地すべり地における地下水・地表水（第三報）

———深さ別の地下水位・水圧変動現象の研究———

岸 本 良 次 郎*

A Study of Fluctuation Phenomena of Ground Water Level and Ground Water Pressure observed at Various Depth in Ground at a Landslide Area

by Ryojiro Kishimoto

Abstract

The fluctuation phenomena of ground water level and pressure were observed with two types of piezometer (quasi-Cassagrande type and electrical diaphragm type) installed at various depths (1~15m) at Naguki landslide area, Nagano Prefecture.

The fluctuations recorded by each piezometer can be divided into two elements——trends and short periodic fluctuations discussed in this report——by the arithmetic moving average method. All periodic fluctuations are classified into the fluctuation caused by precipitation and the fluctuation caused by atmospheric changes. It is assumed that the former is a property of ground water flow through large pores and cracks of the landslide soils and that the latter is a property of soil water in the aquiclude consisting of elastic landslide soil.

The ratio of pore pressure caused by atmospheric changes in the elastic aquiclude to atmospheric changes, elastic moduli of the soils, effective stresses and volume changes forced in the soils by atmospheric changes are discussed referring to those values obtained by other writers.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

The effect of fluctuation phenomena on landslide movements, the setup of piezometric installations and other problems are discussed in this paper.

I 緒 言

地すべり地における従来の地下水位の測定施設はボーリング孔内に単に有孔塩ビ管を挿入するだけに近い状態のものが多く、しかし、地すべり地の土の性質は地点、深さによる差異が多いので、測定された地下水位が何を意味するか疑問が多い。もし、深度別に地下水位を測定すれば降雨が地下深部に圧力的に影響する機構などが明らかになり、地すべりとの関係もわかるであろう。

上の考えに基づいて昭和40年度に二、三の地区において深度別の地下水位調査を行なった。長野県東筑摩郡明科町名九鬼地区における調査結果によると、地下水位の変動が降雨に左右されるものの他に、大気圧に左右されるものがあることがわかった。

この大気圧による水位変動量は小で直接地すべり運動に影響を与えるか否かについては疑問があるが、地すべり地の地下水（むしろ地下水分）の存在と運動状態、地すべり土の力学性の一面などを示すものとして興味あるものである。この報告は名九鬼地区における調査例につ

いて、この点を中心にして論ずる。

調査には長野県松筑地方事務所清水・松井両技師の直接の御援助を得た。また、長期観測には地元の降幡さだみ氏夫妻の労をわずらわした。短期観測には茨城大学学生功力啓治・庄司昭也両君の援助を得た。その他松筑地方事務所、長野県耕地二課、農林省災害復旧課、関東農政局災害復旧課から陰陽に御援助を得た。上記担当者の諸氏に感謝する。

II 地区概要（図-1）

当指定地区は北界の犀川支流潮沢川に面する北向き斜面で、標高690~910m、東西1200m、南北700m、面積27.8haである。

地質は第三紀層（中新世青木累層）の泥岩を主とする地質である。

指定地区全域が一体となってすべっているのではなく、南界の稜線から潮沢川に至る斜面が各所で崩壊性ないしクリープ性の地すべりを起している（たとえば、桑ノ木付近、名九鬼部落付近、大くずれ付近など）。

調査の重点は名九鬼部落付近におかれた。名九鬼部落付近の地すべりは明治30年に発生した。そのときに生じ

* 農林省農業土木試験場

図-1 地区概況

た上部と側方の崖は現在でも認めることができる。現在、地すべり運動は顕著ではないが、家屋・田畑などがいつの間にか傾動するという。この緩慢な運動は地すべり発生以来断続して来たようで、部落下方は崩土の末端隆起地形となっている。

調査事項は地質・地形踏査、縦ボーリング (BV₁ 地点)、10m の試掘坑 (P₁)、地表移動調査、水質調査、湧水量調査などの他に、この報告の主題である深度別の地下水位・水圧調査などである。以下、深度別の地下水位・水圧調査について述べる。

III 調査方法

1. 概要

名九鬼部落下部の畑地内に1直線 (II' 測線) を設け、この直線上に種々の深さに9孔を掘り、この孔に2. 以下に述べる方法で地下水位測管5本、間隙水圧計4台を設置した (図-1, 2, 表-1)。この9孔における地下水位・水圧の変動の性格がこの論文の主題である。

2. 水位測管の構造、間隙水圧計の構造 (図-3)

9孔の作成方法は表-1のごとくである。ボーリング (孔の内径115mm) の場合は、掘削後に孔内を洗浄した。

水位測管は内径28mmの硬質塩ビ管を用いた。管の一端、水位の測定端には径2~3mmの孔を5~6mm間隔に全面的にせん孔した (せん孔部の長さ20cm)。せん孔部の上からビニール製汙濁布を巻き、さらにその上からビニール網を巻いてフィルタとした。せん孔部のある管端には径9cmの塩ビ板を接着して底ぶたとした。

図-2 II' 測線の観測施設と地質

表-1 観測施設の概要

観測位置	観測点 No.	観測孔作法	観測施設		測定感度の推定			備考
			観測孔の深さ(m)	種類	長期観測	短期観測	精度	
名九奥部落下部畑地 (II' 測線)	BV ₄	ボーリング	9.5	水位測管	1cm	0.1cm	短期観測は精度はより良いと推定される。	短期観測は精度はより良いと推定される。
	A ₁	オーガー	0.5	水位測管	フルスケール1.0kg/cm ²	0.1cm		
	A ₂	オーガー	1.5	間隙水圧計	フルスケール2.0kg/cm ²	精度 1/100 (公称)		
	A ₃	オーガー	1.5	水位測管	1cm	0.1cm	短期観測は精度はより良いと推定される。	短期観測は精度はより良いと推定される。
	BV ₃	ボーリング	14.5	間隙水圧計	フルスケール1.0kg/cm ²	精度 1/100 (公称)		
	A ₄	オーガー	3.5	水位測管	1cm	0.1cm		
	A ₅	オーガー	3.5	水位測管	フルスケール1.0kg/cm ²	精度 1/100 (公称)	短期観測における精度はより良いと推定される。	短期観測における精度はより良いと推定される。
	BV ₂	ボーリング	5.5	間隙水圧計	1cm	0.1cm		
	A ₆	オーガー	0.5	水位測管	1cm	0.1cm		
名九奥部落下部畑地 (II' 測線)	BV ₁	ボーリング	0	(有孔塩ビ管をボーリング孔にさし入れ、ライナープレートをわく)	1cm	—	—	—
	P ₁	試験坑	0	井戸枠	—	0.1cm		
名九奥部落下部畑地 (II' 測線)	—	試験坑	10	井戸枠	—	0.1cm	—	—
	—	既設井戸	8.5	井戸枠	—	0.1cm		

【表注】 一印は観測していないもの

図-3 地下水位測管の構造

設置深さが4cm以上の場合にはソケットを用いて塩ビ管を継いだ。この際接着剤を塗って水密を期した。

間隙水圧計はダイヤフラム型しゅう動抵抗式のものをを用いた。

3. 水位測管、間隙水圧計の埋設法（図-3）

孔底に砂を5～10cm厚に突固め、その上に水位測管（せん孔部を下に）または間隙水圧計を置く。さらに砂を周辺と上部に突固め、けっきょく砂層の厚さが約50cmになるようにした。この部分が測定部である。砂層より上はベントナイトまたはベントナイトと掘削粘土との混合土を何層にも突固めて水密を期した*。

孔内水は作業の邪魔になるので（砂層部分以外は）できる限り排除しながら突固め作業をした。

4. 試験方法、測定方法

測管内の水位は電気水位計を用いて測定した。間隙水圧は直視法、ゼロ法により指示器を用いて測定した。各測定の感度などは表-1のごとくである。

試験は長期観測（40年10月16日以来現在も継続中、1回/日観測）、短期観測（41年7月13～19日、数回/日観測）の二種を行なった。

IV 観測結果

1. 長期観測結果の解析法

結果を次の3種のグラフに示す。

① 測管内水位、間隙水圧計水圧の変動グラフ（図-4, 5）

このグラフには下の事項を併記する。

大気圧……4回/日観測の平均値を毎日の大気圧とし

* 水位測管の場合は、要するにキャサグランデ型ピエゾメータ類似のものになる。——文献 1)

図-6 測管内水位の周期的変動 $g_i(t)$ (cm)

図-7 間隙水圧計水圧の周期的変動 $g_i(t)$ (g/cm^2)

図-9 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ — A_1 測点

図-8 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ — BV_4 測点

全期間を通じ周期変動は気圧型の変動であり、大気圧が増加すると水圧は減少し、大気圧が減少すると水圧は上昇する（図-7, 10）。

降雨との関係……BV₄と同様の解析によっても降雨の影響はほとんどない（図-10）。

その他……上記の解析のためには測定精度がやや不良

である（表-1）。

④ A₃（地下水位測管、深さ2m）

大気圧との関係……観測開始～11月下旬のタイムラグ期間（図-4）を含む全期間を通じて気圧型変動を示す（図-7, 11）。

降雨との関係……BV₄と同様の解析を行なっても降雨

図-10 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——A₂ 測点

図-11 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——A₃ 測点

の影響はあまり認められない(図-11)。

その他の変動……11月14日頃、12月24日頃に原因不明の異常な変動がある。

⑥ BV₃(間隙水圧計、深さ15m)

水圧変動と降水、大気圧変動との関係は、観測精度が低いこと(表-1)、晴雨と大気圧の変化が伴ないがなどのゆえに、あまり明瞭ではないが、大要次のことがいえる。

周期的変動は、降水の影響を受けて降水後に水圧は上昇する(図-7, 12)。周期的変動と大気圧との関係の有無は明確ではないが、1月下旬～3月中旬の期間は図-12の各期間中もっとも関係のありそうな期間である。

この測点は、BV₂、BV₄などとともに全測定期間を通じ水位・水圧が減少傾向を示すことが特色で(図-5)、これらはいずれも6mより深部の測点であることとともに興味深いことであるが、傾向変動の解析はより長期の観測結果をまわって論ずることとして、本論文では図-12を併記した期間区分ができるという事実を示すにとどめる。

⑥ A₄(間隙水圧計、深さ4m)

水圧の変動の傾向と周期的変動は表-2のようである。

表-2 A₄測点の水圧の変動状況

	変動の傾向	周 期 的 変 動
観測開始～2日目	急上昇	ある ある ある ある ある
10月中旬～11月下旬	ほぼ一定	
11月下旬	降下	
11月下旬～3月上旬	ほぼ一定	
3月中旬以後	上昇	

周期変動のない時期は大気圧、降水に関係なく常にほぼ一定である。周期的変動のある時期は水圧と降水との関係が大で、降水後に水圧が上昇する(図-5, 7, 13)。

⑦ A₅(地下水位測管、深さ4m)

諸測点中、水位変動に対する降雨の影響がもっとも鋭く表われるものの一つである。すなわち、乾燥期における10mm以上の降雨は約10cm以上の水位上昇となって表われ、降雨後2～3日中にはほとんど元に復する。40年12月以降の断続する降水、融雪などの期間は個々の降水の影響はあまり顕著でないが、全般的な水位の5～10cm程度の上昇をもたらす。大気圧の影響は認められ

図-12 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——BV₃ 測点

図-13 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——A₄ 測点

図-14 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——A₆ 測点

図-15 $\Delta g_i(t)$ と $\Delta p_i(t)$ ——BV₁ 測点

ない。

⑧ BV₂ (間隙水圧計, 深さ 6 m)

水圧変動の特色は図-5 のように一方的な下降傾向および 2 月 26 日～28 日の水柱高約 50 cm の異常な水圧上昇があることである (これは, この論文では論じない)。

周期的変動には降水の影響は認められず, 大気圧の影響も明確でない (図-7)。大気圧の影響を詳細にみると, 大気圧増減と水圧増減が比例する場合と, 逆の場合とがあるごとくであるが (図-7), 精度的にやや疑問がある (表-1)。なお, 2 月 22 日～23, 24 日の周期的変動の異常は先述の異常な水圧上昇が計算上表われたものである (1) 式)。

⑨ A₃ (地下水位測管, 深さ 1 m)

水位は全期間にわたり上昇傾向があり, その間に 12 月 25 日～26 日, 1 月 23 日～26 日の 2 期間においてとくに上昇する (図-4)。周期的変動には降雨, 大気圧両者の影響が混在する。

降雨の影響……降雨による水位上昇は, A₁, A₃ ほど顕著でなく, また月日の経過とともに降雨の影響が減少する (図-6)。

大気圧の影響……図-14 において観測期間内の 5 mm/日以上の降雨当日～翌々日を別記号で表わせば降雨の影響は明らかである。これらの日と上述の水位上昇 2 期間を除いた諸点は気圧型分布を示す。

⑩ BV₁ (地下水位測管は単に有孔塩ビ管を挿入したもの)

水位は観測開始～2 月はほぼ上昇傾向を示し, 3 月は下降する。観測初期の急上昇は先述のタイムラグであろう (図-4)。周期的変動の主因は下のように最初は降雨, 後には気圧と考えられる。

観測開始～11 月上旬は降雨の影響は明白である。11 月

中旬～12 月中旬は変動少なく, ことに 11 月 25 日の 30 mm 以上の降雨の影響もない。12 月中旬以後再び変動が大きくなる (図-4, 6)。図-15 にて第三の期間を第一・二期間と別記号で示すと, 第三期間では降雨の影響は認められず, 気圧型の点の分布が認められる。

3. 短期観測の解析と結果

観測はⅡ' 測線 (A₂, A₄, BV₃ の間隙水圧計は故障のため非観測) と P₁, #₁ (図-1) について行なった。他に大気圧 (現場から西南方 5.5 km の明科町にて自記記録), 降雨 (現場から西北方 0.5 km にて 2 回/日観測～国鉄による。その他現場にて降雨状況観察記録) を記録した。

観測記録は水位・水圧の変動グラフとして整理し, 降雨と大気圧の変動を併記した (図-16)。また短期観測なので傾向変動は無視し単に周期的変動のみであるとして, 水位・水圧と大気圧との関係グラフを作った (図-17)。図-17 においては観測日ごとに記号を変えてプロットし, 降雨の影響を明らかにするようにした。

① BV₄

地下水位変動は気圧型で, 気圧変動による水位変動量は諸測点中最大である (図-16, 17)。降雨による水位変動は微小であると推定される。すなわち, 15, 18, 19 日の諸点は気圧水位関係カーブ (図-17) の上側に分布し, 14 日夜, 17～18 日午前の降雨により微小な水位上昇があったことを示している。

② A₁

降雨型。降雨の水位変化への影響は緩慢であるが小雨も影響する。すなわち, 14 日, 17～18 日の翌日である 15 日と 18 日にゆるやかな水位上昇があり, ゆるやかに降下する。また, 15, 16 日の小雨によってもやや水位上昇または非降下が認められる (図-16)。

図-16 水位・水圧の変動（短期観測）

図-17 水位・水圧の変動と大気圧の変動との関係（短期観測）

図-19 III' 測線における等水圧線と周期的変動の性格 (2月23日)

で流線網をえがき得なかった。この図には周期的変動を併記した。

III' における地下水流動状況の概況……斜面上方から下方へ向かって地表面にはほぼ平行して流下する浸透流は認められず、局部差がいちじるしい。A₄、A₅ 付近に流入点があり、地下水はここから放射状に地下深部に浸透している。浸透途中における水圧降下の割合はBV₃ 付近の垂直断面を境にして異なり、この断面より斜面上方では水圧降下が大で、斜面下方では小である。上方の水圧降下はことにBV₂ 付近でいちじるしい。

流動概況と周期的変動の性格との関係……BV₃ 付近を境とする水圧降下の大部分は概して降雨型の周期的変動の性格が強く、ことに流入点付近でこの傾向がいちじるしい。また、BV₃ より下方の水圧降下の小の付近は概して気圧型の周期的変動の性格が強い。BV₂ 付近は顕著な低水圧、周期的変動の性格が明確でないなどから、やや特殊な地点なのであろう。また、地下6m以深には完全な降雨型がないことは注目に値する。

5. 結果のまとめ

深度別の地下水位・水圧の長期観測結果、短期観測結果を分析して次の諸項を明らかにした。

- ① 変動を傾向変動と周期的変動とに分離し得る。
- ② 周期的変動には典型的な気圧による変動と降雨による変動がある。
- ③ 周期的変動には上の二型の種類の混合型がある。
- ④ #₁、P₁、PV₁ などの水密に留意しない施設には典型的な気圧型変動は認められていない。

⑤ III' 測線の水圧分布の概況を分析して、地下水流入点、水圧降下の局部差などがわかった。

⑥ III' 測線の水圧分布と周期的変動のタイプとの間には関係がある。

V. 気圧型変動に関する考察

1. 土層と地下水流動状況

基盤は風化泥岩を主とする堆積岩で、地点E (図-1) に成層した堆積岩の露頭がある。試掘坑P₁底部10~9mにおいてはこの層内に大きいキレツが何本もあり、水みちとなっている。他の部分の含水は少ない。

この上位の層9~1.5mでは土層は縦断的に異なる層が分布している。その一つは上記風化岩がさらに粘土化し緻密になったものである。下部は微細キレツの複雑に発達した硬質ひびわれ粘土であり、これは上部のさらに緻密な粘土に漸移する。これらの層には地下水の流動は認められず含水は少ない。一部ガスが噴出した。

他の一つは、上記の粘土と破碎した岩塊・岩片・砂質土の複雑な混合土であり、地下水の水みちは岩塊部と砂質部のみにあり、他の部分は含水が少ない。

1.5m以浅は表層土であり、水は少ない。

室内実験*によると岩塊・岩片・砂質部以外の諸層では、pF 2.0以下の張力で土粒子に結合している水分は極微量であり、また浸透係数は10⁻⁷cm/sec以下のオーダーが大部分であった。各層は不完全飽和で微量の空気を含む。

* 室内実験の結果は別の機会に発表の予定

以上要するに

- ① 剛性が大と推定される層はない
- ② 少量の気体を含む（ときには塊状の気体を含む）
- ③ 水みち部以外の各層は極めて透水性が低い
- ④ 水みち部が唯一の地下水流動部である

以上、主に P_1 に基づいての考察である。 II' 測線の状態（図-2）はボーリング柱状図によったものであり、実際は P_1 と同様に複雑なものであろう。

2. 水みち部地下水の気圧型変動の可能性の考察

気圧型変動の説明として、被圧地下水層の体積弾性^{(4)はか}、通気帯表層部が湿潤・凍結などにより外気と遮断された自由面地下水⁽⁵⁾などが提案されている。この地区の水みち部の地下水に対してこれらの説明の適否を検討する。

被圧地下水層の体積弾性による説明の適否の検討、

- ① 水みち部以外は不透水性だから、水みち内の地下水流動を説明するためには水みちが発達、連絡していると考えられ
- ② 多数の湧水点があるから水みちは外気と連絡していると推定される。（図-1）
- ③ したがって、大気圧は水みちを通じて周辺の土層に作用するから、大気圧は水みちを構成する土層の圧縮・膨張には関係しない。すなわち、この説は適用できない
- ④ P_1 の地下水は降雨型の変動をしており（IV 3 参照）、 P_1 の支配的な地下水は水みちの地下水である。したがって③の結果は合理的である
- ⑤ P_1 に認められた水みち部の土層は過去の地すべり（II 参照）により作られたものと推定されるから、 P_1 が特殊な地点であるとは思えない

特殊条件下の自由面地下水とする説の適否の検討

- ① この地区の典型的な気圧変動 BV_4 、 A_2 、 A_3 は乾燥期を含む全期間を通じて気圧型変動であり
- ② 特殊条件下での気圧型変動を適用しては不完全である
- ③ III' 測線の付近に小土水路と沢があり常に湿潤になり得るところであるが（図-1、VI. 2）、水位は浅い（図-4、5）。このことは一時的に大気と水みちが遮断されることがあったにしても、平常状態では地下水面と大気は接しやすいたことを示している
- ④ したがって、特殊条件による水みちの気圧型変動の説明は困難である

3. 不透水性土層の気圧型変動に関する仮定

水みち部が気圧型変動を常に起しているとする考えはこの地区では無理であるとすれば、常に気圧型変動をする土は難透水性の諸土層とする以外にない。1 に従って難透水性の諸土層の物理的・力学的性質と測定条件を次のように仮定する。

① 土の構成

体積 v の土塊は、それぞれ体積 v_s 、 v_w 、 v_a を有する土粒子、間隙水、間隙気体より成る。

$$\left. \begin{aligned} v &= v_s + v_w + v_a, \\ e &= \frac{v - v_s}{v}, \\ \omega &= \frac{v_w}{v_w + v_a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

e : 間隙比
 ω : 飽和度

② 各相の力学的性質

微小な圧力変化に対しては土粒子と水は非圧縮性とする。 p_a の圧力で体積 v_a の気体が、圧力増加 Δp_a に対して体積が Δv_a 減少したとするボイルの法則から

$$\Delta p_a = - p_a \frac{\Delta v_a}{v_a} \dots\dots\dots (4)$$

見掛けの体積 v の土の骨格構造に作用する有効圧力の増加 Δp_s に対して、見掛けの体積が Δv だけ減少したとすると、フックの法則が成立つとすれば

$$\Delta p_s = - \kappa \frac{\Delta v}{v} \dots\dots\dots (5)$$

κ : 骨格構造の体積弾性率

各相相互の関係として、間隙空気は圧力変化は周辺の間隙水に伝達されること、見掛けの体積変化は間隙空気の体積変化に等しいことを仮定する。

$$\Delta p_a = \Delta p_w \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta v = \Delta v_a \dots\dots\dots (7)$$

③ 大気圧の変化に対する挙動

間隙水は間隙圧力を容易に伝達しないとする。すなわち、大気圧のある平衡圧力からの増加 Δp は大気に接する間隙から、間隙水・間隙空気を通じて下層に伝達するにはきわめて長時間かかり、気圧型変動の原因にはならない。 Δp はあたかも土層全体にかかる荷重増加として作用し、 Δp に平衡するために有効圧力・間隙水圧・間隙空気圧それぞれの増加 Δp_s 、 Δp_w 、 Δp_a を要するとすると近似的に

$$v \cdot \Delta p = v_s \cdot \Delta p_s + v_w \cdot \Delta p_w + v_a \cdot \Delta p_a \dots\dots (8)$$

なお、長期的には大気圧は間隙を通じて下層に伝達されていて、間隙水圧の長期的な平衡位置には影響を与えないものとする。

④ 測定条件

水位測管の測定端の周辺土層内には Δp にともなって Δp_a が発生し、測管水位が Δh 減少したとすると水面には Δp が作用しているから平衡条件は

$$\Delta p - \rho g \Delta h = \Delta p_a \dots\dots\dots (9)$$

ρ : 測管内水柱の密度

g : 重力の加速度

間隙水圧計のダイヤフラムの内側にはキャップタイヤ

コードを通じて Δp が作用している。ダイヤフラムの外側には Δp_a が作用する。このときの見掛けの間隙水圧 (測定された間隙水圧) の減少 $\Delta p'$ は

$$-\Delta p' = \Delta p_a - \Delta p \quad \dots\dots\dots(10)$$

4. 不透水性土層の気圧型変動に関する諸問題

① 間隙圧

(3), (4), (5), (6), (7), (8)式より

$$\Delta p = \left\{ (1-e)e(1-\omega) \frac{\kappa}{p_a} + e \right\} \Delta p_a \quad \dots\dots\dots(11)$$

すなわち、 Δp と Δp_a は近似的に比例する。一方、気圧型変動する測管水位に関して、被圧地下水における気圧係数⁽⁴⁾と類似の係数を B とすると(9)式より、

$$\Delta p (1-B) = \Delta p_a, \quad \rho g \frac{\Delta h}{\Delta p} = B \quad \dots\dots\dots(12)$$

間隙水圧についても(10)式より同様に、

$$\Delta p (1-B') = \Delta p_a, \quad \frac{\Delta p'}{\Delta p} = B' \quad \dots\dots\dots(13)$$

(12), (13)式の Δh , $\Delta p'$ はIVにおいて $\Delta g_i(t)$ としたものであり、 Δp はIVにおいて $\Delta p_i(t)$ としたものである。したがって、気圧型変動に関しては(12), (13)式が成り立ち、理論式(11)と一致する。

$1-B$, $1-B'$ は大気圧変化により発生する間隙圧変化の割合を示す係数で、(11)式からわかるように、各測点ごとにほぼ一定である。図-8~17に基づいて計算した値を表-3に示す。ただし、 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $g = 980 \text{ cm/sec}^2$, $[\Delta h] = \text{cm}$, $[\Delta p] = \text{g/cm} \cdot \text{sec}$, $[\Delta p'] = \text{g/cm} \cdot \text{sec}$ とした。

② 土粒子の骨格構造の性質

(11), (12)式より

$$\kappa = \left(\frac{1}{1-B} - e \right) \frac{p_a}{(1-e)e(1-\omega)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

B' も同様である。 Δp に対して右辺各項はほぼ一定だから、 κ は各測点ごとに一定である。P₁ 坑より採土した乱さない試料についての計算例を表-4に示す。

(3), (8), (12)式より

$$\Delta p_s = \frac{1-e(1-B)}{1-e} \Delta p \quad \dots\dots\dots(15)$$

有効応力は大気圧に比例して変動し、比例定数は各測点ごとに一定である。観測期間中の大気圧の最大値 (松本における値) 957 mb と最小値 919 mb との差 $\Delta p_{\max} = 38 \text{ mb}$ に対する Δp_s を $\Delta p_{s\max}$ とし、これを通常条件下における有効応力変動の最大振幅とすれば(15)式より

$$\Delta p_{s\max} = \frac{1-e(1-B)}{1-e} \Delta p_{\max} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$\Delta p_{s\max}$ の計算値を表-4に示す。

$\Delta p_{s\max}$ に伴う Δv を $\Delta v_{\max}$ とすれば

$$\frac{\Delta v_{\max}}{v} = - \frac{\Delta p_{s\max}}{\kappa} \quad \dots\dots\dots(17)$$

計算値を表-4に示す。表-4には大気圧が 38 mb 増加した場合の土層厚 10 m あたりの圧縮量 $\Delta v_{\max}$ を併記する。

5. 考察

上の議論で得られた二、三の意義を考察する。

① 得られた弾性係数値 κ

さきの実験室的に得られた二、三の地すべり地の泥岩、粘土の静的弾性係数値⁽⁶⁾の範囲内にある。

② 得られた体積変化量 $\Delta v_{\max}$, Δv

Δv の少なくとも一部は地表の微小な隆起・沈下になるであろう。松之山地すべり地で観測された値⁽⁷⁾は表-4の値とほぼ等しいオーダーである。また、地すべり地では傾斜変動量が大きいといわれているが、実際の地すべり運動以外にも上述の日常の圧縮・膨張があるのではないか。

③ 気圧型変動をする土と地すべり

降雨が水圧的に直接作用しないこの土層が、主動的に地すべりを促進する場合としては、次のような可能性が考えられる。第一は降雨が長期的な傾向変動としては水圧に影響して力学的不平衡を起す場合；第二は大きい気圧変化による力学的不平衡が起る場合；第三は日常の気圧変化がクリープ性地すべりを力学的に促進する場合；

表-4 気圧型変動をする土の性質

測 点		試 料 の 性 質 (P ₁ 坑より採土)				土 の 骨 格 構 造 の 性 質				
No.	設置深 (m)	採取深 (m)	土 性	e	ω	κ (dyne/cm ²)	$\frac{1-e(1-B)}{1-e}$	$\Delta p_{s\max}$ (dyne/cm ²)	$\frac{\Delta v_{\max}}{v}$	土層 10m あたりの $\Delta v_{\max}$ (mm)
A ₂	1.5~2	2	青灰色粘土 青黒色粘土	0.45	0.96	3.5×10^8	1.62	6.2×10^4	1.8×10^{-4}	1.8
				0.48	0.96	3.4×10^8	1.70	6.5×10^4	1.9×10^{-4}	1.9
A ₃	1.5~2	2	青灰色粘土 青黒色粘土	0.45	0.96	7.8×10^7	1.18	4.4×10^4	5.6×10^{-4}	5.6
				0.48	0.96	7.5×10^7	1.21	4.6×10^4	6.1×10^{-4}	6.1
A ₆	0.5~1	2	青灰色粘土 青黒色粘土	0.45	0.96	7.5×10^7	1.16	4.4×10^4	5.9×10^{-4}	5.9
				0.48	0.96	7.1×10^7	1.19	4.5×10^4	6.3×10^{-4}	6.3
BV ₂	5.5~6	6	青黒色軟粘土 褐色粘土	0.37	0.93	2.6×10^7	1.11	4.2×10^4	1.62×10^{-3}	16.2
				0.35	0.94	6.1×10^7	1.11	4.2×10^4	6.8×10^{-4}	6.8
BV ₄	9.5~10	10	硬質ひびわれ粘土 硬質ひびわれ粘土	0.23	0.84	1.1×10^8	1.22	4.6×10^4	4.1×10^{-4}	4.1
				0.32	0.97	4.6×10^8	1.34	5.1×10^4	1.1×10^{-4}	1.1

第四は日常の圧縮・膨張のくり返しが物理化学的に土の性質自体を軟弱化する場合などである。

つぎに 3. で述べた諸仮定の意義に関して考察する。

① 土塊の構成、各相の力学性

常法にしたがい、土を三相に機械的に分けたが、地すべり土粒子は不安定⁽⁶⁾⁽¹⁵⁾で、膨潤性があることなどのゆえに、土塊の構成・力学性は、さきの仮定のように単純ではない。また、さまざまに発達していると推定される地すべり面⁽¹⁶⁾は力学性をさらに複雑にしていると考えられる。

② 圧力変化 $4p$ の伝達機構

仮定では、難透水性土塊の表層の間隙水に作用する $4p$ は（土粒子と強く結合した間隙水にさまたげられて）間隙を通じては内部に容易に伝達しないとした。また、（土塊が $4p$ と平衡するために） $4p$ は間隙を媒体とせず、間隙内に圧力を発生しようとした。

また、前者の機構は長期的・傾向的な間隙圧力変動に関係し、後者は周期的な間隙圧力変動に関係すると考えた。実際にこのようなことが起るであろうか。また、実際に起っているとしても $4p_w = 4p_a$ が成立するか疑問である。

③ 測定条件

$4p$ との平衡条件 Δh , $4p'$ が実現するためには、（ことに Δh の場合）測定端周辺土層内から測定施設内に水が移動しなくてはならない⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾。②の議論から、 $4p$ 変動に平衡しているとみなせるほど早く水が流入しうるか疑問がある（Ⅶ 3 参照）。

④ 被圧地下水層の気圧型変動に関する理論⁽⁴⁾との比較

この理論は表記理論に間隙空気の圧縮性を導入したものである。表記理論は透水性地層に対して適用し得るものであり、②、③の困難が生じなかったものと推定される。今後、難透水性・不平衡状態のより現実に近い理論の樹立が望まれるが、これには土壤物理学的・数学的な非常な困難が予想される。あるいは、もし水みち部に表記理論を適用し得ないとした議論（2）が正しくないとすれば、この理論は無意味であり、この論文の意義は地すべり地においても気圧型変動をする被圧地下水層があるという事実の報告にのみある。

Ⅶ 降雨型変動その他に関する考察

1. 各測点の変動現象の考察

この地区の地下水の存在状態は水みち内か難透水層内かのいずれかであった（Ⅴ. 1）。また、水位・水圧の変動現象としては下のいずれかである。

気圧型の変動 $\begin{cases} \text{① 常に気圧型} \\ \text{② 一時的な気圧型} \end{cases}$

降雨型の変動 $\begin{cases} \text{③ 一時的な異常上昇} \\ \text{④ 雨水の地下水面への流入} \end{cases}$

①、②はⅤ. 2 で述べたものであり、④は普通考えられているものである。③は大雨などの地表湿潤条件下で大気と地下水面が遮断され、浸透水により通気帯内空気が圧縮されて生ずる^{(13)(19)ほか}という。

さて、水みちは①ではない（Ⅴ. 2）から、②、③、④のいずれかであり、逆に難透水層は①である（Ⅴ. 3. 4）から、②、③、④は水みちの性質である。実際はこれらの混合型・移行型などがありうるし、②、③、④のそれぞれと各測点のある時期の現象を対応させて詳細に論ずることは困難だが、若干の考察を試みる（Ⅳ. 2, 3 参照）。

A₁ 測点——③または④

BV₃測点——③または④が主。1月下旬～3月中旬は②的である。

A₄ 測点——周期的変動期は③または④

A₅ 測点——降雨時の変動が大で③があるものと推定される。

BV₂測点——詳細は不明である。気圧型があるとしても①、②いずれか不明。Ⅴにおける計算は①とした場合の計算である。

A₆ 測点——②、③、④型が次第に①型に移行したのではないか。すなわち、測点製作時の水密性が不完全で本来①であるべきものが②、③、④を表わしており、月日の経過とともに、周辺の土層の押し出しにより、水密性になって①になったということがありうるのではないか。

BV₁測点——単に有孔塩ビ管を挿入した測点。A₆より一層水密性の変化が起りうる。第一の期間は漏水のある期間で上部の土層の水みちの影響に支配され、第三の期間は水密が完成して泥岩層の①の性質に支配され、第二の期間は過渡期と推定される。これが事実とすれば従来の水位測管は多少とも何を測定しているかという疑問が残る。

P₁ 測点、 $\#$ 測点——大口径で水密工事はしていないから支配的な性質は水みちである。③または④と推定される。

上の考察を表-3に併記する。表-3における①、②などは上の①、②などのことである。

2. II' 測線に関する考察（Ⅳ. 4、図-2、18、19）

1. に基づいて考察する。II' 測線に平行して東方数メートルに深さ1～2mの沢が、西方数メートルに深さ10～20cmの小土水路がある。測線付近には沢に向かう浸透流が考えられ、小土水路はこのことを促進すると思われる。測線付近の浸透性水みちの発達している層は深さ約1m～4.5mの層であり（図-2）、A₄・A₅付近の流入点とA₁付近にいちじるしいと推定される。A₂・A₃付近はレンズ状の難透水性挟み層であろう。

4.5m以深はE地点(図-1)に露出する成層した岩の風化土とP₁坑に見た硬質ひびわれ粘土であり、13m深度付近から風化泥岩に移行すると推定される。BV₂は成層した岩の風化土内、BV₄は硬質ひびわれ粘土内、BV₃は風化泥岩内にある。これらは本質的には難透水だがキレツ部分は水みちである。BV₂、BV₄は難透水部に、BV₃は水みち部にあると推定すれば、それぞれの周期的変動型を説明できる。また、3点の特殊な傾向変動(IV.2)は、この深さ付近に起因する微小な地すべりによる土層の圧縮・膨張・水みちの変化・降雨の影響の季節のおくれなどで説明できる。BV₂の2月27日前後の異常水圧(IV.2)も、このことまたは次のことにより説明できよう。

BV₂付近下方に好排水条件(発達した水みちが沢の下方に通じているなど)があるとすれば、BV₂が難透水性だとしても、BV₂付近は総体的に水位は低いはずであり、排水条件の小変化の影響も受けるであろう。

VII 測定施設・測定方法に関する考察

この種の調査には測定が正しいこと(任意の時刻・位置における測定値が、その周辺の土層内のその時刻における真の値と等しいこと)が必要である。測定施設・測定方法(Ⅲ)につき二、三の考察を行なう。

1. 施設の埋設うめもどし方法

うめもどし部は、上部からの漏水を防止し、地表の荷重の変化(たとえば気圧変動)がうめもどし部を通して測定端に伝達されないようになっている必要がある。また、多少の地すべり運動が起っても上の機能が破壊されてはならない。

既述のベントナイトを主とするうめもどし方法は、過去の類似施設の諸例⁽¹⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を参考にし、ベントナイトの膨潤性による補修機能に期待して決められた。今後、より適した埋めもどし材料、方法を研究して行きたい。

2. 測定端の砂層内に混入した気泡

気泡が混入していると周辺の土層が完全剛性、完全不透水性でも気圧型の水圧変動現象を起しうる。以下、混入気泡が水位変動に与える影響のオーダーを評価する。

大気圧 p 、水柱高 h の測管砂層内の気泡の圧力を p_a とすると

$$p_a = p + \rho gh$$

ρ : 水柱の密度,

g : 重力の加速度

大気圧減少 Δp による水柱高の上昇 Δh 、気泡圧力の減少 Δp_a が平衡するためには

$$-\Delta p_a = -\Delta p + \rho g \Delta h$$

p のときの気泡の全量を v_a 、 Δp による変化を Δv_a とすると

$$-\Delta p_a = \frac{\Delta v_a}{v_a} p_a$$

気泡の体積変化がすべて水位変化に表われるとすると

$$\Delta v_a = \pi r^2 \Delta h$$

また、気泡の体積は

$$v_a = \pi (D^2 - R^2) H \alpha$$

R, r : 塩ビ管の外半径と内半径

D, H : 砂層の半径と厚さ

α : 砂層の容気率

上の諸式から、

$$\Delta p = \left\{ \rho g - \frac{r^2 (p + \rho gh)}{(D^2 - R^2) H \alpha} \right\} \Delta h$$

右辺カッコ内の各項は近似的に一定だから Δp と Δh は比例する。すなわち、気泡により気圧型変動が起る。

上式にて、 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, $g = 980 \text{ cm/sec}^2$, $p = 925 \text{ mb} = 9.25 \times 10^5 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$, $r = 1.4 \text{ cm}$, $R = 1.7 \text{ cm}$, $D = 5.8 \text{ cm}$, $H = 50 \text{ cm}$ とする。気泡が多量に混入している($\alpha = 0.05$)とする。もっとも浅い測管($h = 50 \text{ cm}$)の場合とする。 $\Delta p = 1 \text{ mb} = 10^3 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$ に対する水位変動(Δh) $\Delta p = 1$ を計算すると

$$10^3 = \left\{ 1 \times 980 - \frac{1.4^2 (9.25 \times 10^5 + 1 \times 980 \times 50)}{(5.8^2 - 1.7^2) \times 50 \times 0.05} \right\} \Delta h$$

$$\times (\Delta h) \Delta p = 1$$

$$\therefore (\Delta h) \Delta p = 1 \div -\frac{1}{24} \text{ cm}$$

もっとも深い測点($h = 1500 \text{ cm}$)の場合は同様に

$$(\Delta h) \Delta p = 1 \div -\frac{1}{91} \text{ cm}$$

であり、いずれにせよ、この論文であつて精度ではほとんど影響しない。

3. タイムラグ

この種の観測には一般に計器の挿入によるタイムラグ(間隙水圧計、測管を土中に設置することにより生ずるもの)と、計測から生ずるタイムラグ(真の土中の水圧と計測端の水圧が釣り合うに要するもの)がある⁽¹²⁾。

計器挿入によるタイムラグ……うめもどしにより計器を設置した場合に大となる⁽¹²⁾。事実、タイムラグによると思われる水位・水圧変動がいくつか記録された(IV)。傾向変動との区別は今後の問題である。

計測によるタイムラグ……使用した間隙水圧計のは小で、水位測管のは大と推定される⁽¹³⁾が、これの測定結果への影響は不明である。小論はこのタイムラグを無視して進めている。

VIII 結 言

この調査では当初の目的一降雨が地下に浸透する過程を水圧的に明らかにする一を推定したにすぎなかったが、地すべり地において気圧型の変動をする水位がある

ことが副産物として得られた。また、気圧型変動は既述のように難透水性、弾性、不完全飽和土層の地下水分の一性質であるとして、その力学性の一部を明らかにすることができた。これが正しいとすれば、水位変動型の調査により地すべり地深部の透水性、力学性などがある程度知りうるわけである。今後、これらの追試が必要である。

この調査では当初のもう一つの目的一降雨の地すべりへの影響の有無とその機構の調査—をも完遂し得なかった。地すべりに及ぼす降雨の影響として間隙水圧説を採るにせよ、潤滑説を採るにせよ、地すべり運動は地下深部の土層の運動が原因であるという本質には変わらない。この点から地すべりの水理・水文調査が、本来地表付近の現象である降雨と地表付近の地下水調査に限られていてよいはずはない。今後、地下深部の水位・水圧の調査をより完全に近付けたい。

これらの前提として測定施設、測定方法の完成が必要である。それは地すべりにより水密性などが破壊されず、タイムラグが少なく、しかも最低1cm水柱の感度をもつことが必要であると思われる。さしあたり埋めもどし法の改良と、室内試験によるボリュウム・ファクター⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾の算出が最低必要であろう。今後、たとえば地下に埋設された計器から無線により測定値が地表に送られるというような装置が開発されれば、少なくとも地すべりによる破壊に対しては飛躍的に強くなろう。また、地すべり移動のトレーサーにもなるであろう。しかし、これは計測器専門家の力にまっはかない。

文 献

- 1) J. L. Sherard, R. J. Woodward, S. F. Gizienski, W. A. Clevenger (1963): *Earth and Earth Rock Dams*, p. 392, Wiley
- 2) 佐々倉航三 (1965): 信州南北安曇, 東筑摩三郡にわたる積雪量, 地理学評論 Vol. 38, No. 5
- 3) 宮武修, 黒崎達 (1964): 応用数学ハンドブック, p. 771, 日刊工業社
- 4) 酒井軍治郎 (1965): 地下水学, pp. 239~241, 朝倉書店
- 5) G. G. Parker, V. T. Stringfield (1950): *Effects of Earthquakes, Trains, Tides, Winds, and Atmospheric Pressure Changes on Water in the Geologic Formations of Southern Florida*, *Econ. Geol.* Vol. 45
- 6) 仲野良紀 (1966): 第三紀層地すべり母岩(泥岩)の軟弱化と物性の変化について, 農業土木試験場報告 No. 4
- 7) 湊元光春, 伊藤有三 (1966): 「地すべり地溝」の特殊な沈下機構について, 地すべり Vol. 3, No. 1
- 8) 井口弘 (1964): 沈下, 傾斜, ヒズミなどの測定, 土質調査法 pp 328~332, 土質工学会
- 9) 山本荘毅 (1962): 揚水試験と井戸管理 pp 22~37, 昭晃堂
- 10) 愛知用水公団 (1962): 愛知用水技術誌 ダム篇 pp 536~554
- 11) A. W. Bishop, M. F. Kennard, A. D. M. Penman (1960): *Pore-Pressure Observations at Selset Dam, Pore Pressure and Suction in Soils*
- 12) 市原松平 (1964): 間ゲキ水圧計ならびに間ゲキ水圧計測法, 土質調査法 pp 305~307, 土質工学会
- 13) A. D. M. Penman (1960): *A Study of the Response Time of Various Types of Piezometer, Pore Pressure and Suction in Soils*
- 14) R. E. Gilson, A. Marsland (1960): *Pore-Water Pressure Observation in a Saturated Alluvial Deposit Beneath a Loaded Oil Tank, Pore Pressure and Suction in Soils*.
- 15) 岸本良次郎 (1963): 地すべり母岩・土の粒度分析に関する実験, 農業土木研究 Vol. 30, No. 5
- 16) 岸本良次郎 (1966): 地すべり土の微細構造の形態学的研究と地すべり履歴論, 農業土木試験場報告 No. 4
- 17) M. J. Hvorslev (1951): *Time Lag and Soil Permeability in Ground Water Observation*, Bulletin, No. 36, U. S. Waterway Experiment Station
- 18) 金子良 (1956): 水文学的循環における土壌の効果, 農業技術研究所報告 F 9
- 19) 瀬野錦蔵 (1941): 別府市 宮地獄神社 温泉井における気圧影響, 地球物理 Vol. 5 No.3