

道路盛土の排水性向上策に関する検討

北口 峻輝¹・常田 賢一¹

¹大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)

土工構造物の一つである道路盛土では、近年の豪雨あるいは地震により、すべり崩壊などの被害が顕在化している。このような新設あるいは既設盛土の安定性には、盛土内の含水状態、地下水位が深く関係している。ここで、盛土の安定性を回復・確保・向上させる有効な方法は、盛土内の排水機能の向上である。本研究は、比較的簡易な方法である“排水パイプ”と“大型ふとんかご”に着目し、それらの利活用と効果の検証を目的としており、本稿では、実盛土における排水パイプの排水効果の検証結果および排水パイプの設計法（設置幅と設置延長）を提示する。また、ふとんかごの新設盛土への盛土内排水工としての活用法を提起する。

キーワード 道路盛土, 排水対策, 排水パイプ, 堤内ふとんかご, 浸透流解析

1. はじめに

近年、降雨あるいは地震による道路盛土のすべり崩壊などの被害が顕在化している。2009年駿河湾を震源とする地震では、東名高速道路で発生した盛土の崩壊により5日間の通行止めを余儀なくされた。同被害では、盛土内の地下水位が高い状態であったことが原因の1つとして挙げられている。このように、道路盛土の安定性には盛土内の含水状況や地下水位が深く関係しており、2015年3月に制定された道路土工構造物技術基準¹⁾でも排水の重要性が謳われている。ここで、大規模なすべり崩壊の抑制のためには、堤内深部の地下水を常時で排水し、さらに降雨時も速やかに排水することである。本研究では、比較的簡易な方法である“排水パイプ”と“大型ふとんかご”に着目し、それらの利活用と効果の検証を目的とする。

排水パイプは、既設盛土に対して直接打設して施工することが可能であり、簡易かつ経済的な施工法である。現在、排水パイプは鉄道盛土や宅地盛土で実用化されている。しかし、排水パイプの施工は経験的な設計に基づいているのが現状であり、適切な設置間隔や施工配置などの具体的な設計法が未確立である。そこで、排水パイプの基本的な特性に関する室内土槽実験²⁾を実施し、本研究会（H24年度）で報告した。本稿はその後実施した、排水パイプの設計法（設置間隔と敷設長）の提示、阪神高速道路柵管内の実道路盛土における排水パイプの排水効果の検証結果を報告する。

次に、大型ふとんかごは、低コストで施工性がよく、道路盛土においても災害時の復旧工法として多用されている。災害復旧時のふとんかごの適用には、主に法尻部

への設置が行われる。一方で、本稿では、法尻への設置以外として、砂防分野で考慮されている盛土内部での設置（以下、堤内ふとんかごと呼ぶ）に着目し、飽和—不飽和浸透流解析により排水特性を明らかにするとともに、主として、新設盛土の盛土内排水工としての活用法を提起する。

2. 排水パイプの設計法の提案

(1) 排水パイプ

道路盛土の安定性には、盛土内の水の影響が大きいことから、法面から湧水が発生している場合や将来的に盛土内の含水状況の悪化が危惧される場合、排水対策による予防保全が重要となる。排水パイプは、道路盛土に対して直接打設して施工することが可能なため、既設盛土に対する後施工が簡易かつ経済的な施工法である。図-1に示すように、排水パイプは外径60.5mm、内径55.9mm、1本当たりの長さ1.8mであるが、接続管で継ぎ足すことにより、1.8mの倍数で延長が可能である。排水パイプ断面の四隅には幅5mm、長さ50mmのスリットが50mm間隔で千鳥配置されていることから、排水効果を有する。また、鋼製有孔管であり、耐食性メッキ処理が施されているため、長寿命であるという特徴を有する。

(2) 擬似三次元化手法

a) 決定フロー

道路盛土は、鉄道盛土と比較すると大規模であることから、排水パイプを設置する際に、設置場所や設置間隔、

敷設長を効果的に決定する必要がある。そのため、経験的な設計ではなく、排水パイプの効果を定量的に評価する手法の確立が必要である。本稿で提案する擬似三次元化手法は、排水パイプの排水能力を、飽和透水係数 k' で評価する手法であり、解析的に排水パイプの効果を評価することが可能である。擬似三次元化手法の決定フローを図-2 に示すが、同法では、図-3 に示すとおり、排水パイプの設置間隔と敷設長が決定した3次元地盤に排水パイプを設置した場合を考える。このとき、排水パイプの打設方向に対して直角の断面は一樣であり、この断面を四隅排水モデルと呼ぶ。次に、擬似三次元化手法では、図-3 に示すとおり、排水パイプを同一の設置間隔と敷設長、パイプ直径の厚さを有した透水層に置き換える。このとき、排水パイプの打設方向の断面は一樣であり、この断面を擬似三次元モデルと呼ぶ。まず、基本として、予めパイプを敷設する前施工の詳細を以下に示す。

b) 四隅排水モデル

排水パイプの設置間隔・敷設長、地盤の透水係数が決定すると、まず、四隅排水モデルより排水量を求める。四隅排水モデルを図-4 左図に示す。パイプ内部は要素を与えていないため、解析モデルはパイプの四隅にスリットを配置し、浸出面境界を設定した。ここで、解析モデルのスリット幅は実寸のスリット幅 5mm を考慮し、パイプの総面積における比率から 1.875mm と設定することで、パイプを模擬した。また、地表面に水頭既知境界 ($h=45\text{cm}$) を設定し、定常解析を行う。これにより、四隅の浸出面境界からの排水量の合計を四隅排水モデルの排水量 q とする。次に、図-4 左図の総排水量 Q は四隅排水モデルの排水量 q と敷設長 L の積で求められるので、次式となる。

$$Q_{\text{前施工}} = q \times L \quad (a)$$

c) 擬似三次元モデル

擬似三次元モデルを図-4 右図に示す。式(a)より求めた四隅排水モデルの総排水量 Q は、排水パイプ内は空洞であるため、総排水量に排水パイプの透水係数は影響しない。一方で、擬似三次元モデルでは、排水パイプを透水係数 k' の透水層に置き換え、浸透流解析より排水量を求める。そのため、擬似三次元モデルの排水量は、透水層の透水係数 k に依存する。解析条件としては、地表面に四隅排水モデルと同様に水頭既知境界 ($h=45\text{cm}$) を設定し、浸出面境界は、透水層の排水側外面の下半分に設定する。次に、ある透水層の透水係数 k に対する擬似三次元モデルの定常解析を行い、擬似三次元モデルの排水量 q' を求める。図-4 右図の総排水量 Q' は擬似三次元モデルの排水量 q' と設置間隔 B の積で求められるので、次式となる。

$$Q'_{\text{前施工}} = q' \times B \quad (b)$$

ここで、四隅排水モデルから総排水量 Q が求められて

いるため、式(a)と(b)から算出される総排水量が一致する透水層の透水係数 k' を繰返し計算する。式(a)と(b)が一致したときの透水係数を、前施工時の排水パイプの排水能力を表す排水パイプの透水係数 k' として決定する。

d) 前施工と後施工の排水特性の比較

秋田らの土槽排水実験³⁾では、前施工と後施工の排水実験を同一条件で行い、図-5 に示すように水位と排水量が比例関係にあることを示した。この考察として、後施工時の排水量の低下の原因が、排水パイプ打設によりパイプ周辺の地盤が締め固まる、すなわち、パイプ周辺の高密度化を挙げた。擬似三次元化手法が排水量に着目した透水係数 k' の評価法であることから、本論文では、秋田らの土槽排水実験の前施工と後施工の排水量の関係³⁾に着目した。図-5 の両式の勾配の比から、前施工時の

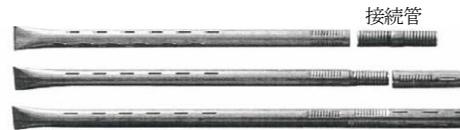


図-1 排水パイプ

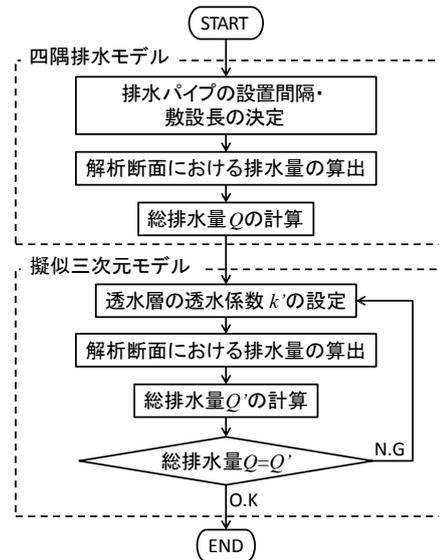


図-2 擬似三次元化手法の決定フロー

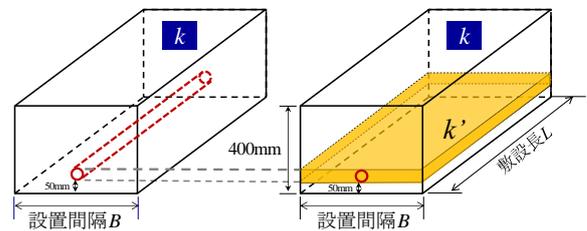


図-3 擬似三次元化手法

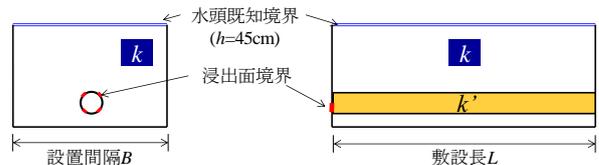


図-4 解析モデル

(左図：四隅排水モデル，右図：擬似三次元モデル)

排水量は後施工時の排水量の 1.8 倍である．この関係を式(a), (b)に適用すると，後施工時の排水パイプの透水係数 k の算出法は次式となる．

$$Q_{\text{後施工}} = q \times L / 1.8 \quad (c)$$

$$Q'_{\text{後施工}} = q' \times B \quad (d)$$

式(c)と(d)が一致したときの透水係数を，後施工時の排水パイプの排水能力を表す排水パイプの透水係数 k' として決定する．

(3) 排水パイプの設計法

表-1 に地盤の透水係数 k およびそれに対する排水パイプの透水係数 k' ，透水係数比 k'/k を示す．これより，透水係数比 k'/k は，地盤の透水係数 k に依存しないことがわかる．そこで，設置間隔 B と敷設長 L を変化させたパラメトリックスタディを実施し，前施工時および後施工時の擬似三次元化手法を適用し，透水係数比 k'/k を求め，等高線図を作成した．その結果を図-6, 7 にそれぞれ示す．同図によれば，設置間隔 B と敷設長 L から，簡便に排水パイプの透水係数 k' を設定することが可能である．

3. 排水パイプの実道路盛土への適用事例

(1) 対象盛土

対象盛土は神戸市北区に位置する阪神高速道路・7号北神戸線の高さが約 20m の高盛土（以後，阪 20 と呼ぶ．）であり，対象盛土横断面図を図-8 にそれぞれ示す．対象盛土は，緊急点検およびマクロ評価による地震危険度評価⁴⁾の結果，補強・調査が必要とされた道路盛土である．

阪 20 では法面におけるボーリング調査および調査孔を用いた観測井（図-8 の阪 20-1 および阪 20-2）において地下水位の連続観測などの現地調査がされている．ここで，図-8 の青丸印はそれぞれの観測井における常時の地下水位（2013年6月）である．また，法面中腹より常時湧水の発生が確認されていることから，地下水位が高いことが予想される．これらの背景より，阪 20 では2013年9月に，排水パイプ（敷設長 3.6m，設置間隔 2m）が上下2段（鉛直方向間隔 1m）の千鳥配置で打設されている．

(2) 解析モデルの再現性の検討

解析モデルは，ボーリング調査，表面波探査結果および湧水の発生位置をもとに決定しており，図-9 に示す．ここで，図-8 に示した湧水位置と2カ所の観測井における常時の実測地下水位を比較すると，湧水は常時の実測地下水位より上側で発生している．そのため，観測井は

自由水面を計測し，水位は唯一の値として計測されるので，観測井のみでは明らかにできない水の流れや滞水が存在していることが考えられる⁵⁾．そこで，対象盛土では，図-8 の上粘性土層が湧水発生に大きく影響を及ぼしていると考え，湧水および上粘性土層の上部に高含水領域を考慮した飽和—不飽和浸透流解析を実施した．

解析パラメータは，不飽和浸透特性は河川堤防の構造検討の手引き⁶⁾を参照した．地盤の透水係数は，粒度試験結果や逆解析による試行錯誤で，表-2 に示すとおり求めた．ここで，モデルの再現性の検討方法を考えるう

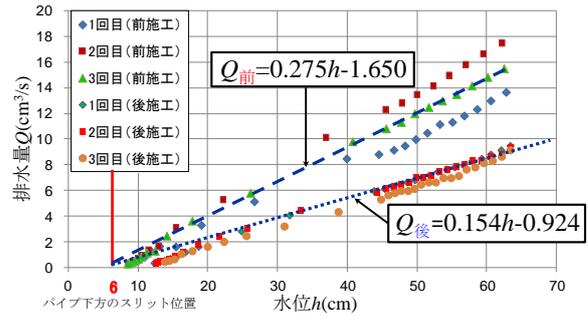


図-5 前施工と後施工の排水量の関係

表-1 透水係数比

地盤の 透水係数 k [m/s]	排水パイプの 透水係数 k' [m/s]	透水係数比 k'/k
1.0×10^5	1.16×10^3	116
1.0×10^6	1.16×10^4	116
1.0×10^7	1.16×10^5	116

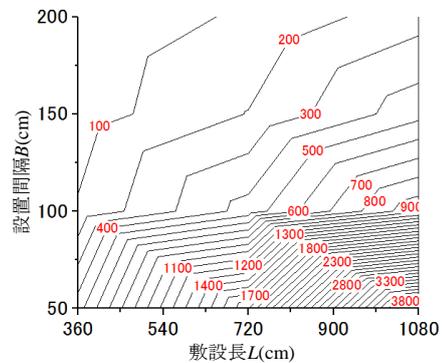


図-6 前施工時の透水係数比 k'/k

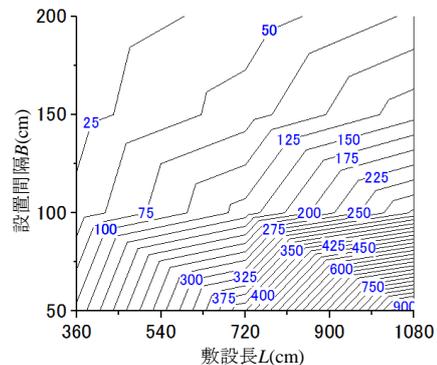


図-7 後施工時の透水係数比 k'/k

えで、上記のとおり、**図-10**のように地下水位の上側に湧水や高含水領域が存在する盛土内の水分状況が考えられる。そのため、常時に着目し、**阪 20-1**、**20-2**の2カ所の観測井における地下水位、湧水の発生箇所および流出量の3つでモデルの再現性を確認する。また、境界条件については、**図-9**に示すとおり、地表面に水面を与える水頭既知境界を設定することで水を供給し、湧水の発生している法面に浸出面境界を設定した。

図-10に非定常解析による常時の飽和度の解析結果を示す。前述の3つの再現性を確認する項目を検討する。まず、観測井の**阪 20-1**と**20-2**における解析による地下水位と常時の実測地下水位とを比較すると、両者の差は**阪 20-1**および**阪 20-2**でそれぞれ**-0.7m**(実測<解析)および**+0.7m**(実測>解析)となった。これは、盛土高が**20m**を超えることを考えると再現性がよいと判断できる。また、湧水発生位置が一致し、流出量が**1.164cm³/s**と微量であることから、その妥当性を確認した。これら3つの項目より、解析モデルの再現性を確認し、本稿では、**表-2**の地盤の透水係数を対象盛土のパラメータとして決定した。

(3) パイプ打設による効果の検討

解析ケースを**表-3**に示し、排水パイプ打設ケースの拡大図を**図-11**に示す。ケース1は排水パイプが未設置であり、パイプを設置したケース2およびケース3はともに敷設長**3.6m**であるが、前者は設置間隔**1m**の1段、後者は設置間隔**2m**の2段である。すなわち、ケース2とケース3は、設置間隔は異なるが設置密度は同じである。排水パイプの透水係数は、**図-7**で示した後施工時の透水係数比 k/k' に基づいて、設置間隔および敷設長から決定した。排水パイプの不飽和浸透特性については代表的な砂の水分特性曲線 $(\theta_r=0.365, \theta_i=0, \alpha=5.748, n=1.629)$ を用いた。また、ケース3は、対象盛土における実際の施工方法から解析モデルを決定した。降雨時の境界条件は**図-12**に示すとおりである。**図-13**に示すとおり、降雨境界には、降雨波形として対象盛土付近で観測された時間雨量を用いた。ここで、横軸の時間が0の状態は常時を意味する。

湧水発生箇所を拡大した飽和度の解析結果を**図-14**に示す。常時、降雨時ともに地下水位がパイプ付近で低下している。なお、地下水位はゼロ水圧線と定義するが、これによると地下水位は3深度で現れるが、最も上側の地下水位に着目する。ここで、地下水位低減効果とは、観測井での無対策ケースの地下水位と排水パイプ打設ケースの地下水位の差と定義する。**図-13**は地下水位低減効果の経時変化であり、パイプ打設により常時で**0.15m**程度、降雨時で最大**0.52m**の地下水位低減効果が得られ、パイプの設置は2段より1段の方が排水効果が大きい。**阪 20-1**と**阪 20-2**の地下水位低減効果を比較すると、法面に近い**阪 20-2**の低減効果が大きい。また、流出量は常時については差異がないが、降雨時にはパイプ打設ケ

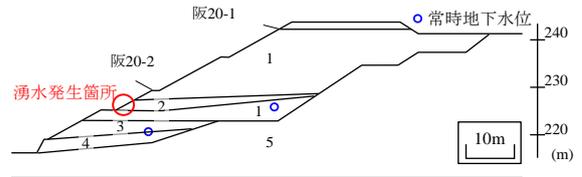


図-8 阪20横断面

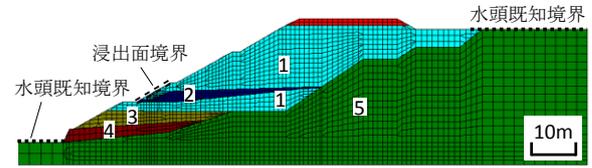


図-9 常時の解析モデル

表-2 地盤の透水係数

層番号	地盤の種類	透水係数 $k[m/s]$
1	砂質土	3.0×10^{-6}
2	上粘性土	1.0×10^{-8}
3	下粘性土	3.0×10^{-6}
4	礫質土	1.0×10^{-5}
5	基盤岩	1.0×10^{-8}

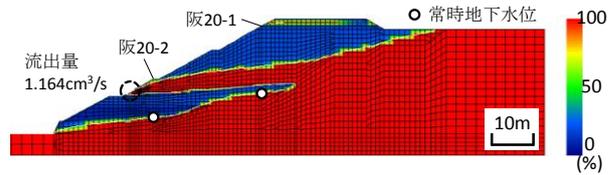


図-10 常時の飽和度の解析結果

表-3 各ケースの排水パイプの透水係数

ケース	地盤 $k [m/s]$	設置間隔 [m]	パイプ $k [m/s]$
1	3.0×10^{-6}	-	-
2	3.0×10^{-6}	1.0	9.79×10^{-5}
3	3.0×10^{-6}	2.0	2.31×10^{-5}

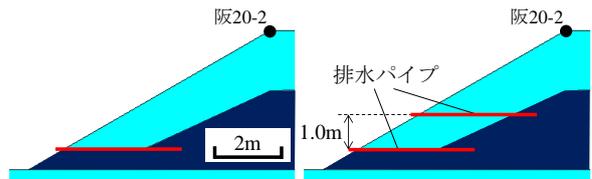


図-11 解析ケース (左図: ケース2, 右図: ケース3)

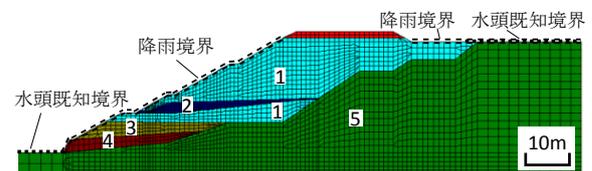


図-12 降雨時の解析モデル

ースの流出量が増大しており、降雨時の排水パイプの排水効果が大きく発揮される。特に、ケース2とケース3を比較すると、設置間隔の狭いケース2の排水効果が大きい。これは擬似三次元手法で提案した透水係数比 k/k' からも明らかのように、設置間隔が狭くなるほど排水パイプの排水能力が増大するためである。また、**阪**

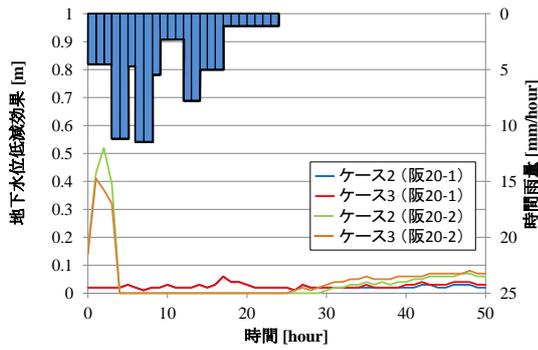


図-13 地下水位低減効果と降雨波形

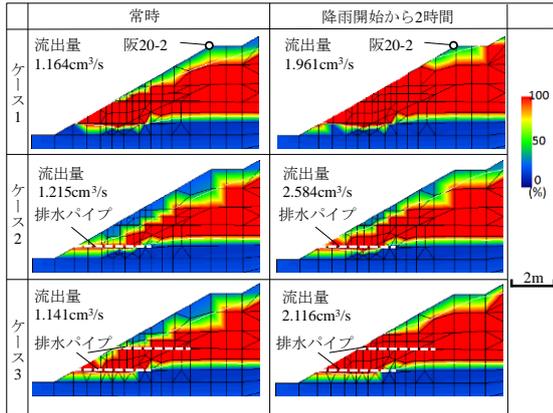


図-14 湧水発生箇所飽和度の解析結果

20-2において降雨時、地下水位低減効果が大きく上昇し、その後、低減している。低減の理由は、降雨の浸透により、盛土上部から湧水発生位置に集水され、地下水位が高い状態となったためである。ただし、湧水発生位置での流出量は、排水パイプ打設により増加するため、徐々に地下水位低減効果が回復する。すなわち、排水パイプの設置により、速やかに地下水位が下がり、盛土の安定性が向上すると言える。

4. 堤内ふとんかごによる排水特性

(1) 堤内ふとんかご

通常、ふとんかごは法尻部に設置されるが、本研究では、主として新設盛土を対象とし、堤内深部に及ぶ大規模なすべり崩壊の抑制を意図して、盛土内部への設置(以下、堤内ふとんかごと呼ぶ)に着目した。そして、2次元飽和—不飽和浸透流解析により、その排水特性を明らかにする。本検討では、主として新設盛土を対象としているが、3章で対象とした高速道路盛土を、より一般的な盛土構造となるようにモデル化した。

(2) 解析モデル

対象盛土は上粘性土層の透水係数が低く、そのため湧

水が発生している特異な盛土であるため、上粘性土層を砂質土層に置き換え、より一般的な道路盛土としてモデル化し、堤内ふとんかごの効果を検討した。

図-15に解析モデルおよび解析条件を示す。盛土上部および下部には地盤高と等しい水頭を与える水頭既知境界を設定し、法尻から高さ0.5mまでの地表面には浸出面境界を設定した。また、初期地下水位として対象盛土で観測された高い地下水位(2012年10月)を設定した。解析ケースは無対策ケース(a)、高さ0.5mの基盤排水層を設置したケース(b)、図-15に示す幅6m、高さ8mの矩形部分に図-16(c)~(n)の12ケースの堤内ふとんかごを設置したケースの計14ケースである。

各ケースは堤内ふとんかごの幅、高さを6m、8mまで2mごとに増加させた。基盤排水層を設置したケースは法尻から法肩直下まで基盤排水層を設置した。また、堤内ふとんかごを設置したケースは、各ケースともに高さ0.5mの基盤排水層を法尻からふとんかごの左端まで設置した。ここで、基盤排水層は $k=1.0 \times 10^4 \text{ m/s}$ 、ふとんかごは $k=1.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ を与えた。本稿では、非定常解析により、時間経過による飽和度の変化と法尻での排水量に着目し、堤内ふとんかごの排水効果を評価する。

(3) 排水特性

図-17および図-18に、図-15に示す拡大範囲の部分に着目した各ケースの解析開始から24時間後および72時間後の飽和度の解析結果の一例を示す。これらの図によれば、無対策ケースは、飽和度の高い領域が長時間継続している。排水対策を施したケースと比較すると、飽和度が高い状態が続くため、排水機能が低い。

一方で、排水対策を施した(b)~(n)では、飽和領域が減少している。例えば、ケース(n)では無対策ケースと

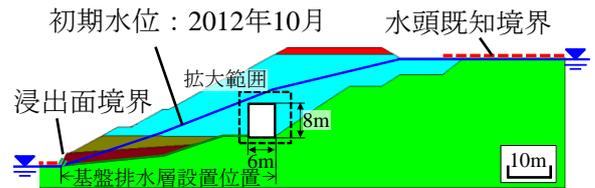


図-15 解析モデルおよび解析条件

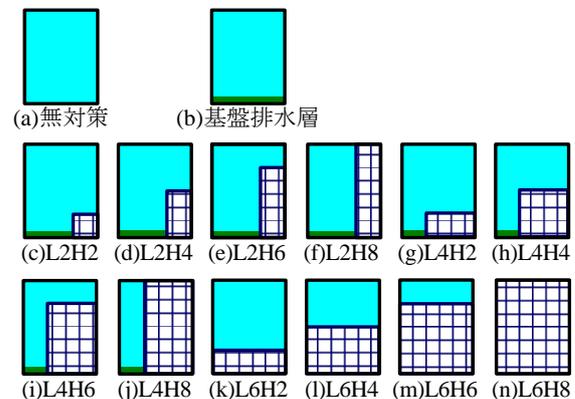


図-16 解析ケース：基盤排水層と堤内ふとんかごのモデル

比較すると、24 時間後で 3.25m、72 時間後で 3.94m、法肩直下の地下水位（ゼロ水圧線）が低下している。

次に、(c)と(k)および(f)と(n)を比較すると、堤内ふとんかごの水平方向への増設による飽和度の分布形状の差異が僅かであることから、水平方向への増設は排水効果の向上には影響が小さい。特に、(c)と(k)は、(b)と比較すると飽和度の形状が類似していることから、基盤排水層による排水効果が大きく影響している。(c)と(f)および(k)と(n)を比較すると、堤内ふとんかごの鉛直方向への増設により、飽和領域が大きく減少しており、鉛直方向への増設は、排水効果の向上に影響が大きい。

他方、法尻からの排水量に着目すると、無対策ケースと比較すると(b)～(n)は、最大排水量で約 2.5 倍から 2.7 倍の排水効果があった。また、飽和度の解析結果と同様に、水平方向へのふとんかごの増設による効果は小さく、鉛直方向への増設が効果的である。

5. 結論

(1) 排水パイプ

本稿では、排水パイプの設計法の確立を目指し、飽和—不飽和浸透流解析により、①排水パイプの排水性能を透水係数で評価する擬似三次元化手法を提案、②設置間隔と敷設長ごとに簡便に排水パイプの性能を参照できる等高線図を提示することを目的とした。また、道路盛土に対して擬似三次元化手法を適用し、排水パイプの効果を評価した。そこで結論を以下に示す。

a) 排水パイプの設計法の提案

- I. 排水パイプを透水層に置き換え、排水パイプの透水係数 k' を求める擬似三次元化手法を提案した。
- II. 擬似三次元化手法による透水係数比 k'/k は地盤の透水係数に依存せず、一定である。
- III. 前施工時、後施工時の設置間隔と敷設長ごとの透水係数比が簡便に得られる等高線図を提示した。

b) 実盛土への適用事例

- I. 湧水を考慮した飽和—不飽和浸透流解析により、対象盛土の解析モデルの再現性を確認することができ

た。

- II. 排水パイプの排水効果は、地下水位が上昇する降雨時に大きく得られる。また、同一設置密度の場合、地下水位低減効果および排水効果は多段より 1 段が効果的である。これらより、擬似三次元化手法を適用することで、常時、降雨時の排水パイプの効果を評価できる。

(2) 堤内ふとんかご

本稿では、一般的な盛土構造の新設盛土を対象として、堤内ふとんかごと基盤排水層による排水特性を飽和—不飽和浸透流解析を行い、比較評価し、新設盛土の盛土内排水工としての活用法を提起することを目的とした。そこで結論を以下に示す。

- I. 堤内ふとんかごの設置による排水機能の向上効果は、水平方向への増設時より、鉛直方向への増設時に大きくなり、今後の新設道路盛土の安定性の向上策として期待できる。

今後の課題としては、基盤排水層の厚さと排水効果の関係、降雨時の堤内ふとんかごの排水効果の検討などがある。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路土工構造物技術基準，2015.3. 2) 秋田剛，常田賢一：既設道路盛土の安定性向上のための排水パイプの適用性の検証，平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会，2012. 3) 秋田剛，常田賢一，平山淳基，柏熊誠治：排水パイプの排水機能に関する室内模型排水実験，第 46 回地盤工学研究発表会，No.964，pp.1927-1928，2011. 4) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，山尾泰之，常田賢一，林健二：道路盛土の緊急点検および地震危険度マクロ評価に基づく耐震対策，第 32 回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM)，土木学会，No.4，294-302，2012. 5) 北口峻輝，常田賢一，Vu Nhat Linh，林訓裕：湧水を考慮した実盛土の 2 次元浸透流解析，第 49 回地盤工学研究発表会，pp.1711-1712，2014. 6) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，pp.50-56，2012. 7) 西垣誠，竹下祐二：室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究，岡山大学工学部土木工学科，1993.

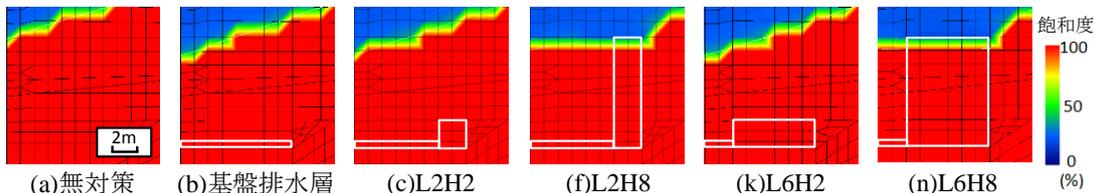


図-17 降雨開始から24時間後の飽和度の分布図（拡大部分）

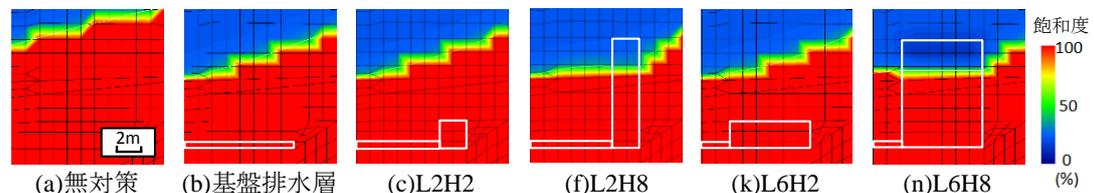


図-18 降雨開始から72時間後の飽和度の分布図（拡大部分）