

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：小橋 秀俊，藪 雅行，澤松 俊寿，
徐 永強，林 豪人

【要旨】

本研究は、盛土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、地下水位、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、被災事例の多い盛土構造の1つである傾斜地盤上盛土を対象として、単粒砕石を用いた排水ブランケットをパラメータとした実大盛土に対する浸透流解析及び模型盛土を用いた浸透実験と解析を行い、排水ブランケットの幅による地下水位低下効果、排水効果の違いを明らかにした。また、水平排水パイプの増設による地下水位低下手法を中心に、傾斜地盤上盛土を対象として実大盛土に対する浸透流解析及び模型盛土を用いた浸透実験と解析を行い、水平排水パイプの配置間隔と地下水位低下量、水平排水パイプ1本あたりの排水量との関係性を評価した。

キーワード：盛土，排水ブランケット，水平排水パイプ，浸透実験，浸透流解析

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ケースが多い。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¹⁾。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箇所が生じ、いずれも、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、①盛土・擁壁に要求される排水性能を明らかにし、②土質、地下水位、排水材料、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、③既設盛土・擁壁の排水性能の調査・点検手法、④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、沢埋め盛土では、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、新設盛土に対しては、盛土底部に排水ブランケットを設置するように提案されている²⁾。また、既設盛土に対しては、盛土内に水平排水パイプ（有孔管）を増設し、土中水を排除することが効果的とされている³⁾。このような水平排水パイプの位置と規模は、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べきであるが、経験に基づくことが多い。現在



写真1.1 能登有料道路の盛土崩壊

のところ、理想化された状態に対してでさえ、水平排水パイプの位置、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。

本年度は、被災事例の多い盛土構造の1つである傾斜地盤上盛土を対象として、排水ブランケットをパラメータとした実大盛土に対する浸透流解析及び模型盛土を対象とした浸透実験と解析を行い、排水ブランケットの幅による地下水位低下効果、排水効果の違いを評価する。また、既設盛土に対する排水機能の回復対策として水平排水パイプの増設を想定し、排水パイプの縦断配置間隔と水位低下、排水量との関係を、実大盛土に対する浸透流解析及び模型盛土を対象とした浸透実験と解析によって評価する⁴⁾。

2. 排水ブランケットの地下水排除効果

排水ブランケットの設置は地山湧水のある盛土における切盛境の地下水排除とりのり尻の地下水位低下に効果的な手段である。排水ブランケットの幅と水位低下、排水量との関係を明らかにするため、被災事例の多い盛土構造の1つである傾斜地盤上の実大盛土を対象として浸透流解析を行い、更に、模型盛土に対する浸透実験と浸透流解析を行う。

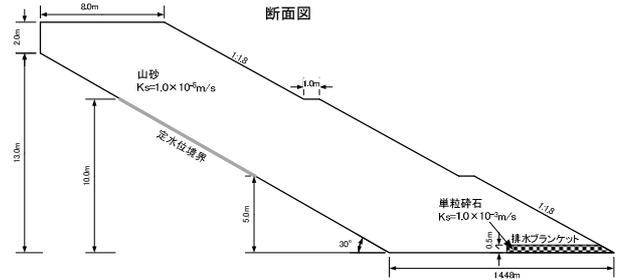


図 2.1 解析モデルの概要

2.1 浸透流解析によるパラメトリックスタディ

2.1.1 飽和-不飽和浸透流モデル

有限要素法による浸透流解析を行う。飽和-不飽和浸透流モデルは3次元方程式

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

によって表わされる。ここに、 $K(\theta)$ は土の透水係数、 θ 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 β は、飽和領域で $\beta=1$ 、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、比水分容量は van Genuchten⁵⁾の提案した式、不飽和土の透水係数は、Mualem⁶⁾の提案した式を用いて解析を行う。これらの式を以下に示す。

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

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

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

ここに、 S_e は飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_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、 α, 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。初期圧力水頭は、深さ方向に直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。

2.1.2 実大盛土に対する浸透流解析

解析の対象とする実大盛土の概要を図2.1に示す。盛土材料は山砂で飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とし、不飽和浸透特性は図2.2(a)に示す。地山高さ5m~10mの間に湧水があると仮定する。排水ブランケットは奥行き方向に全面的に入っているとす。排水ブランケットの飽和透水係数は盛土本体の100倍の $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ とする。

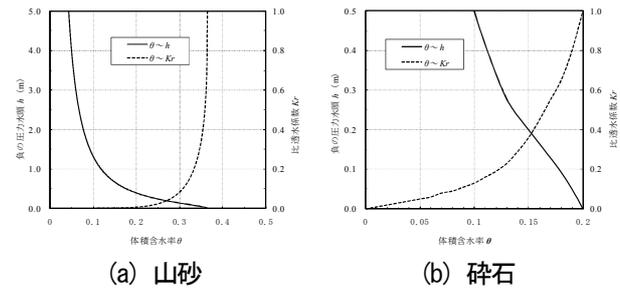


図 2.2 不飽和浸透特性

不飽和浸透特性は図2.2(b)に示す。境界条件として、湧水を考慮する範囲を定水位境界とし、のり尻は浸出点境界とする。

図2.1に示す実大盛土をモデル化し、浸透流解析を行う。排水ブランケットの敷き幅については、斜面水平長さの1/2以上とすることが提案されている²⁾。ここでは、斜面水平長さの1/2は14.5mとなるが、排水ブランケットの敷き幅はのり先から地山までと考えて、0~14.48mの範囲で1.8mごとに増加させ解析を行う。各ケースの定常時浸潤線を図2.3に示す。なお、図に示す浸潤線は盛土の奥行き方向の中央断面での浸潤線である。

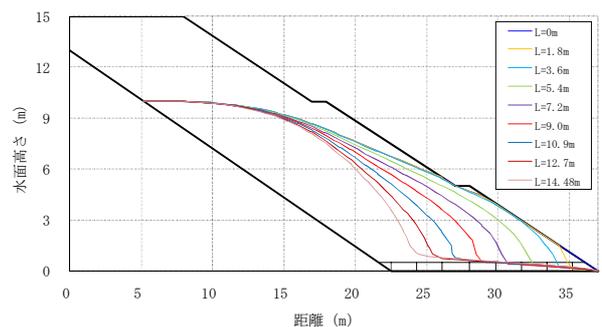


図 2.3 排水ブランケットの敷き幅別浸潤線

図2.3より、排水ブランケットの幅が地山に向かって長くなるほど、浸潤線が地山に近くなり、のり尻の安定性が向上される。地下水位の低下が最も大きいのはのり尻より約12m(図2.3横軸の25m地点)の箇所で、排水ブランケットの敷き幅が14.48mの場合、0mと比較して水位が5mも低下した。

排水ブランケットによる地下水位低下効果は水位データから計算した断面の飽和面積比によって評価する。飽和面積比とは、盛土横断面における水面以下の面積と横断面の全体面積の比で、盛土の安定に関係している指標である。排水ブランケットの幅と飽和面積比、排水量との関係を図 2.4 に示す。図から排水ブランケットの幅が 3.6m より短い時はその排水効果がのり先のわずかな部分に限り、盛土全体に対する安全性向上をほとんど期待できないことがわかった。

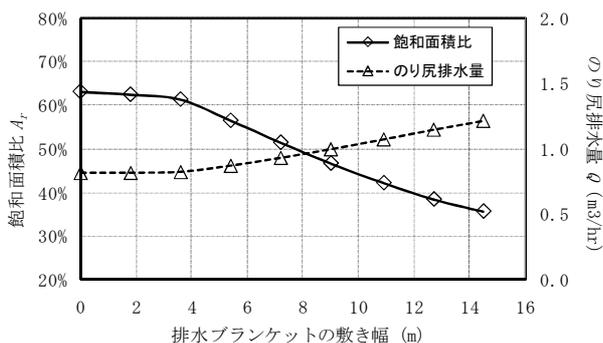


図 2.4 飽和面積比と のり尻排水量

2.2 模型盛土に対する浸透実験と浸透流解析

2.2.1 模型盛土の概要

実大盛土に対する浸透流解析から得られた排水ブランケットによる地下水位低下効果、排水効果を確認するために、模型盛土に対する浸透実験及び解析を行う。

模型盛土の材料には、茨城県銚田市半原産の山砂を用いた。模型盛土の概要を図 2.5 に示す。水平排水パイプと幅 1.8m の排水ブランケットを設置した盛土 1 及び幅 4.17m の排水ブランケットのみを設置した盛土 2 をそれ

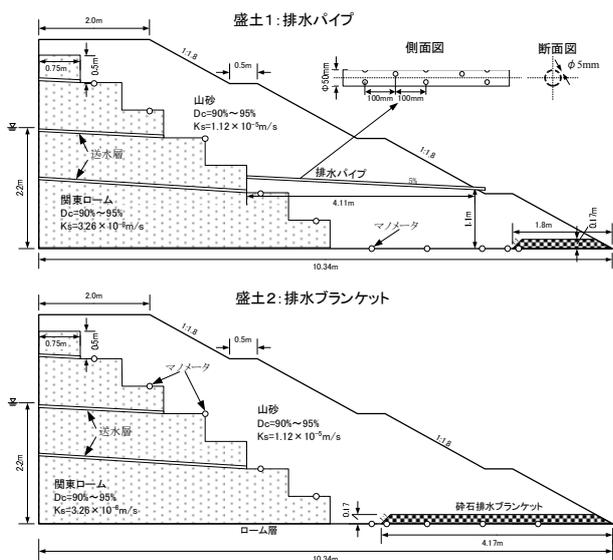


図 2.5 模型盛土の概要

ぞれ構築し、浸透水による変形を極力起こさないようにするため緩勾配の盛土とした。ここで、傾斜地盤上に構築される盛土を想定しているため、勾配 1:1.5 の傾斜地盤を作成した。傾斜地盤の材料は関東ロームで、締め固め度 D_c は 90~95%、飽和透水係数は $3.26 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ である。地盤の高さ 1m ごとに 5% の勾配を持つ送水層を設けた。盛土は、仕上がり層厚 20cm、締め固め度 $D_c=90\%$ となるように構築した。盛土 1 に、排水パイプを底面から高さ 1.1m 位置に排水口が来るように 5% の勾配で盛土縦断方向に 3 本設置した。排水パイプの奥行き間隔は 1.25m、水平長さは 4.11m である。また、パイプ周辺の細粒分が流出しないように、孔の上にフィルタを貼り付けた。のり尻に 7 号単粒碎石を用いた排水ブランケットを設けた。盛土 2 に設けた排水ブランケットの幅に対しては、盛土斜面の水平長さの半分以上と提案されているため²⁾、斜面水平長さの半分の 4.17m とした。盛土内の水位を観測するために、盛土 1 では、横断方向に 1m 間隔、縦断方向に 3 列で各排水パイプの真下に、盛土 2 については、横断方向に 1m 間隔、縦断方向には 1 列で中央に、マンメータを設置した。

実験方法は、盛土背面の水位が一定になるように給水し、盛土内の水位が安定した時点で、のり尻からの排水量を計測する。

2.2.2 排水ブランケットの排水効果

排水ブランケットの排水効果を検討する実験ケースは、盛土 1 においてすべての排水パイプを閉塞し、幅 1.8m の排水ブランケットのみのケースと盛土 2 において長さ 4.17m のケース、計 2 ケースを行った。

実験の 2 ケースと対応する浸透流計算を行う。解析の対象領域は盛土と排水ブランケットの部分である。計算には、透水試験から得られた山砂の飽和透水係数 $1.12 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、碎石の飽和透水係数は $1.54 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ を用いる。境界条件については、背面高さ 1.0m~2.2m の間は水位 2.2m の定水位境界、のり尻には浸出点境界を与えた。計算された定常時の浸潤線と実験で得られた浸潤線とともに図 2.6 に示す。飽和面積比と のり尻排水量を図 2.7 に示す。

結果から浸潤線の計算値と実験値が概ね一致しているが排水量については、計算値が実験より小さいことが分かる。排水量の多少は本体の飽和透水係数によって決められるため、実際に構築された盛土の飽和透水係数は要素試験で得られた飽和透水係数より大きいと考えられる。ここで、排水量の比で飽和透水係数を計算した。再計算された浸潤線を図 2.6 (点線) に、飽和面積比と排水量

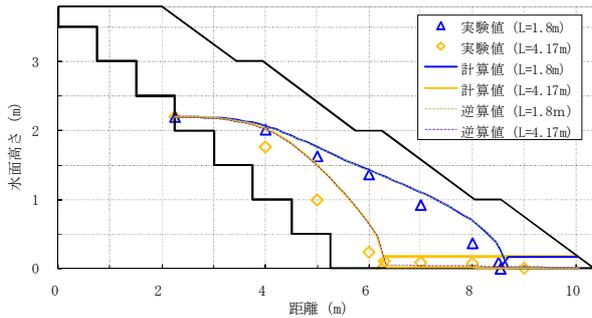


図 2.6 定常時浸潤線

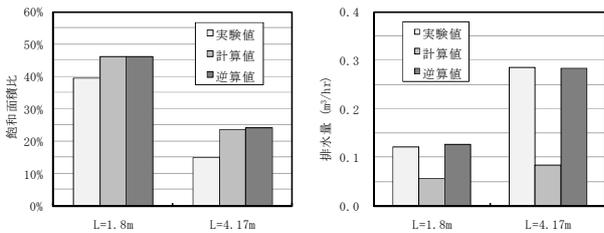


図 2.7 飽和面積比とりのり尻排水量

を図 2.7 に示す。再計算で得られた排水量は実験排水量と一致している。

実験と解析結果から排水ブランケットの敷き幅が 1.8m から 4.17m に、約 2.3 倍を長くすると、飽和面積比が約 0.4 倍まで減少し、盛土の安定性への寄与がきわめて大きいことがわかった。また、のり尻排水量も長さと同じ倍率で増えて、地下水排除の効果も明らかである。

3. 水平排水パイプの地下水排除効果

既設盛土に対して水平排水パイプの増設は土中水の排除に有効的な手段である。水平排水パイプには、必要排水量を集水でき、かつ、必要とする水位低減が盛土全体にわたり達成できる、という機能が要求される。ここで、湧水のある傾斜地盤上盛土を想定し、水平排水パイプの配置間隔による水位の低下、及び水平排水パイプ 1 本あたりの排水量を明らかにするため、実大盛土を対象に浸透流解析を行う。更に、模型盛土に対する浸透実験と浸透流解析を行う。

3.1 浸透流解析によるパラメトリックスタディ

解析の対象とする実大盛土の概要を図 3.1 に示す。盛土材料は山砂で飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とし。不飽和浸透特性は図 2.2 (a) に示す。水平排水パイプは増設時の施工性も考慮して、小段より 50 cm 高いところから 5% の勾配で地山まで入っていることとする。

解析領域は、排水パイプ 1 本の分担範囲 (= 水平排水パイプの設置間隔) とする。境界条件として、湧水を考慮する範囲を定水位境界とし、排水パイプにあたる節点と

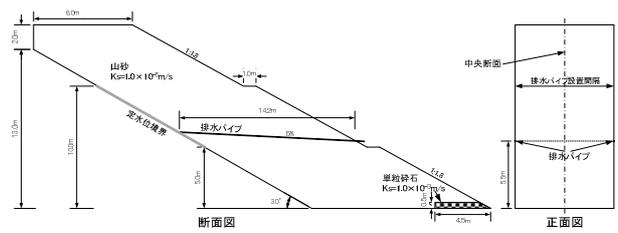


図 3.1 解析モデルの概要

のり尻は浸出点境界とする。

図 3.1 に示すモデル化に対して、水平排水パイプの設置間隔を 1m~10m まで 1m ずつ、そして、設置しない場合の解析を行う。各ケースの定常時浸潤線を図 3.2 に示す。なお、図に示す浸潤線は盛土の奥行き方向の中央断面(排水パイプの間で水位の最も高い断面)での浸潤線である。

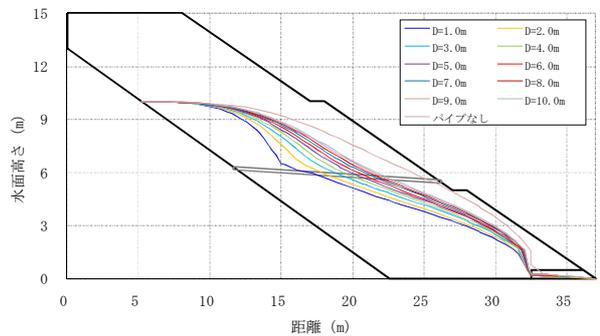


図 3.2 定常時浸潤線

図 3.2 より、排水パイプの設置間隔が小さくなるにつれ、浸潤線が低下していることがわかる。その浸潤線の低下はのり尻に近づくほど効果が小さくなり、最も大きいのはのり尻より約 22m (図 3.2 横軸 15m 地点) の箇所、排水パイプの間隔が 1m の場合は、パイプのない場合より水位が 2.7m 低下した。排水パイプの設置間隔による飽和面積比とパイプ 1 本あたりの排水量の変化を図 3.3 に示す。

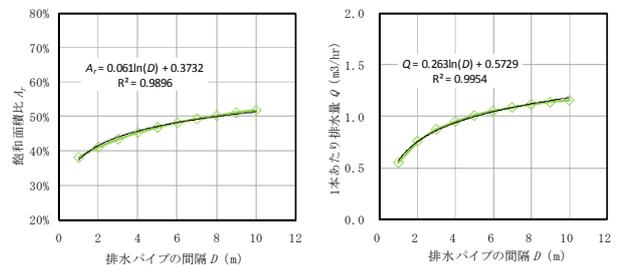


図 3.3 飽和面積比とパイプ 1 本あたり排水量

図より、設置間隔 D が大きくなるにつれ、飽和面積比が大きくなるのがわかる。この関係は、

$$A_r = 0.061 \ln(D) + 0.3732$$

により表わされる。設置間隔 D が大きくなるにつれ、排水パイプ 1 本あたりの排水量が大きくなるのがわかる。

この関係は、

$$Q = 0.263 \ln(D) + 0.5729$$

により表わされる。

3. 2 模型盛土に対する浸透実験と浸透流解析

実大盛土に対する浸透流解析から得られた水平排水パイプによる地下水位低下効果、排水効果を確認するために、模型盛土に対する浸透実験及び解析を行う。

水平排水パイプの縦断配置間隔による地下水位低下効果、排水効果の浸透実験は2.2.1で説明した盛土1を用いて行った。実施した浸透実験のケースを表3.1に示す。

表 3.1 実験ケース

ケース	配置間隔	背面水位	注記
Case0	1.25m (3本)	2.6m	透水係数の同定用
Case1	1.25m (3本)	2.2m	パイプの閉塞なし
Case2	2.5m (2本)		中央パイプ閉塞
Case3	3.75m (1本)		両側パイプ閉塞
Case4	6.25m (1本)		左側2本閉塞
Case5	なし		3本閉塞

なお、水平排水パイプの閉塞はパイプと同じ長さの風船をパイプの中で膨張することによって実施した。

実験のCase1～5の5ケースと対応する浸透流計算を行う。解析の対象領域は盛土と排水ブランケットの部分である。透水試験から、山砂の飽和透水係数は $1.12 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と得られた。境界条件については、背面高さ1.0m～2.2mの間は水位2.2mの定水位境界、排水パイプに当たる節点及びのり尻には浸出点境界を与えた。計算された定常時の浸潤線（例として、Case1, 3, 5のみ、凡例の計算①）と実験で得られた浸潤線を図3.4に示す。飽和面積比を図3.5に、のり尻からの排水量を図3.6に、排水パイプからの排水量を図3.7に示す。

実験の結果より、排水パイプのある場合はない場合より飽和面積比は3%減少した。しかし、排水パイプの配置

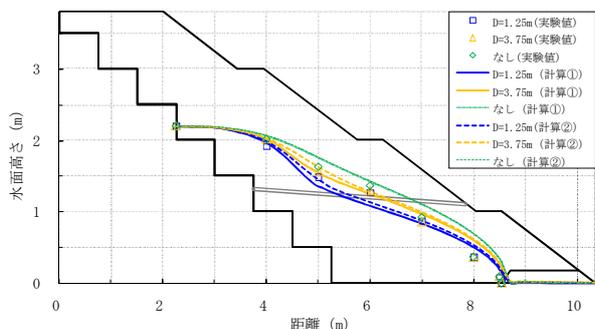


図 3.4 定常時浸潤線

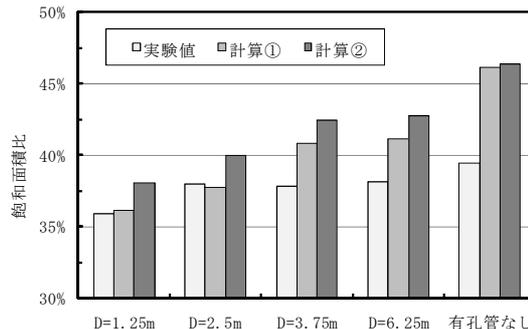


図 3.5 飽和面積比

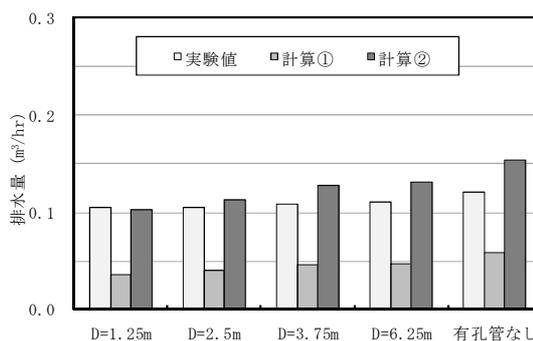


図 3.6 のり尻からの排水量

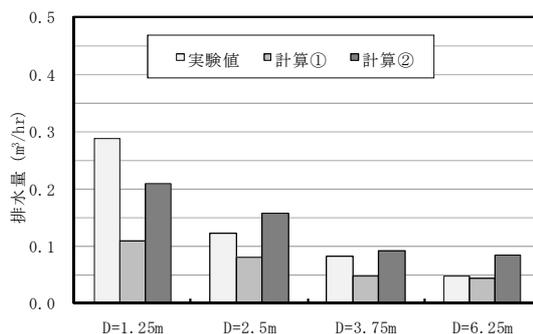


図 3.7 排水パイプからの排水量

間隔を1.25mから6.25mに広げても飽和面積比は1%しか上昇せず、模型盛土の幅が水平排水パイプの影響範囲より小さいことが原因であると考えられる。また、水平排水パイプのない場合はある場合に比べるとのり尻の排水量が約1割増えるが、排水パイプの間隔による変化は認められなかった。実大盛土の浸透流計算結果と同じく、水平排水パイプからの総排水量は、配置間隔の増大（本数の減少）により減少する傾向が認められた。ところが水平排水パイプ1本あたりの排水量に着目すると、実大盛土の計算において、配置間隔の減少に従い排水パイプの集水域がお互いに干渉することにより排水量が減少するが実験においてはそのような傾向は認められなかった。このことから模型実験において最も密に配置したケースでも排水パイプの集水域に干渉が生じておらずより密に

配置すると生じることが予想される。

また、計算で得られた浸潤線は、排水パイプの間隔が大きくなるにつれ、高くなることから、のり尻排水量に対しては、計算値は実験値の1/2以下とかなり低く、排水パイプの排水量はのり尻排水量と比べ、実験値に近い値を示しているが全体的に低くなっている。

ここで、Case0で観測されたのり尻及び排水パイプの排水量から飽和透水係数を逆算して、Case1~5を再計算した。また、排水パイプのモデル化方法について、従来の浸出点境界法では、排水パイプの排水能力を過大評価される可能性があり、パイプ周囲要素の透水性低下法が提案されている⁷⁾。ここで、透水性低下法を用いてパイプをモデル化し、Case0においてのり尻排水量及び水平排水パイプの排水量が実験値と一致するように盛土本体とパイプ周囲要素の飽和透水係数を試算する。排水量がそれぞれ98%以上一致した時点で盛土の透水係数は 2.97×10^{-5} m/s、パイプ周囲要素の飽和透水係数は 1.58×10^{-5} m/sと得られた。これらの飽和透水係数を用いて、Case1~5を再計算した。得られた定常時浸潤線（凡例の計算②）を図3.4、飽和面積比を図3.5、のり尻からの排水量を図3.6、パイプからの排水量を図3.7に示す。

図3.4、3.5より、計算②で得られた浸潤線は計算①の浸潤線より高く、水平排水パイプを浸出点境界法でモデル化すると、パイプの排水能力を過大評価する可能性があると考えられる。また、図3.6、3.7の排水量より、計算②のり尻排水量と排水パイプ排水量とも実験と概ね一致しており、より正確に実験の再現ができた。

4. まとめと今後の課題

新設盛土の排水工の設計手法について、被災事例の多い盛土構造の1つである傾斜地盤上盛土を対象として、排水対策として有効と考えられる単粒砕石を用いた排水ブランケットをパラメータとした実大盛土に対する浸透流解析、模型盛土を対象とした浸透実験と解析を行い、盛土内部への排水ブランケットの敷き幅の増加による地下水位低下効果、排水増大効果がきわめて大きいことを明らかにした。

排水機能の回復技術について、水平排水パイプの増設による地下水位低下手法を中心に、傾斜地盤上盛土を対象とした実大盛土に対する浸透流解析及び模型盛土を用いた浸透実験と解析を行い、排水パイプの縦断配置間隔と地下水位低下量、パイプ1本あたりの排水量との関係性を評価し、水平排水パイプを密に配置するほど飽和面積比が減少し、総排水量が増加する傾向が認められた。と

ころが水平排水パイプ1本あたりの排水量に着目すると、実大盛土の計算において配置間隔の減少に従い排水パイプの集水域がお互いに干渉することにより排水量が減少するが実験においてはそのような傾向は認められなかった。また、浸透流計算を行う際に、排水パイプのモデル化方法について、従来の浸出点境界法が水平排水パイプの排水能力を過大評価する可能性があり、パイプ周囲要素の透水性低下法を提案し、その妥当性を検証した。

本年度、排水ブランケットは新設盛土の有効な排水対策であること、水平排水パイプの増設は、既設のり面の効果的な排水機能回復・向上手法であることを実験並びに浸透流計算より検証した。今後は、盛土材料、地形などに応じた排水ブランケットの設計、現場盛土における水平排水パイプの増設設計や増設後の効果の検証などを行う必要がある。

盛土内の地下水位調査を目的とした非破壊探査手法、およびカメラによる排水管内部の調査法の適用性について調査した。その結果、非破壊探査手法については各種手法が提案されているが精度等に課題があり、継続的に精度良く地下水位を把握するためには、ボーリング孔を用いた地下水位モニタリングが現時点では有効であることが分かった。また、カメラによる排水管内部の調査については、管が直線であれば数十mの調査が可能であるが、管が屈曲している場合には適用が難しいことが分かった。

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) 盛土の調査・設計から施工まで (第1回改訂版), 社団法人地盤工学会, pp.179, 1990.
- 3) 徐永強, 井谷雅司, 宮武裕昭, 大下武志: 盛土内水平排水工の排水効果に関する実験的評価, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集第III部, Vol.63, pp.703-704, 2008.
- 4) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人, 藪雅行, 小橋秀俊: 盛土における水平排水パイプの地下水排除効果, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009 (投稿中).
- 5) 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.
- 6) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media *Water Resources Research*, 12(3), pp.513-522, 1976.
- 7) 徐永強, 澤松俊寿, 林豪人, 藪雅行, 小橋秀俊: 浸透流解析における盛土排水パイプのモデル化, 地盤工学会第44回地盤工学研究発表会, 2009 (投稿中).

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, for the embankment on the slope which is the one of the road embankment types with a lot of collapses, seepage flow analysis and permeation experiments were conducted, and drainage properties of drainage blanket was revealed as results. About the technique of groundwater level decrease with horizontal drain pipe, seepage flow analysis and permeation experiments were conducted for the road embankment on the slope. As results, relations between interval of horizontal drain pipes, decrease of groundwater level and drainage amount per one horizontal drain pipe were estimated.

Key words : road embankments, drainage blanket, permeation experiment, horizontal drain pipe, seepage flow analysis