

# 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

秋田 剛<sup>1</sup>・常田 賢一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

近年、地震や豪雨の作用による道路盛土の崩壊が多発し、社会的に影響を及ぼしているが、原因の一つとして盛土内の地下水位上昇による盛土の不安定化が考えられる。既設盛土の排水対策の一つである排水パイプは、安価で簡易に施工が可能であり、既に鉄道盛土、宅地盛土で実用化し、普及している。しかし、パイプの排水特性は定量的に評価されておらず、具体的な設計法は確立されていない。本研究は、既存の道路盛土の安定性向上のため、排水対策としての排水パイプの実用化に必要な技術的課題の解明を目的としており、排水パイプの排水特性に関する変水位模型排水実験を実施し、その結果に基づいて排水パイプの適用性を考察する。

キーワード 道路盛土、地下水、排水工法、排水パイプ、間隙水圧

## 1. はじめに

2009年8月の駿河湾を震源とする地震では、東名高速道路において盛土のすべり崩壊が発生したが、その原因の一つとして集水地形であること、つまり盛土内の地下水位の影響が指摘された。そして、この被害を教訓として、国土交通省および道路会社において盛土の緊急点検が実施されているところであるが、今後は点検結果に基づいて、具体的な補強対策の検討が必要になる。

写真-1 は道路盛土の小段にある側溝の山側法面の状態であるが、一般的に見られる盛土内の地下水位あるいは土砂の浸出である。このように盛土内の地下水位は盛土のすべり安定性に影響するが、図-1 は 2007 年能登半島地震、2009 年駿河湾を震源とする地震および 2004 年新潟県中越地震で崩壊した、3 種類の土質特性の盛土（粘性土盛土、中間土盛土および砂質土盛土）を対象として、法肩位置での地下水位を変動させて常時および地震時（震度 0.2）のすべり安定解析（修正フェレニウス法）による、地下水位の変動に伴う盛土のすべり安全率の変動例である<sup>1)</sup>。同図から、盛土内の地下水位の変化がすべり安全率に及ぼす影響は、盛土材の土質特性により大きく異なり、砂質土盛土で最も大きく、中間土盛土、粘性土盛土の順に小さいことが分かり、いずれの場合も地下水位の影響が示されている。

このため、盛土の安定性を確保し、向上させるためには、地下水位を低下させることが考えられるが、既設盛土の排水機能の回復、増強のための経済的かつ効果的な



写真-1 盛土小段の堤内からの浸出状況例

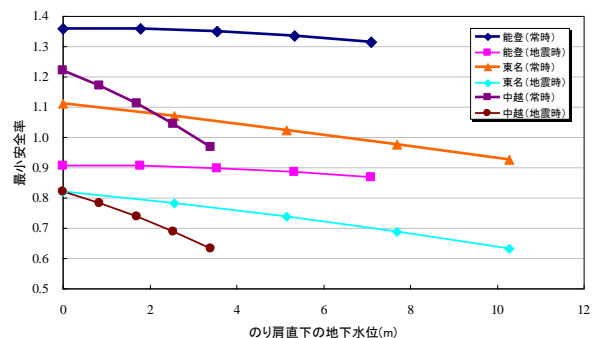


図-1 盛土のすべり安全率に及ぼす地下水位の影響例

排水工法<sup>2)</sup>の一つとして排水パイプ<sup>3)</sup>が挙げられる。排水パイプは、図-2の道路排水工の盛土内排水に相当するが、既存盛土に対して直接打設する施工が可能であり、簡易且つ安価に施工できる。また、地盤の変形抑制の効果もあることから、補強効果（本文では、対象外）も見込め



写真-2 鉄道盛土における排水パイプの設置例

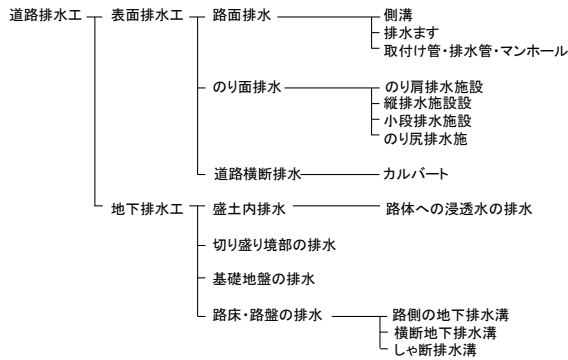


図-2 道路排水工の種類<sup>2)</sup>

る。現在、排水パイプは鉄道盛土(写真-2参照)や宅地盛土で実用化されており、現在多発している道路盛土の崩壊防止への対策工としても大いに期待できる。

ここで、排水パイプの実用化に必要な技術的課題として、排水パイプを盛土へ直接打設する際、パイプのスリットへの土粒子の充填、いわゆる目詰まりや、パイプ内への土粒子の流出現象が生じる可能性があることや、長期間に亘る地下水水位の変動に伴う盛土地盤の飽和・不飽和の繰り返しにより、スリット周辺への細粒分の蓄積が進行し、排水性能が低下する等の現象が懸念される。また、従来、パイプの設置間隔は1m程度として経験的工学的に施工されており、最適な設置間隔や施工配置といった具体的な設計法が未確立である。

本研究は、地震および豪雨に対する既設道路盛土の安定性向上のため、排水対策としての排水パイプの実用化に必要な技術的課題を明らかにすることを目的として、排水パイプの排水特性に関する室内模型実験を実施し、その結果に基づいて、排水パイプの適用性を考察する。

## 2. 排水性能に関する模型実験

排水パイプは、既設盛土に対して簡易且つ安価に直接打設施工が可能であるが、打設の際にパイプのスリットに土粒子が充填し、パイプ内に流出する現象が危惧される。また長期間に亘る地下水水位の変動に伴う地盤の飽和・不飽和状態の繰り返しにより、スリット周辺への細

粒分の蓄積が進行し、排水性能が低下する事も考えられる。このようなパイプの排水性能変化を検討すべく、変水位による室内模型排水実験を実施した<sup>4)</sup>。

### (1) 実験内容

林ら<sup>5)</sup>を参考にし、図-3に示す内寸500×400×700mmの土槽の4隅に給水パイプ、下部に排水パイプを水平に設置する。給水パイプは外径48mm、内径40mm、長さ750mmの塩ビパイプであり、9×100mmの孔を千鳥配置で空けている。また、土粒子の流出を防ぐために、塩ビパイプの表面に土砂流出防止用の不織布を取り付けている。排水パイプは外径60.5mm、内径55.9mm、長さ600mmで、パイプ先端から75mmまでが尖っており、パイプ断面の四方には50×5mmのスリットが軸方向に50mmの間隔で3箇所ずつ計12箇所配置してある。次に、乾燥させた試料を締め固めてから排水パイプの排水口を閉じ、土槽内水位が65cmになるまで給水する。その後24時間放置した後、排水口を開けてパイプからの排水流出量と土槽内の水位変化を計測した。流量は単位時間当たりの変化量を求めることで平均流量を算出した。また、給水パイプ内の水位変化から土槽内水位を計測した。

なお、土試料は茨城県笠間市の山砂であり、土質特性を表-1に示す。また、パイプ打設による地盤の締め固め効果の影響を検討するために、土槽にパイプを先に設置してから山砂を締め固めた実験1と、土槽に山砂を締め固めてから後からパイプを直接打設した実験2の2ケースを同じ地盤条件下で実施し、パイプの排水性能の変化を比較した。計測後、排水を乾燥させ、排水に含まれている土粒子の計量及びふるい試験を行った。さらに、排水後、土槽内に再び給水して水を溜めて地盤を飽和させ、計3回の排水実験を行った。最後に、パイプ内に流出していた土粒子の計量及びふるい試験を行った。

### (2) 排水実験結果

実験1, 2の水位と平均流量の関係を図-4に示す。いずれの場合も水位と流量は比例関係にあることが分かる。また、3回ずつ繰り返した結果を比べると、実験1では多少の変動が見られた。さらに、同水位では実験1に比べて実験2の方が流量が小さくなっているが、これはパイプを後から打設することでパイプ周辺の土粒子が締め固まり、透水性が低下したためと考えられる。また、実験1でパイプを設置してから地盤を作成した時点と、実験2で地盤にパイプを直接打設した時点において、パイプのスリットへの土粒子の充填、パイプ内の土試料の流出を確認している(写真-3)。しかし、その後は充填具合及び流出状態の変化は見られなかったことから、土粒子の充填及び流出現象はパイプ設置直後に生じるものの、その後は殆ど変化しないといえる。また、排水には微量の細粒土が含まれていたが、3回の排水実験を繰り返す中で徐々にその量は減少した(表-2)。

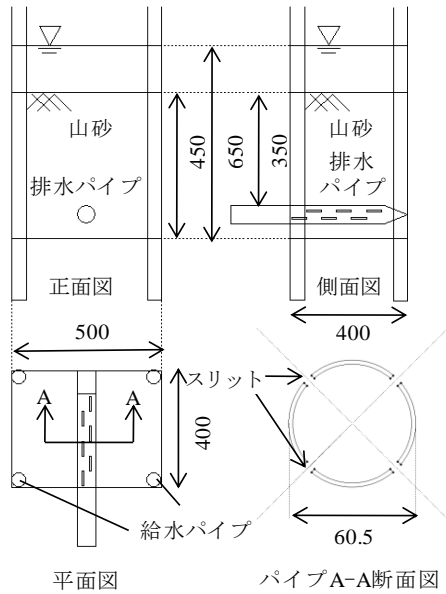


図-3 模型(単位: mm)

表-1 土試料の土質特性

土試料	山砂 (茨城県笠間市)
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.661
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.876
透水係数 $k$ (cm/s)	$8.4 \times 10^{-3}$

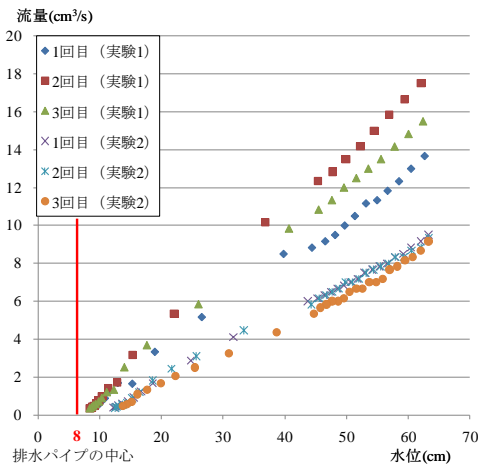


図-4 水位と平均流量

表-2 排水及びパイプ内の土粒子量(単位: g)

実験	排水中土粒子質量				パイプ内土粒子質量
	1回目	2回目	3回目	合計	
1	13.2	2.7	1.6	17.5	247.6
2	11.5	2.2	1.6	15.3	435.6



パイプ設置前

実験1 実験前

実験1 実験後

実験2 実験前

実験2 実験後

写真-3 実験前後での土粒子のパイプスリットへの充填およびパイプ内への流出状況

### (3) ふるい試験結果

実験1, 2でパイプ内に流出した土粒子, パイプからの排水に含まれていた土粒子をそれぞれ乾燥させ, ふるい試験を行った. その結果を山砂(笠間砂)と併せて図-5の粒径加積曲線に示す. パイプ内に流出していた土粒子は実験1, 2共に粒径が5mm以下のものであり, これは排水パイプのスリットの大きさ $5 \times 50$ mmと一致する. また, パイプ内の土粒子は粒径5mm以上のものが存在しないため, 山砂と比べて粒径加積曲線はやや上部に位置している. しかし, 排水パイプからの排水には, 実験1, 2共に粒径が1mm以下の細粒土しか含まれていなかった.

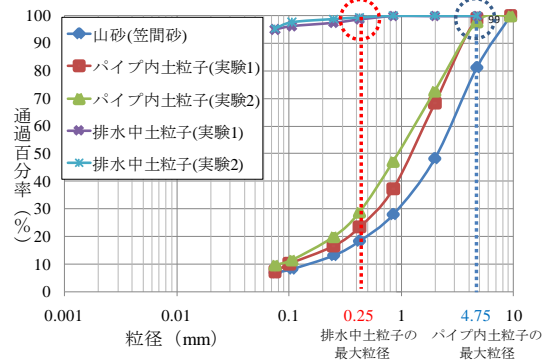


図-5 パイプ内・排水中土粒子の粒径加積曲線

### (4) 長期間に及ぶ地下水位変動の影響

長期間に及ぶ地下水位の変動による, 地盤の飽和・不飽和状態の繰り返しの影響を検討するために, 実験2(パイプ打設)と同様の排水実験を計9回実施した. 図-6に示すように, 最初に給水してから地盤の飽和状態を3日間維持し, 排水実験後, 再び給水して同様に2回目, 3回目の排水実験を行い, その後飽和・不飽和状態のスペンを変化させて計9回の排水実験を実施した. 各排水実験毎の排水時間と水位変化との関係を図-7に示す. 同図から, 1~3回の実験の中で土中の水位低下速度が変化しているが, 3回目以降はほぼ一致しているのが分かる. これは, 排水の繰り返しの伴ってパイプ周辺地盤の排水性が変動したが, 3回目以降はほぼ安定したと考えられる. しかし, パイプの中心から0~10cm高い範囲においては, 9回の排水実験の中で水位低下が徐々に遅れているが, パイプのスリット周辺地盤での細粒分の蓄積が原因と考えられる. パイプ近傍の細粒分蓄積の影響評価については, 今後検討が必要である.

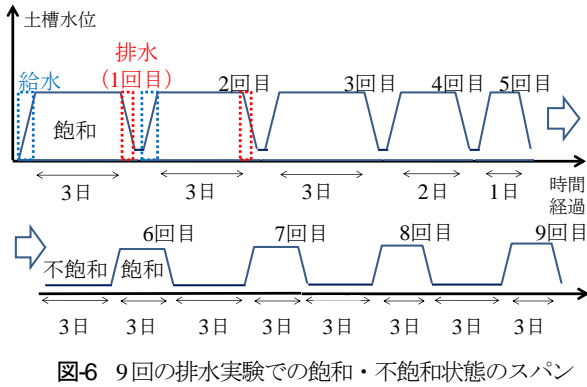


図-6 9回の排水実験での飽和・不飽和状態のスペン

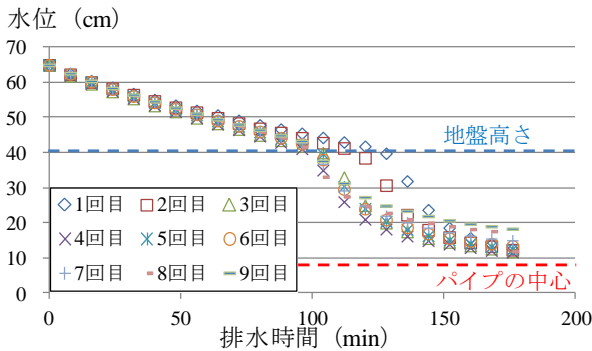


図-7 排水時間と水位変化

### 3. 排水範囲に関する模型実験

従来、適用地盤に対する排水パイプの設置間隔は1m程度<sup>9)</sup>でよいとされ、鉄道・宅地盛土で適用されてきたが、排水パイプの具体的な設計法の確立に向けて、パイプの最適な設置間隔を提案するために、パイプ1本当たりの排水範囲を明らかにする事を目的として、実験土槽の規模を変えて変水位による排水実験を実施した。実験結果から、土槽規模による排水性及び新たに試みた間隙水圧計による排水時の間隙水圧の変化特性、マンメータによる土槽底面での水圧分布特性について報告する。

#### (1) 実験内容

図-8に示す内寸1700×600×550mmの土槽において、土槽に仕切りを入れて土槽幅を変化させ、土槽幅500mm、1,000mm、1,500mmの3ケース（以下、順にケース1、2、3とする）での変水位による排水実験を行った。用いた排水パイプは外径60.5mm、内径55.9mm、長さ700mmで、パイプ先端から100mmまでが尖っており、パイプ断面の四方には50×5mmのスリットが軸方向に50mmの間隔で計18箇所配置してある。実験手順は、まず、図-8に示すように各ケースの土槽底面2箇所に間隙水圧計を設置し、2章での実験（以下、前土槽実験とする）と同様に土試料を投入、締め固めて地盤模型（高さ400mm）を作成した後、パイプ孔から排水パイプを水平に打設する。次に、

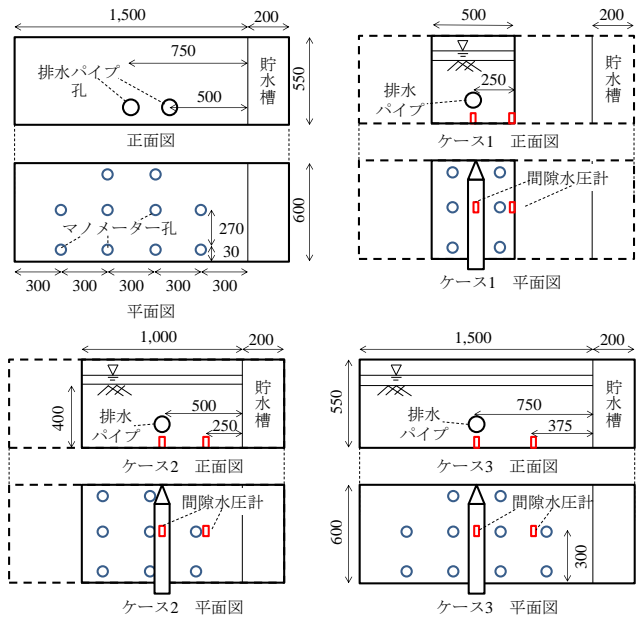


図-8 模型と実験ケース（単位：mm）

パイプの排水口を閉じ、貯水槽から土槽内水位が450mmになるまで給水して土試料を飽和する。その後、パイプの排水口を開けてパイプからの平均流量、土槽内の水位変化、間隙水圧変化を計測した。流量は単位時間当たりの平均流量を算出し、水位は貯水槽の水位変化の計測に加えて、土槽底面の10孔に接続されたマンメータ水位変化も計測した。実験後、再び給水して土槽内水位を上昇させ、同様の排水実験を計3回実施し、パイプの排水性の変化を検討した。土試料は前土槽実験で用いたものと同じ茨城県笠間市の山砂であり、土質特性は表-1の通りである。

#### (2) 土槽幅別の排水性能比較

本実験より得られた実験結果を、水位低下速度、間隙水圧変化、土中水圧分布変化の3点から各ケース別（土槽幅別）に比較して考察を進める。

##### a) 水位低下速度

本実験より得られたケース2（土槽幅1,000mm）、ケース3（土槽幅1,500mm）での排水時間と貯水槽の水位変化の関係を図-9に示す。同図から、両ケース共に3回の排水実験の中でパイプの排水性がほぼ安定状態となっており、前土槽実験の結果と一致する。ここで、ケース1～3における、水位45cm時でのパイプ1スリット当たりの排水流量を算出し、前土槽実験（土槽幅500mm）での実験結果を参考値として比較したものを表-3に示す。同表から、土槽幅の増加に伴って同水位でのパイプからの排水量はやや増加傾向が見られるが、その変動差は小さく、ほぼ一致している。

そこで、計測した排水時間毎の水位変化から土中における水位低下速度を算出し、土中水位との関係を表したものを図-10に示す。同図において、本実験ではパイプの中心は土槽底面から8.0cmの位置にあり、パイプ設置

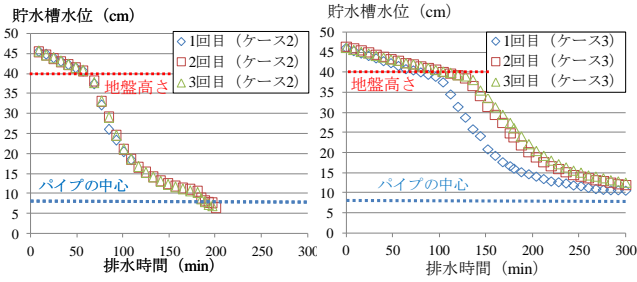


図-9 排水時間と水位変化

表-3 土槽幅別流量比較

	土槽幅 (mm)	流量 (cm <sup>3</sup> /sec)	パイプスリット数	1スリット当たりの流量 (cm <sup>3</sup> /sec)
前土槽	500	5.50~6.17	12	0.46~0.51
	500	8.3~9.0		
本土槽	1,000	10.5~11.8	18	0.58~0.65
	1,500	9.6~12.8		

※乾燥密度は1.87g/cm<sup>3</sup>、水位は45.0cm時で比較

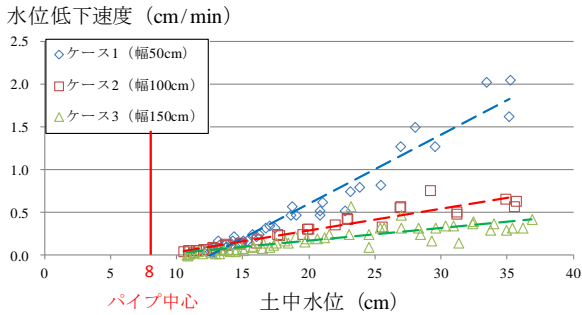


図-10 土中水位と水位低下速度

位置からの土中水位と水位低下速度とは相関関係にあることが分かる。また、土槽幅が小さく、つまりパイプの設置間隔が小さくなると土中での水位低下速度は大きくなる傾向にある。

ここで、パイプの中心位置を基準として、(1)式により土中水位と水位低下速度が線形関係にあるとする。

$$v = ah \quad (1)$$

ここに、 $v$ :水位低下速度 (cm/min),  $h$ :パイプ中心からの土中水位 (cm),  $a$ :定数 (1/min)

また、時間 $\Delta t$ 当たりの水位低下量を $\Delta h$ とすると、

$$-\Delta h = v \Delta t \quad (2)$$

(1)式および(2)式から、

$$-\Delta h = ah \Delta t \quad (3)$$

(3)式を積分すると、

$$h = H \cdot e^{-at} \quad (4)$$

ここに、 $H$ :初期水位,  $h$ :土中水位 (cm),  $t$ :水位低下時間 (min),  $a$ :定数 (1/min)

なお、図-11の実験結果の近似直線による定数  $a$  は、土槽幅 50cm で 0.0555, 土槽幅 100cm で 0.0249, 土槽幅 150cm で 0.0134 である。ここで、本実験におけるパイプ中心からの初期水位  $H$  が 30cm の場合、(4)式による土槽幅毎の  $h \sim t$  関係は図-12のように推定でき、実験値とはほぼ一致している。

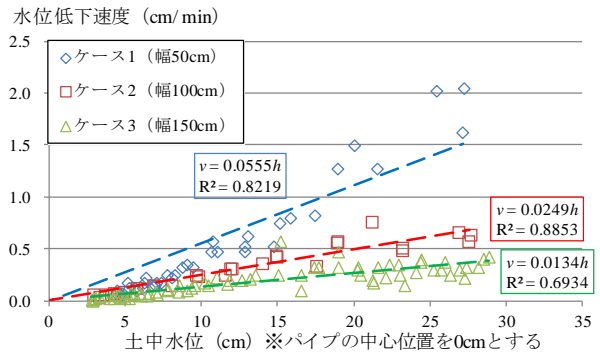


図-11 図-10に基づく水位低下速度の定式化

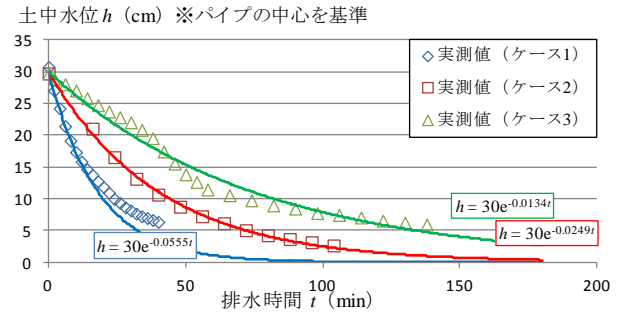


図-12 排水時間の実験値と推定値の比較:  $H=30$ cm

このように、盛土の乾燥密度およびパイプの設置間隔毎に、定数  $a$  が求められれば、設計条件としての排水時間に応じたパイプの設置間隔を決定する事が出来る。

なお、本実験ではパイプの中心位置からの初期水位が 0~30cm の範囲内にあるため、今後はより高い初期水位に対する  $h \sim t$  関係を把握することにより、実際に想定される高水位に対応させるとともに、複数段に設置した排水パイプによる  $h \sim t$  関係について検証し、設計法に結びつけることが必要である。

### b) 間隙水圧変化

本土槽実験では各3ケースにおいて、土槽底面2箇所(パイプ直下と直下横方向:図-8)に間隙水圧計を設置している。排水時間と間隙水圧変化の関係を図-13に示す。いずれのケースにおいても、排水開始前に比べて、排水開始直後に間隙水圧値は急激に低下しており、その後、水位低下に伴って徐々に低下している。また、パイ

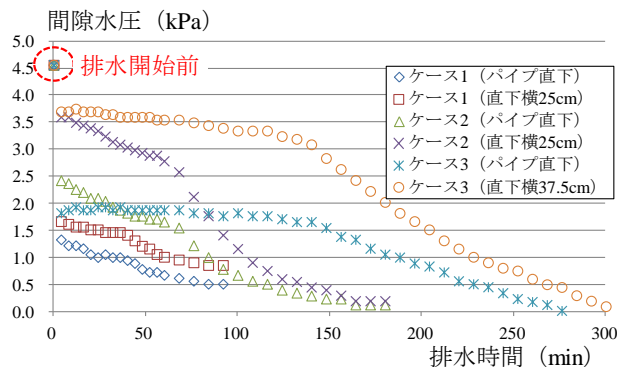


図-13 間隙水圧の経時変化

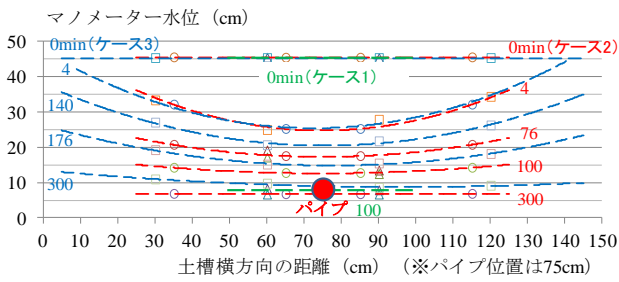


図-14 土槽底面（パイプ下部8.0cm）での水圧分布の変化

パイプ直下横に比べて、パイプ直下の方が排水開始直後の間隙水圧の低下量は大きくなっている。

e) 土中水圧分布変化

各3ケースにおいて、土槽底面に接続されたマンメーターより得られた、土槽底面での水圧の時間経過毎の分布図を図-14に示す。同図より、土中での水圧は排水直後からパイプの中心に向かって低下する分布を呈しており、排水が終了する数時間後にパイプの位置で水平方向にはほぼ一定になる。また、各3ケースの水圧分布形状は類似しており、同密度での土槽底面の水圧分布は同じであることが分かる。

なお、本実験より得られた水圧分布は土槽底面での分布であることから、今後はパイプ上部や横方向など、パイプ周辺地盤の水圧分布特性を明らかにすることが必要である。

4. おわりに

本文では、既設道路盛土の安定性向上のために、排水工法としての排水パイプの適用性を明らかにすることを目的とし、その設計法の確立に向けて、地下水位の変動に伴うパイプの排水性能の変化、パイプスリットへの土粒子の充填・パイプ内への流出現象の有無について変水位模型実験より検証した。さらに、パイプの最適な設置間隔の提案に向けて、パイプ1本当たりの排水範囲について、土槽幅を変えた模型実験により検証した。その結果、以下の知見が得られ、排水パイプの排水性能が明らかになった。

1) 地下水位の変動に伴う地盤の飽和・不飽和状態の繰り返しによって、パイプのスリット周辺地盤での細粒分の蓄積によりパイプの排水性の低下が見られるが、2~3回の排水を行う中でパイプの排水性は安定状態になる。

- 2) パイプのスリットへの土粒子の充填およびパイプ内への流出現象は、パイプ設置（打設）直後に生じるものの、その後の充填および流出の具合は、ほとんど変化しない。
- 3) 土槽幅、つまりパイプの設置間隔により、水位低下速度は変化し、パイプの設置間隔が小さくなると土中での水位低下速度は大きくなる。また、パイプの中心位置からの土中水位と水位低下速度はほぼ線形関係にあり、土槽幅ごとの定数aにより(4)式が定式化できる。同式によれば、地下水位低下に必要な時間からパイプの設置間隔を決定することが出来る。
- 4) 排水パイプからの排水に伴うパイプ周辺の水圧分布を把握することを目的として、間隙水圧計およびマンメーターにより、土槽底面（パイプ下部8.0cm）での水圧分布の変化が把握できることが分かった。

なお、今後は、排水パイプの周囲地盤の水圧分布の把握および30cm以上の高い初期水位に対する(4)式の適用性の検証を行うとともに、排水機能以外の補強機能の定量的な評価を行う予定である。

謝辞：本研究は、千代田器材（株）との共同研究で実施されたものであり、実務的な技術に関しては岡三リビック（株）の協力を得ている。関係者各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 平山淳基, 常田賢一, 寺西弘一: 盛土の安定性に及ぼす地下水の影響の定量的評価, 第13回日本地震工学シンポジウム, GO49-Sat-AM-6, pp.3403-3409, 2010.
- 2) 社会法人日本道路協会: 道路土工 盛土工指針 (2010年度版), pp.150
- 3) 千代田器材株式会社: 恒久排水補強パイプ パンフレット, pp.1~pp.3
- 4) 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実験的検討, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.
- 5) 林 豪人, 澤松俊寿, 徐 永強, 藪 雅行, 小橋秀俊: 盛土排水パイプの集水性能に関する実験的評価, 第45回地盤工学研究発表会, No.517, 2010.8
- 6) 斎藤迪孝, 上沢 弘, 毛受貞久, 安田祐作: 鉄道技術研究報告No.631, 有スリットパイプによる新幹線盛土斜面の排水効果, pp.1~pp.17, 1968.4