

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289151

研究課題名(和文)土構造物の内部侵食と脆弱部の進展過程およびそれに伴う全体構造劣化の評価

研究課題名(英文)Evaluation of earth structure deterioration due to internal erosion

研究代表者

桑野 玲子 (Kuwano, Reiko)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：80312974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：盛土や地中構造物の埋設土および自然斜面内に、雨水浸透の繰返しや地震時の地盤の液状化などにより生成する水みちや内部侵食の形成・進展メカニズムを解明するために、陥没地の現地調査、内部侵食を受けた土の力学試験、空洞形成・進展課程を観察するための模型実験を行った。陥没の事例研究では複数の手法を組み合わせた地盤調査で、陥没原因を推定できたが、地表から2m以深の深層空洞を非破壊で検知する決定的な方法を見つけるまでには至らなかった。要素試験、模型実験からは、細粒分の流出による土の剛性や強度の低下や空洞進展のプロセスをある程度定量的に評価できた。

研究成果の概要(英文)：Field investigation and laboratory tests were conducted to study the mechanism of formation/expansion of subsurface cavities and water pathways in the ground. It was possible to clarify the cause of sinkholes occurred in the real cases, such as multiple sinkholes in Pokhara, Nepal and a large scale sinkhole in Miyakonojo, Miyazaki. But it was not possible to detect the water pathway or underground cavities at more than two meter deep, with non-destructive manner. From laboratory tests, stiffness and strength reduction of soil due to suffusion could be quantitatively evaluated to some extent.

研究分野：地盤工学

キーワード：土構造物 内部侵食 劣化

1. 研究開始当初の背景

国内では都市部を中心に年間約数千件に上る道路陥没が発生している。その大半は下水管などの地中埋設管の老朽化や破損に起因すると考えられているが、原因や径路不明の地下の水みちに沿った侵食によるものも多いのが現状である。近年の気候変動や土地利用の変化などの影響で地下水位の変動幅や浸透条件が変化していることが、長年にわたる繰返し浸透に伴う地盤の内部侵食などの脆弱性を助長していると考えられる。2011年の東日本大震災の際、液状化が発生した地域で大量の噴砂と共に多数の路面下空洞が発生した。それらの多くはマンホール脇や地中埋設管上など、噴砂の運搬径路と関連がつけられ、前述の水みち形成や内部侵食による地盤の脆弱化と対比して考えることが可能である。

パイピングなどの地盤の浸透破壊に関する研究は、主にダムや堤体などの水利構造物の設計に関わる分野において、国内外とも先行している。しかしながら、これらは十分な締固め管理が可能な重要土構造物が主な対象で、多様な土質が混在する自然地盤や地中構造物近傍などのような異種材料との境界面、築堤履歴が不明な河川堤防における水みち形成メカニズムの詳細については依然として不明である。

2. 研究の目的

盛土や地中構造物の埋設土および自然斜面内に、雨水浸透の繰返しや地震時の地盤の液状化などにより生成する水みちや内部侵食の形成・進展メカニズムを解明する。また、内部侵食によってできた空洞やゆるみなど地盤内の局所的脆弱部が土構造物や地中構造物全体の安定性へ及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

(1) 空洞と水みち探索のフィールド調査

①ポカラ・ネパールの多発陥没の現地調査

2013年11月、ネパール・ポカラ近郊で発生した多発陥没は、最盛期には陥没孔が200以上を数え、その後埋め戻しても再陥没が頻発した。周辺地域は第四紀の礫やシルトを主体としたアンナプルナ山域を起源とする堆積層で構成されている。2014年から2017年に渡り計8回の現地調査を行い主として以下の項目を実施した。

- ・表面波探査
- ・弾性波探査
- ・地質踏査
- ・地下流水音調査
- ・ラムサウンディング試験

- ・ボーリング

②都城・宮崎県畑地陥没の現地調査

2016年9月に台風による豪雨の影響で宮崎県都市部の高規格道路脇の畑で巨大な陥没孔が出現した。原因究明と水みち探索のために2016年10月から2017年5月にかけて計6回の現地調査を実施した。

- ・表面波探査
- ・弾性波探査
- ・ドローンによる空撮
- ・動的簡易貫入試験

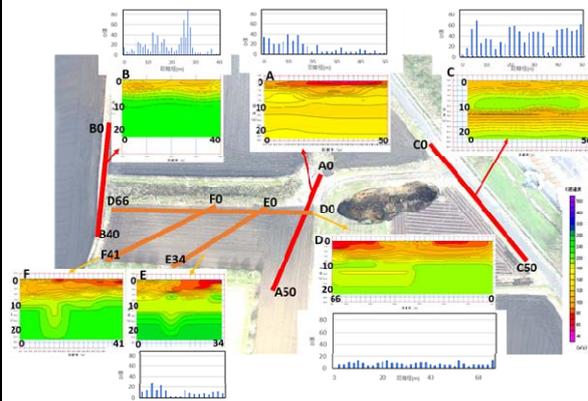


図1 陥没孔周辺の表面波探査結果

(2) 空洞形成・内部侵食に関する室内実験

① 1次元透水試験による土砂流出実験

細粒分の流出を許した透水試験を実施し、細粒分が抜け出す条件や流出の程度を排水の濁度で評価する方法を検討した。

② 内部侵食作用を受けた土供試体の力学特性の評価

試験中に細粒分の流出を許す特殊なペDESTAL（図2）を用いて三軸圧縮試験や中空ねじり試験を行い、内部侵食の影響を受けた供試体の力学特性を調べた。

Non-eroded test



Eroded test



図2. 中空ねじり試験用ペDESTAL

③ 空洞形成に関する模型実験

内部侵食により空洞が形成され、進展して陥没に至るプロセスを図3に示すような模型実験により再現し、メカニズムを調べた。

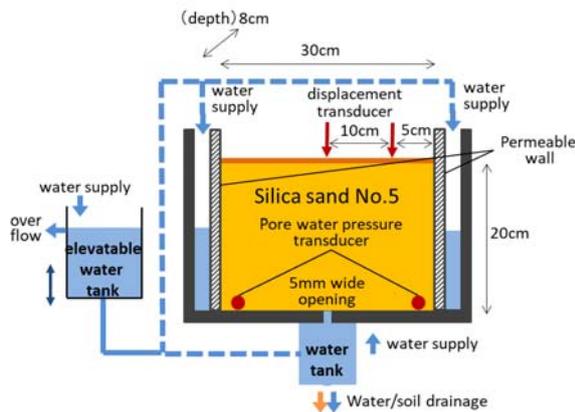


図3. 土砂流出模型実験装置

さらに、地震後に液状化履歴のある地盤で道路下空洞が多発する現象を解明するために、図4のような装置を用いて模型実験を行った。

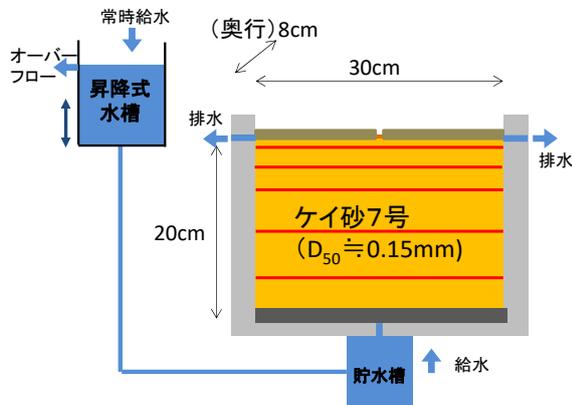


図4. 液状化による噴砂の再現のための模型実験装置

4. 研究成果

(1) 空洞と水みちの探索について

① ネパール・ポカラと宮崎県都城の陥没事例において、複数の手法を組み合わせた地盤調査を実施することにより、空洞・陥没の発生メカニズムを究明できた。

② 地表から2m程度以深の空洞を非破壊で見つける決定的な方法は見つけれなかった。しかし、表面波探査や地質学的考察から、ネパール・ポカラ、宮崎県都城市の陥没事例では、およそ水みちやゆるみの範囲を推定することが可能であった。

③ ネパール・ポカラでは、地下流水音測定が水みち径路の探索に一定の有効性を示した。

(2) 空洞形成・進展のメカニズム及び内部侵食の影響を受けた土の力学特性

① 一次元透水試験により細粒分が流出した土供試体は、にコーン貫入試験を実施したところ、わずかな(0.5%程度)の土の流出にもかかわらず貫入抵抗が半分程度に低下する場合がある。

② 細粒分の流出が起きやすい条件として、従来土の粒度が支配要件として知られているが、その他に土の密度や拘束圧も影響することがわかった。

③ 三軸試験や中空ねじり試験等の要素試験で内部侵食により細粒分が流出した供試体のせん断試験を行うと、初期剛性、せん断強度共に減少した。細粒分出により供試体の密度が低下する影響を考慮してもなお顕著であった。

④ 土砂流出模型実験で、空洞の生成・進展のプロセスを調べたところ、空洞内に水が残っている場合と排水されてしまう場合で異なる成長の様子を示した。水がすぐに排水される場合には煙突状の空洞ができあまり進展しない。一方水が空洞内に残る場合は空洞が横に広がった。空洞上の土は土被りが厚い場合はアーチングにより安定を保ったが薄い場合は不安定となり崩落した。

⑤ 液状化時の噴砂を再現する実験では、舗装模型の直下の砂が開口部への水の流れに運ばれて噴砂となって表れることがわかった。噴砂が起きるかどうかは開口部の流速と砂の粒径に依存した。噴砂が発生した結果、舗装模型直下は地表面が波状に乱れ、路面下空洞のような様相を呈した。

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16件)

① Yang, Y. and Kuwano, R. (2017), An experimental investigation of piping effects on the mechanical properties of Toyoura sand, *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1-10, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0314-6> (査読有)

② Yang, Y. and Kuwano, R. (2017), Effects of principal stress rotation on small strain stiffness of sand subjected to piping erosion, *Soils and Foundations*, Vol. 57, No. 5, pp. 776-788. (査読有)

- ③ 佐藤真理、桑野玲子 (2015)、地中埋設物が水みちと土砂流出時の空洞形成に及ぼす影響、地盤工学ジャーナル Vol.10, No.1, pp.113-125. (査読有)
- ④ Sato, M. and Kuwano, R. (2015), Influence of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 4, pp. 829-840. (査読有)
- ⑤ 佐藤真理、桑野玲子 (2015)、地盤内間隙空気の閉塞による破壊現象、農業工学論文集, Vol. 83, No. 4, pp. I 107-115. (査読有)
- ⑥ Sato, M. and Kuwano, R. (2015), Suffusion and clogging of cohesive soil investigated by one dimensional seepage test, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 6, pp. 1427-1440. (査読有)
- ⑦ Pokhrel R. M., Kiyota T., Kuwano R., Chiaro G., Katagiri T. and Arai I. (2015). Preliminary Field Assessment of sinkhole damage in Pokhara, Nepal. International Journal of Geoengineering Case histories, <http://casehistories.geoengineer.org>, Vol. 3, Issue 2, pp. 113-125. doi: 10.4417/IJGCH-03-02-04 (査読有)
- [学会発表] (38 件)
- ① Kuwano, R., Pokhrel, R. M., Kiyota, T., Katagiri, T., Yagiura, Y., Ikeda, T. and Kuwano, J. (2016), Investigation into the multiple recent sinkholes in Pokhara, Nepal, Proc. of the 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016), UK, Oxford, pp. 207.
- ② Kuwano, J., Kuwano, R. and Horiuchi, Y. (2016), Model Tests on Subsurface Cavities below Road Pavement due to Sand Eruption from the Liquefied Ground, Proc. of the 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016), UK, Oxford, pp. 208.
- ③ Yang, Y., Kuwano, R. and Chao, X. (2016), Variation of small strain stiffness during rotation of principal stress in piping-influenced sand, Proc. of the 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016), UK, Oxford, pp. 203.
- ④ R. M. Pokhrel, T. Kiyota, R. Kuwano, G. Chiaro, T. Katagiri (2015), Site investigation of sinkhole damage in the Armala area, Pokhara, Nepal, Proc. International conference on Geotechnical Engineering, IS-Colombo.
- ⑤ Kuwano, J. and Kuwano, R. (2015), Model Tests on Sand Eruption from the Liquefied Ground through the Gap of Pavement, Proc. of 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, Christchurch, New Zealand.
- ⑥ Sato, M. and Kuwano, R. (2015), Effects of internal erosion on mechanical properties evaluated by triaxial compression tests、JGS special publication, Vol.2, Proc. of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 9-13 November 2015, Fukuoka, No. 29, Japan, pp. 1056-1059.
- ⑦ Kuwano, J. and Kuwano, R. (2015), Mechanism of sand eruption from the liquefied ground through the gap of pavement and subsurface cavities, JGS special publication, Vol.2, Proc. of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 9-13 November 2015, Fukuoka, No. 23, Japan, pp. 865-868.
- ⑧ Horiuchi, Y., Anh, N. N., Kuwano, R. and Kuwano, J. (2015), Observation on Trace of Sand Boiling Erupted from Liquefied Sandy Ground and its Simulation by Laboratory Model Test, Proc. of 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Buenos Aires 2015, pp. 800-807.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑野 玲子 (KUWANO Reiko)
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：80312974

(2) 連携研究者

水谷 崇亮 (MIZUTANI Takaaki)
 (国研) 港湾空港技術研究所・地盤研究領域・チームリーダー
 研究者番号：70371763

森 啓年 (MORI Hirotoshi)
山口大学・創成科学研究科・准教授
研究者番号：20355803

桑野 二郎 (KUWANO Jiro)
埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：30178149