

4.3 複数杭による中型斜面崩壊実験

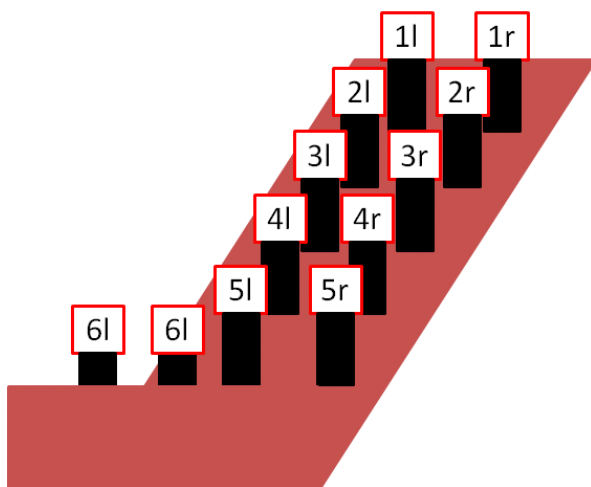
本実験では、前節の単独杭による大型斜面の崩壊実験と同様の大型降雨実験施設において仮想斜面崩壊時の複数杭によるセンサ値取得実験を行った。本実験の斜面は図??図 4.28 に示すような大きさの中型斜面である。土質条件は図 4.26 に示す。実験に用いた杭のサイズは 4.24 となっており、降雨は図 4.25 に示すように二日間行い、1 日目に予備降雨を与え、降雨 2 日目において崩壊させた。杭の配置図は図 4.23 に示すようになっている。最上部の杭は側面から 30cm、上部の鉄板から 80cm メートルのところに配置し 1m 置きとなっている。末端の 6l と 6r の杭は斜面ではなく、平衡な場所に設置している。杭は合計で 12 本設置し、そのうちの 9 本にセンサを入れデータを取得した。センサを設置した杭は 1l、1r、2l、2r、3l、3r、4l、4r、6l であり 5l には androidOS 搭載の高機能携帯通信端末をいれ、加速度を取得した。l は左側 r は右側である。取得した左側の加速度を図 4.27 に示す。斜面の変位計と地下水位のデータを図 4.29 に示す。



図 4.21 中型実験斜面



図 4.22 複数杭中型実験に用いた杭



縦	横	高さ	埋没部
69mm	69mm	510mm	325mm

図 4.24 杭寸法

図 4.23 中型斜面杭配置図 (杭は 1m 間隔)

降雨日	降雨強度	時間
1 日目	30mm/h	3h
3 日目	50mm/h	2h15min

図 4.25 複数杭中型斜面降雨スケジュール

試験試料	まさは土
含水比	9.0(%)
湿潤密度	1.745(g/cm^3)
乾燥密度	1.601(g/cm^3)

図 4.26 複数杭中型斜面土質条件

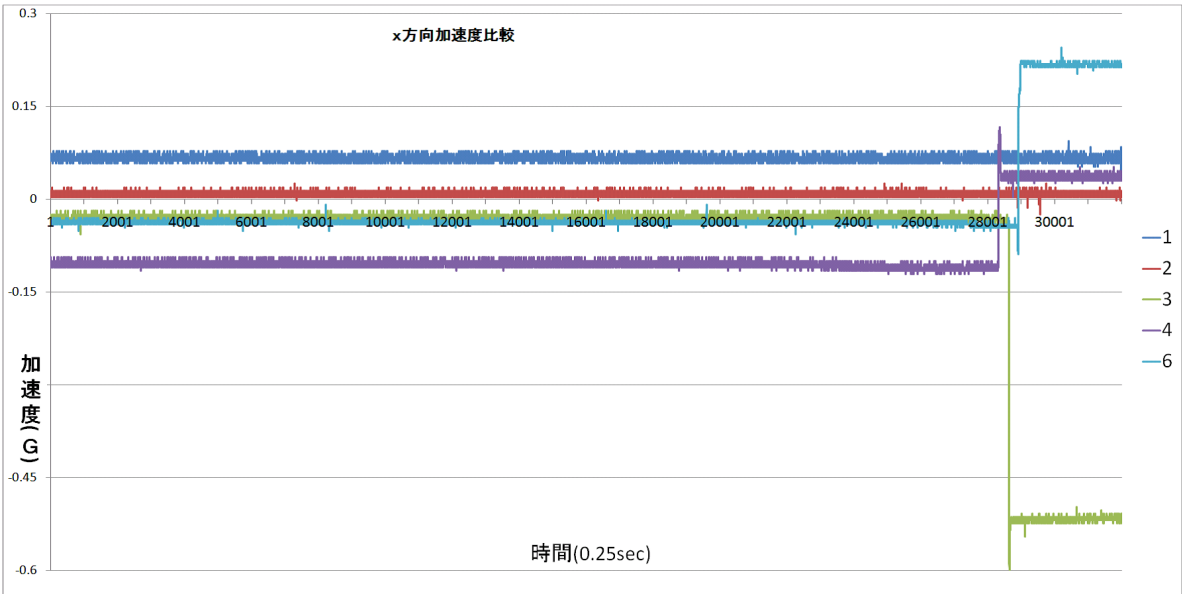


図 4.27 複数杭中型斜面実験杭加速度比較

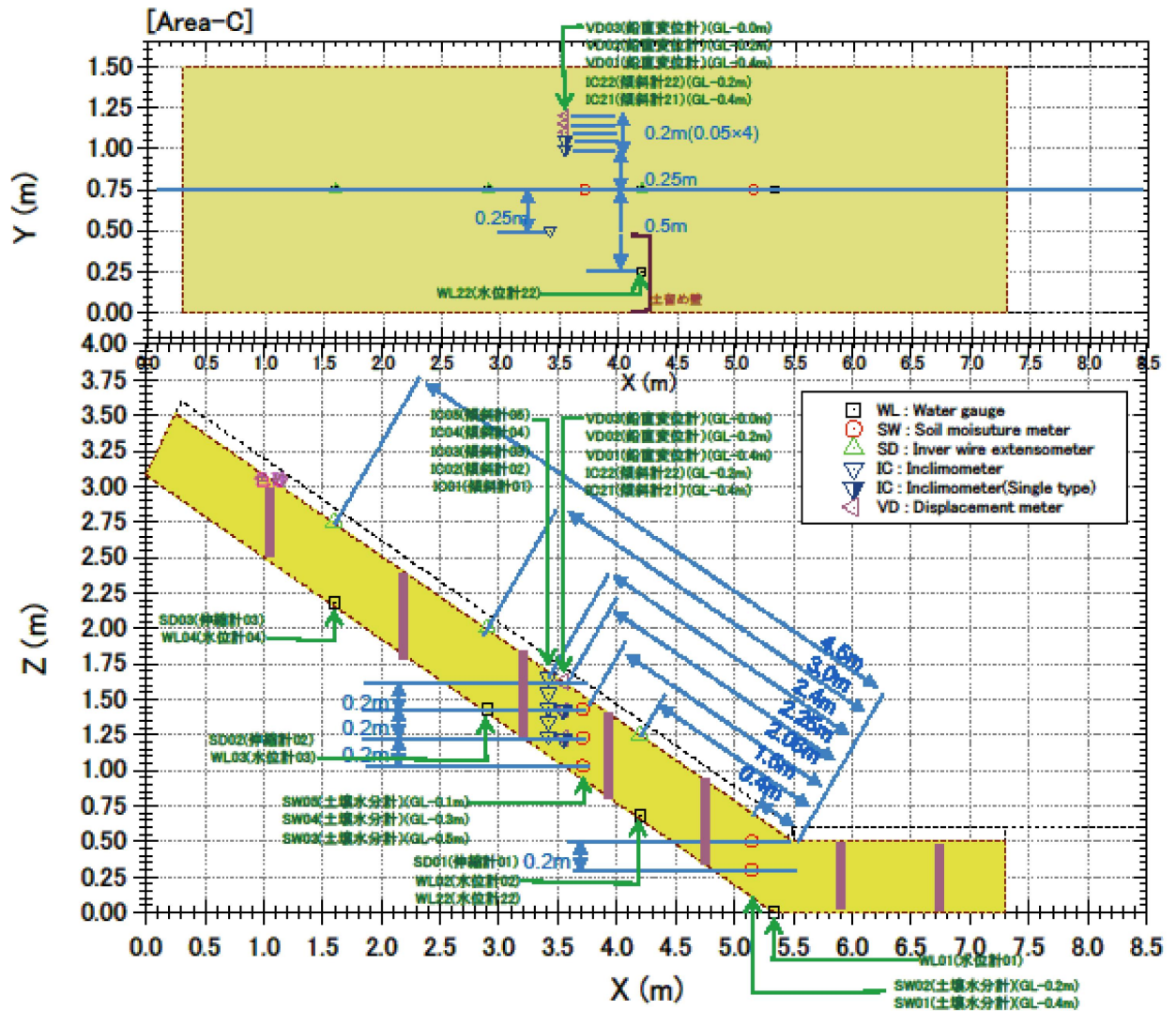


図 4.28 中型実験斜面寸法

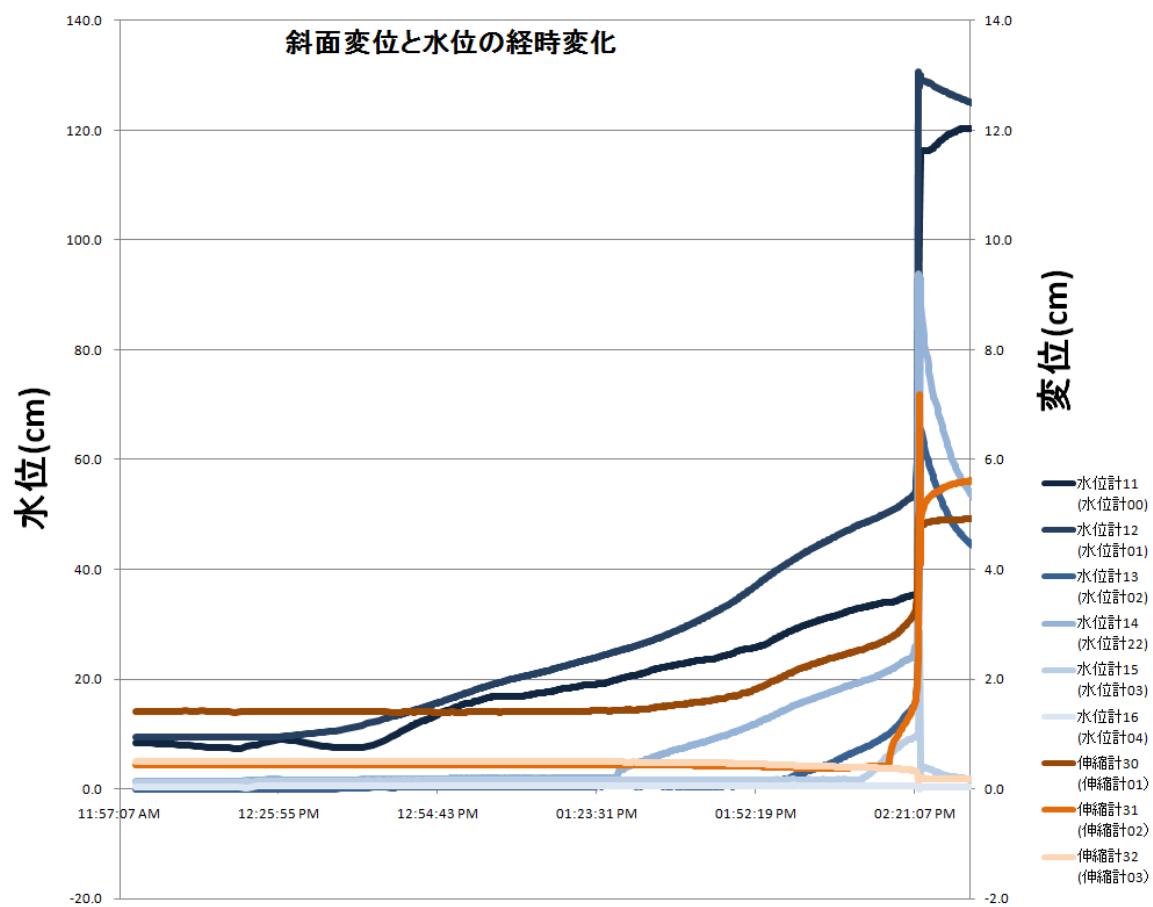


図 4.29 複数杭中型斜面実験地下水位と斜地表面変位

第 5 章

杭中の簡易センサを用いた斜面崩壊 早期予測手法の提案

5.1 斜面災害の予測手法

5.1.1 既存の計測手法と iPicket

斜面災害を減らすために事前にその予兆を検知し、早期に住民へ避難指示を与えなくてはならない。そのために斜面状態をモニタリングする計器として代表的なものは地下水計と地表伸縮計（変位計）である。地下水位は模型実験などで明らかなように、上昇すると土と土の間の摩擦を奪い斜面の支持力を奪い崩壊へと導く。このように地下水位は非常に重要な斜面崩壊のファクターではあるが自然界において、正確にその地下水流を把握することは非常に難しい。草木や、土質などの状態によって複雑に流れが変わるからである。斜面崩壊前には地下水が噴出するなど、水の動きはほかにも特徴を見せる。一方で地表伸縮計で取得したひずみは地すべり時はクリープひずみ式と呼ばれる時間と変位の関係を示す（P11、図 2.4）。この関係を利用した崩壊時期予測法は斎藤 [8] らや福園 [9] らによって提案させている。地表ひずみ計での計測も自然界で行うため困難な点が多い。土塊が崩落する方向と平行になるようにひずみ計を設置する必要がある。すべり面が見えているという状態はいつ崩落してもおかしくはない状況であり非常に危険が伴う。計測自体は mm 単位の変位をみるために非常にデリケートなものである。インバー線の管理にコストを使う。

iPicket は単体の棒状であり、中心部にセンサを搭載しているのでひずみ計や水位計の

機能を有していない。埋没部分を 10m 以上長くして外部に土壤水分センサを取りつければ水位は測ることができるかもしれないが容易に設置することは出来なくなってしまう。また、伸縮計のように正確に変位を計測することはできない。RSSI(無線電波通信強度)を用いて相対的なセンサ同士の位置を計測する研究は数多くされているが、もともと誤差が多分に出る手法であり、自然界における風による草木のゆらぎや気温室度などの諸条件で容易に相対距離が変わってしまう。

複数杭でモニタリングを行うことが iPicket の特徴である。地すべりの検知のためのセンサネットワーク手法は検討されている [10] が、本研究では、長期運用から検知、早期伝達までのアプリケーションの一つとして早期検知問題に取り組む。

iPicket には 6 軸の加速度センサが内蔵されている。本研究における提案手法はそれを利用した加速度と、傾きについて早期検知手法を提案している。

5.1.2 逆数予測法

斎藤手法と福圓手法は同じく、地表面の移動速度を利用する。崩壊前にひずみと時間の関係は 3 次クリープ式をとる。福圓 [9] はひずみ速度の逆数が 0 になった時崩壊するものとし以下の式で崩壊時間の予測式を示した。

$$\frac{1}{v} = (t_r - t_0) \quad (5.1)$$

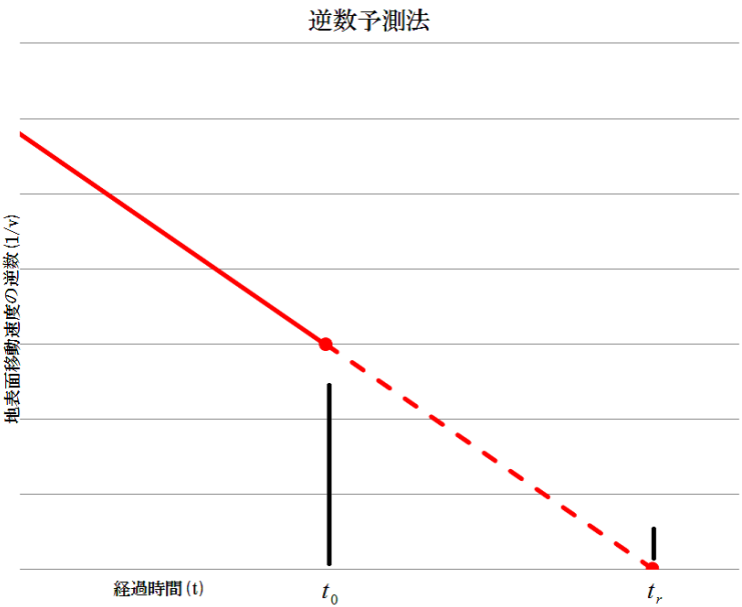


図 5.1 逆数予測法

5.2 杭中の傾き計を用いた早期斜面崩壊予測手法の提案

5.2.1 概要

地すべりは観測手法も述べてきたように確立され、予測の手法もほぼ確立されてきている。その中で広く使われている手法は斎藤 [8] 手法と福圓 [9] 手法である。しかしながら、それらは不動点と動店の距離が必要で iPicket では計測することが難しい。両者とも地表面の移動量を仕様することを前提としている。この手法を iPicket に利用し傾き計にそのまま適用することはむずかしい。また傾斜計はある地点のある深さだけのせん断変形をみているが地表面移動量は、表面の凹凸や土の締まりなどを考慮している点でも本質的に違うものである。従って傾き計 [11] による斜面崩壊の予測研究 [12] が行われた例も非常に少ない。本研究では植竹ら [13] によって提案された斜面の傾斜と表面移動量の変換式を利用し iPicket において斜面の変化量を抽出し、実際の変位と比べその再現性と逆数予測法への適用性について考察を述べる。また、傾き計だけではなく、加速度も利用し地表面変位と同じような値の挙動を示すかを調査する。

5.2.2 傾き計を用いた早期斜面崩壊予測手法の提案

iPicket の斜面変位計を利用し、地表面移動量へ変換する。傾き計の値から地表面移動量への変換式は以下のように提案されている。

$$x = h \frac{\sin \theta}{\cos \alpha} \quad (5.2)$$

ここに $x = s$ 斜面移動量、 h = 杭の埋没長さ、 θ = 杭の転倒角、 α = 斜面角、である。それぞれを図 5.4 に模式的に図 5.4 に示した。

また、前章の中型斜面崩壊実験において取得した傾き計の値を利用し、斜面移動量を式 5.5 により求めた計算図を 5.3 に示している。数値の安定化のためにそのステップまでの 3 分間の平均を算出している。斜面した方向の変位が、正の値をとる。オレンジ色が伸縮計による変位であり、色が濃くなるほど斜面下の伸縮計である。P38 の斜面寸法図 5.1 において、詳細な伸縮計の位置が描かれている。緑は傾き計から変換した地表面変位の値である。色が濃いほど下に設置した iPicket である。今回は左側の 1l、2l、3l、4l、6l の傾きの値を抽出している。P33 の図 4.23 において杭の位置関係は描かれている。グラフの初めは雨の降り出しでありおよそ 7250sec で崩壊している。

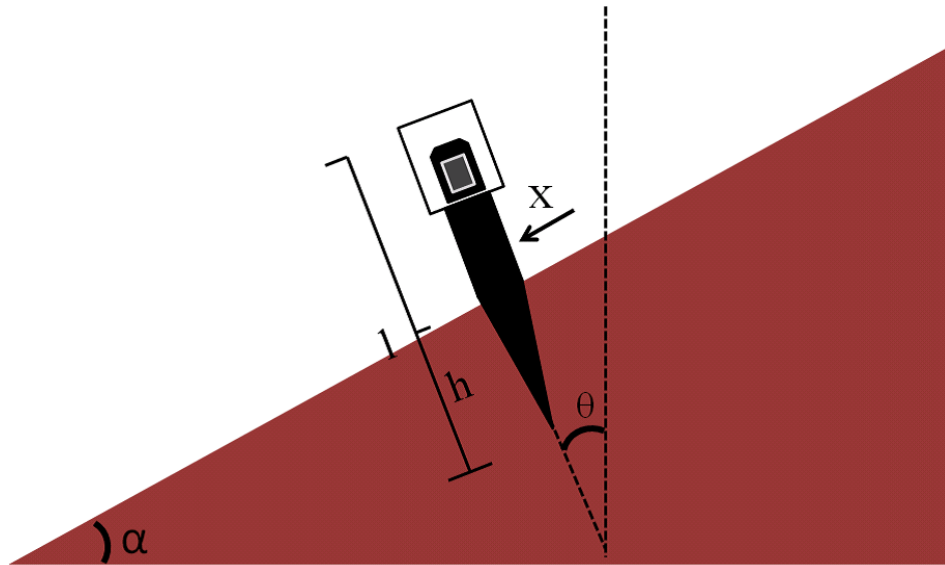


図 5.2 傾きと変位

5.2.3 傾き計を用いた早期斜面崩壊予測提案手法の考察

6l、4l の杭は斜面崩壊が発生する前は斜面下方向に傾いているが発生した後は後ろに傾いている。実際の現場でも崩壊後はそのようになっており挙動をモニタリングできていることがわかる。傾き計から求めた地表面の変位は伸縮計の変位よりも早くから変化をとらえることが出来ていた。これは水位が下部から上昇してくる今回の斜面の性質を表していると言える。今回の中型実験斜面は下側の先端部の排水量を調節させており、自由に浸透水を流下することが出来ないシステムになっているからである。水位が徐々に下から上がり、斜面の変形も下から起こって行ったと考えられる。この変位を iPicket が捉えることが出来たのは自由に挿入する場所を選択できたからである。6l の場所は平坦で斜面になっていないが、このように変化を取得することが出来ている。4l に関しては、最初に変化している伸縮計 01 の近くではあるが遅れて傾き始めている。崩壊前には傾きが少し減少し、地表面変位も減少している。これは 4l が斜面の中腹であり下部に流れることが出来ない斜面と上から落下しようとしている斜面の両方の影響をみて土塊が盛り上がった場所にあるからと考察する。

iPicket の傾き計から斜面が動いた様子や斜面の状況をよみとることが出来たが一方で、伸縮計を用いた変位より iPicket から求めた地表面の変位の桁数が一つ多い。原因の詳細については計算方法確認から傾き計の精度までみる必要があるだろう。今回は降雨直前の傾きから変動角を求めているので iPicket の中でセンサが大きく動いてしまった可能性も

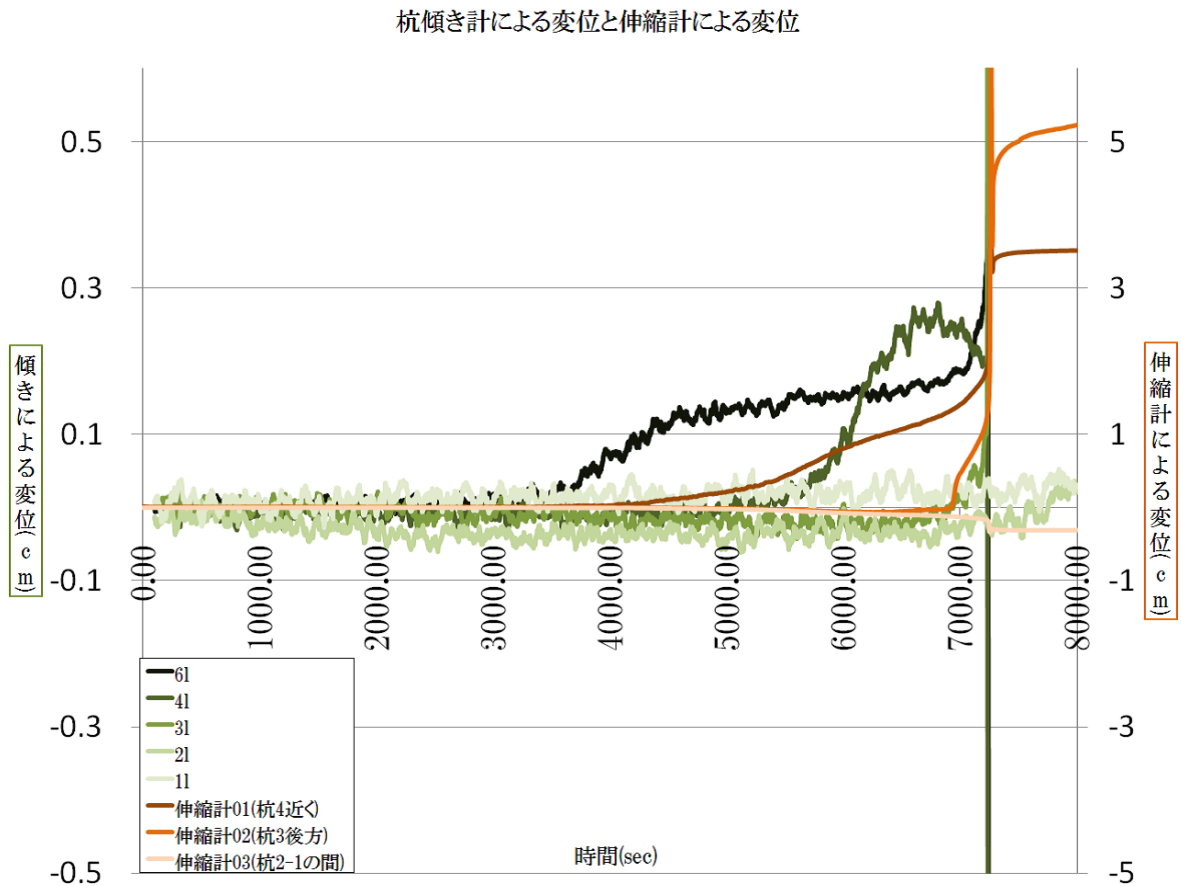


図 5.3 杭傾き計による変位と伸縮計による変位

ある。

斜面崩壊と地すべりは地面のせん断変形運動であり、すべり面からのせん断変形してずれた角度を求めることが出来れば地表面の変位も解ることができる。今回の中型斜面での仮想地すべり面は実験斜面の底である。iPicket がそこまで届き、地表面せん断変形までずれることなく取得出来れば伸縮計の変位と誤差が無くなるはずである。

今回は、すべり面まで届く杭の長さではなかったために本来の地表面変位を取得できたとは言いがたい。実際の斜面においても iPicket の長くて 1m 程度の埋没部での長さを考えると、傾き計を用いて地表面変位を求める時は必ず、すべり面との変位とは違うことを考慮しつつ求めたい。

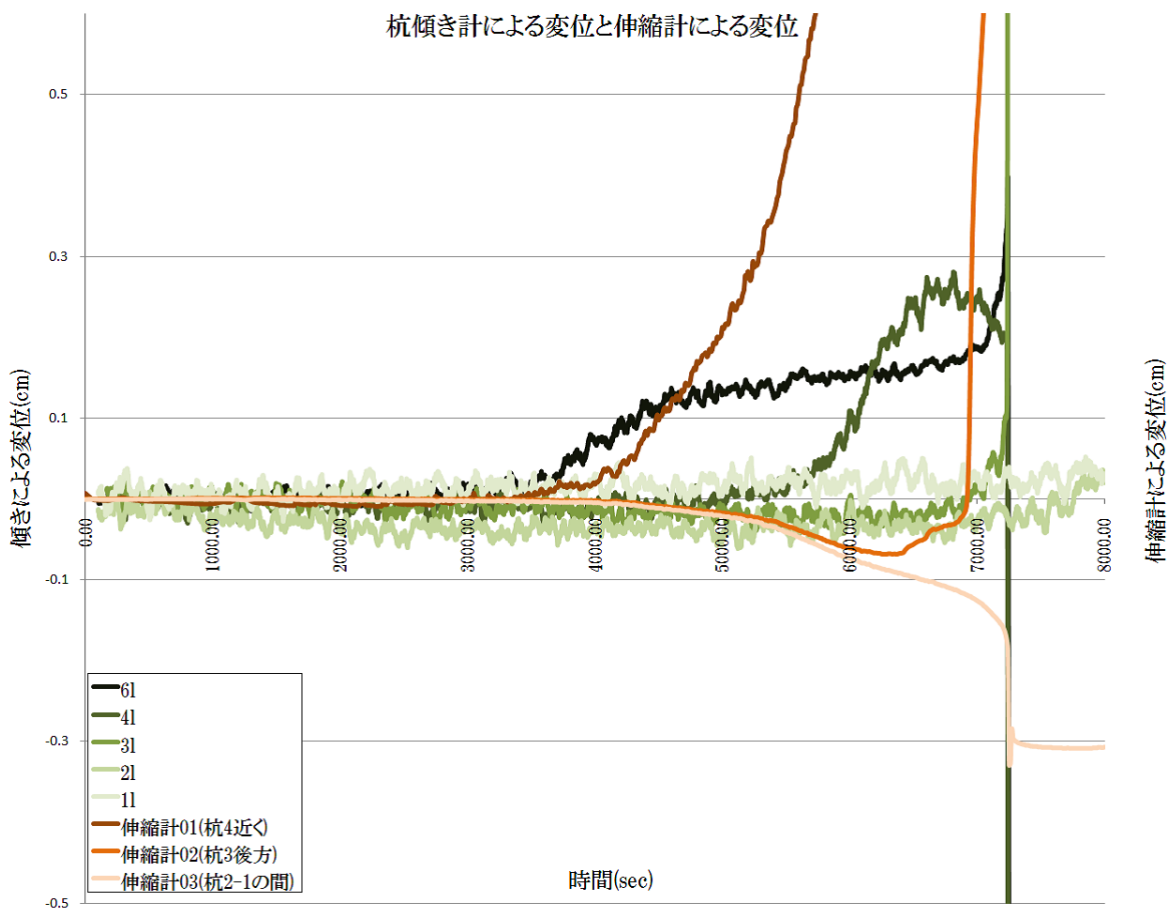


図 5.4 杭傾き計による変位と伸縮計による変位 (同スケール)

5.3 杭中の加速度計を用いた早期斜面崩壊検知手法の提案

5.3.1 概要

高機能携帯型電話端末や、小型携帯ゲーム機など、最近は加速度センサは最も身近なセンサの一つになったといえる。価格も安く、iPicket においてもその本体の価格を抑えるため MEMS 型の加速度計を搭載している。この加速度計は 6 軸であるので傾きも計測している。加速度計には常に 1G の重力加速度がかかっているため姿勢の変化をとらえることが出来るのである。また、モノがぶつかって動いた場合を計測することが出来る。iPicket はこれを利用し、土石流の発生判定にも行うことを検討している。斜面崩壊の予測のためにはゆっくりしたと地盤の変位を計測するというのではなく、崩落直前の加速度の変化に着目することとする。これは、第二次クリープひずみ式に近い、ほぼ等速な運動をとらえるためには地震計測で用いるような超高精度で高い周波数で観測する必要がある。iPicket に搭載している MEMS 型の加速度計ではそのような高精度で測ることはできない。またセンシングレートを高めることはバッテリーの消費を激しくし長期運用にも向かないからである。本提案手法では前節の傾き計と同様に伸縮計による変位と加速度の提案手法をくらべ、その有効性を考察する。

5.3.2 加速度計を用いた早期斜面崩壊検知手法の提案

iPicket に搭載された加速度計を用いた斜面崩壊の早期検知手法として積算加速度 \bar{A} を提案する。求める手法は以下の通りである。

$$|a_{xi} - \bar{a}_{x0}| = \hat{a}_{xi} \quad (5.3)$$

$$\sqrt{\hat{a}_{xi}^2 + \hat{a}_{yi}^2 + \hat{a}_{zi}^2} = A_i \quad (5.4)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{99} A_i}{100} = \bar{A}_i \quad (5.5)$$

ここに \bar{a}_{x0} = 降雨前平均、 a_{xi} = 時刻 i における x 方向の加速度、である。この積算加速度の特徴は方向ではなくセンサ全体の加速度の積算ということである。従って、どの方向に倒れたか、加速度が加わったのかは表すことは出来ないが、iPicket が動いた量を単純に表している。この積算加速度を用いることで、iPicket の簡易的な設置に役立つと考えられる。傾き計を利用する場合、方向を決め杭の向きをある程度地すべり面と垂直になる用に設置する必要がある。人為的に地面に挿入することで、杭の向きを間違える可能性

があるが、この指標だと方向は考慮されないのでシステムの効率化を担うことが出来るのである。

下の図は中型斜面崩壊実験時における伸縮計の変位と各杭の積算加速度値である。前節の傾き計と同様にオレンジ色が伸縮計の変位であり、濃い色程下に設置したものである。同様に緑色が iPicket ごとの加速度センサの値であり、濃い色程下に設置している。取得した iPicket は P33 の図 4.23 の中で左側の 1l、2l、3l、4l、6l である。

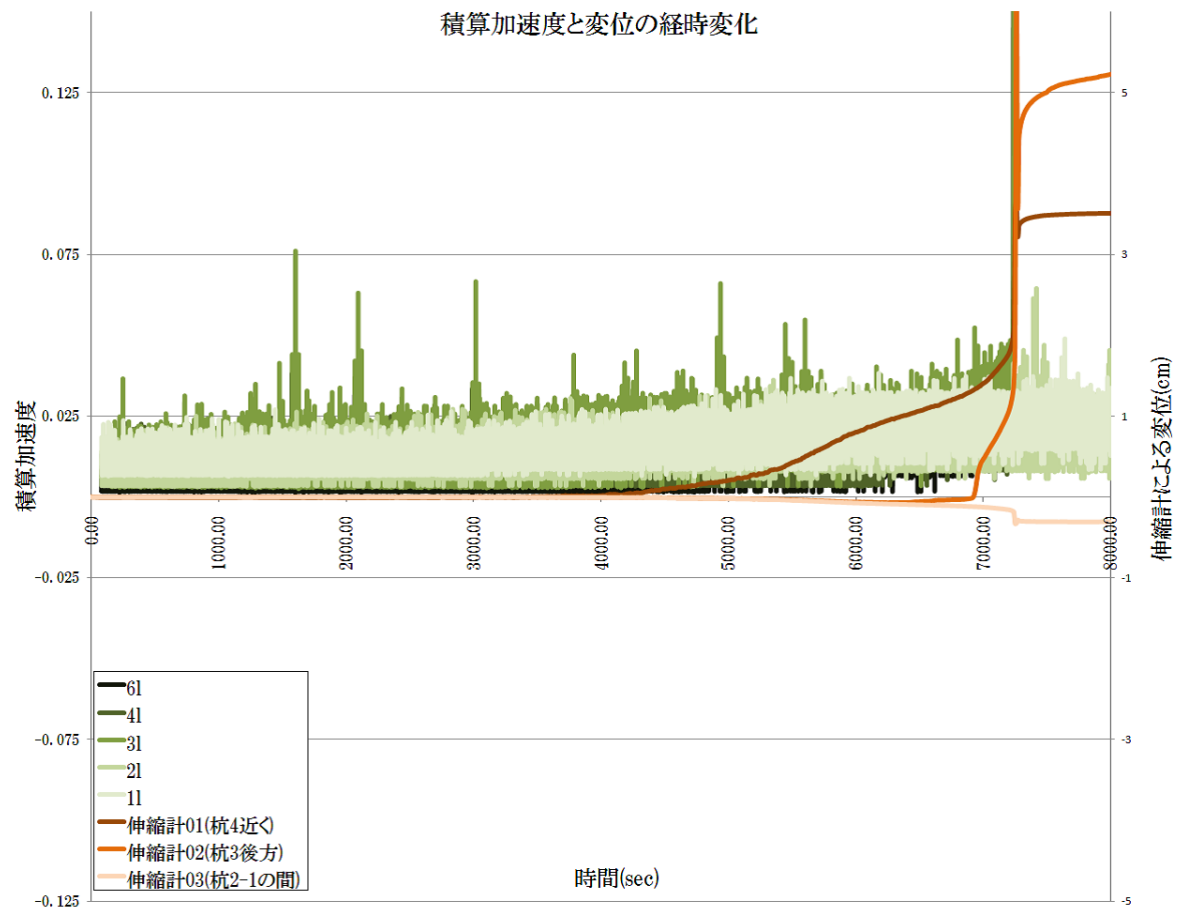


図 5.5 杭加速度計による変位と伸縮計による変位

5.3.3 加速度計を用いた早期斜面崩壊検知提案手法考察

積算加速度は図 accheni において各 iPicket と同じような数値の上昇を示している。崩壊が起きた際に 6l、4l、3l とともに積算加速度の上昇を示しており、転倒を検知できることを示している。崩壊前はすべての iPicket で同じような数値の上昇を示しており、傾き計の図 5.3 でみられたような設置個所による個別の iPicket の数値の動きは見られない。3l

の積算加速度が時より大きな値を示しているが、他の iPicket ではその傾向が見られないために、これはセンサ個体の問題である可能性が高い。この提案手法では斜面崩壊の予測をすることは、転倒する iPicket と転倒しない iPicket で値の変化が等しいため、難しいと考える。本手法の改善のためには、積算するステップをより増やし、その傾向を解析する必要がある。また傾き計で崩壊前の傾向が出ているためより、高精度な加速度計を導入し、高頻度でモニタリングを行うと改善されると推測する。

5.4 提案手法のまとめ

本研究で行った斜面崩壊早期予測の提案手法は従来の地下水位計や、2 地点間を計測する必要がある伸縮計ではなく、iPicket が挿入された地点での崩壊の予測を行うものであった。iPicket から獲得出来る傾きと加速度からそれぞれ手法を提案した。傾き計の提案手法に関しては、転倒するかしないか、変位が生じたで各 iPicket ごとに変化が見られた。しかしながら斜面移動量に換算した値は変位の約 10 倍となることや地すべり面に杭の先端が届いていないことによる不確定移動量の存在など、扱いを検討すべき要素もあった。加速度に関しては積算加速度という指標を示した。方向に依存しないため iPicket のコンセプトの一つである簡易性に合致する。斜面崩壊時の杭の転倒も検知していた。しかしながら崩壊する斜面と崩壊しない斜面での積算加速度の変化は見られず、崩壊の予測を行うことが出来なかった。今後は積算ステップの検討やより高精度高頻度で加速度の取得を検討する必要がある。

iPicket の傾きと加速度を用いて崩壊の検知と早期予測手法の提案を行ったが、iPicket には RSSI や温度計も内蔵されている。RSSI は精度が低い但し崩壊後に杭の相対的位置関係を構築するために使用出来る可能性がある。また崩壊前の温度変化についても実証実験において地下水位の流出などでの気温変化を取得出来れば指標になるといえる。

第 6 章

結論

6.1 今後の課題

斜面崩壊の検知手法については、傾き計において斜面の設置場所によって異なる傾向がでた。しかしながらすべり面と iPicket が離れているなど変位課題が残る。今後は杭の長さの検討やデータの見直しなどを行う必要がある。加速度計を利用した積算加速度であるが、本実験を用いたデータでは設置した場所による崩壊前の傾向は示すことは出来なかった。今後は傾き計などの補助的指標に用いることも検討を行いつつ新たな指標の導出も行う必要がある。

今後の課題は 3.4 節でも掲げた周辺研究課題への取り組みでもある。本研究で扱った斜面崩壊早期予測検知問題の他にも以下の課題がある。

1. 長期運用問題
2. ネットワーク形成問題
3. メッシュサイズ問題
4. 崩壊範囲推定問題

詳しくは 3.4 節で述べているので割愛するが、これらの問題の解決するために情報通信や土木分野を横断して研究する必要がある。また、降雨実験施設だけでは実証実験を行うことが出来ないため、実際の斜面で長期間観測する必要がある。従って、これらのための実験場を確保する必要がある。

6.2 まとめ

本論文では斜面環境モニタリングシステムの iPicket の開発を行った。iPicket は加速度センサ、傾きセンサ、温度計、RSSI 等を有する無線マルチセンサデバイスである。無線通信規格の Zigbee によって iPicket が互いに無線通信しマルチホップ形式で取得したセンサの値をサーバーまで届け、斜面災害の危険があった場合に早期に住民に避難を伝えるシステムである。また、災害発生後にも異常のあった杭を判定することで斜面崩落の範囲を推定する。

斜面土砂災害において iPicket を利用した早期予測システムを構築するための実測データを取得するため、仮想的な斜面崩壊実験を行った。簡易的な基礎実験を行い転倒した場合の杭の加速度によって転倒を検知出ることを示した。また、人口降雨可能な実験施設を利用し、大型斜面中の単独杭と中型斜面中の複数杭の加速度、傾き等のセンサのデータを取得した。

iPicket の一本の杭という性質から iPicket 内部のセンサで取得で出来る傾きと加速度を利用した予測法の提案を行った。傾きを利用した提案手法では崩壊前の個々の iPicket において斜面の移動を示す値を獲得することが出来、斜面の移動を読み取った。しかしながら、すべり面と iPicket が離れているため精密な斜面の移動して捉えるには杭の長さの検討も含めた改良が必要である。加速度を利用した指標として積算加速度を示した。この指標は杭の方向によることがないが、結果として崩壊前の斜面の挙動の違いを取得することが出来なかった。

謝辞

本論文を執筆するにあたりによくの方にお世話になりました。学部と研究室の分野が違
う私を快く研究室に迎え、技術に対する視野を広げるきっかけを与えて下さり、また研究
に対して多くの指導をして下さった瀬崎薫准教授、iPicket のアイデアや実験、データ
の処理を初め多くの研究活動を指導して下さい、私が迷惑をかけながらもいつも優しく指
導して下さいた瀬崎研究室岩井将行助教、研究室の一員と変わらず熱心に指導して下さい
た柴崎亮介教授、大型降雨実験施設を無理を言って使わせていただいたにも関わらず研究
に多くの有意義なアドバイスを下さった(独)防災科学技術研究所酒井直樹氏、石澤友浩
氏、杭の設計変更にも快く答えて下さり杭の将来の利用法について熱く教えていただい
た(株)リプロ岡田様、西谷様をはじめ社員の皆様、実験や現場見学でもお世話になった
齋藤修氏をはじめ茨城大学環境地盤工学研究室の皆様、研究室の先輩として研究に対する
姿勢を常に示して下さいた瀬崎研博士課程陳紅陽氏、ハンセギョン氏、石塚宏紀氏、Asif
Hossain Khan 氏、研究室での生活を私の好き勝手にやりながらも大変に有意義な思い出
の残る楽しいものにしてくれた同期の江口洋平氏、平山陽彦氏、張銖炯氏、李継氏、後輩
の何斌斌君、酒巻智宏君、澤上佳希君、また不慣れな研究活動や出張の手配で大変お世話
になった秘書の松本夏穂さん、坪野明日香さん、公私ともに仲の良い時間を過ごし大切な
大学院の思い出を作ってくれた柴崎研同期の桑田賢太郎氏、仲市哲大氏、仙石裕明氏、中
村寿和氏、内藤健志氏をはじめ柴崎研究室の皆様、空間情報学系研究室はじめ社会文化環
境学専攻の友人たち、研究に対して基調な意見をもらいまた立ち寄った際に研究で忙しい
のにも関わらず楽しく話を聞いてくれた中央大学計算力学研究室の友人たち、そして最後
に大学院に進学し研究論文を書き上げるまで優しく育ててくれた家族、この研究に関わっ
ていただいた全ての方に感謝の意を述べたいと思います。

ありがとうございました。

平成 23 年 1 月 24 日
社会文化環境学専攻 今井 大樹

参考文献

- [1] CROSSBOW:屋 外・農 業 用 無 線 セ ン サ ネ ッ ト ワ ー ク「エ
コ」, <http://www.xbow.jp/eKo.html>
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change:<http://www.ipcc.ch/>
- [3] Glacsweb:<http://envisense.org/glacsweb/>
- [4] Kirk Martinez, Philip Basford, Joshua Ellul, Richard Clarke:”Field deployment of
low power high performance nodes”:The Third International Workshop on Sensor
Networks
- [5] 例えば、NEXCO 東日本エンジニアリング:”夢シス (ユビキタス道路メンテナンス情
報収集システム)”:<http://www.e-nexco-engi.co.jp/service/>
- [6] 社団法人地盤工学会:”地盤調査の方法と解説”:丸善,2004
- [7] 松倉公憲:”山崩れ・地すべりの力学 地形プロセス学入門”:筑波大学出版会
- [8] 斎藤迪孝:”斜面崩壊時期の予知”地すべり、第 2 巻、第 2 号、7-12.
- [9] 福園輝旗:”平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測-斜面崩壊の予測に関する研
究 (3)-防災科学研究所研究報告大 46 号、45-81.
- [10] Kalyana Tejaswl, Prakshep Mehta, Rajat Bansal, chandresh Parekh,
S.N.Merchant and U.B.Desai:”Routing Protocols for Landsilde Prediction using
Wireless sensor Networks”:IEEE 2006
- [11] Rosanno JC de Dios, Jason Enriquez, Francis Gabriel Victorino Earl Anthony
Mendoza, Marc Caesar Talampas, Joel Joseph Marciano Jr:”Design, Development,
and Evaluation of a Tilt and Soil Moisture Sensor Network for Slope Monitoring Ap-
plications”:IEEE TENCON 2009
- [12] 豊澤康男、伊藤和也、TAMARAKAR.S.B、三田地利之、国見敬、西條敦志、大久保
知美:”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、Vol.2 103-110.

- [13] 植竹政樹、酒井直樹、福園輝旗: ” 内部傾斜計による斜面崩壊発生予測手法に関する研究。-土砂災害消防活動時斜面監視への応用- ” 防災科学技術研究所研究報告、第 77 号、2010 .