

盛土に適用する排水パイプの施工仕様決定ノモグラム

渡邊 諭* 太田 直之*
西田 幹嗣** 浅野 嘉文***

Nomogram for the Execution Specification of Drain Pipes for Earthfills

Satoshi WATANABE Naoyuki OTA
Mototsugu NISHIDA Yoshifumi ASANO

The groundwater levels of earthfills often rise due to heavy rainfall, which would occasionally cause embankment collapse. In order to lower the ground water level, it is important to take countermeasures for the water drain of earthfills which would become weak spots during heavy rainfall. The drain pipe method for earthfills has been adopted widely in Japanese railways as a water drain method. However, the execution specification of drain pipes has not been established yet, and the details of construction works depend on past experience at present. Therefore, in this study, we evaluated the effect of drain pipes quantitatively, and we suggest the execution specification of drain pipes for earthfills based on the evaluation considering the height of the earthfill, external permeance, and so on.

キーワード：排水パイプ、ノモグラム、盛土、切盛境界、飽和・不飽和浸透流解析

1. はじめに

降雨や地下水の浸透により安定性が低下することが予想される盛土に対しては、盛土内の地下水位を低下させる排水対策が効果的な対策とされている。しかしながら、排水溝などの表面排水設備を除いて、盛土内からの排水を促すための対策の多くは設計法が確立されておらず、その設計仕様については経験に基づいて決定されている場合が多い。そこで本稿では、施工実績が豊富で高い効果が期待される排水パイプを選定し、排水パイプの耐降雨性向上効果を解析的に評価するとともに、その結果に基づいて整理した排水パイプの標準的な施工仕様について述べる。

集中することによって不安定化すると考えられ、降雨時に弱点箇所となる盛土の構造条件を有すると言える。

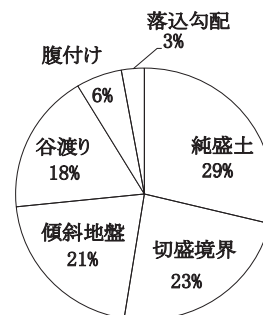


図1 構造条件別の災害発生割合

2. 検討対象とした盛土の構造条件

2.1 構造条件別にみた盛土の被災事例

図1に、降雨により発生した過去の盛土の被災事例67件について、その構造条件の内訳を示す¹⁾。図から分かるように、被災事例の多いものから順に純盛土に次いで切盛境界の盛土、傾斜地盤上の盛土、谷渡り盛土、腹付け盛土、そして落込勾配の盛土となっている。純盛土以外の盛土については、降雨時に盛土の外部から水が

2.2 切盛境界の盛土の不安定化メカニズム

鉄道盛土では、列車荷重の経年的な繰り返し作用により軌道バラストが沈下して盛土堤体にめりこみ、この部分が水みちを形成する場合があると考えられる(図2)。切盛境界の盛土が不安定化するメカニズムとして、上述の水みち部分を流下する雨水が切土と盛土の境界部の構造変更点で集中して盛土内に浸透し、盛土が不安定化あるいは場合によっては崩壊に至ると推定される。なお、過去に実施されたバラストめりこみ量の計測結果から、その平均深さは約0.3mであることが報告されている。

このようなり面表面から浸透する降雨に加えて集水条件によって加算される水が原因で不安定化するメカニズムは、切盛境界のみならず、落込み勾配の盛土や構造物背面の盛土などでも同様であると考えられる。

* 防災技術研究部 地盤防災研究室
** 防災技術研究部 地盤防災研究室
(現 西日本旅客鉄道株式会社)
*** 防災技術研究部 地盤防災研究室
(現 東海旅客鉄道株式会社)

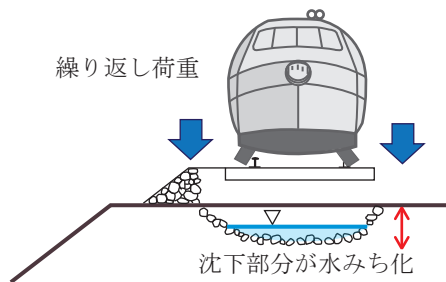


図2 施工基面における水みち形成のイメージ

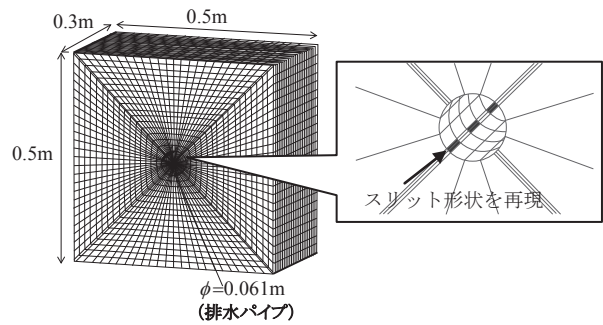


図4 スリット形状を再現した解析モデル

3. 排水パイプのモデル化に関する検討

前述のような降雨時に弱点箇所となる盛土の不安定化メカニズムを考慮した地下水の挙動を再現する飽和・不飽和浸透流解析（以下、浸透流解析という）を行った上で、その弱点箇所には排水パイプを打設した時の水位低下量を解析的にもとめ排水パイプの盛土安定化効果を明らかにすることとした。ここでは、排水パイプのモデル化について述べる。

3.1 模型実験およびモデル化手法の概要

従来モデル²⁾の高度化を図ることを目的に、排水パイプ周辺の二次元的な流れのみを再現した定水位浸透試験により排水パイプの排水効果を定量的に評価した。図3に実験土槽の概略図を、表1に模型地盤材料の土質条件を示す。また、浸透流解析により、図4に示すように排水パイプのスリット形状（5mm×50mm×12箇所）を表現した解析モデルを用いて実験結果の再現解析を行った。再現解析では、実験で得られた飽和透水係数を基に、スリット形状を再現した解析モデルにおける排水パイプの排水量と、模型実験における排水量とが一致するような解析モデル地盤の飽和透水係数を逆解析的に求めた。また、その排水量をより簡便な簡易モデルで置き換える手法について検討した。

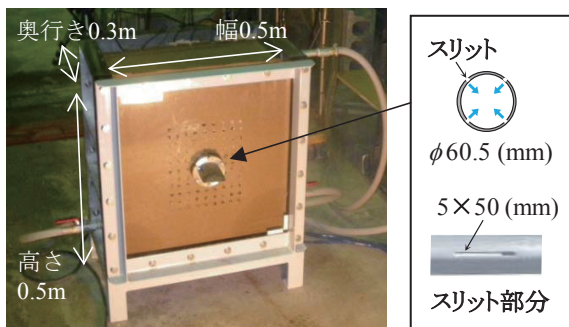


図3 実験土槽概要

表1 土質条件

材料	稲城砂
最大乾燥密度 (kN/m ³)	16.22
模型地盤の乾燥密度 (kN/m ³)	13.75
最適含水率 (%)	18.82
締固め度 (%)	85
細粒分含有率 (%)	18

3.2 排水パイプのモデル化のための浸透流解析条件

浸透流解析における境界条件は、排水パイプのスリット部分を浸出境界とし、土槽天端には模型実験で設定した水位である0.525mを全水頭として与えた。再現解析に用いた水分特性は、模型地盤から得られた実測値を用いた。水分特性曲線のモデルは式(1)に示す van Genuchten モデル³⁾を、比透水係数のモデルは式(2)に示す Mualem モデル⁴⁾を用いた。

$$\theta = \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{-m} \cdot (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (1)$$

$$K_r = S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (2)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 θ_r ：残留体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率、 ψ ：マトリックサクション (kPa)、 α 、 n 、 m ：定数、 K_r ：比透水係数、 S_e ：有効飽和度である。なお、 m と n の関係は式(3)である。

$$m = 1 - 1/n \quad (3)$$

再現対象とした実験値は、排水試験開始から3時間後のほぼ定常となった排水量（ $4.21 \times 10^3 \text{mm}^3/\text{s}$ ）とした。なお、模型地盤の飽和透水係数は $2.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であった。

3.3 排水パイプの排水量を再現する簡易モデルの作成

図4に示したモデルを用いた再現解析の結果、解析モデル地盤の飽和透水係数を $4.3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ に設定した場合に模型実験で得られた排水量（ $4.21 \times 10^3 \text{mm}^3/\text{s}$ ）と解析における排出量とが一致することを確認した。この精緻モデルの簡便化を図るため、図5に示すような、排水パイプを模擬した空洞の周りを盛土材よりも透水性の低い層で覆った矩形モデルへの置き換えを検討した。その結果、空洞周りを覆う透水性の低い層の透水係数と盛土材料との透水係数との比（以下、透水係数比という）を0.5とすることで、実験結果を再現できる簡便な解析モデルが構築できることが分かった。また、模型実験では二次元方向のみの排水効果を定量化しているため、排

水パイプの長さを変化させたモデル化を行う際にも、盛土材料が変化しない限り透水係数比のパラメータは同じ値を使用することができる。以下の検討では、図6に示す形状により排水パイプを簡易モデル化し、透水係数比は0.5を用いて検討を行った。

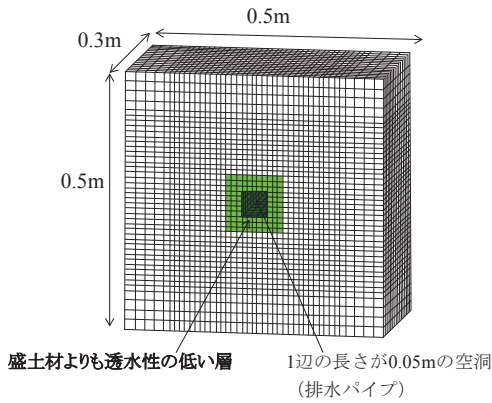


図5 矩形モデルの概要

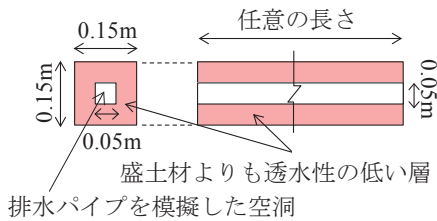


図6 簡易モデル化された排水パイプ

4. 排水パイプの施工仕様の検討

4.1 盛土モデルにおける外力条件および解析条件

排水パイプの施工仕様の検討にあたり、前述の雨水の集中を湛水として表現して切盛境界部に与えることとした。水みちの深さの実績値や線路勾配などから、本検討では最大30mを湛水範囲とした。

浸透流解析に用いる盛土の透水特性については、既設盛土の透水特性を実測により求めることが困難なため、過去の被災事例に基づいて検討した。ここでは、土の不飽和透水特性について Brooks&Corey 法⁵⁾により算出し、各種パラメータは、過去に被災した盛土の物性値¹⁾を参考に表2に示す値を用いている。土の飽和透水係数は、既往の検討により地下水位が最も上昇しやすいことが明らかな $5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の値を採用し⁶⁾、土質は砂質土を想定した。また、不飽和透水係数は Irmay 型とし、パラメータ n は西垣の方法⁷⁾により下式から求めた。

$$n = 0.69 - 1.31 \cdot \log k \quad (4)$$

ここで、 k は飽和透水係数 (cm/s) である。なお、本報告において浸透流解析に基づく地下水位は、排水パイ

プの有無や解析条件の変化に関わらず盛土内の間隙水圧が0となる等値線として整理した。

表2 飽和・不飽和水分特性

体積含水率		限界吸引圧力 水頭 (1/cm)	λ
飽和 (%)	最小 (%)		
32.0	19.5	-5.5	0.35

4.2 排水パイプの打設範囲の検討

構造物境界における地下水位の上昇は、図7の模式図に示すように発生すると想定される。そこで、排水パイプの施工範囲は図中の網掛けで示すように地下水位の上昇範囲を包含するよう設定する必要がある。本検討では、湛水条件を与えた範囲の盛土のり面には全面にわたり排水パイプを施工することとし、湛水に起因して盛土縦断方向の地下水位が上昇する範囲（以下、湛水による影響範囲という）には排水パイプが効果的に作用する打設範囲を設定することとした。

縦断方向の打設範囲を決定するにあたり、湛水による影響範囲を明確にする必要がある。そこで、図8に示す盛土高さ7.5m、施工基面幅10m、のり面勾配1:1.5、延長150mのモデルを作成し、浸透流解析により湛水による影響範囲の長さを検討した。なお、同モデルは線路縦断方向に十分な長さを有しており、盛土高さは過去の被災事例¹⁾を参考として決定した。このモデルに対し、外力条件として表3に示すような降雨パターンと湛水範囲を組み合わせて与え、解析時間中における湛水の影響範囲の長さを外力条件別に算出した。それらの算出結果の中での最大値を盛土縦断方向の打設範囲として設定した。図9に、のり肩直下位置における盛土縦断面の地下水位の一例を示す。各解析結果を総合すると、いずれの外力条件でも境界部から湛水による影響範囲は最大約40mであることが明らかとなった。

排水パイプの高さ方向の打設範囲の検討では、図9と同様の断面形状を持つ純盛土モデルを作成し、外力条件として降雨を与えた際に上昇する地下水位の最高位置よ

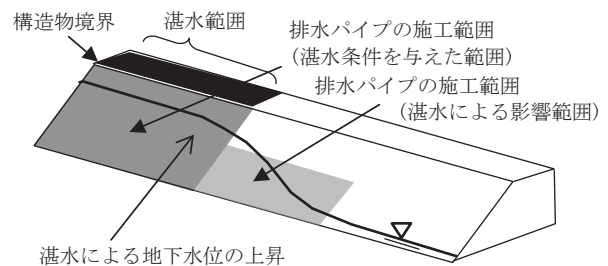


図7 構造物境界における地下水位上昇と施工範囲のイメージ図

表3 解析条件

降雨条件	湛水範囲 L (m)
5mm/h × 110h	1,5,10,20,30
10mm/h × 55h	1,5,10,20,30
50mm/h × 11h	1,5,10,20,30

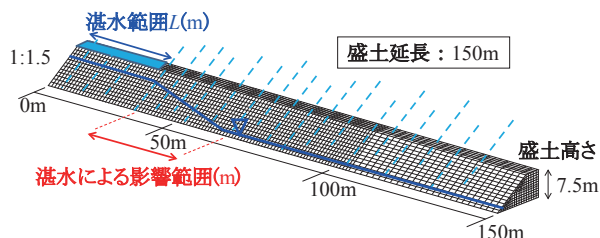


図8 湛水による影響範囲の評価のための盛土モデル

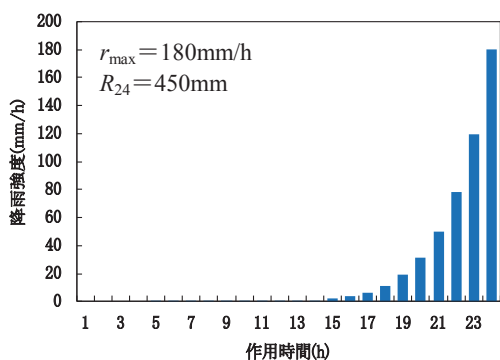


図10 作用させた短期型降雨

り下方ののり面を打設範囲として設定することとした。降雨は鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物編⁸⁾(以下、設計標準という)に準拠し、安全側を考慮して作用Ⅱの降雨とした。なお、設計標準では、台風などに代表されるような短時間降雨パターンと、梅雨時期に代表されるような長期型降雨パターンがあるが、ここで設定した飽和透水係数 $5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の砂質土に対しては、短時間降雨パターンがより地下水位を上昇させる条件となる。そこで、図10に示すような24時間中に最大時間雨量 $r_{\text{max}} = 180 \text{mm/h}$ 、総降雨量 $R_{24} = 450 \text{mm}$ が作用する短期型降雨パターン(以下、短期型降雨という)を与えることとした。図11に、上述の降雨を与えた際の盛土内地下水位の経時変化を示す。図から、降り止み時から数時間後の間に最も地下水位が上昇し、その最高位置は基盤面から約3mであることが分かる。

以上の検討から、湛水による影響範囲に対する排水パイプの施工は、高さ方向については盛土基盤面から高さ3mまでの範囲、盛土縦断方向における打設延長については湛水範囲との境界部から40mまでの範囲とした。

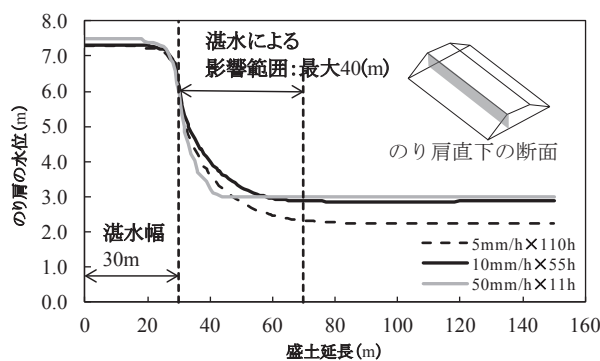


図9 解析結果の一例(湛水幅30m)

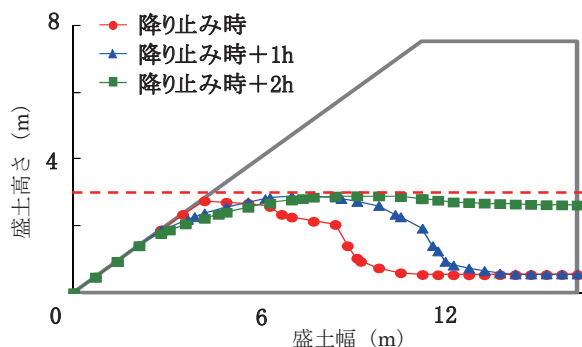


図11 盛土内地下水位の解析結果

4.3 排水パイプの打設条件毎の排水効果の定量化

前項で述べた打設範囲に対し、排水パイプの打設長さや打設間隔の組み合わせを変えて浸透流解析を実施した。

浸透流解析における解析モデルは、図12で示すように長さ150mのモデルにおいて最も水位が高くなると想定される湛水部分の一部を切り出したものである。排水パイプの打設条件は過去の施工実績を参考に、長さ4, 6, 8m、打設間隔1, 2, 3mの千鳥配置の組み合わせで設定した。外力条件は図10と同様の短期型降雨と盛土天端部の湛水条件を与えた。図12に解析モデルと排水パイプの設置状況を示す。前述のとおり、排水パイプは盛土のり面全面に設置しており、打設間隔1mの場合は下から17段、2mの場合は9段、3mの場合は6段配置される。図13に排水パイプの設置断面として打設間隔1mの例を示す。

図14に浸透流解析結果の一例を示す。図から、排水パイプの打設によりり尻付近の地下水位が低下していることが確認できる。排水パイプの打設長さによる排水効果の差異を示す例として、図15(a)に排水パイプの打設間隔を1mとした場合の降雨降り止み時の打設長さごとの盛土内地下水位を示す。また、図15(b)には打設間隔による差異を示す例として、打設長さを6mとした場合の打設間隔ごとの盛土内地下水位を示す。なお、図15に示した断面はモデル中央部の断面である。図か

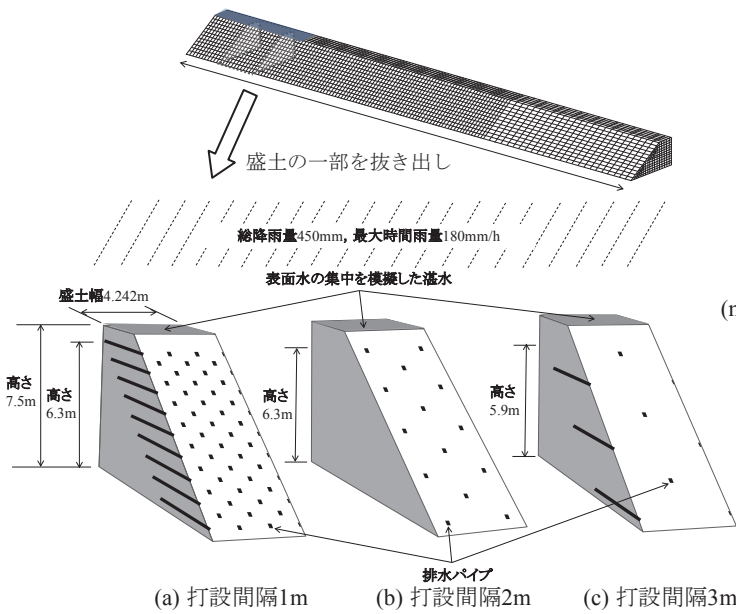


図12 排水パイプが打設された盛土の解析

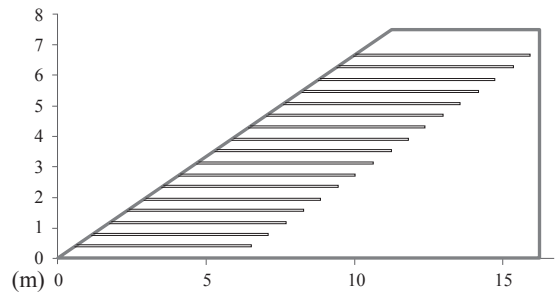


図13 排水パイプの打設位置断面図の例 (長さ6m, 打設間隔1m)

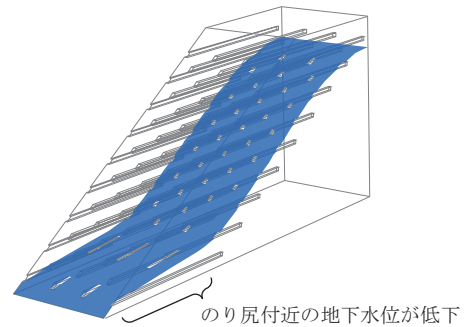
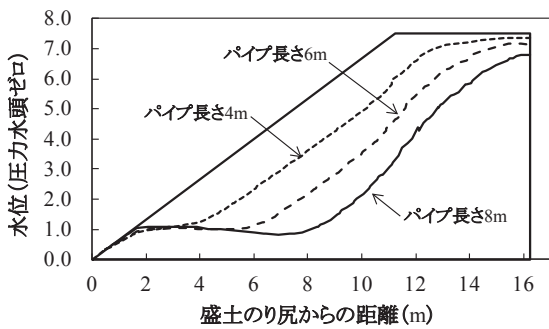
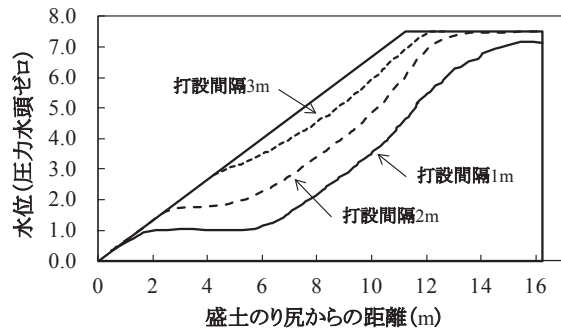


図14 解析結果の例 (長さ6m, 打設間隔1m)



(a) 打設間隔を1mで固定した場合



(b) パイプ長さを6mで固定した場合

図15 のり肩直下断面の地下水位の一例

ら、排水パイプが長いほど、また打設間隔が密になるほど水位低下効果が高いことが分かる。

4.4 最適施工仕様決定ノモグラムの作成

盛土の安定性については、盛土のパイプとパイプとの間の断面において浸透流解析結果に基づく地下水位を反映した安定解析を行うことで評価した。安定解析にあたっては円弧すべりに対する安全率を修正フェレニウス法により算出し、強度定数は設計標準に準拠して表4に示す土質2の強度定数を用いた。これは、設計標準において、本報告で採用した飽和透水係数 $k=5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 相当の砂質土を含む土質群のうち、最も強度定数が小さい土質区分を採用したことによる。また、設計標準では盛

土の飽和度とすべり面の位置（盛土深部と表層部）に応じた強度定数を設定しているが、以下の検討では安全側を考慮して飽和時における表層部の強度定数を採用した。なお、すべりは基礎地盤を含まない盛土堤体内部で発生するとし、すべり面は必ず施工基面を通過するように設定した。

図16に、排水パイプの打設間隔、打設長さ、正規化

表4 安定解析に用いる強度定数

土質区分	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
土質2	19	0	35.0

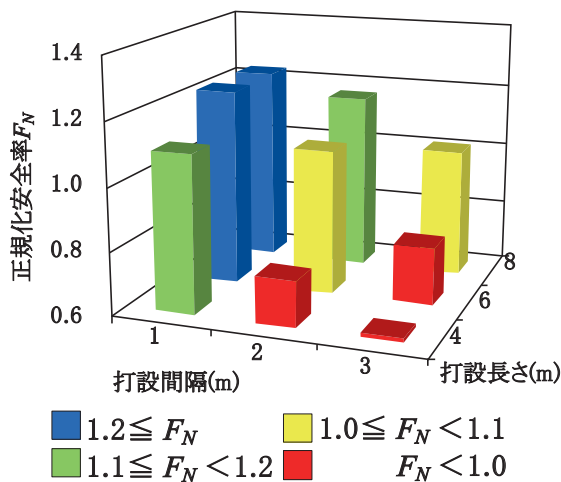


図 16 排水パイプの打設条件の組み合わせと正規化安全率との関係

安全率 F_N の関係を整理した。正規化安全率とは、降雨降り止み時の安全率 F_{si} を排水パイプが打設されていない純盛土における同時刻の安全率 F_{s0} で正規化した値である。ここで、安定性向上効果の指標として純盛土を基準とした正規化安全率を用いたのは、盛土構造物全体の中で降雨時に弱点となるような切盛境界の盛土に対し、排水パイプを施工することで純盛土と同程度以上に安定性を向上させ得るかどうかを防災対策を検討する上で重要であると考えたためである。図 16 から、正規化安全率が 1.0 を超えるのは、打設長さが 4m で打設間隔が 1m の組み合わせ、打設長さが 6m で打設間隔が 1, 2m の組み合わせ、8m では全ての打設間隔の組み合わせである。なお、図 16 の結果は湛水部分を切り出したモデルについて検討した結果であるが、施工仕様を整理するにあたり、正規化安全率が 1.0 以上となるような上述の打設条件の組み合わせを 4.1 節で述べた湛水による影響範囲に適用することとした。このような打設条件で施工することで降雨時の弱点箇所が解消されることが考えられる。

5. まとめ

本報告では、既設盛土の排水対策の一つである排水パイプ打設工法を対象に、その排水効果を定量的に表現できる解析モデルを作成し、排水パイプの打設パターンを変化させた際の安定性向上効果を定量的に評価した。また、降雨に対して弱点となる箇所特有の外力条件を設定し、各条件における排水パイプの最適な施工条件の組み合わせをノモグラムとして提案した。また、本報告で

は切盛境界の盛土を中心に述べたが、施工条件設定の考え方や、提案する排水パイプのモデルを用いた解析に基づく検討を行うことで、他の構造条件についても任意の外力条件別に最適な打設条件を検討することが可能となる。しかしながら、本検討における排水パイプのモデル化は、打設時におけるパイプの打設方向の土の乱れ等は再現しておらず、モデル化にあたっての課題が残っている。

今後は、上述の課題について検討をすすめるとともに、土質条件を含めたパラメトリックな解析結果を蓄積する必要がある。また、降雨に対する弱点箇所が複合して存在する場合や山間地と都市部などの立地条件の違いなどを考慮した対策の優先度の検討を含め、排水パイプの施工仕様マニュアルとして取りまとめる予定である。

謝 辞

本研究の実施に当たっては、岡山大学西垣誠教授にご指導を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- 1) 杉山友康：降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.19, No.5, 1997
- 2) 太田直之・杉山友康・渡邊諭・高馬太一・西田幹嗣・石川智史：盛土に用いる排水パイプの浸透流解析モデル，鉄道総研報告，Vol.26, No.9, pp.35-40, 2012
- 3) M. T. van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society American Journal, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 4) Y. Maulem: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol.12, pp.513-522, 1977.
- 5) Brooks, R. H. and Corey, A. T. : Hydraulic properties of porous media, Hydrology paper No.3, Colorado state University, 24p, 1964.
- 6) 杉山友康, 太田直之, 阿知波秀彦, 布川修：降雨時の安定性に影響する盛土内の水分挙動の実験的評価，鉄道総研報告，Vol.18, No.9, pp.35-40, 2004
- 7) 西垣誠・楠見和紀：不飽和土の浸透特性の評価に関する考察，土質工学会，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，pp179-186, 1986
- 8) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，703p, 2007