

排水機能を有する管継手部材の提案と性能照査

Proposal and Performance Investigation of Drainable Pipe Fitting

河井 克之 中島 晃司 竹内 建吾
Katsuyuki Kawai Koji Nakashima Kengo Takeuchi
前田 和徳 深津 翔大
Kazunori Maeda Shota Fukatsu

1. はじめに

盛土や切土といった土工構造物は、降雨や周辺地下水位の上昇によって外部から水が供給され、内部の含水状態が高まると、浸潤線の上昇とともに不安定化を招く。そのため、浸透水や地下水を排出する目的で排水工が設けられる。排水対策は構造物設計時に計画されるのが一般的であるが、事前の調査のみで浸透水量や浸潤線挙動を正確に把握することは困難である。そのため、排水が不十分で安定性に問題を抱える既存の土工構造物や自然斜面に対して適用可能な排水工が必要とされている。排水パイプ工は、細孔を有する鋼管や塩ビ管を直接地盤に貫入し、地中水を構造物外に導くことを目的としており、貫入周辺地盤の締め固め効果や局所変形を拘束することで地盤強化も見込めるため、既存構造物の排水対策工として、古くから鉄道分野などで施工実績がある。斎藤ら¹⁾は、この排水パイプの効果を定量的に評価するために、模型土槽を用いた浸透試験により排水パイプの基本的な排水メカニズムについて調べるとともに、大型模型実験や現地調査によって排水パイプの打設間隔と間隙水圧低減効果をまとめている。藤井ら²⁾は、排水パイプの打設長さについて、ある一定以上の長さでは、間隙水圧低減効果が一定となることを示している。蔡³⁾は、浸透解析の中での排水パイプの効果として、排水パイプ上部節点にゼロ圧力水頭を入力し、浸潤線の降下を表現するとともに、せん断強度低減法を用いた安定計算により安全率の変化についても言及している。太田ら⁴⁾は、排水パイプを設置した模型実験の結果と、三次元浸透解析の比較によって、排水パイプ周辺の透水係数が小さくなるスキニング効果の適用について調べている。渡邊⁵⁾らは、太田らの解析モデルを用いて、仮想盛土の浸透解析により、排水パイプの打設長さや打設間隔の影響を調べている。北口・常田⁶⁾は、排水パイプの影響範囲を考慮し、疑似三次元モデルとして排水パイプ位置の透水係数を修正することで浸透解析における排水パイプの効果を表示している。Kawai et al.⁷⁾は、排水パイプが施工された実鉄道盛土において、観測井で計測された地下水位と電気比抵抗探査結果から盛土内浸潤線位置を同定するとともに、土/水/空気連成解析コードに浸透境界を適用することで浸潤線を得ており、実データとの良い整合を見せている。しかしながら、これらの研究成果は排水パイプが健全な状態を保っていることが条件となる。実際、供用中の排水パイプでは細孔からの土砂の流入を避けることが難しく、この土砂が細孔を目詰まりの原因となったり、管内で堆積することが原因で当初の機能を有していないものが多くみられる。そこで、排水パイプに代わる既存の土工構造物に適用可能な排水工が求められている。本研究では、既設土工構造物に適用可能な排水工として、排水経路への土砂混入を抑制する排水機構を備えた新しい管継手部材を提案し、その効果を室内模型実験と実物大盛土試験によって検討する。

2. 新しい排水機構を有する排水部材の提案

本研究で提案する排水工は、排水経路となる管路は細孔を有しない無孔管とし、管を接続する継手部分に排水機能を持たせたものである。図-1に新しい排水工の設置イメージと排砂抑制機構について示す。排水パイプは土工構造物法面に対して仰角5度で挿入することになっている⁸⁾が、同様に排水機構を有する継手で無孔管を接続することで、任意の

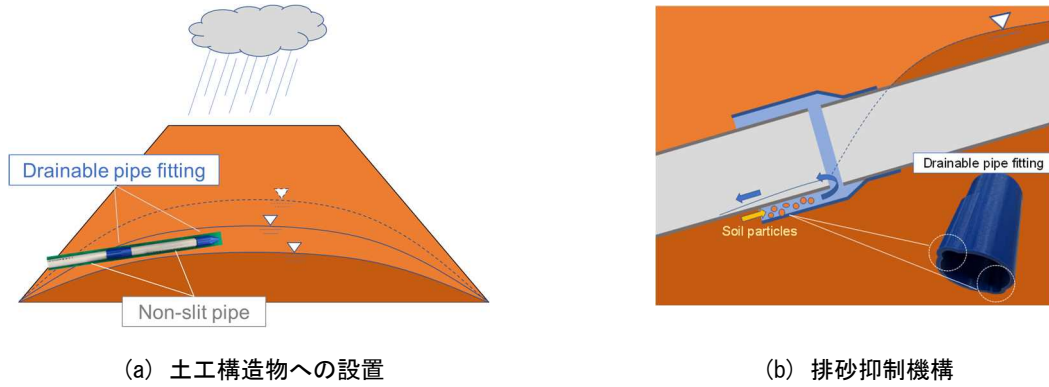


図-1 新しい排水工の概略

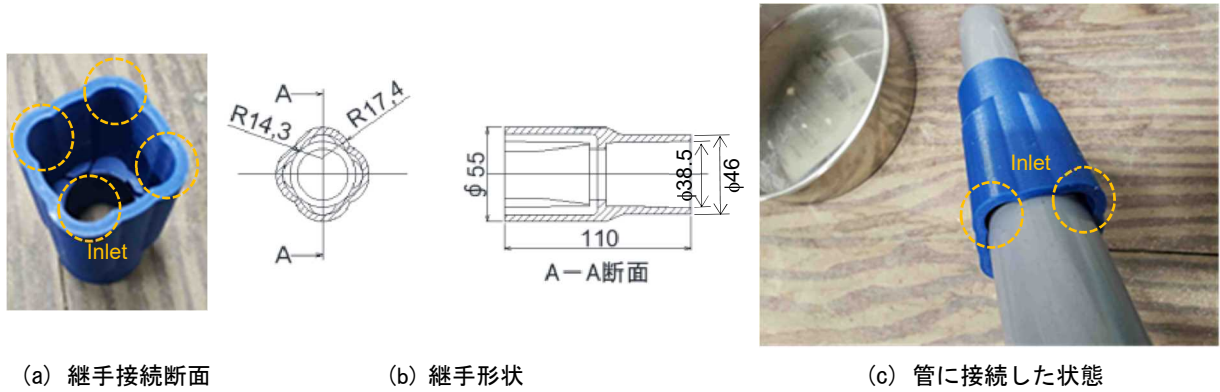


図-2 本研究で用いた四つ孔継手

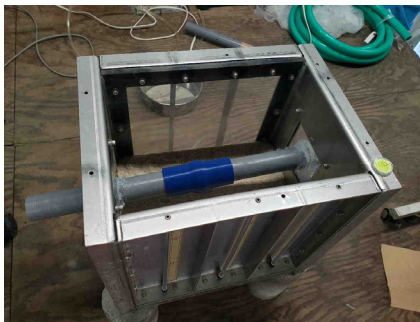


写真-1 模型土槽全景

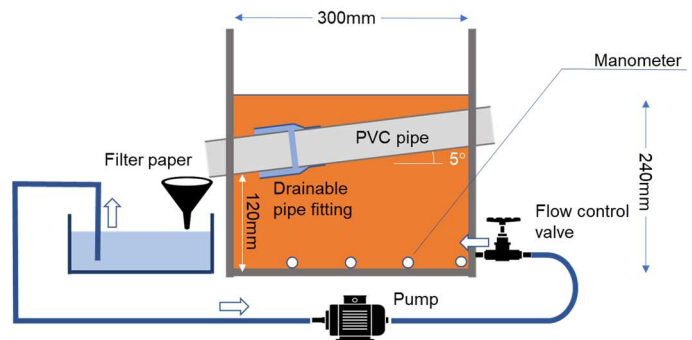


図-3 模型実験概略図

位置に排水箇所を設置することができる。継手は管路の傾斜した方向に排水工を備えており、土工構造物内の浸潤線はこの排水孔から管路に流入する。この時、土砂の流入も生じ得るが、仰角方向への流れとなることから土粒子に作用する重力方向と相反する流向となるため土砂が管路に達することは容易でないため、管路への土砂流入を抑制することを期待している。また、使用する無孔管は既存の鋼管や塩ビ管、さらには中空構造となるアンカーロードの転用も可能であり、継手の構造を独立して開発できる点に発展性が見込める。図-2 に本研究で用いた VP30 標準塩ビ管に接続できる四つ孔継手を示す。継手の片側に排水孔となるふくらみを対角線上に4箇所持たせた構造となっている。図-2(c)は、無孔塩ビ管と接続した状態であるが、塩ビ管と継手の膨らみ部分の隙間から地中水が流入することで排水が行われる。

3. 実験方法

3. 1 模型実験

排水継手の排水工としての効果を明らかにするために、模型土槽を用いた排水試験を行った。写真-1 は模型土槽の写

真である。模型土槽は内寸が幅 300mm, 高さ 300mm, 奥行 200mm で片側の中央部から仰角 5 度で排水管を設置できるようにになっている。図-3 に模型試験の概略図を示す。図中の白丸印の位置にスタンドパイプ型のマノメーターが設置されており土槽内の水位が確認できるようになっている。上流側下部には流量バルブを介した水流入口がある。排水管出口からの排水は 排砂を取り除くためのろ紙を介して水槽に貯められポンプで循環させられるようにしている。試料としては、本研究で提案する排水機構を検証しやすくするために、土粒子密度が均一で粒度調整が可能な三河珪砂を用いた。いくつかの粒度で基本的な物理試験を実施し、ここでは乾燥密度の設定範囲が比較的広い市販の珪砂 5 号を用いた。図-4 に粒度分布を示す。最大最小密度試験(JIS A-1224)によって、最大間隙比は 1.050, 最小間隙比は 0.708 を得た。表-1 は、別途行った定水位透水試験から得た透水係数である。模型土槽作製時は、乾燥状態の試料を用い、間隙比 0.70 となるように高さ 240mm を 10 層に分けて排水管を設置した状態で締め固めを行った。まず排水管下部まで飽和させ、その後、流入部のマノメーターを確認しながら一定の動水勾配になるように流量バルブを調節して、定常状態になったことを確認しながら、60 分間隔で 1cm ごとに水位を上昇させた。土砂混入が顕著になり完全に排水管が詰まるまで実験を行った。また、比較のため一般的な有孔管と同じピッチ(対角線上に 2カ所, 62.5mm 間隔で 90 度回転方向に 2カ所)で 5mm 孔を設けた塩ビ有孔管でも同条件で実験を行った。ただし、本研究で用いた試料では、排水とは無関係に排水管上面の細孔から試料が混入するため、排水継手との比較を行うために有孔管上面と排水継手設置箇所より上流側の細孔をすべて防水テープで塞いだ状態で試験を行った。

3. 2 実物大盛土試験

神戸空港内に設けた実物大試験盛土(図-5)で提案する排水工の検証実験を行った。この盛土は、宙水生成過程を再現するために、2 種類の建設発生土(図-6 粒径加積曲線)を用いて造られている。締め固め試験(JIS A-1210 A-b)の結果、建設発生土 A は最適含水比 14%で最大乾燥密度 1.93g/cm³, 建設発生土 B は最適含水比 18%で最大乾燥密度 1.72g/cm³である。表-2 に図-5 の盛土の各層の締め固め仕様を示す。B 層については、法面中央を境に含水比が異なる状態で締め固めを行っている。浸透雨水は c 層上で宙水を形成することを想定している。盛土内の宙水は c 層上を法尻方向に流下するため、図-5 中に示す位置(縦断面図中の白プロット、平面図中の灰色線)に排水工を設置している。

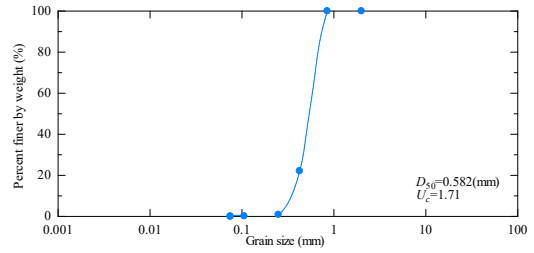


図-4 珪砂 5 号の粒径加積曲線

表-1 珪砂 5 号の透水係数

間隙比	0.67	0.70	0.75
透水係数(m/s)	4.49×10 ⁻³	3.37×10 ⁻³	2.42×10 ⁻³

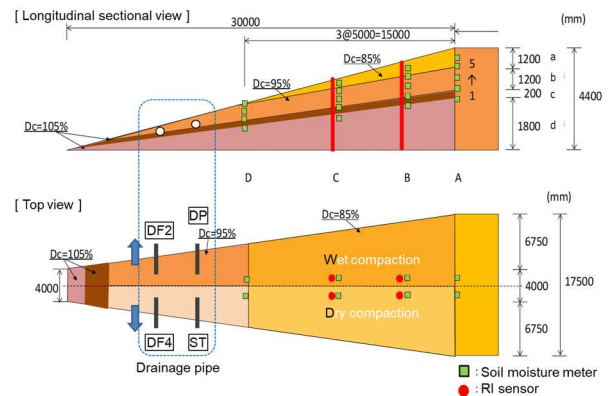


図-5 試験盛土概要

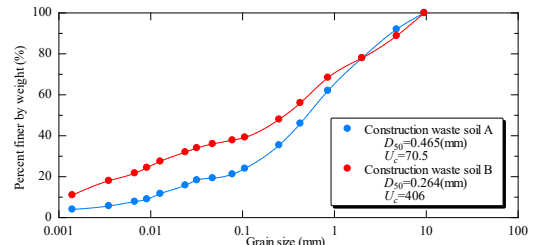


図-6 実物大盛土使用材料の粒径加積曲線

表-2 各層の使用材料

Layer	a	b		c	d
		W	D		
Soil	A	A	A	B	A
w (%)	14	16	10	18	14
D _c (%)	85	95		105	105



写真-2 排水工設置概要

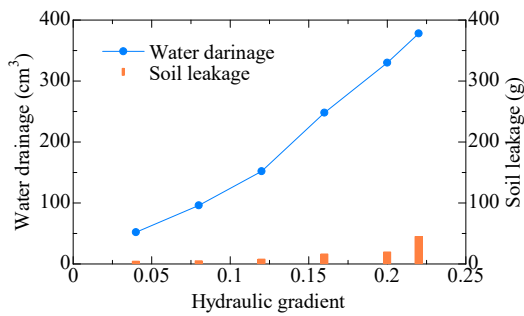


図-7 塩び有孔管模型試験結果

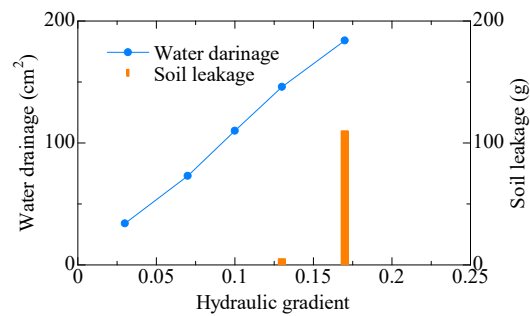


図-8 排水継手模型試験結果

写真-2に排水工の設置状況を示している。排水工は写真-2中下に示す様に4種類用意した。DF4, DF2は本研究で提案している排水継手であり、それぞれ排水孔数が4, 2である。STは既存のアンカーロッド(S45C:溶融亜鉛メッキ表面処理、外径φ28.5、内径φ13)の継手に排水機能を持たせたものであり、形状は同じで排水孔は2つのものである。DPは比較のために設置した塩び有孔管である。すべて法面から仰角5度で2m挿入している。排水継手を有するもの(DF4, DF2, ST)については先端を含み50cmごとに排水継手で接続している。STは自穿孔タイプで材質が防錆処理した鋼製のため剛性が高く、打撃によって貫入、DP, DF2, DF4は挿入前にあらかじめエアオーガーで先行掘りをし、孔壁が自立していることを確認後、挿入・設置した。排水管からの排水はアクリル製容器に集め、定期的に排水量、排砂量を計測した。また、計測期間中はタイムラプスカメラで排水の様子を撮影し、排水が見られた日を記録した。

4. 試験結果

4. 1 模型実験

図-7に塩び有孔管模型試験の結果を示す。排水量に関しては、水位を上昇させる前の30秒間排水量である。模型土槽底面のマンメーター間の水位にはほとんど差が見られなかったために、ここでの動水勾配は、流入部のマンメーター水位と最下部の細孔高さの差を水平距離で除したものとした。動水勾配に応じて直線に漸近するように排水量が増加している。有孔管では動水勾配が小さい時も一定量の排砂があり、動水勾配が0.25を超えたあたりで大量の土砂が確認され、実験を取りやめた。次に、排水継手の実験結果を図-8に示す。動水勾配の絶対値については細孔の位置関係などから正確に比較することは難しいものの、動水勾配に比例して排水量が増加しているのは同じ傾向である。低動水勾配では排砂は確認できないものの、排砂が生じ始めると加速度的に増加し、動水勾配が0.2を超える辺りで実験が継続できないほどに排砂による目詰まりが生じた。排水継手では流入部の勾配が仰角5度であり土砂に作用する重力よりも掃流力が勝るため、ある程度の動水勾配になると土砂混入抑制効果はほとんどなくなることが分かった。これは、ストークスの法則からも明らかである。水の粘性係数を η とする時、流速 v の流れの中で直径 d の土粒子には、

$$R = 3\pi\eta dv \quad (1)$$

の掃流力 R が作用する。また、水の中で土粒子に作用する重力は、

$$W = \frac{\pi d^3}{6}(\gamma_s - \gamma_w) \quad (2)$$

ここで、 γ_s 、 γ_w はそれぞれ土粒子、水の単位体積重量である。掃流力が重力に勝る条件を考えると、

$$v = \frac{d^2}{18\eta}(\gamma_s - \gamma_w) \quad (3)$$

の流速に達すると、土粒子は浮遊することになる。地盤内で一定の流速に達すると独立した土粒子は浮遊することになるため、排水継手の様な排水孔サイズが比較的大きいものは、その状態で土粒子の浮遊を抑制することができないと言える。この流速に関しては排水孔から排水経路に流入する時の流速を意味するため、この流速を小さくすることが排水継手を有効に作用させることになると考える。そこで、図-9に示す様に継手形状を改良した。改良型排水継手は排水管底辺部分に流入口が、排水経路への合流部は排水管内上部にあり、より高低差のある構造となっている。この改良型



図-9 改良型排水継手

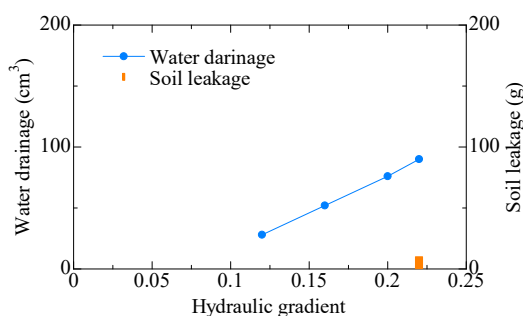


図-10 改良型排水継手 A 模型試験結果

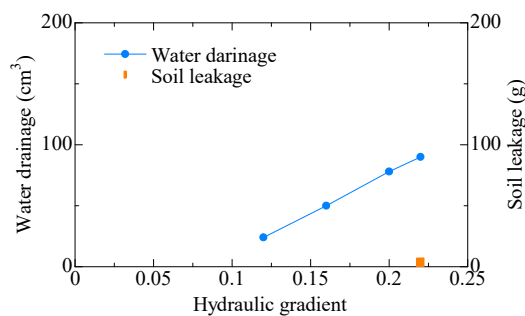


図-11 改良型排水継手 B 模型試験結果

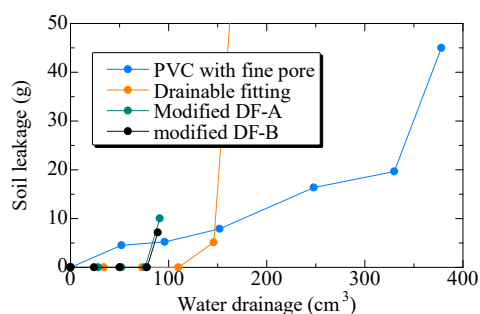


図-12 模型試験 (排水量～排砂量関係)

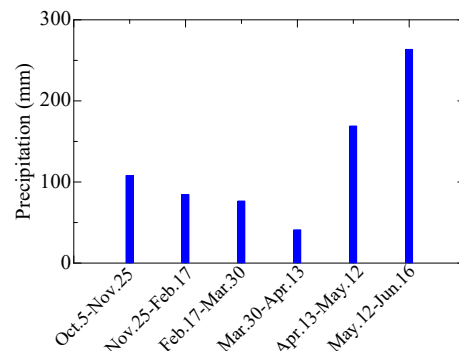


図-13 計測期間中の降水量

排水継手には別の利点もある。例えば、有孔管や図-2 で示すような排水継手で、構造物奥部の宙水を取水する場合、排水が法面に達する前に途中の細孔や排水継手から土構造物側に取水した土壤水が漏れる可能性があるが、改良型排水継手では排水経路の上部に流入口があるため、途中で漏れることなく排水を法面まで運搬することができる。ここでは、流入部(オレンジ色破線枠)の形状に違いがある2種類を用意し、それぞれ改良型排水継手A, Bとする。図-10, 11に改良型排水継手を用いた場合の試験結果を示す。継手A, Bの試験結果に違いが見られないため、内部構造が同じ場合、流入部の形状による排水機能、排砂抑制機能への影響は少ないと考える。改良を施す前に比べると、排砂量は少なくなるものの、一定の動水勾配を超えると排砂量は過大となり実験継続は困難となった。先述した様に、動水勾配の絶対値の比較は妥当でないため、図-12 の様に排水量～排砂量関係として排水部材毎の比較を行った。その結果、有孔管では排水量が小さい時でも排砂が確認できるが、提案する排水継手ではほとんど排砂が生じない。しかしながら、一定量の排水量以上になると顕著な排砂が生じるようになることが分かる。この排砂については、水位上昇直後に最も多いことも確認されており、水位上昇速度に大きく依存していると考えられる。

4. 2 実物大盛土試験

実物大盛土試験における排水量、排砂量計測は6回に分けて行った。図-13に計測期間中の降水量を示す。秋から冬

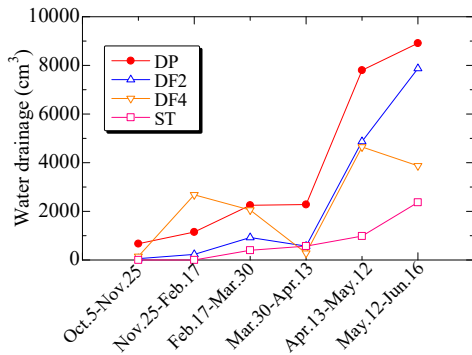


図-14 排水工からの排水量

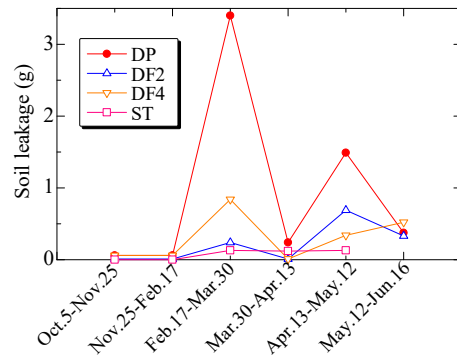


図-15 排水工からの排砂量

の間にかけてはほとんどまとまった雨がなく、春先から梅雨に欠けて降水量が多くなるため、計測期間にはばらつきがある。図-14, 15 に計測された排水量、排砂量を排水工ごとにまとめたものを示す。設置位置や土層構造などの条件が同じでないため比較は難しいが、有孔管と排水継手で排水量に大きな違いはないことが分かる。つまり排水継手も有孔管と同等の排水性能を備えていることが分かる。一方で排砂量については降水量の小さい期間ではほとんど見られず、また有孔管で最も多い結果となった。これらの排水についてはタイムラプスカメラから確認すると、日雨量が30mmを超える様なまとまった雨の日にのみ見られた。別途計測しているテンシオメーターから、この盛土で宙水が発生する条件は日雨量25mm程度であり、それ以下であれば宙水を生成することなく表面流出や蒸発で消散してしまうことも分かっており、排水溝が機能を発揮するのは宙水の様な自由水が生成される時であると言える。

5. まとめ

本研究では、新しい排水機構の排水部材として、模型実験と実物大盛土試験によるモニタリングにより、排水継手の排水機能、排砂抑制機能の検討を行った。その結果、排水継手の排水効果を確認するとともに、低動水勾配では排砂抑制効果が期待できることも分かった。しかしながら、実験条件が限られており、水位上昇速度などの外水位変動荷方法を変更した模型実験や現地モニタリングによって試験結果を蓄積する必要がある。継手形状に関しては更なる改良の余地もあるが、既往の排水パイプ工とは異なり継手位置によって土構造物内の土壌水を選択的に排水することができるなど応用範囲は広いと言える。

参考文献

- 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: 排水パイプ工の施工ピッチに関する実験, 第31回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1999-2000, 1996.
- 3) 蔡飛: 地すべり解析における有限要素法の利用第6回-2. 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.
- 4) 太田直之, 杉山友康, 渡邊諭, 高馬太一, 西田幹嗣, 石川智史: 盛土に用いる排水パイプの浸透流解析モデル, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, pp.35-40, 2012.
- 5) 渡邊諭, 太田直之, 西田幹嗣, 浅野嘉文: 盛土に適用する排水パイプの施工仕様決定ノモグラム, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, pp.29-34, 2015.
- 6) 北口峻輝, 常田賢一: 道路盛土の排水性向上策に関する検討, 近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門, No.6, pp.1-6, 2015.
- 7) K. Kawai, K. Nakashima, K. Yasutomi, and N. Otaka: Estimation of drain pipe effects using electrical prospecting and

unsaturated soil/water coupled analysis, SEAGS-AGSSEA Journal, Vol.53, No.2, pp.43-50, 2022.

8) 秋山一弥, 石井靖雄ら: 道路土工一切土工・斜面安定工指針, (公社) 日本道路協会, pp.173-175, 2009

著 者

河井 克之	所員, 博士(工学), 地盤工学
中島 晃司	近畿大学, 博士(工学), 地盤工学
竹内 建吾	近畿大学大学院, 学士(工学), 地盤工学
前田 和徳	岡部株式会社, 学士(工学), 地盤工学
深津 翔大	岡部株式会社, 学士(工学), 地盤工学