

盛土に用いる排水パイプの浸透流解析モデル

太田 直之* 杉山 友康** 渡邊 諭*
高馬 太一*** 西田 幹嗣* 石川 智史#

Seepage Analysis Model for the Drainage Pipe Applied to Embankment

Naoyuki OTA Tomoyasu SUGIYAMA Satoshi WATANABE
Taichi KOUMA Tomotsugu NISHIDA Satoshi ISHIKAWA

A drainage pipe is an effective method for improving the stability of embankment. Although it is applied to a lot of embankment, the suitable method of deciding construction specifications, such as the interval, length, etc., does not exist. In almost all cases, they are determined by experience. Accordingly, we investigated the performance of the drainage pipe by the laboratory experiment, and constructed an analysis model of the drainage pipe in consideration of the experiment result. The proposed analysis model can reproduce the water level of full-scale model of embankment.

キーワード：盛土，排水パイプ，浸透流解析，模型盛土，水位，間隙水圧

1. はじめに

降雨や地下水が浸透することにより安定性が低下すると予想される盛土に対しては、排水対策が効果的かつ不可欠な対策とされ、状況に応じてさまざまな種類の排水工が施工されている。そのような排水工のひとつに、排水パイプがある。排水パイプはスリットを有する鋼管を盛土に打設し、盛土内へ浸透した水を円滑に盛土外へと排出し、盛土内の水位上昇を防ぐことを主な目的として実施されている。また、盛土内の間隙水圧や間隙空気圧を低下する機能や、斜面表面に打設される鋼管がのり面を力学的に補強する機能なども期待されることから、効果的な対策として、多くの施工実績を有する。一方、これらの効果の多くは経験的に認められているものであるため、排水パイプの長さや施工間隔を決定するための設計基準はこれまで作成されてこなかった。

本研究では、排水パイプの適切な施工仕様を経験によらず定量的に決定する方法の確立を目的として、排水パイプの浸透流解析モデルの作成を試みた。且つ施工実績も豊富な排水パイプを選定し、その性能を明らかにするとともに、排水パイプによる盛土の安定性向上対策の設計方法を提案した。

2. 排水パイプに関する既往の研究と課題

排水パイプは、上述のように経験的にその効果が認められていること、また、比較的小規模な機械での施工が可能であることから、様々な条件の盛土で施工のニーズが高い。しかし、その施工範囲、施工間隔、打設長などについては「過去に効果が認められた経験」によって決められてきた。

このような経験的設計法が適用されてきた排水パイプの効果を定量的に明らかにする取り組みとして、斎藤ら¹⁾の研究がある。斎藤らは、地表面に水位がある地盤の深さ1mに設置した排水パイプについて浸透計算を行い、そのような条件下における排水パイプの間隙水圧低下効果は、排水パイプから約2m離れた位置にまでおよぶこと、また、排水パイプから1mの位置では静水圧の約80%に水圧を低減できることを明らかにした。また、高さ3.5mの模型盛土を用いた散水実験を行い、排水パイプの打設間隔は1m間隔程度が望ましいとする結果を導いた。

また、藤井ら²⁾は、室内実験の結果を基にして、排水パイプの施工間隔を1mとした場合に水位低下効果が高いこと、長さ2m以上のパイプではその効果は一定になることを明らかにした。また、布川ら³⁾は、上記の藤井らの実験結果を基にして、三次元的な効果を有する排水パイプの機能を二次元問題に置き換えるための等価透水係数を示した。任意のパイプ長さ、パイプ間隔に対応した等価透水係数の算出法を示し、これによって、排水パイプの施工仕様毎の水位低下効果を簡便に求める方法を示した。

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 防災技術研究部

*** 防災技術研究部 地盤防災研究室(現:西日本旅客鉄道㈱)

防災技術研究部 地盤防災研究室(現:東海旅客鉄道㈱)

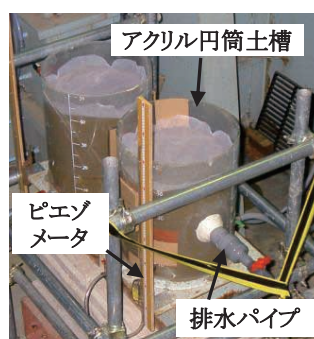


図1 浸透実験状況

表1 模型地盤材料の物性値

土粒子の密度 ρ_s (kg/m ³)	2684
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (%)	1.590
最適含水比 w_{opt} (%)	20.1
最大粒径 D_{max} (mm)	9.5
平均粒径 D_{50} (mm)	0.19
細粒分含有率 F_c (%)	20.7
均等係数 U_c	4.8
曲率係数 U'_c	1.6

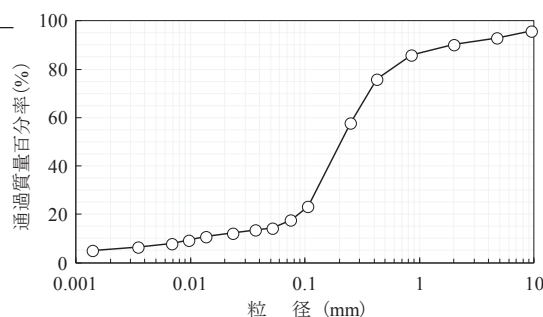


図2 模型地盤材料の粒径加積曲線

表2 模型地盤の密度と透水係数

	Case1	Case2
排水パイプの設置方法	打設	敷設
乾燥密度 ρ_d (kg/m ³)	1483	1442
透水係数 k (cm/s)	4.65×10^{-4}	3.86×10^{-4}

また、蔡⁴⁾は、三次元飽和・不飽和浸透流解析を行い、排水パイプによる盛土の安定化効果を示した。降雨時も排水パイプ内部は満水とならないことから排水パイプ上にあるすべての接点の圧力水頭をゼロと仮定して解析を行い、のり面付近の水位が大きく低下することを示した。

このように、排水パイプの効果については、実験データや現場測定データを基にして定性的に明らかにする取り組みに始まり、近年ではコンピュータ技術の発達によって、その効果を解析的に明らかにする取り組みが進んでいる。しかし、これらの取り組みに基づいた、排水パイプの長さや打設間隔を決定する手法はこれまで提案されてこなかった。

そこで、本研究では、実験等によって排水パイプの効果を明らかにし、その効果を適切に再現する解析モデルを作成し、この解析モデルを用いて、降雨条件や盛土の条件に応じた排水パイプの施工仕様を決定する解析手法を提案することを目的とした。このうち本報告では、実験によって明らかにした排水パイプの定量的効果と、その実験結果を基に作成した排水パイプの解析モデルについて述べる。

3. 模型地盤を用いた排水パイプの効果確認実験

小型模型地盤を用いた浸透実験を行い、地盤に打設された排水パイプが有する水位低下効果（排水能力）および間隙水圧低下効果を確認した。以下に実験の方法と結果について述べる。

3.1 実験方法

3.1.1 実験装置

実験土槽の概略図を図1に示す。土槽は、高さ510mm、内径400mmのアクリル製円筒、鋼製の底板、ピエゾメータ等で構成されている。アクリル円筒側面には排水パイプの挿入孔が設けられており、排水パイプが設置された状態の地盤模型を作成することができる。模型地盤内に設置した排水パイプ中央の高さは、土槽の底板面から235mmとなる。この円筒模型地盤を用いて鉛

直方向の浸透実験を実施した。

実験に用いた排水パイプは、盛土用の排水パイプとして一般に用いられているものを土槽の直径に合わせて長さ500mmに切断したものである。直径60.5mmの鋼製パイプの周面に、幅5mm、長さ50mmのスリットが16箇所開けられており、スリットの開口面積は合計4000mm²となる。

実験に用いたアクリル円筒には、上端部1箇所に切り欠きを設けており、実験装置に水を溜めて切り欠きから越流させることで、底板面から500mmの水面高さを維持した定水位実験ができる。

また、円筒容器側面の最下端にピエゾメータを取り付けており、模型地盤底面の圧力水頭を測定することが可能である。

3.1.2 地盤材料の物理的性質

模型盛土地盤には砂質材料を用いた。試料の主な物理的性質を表1に、粒径加積曲線を図2に示す。

3.1.3 模型地盤の乾燥密度と透水係数

実験では、実際の排水パイプの施工と同様に、模型地盤を作成した後に排水パイプを打設したCase1と、予め排水パイプを敷設した状態で試料を締め固めて模型地盤を作成したCase2の二種類の模型地盤を作成して実験を行った。両ケースが等しい密度になるように同一のエネルギーで試料を締め固めて、厚さ400mmの模型地盤を作成した。実験終了後に模型地盤から採取した不攪乱試料による各模型盛土地盤の乾燥密度 ρ_d および透水係数 k を表2に示す。不攪乱試料の採取は、模型盛土地盤を4層に分け、各層から3個の試料を採取した。表2中の値は、全ての試料の平均値である。

3.1.4 測定方法

排水パイプの排水口を閉じた状態で、ボーリングが生じないように注意しながら底板から模型地盤内に水を注

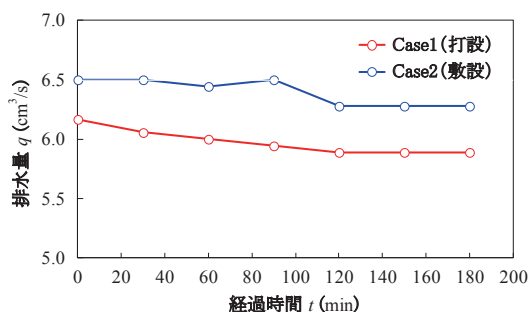


図3 排水量の経時変化

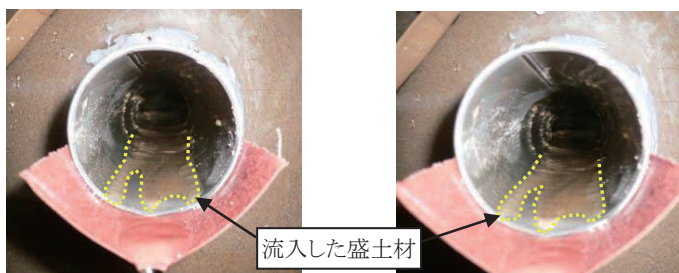


図4 排水パイプ内への試料の流入状況 (Case2)

入した。浸透水が模型地盤を満ち、アクリル円筒上端から水が越流した状態で排水パイプの排水口を開け、排水パイプから排水される水の流出量およびピエゾメータで得られる圧力水頭を測定した。

3.2 実験結果

3.2.1 排水量

図3に排水パイプからの流出量の経時変化を示す。

排水パイプを打設した場合は敷設した場合に比べて10%程度排水量が低下している。これは、排水パイプが盛土内に打設されたことにより、排水パイプ周囲の土が締め固められたことによると考えられる。ただし、表2に示したように、乾燥密度はCase1がCase2より大きいものの、Case1の透水係数はCase2より大きく、通水性が高いことを示している。このことから、打設したことによる排水パイプの排水量の低下は、排水パイプの極近傍の密度変化によるものであることが推定される。

また、両ケースによる排水量の経時変化を見ると、実験開始後しばらくの間は排水量が徐々に低下する傾向を示すものの、120分経過以降は両ケースともほぼ一定の排水量となっていることがわかる。これは、排水パイプ周辺の土粒子が浸透水とともに移動し、再配列された土粒子の配列が安定したことによるものと推定される。

図4に排水パイプ内への試料の流入状況の例として、排水パイプを敷設した場合 (Case2) の結果を示した。実験開始30分後と180分後で試料の流入量に大きな差異がないことがわかる。これは、実験初期には排水パイプのスリット近傍の緩く堆積していた土粒子が流されるものの、ある程度の時間が経過すると安定した骨格を形成する土粒子が浸出面に残り、土粒子の流出を止める働きをするためと考えられる。また、図4のような試料の流入量は、排水パイプを打設した場合よりも敷設した場合の方が多。これは、パイプを打設した場合、その周辺の材料が締め固められることにより、土粒子の骨格がより堅固に形成されることによるものと考えられる。

これらのことから、盛土内に打設された排水パイプ周辺では、打設に伴うパイプ周囲の盛土材密度の増加や土粒子骨格の堅固化が生じていると考えられる。これらの

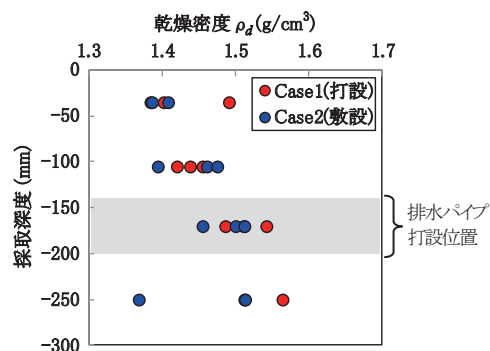


図5 実験後の地盤の密度分布

影響によって排水パイプ周辺の盛土材に透水性の低い領域が形成され、そのため図3に示されたように排水パイプの打設による排水量の差異が生じるものと推察される。

したがって、排水パイプの排水能力を適切に評価するためには、この低透水性の層の影響を考慮する必要があるといえる。本研究では、この排水パイプの周囲に形成される低透水性の層をスキニエフェクト層とよぶ。

3.2.2 排水パイプ周囲の密度変化

排水パイプの打設が盛土材の密度分布を変化させると考えられることから、その影響範囲、すなわちスキニエフェクト層の厚さを明らかにするために、実験後の模型地盤の密度分布状況を調べた。模型地盤の各箇所から、直径50mm、高さ50mmの円筒形のシンウォールサンプリャを用いて不攪乱試料を採取し、乾燥密度を測定した。

測定結果を図5に示す。乾燥密度の分布状況に排水パイプの設置方法による明確な差は表れていない。いずれのケースでも模型地盤の下方ほど密度が増加する傾向を示している。図中の網掛けは排水パイプ位置を示しているが、Case1の網掛け部分の乾燥密度がその上下より特に高い値を示している様子はみられない。

これらのことから、排水パイプの打設によって透水性能が変化する盛土地盤の領域は、排水パイプに極めて近い範囲であると推定される。

3.2.3 模型地盤底面位置の圧力水頭

図6に圧力水頭の測定結果を示す。ピエゾメータの値は実験中ほぼ一定の値を示し、Case1は330mm、Case2は305mmであった。水位は円筒土槽底面から500mmの高さにあるため、土槽底面に作用する圧力水頭は、排

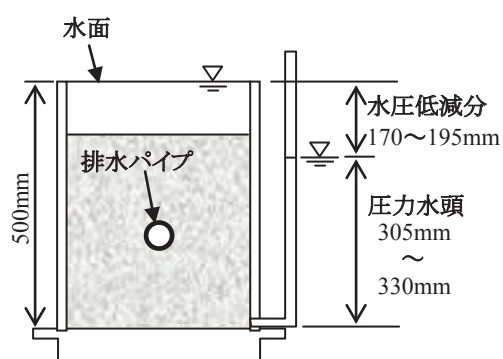


図6 底面圧力水頭の測定結果

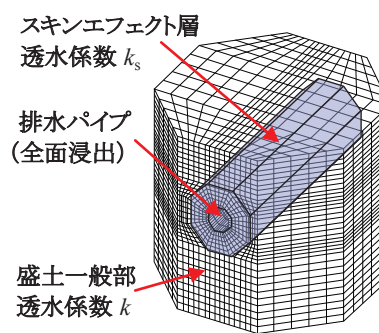


図7 排水パイプの解析モデル

水パイプによって170mm～195mm低減されたことが分かる。すなわち、排水パイプ打設位置よりも高い位置に水面があっても、排水パイプによってその周囲の盛土の間隙水圧は34%～39%低減されたことになる。

ここで、圧力水頭の低減は、排水パイプによって大気圧と接する面が模型盛土地盤内に形成されたことによるものであり、排水パイプの設置方法による差異はないものと考えられる。したがって、Case1およびCase2の各ピエゾメータの測定値の差異は誤差と捉えることが妥当と考える。

なお、実験の結果得られた間隙水圧低下効果は、前述した斎藤ら¹⁾が試算した排水パイプの間隙水圧低減効果よりも低い値となっている。これは、排水パイプによる間隙水圧低減効果には、地盤の透水性やパイプのスリットの大きさなどが影響を及ぼしているためと考えられる。

4. 排水パイプの解析モデル

実験の結果を基にして、排水パイプの効果を適切に評価する解析モデルとして、パイプ周辺に形成されるスキンエフェクト層を考慮したモデルを検討した。実験の結果得られた排水パイプからの排水量を再現するスキンエフェクト層の厚さと透水性を三次元浸透流解析で明らかにした。

4.1 解析モデルの検討

4.1.1 解析モデルの形状

実験に用いた円筒模型地盤の解析モデルを図7に示す。地盤および排水パイプのモデルは簡素化のため八角柱とした。また、この地盤モデルの底面から高さ235mmの位置に排水パイプを表す空洞を設定している。この排水パイプを表す空洞の断面は対角線の長さが60mmの正八角形であり、空洞の内側全面を浸出面としている。排水パイプのスキンエフェクト層の範囲は、図7のように排水パイプの断面形状に相似な形に設定した。ここで、実際のスキンエフェクト層の範囲は明確でないため、排水パイプ表面からの厚さ t を10mm,30mm,50mmと変化させて、空いていないか、それぞれについて解析を行った。

なお、実験では底面からの高さ50cmの位置に水位を一定に維持した状態で排水量および圧力水頭の測定を行ったため、解析では円筒模型地盤上端面に底面からの高さ50cmの圧力水頭を均一に作用させた定常解析を実施した。

4.1.2 解析に用いた各定数

実験に用いた各円筒模型地盤の乾燥密度および土粒子の密度から飽和体積含水率 θ_{sat} を求めると、Case1(打設)では47.8%、Case2(敷設)では44.1%が得られる。これらから、解析ではCase1およびCase2とも飽和体積含水率は $\theta_{sat}=40\%$ を用いることとした。また、比貯留係数 S_s はDomenicoら⁵⁾により示されている「ルーズな砂」の代表値として $S_s=1 \times 10^{-4}$ を用いた。また、円筒模型地盤は常に湿潤状態にあるため、最小含水量 M_n は0%とした。

4.1.3 スキンエフェクトの影響範囲外の透水係数

実験Case2で用いた模型盛土の透水係数を用いて浸透流解析を実施したところ、実験による排水量 $6.28\text{cm}^3/\text{s}$ に対して解析値は $2.55\text{cm}^3/\text{s}$ となり、解析値と実験値に乖離がみられた。これは、模型盛土と土槽壁面との境界部分を通る水や盛土の不均一性などが実験結果に影響を及ぼしている可能性があるためと考えられた。そこで、Case2の模型土地盤の透水係数を、Case2の実験結果を用いた逆解析を行い求めることとした。

逆解析の結果、模型盛土地盤の透水係数を $k=3.1 \times 10^{-5}\text{m/s}$ とすると解析値と実験値の差が最も小さくなったため、この透水係数をスキンエフェクトの影響が及ばない範囲の透水係数として用いることとした。

4.2 解析結果

4.2.1 スキンエフェクト層の透水係数

Case1のスキンエフェクトの影響範囲(スキンエフェクト層の厚さ)を排水パイプ表面から $t=10\text{mm}$, 30mm , 50mm とし、実験による排水量と解析による排水量とが一致する時のスキンエフェクト層の透水係数をそれぞれ求めた。ここで、スキンエフェクト層の範囲外の透水係数 k は上述の $k=3.1 \times 10^{-5}\text{m/s}$ とし、スキンエフェクト層の透水係数 k_s を $k_s=n \cdot k$ として実験値に最も近い値を示す透水係数比 n を求めた。

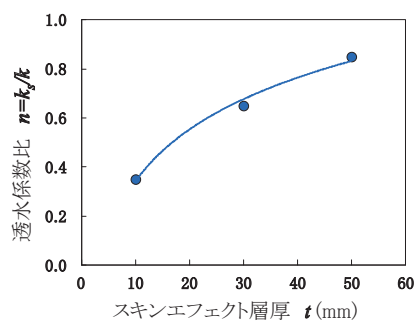


図8 スキンエフェクト層の厚さと透水性との関係

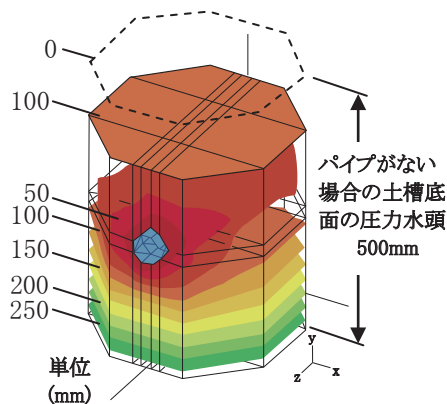


図9 間隙水圧分布の解析結果

解析で得られたスキンエフェクト層厚 t と透水係数比 n との関係を図8に示す。スキンエフェクトの範囲 t を無限大に設定した場合の透水係数比 n の値は、Case1の実験で得られた排水量を基にスキンエフェクトを設定せずに逆解析によって求めた透水係数 k_1 と、上述の透水係数 k との比に漸近する。実験ではCase1の排水量がCase2の90%程度であったため、 n は0.9に漸近することになる。

4.2.2 間隙水圧の分布

上記のようなスキンエフェクトを考慮した排水パイプの解析モデルを用いて、円筒模型盛土地盤の圧力水頭の分布を求めた結果を図9に示す。水位以下に設置されている排水パイプの間隙水圧低下効果によって、土槽底面の圧力水頭が、実験では34%～39%低減されたのに対して解析では44%低減されており、両者はほぼ一致しているといえる。このように、検討した解析モデルは実験時にピエゾメータで測定した間隙水圧を再現でき、したがって、同解析モデルは排水パイプによる間隙水圧の低減効果についても再現可能であるといえる。

5. 実物大模型盛土を用いた解析モデルの検証

実物大模型盛土を用いて散水実験を行い、排水パイプによる水位低下効果を確認するとともに、実験結果を用いて提案する排水パイプのモデルの適用性を検討した。

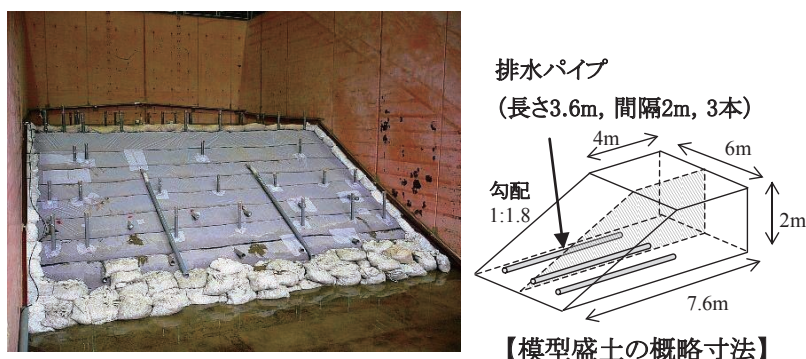


図10 実物大模型盛土

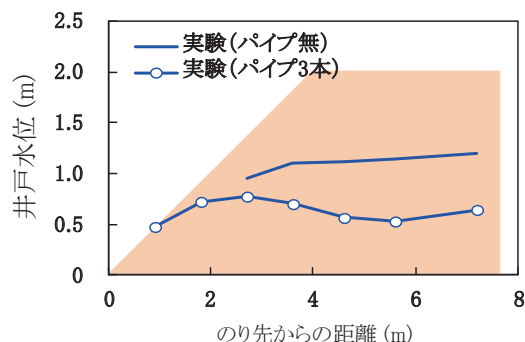


図11 実物大模型盛土を用いた散水実験結果

5.1 実験概要

実験で用いた盛土は、図10のようなのり面勾配1:1.8、高さ2m、底面奥行き7.6m、天端奥行き4m、幅6mの寸法を有している。盛土材には円筒形模型地盤に用いた試料と同一のものを用いた。実験後に盛土から採取した不攪乱試料の透水係数 k は $8.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であった。このような模型盛土に1時間当たり20mmの散水を6時間行い、水位高さの変化を測定した。なお、水位高さの測定には観測井戸を用い、井戸内に形成された水面の盛土底面からの高さを測定した。

5.2 実験結果

排水パイプの有無による水位の差異を図11に示す。ここで、上述の解析による水位は圧力を換算して求めた水位であり、実験と解析のそれぞれで得た水位を区別するために、本報告では、実験による水位を井戸水位、解析による水位を圧力換算水位と表記した。

図11は盛土底面から0.3mの高さに長さ3.6m、直径60mmの排水パイプを2m間隔に3本打設した場合と、排水パイプを打設していない場合について、それぞれ散水終了時における中央の排水パイプの打設断面位置における井戸水位を示している。排水パイプがない場合、のり肩直下の井戸水位は1m程度まで上昇しているが、排水パイプを打設した場合には、0.7m程度に低下している。また、盛土の中心部(のり尻から6m～8mの部分)では、排水パイプの打設によって、井戸水位は約0.5m

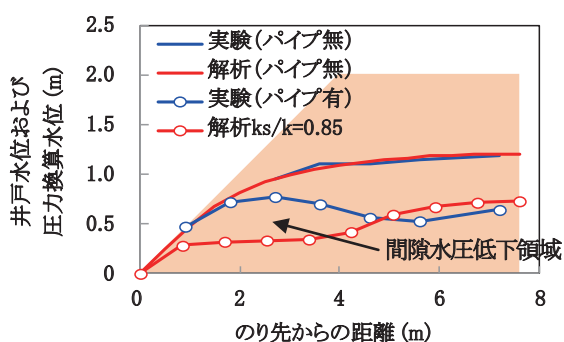


図 12 実験結果と解析結果との比較

低下していることがわかる。図 11 から求めた井戸水位以下の面積を比較すると、排水パイプを 2m 間隔で打設することによって、排水パイプがない場合の約 34% が減少している。

5.3 実験結果と解析結果との比較

排水パイプのモデルとして、スキリエフェクト範囲を 50mm とし、これを基に図 8 から求めた透水係数比 $n=ks/k=0.85$ を用いて解析した結果を図 12 に示す。また、同図中には排水パイプがない場合についても実験結果と解析結果とを示している。ここで、図中に示したいずれの水位も、3 本打設した排水パイプの中央のパイプ打設断面上の水位を示している。

図が示すように、排水パイプのない場合の実験結果と解析結果とはよく一致しており、解析に用いている各水特性値は適切に設定されていることが示されている。

排水パイプを打設した場合の盛土中心部の水位に着目すると、解析結果と実験結果とがよく一致していることがわかる。すなわち、排水パイプを打設することによる水位低下効果について解析結果が実験結果をよく再現していると捉えることができる。

一方、のり先から 4m 程度までの範囲の水位を比較すると、解析から得られた圧力換算水位は実験による井戸水位を大きく下回っており、のり先から 2m ~ 3m 付近でその差は 0.4m 程度あることがわかる。これは、盛土に排水パイプが打設された場合、盛土に設置した水位観測井戸では排水パイプの上方に水面が測定されるものの、この井戸水位以下で圧力換算水位以上の部分（図 12 で「間隙水圧低下領域」と示した部分）の間隙水圧はほぼ 0kPa に低減されることを表している。すなわち、排水パイプの上方に水位は存在してもその部分の間隙水圧は井戸水位に対して低減されており、このような実験および解析の結果を勘案すると、排水パイプを打設した場合の盛土のり面の安定性を適正に評価するためには、圧力換算水位を用いた安定解析を行う必要があることを示唆している。

6. 結論

排水パイプの適切な解析モデルを作成することを目的とした実験および解析の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 模型盛土を用いた浸透実験の結果、排水パイプは水位低下効果の他に間隙水圧低下効果を有している。このため、排水パイプによる対策は盛土の安定化対策として効果的であるといえる。
- (2) 実験結果から、排水パイプの排水能力を適切に評価するためには排水パイプ打設によってその周囲に生じるスキリエフェクトを考慮する必要がある。
- (3) 排水パイプの周囲にスキリエフェクト層を考慮した解析モデルを提案した。提案した解析モデルは、排水パイプの水位低下効果と間隙水圧低下効果の両者を適切に再現することが可能である。また、排水パイプを打設した盛土の安定性を評価する場合、圧力換算水位を適用する必要がある。

7. おわりに

検討の結果、提案する解析モデルは排水パイプの効果をよく再現することができ、これを用いることで、排水パイプの適切な施工仕様を決定することができる。今後、さらに実際の盛土に適用した場合の検証を加え、提案するモデルの妥当性を確認する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたって、岡山大学西垣教授のご助言をいただいた。また、排水パイプの施工実態に関する現地調査等で、JR 西日本の構造技術室を始めとする各協力の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 斎藤迪孝, 上沢弘, 毛受貞久, 安田祐作: 有孔パイプによる新幹線盛土斜面の排水効果, 鉄道技術研究報告, No.631, pp.1-18, 1968
- 2) 藤井昌隆, 岡田勝也, 杉山友康, 村石尚, 佐溝昌彦, 草野國重: 排水パイプの施工ピッチの影響に関する実験: 第 31 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1999-2000, 1996
- 3) 布川修, 杉山友康, 太田直之: 排水パイプの排水効果を 2 次元問題として扱う手法について, 第 38 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.2237-2238, 2003 新
- 4) 蔡飛: FEM による地すべり解析の基礎理論, 日本地すべり学会誌, Vol.40, No.5, pp.93-96, 2004
- 5) Domenico, P. A. and Schwartz, F. W.: Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, New York, 824p, 1990.