



二次元矢板締切り地盤の浸透破壊におけるPIV解析と地盤形状の変化（特集 地下水問題の最前線）

田中, 勉
参鍋, 漱祐
永井, 茂
笠松, 晃次
井上, 一哉

(Citation)

地盤工学会誌 : 土と基礎, 64(2):18-21

(Issue Date)

2016-02

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2016 地盤工学会. 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003328>



二次元矢板締切り地盤の浸透破壊における PIV 解析と地盤形状の変化

PIV Analyses and Soil Particle Movement in 2D Seepage Failure of Soil

田 中 勉 (たなか つとむ)

神戸大学 大学院農学研究科 教授

参 鍋 漱 祐 (さんなべ そうすけ)

神戸大学 大学院農学研究科 M2

永井 茂 (ながい しげる)

神戸大学 大学院農学研究科 D2

等 松 晃 次 (かさまつ こうじ)

神戸大学 農学部 B4

井 上 一 哉 (いのうえ かずや)

神戸大学 大学院農学研究科 准教授

1. はじめに

矢板締切り地盤の浸透破壊現象は、下流側の砂質材料が上昇浸透流による上向きの力を受け、土粒子が移動したり、土塊全体が持ち上がったることによって発生すると考えられている。地盤内の出来事であるので、実際には、いつ、どこで、何が起きているのかは分かっていない。著者らは、今回、矢板近傍土粒子の観察が可能となるように改良した小型二次元浸透破壊実験装置を用いて、上下流地盤厚さの条件を変えた25ケースの浸透破壊実験 E0401～E0425を行った¹⁾。これらの実験ケースについて PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた解析を行い、地盤が破壊するまでの砂粒子挙動の把握を行った。

2. 実験装置, 試料と方法

小型二次元浸透破壊実験装置は、図—1に示すように、二次元モデル²⁾の1/2の大きさになっている。実験水槽本体はステンレス・スチール製で、幅800 mm、高さ800 mm、奥行き200 mmであり、中央に底面から100 mmの位置に厚さ3 mmの矢板が取り付けられている。前面はアクリル製で、厚さ3 mmの矢板に接する砂の挙

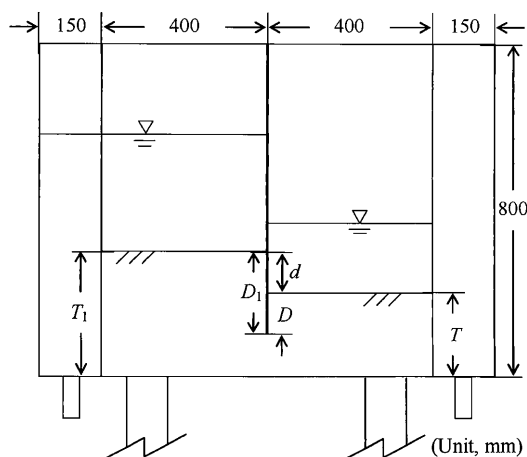
動が PIV 解析によって正確に把握できるように改良されている。実験は、実験装置本体両側に、幅 150 mm の補助水槽を取り付けて行う。図—1 に示すように、 T_1 、 T は上下流地盤の層厚、 D_1 、 D は上下流における矢板の根入れ深さ、 d は掘削深さであり、掘削なしのとき $d=0.0$ 、掘削ありのとき $d>0.0$ となる。実験で用いた試料（琵琶湖砂 3）の物理的性質を表—1 に、粒径加積曲線を図—2 に示す。表—1、図—2 から、試料は均一な細砂であるといえる。

実験では、まず、試料について、(1)所要の質量を測定したのち、(2)水に浸し、日を変えて4回かき混ぜて飽和させるとともに、約1週間以上水浸させ水になじませる。(3)水を張った実験水槽本体に飽和した試料を両側から約20層に分けて少しずつ入れ、層ごとにアルミ製の突き固め棒（直径7 mm、長さ1 000 mm、質量100 g）を所定の回数だけ落下させて締固める、相対密度 D_r がおよそ50%の中密度の地盤を作製する。(4)補助水槽を取り付けて実験準備が出来上がる。

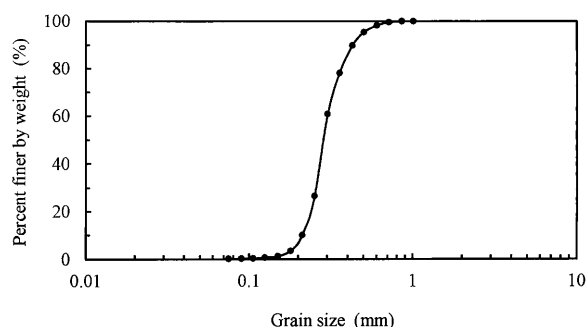
水頭差を徐々に増加していったとき、地盤が破壊に至

表—1 試料の物理的性質

物理的性質	琵琶湖砂3
比重 G_s	2.668
均等係數 U_c	1.404
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.283
最大間隙比 $e_{\max}$	1.115
最小間隙比 $e_{\min}$	0.761



圖一-1 小型二次元浸透破壞實驗裝置 (正面圖)



図一2 試料の粒径加積曲線

るまでにどのような性状の変化を示すかについて詳しく考察を行った。水頭差の増分としては、理論限界水頭差を H_c 、水頭差増分を ΔH とすると、最初は $\Delta H \approx 0.2 H_c$ 、 $H > 0.8 H_c$ あたりから、次第に増分を減らしていき、 $H = H_c$ 付近から破壊に至るまで $\Delta H \approx 0.02 H$ とした。ここに、 H_c は実験前に pfc-2D³⁾ によってあらかじめ求めた理論限界水頭差の値、 H はその段階における水頭差の値を表す。pfc-2D³⁾ は、Prismatic failure concept を用いて、二次元矢板締切り地盤の浸透破壊に対する限界水頭差を求める方法をいう。水頭差を上げていったとき、各水頭差段階で、浸透流況及び地盤状態が落ち着いた時点で、地盤内の200点余りのピエゾメーター点について全水頭値を観測するとともに、水頭差 H 、流量 Q 、地盤表面形状の変化を計測し、正面から写真撮影を行った。実験後、 $H \sim Q$ 関係、実験及び解析による等ポテンシャル線分布を求めるとともに、地盤形状変化の把握を行い、撮影した画像について PIV 解析を行った。

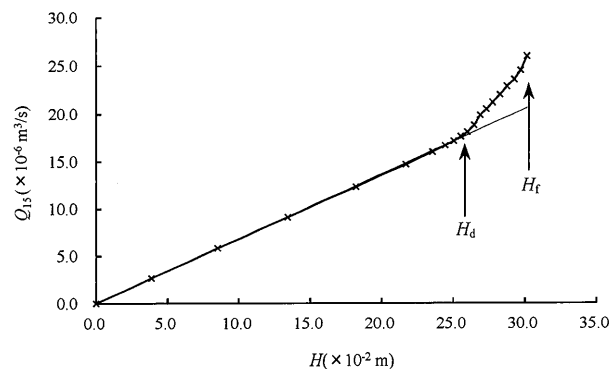
PIV とは、粒子イメージ流速計測法という画像解析手法である。粒子によって可視化された流れ場のイメージについて、時間的に連続する2つの画像内の一部（格子状に配置した点を中心とした小領域）の類似性を求め、粒子パターンの変位を計算し撮影時刻や画像取り込みの時間間隔から流速が求まる。今回の解析では、前後する2つの水頭差段階における粒子パターンの変位を表すことになる。ここでは、類似性の指標としては小領域内の輝度差累積値を用い、解析の高度化のため逐次棄却を行った。ここで用いた PIV 解析では、地盤に色素や標的を注入することなく、砂粒子の配置パターンの変化から、その挙動を把握するものである。地盤内への異物の混入がないので、実際の地盤状態を把握できるという特徴がある。

3. 実験結果と考察

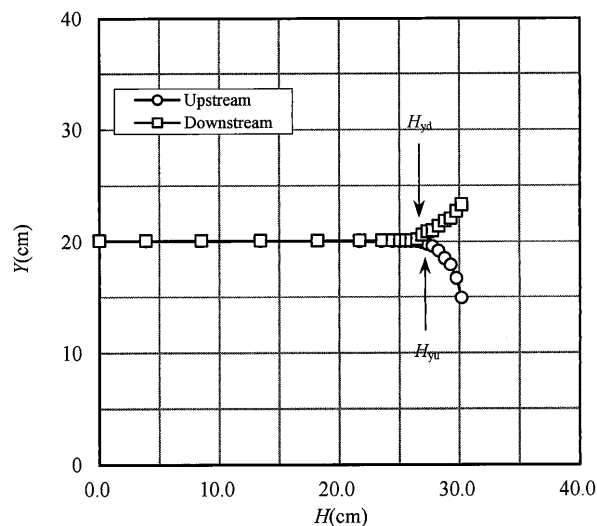
ここでは、地盤状態の変化を特徴づける各種限界水頭差と PIV 解析結果について述べる。また、ここでは、E0425の実験結果について考察する。実験 E0425は、掘削なしを模擬した地盤であり、 $T_1 = 19.90$ cm, $D_1 = 9.93$ cm, $T = 20.08$ cm, $D = 10.12$ cm, $d = 0.00$ cm, $D_r = 49.5\%$ である。

3.1 各種限界水頭差

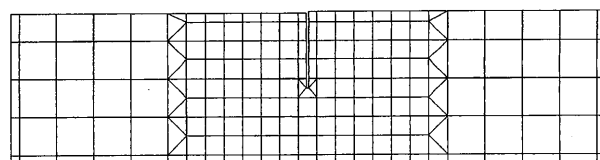
図—3 に実験 E0425について、水頭差 H と15°C時の値に換算した流量 Q_{15} の関係を示す。図—3 から分かるように、 Q_{15} は、 H の増加とともに最初直線的に増加していくが、 H がある値 H_d になると、流量は直線関係から外れ急激に増加する。この値 H_d を流量急増時水頭差と呼ぶ。 H が H_d を超えてさらに増加していくと、地盤は矢板の近傍上下流で大きく変化していき、 $H = H_t$ になると最終的に破壊する。このときの水頭差 H_t を破壊時水頭差と定義する。水頭差 H と地盤表面高 Y の関係を図—4 に示す。 Y は矢板の上下流壁地点における地盤高さを表している。 H が増加していくとき、地盤表面高は最初変化しないが、ある値 H_y を超えると上流側



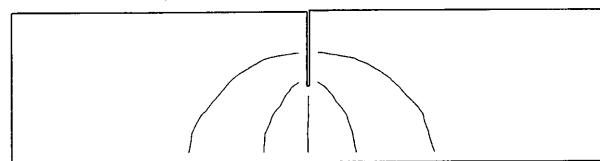
図—3 $H \sim Q_{15}$ 曲線



図—4 $H \sim Y$ の関係



図—5 有限要素分割図 (E0425)



図—6 実験による等ポテンシャル線分布 (E0425, $H = 13.47$ cm)

で沈下、下流側で隆起する。ここで、 H_y を変形開始時水頭差と定義する。 H_y は上下流で求まるが小さい方の値を用いる。また、 $H_y = H_d$ の関係があり¹⁾、流量急増と地盤形状変化の減少は連動していると考えられる。図—5 に有限要素分割図、図—6 に3段階目の水頭差 ($H = 13.43$ cm) における実験による等ポテンシャル線分布を示す。図—5 において、地盤内の格子点がピエゾメーター点と一致している。図—6 は地盤における水頭差を6分割したときのものを表している。等ポテンシャル線分布は左右対称となっており、地盤はほぼ均質に

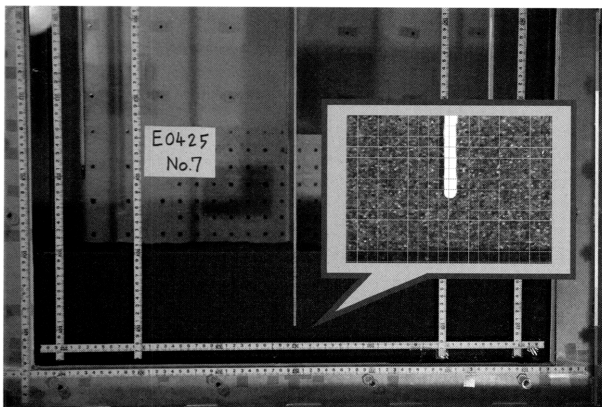
報 告

作製されているものと考えられる。

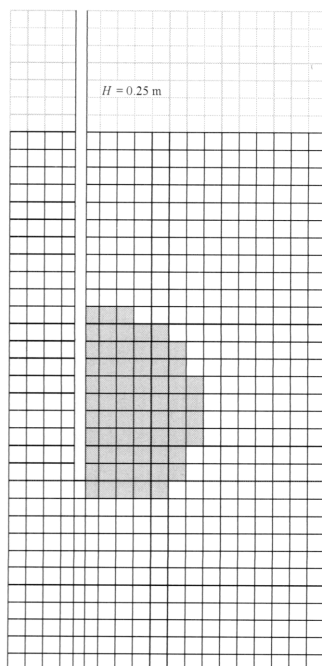
3.2 PIV 解析

PIV 解析を行うと、はじめは砂粒子の移動はないが、 H が H_y ($\approx H_d$) よりも小さな値 $H=24.742$ cm のときに、図—7 (口絵写真—1, <http://urx.nu/bmG4>) に示すように、矢板下端下流側付近において、砂粒子の移動が観察されることが分かった。砂粒子の変位量は約 0.013~0.021 cm である。地盤表面における上流側沈下や下流側隆起はこの時点では観測されない。矢板下端下流側付近における砂粒子の移動領域は、Kochina⁴⁾や河野・久保田⁵⁾が定義した γ_{net} が負になる領域 (図—8 参照) とよく一致していることから、この現象は $\gamma_{\text{net}} < 0$ 領域の発生と関係があると考えられる。 γ_{net} は単位体積の土粒子に作用する鉛直下向き方向の正味の力を表す。矢板下流側壁近傍の土粒子は、個々にみればより早くから動きを生じていると予想されるが、上述のように塊として動き出す時点が存在すると考えられる。

矢板下端下流側付近において砂粒子の塊としての移動が起こり始めるときの水頭差を H_{piv} とすると、実験



図—7 PIV 解析結果 ($H_{\text{piv}}=24.742$ cm のとき)



図—8 γ_{net} が負になる領域

E0425 の場合、 $H_{\text{piv}} = 24.742$ cm となる。 $H_d = 26.727$ cm, $H_y = 26.382$ cm, $H_l = 30.417$ cm であることから、 $H_{\text{piv}} = 0.94 H_y$ であることが分かる。このように、下流側地盤表面に変形が現れるより前に、矢板下端下流側付近で土粒子の移動現象が生じることが分かる。実験 E0401~E0425 について、 $H_{\text{piv}} = \alpha H_y$ として α の値を求めると、 $\alpha = 0.73 \sim 0.99$ となる。実験ケースによってばらつきはあるものの、今回の中密度の細砂を用いた実験では、水頭差が H_y よりも小さな値のときに、矢板下端下流側付近で土粒子の移動が生じることが分かる。

矢板下端付近の土粒子の塊としての移動を防ぐためには、施工時における水頭差の限界値 (施工限界水頭差)⁶⁾ を H_d よりも小さな値に設定しなければならないことが分かる。そして、矢板下端付近の地盤を締め固める (又は、矢板下端付近の地盤の透水係数を小さくする) ことによって、締切り矢板地盤の浸透破壊に対する安定性を高められる可能性があることが予測される。

次に、 H が H_y を超えて地盤が形状変化を起こしたあとの、PIV 解析結果について考える。図—9 (口絵写真—2) (a), (b), (c) に、水頭差が $H=26.727$ cm (変形開始時水頭差), 29.047 cm (地盤変形がある程度進んだ状態), 29.994 cm (破壊の2段階前) のときの PIV 解析結果を示す。

図—9 (a) に示すように、変形開始によって下流側地盤 (幅約 2.8 cm) が持ち上がる。下流側表面近傍における砂粒子はほぼ上向きの変位を生じ、その大きさは 0.23~0.25 cm である。砂粒子の移動は下流側で顕著であり、矢板下端より上方へ 5 cm 地点 (矢板の根入れ深さの中央部分) で幅約 2.8 cm である。下流側で持ち上がる地盤の幅約 2.8 cm は、Terzaghi⁷⁾が定義した破壊土塊の幅 $D/2 = 5.0$ cm より少し小さい。砂粒子の変位量は矢板下端より上方へ 5 cm 地点で約 0.22~0.30 cm (下流側) である。

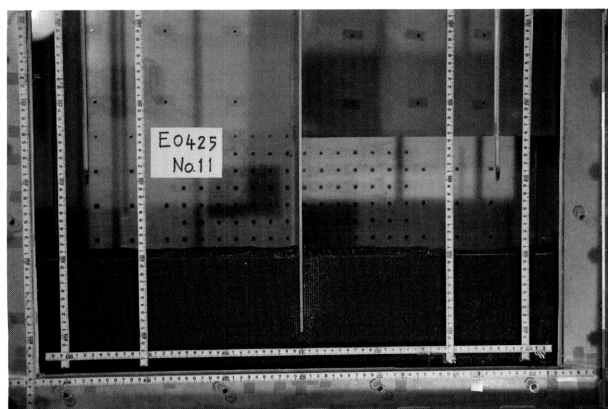
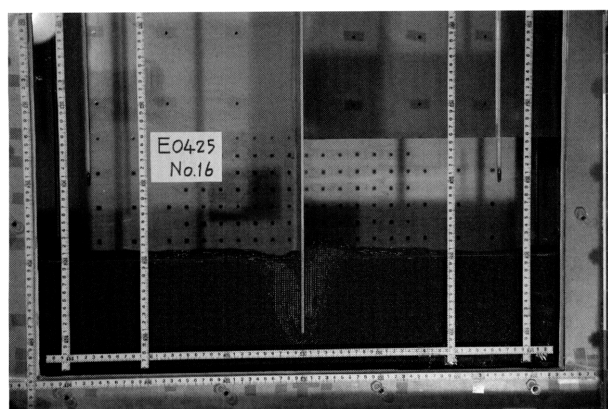
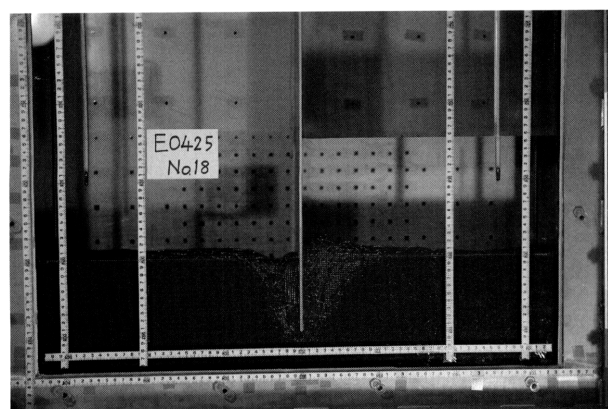
水頭差 H が H_y を超えて大きくなっていくと、地盤形状の変化 (上流側沈下及び下流側隆起) が進行していく。地盤変形が進むと、図—9 (b) に示すように、砂粒子の移動領域は下流側よりも上流側の方が大きいこと、矢板下端より上方へ 5 cm 地点で幅約 3.8 cm (上流側), 2.9 cm (下流側) の範囲の砂が下降及び上昇移動を起こしていることが分かる。砂粒子の変位量は矢板下端より上方へ 5 cm 地点で約 0.34~0.53 cm である。

また、図—9 (c) に示すように、破壊近くになると、砂粒子の移動領域は上下流ではほぼ同じ大きさとなり、矢板下端より上方へ 5 cm 地点で幅約 4.9 cm の範囲となっている。また、砂粒子の変位量は矢板下端より上方へ 5 cm 地点で約 0.31~0.80 cm である。

このように、砂の移動範囲は、変形開始時には $D/2$ より少し小さいが、地盤変形の進行とともに大きくなり、また上方へ行くにしたがって広がっていくことが分かる。

4. おわりに

実験地盤の砂粒子の挙動を明らかにするために、改良

(a) $H = 26.727$ cm (変形開始時水頭差)(b) $H = 29.047$ cm (地盤変形がある程度進んだ状態)(c) $H = 29.994$ cm (破壊の2段階前)

図—9 地盤変形後のPIV解析結果

した実験装置を用いて、小型二次元浸透破壊実験を行い、PIV解析を実施した。そして、地盤が破壊するまでの砂粒子の挙動の把握と考察を行った。そして、次のような結論を得た。

(1) H が H_y ($\approx H_d$) よりも小さな値のときに、矢板下端下流側付近において、砂粒子の移動が観察される。この時点では、地盤表面における上流側沈下や下流側隆起が観測されない。ここに、 H_d 及び H_y は流量急増時水頭差及び変形開始時水頭差である。

(2) 矢板下端下流側付近における砂粒子の移動領域は、Kochina や河野・久保田が定義した γ_{net} が負になる領域とよく一致していることから、この現象は $\gamma_{\text{net}} < 0$ 領域

の発生と関係があると考えられる。

(3) 下流側地盤表面に変形が現れるより前に、矢板下端下流側付近で土粒子の移動現象が生じる。実験 E0421～E0425 について、 $H_{\text{piv}} = \alpha H_y$ として α の値を求めると、 $\alpha = 0.73 \sim 0.99$ となる。ここに、 H_{piv} は矢板下端下流側付近において砂粒子の塊としての移動が起こり始めるときの水頭差である。

(4) 中密度の細砂を用いた実験では、水頭差が H_y よりも小さな値の時に、矢板下端下流側付近で土粒子の移動が生じることが分かる。したがって、矢板下端付近の土粒子の移動を起こさないためには、施工時における水頭差の限界値（施工限界水頭差）を H_y よりも小さな値に設定しなければならない。

(5) 矢板下端付近の地盤を締め固める（又は、矢板下端付近の地盤の透水係数を小さくする）ことによって、締切り矢板地盤の浸透破壊に対する安定性を高められる可能性がある。

(6) 水頭差 H が H_y を超えて大きくなっていくと、地盤形状の変化（上流側地盤の沈下及び下流側地盤の隆起）が進行していくが、砂粒子の移動領域は下流側よりも上流側の方が大きいこと、矢板中央深さあたりでは幅約 3.8 cm（上流側）、2.9 cm（下流側）の範囲の砂が下降及び上昇移動を生じている。また、破壊初期には、砂粒子の移動領域は上下流ではほぼ同じ大きさであり、矢板中央深さあたりで幅約 4.9 cm の範囲となっている。

(7) 砂の移動範囲は、変形開始時には $D/2$ より少し小さいが、地盤変形の進行とともに大きくなり、また上方へ行くにしたがって広がっていく。

参 考 文 献

- 1) 参鍋漱祐・田中 勉・館村 立・井上一哉：小型二次元地盤の浸透破壊実験—破壊メカニズムの解明に向けて—，平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp. 794～795, 2014.
- 2) Tanaka, T., Verruijt, A. and Hayashi, K.: Seepage failure experiments on sand behind sheet piles, Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (IS-Tokyo '99), pp. 717～722, 1999.
- 3) 田中 勉：上昇浸透流を受ける矢板背後地盤の浸透破壊—Prismatic failure の概念と解析結果—，農業土木学会論文集，No. 186, pp. 969～979 (Vol. 64, No. 6, pp. 77～87), 1996.
- 4) Polubarinova-Kochina, P. Ya.: Theory of Groundwater Movement, Translated from the Russian by J.M.R. de Wiest, Princeton University Press, Princeton, pp. 85～88, 1962.
- 5) 松尾新一郎・河野伊一郎・久保田英之：矢板等の下をまわる浸透流と地盤の安定に関する考察，第6回土質工学研究発表会昭和46年度発表会講演集，pp. 487～490, 1971.
- 6) 田中 勉・廣瀬哲夫：我が国における地盤の浸透破壊に対する基準と検討手法—安全施工限界水頭差の提案—，神戸大学自然科学研究紀要，23-B, pp. 41～50, 2005.
- 7) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp. 257～261, 1943.

(原稿受理 2015.8.31)