

地すべり地地下水の挙動に関する実験的研究 ——地下水排除工と地すべり移動との関係——

曹 崇 銘*

Experimental Study on Groundwater Fluctuation in Landslide Area —the Relation between Groundwater Drainage Works and Landslide Movement—

Tsungming TSAO*

目 次

第1章 序論	2
第2章 平沢地すべりの概要および観測方法	6
第1節 平沢地すべり試験地の概要	6
第2節 地すべり移動層および地下水流動層の調査	8
第3節 すべり面付近の間隙水圧の観測方法	9
1. 地すべり移動層に対応した間隙水圧の観測	9
2. 集水井の部分ストレナー集水ボーリングの集水量観測	10
第3章 集水井施工によるすべり面付近の間隙水圧の変動特性	12
第1節 集水井施工前の圧力水頭の変動	12
第2節 集水ボーリング孔の掘削による圧力水頭の低下	14
1. 掘削延長・方向による圧力水頭の変動	15
2. 全孔ストレナー観測孔の地下水水位変動	17
3. 集水ボーリング孔すべての孔口にバルブを取り付ける予備実験	17
第3節 まとめ	19
第4章 集水量制御（バルブ開閉操作）実験におけるすべり面付近の間隙水圧の挙動	19
第1節 はじめに	19
第2節 実験方法	19
第3節 集水量制御実験（1986年と1987年の実験）の結果および考察	20
1. 集水井のバルブ操作と圧力水頭の変動関係	20
2. 集水ボーリング孔からの流出特性	23
3. 降雨量, 集水量, 圧力水頭の相互関係	24
4. 圧力水頭変動の応答時間（1986年）	25
5. 集水ボーリング孔別集水量（1986年）	27

* 東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻

* Department of Global Agricultural Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.

第4節	まとめ	29
第5章	人工的に地すべりを発生させる実験	30
第1節	はじめに	30
第2節	人工的に地すべりを発生させる従来の実験研究	31
第3節	実験前の地すべり移動状況	32
1.	パイプひずみ計の観測結果	32
2.	すべり面測かん調査の結果	36
3.	地盤傾斜計の観測結果	38
4.	バルブ操作による圧力水頭, 集水量, 移動量の相互関係 (1986年と1987年の実験)	40
5.	バルブ操作による圧力水頭と移動量との関係 (1988年と1989年)	42
6.	集水ボーリング孔別集水量 (1988年と1989年)	45
第4節	実験方法	46
第5節	実験結果および考察	48
1.	降雨の長期変化と圧力水頭の変動比較	48
2.	集水井のバルブ操作が地すべり移動に与える影響	51
第6節	まとめ	53
第6章	結論	53
謝辞		55
要旨		55
引用文献		58
Summary		60

第1章 序 論

地球環境にいま大きな変化がおきつつある。世界中いたるところで、異常気象が起こり、さまざまな形をとって現われている。台風、ハリケーン、サイクロンがいずれもこれまでとは異なった強さとルートをもって頻繁に発生している。北アメリカ大陸、アジア、ヨーロッパのいたるところで、雨の降り方が大きく変わってきている。大洪水と大干ばつとが交互に起こり、数多くの生命が失われ、自然が破壊されている。「国際防災の十年」委員会が出した報告に採用されている統計によると、世界中での地震、地すべり、洪水、津波、ハリケーン、竜巻、火山噴火、自然火災による災害の犠牲者は、過去20年間で280万人を越え、820万人もの人々に被害を与えている (Schuster, 1988)。そのうちの地すべり災害は、一般の新聞・テレビの報道、国際地すべりニューズレターなどによると、世界での悲惨な災害の発生事例のうちのかかなりの割合を占めている。最近の災害事例を挙げると、台湾中部の南投県でM7.6の大地震により発生した山体崩壊・地すべり (1999)、インドのピトラガル州マルバ村で発生した地すべり (1998)、日本の秋田県鹿角市八幡平で発生した地すべり災害 (1997)、台湾中部の陳有蘭溪で台風により発生した地すべり (1996)、カナダケベック州で発生した塊状後退性地すべり (1996)、ノルウェーで第7回国際地すべりシンポジウム (ISL) 期間中に発生した finneidfjord 地すべり (1996)、中国甘肅省永靖県の黒方台で灌漑により発生した地すべり (1996)、ウクライナのクリミア南西部のセルブクラ山の斜面

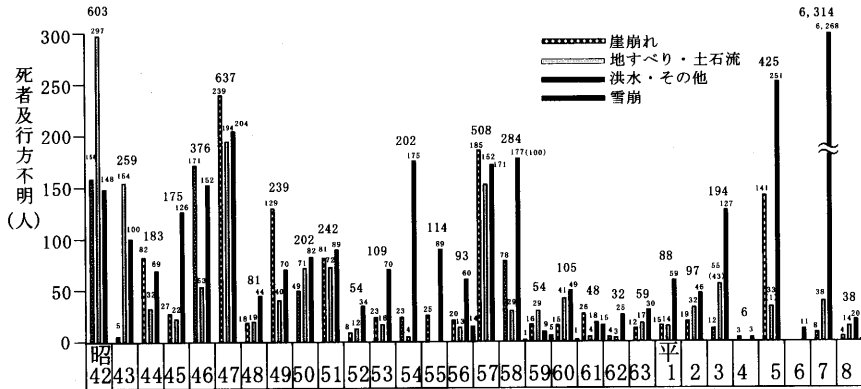


図-1 昭和42年から平成8年までの自然災害による原因別死者行方不明者数（砂防・地すべり技術センター，1996より作成）

Fig. 1. Dead and missing numbers due to national disasters by cause (1967-1996).

注) 自然災害のうち、台風、大雨、強風、高潮、地震、津波災害について集計したものであり、合計に登山者の登山中の雪崩による災害は含んでいない。

昭和58年()内：津波による死者、数；平成3年・5年()内：火砕流による死者数，平成8年12.6 蒲原沢土石流災害による死者数を含んでいる。

で活動中の地すべり(1996)，日本の兵庫県南部でM7.2の大地震により発生した地すべり災害(1995)，アメリカのカリフォルニア州南部で豪雨による発生した地すべり・斜面崩壊(1995)，ユタ州Zion公園内で発生した地すべり(1995)，ペルーのマチュピチュで発生した岩盤すべり(1995)などがある。

一方、図-1（砂防・地すべり技術センター，1996）によれば、日本では、土石流・地すべりあるいはがけ崩れが原因となって多大の被害が発生している。特に、地すべり災害においては台風・梅雨による豪雨，融雪などに起因する地下水変動を原因とするものが大半で，そのうち豪雨に起因するものが66%を占める（吉松ほか，1985）。最近地すべり災害が多発している原因には，1950年代末頃からの著しい経済成長によって，土地の高度利用が急激に進展し，山地・丘陵地が開発されるようになり，道路や住宅造成などによる大規模土工に伴う地すべりや，ダム湛水に関連した地すべりなどの災害が急増したことも影響している。

地すべり対策には回避と防止の二つの方法がある。回避は地すべり地を利用しない方法で地すべり対策として最善の方法と考えられているが，土地利用が進んでいる場合にはこの方法をとれる場合が非常に少なく，一般には防止対策を実施せざるを得ない。一方，地すべりの防止対策は通常，抑制工と抑止工に分類されている（渡ほか，1971；栃木ほか，1974）。それらの分類は表-1に示すとおりである。両者の比較のために，建設省土木研究所でまとめた地すべりの実態統計（図-2参照）に述べられている地すべり対策の箇所を見ると，抑制工のみが60%であり，抑制工と抑止工の併用が40%となっている。特に水抜ボーリングと集水井による地下水排除工が一般的に用いられている。つまり，地すべり地内の地下水排除工が地すべり斜面の安定に重要であることが示されている。したがって，地すべり斜面の安定性を議論するいわゆる安定解析（日本道路公団，1983）を通して，抑制工として地下水排除工の効果判定を行うことは地すべりに起因する土砂災害の防止にとって極めて重要である。

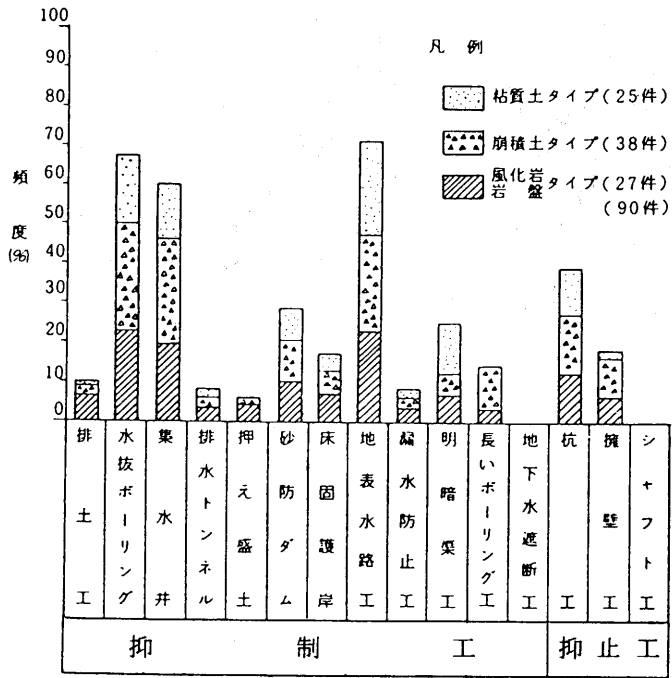
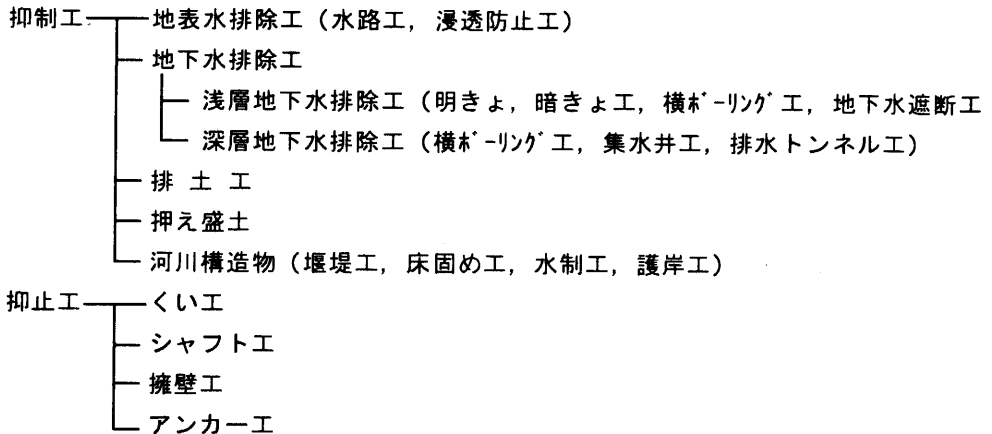


図-2 型分類による防止工法の集計結果 (藤田・坂垣, 1977 より作成)

Fig. 2. Total results of preventive works by type (by FUZITA and ITAGAKI, 1977).

表-1 地すべりの抑制工と抑止工の分類

Table 1. Classifications of control and prevention works



地すべりの発生原因は、降雨、融雪などによる間隙水圧の上昇がすべり面付近での土のせん断抵抗力を著しく減じ、地すべり土塊が不安定化することである。地すべりの誘因となる間隙水圧を排除するため、地すべり抑制工として集水井による地下水排除工が広く施工されている。現在の集水井による地下水排除工は、集水井の井筒と全孔ストレーナーの集水ボーリングを併用して地下水を排除する排水工法である。

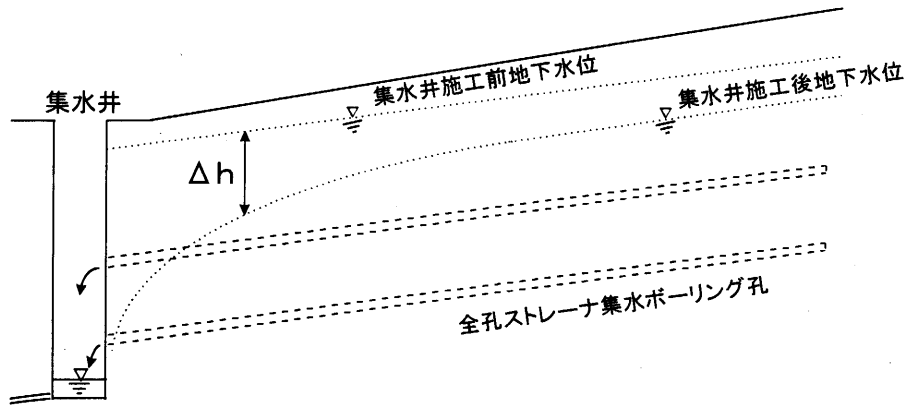


図-3 地下水位の低下効果

Fig. 3. The dropping effects of groundwater level.

従来、集水井による地下水排除工の効果を評価する一般的な方法は、集水井付近に設置した全孔ストレーナー観測孔の地下水位変化を利用し行われる方法である。その効果は井戸理論公式を安定計算に導入することにより検討されてきている。また図-3の断面図に示すように、地下水位の低下量 Δh と集水ボーリングの施工密度との関係についても多くの研究が行われている（奥園ら, 1985; 丸山ら, 1996）。

一般に地すべり地の地下水挙動は、水文地質構造の複雑さが原因となり、個々の調査地点や深度において異なった挙動を示すことが多い。従来、地下水位の観測には、ボーリング孔に多孔管を立て込んだ観測井の地下水位変化を測定する方法が用いられてきた。しかし、この方法では全孔ストレーナー観測孔の地下水位は複数の滞水層の圧力水頭が混在した結果を計ることになり、実際にすべり面に作用する間隙水圧を見逃すことになってしまうと指摘されてきた（岸本, 1969; 川上, 1986; 松浦ら, 1996）。このため、現在では、ボーリング孔のすべり面付近に部分ストレーナー加工された多孔管を入れ、ストレーナー区間に間隙水圧計を設置して圧力水頭を計測する例が多くなってきた（檜垣ら, 1991; 吉田ら 1991）。

一方、集水井を掘削し、井内から集水ボーリングを打設し地下水を排除することは、一般的に行われている。通常集水ボーリングでは、ボーリング孔全長にわたってストレーナー加工を行う場合が大半である。しかし、集水ボーリングの効果を評価・検討するためには、すべり面付近に部分ストレーナー加工された集水ボーリングによって地下水排除を行い、これと併せて間隙水圧の変化も測定することが望ましい。これにより他の地下水流動層からの地下水がすべり面に作用する影響が緩和され、施工前後の間隙水圧の挙動はより精密に計測できると考えられる。

本論文では、埼玉県児玉町地内平沢川右岸に発生した地すべり地を研究対象として、過去十年にわたって行われた調査・実験結果を基に、1) 集水井の集水ボーリングの掘削に伴う地すべり地内の間隙水圧の低下特性および集水ボーリングからの初期排水特性の解明。2) バルブ開閉実験における間隙水圧変動特性、集水ボーリング群からの排水特性、降雨によるそれらの変動特性を解析し、集水井排水工法による地下水低下の実態と地すべり地地下水の複雑な挙動の解明。3) バルブ操作により間隙水圧を増加させて人工的に地すべりを発生させることの可能性を検討することも含めて、今後の地すべり対策工改良への知見の集積を試みようとするのが目的である。本研究

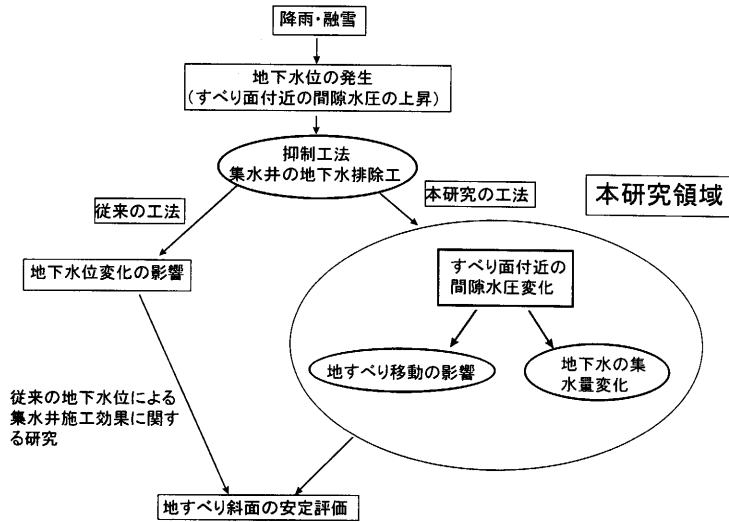


図-4 本研究の背景と領域

Fig. 4. Background and region of this paper.

の位置づけは図-4 に示す。

本論文は全6章より構成されており、第2章では、平沢地すべり地の概要、調査した地すべり移動層と地下水移動層との関係を記述する。そして第1章で提示された集水井の地下水排水工法の問題点の解決を目的とした新たな集水井による地下水排除工法を述べる。第3章では、間隙水圧を低下させる地下水排除工法によって得られたすべり面付近の間隙水圧の低下効果を検討し、さらに集水井の掘削延長・掘削方向との関係について考察を加える。

第4章では、集水井からの集水量制御（バルブ操作）実験の結果を整理して、間隙水圧の時系列変動と降雨変動との関係を検討する。さらにすべり面付近から排除された地下水の流量について、降雨と間隙水圧の相互関係を定量的に評価する。

第5章では、集水井の集水井の掘削孔に取り付けたバルブの閉止操作を行い、降雨に伴う間隙水圧の上昇が地すべり発生の原因となっていることを人工的な実験より実際に確認するとともに、すべり面付近の間隙水圧の変動や地表変動の調査を実施することにより、集水井の施工効果に対する検討を行う。

第6章は、結論である。

第2章 平沢地すべりの概要および観測方法

第1節 平沢地すべり試験地の概要

今回観測対象とした平沢地すべり地は、図-5 に示すように、埼玉県児玉町内小山川支流の平沢川右岸に発生した面積30haの地すべり地である。図-6, 7 に示すように山頂直下は40~60°の急斜面で、その下部が10~20°の台地状地形となっている。山腹斜面は急~緩~急と続き、緩斜面は田畑として利用され、湿地帯や湧水地がみられる。緩斜面と急斜面の境界付近（中部ブロックの滑落崖付近）に1~2mの段差が連続している。地質は長瀨系三波川変成岩地帯に属し、黒

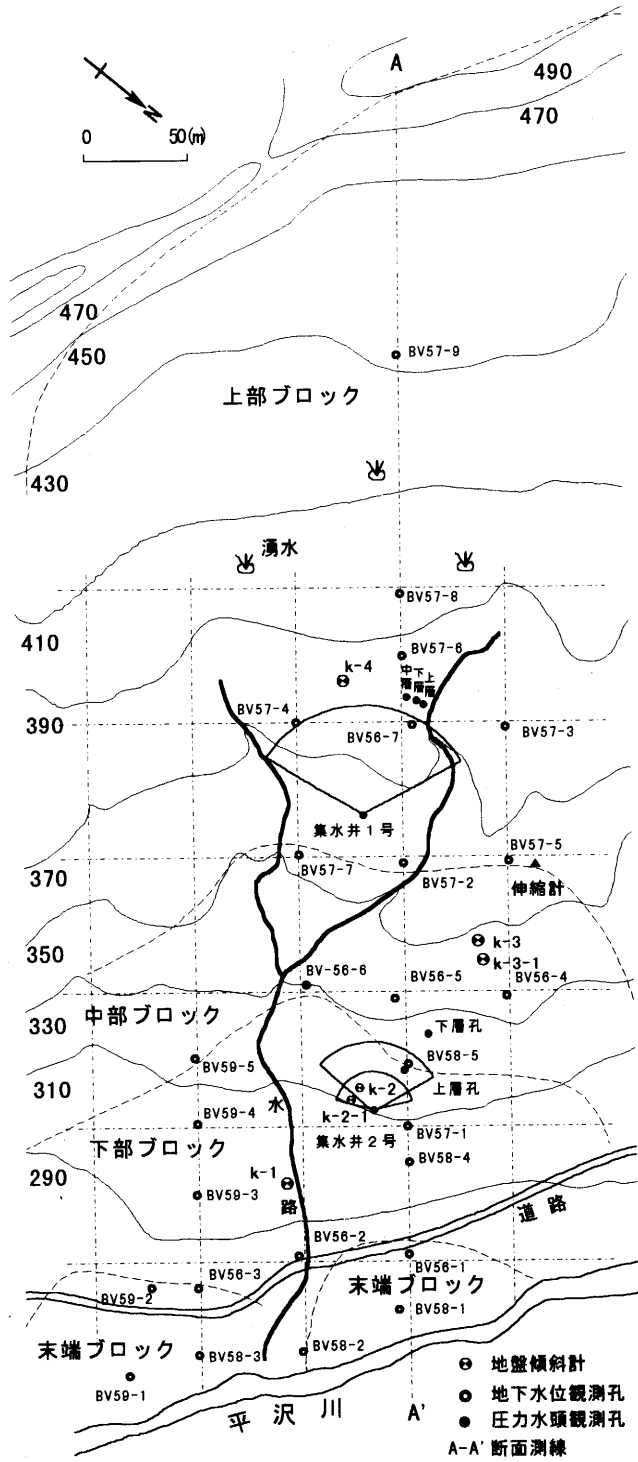


図-5 平沢地すべり地形および集水井配置図

Fig. 5. Landslide morphology and location of drainage wells in Tairasawa.

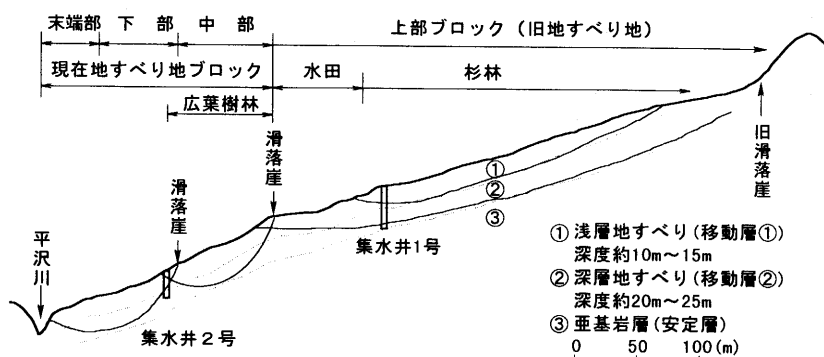


図-6 平沢地すべり地の移動層

Fig. 6. Moving stratum of Tairasawa landslide.

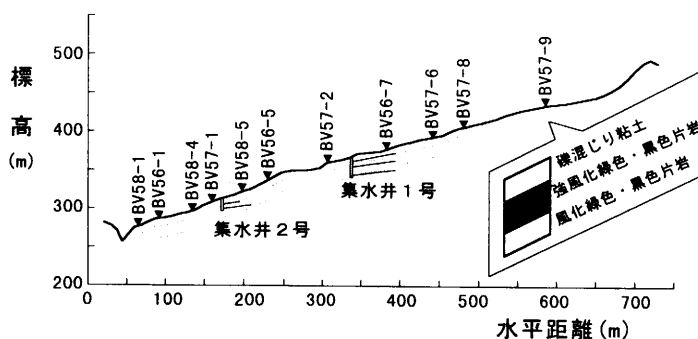


図-7 平沢地すべり地の A-A' 断面図

Fig. 7. A-A' cross section of Tairasawa landslide.

色片岩と緑色片岩の互層をなしており、軟弱で固結度が低い。

第2節 地すべり移動層および地下水流動層の調査

地すべり現象としては、山腹斜面に発生しているき裂、地表の凸凹、民家の傾き、町道の陥没、平沢河岸の崩壊性の地すべりがみられる。図-6に示すようにボーリングコア判定、弾性波探査などの結果から地すべり土塊の浅層地すべり(深度10~15m)は、①を移動土塊として黒色片岩、緑色片岩の風化土から成り粘土化が進んでいる。深層地すべり(深度20~25m)は、②を移動土塊として黒色片岩、緑色片岩が破碎され、軟質化し、岩相のみられる部分と礫混じり粘土状となっている部分が互層を成している。亜基岩層③では黒色片岩、緑色片岩が見られ、上部層に比べると硬質の棒状コアの岩相が多く介在している。また滑落崖などがみられる地形的な特徴やパイプひずみ計、地盤傾斜計などによる土塊移動状況から、地すべり地は上・中・下(末端部)ブロックに区分される。上部ブロックは旧地すべり地で杉林であり、中・下部ブロックは主として広葉樹で地すべり性の変動が認められる。

地下水については地下水検層、簡易揚水試験の結果によると、地下水流動層が調査ボーリング全孔(25孔)で認められる。特に表-2に示す上部ブロックのBV57-2, 3, 4, 8の各孔は地下水が豊富に賦存していることが確認される。さらに、現地調査から、上部ブロックには湿地帯、湧水

表-2 地下水流動層の優勢な観測孔

Table 2. Superior groundwater at fluid stratum of observation borehole

ボーリング孔	解析区間 (m)	流入量 (cc/min)
BV57-2	G. L 9.25-16.25	6559
	22.00-22.5	326
BV57-3	29.00-30.25	594
BV57-4	17.25-27.00	5805
	31.75-32.5	317
	38.75-39.5	401
BV57-8	14.25-25.00	3327

点 (18カ所) がある。上部ブロックは地下水涵養帯であり、しかも地下水の経路となって地下水が集まりやすい水文地質構造からなっているものと考えられる。したがって、上部ブロックからの地下水は中部～下部ブロックの地すべり地に供給され、地すべり活動を助長しているものと推定される。

第3節 すべり面付近の間隙水圧の観測方法

1. 地すべり移動層に対応した間隙水圧の観測

集水井施工前後の圧力水頭低下効果を評価するため、各集水井の集水ボーリングの先端付近には、まえもって圧力水頭観測孔が設置された。上部ブロックでは3層の圧力水頭観測孔（上層孔 15 m, 中層孔 25 m, 下層孔 35 m）に対応して集水井 1号内の上・中・下段の集水ボーリングを設置した (図-8)。そして、圧力水頭観測孔の先端 4 m のみに部分ストレーナー区間を設け、水位

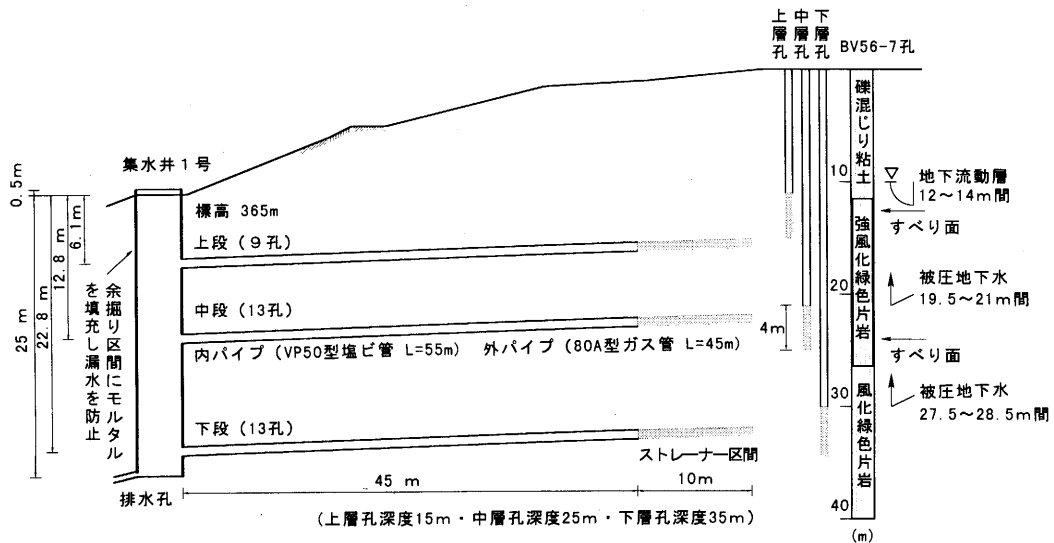


図-8 集水井 1号の部分ストレーナー集水ボーリングの観測方法

Fig. 8. The observational methods of horizontal borehole in a screened section at No. 1 drainage well.

計を用いて圧力水頭を観測している。また下部ブロックでは集水井2号内の上・下段に設置した集水ボーリングを2層の圧力水頭観測孔（上層孔18 m, 下層孔27 m）に対応させて上記と同様に4 mの部分ストレーナー区間を設けて圧力水頭を観測している。

2. 集水井の部分ストレーナー集水ボーリングの集水量観測

中部～下部ブロックへの地下水の供給を遮断する目的で1983年には上部ブロックに集水井1号（深さ25 m）を施工し、1984年は下部ブロックに集水井2号（深さ15 m）を施工した。集水井の井筒は周辺の地下水の侵入および集水井内部の水の周辺への漏水を防ぐため、ライナーブ

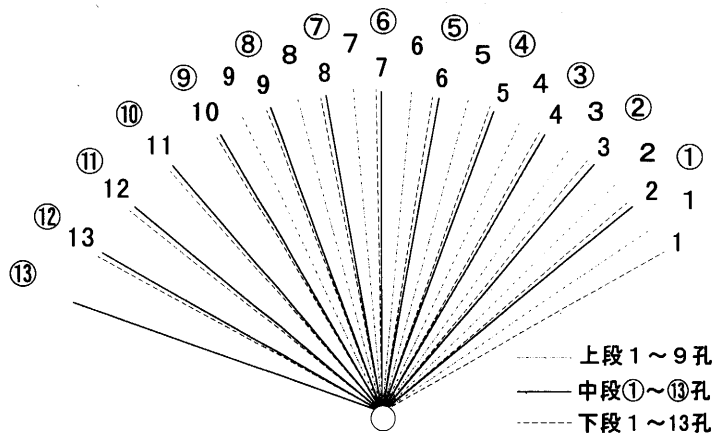


図-9 集水井1号の集水ボーリング孔配置

Fig. 9. Location of horizontal borehole at No. 1 drainage well.

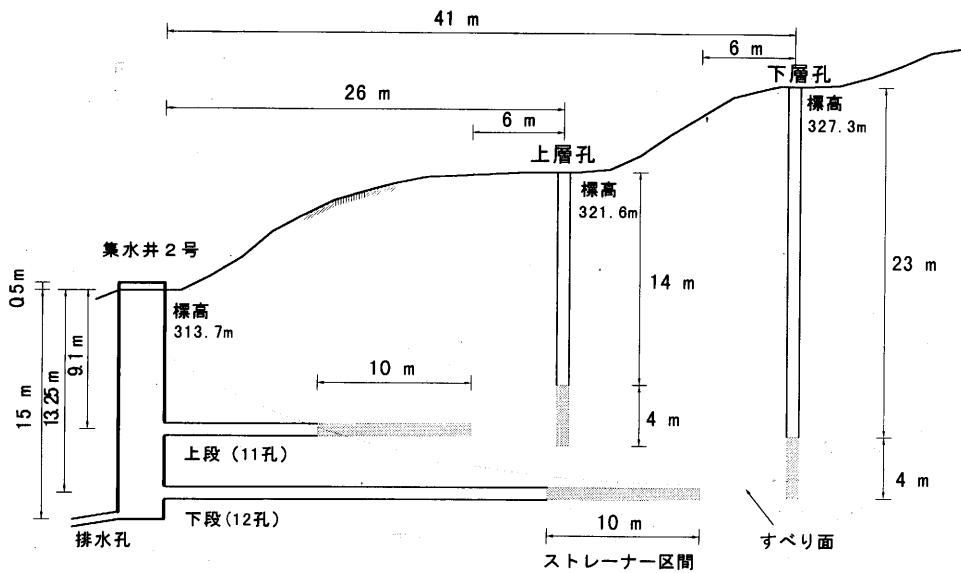


図-10 集水井2号の部分ストレーナー集水ボーリングの観測方法

Fig. 10. The observational methods of horizontal borehole in a screened section at No.2 drainage well.

レート製井筒を組み立てながら余掘り空間にモルタルを注入している。各集水井の集水ボーリング孔は1984年に完成した。図-8に示すように集水井1号の集水ボーリングは調査ボーリングBV56-7孔で検出された三層の地下水流動層を集水井の三段集水ボーリング(上・中・下段)に対応させて流動層内の地下水を排除させることを目的とする。井筒から扇状に掘削された長さ55mの集水ボーリングは先端10mのみに部分ストレーナー区間を設け地下水排除(自由・被圧地下水)を行った。集水井1号の集水ボーリング孔配置は図-9に示す。

一方、図-6に示すように地すべり地の活動ブロックは、中部ブロックから下部ブロックの末端部にかけて認められた。これらのブロックの動きに対応するため、下部ブロックにある二つのす

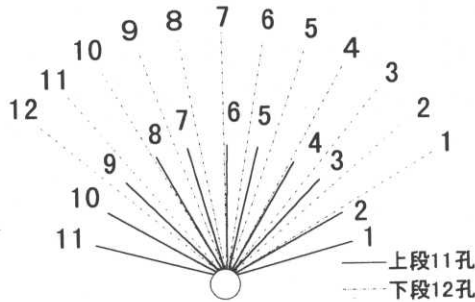


図-11 集水井2号の集水ボーリング孔配置

Fig. 11. Location of horizontal borehole at No. 2 drainage well.

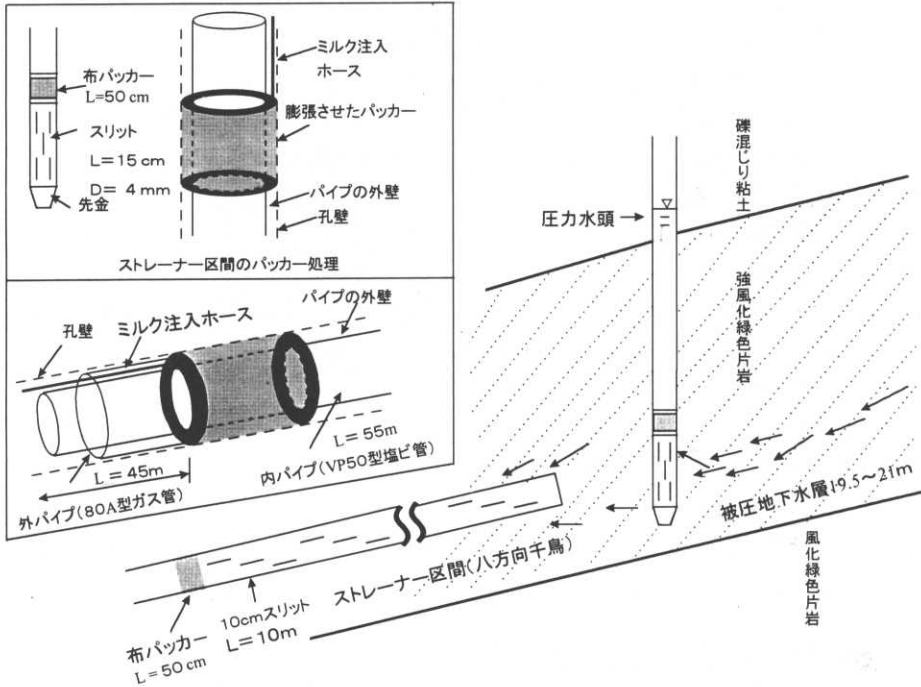


図-12 ストレーナー区間のパッカー処理とせん孔配置位置図

Fig. 12. Location of packer and lineal hole in a strainer section.

べり層の間に次の集水井2号を設置した。図-10に示すように集水井2号による集水ボーリングは、移動層のすべり面および調査ボーリングBV58-5孔で検出された二層の地下水流動層に対応するために、二段（上段の長さ20m、下段の長さ35m）の全長の異なる集水ボーリングによって行われている。集水井2号の集水ボーリングは集水井1号と同様に掘削延長の先端10mのみに部分ストレーナー区間を設け地下水排除を行った。集水井2号の集水ボーリング孔配置は図-11に示す。

図-12は集水ボーリング孔および圧力水頭観測孔のストレーナー区間のパッカー処理とせん孔配置位置を模式的に示したものである。パッカー処理の目的はストレーナー区間への他の流動層からの地下水の流入をシャ断するため、ボーリング孔に挿入するパイプ（塩ビ管）のストレーナー区間前に布パッカーを設置した。パッカーの施工方法は、長さ約50cmの布パッカーをパイプの外壁周りに固定させ、注入するためのホースを一端に付設した。布パッカー付きのパイプをボーリング孔内に挿入した後、布パッカーに付設した注入ホースから液体ミルクを布パッカーに加圧で注入する。そして、この布パッカーを膨張させてパイプの外壁周りと孔壁間に密着させてストレーナー区間のみに入水する地下水を保持する。

第3章 集水井施工によるすべり面付近の間隙水圧の変動特性

最近の地すべり学会誌において丸山ら（1996年）は以下の二点を指摘している。すなわち、地下水排除工の効果を定量的に評価するためには①現在行われている地下水位の観測を間隙水圧の観測に切り替えること、②地下水排除工の施工前から十分な地下水位・間隙水圧の観測を行い、施工後のデータと比較することが必要であるとしている。

本研究の試験地はまさに丸山らの指摘した問題点を克服した試験地といえる。すなわち、平沢地すべり地における間隙水圧の観測は、集水井の掘削前の1983年から行われており、1984年に集水井が施工された。観測期間を①施工前の調査（1983年）および②集水井施工後の調査（1984年から1985年まで）の二期に分けて間隙水圧のデータを比較することにより、集水井掘削そのものの効果を明らかにする。

① 施工前の調査（1983年）

地すべり対策工事は、一般に緊急を要するため、施工効果判定に必要な施工前調査は、必ずしも十分な期間にわたって実施されるとは限らない。特に降雨条件は、季節的な変動を伴うため、長期間の観測が必要である。そのため、あらかじめ一年以上の降雨量や圧力水頭などのデータを収集した（集水井1号に対応する観測データは、1983年1月から1984年1月まで、集水井2号に対応する観測データは、1983年10月から1984年11月まで行った）。

② 集水井施工後の調査（1984年から1985年まで）

この調査は、集水井の集水ボーリング孔の掘削によるすべり面に作用する圧力水頭の低下特性を捉えるため、また集水井施工後のバルブの閉止操作や降雨の影響などによる圧力水頭の変動を調査するために行った。

第1節 集水井施工前の圧力水頭の変動

すべり面付近に作用する圧力水頭を正確に求めることは、地すべり抑制工事の施工効果判定や安定解析を行う際に非常に重要である。流動層別の水位計を用いた圧力水頭の観測結果は、

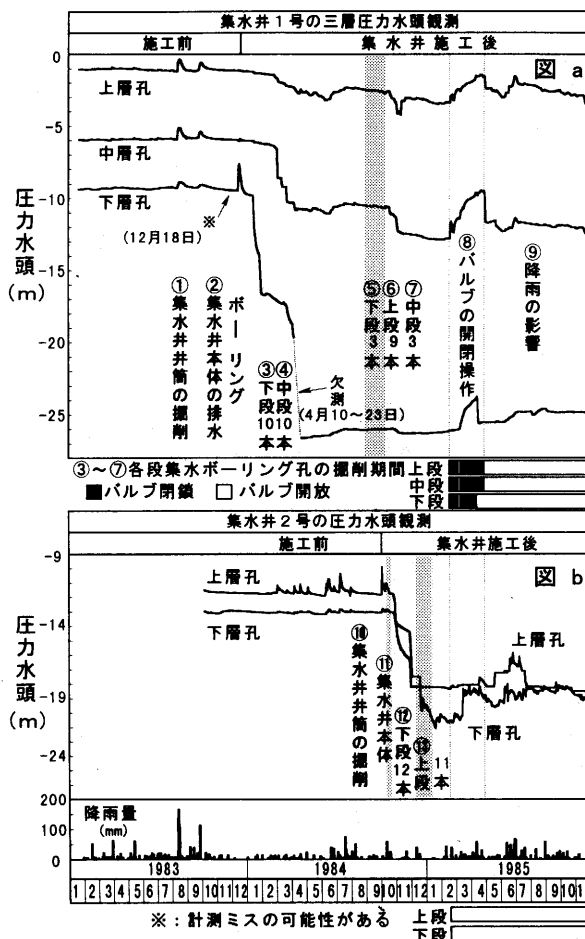


図-13 集水井施工による層別圧力水頭の変動関係

Fig. 13. Relation of pressure head fluctuation at different stratum by drainage well works.

図-13-aに示すように、1983年1月から10月まで上部流動層内で観測期間平均 -1.07 m (上層孔の深さ 15 m)、下部流動層内で同 -5.89 m (中層孔の深さ 25 m) 亜基岩安定層内で同 -9.31 m (下層孔の深さ 35 m) であった。1983年8月下旬の台風により秩父気象観測所で連続降雨 422 mm が観測され、三層孔 (上・中・下層孔) の圧力水頭がそれぞれ -0.38 m、 -5.12 m、 -8.90 m まで上昇した。また、全孔ストレーナー観測孔での地下水位の観測結果は、各孔とも台風がもたらした集中豪雨によって最高水位を記録した。特に上部ブロックは水位の変動幅が大きく台風時には $2\sim 10$ m の水位上昇がみられた。このことにより、この斜面の上部ブロックでは、圧力水頭の上昇が降雨に鋭敏に反応していることが確認された。

さらに、この斜面の下部ブロックで工事予定の集水井2号付近に 15 m 離れて設置された上層孔 (深さ 18 m) と下層孔 (深さ 27 m) の観測結果 (図-13-b) によると、1983年10月から1984年7月までの観測期間で上層孔平均水頭 -11.5 m、下層孔平均水頭 -12.9 m が観測された。そのうちの上層孔の水頭変動は、図-13-bに示すように、1984年3月から7月までの降雨期間に

対し鋭敏に上下することがわかった。

一方、集水井の井筒の掘削が観測孔の圧力水頭に与える影響をみると、図-13の説明番号①、②、⑩、⑪、に示すように、集水井1号の井筒の掘削期間には、三層孔とも圧力水頭に与える影響が見られなかった。それは集水井の余堀り空間にモルタルを注入して集水井周辺の地下水の侵入および集水井本体からの漏水を防ぐ効果によるものと考えられる。

第2節 集水ボーリング孔の掘削による圧力水頭の低下

図-13に示すように、集水井1号での三段集水ボーリング孔の掘削は、降雨の影響を避けるために1984年の1月と8月に二つの施工期に分けて行った。最初に集水井内の下段集水ボーリング孔の施工に着手し、1月から10本の集水ボーリング工事を行った。下段の集水ボーリング孔の掘削中に同年の2月から中段の集水ボーリング工事も同時に着工した。③と④の掘削期間をみると、三層孔の圧力水頭の低下が明瞭に認められる。集水ボーリング施工に伴う圧力水頭の低下量は、施工前後の3カ月平均圧力水頭の観測結果の差として、それぞれ1.6 m (上層孔), 4.9 m (中層孔), 17.2 m (下層孔) である。特に下層孔での圧力水頭は大きく低下した。つぎに、図-13の

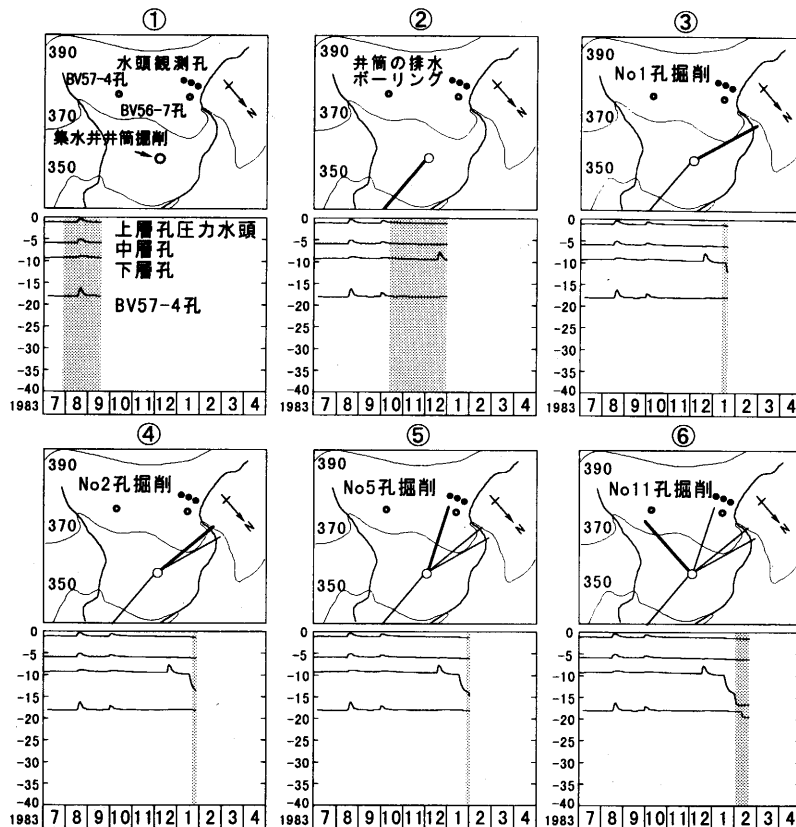


図-14 集水井1号の下段集水ボーリング孔の掘削方向と水頭の変化関係 (その1)

Fig. 14. Relation between excavating direction of horizontal borehole and pressure head fluctuation at lower stratum of No. 1 drainage well (one of the same).

⑤、⑥と⑦の掘削期間では、それぞれ下段3本、上段9本と中段3本の集水ボーリングが施工されたが、⑥の上段9本の集水ボーリング孔の施工後のみ三層孔の圧力水頭の低下が認められた。三層孔の圧力水頭の低下量はそれぞれ0.53 m, 1.34 m, 0.24 mが得られた。特に中層孔に対応している強風化片岩層で一番大きく約1.34 mの低下量がみられた。一方、集水井2号の観測孔の圧力水頭果は、⑫の下段12本と⑬の上段11本の集水ボーリング施工により6.65 m（上層孔）、8.06 m（下層孔）の低下がみられた。以上の計測では、いずれも深層の圧力水頭が浅層のものより低下の割合が大きい。

1. 掘削延長・方向による圧力水頭の変動

図-14は集水井1号下段での各集水ボーリング孔の掘削方向と水頭の変動関係を図示したものである。集水ボーリング孔の掘削方向が集水井付近の圧力水頭に与える影響を検討するため、圧力水頭の時系列変動と施工期間との関係を①から⑫までの関連図で示している。まずこの関連図の関連番号①の図を見ると、①の上図は集水井1号付近の平面図であり、集水井1号に近い観測孔の水頭値を①の下図に示した。下図は水頭値とともに井筒の掘削工事期間を塗色して示している。また、図-15は集水井1号下段および中段の集水ボーリング孔の掘削に伴う圧力水頭の低下

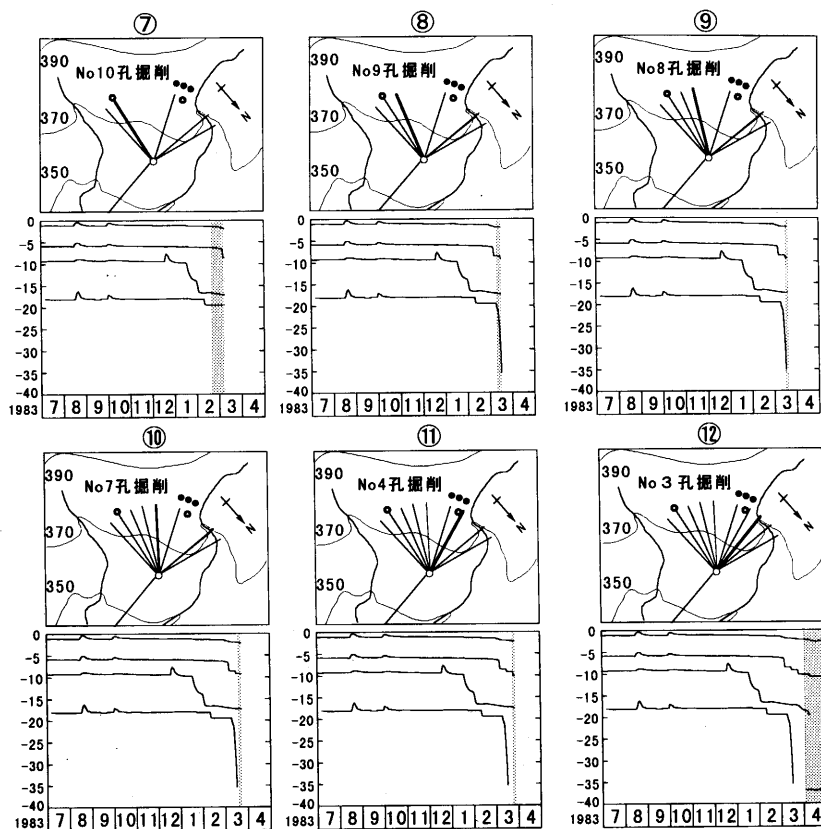


図-14 集水井1号の下段集水ボーリング孔の掘削方向と水頭の変化関係（その2）

Fig. 14. Relation between excavating direction of horizontal borehole and pressure head fluctuation at lower stratum of No. 1 drainage well (two of the same).

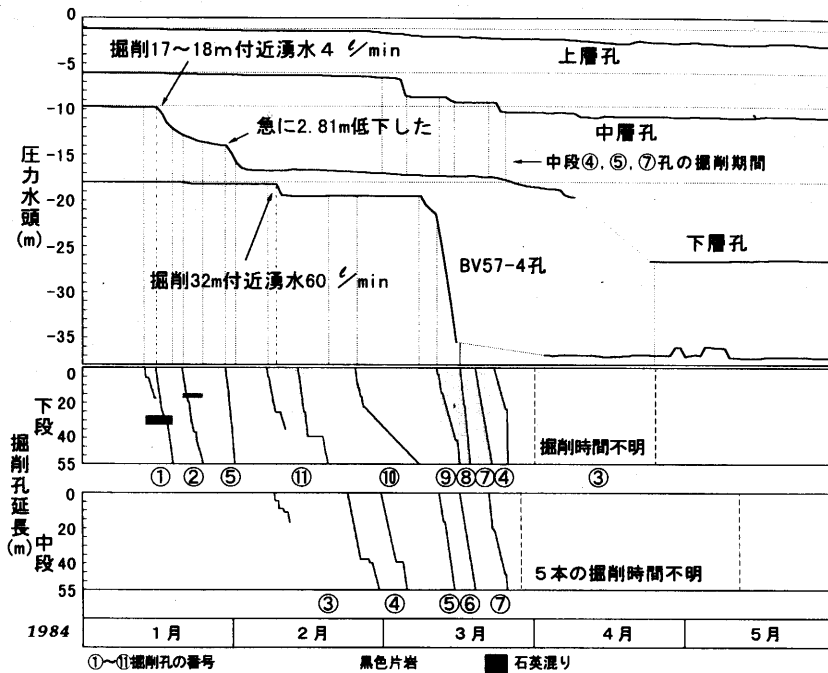


図-15 集水井1号の集水ボーリング掘削による孔内湧水と圧力水頭の低下関係

Fig. 15. Relation between groundwater discharge and drop of pressure head by horizontal borehole of No. 1 drainage well.

関係を示す。以下の解析は図-14と図-15を対照しながら、掘削延長・方向による圧力水頭の変動を検討する。

まず、図-15の下段の集水ボーリング孔の掘削状況を検討する。1984年1月13日から4月24日にかけて10本の掘削工事が行われた。下段のNo.1孔の掘削(掘削方向は図-14の③に示す)は、1月13日から始まり、16日に掘削延長17~18m付近での湧水4l/minとともにボーリング機のケーシングが締め付けられた。ケーシングを引き抜き再び最初から掘削し直した。このときの圧力水頭が急に低下した。そして17日に掘削延長27.5mの硬い石英混り岩石で湧水30l/minがあり、圧力水頭が徐々に低下した。No.2孔の掘削(図-14の④に示す方向)は、21日に掘削延長14~17m付近における湧水3l/minで圧力水頭が徐々に低下していた。No.1孔およびNo.2孔のボーリングを実施していない数日間(25日~29日の間)にも圧力水頭が低下していた。No.5孔の掘削(図-14の⑤に示す方向)は、掘削方向が水頭観測孔に向っており、掘削が容易で圧力水頭は急に2.81m低下した。この間、上層孔および中層孔の水位は変化しなかった。No.11孔の掘削(図-14の⑥に示す方向)は、全孔ストレーナー観測孔BV57-4に向っており、2月9日から掘削が始まり、10日に掘削延長32m付近で湧水60l/minがありこの時、このBV57-4孔は地下水位の低下が見られた。その後、掘削延長35m付近でケーシングが切断され、掘削作業が中止になった。13日に最初から掘削し直し、14日夜掘削延長39mまで順調に進んで掘削したが、15日に油圧ポンプ故障修理のため、再び掘削作業が中止され、18日から再開して掘削延長55mまで掘削された。次にNo.11孔に近いNo.10孔、No.9孔の掘削(図-14

の⑦、⑧に示す方向)で、BV57-4孔の地下水位が急に17.7 m低下した。No. 4孔およびNo. 3孔の掘削は、掘削方向が変わって圧力水頭観測孔に向っており、No. 4孔掘削(図-14の⑪に示す方向)により集水井1号下層孔の水頭が多少低下し、さらにNo. 3孔の掘削(図-14の⑫に示す方向)で7.01 m低下した。

以上の掘削状況と圧力水頭の低下特性を見ると、圧力水頭の低下は集水ボーリングが観測孔の数m以内に達したときと削孔中に湧水が発生したときに発生している。集水井1号の西側に掘削したNo. 1孔からNo. 5孔までの5本の集水ボーリング孔が三層孔の水頭の変動に関わっていた。しかし、南側で掘削すると三層孔の圧力水頭はあまり明瞭な変化を示さないことがわかった。一方、BV57-4孔の地下水位の低下は集水ボーリング孔のNo. 9孔とNo. 11孔の掘削が大きく影響した。

最後に、図-15に示す中段の集水ボーリング孔の掘削に伴う圧力水頭の変化を検討する。1984年2月8日から5月11日にかけて10本の工事が行われたが、そのうちの5本は掘削孔の時間と番号が確認できないので点線で示した。最初に掘削した5本の状況について説明する。No. 3孔の掘削は2月8日から始まり、11日に掘削延長16.5 m付近で湧水10 l/minと共にケーシングが締め付けられ掘削作業がしばらく中止になった。そして23日に最初から掘削し直し、28日までに掘削延長55 mを掘削した。しかし中層孔の圧力水頭の低下が見られなかった。その後、No. 4孔からNo. 7孔まで順番に4本を掘削した。その結果、中層孔での圧力水頭がそれぞれNo. 4孔で2.10 m、No. 5孔で0.63 m、No. 7孔で1.07 m低下した。その期間に、上層孔での圧力水頭も中段と下段の集水ボーリング孔の掘削により徐々に低下していたことが認められた。なお、No. 7孔の掘削時には下段のNo. 4孔も同時に掘削しているので、その影響も考えられる。

2. 全孔ストレーナー観測孔の地下水位変動

集水ボーリング孔の掘削に伴う全孔ストレーナー観測孔内の地下水位変動は、図-16に示すように、BV57-4とBV58-5のみに19 m、8.7 mの水位低下が認められた。しかし、集水井1号での三層孔に近いBV56-7孔の水位は、ほとんど変化がなかった。以上の結果からみると、集水ボーリング孔の集水効果を全孔ストレーナー観測孔の地下水位から評価することは困難なことが確認された。その原因として、一般に地すべり地では地すべり移動によって土塊が攪乱されているため地下水の経路、流量などの水文条件が複雑であり、しかも、地すべり地の地下水の挙動は、個々の調査地点や深度において異なった挙動を示すことが多い点が挙げられる。

3. 集水ボーリング孔すべての孔口にバルブを取り付ける予備実験

斜面内のすべり面付近の圧力水頭の挙動について施工前と類似した地下水環境を再現するため、バルブの閉止操作実験を行った。バルブの閉止操作実験は、井内に設置した集水ボーリング孔すべての孔口にバルブを取り付け、バルブを閉じることによりその排水機能を一時的に停止させ集水井別の圧力水頭観測孔の変動を捉えることが目的である。

図-13に示すように、集水井1号の3段バルブは、1985年2月中旬から2週間閉止し、その後三日間だけ開放した。その後4月下旬まで長期に閉止し、4月中旬以降に下段のみ開放した。また実験期間中は集水井2号のバルブは常時開放された状態であった。その結果として、集水井1号の三層孔の圧力水頭の変動はバルブを閉止した影響で圧力水頭が鋭敏に上昇していた。バルブを開放するまでの上昇幅はそれぞれ1.97 m、3.35 m、2.38 mが認められた。なかでも中層孔に対応する強風化片岩層の圧力水頭の上昇量が最も大きい。強風化片岩層は破碎、レキ化が進み、

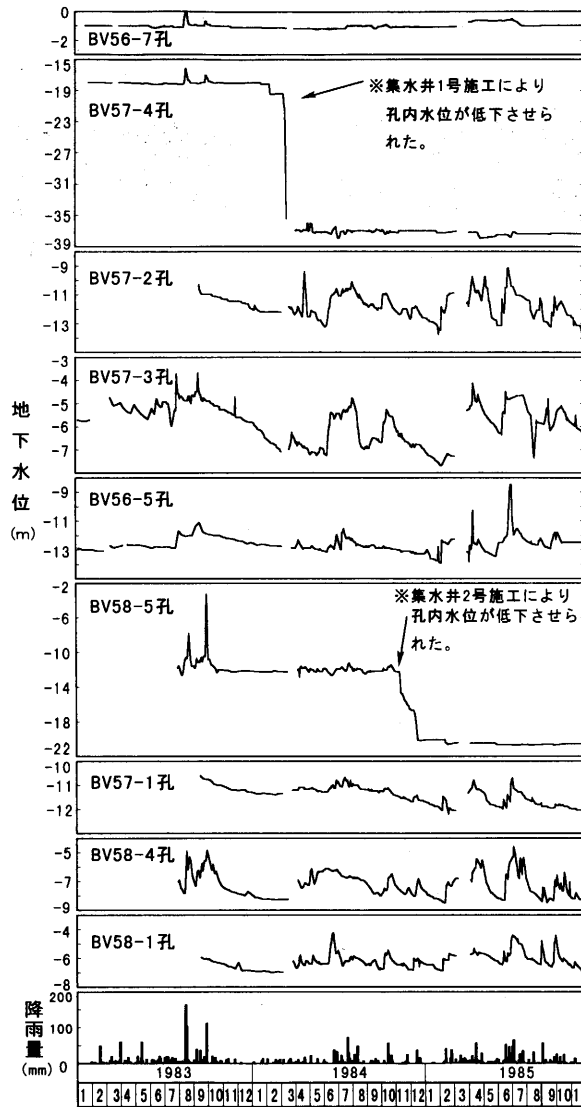


図-16 全孔ストレーナー観測孔の地下水位変動

Fig. 16. Groundwater level fluctuation at the observation borehole.

透水性が高いためと考えられる。なお、閉止による下層孔（深度 35 m）の圧力水頭上昇の応答時間は、上層孔と中層孔よりやや遅くなることがわかった。

一方、本実験の期間中、集水井 2 号の下層孔（深度 27 m）の圧力水頭が鋭敏に上昇していることが確認された。集水井 2 号のバルブを閉止しなくても下層孔の圧力水頭が鋭敏に上昇したことは、バルブ閉止前の一週間累積降雨量 33 mm の降り方にも注目すべきであり、一概に集水井 1 号の影響が表われたとはいえないもののなんらかの影響が指摘できよう。

第3節 まとめ

平沢地すべり地における集水井施工前後の圧力水頭の観測結果から集水ボーリング孔の掘削に伴うすべり面付近の圧力水頭の変動の解析を行い、集水ボーリング孔の掘削そのものの効果を明らかにした。施工前の調査では降雨や圧力水頭などの季節変化データが得られ、その結果と施工後のデータとを比較して集水井の地下水排除効果を定量的に明らかにした。さらに、集水ボーリング孔掘削中のすべり面付近に作用する圧力水頭の低下特性を捉えるため、掘削中の湧水の出現、また掘削方向と圧力水頭の変動関係や降雨の影響などの解析を行い、以下の結果を得た。

- 1) 集水ボーリング孔の施工前後における圧力水頭の低下状況は、集水井1号の三層孔および集水井2号の二層孔の観測結果をみると、深層の圧力水頭が浅層のものより低下量が多い。
- 2) 集水ボーリング孔の掘削と圧力水頭の低下特性を見ると、圧力水頭の低下は集水ボーリング孔が観測孔の数 m 以内に達したときと削孔中に湧水が発生したときに起っている。圧力水頭の低下効果は観測孔に近いところまで掘削した集水ボーリング孔が大きく影響した。
- 3) バルブ閉止の操作実験による集水井1号の三層孔の圧力水頭の変動は、バルブ閉止の影響で三層孔の圧力水頭が鋭敏に上昇し、その中の中層孔に対応する強風化片岩層の水頭上昇量が最も大きい。

第4章 集水量制御（バルブ開閉操作）実験におけるすべり面付近の間隙水圧の挙動

第1節 はじめに

第3章で述べたように、集水井による地下水の排除効果は、まず集水井施工前後におけるすべり面付近の間隙水圧の低下量で評価することが必要である。本研究では、すべり面および各流動層での間隙水圧の観測およびそれらからの集水が正確に測定できる試験地での集水ボーリングによりすべり面付近の間隙水圧が低下することを明確にした。

さらに、各集水ボーリングには止水バルブを設置して流出水量の停止装置をつけられる。したがって、全部バルブを閉止すれば、集水井施工以前の状態が再現できる。この実験の利点は、集水バルブ操作によって任意の時期に施工前の環境に近いデータを得ることができるので集水井の施工効果の判定が容易で確実にを行うことができる点である。つまり降雨による圧力水頭の上昇・低下を自由にバルブの開閉操作によってコントロールすることができる。実験期間は1986年から1987年までで、本章ではおもに①降雨量、②圧力水頭、③集水ボーリング孔からの集水量等と④バルブの開閉操作の相互関係について検討を行う。

第2節では平沢試験地における2基の集水井の部分ストレーナー集水ボーリング孔を利用した集水量制御実験の実験方法と、この方法による地すべり試験の利点を述べる。第3節では1986年と1987年の実験データを解析し、特に集水井1号での三段集水ボーリングの開閉組合わせパターンと圧力水頭の対応関係を検討する。またバルブの開放による集水ボーリング孔からの集水量の変化を検討する。最後に集水ボーリング孔からの地下水流量の測定結果から、降雨量と各集水量の関係を検討する。

第2節 実験方法

今回の観測対象とした平沢試験地の概要および観測方法（集水井1号と集水井2号）については、第2章に示した図を引用されたい。

表-3 各段のバルブ閉止時における実験の許容最高圧力水頭 (HWL)

Table 3. The maximum permissible volume of pressure head in a period of closing valve

集水井 (GL-m)	集水井施工前後			実験	
	HWL	LWL	変動幅 (m)	許容 HWL	
集水井 1 号	上層孔	-0.38	-4.24	3.86	-1.6
	中層孔	-5.12	-12.89	7.77	-7.7
	下層孔	-8.9	-26.64	17.74	-14.8
集水井 2 号	上層孔	-9.94	-18.64	8.7	-12.8
	下層孔	-12.83	-21.1	8.27	-15.5

集水井 1 号 (三段) と集水井 2 号 (二段) に掘削した集水ボーリング孔口のバルブの取り付けが 1985 年 2 月 25 日 (2 月 15 日から 2 月 25 日まで) に完了した。その後にはじめてバルブの閉止操作の予備実験を行った。その結果、集水井 1 号の三層孔の圧力水頭の変動はバルブを閉止した影響で圧力水頭が鋭敏に上昇した。バルブを開放するまでの上昇幅はそれぞれ 1.97 m, 3.35 m, 2.38 m が認められた。なかでも中層孔に対応する強風化片岩層の圧力水頭の上昇量が最も大きい。一方、集水井 2 号については、バルブの取り付けが完了した後、集水ボーリング孔からの流出量がほとんどみられないので、バルブは完了当初から全開状態にしておいた。

以上のことから集水ボーリング孔口に取り付けたバルブの閉止によって集水井 1 号三層孔の圧力水頭が変化し、集水井施工前の状態に類似した状態を再現できる見通しがついた。しかし、バルブ操作による圧力水頭の上昇は地すべり現象を助長する原因になり得るため、バルブの開閉方法・期間および各集水ボーリング孔からの集水量などについても検討しなければならないと考えた。

そこで、1986 年 4 月から各集水井のバルブの操作実験を計画的に実施した。この実験では、試験地における地すべり抑制工の施工前後の最高と最低圧力水頭データに基づいて、各集水ボーリングの排水口に取り付けたバルブを長・短期に開閉することにより排水を停止・再開させる実験を行った。集水量の測定は 2 基の集水井内で各段ごとに三角ノッチを設置して集水ボーリング孔からの総流出量を自記的に測定した。

一方、次のことに留意して実験を行った。①バルブ操作の開始前後および試験期間中に安全を確保するために層別水位計、歪計、傾斜計の数値をモニターする。②表-3 に示すようにバルブ閉止期間中の許容最高圧力水頭は、集水井施工前後の最高と最低圧力水頭を参考にし、変動幅の 3 分の 2 に設定した。バルブの閉止期間中はこの値以上にならないように留意した。

第 3 節 集水量制御実験 (1986 年と 1987 年の実験) の結果および考察

1. 集水井のバルブ操作と圧力水頭の変動関係

まず、図-17 に示す集水井 1 号の 1986 年の実験結果を検討する。1986 年の実験は、平常時、バルブを閉止状態にしておき、実験時、バルブの一部を開放した。各バルブの開閉の組合せは①下段だけバルブを開ける、②上段だけバルブを開ける、③中段だけバルブを開ける、④上・中・下段のバルブを全部開ける、⑤上段と下段だけバルブを開ける、⑥中段と下段だけバルブを開ける、の 6 ケースを実施した。開放期間は⑤と⑥の操作のときだけ 4 週間、他の場合は 2 週間とした。以下は番号①～⑥のバルブの開放操作に対応する圧力水頭の変動状況を検討する。

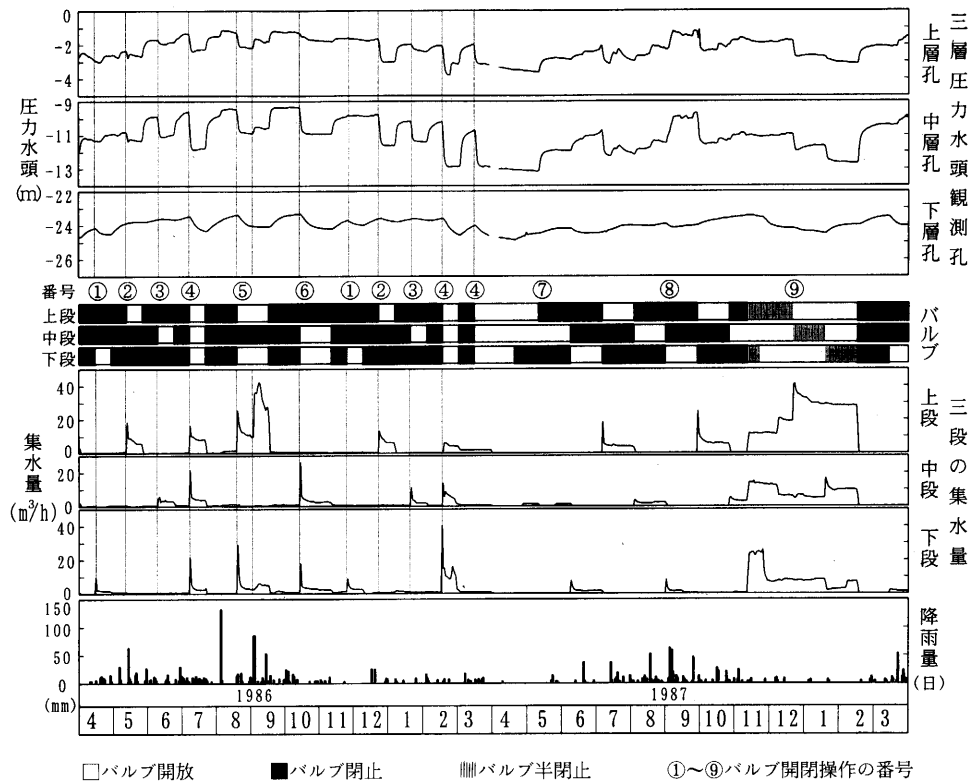


図-17 集水井 1 号のバルブ操作による集水量および圧力水頭の変動関係

Fig. 17. Relation between drainage volume and pressure head fluctuation by controlling drainage experiment at No. 1 drainage well.

下段だけバルブを開ける①の操作は 4 月と 11 月に二回行った。4 月の操作では下層孔（風化片岩層）での圧力水頭の低下が見られたが、中層孔（強風化片岩層）と上層孔（礫混じり粘土化層）での圧力水頭変動は連続降雨の影響によりむしろ上昇したことが認められた。一方、11 月下旬の降雨量が少なかった期間では、上層孔と中層孔での圧力水頭へのバルブ操作の影響は認められなかった。

②の操作によって 5 月中旬バルブを開けた直後に、上層孔と中層孔の水頭が 0.47 m と 0.55 m 低下し、その後、連続降雨量 69 mm が降り、圧力水頭が少し上昇した。しかし、下層孔の水頭変動はほとんどない。次に、12 月下旬の降雨量が少ないときに同じ操作を行ったところ、やはり上層孔と中層孔の圧力水頭がそれぞれ 1.38 m, 1.83 m 低下した。これより、上層での排水は中層孔の圧力水頭にも影響することが明らかになった。

中段だけバルブを開けた③の操作では、上層孔の水頭低下が 6 月と 1 月の二回とも平均で 0.36 m 低下した。しかし下層孔の水頭に変化はなかった。すなわち、中層での地下水排除は上層孔の水頭に多少影響する程度であった。

全部のバルブを開ける④の操作では三層の観測孔の水頭はともに低下した。特に下層孔での水頭の低下が他の①～③の操作の時より大きいことが認められた。また水頭低下の速度は上、中層

孔に比べて下層孔の方が遅かった。

8月から9月にかけて行った上段と下段のバルブを開ける⑤の操作では、三層とも観測孔の水頭が低下した。9月上旬には連続降雨量 171 mm が降り、上層孔と中層孔の水頭上昇が見られたが、下層孔の水頭はほぼ同様な値のままであった。なお、連続降雨量と圧力水頭の上昇関係については、8月上旬に、三段ともバルブを閉じた状態の時、129 mm の降雨があり、その影響により圧力水頭が上層孔で 0.38 m、中層孔で 0.36 m 上昇したが、下層孔では顕著な変化は見られず、バルブ操作の影響に吸収されているように見える。

中段と下段のバルブを開ける⑥の操作では、中層孔および下層孔の水頭は著しく低下しているが、上層孔の水頭低下は小さい。

以上の観測結果より、三層それぞれの圧力水頭の変化特性は以下のようにまとめられる。

- 1) 上層での排水は、中層孔の圧力水頭に影響する。しかし、下層孔の水頭には影響しない。
- 2) 中層での排水は上層孔の圧力水頭に多少影響する程度であり、下層孔の水頭に影響しない。
- 3) 下層での排水は上層孔、中層孔での圧力水頭に影響しない。
- 4) 圧力水頭低下の速度は上、中層孔に比べて下層孔では遅い。
- 5) 降雨の影響で上層孔、中層孔での圧力水頭の変動が認められる。

次に、図-17 中の 1987 年の実験結果(番号⑦, ⑧, ⑨)を検討する。1987 年の実験はバルブ操作として開放から閉止していく過程を観測した。閉止期間は主に 8 週間を設定した。

⑦の操作で上段のバルブを閉止したことに伴い、集水井 1 号の上層と中層の観測孔で水頭の上昇があった。

⑧の操作で中段のバルブを閉止すると、上層孔と中層孔ともに水頭がそれぞれ 1.14 m, 1.6 m と大きく上昇している。ただし、上層孔の水頭上昇は 9 月上旬連続降雨量 138.5 mm の影響を受けていることも考えられる。

⑨の閉止操作期間において、11 月中旬から大量の地下水が現れたので、対策としてバルブを半開放(集水ボーリング孔の奇数番号のみ開放)にした。12 月中旬のバルブ操作で上段と中段のバルブの開閉を切り替えたが、上層孔と中層孔の水頭はそれぞれ 0.93 m, 1.01 m 低下した。つまり上段バルブの開放の影響が中段の閉止操作より大きいことがわかった。さらに 1 月中旬に今度は中段と下段のバルブ開閉を切り替えた。その結果として、中層孔の水頭が低下し、下層孔の水頭の上昇が認められた。以上のようにバルブの開閉操作期間の長短によって 1986 年と 1987 年圧力水頭の変動の仕方も変わることがわかった。

一方、図-18 に示す集水井 2 号の 1986 年と 1987 年の観測結果を検討する。集水井 2 号の実験は平常時、バルブを開放状態にしておき、実験時、バルブの一部を閉止する。まず、1986 年の実験はバルブ閉止期間が 4 月と 10 月に二回だけ 4 週間、他の場合は 2 週間とした。その結果、全体的にバルブ操作は圧力水頭にあまり影響していない。上段と下段バルブを開ける①の操作では初期に上層孔と下層孔の圧力水頭がやや低下した。しかし、8 月上旬の連続降雨量 129 mm の影響で上層孔の水頭のみが上昇した。その後のいくつかの降雨によっても水頭上昇が認められた。

次に、図-18 中の 1987 年の実験結果(番号②, ③)を検討する。7 月上旬の②の操作で上段と下段のバルブの開閉を切り替えたが、上層孔の水頭は 1.44 m 上昇した。下層孔の水頭は

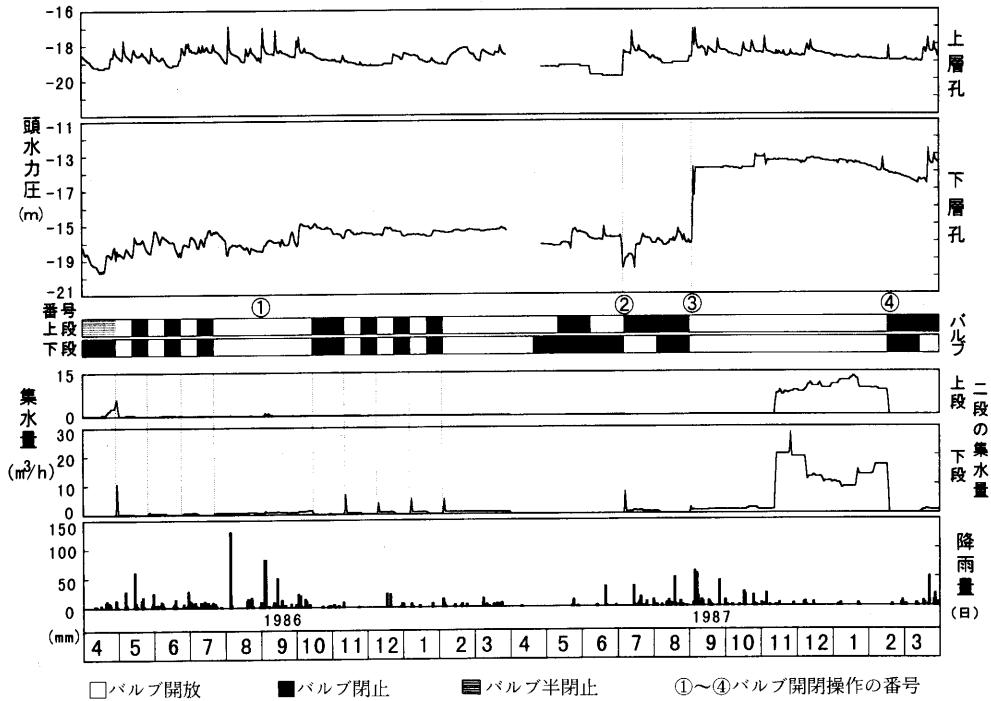


図-18 集水井 2 号のバルブ操作による集水量および圧力水頭の変動関係

Fig. 18. Relation between drainage volume and pressure head fluctuation by controlling drainage experiment at No. 2 drainage well.

1.80 m 低下した。その後、降雨の影響で上層孔と下層孔の圧力水頭が著しく上昇した。前述した 1986 年のバルブ操作では集水井 2 号の降雨による水頭変化の影響は見られなかったが、今回のバルブ操作では影響が認められた。

③の操作では、9 月上旬の連続降雨 138.5 mm の影響で各観測孔の水頭が大幅に上昇した。特に下層孔の水頭は急激に 4.34 m 上昇してから、そのままの水頭を保っている。その原因としては、集水ボーリング孔の目詰まりの影響で地下水の排出が断たれた、あるいは斜面の上部土層から伝達された地下水圧の増加に伴い圧力水頭が急激に上昇したなどが考えられる。

2. 集水ボーリング孔からの流出特性

図-17 と図-18 に示す 1986 年と 1987 年の実験で得られた集水量のデータにおいて、降雨の影響による集水量の違いが検出されたのでそれを次に検討する。集水量は各段の集水ボーリング孔からの総流出量で示す。

第一に、図-17 に示した 1986 年 8 月からの⑤の操作による上段と下段の集水量の急増に着目する。バルブを開けた直後に、流量はピークに達し、その後いったん集水量が急減した後、また集水量の著しい増加があり、ピークが現れた。初期のピーク集水量に関わる現象は集水ボーリング管内に蓄積した水が急に排出されたためと考えられる。後者のピーク集水量に関わる現象は、9 月 1 日から 3 日の間に 171 mm の連続降雨があり、その影響と思われる。

第二に、図-17 に示す 1987 年の集水井 1 号の実験は、平常時、バルブを開放状態にしており、

実験時、バルブの一部を閉止した。しかし、11月中旬から大量の地下水が現れたので、対策として⑨の閉止実験期間にバルブ操作を変更して半開放にした。大量の地下水は、その前の9月から10月までの総降雨 284 mm の影響で圧力水頭が急激に上昇し、排出されたものと考えられる。一方、バルブ操作による集水量の影響は、9月29日から10月26日まで上段バルブのみを開放した直後の集水量をみると、以前の集水量と比較してあまり多くない。雨水が土層に浸透水として蓄積されたと予想される。

第三に、図-18に示した集水井2号の降雨量、圧力水頭、集水量をみると、特に1987年11月中旬からの集水量は以前より多く、しかも下層孔の圧力水頭の上昇現象と一致することが認められる。1987年11月中旬大量の集水量が生じたときには、同じ時期のひずみ計と地盤傾斜計に地すべり性の変動が認められた。

3. 降雨量、集水量、圧力水頭の相互関係

1986年と1987年における降雨量、集水井1号三段の集水量（各段の総流出量）、三層孔の圧力水頭変動の結果を基に、その相互関係を以下に検討する。まず、図-19に示した連続降雨量と集水量の関係をみると、降雨量の増加による集水量の上昇関係が認められる。特に上段に対応する礫混じり粘土化層での集水量が最も多い。また、深いほど集水量が少ない。つまり表面からの深さおよび風化程度によって集水量が異なる。

次に、図-20に示したバルブ閉止日数と圧力水頭上昇量（最高圧力水頭とバルブ閉止開始時の圧力水頭の差）との関係をみると、三層ともに明瞭な正の対応関係をもっている。圧力水頭上昇量は上、下層孔よりも中層孔（強風化片岩層）の方が大きい、集水量が多い上層孔では水頭の上昇量が小さい。バルブを長期あるいは短期に閉鎖する本実験より、その圧力水頭上昇量への影響が中層孔の方が大きいことが判明した。それは第3章の結論と一致する。

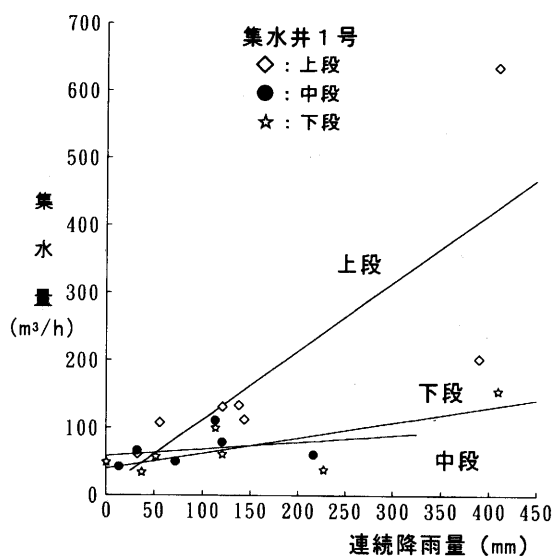


図-19 連続降雨量と集水量の関係

Fig. 19. Relation between serial rainfall and drainage volume.

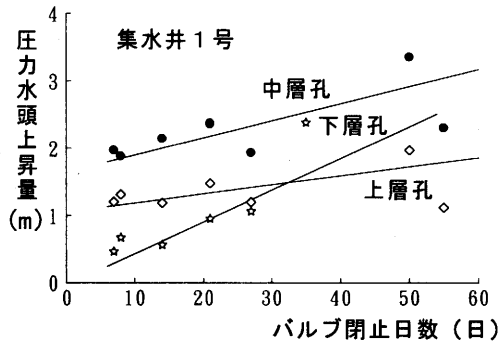


図-20 バルブ閉止日数と圧力水頭上昇量の関係

Fig. 20. Relation between days of closed valve and rising volume of pressure head.

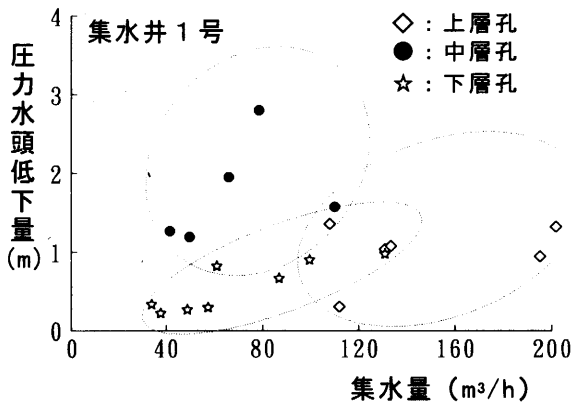


図-21 集水量と圧力水頭低下量の関係

Fig. 21. Relation between drainage volume and dropping volume of pressure head.

また、図-21 に示した集水量と圧力水頭低下量の関係を見ると、集水量が多い上層孔では圧力水頭の低下量が中層孔より小さいことが認められる。以上の相互関係の結果から、降雨による集水量の増加および圧力水頭の変動の仕方は地すべり地内の土層の風化程度や観測地点の深度によって異なることがわかった。この地すべり地においては、圧力水頭の低下のみを考慮すると、中層での集水が有効であるといえる。

4. 圧力水頭変動の応答時間 (1986 年)

ここでいう応答時間は、圧力水頭がバルブの開閉操作によって操作の開始時間から圧力水頭の上昇・低下の変動反応までにかかる時間である。バルブ操作による圧力水頭の応答時間の長短は、岩層の風化程度によって異なることを以下の実験から検討する。

表-4 は、集水井 1 号の上段 (礫混じり粘土化層)、中段 (強風化片岩層)、下段 (風化片岩層) におけるバルブの開閉操作によって得られた圧力水頭の応答時間である。表-4 の A, B, C の操作、すなわち一段だけバルブを開けた状態から閉じた状態にする操作では、下段のバルブのみを閉じたときの水頭上昇の応答時間 (10 時間) が最も長い。透水性のよい強風化の中層では、水頭上昇の応答時間 (2 時間) は短い。

表-4 集水井1号のバルブ開閉操作により計測した圧力水頭の応答時間
 Table 4. Response time of pressure head by controlling drainage experiment at No. 1 drainage well (単位: 時)

操作	A		B		C		D		E		F		G		H					
	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間	前→後	応答時間				
バルブ操作 の開閉状況																				
上段	○→×	4	×	×	×	×	×	○	2	×	×	×	×	×	○	×	1.8	○	×	3.3
中段	×	×	○	×	×	×	×	×	2	×	×	×	×	×	○	×	0.8	○	×	2.3
下段	×	×	×	×	○	×	×	×	10	×	×	×	×	×	○	×	23	○	×	21

×→○: バルブを閉じたままから開けた状況, ×→×: バルブを閉じたまま状況で変わらない, ○: 開けた状況,
 ○→×: バルブを開けたままから閉じた状況, 前→後: バルブの操作前・後状況, ×: 閉じた状況

逆にバルブを閉じた状態から開けた状態に変える D, E, F の操作では、下段の応答時間は開から閉にする C の操作と同じ 10 時間であった。しかし、上段と中段で閉から開にする D と E の操作では、開から閉にする A と B の操作に比較して半分の時間しかかかっていない。一方、G の操作で全バルブを閉じた状態から同時に開けた場合の下層孔の水頭低下の応答時間は、F の下段だけの操作の場合に比べて 2 倍以上の時間 (23 時間) かかった。すなわち、上層と中層の地下水排除によって下層への地下水流動速度にも影響が出ることがわかった。H の操作からも同様な現象が認められた。以上の調査結果から多層地盤中の地下水の浸透は、岩層の風化程度によって大きな違いを示すことが判明した。特に、風化が進行している中層の強風化片岩層ではき裂が多数存在するので、地下水が流れやすく浸透流速も速いものと推察される。

5. 集水ボーリング孔別集水量 (1986 年)

各集水井における集水量の測定は集水井から扇状に配置した集水ボーリングによって行った。各段の集水ボーリング数および位置関係は表-5 と第 2 章の図-9 と図-11 に示すとおりである。

集水量の測定日は、集水井 1 号では他の地下水流動層からの集水がお互いに影響を及ぼさないように集水する層のバルブのみを開放し、集水量の少ない集水井 2 号では上、下層を同時に開放して、2 週間後のバルブ閉止前に各集水ボーリングから集水される量を測定した。

その結果として、表-5 をみると、集水井 1 号では 9 孔の上段ボーリングのうち No. 7 の集水割合が上段集水量の 44.5% を占め、次いで 10% 以上の孔は No. 5 (16.1%), No. 8 (11.1%) となり、

表-5 集水ボーリング孔別集水量
Table 5. Drainage volume by drainage well

孔号	集水井 1 号			集水井 2 号	
	上段集水量	中段集水量	下段集水量	上段集水量	下段集水量
	ボーリング 深度 15 m	ボーリング 深度 25 m	ボーリング 深度 35 m	ボーリング 深度 18 m	ボーリング 深度 27 m
	cc/min (%)	cc/min (%)	cc/min (%)	cc/min (%)	cc/min (%)
1	360 (7.4)	180 (7.6)	560 (43.7)	0 (0.0)	0 (0.0)
2	390 (8.0)	80 (3.4)	20 (1.6)	0 (0.0)	0 (0.0)
3	30 (0.6)	80 (3.4)	200 (15.5)	0 (0.0)	0 (0.0)
4	300 (6.2)	80 (3.4)	400 (31.2)	0 (0.0)	20 (11.1)
5	780 (16.1)	120 (5.1)	10 (0.8)	0 (0.0)	0 (0.0)
6	60 (1.2)	570 (24.2)	10 (0.8)	0 (0.0)	10 (5.6)
7	2160 (44.5)	70 (3.0)	10 (0.8)	0 (0.0)	0 (0.0)
8	540 (11.1)	10 (0.4)	0 (0.0)	0 (0.0)	120 (66.6)
9	240 (4.9)	20 (0.8)	10 (0.8)	0 (0.0)	20 (11.1)
10		50 (2.1)	20 (1.6)	0 (0.0)	10 (5.6)
11		40 (1.7)	10 (0.8)	0 (0.0)	0 (0.0)
12		300 (12.7)	10 (0.8)		0 (0.0)
13		760 (32.2)	20 (1.6)		
計	4860 (100.0)	2360 (100.0)	1280 (100.0)	0 (0.0)	180 (100.0)
m ³ /日	7.0	3.4	1.8	0.0	0.26
測定日	5月27日	6月24日	4月29日	5月13日	5月13日
二週間 累積雨量	5/14-5/27 100.0 mm	6/11-6/24 21.0 mm	4/16-4/29 51.0 mm	4/30-5/13 31.0 mm	4/30-5/13 31.0 mm

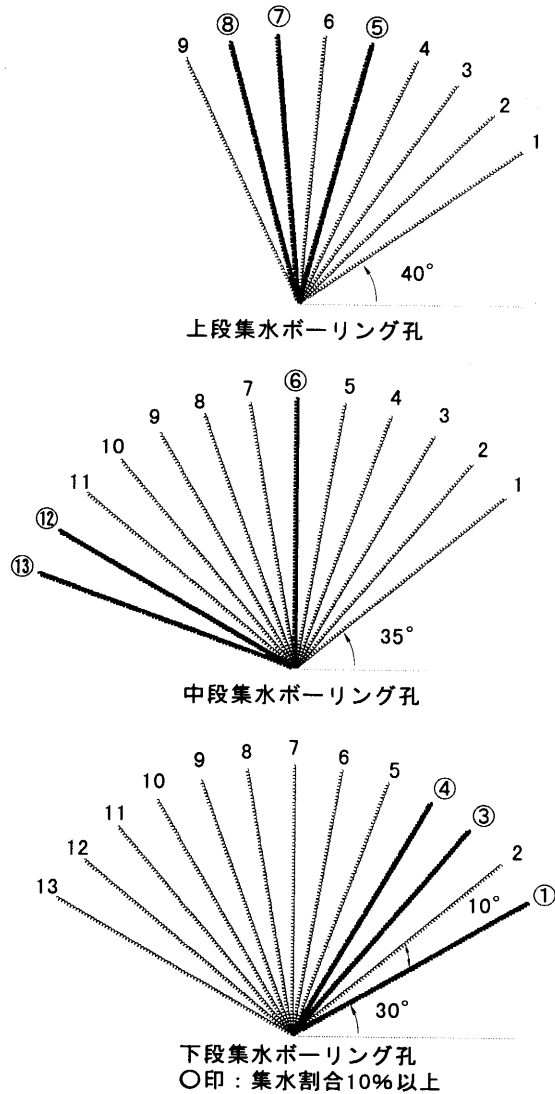


図-22 集水井1号での集水割合の高い孔

Fig. 22. The high rate of drainage volume at horizontal borehole of No. 1 drainage well.

この3孔の合計は71.7%である。No. 3 (0.6%), No. 6 (1.2%) は特に少なく両者あわせてわずか1.8%である。

中段では全集水量 2360 cc/min のうち、10%以上の孔は No. 6 (24.2%), No. 12 (12.7%), No. 13 (32.2%) の3孔でその割合は69.1%を占めるが、5%以下の孔が13孔のうち、No. 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 の8孔 (18.2%) もある。下段では No. 1 (43.7%), No. 4 (31.2%) の2孔が多く、次いで No. 3 (15.5%) で90.4%をこの3孔で占め、残り10孔はいずれも2%以下となり集水割合はかなり低い。

集水井2号は上段11孔、下段12孔であるが全体に集水量が少なく、上段集水ボーリングから

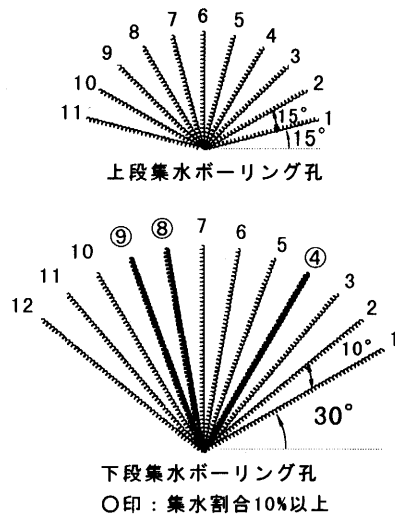


図-23 集水井 2 号での集水割合の高い孔

Fig. 23. The high rate of drainage volume at horizontal borehole of No. 2 drainage well.

の集水量は認められない。下段は No. 8 の集水量が 120cc/min で最も多く、全体の 66.6% に相当する。

集水割合が 10% 以上の孔を図-22 に図示すると、集水井 1 号は上・中・下段別にみると集水割合の高い孔は偏る傾向が見られ、上・中・下段間で比べると段によって集水割合の高い孔の方向が異なっており、下段ほど集中する傾向がある。

一方、図-23 に示すように集水井 2 号では上段は該当する孔はなく、下段は No. 8 方向のみである。いずれにしても集水割合の高い孔は少なく、しかもそれらは各段で同一方向に集まる傾向が見られる。以上の集水量結果からみると、地すべり斜面の水文地質構造は一樣でなく、地下水がかなり分散しているため、集水ボーリング孔からの集水量にかなりの差が出てきたものと考える（梁瀬ら、1986）。

第 4 節 まとめ

バルブ開閉実験における圧力水頭変動特性、集水ボーリング孔群からの排水特性、降雨によるそれらの変動特性を解析し、集水井集水工法による地下水低下の実態と地すべり地内の地下水文環境を把握し、次のような結果が得られた。

1) この地すべり斜面の水文地質構造は、集水井 1 号付近において 3 つの滞水層がある三層の地下構造により構成される。集水量制御実験よりそれらの圧力水頭変動の相互関係について、上層（礫混じり粘土化層）での排水は、中層孔の圧力水頭に影響する。しかし、下層孔の水頭には影響しない。中層（強風化片岩層）での排水は上層孔の圧力水頭に多少影響する程度であり、下層孔の水頭に影響しない。下層（風化片岩層）での排水は上層孔、中層孔での圧力水頭に影響しない。圧力水頭低下の速度は上、中層孔に比べて下層孔では遅い。降雨の影響で上層孔、中層孔での圧力水頭の変動が認められる。

2) 各段の集水ボーリングからの集水量と圧力水頭低下量の間関係をみると、集水井 1 号の中層

(強風化片岩層)は上層に比べて集水量の少ない割には低下量大きい。降雨による集水量の増加および圧力水頭の変動の仕方は地すべり地内の土層の風化程度や観測地点の深度によって異なる。この地すべり地においては、圧力水頭の低下のみを考慮すると、中層での集水が有効である。

3) 集水井1号および集水井2号の集水ボーリング孔別集水量の結果をみると、集水井1号の集水割合の高い孔は、偏る傾向が見られ、下段ほど集中する傾向がある。また、集水井2号の下段では地下水の流動が部分的に集中し、集水量が明瞭に異なる。

今回の研究の中での集水ボーリング孔別集水量の結果からは、第3章で得られた集水ボーリング孔の施工前後における圧力水頭の低下効果を比較することにより、地下水の流動が部分的に集中する下段では、集水井集水工法による深層(集水井1号の下層孔と集水井2号の下層孔)の圧力水頭の低下量も大きいことがわかった。すなわち、第3章の考察で示した集水井1号の掘削延長・方向による圧力水頭の変動は、集水井1号の西側に掘削した下段のNo.1孔からNo.5孔までの5本の集水ボーリング孔が三層孔の水頭の変動に関わっていた。その結果は、今回の集水ボーリング孔別集水量の実験より集水井1号下段のNo.1孔からNo.5孔までの5孔の集水量が92.8%占めることと一致する。

以上のことから平沢地すべり斜面の地下水はかなり分散していることがわかる。しかも降雨から伝達される地下水圧への影響は全体的ではなく、斜面の水文地質構造によって土層の一部に作用していると考えられる。

第5章 人工的に地すべりを発生させる実験

第1節 はじめに

第3章では間隙水圧の観測方法を述べた後、集水井地下水排除工法によるすべり面付近の間隙水圧の低下効果を検討した。また第4章では集水井のバルブ操作によって人工的にすべり面付近に作用する間隙水圧の挙動および地下水量をコントロールし、それらの関係を解析した。しかし、本研究の地下水排除工法における2基の集水井施設の効果を地すべり移動と対応させる必要がある。そのためには、集水井施設設置前後の地盤そのものの移動観測データも検討しなければならない。そして、その観測データをもとに、再度集水井の地下水排除効果について検討する必要がある。最終的には本実験により自然降雨で人工的に地すべりを発生させ、間隙水圧の上昇と地すべり移動との関係および集水井の施工効果を定量的に捉えられれば理想的である。

したがって、平沢地すべり試験地に人工的に地すべりを発生させる手段として、前述のように地すべり斜面に設置された2基の集水井排水機能をバルブ閉止操作より長期に停止させて、集水井施工前の環境に近い状態をつくり、そのときの地表移動、間隙水圧、降雨量などを測定する。これを施工前のデータとみなして、バルブ開放後のデータと比較すれば地すべり移動に対する集水井の施工効果の直接的な判定を確実に行うことが可能になる。本章では、1990年に行われた観測結果をもとに、地すべり地における①降雨量、②圧力水頭、③地表移動量などを解析する。

以下、第2節ではこれまでの多くの人為的な制御下で地すべりを発生させる実験の研究を整理し、その実験の問題点と改善点を検討する。第3節では、集水井施工前後における地中および地表移動量のデータ(パイプひずみ計、地盤傾斜計、すべり面測かん)を解析し、地すべりの移動状況を把握する。第4節では人工的に地すべりを発生させる実験方法とその長所を述べる。第5節では実験によって得られた結果を解析し、間隙水圧の上昇が地すべり移動に与える影響を明ら

かにする。

第2節 人工的に地すべりを発生させる従来の実験研究

地すべり運動現象を把握するために、人工的に地すべりを発生させる実験方法が考えられる。地すべり運動現象は、降雨あるいは融雪に伴い地すべり土塊の地下水位（間隙水圧）が上昇して土層のせん断抵抗力が低下することによって発生する。このような地すべり現象を人為的な制御下で解明することに関して、従来から行われている室内での浅層の斜面崩壊研究が注目される（佐々・武居，1979, 1980; 小川ら，1987）。しかし、その多くは、地すべり性「崩壊」を対象として砂を用いることが多く、また、粘性土を用いた場合でも、その困難さのゆえに相似率を考慮しなかったり、あるいは実験の際の境界条件が試料の動きに望ましくない影響を及ぼしたり、実験に必然的に伴う短所も多く見られた（小川ら，1987）。すなわち、実際の地すべり地では、地形、地質、地下水などの自然条件が複雑になっており、それらがお互いに影響し合っているため、地すべり地のモデル化および模型実験から実際の地すべり地の挙動を予測することは非常に困難であるといえる。

既往の室内においての地すべり模型実験研究を見ると、すべり面付近の間隙水圧の影響を検討した研究は非常に少ない。大久保（1976）は地すべりの運動特性を調べるために、すべり面を含む実験斜面の崩壊実験を行った。しかし、この実験は外力を側面抵抗の除去として与えているため、地すべり発生に影響を与えると考えられている間隙水圧と地すべりの運動特性との関係を得ることはできない。

小川ら（1987）はこの欠点を考慮して、室内において地すべり模型実験を行い、地すべり発生に及ぼす間隙水圧の影響について検討を行った。小川らは過去に地すべり履歴を有する地すべり地を対象として、粘土をすべり面として滑動するというを考慮して、実験斜面内に試料をスラリー状にしたすべり面を設けて行った。また、間隙水圧の上昇を考慮した地すべり地の土のせん断強さを定量的に表す強度定数を求めるため、リングせん断試験を行い、その結果に基づいて地すべり模型斜面の安定解析およびその適用性について検討を行った。

一般に模型実験を行う際に重要な要因として相似率が挙げられる。模型によって実際の現象を予測する場合、模型の挙動から実際現象への換算の方法が必要である。この換算の根拠になるものが相似率である。しかし、小川らの研究は単に地すべり発生に及ぼす間隙水圧の影響を検討するため、相似率を考慮せず、単純にモデル化した実験斜面を用いている。

一方、自然斜面で地すべりを発生させる実験研究は非常に少ない。例えば川辺ら（1990）は人工的に地すべりを発生させ、地盤内部の諸現象と滑動の関係、あるいは地盤内部のせん断変形から地表面への地すべり発展過程を検討した。また、降雨時の斜面崩壊の発生時期を予知するための野外斜面実験に関してはかなり報告されている（八木ら，1985）。発生時期の予知に関しては大別して二つの方法がある。一つは前兆としての斜面の動きから破壊発生の時期を検知しようとするものである。例えば地表面のひずみ速度の変化を用いる斎藤の方法や地表面の傾斜の変動を利用する方法（森野ら，1975）などが提案されている。もう一つは、破壊発生を支配する主な誘因の変化から予測しようとするものである。代表的なものとして崩壊発生危険雨量の設定が検討され実用化されてきている。

ここに川辺らの野外実験について、以下に紹介する。

地すべりを予測し、災害を防ぐという観点から必要なのは

- ・地すべりを発生させる各種の因子と地盤の変動との相関
- ・地盤がクリープ状態から破壊へと移行する過程

を可能な限り自然に近い状況下で明らかにすることである。そこで、この目的を達成するため、自然の斜面に人為的に地すべりを発生させ、各種の観測を行うことを考える。

なお、地すべりの誘因として一般に、①間隙水圧の発生と上昇、②土の強度低下、③応力状態の変化が挙げられる。①と②は降雨・地下水などによる水分の供給が主な内的要因であり、③は地震や切土、盛土などの人為的改変が外在要因である。これらの要因のいくつかを発見することによって、ある地点で、せん断力が許容限界を越えた時点でせん断破壊が起こり、周辺に伝播しすべり面が形成されると考えられる。

川辺らの実験は静岡県由比町の由比地すべり地帯にある斜面長約 30 m、幅約 20 m、平均傾斜約 15°の自然の小斜面に設けられた実験地を利用して行った。地すべりは斜面下部の掘削によって③を変化させ、斜面上部よりの注水によって①と②を引き起こすことによって発生させる。上記野外実験における間隙水圧と移動量の間の直接的な相関が検討されている（川辺ら、1991）。また、斜面に配置した杭の移動量の測量結果によって地表面のひずみの分布と地すべりの変動過程を考察した（川辺ら、1993）。川辺らの実験では、明確なせん断破壊面が見られたが、すべり面が生じるまでには至らなかったから、すべり面付近の間隙水圧の影響を検討することができなかった。

第3節 実験前の地すべり移動状況

地表面にみられる地すべり現象は、地形的調査ならびに現象目視調査によってある程度定性的に把握し得る。しかし、これらを定量的に把握することは困難である。実際には、調査の対象となる地すべりが現在活動しているか否かを定量的に把握しなければならない。このためには計測器を利用する調査が必要である。

一般には地すべり移動を判定するための地中移動量および地表移動量の調査が広く行われている。地中移動量の調査はボーリング孔を利用して、計器類を用いて、すべり面、地中移動量および土圧などを把握する。計測器の種類としては、①すべり面測かん、②パイプひずみ計、③地中傾斜計、④地中伸縮計、⑤地すべり土圧計などを標準とし、現地の状況に応じて選択使用する。さらに、地すべり運動に起因する地表面の微小変位などの地表移動量の調査は、①地盤傾斜計および②伸縮計を用いて、地表ひずみの状態、特に地表面上に現われたき裂の活動性を把握することも含めて行われる。

本節では、平沢地すべり地における集水井施工前後の地中および地表移動量のデータ（パイプひずみ計、地盤傾斜計、すべり面測かん）を解析し、1981年から1989年にかけての地すべり移動状況を検討する（埼玉県農林部林務課、1981～1989より）。図-24はパイプひずみ計および地盤傾斜計の配置状況である。

1. パイプひずみ計の観測結果

第一に、平沢地すべり調査の初期は、中部、下部および末端部ブロックの地すべり移動現象の解明のために、1982年から各ブロックにボーリングを行い、パイプひずみ計を取り付けた。その結果、1982年は8月、9月の台風の影響で浅層、中層、深層に地すべり活動が見られた。

すなわち、

- 浅層地すべり移動: BV56-6 (深さ-1.5 m) 孔 (8月13日まで累積した)
- BV57-1 (深さ-1.5 m) 孔 (9月24日まで累積した)
- BV58-1 (深さ-3.5 m) 孔 (8月15~21日まで累積した)
- 中層地すべり移動: BV58-3 (深さ-9.5 m) 孔
- 深層地すべり移動: BV56-2 (深さ-19.5 m) 孔
- BV56-4 (深さ-19.5 m) 孔
- BV56-5 (深さ-19.5 m) 孔

が認められた。図-24 に示すパイプひずみ計の位置を参照されたい。

第二に、1984年は台風らしいものもなく、降雨が少なかったためパイプひずみ計には異常変動が認められなかった。1985年は末端部ブロックでBV59-1 (深さ-3.5 m) のひずみ変動が微小であるが断続的に認められた。

第三に、1986年から集水量制御実験が始まり、パイプひずみ計の観測結果は、BV56-5 (深さ-11.5 m)、BV57-1 (深さ-1.5 m, 7.5 m)、BV58-3 (深さ-9.5 m)、BV58-5 (深さ-1.5 m)

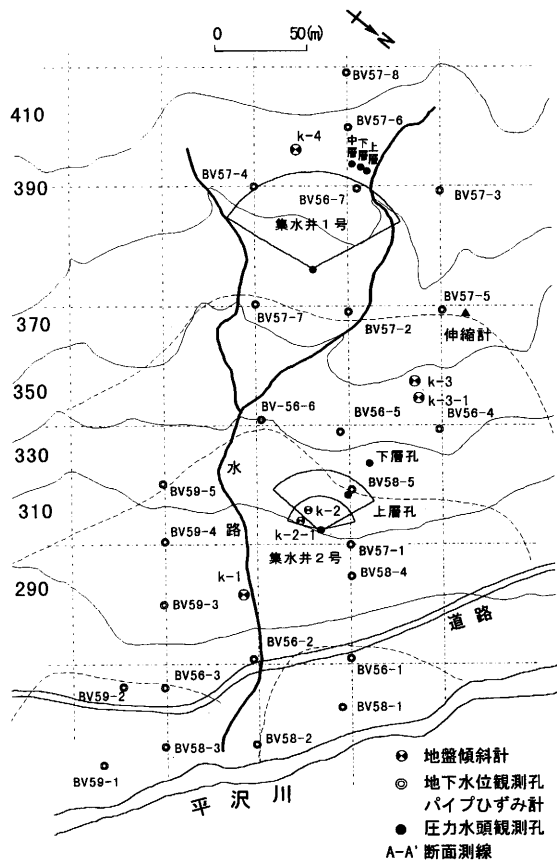


図-24 パイプひずみ計と地盤傾斜計の位置

Fig. 24. Location of pipe-strain meter and land inclinometer.

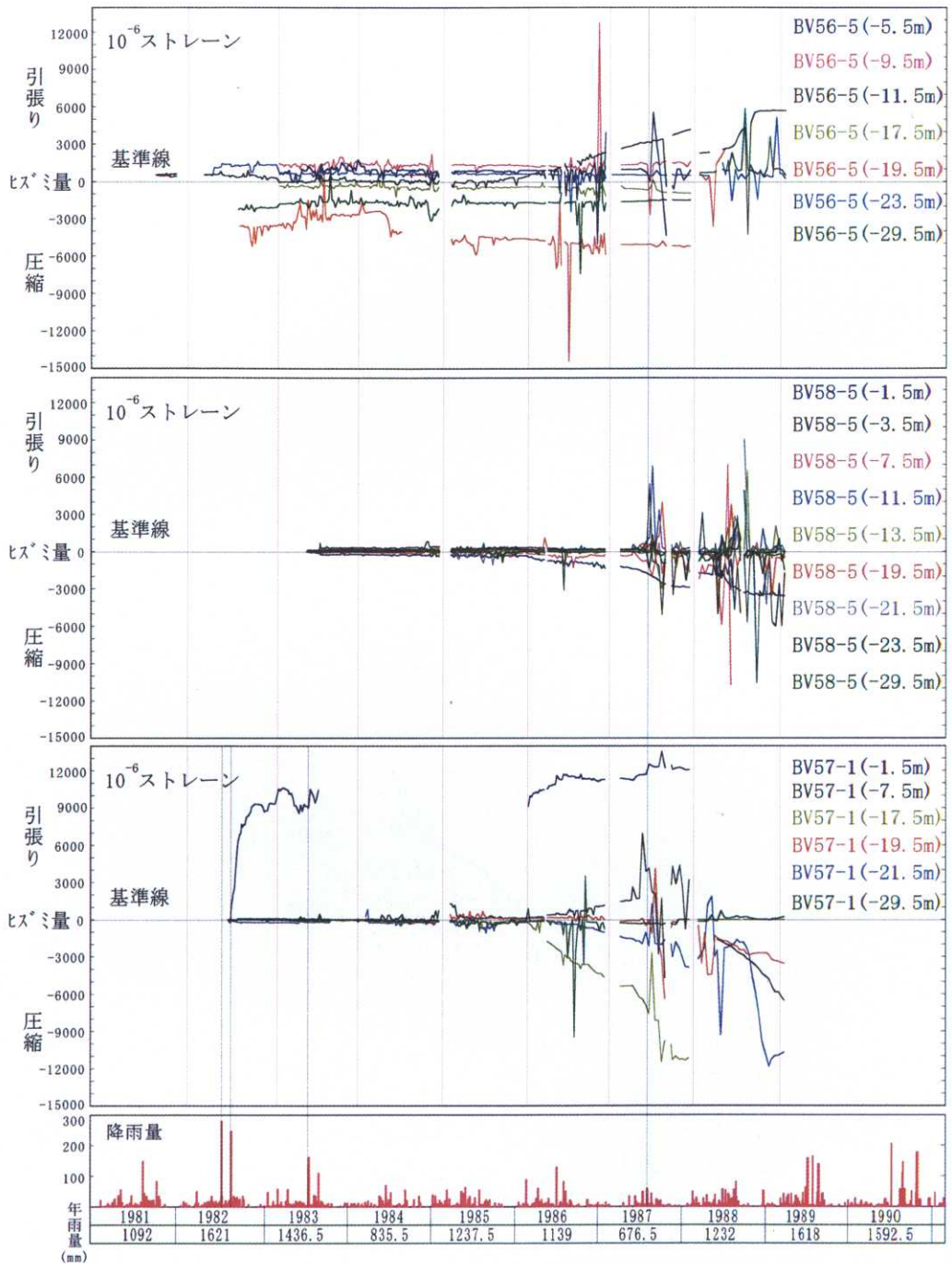


図-25 パイプひずみ計の経年変化

Fig. 25. Annual change of pipe-strain meter.

の観測孔においてひずみ累積が認められた。また、BV56-5（深さ-9.5 m, 19.5 m, 29.5 m）、BV57-1（深さ-29.5 m）、BV58-5（深さ-5 m, 7.5 m, 11.5 m, 13.5 m, 19.5 m）の観測孔においては一時的に大きく増加するが、再び回復した。図-25は集水井2号付近におけるパイプひずみ計による長期地中移動の観測結果である。集水井2号付近のBV56-5、BV58-5、BV57-1孔において、特に1986年にバルブ操作が開始された後、集水井付近のひずみ計の累積変動が激しくなることが認められた。

第四に、1987年はBV56-5（深さ-11.5 m）、BV57-1（深さ-7.5 m, 17.5 m, 19.5 m, 5 m）、BV58-5（深さ-1.5 m）の観測孔において地すべり性変動が一時的に大きく増加するが、再び回復したことがわかった。1988年はBV56-5（深さ-11.5 m）、BV58-5（深さ-1.5 m）、BV57-1（深さ-7.5 m, 19.5 m, 21.5 m）で顕著な地すべり性変動が認められた。

総合的な結果を示すと次のようになる。

2. すべり面測かん調査の結果

パイプひずみ計は老朽化が激しく、1987年にはパイプひずみ計による測定が可能であった箇所も1988年以後はノイズが発生してデータに信頼性が欠けるようになってきた。そのため1987年からは測かん調査も併用して地すべり土塊の移動をチェックすることにした。

その結果について、表-6に示すように、測かんが底まで挿入できない孔はBV56-5（測かん長1.0 m）、BV57-1（測かん長0.3 m以上）、BV57-2（測かん長0.2 m以上）、BV58-5（測かん長1.0 m）で、特に1987年より挿入深度が浅くなってきている。また、BV56-5、BV57-1、BV58-5の3孔はいずれも地表面付近で挿入不可能となっている。

図-26は1987年より挿入深度が浅くなってきている観測孔付近の位置を示す。集水井2号付近の中部・下部ブロックでは1986年にBV56-5、BV58-5、BV57-1においてひずみ累積が認められたが、目立った地すべり土塊の移動は認められなかった。1987年と1988年はBV56-5、

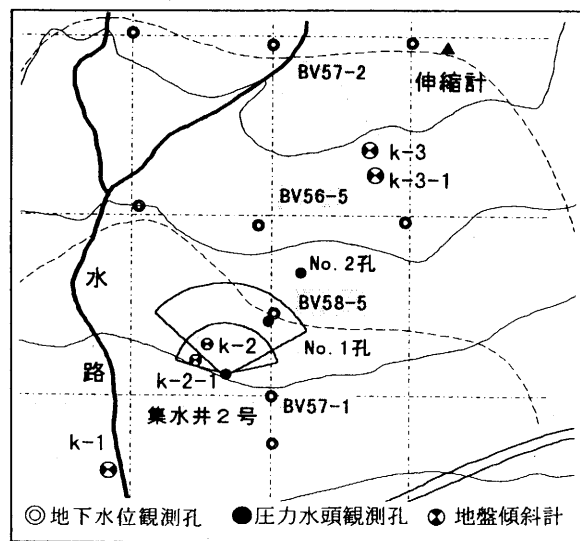


図-26 測かん調査より移動が認められる位置

Fig. 26. Moving position by measurement stick.

表-7 地盤傾斜計の正負号と傾斜方向の関係

Table 7. Relation between plus minus sign and slope direction by land inclinometer

N-S 方向	-	-	+	+
E-W 方向	-	+	-	+
傾斜方向	$N\phi^{\circ}E$	$N\phi^{\circ}W$	$S\phi^{\circ}E$	$S\phi^{\circ}W$

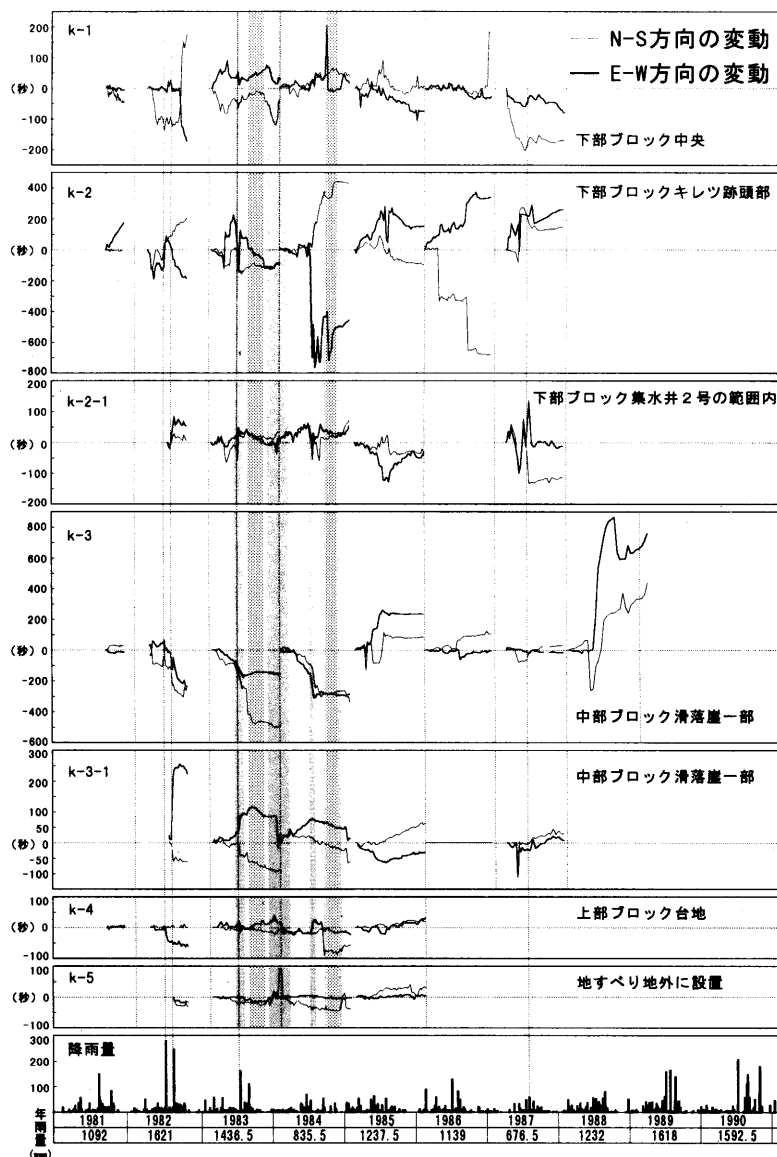


図-27 地盤傾斜計の経年変化 (注: 塗色は集水井の掘削期間)

Fig. 27. Annual change of land inclinometer.

BV58-5, BV57-1 でパイプひずみ計および地盤傾斜計の観測より顕著な地すべり性変動が認められた。これらのことにより、1987年から集水井2号付近の土層が移動していると推定された。

3. 地盤傾斜計の観測結果

地盤の傾動状況や地すべり発生の有無を検討するために、図-24に示したように傾斜計を7箇所に設置して観測を行った。

k-1: 下部ブロック中央部の畑に設置

k-2: 下部ブロックキレット跡地頭部に設置

k-2-1: 下部ブロック集水井2号の集水範囲に設置

K-3: 中部ブロックの滑落崖の一部に設置

K-3-1: 中部ブロックの滑落崖の一部に設置

K-4: 上部ブロックの台地に設置

K-5: 地すべり地外に設置

観測期間は、1981年10月6日～1982年1月7日まで3日に1回観測し、その後、1988年まで7日に一回観測した。

地盤傾斜計の主脚(分度板)をNおよびE方向に向けて設置した場合の傾斜運動方向は表-7から求める。表-7の場合N-S, E-W両方向について、数字がプラスの場合はS, W方向へ、マイナスの場合はN, E方向へ傾斜することを意味する。

図-27は平沢地すべり地における地盤傾斜計変動図(k-1-k-5)の長期観測結果である。経年調査より総合的な結果を表-8に示す。各傾斜計の変動状況をまとめて検討すると次のようになる。

k-1は1981年の観測開始よりS方向主体とした交互変動を示し、12月14日から変動量が少なく落ち着きを示している。1982年の累積変動が認められ、1983年から1985年までN～W方向に交互変動が見られた。しかし、表-8に示すように、1986年に7日平均変動量が小さくなり、変動方向の累積性も認められない。1987年から地すべり性の累積変動が認められた。以上の結果から見ると、1982年の大きな変動が認められるが、これは地すべり対策工事などの人為的行為に伴う変動と判定され、この変動を除けば1987年の累積変動が大きいと思われる。

k-2は1981年の観測開始より10月24日まで目立った変動が認められずE-W方向での交互変動を呈すがその後E方向に確実な累積傾向を示している。1982と1983年には全体に大きく累積変動が認められた。しかし、これは地すべり対策工事による人為的影響と考えられる。1984年8月19日まで50秒前後であったがその後大きくW方向に変動し、E-W方向の交互変動を示しながらN方向へ変動している。1985年9月中旬までは大きくE方向への移動であるがその後一時期回帰し、再びE方向へ移行し、その後はSW方向に移動して激減している。また1986年の変動量も減少している。しかし、1987年は7～9月に地すべり性のもと考えられる変動が記録された。1988年以後、傾斜計の傾きが測定限界を超えたため測定不能となっている。

k-2-1は1982と1983年に変動があるが、変動量が少なく交互変動を主体に示している。1984年は8月末から十月末まで変動が大きい。1985年からまた変動が少なくなり、全体にS-W方向の移動で回帰している。1987年は同じS-W方向の移動で7～9月に地すべり性の変動が記録された。1988年以後、同じく測定不能となっている。

k-3は中部ブロック冠頭部に設置しており、1981年観測開始から10月27日までN-W方向の累積を示すがその後、変動は認められない。しかし、1983年からNS方向の傾斜計に地すべり

表-8 地盤傾斜計の変動状況
Table 8. The variation of land inclinometer

傾斜計 (秒)	1981. 10-1982. 1		1982. 5-1983. 3		1983. 4-1984. 3		1984. 4-1985. 3	
	3日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向
k-1	9.78±6.27	N8°21'W	27.35±28.21	N48°W	15.63±12.63	S38°39'E	18.62±35.58	N23°11'E
k-2	9.40±6.16	E	29.90±32.67	N28°05'W	35.75±56.47	S41°55'W	59.29±96.49	S46°45'E
k-2-1	—	—	15.56±11.34	S78°27'E	14.10±15.82	N22°37'E	21.39±35.57	N36°21'E
k-3	4.21±3.75	N22°W	27.77±38.61	S43°23'W	15.42±24.62	S17°19'W	15.73±18.64	S39°57'W
k-3-1	—	—	14.29±34.62	S68°23'E	8.94±10.94	S17°03'E	7.67±9.21	S12°03'E
k-4	3.79±3.02	N9°27'E	6.28±5.46	S82°11'W	6.02±4.84	S70°33'E	8.60±13.17	S23°04'W
k-5 (BG)	—	—	4.56±5.34	S17°35'W	6.98±11.20	N1°17'W	6.22±7.67	N5°51'W

傾斜計 (秒)	1985. 4-1986. 3		1986. 4-1987. 1		1987. 4-1988. 3		1988. 4-1989. 3	
	7日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向	7日平均変動量	傾斜方向
k-1	16.08±17.18	N82°30'W	8.84±4.61	方向なし	12.29±10.84	S20°36'W	—	—
k-2	29.06±41.46	S56°40'E	18.44±15.18	方向なし	87.15±30.73	N60°24'E	—	—
k-2-1	11.67±10.77	S47°38'W	—	—	49.66±21.17	S6°30'W	—	—
k-3	20.33±41.50	S70°15'E	9.27±12.24	W	18.33±6.37	N26°30'W	43.50±10.99	N59°48'E
k-3-1	5.03±3.01	N24°22'W	—	—	37.26±10.16	N13°06'E	—	—
k-4	4.24±3.73	N57°10'E	—	—	—	—	—	—
k-5 (BG)	5.50±4.80	N5°54'W	—	—	—	—	—	—

冠頭部の変動が示され、降雨時に累積が認められ、全体にSW方向に累積している。1984年6月1日から10月末まではSW方向へ累積を示し、その後、交互変動を示している。1985年の4月～6月まではN方向の移動であるが、その後、SEに転じ再びNE～E方向に移行している。平均的に8月31日まで変動が大きい。しかも、降雨後に変動が大きくなる傾向が見られる。1986年の7日平均変動量は1981年に次いで小さくなっている。1988年においても地すべりへ変動が認められ、これは冠頭部の局所的な移動と考えられる。

k-3-1は1982～1983年まで降雨時に累積変動量が大きく認められ、SW方向への変動が多い。1984年は変動量が小さく交互変動を示しながらN→E→E→S→W方向に変動し回帰傾向にある。1985年も変動量は年々減少傾向にある。1986年は欠測である。1987年の累積変動が小さい。1988年以後、同じく測定不能となっている。

k-4とk-5は1981年観測開始から1985年まで全体に変動量が小さく7日平均変動量6秒前後、微小変動であると考えられる。

以上の経年観測結果より、集水井対策工の施工前において1982～1983年まで降雨時に地盤傾斜の累積変動が大きく認められた。1984年は2基の集水井の施工期間であり、1985年施工後における変動量は年々減少傾向にある。しかし、1986年から集水井のバルブ閉止操作が開始され、1987～1988年まで地盤傾斜計k-1, k-2, k-2-1, k-3などの箇所でも累積変動が大きく記録された。傾斜計の累積変動が大きくなる原因はバルブ閉止操作に降雨の影響が伴っていると考えられる。

4. バルブ操作による圧力水頭、集水量、移動量の相互関係 (1986年と1987年の実験)

1986年と1987年のバルブの開閉操作と圧力水頭の変動関係の詳細はすでに第4章において記述している。ここでは概要を示す。まず、図-28に示す1986年の実験は、平常時バルブを閉止状態にしておき、実験時、バルブの一部を開放した。集水井1号の観測結果より、三層それぞれの圧力水頭の変化特性は以下のようにまとめられる。①上層での排水は、中層の圧力水頭に影響する。しかし、下層の水頭には影響しない。②中層での排水は上層の圧力水頭に多少影響する程度であり、下層の水頭に影響しない。③下層での排水は上層、中層での圧力水頭に影響しない。④圧力水頭低下の速度は上、中層に比べて下層では遅い。⑤降雨の影響で上層、中層での圧力水頭の変動が認められる。

図-28に示す集水井1号の1987年の実験は、平常時、バルブを開放状態にしておき、実験時、バルブの一部を閉止した。しかし、11月中旬から大量の地下水が現れたので、対策として11月中旬から2月中旬までの閉止実験期間にバルブ操作を変更して半開放にした。バルブ操作以前の9月から10月までの総降雨284mmの影響で圧力水頭が急激に上昇し、大量の地下水が排出されたものと考えられる。一方、バルブ操作による集水量への影響は少ない。すなわち、9月29日から10月26日まで上段バルブのみを開放した直後の集水量をみると、以前の集水量と比較してあまり多くない。雨水が土層に浸透水として蓄積されたと予想される。また、図-28に示す集水井2号の降雨量、圧力水頭、集水量の変動関係をみると、1986年と1987年の集水井2号の観測結果は全体的にバルブ操作が圧力水頭にあまり影響していない。

次に、集水井付近に設置した地盤傾斜計とパイプひずみ計の累積量の変動関係を検討する。第一に、1986年のバルブ操作によるパイプひずみ計の累積変動量の関係は、図-28に示す集水井2号の①のバルブ操作をみると、集水井2号の右下側に設置したBV57-1孔の深度29.5mにおい

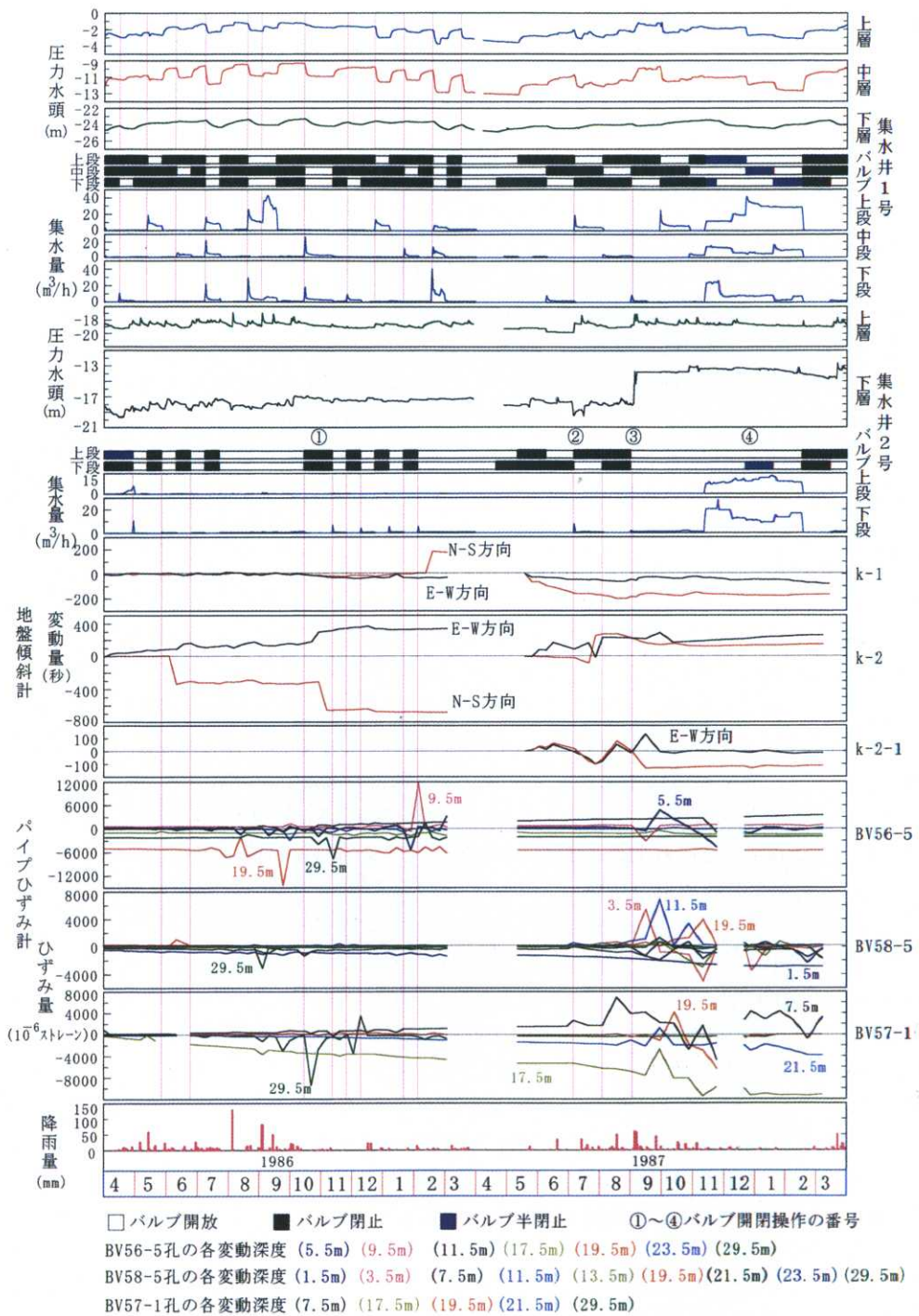


図-28 バルブ操作による圧力水頭および移動量の変動関係 (1986年と1987年)
 Fig. 28. Relation between pressure head and displacement by controlling drainage experiment (in 1986 and 1987).

て、バルブを10月14日から11月10日まで閉止することによってひずみ量の増加が一時的に -8000 ($\times 10^{-6}$ ストレーン) に大きくなった。その後、再び回復することが認められた。またバルブを閉止すると、さらにひずみ量が約 4000 ($\times 10^{-6}$ ストレーン) の圧縮と引張りを交互に示していることがわかった。この現象からみると、バルブ閉止操作の影響によって実際に塩ビ管にひずみ量が与えられたような観測結果が得られたが、再び回復するのであるから、地すべりによるものではなく、塩ビ管周辺の孔壁の局部的変動などによる塩ビ管の一時的変形と解釈する。また、図-28に示す集水井2号付近(集水井の集水範囲内)の下部ブロックにあるき裂頭部に設置された地盤傾斜計k-2の変動は、同じバルブの閉止期間に一時的に大きく増加したことが認められた。前述したBV57-1孔の深度29.5mの累積変動の関係と一致することがわかった。

第二に、図-28に示す1987年の圧力水頭、地盤傾斜計、パイプひずみ計の観測結果をみると、②の操作期間において、集水井2号下段のバルブ操作は4月21日から7月6日まで閉止操作を行い、その時のk-1、k-2、k-2-1の地盤傾斜計の累積が5月中旬から動いている。その後、バルブを4週間開放してから再びバルブを閉止した。8月31日にバルブ閉止操作が終わるまで集水井2号付近のk-2とk-2-1の地盤傾斜計は、変動量の累積が続いて激しく変動していることが認められた。また、集水井2号付近に設置したパイプひずみ計BV57-1孔の深度7.5mと17.5mの累積変動も認められた。

③の操作は1987年9月上旬から連続降雨138.5mmの影響で各観測孔の水頭が大幅に上昇した。特に集水井2号の下層孔の水頭は急に4.34m上昇してからそのままの水頭を保っている。その時、集水井2号付近に設置したBV56-5、BV58-5、BV57-1のパイプひずみ計の変動量も同時に変化していることがわかった。つまり、降雨に伴うすべり面付近の圧力水頭の上昇が地盤傾斜計とパイプひずみ計の累積量の増加に直接的に影響していることが認められた。特に集水井2号に近いBV58-5孔のひずみ量は過去より激しく変動して水頭上昇の関係と一致することがわかった。前述した集水ボーリング孔から大量の地下水が排水された現象とも一致する。

5. バルブ操作による圧力水頭と移動量との関係(1988年1989年)

図-29に示す1988年の実験は、平常時バルブを開放状態にしておき、実験時、バルブの一部を閉止したが、バルブの奇数番号のみを実行した。バルブの閉止操作は6月上旬から主に8週間に設定して同じ繰り返し状態で実行した。しかし、1988年9月27日に集水井2号下段でのバルブを開放する予定日には、集水量の自動観測フロートが孔内で動かなくなったため、9月27日から11月22日までのバルブ操作は予定計画と違ってバルブの閉止を現状維持にした。その結果は図-29に示す①と②の操作をみると、集水井1号上段のバルブを閉止した直後に中層孔の圧力水頭が0.87m上昇した。そして、8月2日から上段バルブを開放すると、上層孔と中層孔の圧力水頭が0.48mと0.96m低下し、その後、連続降雨量90mmが降り、圧力水頭が少し上昇した。バルブ操作による集水井1号の水頭変動が全体に緩やかに上昇・低下することがわかった。一方、集水井2号の圧力水頭の変動は全体にバルブ操作が圧力水頭に影響していない。しかし、降雨の影響で水頭上昇がみられた。

図-29に示す降雨量と移動量の観測結果をみると、1988年は集中豪雨がないが、不順な天候により降雨で連続している。不順な天気が続いたのは、8月と9月であるが、特に8月10日から9月6日までの約一カ月で40mm以上の降水量が9日間記録されている。そのときの総降雨量は517mmであった。しかも、8月2日から11月22日までは集水井2号下段のバルブの閉止

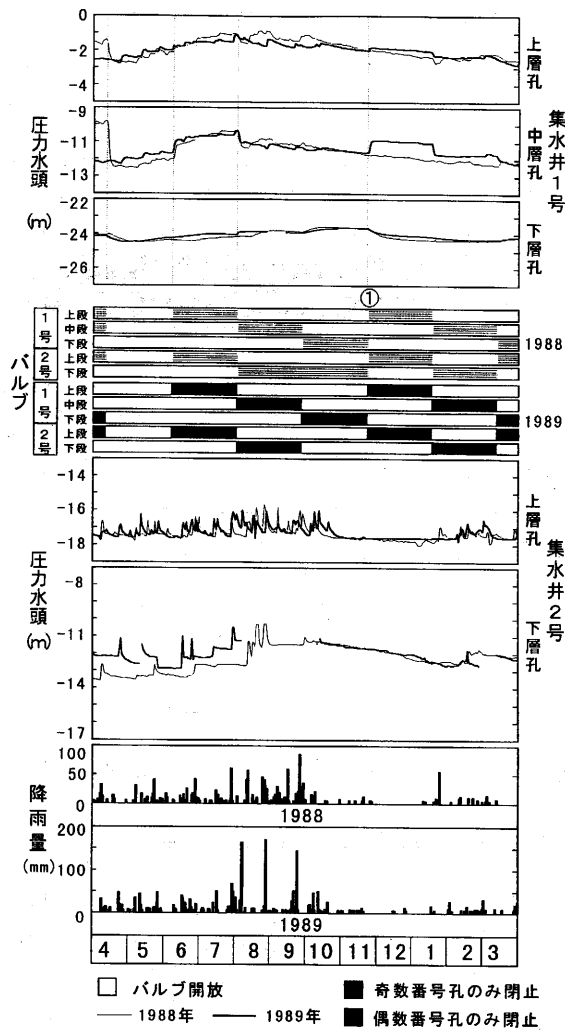


図-30 1988年と1989年のバルブ操作による圧力水頭の変動関係

Fig. 30. Pressure head fluctuation by controlling drainage experiment in 1988 and 1989.

(バルブの奇数番号孔のみ)が重なっている。その原因で中部ブロックの滑落崖に設置された k-3 の地盤傾斜計は累積の方向に変動した。この地盤傾斜計の変動は過去より激しく動いて地すべり地盤の移動現象が認められた。また、集水井2号に近い BV56-5, BV58-5, BV57-1 孔のパイプひずみ計が一時的に大きく変動した。特に BV56-5 孔の深度 11.5 m と BV57-1 の深度 7.5 m, 19.5 m, 21.5 m において、ひずみの累積量が認められた。

一方、1989年の実験は1988年と逆にバルブの偶数番号のみを行った。図-30に示す1988年と1989年の実験結果を比較すると、1989年の①の操作結果は上層孔と中層孔の圧力水頭が1988年の実験より上昇した。しかし、全体的に水頭の変動傾向は降雨量が違っててもよく類似している。

6. 集水ボーリング孔別集水量（1988年と1989年）

各集水井における集水量実験は集水井から扇状に配置した集水ボーリングによって、はじめて1986年4月29日と5月13日に行った。その結果は、集水井1号と集水井2号の集水ボーリング孔別集水量の効果をみると、集水井1号の集水割合の高い孔は、偏る傾向が見られ、下段ほど集中する傾向がある。集水井2号の下段では地下水の流動が部分的に集中し、集水量が明瞭に異なる。しかし、前述した1987年の移動量の観測結果によると、集水井2号付近に設置した地盤傾斜計とパイプひずみ計は過去より累積量が続けて激しく変動している。しかも圧力水頭の上昇と集水ボーリングから大量の地下水が排水された現象とも一致する。以上のことから、1987年に集水井2号付近の地すべり地盤の移動を伴いながら地表面と地中の変形とを起こしたため、水みちが閉塞したり新たな水みちが発生する可能性があると考えられた。

そこで、1988年と1989年の集水量実験では、1987年に地すべり地盤が激しく変動した影響が各集水井の下段からの集水量に及ぶかどうかを調べるため、集水井1号下段と集水井2号下段における各集水ボーリング孔からの排水量を測定した。測定期間は、1988年6月21日から1989年1月7日まで合計16回、1989年9月26日から1990年2月17日まで合計14回行った。表-9に示す1988年と1989年の平均集水量は集水井1号下段での13孔の集水量うち、No.1（下段ボーリングNo.1）、No.4、No.10、No.12の4孔の集水割合が高い。特にNo.12の孔は他の孔に比較して集水量が最も多い。しかも、図-31に示すNo.12の孔の集水量は降雨の影響に伴う集水量の増加が大きくなる。No.1、No.4、No.10の3孔は降雨との関係が見られず一定の集水量をもっている。残り9孔の集水量が極めて低い。一方、集水井2号下段での平均集水量が13孔の集水量のうち、集水できる孔は1986年より5孔増えた。しかも、集水量が全体に増加した。特に、図-31に示す集水井2号のNo.4の孔の集水量は他の孔に比較して集水量が最も多く、降雨の影響より集水量の上昇関係が認められた。今回の研究の中で集水ボーリング孔別集水

表-9 集水ボーリング孔別集水量
Table 9. Drainage volume by horizotnal borehole cc/min(%)

孔号	集水井1号下段集水量		集水井2号下段集水量	
	1986年4月29日	1988-1989年平均集水量	1986年5月13日	1988-1989年平均集水量
1	560 (43.7)	646 (24.1)	0 (0.0)	33 (3.4)
2	20 (1.6)	152 (5.7)	0 (0.0)	38 (3.8)
3	200 (15.5)	139 (5.2)	0 (0.0)	69 (7.0)
4	400 (31.2)	455 (17.0)	20 (11.1)	441 (44.5)
5	10 (0.8)	37 (1.4)	0 (0.0)	0 (0.0)
6	10 (0.8)	34 (1.3)	10 (5.6)	80 (8.1)
7	10 (0.8)	63 (2.4)	0 (0.0)	0 (0.0)
8	0 (0.0)	11 (0.4)	120 (66.6)	146 (14.7)
9	10 (0.8)	20 (0.7)	20 (11.1)	37 (3.7)
10	20 (1.6)	243 (9.1)	10 (5.6)	90 (9.1)
11	10 (0.8)	20 (0.7)	0 (0.0)	32 (3.2)
12	10 (0.8)	783 (29.2)	0 (0.0)	24 (2.4)
13	20 (1.6)	75 (2.8)		
計	1280 (100.0)	2678 (100.0)	180 (100.0)	990 (100.0)
累積雨量	51.0 mm	平均 53.0 mm	31.0 mm	平均 44.0 mm

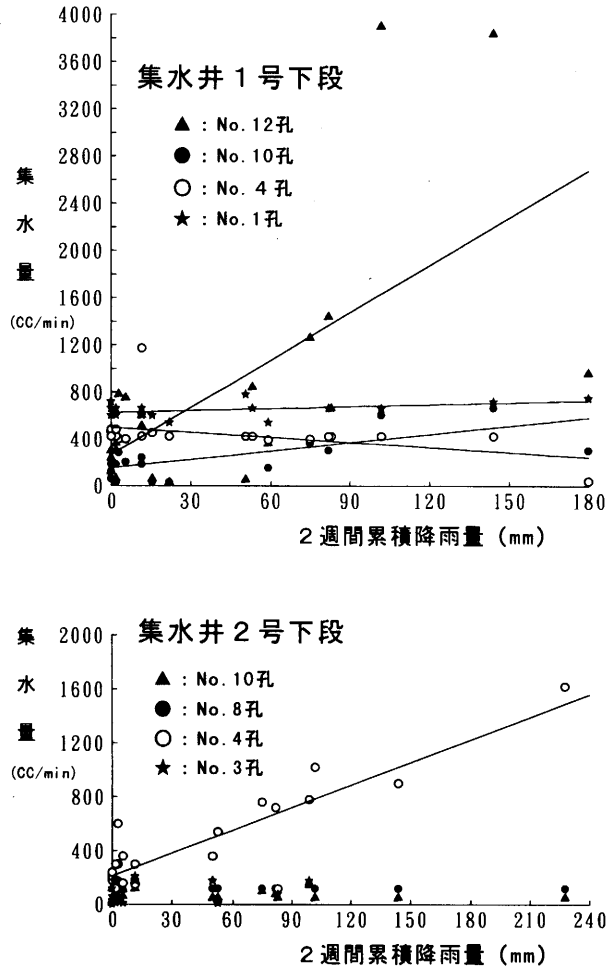


図-31 集水量と累積降雨量の関係

Fig. 31. Relation between drainage volume and cumulative rainfall.

量の結果と、第4章の結果で得られた1986年集水量を比較すると、地下水の流動が部分的に集中する集水井下段では1987年に集水井付近の地すべり地盤の移動に伴う影響によって地中の水みちと集水量が大きく変わったことがわかった。

第4節 実験方法

1986年から1989年まで各集水井のバルブ操作によって得られた結果によると、集水井1号では三層それぞれ圧力水頭の変化特性が明らかになり、降雨の影響による集水量の違いが検出された。集水井2号はバルブの取り付けが完了して以降、全体的にバルブ操作が圧力水頭にあまり影響していない。集水井2号上段の11孔と下段の12孔は一、二の例外を除いて全体的に集水量が少なく、上段集水ボーリングからの集水量は認められない。下段では地下水の流動が部分的に集中し、集水量が明瞭に異なる。集水井2号の施工効果はまだ明らかになっていないので、集水

表-10 平沢試験地の降雨量資料
Table 10. Rainfall data in Tairasawa landslide

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年降雨量	最大日降雨量	最大累積降雨量
1980	43	13	70	48	79	42	235	136	100	122	70	26	984	67	95 (7/7-7/9)
1981	2	25	37	77	132	69	94	277	160	144	75	0	1092	149	209 (8/21-8/23)
1982	0	33	22	101	38	164	139	456	452	141	75	0	1621	280	455 (7/24-8/3)
1983	14	60	50	98	116	83	146	454	311	65	39	0.5	1436.5	162	422 (8/14-8/18)
1984	21	41	41	39.5	47.5	118.5	180.5	102.5	45	117	32	50	835.5	69.5	125 (7/18-7/23)
1985	1	126	92	168	42	329.5	178.5	106	97.5	48.5	36	13	1237.5	63.5	187.5 (6/28-7/5)
1986	0	31	139.5	50.5	158	91	83.5	183	258	74	14.5	56	1139	129	171 (9/1-9/3)
1987	14	33	41	0.5	14	38	82	97	227.5	75	35.5	19	676.5	59.5	139.5 (9/3-9/7)
1988	9	14	106	72	142	152	122	256	324	43	15	0	1232	81	136 (8/24-8/28)
1989	61	33	19	126	163	158	220.5	414.5	242.5	150	23	9.5	1618	165	183 (8/5-8/6)
平均	17	41	61.8	78	93.1	124.5	148.1	248.2	221.8	97.9	41.5	17	1187.2	122.6	

井の施工効果を明確に調査する必要があると考えた。そこで、1990年の実験は集水井の施工効果の判定を容易かつ確実に行うため、また地盤傾斜計やパイプひずみ計の老朽化が年々著しいため、1990年に伸縮計1基を中部ブロックの滑落崖の一部と推定される位置に設置した。各集水井のバルブの開閉の組み合わせは、①集水井1号と集水井2号の各段バルブを開放する。②集水井2号は全開放状態で集水井1号の一段だけバルブを開放する。③集水井1号と集水井2号の各段バルブを開放する。④集水井2号は全閉止の状態で集水井1号の一段だけバルブを開放する。の4ケースを実施した。閉止期間はバルブ操作の期間中の安全を確保するため、表-10に示す平沢試験地の降雨量を参考にし、降雨量と台風襲来が多い時期（6月から10月にかけて）を避けて11月28日から集水井2号の全バルブの閉止を実施した。

第5節 実験結果および考察

1. 降雨の長期変化と圧力水頭の変動比較

(1) 月降雨量:

① 1980年以降11年間の降雨量について、月降雨量の統計を表-10に示す。これによると1980年から1990年の年間降雨量は、最大1621.0mm（1982年）、最小676.5mm（1987年）、平均1224mmである。

② 平沢地すべり地域は6月から9月にかけて降雨量が多く、1989年の同期の降雨量は全て平均を上まわっている。経年観測より8月の降雨量は、1982年8月の456mmに次ぐ454mmを記録した。

③ 1990年11月は最大354.5mmの降雨量を記録した。1990年の台風の上陸数は6個であり、記録を塗り変えた。また季節外れの台風第28号が11月30日に上陸して1951年からは最も遅く上陸した台風となった（砂防・地すべり技術センター、1990）。

(2) 日降雨量:

① 表-10に示す最大日降雨量によると1982年および1983年は台風による集中豪雨が多発した。台風時の最大日降雨量は1982年8月1日の280mm、9月12日の247mmがあり、最大累積降雨量は455mmを記録した。

② 1988年は、1982年および1983年のような集中豪雨はないが、梅雨前線と低気圧などの不順な天候により降雨が連続している。不順な天気が続いたのは、8月と9月であるが、特に8月10日～9月6日の間の約一カ月で20mm以上の降雨量を7日記録した。

③ 1989年は梅雨明けの7月下旬から9月下旬にかけて台風の上陸や接近により各地で土砂災害が発生した。平沢地すべり地では月総雨量200mm以上を7、8、9月で記録した。最大日降雨量は8月27日に165mmがあり、これは台風17号によるものである。次に8月6日の158.5mm雨量を記録した。

④ 1990年は8月10日から11月30日までの連続台風の上陸により土砂災害は連年の約5倍にあたる491件の報告があり、1990年の発生件数の約40%を占めた（砂防・地すべり技術センター、1990）。8月から11月までの総雨量は1283mmを記録した。特に台風28号（11月27～30日）による4日間の累積降雨量は318.5mmに達した。最大日降雨量は8月10日に206.5mmを記録した。

(3) 圧力水頭の長期変化:

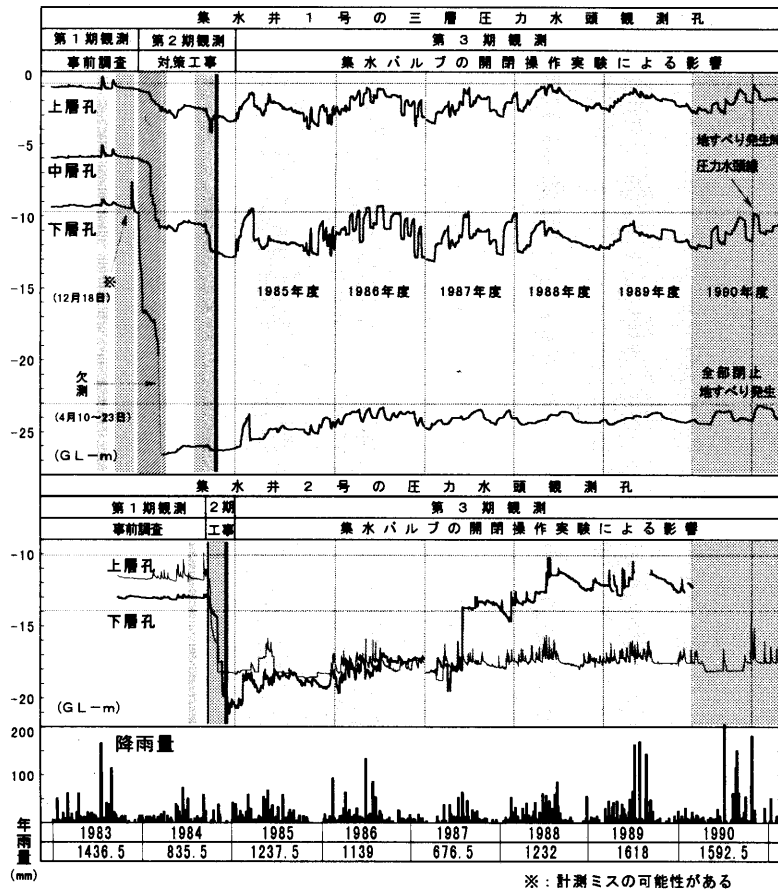


図-32 集水井別圧力水頭の経年変化

Fig. 32. Annual change of pressure head by drainage well.

図-32は1983年から1990年までの長期圧力水頭の変動状況を示している。これを三期に分けると、①集水井施工前、②対策工事中、③バルブ開閉操作実験などの三観測期間になる。①～③は前述した第3章および第4章で述べた。しかし、③の1990年実験は過去のバルブ操作条件と違って人工的に地すべりを発生させる実験であり、その結果を後で詳しく検討する。ここでは、すべり面付近の圧力水頭の変動を長期的な視点から特に注目すべき点について検討しておくたい。

まず、1987年の圧力水頭の異常上昇現象を検討する。9月3日から7日までには138.5 mmの降雨があり、集水井1号下層(深さ35 m)の観測孔を除く他の観測孔(水位観測孔も含む)では一時的に水位が上昇した。集水井2号下層(深さ27 m)の観測孔はその後スケールオーバーしてしまい、その後圧力水頭がそのまま維持されることになった。この現象の原因には三つの説が考えられる。

第1は計測器械の故障が原因で不正確な値を記録したこと。

第2は集水ボーリング孔に付設したストレーナーパイプ内部あるいは外部の沈泥、目詰まりに

よって水みちが閉塞されたこと。

第3は連続降雨の影響で圧力水頭が上昇し、地すべり移動現象が発生、そしてパイプ周辺地盤の変形によって、土層の水みちが変わって異状な圧力水頭が発生したこと。

まず第1の場合は1987年9月7日に集水井2号の下層の圧力水頭が急激に上昇した、その後スケールオーバーしてしまい、いくぶん不正確な値を記録した。しかし、その後から1989年まで観測したデータははっきり記録され、降雨による圧力水頭の上昇も認められたので、水位計故障の原因は排除できると考えられる。次に第2について、集水井の集水ボーリング孔による地下水の排除はストレーナーパイプの目詰まりが原因で経年的排水機能低下を起こす事例は多い。しかし、実際に集水ボーリングからの排水量を見ると、以前より減少した傾向は見られず、水みちの閉塞が原因となる可能性は低いと考えられる（図-17と図-18の結果を参照）。

最後に第3の場合では降雨の影響と地すべり移動現象の関係を検討しなければならない。降雨量について、1987年9月3日から7日には138.5 mmの降雨があり、翌年3月からの雨量も多く、4月の72 mmを除いて9月まで毎月100 mm以上の雨がかった。特に9月は324 mmにも達した。圧力水頭はそれらに対応して上昇し、集水井1号上層と集水井2号下層の観測孔では今までになかった最高水頭を記録している。この最高水頭を記録したのは8月下旬で、8月の中旬から下旬にかけて200 mm以上の降雨があった。そして、このときの集水バルブ操作は開放状態になっていた。しかし、三日間で100 mmの連続降雨があり、今までになく水頭が上昇した原因と考えられる。

さらに前述した1987年と1988年の降雨に伴う地すべり移動現象を解析すると、斜面に設置したパイプひずみ計と地盤傾斜計の移動が確実に記録された。したがって、連続降雨および地すべり移動が、圧力水頭の上昇が長期に維持されることになった原因であると結論できる。すなわち第3の場合が実際の現象に近いと考えられる。

次に、1983年から1990年までの年間最大圧力水頭の変動をまとめて検討する。

集水井施工前の平均圧力水頭（1983年と1984年）および集水井施工後の平均圧力水頭（1985～1989年のバルブ操作実験期間）は次のようになる。

① 集水井施工前の平均圧力水頭（1983年と1984年）:

集水井1号の観測孔：上層孔-1.07 m, 中層孔-5.89 m, 下層孔-9.31 m.

集水井2号の観測孔：上層孔-11.5 m, 下層孔-12.9 m.

② 集水井施工後の最高圧力水頭（1985～1990年の集水バルブ操作実験期間）:

1988年の最大降水量（8月24～28日の連続降雨136 mm）に伴う集水井1号上層の最高圧力水頭は-0.86 mが記録され、集水井2号のNo. 2観測孔も-10.28 mの最高値となった。しかも、圧力水頭は集水井施工前の平均圧力水頭を上まわっている。

また、1990年11月下旬に連続降雨297.5 mmが降り、同時に集水井1号と集水井2号の集水バルブが人工的操作で全て閉鎖され、各観測孔の水頭が急激に上昇し変化した。特に集水井2号上層の観測孔が最高水頭-14.1 mになった。以上の長期的分析から、降水量と各層圧力水頭の上昇との関連が明確に認められた。

(4) 全孔ストレーナー観測孔の地下水位の長期変動:

図-33は図-24に示したA-A'測線に沿って観測された調査ボーリング孔の長期水位変動である。水位観測孔は集水井1号および集水井2号の付近に設置している。この周辺は平沢地すべり

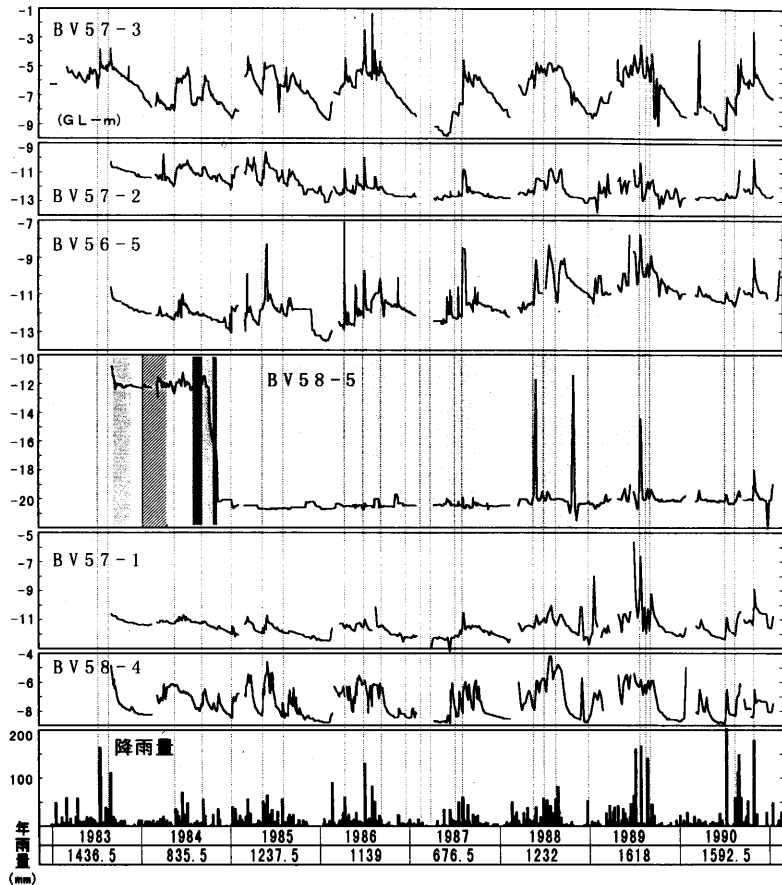


図-33 地下水位の経年変化

Fig. 33. Annual change of groundwater level.

地の中部ブロックから下部ブロックの間にあり、現在地すべり活動が認められているところである。なお、図-33の観測結果からみると、降雨期（6月～9月）の雨量と地下水位は非常によく対応していることが明らかである。集水井の排水効果が見られるBV58-5孔において、集水井施工前後の水位変動状況を比較すると、明瞭に違うことがわかる。

2. 集水井のバルブ操作が地すべり移動に与える影響

図-34に示す実験は①の操作期間で各集水井のバルブを全開放して自由に地下水の排除を行った。②の操作期間において、集水井2号のバルブを全開放しており、集水井1号の一段だけバルブを4週間開放してからバルブを閉じた。その結果は集水井1号の上層孔と中層孔の圧力水頭が鋭敏に上昇した。8月上旬の連続降雨量240mmの影響で集水井2号の上層孔の水頭が1.1m上昇したが、移動量はほとんど認められない。その後、9月の447.5mmの降雨の影響で集水井1号の上層孔と中層孔の圧力水頭が徐々に上昇した。また、10月に降雨量139.5mmが降り、しかも、集水井1号の三段バルブの閉止が重なり、集水井2号のバルブが全開放状態で、移動量が伸び方向に5～6mm程度変動した。

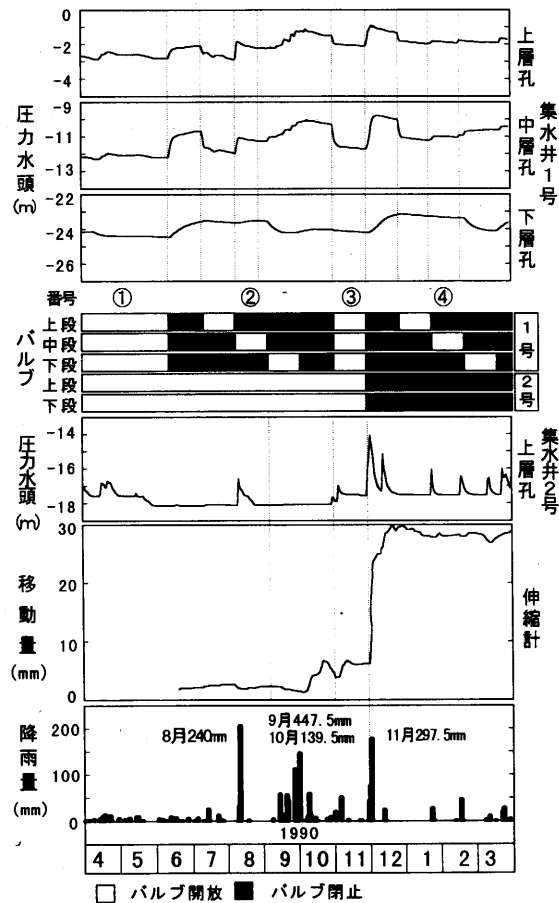


図-34 バルブ操作による圧力水頭と移動量の変動関係

Fig. 34. Relation between pressure head and displacement by controlling drainage experiment.

③の開放操作期間において、9月と10月からの大量の雨量が現れたので対策として11月から全バルブを一か月間開放にした。その時の移動量はいったん戻り、また降雨量51mmの影響で少し伸びた。さらに④の閉止操作期間において、11月28日から集水井2号の全バルブの閉止を実施した。その後、季節外れの台風28号が11月30日に上陸して1951年からは最も遅く上陸した台風となった(砂防・地すべり技術センター, 1990)。その時の連続降雨量228.5mm(27日から30日までそれぞれ1mm, 43.5mm, 6mm, 178mm)が降り、集水井1号の三段バルブの閉止に集水井2号の二段バルブの閉止が重なったことによる移動量の変化も伸び方向に約30mm変動した。それに、集水井1号と集水井2号の各層の観測孔の水頭も大幅に上昇したことが認められた。このように、11月下旬に伸縮計に大幅な変動が認められたのは、集水井1号の三段バルブの閉止による影響よりも、集水井2号の二段バルブを閉止したことが大きく影響しているためと考えられる。

今回の実験から見ると、集水井1号と集水井2号のバルブを閉じることは、集水井1号と集水井2号付近での斜面内の土層で間隙水圧を上昇させる効果をもつことがわかった。また、これら

の結果から、降雨に伴う各深度の観測孔でも圧力水頭の上昇がみられ、それが地すべり移動の活発化する時期と一致している。このことから、降雨による圧力水頭の上昇が地すべり発生の原因となっていることが実際に検証された。

第6節 まとめ

平沢地すべり地における集水井の集水ボーリング孔を利用して集水量制御実験を行うことにより、集水井付近の地すべり地盤の変形挙動について、降雨に伴う圧力水頭の上昇が集水井付近の地表面や地中の変動に与える影響を明らかにした。さらに、集水井1号と集水井2号の施工効果の評価を地すべりの人工的移動によって検証し、次のような結果が得られた。

1) 1986年と1987年の実験結果をみると、降雨に伴うすべり面付近の圧力水頭の上昇が地盤傾斜計とパイプひずみ計の累積量の増加に与える直接的影響が認められた。特に集水井2号付近のBV58-5孔とBV57-1孔のひずみ量は過去より激しく変動して水頭上昇の関係と一致することがわかった。しかも、集水ボーリング孔から大量の地下水が排水された現象とも一致する。

2) 1988年と1989年の集水ボーリング孔別集水量の効果を見ると、集水井1号下段と集水井2号下段の集水量は、全体的に増加し、各集水ボーリング孔の集水量が明瞭に異なる。特に、集水井1号のNo.12の孔と集水井2号のNo.4の孔の集水量は降雨の影響より集水量の上昇関係が認められた。それらの結果と、第4章の結果で得られた1986年集水量を比較すると、地下水の流動が部分的に集中する集水井下段では1987年に集水井付近の地すべり地盤の移動に伴う影響によって地中の水みちと集水量が大きく変わったことがわかった。

3) 集水井2号の施工効果は、各集水井のバルブ閉止操作実験によって集水井の各層の圧力水頭が大幅に上昇し、中部ブロックの滑落崖に設置した伸縮計も同時に累積変動が認められたことによってその効果が評価できた。すなわち、集水井2号の施工効果を人工的すべり移動時の検証より再度明らかにした。

第6章 結論

地すべり地を安定させて二次すべり発生を防ぐことは、地すべり研究の最大の課題である。そのために、地すべり対策工（抑制工）の一つとして、すべり面付近の間隙水圧を低下させて地すべり地を安定させる「集水井を用いた地下水排除工」が広く採用されている。

従来の集水井による地下水排除工は、集水井の井筒と全孔ストレーナーによる集水ボーリングを併用し地下水を排除する排水工法である。この工法によって集水井の井筒周辺の地下水およびストレーナー集水ボーリング設置範囲内の滞水層の地下水を排除することができる。一般に集水ボーリングの設置範囲内の地下水頭の低下量は、集水ボーリングの先端から井筒に近づくにつれ大きくなる傾向が見られる。その効果は井戸理論公式を安定計算に導入することにより検討されてきている。また、集水ボーリングの施工密度と地下水頭の低下量の関係についても多くの研究が行われている。

しかし、実際の地すべり活動に関与する地下水は、移動層中の自由水頭をもった地下水ではなく、すべり面付近に存在する被圧地下水である。そして、降雨などによるそのような地下水の間隙水圧の上昇がすべり面付近せん断抵抗力を著しく減じ、地すべり土塊の安定に直接影響を与え、地すべり運動が活発化するのである。したがって、集水井などによって移動層中の地下水を

排除しても、地すべり活動の抑制効果への寄与は小さいと考えられ、より効果的な地すべり活動の抑制のためには、すべり面に作用する被圧地下水を排除すべきであることが以前から指摘されてきた。

一般に、集水井を用いた地下水排除工法が実際に有効であったかどうかは、必ずしも簡単に検証することはできず、それは、①地すべり地の土層の不均一性、②間隙水圧や集水量の観測方法に問題があること、が考えられる。①に関しては、地すべり地は土塊が攪乱されているため水文地質条件が複雑で、地下水を明確にとらえて適切な地下水排除工を実施することは困難である。しかも地すべり地の地下水の挙動は、個々の調査地点や深度において異なった挙動を示すことが多い。したがって、井筒のみの地下水排除工は、すべり面に作用する間隙水圧の低下をもたらすことができない。したがって、集水井付近の移動が激しくなって失敗する事例がある。そこで井筒排水に変わるものとして、集水井内からの集水ボーリングによる地下水排除工が有効であるが、一般には集水ボーリング全長にわたりストレーナー加工したものをを用いて地下水排除を行っているため、すべり面付近の間隙水圧の低下特性は必ずしも明確に把握することができない。しかも地すべり移動と②の間隙水圧との関係を定量的に評価することが困難である。

本論文では、この観測方法に関する問題点を解決するため、第2章においても述べたように、

1) 観測ボーリング孔内のすべり面付近のみに部分ストレーナーを入れ、そこに水位計を設置して圧力水頭（間隙水圧）の変化を観測する。

2) 集水井は周辺の地下水の侵入および集水井内部の水の周辺への漏水を防ぐため、余掘り空間にモルタルを注入している。また、集水ボーリングはすべり面のみに部分ストレーナーを行い、すべり面付近の被圧地下水を集水し測定をする。

3) 集水井内に設置した集水ボーリング孔からの排水を一時的に停止するために、それぞれ孔口にバルブを取り付け、その排水機能を一定期間集水バルブを開放・閉止する集水量制御を行うことにより間隙水圧の複雑な挙動特性を調べる。

などの観測方法を用いて野外実験を行った。

この野外実験は、以下のことを目的として行った。

1) 集水井の集水ボーリング掘削に伴う地すべり地内の間隙水圧の低下特性及び集水ボーリングからの初期排水特性を解明する。

2) バルブ操作実験における間隙水圧変動特性、集水ボーリング群からの排水特性、降雨によるそれらの変動特性を解析し、集水井排水工法による地下水低下の実態と地すべり地地下水の複雑な挙動を解明する。

3) バルブ操作により間隙水圧を増加させて人工的に地すべりを発生させることの可能性を検討することも含めて、今後の地すべり対策工改良への知見の集積を試みる。

この実験結果から、

①従来の集水井戸と全長ストレーナー加工の集水ボーリングの地下水排除工では、集水井施工前後におけるすべり面付近の間隙水圧の低下効果を定量的に評価することは困難であった。しかし、本論文では、間隙水圧の低下特性は、下層の集水ボーリング孔の効果の方が上層のものより大きく、その後の間隙水圧の変動量も大きかったことと、掘削による初期排水量はボーリングの方位により極端な差があるほか、掘削中に突然流出があることなど、地すべり地の地下水の多様性・偏在性とを明らかにした。

②本論文の第4章に示した集水ボーリング排水量を制御するバルブ開閉実験では、地すべり地内各層での地下水流動特性、間隙水圧の低下と排水量の関係、降雨の影響などについて、地すべり地地下水の複雑な実態が明確に追跡・検証された。

③従来の地すべり地のモデル化および模型実験からは地下水排除工と地すべり挙動との関係を明らかにすることは非常に困難であったが、本研究の第5章に示した集水井の地下水排除工の有効性を検証する野外実験の手法では、すべり面付近の間隙水圧の上昇が地すべり土塊の移動に与える影響を明らかにでき、再度集水井の地下水排除工の有効性を定量的に示した。

などを実証的に明らかにした。

以上のように、地すべり地地下水の挙動はこれほどの精密な観測によっても把握しきれないほど複雑多様なものであり、現在、理論的解析が強調されている地すべり研究であるが、今後も理論的解析とは別に現象論的研究の推進が一層重要であることを示した。また、すべり面付近の間隙水圧や集水ボーリング集水量の精密な観測によって得た間隙水圧の挙動や変動特性は、今後の集水井施工に多くのヒントを与えるものとなった。これらのことにより、地すべりに起因する土砂災害の対策技術や地すべり地地下水の研究が一層向上することになると考えられる。

謝 辞

本研究を進めていく過程で、多くの方々から有形無形の援助を得ている。まず、東京大学農学生命科学研究科 太田猛彦教授には、筆者が研究を開始した当初から、終始適切にご指導を賜ったばかりでなく、筆者の使用した研究資料（平沢試験地の観測データ）の取得に十分なご配慮を賜った。東京大学農学生命科学研究科 鈴木雅一教授には、観測データの整理や解析の方法など実地的な研究の進め方について終始懇切にご指導を賜っている。また、東京大学農学生命科学研究科 執印康裕助手とは、さまざまな面でいつも有意義な議論をともにさせて頂いた。

また、農林水産省森林総合研究所北海道支所 梁瀬秀雄所長、東北支所 竹内美次部長からは、筆者が観測データの解析を開始した当初から、観測データの確認作業や地すべりの現象的研究の重要性について学ばせて頂いた。また、森林総合研究所森林環境部 落合博貴博士からは、とても親切に平沢試験地での現場の対策工施設の解説や研究の助言を賜った。また、森林総合研究所地すべり研究室 松浦純生室長からは、研究論文の進め方について懇切にご指導と助言を賜っている。

この研究に用いた資料は、森林総合研究所地すべり研究室の平沢試験地において、設置以来得られた全ての観測データであり、これら試験の計画と実行に携わったきわめて多数の研究者と関係職員の方々の多年のご苦勞のたまものである。ここに記して深く敬意と謝意を表す。

また、台湾大学農学部 陳 信雄教授、陳 明杰教授からは、留学期間中に多大なご支援や研究についての励ましを頂いた。さらに、東京大学農学部森林理水および砂防工学研究室の院生・学生諸氏とは、有意義な議論を通じて研究過程を共有することができた。これら全ての方々から心から感謝の意を表す。

要 旨

日本では、地すべり対策工（抑制工）の一つとして、すべり面付近の間隙水圧を低下させて地すべり地を安定させる「集水井を用いた地下水排除工」が広く普及している。しかし地すべり地

内の地下水系は極めて複雑であり、その挙動と地すべり移動との関係や地下水排除工の有効性の検証などについての知見は未だ極めて貧弱である。そこで森林総合研究所地すべり研究室では、埼玉県下のいわゆる結晶片岩系破碎帯地すべり地帯にある平沢地すべり地において、部分ストレーナ加工やバルブ装着など、集水ボーリング孔に工夫をこらすことにより、すべり面付近の間隙水圧や集水量を精度よく測定することが可能な地すべり試験地を設置し、10年間にわたって観測を行った。

本論文では、そこで得られたすべての観測データを用いて、1) 集水井の集水ボーリングの掘削に伴う地すべり地内の間隙水圧の低下特性および集水ボーリングからの初期排水特性の解明。2) バルブ開閉実験における間隙水圧変動特性、集水ボーリング群からの排水特性、降雨によるそれらの変動特性を解析し、集水井排水工法による地下水低下の実態と地すべり地地下水の複雑な挙動の解明。3) バルブ操作により間隙水圧を増加させて人工的に地すべりを発生させることの可能性を検討することも含めて、今後の地すべり対策工改良への知見の集積を試みようとするのが目的である。研究結果を次にまとめる。

第一に、第3章は平沢地すべり地における集水井施工前後の圧力水頭の観測結果から集水ボーリング孔の掘削に伴うすべり面付近の圧力水頭の変動の解析を行い、集水ボーリング孔の掘削そのものの効果を明らかにした。施工前の調査では降雨や圧力水頭などの季節変化データが得られ、その結果と施工後のデータとを比較して集水井の地下水排除効果を定量的に明らかにした。さらに、集水ボーリング孔掘削中のすべり面付近に作用する圧力水頭の低下特性を捉えるため、掘削中の湧水の現象、また掘削方向と圧力水頭の変動関係や降雨の影響などの解析を行い、以下の結果を得た。

1) 集水ボーリング孔の施工前後における圧力水頭の低下状況は、集水井1号の三層孔及び集水井2号の二層孔の観測結果をみると、深層の圧力水頭が浅層のものより低下量が多い。

2) 集水ボーリング孔の掘削と圧力水頭の低下特性を見ると、圧力水頭の低下は集水ボーリングが観測孔の数m以内に達したときと削孔中に湧水が発生したときに起っている。圧力水頭の低下効果は観測孔に近いところまで掘削した集水ボーリング孔が大きく影響した。

3) バルブ閉止の操作実験による集水井1号の三層孔の圧力水頭の変動は、バルブ閉止の影響で三層孔の圧力水頭が鋭敏に上昇し、その中の中層孔に対応する強風化片岩層の水頭上昇量が最も大きい。

第二に、最4章はバルブ開閉実験における圧力水頭変動特性、集水ボーリング孔群からの排水特性、降雨によるそれらの変動特性を解析し、集水井集水工法による地下水低下の実態と地すべり地内の地下水文環境を把握し、次のような結果が得られた。

1) この地すべり斜面の水文地質構造は、集水井1号付近において三つの滞水層がある三層の地下構造に構成される。集水量制御実験よりそれらの圧力水頭変動の相互関係について、上層(礫混じり粘土化層)での排水は、中層孔の圧力水頭に影響する。しかし、下層孔の水頭には影響しない。中層(強風化片岩層)での排水は上層孔の圧力水頭に多少影響する程度であり、下層孔の水頭に影響しない。下層(風化片岩層)での排水は上層孔、中層孔での圧力水頭に影響しない。圧力水頭低下の速度は上、中層孔に比べて下層孔では遅い。降雨の影響で上層孔、中層孔での圧力水頭の変動が認められる。

2) 各段の集水ボーリングからの集水量と圧力水頭低下量の関係を見ると、集水井1号の中層

(強風化片岩層)は上層に比べて集水量の少ない割には低下量が大きい。降雨による集水量の増加及び圧力水頭の変動の仕方は地すべり地内の土層の風化程度や観測地点の深度によって異なることがわかった。この地すべり地においては、圧力水頭の低下のみを考慮すると、中層での集水が有効である。

3) 集水井1号および集水井2号の集水ボーリング孔別集水量の効果をみると、集水井1号の集水割合の高い孔は、偏る傾向が見られ、下段ほど集中する傾向がある。また、集水井2号の下段では地下水の流動が部分的に集中し、集水量が明瞭に異なる。

今回の研究の中で集水ボーリング孔別集水量の結果からは、第3章の結果で得られた集水ボーリング孔の施工前後における圧力水頭の低下効果を比較すると、地下水の流動が部分的に集中する下段では、集水井集水工法による深層(集水井1号の下層孔と集水井2号の下層孔)の圧力水頭の低下量も大きいことがわかった。すなわち、第3章の考察で示した集水井1号の掘削延長・方向による圧力水頭の変動は、集水井1号の西側に掘削した下段のNo.1孔からNo.5孔までの5本の集水ボーリング孔が三層孔の水頭の変動に関わっていた。その結果は今回の集水ボーリング孔別集水量の実験より集水井1号下段のNo.1孔からNo.5孔までの集水量が92.8%をこの5孔で占めることと一致することである。

以上のことから平沢地すべり斜面の地下水はかなり分散していることがわかる。しかも降雨から伝達される地下水圧の影響は全体的ではなく、斜面の水文地質構造によって土層の一部に作用していると考えられる。

第三に、第5章は降雨に伴う圧力水頭の上昇が集水井付近の地表面や地中の変動に与える影響を明らかにし、さらに集水井1号と集水井2号の施工効果の評価を地すべり移動時の検証より行い、平沢地すべり地における集水井の集水ボーリング孔を利用して集水量制御実験を行うことにより集水井付近の地すべり地盤の変形挙動は、次のような結果が得られた。

1) 1986年と1987年の実験結果をみると、降雨に伴うすべり面付近の圧力水頭の上昇が地盤傾斜計とパイプひずみ計の累積量の増加に与える直接影響が認められた。特に集水井2号付近のBV58-5孔とBV57-1孔のひずみ量は過去より激しく変動して水頭上昇の関係と一致することがわかった。しかも、集水ボーリング孔から大量の地下水が排水された現象とも一致する。

2) 1988年と1989年の集水ボーリング孔別集水量の効果をみると、集水井1号下段と集水井2号下段の集水量は、全体的に増加し、各集水ボーリング孔の集水量が明瞭に異なる。特に、集水井1号のNo.12の孔と集水井2号のNo.4の孔の集水量は降雨の影響より集水量の上昇関係が認められた。それらの結果と、第4章の結果で得られた1986年集水量を比較すると、地下水の流動が部分的に集中する集水井下段では1987年に集水井付近の地すべり地盤の移動に伴う影響によって地中の水みちと集水量が大きく変わることがわかった。

3) 各集水井のバルブ閉止操作による集水井2号の施工効果は集水井の各層の圧力水頭が大幅に上昇し、中部ブロックの滑落崖に設置した伸縮計にも同時に累積変動が認められた。再度集水井2号の施工効果を地すべり移動時の検証より明らかにした。

結論として、現在、地すべり現象に対しては浸透理論などを用いて理論的に解析する方法と現象論としてケーススタディを積み上げる方法があるが、本研究の結果から地すべり地の地下水の研究は現象論的な方法の積み重ねがさらに必要であることがわかった。また、すべり面付近の間隙水圧や集水ボーリング集水量の精密な観測によって得た間隙水圧の挙動や変動特性は、今後の

集水井施工に多くのヒントを与えるものと考えられる。

キーワード： 地すべり，間隙水圧，集水ボーリング，すべり面，集水井

引用文献

- 1) CARRENO, R., BONNARD, C. (1997): Rock slide at Machupicchu, Peru, *Landslide News*, No. 10, pp. 15-17.
- 2) 陳 信雄 (1995): 台湾における地すべりと防止対策, 土地開と保全に関する国際セミナー講演論文集, (財)地盤工学会九州支部, pp. 27-37.
- 3) EVANS, S. G., BEGIN, C., LAWRENSE, D. E., DEMERS, D., GRONDIN, G., AYLWORTH, J. M., PARENT, M. Y., BROOKS, G. R. (1997): A Massive Retrogressive Landslide in Sensitive Shawinigan, Quebec, Canada, April 1996, *Landslide News*, No. 10, pp. 17-19.
- 4) 藤田寿雄・板垣 治 (1977): 地すべりの実態統計, その 3, 土木研究所資料, 第 1204 号.
- 5) HARP, E. L., JIBSON, R. W., SAVAGE, W. Z., HIGHLAND, L. W., LARSON, R. A., TAN, S. S. (1995): Landslides Triggered by January and March 1995 Storms in Southern California, *Landslide News*, No. 9, pp. 15-18.
- 6) 檜垣大助・丸山清輝・吉田克美・吉松弘行 (1991): 地すべり地における間隙水圧変動の観測, 地すべり, Vol. 28, No. 3, pp. 9-16.
- 7) JANBU, N. (1997): The Finneidfjord Slide, which Occurred during ISL '96, *Landslide News*, No. 10, pp. 28-29.
- 8) 川辺 洋・芝野博文・西尾邦彦・山口伊佐夫 (1990): 野外実験による地すべり発展過程における地盤の変形特性, 地すべり, Vol. 27, No. 1, pp. 1-10.
- 9) 川辺 洋・芝野博文・西尾邦彦・山口伊佐夫 (1991): 地すべり地盤の変形に及ぼす間隙水圧の影響についての一考察, 地すべり, Vol. 27, No. 4, pp. 33-36.
- 10) 川辺 洋・芝野博文 (1993): 地すべり地における表面歪の分布と変化, 地すべり, Vol. 29, No. 4, pp. 32-36.
- 11) 川上 浩 (1986): 地すべり調査に関連する 2, 3 の問題, 地質学論集, 第 28 号, pp. 87-95.
- 12) 岸本良次郎 (1969): 地下水圧観測施設の一例—地すべり調査用—, 農業土木学会誌, Vol. 36, No. 10, pp. 23-28.
- 13) 高速道路調査会 (1985): 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書, pp. 106-107.
- 14) MA, D., ZHAO, S., LI, H. (1997): Loess Landslides Triggered by Irrigation on the Slopes of the Terrace Edge in Heifangtai of Yongjiing County Gansu Province, China, *Landslide News*, No. 10, pp. 31-33.
- 15) MARTINEZ, J. M., AVILA, G., AGUDELO, A., SCHUSTER, R. L., CASADEVALL, T. J., SCOTT, K. M. (1995): Landslides and Debris Flows Triggered by the 6 June Paez Earthquake, Southwestern Colombia, *Landslide News*, No. 9, pp. 13-15.
- 16) 丸山清輝・北島義則 (1996): 地すべり地における集水井の地下水排除効果に関する検討, 地すべり, Vol. 33, No. 3, pp. 13-18.
- 17) 松浦純生・梁瀬秀雄 (1996): 地すべり地における地下水調査の現状, 地すべり研究の発展と未来, 大明堂, pp. 229-241.
- 18) 南 哲行・網木亮介・小山内信智・藤澤和範・萬徳昌昭・杉淵清徳 (1997): 平成 9 年 5 月秋田県鹿角市八幡平で発生した土砂災害調査報告 (速報), 砂防学会誌, Vol. 50, No. 2, pp. 68-73.
- 19) 森野亮宏・飯島哲之助 (1975): 斜面崩壊検知に関する実験的研究, 鉄道土木, No. 17-6.
- 20) 中村浩之・近藤政司・白石一夫 (1970): 粘土性を主体とした地すべりでの地下水位及び間隙水圧の測定例, 地すべり, Vol. 7, No. 1, pp. 1-7.
- 21) 日本道路公団編 (1983): 地すべり・斜面安定問題の数値解析手法に関する文献調査, 101 pp.
- 22) 農林水産省林業試験場・埼玉県農林部林務課: 昭和 58 年地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 23) 農林水産省林業試験場・埼玉県農林部林務課: 昭和 59 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 24) 農林水産省林業試験場・埼玉県農林部林務課: 昭和 60 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).

- 25) 農林水産省林業試験場・埼玉県農林部林務課: 昭和 61 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 26) 農林水産省林業試験場 (1988): 昭和 62 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 27) 農林水産省森林総合研究所 (1989): 昭和 63 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 28) 農林水産省森林総合研究所 (1990): 平成元年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 29) 小川正二・池田俊雄・亀井健史・佐野博昭 (1987): 地すべり発生に及ぼす間隙水圧の影響, 地すべり, Vol. 24, No. 2, pp. 2-9.
- 30) 大久保駿・近藤政司・白石吉信 (1976): 地すべりの運動特性に関する実験, 土木技術資料, 17-8, pp. 21-26.
- 31) 奥園誠之・緒方春樹 (1985): 地すべり地における地下水排除工の効果とその調査法, 基礎工, Vol. 13, No. 2, pp. 33-39.
- 32) 林野庁森林総合研究所 (1991): 平成 2 年度地すべり対策調査報告書 (埼玉県児玉郡児玉町平沢地区).
- 33) 砂防・地すべり技術センタ (1996): 土砂災害の実態, pp. 4-5.
- 34) 埼玉県農林部林務課 (1981): 平沢地区地すべり調査 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 35) 埼玉県農林部林務課 (1982): 平沢地すべり調査 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 報告書.
- 36) 埼玉県農林部林務課 (1982): 平沢地区地すべり調査 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 37) 埼玉県農林部林務課 (1983): 平沢地すべり調査 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 報告書.
- 38) 埼玉県農林部林務課 (1983): 平沢地すべり調査業務 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 報告書.
- 39) 埼玉県農林部林務課 (1983): 平沢地区地すべり調査 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 40) 埼玉県農林部林務課 (1984): 平沢地区地すべり調査 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 41) 埼玉県農林部林務課 (1984): 平沢地すべり対策調査業務 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 資料集.
- 42) 埼玉県農林部林務課 (1985): 平沢地すべり調査 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 報告書.
- 43) 埼玉県農林部林務課 (1985): 平沢地すべり調査 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 資料集.
- 44) 埼玉県農林部林務課 (1985): 平沢地すべり対策調査業務 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 45) 埼玉県農林部林務課 (1985): 平沢地すべり地流出量データ.
- 46) 埼玉県農林部林務課 (1986): 昭和 60 年度平沢地すべり調査業務 (観測) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 資料集.
- 47) 埼玉県農林部林務課 (1986): 平沢地すべり地流出量データ.
- 48) 埼玉県農林部林務課 (1986): 平沢地すべり地集水量・排水量データ.
- 49) 埼玉県農林部林務課 (1987): 昭和 61 年度平沢地すべり調査業務 (その 1) <埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内> 報告書.
- 50) 埼玉県農林部林務課 (1987): 平沢地すべり地流出量データ.
- 51) 埼玉県農林部林務課 (1987): 平沢地すべり地集水量・排水量データ.
- 52) 埼玉県農林部林務課 (1988): 昭和 62 年度平沢地すべり調査業務 (埼玉県児玉郡児玉町大字太駄地内) 報告書.
- 53) 埼玉県農林部林務課 (1988): 平沢地すべり地集水量・排水量データ.
- 54) 埼玉県農林部林務課 (1985~1990): 平沢地すべり地バルブ開閉操作のルール.
- 55) SASSA, K., FUKUOKA, H., SCARASCIA, M. G., IRIKURA, K., OKIMIRA, T. (1995): Landslide Triggered by the Hyogoken-nanbu Earthquake, Landslide News, No. 9, pp. 1-3.
- 56) SASSA, K., TAKEI, A. (1979): Landslips on the ground surface and its Mechanism-I, Landslide, 16-2, pp. 1-8.
- 57) SASSA, K., TAKEI, A. (1979): Landslips on the ground surface and its Mechanism-II, Landslide, 16-2, pp. 9-15.
- 58) SASSA, K., TAKEI, A. (1980): Landslips on the ground surface and its Mechanism-III, Landslide, 16-3, pp. 9-20.
- 59) SCHUSTER R. L. (1988): The International Decade for Natural Disaster Reduction, Landslide News,

- No. 2, pp. 1-3.
- 60) 宜保清一・陳 信雄・江頭和彦・林 義隆・周 亜明(1997): 台湾, 中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性, 地すべり, Vol. 34, No. 2, pp. 50-56.
 - 61) 玉田文吾・福田順二(1989): 降雨浸透による地すべり面の間隙水圧変化, 地すべり, Vol. 26, No. 3, pp. 19-27.
 - 62) 栃木省二, 中村三郎・中村二郎・山口伸一(1974): 地すべり, 山崩れ大明堂, 120 pp.
 - 63) 栃木省二(1982): 自然放射能探査・電気探査と排水対策, 地すべり・急傾斜地の調査と対策協議会, 60 pp.
 - 64) VOZNESENSKY, E. A., KUMACHYOVA, N. V., SAMARIN, E. N., NIKITIN, M. Yu. (1997): Active Landslides on Slopes of Selbukhra Mountain, Southwestern Crimea, Ukraine, *Landslide News*, No. 10, pp. 29-31.
 - 65) 渡 正亮・山田 二・小橋澄治(1971): 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 580 pp.
 - 66) 渡 正亮・小橋澄治(1987): 地すべり斜面崩壊の予知と対策, 山海堂, pp. 89-90.
 - 67) 吉松弘行・中村浩之・久保田哲也・中島 茂(1985): 既往地すべり災害実態調査, 土木研究所資料, 102 pp.
 - 68) 八木則男・矢田部龍一・榎 明潔(1985): 降雨時の斜面崩壊予知に関する室内及び現地実験, 地すべり, Vol. 22, No. 2, pp. 1-7.
 - 69) 梁瀬秀雄・落合博貴・松浦純生・紀平潔秀(1986): 地すべり地における地下水の排水量調査, 第38回日林関東支論, pp. 209-210.
 - 70) 吉田昭治・稲葉一成・中野俊郎・竹内伸一・佐藤 修(1991): 地すべり斜面の自由地下水, 地下水圧の観測と解析について, 土と基礎, 第39巻12号, pp. 29-34.

(1999年10月27日受付)

(2000年3月21日受理)

Summary

Pore water pressure fluctuation has been proved to be an important cause of landslide movement in landslide areas, but it is difficult to observe the mechanism of pore water pressure fluctuation at the various depths of the slip surface. The first purpose of this paper is to examine the pore water pressure fluctuation in shallow and deep stratum at the slip surface. The data used in this study was collected at the Tairasawa landslide area during 1983-1985. Two observational methods are considered. (1) The pressure heads were measured in the vertical observation borehole with a screened section at the designated depth of slip surface. (2) The horizontal borehole of drainage wells were drilled for confined groundwater in a screened section at the same depth of the slip surface. The rainfall, pressure head and drainage discharge were observed before and after the drainage well works.

The results indicated that after drilling a horizontal borehole, the pore water pressure was low in shallow and deep strata at the slip surface. It is possible to judge the effects of drainage well works by comparing the drop in pore water pressure before and after the works. Furthermore, the drop in pore water pressure at the slip surface has two significant characteristics. First, the drop of pore water pressure corresponds to the drilling depth and seepage water in a horizontal borehole. Secondly, the drop in water pressure can be clearly seen when the drilling direction of a horizontal borehole nears the vertical observation borehole.

The second purpose of this paper is to examine the mechanism of pore water pressure fluctuation and to grasp the environment of underground hydrology in the landslide by a controlled drainage experiment. First, the results of experiments on the pore water pressure fluctuation at the slip surface are explained. Second, the drainage effects of the horizontal borehole are confirmed quantitatively. Finally, the environment of underground hydrology in the Tairasawa landslide area is clarified. The data was collected at the

Tairasawa landslide area during 1986–1987. The results are as follows:

1) In this natural slope, the geological structure of hydrology around the No. 1 drainage well has three confined groundwater strata with a three-stratum (upper, middle and lower) underground structure. It is proved that the confined groundwater flows between the upper and middle strata, but this is not so in the lower stratum. Furthermore, the dropping velocity of pore water pressure in the lower stratum is slower than the other strata, and the pore water pressure fluctuation in the upper and middle strata responds to rainfall.

2) Compared with the upper stratum, the dropping volume of pore water pressure in the middle stratum (strong weathering rock stratum) at the No. 1 drainage well is larger, but the drainage volume is smaller. It is also found out that the increase of drainage volume and pore water pressure fluctuation due to rainfall differ with the degree of weathering of the rock stratum and depth of the observation borehole.

3) The No. 1 drainage well is a three-stage structure design. Each stage drains groundwater away from horizontal boreholes. The distribution of the drainage volume has a tendency to be concentrated at the lower stage. The drainage effect of the No. 2 drainage well is partial at some horizontal boreholes of the lower stage, and the drainage volume of each horizontal borehole is clearly different.

The third purpose of this paper is to examine the characteristics of land deformation around the drainage wells and to estimate the effects of drainage well works at the Tairasawa landslide area by a controlled drainage experiment. The data was collected during 1986–1990. On the whole, it is proved that the rise of pore water pressure caused by rainfall at the slip surface influences land deformation around the drainage wells. The detailed results on this paper are as follows:

1) The rise of pore water pressure caused by rainfall at the slip surface has a direct influence on the cumulative variation of measurements made by land inclinometers and pipe strain gauges during 1981–1987. The strain variation at borehole BV58-5 and BV57-1, around No. 2 drainage well in particular, is more marked than that which had been observed in the past, and is consistent with the increase of drainage volume.

2) The drainage volume of No. 1 and No. 2 drainage wells at the lower stage horizontal borehole were measured during 1988–1989. The drainage volume increased overall but each horizontal borehole was clearly different. The increase of drainage volume due to rainfall was also confirmed at borehole No. 12 of the No. 1 drainage well and borehole No. 4 of No. 2 drainage well.

3) The effects of work at the No. 2 drainage well were estimated by comparing the pore water pressure fluctuation and cumulative deformation before and after the controlled drainage experiment.

In conclusion, the study of landslide phenomenon currently has two methodologies. One is theoretical analysis using seepage theory. The other is by case study. The results show that the detailed case study analysis plays an important role in groundwater research in landslide area. Characteristics of pore water pressure fluctuation were obtained from detailed observation of pore water pressure and drainage volume at the slip surface. It is thought that this research will aid drainage well works in the future.

Key words: Landslide, Pore water pressure, Horizontal borehole, Slip surface, Drainage well

Abstract

Experimental Study on Groundwater Fluctuation in Landslide Area —the Relation between Groundwater Drainage Works and Landslide Movement—

Tsungming TSAO

Pore water pressure fluctuation has been proved to be an important cause of landslide movement in landslide areas, but it is difficult to observe the mechanism of pore water pressure fluctuation at the various depths of the slip surface. The purposes of this study are as follows: 1) to examine the pore water pressure fluctuation in shallow and deep strata at the slip surface. 2) to examine the mechanism of pore water pressure fluctuation and to grasp the environment of underground hydrology in the landslide by controlled drainage experiment. 3) to examine the characteristics of land deformation around drainage wells and to estimate the effects of drainage well works. The data used in this study was collected at the Tairasawa landslide area of Saitama prefecture during 1981~1990.

The results show that the detailed case study analysis plays an important role in groundwater research in landslide area. Characteristics of pore water pressure fluctuation were obtained from detailed observation of pore water pressure and drainage volume at the slip surface. It is thought that this research will aid drainage well works in the future.

Study on the Morphological and Ecological Characteristics of the Genus *Larix* with Special Reference to Its Molecular Phylogeny

Hiromitsu KISANUKI

The interspecific relationships in the genus *Larix* were clarified using phenological observation, cpDNA RFLP, *rbcl*, and RAPDs. Significant differences in the time of needle coloring, defoliation, and seed fall were revealed between *Larix* species. In the DNA results, the North Eurasian species formed a clade, while the South Eurasian species was the most isolated taxa in *Larix*. The North American species were distinct from the Eurasian species. These results were somewhat different from the morphological classification and phenological results, although they correspond to chromosome characters reasonably well. *Larix* is postulated to consist of three clades, which match the geographic distribution.