

機関番号：14501

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19380136

研究課題名 (和文) 地盤浸透破壊のメカニズム解明と総合評価

研究課題名 (英文) Study on Seepage failure mechanism of soil and estimation of critical hydraulic head differences under various flow conditions

研究代表者

田中 勉 (TANAKA TSUTOMU)

神戸大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号：20144602

研究成果の概要(和文):地盤の浸透破壊現象は、流れの条件(一次元, 二次元, 二次元集中, 軸対称集中, 二次元放射, 及び, 軸対称放射流)によって大きく影響されることを明らかにした。ここでは、まず、これら流れ条件における地盤浸透破壊の総合評価を行った。そして、二次元集中流地盤の浸透破壊問題について、3事例のケーススタディーと問題提起を行い、25ケースの実験から浸透破壊メカニズムの解明とPIV解析による浸透破壊現象の把握を行った。

研究成果の概要(英文): It was clarified that the effects of flow conditions, such as 1D, 2D, 2DC, AXSC, 2DR and AXSR flows, on seepage failure phenomena of soil are very large. In this study, the critical hydraulic head differences  $H_c$  under various flow conditions were first calculated and summarized. Seepage failure of soil under the 2DC flow condition was next considered from (1) three case studies and (2) 25 experiments. Problem issues were presented by the case studies, and seepage failure mechanism was clarified by the experiments using PIV analyses.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	10,700,000	3,210,000	13,910,000

研究分野：水利施設工学・地盤工学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード:地盤工学, 浸透破壊, 締切り矢板, 流れの条件, 限界水頭差, 変形開始時水頭差, 破壊時水頭差, PIV解析

## 1. 研究開始当初の背景

アースダムや堤防などの破壊事故は約40%が浸透流あるいはそれに起因した現象に端を発している。その中でも土粒子の移動すなわちパイピングによる破壊は現象が複雑でありいまだそのメカニズムが不明な点が多い。また、締切り矢板前面の地盤においては全体的な浸透破壊が問題となる。そこで

は、全体的な破壊現象とパイピングによる破壊現象が複雑に絡み合って発生する。パイピングによる破壊現象や全体的な破壊現象による浸透破壊を防止するためには、その発生機構を明らかにする必要がある。

研究代表者らのこれまでの一連の研究から、地盤の浸透破壊現象は、流れの条件(一次元, 二次元, 二次元集中, 軸対称集中, 二次元放

射、及び、軸対称放射流)によって大きく影響されることがわかってきた。そして、すでに、一次元、二次元、及び、軸対称浸透破壊について、実験的・理論的研究及び事例研究から、浸透破壊特性を明らかにしてきた。したがって、この時点で、地盤浸透破壊の総合評価と二次元集中流地盤の浸透破壊問題の解明が残されていた。

## 2. 研究の目的

ここでは、地盤浸透破壊問題について、各種流れ条件を考慮した総合評価を行い、二次元集中流地盤の浸透破壊問題に関して、事例解析及び大型浸透破壊実験を行う。そして、次の項目について考察を行い、地盤浸透破壊理論の構築を図る。

- (1) 各種流れ条件における地盤浸透破壊の総合評価
- (2) 二次元集中流浸透破壊問題における次の2点に関する考察
  - ① 事例解析
  - ② 大型二次元集中流浸透破壊実験

## 3. 研究の方法

浸透破壊問題について、下記の項目に関して、理論的、数値解析的、及び、実験的に研究を進める。

- (1) 地盤浸透破壊の総合評価 新たに開発した FEM 浸透流解析・安定解析プログラムを用いて、種々の境界条件の地盤について、限界水頭差を求め、各種流れ条件における地盤浸透破壊について総合評価を行う。
- (2) 二次元集中流地盤の浸透破壊 二次元集中流浸透破壊問題について、次の2点から考察を行う。
  - ① 事例解析 3つの事例についてケーススタディーを行い、解析結果に基づいて、原因の究明と問題点の提起を行う。
  - ② 大型二次元集中流浸透破壊実験 条件を変えた二次元集中流地盤について浸透破壊実験を行い、浸透破壊メカニズムの解明、浸透破壊特性の解明と PIV 解析を用いた地盤浸透破壊現象の把握を行う。

## 4. 研究成果

一連の理論的・実験的研究及び事例研究から、地盤浸透破壊について、問題点の提起、破壊特性の解明、理論構築を行った。得られた成果について、要点を示すと次のようになる。

### (1) 地盤浸透破壊に関する総合評価

研究代表者らは、これまでの一連の研究から、地盤の浸透破壊現象が、流れの条件(一次元、二次元、二次元集中、軸対称集中、二次元放射、及び、軸対称放射流)によって大きく影響されることを明らかにした。ここでは、これら流れの条件が地盤の浸透破壊に対す

る限界水頭差 $H_c$ にどのように影響するののかについて詳細に考察した。地盤層厚 $T$ 、矢板の根入れ深さ $D$ 、複列矢板の半幅 $B$ 、軸対称地盤における円筒壁半径 $R$ としたとき、全ての流れ条件について、例えば、 $B=R=10m$  のとき、 $D/T$ と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係はFig.1となる。

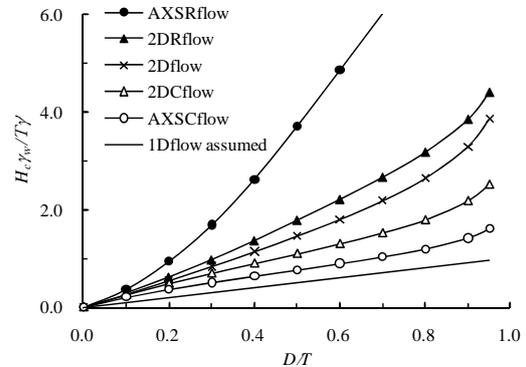


Fig.1  $D/T$ と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係 ( $B=R=10m$ )

Fig.1 から次の事柄が明らかとなった。

- (i)  $H_c\gamma_w/T\gamma'$ は同一の $D/T$ に対して、(1Dflow assumed) < (AXSCflow) < (2DCflow) < (2Dflow) < (2DRflow) < (AXSRflow)となる。
  - (ii) 二次元集中流を二次元流と仮定したり、軸対称集中流を二次元集中流または二次元流と仮定したりすることは、 $H_c$ を過大評価することになり $H_c$ の点から見て不合理である。
  - (iii) 二次元放射流を二次元流と仮定したり、軸対称放射流を二次元放射流または二次元流と仮定したりすることは、 $H_c$ を過小評価することになり $H_c$ の点から見て不経済となる。
- (2) 二次元集中流地盤の浸透破壊

### ① 事例解析

実際に二次元集中流が原因となって起こった3つの浸透破壊事例「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」、「Braced Cofferdam におけるパイピング発生事例の解析」、「柵渠型排水路底面における浸透破壊—事例報告と解析—」について考察を行い、解析結果を用いて問題点を明らかにした。得られた結論について主なものを抜粋して示すと次のようになる。

(i) 「複列矢板内の二次元集中流状態」を「単列矢板背後の二次元流状態」と仮定することは浸透破壊に対して危険である。

(ii) 矢板の根入れ深さ $D$ に対して掘削半幅 $B$ が小さい場合には、地盤の浸透破壊に対する安全率が大きく低下し、掘削地盤中の上昇浸透流が一次的になり、限界時に地盤全体が限界状態(クイックな状態)となり支持力が著しく低下することがあるのでそれに対する対策等注意が必要である。

(iii) 柵渠型排水路底面における浸透破壊問題に関して、浸透破壊に対する防止対策として、3つの工法、すなわち、「パネルの根入れ



また、PIV解析を用いて地盤内砂粒子の挙動解析を行い「PIV解析とそれによる地盤の浸透破壊現象の把握」を行った。Fig.5に、地盤構成砂粒子の移動ベクトルを、実験 E0224 に関して、(a) 変形開始時水頭差直前、(b) 変形開始時水頭差直後、(c) 破壊時水頭差直前の場合について示す。矢板締切り地盤の浸透破壊現象において、PIV解析を用いて、上流側及び下流側地盤砂粒子の移動現象を明らかにした。そして、次のような事柄が明らかとなった。

(1) 下流側の矢板近傍(矢板の根入れ深さ  $D$ ) $\times$ (幅  $D/2$ ) の範囲において、水頭差の増加に伴う砂粒子の平均移動量の変化、及び、同範囲内での砂粒子の最大移動量を考察することにより、土粒子が大きく移動し始める時の水頭差、すなわち、砂粒子移動開始時水頭差  $H_{PIV}$  の算定基準を考案した。また、砂粒子移動開始時水頭差  $H_{PIV}$ 、流量急増時水頭差  $H_d$ 、及び、変形開始時水頭差  $H_y$  が全実験条件に対してすべておおむね等しいことがわかった。このことは、変形が開始したと同時に、流量が急増し、地盤表面高が変化し、土粒子が移動したということの意味している。

(2) 下流側地盤では、変形開始時水頭差直後、地盤掘削の有無に関係なく、矢板下端から地盤表面にかけて砂粒子の斜め上方への移動が確認できた。砂粒子の移動が生じた範囲は、おおよそ変形側の矢板根入れ深さ  $D$  に対して幅  $D/2$  の土塊形状をなし、Terzaghi の方法及び Prismatic failure の考え方に対応している。

(3) さらに水頭差が増加すると、下流側地盤において、矢板壁近傍では鉛直上方向への砂粒子の移動が顕著になり、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。

(4) 上流側では、変形開始時水頭差直後、砂粒子の移動範囲は(上流側矢板根入れ深さ  $T+d$ ) $\times$ (幅  $(T+d)/2$ )であった。水頭差が増加すると、砂粒子の鉛直下方への移動は矢板壁近傍の狭い範囲(幅約 5cm)に限られ、この範囲は破壊に至るまで変わらない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① Tsutomu TANAKA, Kazuki HASHIMOTO and Kazuya INOUE, Theory and Experimental Findings of Seepage failure of Soil under Various Flow Conditions, with peer review, Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, in printing, 2011.

- ② 田中 勉, 高嶋 互, ファン ティ ハン チャン, 浦田 憲, 上村 宣博, 柵渠型排水路底面における浸透破壊—ボイリング未発生地点における水路底面の粘質土地盤の安定性—, 査読有, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No. 15, 印刷中, 2011.
- ③ 田中 勉, 高嶋 互, ファン ティ ハン チャン, 浦田 憲, 上村 宣博, 柵渠型排水路底面における浸透破壊—事例解析と防止対策工法—, 査読有, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No. 15, 印刷中, 2011.
- ④ 田中 勉, 土居 央, 井上一哉, 二次元堤体のパイピング破壊に関する実験的研究, 査読有, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol. 14, pp. 203-212, 2010.
- ⑤ 田中 勉, 水利施設構造物の浸透破壊に対する設計の考え方, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No. 14, pp. 241-256, 2010.
- ⑥ 石渡洋子, 田中 勉, 廣瀬哲夫, 二次元集中流実験地盤の浸透破壊におけるPIV解析, 査読有, 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol. 57, No. 9 (Ser.No. 620), 2009, pp. 18-21, 2009.
- ⑦ 田中 勉, 日下知哉, 廣瀬大輔, 流れの条件と地盤の浸透破壊安定性, 査読有, 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol. 57, No. 9 (Ser.No. 620), pp. 14-17, 2009.
- ⑧ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, 河端俊典, 中瀬 仁, 個別要素法を用いた一次元上昇浸透流による粒子間力の低減と粒子移動特性の把握, 査読有, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No. 13, pp. 243-253, 2009.
- ⑨ Tsutomu TANAKA, Tomoya KUSAKA, Shigeru NAGAI and Daisuke HIROSE, Characteristics of Seepage Failure of Soil under Various Flow Conditions, with peer review, Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition 2006 (ISOPE-2009), pp. 90-94, 2009.
- ⑩ 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 (Ser.No. 603), pp. 26-29, 2008.
- ⑪ 田中 勉, 高嶋 互, ファン ティ ハン チャン, 坂井田貴士, 浦田 憲, 井上一哉, 柵渠型排水路底面における浸透破壊—事例報告と現地調査—, 査読有, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No. 12, pp. 231-244, 2008.
- ⑫ T. Hirose, T. Tanaka and T. Yokoyama, Verification of seepage failure

stability of soil at construction stages within a cofferdam, with peer review, Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.1023-1026, 2007.

- ⑬ 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, 査読有, 農業土木学会論文集, Vol.75, No.5, pp.515~527, 2007.
- ⑭ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 鋼矢板土留め壁掘削地盤の浸透破壊に関する事例解析, 査読有, 農業土木学会論文集, Vol.75, No.2, pp.145~156, 2007.

[学会発表] (計23件)

- ① 田中 勉, 芝 優大, 久住慎也, 井上一哉, 三次元地盤の浸透流及び浸透破壊特性, 平成23年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, 印刷中. (2012.09.06.) (福岡県, 博多市)
- ② 田中 勉・清水和臣・柴田宗治・井上一哉, 締切り矢板地盤の浸透破壊に対する限界水頭差の無次元化表示, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 印刷中. (2011.07.05.) (兵庫県, 神戸市)
- ③ 田中 勉, 榛葉美友, 橋本和樹, 井上一哉, 地盤の浸透破壊に対する異方透水性の地盤の浸透破壊に対する異方透水性の影響, 平成22年度農業農村工学会京都支部講演会講演要旨集, pp.2-7 - 2-8. (2011.11.18) (三重県, 津市).
- ④ 田中 勉, 柴田宗治, 橋本和樹, 芝 優大, 井上一哉, 地盤の浸透破壊現象の無次元化表示に関する研究, 平成22年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.374-375. (2010.09.02.) (兵庫県, 神戸市)
- ⑤ 田中 勉, 橋本和樹, 芝 優大, 井上一哉, 三次元地盤に関する浸透破壊実験と解析, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.893-89. (2010.08.19.) (愛媛県, 松山市)
- ⑥ 田中 勉, 土居 央, 橋本和樹, 井上一哉, 二次元堤体のパイピング破壊に関する実験的研究, 農業農村工学会京都支部第66回研究発表会講演要旨集, pp.2-29 ~2-30. (2009.11.05.) (富山県, 富山市)
- ⑦ 廣瀬大輔, 田中 勉, 橋本和樹, 井上一哉, 三次元浸透破壊に関する実験と解析, 平成21年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.606-607. (2009.08.05.) (茨城県, つくば市)
- ⑧ 田中 勉, 岩谷あゆみ, 岩石早季子, 石渡雅子, 鹿島靖朗, 井上一哉, 二次元集中流実験地盤における透水係数の逆解析, 平成21年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.604-605. (2009.08.05.) (茨城県, つくば市)
- ⑨ 石渡洋子, 田中 勉, 廣瀬哲夫, 井上一哉, PIV解析による浸透破壊に伴う土粒子の移動特性及び地盤の破壊形態, 第44回地盤工学研究発表会平成21年度発表講演集, pp.937~938. (2009.07.19.) (神奈川県, 横浜市)
- ⑩ 田中 勉, 廣瀬大輔, 西河宏城, 井上一哉, 流れの条件による地盤の浸透破壊安定性 -理論的・実験的検討-, 第44回地盤工学研究発表会平成21年度発表講演集, pp.939~940. (2009.07.19.) (神奈川県, 横浜市)
- ⑪ 田中 勉, 石渡洋子, 廣瀬大輔, 西河宏城, 井上一哉, 二次元集中流地盤の浸透破壊 -流量急増, 地盤形状変化と土粒子移動の関係-, 農業農村工学会京都支部第65回研究発表会講演要旨集, pp.66-67. (2008.11.06.) (福井県, 福井市)
- ⑫ 石渡洋子, 田中 勉, 廣瀬哲夫, 井上一哉, PIV解析による地盤の浸透破壊現象の把握, 農業農村工学会京都支部第65回研究発表会講演要旨集, pp.64-65. (2008.11.06.) (福井県, 福井市)
- ⑬ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, 河端俊典, 中瀬 仁, 個別要素法を用いた地盤の一次元上昇浸透流による粒子間力と粒子移動特性の把握, 平成20年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.632-633. (2008.08.27.) (秋田県, 秋田市)
- ⑭ 田中 勉, 堀井敬之, 土居 央, 井上一哉, 二次元集中流地盤の異方透水性特性, 平成20年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.598-599. (2008.08.26.) (秋田県, 秋田市)
- ⑮ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, 河端俊典, 中瀬 仁, 個別要素法を用いた一次元上昇浸透流による地盤の浸透破壊に対する限界状態と粒子の移動特性及び力学特性の把握, 第43回地盤工学研究発表会平成20年度発表講演集, pp.1075~1076. (2008.07.11.) (広島県, 広島市)
- ⑯ 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平成20年度発表講演集, pp.1073~1074. (2008.07.11.) (広島県, 広島市)
- ⑰ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, 河端俊典, 中瀬 仁, DEMを用いた一次元上昇浸透流による地盤の限界状態と砂粒子の力学的特性, 農業土木学会京都支部第64回研究発表会講演要旨集, pp.46-47. (2007.11.08.) (和歌山県, 和歌山市)
- ⑱ 田中 勉, 土居 央, 小寺義昭, 井上一

哉, ため池堤体材料の異方透水性, 農業土木学会京都支部第 64 回研究発表会講演要旨集, pp. 44-45. (2007. 11. 08.) (和歌山県, 和歌山市)

- ⑩ 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, 河端俊典, 中瀬 仁, DEMを用いた地盤の一次元上昇流による浸透破壊と砂粒子移動特性の把握, 平成 19 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 906-907. (2007. 08. 29.) (島根県, 松江市)
- ⑪ 田中 勉, ファン ティ ハン チャン, 石渡洋子, 井上一哉, 流れの条件による地盤の浸透破壊安定性と実験的検討, 平成 19 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 904-905. (2007. 08. 29.) (島根県, 松江市)
- 廣瀬哲夫, 田中 勉, 内田一徳, ファン ティ ハン チャン, 石渡洋子, 地盤の浸透破壊に対する損傷限界とPIV解析を用いた砂粒子移動特性, 第 42 回地盤工学研究発表会平成 19 年度発表講演集, pp. 1039 ~ 1040. (2007. 07. 06.) (愛知県, 名古屋市)
- 田中 勉, Pham Thi Hanh Tran, 井上一哉, 高島 瓦, 柵渠水路底面の浸透破壊事例における安定解析と防止対策工法の評価, 第 42 回地盤工学研究発表会平成 19 年度発表講演集, pp. 1037 ~ 1038. (2007. 07. 06.) (愛知県, 名古屋市)

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/ans-hy-steng/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 勉 (TANAKA TSUTOMU)  
神戸大学・大学院農学研究科・教授  
研究者番号: 2 0 1 4 4 6 0 2

### (2) 研究分担者

井上 一哉 (INOUE KAZUYA)  
神戸大学・大学院農学研究科・助教  
研究者番号: 0 0 3 6 2 7 6 5

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: