

# 豪雨時における盛土の安定性と排水対策

徐 永強\* 藪 雅行\*\* 小橋秀俊\*\*\* 中島伸一郎\*\*\*\*

## 1. はじめに

盛土・擁壁の災害は、降雨浸透水や地山湧水の排水不良に起因して発生する場合が多い。したがって、土構造物の安全性向上のためには、排水工を適切に設置・維持管理することによって盛土内部や擁壁裏込め等の構造物周辺の水を確実に抜くことが重要である。このような排水工の重要性は、中越地震（2004年）における土工構造物の被災事例、山陽道での大規模盛土のり面崩壊事例（2005年、台風14号）、能登半島地震（2007年）における大規模な盛土崩壊でも再確認された。

一方、盛土や擁壁の排水工の設計法は必ずしも合理化・体系化されておらず、経験的手法によっており、使用材料や道路構造にかかわらず画一的な仕様の排水工が設置されているのが現状である。このため、構造物完成後に排水機能が不十分なことに起因する変状や崩壊が生じる例が少なくない。

これらを背景として、土木研究所では盛土・擁壁に要求される排水性能を明らかにし、土質、降雨量、構造条件等に応じた効果的な排水対策手法の提案に向けた調査研究を進めている。

本稿では、異常降雨時を想定した場合の土質区分ごとの盛土の安定性及び排水が問題となる盛土に対して排水対策を実施した場合の効果についてのこれまでの研究成果を報告する。



図-1 山陽自動車道での盛土のり面崩壊

## 2. 異常降雨時の盛土安定性の概略検討

### 2.1 概要

異常降雨時に安定性に問題が生じやすい盛土の形態としては、急峻な高い斜面・沢部・谷部などの集水地形の盛土が代表的である。そこで、盛土の排水性能と力学安定性との関係に関する基礎的検討として、集水地形に建設された盛土を取り上げ、異常降雨時の地下水位の上昇をモデル化して円弧すべり計算を実施し、最小安全率により安定性を検討した。

異常降雨時の盛土の安定性には、厳密には、盛土形状、地山形状、土質、降雨浸透量、地下水流入量、盛土の排水性能（土質・地下排水施設の性能）などの影響を受けるが、計算上でこれらをモデル化することは必ずしも容易でない。そのため、以下に示すように、大胆に単純化したモデルを用いて計算を実施した。

### 2.2 想定モデル

盛土の形状は、図-2に示すような、傾斜地盤上の高さ $H$ の盛土を想定する。のり面勾配は1:1.8を基本とした。盛土内水位については、問題の単純化のために、図-2に示すように、地山と盛土との接合高さに、水平に地下水位が存在するような極めて水位の高い条件を設定した。想定すべり線は、図-2に示すように、のり肩から車道側に8mの位置（2車線相当）を通り、のり尻付近を切るものを想定した。これは、道路盛土において車両の通行に支障が生じるような、ある程度大規模な崩壊を対象にすることを考えたものである。

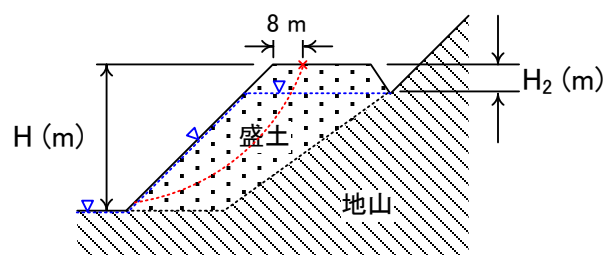
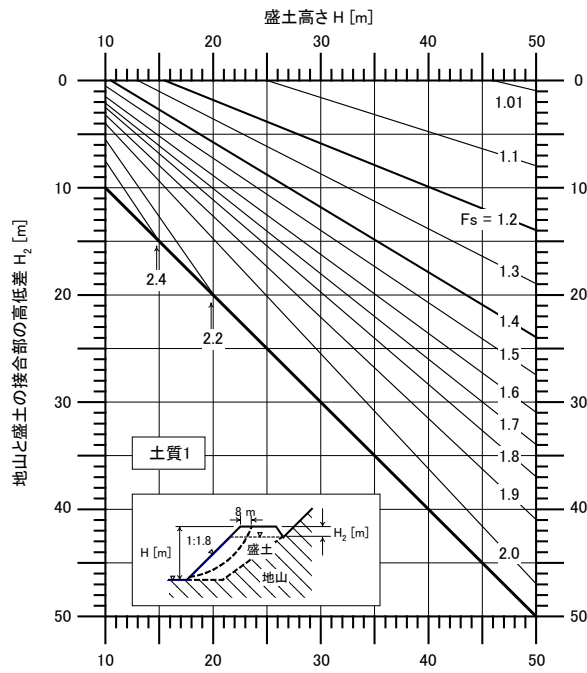


図-2 盛土とその浸水状況のモデル化

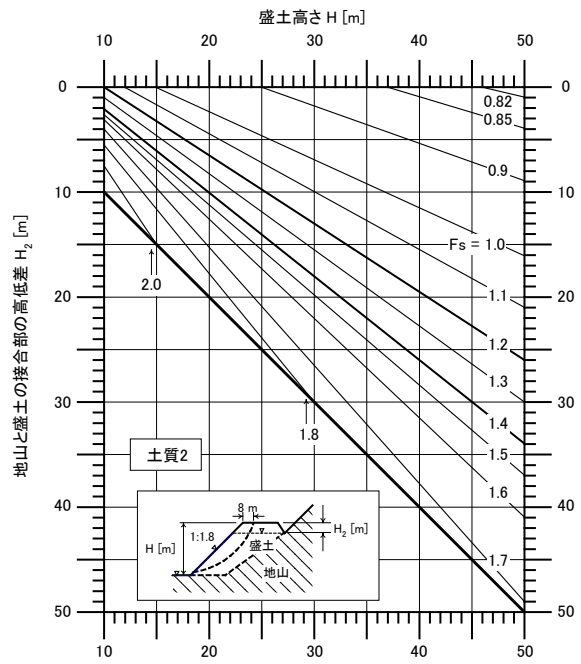
盛土材は一種類の土質で構成され、均質なものであると仮定した。降雨によって飽和度が上昇すると土粒子に作用するサクションが減少することにより、盛土材の強度は低下する。飽和度が強度定数に及ぼす影響については必ずしも定量的に解明されていないが、本検討では、鉄道の設計値<sup>1)</sup>を参考に表-1に示す値を用いて計算することとした。すなわち、表-1は、飽和度の上昇は粘着力に影響

することを考慮し、飽和時の粘着力 $c$ を不飽和時の粘着力の1/2とした。また、内部摩擦角については飽和度の影響が少ないため、飽和時と不飽和時が同じ値とするものである。

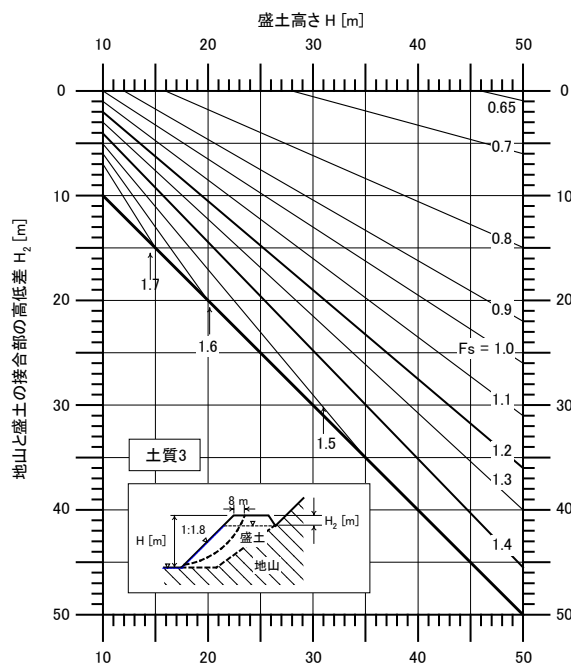
種々の盛土高さ $H$  (m) ( $H=10\sim50$ m)、地山と盛土の接合部の高低差 $H_2$  (m) ( $H_2=0\sim H$  m)、盛土材 (土質1～土質4) に対して円弧すべり計算を実施して最小安全率を算出した。



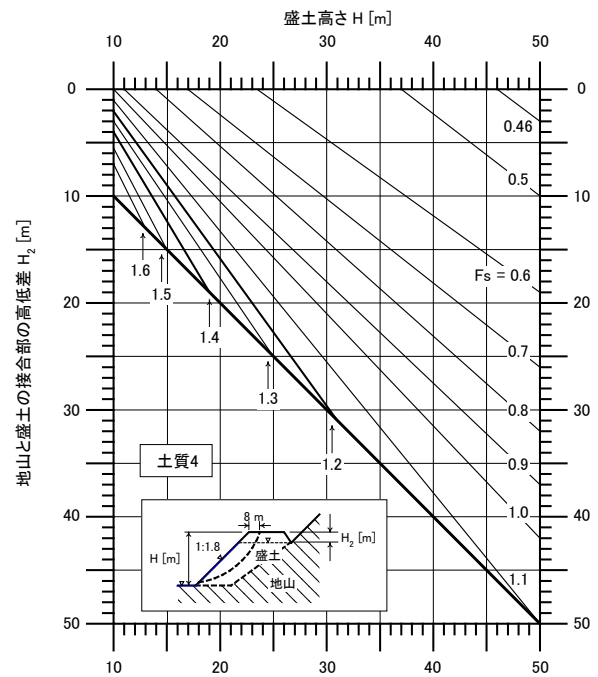
(a) 土質区分1



(b) 土質区分2



(c) 土質区分3



(d) 土質区分4

図-3 円弧すべり計算結果 (盛土高さ、盛土内水位、盛土材質に応じた最小安全率)

表-1 盛土材料の土質区分

| 土質区分 | 地盤工学会による<br>工学的分類                                                                                          | $\gamma_t$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $c$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\phi$<br>[°] |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| 土質1  | G, G-S, GS<br>G-F, G-FS, GS-F <sup>※1</sup><br>硬岩ずり (剥離性弱)                                                 | 20                                 | 3                           | 45            |
| 土質2  | S-F, S-FG, SG-F <sup>※2</sup><br>S, S-G, SG <sup>※3</sup><br>脆弱岩ずり (粘性化、<br>泥岩化、風化の進行の<br>おそれがあるものは除<br>く) | 19                                 | 3                           | 40            |
| 土質3  | GF, GF-S, GFS<br>SF, SF-G, SFG <sup>※4</sup>                                                               | 18                                 | 3                           | 35            |
| 土質4  | ML, CL, MH, CH<br>脆弱岩ずり (粘土化、<br>泥土化するもの)<br>OL, OH, OV, Pt, Mk<br>L, VH1, VH2                             | 15                                 | 10                          | 25            |

※ $\gamma_t$ : 土の湿潤単位体積重量、 $c$ : 粘着力、 $\phi$ : 内部摩擦角  
 ※1 G-F, G-FS, GS-Fは細粒分が有機質であれば、土質2の $\phi$ 、 $c$ を用いる。  
 ※2 S-F, S-FG, SG-Fは細粒分が有機質または火山灰でなければ土質1とする。  
 ※3 S, S-G, SGは粒度が良好 ( $U_c \geq 10$ ) であれば土質1、分級 ( $U_c < 10$ ) されていれば土質2。  
 ※4 SF, SF-G, SFGは細粒分が有機質であれば、土質4の $\phi$ 、 $c$ を用いる。

### 2.3 計算結果

各種土質区分、盛土高さ $H$ 、地山と盛土との接合部の高低さ $H_2$ に対して円弧すべり計算を行った結果を図-3に示した。これらの図は、のり面勾配1:1.8の場合の結果である。

上記のような特異な計算条件のもとで算定される安全率 $F_s$ であるので、あくまでも参考値であることに留意する必要があるが、各土質条件において水位や盛土形状が安定性に及ぼす影響について傾向をつかむことはできる。また、盛土形状や水位が同一であっても、土質条件により、盛土の安定性が大きく異なることがわかる。

地下排水工によって異常降雨時に水位をどの程度下げておかなければならないかは、設計安全率の設定にもよるが、例えば、盛土材が土質4の高盛土の場合には、水位がなくても安全率に余裕があまりないので、集水地形の場合には地下排水工による水位の低下が不可欠であることが確認できる。

図-3はのり面勾配が1:1.8の計算結果であるが、他の勾配についても計算を実施している。のり面勾配が1:1.8でない場合の安全率 $F_s$ の補正量を表-2に示す。

これまで述べてきた結果は、上述したとおりある一定の条件下での結果ではあるが、道路管理者が管理する膨大な盛土延長のうち、概略的に注意を要する箇所を抽出する場合の参考情報として活

用できるのではないかと考えている。

表-2 のり面勾配に応じた安全率の補正量

| 土質区分 | 補正量 (0.1の勾配差に対する補正量) |       |
|------|----------------------|-------|
|      | 急勾配側                 | 緩勾配側  |
| 土質1  | -0.05                | +0.05 |
| 土質2  | -0.04                | +0.04 |
| 土質3  | -0.03                | +0.03 |
| 土質4  | -0.02                | +0.02 |

#### 【補正例】

土質1、 $H=25$  m、 $H_2=0$  mの盛土の場合、図-3よりのり面勾配1:1.8の場合の安全率 $F_s=1.10$ である。  
 実際ののり面勾配が1:2.2の場合には、勾配差0.4 (= 2.2-1.8) の緩勾配であるから、上表より補正後の安全率は $F_s=1.10+0.05 \times 4=1.30$ 。同様に1:1.6の場合には、勾配差0.2 (= 1.8-1.6) の急勾配であるから、補正後の安全率は $F_s=1.10-0.05 \times 2=1.00$ 。

## 3. 水平排水パイプの排水効果

### 3.1 概要

水位を要因として安定性に問題がある既設盛土においては、排水対策により水位を低下させ安定性を向上させる必要がある。このため、既設盛土の排水対策として有効と考えられる排水パイプ (有孔管) に着目し、浸透流解析によりその排水効果の分析を行った。

### 3.2 飽和-不飽和浸透流モデル

飽和-不飽和浸透流モデルは3次元方程式

$$\nabla \cdot (K(\theta) \nabla (h+z)) = (C(\theta) + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

によって表わされる<sup>2)</sup>。ここに、 $K(\theta)$ は土の透水係数 (m/s)、 $\theta$ は体積含水率、 $h$ は圧力水頭 (m)、 $z$ は基準位置からの高さ (m)、 $t$ は時間 (s)、 $C(\theta)$ は比水分容量 (1/m)、 $S_s$ は比貯留係数 (1/m)、パラメータ $\beta$ は飽和領域で $\beta=1$ 、不飽和領域で $\beta=0$ である。

不飽和土の透水係数と比水分容量は体積含水率、従って圧力水頭の関数である。ここで、比水分容量はvan Genuchten<sup>3)</sup>の提案した式、不飽和土の水係数は、Mualem<sup>4)</sup>の提案した式を用いて解析を行う。

盛土内の初期水位は、盛土の底面とする。初期圧力水頭は、深さ方向に直線的に増加すると仮定し、地下水面高さで0になるようにした。

### 3.3 浸透流解析

今回の解析では、図-4に示すような傾斜地盤上の盛土を想定した。これは、本研究で別途実施中の室内盛土実験をモデル化したものである。

盛土材料は山砂で飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とする。地山の高さ5m～10mの間に湧水があると仮定する。水平排水パイプは増設時の施工性も考慮して、下方の小段より50cm高いところから5%の勾配で地山まで入っていることとする。

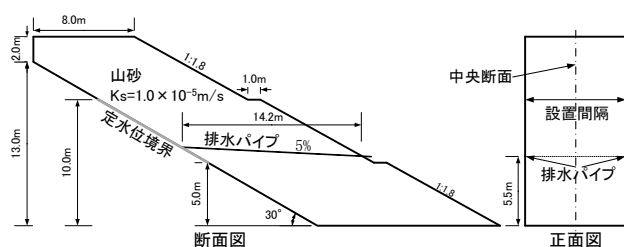


図-4 解析モデルの概要

解析領域は、排水パイプ1本の分担範囲 (= 水平排水パイプの設置間隔) とする。境界条件として、湧水を考慮する範囲を圧力水頭が10mの定水位境界とする。水平排水パイプについては、パイプに沿って水は完全に排水されると仮定し、パイプの位置にあたる節点での圧力水頭をゼロとする浸出点境界を与える。また、のり尻にも浸出があるので最下段のり面も浸出点境界とする。

図-4に示すモデルに対して、水平排水パイプの設置間隔を1m～10mまで1mずつ、そして、設置しない場合の解析を行う。各ケースの定常時浸潤線を図-5に示す。なお、図に示している浸潤線は盛土の奥行き方向の中央断面 (排水パイプの間で水位の最も高い断面) での浸潤線である。

図-5より、水平排水パイプの設置間隔が小さくなるにつれ、浸潤線が低下していることがわかる。水位低下が最も大きいのはのり尻より約22m (図-5横軸15m地点) の箇所で、排水パイプの間隔が1mの場合は、パイプのない場合より水位が2.72m低下しており、排水パイプが盛土中水の排水対策に効果的であると考えられる。

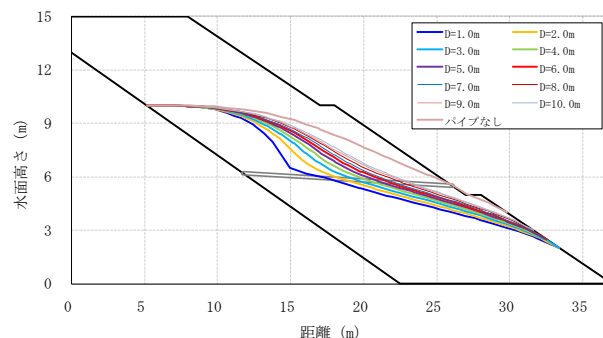


図-5 定常時浸潤線

#### 4. まとめ

傾斜地盤上の盛土について、盛土形状、土質、地下水位を変数として盛土の安定性を分析し傾向を把握し、異常気象時に問題となる、盛土形状、地下水位、土質条件の傾向を把握した。安定性には、土質条件も大きく影響しており、さらにその後の排水対策を実施した場合においても透水係数等の違いにより対策効果が異なると考えられることから土質条件に応じた排水対策の必要性が示唆される。

また、今回、傾斜地盤上に山砂により盛土されているケースにおいて、水平排水パイプの効果を浸透流解析によって排水パイプの設置間隔と水位低下の関係を定量的に把握したが、今後、土質条件の違いや各パイプの排水範囲の干渉等にも着目した分析を行い、効果的な排水対策手法の提案に向けた調査研究を推進していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所、国土交通省鉄道局：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物、丸善、2007
- 2) 赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による飽和・不飽和浸透流の解析、土木学会論文集、第264号、pp.87-96、1977
- 3) van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soils Science Society of America Journal, Vol.44, pp.892-898, 1980
- 4) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media Water Resources Research, 12(3), pp.513-522, 1976

徐 永強\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部施工技術チーム  
専門研究員、博士(農学)  
Dr. Yong-Qiang XU

藪 雅行\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部施工技術チーム  
総括主任研究員  
Masayuki YABU

小橋秀俊\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部施工技術チーム  
主席研究員、博士(工学)  
Dr. Hidetoshi KOHASHI

中島伸一郎\*\*\*\*



京都大学次世代開拓研究ユニ  
ット 助教、博士(工学)  
(前独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部 研究員)  
Dr. Shinichiro NAKASHIMA