

2010年度 修士論文

無線センサ杭を利用した
斜面環境モニタリングシステムの基盤研究
Study on Development of Monitoring System
for Slope Area Environment using Wireless Picket

今井 大樹
Imai, Masaki

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

第 1 章	序論	4
1.1	研究背景と目的	4
1.2	本論文の構成	6
第 2 章	斜面環境モニタリングの現状	7
2.1	環境モニタリングの概要	7
2.2	環境・土木モニタリングにおけるセンサネットワークの利用	8
2.2.1	氷河モニタリング	8
2.2.2	構造物ヘルスマニタリング	8
2.3	斜面災害の定義と現状	10
2.3.1	定義	10
2.3.2	現状	11
2.4	斜面計測手法と問題点	13
2.4.1	ひずみの計測	13
2.4.2	地下水位の計測	13
2.4.3	地質調査	13
2.4.4	斜面崩壊後の計測	14
2.5	本研究の目的	16
第 3 章	iPicket System	17
3.1	概要	17
3.2	設計・機能	18
3.3	データフロー	19
3.3.1	崩壊発生前	19
3.3.2	崩壊発生後	20

3.4	研究課題の整理	22
3.4.1	崩壊検知問題	22
3.4.2	長期運用問題	22
3.4.3	ネットワーク形成問題	22
3.4.4	メッシュサイズ問題	23
3.4.5	崩壊範囲推定問題	23
第 4 章	斜面崩壊早期検知のためのセンサ値取得実験	24
4.1	簡易転倒実験	24
4.2	単独杭による大型斜面崩壊実験	29
4.3	複数杭による中型斜面崩壊実験	32
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	36
5.1	斜面災害の予測手法	36
5.1.1	既存の計測手法と iPicket	36
5.1.2	逆数予測法	37
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	39
5.2.1	概要	39
5.2.2	傾き計を用いた早期斜面崩壊予測手法の提案	39
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	39
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	43
5.3.1	概要	43
5.3.2	加速度計を用いた早期斜面崩壊検知手法の提案	43
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	44
5.4	提案手法のまとめ	46
第 6 章	結論	47
6.1	今後の課題	47
6.2	まとめ	48
謝辞		49
参考文献		51

第 1 章

序論

1.1 研究背景と目的

日本では山間部において特に西日本を中心に、局所的集中豪雨による土砂災害の被害が多く報告されている。IPCC の第四次報告書によると、今後気候変動により日本付近の局所的な大雨の増加が予想されている。加えて社会基盤施設の老朽化や、現代政策における社会基盤施設建設関連の公共投資削減等と重なり、維持保守が十分に行われず、災害に対するハードの面における十分な対策を取ることが出来ない地域も発生してくることが予想される。従って、危険にさらされている住民及び自治体は自ら災害の対策を講じなくてはならない。斜面災害において、災害発生前に斜面の状態をモニタリングすることは災害の検知に役立ち、早期の避難で人的物的被害を軽減させる効果がある。加えて、災害発生後にモニタリングすることで被害状況の把握に役立ち、天然ダムの形成判断などの二次災害の防止や早期復興に効果がある。従来、前者においては、歪計や地下水位により崩壊の時期を予測する研究が盛んに行われてきた。落石や臭い、地下水の流出など、経験に基づく予測も行われている。累計雨量による予測もある。また、後者においては航空写真測量やレーザー測量等により崩落後の地形の状態把握が行われている。近年は分解能 1m 未満の衛星写真による地形把握も行われている。測量会社は災害発生後に要請を受け、その後測量し、夜を徹しての作業で地形変動を地形図反映させる。問題点として、両者とも設置が困難であり、また、デバイスが高価であること、情報の収集と構築に時間がかかることが挙げられる。

一方、Crossbow 社の eko-mote[1] などに代表されるような、都市や農場の環境計測場面において利用されるセンサデバイスの低価格化・汎用化が進んでいる。このように自然

環境中にセンサネットワークを設置し、環境情報を取得する機会は、今後増加することが予想される。しかしながら、斜面環境分野の計測においては従来の計測手法の研究は進んでいるものの、簡易的で低価格なセンサを利用し、かつ情報通信技術を利用した伝達システムについてはその体系的整備が進んでいない

以上を踏まえ、筆者らは、杭の中に無線センサを搭載した iPicket と呼んでいるデバイスを提案している。本研究はまず、斜面環境計測において、簡易的で低コストなセンサネットワークを構築するための学問体系的整備を行った。続いて、iPicket で斜面崩壊前後の挙動をモニタリングし、取得データを用いて斜面崩壊早期予測手法の提案を行った。

1.2 本論文の構成

本論文の構成と各章の概要は以下のとおりである。

- 第1章「序論」では、本研究を行うにあたっての背景について述べ、続いて本研究の目的を示す。
- 第2章「斜面環境モニタリングの現状」では、環境モニタリングについて述べた後に本研究を行うにあたって斜面崩壊の定義を行い、現在の計測手法と最新の研究について整理する。
- 第3章「iPicket system」では、斜面災害の諸問題を解決するために提案するシステムについて概要を述べる
- 第4章「斜面崩壊早期検知のためのセンサ値取得実験」では、簡易センサを用いた仮想斜面崩壊を行い、手法と諸条件、結果について示す。
- 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」では、簡易的な斜面崩壊予測のための指標を示す。
- 第6章「結論」では、本論文をまとめるにあたって得られた結論を示すとともに、今後克服すべき課題について述べる。

第2章

斜面環境モニタリングの現状

2.1 環境モニタリングの概要

モニタリングとは状態や状況を継続的に監視、追跡することである。近年の気候変動や都市化により環境へ関心が強まる中で、環境をモニタリングは、人々に真実を公平に伝えるだけでなく、新しい判断基準をもたらし決定権を増やしてくれ、将来を豊かにするという意味で大変重要な情報収集源である。衛星画像などを利用したリモートセンシングから、天気観測など多くのモニタリング技術が研究されている。近年では関東にある雨雲レーダーを結び効率的に運用し都内のゲリラ豪雨の早期予測に役立てようとするプロジェクトもある。このようにモニタリングする計器を一つではなくて複数集めることができればジオグラフィカルなモニタリングの結果を取得することができる。複数のモニタリングしたデータを取得する方法としてセンサ同士を無線通信で結ぶ手法もあり、実世界にセンサをばらまくことが出来れば多くの情報を取得できる。一方で無線のセンサでは電力問題や通信半径、距離計測などの諸問題も存在する。確実に必要な実世界情報を取得するかが環境モニタリングの課題である。

2.2 環境・土木モニタリングにおけるセンサネットワークの利用

2.2.1 氷河モニタリング

センサネットワークはすでに環境分野においてモニタリング手法の一つとして利用され始めている。イギリスの Southampton 大学においては Glacweb と呼ばれるワイヤレスセンサネットワークを利用し、氷河を長期的に観測するプロジェクトが 2003 年から断続的に続いている [3][4]。彼らは地球の気候変動により減退していく氷河をノルウェイとアイスランドにおいて観測し続けている。氷河の観測は夏場は氷が融解し易く、また冬の厳しい寒さでは近づくことができないため無線のセンサネットワークを利用して継続的にモニタリングを行っているのである。氷河の上に Basestation を設置し、そこから Reference Station までデータを送信しサーバーに情報を蓄積している。Basestation の下には probes というカプセルを氷河の下約 70m 程まで埋めて置き無線通信で、温度や圧力といった周辺の氷、土のデータを送信するシステムとなっている。この probes の埋没には高温のウォータドリルが利用されている。Basestation には同様にセンサが搭載され氷河の移動を測る differentialGPS、温度計、超音波で雪を測る計器などを搭載している。システム全体は Linux ベースで作成されている。

冬の間メンテナンスに行くことが出来ないので、センシングのタイミングを効率よく行うことまた Basestation の dGPS の効率の良い運用が研究課題となっている。彼らによるとこの数年のあいだに 1 年ごとに 100m 程、氷河は後退していつているという。視覚的に観測できない場所のデータを長期的に正確に伝えることがセンサネットワークの使命であるといえる。

2.2.2 構造物ヘルスマニタリング

高度経済成長期に新幹線を代表とする多くの土木構造物は、コンクリートや複合鉄筋の劣化により、構造物の安全率を保つことが出来ない時期に入ってきている。阪神淡路大震災後に行われた高速道路高架橋の補強工事のように、多くの構造物の安全率を強化することができれば最適だが、コストの面で問題となる。可能であるならば、維持補修が必要になった構造物から補修工事を行うべきである。補修の点検は本来係員が構造物の橋脚の下などに入りハンマーでたたき音による異常などを地道に検知するという手法が取られてきた。山間部の険しい山肌にそびえる橋脚に行きかんそくすることは、それだけで命の危険を伴いまた、コストも非常にかかるという点で問題がある。

土木コンサルタント会社など [5] ではセンサを土木構造物に取り付け、その間を無線の

センサネットワークを利用し、情報を効率よく、安全に周期的に集めようとしている。例えば、道路の保全会社では高速走行中にデータを集積させるために車体に RFID の受信機を装備させ、橋など土木構造物から受信する振動やひずみのデータを集積するシステムを提案している。

2.3 斜面災害の定義と現状

2.3.1 定義

斜面災害は一般に便宜的に、地すべり・崩壊・土石流の3つに分類される [6]。図 2.1 図 2.2 図 2.3 は兵庫県加西市の HP より抜粋した3つの斜面災害の模式図である。斜面防災に関係する法律の体系もこれに対応する形で整備されている。

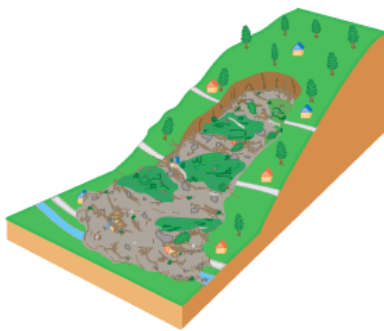


図 2.1 地すべり

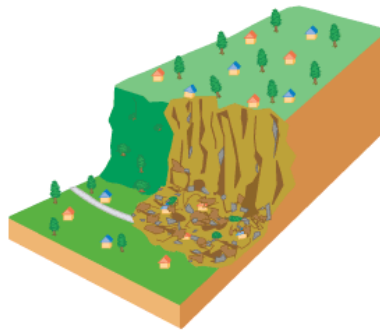


図 2.2 斜面崩壊



図 2.3 土石流

地すべりは土層内の比較的深い位置に定常的なすべり面があり、その上の土塊がゆっくりとした速度 (数 mm/y ~ 数 cm/s) で定常的あるいは周期的、間欠的に滑動しているものである。その移動距離と時間の関係はクリープひずみ (図 2.4) と呼ばれる形をとることがある [7]。クリープひずみは3つのフェーズに分かれている。第一次クリープは初めに土塊が形成された時に土の自重などでひずみが広がる。土の圧密と似たような漸近線の挙動を示し、ひずみ速度は一定になって行く。一定になると第二次クリープである。このフェーズが一番長い。最後にひずみ速度が加速度的に上がって行く第三次クリープである。この頃になると、すべり面と垂直になるとように地表伸縮計を設置し監視を行うようになる。地すべりだけでなく斜面崩壊において第三次クリープのような挙動をとることがある。

崩壊という語句は一般的に急速な移動 (数 m/s ~ 数 10m/s) の場合に用いられ、明確なすべり面が存在しないにも関わらず、降雨や斜面の切り崩しにより土塊が突然動き出すのが特徴である。多くは地表の浅い滑動 (表層崩壊) である。斜面崩壊はときに山崩れ、崖崩れなどとも呼ばれているが、特に崖崩れは、行政的には人家を直撃するような勾配が 30° 以上の斜面の崩壊を指している。浅い板状の高速滑動がある程度以上の距離移動すると土層は運動中に破碎され、十分な水が土層自体に含まれていたり、外部から供給される場合には土石流へと変化する。また、崩壊により形成された天然ダムが崩壊し、ダムが貯え

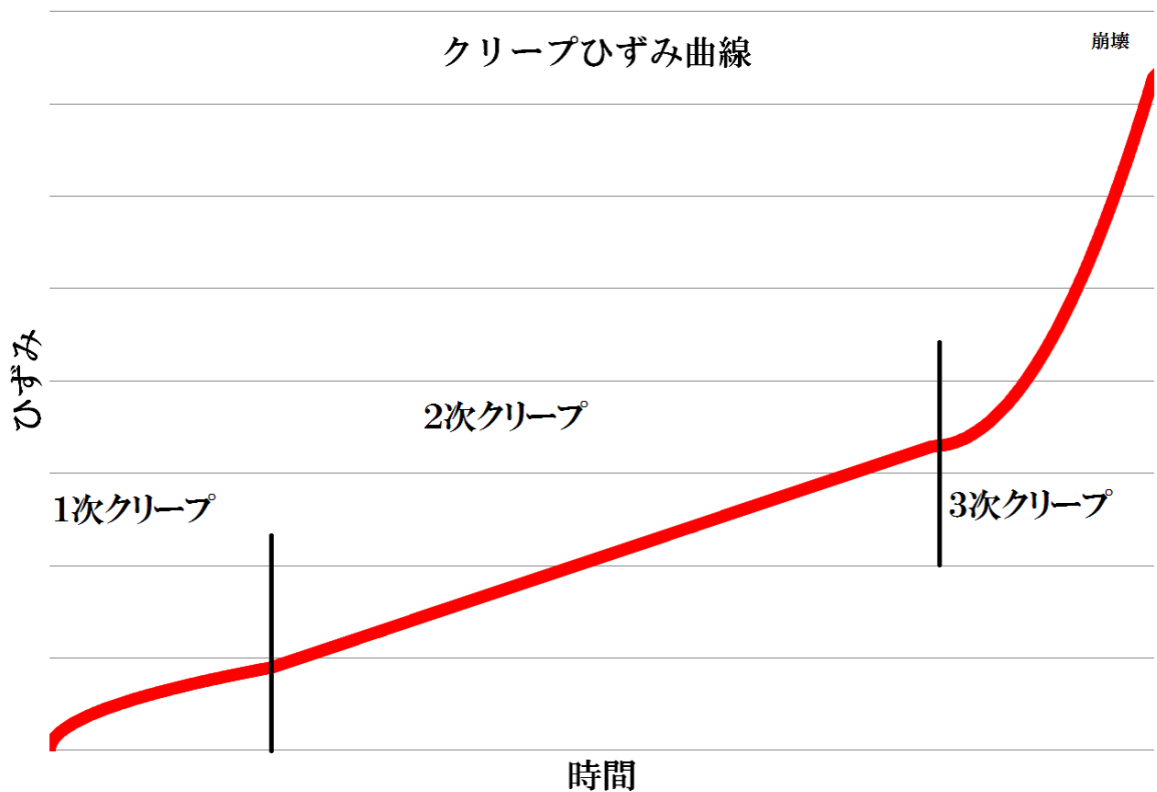


図 2.4 クリープひずみ

ていた水と土砂が土石流となって流化することもある。

2.3.2 現状

日本では、局地的集中豪雨による土砂災害被害が現れている図 2.5 図 2.6 図 2.7。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change) の第四次評価報告書 [2] によると、今後気候変動により日本付近の局所的な大雨の増加が予想されている。大雨による土砂災害対策には斜面への補強や、土石流の流下阻止のための砂防ダム等を建設することが挙げられる。しかしながら、高度成長期に建設された社会基盤の老朽化や、現代政策における社会基盤施設関連の公共投資費削減等と重なり、維持補修が十分に行われず、災害に対するハードの面における十分な対策を取ることが出来ない地域も発生してくることが予想される。従って、危険にさらされている住民や自治体は自ら災害への対策を講じなくてはならない。この場合は高価な構造物を建設することは難しい、よって安価な対策の構築が求められている。

2009年 山口豪雨災害 台風土砂災害		
死者	17	1
けが人	7	4

図 2.5 2009 年の主な降雨による斜面災害の被害

2010年 梅雨前線による大雨被害 奄美地方大雨被害		
死者	7	3
けが人	1	2

図 2.6 2010 年の主な降雨による斜面災害の被害

近年の主な土砂災害による死者・行方不明者の状況

年 月	発 生 箇 所	原 因	死者 行方不明者数
8. 1	新潟・長野	融雪・降水	14
9. 7	鹿児島 出水市	梅雨前線	21
11. 6	広島等全国	梅雨前線	24
15. 7	九州の4県	梅雨前線	23
16. 10	全国各地	台風第23号	23
17. 9	宮崎県	台風第14号	22
18. 7	長野県ほか	平成18年7月豪雨	23
18. 10	北海道ほか	台風第16号, 17号	48
21. 7	山口県, 福岡県	平成21年7月中国・九州北部豪雨	21

図 2.7 近年の主な土砂災害による死者・行方不明者の状況 (防災白書平成 22 年)

2.4 斜面計測手法と問題点

斜面災害において、災害発生前に斜面の状態をモニタリングすることは災害の検知に役立ち、早期の避難で人的物的被害を軽減させる効果がある。加えて、災害発生後に地形をモニタリングすることで被害状況の把握に役立ち、天然ダム形成判断などの二次災害の防止や早期復興に効果がある。従来、前者においては、土木工学や地質学の分野で、ひずみ計や地下水位により地すべりや崩壊の時期をある程度予測する研究が盛んに行われてきた。落石や臭い、地下水の流出など、経験に基づく予測もされており、各自治体では、住民へ斜面の異常を知らせる現象の一つとして防災用 HP や防災教室などで呼びかけられている。合計雨量による予測もある。また、後者においては航空写真測量やレーザー測量等により崩落後の地形の状態把握が行われている。測量会社は昼間に測量し、夜を徹して地形変動を地形図に落とし込む。問題点として、両者とも設置が困難であり、また、デバイスが高価であること、情報の収集と構築に時間がかかることが挙げられる。

2.4.1 ひずみの計測

ひずみ計 (図 2.8) は地表に設置するものと、地中に挿入するものがある。地表に設置するものはすべり面に垂直に設置しなくてはならない。これは地盤の変動が目視出来る程明らかになってから設置されることとなり、設置には危険も伴うことになる。地中に挿入するものは比較的容易に設置することができるが、地中にあるすべり面までひずみゲージを挿入しなくてはならない。地中のすべり面を見つけるためには地盤の状態を見分け専門的な熟練の経験が必要となってくる。GPS により変動を計測するシステムもあるが、これは上空視界の確保され衛星の電波が受信されることが条件となる。森林地帯においては葉などがマルチパスの要因となってしまう精度も確保しにくいことがある。mm 単位の精度を確保するためには専用の反射板の設置や生データを解析する必要がある、即時性や簡易性に劣る。崩壊の進行が早い地点の計測には不向きである。

2.4.2 地下水位の計測

地下水位を知ることも斜面崩壊を予測する上で非常に重要である (図 2.9)。一般的に斜面崩壊は地中の地下水位が上昇し地中の支持力が無くなったことにより斜面崩壊が発生するからである。しかしながら、これらは地中深くに挿入する必要があり設置は簡単ではない。また自然界での地下水位は大変に複雑で、地下の植生や地質などが複雑に混ざりこみ、地下水位を推定することは大変に困難である。



図 2.8 ひずみ計 (地表面変位計)



図 2.9 地下水位計

2.4.3 地質調査

地質調査を行うことも地すべり面の特定や、地下水の浸透係数を調べる上で大変重要である (図 2.10)。地すべり面を調査するためには広い範囲で調査を行う必要があるが、こちらも地下水位計と同様に地面を深く掘るボーリング調査が必要である。

2.4.4 斜面崩壊後の計測

航空写真測量 (図 2.11) やレーザー測量は崩壊後の斜面の状態を知るために大変に重要である。崩壊前の写真との差分をとることで崩壊の規模を推定する。また地図を作製することで早期復旧に向けた足がかりとなる。しかしながらこれらの測量は昼間のみ計測することができる。航空機やヘリが飛ぶことが出来ないからである。早期復旧のためには夜間においても斜面の変動を取得出来るようにすることが重要である。



図 2.10 地質調査

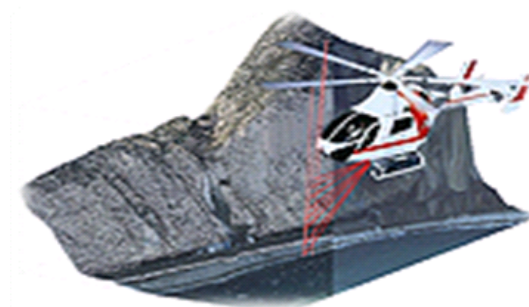


図 2.11 航空測量

2.5 本研究の目的

斜面環境モニタリング手法の現在を省みて、その問題点を以下にまとめる。

1. 高コストであり、範囲が限られる点
2. システムの設定が専門家でないに行えない点
3. リアルタイムで危険が及ぶ人へ情報伝達されていない点
4. 設置が危険である点

筆者らは上記の斜面崩壊の計測における問題点を解消するために iPicket を提案している。詳細については次章を参照されたいが、iPicket が持つ特徴は以下のように上記の斜面災害の計測手法の弱部を補うものである。

1. 低コスト、任意の範囲への設置
2. システムの設定・設置が容易
3. リアルタイムでの危険情報配信
4. 設置の際の安全性の確保

本研究は上記の要求を満たす iPicket の開発および、周辺技術の課題を情報通信・土木等分野を横断して整理したものである。また、被災可能性のある人物に向けて危険情報を発信させるために必要な早期斜面崩壊予測手法について、加速度センサ及び傾きを用いた提案を行う。

第3章

iPicket System

3.1 概要

筆者らは前章で述べた斜面環境モニタリング手法の問題点を解決するために”iPicket”と呼んでいる無線マルチセンサデバイスを提案している。また、iPicket は杭である。杭は地面に簡単に打ち込むことが出来るので、ひずみ計のように亀裂を判断する必要がない。また、マルチホップに無線通信可能で低価格なマルチセンサデバイスを搭載することで、コストを抑え任意の範囲で斜面環境をモニタリングすることができる。設置及び安価ならば住民や地方自治体等が購入し、自ら設置することが出来ると考えたからである。この章では iPicket の設計、機能から無線通信ネットワークのデータの流れを述べた後に研究課題について整理する。

3.2 設計・機能

iPicket は地面に簡単に挿入出来る杭に無線通信機能を持ったマルチセンサデバイスである図 3.1。杭本体は (株) リプロ社の段付杭を採用している。内部にはセンサとバッテリー空間を設けている。本論文でのマルチセンサデバイスには Sunmicro 社の Sunspot を採用している。良好な無線通信環境確保のために杭は地面に完全に埋め込んでしまうのではなく、2/5 程地面に挿すことを想定している。無線通信は 2.4Ghz の通信チップにより Zigbee 通信を行う。iPicket の上部には杭の斜面崩壊中の振る舞いのを計測するために 6 軸の加速度センサがついている。iPicket には他にも傾斜計、照度センサ、無線電波強度 (RSSI)、バッテリー残量計を搭載している。将来的には位置情報を取得するための GPS や、地下水位を測定するために土壌水分計、ソーラー充電システムを搭載することも検討している。安価で簡易的なシステムであると同時にメンテナンスの機会を減らし何度も設置された斜面に足を運ばなくても利用できるシステムにする必要がある。長期運用のためにはバッテリーも杭の中に搭載する必要がある。バッテリーには 4400mha のモデルを利用した。目標としては一年間以上運用することである。後述するが、長期運用問題は重要な研究課題である。センシングレートを降雨などの周辺の斜面環境に合わせて変化させることが有効である。

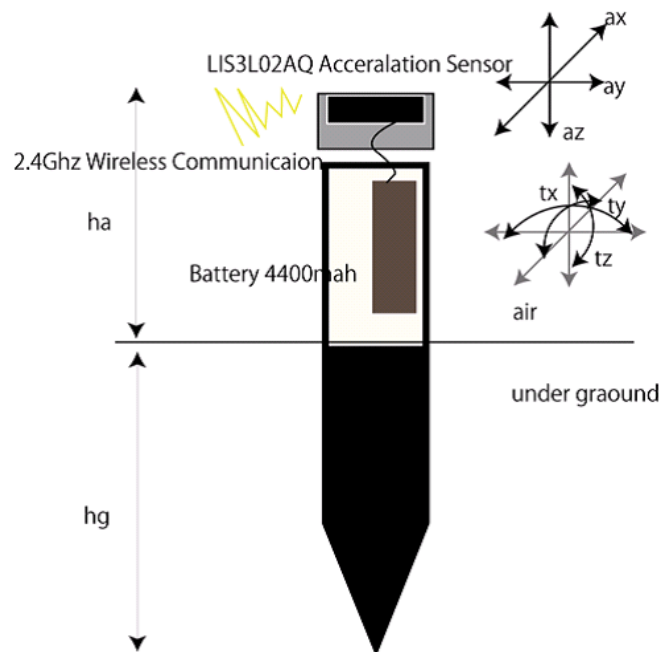


図 3.1 iPicket 内デバイス

3.3 データフロー

iPicket は斜面上の環境を取得するためのデバイスであり環境情報を収集して防災や減災に役立つシステムである。ここでは無線通信のデータフローから iPicket のシステムフローについて崩壊発生前後を想定した流れを説明する。

3.3.1 崩壊発生前

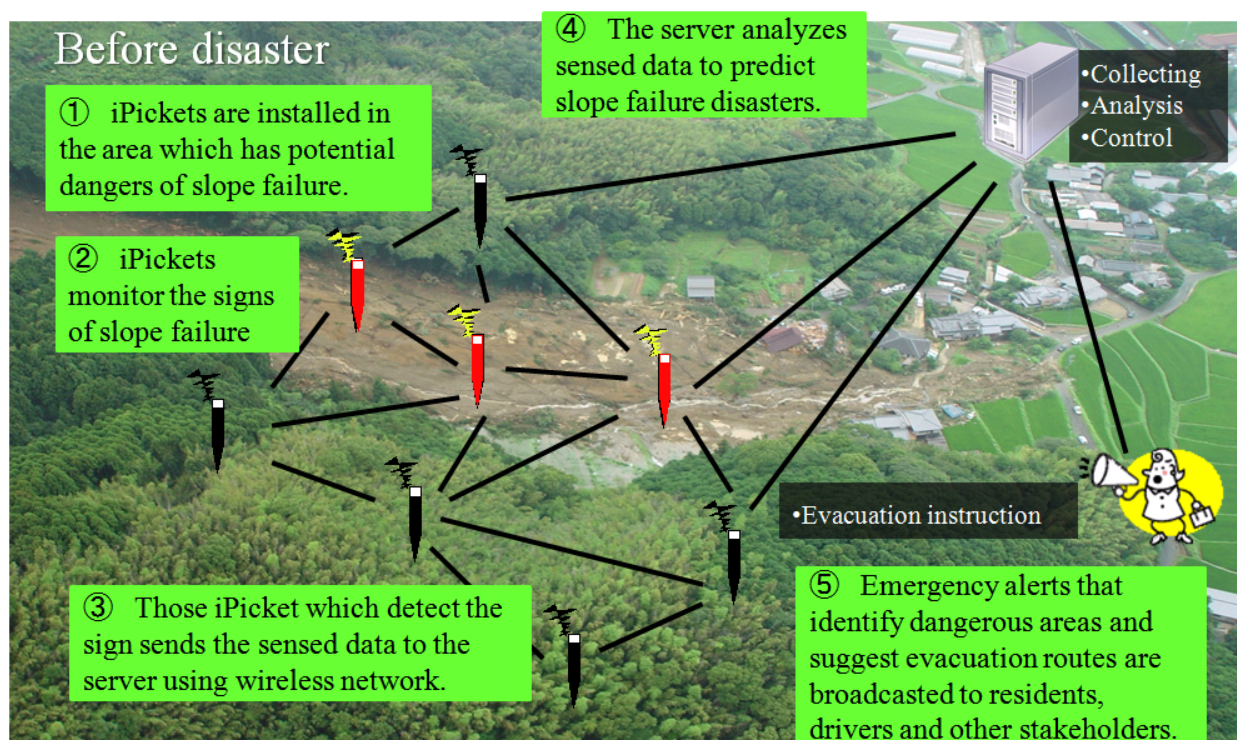


図 3.2 崩壊発生前のデータフロー

iPicket の重要な役割の一つとして斜面崩壊の早期検知が挙げられる。崩壊を少しでも早く検知し、住民に出来るだけ早く知らせることで、人的被害を最小限に抑えることを目的としている。そのためには斜面崩壊の予測技術から、確実なデータ通信、住民への呼び掛けシステムの構築など課題は多い。

iPicket のシステムの流れを図 3.2 に沿って説明する。まず、iPicket を地面に挿入し、その向きや位置の情報をサーバーに登録する。この地面に挿入したときにはある程度斜面崩壊時の不動点と動点が分かれるように配置出来ればデータは観測を行いやすくなる。挿入後に iPicket は斜面環境のモニタリングを行う。このときのセンシングの周期は斜面

環境や天候によって変更される。晴れている時などは降雨による斜面崩壊の危険性はほぼないので出来るだけセンシングと通信を行わないようにする。斜面災害だけではなく、斜面の生態系の監視などで iPicket を用いたい場合は、別途にセンシングの周期を決定する。斜面地面に挿入した iPicket からモニタリングしたデータが無線マルチホップ通信のネットワークを利用して送られてくる。それをサーバーで集約する。サーバーでは斜面崩壊ポテンシャルを算出し、ある閾値を超えたら警報として住民や自治体に非難命令を出す。

3.3.2 崩壊発生後

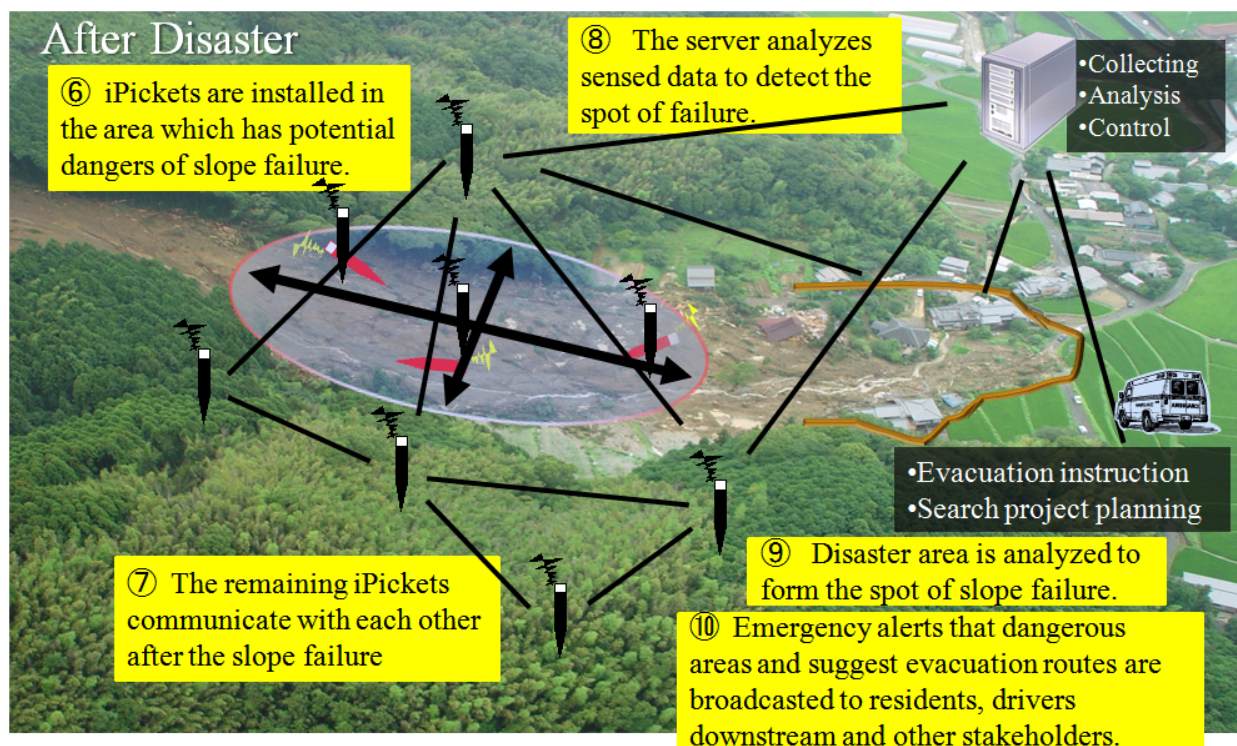


図 3.3 崩壊発生後のデータフロー

iPicket は崩壊後にもモニタリングを行う。斜面崩壊発生後に重要となることは崩壊した土砂が河川を堰き止めていないかということであるとともに、流下した土砂がどれくらいの範囲に広がっているかである。河川が堰き止められている場合はその堆積した土砂は天然ダムと呼ばれている。この天然ダムは、降雨による浸透が続いていると考えられる場合、非常に容易に決壊することがある。決壊した土砂や水は土石流となり、遠方の下流ま

で影響を及ぼすことになる。また土砂の到達範囲がわかれば夜間でもどの建物が被害を受けているかが分かる。夜間に山間部で土砂災害が起こった場合に、救出活動に参加できる人数は道路の閉鎖やヘリコプターが飛べないことなどから昼間より少ないことが想定できる。大地震のような大規模なけが人発生時のトリアージタグではないが、各建物の被災状況からを観て少ない救助隊で最善の救出高価を生むために状況判断のツールとして利用されるべきである。

iPicket システムの崩壊発生後のデータの流れを図 3.3 に沿って説明する。iPicket は斜面崩壊が発生する前からモニタリングを行っているが、斜面崩壊が起きた後に変動した土砂の中ですぐにほかの杭とネットワークを再構築する。倒れた杭により崩壊したエリアを特定することができる。また、倒れて土砂とともに流れた杭から、電波強度を利用し近接関係を再構築することが出来る。それにより杭が集約されていた場合、土砂がその場所に堆積しているということが分かるのである。天然ダムが形成されていると判断されればさらに下流の住民に避難指示を出すことが出来る。このシステムは主に航空写真測量が出来ない夜間や、迅速に天然ダムの形成を知りたいが人が見に行くことが出来ない場所で効果を期待することが出来る。

3.4 研究課題の整理

iPicket はその設置場所とシステム構成から、土質工学と情報通信工学を横断した多くの研究分野発生する。ここでは研究課題についてまとめる。本論文では以後の章において崩壊検知問題を取り上げる。

3.4.1 崩壊検知問題

iPicket の斜面崩壊の検知が早ければ早いほど、住民に早期斜面崩壊の発生を知らせることができ、避難時間を少しでも確保することが出来る。合計雨量、臭いや地下水の流出などの事前現象の経験に基づく判断などもある。従来多くの研究が行われてきており地表面変位計や地下水位等を考慮した予測法が確立されつつある。しかしながら、iPicket は地表面変位も地下水位も直接計測することは出来ない。iPicket は自身の周りの情報を組み込まれた加速度センサや傾きセンサ等の限られた安価なセンサのみで測ることだけ出来る。広く数を多く設置できるという特徴を活かしつつ、斜面崩壊を確実に検知し、少しでも早く予測する iPicket に対応した手法を構築することが必要となる。本報告ではこの検知問題に取り組み安価に搭載することが出来る加速度センサと傾きセンサを利用した崩壊現象の早期検出手法の提案を行う。

3.4.2 長期運用問題

iPicket は非常に簡易的であるシステムを目指している。そのために長期間メンテナンスフリーの状態を保つことが出来れば、多くの時間を住民を守ることに使うことが出来る。特に山間部に多く住む老人たちが自分たちが現地に赴いて iPicket の電池交換などを行わなくてはならない状況は避けたい。メンテナンスフリーのためには電源を効率的に使用しなくてはならない。降雨終了直後ではない晴れている期間は崩壊の危険性が降雨時に比べ小さい期間である。例えば晴れが続けは一日一回程のセンシングでも問題はない。累計降雨量が閾値を超えた場合のみセンシングレートをあげ確実に崩壊早期予測と検知の伝達を行いたい。晴れの判定は照度センサを使うかもしくはサーバー側から直接全てのノードに情報を伝達することとする。この長期運用に関しては実際の自然条件の中で稼働を長期間行っていない。バッテリー容量とセンシングレートを整理しつつ、いかに運用した場合に長期間運用できるかを検討する。

3.4.3 ネットワーク形成問題

一般的に設置する斜面は草木が生え、地形の凹凸により杭の高さでは見通しがきかない地域である。iPicket は、雨が降り斜面災害の発生する危険のある場合にはモニタリング

した大量データを安定的に高頻度でサーバーに転送しなくてはならない。またモニタリングしたデータはマルチホップで転送するため一か所で通信が途切れてもネットワークルーティングの再構築が容易に早急に行われなくてはならない。現在想定している無線通信規格の Zigbee は直進性が高く通信距離が長い分、電波が回りこみにくいという欠点がある。草木の密集率や微地形地においてどのくらい安定的に情報を送信することが出来るのか指標を示すことが大切である。

3.4.4 メッシュサイズ問題

iPicket をどのくらいの頻度で設置するかも重要な問題である。これは検知問題とネットワーク問題の二つに結びついている。斜面崩壊の早期検知と安定的ネットワーク構築のためには iPicket を出来るだけ近づけて配置した方がいいことは明白である。また、iPicket を近づけた方が早期予測においてその場所の崩壊を検知し易くなるというメリットがある。しかしながら、広い範囲をカバーするためには高コストになるということや無線通信の packets 欠損の原因となってしまうことがあるために積極的には行うことが出来ない。今後は、無線通信範囲を決めるデータ packets 欠損量の割合を決め、閾値を設けるなどして容易にメッシュサイズの決定を可能にする。

3.4.5 崩壊範囲推定問題

斜面崩壊後の土砂の到達範囲推定法の構築である。今まで述べたように斜面崩壊の範囲と土砂の到達範囲は相関性があり、簡易的にはあるが推定することができる。また、崩落した杭が集約していることが分かれば、天然ダムが形成されているという危険性を検知することができる。

第 4 章

斜面崩壊早期検知のためのセンサ値取得実験

iPicket は斜面環境モニタリングのために設置されるものであるが、そのアプリケーションの一つとして斜面崩壊の早期検知を目的としている。既存の斜面崩壊や地すべりの計測手法より設置が簡易的である iPicket で早期の崩壊の検知が出来れば、安価に設置し多くの個人の家や裏山や老人ホームなどの現場が使うことができる。そのためには iPicket の中の簡易的なセンサを用いてどの程度斜面崩壊を早期に検知できるか、また斜面崩壊の発生検知できるかを明らかにしなくてはならない。筆者らは、複数の仮想的な斜面崩壊実験を行いセンサの値を取得した。本章では、行った仮想的な斜面崩壊実験についての実験の概要及び、様子、取得したセンサのデータをまとめる。

4.1 簡易転倒実験

最初のステップとして、簡易転倒実験では降雨施設を利用せずに、3通りの外的要因を与えて杭を転倒させセンサの値を取得した。取得したセンサは加速度、傾き、照度、温度、電波強度である。モニタリングの周期は 2sec である。今回の実験で用いた杭は図 4.1 であり、外寸は以下の表の通りである。地面には半分程挿入し実験を行った。各実験の加速度のグラフを示す。また、外力が加わったことを示す指標として Movemetindex を示す。Movemetindex は以下の 4.1 式で表される。

$$Movementindex = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (4.1)$$

ここに $a_x = x$ 方向の加速度、 $a_y = y$ 方向の加速度、 $a_z = z$ 方向の加速度、である。なお、この x, y, z はセンサの軸による。つまり Movementindex とは加速度の合成ベクトルの距離である。図 4.1 に実験で用いた杭を、表 4.2 に杭の寸法を示す。



図 4.1 実験で用いた杭

杭寸法	縦	横	高さ
	90mm	90mm	890mm

図 4.2 杭寸法

杭を転倒させるために行った外的要因は以下の通りである。

1. 斜面上流から土砂を流す
2. 斜面上流から流水を行う
3. 斜面を傾斜させる

以下に順を追ってこの外的要因を与えた 3 つの基礎転倒実験について述べる。

1. 斜面上流から土砂を流す

本実験ではショベルカーを用いて盛土をし、締め固めを行っていない斜面に 2 本の杭を指した。斜面上流より、ショベルカーを利用し繰り返し土砂を流した。この実験は最後に杭が転倒するまで続けた。この実験は仮想的な土石流の実験という意味合いが強い。本実験の様子 4.3 と取得した加速度、及び Movementindex を図 4.4 に示す。

incline は土砂があたり傾きだした時点を示している。fall は杭が横になって倒れたことを示している。本実験において取得した加速度の値は徐々に変化していることが見てとれる。土砂を繰り返し流した影響によって杭は傾いたがその際の姿勢を示す加速度については取得することが出来ている。Movementindex においてはほとんど変化はみられない。



図 4.3 斜面上流から土砂を流す

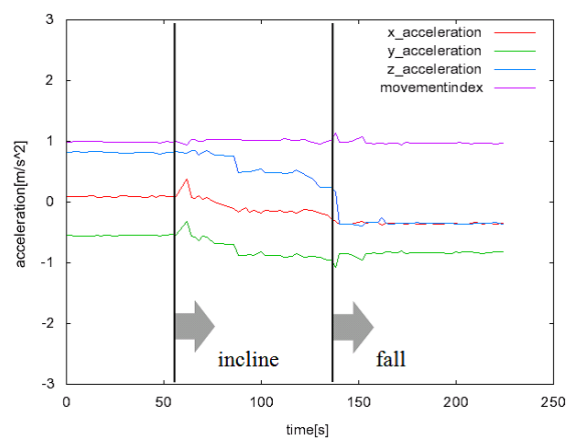


図 4.4 加速度および Movementindex

本実験ではショベルカーで落とす程度の土砂量がこの大きさの杭にあたって加速や外力としては検知しにくいということである。これは実験回数を増やしたり、センサの取得周期を短くするとより正確に言える。

2. 斜面上流から流水を行う

本実験では締め固めを行っていない斜面に杭を挿し、斜面上流から一定流量の水を流し続け杭周辺の土砂を削り転倒させた。今回の実験も杭が転倒するまで行った。今回の実験は斜面崩壊や斜面表層に水が流れて杭の支持力に影響を与えてしまった場合を想定している。本実験の様子図 4.5 と取得した加速度、及び Movementindex を以下の図 4.6 に示した。

本実験では少し傾いたあとに杭は一気に転倒した。所得した加速度の値は前実験に比べると大きな変化を 3 軸ともしている。Movementindex においては 3 G までかかっており、転倒の衝撃が大きいことを推測できる。杭の転倒を早期に検知するような加速度や Movementindex の動きは見られないが、杭がほぼ直立から、締め固めを行っていない地面へ転倒した時の力を取得することが出来た。

3. 斜面を傾斜させる



図 4.5 斜面上流から流水を行う

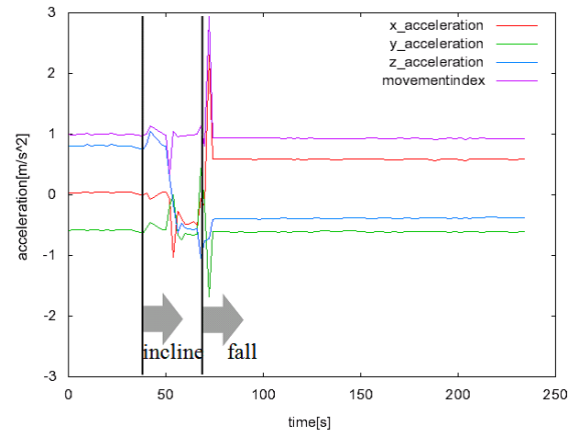


図 4.6 加速度および Movementindex

本実験では傾きの角度の変化によって斜面崩壊を行った。トラックの上に盛土を行い、杭を8本挿し後に荷台を傾斜させた。この実験は最後の杭が転倒するまで斜面の角度を上げ続けた。この実験は仮想的な斜面崩壊の実験である。本実験における杭の配置を図 4.7 に示す。本実験の様子 4.8 と取得した加速度、及び Movementindex を以下の図 4.9 と図 4.10 に示す。

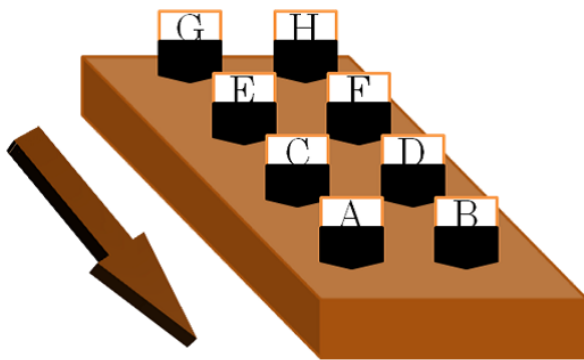


図 4.7 杭配置図



図 4.8 傾斜角度を変化させ崩壊させる。

杭は A、B C、D F H E、G の順に倒れた。同じトラックの荷台を利用して

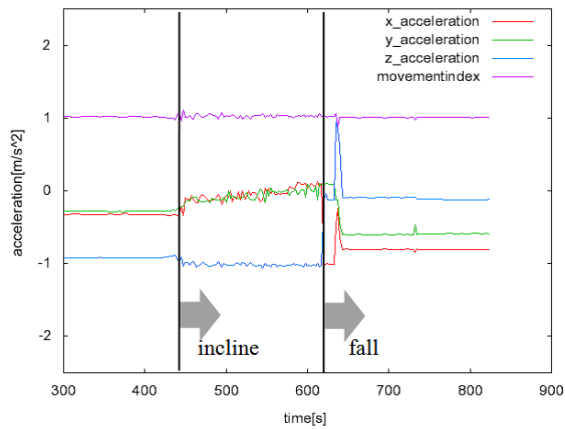


図 4.9 B のグラフ

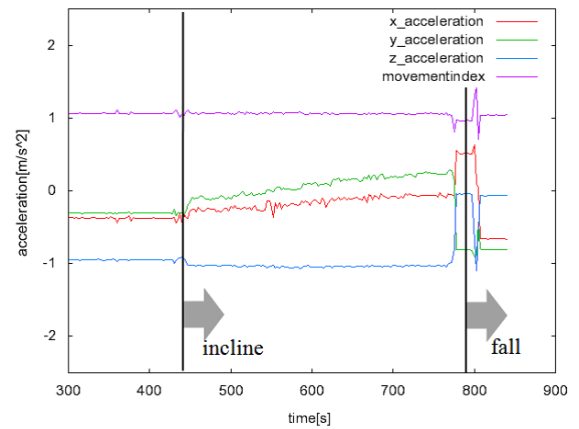


図 4.10 G のグラフ

いるので *incline* の時間は同じである。傾いた杭の時間が同じということが分かる。また、斜面の傾きに対応した加速度の変化も同じ傾向を示している。B と G の倒れたタイミングは同じであるが、加速度の傾きは同じである。B において *Movementindex* はあまり変化が見られない。しかしながら、G については転倒する際に変化がみられる。G は B よりも高所に位置しており、またトラックの荷台の下側の土が崩落していたために力が強かったとみれる。

また、今回の実験において無線通信の際にデータの欠損がみられた。これは、8 本全て同じチャンネルで同じレシーバに送信していたため、パケットが欠損していたためとみられる。

実験のまとめとして、今回の実験では 3 つの外的要因を与え杭を転倒させた。全ての実験で転倒時と傾いた時の加速度の変化を取得することができた。よって杭を利用して斜面崩壊の発生を検知することは可能である。本実験では各実験とも行った回数は一回なのでデータの信頼性はあまり高くない。また周期が 2sec であったので、加速度の十分には瞬間的な変化を取得出来ていない。

4.2 単独杭による大型斜面崩壊実験

本実験では、茨城県つくば市にある独立行政法人防災科学技術研究所が所有する大型降雨実験施設(図 4.11)を利用し、単独杭の斜面崩壊前の加速度値を取得した。大型降雨実験施設とは斜面崩壊、洪水被害、土壌侵食、電波減衰など豪雨に起因する災害ならびに諸現象の解明、予知予測、対策構築のために利用される施設である。本研究に用いた施設は縦 49m、横 76m、高さ 21m の大きさで世界最大級の降雨実験施設である。降雨強度は 15~200mm/h まで調整可能である。本実験で利用した杭は図 4.15 であり寸法は表 4.16 である。杭は大型斜面に図 4.17 のように 1 本設置した。また、今回の実験では側面とひもでつながれており、斜面崩壊が発生した後は斜面下部まで落下しない仕組みとなっている。従って、本実験では斜面崩壊の発生前の加速度の取得を目的とした。斜面の大きさは図 4.18 で、降雨スケジュールは図 4.13、土質条件は図 4.14 の通りである。実験では、降雨スケジュール図 4.13 のように 2 日間雨を降らせ斜面崩壊を発生させた。1 日目は地面を締め固めるためであり、2 日目に降雨強度を上げて斜面を崩壊させた。本実験において斜面崩壊後の図 4.19 と取得した加速度の図 4.20 を示す。



図 4.11 単独杭大型降雨実験施設 (防災科研)



図 4.12 単独杭大型斜面

。