

# がけくずれの運動特性に関する研究

斎藤迪孝・上沢 弘

鉄道技術研究所土質研究室

## Research on the Behavior Characteristics of Slopes Before Failure

By

M. Saito and H. Uezawa

*Railway Technical Research Institute, Tokyo*

### Abstract

As a means to make clear the behavior characteristics of slopes before failure, a natural text slope equipped with self-recording instruments was submitted to continual observation in the Tara area, Saga Prefecture.

Through the records of two-year observation, several unknown facts, such as fluctuation of piezometric level, strain and inclination of slope surface and water content having relation to rainfall, were revealed considerably. Especially, the fact of the regularity of fluctuation of pore water pressure was clearly recognized, and it was made possible to calculate dangerous precipitation through stability analysis of slope.

This procedure is undoubtedly an orthodox method to examine the degree of stability of slopes, but is liable to contain some uncertainty in relation to strength constants of soil. It is, therefore, recommended that care should be paid to the places where a large fluctuation of pore water pressure is measured during rainy seasons, and that the important or dangerous slopes should be watched by the aid of strain meters; these steps taken will lead to obtain effective methods of forecasting the failure of slopes.

### 目 次

|                          |    |                     |    |
|--------------------------|----|---------------------|----|
| 1. まえがき .....            | 34 | 3.1 水位昇降の推定 .....   | 59 |
| 2. 降雨時のがけの挙動 .....       | 34 | 3.2 安定度の検討 .....    | 64 |
| 2.1 観測個所の選定 .....        | 34 | 4. 崩壊発生の予知と警戒 ..... | 67 |
| 2.2 土質調査 .....           | 35 | 4.1 予知の方法 .....     | 67 |
| 2.3 計器設置 .....           | 37 | 4.2 警戒と処置 .....     | 68 |
| 2.4 観測記録 .....           | 40 | 5. むすび .....        | 68 |
| 3. がけくずれの発生についての考察 ..... | 59 |                     |    |

1. まえがき

がけくずれの運動特性を明らかにするにはいろいろむずかしい問題がある。その第1はどのがけも必ず崩壊するわけではなく、特定の場所で特定の条件のもとで生じるのであるから場所の選定が困難であり、また特定の条件の生じるまで何年かかるか何十年かかるか、あるいはまた全然生じないかもわからないことにある。第2の理由は、特に注意を払っているものでなければ、がけくずれはほとんど瞬間的に生じると思われるくらい急激な運動であるから、たとえその徴候を事前に察知できたとしても、必要な観測を行なうには十分な時間的余裕がない。また非常に危険を伴うので接近すら困難なことが多いからである。それゆえがけくずれの最初から最後まで、斜面が安定な状態から不安定な状態を経て崩壊にいたるまでの全経過を何らかの観測値で求めたものはほとんどないといってもよいくらいである。

もちろんがけくずれの研究方法は挙動観測のほかにも数多くあり、むしろその方が一般的であるといえよう。全般の状況を記録に残す災害調査から、さらに進んで土質、地質、地形、異常気象等の調査、ならびにそれら相互間の関連性が統計的に検討されることが多いが、いつどこがどのような状態になって崩れるかという将来の問題に対する答はでてこない。とくに広い区域ではなくて「どこが」という特定の地点にしぼることはこれらの方法ではまず不可能である。それでは処置対策を行なうにもあてずっぽうになってしまうおそれが多分にあるのである。

それで今回は「どこが」というのを「ここは」と置きかえて特定の地点から始め、その数をふやしていけばいろいろの類型を見出すことができ、従来推定の域を出なかった斜面の挙動を今までよりも明確にとらえることができると考えた。そこでこの一連の総合研究では崩壊危険度の高そうな斜面を選定して常時観測を行ない、斜面の挙動、とくに降雨の浸透状況をとらえて、これから危険状態の発生条件を推定する方法をとることとした。

2. 降雨時のがけの挙動

2.1 観測個所の選定

がけくずれが降雨の際に頻発することは周知の事実であるが、斜面内に浸透した雨水がどのような経過をたどって斜面を崩壊にいたらせるかを知るには観測によるほかはない。どのような斜面で

も雨水の浸透により土の含水量が増加し、飽和個所では間ゲキ水圧の発生増大が見られるが、崩壊にいたる挙動をみるには崩壊の可能性の多い個所、いかえれば安定に不利な条件をそなえた所を選ぶのが効果的な方法である。その意味ではいままでの崩壊多発個所付近は少なくとも土層構成上ならびに水文学上不利な条件が具わっていると考えられるので、このような個所から観測地点を選ぶこととした。地点選定当時から数年前までさかのぼって、国鉄沿線で被害件数1,000件以上の災害をひろってみると表-1のとおりである。<sup>1)</sup>このうち、切取の崩壊が多く、かつ中間流の影響が明らかに作用したところで観測に適した個所と考えられるのは、東北本線三沢-野辺地間、長崎本線多良-小長井間、室蘭本線栗山-栗丘間などである。このうち、東北本線三沢-野辺地間の千曳駅構内の斜面では昭和38年11月に国鉄側で計器を設置して観測を開始していたので、これとならんで観測に適した多良地区を選ぶこととなった。この地域は昭和37年7月の連続降雨の後の集中豪雨で、長崎本線が寸断されたところであって、このときの降雨量は肥前大浦の線路分区の記録に

表-1 昭和33~37年間国鉄沿線主要災害

| 発生                  | 種別                  | 被害件数  | 被害地方     | 主な被害箇所   |
|---------------------|---------------------|-------|----------|--|
| 1958, 9, 26<br>~27  | 台風<br>22号<br>(狩野川)  | 1,304 | 関東, 東北地方 | 常盤線富岡-夜ノ森間<br>原町-新地間<br>東北本線小牛田-一関間<br>三沢-野辺地間 |
| 1959, 8, 13<br>~14  | 台風<br>7号            | 1,178 | 中部, 関西地方 |  |
| 1959, 9, 27<br>~28  | 台風<br>15号<br>(伊勢湾)  | 3,608 | 中部, 関西地方 | 関西線八田-四日市間<br>線路浸水<br>紀勢線櫛田川流失<br>越美南線第5長良川流失  |
| 1961, 6, 26<br>~29  | 集中豪雨                | 1,900 | 中部, 関西地方 | 飯田線水窪-飯島間<br>切取築堤崩壊                            |
| 1961, 10, 15<br>~16 | 台風<br>18号<br>(第2室戸) | 3,518 | 中部, 関西地方 | 越美北線第1九頭竜川流失<br>山陰線玄武洞-城崎間<br>築堤流失             |
| 1962, 7, 2<br>~9    | 集中豪雨                | 1,152 | 北九州地方    | 長崎本線多良-小長井間<br>切取築堤崩壊<br>松浦線潜電機内埋没             |
| 1962, 8, 2<br>~11   | 台風<br>910号          | 1,036 | 北海道地方    | 室蘭本線栗山-栗丘間<br>切取崩壊<br>根室本線滝里-島ノ下間<br>築堤崩壊      |

国鉄土木課編 業務便覧 昭和38年11月 R.67より

よると、7月1日から8日までの8日間の累計1,500mm、7月7日20時から7月8日8時までの半日降雨量766mm、なかでも8日5時から6時までの1時間降雨量は168mmに達した。そのため多良—肥前大浦間では切取崩壊が72<sup>K</sup>000, 72<sup>K</sup>100, 73<sup>K</sup>000と続き、ほかに亀の浦の大崩壊で線路切取区間が埋没し、開通までに54日を要したのであった。また崩壊箇所付近の斜面では地下水が常時流出して付近の飲料水となっていたり、海中に真水の湧出が見られるなど、多量の地下水の存在が認められ、豪雨時にはその水量も急激に増大するものと考えられた。

この地域で観測計器を設置する箇所として72<sup>K</sup>000、里すい道出口の斜面を選んだのは、風化表土層が比較的厚く、まだ崩壊の危険が残っていること、また計器の埋設が容易なこと、崩壊しても落石止擁壁が線路際に設けてあって鉄道に直接被害がないので、斜面に今後手を加える予定のないこと、線路沿いで警戒などに国鉄現場機関

の協力を得やすいことなどの理由によるものである。この箇所は下方は鉄道建設の際の切取斜面であって、それに続く上方は自然の緩斜面で、現在ミカン畑となっており、多良岳の1つの尾根まで続いている。

## 2.2 土質調査

昭和40年3月、土質調査のために観測地点の最急勾配の方向にとった中心線に沿って、12～15mの標準貫入を併用したボーリングを2本、ほかに表層調査と計器埋設をかねて2～10mのボーリングを13本、延べ91.70mのボーリングを行なった。ボーリングの位置、番号、深度ならびに土質区分は図-2に示すとおりであって、標準貫入を実施した2本の柱状図は図-3(a)および(b)に示すとおりである。土層構成は図のように複雑であるが、大きく分けると地表から数mは軟らかい凝灰質ロームで、その下に火山岩の転石層があり、10m付近からやや軟らかい凝灰質ロームと硬い凝灰質ロームが続き、15m以下は玄武岩となっている。透水層とみられるのは地下数m

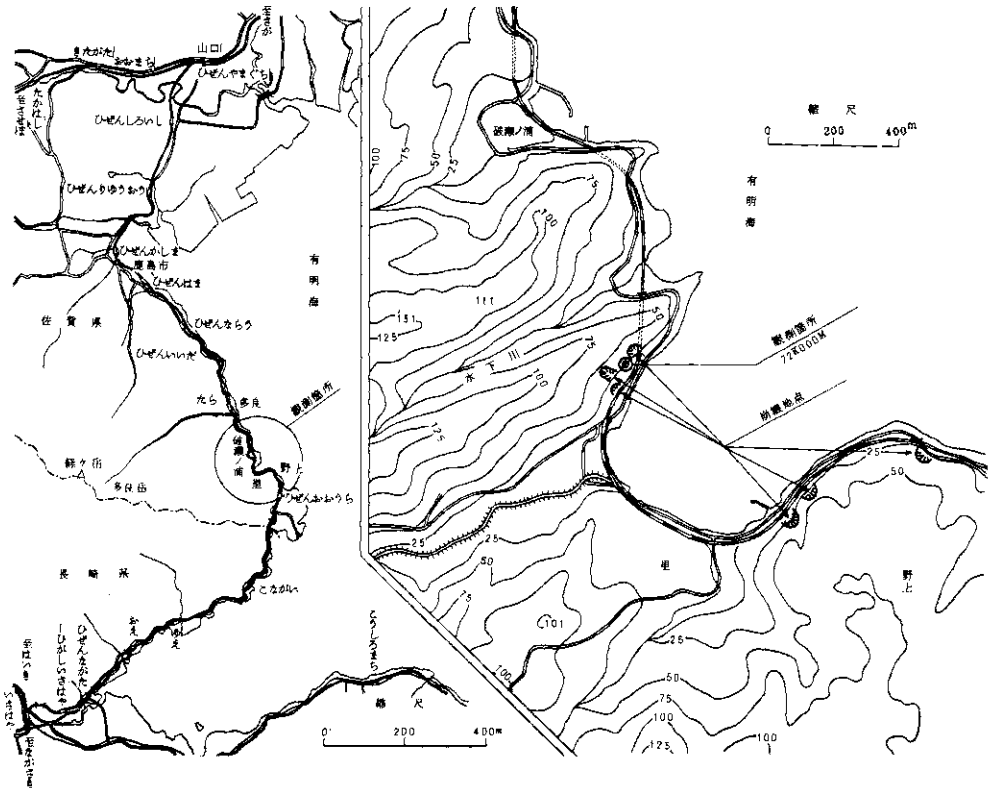


図-1 観測箇所図

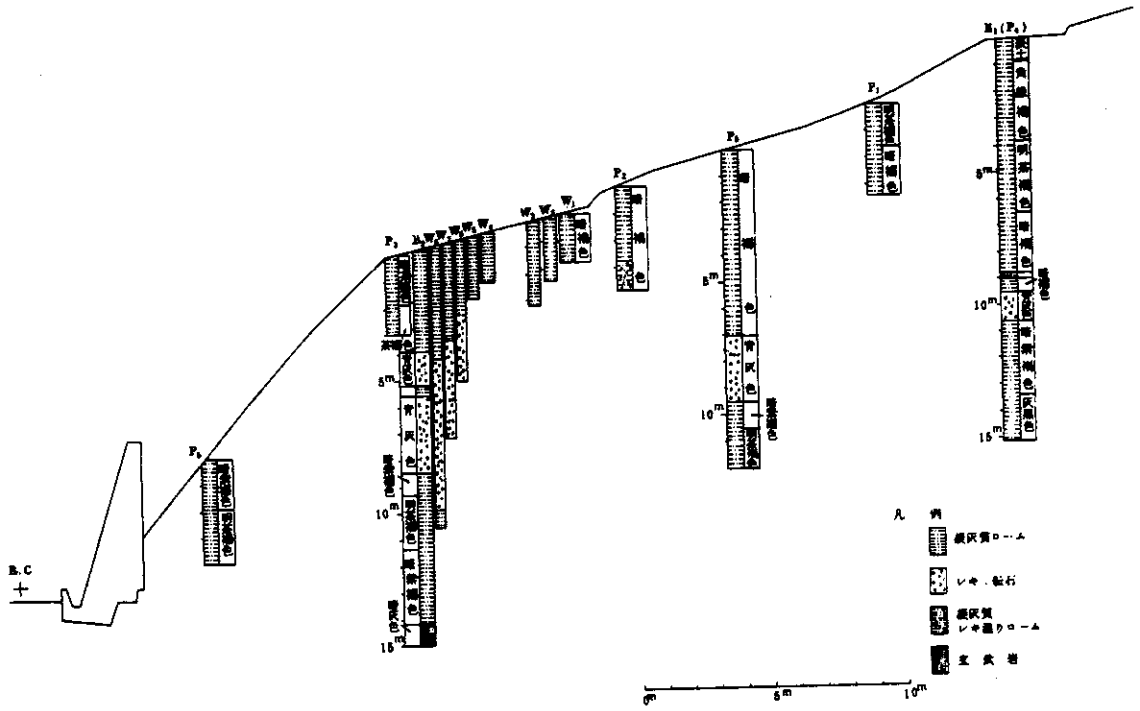


図-2 ボーリング実施箇所断面図

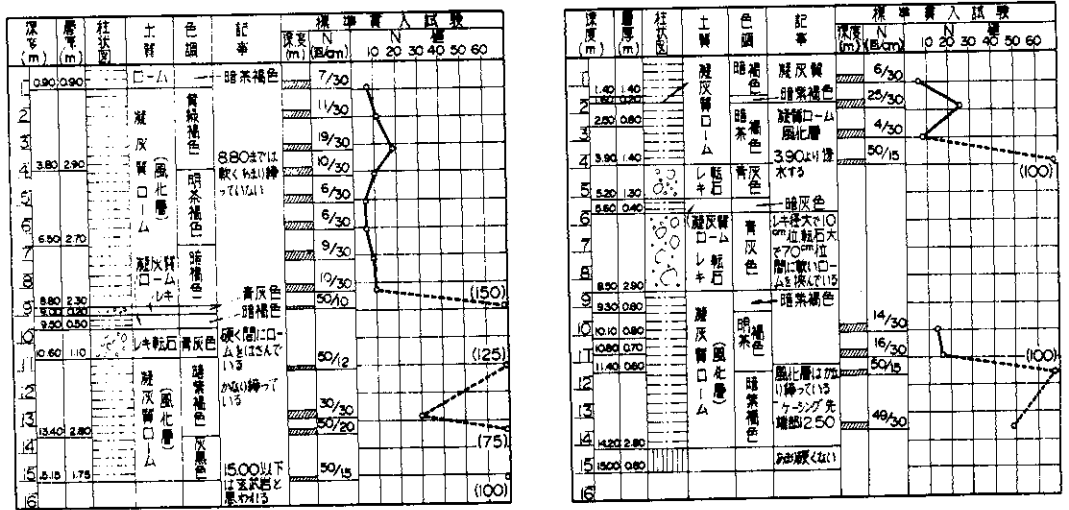


図-3 土質柱状図

の深さと10 m以下の深さに存在する含水量の多くに多い土層である。このような層区分を図で示すと図-4のようになり、以後の安定解析その他

の検討はこの考え方にもとづいて行なうこととする。この各土層のうち主なものの土質試験の結果は表-2のとおりである。

表-2 土質試験結果一覧表

| 土層番号 | 深 度 (m)                   | 色    | 含水比  | 比 重   | 粒 度 分 析 |      |      |           | コンシステンシー試験 |      |      |      |
|------|---------------------------|------|------|-------|---------|------|------|-----------|------------|------|------|------|
|      |                           |      |      |       | 砂       | シルト  | 粘土   | 判 定       | L.L        | P.L  | P.I  | AC分類 |
| I    | P <sub>1</sub> 1.40~ 3.90 | 黄緑褐色 | 65.4 | 2.789 | 16.5    | 57.5 | 26.0 | シルト質粘土ローム | 63.9       | 54.6 | 9.3  | MH   |
| II   | P <sub>2</sub> 0.95~ 1.10 | 明茶褐色 | 63.7 | 2.772 | 10.0    | 45.0 | 45.0 | 粘 土       | 73.5       | 36.2 | 37.3 | 〃    |
| III  | 〃 2.30~ 4.05              | 暗 褐色 | 52.7 | 2.866 | 22.0    | 57.0 | 21.0 | シルト質粘土ローム | 54.0       | 43.7 | 10.3 | 〃    |
| IV   | 〃 4.05~ 4.65              | 暗紫褐色 | 66.4 | 2.785 | 8.0     | 65.0 | 27.0 | 〃         | 56.7       | 44.2 | 12.5 | 〃    |
| V    | 〃 8.70~ 9.60              | 暗 褐色 | 52.3 | 2.857 | 14.0    | 53.0 | 33.0 | 粘 土       | 57.3       | 44.3 | 13.0 | 〃    |
| VI   | 〃 9.65~10.60              | 暗紫褐色 | —    | 2.781 | 35.0    | 38.5 | 26.5 | 粘土質ローム    | 96.9       | 49.5 | 47.4 | 〃    |
| VII  | 〃 10.70~11.40             | 明茶褐色 | 58.4 | 2.883 | 19.0    | 50.0 | 31.0 | 粘 土       | 96.8       | 49.5 | 47.3 | 〃    |

| 土層番号 | 深 度 (m)                   | 色    | 透水係数 cm/sec           |       | 三軸圧縮試験 (圧密非排水)          |      |      |                          |        |  |
|------|---------------------------|------|-----------------------|-------|-------------------------|------|------|--------------------------|--------|--|
|      |                           |      | 乱されない土                | 乱された土 | 湿潤密度(t/m <sup>3</sup> ) | 間ゲキ比 | 飽和度  | 粘着力(kg/cm <sup>2</sup> ) | 摩擦角(度) |  |
| I    | P <sub>1</sub> 1.40~ 3.90 | 黄褐色  |                       |       |                         |      |      |                          |        |  |
| II   | P <sub>2</sub> 0.95~ 1.10 | 明茶褐色 |                       |       |                         |      |      |                          |        |  |
| III  | 〃 2.30~ 4.05              | 暗 褐色 |                       |       |                         |      |      |                          |        |  |
| IV   | 〃 4.05~ 4.65              | 暗紫褐色 |                       |       | 1.45                    | 2.49 | 91.5 | 0.24                     | 24°00' |  |
| V    | 〃 8.70~ 9.60              | 暗 褐色 | 1.34×10 <sup>-4</sup> |       | 1.73                    | 1.38 | 92.4 | 0.26                     | 14°45' |  |
| VI   | 〃 9.65~10.60              | 暗紫褐色 |                       |       |                         |      |      |                          |        |  |
| VII  | 〃 10.70~11.40             | 明茶褐色 | 4.80×10 <sup>-7</sup> |       |                         |      |      |                          |        |  |

2.3 計器設置

土質調査に引続いて間ゲキ水圧計、ヒズミ計、含水量計その他の計器の設置を同じく昭和40年3月に行なった。

間ゲキ水圧計は地中水の通路と考えられる上下2層を対象として、上層にP<sub>1</sub>~P<sub>3</sub>の3点、下層にP<sub>4</sub>~P<sub>6</sub>の3点を設置した。間ゲキ水圧計の機構は水圧をペローズの動きに換え、それを褶動抵抗の変化に換えて測定するもので、パイプの先端にフィルターでカバーされて直結してあり、予定深度の手前までボーリングで先掘をして、そのあとでパイプを圧入し、さらに上部のパイプと土のすき間から雨水が入らないように土で十分すき間をつめた。測定範囲は0.2および0.5 kg/cm<sup>2</sup>の2種類のものを使用した。1年間の観測後、水位変動幅が非常に大きくて測定範囲を越えるものがあったので、間ゲキ水圧計を引上げたり、増設したりして、測定範囲を拡大または変更して観測を行なった。この細部は後述の観測記録に記入してある。

ヒズミ計は2点間に張られたインパー線の長さの変化を褶動抵抗の変化に換えて測定する構造のもので、斜面の中心線に沿って上方の緩斜面に

S<sub>1</sub>~S<sub>4</sub>の4台を地中に埋めたパイプ中に設置して畑地歩行の障害にならないようにし、下方の急斜面にはS<sub>5</sub>、S<sub>6</sub>の2台を斜面上にとりつけた。

含水量計は表層付近を対象にして中心線方向と深さ方向とを考えて8個を埋設したが、さらに深い箇所の変化を知るためにその後10個を増設した。これはナイロン布を吸湿材としてその中に1枚の電極を入れ、これを表面両側にあてた2枚の電極板でしめつけ、含水量の変化を吸湿材のナイロン布の電気抵抗の変化に換えて測定する構造のもので、これをパイプの先端にとりつけて、間ゲキ水圧計と同様に圧入した。キャリブレーションは埋込位置付近で採取した土を使用して室内で行なった。その結果は図-5に示されている。

ほかに雨量計1、水平振子型長周期傾斜計1、下げ振り褶動抵抗型傾斜計2ならびに観測小屋1棟を設置した。長周期傾斜計はとくに敏感なので、ごく地表の乾湿による局所的な動きを測定することがないように、1.5 mの深さまで4本の鉄パイプの基礎杭をうち、その上にコンクリート台をうって取付けた。

以上の計器は長周期傾斜計以外は24打点式記録器2台を用いて集中記録をさせ、故障の点検な

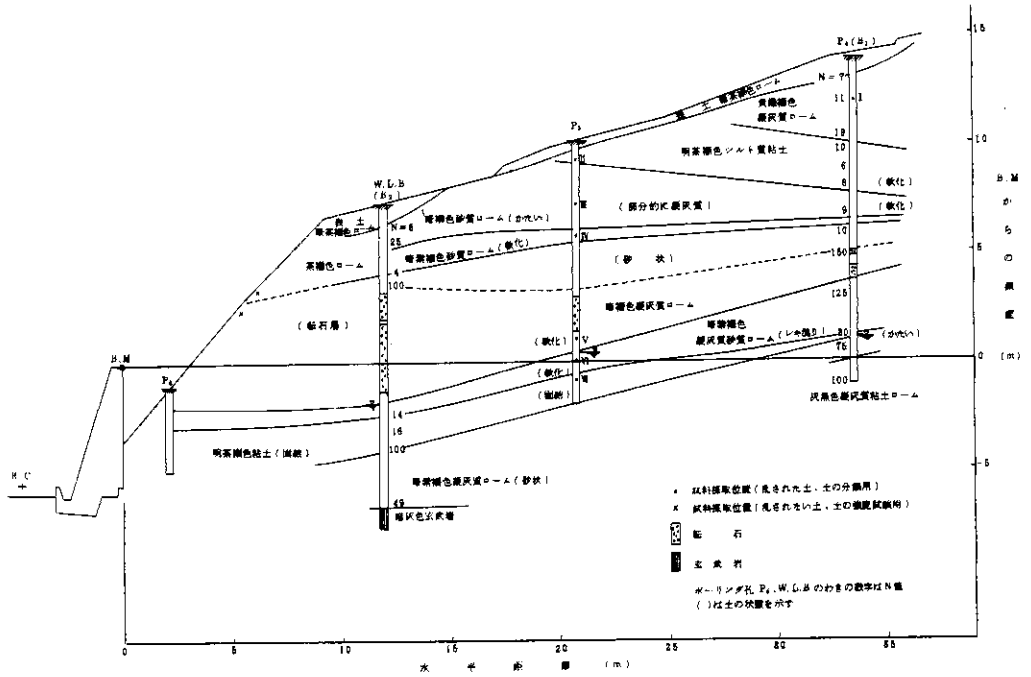


図-4 土層区分断面図

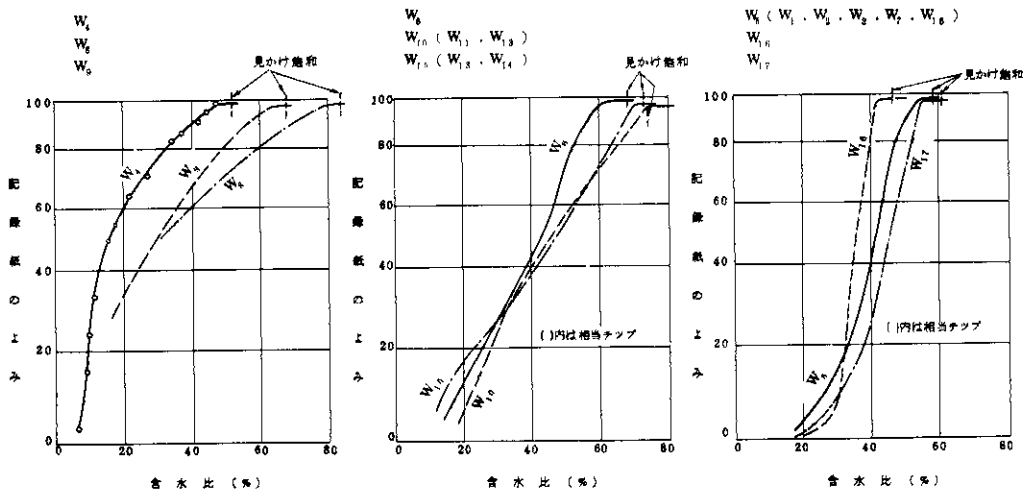


図-5 含水量計のキャリブレーション

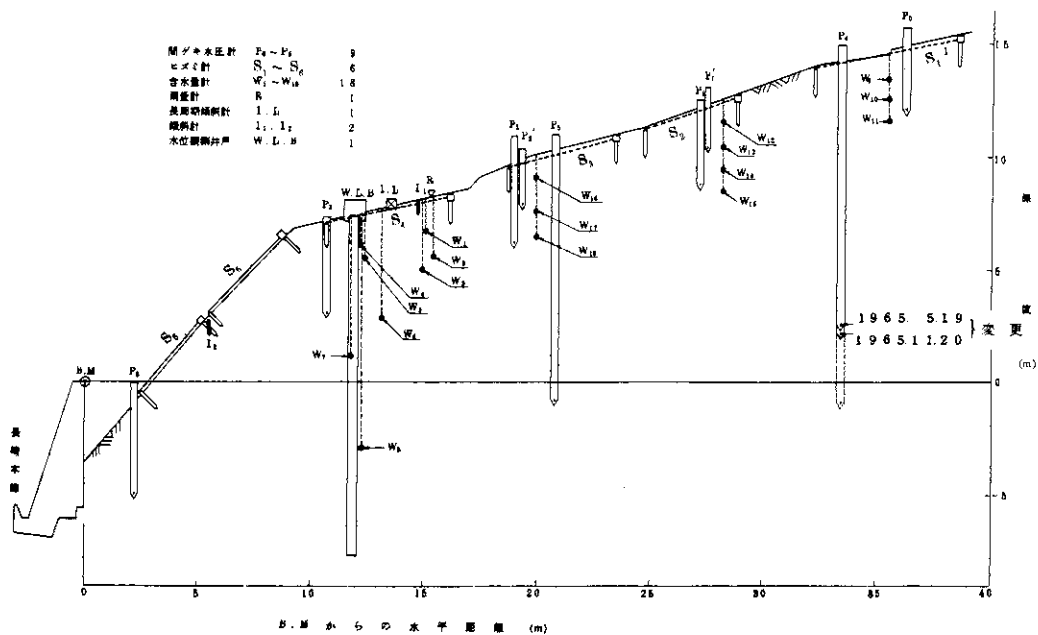


図-6 計器設置断面図

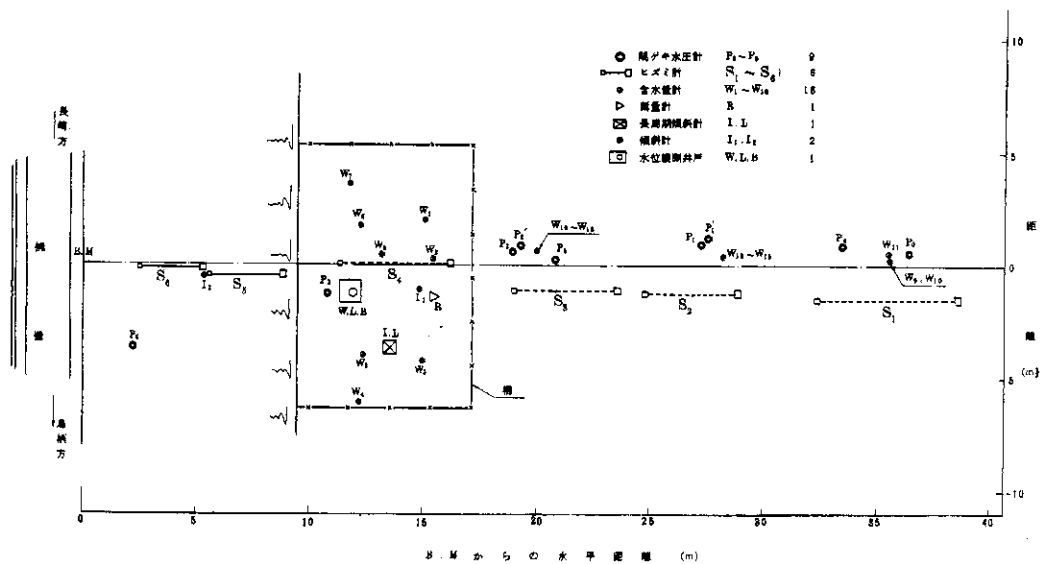


図-7 計器設置平面図

らびに用紙の交換以外には人手を要しないようにした。

ほかに土質調査を行なったB-2ボーリング孔を内径150mmに拡大掘削してケーシングを挿入し地下水位観測井戸とした。これは共同研究の気象研究所が担当することになっていて、同所の計器を設置し、記録は同所へ送付した。

また当初は電源として蓄電池を使用していたので、毎月充電を保線区に依頼していたが、昭和40年11月に交流電源を設備したので、観測に非常に便利になった。

以上の計器の配置は図-6および図-7に示されている。そして2年間の観測記録をえて、昭和41年12月計器を撤収し、観測を終了した。

## 2.4 観測記録

### 2.4.1 降雨概況

計器の設置後その調整ならびに故障修理のため1カ月を費やしたので、連続記録がとれるようになったのは昭和40年5月以降であった。この頃から降雨は次第にひんぱんとなり、5月末には日雨量127mmを記録した。6月中旬から7月上旬にかけて豪雨が続き、最大日雨量293mmに達し、観測計器も大きい変動を記録し、とくに間ゲキ水圧が予想以上に上昇したために計器の測定範囲を越えたことが2~3回あったが、8月以降はあまり大きい雨はなかった。

この経験から昭和40年11月と41年6月とに計器の調節あるいは増設を行なって次年度に備えたが、昭和41年にははいてからは前年のような大雨はなく、6月と9月に連日降雨があつてその都度ある程度の変動が見られたが、前年ほど著しいものではなかった。11月にははいてこの年の最大日雨量136.5mmが記録されたが、このときはすでに多雨期をすぎていたもので、影響はわずかにとどまった。

2年にわたる観測期間中の日雨量は他の各観測記録のいずれの図にも下端に棒グラフで記入してある。

### 2.4.2 水位

間ゲキ水圧計による水位の記録は図-8(a)および(b)に示されていて、(a)は浅い方の水の通路に入れた $P_1 \sim P_3$ および $P_4$ の記録であり、(b)は深い方の水の通路に入れた $P_1 \sim P_3$ の記録である。深い方には常時水が存在していて地下水と呼んでよいが、浅い方は大雨の際のみ水圧が出現し、

かつ急上昇するので、典型的な中間流と見られるものである。

### 2.4.3 ヒズミ

斜面のヒズミの記録は図-9に示されている。観測期間中のヒズミの変動は全般的にみてわずかであつて、この斜面はきわめて安定であつたといふことができよう。ただ昭和41年の9月に急斜面の上方にとりつけた $S_1$ がやや大きい動きを示しているが、これは夏期降雨が少なかったための乾燥による収縮ではないかと考えられるが、斜面全体の危険を示すものでないことは明らかである。

### 2.4.4 含水量

含水量の変化は図-10(a)~(d)に示されている。図には記録器の読みをそのまま記入してあるが、これは図-5のキャリブレーションカーブから含水量に換算しうるものであつて、読みの100が飽和に近い方を、読みの小さい方が乾燥している方をあらわすものである。 $W_1 \sim W_2$ のように比較的浅く埋められた方は変化が大きいのに対して、 $W_3 \sim W_4$ のように深目に埋設された方はほとんど飽和に近い状態のまま変動がないなど、著しい対照を示している。これは上層と下層との透水性の違いもあろうし、上層にき裂が多く、乾燥が容易であるのかも知れない。後から埋設した10個の含水量計の動きは前の分と違つていて、平時は飽和に近いのが、昭和41年2月と8月とに急激に含水量が減じたことを示している。これは降雨の少ない時期に乾燥が進んでき裂が開くと急激に含水量が減ることになるのではないかと思われる。また斜面の下方に近いほどき裂が多いため常時開いていて、上方に進むに従つて常時はき裂が閉じているためであるかも知れない。

### 2.4.5 傾斜

傾斜計の記録は図-11に示されている。水平振り型長周期傾斜計は感度はよいが、計器自身に故障が多く、図に示した程度のもので得られただけで満足を記録は得られていない。

下げ振り撻動抵抗型傾斜計の記録によると傾斜の変化は若干あるが、ほとんど問題にならないくらいのみ量である。この場合も記録の得られなかった期間はあるが、これは集中記録器の故障のためであつて、傾斜計そのものの故障ではない。これから考えても長期観測には故障の少ない安定した計器を選ぶべきであると思われる。



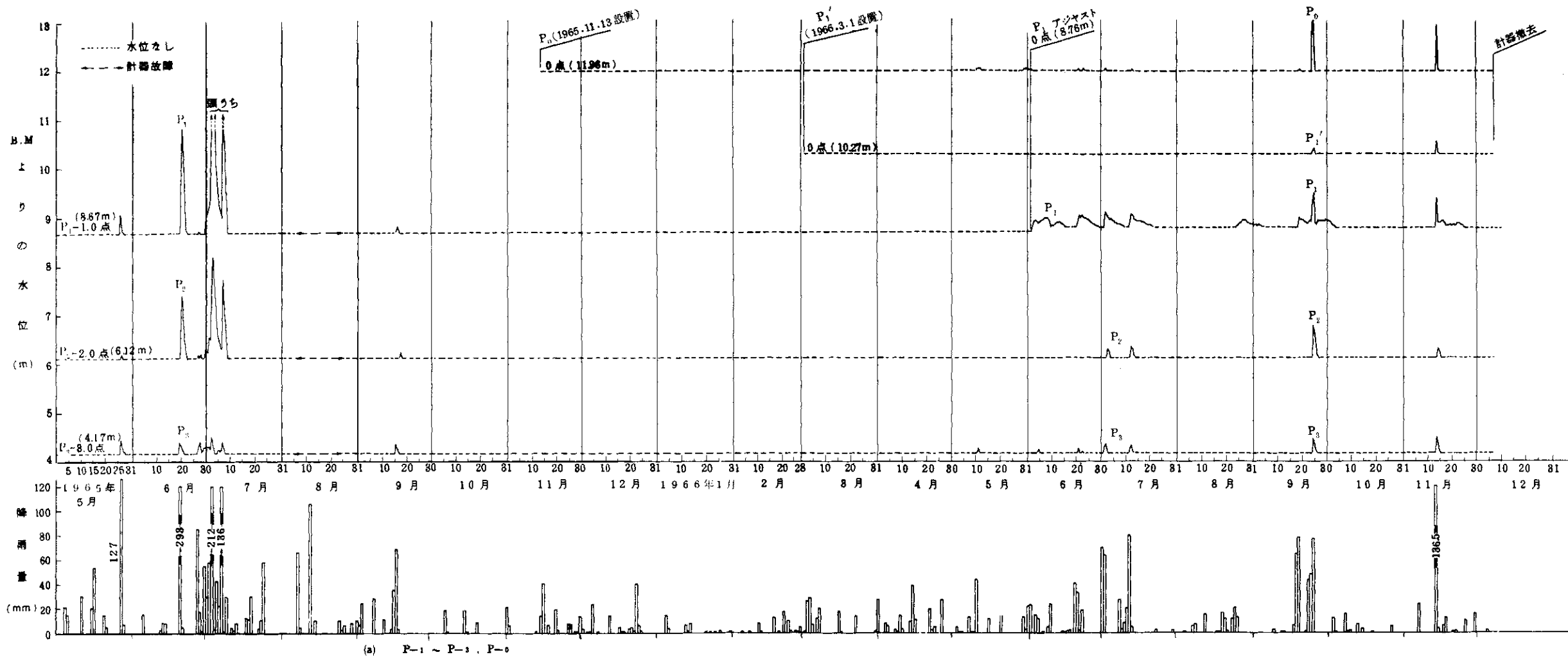


図-8(a) 水位観測記録 P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub>~P<sub>3</sub>

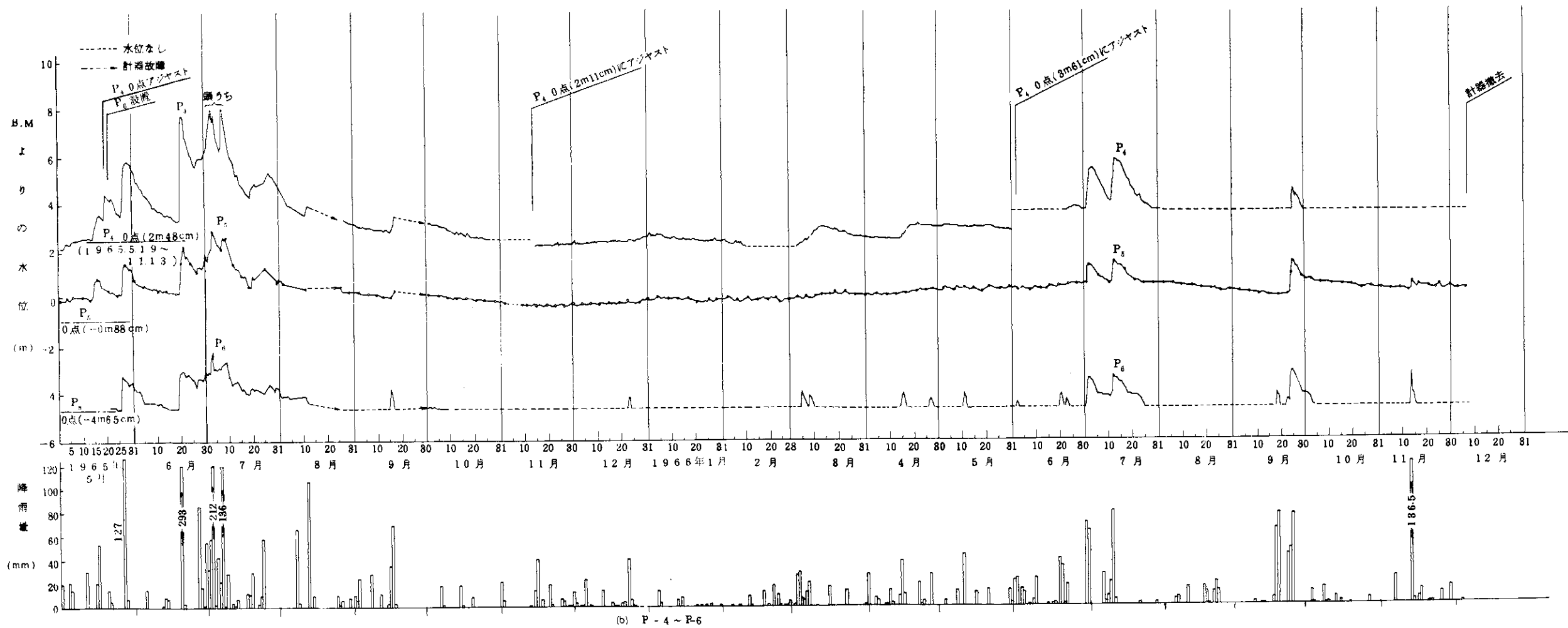


図-8(b) 水位観測記録  $P_4 \sim P_6$

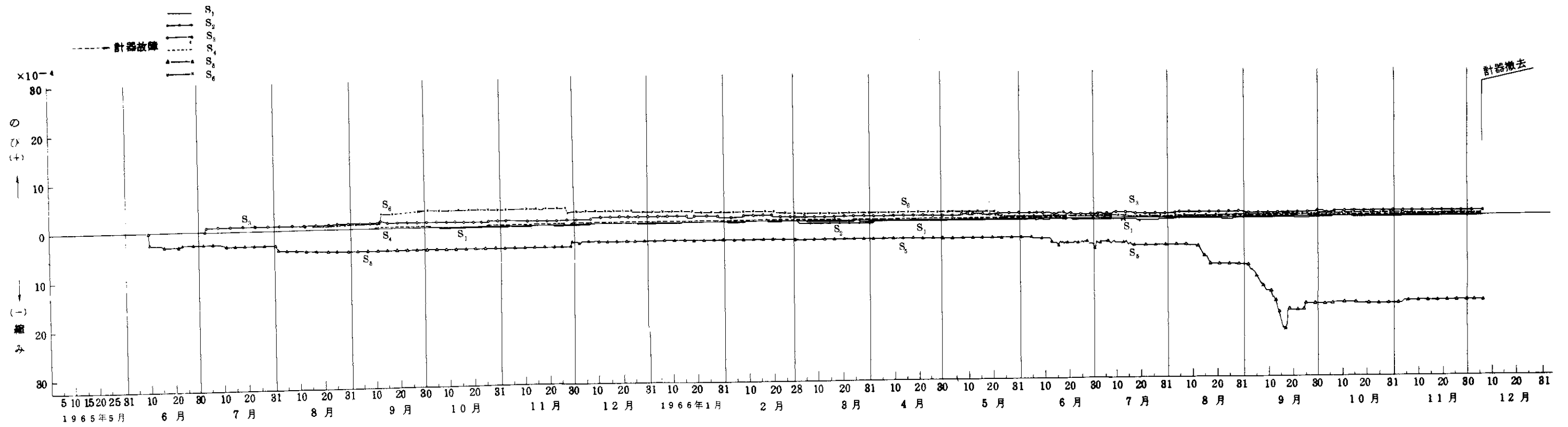


図-9 ヒズミ観測記録

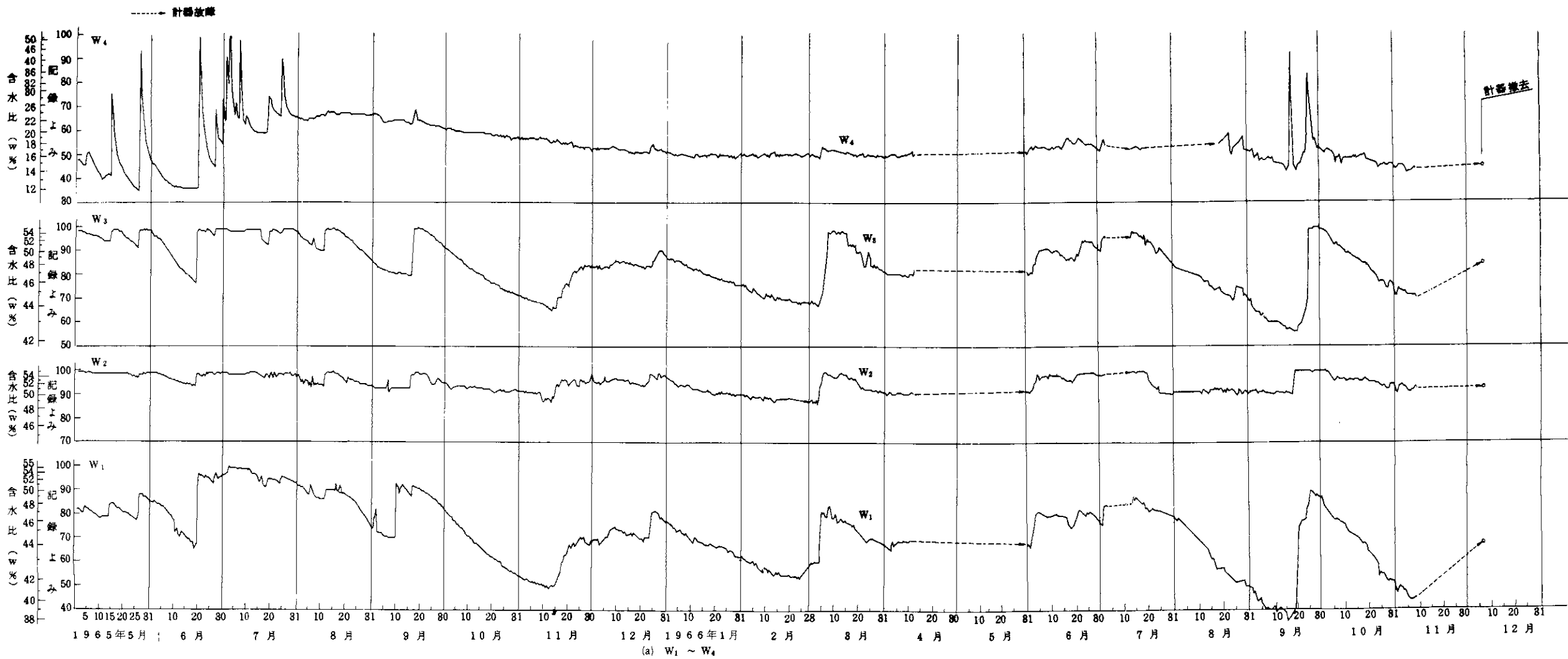


図-10(a) 含水量観測記録  $W_1 \sim W_4$

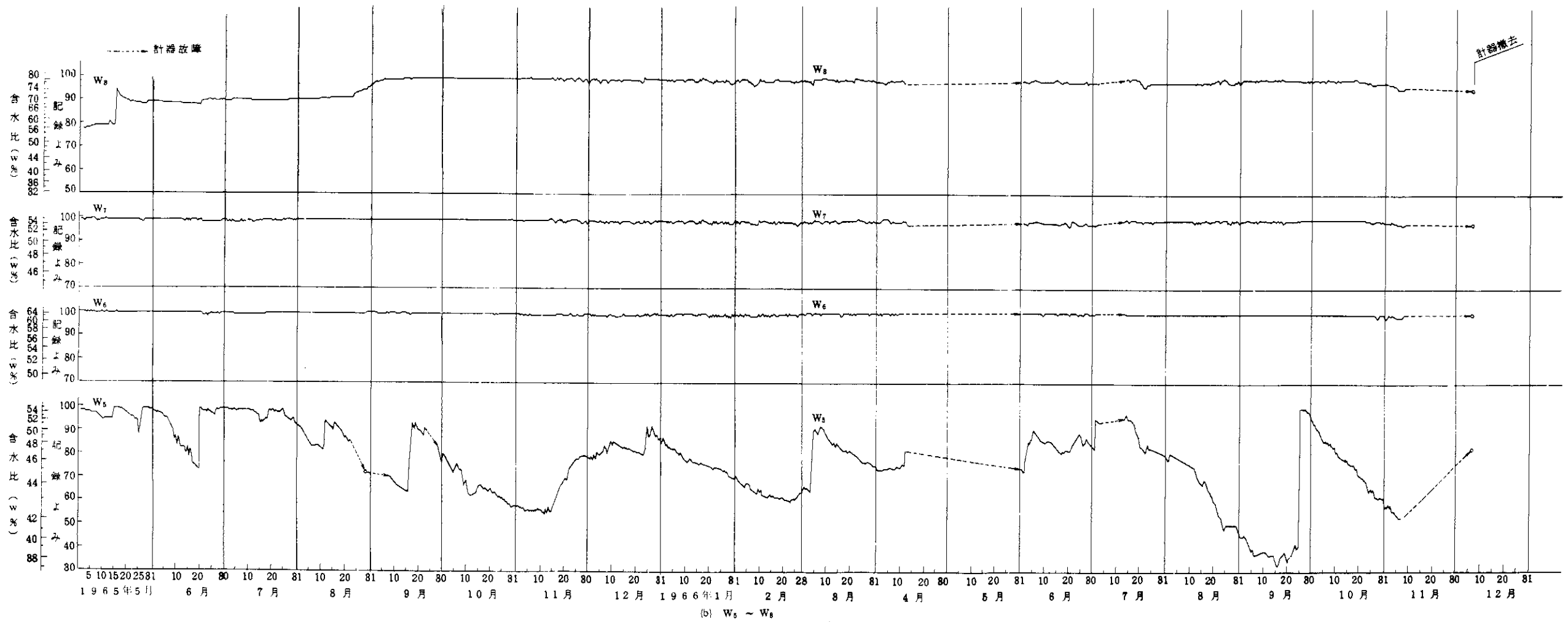


図-10(b) 含水量観測記録  $W_5 \sim W_8$

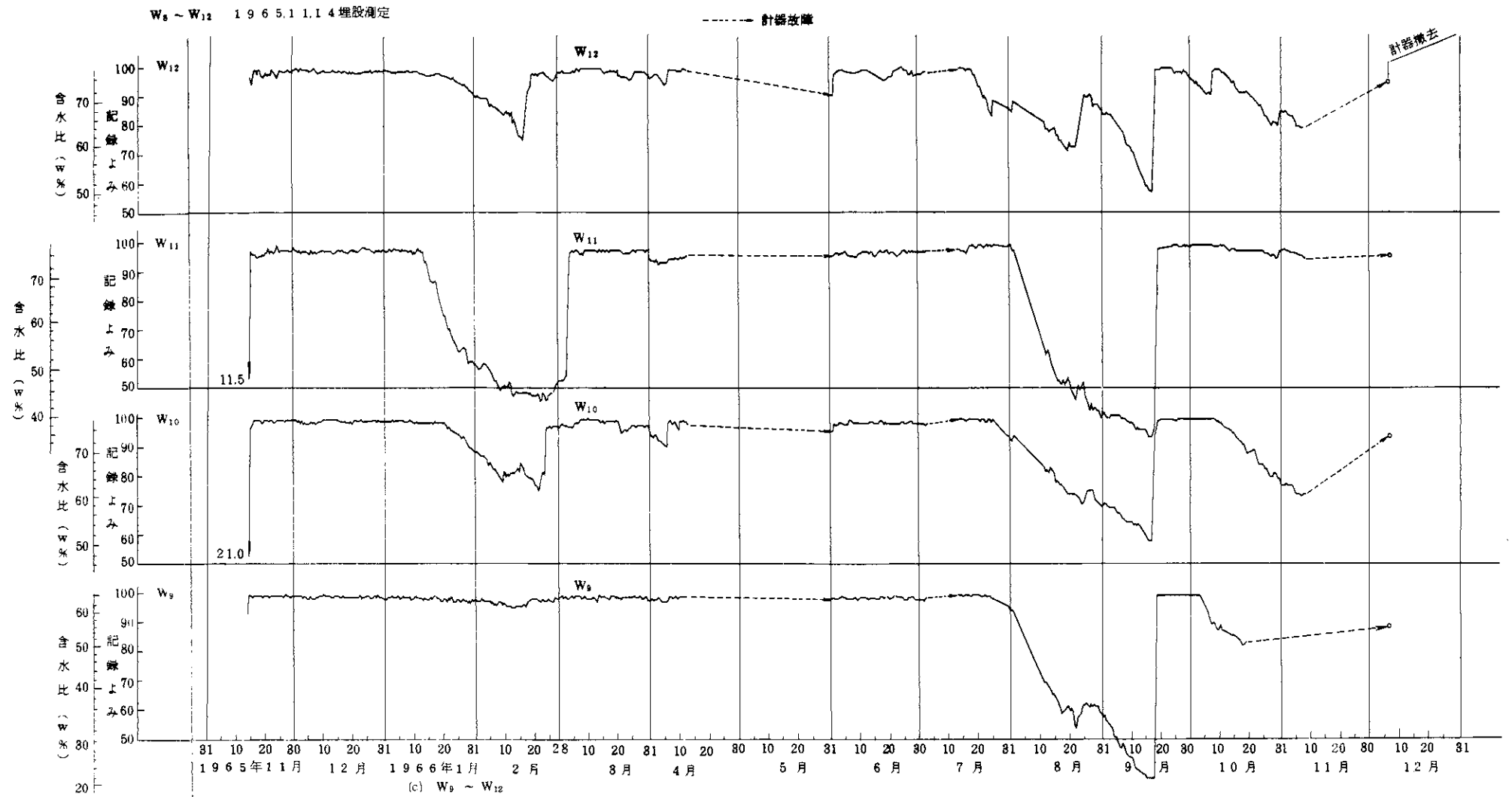


図-10(c) 含水量観測記録 W<sub>9</sub> ~ W<sub>12</sub>

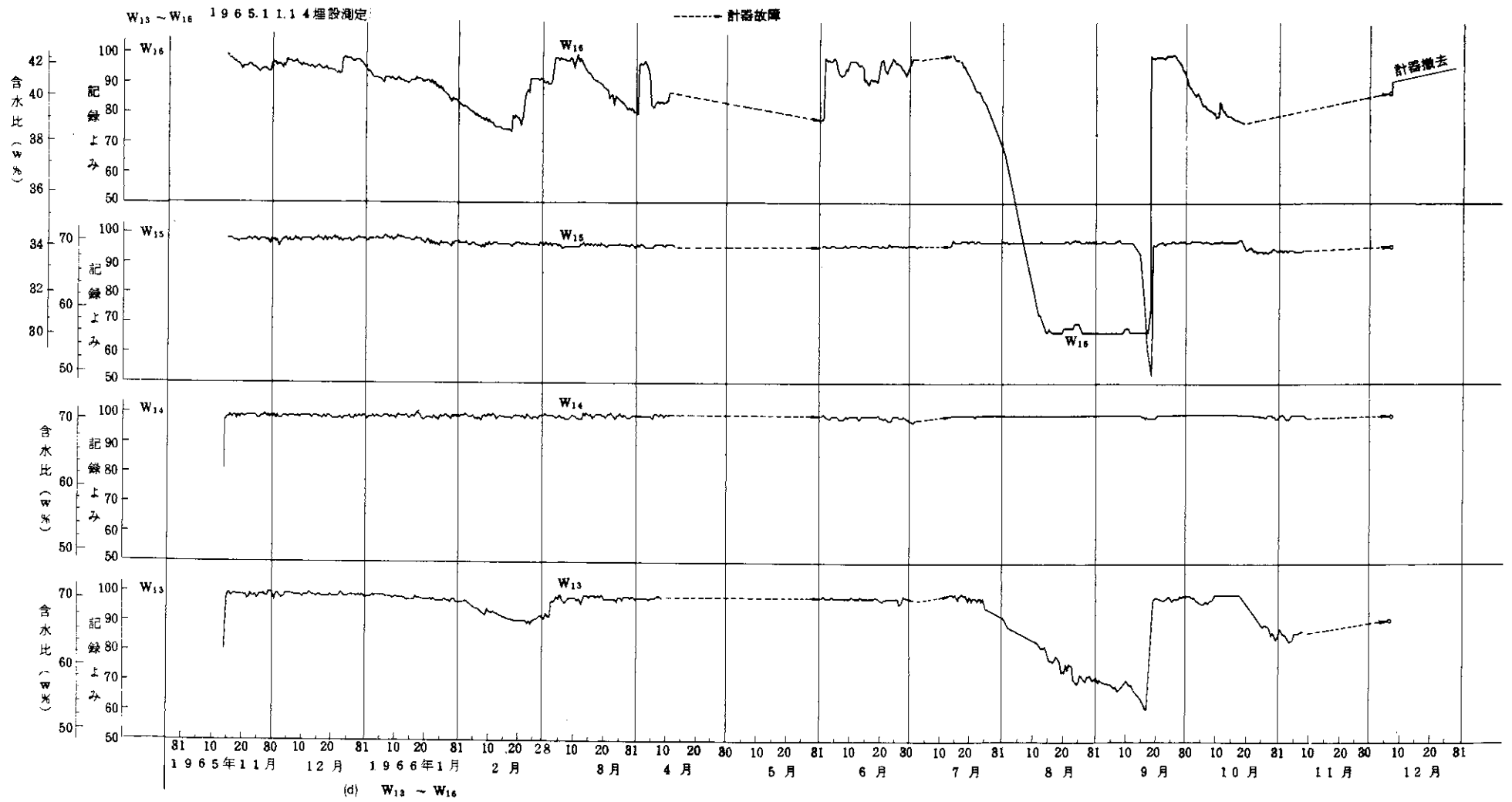


図-10(d) 含水量観測記録 W<sub>13</sub> ~ W<sub>16</sub>

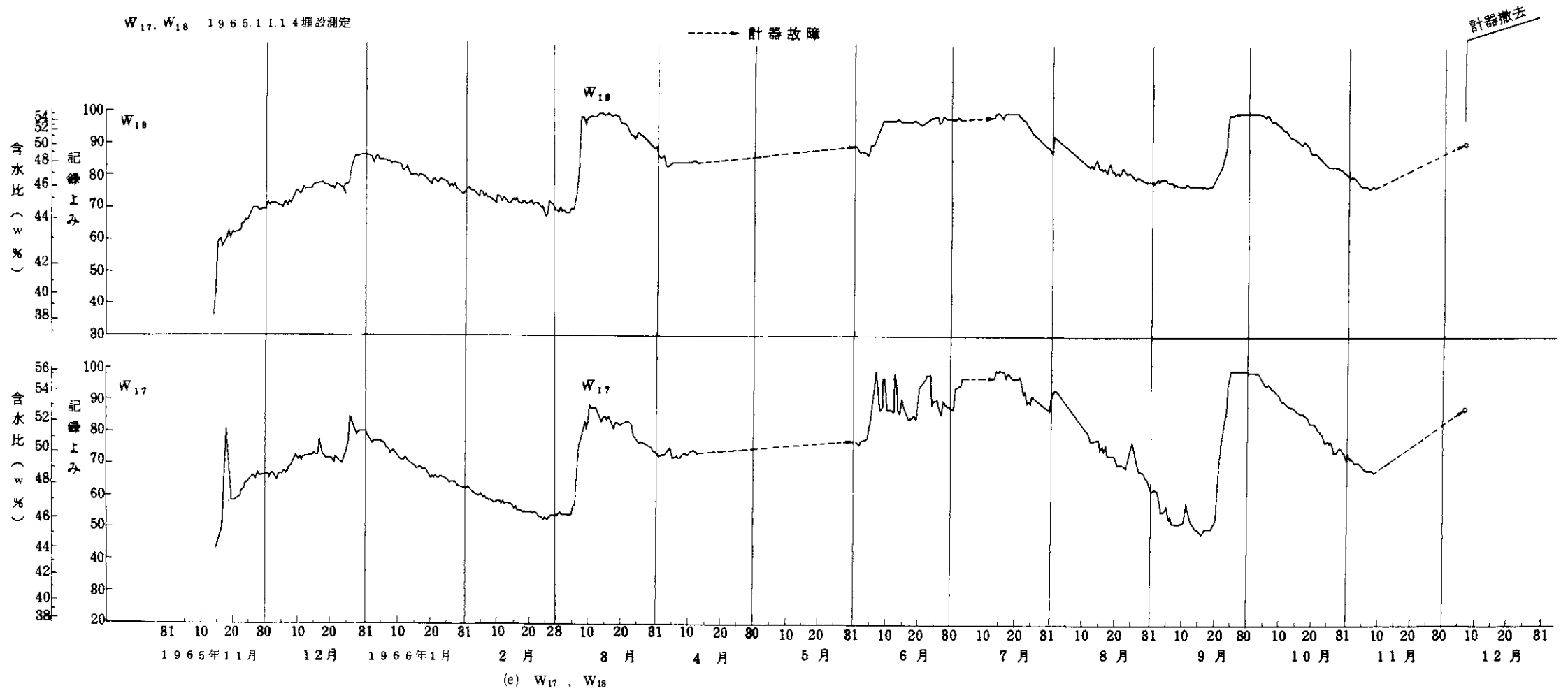


図-10(e) 含水量観測記録 W<sub>17</sub>~W<sub>18</sub>



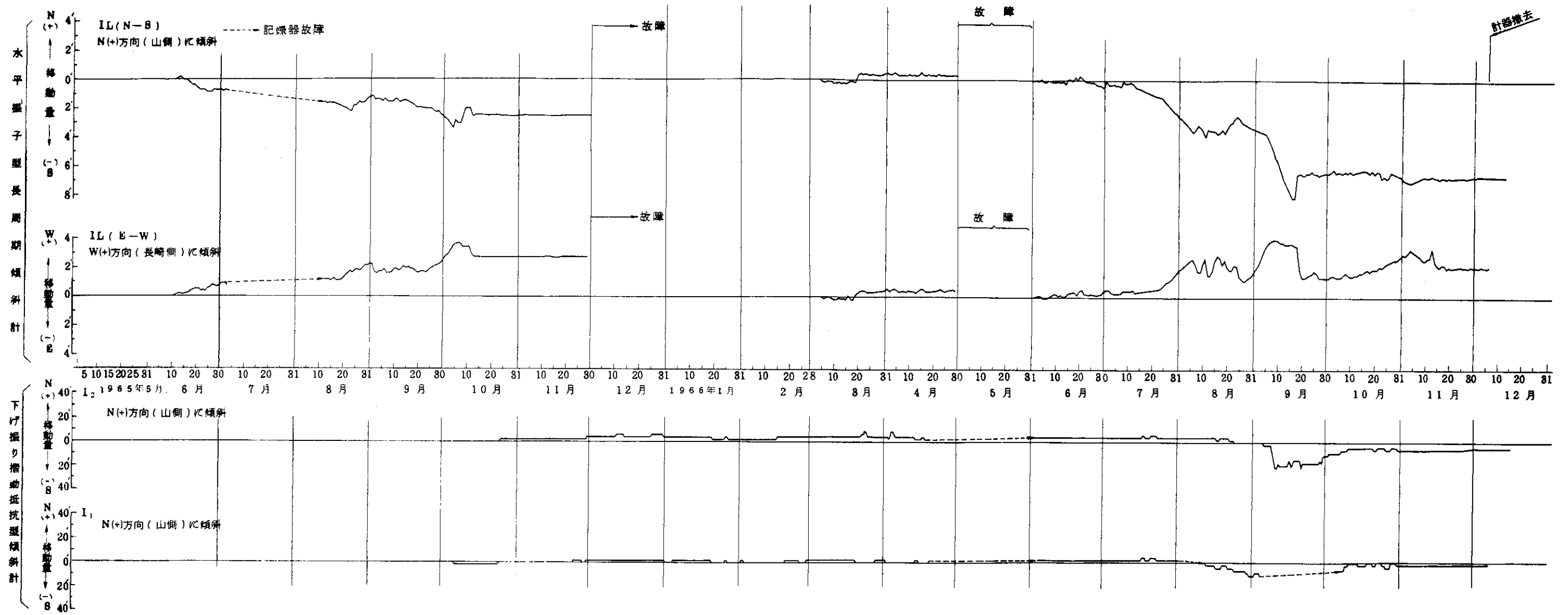


図-11 傾斜観測記録

3. がけくずれの発生についての考察  
3.1 水位昇降の推定

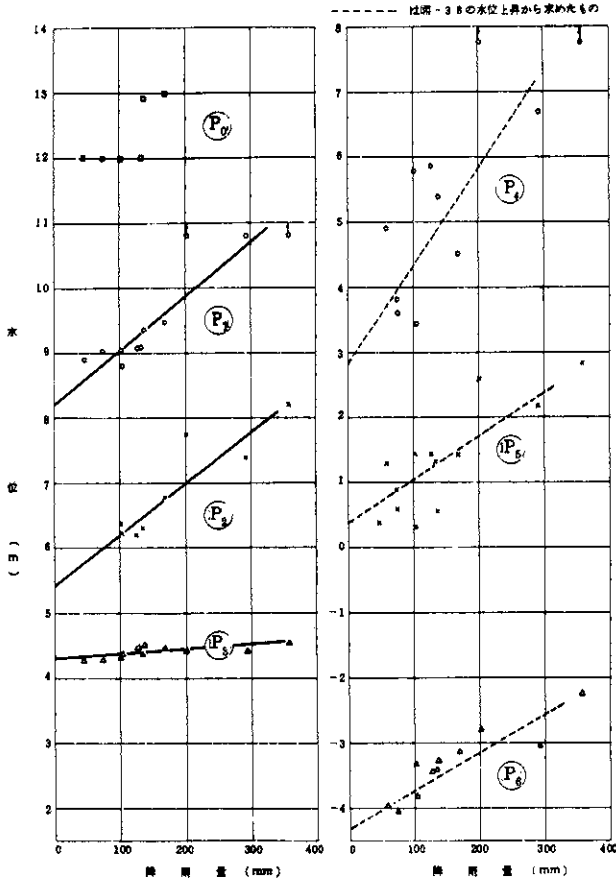


図-12 降雨量と水位との関係

観測記録のうち降雨時に最も変動の激しく、かつ崩壊と直接関係があるのは地下水位である。他のものについては、ヒズミや傾斜のように常時若干の変動はあっても、崩壊に近づかなければ意味のある大きい変動を示さないものもあるし、また含水量のように大きい変動はあっても崩壊との関係は間接的なものであるものもあり、地下水位のように土塊の平衡に直接影響をもつものにはほかにないようである。それでここでは主として降雨と地下水位の変動との関係について検討を行なうこととする。

まず降雨量と水位または水位上昇との関係を調

べてみる。記録から求められる降雨量は日雨量であるが、それも単日降雨と連日降雨とあり、望ましいのは前後数日間は降雨がなくて、1日だけ降雨があるような単日降雨の場合で、しかも降雨量がかなり大で水位上昇が相当大きいような例が沢山あればよいが、このような使いやすい例は極めて少ない。それで連日降雨の場合は累計雨量として用いるほかに、連日降雨中の最大降雨日を単独でとりだして用いることとした。

水位としては間ゲキ水圧計より低い場合には記録がなく、また豪雨の場合は水位上昇が大で測定範囲をこえたために最大値のとれていないものもある。また水位上昇量をとる場合は、降雨の前後の水位が明確なことが必要であるが、これに利用できるデータも数が限られている。

以上のような考え方で各間ゲキ水圧計について降雨量と水位との関係を示したのが図-12である。これをみると上層の水位のうち、斜面下方の切取面近くのP<sub>1</sub>は降雨量が増大しても水位はほとんど増大しない。また第2年度に設置したP<sub>2</sub>は豪雨時の記録が少なすぎるので傾向がはっきりしない。この2つを除いてあとはほぼ降雨量に比例して水位が増大することがわかる。

また降雨量と水位上昇との関係は図-13のようにあらわされる。この場合上層のP<sub>1</sub>~P<sub>4</sub>の水位上昇は間ゲキ水圧計の設置位置が高すぎるか、あるいは常時中間流がないためかはっきりしないが、

上昇前の水位がとれていないのが多いので記録はほとんど利用できないが、下層のP<sub>5</sub>~P<sub>7</sub>については広い幅にわたって分布しているので解釈しにくい点もあるが、一番変動の大きいP<sub>5</sub>のデータから水位上昇も降雨量に比例して直線的に増大すると考えてよいのではないと思われる。

以上のように水位も水位上昇も降雨量に比例するような結果が得られたが、水位そのものよりも水位上昇の方が降雨量に比例すると考える方が合理的であると思われる。そのように考えると水位上昇特性はその点の特有のものと考えて計算を容易にすることができる。実際に観測記録をみても

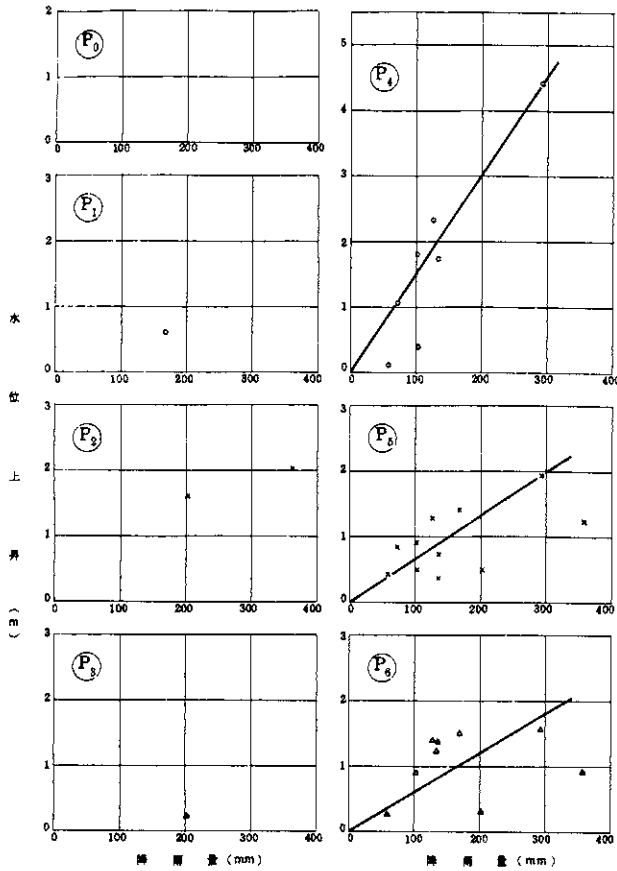


図-13 降雨量と水位上昇との関係

地下水の流動は非常に複雑であって、同じ断面の上下で水位は一致しないし、昇降の割合も異っている。通常考えるように不透水層上の透水層の中を流れるような模式では代表されないことがわかる。それで水位上昇特性をその点に付随した特有な性質と考える方がその後の取扱い方が容易であるし、また観測データに合致していると考えられる。

日雨量に対するその水位上昇係数を  $K$  とすれば、

図-13から  $P_4 \sim P_6$  の  $K$  の値は表-3のように求められる。

つきに水位

表-3 水位上昇係数  $K$  の値

| 間ゲキ水圧計 | $K$ m/mm/day |
|--------|--------------|
| $P_4$  | 0.0150       |
| $P_5$  | 0.0067       |
| $P_6$  | 0.0060       |

低下の傾向をしらべてみる。降雨のない期間の水位低下は図-14(a)~(c)に示すとおりであって、2カ年の記録を通して図-15に示すようなそれぞれ1つの曲線であらわされることがわかる。したがって水位低下速度はそれぞれ水位のみの関数として示される。この水位低下曲線の形の決定には一応基底流出として経験的に求められた指数式<sup>3)</sup>

$$Q = Q_0 \cdot e^{-at}$$

が考慮されるが、流量と水位との関係がタンク孔からの流出に類似すると考えて

$$v \propto \sqrt{2gH}$$

で与えられるとすると、水位低下の時間経過は

$$H = H_0 \cdot e^{-at}$$

であらわされる。これは水位と時間とが半対数座標で直線になることを意味するが、これは今回のデータで、たとえば  $P_4$  についてしらべてみると図-16に示すとおりであって成立しないことがわかる。

それで既成知識から離れてこの水位低下に最もよく適合する曲線をさがしてみると

$$H = \frac{b}{t+a} - c \quad (1)$$

の双曲線形の関係式が見出された。  $P_4 \sim P_6$  について上記の式の係数を求めるとつぎのようになる。

$$P_4 : H = \frac{46.0}{t-t' + 7.80} + 1.80$$

$$P_5 : H = \frac{13.1}{t-t' + 43.4} - 0.35$$

$$P_6 : H = \frac{21.6}{t-t' + 7.87} - 5.80$$

ここに、  $H$  は m、  $t$  は日であらわすものとし、  $t'$  は修正日数で  $t = t'$ 、  $H = H_0$  の1組の値から求めることができる。なお  $P_5$  は1本の曲線とはならず、下方で折曲るのは基底流の影響が入るためと思われるが、これはここではとり上げないこ

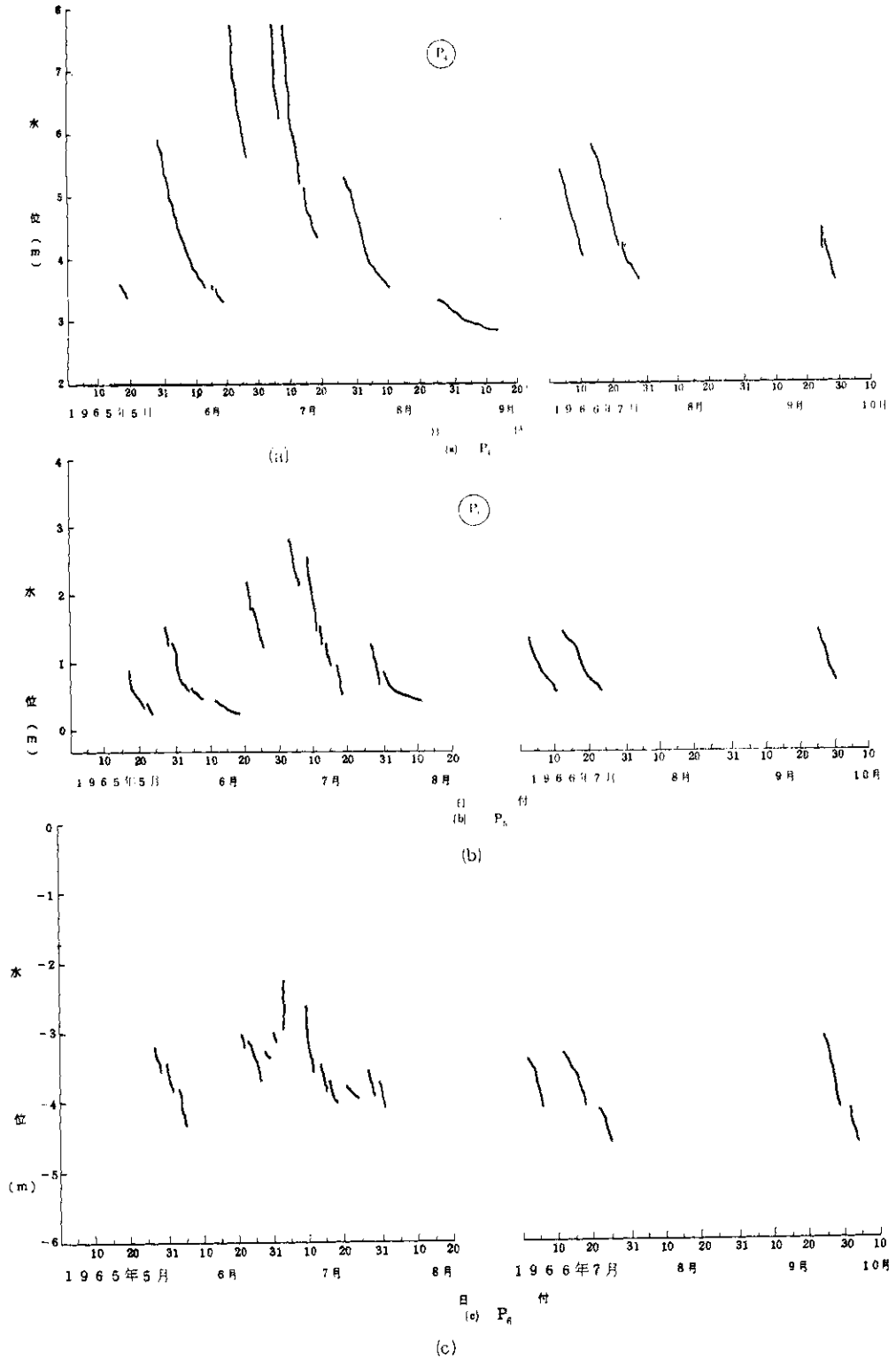


図-14 降雨のない場合の水位低下の傾向

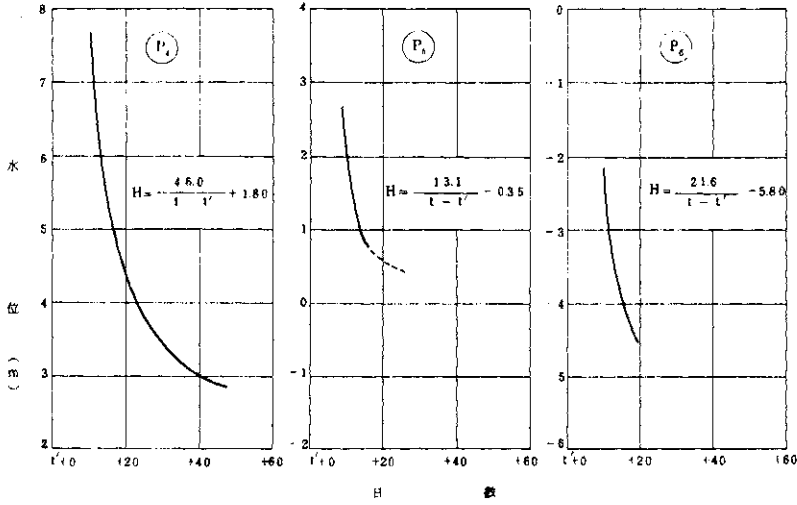


図-15 水位低下曲線

とにする。

以上のことから、降雨による水位の上昇と降雨終了後の水位低下は上昇については

$$\frac{dH}{dt} = K \cdot R(t) \quad (2)$$

下降については

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{b}{(t+\alpha)^2} = -\frac{1}{b}(H+C)^2 \quad (3)$$

で与えられるので、降雨の断続による水位昇降の方程式をつぎのように組立てることができる。

$$\frac{dH}{dt} = KR(t) - \frac{1}{b}(H+C)^2 \quad (4)$$

ここで

$$H+C=h \quad (5)$$

と置くと次式が得られる。

$$\frac{dh}{dt} = KR(t) - \frac{h^2}{b} \quad (6)$$

これを基本方程式として取扱ってゆくこととする。もちろんここでこまかく考えればいろいろの問題がある。

水位の変化は降雨の浸透によるだけでなく、他の多くの要素が影響する。地表流出、蒸発作用、気圧の変化、外力の作用、地震の影響などが関係することは当然考えられるが、表土にき裂が多ければ

地表流出は少ないとみてよいし、その他の影響は降雨の浸透に比較すれば桁が違ふと思われる、また不確定要素が多いので、今回は考慮しないことにした。また水位上昇が降雨に応じてただちに生じるのではなく、遅滞時間を考慮することが必要であるが、ここでは日雨量をとっている関係で、ピークがそれほどにずれてはいること、またいつピークが生じるかということではなく、降雨によってどれだけ水位が上がるかという上昇量そのものの大きさを考えているので、これも考慮しなく

てもよいと考えられる。

式(6)は修正水位  $h$  と降雨強度  $R$  との関係でつぎの4つの場合に分けられる。ただし  $R$  は日雨量で1日ごとに考えるときは常数として取扱うことができる。

I)  $KR - \frac{h^2}{b} > 0$  これは降雨量が大きき水位

が上昇する場合である。この場合の解は

$$\frac{dh}{bKR - h^2} = \frac{dt}{b}$$

$$\frac{1}{2\sqrt{KR}} \log \frac{\sqrt{bKR} + h}{\sqrt{bKR} - h} = t + \alpha$$

$$\frac{\sqrt{bKR} + h}{\sqrt{bKR} - h} = \exp\left\{2\sqrt{\frac{KR}{b}}(t + \alpha)\right\}$$

これより

$$h = \sqrt{bKR} \tanh \sqrt{\frac{KR}{b}}(t + \alpha) \quad (7)$$

ただし  $\alpha$  は積分常数であって、 $t=0$  のとき  $h=h_0$  とすれば、 $\alpha$  は次式で求められる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{b}{KR}} \tanh^{-1} \frac{h_0}{\sqrt{bKR}} \quad (8)$$

II)  $KR - \frac{h^2}{b} = 0$  これは降雨と水位低下と

が釣り合って、水位の変化がない場合である。この時の水位は

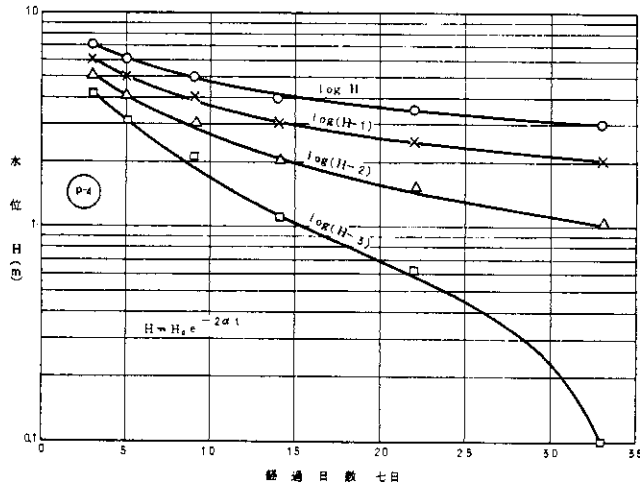


図-16 水位低下曲線に指数式が適合しない例

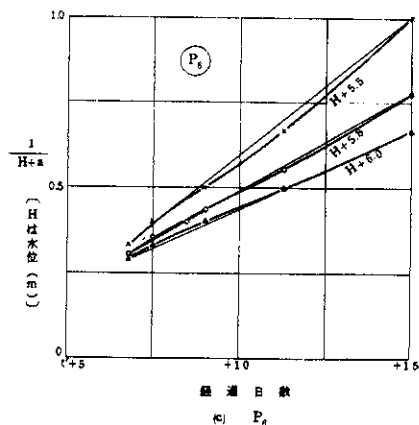
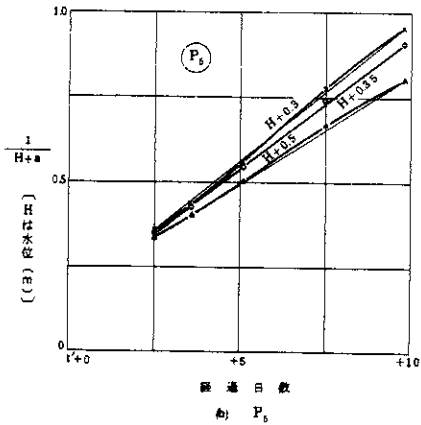
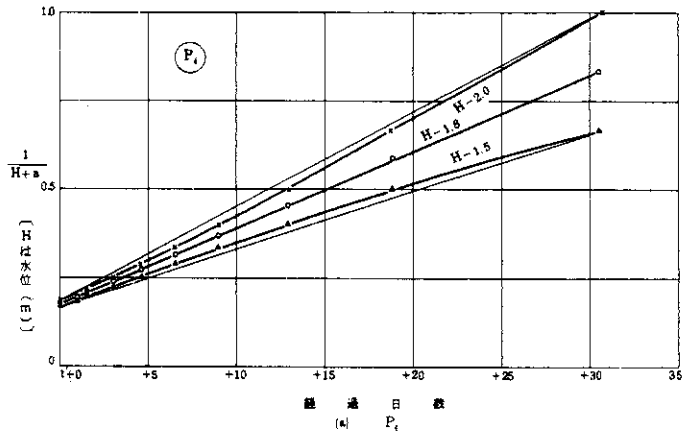


図-17 水位低下曲線に双曲線形が適合する例

$$h = \sqrt{bKR} \quad (9)$$

III)  $KR - \frac{h^2}{b} < 0$  これは降雨があるにもかかわらず水位が低下する場合である。  
この時の解は

$$h = \sqrt{bKR} \coth \sqrt{\frac{KR}{b}} (t + \alpha) \quad (10)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{b}{KR}} \coth^{-1} \frac{h_0}{\sqrt{bKR}} \quad (11)$$

IV)  $R=0$  すなわち無降雨の場合である。  
 $t=0$  のとき  $h=h_0$  とすれば

$$h = \frac{h_0 b}{h_0 t + b} \quad (12)$$

以上の(7)~(12)式により降雨量と水位に応じて水位変化を求めることができる。

ここで長初に測定データから仮定した条件を一応検討してみる。データとしては  $P_1$  を用いることとする。

まず水位上昇は降雨強度(日雨量)のほか当初水位にも影響されるが、当初水位が2, 4, 6 mのときの水位上昇量を日雨量に対してプロットすると図-18のようになり、当初水位の影響はきわめてわずかであることがわかる。また図-18は日雨量300 mmまでであるが、ほとんど直

線をなしていることがわかる。日雨量が1,500 mmまでと考えると図-19のようにわずかに曲るだけで、実質的には直線と考えても差支えない程度のものである。これは地下水流動による水位低下の速度が降雨による水位上昇の速度に比べてはるかに小さいためであるといえよう。それゆえ当初の仮定として降雨強度(日雨量)に比例して水位が上昇するとしたのはおおむね妥当な考えであるといえよう。

以上の式を用いて、例として昭和40年6月18日から7月15日までの水位を計算すると図-20のようになり実測水位に近い値が得られ、そのほかに計器の測定範囲をこえた個所の水位も推定できることになる。

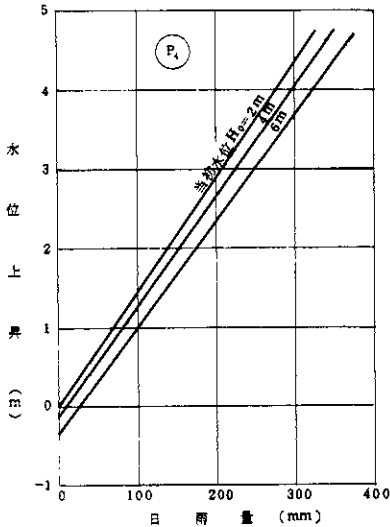


図-18 当初水位が水位上昇に与える影響

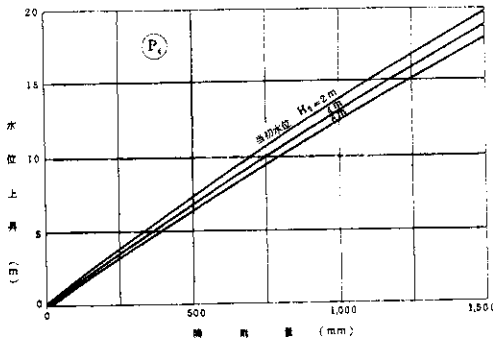


図-19 水位上昇の直線性

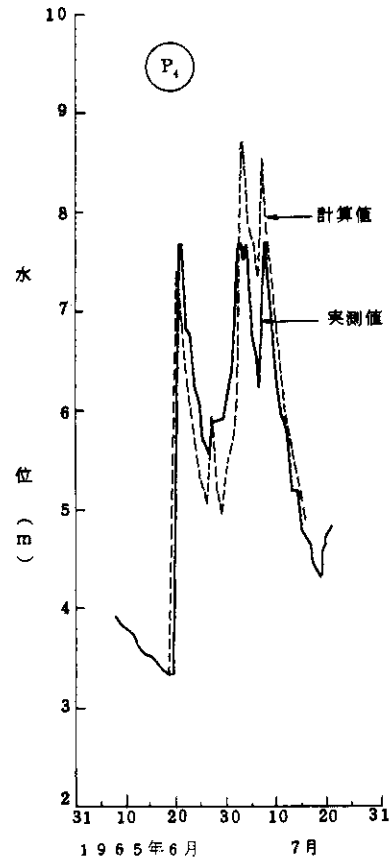


図-20 水位昇降の計算値と実測値との比較

### 3.2 安定度の検討

ヒズミ計や傾斜計の記録からみて、観測期間中にこの斜面が危険な状態になったことはないといえる。しかし降雨時の間ゲキ水圧の変動から考えて、どのような状態になっても安全であるといえることはできない。また観測期間中にどの程度危険に近づいたかを検討することも必要である。それで間ゲキ水圧の変動による斜面の安全率の低下を算定し、危険降雨量を推定することを試みてみる。

前述のように水位の昇降特性がその点特有のものと考えてよいことがわかったが、上層と下層の測定水位が一致しないことから、地下水流は同一透水層内で水平流動をするのではなく、順当に上方から下方へ流れたり、また下方から上方へ流れる被圧流になったりして複雑な流動をしていると考えなければならぬ。それゆえ各点の水位は降雨量に比例して上昇し、その割合はその点特有の係数に従うとすれば、種々の降雨量に対する水位

を各測定点で定めることができる。これらの値を上下結んでその断面の水位曲線とし、測定点間は直線的に変化するとすれば、断面の各点の水位を求めることができる。図-21には連続降雨量が250, 500, 750, 1,000mmの4つの場合について示してある。

土質試験結果から土層を2層に分け、三軸圧縮試験(圧密非排水)で求めた土質常数として表-4の数値を用いるものとする。

表-4 安定計算に用いた土質常数

| 層区分 | C kg/cm <sup>2</sup> | φ       | γ t/m <sup>3</sup> |
|-----|----------------------|---------|--------------------|
| 第1層 | 0.24                 | 24° 00' | 1.45               |
| 第2層 | 0.26                 | 14° 45' | 1.73               |

安定計算は最も普通に用いられている次式によることとする。

$$F_s = \frac{\sum \{ c' \ell + \tan \phi' (W \cos \alpha - U \ell) \}}{\sum W \sin \alpha} \quad (13)$$

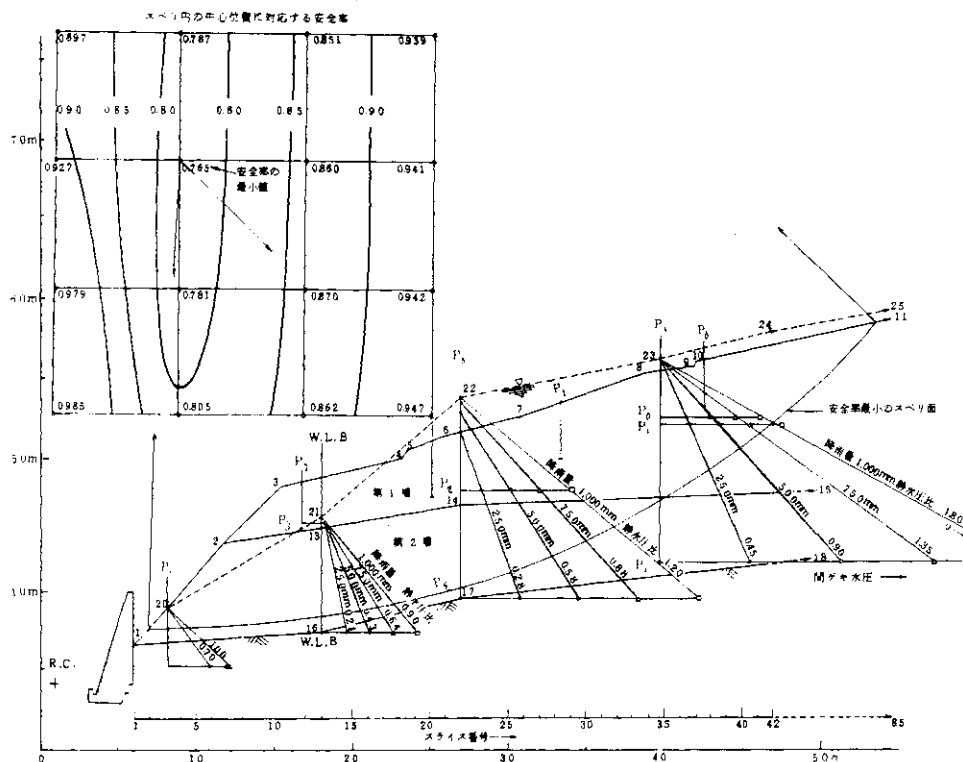


図-21 降雨量1,000mmの場合の安定解析図



ただしこの式の第2項は摩擦による抵抗であって、間ゲキ水圧が増大しすぎると負になるので、その場合はこの項を無視して粘着力による抵抗のみを考えた。

計算の方法は図-21に示したように横軸にスライス番号をつけ、任意点をスベリ円の中心として、スライス番号を通る鉛直線と地表との交点を通る円をえがき、スベリ面が通る層の土質常数を用いて安定計算を行なう。そして考えられるもっとも深いスベリ面から、もっとも浅いスベリ面へとつきつきと動かして得られる同心円のスベリ面のなかで最小の安全率を求める。ついでスベリ円の中心を種々動かして同様な計算を繰返して行な

い、全体のなかから最小の安全率を決定する。この計算は電子計算機を使用して表-5のようなデータから多くのスベリ面の安全率を一度に計算した。スベリ面が深すぎる場合や図形をこえる場合にはその旨印刷され、計算は行なわれないようになっている。

降雨量によって最小安全率を与える円中心の位置は多少動くが、1例として1,000mm降雨に対する各中心位置の安全率を示すと図-21のようになり最小値は0.765である。前述の各降雨ごとの最小安全率を求めると図-22のようになり、これからこの斜面の危険降雨量は600mmということになる。また2カ年の観測期間中の最大連続

表-5 安定解析の電子計算資料と計算結果

1) ラインデータ

| 線番号 | 線名<br>(点-点) | 土の型 |
|-----|-------------|-----|
| 1   | 1-2         | 2   |
| 2   | 2-3         | 1   |
| 3   | 3-4         | 1   |
| 4   | 4-5         | 1   |
| 5   | 5-6         | 1   |
| 6   | 6-7         | 1   |
| 7   | 7-8         | 1   |
| 8   | 8-9         | 1   |
| 9   | 9-0         | 1   |
| 10  | 10-11       | 1   |
| 11  | 2-13        | 2   |
| 12  | 13-14       | 2   |
| 13  | 14-15       | 2   |
| 14  | 1-16        | 3   |
| 15  | 16-17       | 3   |
| 16  | 17-18       | 3   |
| 17  | 1-20        | -1  |
| 18  | 20-21       | -1  |
| 19  | 21-22       | -1  |
| 20  | 22-23       | -1  |
| 21  | 23-24       | -1  |
| 22  | 24-25       | -1  |

-1は水位面を示す。

2) ポイントデータ

| 点番号 | X (m) | Y (m) | 間ゲキ水圧<br>の静水圧比 |
|-----|-------|-------|----------------|
| 1   | 6.0   | 6.4   | 1.0(仮定)        |
| 2   | 11.3  | 12.6  |                |
| 3   | 15.4  | 16.7  |                |
| 4   | 23.1  | 18.6  |                |
| 5   | 23.6  | 19.2  |                |
| 6   | 25.8  | 20.0  |                |
| 7   | 30.8  | 21.2  |                |
| 8   | 38.4  | 23.9  |                |
| 9   | 41.6  | 24.4  |                |
| 10  | 41.8  | 24.7  |                |
| 11  | 90.1  | 34.6  |                |
| 12  | 0.0   | 0.0   |                |
| 13  | 17.8  | 14.2  |                |
| 14  | 27.0  | 15.7  |                |
| 15  | 90.1  | 17.8  |                |
| 16  | 17.8  | 7.6   |                |
| 17  | 26.8  | 9.6   |                |
| 18  | 90.1  | 16.0  |                |
| 19  | 0.0   | 0.0   |                |
| 20  | 8.2   | 9.2   | 1.0            |
| 21  | 18.0  | 14.6  | 0.9            |
| 22  | 27.0  | 22.6  | 1.2            |
| 23  | 39.8  | 24.9  | 1.8            |
| 24  | 46.5  | 26.5  |                |
| 25  | 90.1  | 35.4  |                |
|     | 90.0  |       | 1.8(仮定)        |

3) 土のデータ

| 土の型 | 湿潤密度<br>t/m <sup>3</sup> | 粘着力<br>kg/cm <sup>2</sup> | 摩擦角の tan        |
|-----|--------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1   | 1.450                    | 0.2400                    | (24°0') 0.4452  |
| 2   | 1.730                    | 0.2600                    | (14°45') 0.2633 |
| 3   | 1.730                    | 0.2600                    | (14°45') 0.2633 |

4) スベリ面のデータ 5) 計算結果

| スベリ<br>面中心<br>番号 | X(m) | Y(m) | 通<br>スライス番号 | 通<br>スライス番号 | 最<br>小<br>安全率 |
|------------------|------|------|-------------|-------------|---------------|
| 1                | 1.0  | 52.7 | 1-9         |             | 0.985(2)      |
| 2                | 1.0  | 60.7 | 1-9         |             | 0.979(2)      |
| 3                | 1.0  | 68.7 | 1-9         |             | 0.927(2)      |
| 4                | 1.0  | 76.7 | 1-9         |             | 0.897(2)      |
| 5                | 9.0  | 52.7 | 1-9         |             | 0.805(2)      |
| 6                | 9.0  | 60.7 | 1-9         |             | 0.781(2)      |
| 7                | 9.0  | 68.7 | 1-9         |             | 0.765(2)      |
| 8                | 9.0  | 76.7 | 1-9         |             | 0.787(2)      |
| 9                | 17.0 | 52.7 | 1-18        |             | 0.862(4)      |
| 10               | 17.0 | 60.7 | 1-15        |             | 0.870(4)      |
| 11               | 17.0 | 68.7 | 1-9         |             | 0.860(4)      |
| 12               | 17.0 | 76.7 | 1-9         |             | 0.851(4)      |
| 13               | 25.0 | 52.7 | 5-18        |             | 0.947(6)      |
| 14               | 25.0 | 60.7 | 3-25        |             | 0.942(6)      |
| 15               | 25.0 | 68.7 | 4-25        |             | 0.941(6)      |
| 16               | 25.0 | 76.7 | 5-25        |             | 0.939(6)      |

計201個。( )はスライス番号

記 スライス(分割片)の巾は1mの長さで全体で85個になる。

降雨量は昭和40年6月29日～7月2日の4日間の357.5mmであるが、このとき安全率は1.598から1.247程度にまで減じたと推定される。

観測を行なった多良地区が大災害を起した昭和37年には、災害直前の7月7日20時から7月8日8時まで766mmの降雨量を記録し、また7月に入ってからこのときまで累計1,500mmに達しているの、推定危険降雨量600mmは決して不自然な数値ではない。

ただし安定を左右するものに水位の増大と並んで土の強度があり、この両者の拮抗のうえに安定が托されているので、その信頼度を高めるにはより多くの地点での観測と綿密な土質調査とが是非とも必要であると痛感されるのである。

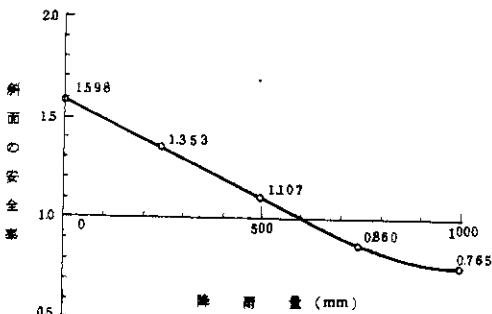


図-22 降雨量と安全率との関係

#### 4. 崩壊発生の予知と警戒

##### 4.1. 予知の方法

予知というのは場所と時期と規模の3つの要素を明示するの、なければ役に立たない。

降雨によるかけくずれの場所の予知については、土質調査と間ゲキ水圧の観測とから安定計算により危険状態の生起を推定するのが正攻法ではあるけれども、とくに土の強度に不確定要素の多い心配が多分にあるので、これのみに頼るわけにはいかない。しかし間ゲキ水圧の増減の激しい個所は、そうでない個所に比べて土の強度いかにかわらず安定度の変動の大きい所であるから、要注意個所の選択に間ゲキ水圧の観測を利用すれば、従来の土質、地質、地形、災害歴などからの判定から不適当なものを除去し、信頼度を高めることができる。

崩壊時期の予知には力の釣合関係で判断するよりも、斜面の動きそのものをとらえる方が適確である。斜面の移動や傾斜などがこれにあたるが、移動は崩壊の規模が大きくなるとそれに応じて崩壊までの移動量が大きくなり、また傾斜の変化は漸移的であつてかつ実測データ以外に利用し得るデータは得られないことなどから、いずれも困難を伴うものである。これらに比べると斜面のヒズミは崩壊の規模に関係しないこと、崩壊時期よりもかなり前に著しい変化を示すことなどが実験ならびに実測から知られているので、使い易い要素といえよう。

いままでの研究で種々の土についてのクリープ破壊試験の結果、時間—ヒズミ曲線で第2次クリープの直線部分が示す定常ヒズミ速度とクリープ破壊時間との関係が図-23に示すように両対数座標で直線であらわされることがわかっている。この関係は実験に用いた試料のみでなく、他の機関、あるいは外国で実施されたクリープ破壊試験結果ともよく適合し、また斜面崩壊実験の結果や斜面崩壊の実例の観測記録についても図-24に示すように妥当であると認められる。それゆえ要注意個所に観測に用いたような自記式ヒズミ計を設置して記録させれば、崩壊よりかなり前にヒズミが急激に増大し、このヒズミ速度から図の関係を使って崩壊時期を予知することができる。

規模については間ゲキ水圧変動の範囲からその大きさの概略を、また危険接近に伴って発生き裂の範囲および方向から適確な規模を知ることができる。

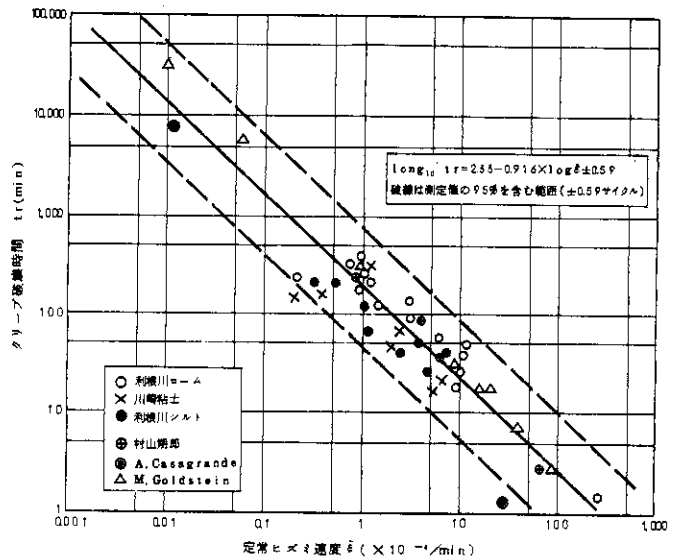


図-23 ヒズミ速度とクリープ破壊時間との関係

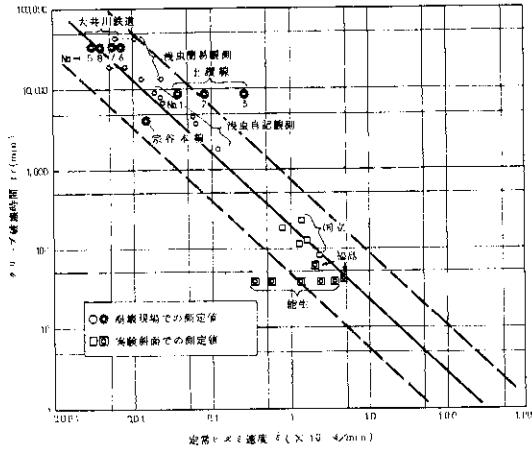


図-24 崩壊および実験斜面における測定値

#### 4.2 警戒と処置

以上のべたことは、観測を継続して行なえば、事前に崩壊を予知することが可能であるということであって、観測を行なわないで予知する方法は今のところないといってよい。要注意個所には自記式の間ゲキ水圧計を設置して水圧変動特性をしらべ、変動の少ない所は一応警戒対象から除外して埋設計器を撤去して他に転用し、できるだけ多くの地点の記録をとるようにする。水圧変動の著しい所はその傾向の把握できるまで記録をとり、危険降雨量を一応算定しておいて警戒の目安とする。そしてその降雨量の再現期間の短いものは間ゲキ水圧計のほか自記式ヒズミ計、それもできれば直接記録式でなくて遠隔記録式のものを設置して警戒に当るのがよい。

調査個所数がばく大な場合は計器設置が非常に困難なことは事実であるが、危険個所発見に間ゲキ水圧計を用い、不要個所は撤去してつぎつぎと転用すれば、ある程度の数量があればかなり多く調査ができると思われる。またヒズミ計は、とくに重要な個所のみにすれば、これも数がある程度制限される。最近故障のない優秀な記録器が安価に入手できるようになったので、このような観測はそれほど困難ではないと思われる。そして直接の警戒に加えて、降雨時のがけの挙動の観測データをとって将来の判定の資料をそろえることに努力がはらわれるならば、がけについての知識が現在の空白状態から急速に脱して、その実態を明らかにする時期も遠からず望むことができるのではないと思われる。

降雨によるがけくずれの発生は他の斜面崩壊に比して事前に予知することはむずかしい。それは降雨がある程度継続してから安定な斜面が不安定状態に入り、安全率は急激に低下し、降雨がさらに継続すると危険状態となって崩壊するので、常時は安定か不安定か見わけがつかないし、また不安定状態に入ると斜面ヒズミが急激に増大するが、これも降雨中のことなので巡回監視はむずかしい。しかも不安定状態に入ってから崩壊までの時間があまり長くはないので、時間的余裕がない。それに加えて、警戒を要する個所が多すぎると手がまわりかねるなどで、いまだちに十分な警戒態勢を敷くことは

困難であるが、少しずつでも着手していかなければ解決の道は開かれぬ。とくに重要な個所からでも着手していく必要があるのではないと思われる。

崩壊が予知された場合はどのような処置がとれるかという点、崩壊を防止することはできなくても、住民の退避とか列車の運行停止、道路交通の遮断などで被害を最小限に止めることができよう。

また予知の信頼度がかなり高い場合、とくに間ゲキ水圧の増大個所は危険性が大きいという実例が多くでてきた場合は、事前に排水工事、補強工事などで崩壊を防止することができよう。

#### 5. むすび

がけくずれの運動特性の一ばんを明らかにするために長崎本線72K000付近、里ずい道出口の斜面に各種計器を設置して降雨時の斜面の挙動を観測した。この期間は2カ年であったが、今までに未知の事実がかなり明らかになり、間ゲキ水圧の増減の規則性などもわかったので、安定計算を行なって危険降雨が求められるようになった。この方法は斜面の安定度検討の正攻法であるが、不確定要素もあるので、間ゲキ水圧の変動の大きい所を要注意個所としてマークし、重要な地点には斜面ヒズミ計を設置して警戒すれば、予知にも役立たせることができる。

現地の観測に当っては佐賀県防災課、太良町役場、国鉄西部支社、門司鉄道管理局、および鹿島保線区の関係各位から多大の便宜と協力をいただいた。ここに付記して深く謝意を表す。

文 献

- 1) 国鉄施設局土木課編(1963):業務便覧,  
67
- 2) 熊野弘(1963):梅雨前線大雨による長

崎本線の災害, 鉄道土木, 5巻6号, 30 -  
33

- 3) Todd, D.K. (1959): Ground Wa-  
ter Hydrology, John Wiley, 155