

# 間隙水圧計による施工時と施工後の盛土斜面の安定管理

菅原紀明, 和田健一

## Observational Control of Embankment Slope during and after Construction using Piezometer

Noriaki Sugawara and Kenichi Wada

### Abstract

It is well known that an embankment even with gentle slope breaks down due to high pore pressure of its soils. In embankment slope consisted of Kantou-loam, when high speed construction is carried out by a given height, embankment slope moves down laterally and then any additional embankment construction is impossible to perform. And also, there are often experienced that embankment slope collapsed with or without rain fall and earthquake in about few or several tens of years after construction. In such a unstable slope is commonly located in such specific geographical condition that embankment slope is constructed in close to natural slope where ground water table is expected to be higher.

This paper at first presents a control method using piezometer for estimating slope stability based on the results during construction with soil of Kantou-loam. Secondly, examples of embankment slope collapsed without heavy rain fall over few years after construction are shown and the specific conditions of such failed slopes are discussed.

From these results it is concluded that both short and long term stability of embankment slope should be estimated by observational method using piezometer. And it is also proposed that new instrument called "cup-type maximum pore pressure measurement together with stand pipe" is the best way for long term observation of pore pressure of embankment in term of cost, durability and reliability.

KEY WORD : slope stability, observational control, embankment, pore pressure, piezometer

### 要 旨

盛土斜面は、その勾配が緩くても、盛土内の間隙圧が上昇することによって崩壊することが良く経験される。関東ロームを盛土材とする盛土斜面を急速に施工すると盛土荷重の増加に伴って発生する間隙圧によって、斜面が側方に移動し、ある高さ以上の盛土が困難になる。また、斜面完成後、数年から数十年経過して降雨時(時には降雨に関係なく)や地震時に崩壊することがある。これらの地点は、地山にすり付いた箇所が非常に多く、地山からの地下水の影響を受けている可能性が高い。

本報文では、まず、関東ロームを盛土材とする盛土斜面の施工時の安定管理法を提案した。次いで、完成後、数年から数十年経過した盛土が、崩壊した事例の特徴を示し、盛土内の間隙圧に着目した安定管理の重要性を示した。さらに、安価で長期間の計測が可能な間隙水圧計(カップ式最高水位計)を用いた既設盛土斜面の安定管理の考え方を提案した。

キーワード : 斜面安定, 安定管理, 盛土, 間隙圧, 間隙水圧計

## 1 はじめに

東京西部の多摩地区の宅地造成工事では、盛土材に関東ロームを使用することが多い。関東ロームを盛土材として急速に盛土した場合、盛土高が8~10mに達すると、盛土斜面が側方に移動し（以下「はらみ出し」という）、それ以上の施工ができなくなることが、しばしば発生した。筆者らは、施工中の盛土内部の間隙圧を継続的に計測し、測定結果に基づいて盛土斜面の設計に必要な盛土の工学的性質を求め、はらみ出し現象の対策と安定管理方法を検討してきた<sup>1) 2)</sup>。

一方、盛土完成後、数年から数十年経過した盛土斜面が突然崩壊することがある。崩壊箇所は、地山にすり付いた盛土が非常に多く、地山からの地下水の影響を受け、大きな間隙圧を持つ可能性が高い。

また、地震時にも谷部を盛土した箇所や地形のコンターが平行な斜面の沢筋を盛土した箇所、造成盛土の変状が発生するケースが多い。これらの箇所は、集水地形にあたり、盛土内の水位が高いことが知られている。

盛土完成後、盛土の変状や崩壊が発生する箇所は、造成前の地形的な特徴からおおよそ推定することができる。これを確実に知るためには、経年的な盛土の間隙圧を計測し、安定管理を行うことが重要である。

本報文では、まず、関東ロームを盛土材とする盛土斜面の施工時の安定管理法を提案した。これは、間隙水圧計で計測した盛土斜面内の間隙圧分布をもとにし、簡単なすべりモデルを仮定して、斜面の平均勾配とすべり面上の平均間隙圧係数の関係から安定性（はらみ出しの発生）を評価するものである。さらに、一個の間隙水圧計を用いた盛土斜面の簡便な安定評価法を提案した。

次いで、完成後、数年以上経過した既設盛土斜面が、降雨時に崩壊した事例、降雨に関係なく崩壊した事例、地震時に崩壊した事例の特徴を示し、盛土内の間隙圧に着目した安定管理の重要性を示した。さらに、安価で、長期の計測が可能な間隙水圧計（カップ式最高水位計）を用いた既設盛土斜面の安定管理の考え方を提案した。

## 2 施工時の盛土斜面の安定管理（関東ロームを盛土材とする高盛土）

### 2・1 斜面のはらみ出し挙動

関東ロームを盛土材料とした盛土工事において、8~10m程度の高さの盛土を数ヶ月の間に盛立てようとすると、盛土斜面の中央部がはらみ出し、それ以上の施工が困難になることがしばしば経験される。

図-1は、緩傾斜の盛土が施工中にはらみ出した事例とその対策工を示したものである。この事例は、はらみ出しが問題になった当初のもので、後述するような排水ブランケットを設けていない。

この盛土は、関東ロームの既設盛土上に、同じ関東ロームを盛土材として、約4mの二次盛土を行ったものである。図中の破線まで盛土した時点で、盛土斜面が下方にゆっくりと変動し、まるで粘性の高い液体が流れるようであった。また、斜面頂部の線と平行に無数の細かい亀裂が発生し、盛土斜面の頂部には、段差が生じた。はらみ出しを生じたときの平均法勾配は、約1:8である。一見、安定上問題がなさそうな極めて緩い勾配の盛土斜面であっても、盛土自重による圧縮に伴って高い間隙圧が発生すれば、はらみ出しを生じうる事例である。

この盛土は、図-1(b)のように、盛土斜面の表層を撤去し、サンドドレーンを打設して盛土内部の間隙圧の消散を図ったところ、当初計画断面の高さまで、盛土を施工することができた。

図-2は、多摩ニュータウンの2地区において、盛土斜面内部に設置したキャサグランデ型間隙水圧計で計測したはらみ出しを生じた時の間隙圧の分布<sup>2)</sup>である。

A盛土は、多摩地区の造成を開始した当初の盛土である。近くで採取される細砂を排水ブランケット材として使用し、関東ロームを盛土材として、高さ12mの計画で盛土を開始した。盛土開始後、およそ2ヶ月半が経過し、盛土高さが8.5mになった時点ではらみ出しが発生した。はらみ出しが始まった時点の間隙圧と地中変位の測定結果を図-2(a)に示す。

また、B盛土は、碎石(C-40)を排水ブランケット材とし、関東ロームを盛土材としたものである。盛土高が約8.5mになったときに、法面の中央部がはらみ出したので、施工を中止した。その直後に、盛土の横断方向に3側線を設けて合計16個の間隙水圧計を設置し、間隙圧の測定を開始した。その時の間隙圧分布は、図-2(b)に示すとおりである。

これら結果によれば、斜面下の盛土で最も高い間隙圧を示す部分は、排水ブランケットに挟まれた盛土のほぼ中央部にあたっている。

図-3は、はらみ出しを生じたときの変位の発生状況を前述とは別の斜面で示したものである。この盛土は、谷部を埋立てるように高さ14mの盛土を計画したもので、1月23日に高さ約12mに達した時点で、2段目法面の中央部がはらみ出した。図-3(b)に示す位置に変位杭を設置し、平面的な変位の発生状況を示したものが図-3(c)である。変位は、盛土中央部で大きく、地山に近い側面

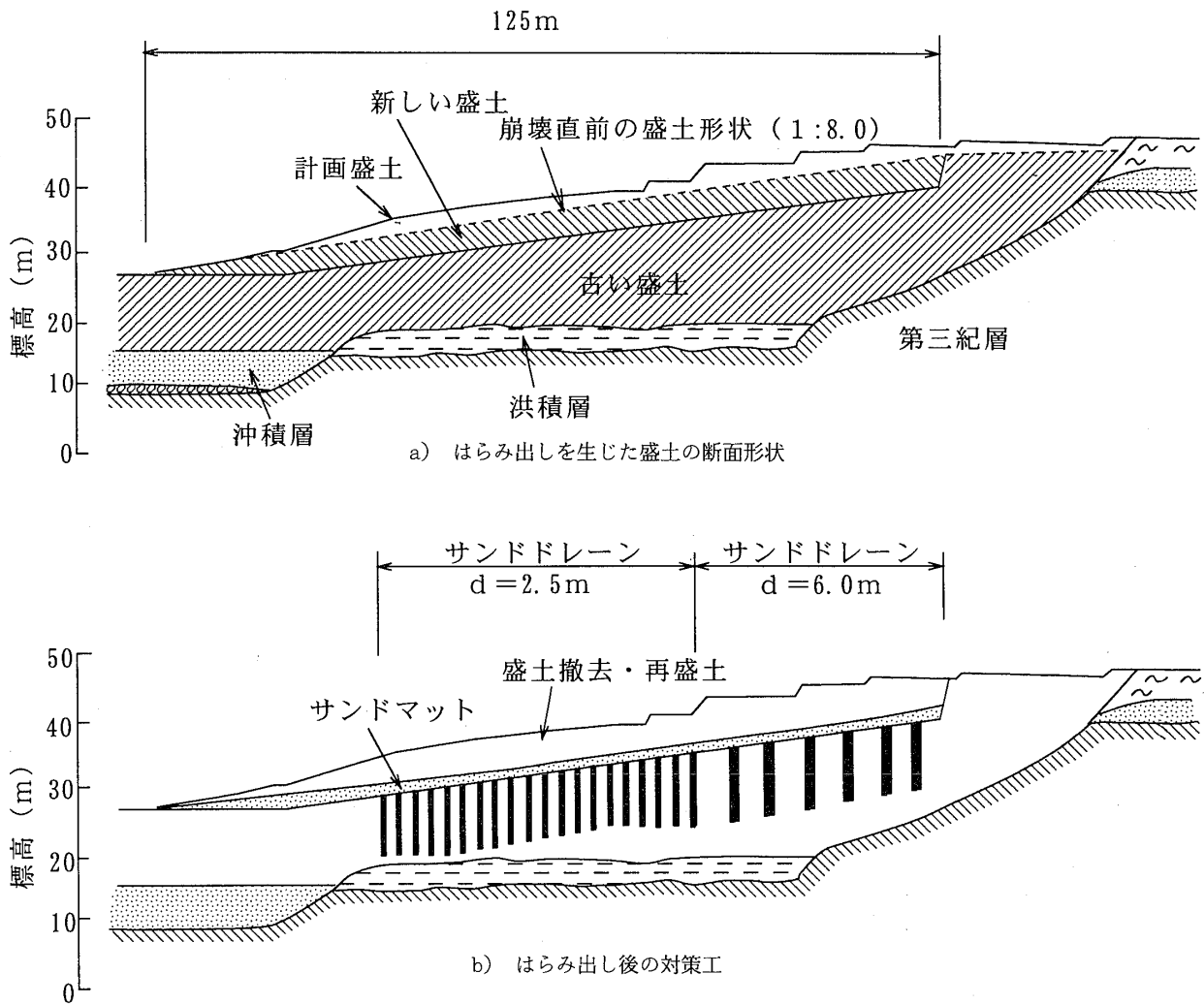


図-1 緩い傾斜の盛土が施工中にはらみ出した事例  
 Fig. 1 Example of embankment slope collapsed during construction

では小さい。また、変位は瞬時に発生するのではなく、極めてゆっくり発生している。

2・2 施工中にはらみ出した盛土斜面の単純モデル

上記のようなはらみ出しを生じた盛土斜面を観察すると、ある特定のすべり面を境界として土塊が移動するようには見えず、盛土の天端部分を含む盛土背面の全土圧が、斜面部を押し出しているような印象を受ける。そこで、斜面背面の全土圧Pに対するせん断抵抗力Rの比をはらみ出しに対する安全率と考える。なお、はらみ出しの対策としては、排水ブランケット工法が有効であり、一般化しているので、ここでは、排水ブランケットによる排水層がある場合を前提として考える。

図-4には、盛土斜面のはらみ出しに対する安定を評価する単純化したモデルを示す。その特徴は、以下のと

おりである。

- ①斜面の移動部分を斜面の頂部と想定すべり面に囲まれた三角形のブロック（図-4のABC）を仮定する。
- ②滑動力Pを斜面の頂部を通る鉛直面に作用する間隙圧と有効土被りに比例する側圧を加算したものと仮定する。
- ③すべりに抵抗する力Rは、排水層に挟まれた盛土部分の中心を通る水平面を仮定する。

はらみ出しに関する安全率は、次式で表わされる。

$$F = \frac{R}{P} = \frac{(W-U) \tan \phi'}{\frac{1}{2} K_r \gamma z^2} \dots \dots \dots (1)$$

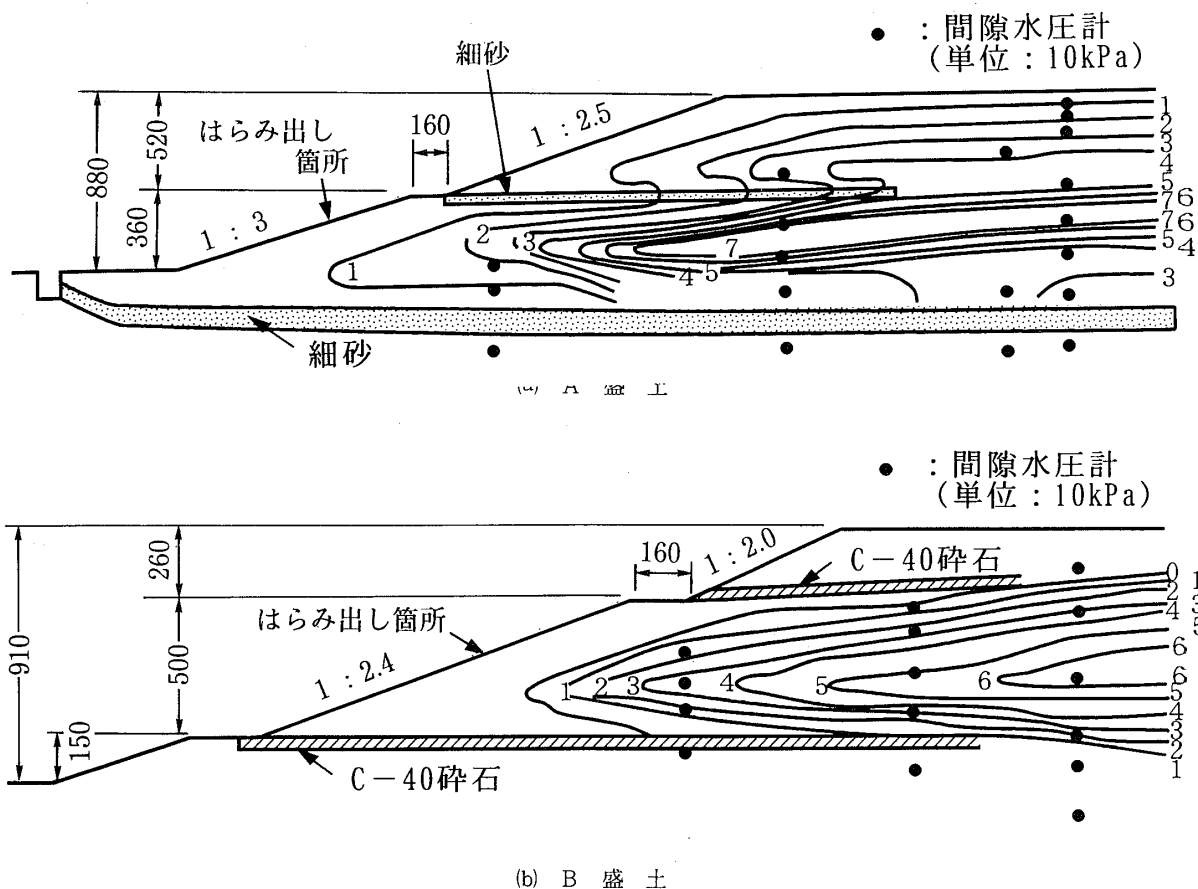


図-2 はらみ出しが発生した盛土斜面の形状と間隙圧  
Fig.2 Pore pressure distribution during slop heaving

ここで、

- W : すべり面より上部の盛土の全重量 (=  $\gamma A$ )
- U : すべり面の間隙圧の合計 (=  $\int u dx$ )
- u : すべり面部分の間隙圧
- $K_f$  : はらみ出し時の側圧係数
- $\gamma$  : 盛土の単位体積重量
- z : すべり面と盛土表面の鉛直距離

2・3 はらみ出し時の側圧係数 $K_f$ の評価

盛土の頂部からzの深度のはらみ出し時の側方全土圧は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 P_{zh} &= (\text{間隙圧}) + (\text{有効水平土圧}) \\
 &= u + a_f (\gamma z - u) \\
 &= \{(1 - a_f) r_{ui} + a_f\} \gamma z \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

ここで、

- u : 間隙圧
- $a_f$  : 土圧係数
- $r_{ui}$  : 間隙圧係数 (=  $u / \gamma z$ )

したがって、はらみ出し斜面の滑動力Pは、以下のよ

うになる。

$$\begin{aligned}
 P &= \int P_{zh} dz \\
 &= \int \{(1 - a_f) r_{ui} + a_f\} \gamma z dz \\
 &= \frac{1}{2} K_f \gamma z^2 \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$K_f = (1 - a_f) r_{ui} + a_f$$

実際の盛土斜面について、 $a_f$ を求めるのは困難である。また、 $r_{ui}$ を正確に測定するのは繁雑である。ここでは、式(1)において、安全率1.0のときにはらみ出しが生じるものと仮定し、実際にはらみ出した盛土斜面に関して逆解析を行い、 $K_f$ を求めた。なお、盛土の $\gamma$ 、 $\phi'$ は、盛土材の試験結果等<sup>2)</sup>に基づき、次のように設定した。

$$\begin{aligned}
 \gamma &= 14.7 \text{ kN/m}^3 \\
 \phi' &= 33^\circ \quad (c' = 0)
 \end{aligned}$$

はらみ出しを生じた3箇所の盛土斜面のデータと逆算した $K_f$ を表-1に示した。平均値は、 $K_f = 0.86$ と求められる。

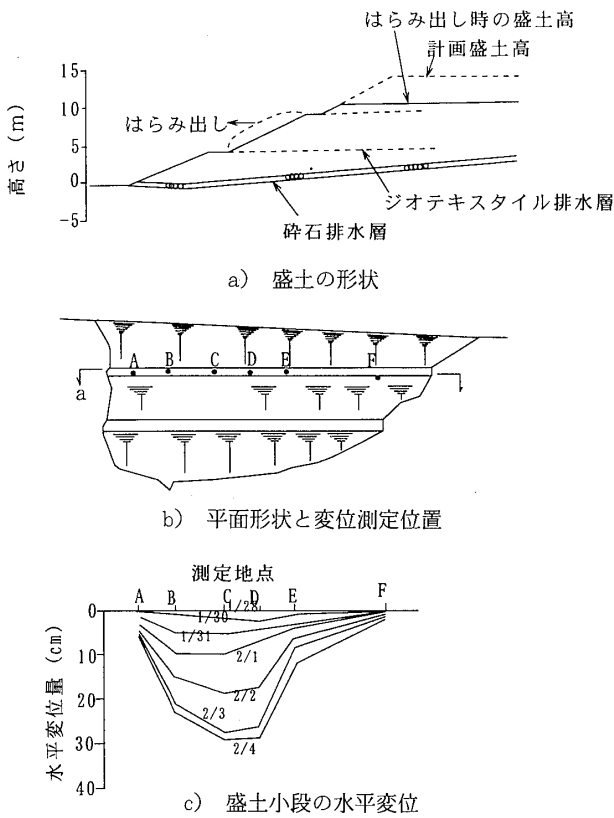


図-3 はらみ出した盛土斜面の水平変位  
Fig.3 Lateral displacement during slope heaving

表-1 側圧係数  $K_f$  の逆算値  
Table 1 Coefficient of lateral pressure estimated from observed pore pressure

場所	W(kN)	U(kN)	$z^2$ (m <sup>2</sup> )	$K_f$
I	129.5	68.6	64.0	0.83
II	68.2	29.4	38.4	0.88
III	140.1	103.2	36.0	0.89
平均				0.86

2・4 限界平均間隙圧係数の評価

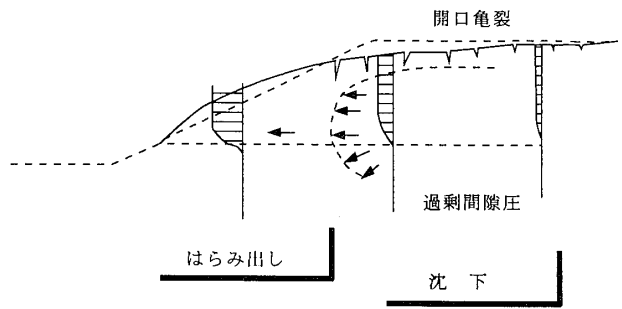
盛土斜面の平均勾配を  $\cot \beta$  とすれば、図-4 のモデルではらみ出しによって移動すると仮定した三角形の土塊の全重量  $W$  は式(4)で表わされる。

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot z^2 \cdot \cot \beta \quad \dots \dots \dots (4)$$

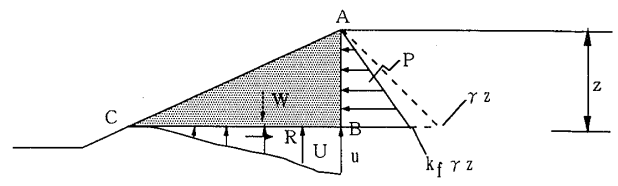
すべり面全体の平均間隙圧係数を  $r_{uT}$  とし、次式で表わされるものとする。

$$r_{uT} = \frac{U}{W} \quad \dots \dots \dots (5)$$

式(4)、式(5)を式(1)に代入すれば、はらみ出しの安全率



a) はらみ出しを生じた盛土斜面の模式図



b) 平面すべりを考えた盛土斜面の力の釣合い

図-4 はらみ出しを生じた盛土斜面の単純モデル  
Fig.4 Model of slope heaving

は、次式で表わされる。

$$F = \frac{\cot \beta (1 - r_{uT}) \tan \phi'}{K_f} \quad \dots \dots \dots (6)$$

はらみ出し時の平均間隙圧係数を  $[r_{uT}]_c$  (限界平均間隙圧係数) とする。  $F = 1$  を式(6)に代入すると、  $[r_{uT}]_c$  は式(7)で表わされる。

$$[r_{uT}]_c = 1 - \frac{K_f}{\cot \beta \cdot \tan \phi'} \quad \dots \dots \dots (7)$$

式(7)に  $K_f = 0.86$ 、  $\phi' = 33^\circ$  を代入すると次式を得られる。

$$[r_{uT}]_c \cong 1 - \frac{1.33}{\cot \beta} \quad \dots \dots \dots (8)$$

式(7)は、任意の勾配の盛土斜面がはらみ出しを生じる時の限界平均間隙圧係数を示している。盛土材に多摩地区の関東ロームを使用した場合には、式(7)は式(8)で表わされる。したがって、盛土斜面内部の間隙圧を計測し、式(5)で求めた平均間隙圧係数が、式(8)で求めた  $[r_{uT}]_c$  を上回れば、その盛土斜面ははらみ出しを生じると判定することができる。

2・5 限界平均間隙圧係数の現場観測に基づく検証

1979年以来、工事中の盛土斜面の安定管理を多数経験し、はらみ出しを生じた盛土斜面とはらみ出しを生じなかった盛土斜面の間隙圧データが多数得られている。

図-5は、盛土斜面の平均勾配 ( $\cot \beta$ ) と平均間隙圧係数 ( $r_{uT}$ ) の関係をプロットしたものである。平均間隙圧係数は、盛土完成時またははらみ出し発生時の排水層に挟まれた盛土中間部の想定すべり面について求めた値である。

図中には式(7)に  $K_f = 0.86$  を代入し、 $\phi'$  を  $30^\circ \sim 39^\circ$  まで変化させたときの  $[r_{uT}]_c$  と  $\cot \beta$  の曲線を併記した。図-5は、適切な  $K_f$  値と  $\phi'$  の組み合わせを設定すれば、式(7)が現場の盛土斜面の安定度を評価する基準式として、合理的であることを示している。関東ロームを盛土材とした盛土斜面の安定管理では、はらみ出した盛土斜面の変動が極めてゆっくりであり、多少の斜面のはらみ出しがあっても実害が少ないことから、式(8)の関係を採用するのが妥当と考える。

2・6 盛土法肩直下の間隙水圧計のみによる盛土斜面の安定管理方法

これまで、盛土斜面内に多数の間隙水圧計を設置して安定管理を行ってきた。安定管理の経済性や多数の間隙圧データから間隙圧の分布を求め、平均間隙圧係数  $r_{uT}$  を算出する手間を考えると、より少ない間隙水圧計の観測値で判定できることが望ましい。

キャサグランデ型間隙水圧計を用いて測定した経験によれば、スタンドパイプの水頭が測定位置の盛土高(斜面または盛土の天端面)を超えると、盛土斜面のはらみ出しが発生することが多い。

図-6に示すように盛土断面の法肩直下のライン上で、

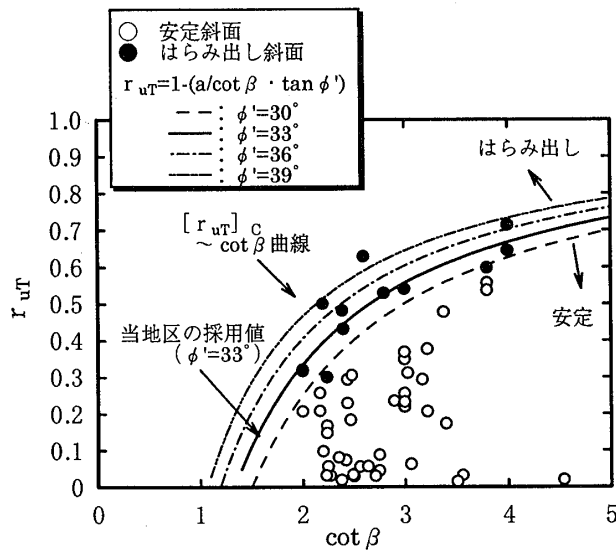


図-5 盛土斜面の平均間隙圧係数 ( $r_{uT}$ ) と斜面勾配の関係  
Fig.5 Relationship between mean pore pressure coefficient ( $r_{uT}$ ) and gradient of slope.

排水ブランクットに挟まれた中央部に間隙水圧計を設置することとし、その間隙圧から求めた間隙圧係数を  $r_{ui}$  とする。平面的に一定の範囲の盛土高がほぼ同じになるように施工することを前提とすれば、盛土斜面の平均間隙圧係数  $r_{uT}$  と法肩位置の間隙圧係数  $r_{ui}$  は、正の相関があると考えられる。

また、盛土速度を一定と仮定すれば、図-7に示すように、最終断面における安全率が最も小さくなる。したがって、最終断面における法肩直下の排水ブランクットに挟まれた中央部に設置した間隙水圧計の測定値のみで、その盛土斜面の安定管理を行うことができるものと考えられる。

図-8は盛土の法肩直下に設置した間隙水圧計の測定値のみを選択し、その間隙圧係数  $r_{ui}$  と盛土の平均法勾配  $\cot \beta$  の関係をプロットしたものである。盛土の法肩直下の限界間隙圧係数  $[r_{ui}]_c$  と平均法勾配  $\cot \beta$  の関係は、式(7)にある係数を乗じた式(9)の形式で表わされるものと考えられる。

$$[r_{ui}]_c = m - \frac{n}{\cot \beta} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$m, n$  : 定数

現状、かなり大胆ではあるが  $[r_{uT}]_c$  と  $\cot \beta$  の関係は、図-8に示した曲線(式(10))を提案する。

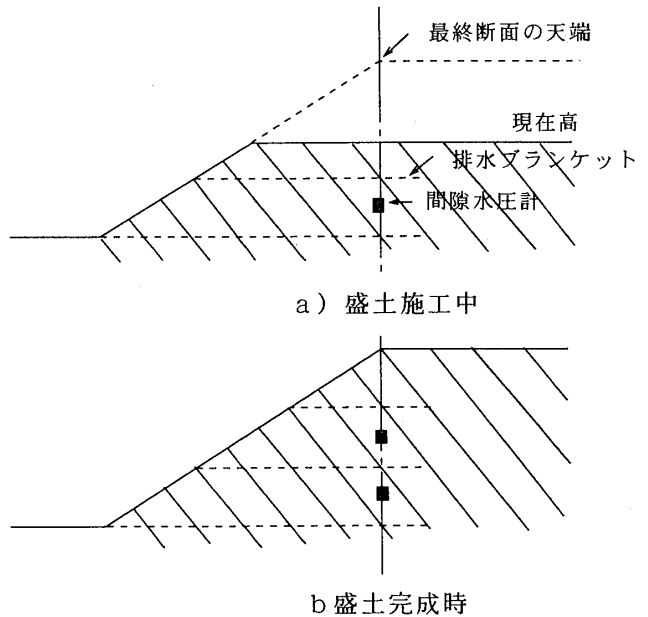


図-6 盛土斜面の安定管理を目的とした間隙水圧計の配置  
Fig.6 Arrangement of piezometers for estimation on embankment slope stability.

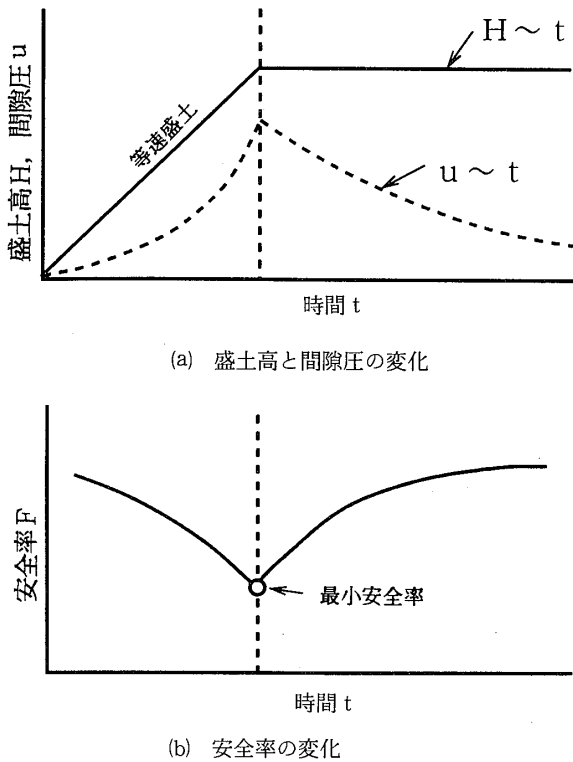


図-7 等速盛土施工時の斜面の安全率  
Fig.7 Safety factor of embankment slope during construction

$$[r_{ui}]_c = 1.02 - \frac{1.36}{\cot \beta} \dots\dots\dots (10)$$

2・7 間隙水圧計選定上の留意点

現場での間隙水圧測定には、キャサグランデ型間隙水圧計とニューマチック型間隙水圧計を使用している。

排水層に挟まれた中間部に設置した間隙水圧計に着目し、中断せずに盛土工事を行っている期間の間隙圧の測定値と上載圧の関係をプロットしたのが図-9である。

同図には以下に示す Hilf の式<sup>3)</sup>より、非排水条件下の間隙圧を求め、上載圧との関係曲線を併記した。圧縮ひずみ  $\Delta$  は、標準圧縮試験で得られた  $e \sim \log P$  曲線から盛土の圧密荷重に対応する値をとったものである。

$$u_o = \frac{p_a \cdot \Delta}{(V_a + h V_w - \Delta)} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

- $\Delta$  : 圧縮ひずみ ( $= \Delta e / 1 + e_o$ )
- $u_o$  : 非排水条件下の間隙圧
- $p_a$  : 盛土施工箇所の大気圧
- $V_a$  : 締固め直後の土の間隙空気量
- $h$  : 水中の空気溶解度 ( $= 0.0198$ )
- $V_w$  : 締固め直後の土の間隙内の水の量

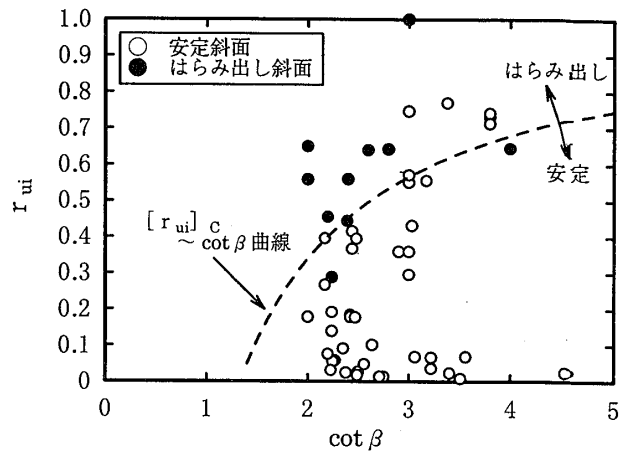


図-8 法肩に設置した間隙水圧計の測定値と限界間隙圧係数の推奨曲線  
Fig.8 Proposed correlation for slope stability by single piezometer data

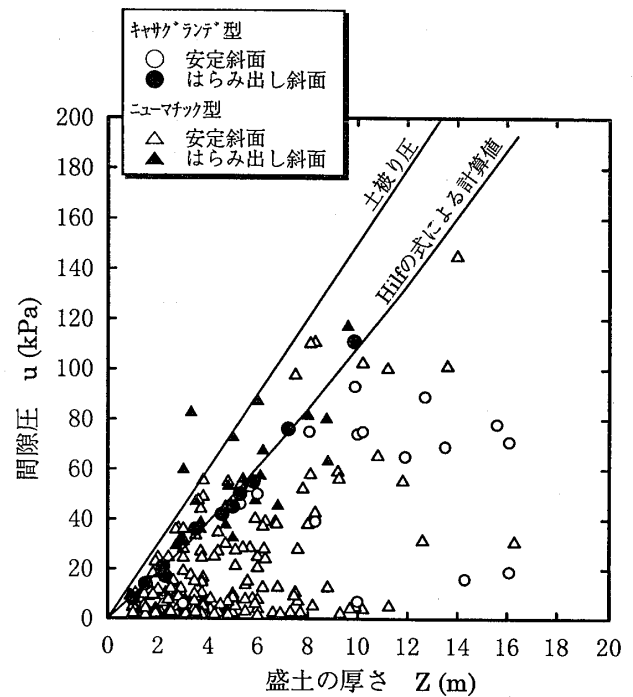


図-9 工事中の間隙圧と盛土厚の関係  
Fig.9 Relationship between pore pressure and thickness of embankment during construction

キャサグランデ型間隙水圧計で計測した間隙圧は、斜面がはらみ出した箇所と変状のなかった箇所とを区分している。これにより、はらみ出した斜面の間隙圧は、Hilfの曲線に著しく近似していることがわかる。

これに対し、ニューマチック型間隙水圧計で測定した間隙圧は、Hilfの曲線を上回る値が多く見られ、図-9から、最大50kPa程度大きい値が計測されていることが

わかる。これは、キャサグランデ型間隙水圧計とダイアフラム式間隙水圧計（ニューマチック型間隙水圧計や電気式間隙水圧計）の構造の差によるものと考えられる。すなわち、ニューマチック型間隙水圧計では、後述するようにフィルターの内に入り込んだガス圧を計測している可能性がある。

不飽和土の間隙圧とその測定方法について、Bishop<sup>4)</sup>、Penman<sup>5)</sup>は、次のような研究成果を発表している。

『不飽和土の中の空気圧は間隙水圧よりも常に高く、間隙水圧と空気圧を含めた間隙圧は常に間隙水圧よりも高い。また、電気式間隙水圧計で測定された低い圧力領域では土被り圧の2倍に達するほどの大きな値を示すことがある。』『ボーリング孔に設置する間隙水圧計の中で最も簡便な方法はキャサグランデのスタンドパイプであり、直接に圧力を知ることができる。気泡はスタンドパイプの中を上昇するので、自動的に脱気される。』（Bishop 1969）

『土の間隙から侵入するガスがフィルタの中に拡散しなければ、間隙水圧計は土の中の間隙水圧を測定するはずである。しかしながら、もし、ガスがフィルタの中に入り込んだならば、土の中のガス圧だけを測定し始めることがある。電気式間隙水圧計と同様に、ニューマチック型間隙水圧計はフィルタユニットに入り込んだガスを追い出せないで、不飽和土においては間隙空気圧を示している可能性がある。』（Penman 1980）

不飽和土の間隙水圧計測定方法として最も信頼の高い方法は、ハイドロリック型（または、ツイン・チューブ型とも呼んでいる）であるといわれているが、測定するための付帯的な装置を多く必要とし、高価である。それに次いで信頼の高い方法は、キャサグランデ型であり、多くのフィルダムの管理計測に使用されてきた。ダイアフラム式間隙水圧計は、浅い深度の不飽和土では間隙空気圧を測定し、実際の間隙水圧よりも大きな空気圧を示すことがあるが、安定管理上は、安全側の結果を導くことになる。ダイアフラム式間隙水圧計の中では、非金属材料で構成され、ゼロシフトによる問題発生のおこらないニューマチック型間隙水圧計が優れているといえる。

以上のように、不飽和土である盛土の施工時の安定管理には、キャサグランデ型の間隙水圧計を使用するのが望ましい。ニューマチック型の間隙水圧計を使用する場合には、フィルター内に入り込んだガスの圧力を計測している可能性があることに留意する必要がある。

### 3. 施工後の盛土斜面の安定管理

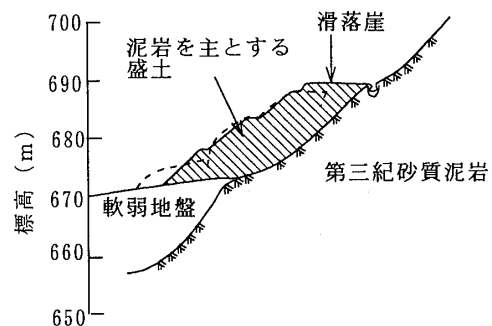
#### 3.1 崩壊した盛土斜面の特徴

地形・地質が複雑で急峻な山地が多いわが国では、台風や梅雨などの降雨時に盛土や切土の崩壊が多数発生している。降雨による斜面崩壊に関する研究は多数行われている<sup>6)</sup>。盛土や切土の降雨時の崩壊の要因はさまざまであるが、侵食や劣化の促進に起因するものを除けば、降雨の浸透に伴う盛土の間隙圧の変化や強度の低下によってある程度説明が可能と考えられる。

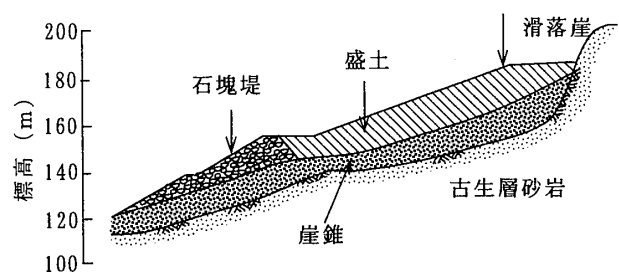
一方、崩壊前に特別多量の降雨がなくても崩壊する場合がある。図-10<sup>7)</sup>は、その例である。

図-10(a)は、盛土完成後3年経過した時点で、盛土法面が崩壊し、盛土上の道路が約1m陥没した例である。地山は透水係数の小さな泥岩からなるもの、法尻まで到達した浸潤水により斜面が崩壊したもので、その陥没に至る経過は、ある日突然発生したものであった。

図-10(b)は、山岳地の谷部を埋めた盛土斜面が崩壊した事例である。崩壊した土砂は、約300m流れ出し、下流の家屋一軒を飲み込んで5人が死亡した。



a) 完成後3年経過して崩壊した盛土



b) 下流へ300m流れ出した盛土

図-10 完成後の盛土斜面の崩壊例

Fig. 10 Example of collapsed embankment after construction



これまでの経験から盛土の破壊形態を図-11に示した。図-11(a)は、集中豪雨などの多量の雨が降った際に発生する表層崩壊であり、本報の検討対象から除く。図-11(b), (c)は、降雨時でなくても、崩壊することがある。

多くの場合、地山の透水係数は、盛土の透水係数より大きく、相対的には盛土部分が地山の地下水の浸透・浸出を遮断する作用をする。地山に浸透した地下水は、下方に向かって浸透するが、下方に不透水層（粘性土の地山など）があると地下水の流れが遮断され、遮断面部分の間隙圧が上昇する。この間隙圧が盛土を押すと同時に、盛土内部の間隙圧の上昇に伴うせん断抵抗力を減少させ、盛土斜面の安定に関する釣合いが保てなくなると斜面が変動を開始すると考えられる。

すなわち盛土の安定度を低下させる最も大きな要因は次の2点と考えられる。

- ①斜面を構成する盛土の間隙圧の上昇
  - ②不透水性の盛土材による地山地下水の塞き止め
- 安定を損う時間（不安定継続時間）は、盛土斜面の地

盤構造、地下水環境、降雨量とその継続時間によって変化し、斜面の不安定継続時間に依りて斜面が移動する。斜面の移動量は、大小さまざまで、斜面の表面にその移動による変形が確認できる程度の大きさから、まったく認められない程度の大きさである場合もある。後者のような微小な移動であっても、それを繰返すことは、盛土内部を順次ルーズにすることになり、ある限界を越えると地震や少ない降雨または雨が降らなくても、地山の浸透水圧によって急激な崩壊が発生すると推定される。

すなわち、斜面の安定度は常に変化しており、斜面の移動は、盛土の間隙圧がある限界を越える時に起ると考えられる（その時の間隙圧を限界間隙圧とよぶ）。斜面の崩壊は、決してある一時期の不安定条件に遭遇したときのみには起るのではなく、変動の重なりがある時期の崩壊を決定づけるものと考えられる。したがって、既設盛土の安定性を評価するためには、経年的に、盛土内の間隙圧がどこまで上昇するかを確認することがポイントになる。

### 3・2 地震時に崩壊した盛土斜面の地下水位

宅地の大規模造成と期を同じくして、1978年宮城県沖地震以降、地震による宅地造成盛土の被害が着目されるようになった。

平成7年兵庫県南部地震でも、多数の盛土が変状を生じた。この地震による被害の特徴は、傾斜の緩い造成地で斜面変状を起こしている例が多いことである。これらの地点は、丘陵の各筋を盛土し、ひな段状に造成した地区である。

図-12<sup>8)</sup>は、地震後の災害復旧のために行ったボーリングの結果から被災した盛土の地下水位を整理した結果である。調査時期が渇水期であったにもかかわらず、地下水位が高く、地表面下4m以内にあるものが全体の80%近くある。

地震時の盛土の安定性評価方法は、別途議論する必要があるが、地下水位が高いほど、安定性が低下するのは明らかである。したがって、地震時の安定性を評価する上でも、盛土の地下水位（間隙圧）を確認することが重要なポイントになる。

### 3・3 既設盛土の安定管理の方法

前述のように、既設盛土の不安定箇所は、造成前の地形や盛土の形状を調査することにより、ある程度、推定することができる。これらの地点の安定度を評価するためには、盛土中の間隙圧の測定を行い、限界間隙圧を越える状態が発生したかどうかをチェックする方法が有効

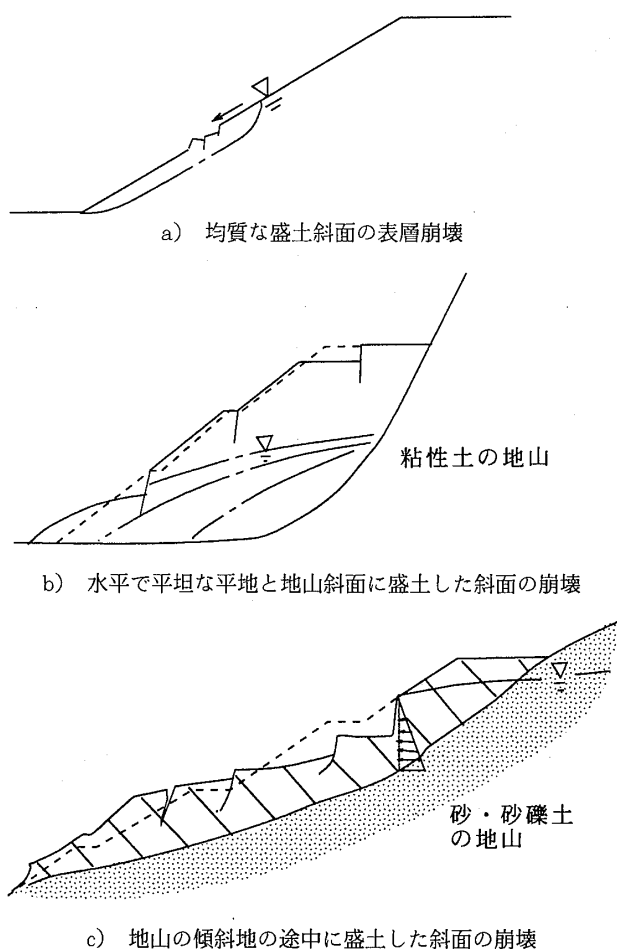


図-11 盛土斜面の破壊形態  
Fig.11 Damage pattern of embankment slope

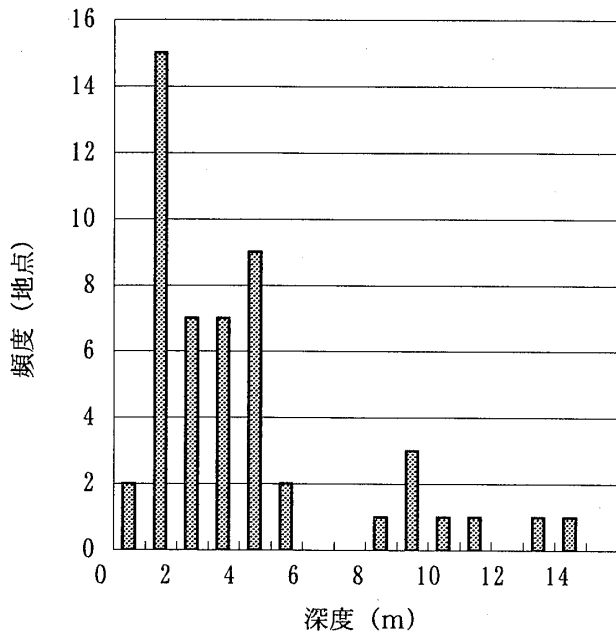


図-12 兵庫県南部地震で被災した造成盛土の地下水位  
Fig.12 Giroud water level in collapsed embankment by Hyogo-ken Nanbu earthquake

である。

盛土斜面の安定に関する安定率は、一般に次式で表わされる<sup>9)</sup>。

$$F_s = m - n r_u \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

$F_s$  : 安定に関する安全率

$m, n$  : 盛土斜面の形状と強度パラメータによって決まる定数

$r_u$  : すべり面の平均間隙圧係数

$m, n$  は盛土斜面の形状と強度パラメータ (地震を扱う場合は地震力を含む) などにより決まる定数である。平常時の盛土内の水位の変動に関しては, Bishop and Morgensternが,  $m, n$  を決定する図表<sup>10)</sup> を示している。

筆者らは, 盛土斜面の間隙圧を安価に, 長期間計測することを目的として, 簡易な間隙水圧計を作製した。これは, キャサグランデ式オープンピエゾメータを設置し, ピエゾメータの示す最高水位をカップ式最高水位計で測定するものである。カップ式最高水位計の構造と設置概要を図-13に示す。

カップ式最高水位計については, 上沢<sup>11) 12)</sup>, Brand et al<sup>13)</sup> が報告しており, それを改良して新しいカップ式最高水位計を考えた。前述のようにオープンピエゾメータには土中よりガスが侵入してくる。このガスに伴う気泡がスタンドパイプに留まると, 原位置の間隙水圧に対

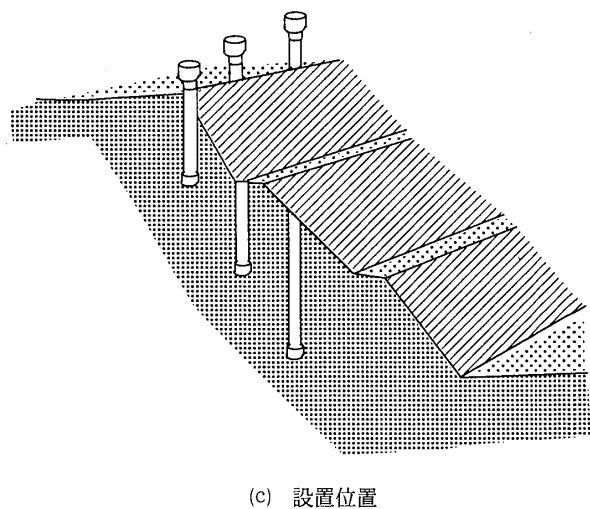
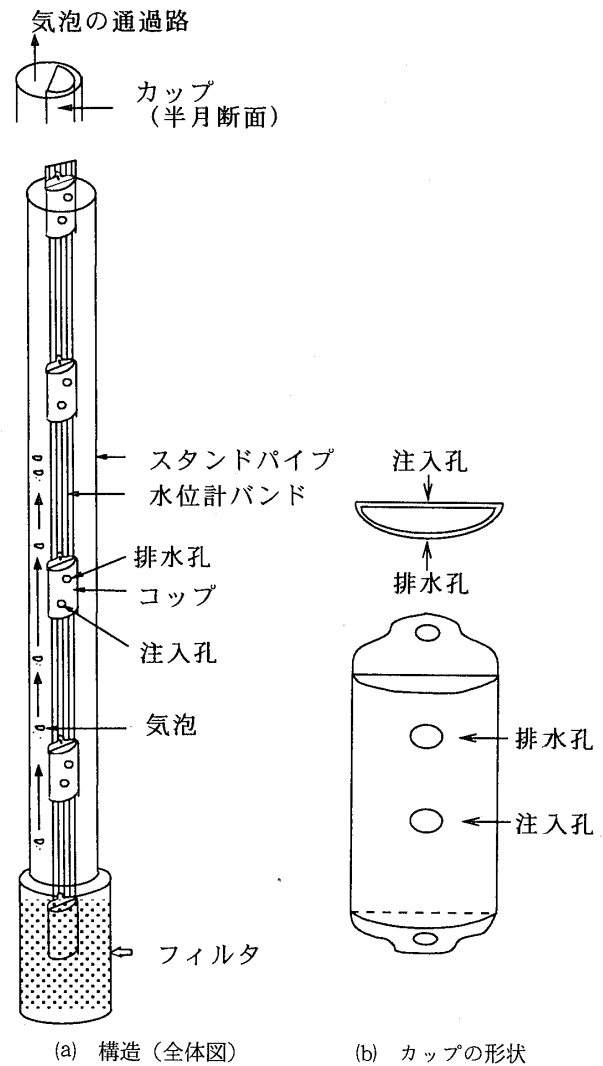


図-13 カップ式最高水位計の構造と設置位置  
Fig.13 Form of cup type tester and arrangement of piezometer.

応する正しい水位を示さない。

スタンドパイプ内の気泡を速やかに排出できるようにするためには、スタンドパイプにカップを挿入した状態で直径6 mm以上の空隙を確実に確保する必要がある。その条件を確保するために、新たにカップを設計した。カップの断面を円形断面から半円径断面に変更し、スタンドパイプの半断面が確実な空隙を確保できるようにした。

ピエゾメータは、斜面の法肩に深度を変えて数本設置する。カップ式最高水位計は、斜面の限界間隙圧係数に相当するスタンドパイプの水位近傍にカップの設置密度を高めて取り付け、限界間隙圧近傍の測定精度を高める。間隙水圧の測定は、年に数回行い、その期間の最高水位を記録する。

この測定結果より、所定の限界間隙圧を越える水頭を示す斜面があった場合、いずれは崩壊する斜面であると判断し、安定対策工事の設計を行うのが望ましい。地震時の崩壊を除けば、前述したように、盛土斜面は短時間の安定を損なう条件に遭遇しただけではただちに崩壊することはなく、不安定な状態の繰返しに伴う緩みが重なって、最悪の崩壊に至ると考えられる。既設の盛土斜面の安定管理は、原則的には、盛土中の間隙圧の観測結果による安定評価を採用する他に方法がない。この意味で、継続した長期間の間隙圧測定が必要である。

#### 4 結 語

本論文では、施工時ならびに施工後の盛土の変状事例と間隙圧の関係を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 関東ロームを主な材料とした盛土の施工時の安定性評価方法と安定管理方法について
  - ①盛土斜面のはらみ出し現象は、盛土内に発生する間隙圧と関連付けられる。
  - ②はらみ出しの有無は、排水ブランケットにはさまれた盛土の中央部にすべり面を仮定した斜面崩壊モデルで説明できる。
  - ③はらみ出しを生じるときのすべり面の平均間隙圧係数は、盛土の材料が一樣であれば、斜面勾配の関数で与えることができる。
  - ④盛土法肩直下の排水層にはさまれた中間点の間隙圧係数 ( $r_{ui}$ ) は、すべり面の平均間隙圧係数 ( $r_{UT}$ ) より常に大きく、両者には正の相関がある。
  - ⑤  $r_{ui}$  を計測すれば、合理的かつ経済的にはらみ出しの有無を管理することができる。
  - ⑥間隙圧の計測は、キャサグランデ型の間隙水圧計を

使用するのが望ましく、ニューマチック型の間隙水圧計を使用する場合には、土中の間隙から侵入するガスの影響を考慮する必要がある。

#### (2) 施工後の盛土の安定管理方法について

- ①施工後の盛土の崩壊は、常時、地震時を問わず、盛土の間隙圧が上昇しやすい箇所と不透水性の盛土材により地山の地下水が塞き止められる箇所が発生しやすい（降雨時の表層崩壊と地震時の液状化による崩壊を除く）。
- ②盛土斜面の安定性は、常に変化しており、盛土の間隙圧が限界間隙圧を超えたときに、変状移動が蓄積し、ある限界を超えると崩壊に至ると考えられる。
- ③盛土斜面の間隙圧を安価に、長期間計測するために、カップ式最高水位計を作製した。カップ式最高水位計は、オープンピエゾメータに侵入するガスが排除できる形状を有している。

#### 参 考 文 献

- 1) 菅原紀明 (1986) : 関東ロームを使用する高盛土の実用的な設計法, 応用地質年報, No.8, pp.1-23
- 2) 谷口 巖・中山 哲・高野和一・菅原紀明 (1997) : 間隙水圧計測定結果による盛土の工学的性質の評価, 土と基礎, Vol.45, No.11, pp.13-16
- 3) Hilf, J. W. (1948) : Estimation construction pore Pressure in rolled dams, Procs. of 2nd ICSMFE, Rotterdam, Vol.3, pp.234-240
- 4) Bishop, A. W. (1969) : Pore pressure measurements in the field and in the laboratory, Specialty Session, Procs. of 7th ICSMFE, Mexico, Vol.3, pp.427-444
- 5) Penman, A. D. M. (1980) : Insurumentation requirements for earth and rockfill dams, Symposium on Problems and Practice of Dam Engineeering, Bangkok, pp.183-209.
- 6) 例えば、降雨による地盤災害に関する研究委員会 (1997) : 降雨による地盤災害に関する研究報告書 (社) 地盤工学会
- 7) 菅原紀明 (1997) : 盛土・切土工事の事前調査のポイント, 第7回新しい材料・工法・機械講習会講演概要—最新の切土・盛土工法の現状と設計施工のポイント—, (社) 土木学会土木施工研究委員会のポイント—, (社) 土木学会土木施工研究委員会のポイント—, (社) 土木学会土木施工研究委員会のポイント—
- 8) 阪神大震災調査委員会 (1996) : 阪神・淡路大震災報告書 (解説編), (社) 地盤工学会
- 9) Bishop, A.W. (1955) : The use of the Slip

Circle in the Stability Analysis of Slopes,  
Geotechnique, Vol.5, No.1, pp.7-17

- 10) Bishop, A.W. and Morgenstern, N. (1960) :  
Stability Coefficients for Earth Slopes,  
Geotechnique, Vol.1, No.4, pp.129-150
- 11) 上沢 弘・安田祐作・毛受貞久 (1972) : 簡易間ゲ  
キ水圧計 (鉄研1型) による盛土法面の監視, 鉄  
道技術研究所報告No.830
- 12) 上沢 弘・安田祐作 (1975) : 簡易間ゲキ水圧計  
(鉄研2型) による災害のり面の監視, 鉄道技術研  
究所報告No.75-135
- 13) E.W. Brand, G.W.Borrie and J.M. Shen  
(1983) : Field measurements in Hong Kong  
residual soils, International Symposium  
on Field Measurements in Geomechanics,  
Zurich, pp.639-648