

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22658073

研究課題名（和文） 粘性係数の異なる二相流における浸透メカニズムと浸透破壊特性

研究課題名（英文） Seepage flow and seepage failure phenomena of soil for two fluids of different temperatures having different viscosities

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）：飽和地盤への異温度流体の流れにおける浸透流及び浸透破壊メカニズムの解明を行う。「冷水飽和地盤中への温水の流れ」では流れやすい大きな土粒子間隙への選択的流れがおこる。このとき、流量は減少するが限界水頭差の変化はないことを明らかにする。また、「温水飽和地盤中への冷水の流れ」では温水地盤中に気泡が発生する。ここでは、メタンガスによるパイピング発生事例への慣用的安定解析法 (Prismatic failure concept) の適用からその原因究明とメタンガスの影響の解明を行う。

研究成果の概要（英文）：The effects of the temperature of water on seepage flow and seepage failure phenomena were discussed. When seepage water with a higher temperature flows through cold saturated soil, it goes selectively through larger pores in the soil. The critical hydraulic gradient i_c with respect to the boiling of soil in a one-dimensional case is almost the same as soil having the same initial void ratio e_0 in spite of the flowing water temperature. When seepage water with a lower temperature flows through warm saturated soil, gases generates in soil. The case study on piping failure due to methane gas generated during the construction of a bridge pier was discussed. The occurrence of methane gas was resulted to be one of the main causes of piping failure in excavated bottom soil.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	0	1,400,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	510,000	3,610,000

研究分野：農学

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，異温度流体，気泡，二相流，粘性係数，浸透流特性，浸透破壊

1. 研究開始当初の背景

室内透水試験について考える。変水位透水試験は、透水係数が小さな試料に対して行われるため、通常、流量が小さく室内の貯

水槽に貯めた水を流して恒温室の中で実験が行われ浸透水温を室温に近い値に調整することができる。一方、定水位透水試験は、透水係数が大きな試料に対して行われるため、変水位の場合と比べて流量も大きく浸

透水として水道水がよく用いられることから実験中に水温が変化する。また、大型の装置を用いた浸透破壊実験では、多量の水を流す必要があるため、水道水がそのまま用いられることが多い。水道水を用いた場合には、実験の実施時期や方法によっては水温の変動や変化についての配慮が必要である。

2. 研究の目的

水温調節のない部屋で、実験前日に供試体を作製し、水道水を用いて冬期(12月上旬から3月中旬)に透水試験を行う場合、水温は室温(供試体の温度)より高い場合が多く、供試体中を流れる間に浸透水の水温が下降することになり、Henryの法則により、供試体には気泡が生じにくくなる。この場合、水温について浸透水の粘性係数を補正すれば、透水係数として良いデータが得られると考えられている。しかしながら、水温による変化だけでは説明できない特異な現象があることがわかった。ここでは、低水温試料への温水浸入が、浸透流特性及び浸透破壊特性にどのような影響を及ぼすかについて考察を行う。

次に、水温調節のない部屋で、実験前日に供試体を作製し、水道水を用いて夏期(7月上旬から9月中旬)に透水試験を行う場合、水温は室温(供試体の温度)より低い場合が多く、供試体中を流れる間に浸透水の水温が上昇することになり、Henryの法則により、供試体中に気泡が生じやすくなる。また、透水装置の外部に結露を生じ透過性の容器の場合には供試体の状態が観察しにくくなる。ここでは、気泡の発生が、浸透流特性及び浸透破壊特性にどのような影響を及ぼすかについて考察を行う。

3. 研究の方法

研究代表者が所属する研究室のメンテナーである浸透破壊に関して、一連の浸透破壊実験及び事例解析から研究を行った。浸透破壊実験では、各種流れ条件(一次元、二次元、二次元集中流、軸対称、三次元、小型二次元)について浸透破壊実験を行った。事例解析では、研究代表者らが提案する安定解析手法(Prismatic failure concept)を用いて解析を行った。

4. 研究成果

(1) 透水係数と水温の関係

まず、水中に溶存する空気量は、Henryの法則から、水温が高くなるにつれて、また、圧力が低下するにつれて減少することが知られている。したがって、地盤工学会の「土

質試験の方法と解説」では、試験用水として「水道水を直接用いるのではなく、常温での気泡発生を防ぐため一度大きな容器に貯めた後の水を用いる」としている。ここでは、(4)において、掘削地盤で実際に生じたメタンガスによるパイピング発生問題について考察する。

水温による透水係数の補正については、日本では、透水試験を行ったときの浸透水温を T °Cとしたとき、次式を用いて、水温15°C時における透水係数 k_{15} に換算するものとしている。ここに、 k_T は T °C時の透水係数、 μ_T 、 μ_{15} は T °C及び15°C時の水の粘性係数である。

$$k_{15} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{15}} \quad (1)$$

Fig. 1に、水温 T と水の粘性係数 μ 及び水の密度 ρ_w の関係を示す。Fig. 1から、水温によって、水の密度はほとんど変化がないのに対して、水の粘性係数は大きく変化することがわかる。水温による粘性係数の変化に関して透水係数を換算することが記載されている。しかしながら、著者らの実験結果から、供試体の温度と浸透水の温度が大きく異なる場合、供試体中に気泡の発生がない場合にも、水温による粘性係数の変化だけでは説明できない、すなわち、(1)式による補正だけでは説明がつかない特異な現象が見られることがわかった。著者らは、これまで一次元、二次元、二次元集中流、軸対称、三次元及び小型二次元地盤について一連の浸透破壊実験を行ってきたが、実験に水道水を用いる関係上、夏期における気泡の発生、冬期におけるこのような特異な現象を避けるため、春期(3月下旬から6月)及び秋期(9月下旬から11月)に実験実施日を設定している。ここでは、まず、温度条件の悪い冬期に行った一次元透水試験において発生した、(1)式による補正だけでは説明がつかない特異な現象について考察する。

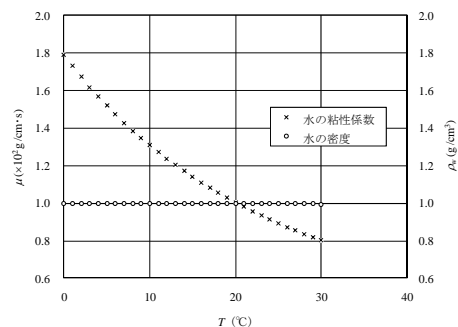


Fig. 1 水温と水の粘性係数及び水の密度

(2) 異温度浸透水と $v_{15} \sim i$ 曲線の関係

温度調整のない実験室において、水道水を用いて、一様流量型の一次元浸透破壊実

験 S0575~585, 589, 592, 593 を温度条件の悪い冬期に行った。これらの実験は、おおよそ 2 時間で終わっているが、前日に作製し一晩放置した供試体に水道水を流して行った。Fig. 2 に実験 S0583~585, 593 について、実験開始からの時刻と水温の関係を示す。Fig. 2 には大型の二次元集中流浸透破壊実験 E0207, E0223 の場合のデータがはいっているが、この場合実験中に水温の変化がほとんどない。これに対して、一次元浸透破壊実験 S0583~585, 593 では、実験中の水温の変化が大変大きいことがわかる。供試体の初期相対密度 D_0 が 50~60% とほぼ同じ 3 つの実験 S0575, 578, 592 について、15°C 時の値に換算した流速 v_{15} と動水勾配 i の関係 ($v_{15} \sim i$ 関係) を示すと Fig. 3 となる。この場合、実験中に 5°C 程度の水温の変化があっても、(1) 式による換算によって、 $v_{15} \sim i$ 関係は、ほぼ同一となり、直線関係 (Darcy 則) が成り立つことがわかる。

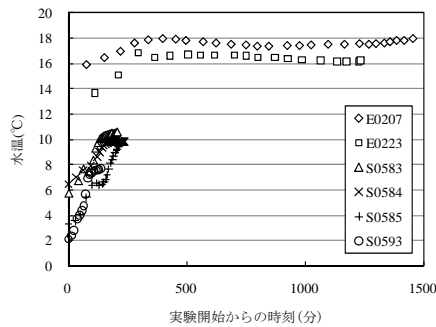


Fig.2 実験開始からの時刻と水温との関係(E0207, 223, 583~585, 593)

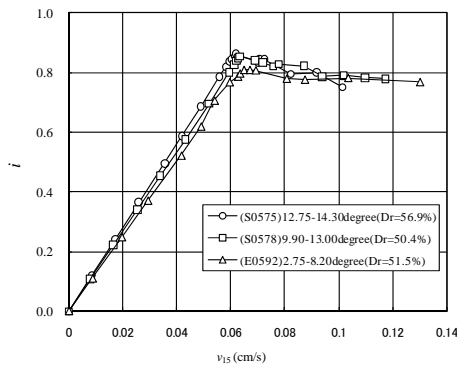


Fig. 3 $v_{15} \sim i$ 曲線 ($D_f=50 \sim 60\%$)

次に、供試体の初期相対密度 D_0 が 20~30% とほぼ同じ 4 つの実験 S0583, 584, 585, 593 について、 $v_{15} \sim i$ 曲線を示すと Fig. 4 となる。Fig. 4 から、実験中に、それぞれ、4.9, 3.4, 5.6°C の水温変化がある実験 S0583, 584, 593 についてはほぼ同じ傾向を示しているものの、実験中に水温に 6.2°C の変化がある実験 S0585 については (1) 式による換算を行っても、 $v_{15} \sim i$ 関係がほかの実験結果と大きくは

ずれていることがわかる。

実験 S0585 では、実験中に水温は 3.35°C から 9.5°C まで 6.15°C 変化している。ここでは、実験条件を単純化して、3.35°C の供試体に 9.5°C の水が流れる問題であると考えられる。実験 S0585 では、 D_0 が同じ他の試料に関する実験 S0583, 584, 593 と比べて同じ i の値に対する流量が著しく小さいことがわかる。これは、不飽和地盤への水の侵入現象 (フィンガリング現象) と同様に、供試体内に冷水塊が生じ水温の高い水道水は流れやすい大きな土粒子間隙を選択的に流れているものと考えられる。供試体とほぼ同じ水温の流体が流れるときよりも少ない間隙経路を流れているために流量が小さくなっているものと考えられる。原因として、「浸透水が小さな間隙を避けて流れていること」、「浸透水の流動する間隙空間が小さくなっていること」などが考えられる。この現象をここでは飽和地盤への異温度流体の注入問題「冷水飽和地盤中への温水の選択的水みちの流れ」と呼ぶことにする。水温の差として 6°C あたりに、このような現象が起こる境界があると考えられる。

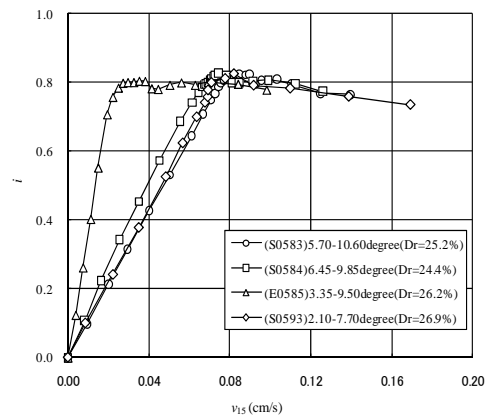


Fig. 4 $v_{15} \sim i$ 曲線 ($D_f=20 \sim 30\%$)

(3) 一次元地盤の浸透破壊に関する終局限界状態

一連の実験から、 $v_{15} \sim i$ 曲線における i の最大値すなわち限界動水勾配 i_c は相対密度が大きいほど大きくなることがわかる。そして、破壊後の v_{15} と i の関係を見ると、Figs. 3, 4 に示されるように、 i が大きくなり i_c を超えると、どの実験結果も一つの曲線にのることがわかる。動水勾配が砂粒子の集まりとしての砂柱の限界動水勾配を超えると、最終的に、砂粒子が個々の粒子としてばらばらとなり、砂粒子群はどの実験においても同じ状態、すなわち、上昇流中に砂粒子が浮かんだ状態になるためだと考えられる。単位体積内の砂粒子についてみると、砂粒子に作用する「水流による上向きの浸透力」と

「重力による下向きの自重」が釣合った状態になっているためであると考えられる。

破壊後の最終的な関係を考察するために、 $e \sim i$ 関係を、実験 S0577, 582, 584, 585 の結果を含めて Fig. 5 に示す。Fig. 5 には、与えられ動水勾配 i とそのときの供試体の間隙比 e の関係が示されている。Fig. 5 から、実験 S0577, 582, 584, 585 も含めて、破壊後の最終的な関係は同一の曲線になることがわかる。これは、透水性は水が流れる間隙の大きさや経路によるが、浸透破壊特性は Terzaghi の限界動水勾配理論により、力の釣合いから決まり、

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

となることからわかる。すなわち、一次元地盤の浸透破壊に関する終局限界状態では、(2)式が成立しているものと考えられる。Fig. 5 には(2)式の関係と同時に示している。地盤の浸透破壊は、間隙中の選択的な水の流れ方、すなわち透水性に関係なく、「砂の水中単位体積重量と上向きの浸透力の釣り合い」すなわち「砂柱の水中重量と上向きの過剰間隙水圧の釣り合い」できまるものであるためである。このように、浸透破壊現象は浸透力と地盤構成砂粒子の力の釣り合いから決まるものであるため、粘性係数の大きく異なる二相流問題における浸透破壊特性には、冷水地盤への温水注入が大きな影響を及ぼさないことがわかる。

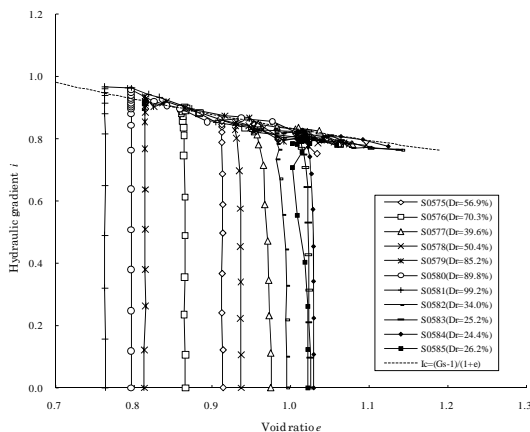


Fig. 5 間隙比 e と動水勾配 i の関係

(4) 橋脚掘削工事におけるメタンガスによるパイピング発生事例と解析

東北地方のメタンガスを多量に含む地下水水位の高い地盤において、橋脚の杭基礎を施工する掘削工事中に起こったメタンガスによるパイピング発生事例について、浸透破壊に対する安定解析と考察を行った。

本事例について、まず、道路協会の方法

を用いて、掘削底面のパイピングに対する安定性を調べたところ、安定であるという結果が得られた。しかし、実際にはパイピング現象が発生し、その原因が土留矢板壁内外の水位差や浸透路長以外にあると考えられた。そして、現地において観察されたメタンガスの噴出が原因の一つと考えられた。

ここでは、本事例について、慣用的な方法の一つである Prismatic failure の考え方を用いて浸透破壊に対する安定解析を行い、空気間隙率(主にメタンガスからなる)と浸透破壊に対する安全率の関係について考察し、本事例における地盤の安定性を、Prismatic failure concept のような簡易な安定解析法を用いて評価することが可能であることがわかった。そして、本事例におけるパイピングの発生は、地盤の掘削に伴う圧力の低下や浸透水温(地下水の水温)の上昇による気泡(メタンガス)の発生によることが一因と考えられた。

(5) まとめ

一次元地盤における浸透破壊実験を行い、実験結果をもとに、異温度流体が飽和砂地盤に流れ込むときの浸透流特性と浸透破壊特性について考察した。本研究により新たに明らかとなった事項は以下の通りである。

- ① 冷水地盤への温かい浸透水の流れは、土粒子間隙内への選択的流れであり、不飽和地盤への水の侵入現象(フィンガリング現象)と同様の現象であると考えられる。
- ② 冷水地盤への温水流れは透水係数が著しく小さくなることがあり、得られる透水係数に大きなばらつきが生じ、データが安定しない。
- ③ 浸透破壊に対する安定性、すなわち、限界水頭差 H_c または限界動水勾配 i_c は、力の釣り合いによって決まる現象であるため、飽和地盤に等温度の水が均等に流れる場合のものと差はない。
- ④ 掘削工事中に起こったメタンガスによるパイピング発生事例について、地盤の安定性を、Prismatic failure concept のような簡易な安定解析法を用いて評価することが可能であることを明らかにした。
- ⑤ パイピングの発生は、地盤の掘削に伴う圧力の低下や浸透水温(地下水の水温)の上昇による気泡(メタンガス)の発生によることが一因と考えられる。

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 8 件)

- ① 田中 勉, 浸透破壊における土の自己防衛機能と防止対策工法, 神戸大学都市安全

研究センター研究報告, No.17, 印刷中, 2013. 査読有り

② 田中 勉, ファン ティ ハン チャン, 橋脚掘削工事におけるメタンガスによるパイピング発生事例と解析, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No.17, 印刷中, 2013. 査読有り

③ Tsutomu Tanaka, Wataru Takashima, Pham Thi Hanh Tran, Ken Urata and Nobuhiro Uemura, A Case Study on Seepage Failure of Bottom Soil within Double-Sheet-Pile Wall-Type Ditch, Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6), pp.1543-1550, Paris, France May 2012.

④ Tsutomu Tanaka, Shuang Song, Yuki Shiba, Shinya Kusumi, and Kazuya Inoue, Seepage Failure of Sand in Three Dimensions -Experiments and Numerical Analyses-, Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6), pp.1535-1542, Paris, France May 2012.

⑤ 田中 勉, 地盤及び土構造物のパイピングによる浸透破壊 -破壊形態の分類と破壊事例の分析-, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No.16, pp.301-326, 2012.

⑥ 田中 勉, 久住慎也, 廣瀬大輔, 三次元地盤の浸透破壊に対する安定解析 -Prismatic failure concept 3Dの開発と実験地盤の解析-, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No.16, pp.285-299, 2012.

⑦ Tsutomu TANAKA, Kazuki HASHIMOTO, Kazuya INOUE, Theory and Experimental Findings of Seepage failure of Soil under Various Flow Conditions. Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 6pages in CD-ROM, May 23-27, 2011. (Hong Kong, China, CD-ROM) (Paper No 236) (file "P269_236_tanaka" in CD-ROM).

⑧ 田中 勉, 浸透流及び浸透破壊現象における水温の影響, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No.15, pp.265-275, 2011.

[学会発表] (計11件)

① 館村 立・田中 勉・久住慎也・井上一哉, 三次元地盤の浸透破壊実験及び解析, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 印刷中. (2013.09.03-05.) (東京、東京都)

② 柴田奈緒・田中 勉・久住慎也・井上一哉, 実験地盤における異方透水性の値および実験地盤と実地盤における異方透水性の効果, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 印刷中. (2013.09.03-05.) (東京、東京都)

③ 田中 勉・宋 爽・李 麗・井上一哉, 小型二次元地盤(1/2 model)の浸透破壊-理論解析と実験-, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集, 印刷中. (2013.07.23-25.) (富山県、富山市)

④ 田中 勉・平尾拓也・柴田奈緒・井上一哉, 三次元浸透破壊実験地盤の異方透水性-逆解析と採取試料透水試験-, 平成 24 年度農業農村工学会 第 69 回京都支部講演会講演要旨 5-05, pp.150-151. (2012.11.21.) (新潟県、新潟市)

⑤ 田中 勉・宋 爽・平尾拓也・井上一哉, 地盤の浸透破壊に対する限界水頭差-基準類算定式に含まれる安全率, 設計安全率及び実質的な安全率の関係-, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.784-785. (2012.09.20.) (北海道、札幌市)

⑥ 田中 勉・長沼 瞳・榛葉美友・久住慎也・井上一哉, 三次元浸透破壊実験地盤の異方透水性の値, 平成 23 年度農業農村工学会第 68 回京都支部講演会講演要旨集, pp.3-5-3-6. (2011.11.17.) (奈良県、奈良市)

⑦ 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 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.388-389. (2011.09.06.) (福岡県、博多市)

⑧ 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, pp.1005-1006. (2011.07.5-7.) (兵庫県、神戸市)

⑨ 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. (2010.11.18.) (三重県、津市)

⑩ 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)

⑪ 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. 893-894. (2010.08.19.) (愛媛県、松山市)

[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: 20144602

(2) 研究分担者

なし