

間隙水圧計による盛土斜面の安定管理

Stability Assessment of Embankment under Construction Using Piezometers

谷 口 嶽 (たにぐち いわお)

東京都多摩市整備本部宅地造成事務所

中 山 哲 (なかやま てつ)

東京都建設局道路建設部

高 野 和 一 (たかの かずいち)

東京都多摩市整備本部南多摩区画整理事務所

菅 原 紀 明 (すがわら のりあき)

応用地質(株)計測技術研究所

1. まえがき

東京都多摩丘陵では、多摩ニュータウン開発に伴い、これまで680 haに及ぶ宅地を造成した。主な盛土材料は関東ロームであり、初期の段階では盛土斜面の著しい形状（これを『はらみ出し』と呼んでいる）に遭遇した。盛土斜面の安定管理と合理的な排水層の設計を目的として、これまでの18年間に、600個以上の間隙水圧計を設置し、はらみ出した盛土斜面の間隙圧を基にした解析を行ってきた。

安定管理にあたって最も重要な条件は、間隙圧のような単一のパラメーターを用いて簡便な基準を設けることである。そこで、はらみ出し現象に対して非常に簡便なモデルを仮定し、より実際的で経済的な盛土斜面の安定度評価方法を提案する。

2. 斜面のはらみ出しの挙動とそのモデル

2.1 はらみ出した斜面の挙動

図-1にはらみ出した盛土斜面の断面の一例を示す。盛土で埋め立てた平坦地に杭基礎で支持した擁壁を建設した後、その背面を頂部まで埋め戻したとき、擁壁が水平方向に約15~20 cm押しだされた。そこで、その背面部分の埋戻し基礎地盤の地盤改良を行うために、その部分を緩勾配で図-1のように掘削した。擁壁基礎底面近傍まで掘削した時、その掘削斜面の中央部ではらみ出しが始まった。

この斜面は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る。また、無数の細かい亀裂が掘削斜面頂部の線に平行に発達し、その亀裂の盛土頂部からの広がりは掘削高さの約2倍の奥行きまで達し、斜面天端には明確なすべりの境界を示す段差は認められない。一方、地中傾斜計の測定によれば、掘削面と同じレベルで地中測定管へのプローブ挿入が不可能となったり、水平変位が著しくなっている。

このようなはらみ出した斜面の水平変位の一例を平面的に図-2に示す。谷部を埋め立てたはらみ出した盛土斜面の変動は、盛土の中央部で大きく、端部で小さく、まるで高い粘性をもった液体に類似している。

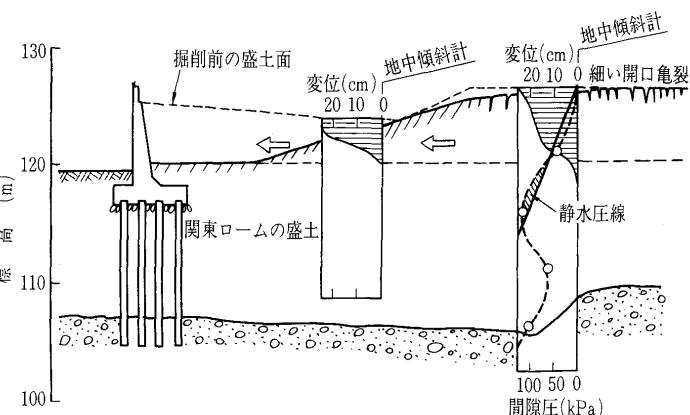


図-1 掘削によってはらみ出した斜面の挙動

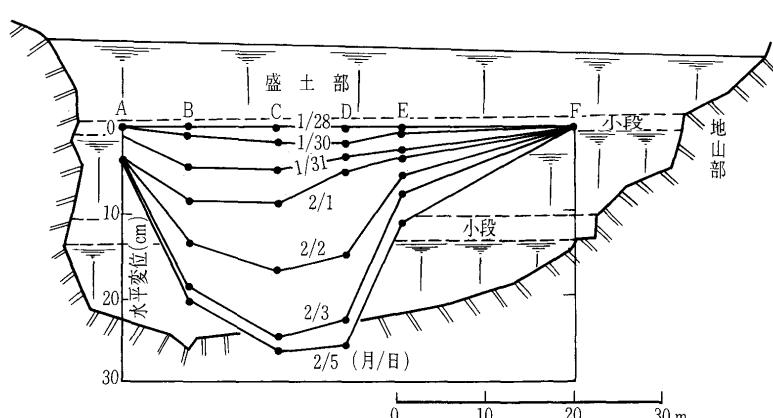


図-2 はらみ出し盛土斜面の水平変位の経時変化

斜面の安定計算は、一般に円形すべり面を仮定して実行されるが、上述のはらみ出し斜面の変位はこの仮定と異なっている。このような盛土斜面の安定は、盛土部分の間隙圧分布に支配されるものと推察される。

2.2 施工中にはらみ出した盛土斜面の単純モデル

上記のはらみ出し盛土斜面の安定を評価するための単純モデルを図-3に示す。そのモデルの仮定は次のとおりである。

- ① 斜面の移動部分を斜面の頂部と法尻に挟まれた三角形のブロックと仮定する。
- ② 滑動力 P を斜面の頂部を含む鉛直面に作用する間隙圧と有効土被りの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斜面部分の中心を通過する水平面に作用すると仮定

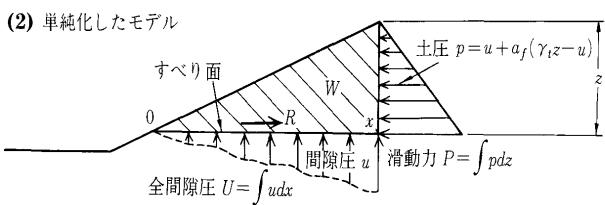
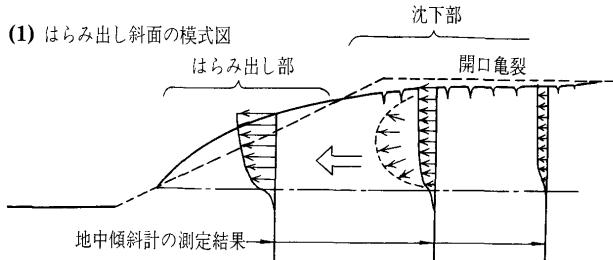


図-3 はらみ出し盛土斜面の単純モデル

する。

はらみ出しに関する安全率 F は次式で表される。

$$F = \frac{R}{P} = \frac{(W-U) \tan \phi'}{1/2 K_f \gamma_t z^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

W : 全重量

U : 全間隙圧 ($= \int u \, dx$)

u : すべり面部分の間隙圧

ϕ' : 有効応力表示のせん断抵抗角

K_f : はらみ出し時の側圧係数

γ_t : 盛土の単位体積重量

z : すべり面(水平)と盛土の頂部の鉛直距離

そして、はらみ出し時の安全率を1.0と仮定する。

2.3 はらみ出し時の側圧係数 K_f の評価

盛土の頂部よりの鉛直深度 z のはらみ出し時の側方土圧 p_{zh} は(2)式で表される。

$$\begin{aligned} p_{zh} &= (\text{間隙圧}) + a_f (\text{有効土被り圧}) \\ &= u + a_f (\gamma_t z - u) \\ &= [(1-a_f) r_{ui} + a_f] \gamma_t z \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

u : 間隙圧

a_f : 土圧係数

r_{ui} : 間隙圧係数 ($= u / \gamma_t z$)

したがって、はらみ出し斜面の滑動力 P は、

$$\begin{aligned} P &= \int [(1-a_f) r_{ui} + a_f] \gamma_t z \, dz \\ &= 1/2 K_f \gamma_t z^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $K_f = (1-a_f) r_{ui} + a_f$

実際の現場の盛土斜面について a_f を求めることは困難であり、また、 r_{ui} の決定は困難である。そこで、今回の簡単なモデルを仮定した(1)式を使用し、実際にはらみ出した3箇所の斜面のデータとそれぞれの K_f 値および平均値を表-1に示す。平均値は $K_f = 0.86$ と求められた。

表-1 側圧係数 K_f の逆算

場所	W (kN)	U (kN)	z^2 (m ²)	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

W : 全重量 U : 全間隙圧 z : すべり面深度 K_f : 側圧係数

3. 限界平均間隙圧係数の評価

3.1 限界平均間隙圧係数の簡便式

もし斜面の平均勾配を $\cot \beta$ とすれば、はらみ出しによってすべての三角形の土塊の全重量 W は(4)式で表される。

$$W = 1/2 \cdot \gamma_t z^2 \cot \beta \quad \dots \dots \dots (4)$$

すべり面全体の平均間隙圧係数を r_{uT} とすれば、すべり面の全間隙圧 U は(5)式で表される。

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

(4), (5)を(1)式に代入すれば、

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

はらみ出し時の平均間隙圧係数を $[r_{uT}]_c$ で表すと、 $F=1$ を(6)式に代入して、 $[r_{uT}]_c$ は(7)式で表される。

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

(7)式に $K_f=0.86$ 、また既報の報文より、安全側の値として、円形すべり面を仮定した逆算せん断抵抗角度 $\phi'=33^\circ$ を代入すれば

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

(8)式は任意の斜面勾配の盛土がはらみ出しをする限界平均間隙圧係数を示しており、間隙圧測定値より直接的に盛土斜面の安定度を評価する基準になる。

3.2 盛土斜面安定度評価例

約24箇月間で厚さ16 m のかさ上げをする盛土斜面の安定管理のために、ニューマチック式間隙水圧計を1断面に20個設置した。この盛土は図-4に示すように三つの小段を持ち、そのレベルにジオテキスタイル排水層を挟む。また、長期的に有効なC-40碎石排水層が盛土の底面に設置されている。排水層に挟まれた盛土の中間に設置した間隙水圧計3個の測定結果と盛土の高さの時間的变化を図-5に示す。それぞれの間隙水圧計の測定値は1987年3月3日に最大値を示している。この日に斜面のはらみ出しが認められた。この時刻の盛土斜面全体の間隙圧分布を図-4に示した。

図-4には、排水層の中間に二つのすべり面A-A'、B-B'を想定した。図-4の等圧線より二つの想定すべり面沿いの間隙圧を決定した。図-6には想定すべり面の土被り圧($\gamma_t z$)、間隙圧(u)を示し、また、全土被り圧(W)と全間隙圧(U)を示した。

両すべり面の平均間隙圧係数は(5)式から $r_{uT}=U/W$ となり、

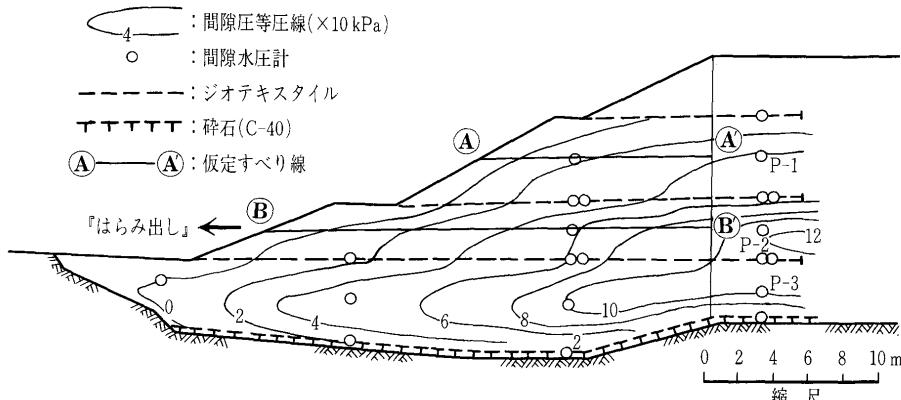


図-4 厚さ約16 m の盛土斜面の断面と3月3日の間隙圧分布

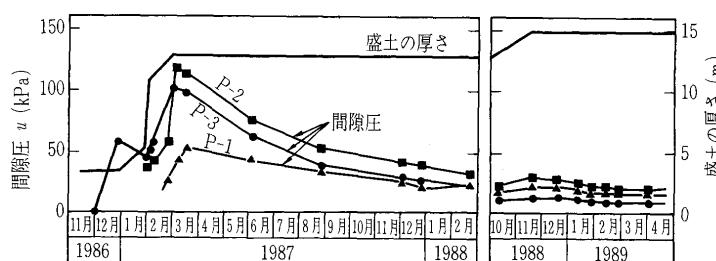


図-5 間隙圧と盛土高さの経時変化

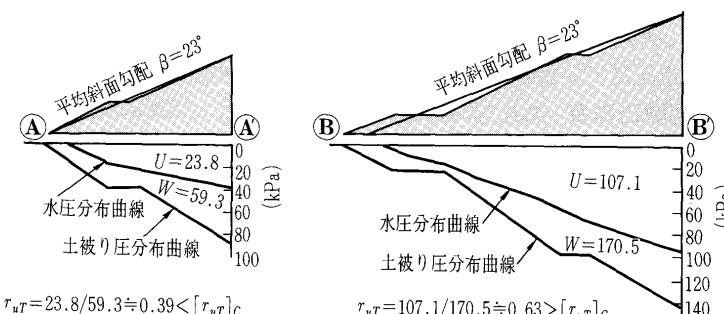


図-6 想定すべり面の間隙圧と間隙圧係数

$$A-A' \text{ すべり面について } \dots r_{uT} = 23.8/59.3 = 0.39$$

$$B-B' \text{ すべり面について } \dots r_{uT} = 107.1/170.5 = 0.63$$

一方、斜面の平均勾配 β は 23° ($\cot 23^\circ = 2.35$) であるから、限界平均間隙圧係数 $[r_{uT}]_c$ は(8)式より、

$$[r_{uT}]_c = 0.43$$

これより、A-A' は安定しており、B-B' ははらみ出しが発生していると判断され、この盛土斜面の問題は B-B' 部分の間隙圧が大きいことにあるといえる。

3.3 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観測管理を継続し、安定斜面とはらみ出し斜面に関してたくさんのデータが得られた。

図-7は、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。一つの点は一つの盛土斜面を表し、排水層に挟まれた中間部の想定すべり面についての平均間隙圧係数の値を示している。また、施工中斜面の水平移動が認められなかった斜面を安定斜面とし、水平移動が止まらずこれ以上の施工が困難と認められた斜面をはらみ出し斜面と定義して、それぞれ、○、●で区別している。

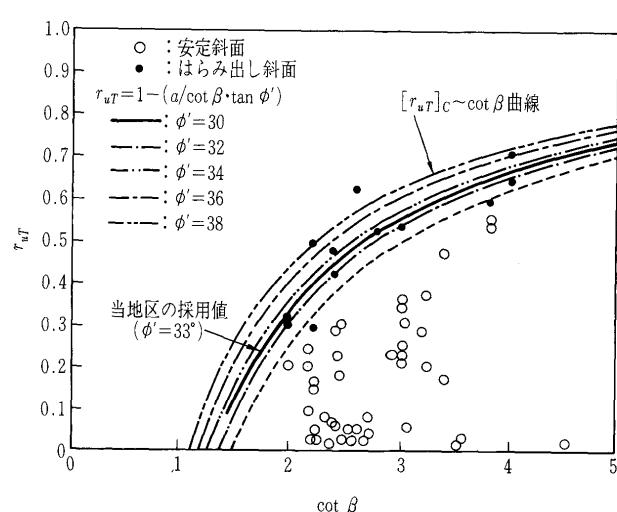


図-7 実際の盛土斜面の平均間隙圧係数と斜面勾配

また、(7)式に $K_f = 0.86$ を代入して ϕ' を変化させた $[r_{uT}]_c \sim \cot \beta$ 曲線を同図に併記した。図-7は、適切な K_f 値と ϕ' の組み合わせを考えれば、(7)式は現場の盛土斜面の安定度を評価する基準式として極めて合理的であることを示している。したがって、当地では(8)式

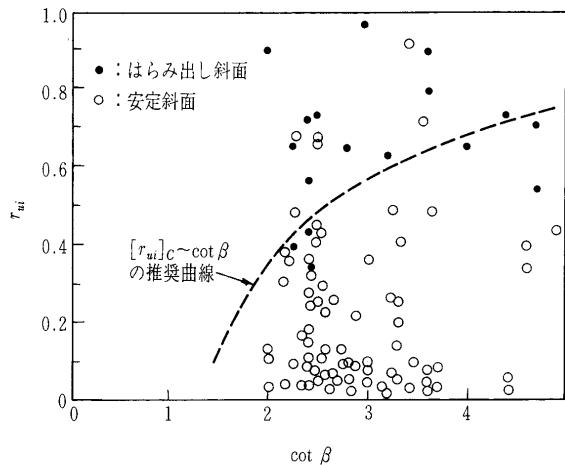


図-8 1個の間隙水圧計の測定結果と限界間隙圧係数の推奨曲線

($K_f=0.86$, $\phi'=33^\circ$)の関係式を基準とした管理をしている。

4. 1個の間隙水圧計による盛土斜面の安定管理方法

キャサグランデ型間隙水圧計を用いて測定した現場の経験によれば、スタンドパイプの水頭面が盛土頂部の表面を越えると、盛土のはらみ出しが起こることが多い。盛土斜面の頂部に設置した間隙水圧計で、排水層の中間部にあるものを選択し、その間隙圧係数 (r_{ui}) と斜面勾配の関係をプロットすると図-8に示すとおりである。この図の○は安定した盛土斜面、●ははらみ出した斜面を示し、両印の境界線は盛土斜面のはらみ出しが起こるか否かの境界を表す。

当図からは滑らかな境界線を描くことができない。これは1点の間隙水測定値を持って不均質な盛土斜面の代表値としたことによると推測される。もし盛土斜面部

分の盛土材料が均質で、盛土高さが単純等速度で累積された場合には、常に、 $r_{ui} > r_{uT}$ の関係にあり、盛土頂部下の1点の間隙水圧計の間隙圧係数は(8)式の限界間隙圧係数よりも大きな値を持つはずである。

(8)式を基にして r_{ui} と r_{uT} の関係を勘案すると、限界間隙圧係数 $[r_{ui}]_c$ と斜面勾配の関係について経験的に次式が設定できる。

$$[r_{ui}]_c = 1.1 - \frac{1.36}{\cot \beta} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

この経験式はまだ不十分であるが、既存の盛土斜面を簡便に経済的に安定度を評価する場合に役立つと思われる。

5. 結論とあとがき

約18年間、関東ロームを主な盛土材料に使用した宅地造成を実施し、その場合、間隙圧を基準とした盛土斜面の安定管理を実行してきた。また、その成果は、斜面安定を確保するために排水層の設計に反映されている。

本報文では、盛土斜面の観察により単純な斜面崩壊モデルと現場実測値を基にしてはらみ出しを生ずる限界間隙圧と斜面勾配の関係を明らかにした。

なお、既存の盛土斜面の頂部下の排水層に挟まれた中間点に間隙水圧計を設置し、その観測結果で盛土斜面の長期的な安定を評価する試みを開始しており、その安定評価基準として試行的に(9)式を採用している。既存の盛土斜面の安定度評価方法については、後日に報告したい。

参考文献

- 1) Mitchell, R. J.: Earth Structures Engineering, Allen & Unwin Inc., pp. 279~300, 1983.

(原稿受理 1996.9.3)