

既設盛土の安定性向上効果に着目した排水パイプの最適設計仕様

防災技術研究部 地盤防災研究室

副主任研究員 渡邊 諭

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、盛土内の排水対策が効果的な対策とされている。しかし、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最適設計仕様について述べる。

2. 排水パイプの施工対象となる盛土の構造条件

2.1 構造条件と被災事例

図1は、過去の降雨による盛土の被災事例67件について、その構造条件の内訳を示したものである。ここでは、盛土外部からの雨水の浸透により不安定化する構造条件のうち、最も被災割合の高い切盛境界の盛土を検討対象とした。

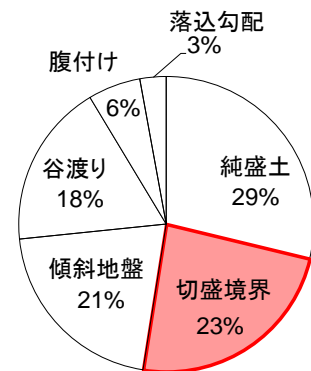


図1 構造条件別の災害発生割合

2.2 切盛境界の盛土の不安定化メカニズムと外力条件

鉄道では、軌道のバラスト部分が列車荷重の繰り返し作用により経年的に沈下することで、盛土堤体にめりこんだバラスト部分が見かけ上の水みち（以下、ウォーターポケットという）を形成すると考えられる（図2）。切盛境界の盛土が不安定化するメカニズムとしては、上述のウォーターポケット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に集中し、そこが不安定して崩壊に至ると推定される。そこで、排水パイプの施工仕様の決定にあたり、上述の湛水条件を切土境界部に与えることとした。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¹⁾。そこで、湛水範囲については、

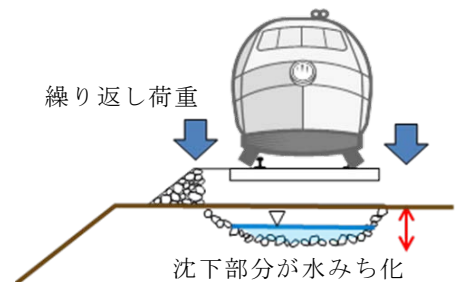


図2 ウォーターポケットのイメージ図

図3に示すようにバラストめりこみ量と線路勾配との幾何学的な関係より算出することとした。また、湛水範囲は約30mを上限值として検討した。

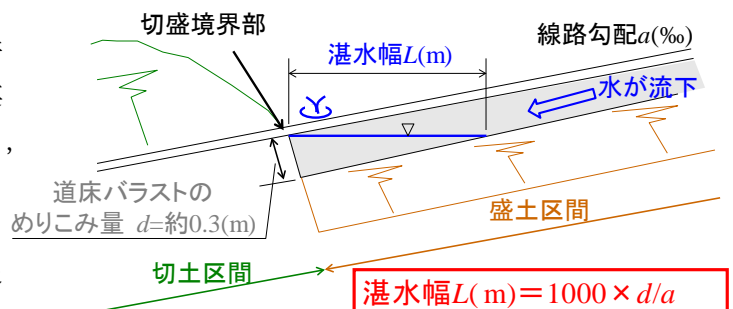


図3 湛水幅の算定イメージ図

3. 排水パイプのモデル化と飽和・不飽和浸透流解析

3.1 排水パイプモデル

過去の検討では、排水パイプ周辺部に盛土本体部分よりも透水性の悪い領域（スキニイフェク

ト領域) を設けることで、排水パイプの地下水位低下効果が再現できることを要素試験ならびに飽和・不飽和浸透流解析により確認している²⁾。本検討では、図4に示すように、矩形で再現した排水パイプ周りにスキニエフェクト領域を設け、その透水係数として盛土材料の85%の値を与えている。

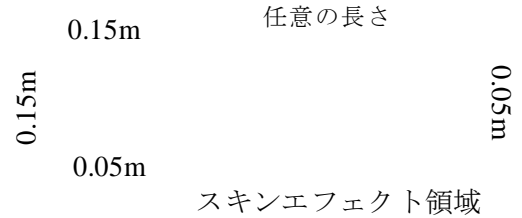


図4 モデル化された排水パイプ

3.2 飽和・不飽和浸透流解析の解析条件

降雨や湛水条件を与えた際の盛土内の地下水位の変化を、飽和・不飽和浸透流解析により評価した。不飽和領域の透水特性は

Brooks&Corey法とし、過去に被災した盛土の物性値を参考に表1に示すパラメータを用いた。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³⁾により下式から求めた。

$$n = 0.69 - 1.31 \cdot \log_{10} k \quad k: \text{飽和透水係数 (cm/s)}$$

本検討における地下水位位置は、排水パイプの有無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。

4. 排水パイプの最適設計仕様に関する検討

4.1 排水パイプの打設範囲の検討

検討対象となる盛土の構造条件における排水パイプの施工範囲は、所要の安全性を確保しつつ経済性にも配慮して最適化する必要がある。そこで、盛土底面からの打設高さとして盛土縦断方向における打設延長については、降雨および湛水条件をパラメータとした解析的検討により決定した。

排水パイプの打設長さについては、盛土高さ7.5m、施工基面幅10m、のり面勾配1:1.5の純盛土に対し、24時間降水量が1000年確率に相当する降雨(以下、作用II降雨⁴⁾という)を与えた際の最高地下水位位置を排水パイプの施工高さとして設定することとした。なお、この断面形状は、図1で示した被災事例の平均値より決定した。解析の結果、最高地下水位は約4mとなった。

排水パイプの打設延長については、上述の施工高さを設定した盛土と同じ断面形を持つ長さ150mのモデル(図5)に対し、降雨条件と湛水範囲を組み合わせた外力を与え地下水位上昇の影響が及んだ延長のうち最も長いものとした。表2に解析条件を、図6に湛水による地下水位上昇範囲の解析結果の一例としてのり肩直下断面の地下水位を示す。その結果、盛土の縦断方向に

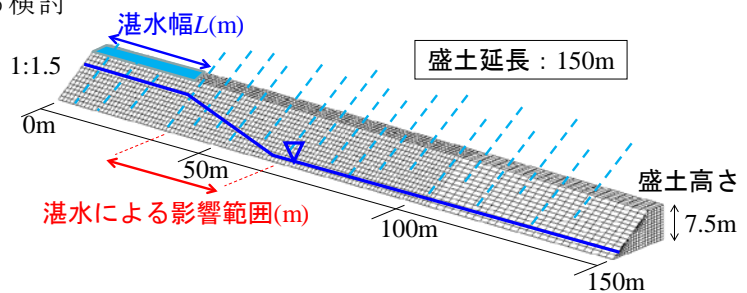


図5 湛水による影響範囲の評価のための盛土モデル

表2 解析条件

降雨条件	湛水幅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

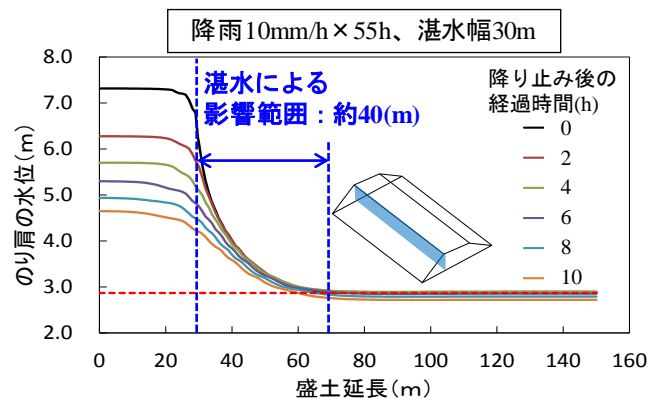


図6 のり肩直下断面の地下水位の一例

その結果、盛土の縦断方向に

において最大約 40m の範囲が湛水の影響を受けることが分かった。

以上の検討により、排水パイプの施工範囲は打設高さを 4m、盛土縦断方向における打設延長を 40m と設定することとした。

4.2 排水パイプの打設パターンに関する検討

4.1 節で決定した打設範囲において、排水パイプの打設長ささと打設間隔の組み合わせを变えることで、盛土の安定性向上効果を定量的に評価した最適施工条件を検討する。ここでは、排水パイプの施工条件の組み合わせとして、排水パイプの長さを 4, 6, 8m に、排水パイプの打設間隔を千鳥配置で 1, 2, 3m に設定し、各施工条件の組み合わせによる盛土の安定性向上の程度

表 3 安定計算に用いるパラメータ

土質区分	飽和度	γ_t (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
土質2	$80 \leq Sr < 100$	18	1.5	35
	$Sr = 100$	19	0	35

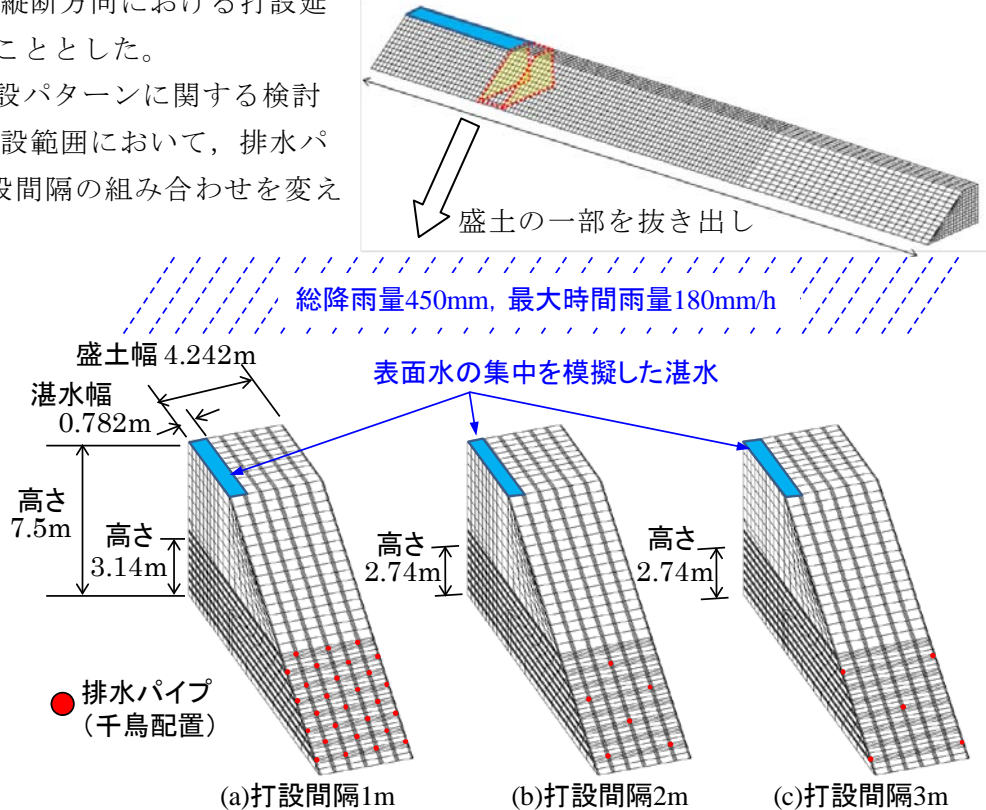
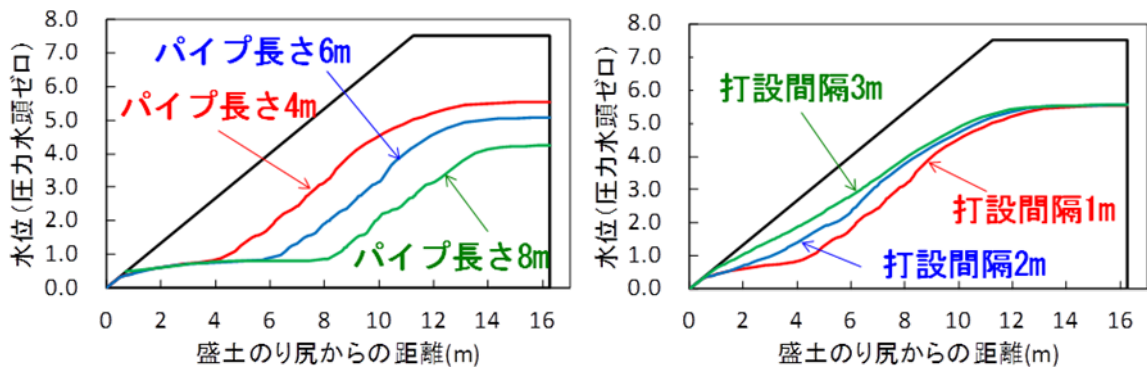


図 7 排水パイプが打設された盛土の解析モデル

の差異を検討した。表 3 の強度定数を用いてフェレニウス法により円弧すべりに対する安全率を算出した。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。

外力条件として、4.1 節で述べた作用 II 降雨と、盛土天端部の湛水条件を組み合わせで与えた。また、解析に用いたモデルは解析モデルの簡便化のため図 7 に示すように境界部を約 4m 抜き出したモデルとした。解析モデルの簡便化は解析ツール上の要素節点数の制限によるものであるが、境界部分を抜き出したモデルと、盛土全長を再現したモデルでは境界条件の影響により前者の方が降雨時の地下水位が高くなることを確認している。



(a) 打設間隔を 1m で固定した場合

(b) パイプ長さを 4m で固定した場合

図 8 排水パイプの打設条件の違いによる地下水位の変化の例

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8(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8(b)には打設間隔による差異を示す例として、打設長さを4mとした場合の打設間隔ごとの盛土内地下水を示す。図から、排水パイプが長いほど、また打設間隔が密になるほど高い排水効果を示すことが分かる。これらの各打設条件を組み合わせ実施した浸透流解析により得られた地下水位から安定計算を実施することで、降雨量や盛土高さ、土質等の設計条件に応じた施工仕様が決定できる。

4.3 その他の不安定化要因による打設条件の検討

前節までは、湛水と降雨による地下水位上昇対策を目的とした排水パイプの施工仕様について述べたが、この他に排水パイプを打設すべき条件として、①盛土のり面の緩んだ表層部分、②のり肩構造物背面の湛水に起因する緩み部分、が考えられる。前者は、締め固め不足や締め固めむらなどの施工不良や経年劣化によりのり面表層が緩んだ部分、あるいは集水部分からの雨水の流下により下方のり面が緩んだ部分である。後者は、のり肩構造物がウォーターポケットからのり肩付近へ流れる浸透水を阻害することでのり肩部が湛水し、パイピングやルーフィング現象によりのり肩構造物下の土羽部分が緩んだものである。

盛土のり面の緩んだ表層部分に関しては前節で述べた施工仕様に準じて排水パイプを打設することとした。ただし、排水パイプの打設長さは、表層の緩み部分がそれほど深くないと考えられることから長さ4mを基本とした。のり肩構造物の周辺部分については基礎下部から構造物背面のウォーターポケットに到達する範囲までとし最大8mを基本とした。

5. おわりに

不安定化しやすい構造として、切盛境界の盛土を対象に、降雨時に想定される湛水による影響範囲を定量的に評価するとともに、排水パイプを施工した場合の浸透流解析と、その結果に基づく安定解析により施工仕様を提案した。その他、排水パイプを施工する必要がある条件を整理し、施工条件と合わせて排水パイプの最適な設計仕様として整理した。なお、切盛境界の盛土と同様のメカニズムで不安定化すると考えられる落込み勾配および橋台背面に位置する盛土についても本仕様が適用できる。今後は、谷渡盛土における施工仕様について検討する予定である。

文献

- 1) 斎藤迪孝：盛土施工に関する最近の資料から、鉄道技術研究所速報，No.59-191，1959
- 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，Vol26，No.9，Sep.2012
- 3) 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，1986.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，2007