

氏名	PRADEEP POKHREL
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1209 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Stability of underground cavity caused by internal erosion (内部侵食に起因する地盤内空洞の安定性)
論文審査委員	委員長 教授 桑野 二郎 委員 教授 長田 昌彦 委員 教授 内村 太郎 委員 教授 川本 健

## 論文の内容の要旨

Internal erosion is one of the major causes of the failure of hydraulic structures, road pavement, and the naturally deposited ground as well. Cave-in often caused by hidden cavity in the subsurface of the ground, which is triggered by internal erosion of soil. Between 2013-2017 numerous sinkholes have been observed in Armala area of Pokhara valley in central Nepal. Based on the site investigation results, it was presumed that internal contact erosion was occurred between the sand seam and silty clay layers. In recent years, collapse of a sinkhole or a hidden cavity is widely observed on the road pavement of the urban city. And the number of such underground cavities in the road pavement in Tokyo area of Japan increased after the gigantic 2011 Tohoku earthquake. Although the mechanism of cavity formation and the stability of the soil arching have been widely investigated, still limited research has been done under seismic loading condition. This study focuses on mainly two parts. (1) Internal contact erosion to understand the phenomenon that leads to sinkhole formation using the soil material having similar physical and geometrical properties of the onsite soil. (2) Seismic stability of the subsurface cavity. In the contact erosion test, three series of test were performed considering the effect of fully saturated and unsaturated condition of fine soil, soil configurations and applied overburden pressure. In case of seismic stability of subsurface cavity, shaking table tests were performed considering the conditions of water level on the model ground to form the cavity, drained condition, and the effect of reinforcement on arching. A woven geotextile and a triangular geogrid were used as a reinforcement material. From this study, the followings were observed. From contact erosion test, contact erosion is significant only when the flow velocity exceeds the critical velocity. The observation result shows that the contact erosion phenomenon leads to the surface settlement if the coarse material is non-cohesive and uniformly graded under the soil configuration of coarse material overlying the fine soil condition. But erosion phenomenon leads to the formation of a subsurface cavity under the soil configuration of fine soil overlying

the coarse material condition. In addition, due to the breakage of particle to particle bonding stable cavity at the interface was not observed in the fully saturated condition of the fine sand. Test result shows, there is no significant effect of overburden pressure on the critical flow velocity, but it has inverse effect on the erosion rate. The test results indicated that the fine soil overlaying coarse soil scenario clearly shows the internal erosion that ultimately leads to piping. This situation reflects the Armala site condition that undergoes sinkholes. From shaking table test, seismic stability of the subsurface cavity is greatly affected by the amount of water around the cavity. It was observed that the stability of the cavity decreased with the increase of water at the bottom of the cavity. Test result shows that the stability of the cavity increases with the increase of H/W ratio. The effect of reinforcement was highly noticed at the fully drained condition of the model ground.

## 論文の審査結果の要旨

地盤の内部侵食に伴う空洞の形成や地盤陥没は、例えば道路などの社会基盤の維持・保全において重要な課題となっている。本論文では、ネパールにおいて生じた多数の地盤陥没の調査から得られた知見を基に、粗粒層と細粒層の地盤境界部における接触侵食について室内模型実験により検討している。さらに、東日本大震災などの過去の地震後の路面下空洞の調査結果から、地震により空洞の発生数が著しく増加することが知られていることから、空洞の地震時安定性及びジオシンセティックス敷設による予防保全効果について、振動台実験により検討している。

本論文は、研究成果を5章に分けて記述している。

第1章では、本研究の背景となる、地盤の内部侵食に起因する地盤内空洞や地盤陥没の問題について、特に近年問題となっている路面下空洞や道路陥没についての研究について概観している。さらに、本研究を行う大きなきっかけとなった、ネパール・ポカラ近郊の Armala 地区において、扇状地の水田で多数発生した地盤陥没について報告している。路頭での観察から一連の陥没が、建設骨材採取のために近接する河川で行われた浚渫により動水勾配が増加し、非塑性シルト層とそれに挟まれた薄い砂層との接触侵食が著しくなったことに起因するものと指摘し、本研究の必要性を述べている。

第2章は既往の研究について述べている。Suffusion（細粒分の抜け出し）など各種内部侵食を概観し、既往の研究での実験結果を特に接触侵食に関するものを中心に取りまとめ、さらにジオシンセティックスが敷設された地盤の載荷安定性についても紹介している。

第3章では、接触侵食の実験について述べている。まず本研究のために製作した試験装置を説明し、さらに内部侵食量の計測のための濁度計測と侵食質量の実計測の対応関係を述べている。実験では細砂、粗砂、非塑性シルト質粘土（DL クレー）の3種類を用い、さらにそれらの上下の位置関係を変えた二層地盤を作製し、層境界面に平行な浸透流の流速を段階的に増加させながら、内部侵食量を計測している。その結果、内部侵食量はある限界流速を超えると急増すること、粗粒層の流速は細粒層よりも大きいためその流速により運ばれやすい細粒層での侵食が生じること、細粒分は粗粒層内で目詰まりを起こすことで接触侵食の位置が変わることなどが示された。さらに、粗粒分が上層にある場合は侵食されてもその隙間を上層の粗粒分が崩壊して埋めてしまうため空洞が形成されないこと、一方 DL クレーが上層にある場合は上層の崩壊が起きにくく内部侵食により生じた隙間が空洞へと発展すること、接触侵食により生じた空洞は二層の接触面に沿って発達することなども報告されている。これらの研究成果は、Almara において生じた地盤陥没のメカニズムを説明するものと考えられる。

第4章では、地下水位の上昇・下降に伴う空洞の生成と発達、さらに形成された空洞の地震時安定性について、振動台実験により検討している。さらにジオシンセティックスを地盤中に敷設した場合の、予防保全効果についても検討している。本章では、まず土槽底部に土砂流出スリットを有し、水位を上下させられる土槽について説明をし、実験方法の詳細を述べている。まず模型地盤全体を飽和させた後、地下水位を所定の位置に下げ、しかる後に底部のスリットを開け、水と土砂を一緒に排出させた。地盤内の変位を PIV 計測したところ、排出直後のまだ空洞が形成される前から、地盤底部の排出孔から離れたむしろ地盤表面に近い個所に歪の集中個所が現れアーチの形成が見られた。さらに排出させるとそのアーチ部の下に空洞が現れ、排出を続けると縦長の煙突状の空洞が形成された。排水がほぼ止まる約10分後にスリットを閉じる部分排水と24時間スリットを開けた完全排水の2つの条件に対して振動台実験を行った。完全排水では土粒子間隙に水分が残り不飽和状態にあるものの、水分はサクションにより間隙に保持されている。一方部分排水で

は間隙にまだ多くの水分が残りサクシオンでは保持しきれないため、水分が徐々に下に移動し、地盤底部の約2cmは飽和状態となった。そのため振動を与えると地盤底部が液状化し、空洞化部の両側が液状化により流動し、その結果その上の空洞側面も滑り出し空洞が拡大し、やがて上部が陥没することとなった。一方完全排水の場合はそのような株の流動は生じないため、部分排水よりも大きな加速度を与えると空洞上部が剥がれ落ちるような状態となり空洞が拡大し、空洞陥没が生じた。ジオシンセティックスのうち、ジオグリッドを敷設した場合はスリットを開けて排水・排砂をする際にグリッドの目合を水も砂も通過できるため、敷設しない場合と同様の縦長の煙突状の空洞が形成される。一方ジオテキスタイルを敷設した場合は、水は通すものの砂は通さないため、上部の地盤をハンモック上に支えることとなり、ジオテキスタイルより下の空洞は幅広いものとなり、上の地盤も幅広く沈下するが、砂粒子が残る分だけ上部の空洞はアーチの下に狭い隙間が生じるような形状となった。段階的に加速度振幅を増加させて加振を行うと、補強をしていない場合は突然陥没が生じるが、補強をしている場合は徐々に地盤表面の沈下は進行するものの、陥没が生じる前に空洞部が閉塞し突然の陥没は生じなくなるとともに、相当大きな加速度を与えてもそれ以上沈下が増加することもなくなる。従って、ジオシンセティックスにより予防保全の効果が期待できることが示された。

第5章では、本研究により得られた結論を総括して述べるとともに、今後の展望を述べている。