

## 10.1 土構造物の排水性能向上技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：技術推進本部（施工技術）

研究担当者：大下武志，宮武裕昭，井谷雅司，  
徐永強

### 【要旨】

本研究は、盛土・擁壁に要求される排水性能を明らかにし、盛土材や排水材などの使用材料、降雨量、構造条件等に応じた排水工の設計手法を提案するとともに、既設盛土・擁壁の排水性能の調査・点検手法、簡易で効果的な機能回復方法の開発を行うことを目的とする。本年度は、地山湧水のある盛土を対象に、排水材の配置長さ、間隔をパラメータとした浸透実験及び数値解析を行った。また、様々な排水材を用いる場合に各基準類がどのような排水性能を要求し、どのように設計を行っているかについての情報を収集・分析した。

キーワード：盛土，排水材料，浸透実験，数値解析

### 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、2007年能登半島地震における大規模な盛土崩壊（写真1.1）でも再確認された<sup>1)</sup>。この地震では、能登有料道路で多くの盛土被害が生じた。大規模な崩壊は11箇所で見られ、いずれでも、沢や湿地、湧水などの水の存在が確認されており、盛土内の水が大規模な崩壊の要因の1つと思われる。以上を踏まえ、本研究は、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排水工の設計手法を提案するとともに、既設盛土・擁壁の排水性能の調査・点検手法、簡易で効果的な機能回復方法の開発を行うことを目的とする。

傾斜地盤上盛土、谷埋め盛土では、地山からの湧水が盛土内へ浸透し、盛土のり面を不安定にすることが多い。このような場合、のり面内に排水管（有孔管）を設置し、土中水を排除することがしばしば行われる。しかしながら、このような排水管の位置と規模は、盛土内水位の分布状態や自由水面の位置などを予測した上で実施されるが、経験に基づくことが多い。現在のところ、理想化された状態に対してでさえ、排水管の位置、設置間隔、長さ、方向などが土中水位の低下、排水量、斜面の安全率の上昇にどの程度寄与するかを精度良く予測する方法は提案されていない。

盛土の地下排水材および擁壁の裏込め排水材として、



写真1.1 能登有料道路の盛土崩壊

様々なジオシンセティック材料が開発され、普及しているが、これらの材料を用いる場合に各基準類がどのような排水性能を要求し、どのように設計を行っているかは明らかにされていない。

本年度は、地山湧水のある盛土を対象に、排水材の配置長さ、間隔をパラメータとした浸透実験及び数値解析を行った。また、様々な排水材を用いる場合に各基準類がどのような排水性能を要求し、どのように設計を行っているかについての情報を収集・分析した。

## 2. 模型盛土を対象とした実験および数値解析

### 2.1 実験概要

模型盛土の材料には、茨城県江戸崎産の山砂を用いた。代表的な物理的性質を表2.1に示す。粒径加積曲線を図2.1に示す。盛土の寸法、排水材（有孔管）及び土中水

表 2.1 模型盛土材料の物性値

一般	土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.664
	自然含水比	%	17.6
粒度構成	粗砂分	%	4.1
	細砂分	%	82.9
	シルト分	%	9.1
	最大粒径	mm	4.75
	均等係数		2.46
	曲率係数		0.78
締め	最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.638
	最適含水比	%	15.8
	飽和透水係数	cm/sec	4×10 <sup>-3</sup>

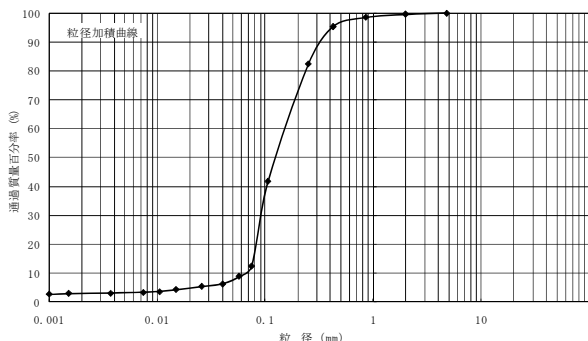


図 2.1 山砂の粒径加積曲線

位を観測するマンメータの配置を図 2.2 に示す、使用した土槽と構築した盛土を写真 2.1 に示す。盛土は、道路における一般的な単線盛土の半断面形状を想定しており、のり面勾配は 1 : 1.5、高さ 1.2m、奥行き 2.3m、幅 1.0m である。盛土は、仕上がり層厚 10cm、平均締め度 90% で作成した。盛土中に設置した有孔管は 5% の勾配を付けて設置した。有孔管には φ20mm の VP 管を使用し 10mm 間隔に φ5mm の穴を千鳥状に配置した。また、有孔管内への細流分流入を防ぐため 15mm×15mm の不織布を穴の周りに貼付けた。

なお、実験では不透水性地盤上の盛土を想定しているため、盛土底面には透水係数 1×10<sup>-5</sup>cm/s 以下となるよう締め厚さ 5cm の関東ローム層を設けた。このため、盛土内に浸透した水は、盛土底面に達した後のり尻より盛土外部へ排水される。

盛土の底面（不透水層と盛土の境界部）には盛土内の水位を測定するためのマンメータを設置した。また、マンメータの水位を自動計測するために間隙水圧計を設置した。実験は、排水管の閉塞条件と背面水位の組み合わせで行った。実験ケースを表 2.2 に示す。なお、有孔管の閉塞条件の制御は、有孔管内の任意の位置をゴム風船

で止水することにより行った。

各のケースにおいて、盛土背面より給水し、水位が安定した時点での浸潤線および排水量を計測した。

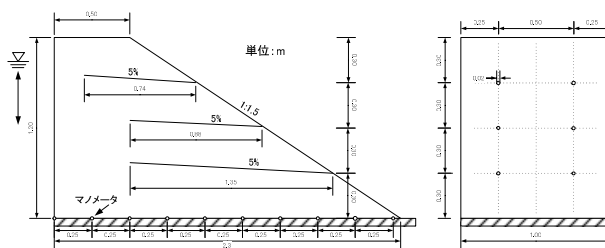


図 2.2 盛土寸法と有孔管の配置



写真 2.1 実験に使用した土槽と構築した盛土

表 2.2 模型盛土の実験及び数値解析ケース

Case No	背面水位 (m)	排水条件	備注
Case0-1	0.77	無排水	解析のみ
Case0-2	1.08	無排水	解析のみ
Case1	0.77	全開	
Case2		片側閉塞	
Case3		最下段後半閉塞	
Case4	1.08	全開	
Case5		片側閉塞	解析のみ
Case6		最下段後半閉塞	

2. 2 浸透流解析モデル

実験盛土を対象とした飽和-不飽和浸透流の数値解析を行う。3次元飽和-不飽和浸透流を支配する方程式は次のようになる。

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

ここに、 $K(\theta)$ は土の透水係数、 $\theta$ は体積含水率、 $h$ は

圧力水頭、 $z$ は基準位置からの高さ、 $t$ は時間、 $C(\theta)$ は比水分容量、 $S_s$ は比貯留係数、パラメータ $\beta$ は、飽和流域で $\beta=1$ 、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。ここでは、van Genuchtenが提案した次式を用いて解析を行う<sup>2)</sup>。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h|^n\right)^m$$

$$C(\theta) = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r)S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m$$

$$K(\theta) = K_s K_r = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^2\right]^2$$

ここに、 $S_e$ は飽和度、 $\theta_s$ は飽和体積含水率、 $\theta_r$ は残留体積含水率、 $K_s$ は飽和透水係数、 $K_r$ は比透水係数、 $\alpha, n, m$ は経験パラメータで $m=1-1/n$ の関係がある。

盛土内の初期水位は、盛土の底面とする。排水管に沿って水は完全に排水されると仮定し、排水管の位置にある節点での圧力水頭はゼロとする。

表 2.3 に盛土材料の山砂、地盤材料の関東ロームの不飽和浸透特性を表わすパラメータ値を示す。また、図 2.3 (a)と図 2.3 (b)にそれぞれ山砂と関東ロームの水分保持曲線を示す。盛土内の初期圧力水頭は、深さ方向に直線

表 2.3 浸透特性パラメータ値

	山砂	関東ローム
$\theta_s$ [-]	0.565	0.760
$\theta_r$ [-]	0.221	0.218
$\alpha$ [-]	1.47	1.15
$n$ [1/cm]	0.0666	0.0149
$S_s$ [1/cm]	0.01	0.01

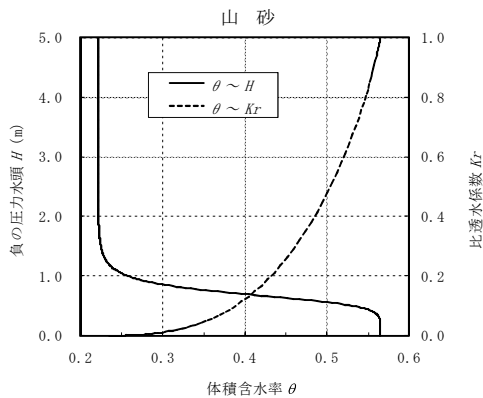


図 2.3 (a) 山砂の水分保持曲線

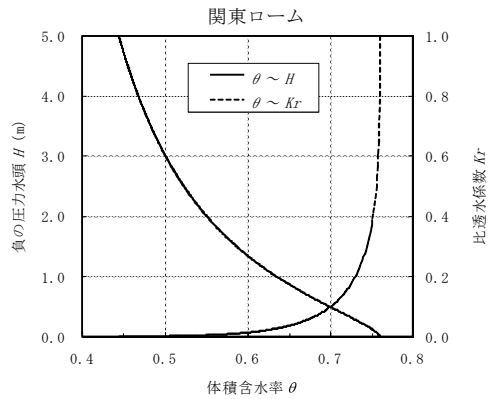


図 2.3 (b) 関東ロームの水分保持曲線

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。盛土背後に一定の水位がある境界条件とし、のり尻に浸出がある場合浸出点境界とする。

### 2. 3 実験及び解析の結果

図 2.2 に示す模型盛土をモデル化し、浸透流解析を行う。モデルのメッシュ分割は図 2.4 に示す。飽和透水係数は、Case1 の実験から得られた浸潤線及び排水量から逆算し、 $K_s=4 \times 10^{-3}$ cm/sec となった。実験より得られた各ケースの定常時浸潤線を数値計算で得られた無排水時浸潤線とともに図 2.5、図 2.6 に示す。

図より、有孔管を入れることによって浸潤線が低下していることがわかる。

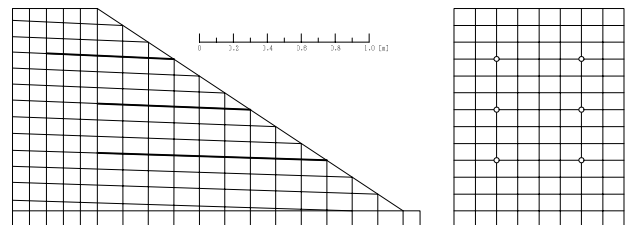


図 2.4 模型盛土のメッシュ分割

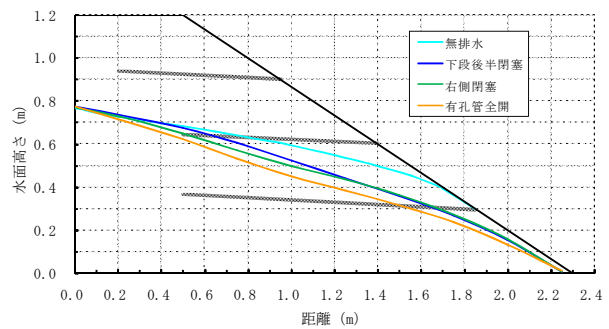


図 2.5 実験浸潤線 (背面水位 0.77m)

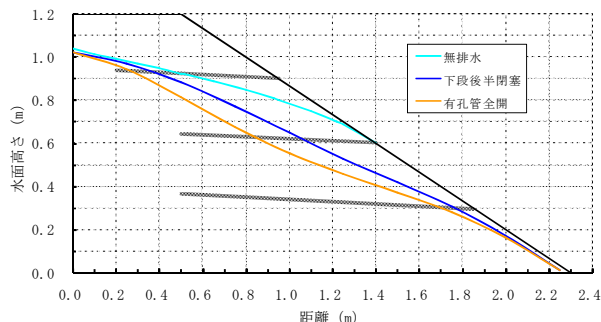


図 2.6 実験浸潤線 (背面水位 1.08m)

解析から得られた各ケースの定常時浸潤線は図 2.7, 図 2.8 に示す. 図に示す浸潤線高さは, 3次元浸透流解析から計算された値を奥行方向に平均化したものである. 実験と同じ傾向を示している.

また, 数値解析における無排水時の浸潤線に対して, 各ケースの実験浸潤線, 解析浸潤線の最大低下幅を図 2.9 に示す. 有孔管及びのり尻からの合計排水量を図 2.10 に示す. 有孔管の配置間隔を大きくした場合, 浸潤線の低下が小さく, 排水量も少なくなることがわかる. また, 有孔管の水平間隔が大きくなる場合, 横断方向に浸潤線の差を見られた. 有孔管の配置長からみると, 有孔管の後半を閉塞した場合は水平間隔を大きくする場合と同様な結果になった.

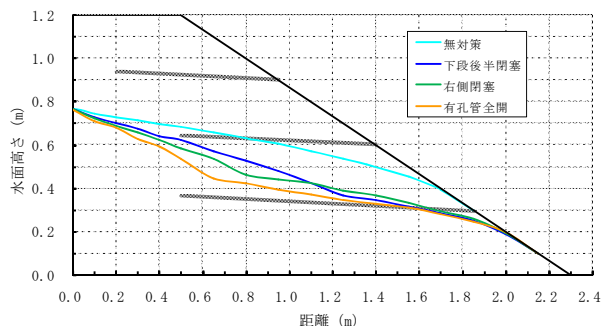


図 2.7 解析浸潤線 (背後水位 0.77m)

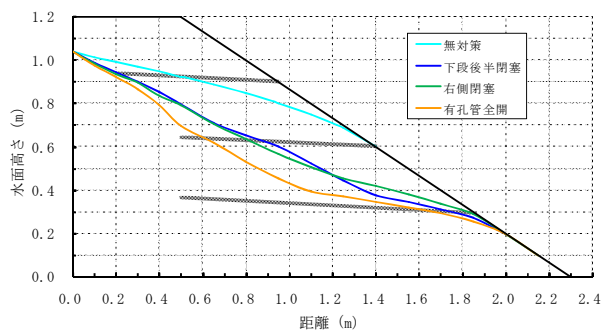


図 2.8 解析浸潤線 (背後水位 1.08m)

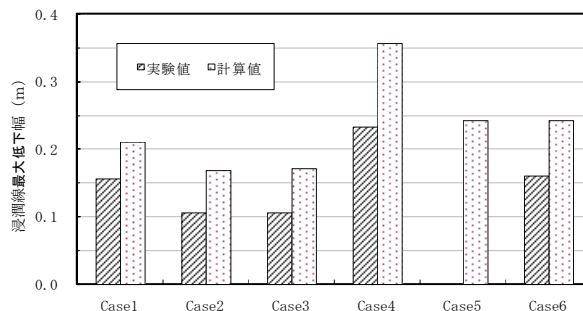


図 2.9 浸潤線の最大低下幅

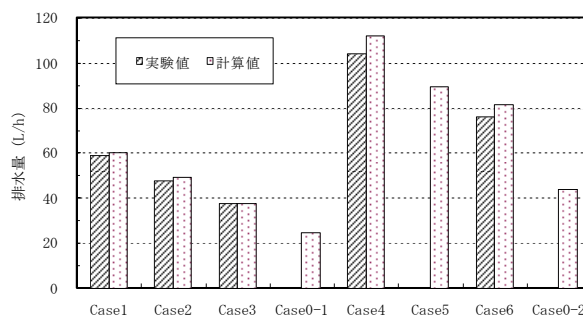


図 2.10 ケース別盛土排水量

### 3. 実大盛土を対象とした実験及び数値解析

#### 3.1 実大実験の概要

模型実験によって得られた排水傾向, 実験手法を参考にし, 実物大の盛土において同様の排水実験を実施した.

実大盛土の材料には, 茨城県銚田市半原産の山砂を用いた. 代表的な物理的性質を表 3.1 に示す. 粒径加積曲線を図 3.1 に示す. 実験盛土の寸法, 排水材 (有孔管・板状排水材) 及び計測器の配置を図 3.2 に, 構築した盛土を写真 3.1 に示す. 有孔管, 板状排水材を設置した盛土をそれぞれ構築し, 浸透水による変形を極力起こささないようにするため緩勾配の盛土とした. のり面勾配は 1:1.8, 高さ 3.8m, 奥行き 10.34m, 幅 3.75m であり, 高さ 1.0m ごとに幅 50cm の小段を設置している. また, のり尻に砕石ドレーンを設けた. 盛土は, 仕上がり層厚 25cm, 平均締固め度 85% となるように作成した. 飽和透水係数は透水試験より  $K_s = 1.12 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  となった. 盛土中に設置した排水材 (有孔管・板状排水材) は 5% の勾配を付けて設置した. なお, 実験では不透水性地盤上の盛土を想定しているため, 盛土底面には透水係数  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  以下となるよう締固めた関東ローム層を厚さ 20cm 設けた. このため, 盛土内に浸透した水は, 盛土底面に達したのちにのり尻より盛土外部へ排水される.

盛土の底面（不透水層と盛土の境界部）には盛土内の水位を測定するためのマノメータを設置した。また、体積含水率を測定するために、土壤水分計（Sentek 社 EnvioSMART）を設置した。

表 3.1 実大盛土材料の物性値

一般	土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.614
	自然含水比	%	17.6
粒度構成	粗砂分	%	12
	細砂分	%	82
	シルト分	%	6
	最大粒径	mm	4.75
	均等係数		2.2
	曲率係数		1.1
締め	最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.638
	最適含水比	%	15.8
	飽和透水係数	cm/sec	1.12×10 <sup>-3</sup>



写真 3.1 構築した実大盛土

表 3.2 実験及び解析のケース

Case No	背面水位 (m)	排水条件
Case0-1	2.0	無排水 (解析のみ)
Case0-2	3.0	無排水
Case1	2.0	全開
Case2		最下段後半閉塞
Case3		片側 1 列閉塞
Case4	3.0	全開
Case5		最下段後半閉塞
Case6		片側 1 列閉塞
Case7		片側 2 列閉塞
Case8	2.0	全開 (板状排水材)
Case9	3.0	全開 (板状排水材)

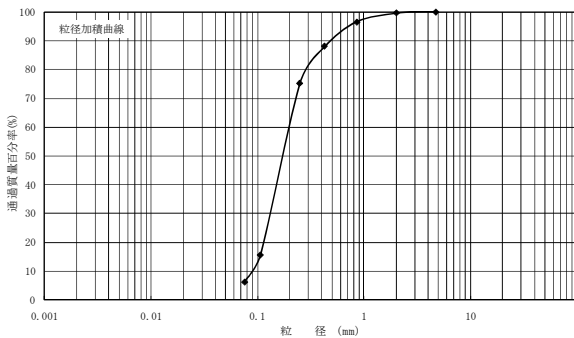


図 3.1 山砂の粒径加積曲線

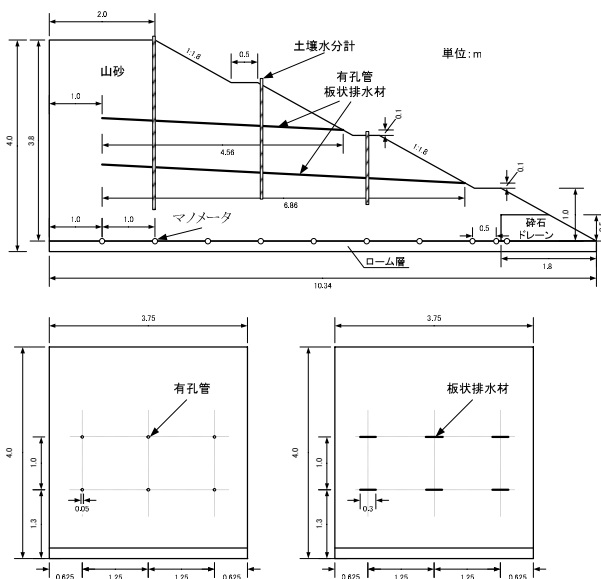


図 3.2 実大盛土の寸法と計測器配置

実験及び数値解析のケースを表 3.2 に示す。実験は有孔管の閉塞条件（配置長・間隔）、背面水位をパラメータとして実施した。なお、有孔管の閉塞条件の制御は、有孔管内に 40cm 間隔に設置したゴム風船を膨らませることにより行った。

それぞれのケースにおいて、盛土背面より給水し、水位が安定した時点での浸潤線および排水量を計測した。

### 3. 2 実験及び数値解析の結果

図 3.2 に示す実大盛土をモデル化し、浸透流解析を行う。モデルのメッシュ分割は図 3.3 に示す。盛土材料の山砂及び地盤材料の関東ロームの不飽和浸透特性を表わすパラメータは模型実験と同様、表 2.3 に示す。のり尻ドレーン材料の砕石については、飽和透水係数を

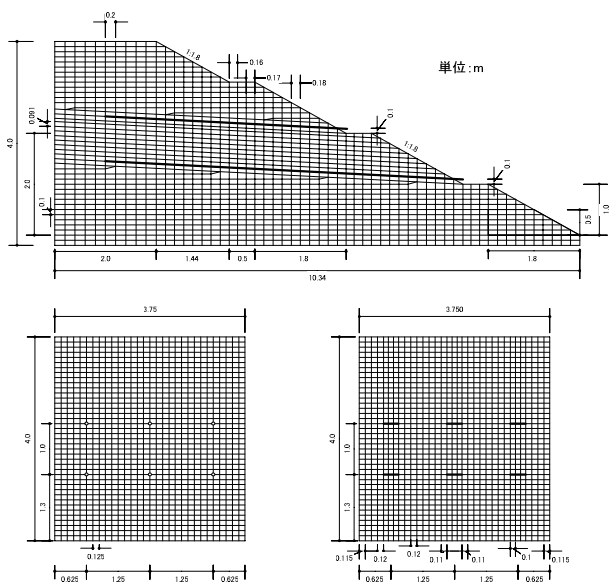


図 3.3 実大盛土のメッシュ分割

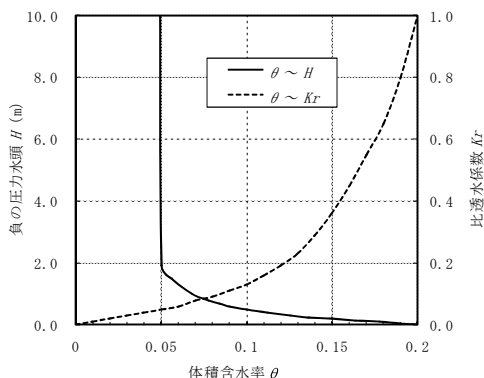


図 3.4 碎石の不飽和浸透特性

1.0cm/sec とし、不飽和浸透特性は図 3.4 に示す水分保持曲線より与える。

数値計算は各ケースに対して、定常状態における浸潤線の高さ及び排水管、のり尻からの排水量を計算する。

背面水位 2.0m と 3.0m の時の浸潤線を図 3.5, 図 3.6 に示す。有孔管に比べ、板状排水材は浸潤線が低く、背面水位が高い場合その差が大きくなる傾向が得られた。

背面水位 2.0m の計算結果を図 3.7, 背後水位 3.0m の計算結果を図 3.8 に示す。図に示す浸潤線高さは、3次元浸透流解析から計算された値を奥行方向に平均化したものである。解析では、実験と同じ傾向を得られた。

数値解析における無排水時浸潤線に対して、各ケースの実験浸潤線及び解析浸潤線の最大低下幅を図 3.9 に示す。背面水位の高い方が低下幅も大きいことがわかる。排水管およびのり尻からの排水量の比較は図 3.10 に示す。排水管の長さおよび数の減少につれ、排水量が減少

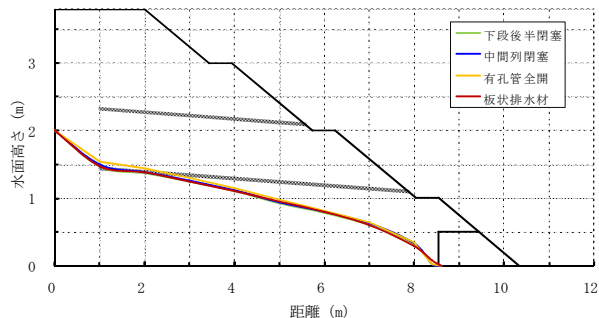


図 3.5 実験浸潤線 (背面水位 2.0m)

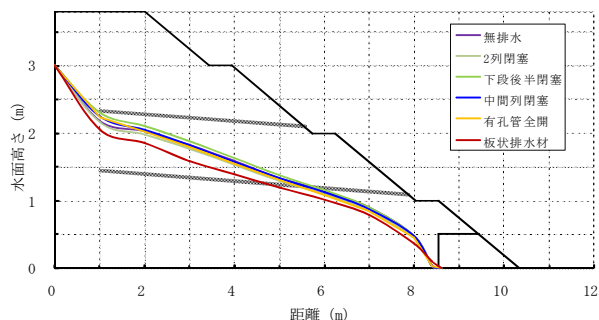


図 3.6 実験浸潤線 (背面水位 3.0m)

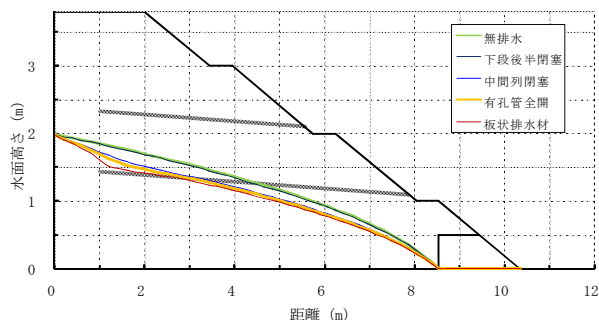


図 3.7 解析浸潤線 (背面水位 2.0m)

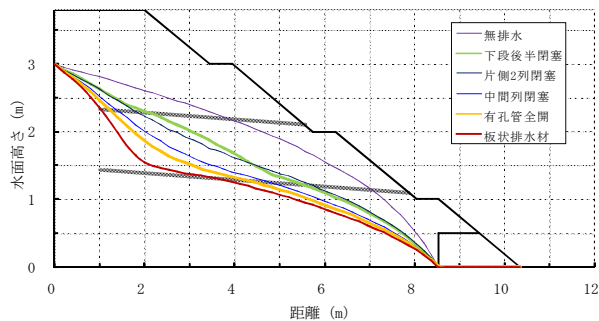


図 3.8 解析浸潤線 (背面水位 3.0m)

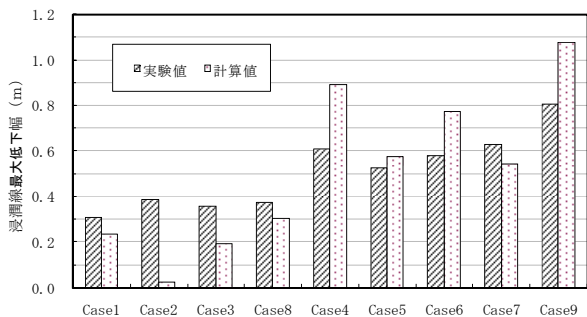


図 3.9 浸潤線の最大低下幅

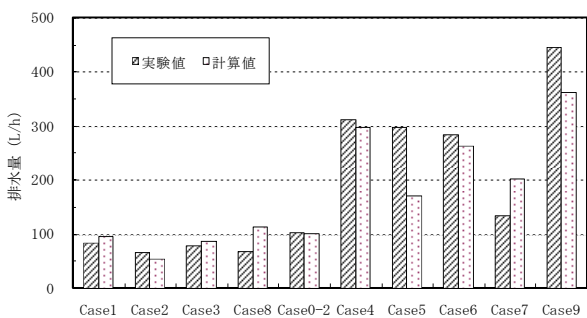


図 3.10 ケース別盛土排水量

していることがわかる。

土壌水分計の計測値から換算した盛土の飽和度とマンメータで得られた水位面を比較すると、いずれのケースにおいても、地盤の毛管現象により浸潤線より約 20cm～50cm 上の部分まで、飽和度 90%以上の領域が広がり、それより地表面に向けて飽和度が低下した。また、排水材周辺の地盤では、飽和度が低下していることがわかった。

#### 4. 排水材料に関する調査

様々な排水材料を用いる場合に各基準類がどのような

表 4.1 調査対象とした基準類

	盛土地下排水	擁壁の裏込め排水
道路基準	道路土工 排水工指針 (日本道路協会 S61.11)	道路土工 擁壁工指針 (日本道路協会 H11.3)
	設計要領第1集 排水編 (東日本高速道路(株) H17.10)	道路土工 排水工指針 (日本道路協会 S61.11)
	国土交通省 設計要領 (中部地方整備局 H12.4)	設計要領第2集 擁壁編 (東日本高速道路(株) H17.10)
	第二東名高速道路 高盛土及び大規模盛土設計施工指針(案) (旧日本道路公団 静岡建設局 H11.7)	
鉄道基準	鉄道構造物設計標準・同解説 土構造物 (鉄道総合技術研究所 H19.1)	鉄道構造物設計標準・同解説 (鉄道総合技術研究所 H17.10)
宅地基準	宅地土工指針(案) (住宅・都市整備公団 都市開発事業部 H6.3)	宅地土工指針(案) (住宅・都市整備公団 都市開発事業部 H6.3)
	宅地防災マニュアルの解説【改訂版】 (建設省監修 H元年版)	宅地防災マニュアルの解説【改訂版】 (建設省監修 H元年版)
		擁壁用透水マット技術マニュアル ( (社) 全国宅地擁壁技術協会 H9.6)

排水性能を要求し、どのように設計を行っているかについての情報を収集・分析した。調査対象は、道路・鉄道・宅地の盛土・擁壁に関する各基準類とした(表 4.1)。

調査の結果を取りまとめると次の通りになる。

- (1) 排水工の寸法等は既往事例の経験に基づく構造細目として規定されており、湧水が多い場合や盛土材料の透水性が低い場合などにどのように仕様を変更させて対応するべきかという具体的な記述が見られない。
- (2) 擁壁の裏込め排水などにジオシンセティクスを用いる場合、短期的な通水・透水性能については規定がされているが、長期的な性能、すなわち目詰まりに対する規定はされておらず、長期的な性能の維持については考慮されていない。

これらの基準類における排水工検討時の留意事項などから排水工に要求されている性能を整理すると以下の3項目となる。

##### (1) 排水性能

盛土中や擁壁裏込め中の水を速やかに排水する機能であるが、ジオシンセティクスの場合は、その方向性によって面内通水性能と垂直透水性能に分類される。特にこれらの排水性能が長期的に目詰まりにより低下することもあり、短期的な排水性能と長期的な排水性能に分類できる。管タイプの排水工ではマンシングの粗度係数を用いて、シートタイプではダルシーの透水係数を用いて性能が表現される場合が多い。

##### (2) フィルター性能

盛土中や裏込めの細粒分の抜け出しを防止する性能であり、排水性能と併せて、水分は通すが、細粒分は透過せず、かつ目詰まりを起こしにくいという性能が要求されている。

##### (3) 耐久性性能

排水工への作用に対する安定性であり、土中に埋設される際の重量に対する力学的な耐久性と土中の化学物質やバクテリアなどに対する化学的耐久性が主である。

#### 5. まとめと今後の課題

実験、解析を結果より得られた結果を以下に述べる。

- (1) 有孔管や板状排水材を設置することによって盛土中水位を低下させ、土中水を速やかに排出されることを確認できた。これにより、盛土の安定性の向上ができる。また、排水材料の配置間隔にも影響され、長期性能を考慮すれば、ある程度密に配置する必要

がある。

- (2) 板状排水材のように排水面積が大きい材料は、有孔管に比べ排水能力が高く、浸潤線を低下させる能力も高い。
- (3) 浸透水が懸念される盛土では、のり尻にドレーン材を設置することで、のり尻付近の浸潤線低下、洗掘防止ができ、盛土の安定性が向上する。
- (4) 有孔管や板状排水材は、全長にわたり水が入り出ることができる構造である。途中で閉塞（目詰まり）が起きると、のり面付近まで水を誘導してしまうこととなり、盛土を不安定にさせる要因となる可能性がある。
- (5) 水位観測孔で観測した土中水位は、マンメータが示す値と同じであったが、土壌水分計で観測した飽和領域 ( $S_r > 90\%$ ) は、それより 50cm 上の位置であった。毛管現象による水位の上昇の影響と考える。

今後の課題としては次のような事が挙げられる。

- (1) 排水工は土構造物の安定性に大きな影響を与えるが、その設計は従来の経験に基づく仕様規定で設計

されている。しかしながら土構造物が適用される現場は多様化しており、湧水などの発生が想定される場合や、比較的透水性に劣る現地発生土を用いなければならない場合などが生じているが、このような場合にどのように排水工を強化すればよいのかを整理していくこと。

- (2) 排水工については、短期的な性能については様々な試験により確認が行われているが、長期間使用されているうちに細粒分により目詰まりして排水性能が低下するなどの長期的な性能の低下についての検証を行うこと。

#### 参考文献

- 1) 佐々木 哲也, 杉田 秀樹, 大川 寛, 水橋 正典: 沢埋め盛土の耐震対策, 土木技術資料, 49-8, pp. 34-39, 2007.
- 2) 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.



## IMPROVEMENT OF DRAINAGE SYSTEM FOR ROAD EMBANKMENTS AND RETAINING WALLS

**Abstract :** The purposes of the study were 1) to propose a feasible design method for drainage system with certain drainage materials, rainfall and construction conditions, and 2) to develop an appropriate inspection method and effective functional recovery method for the existing embankments and walls. In this year, a permeation experiment and numerical analysis, which took the length of the drainage materials and their arrangement intervals as the parameters were performed for the road embankment with ground springwater. And an analysis was carried out for the drainage efficiency of various materials, based on the collected information.

**Key words :** road embankments, drainage materials, permeation experiment, numerical analysis