

二次元集中流実験地盤の浸透破壊における PIV 解析

PIV Analyses on Seepage Failure of Soil in Two Dimensionally Concentrated Flow Condition

石 渡 洋 子 (いしわた ようこ)

(株)NTT データ

田 中 勉 (たなか つとむ)

神戸大学大学院教授 農学研究科

廣 瀬 哲 夫 (ひろせ てつお)

元 神戸大学大学院自然科学研究科後期課程

1. 序 論

地下水位の高い地点における地盤の掘削では浸透破壊が問題となる。浸透破壊現象の解明が緊急の課題となっている。さて、現行の設計指針や設計要領における地盤の浸透破壊現象の評価は、Terzaghi の方法等に基づいて行われている¹⁾。しかしながら、水みちのような水理学的弱点を考慮したものではないため、実現象との乖離が指摘されており、浸透破壊現象に関する地盤挙動特性をより多面的に捉え、浸透破壊の評価につなげることの重要性が高まっている。本研究では、二次元集中流地盤における浸透破壊実験を実施し、PIV (Particle Image Velocimetry) 解析を行った。本研究は、PIV 解析を用いて、浸透破壊現象における、地盤構成砂粒子の挙動特性や地盤の破壊形態について明らかにすることを目的とする。

2. 二次元集中流地盤の浸透破壊実験

暗渠を用いた水路など、幅に比べて長さ方向に長い構造物を構築するとき、複列矢板で締切り、内部の地盤を掘削することが行われる。このような工事が、地下水位の高い地点で行われるとき、複列矢板内の地盤は、両側から二次元的に浸透流が集中して流入する状態となり、浸透破壊に対して安全率が著しく低下することが知られている²⁾。この状態を、いわゆる典型的な単列矢板前後の「二次元流」と区別するため「二次元集中流」と呼ぶことにする。

著者らは、二次元集中流の問題、すなわち、複列矢板内の地盤が浸透流の集中によって浸透破壊に対する安定性が低下する現象について明らかにするために一連の浸透破壊実験を行った。ここでは、とくに、PIV 解析の結果を用いて、地盤が破壊に至るまでの過程（地盤状況の変化）を明らかにすることを目的とする。

2.1 実験装置、試料および方法

実験水槽本体は、図-1 に示すように、幅2000 mm、高さ1300 mm、奥行き400 mm のステンレス製水槽からなる。複列矢板は、水槽本体中央に幅400 mm、下端が水槽底面からの高さ200 mm の位置に取り付けられている。背後には間隙水圧測定用のピエゾメーター孔が440個ついている。前面はガラス張りになっており、地

盤の形状変化および砂粒子の挙動が観察できる。図中の T および D は下流側における地盤層厚および矢板の根入れ深さ、 d は掘削深さである。実験水槽本体両側に補助水槽を取り付けることにより、下部から上流側の水を供給することができる。

実験試料には琵琶湖砂3を用いた。実験試料の物理的性質を表-1に、粒径加積曲線を図-2に示す。表-1および図-2から、実験試料は均一な細砂といえる。

あらかじめ飽和させた試料砂を実験水槽本体にいくつかの層に分けて水中落下させて注入し、相対密度 D_r が約50%になるように、各層において締固め棒を所定の回数だけ自由落下させて締固めることによって地盤を作製した。上下流に段階的に水頭差 H をかけてゆき、各段階において、PIV 解析用の写真撮影、地盤表面形状・間隙水圧・流量・水温の測定を行った。ここでは、地盤の層厚や掘削の有無などの地盤条件を変えた25ケースの実験 E0201～E0225を実施した。PIV 解析を行ったのは実験 E0212～E0225の14ケースである。こ

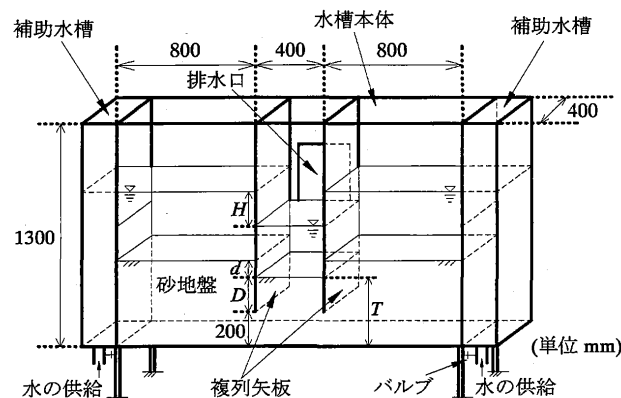


図-1 二次元集中流地盤の浸透破壊実験装置

表-1 実験試料の物理的性質

	琵琶湖砂3
比重 G_s	2.668
平均粒径 D_{50} (mm)	0.283
均等係数 U_c	1.404
最大間隙比 e_{max}	1.115
最小間隙比 e_{min}	0.761
透水係数 k_{15}^* (10^{-4} m/s)	7.263

* 15℃時の透水係数

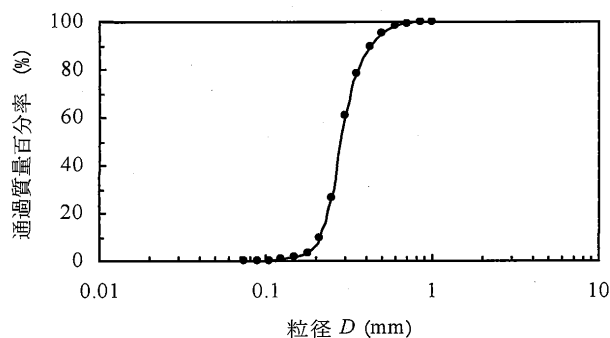
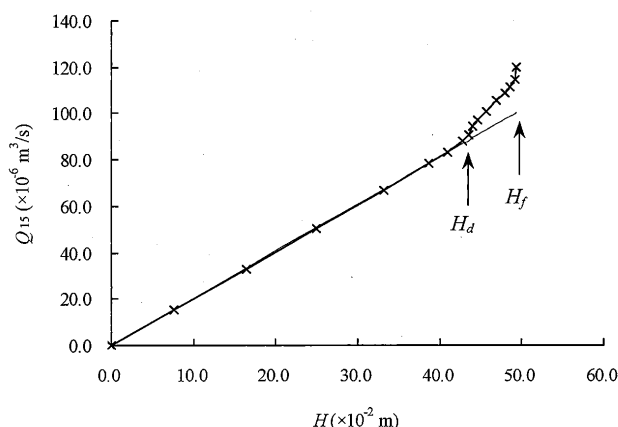


図-2 実験試料の粒径加積曲線

図-3 $H \sim Q_{15}$ 曲線 (E0224)

ここでは、一例として、実験 E0224（掘削なし、 $T=45$ cm、 $D=25$ cm、 $d=0$ cm）について考察する。

3. $H \sim Q_{15}$ 曲線と流量急増時水頭差 H_d

図-3 に、実験 E0224 について、各水頭差段階における水頭差 H と 15°C 時の値に換算した流量 Q_{15} の関係を示す。 Q_{15} は、 H の増加に伴い直線的に増加するが、 $H=H_d$ で流量が急増し直線が折れ曲がる。ちょうどこのあたりで、地盤は、矢板前後で下流側隆起および上流側沈下が生じる³⁾。 H_d を流量急増時水頭差と呼ぶ。地盤表面の形状変化が始まる時点の水頭差 H_y を変形開始時水頭差と呼ぶが、 $H_d=H_y$ の関係がある³⁾。流量急増現象は地盤形状の変化と同時に起こると考えてよい。また、流量急増現象は、上下流地盤の沈下と隆起による表面形状（境界条件）の変化、および、下流側地盤の弛みによる透水係数の増加によると考えられる。地盤は、 H の増加につれて、次第に変形量が大きくなってゆき、破壊時水頭差 H_f に達して全体的に破壊する。実験 E0224 について、流量急増時水頭差 H_d 、変形開始時水頭差 H_y 、および、破壊時水頭差 H_f は、それぞれ、 $H_d=43.20$ cm、 $H_y=43.15$ cm、 $H_f=49.56$ cm であった。

4. PIV 解析を用いた砂粒子の移動現象と地盤変形の把握

PIV とは、流れの可視化技術にデジタル画像処理技術を加え、流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する方法である⁴⁾。画像から情報を抽出する際には、輝度の二

次元分布が用いられる。本研究の場合、対象となる画像は浸透破壊現象における砂粒子の流れの濃度むらパターンのある画像である。また、実験ではトレーサ粒子を混入しておらず、実験地盤中の砂粒子そのものの移動が捉えられる。

ここでは、実験 E0224 について、水頭差が増加してゆくときの各水頭差段階における地盤内砂粒子の移動ベクトルについて考える。口絵写真-6(a), (b), (c), (d) に、変形開始時水頭差前後、水頭差 H がさらに大きくなったとき ($H_y < H < H_f$)、および、破壊時における地盤内砂粒子の移動ベクトルを示す。図中の砂粒子の移動ベクトルは、移動量が小さいもの（茶）から大きいもの（黄）へとグラデーションされている（0 mm が茶色で 2 mm 以上が黄色になるように順に変化するよう示されている）。

4.1 下流側地盤における砂粒子の移動現象

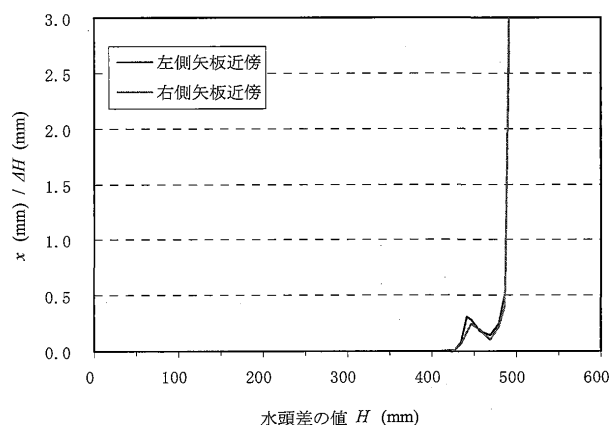
水頭差が 0.0 から変形開始時水頭差までの段階では（口絵写真-6(a)参照）、地盤全体に砂粒子の大きな移動は確認できない。変形開始時水頭差を超えると（口絵写真-6(b)参照）、右側矢板の下流側壁面に沿って、矢板下端から地盤表面にかけて砂粒子の上方移動が確認できる。砂粒子の塊としての移動部分の大きさは、深さ D 、幅 $D/2$ のプリズム（Terzaghi の破壊土塊⁵⁾と同じ）と考えることができる。複列矢板内地盤の砂粒子には、矢板壁近傍では鉛直上方向への移動、矢板壁から離れた部分では複列矢板中央へ向かう斜め上方への移動が認められる。水頭差が破壊時水頭差に近づいてゆくに連れて（口絵写真-6(c), (d)参照）、下流側において砂粒子が移動する領域が地盤中央まで広がり、砂粒子の大きな移動が観察される。

4.2 上流側地盤における砂粒子の移動現象

変形開始以降、上流側では、矢板からおおよそ $D/2$ の範囲で地盤表面から矢板下端に向かう範囲に砂粒子の 0.2~1.0 mm 程度の移動が確認できる。ここに、 D は矢板の上流側根入れ深さである。水頭差が増加すると、矢板近傍の限られた範囲で砂粒子の 1.0~2.0 mm の移動が顕著となる。詳しく見ると、上流側では、矢板からおおよそ $D/2$ のあたりから矢板に向かって下がってゆくような斜面が形成され、この斜面を転がり落ちてきた砂粒子は、矢板近傍に吸い込まれるように流れ込んでゆく。上流側地盤における砂粒子の 2.0 mm 以上の大きな移動は、矢板近傍の幅約 5 cm の範囲に限られ（口絵写真-6(c)参照）、この範囲はさらに水頭差が増加したときも変わらない。これは、矢板上流壁に沿った浸透水の集中と砂粒子の移動層の形成によるものと考えられる。

前節 4.1 および 4.2 から、中密度の地盤における浸透破壊現象について、地盤形状の変化は、変形開始時水頭差までは ($H < H_y$)、土粒子の移動はほとんどなく地盤変形も小さいので弾性挙動と考えてもよいが、変形開始時水頭差以降は ($H > H_y$)、塑性挙動というよりも砂粒子の移動による形状変化と考えた方がよい。この現象は、Selfstabilizing effect と言い換えることができる⁶⁾。

報 告



図—4 水頭差の増加に伴う砂粒子の基準化された平均移動量 (実験 E0224, 下流側地盤)

4.3 水頭差の増加に伴う砂粒子移動量の変化

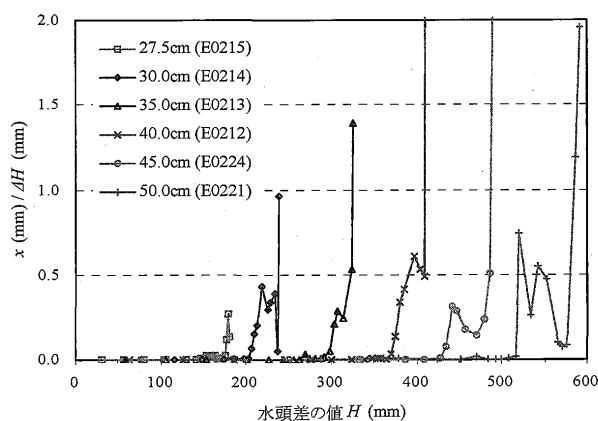
水頭差の増加に伴う砂粒子移動量の変化について考える。水頭差の増加に伴う砂粒子移動量の変化を実験 E0224 について図—4 に示す。図—4 では、下流側地盤で左側と右側の矢板近傍における砂粒子移動量の変化を同時に示す。

実験 E0224 について、水頭差が増加してゆくと、まず下流側地盤の右側矢板近傍で砂粒子の移動が始まった。その後、下流側地盤の左側矢板近傍でも砂粒子の移動が生じ地盤形状の変化が進んでいった。地盤は最終的に右の矢板側で破壊した。

砂粒子の移動量 x (mm) は、矢板に接する深さ D 、幅 $D/2$ の範囲における、次段階の水頭差に増加したときの砂粒子移動量の平均値をとったものであり、各段階での水頭差の増分 ΔH (mm) で除することにより基準化している。砂粒子の移動量は単調的には増加せず、増減を繰り返しながら破壊に至ることがわかる。これは、砂粒子が塊として大きく移動すると同時に地盤が大きく変形し (増)、その後土粒子の移動量が減少したり (減)、下流側地盤が上向きの浸透力に耐え切れなくなって再び砂粒子の大きな動きが現れたりする (増) ためではないかと考えられる。

4.4 地盤層厚の違いが砂粒子の挙動特性に与える影響

異なる地盤層厚に関する実験について考察を行った。図—5 に、掘削のない地盤について、層厚が、27.5 cm (E0215)、30.0 cm (E0214)、35.0 cm (E0213)、40.0 cm (E0212)、45.0 cm (E0224)、50.0 cm (E0221) の場合、水頭差の増加に伴う砂粒子の移動量の変化 x (mm) / ΔH (mm) をその時点の水頭差 H (mm) に対して示す (図—4 と同様の表示法)。図—5 では、各実験について最終的に破壊が生じた側の下流側矢板近傍地盤のデータを示している。図—5 から、地盤層厚が大きいほど、立ち上がり部分が右側へ移動し (立ち上がりの水頭差が大きくなり)、立ち上がり部分の x (mm) / ΔH (mm) の値が大きくなる傾向があることがわかる。すなわち、地盤層厚が大きいほど砂粒子の移動量が大きいことがわかる。これは矢板の根入れ深さが大きいほど変形開始時に地盤



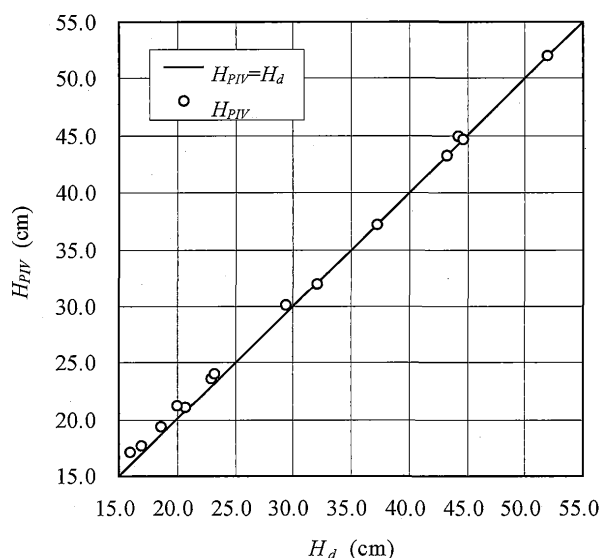
図—5 水頭差の増加に伴う砂粒子の基準化された平均移動量

にかかる水頭差が大きく、浸透力が大きくなるためだと考えられる。また、砂粒子の移動は地盤層厚が大きいとき複列矢板中央よりも広い範囲に及び、下流側地盤において持ち上げられた砂粒子は両側から作用する浸透力によってより大きな影響を受けているものと考えられる。

5. 流量急増時水頭差 $H_d (=H_y)$ と地盤構成材料の移動開始時水頭差 H_{PIV} の関係

地盤内に浸透流が生じると、比較的小さい水頭差段階においても、砂粒子の微小な移動 (細土粒子の転動現象を含む) が観察される。これまでの一連の実験においては、2 mm 程度 (試料砂の最大粒径 0.85 mm の約 2.4 倍) の表面変位が生じたときに地盤が変形したとするのが妥当であると判断した⁷⁾。PIV 解析においても 2 mm を目安として、この値に近い変位が地盤内で塊として現れたときに地盤が全体として変形を開始したと判断することにした⁸⁾。PIV 解析においては、実際に存在しないベクトル (誤ベクトル) や欠測が生じる⁸⁾。誤ベクトルは後処理によって取り除くことができるものもあるが、ここでは後処理を行わず修正なしのデータを掲載している。したがって、突如、1ヶ所から数ヶ所において塊としてではなくバラバラに現れた大きな移動ベクトルは、誤ベクトルであり、砂粒子の移動とは直接関係ないと判断する。塊として生じるというのは、「ある部分に、2 mm 程度の大きさの移動ベクトルがある規則性 (例えば、ベクトルがある一定の方向を向いている状態) を持って生じるという」ことを表している。したがって、ここでは、PIV 解析によって、2 mm を目安として、この値に近い変位が地盤内で塊として現れたときの水頭差を H_{PIV} とした⁸⁾。

流量急増時水頭差 $H_d (=H_y)$ と PIV 解析によって求まる砂粒子移動開始時水頭差 H_{PIV} の関係を図—6 に示す。図—6 から、おおそ $H_{PIV} = H_d$ の関係が成り立つこと、 H_d が小さいときに $H_{PIV} > H_d$ の関係が見受けられることがわかる。これは、矢板の根入れ深さが小さいとき、地盤形状の変化がまず二次元集中流地盤の奥行き方向中央部付近で局所的に起こり手前のガラス面で遅れたことによると考えられる。

図—6 H_d と H_{PIV} の関係

6. 結 論

条件を変えた25種類の二次元集中流地盤の浸透破壊実験を行い、PIV解析を用いて水頭差の増加に伴う砂粒子の移動特性について考察し次の結論を得た。

- (1) PIV解析を用いると砂粒子の挙動を把握することができる。
- (2) 地盤の変形開始直後、下流側地盤では、矢板の下流側根入れ深さ D 、幅 $D/2$ の範囲において砂粒子の移動が起こる。Terzaghiの破壊土塊の考え方は妥当である。
- (3) 変形開始時水頭差以降、上流側地盤における砂粒子の鉛直下方への移動は、矢板壁近傍の狭い範囲に限られる。本実験の場合、矢板近傍の幅約5 cmの範囲であった。
- (4) 水頭差 H の増加に伴う砂粒子の移動量は、地盤が変形を開始すると急激に増加し、増減を繰り返しながら地盤全体の破壊に至る。
- (5) 地盤層厚が大きくなると、下流側地盤において持ち上げられた砂粒子は両側から作用する浸透力によってより大きな影響を受ける。

(6) 中密度の地盤における浸透破壊現象について、地盤形状の変化は、変形開始時水頭差までは($H < H_y$)、土粒子の移動はほとんどなく地盤変形も小さいので弾性変形と考えてもよいが、変形開始時水頭差以降は($H > H_y$)、塑性変形というよりも砂粒子の移動による形状変化と考えた方がよい。また、この現象は、Selfstabilizing effect と言い換えることができる。

(7) 流量急増時水頭差 $H_d (= H_y)$ とPIV解析によって求まる砂粒子移動開始時水頭差 H_{PIV} の間には、おおよそ $H_{PIV} = H_d$ の関係が成り立つ。 H_d が小さいときに $H_{PIV} > H_d$ の関係が見受けられる。これは、矢板の根入れ深さが小さいとき、地盤形状の変化がまず二次元集中流地盤の奥行き方向中央部付近で局所的に起こり手前のガラス面で遅れたことによる。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会編：道路土工—仮設構造物工指針，日本道路協会，pp. 76～82, 1999.
- 2) 田中 勉・堀 宏昌：複列締切り矢板内掘削地盤の浸透破壊に対する安定解析，土と基礎，Vol. 56, No. 4, pp. 26～29, 2008.
- 3) 田中 勉・Pham Thi Hanh Tran・石渡洋子・大西慶一・井上一哉：二次元集中流地盤の浸透破壊—実験と解析—，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1073～1074, 2008.
- 4) 可視化情報学会編：PIVハンドブック，森北出版，1-2, pp. 106～115, 2002.
- 5) Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1st ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 502～503, pp. 510～512.
- 6) Tsutomu Tanaka and Ken-ichi Sakane: Self-stabilizing effect in seepage failure of soil in an axisymmetric condition, *Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 833～836, 2003.
- 7) 田中 勉・廣瀬哲夫・井上一哉・永井 茂 (2005)：締切り矢板内地盤の浸透破壊に対する性能設計の考え方，農業土木学会論文集，pp. 73, No. 6, pp. 107～116.
- 8) 廣瀬哲夫・内田一徳・田中 勉・ファン ティハン チャン・石渡洋子：PIVを用いた地盤の浸透破壊挙動の把握，農業土木学会論文集，第75巻，第5号，pp. 515～527, 2007.

(原稿受理 2009.5.21)