年度版建設業安全衛生年鑑，建設業災害防止協会，212p，2005。
- 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) Terzaghi, K. and Peck, R. B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willy & Sons, Inc., 1969.
- 4) 切土法面の調査・設計から施工まで編集委員会編：地盤工学・実務シリーズ 5 切土法面の調査・設計から施工まで，476p，1998。
- 5) 地盤技術者のための情報化設計・施工入門編集委員会編：入門シリーズ 26 地盤技術者のための情報化設計・施工入門，162p，2000。
- 6) 国見敬，納谷六郎，堀井直彦：車両運動制御用高性能加速度センサの開発，自動車技術，Vol.55, No.10, pp. 48-53, 2001。
- 7) 伊藤和也，豊澤康男，Tamrakar S. B. , Timpong S. , 堀井宣幸：切土掘削工事中における斜面崩壊メカニズムに関する検討，労働安全衛生総合研究所特別研究報告，JNIOSSH-SRR-NO.35 (2007) ， 投稿中。
- 8) S.B.Tamrakar, 豊澤康男, 伊藤和也, 有木高明：実大実験による法面掘削に起因する斜面崩壊の前兆現象の検討，安全工学シンポジウム vol. 35, pp. 319~322, 2005。
- 9) 笠間太樹，田中洋行，S.B.Tamrakar, 豊澤康男：遠心力载荷実験による砂質土の斜面崩壊の再現，第41回地盤工学研究発表会概要集，pp. 953-954, 2007。
- 10) S. B. タムラカル，豊澤康男，伊藤和

也 ; Development of Tilt-sensor for advance prediction of failure and its applicability in the field excavation, 第36回安全工学シンポジウム(港区), pp.169-172, 2006.

- 11) S・B・タムラカル, 豊澤康男, 伊藤和也, S. ティムポン ; Relationship between critical failure height and trench excavation depth in relation to centrifuge tests performed with In-flight excavator, 第36回安全工学シンポジウム(港区), pp.173-176, 2006.

3.5 健康危機情報

なし

3.6 研究発表

1. 論文発表

- (1) S.B. Tamrakar, Y. Toyosawa, S. Timpong : Slope failure measurement with new tilt sensors just before failure, 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Kolkata), 2007 (CD-ROM版)
- (2) S.B. Tamrakar, T. Mitachi, Y. Toyosawa, K. Itoh : Possible use of Tilt-sensor for failure movement and failure plane just before slope failure, Proceeding of International Geotechnical symposium on Geotechnical Engineering for disaster prevention and reduction (Russia), pp.247-252, 2007
- (3) S.B. Tamrakar, 豊澤康男, 伊藤和也 : Measurement of slope movement

using tilt sensor in the slope excavation field during and just before the failure, First North American Landslide Conference (Vail, Colorado), pp.1041-1050, 2007

- (4) S. B. Tamrakar, Y. Toyosawa, H. Tanaka, K. Itoh : Possibility of measurement of slope movement during the sandy soil slope failure in centrifuge, Sea to Sky Geotechnique 2006 (Canada), CD-ROM版, pp.351-358, 2006
- (5) S. B. Tamrakar, Y. Toyosawa, K. Itoh, S. Timpong : Failure heights comparison during excavation using in-flight excavator, International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2006 (TC2 of the ISSMGE), 2006年8月
- (6) Tamrakar S.B., Y Toyosawa, Itoh K., Horii N. and Kusakabe S ; Failure Mechanism of Slopes in the Centrifuge using in-flight Excavator, The International Symposium on Landslide Hazards in Organic Zones, from the Himalaya to Island Arcs in Asia, pp.255-264, 2005
- (7) Tamrakar S.B., Mitachi T., Y Toyosawa, Itoh K. and Ariki T ; Measurement of slope movement during the slope excavation of small size full scale model, The International Symposium on Landslide Hazards in Organic Zones, from the Himalaya to Island Arcs in Asia, pp.265-274, 2005
- #### 2. 学会発表
- (1) S・B・タムラカル, 豊澤康男, 伊藤和也, S. ティムポン ; Relationship between

critical failure height and trench excavation depth in relation to centrifuge tests performed with In-flight excavator, 第 36 回安全工学シンポジウム(港区), pp.173-176, 2006

(2) S・B・タムラカル, 豊澤康男, 伊藤和也 ; Development of Tilt-sensor for advance prediction of failure and its applicability in the field excavation, 第 36 回安全工学シンポジウム(港区), pp.169-172, 2006

(3) S・B・タムラカル, 豊澤康男, 伊藤和也, 有木高明;実大実験による法面掘削に起因する斜面崩壊の前兆現象の検討, 第 35 回安全工学シンポジウム, pp.319-322, 2005

(4) S.B.Tamrakar, Y. Toyosawa, K. Itoh, T. Kunimi, A. Nishijo, S. Okubo ; Comparison of slope failure trend just before failure in the field using newly developed tilt-sensor, 土木学会第 61 回年次学術講演会 (滋賀), CD-ROM 版 3-219, pp.433-434, 2006

(5) S.B.Tamrakar, Y. Toyosawa, K. Itoh, T. Kunimi, A. Nishijo, S. Okubo ; Development of Tilt-sensor and possibility of measurement of failure trend just before the failure, 平成 18 年度地盤工学研究発表会(鹿児島), CD-ROM 版 Vol.41, pp.2253-2254, 2006

(6) 笠間大樹, 田中洋行, S・B・タムラカル, 豊澤康男;遠心力載荷実験による砂質土の斜面崩壊の再現, 平成 18 年度地盤工学研究発表会(鹿児島), CD-ROM 版 Vol.41, pp.953-954, 2006

(7) S・B・タムラカル, 豊澤康男, 伊藤和也 ; Measurement of Tensile and the

effect of finer particles, 第 60 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM 版 No.60, pp.179-180, 2005

(8) 豊澤康男, 伊藤和也, S・B・タムラカル, 有木高明;法尻掘削に起因する土砂崩壊の小規模実大実験, 第 60 回土木学会年次学術講演会, CD-ROM 版 No.60, pp.339-340, 2005

4. 斜面の変位・崩壊の予測および危険性判定手法

分担研究者 田中洋行 北海道大学 大学院 准教授

主任研究者 三田地利之 北海道大学 大学院 教授

研究要旨：

斜面崩壊による労働災害では、降雨の影響を無視することはできない。そこで、本章では、降雨による地盤中の間隙水圧の挙動に関して遠心場での模型実験を実施した。その結果、均一な地盤より透水係数が異なる複数の層から成る地盤ほど崩壊が生じやすく、かつ崩壊は斜面表層に限定的に生じかつ突発的であることなどを確認した。このような降雨による斜面崩壊では、のり方の変位から破壊を予知することは非常に難しく、降雨時の災害を回避するには、降雨強度があるレベルを超えた場合、作業を中止することが必要である。

4.1 降雨による地盤中の間隙水圧の挙動に関する遠心実験

降雨によって崩壊を起こす可能性のある斜面は、地下水位が地面より下の不飽和である場合が多い。不飽和によってもたらされたサクシオンは見かけ上の粘着力を生じるために、斜面は重力に対して安定している。しかし、降雨によって飽和度が上昇し、この過程においてサクシオンが消失し、このため斜面崩壊が生じると考えられる。この現象を数値的に再現するためには、サクシオンと見かけ上の粘着力の関係に加えて、サクシオンと飽和度の関係、飽和度の変化による透水性の変化も考慮する必要がある。数値実験を行うためには、この3つの関係を対象とする地盤に対して

パラメーター化し、さらにカップリングを計る必要がある。しかし、現在においても、これらの現象を要素レベルにおいて再現することは非常に難しく、実用に足るパラメーターの測定方法および解析手法は未だ完成していない。このような現状において、模型実験は古典的であるが、最も実用的な手法である。

模型実験において、実大規模の模型実験が望ましいが、コスト・時間の観点から実施は非常に難しい。このため、地盤の分野では縮尺模型実験が広く行われているが、縮尺を小さくすると、相似則という問題が生じてくる。他の材料と比べて地盤の強度や変形係数は小さいので、自重の影響は無視することはできない。例えば、縮尺模型

において、自重によって生じる応力、例えば土被り圧は、縮尺の $1/n$ となる (n は縮尺比)。したがって、自重が大きな比重を占める斜面の安定問題では、抵抗モーメントとドライブモーメントの比を実物と一致させるためには、ドライブモーメントが小さくなった分、抵抗モーメントすなわち強度を実物より低減させれば良い。すなわち、縮尺比が n とすれば、ドライブモーメントが $1/n$ となるので、抵抗モーメントを $1/n$ 、すなわちせん断強度を $1/n$ とすれば、両モーメントの比は実物と同じになる。しかし、せん断強度を実物の $1/n$ とすることは、実験テクニック上、非常に難しい。遠心力模型実験は、模型に遠心加速度を加えることにより、自重を n 倍にして、縮尺によって現象したドライブモーメントを実物と同じにする手法である。すなわち、縮尺が n とすると地球の加速度の n 倍、すなわち nG を縮尺模型に加えることによって、せん断強度が実物と同じ地盤、すなわち実物と同じ土を用いることができる。

さて、今回のような降雨の場合には相似則はどうなるであろうか？ 今回の実験では、降雨による地盤内の水分の移動が最も重要である。水分の移動は導水勾配によって生じる。遠心場では導水勾配が加速度によって n 倍となるので、透水係数が見かけ上 n 倍となり、水の移動は n 倍、実物より早くなる。したがって、降雨強度は n 倍、時間は n^2 倍早く現象が進行する。主な相似則を表 4.1 に示す。

不飽和土地盤は、以下の手順で作成した。砂、粘土、水を所定の配合で十分に攪拌した試料を、一層当たりの厚さが 2.5cm で、

表 4.1 降雨時における遠心模型実験における主な相似則

	実地盤換算
長さ(m)	n
時間(sec)	n^2
応力(kPa)	1
降雨強度(m/sec)	$1/n$

飽和度が 50% となるように模型土槽 (W45 × D20 × H40cm) 内で締め固める。その際に、間隙水圧計を所定の深さに設置する。この作業を繰り返し行い (全部で八層)、平坦な地盤を作製する。その後、斜面角度を 45° 、斜面高さ 15cm となるように削り出し、斜面地盤を作製する。また、斜面地盤の法先には排水口を設け、降雨の際、水は排水口により土槽外部へと排水される。模型土槽を遠心模型実験装置に設置後、所定の遠心加速度を載荷し、間隙水圧計の値が安定するまで、すなわち遠心加速度による地盤内の水分移動が十分に行われるまで放置し、その後、降雨を模した散水を行った。

表 4.1 に示した相似則に従って、実物に寸法を換算した模型斜面地盤を図 4.1 および 4.2 に示す。

地盤は図-4.1 および 4.2 に示すように 2 種類の層からなっている。透水係数を変化させるために、豊浦標準砂と笠岡粘土を質量比 100 : 0 (以下、粘土分 0%)、質量比 95 : 5 (以下、粘土分 5%)、質量比 90 : 10 (以下、粘土分 10%) の割合で混合した三種類の地盤を用いた。

4.2 降雨による斜面崩壊のメカニズムと破壊状況

表 4.2 に実験条件と斜面崩壊の有無を

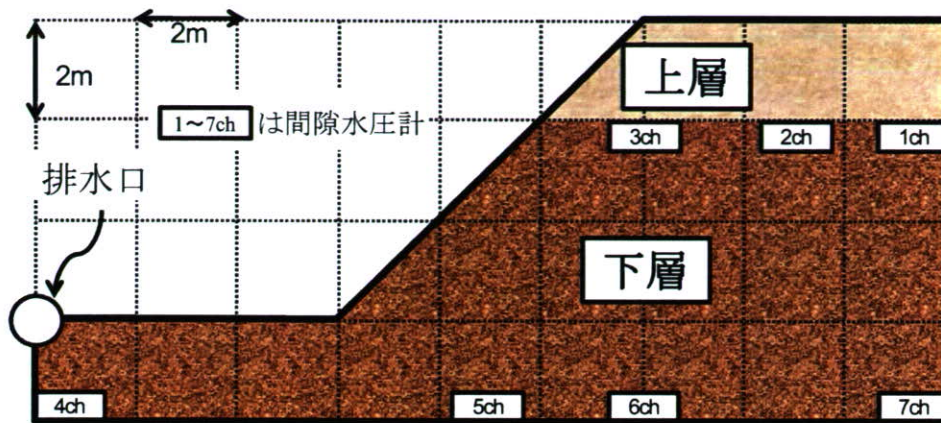


図 4.1 上層が 2m の場合

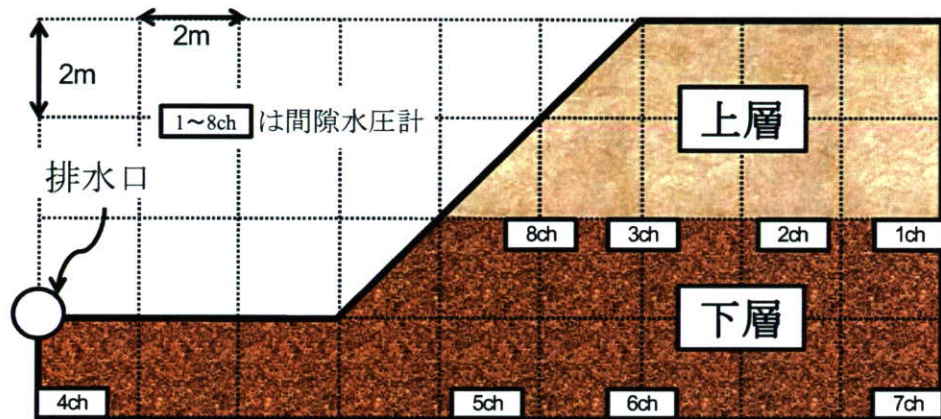


図 4.2 上層が 4m の場合

表 4.2 実験条件

実験	上層 粘土分(%)	下層 粘土分(%)	降雨強度 (mm/hr)	降雨時間 (hr)	斜面崩壊
①	0	5	30	14.8	×
②	5	10			×
③	0	10			○
④	0	5	15	29.6	×
⑤	5	10			×
⑥	0	10			○
⑦	0	5	30	14.8	×
⑧	5	10			×
⑨	0	10			○

注) 遠心加速度は全て40(G) 斜面崩壊: ×は崩壊せず, ○は崩壊

示す。遠心加速度は全て 40G で行い、降雨強度は 30mm/hr および 15mm/hr で行った。また、降雨時間は 15 時間および 30 時間である。これらの降雨強度および降雨

時間は実際に起こる降雨と比べて、かなり厳しい条件である。

斜面崩壊が生じたのは、上層の厚さに関わらず、上層が粘土分 0%で下層が粘土分

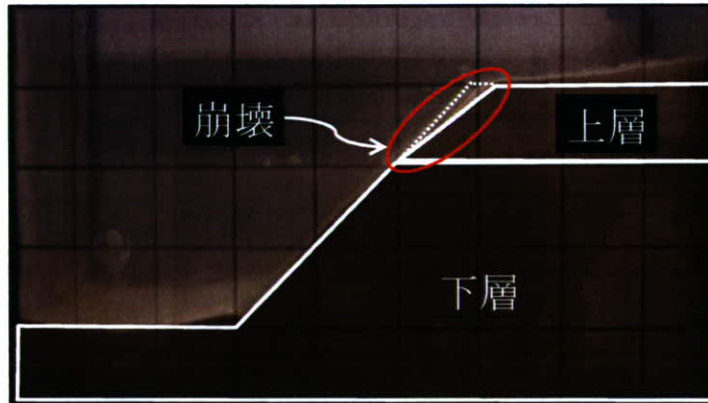


図 4.3 斜面の崩壊状況 (上層の層厚が 2m の場合)

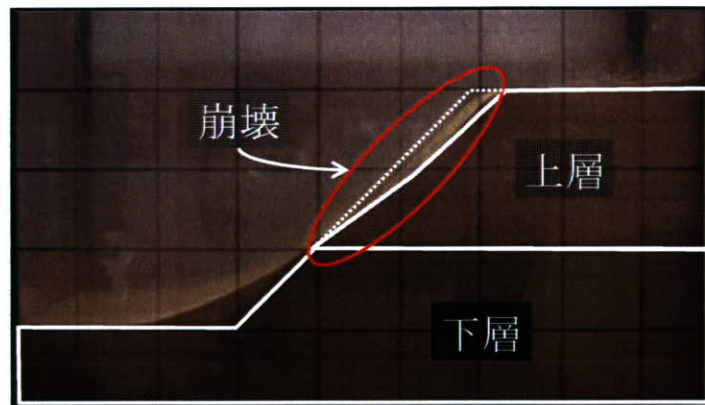


図 4.4 斜面の崩壊状況 (上層の層厚が 4m の場合)

10%の条件である。

図 4.3 および 4.4 は、崩壊した斜面の写真である。実験③と実験⑥は同じ破壊状況であったので、実験③の写真を示す。上層の斜面崩壊のメカニズムを調べるために、まず、実験①～③を比較してみる。実験①では斜面崩壊が生じなかったため、必ずしも上層の粘土分が 0%であると崩壊するわけではない。図 4.5 および 4.7 に実験①～③の地下水面の時間変化を示す。地盤内の間隙水圧は静水圧分布していると考え、設置した間隙水圧計から地下水面を求めた。上層と下層の境界面の地下水位に着目す

ると、実験①では、境界面に地下水面は形成されていないことがわかる。これは、上層、下層ともに粘土分が少ないので、透水係数が大きく、図に示すように雨水が境界面に溜まることなく下層に全て浸透したと考えられる。しかし、実験②、③では、上層と下層の境界面の間隙水圧が上昇していることから、一時的に地下水面が形成されたことがわかる。これは、下層の粘土分が 10%なので、降雨強度に対して相対的に透水係数が小さい。このため、境界面に雨水が溜まったと考えられる。

境界面に地下水面が形成された実験②と③とを比較すると、実験③の方が上層の粘土分が少ない。境界面に溜まった雨水は

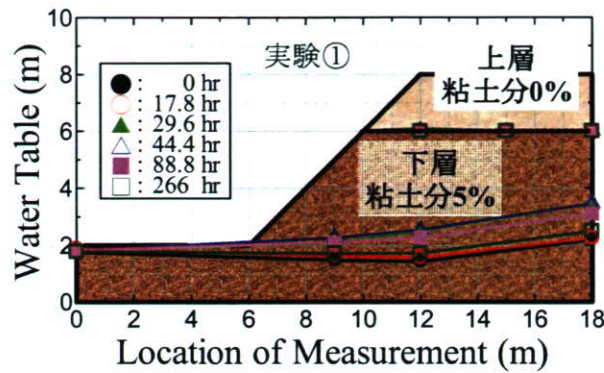


図 4.5 地下水位の変化 (実験①)

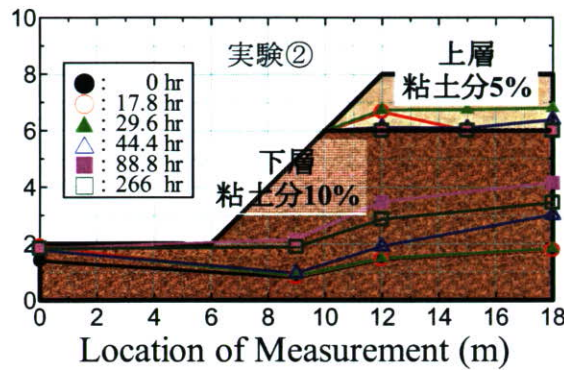


図 4.6 地下水位の変化 (実験②)

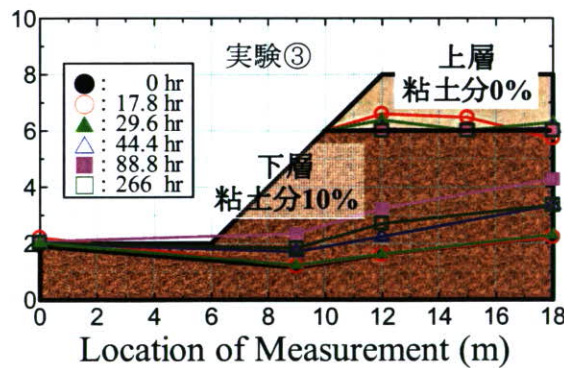


図 4.7 地下水位の変化 (実験③)

斜面表面に向かって移動し、この水の流れによって、斜面が崩壊したと考えられる。すなわち、二層地盤の斜面崩壊は、上層と下層の透水係数の差が大きくなると境界面に雨水が溜まり、さらに上層の粘土分が少ない(透水係数大きい)と斜面表面に向かって水が流れ、この浸透圧によって斜面崩壊が生じたと考えられる。

次に実験①～③と地盤条件は同じであるが、降雨強度が小さい(15mm/hr)実験④～⑥をしてみる。この条件においても実験⑥(上層：粘土分 0%、下層：粘土分 10%)のみに斜面崩壊が生じ、斜面崩壊の状況は実験③と同様であった。このことから、降雨強度の違いは斜面崩壊を生じさせる大きな要因にはならないと考えられる。しか

し、今回の実験では、降雨強度が 15～30(mm/hr)と狭い範囲にあるため、今後、降雨強度を様々に変えて確認する必要がある。

上層の層厚が異なる実験⑦～⑨でも、実験⑨(上層:粘土分 0%, 下層:粘土分 10%)で斜面崩壊が生じた。図 4.3 および 4.4 に示すように、上層が 2m の場合と破壊の状況は同じであるが、上層が厚くなると破壊する範囲は大きくなるのがわかる。よって、層厚の違いが斜面崩壊を生じさせる大きな要因とはならないが、上層が厚くなると崩壊が大規模になることがわかる。しかし、この影響因子も降雨強度の影響と同様、今後、様々に実験条件を変化させて実験を行うことを考えている。

4.3 降雨による斜面崩壊の予知

4.2 に示したように、比較的透水係数が大きな 2 層から成る地盤を対象として、降雨による斜面崩壊を遠心力载荷模型実験によって再現した。この結果、①均一な地盤より透水係数が異なる複数の層からなる地盤の方が、斜面崩壊を生じやすいこと、②斜面崩壊は限られた表層で起こること、がわかった。特に②については、さらに破壊状況を詳細に記述すると、2～3 回に分かれて斜面が崩壊していることが、実験時の観察から確認されている。したがって、このような場合には、のり方の変位から破壊を予知することは非常に難しいことがわかる。今回行った実験では斜面の崩壊は、何の前兆もなく、突然表層が崩壊した。したがって、このような崩壊の予知は非常に難しく、斜面崩壊による人身事故を回避するためには、天気予報などの情報から降雨

強度があるレベルを超えると作業を中止する方法が最良の方法と考えられる。

4.4 健康危機情報

なし

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総合研究報告書

5. 検知・警報システムの開発

分担研究者 伊藤和也 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 研究員
主任研究者 三田地利之 北海道大学 大学院 教授
分担研究者 田中洋行 北海道大学 大学院 准教授
分担研究者 豊澤康男 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 部長

研究要旨：

斜面崩壊による労働災害を防止するために、3章・4章において様々な原因による斜面変形・崩壊の予測および計測器による計測の可能性について検討を行ってきた。本章では、これらの成果および既往の研究での計測結果をもとにして斜面崩壊の検知・警報システムの試作を行い、警報発信レベルについての検討を行った。

5.1 研究目的

斜面崩壊による労働災害を防止するために、3章および4章にて斜面変形・崩壊の予測および計測器による計測の可能性について検討を行ってきた。これらの成果を受け、本章では、斜面崩壊の検知・警報システムの開発を行う。

5.2 研究方法

5.2.1 検知・警報システムの試作・検討

労働災害となるような斜面崩壊は地すべり等の自然現象とは大きく異なり、時間的余裕が無く一瞬のうちに土塊の滑動が起こることや、崩壊の前兆現象が顕著に表れる場合が少ない。そのため、崩壊現象の発生の予測が非常に困難な場合が多い。このよ

うに前兆現象が現れず、突如崩壊するような現象として、岩盤斜面の崩壊が挙げられる。岩盤斜面では1996年2月に発生した北海道豊浜トンネル坑口岩盤斜面崩壊事故や、その後の第二白糸トンネルの大規模崩壊などにより岩盤斜面の調査、危険箇所安定性の予知・予測、そして対策方法などが多く議論され、それに伴い調査技術、解析技術、計測技術、対策技術が開発・検討されている¹⁾。本研究では、労働災害となる斜面崩壊の計測機器として、類似した崩壊現象を示す岩盤斜面に用いられている計測機器の中でコストや施工性を考慮して、中小規模斜面工事現場にて使用することが可能な機器について検知・警報システムを構築することとした。

表-5.1 岩盤斜面における計測項目と計測機器（文献²⁾を加筆・修正）

計測の対象	計測項目	計測手法, 計測機器名	設置箇所および設置方法	
地表面変動 (変形・変位)	地盤伸縮変動量	地表面伸縮計	地表面のクラックを挟んで多数設置	
	地盤傾斜変動量	地盤傾斜計	地表面の必要箇所に多数設置	
	転倒, 回転量	転倒スイッチ	移動岩塊表面部の必要箇所に多数設置	
	落石の検知	検知線式落石検知機	落石・崩落発生箇所に必要数設置	
	地表移動量	移動杭測量		地表面に多数移動杭を設置し光波測量する
		GPS 測量		地表面に固定観測点と必要箇所に多数移動標点を設置し人工衛星により測量・解析する
ぬき板測量			地表のクラックを挟んでぬき板を多数設置	
地中変動 (変形・変位)	すべり面の位置	パイプひずみ計	ボーリング孔を利用してすべり面を挟み多数設置	
	すべり面の位置 すべり岩塊の移動量	挿入式地中傾斜計	〃	
		固定式地中傾斜計 (設置型地中傾斜計)	〃	
		地中伸縮計	〃	
		多段式地中伸縮計	〃	
	地中の隆起・沈下量移動量	地中変位計	ボーリング孔を利用して変状発生深度より深く設置	

表-5.2 地すべり動態観測用計測機器の精度・測定範囲（文献³⁾を修正）

計測機器名	精度	測定範囲	耐用年数
地盤傾斜計	1秒～1度	±1度～±90度	10年
伸縮計	0.2mm	±10mm	5～10年
パイプひずみ計	10×10 ⁻⁶	±10,000×10 ⁻⁶	1～3年
地中傾斜計	5～10秒	±5～30度	約5年

表-5.1は岩盤斜面におけるすべり挙動を把握するための計測項目と計測機器を示したものである²⁾。3章にて開発を行った高精度傾斜計は、地表面変動および地中変動を把握する機器として位置づけることが出来る。表-5.2は現在一般的に採用されている地すべり動態観測用の計測機器（主に手動）

の種類, 精度, 判定範囲を示したものである³⁾。ここで傾斜計については、精度が高いものは測定範囲が狭いため、大まかな範囲として示した。3章にて開発した高精度傾斜計は、分解能 0.01 度, 測定範囲±20 度であり、崩壊の検知に対しては十分な精度を有している。

ここでは、実際に現場にて使用されてい

表-5.3 施工段階の管理基準値（文献³⁾を修正）

計測機器	管理基準値の表記法	対応区分			
		点検・要注意 または観測強化	対策の検討	警戒・応急対応	嚴重警戒 一時退避
伸縮計	継続日数とその間の変位速度	5mm 以上/日	5~50mm/5 日	10~100mm/1 日	100mm 以上/1 日
地中伸縮計					
光波測距儀					
挿入型地中傾斜計	継続日数とその間のすべり面付近の変位速度	1mm 以上/10 日	5~50mm/5 日	-	-
パイプひずみ計	累積値	100 μ 以上	1000~5000 μ	-	-

これらの計測機器の精度や計測範囲などを参考にしながら、斜面崩壊による労働災害防止のための斜面崩壊検知・警報システムの試作・検討を行う。

5.2.2 警報発信レベル

人間は外部から得る情報の 8 割程度は視覚から得ていると言われている。斜面の変形が肉眼で確認できるほどであれば、危険を感知して避難することが出来る。しかし、労働災害となる斜面崩壊は概して、肉眼では確認できない微小変形の後に崩壊するケースが多い。しかしながら、3 章の実験結果および幾つかの既往の研究から崩壊前に微小ながらも変形していることは明かであり、計測機器による斜面崩壊の検知および警報の発信は重要である。しかし、肉眼では確認できない変形を計測機器が検知・警報を発して、仮に崩壊しなかった場合、それを何度も繰り返すと計測機器を信用しなくなり、『計測機器の形骸化』が起こる。そのため、警報発信レベルの設定は、計測機器の開発とともに重要となる。

表-5.3 は高速道路調査会が提案した地すべりにおける施工段階の管理基準値を示し

たものである。これらの管理基準値は、変位速度に着目されており、1 日~10 日間の変位挙動に応じて対応レベルを変化することとなっている。このような管理基準値を微小変形にて斜面が崩壊して労働災害となるような現場に適用するためには、これらの基準では冗長すぎると思われる。

ここでは、変位計による変位速度、および傾斜計の傾斜角度の経時変化について各種実験から得られた計測結果をもとに検討し、労働災害となる斜面崩壊の警報発信レベルについて検討を行う。

5.3 研究結果

5.3.1 検知・警報システムの試作・検討

本研究では、斜面崩壊検知・警報システムとして、中小規模掘削工事でも適用することが出来るようにコスト面および設置が容易な面を考慮して（地上・地中）傾斜計と変位計を対象を絞った。その中でも特に、傾斜計について試作・検討を行った。3 章にて試作を行った傾斜計を斜面崩壊検知・警報システムとして構築するために、基盤部分を流用することとした。本研究にて試



図-5.1 室内実験用傾斜計

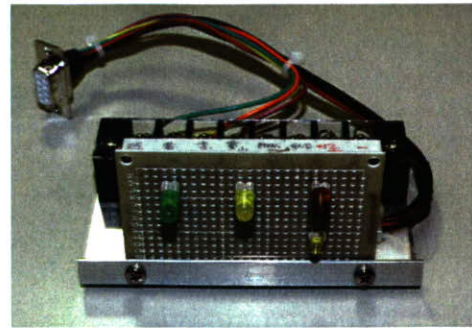
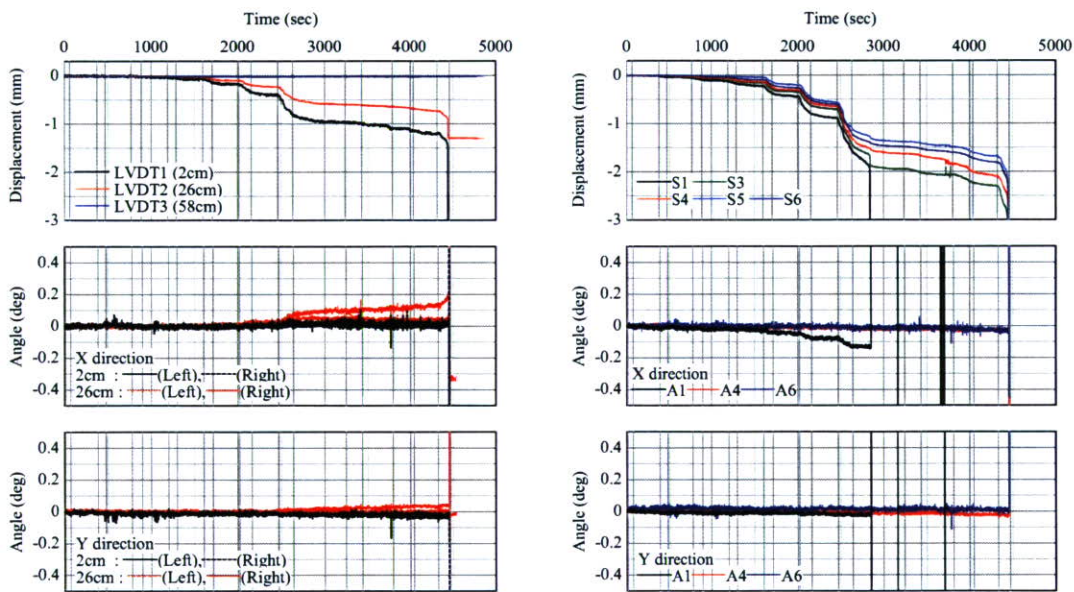


図-5.2 警報発生表示機



(a) 法肩

(b) 斜面

図-5.3 室内模型実験 (ケース L1) の計測結果

作を行った斜面崩壊検知・警報システムを図-5.1に示す。内径 50mm、高さ 50mm の塩化ビニル製で内部は密閉されており、防水処理が施されている。このユニットは単体で X・Y (水平・上下) 方向の傾斜角度を計測することができる。

本研究では、試作機レベルのため、それぞれ設置した傾斜計を計測アンプに集積し、PC にデータを取り込む形式とした。最終的には、これらのロジックは単体にて警報を発生するシステム (スタンドアローン型)

とすることが可能である。警報システムについては、緑・黄・赤色 LED によって警報レベルを緑 (安全)、黄 (警戒)、赤 (緊急) と識別するコネクタを接続することにより警報を発信することが出来る (図-5.2)。

5.3.2 警報発信レベル

3 章にて実施した不飽和状態の山砂にて斜面を作成した室内模型実験にて得られたレーザー変位計および傾斜計の結果を図-5.3~5 に示す (再掲図-3.6~8)。変位計の計測結果では法肩部では沈下量が

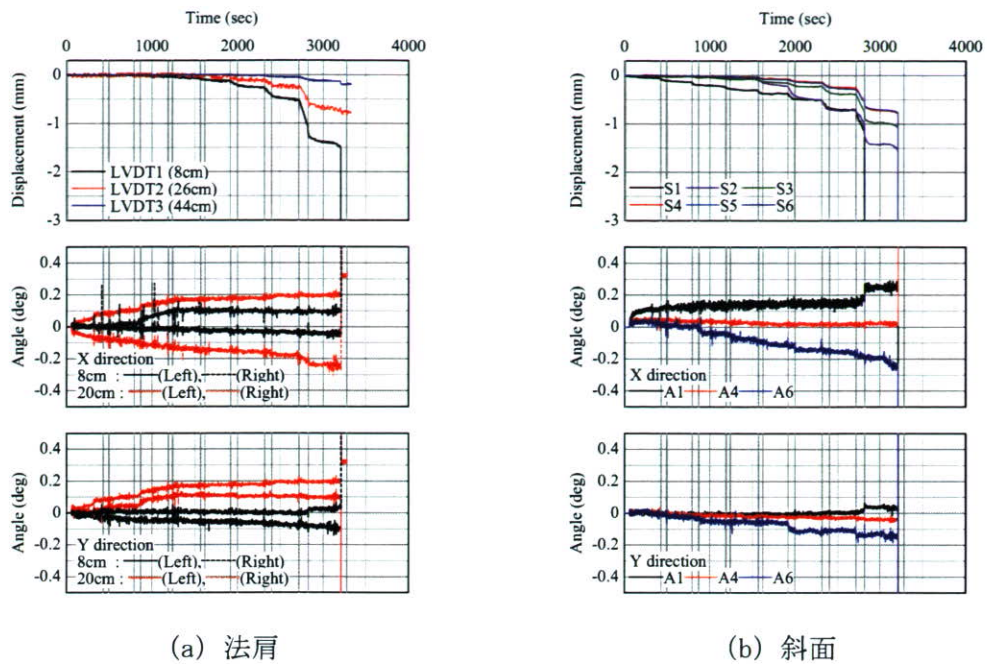


図-5.4 室内模型実験（ケース L2）の計測結果

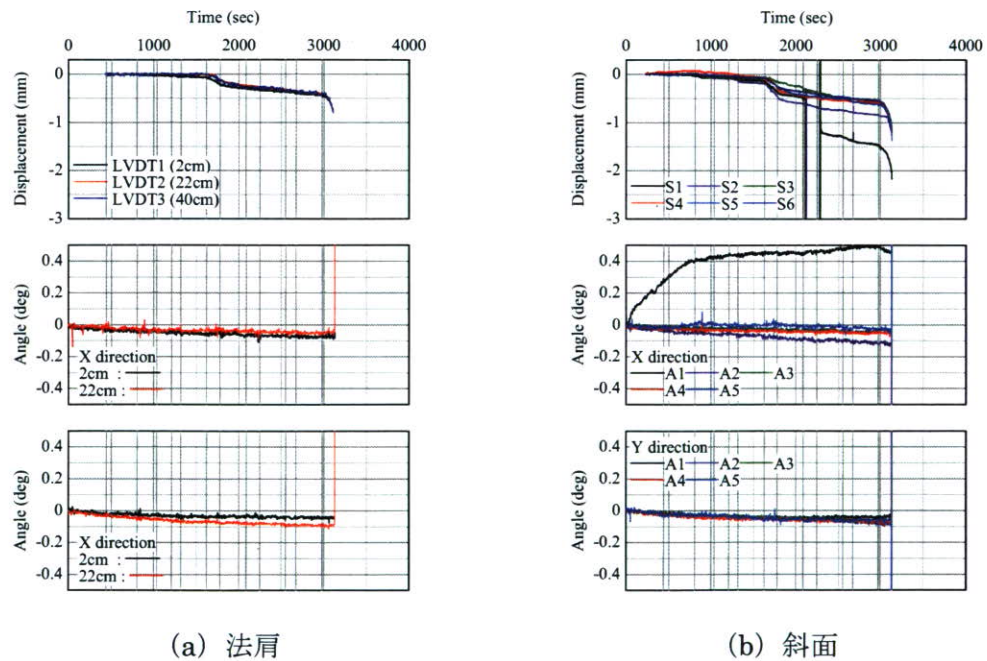


図-5.5 室内模型実験（ケース L3）の計測結果

1~2mm 程度で崩壊に至っており、斜面上を平行に計測した変位計では 2~3mm 程度で崩壊に至っている。このように労働災害となるような斜面崩壊現象は、通常の地すべり挙動よりも微小変形にて突然崩壊に至

る傾向がある。しかし、崩壊に至るまでの経時変化を見ると、崩壊領域近くでは、徐々に変形量が増大している傾向は見られる。

また、傾斜計についても掘削後に徐々に傾斜角度が増加しており、概ね 0.2 度程度

の変動が見られると崩壊に至っている。これらの傾斜計の設置箇所について見てみると、崩壊直前の挙動は、傾斜角度が加速度的に増加する箇所と増加しない箇所があった。また、実験ケースによっても違いが見られた。これは、設置箇所の影響が考えられ、活動土塊内部に設置された場合には、所定の検知が行えないことを示しているも

のと思われる。山砂にて作成された斜面は、実際に工事を実施する現場と比べると粘着力が少ないために微小変形にて崩壊に至るものと想像される。

既往の研究では、成田砂や関東ロームを使用して高さ 5m の模型斜面を作成し、切土掘削を再現した実物大実験が行われている⁴⁾。その際の伸縮計と傾斜計の経時変化について、代表例を図-5.6~7 に示す。これらの実験では、崩壊前に傾斜計が加速度的な増加傾向を示し、0.1~0.2 度程度で崩壊に至っている傾向が見られる。

以上の結果から、傾斜計の崩壊発信レベルとして、

1. 傾斜角度が累積で 0.1~0.2 度となった場合、および、
2. 傾斜角度の速度が加速度的に増加する傾向が見られる場合

に警報を発信することを提案したい。上述の検討結果は、2 種類の砂質系地盤と 1 種類の粘性土系地盤において実施した結果から判断したものである。今後、多くの地盤について実地設置し、データの蓄積を行

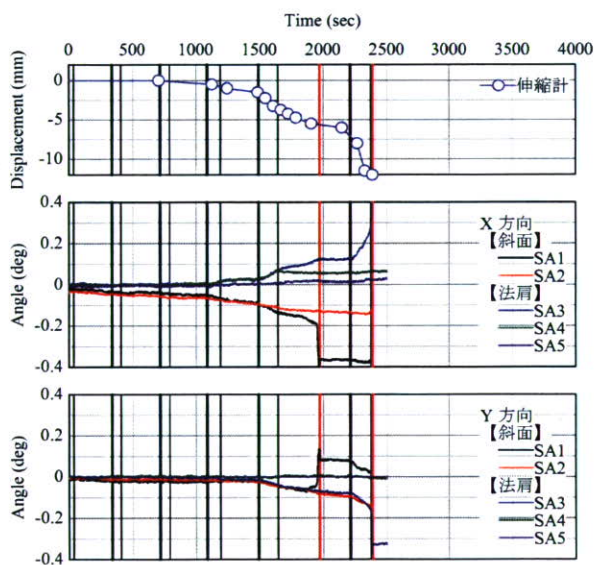


図-5.6 砂質系地盤での計測の一例

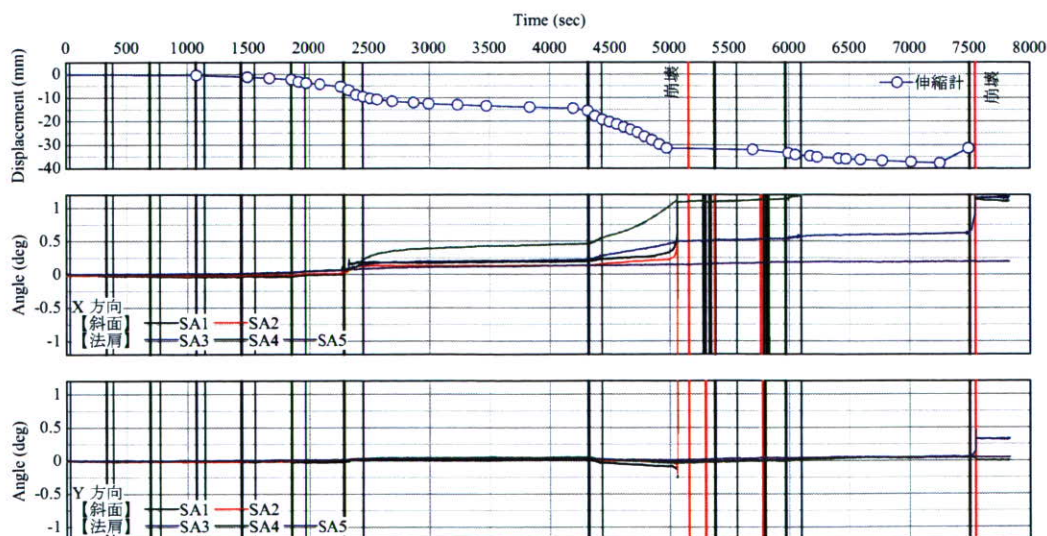


図-5.7 粘性土系地盤での計測の一例

いながらこれらの閾値を精度良くすることが重要であろう。

参考文献

- 1) 土木学会 岩盤力学委員会：「岩盤斜面の調査と対策」, 土木学会, 375p, 1999.
- 2) 土木学会 岩盤力学委員会：「岩盤斜面の安定解析と計測」, 土木学会, 345p, 1994.
- 3) 高速道路調査会:地すべり危険地における動態観測施工に関する研究（その3）（日本道路公団委託）, 1989.
- 4) 伊藤和也, 豊澤康男:切土掘削による斜面崩壊メカニズムに関する実物大実験, 土木学会論文集 C（投稿中）

5.4 健康危機情報

なし

5.5 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
なし

5.6 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

6. まとめ

主任研究者 三田地利之 北海道大学 大学院 教授

厚生労働省の重点施策として、建設業における労働災害防止対策の充実（中小総合工事業者・専門工事業者による安全管理の充実）が掲げられている。また、平成10年に厚生労働省が策定した第10次労働災害防止計画では、建設業における労働災害防止対策の確立が重点対象分野に位置づけられ、「斜面崩壊災害を減少させるため、切土等の作業における斜面崩壊に対する効果的な対策を検討する。」とされている。

本研究は、その主旨に沿ったものであり、的確な斜面の監視に基づいて崩壊の危険性を予測し、確実に警報を発して避難することができるような簡易かつ安価でしかも信頼性の高いシステムを構築することを最終目標に掲げ、第2章ではその基礎となる地盤強度の評価法について検討し、室内試験による地盤の引張り強度の評価法および地すべり対策工設計用強度パラメータの決定法についての提案を示した上で、現場で簡便に強度評価が可能のように工夫開発した簡易静的コーン貫入試験機の原位置試験結果を示し、十分に現場に適用可能であることを示した。

第3章では、斜面崩壊の動態観測・崩壊予知に資するべく本研究で開発した高精度傾斜計の詳細について説明するとともに、室内模型実験および現場実物大実験を通して、突発的に発生する小規模斜面崩壊につ

いても崩壊の前兆現象を精度よく捉えられることを示した。さらに、第4章では、降雨による地盤中の間隙水圧の挙動に関する遠心場での模型実験を実施し、複数の層から成る地盤ほど崩壊が生じやすく、かつ崩壊は斜面表層に限定的に生じかつ突発的であることなどを確認した。

以上の成果を受けて第5章では、本研究で試作した斜面崩壊の検知・警報システムについて説明を加えるとともに、検知システムとして3章で開発した傾斜計を用いる場合の警報発信レベルを提案した。

本研究の成果に基づき、安価で信頼性の高い効果的な対策方法が普及すれば、掘削工事中の労働災害は大きく減少すると考えられる。また、斜面崩壊災害現場における救助活動はともすれば危険と隣り合わせの状況で行われているが、当システムはこのような救助活動の際や災害復旧工事における安全監視システムとしても有効である。なお、当該システムは、全国に33万箇所以上あるといわれている急傾斜地崩壊危険箇所においても活用が見込まれるものであり、その波及効果はきわめて大きいと考えられる。

本研究の成果が実務に採用されて労働災害防止にいささかなりとも貢献できれば、当該研究を推進してきた研究者としてこれに勝る喜びはない。

II 研究成果の刊行に関する一覧表

発表者氏名・論文タイトル名・発表誌名・巻号・ページ・出版年

1. 原著論文

- 1) Tamrakar S.B. Toyosawa Y., Mitachi T and Itoh K.: “Tensile strength of compacted and saturated soils using newly developed tensile strength measuring apparatus”, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 6, pp.103-110, 2005.
- 2) 小松順一, 村岡洋, 阿部真郎, 三田地利之: 「軟岩切土法面における岩盤崩壊の地質的素因と不連続面のせん断強度」, *日本地すべり学会誌*, Vol. 41, No. 6, pp.607-617, 2005.
- 3) 三田地利之: 「粘性土を対象とした室内せん断試験の変遷と展望」, *土と基礎*, Vol.54, No.2, pp.22-25, 2006.
- 4) Tamrakar S.B., Mitachi T. and Toyosawa Y. : “Measurement of soil tensile strength and factors affecting its measurement”, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 5, pp.911-918, 2007.
- 5) 田中洋行: (総説) 「地盤調査に求められている課題—信頼設計に基づいた地盤定数の設定—」, *土と基礎*, Vol.55, No.11, pp.1-4, 2007.
- 6) 豊澤康男, 伊藤和也, Tamrakar S. B., 三田地利之, 国見敬, 西條敦志, 大久保智美: 「半導体加速度センサーを利用した高精度傾斜計による斜面崩壊予知の検討」, *労働安全衛生研究* Vol.1 No.2,(掲載決定), 2008

2. その他の論文

- 1) 鷺隼人, 三田地利之, 高橋秀彰, 梅谷晋平: 「繰り返し一面せん断による地すべり対策工設計用強度パラメータ決定法の適用例」, *地盤工学会北海道支部年次技術報告集*, No.45, pp.1-6, 2005.
- 2) 久常雄大, 大河原正文, 三田地利之: 「原子間力顕微鏡による粘土の残留状態せん断面の表面粗さおよび摩擦力測定」, *地盤工学会北海道支部年次技術報告集*, No.46, pp.99-106, 2006.
- 3) 大河原正文, 三田地利之: 「粘土の残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi' r$ と真実接触面積との関係」, *地盤工学会北海道支部年次技術報告集*, No.46, pp.107-114, 2006.
- 4) 阿部篤史, 笠間太樹, 田中洋行, 三田地利之, 工藤豊: 「遠心場における不飽和地盤の挙動」, *地盤工学会北海道支部年次技術報告集*, No.46, pp.129-132, 2006.
- 5) 梅谷晋平, 高橋秀彰, 三田地利之: 「繰り返し一面せん断試験から求めた地すべり粘土の強度パラメータ」, *地盤工学会北海道支部年次技術報告集*, No.46, pp.139-140, 2006.

- 6) 笠間太樹, Tamrakar S.B., 豊澤康男: 「遠心力載荷試験による砂質土斜面崩壊のメカニズムについての研究」, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.46, pp.157-160, 2006.
- 7) 梅谷晋平, 高橋秀彰, 三田地利之: 「繰り返し一面せん断試験に基づく強度パラメータに及ぼす諸要因の検討」, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.47, pp.125-130, 2007.
- 8) 笠間太樹, 金子広明, 田中洋行, 工藤豊: 「遠心場における降雨再現実験での間隙水圧の挙動」, 第47回地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.47, pp.167-170, 2007.
- 9) 久常雄大, 大河原正文, 三田地利之: 「原子間力顕微鏡による異なる温度条件下での高純度粘土の摩擦力・粘性係数測定」, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.47, pp.189-194, 2007.
- 10) 大河原正文, 九千房修司, 三田地利之: 「残留状態せん断面のその場観察/分析用小型せん断ユニットの開発」, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.47, pp.195-198, 2007.
- 11) 金子広明, 田中洋行, 工藤豊, 伊勢大亮: 「遠心模型実験装置を用いた二層地盤における降雨再現実験」, 地盤工学会北海道支部年次技術報告集, No.48, pp.91-96, 2007.

3. 学会発表 (英文)

- 1) Tamrakar S.B., Toyosawa Y., Itoh K., Horii N. and Kusakabe S.: "Failure mechanism of slopes in the centrifuge using In-flight excavator", Proceedings of the International Symposium, Landslide Hazards in Orogenic Zone from the Himalaya to Island Arcs in Asia, pp. 255-264, 2005.
- 2) Tamrakar S.B., Mitachi T., Toyosawa Y., Itoh K. and Ariki T.: "Measurement of slope movement during the slope excavation of small size full scale model", The International Symposium on Landslide Hazards in Organic Zones, from the Himalaya to Island Arcs in Asia, pp.265-274, 2005.
- 3) Tamrakar S.B., Mitachi T., Toyosawa Y. and Itoh K.: "Development of a New Soil Tensile Strength Test Apparatus", Geo-Frontiers 2005, Geotechnical Special Publication GSP-138 (CD-ROM), Site Characterization and Modeling, ASCE, Reston, Va, 2005.
- 4) Tamrakar S. B., Toyosawa Y., Itoh K. and Mitachi T.: "Newly developed tensile strength apparatus for soil and the factors affecting its measurement", 第40回地盤工学研究発表講演集, Vol. 40, pp. 319-320, 2005.
- 5) Tamrakar S.B., Toyosawa Y. and Itoh K.: "Measurement of Tensile strength and the effect of finer particles", 第60回土木学会年次学術講演集, pp. 179-180, 2005.
- 6) Tamrakar S.B., Toyosawa Y. Itoh K. and Timpong S.: "Failure heights comparison during excavation using in-flight excavator", International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2006 (TC2 of the ISSMGE), pp. 385-390, 2006.

- 7) Tamrakar S.B., Toyosawa Y., Tanaka H. and Itoh K: "Possibility of measurement of slope movement during the sandy soil slope failure in centrifuge" , Sea to Sky Geotechnique-2006, 59th Canadian Geotechnical Conference, pp. 351-358, 2006.
- 8) Toyosawa Y., Yang J., Timpong S., Itoh K. and Tamrakar S. B.: "Stability of Trench Excavation under Construction Machinery Load" , 59th Canadian Geotechnical Conference, Sea to Sky Geotechnique, Vancouver, Canada, pp. 376 - 381, 2006.
- 9) Tamrakar S.B., Toyosawa Y., Itoh K. and Mitachi T.: "Comparison of Failure Mechanism due to Toe Excavation: Field test Centrifuge test and Numerical Analysis" , Geotech Week Symposium, Singapore, 2006.
- 10) Nghia, Trong. Le., Teeparaksa Wanchai., Mitachi T. and Kawaguchi T. : "Observation of the behavior of soil element behind deep diaphragm wall by triaxial tests on Bangkok clay", Proc. of the 19th KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.57-60, 2006.
- 11) Tamrakar S.B., Toyosawa Y. and Itoh K., Kunimi, T., Nishijo A and Okubo S.: "Development of tilt-sensor and possibility of measurement of failure trend just before the failure" , 第 41 回地盤工学研究発表講演集, 鹿児島, pp. 2253-2254, 2006.
- 12) Tamrakar S. B., Toyosawa Y., Itoh K., Kunimi T., Nishijyo A, and Okubo T.: "Comparison of slope failure trend just before failure in the field using newly developed tilt-sensor", 土木学会第 61 回年次学術講演集, pp. 433 - 434, 2006.
- 13) Tamrakar S. B., Toyosawa Y. and Itoh K.: "Development of tilt-sensor for advanced prediction of failure and its applicability in the field excavation" , 第 36 回安全工学シンポジウム, Vol. 36, 6-5, pp. 169-172, 2006.
- 14) Tamrakar S.B., Toyosawa Y., Itoh K. and Timpong S.: "Relationship between critical failure height and trench excavation depth in relation to centrifuge tests performed with In-flight excavator," 第 36 回安全工学シンポジウム, Vol. 36, 6-6, pp. 173-176, 2006.
- 15) Tamrakar S.B., Mitachi T. and Toyosawa Y.: "Factors affecting tensile strength measurement and modified tensile strength measuring apparatus for soil" , Mechanics of Unsaturated soils, Weimar, Germany, 2007.
- 16) Tamrakar S.B., Toyosawa Y., Mitachi T., Itoh K. and Takashi K.: "Possible use of tilt-sensor for failure movement and failure plane just before slope failure" , International Geotechnical symposium on "Geotechnical Engineering for disaster prevention and reduction", Russia, 2007.
- 17) Okawara, M., Hisatsune, T. and Mitachi, T. : "Physico-chemical on mechanism of the coefficient of shear resistance at the residual state " $\tan \phi_r$ " of clay" , International Geotechnical Symposium on "Geotechnical Engineering for Disaster Prevention &