

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420498

研究課題名(和文) 内部浸食による盛土の耐震性能劣化評価法高度化のための土の構造劣化機構の解明

研究課題名(英文) On the impact of deterioration of soils due to seepage-induced internal erosion on seismic performance of existing embankment

研究代表者

高橋 章浩 (Takahashi, Akihiro)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40293047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、内部浸食による盛土の耐震性能劣化を評価するために必要な、浸透による土の劣化機構の解明を目的とした。浸透実験における土の細粒分流失の観察や数値シミュレーションでは、浸透流による盛土内の細粒土の移動プロセスを明らかにした。浸透に伴う細粒土流失や土骨格構造の変化の微視的観察の試みでは、イメージ解析により、流出する細粒土や粗粒土の骨格構造等を定量可能であることを示した。加えて、新たに試作した平面ひずみ浸食・せん断試験装置を用いた試験を通じて、内部浸食により排水条件下における土の剛性・強度は変化すること、これには粗粒土を囲む細粒土の影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Internal erosion has a certain impact on seismic performance of existing embankment. To evaluate conditions of the embankment before earthquake, deterioration process of soil/geotechnical structure due to seepage flow is needed to be understood. In this research, suffusion is focused on among the various modes of the internal erosion. Physical model tests and numerical simulations are conducted to examine the seepage-induced suffusion process in the embankment. Optical quantification of suffusion in plane strain physical model is successfully made using digital microscope. A plane strain erosion apparatus equipped with microscope observation is developed, which allows detailed observation of the deterioration process and investigation of the mechanical consequences of soils subjected to internal erosion.

研究分野：地盤工学

キーワード：内部浸食 盛土 耐震

1. 研究開始当初の背景

2007年の能登半島地震における能登有料道路での谷埋め盛土(特に片盛土)の大規模崩壊のような山間部における谷埋め盛土の地震による大規模な変状は、排水不良等により盛土内の地下水面が高くなっていたことにより液状化に似た現象が盛土内で発生したことが原因であるとされている。また、2011年の東北地方太平洋沖地震においては、宅地盛土も同様の被害を受けている。

能登半島地震による道路盛土被害の調査結果によれば、大規模崩壊が生じた箇所では地下水面が高かったと推定され、地震後に湧水も確認されている。これらより、被災した盛土では地震時に盛土内で液状化が発生する条件が整っていたとも考えられるが、実際には盛土材の液状化強度は大きく、また、緩い砂のように繰返しせん断中に急激にひずみが増加するような現象は室内試験において必ずしも見られず、単純に高地下水面による盛土材の液状化だけでは、盛土の地震時大規模被害を説明できないと考えられる。

一方、同じく斜面を有するダムや自然斜面では、浸透水による内部浸食により、土の細粒分が流失するといった現象が見られる。斜面の安定という観点からすれば、細粒分の流失により土の圧縮性が増すこと等により、液状化強度が低下し、地震時に斜面を不安定にする可能性がある。

谷埋め盛土のような土構造物においても、地山付近の盛土内(盛土下部)において上記のような内部浸食が発生している可能性がある。都市間を結ぶ幹線道路の山間部区間には、谷埋め盛土が多数存在するが、そのような盛土が地震時に大規模変状を呈してしまうと、震災直後の緊急物資の輸送やその後の復旧・復興を遅延させることとなるため、震前の点検・診断・対策が重要となる。しかし、これまでの内部浸食に対する土構造物や自然斜面の安定性に関する研究は、主に水をためる機能を有するダムや堤防では貯水・洪水時、自然斜面では降雨時に発生する浸透流に起因する破壊に関するものがほとんどで、浸透の結果生じた内部浸食が、盛土の地震時安定性に与える影響について検討しているものは見当たらない。

内部浸食による細粒分流失については、ダムや堤防の適切なフィルター材の粒度設定という観点等からの研究は多く行われているが、そのようなフィルター材が設置されておらず、細粒分が流出する(若しくは、流失してしまった)ことによる土の変形・強度特性の変化については、あまり研究例がない。

盛土の地震時大規模変状は、上記のような内部浸食に起因する局所的な土の物性・状態の変化(細粒分流失)等が原因となっていると考えられ、盛土の耐災点検・診断にあたっては、これらの効果についても考慮する(若しくは、その影響度を把握しておく)必要がある。

これらの背景を踏まえて、研究代表者は、これまでに浸透流による土の細粒分の流失による土の強度低下と、これによる地盤構造物全体(盛土を対象)の地震外力に対する抵抗力低下について、土の要素試験や模型実験を通じて示してきている。これまでの研究で明らかとなったのは、マスとしての土の劣化挙動であったが、浸透流による土の劣化は時間とともに進行するため、土の劣化進行予測の高度化には、微視的な観察に基づく考察が不可欠である。

2. 研究の目的

上記のような状況を踏まえて、本研究は、内部浸食による盛土の耐震性能劣化を評価するために必要な、浸透による土の劣化機構の解明を目的とした。内部浸食には様々なモードがあり、時間(浸食の進展)とともにその形態は変化するが、本研究では、特に、浸透流による土の細粒分の流失に着目した。

具体的には、浸透実験における土の細粒分流失プロセスや、これに伴う土骨格構造の変化の微視的観察、並びに、数値シミュレーションを通じて、浸透流による土の細粒分の移動特性、並びに、細粒分の移動により形成される土の骨格構造と力学特性の関係を明らかにすることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、浸透流に伴う細粒分流失を引き起こしやすい、内部不安定な土として、シルトと砂を混合した砂質土を取り上げた。この土を対象として、以下の実験・数値解析を実施した。

(1) 内部不安定な土で構築された盛土が浸透流にさらされたときの細粒土の移動を詳細に観察する模型実験を実施することにより、盛土中の細粒土の移動・堆積過程を把握した。また、細粒土の移動過程の数値シミュレーションも実施した。

(2) 内部不安定な土に浸透流を与え、このときの細粒土流失に伴う土骨格構造の変化を、デジタルファインスコープを用いることにより微視的に観察し、細粒土流出による粗粒土の骨格構造の変化、並びに、局所的な細粒土の堆積による粗粒土間の接触状態の変化の観察・定量化を試みた。

(3) 新たに試作した平面ひずみ浸食・せん断試験装置を用いて、土の浸食過程の詳細な観察を行うとともに、浸食後の細粒土分布と土の力学的挙動の関係を実験的に明らかにすることを試みた。

4. 研究成果

(1) 浸透流による盛土の内部浸食過程

図1に示すような盛土模型に対して浸透流を付与し、盛土の内部浸食過程を明らかにした。実験では盛土材として、珪砂3号および珪砂8号の混合土を選定した。この混合土では、珪砂3号は土骨格を形成する粒子で、珪

砂 8 号は細粒土を模擬しており、その含有率は 15% である。

実験と共に、内部侵食により間隙流体に取り込まれた細粒土の密度の時空間分布を計算する数値シミュレーションも実施した。この数値計算では、浸透流によって浸食された細粒土は間隙水と共に間隙流体としてふるまうと仮定し、Cividini & Gioda (2004) や Uzuoka *et al.* (2012) の研究を参考に浸食モデルを構築し、これを用いた。このモデルを用いた上向き 1 次元浸透実験の再現結果を図 2 に示す。

浸透流を 48 時間与えた後の盛土内の細粒土の増減を図 3 に示す。模型実験では、盛土内の細粒土は浸透時間と共に下流側の水理境界の水面付近 (図 3 領域 A) から浸潤面に沿いながら後退的に減少し、基盤底部 (図 3 領域 B) では、剥離し間隙流体に取り込まれた細粒土が、この部分に再堆積し細粒土が増加した。一方、数値シミュレーションでは、模型実験で見られた前者の現象については再現可能であったが、浸食モデルで陽に考慮されていない再堆積については再現できなかった。

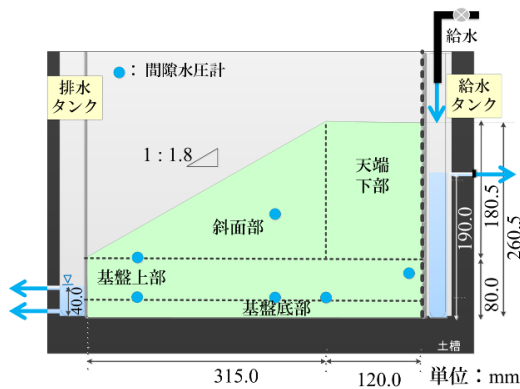


図 1 盛土模型の概要

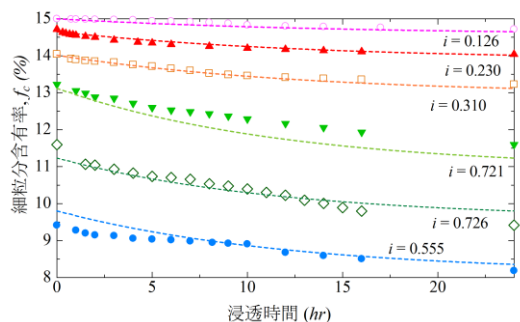


図 2 各動水勾配での供試体内の細粒分含有率の経時変化 (マーカーは実測値, 破線は理論値)

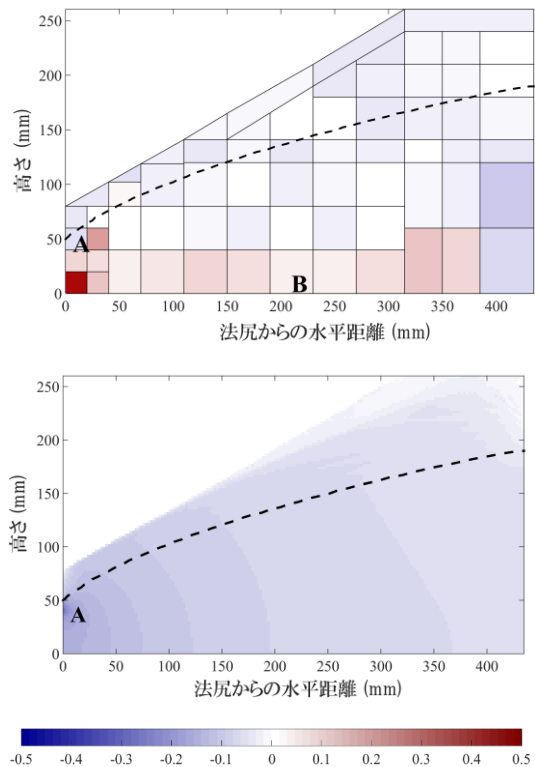


図 3 盛土内の細粒土の増減割合 (上: 模型実験, 下: 数値計算. 何れも 48 時間後)

(2) 内部侵食過程の微視的観察

1 次元上向き浸透流による細粒土流出に伴う土骨格構造の変化を、デジタルファインスケープを用いることにより微視的に観察した (用いた土は(1)と同様)。その結果、イメージ解析により、流出する細粒土の定量的評価が可能であること、細粒土流出による粗粒土の骨格構造の変化、並びに、局所的な細粒土の堆積による粗粒土間の接触状態の変化を観察可能であり、これを定量化することが可能であることを示した (図 4)。

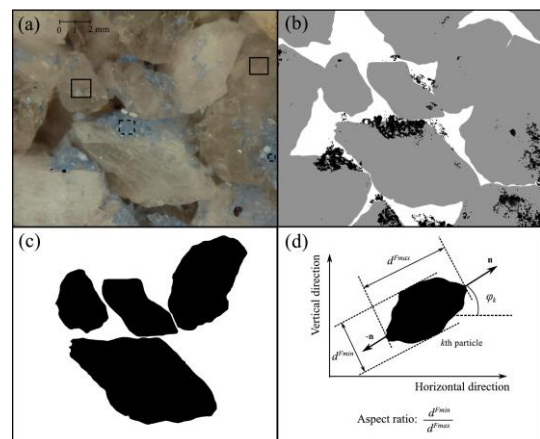


図 4 微視的観察における特徴の抽出

(a) デジタルマイクロスコップで得られた画像, (b) 画像処理後, (c) 抽出された粗粒土, (d) 粗粒土の形状・向きの数値化

(3) 平面ひずみ浸食・せん断試験装置の開発
 新たに試作した平面ひずみ浸食・せん断試験装置(図5)を用いて、土の浸食過程の詳細な観察を行うとともに、浸食後の細粒土分布と土の力学的挙動の関係を実験的に調べた。具体的には、内部浸食により排水条件下における土の剛性・強度は変化すること、これには粗粒土を囲む細粒土の影響が大きいことを示すことができた。

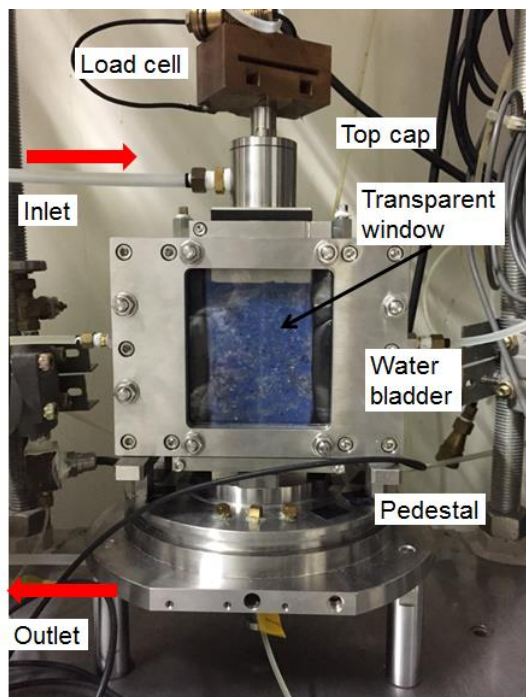


図5 平面ひずみ浸食・せん断試験装置

<引用文献>

- ① Cividini, A. & Gioda, G. (2004): Finite-element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils, *Int. J. Geomech.*, 4(3), 191-198.
- ② Uzuoka, R., Ichiyama, T., Mori, T. & Kazama, M. (2012): Hydro-mechanical analysis of internal erosion with mass exchange between solid and water. *Proc. 6th Int. Conf. Scour and Erosion, Paris, France*, 655-662.

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) 全て査読有

- ① Ouyang, M. & Takahashi, A., Influence of initial fines content on fabric of soils subjected to internal erosion, *Can. Geotech. J.*, 53(2), 299-313, 2016 (DOI: 10.1139/cgj-2014-0344)
- ② 小柿響, 丸山貴広, 堀越一輝, 竹山智英, 高橋章造, 透水性鋼矢板まわりの浸透流による砂質土の内部浸食, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 71(2), I_419-I_427, 2015 (DOI: 10.2208/jscejam.71.I_419)
- ③ 堀越一輝, 高橋章造, 浸透流による盛土内

の細粒土の移動に与える再堆積の影響, 地盤工学ジャーナル, 10(4), 473-488, 2015 (DOI: 10.3208/jgs.10.473)

- ④ Horikoshi, K. & Takahashi, A., Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow, *Soils Found.*, 55(5), 1293-1304, 2015 (DOI: 10.1016/j.sandf.2015.09.027)
- ⑤ Ke, L. & Takahashi, A., Drained monotonic responses of suffusional cohesionless soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 141(8), 04015033, 2015 (DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001327)
- ⑥ Ouyang, M. & Takahashi, A., Optical quantification of suffusion in plane strain physical models, *Géotech. Lett.*, 5(3), 118-122, 2015 (DOI: 10.1680/jgele.15.00038)
- ⑦ Ke, L. & Takahashi, A., Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil, *Soils Found.*, 54(4), 713-730, 2014 (DOI: 10.1016/j.sandf.2014.06.024)
- ⑧ Ke, L. & Takahashi, A., Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, *Geotech. Test. J., ASTM*, 37(2), 347-364, 2014 (DOI: 10.1520/GTJ20130049)

[学会発表] (計16件)

- ① Horikoshi, K., Ke, L. & Takahashi, A., Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fraction in embankment subjected to steady and unsteady seepage flow, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015年11月12日, 福岡国際会議場 (DOI: 10.3208/jgssp.JPN-073)
- ② Ke, L., Ouyang, M., Horikoshi, K. & Takahashi, A., Soil deformation due to suffusion and its consequences on undrained behavior under various confining pressures, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015年11月10日, 福岡国際会議場 (DOI: 10.3208/jgssp.JPN-083)
- ③ 小柿響, 丸山貴広, 堀越一輝, 高橋章造, 透水性鋼矢板まわりの内部浸食進展に関する解析的研究, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月3日, 北海道科学大学
- ④ 丸山貴広, 小柿響, 堀越一輝, 高橋章造, 透水性鋼矢板周りの浸透流による砂質土の内部侵食に関する実験的研究, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月3日, 北海道科学大学
- ⑤ 堀越一輝, 高橋章造, 浸透流による盛土内細粒分の下方向の移動に及ぼす要因の実験的検討, 第50回地盤工学研究発表会,

- 2015年9月3日, 北海道科学大学
- ⑥ Mao Ouyang, 高橋章造, Image-based quantification of size and shape of colored siliceous sand, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月3日, 北海道科学大学
 - ⑦ 堀越一輝, 竹山智英, 高橋章造, 浸透流に起因する盛土内の細粒分流出過程に関する数値解析, 土木学会第18回応用力学シンポジウム, 2015年5月16日, 金沢大学
 - ⑧ Horikoshi, K. & Takahashi, A., Physical model tests on suffusion-induced change of spatial distribution of fine fraction in embankment, 7th International Conference on Scour and Erosion, 2014年12月2日, Rendezvous Grand Hotel (Perth, Australia)
 - ⑨ Ouyang, M., Ke, L. & Takahashi, A., Effects of internal erosion on undrained responses of soils with different initial fines contents, 7th International Conference on Scour and Erosion, 2014年12月2日, Rendezvous Grand Hotel (Perth, Australia)
 - ⑩ 小柿響, 堀越一輝, 高橋章造, 透水性鋼矢板まわりの内部浸食進展に関する数値解析, 第11回地盤工学会関東支部発表会, 2014年10月3日, 日本未来科学館(東京都)
 - ⑪ 堀越一輝, 関栄, 高橋章造, 浸透流による盛土内部の細粒土分布の時空間的变化に関する模型実験, 第49回地盤工学研究発表会, 2014年7月17日, 福岡国際会議場
 - ⑫ Ouyang, M, Ke, L. & Takahashi, A., Effects of non-plastic fines on undrained compressive behavior of mixed sand, 第49回地盤工学研究発表会, 2014年7月15日, 福岡国際会議場
 - ⑬ Ouyang, M. & Takahashi, A., Influence of initial fines content on mechanical behavior

of soil subjected to internal erosion, 4th Tokyo Tech-KU Joint Seminar on Infrastructure Development, 2013年10月31日, 東京工業大学

- ⑭ Ke, L., Takahashi, A., Drained response of internally eroded cohesionless soil, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013年9月5日, 日本大学(千葉県)
- ⑮ 堀越一輝, 関栄, 高橋章造, 内部侵食を受けた水利構造物の安定性に関する模型実験, 第48回地盤工学研究発表会, 2013年7月25日, 富山国際会議場
- ⑯ Ke, L., 高橋章造, Influence of Suffusion on Undrained Response of Non-cohesive Soil, 第48回地盤工学研究発表会, 2013年7月23日, 富山国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 章造 (Takahashi, Akihiro)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40293047

(2) 研究分担者

竹村 次郎 (Takemura, Jiro)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 40179669

竹山 智英 (Takeyama, Tomohide)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00452011