

模型実験による複雑な内部侵食状況に関する検討

佐藤真理*・祖父江陵・堂領翔吾

Model test for the evaluation of internal erosion under actual ground conditions

Mari SATO*, Ryo SOBUE and Shogo DORYO

Abstract Internal erosion refers to the transportation of soil particles due to seepages in the ground, which often induce ground disasters such as landslides and sinkholes. Various internal erosion studies have been conducted mainly under simplified conditions, such as one-dimensional seepages, to verify the boundary conditions of erosion. This study experimentally simulated internal erosion by the use of small soil chambers, under complicated conditions resembling the actual ground. In these simulations, complicated seepage flow is imposed on the modeled ground.

Herein, two types of complex erosion conditions are simulated. One condition is the large degree of erosion from cracks in the soil. These cracks subsequently cause the formation of underground cavities, which are related to sinkhole accidents. The second condition is internal erosion in the multi-layered ground, with the upper layer comprising silt and the lower layer comprising gravel. This erosion is often observed in the natural ground. The movement of the soil particles in the modeled ground is determined, and their displacement on the ground's surface is measured. Then, the change in ground stiffness following seepage and erosion is evaluated. Finally, the influence of internal erosion on the ground, with seepage in multiple directions is discussed.

Keywords : Internal Erosion, Seepage, Model Test, Sinkhole, Suffusion

はじめに

土中の内部侵食は土粒子の地中内での移動流出現象であり、土構造物の浸透破壊や強度低下を引き起こす危険性がある。例えば地盤内での細粒分の移動現象としてはMoffatら¹⁾²⁾が一次元上向き浸透流の実験を行い、移動が発生し始める動水勾配と地盤の拘束圧の関係を明らかにした。またSherardら³⁾は一次元下向き浸透流により粘性土スラリーが粗粒土の中を通過する条件をそれぞれの材料の粒度分布により評価した。これらはアースダム内のコア材とフィルター材を対象としている。

近年内部侵食に関する既往の研究は様々な形で行われ

ているものの、多くの研究が一次元浸透流を対象としており、複雑な浸透挙動は解析による把握が主である。しかしながら実地盤では様々な地質が折り重なって存在し、また地下水流も三次元の複雑な挙動をする。本研究ではそうした背景を踏まえ、既存の一次元浸透流による内部侵食実験では再現することが出来なかった、実地盤に近い複雑かつ大規模な内部侵食挙動について二次元模型実験により再現を行った。条件としては①大規模内部侵食による地中空洞の崩落実験と②二層地盤における内部侵食実験の二種類を実施し、両方の地盤において水平鉛直が混合した多方向からの浸透流を与えた。また地盤表層においてレーザー変位計により地盤の変状を測定し、内部侵食状況を地表面から推定できるかについて考

察した。②に関しては詳細について明らかにするため、侵食実験終了後に模型地盤内の数か所で土壌硬度計による強度分布の計測を行った。また地盤内でサンプルを採取し粒度試験を実施することで、地盤内での土砂移動状況を調べた。

実験方法と実験条件

装置模式図を図1に、①、②の実験条件一覧を表1に示す。装置は内寸高さ400mm、幅300mm、奥行100mmの小型アクリル土槽であり、土槽前面の開閉が可能である。左右壁中央部高さ200mmの箇所に直径8mmの穴をあけ、そこからチューブを接続し水の流入を実施する。また底面中央には5mm幅奥行100mmの土砂流出口があり土砂や水の流出が可能である。表層での変状測定のためにレーザー変位計を設置した。測定箇所は表層部中央付近である。0.1秒または1.0秒間隔での計測を実施し、鉛直方向上向き（膨張側）を正とした。

実験手順についての詳細を以下に示す。まず①大規模内部侵食による地中空洞の崩落実験に関しては、地盤材料は6号ケイ砂を用いて、相対密度 $Dr=30\%$ 、初期含水比12%の条件で突き固めにより模型地盤を30cm高さに作成した。地盤作成後土槽に接続するチューブの先に漏斗をつけ、給水口から約40cmの高さから大気圧条件で水を左右から同時に流入させた。水の流入量は一回あたり左右から同時に200mlずつ、計400mlであり、全ての水が地盤内に浸透したのを確認後に再度水の流入を行い、これを地盤内で空洞が十分拡大するまで繰り返した。この一度の水の流入を1サイクルと定義する。1サイクルにかかる時間は約5分である。SP_HとSP_Cはほぼ同一の条件であるが、SP_Cは地盤作成後水の流入開始前に高さ22cmの位置に予め幅2mm長さ10cm奥行10cmの亀裂を作り、これをあらかじめ弱層とした。

②二層地盤における内部侵食実験に関しては、上に3号ケイ砂下に7号ケイ砂の二層地盤とし、3号ケイ砂、7号ケイ砂それぞれ $Dr=69\%$ 、38%初期含水比3.5%、

10%となるよう調整し、①と同様に突き固めで2.5cm高さまで作成した。3号ケイ砂は高さ16.5cmであり、7号ケイ砂は高さ16cmである。実験ケースは1ケースDLSであり、表1に示す。浸透条件は水頭差一定約40cmで継続的に約32時間の給水を行った。なお流出口にはスポンジをつめ、水の流出のみが発生する条件とした。実

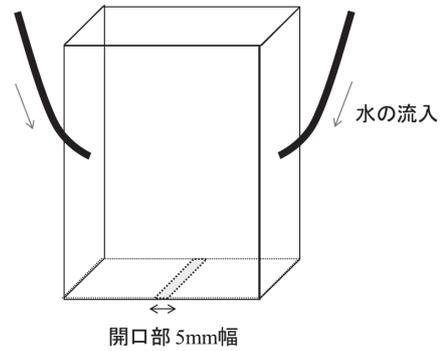


図1. 実験装置模式図

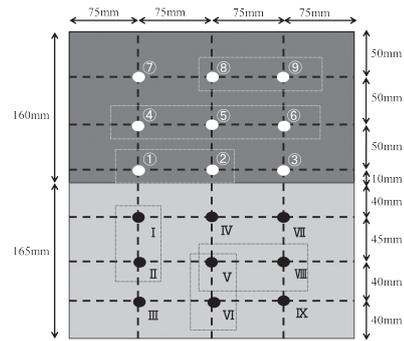


図2. DLS_土壌硬度計測定と試料採取位置

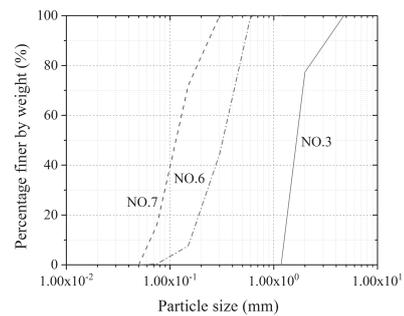


図3. 実験試料粒度分布図

表1. 実験条件一覧

実験	ケース名	相対密度Dr(%)	初期含水比(%)	地盤材料	給水条件	流出口
①	SP_H	30	12	6号ケイ砂	左右計400ml×8サイクル	土砂と水
①	SP_C	30	12	6号ケイ砂	左右計400ml×15サイクル	土砂と水
②	DLS	69/38	3.5/10	3号ケイ砂(下) 7号ケイ砂(上)	40cm水頭差左右32時間浸透	水

験中は①と同様レーザー変位計で表層部中央での変位を計測し、測定間隔は0.1秒とした。実験終了後一日放置した後に図2に示すように3号ケイ砂でIからⅨの9点、7号ケイ砂で①から⑨の9点の計18点で山中式土壌硬度計により土の支持強度 (kg/cm^2) を測定し、その後各層で点線で囲う3か所ずつ計6か所から土壌サンプルを採取し2mm以下の範囲において粒度試験を実施した。なお細粒分が多く含まれるため沈降分析も実施した。①、②の試験で使用した3号、6号、7号ケイ砂それぞれの粒度分布を図3に示す。

結 果

1) 大規模内部侵食による地中空洞の崩落実験

SP_HとSP_Cでの乾燥状態土砂流出量（以下排水量）と排水量の推移を図4に示す。どちらも3回目の水の流入で排水と排土が発生した。また両実験ケースはSP_Cの上部の亀裂以外の密度や初期含水比等の条件が同一であるが、排水排土量にばらつきがみられた。ただし傾向としては一致しており、排水排土量が5サイクル目に向けて上昇し、その後一旦減少した。SP_Cではその後再び10サイクル目に向けて増加した。排水量と排砂量

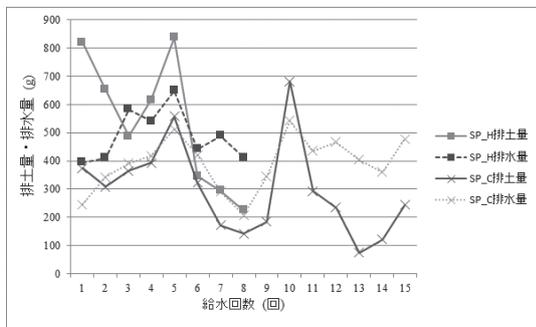


図4. SP_HとSP_C 排水量排水量分布

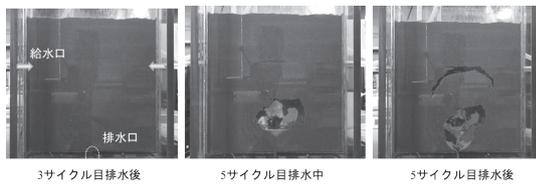


図5. SP_H 3- 5サイクルの様子



図6. SP_H 7- 8サイクルの様子

の増減を繰り返しながら空洞が拡大することが明らかとなった。この詳しいプロセスについての考察は次章を参照されたい。ただしアクリル前面での空洞形状は奥行方向に完全に均一とはならなかった。

空洞拡大の様子であるが、SP_Hにおいて排水排土が発生した3サイクル目からの拡大の推移を図5と図6に示す。3サイクル目では土砂流出がみられたが土槽前面からは特に変化が無かった。これは内部では空洞が既に形成されたもののアクリル前面には現れなかったためと考えられる。5サイクル目では排水中に空洞が崩落し空洞内に一時的に水が溜まる様子が確認された。なおこの時空洞上部に亀裂が形成され、亀裂が土砂と水流出に合わせ拡大することで土砂流出口上部の空洞とその上の大きな亀裂が発生した。亀裂は発生直後には突き固め層に沿った箇所形成された後、アーチ状に拡大した。その後は亀裂と空洞の間にあった地盤が流出口付近まで崩落することで空洞が表層部に進展した。流出口付近に崩落した土砂はその後の水の流入の繰り返しで排出され、最終的には図6のように5サイクル目で出来た亀裂下部に円形の空洞が形成された。

SP_Cも基本的な拡大の様子は図7に示すようにSP_Hと同様である。詳しくは佐藤ら⁴⁾を参照されたい。相違点としては5サイクル目の上部の崩落の有無があった。SP_Cでは崩落がその時点では起こらず、空洞の上部への進展がゆるやかであり、10サイクル目でSP_Hの8サイクル目と同様の空洞が形成され、空洞の下端の流出口付近で安息角となるように空洞が拡大した。

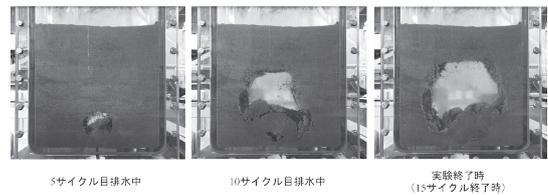


図7. SP_C 5- 実験終了時までの様子

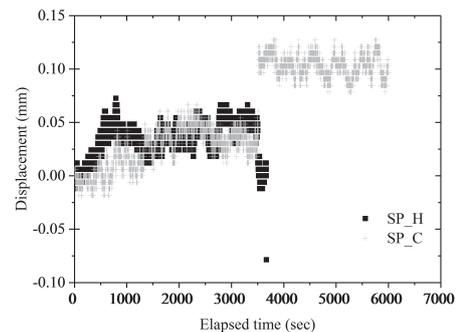


図8. SP_HとSP_C レーザー変位計測定結果

レーザー変位計についての結果を図8に示す。亀裂を入れたSP_Cでは実験中0.12mmほどの変位が発生するのが確認された。これは予め作成した亀裂の幅とほぼ一致する。微小な変動は測定誤差の他に給排水により引き起こされていると推測される。矢印に示すSP_Cでの変状拡大のタイミングは10サイクル目排水中であり、空洞が縦横に拡大すること亀裂部分の変位が地表に伝わったと考えられる。ただし変位自体は最終的な値も約0.1mmと極めて小さく、これは地盤全体に大きな影響を及ぼすものではなかった。

2) 二層地盤における内部侵食実験

浸透実験後の粒度試験結果の拡大したものを3号ケイ砂と7号ケイ砂について図9と図10に示す。なお2つの図の黒実線のoriginalは図4に示す試料本来の粒度分布である。7号ケイ砂の①②付近(3号ケイ砂との境界付近)では粒径が約0.05~0.001mmの広い範囲で最大約3%の減少があり3号ケイ砂の下部の排水口付近(VVIとVⅧ)で0.075mm以下の細粒分の増加が約11%みられた。全体的に比較すると二層の境界付近の7号ケイ砂の細粒分の減少傾向が特に顕著であった。

土中硬度計についての硬度指数と支持強度の一覧を表2に示す。3号ケイ砂地盤では粒径が大きく正確な計測が困難であったが、平均値は 0.16kg/cm^3 に対して底

表2. 土中硬度計計測結果

測点	硬度指数 (mm)	支持強度 (kg/cm^2)
①	4.1	0.4
②	3.9	0.38
③	4	0.39
④	4.5	0.45
⑤	4.2	0.41
⑥	4.8	0.49
⑦	3	0.28
⑧	2.1	0.18
⑨	1.9	0.16

I	1.9	0.16
II	2.1	0.18
III	0.5	0.04
IV	2	0.17
V	2	0.17
VI	2.5	0.22
VII	1.5	0.13
VIII	2.5	0.22
IX	2	0.17

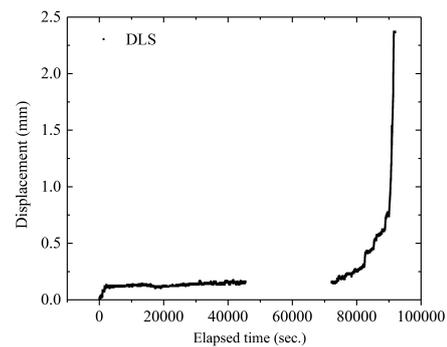


図11. DLSレーザー変位計測定結果

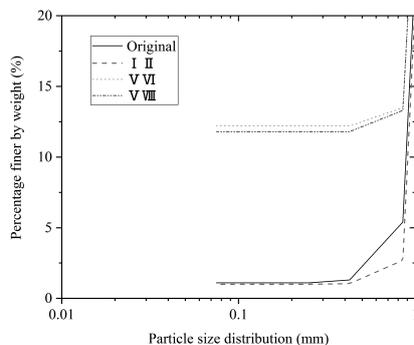


図9. 3号ケイ砂浸透後粒度試験結果

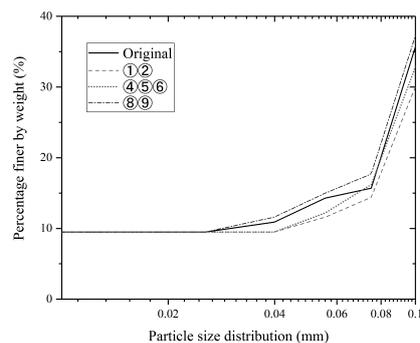


図10. 7号ケイ砂浸透後粒度試験結果

面付近のIIIで 0.04kg/cm^3 と局所的に低い値となった。7号ケイ砂において平均値は 0.35kg/cm^3 であったが、7号ケイ砂層中部の⑥では 0.49kg/cm^3 と高い値になり、上部⑧と⑨はそれぞれ 0.18kg/cm^3 と 0.16kg/cm^3 と低い値になった。これは後述する地表面の湛水が影響している可能性もある。この他に実施した試行実験¹⁾と比較しても顕著な傾向をつかむことはできなかったが、同じ高さの地盤内においても値がかなりばらつくことが確認された。またレーザー変位計の計測では実験中変動がみられ、図11に示すように最大2.4mm程度の膨張が見られた。実験全体での変動の様子は祖父江¹⁾を参照されたい。この結果は①のSP_H、SP_Cと比べると大きな値となった。なおこの時表層地盤が湛水したため給水を止めたところ、膨張は減少した。

考 察

1) 地中空洞の形成要因と崩落プロセスについて

地盤の浸透流による含水比の上昇が空洞拡大を引き起こすことは既往の研究（例えば佐藤ら⁴⁾）により知られており、本研究でも浸透流方向に沿って空洞左右で流出口脇の底部から土砂が流出し、空洞が左右に変形した。ただし空洞は単純に浸透流により徐々に拡大するのみでなく、局所的な弱部からの崩落が影響を及ぼすことが示唆された。一度不安定箇所が崩落すると、その後はまた新たに拡大した空洞の周囲地盤で含水比が上がるまで空洞は安定する。これは土砂や水の流出量は増減を繰り返す結果からも裏付けられる（図5）。最初の亀裂が発生する箇所は多くの場合突き固めの境界層であり、これは地盤のわずかな弱層や不連続面が影響を及ぼしていることが予測される。崩落した地盤は直後には出口付近に留まるが、その後の浸透流により流出した。

2) 二層地盤の内部侵食について

二つの層の境界付近で細粒分の減少が顕著であり、流出口近くの粗粒土層内での細粒分の増加が見られた。Contact Erosion と Suffusionⁱⁱ⁾ の複合した現象が発生し、細粒土中の成分が浸透流により流出口近くまで移動したと考えられる。また前項の浸透流による土砂崩落の状況と合わせると、左右からの浸透流は流出口直上に集中したと推測される。したがってある程度長時間の浸透がある場合、細粒分の流出が粗粒土層内の境界部から離れた箇所、浸透流が集中する水みちにまで及ぶことが示唆された。ただし強度への影響は結果がばらつき明確な結論

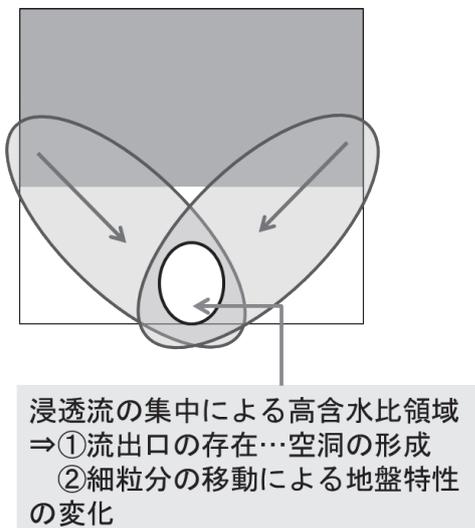


図 12. 内部侵食と空洞拡大プロセス

が出ず、表層の変位もわずかであったため、こうした影響を地盤表面から観測するのは難しいと考えられる。

以上 1) 2) のプロセスをまとめた図を図 12 に示す。

総合論議

本研究では顕著な内部侵食による地中空洞の形成と、多層地盤の影響を模型実験により検討した。その結果多層地盤においては浸透流の方向とその集中箇所の影響が大きいことが示唆された。こうした浸透流の集中により土粒子の移動と流出が発生し、大規模侵食に伴い地盤内は低密度領域や空洞の発生、粒度分布の変化が引き起こされ、元の地盤状態から変化すると考えられる。ただし地盤内部での変化は表層地盤にはごくわずかな変状としてしか観察されず、定量評価は難しいものの浸透流の方向を追い地層データと組み合わせることである程度の予測が出来る可能性がある。今後は実地盤での適用も踏まえより詳細な状況についての検討を目指す。

謝 辞

本研究は公益社団法人地盤工学会「平成 27～28 年度道路保全地盤技術向上に資する調査・研究」助成事業と JSPS 科研費 16K21112 若手研究 (B)「土構造物の侵食による経年劣化機構の解明とモニタリング手法の開発」の助成により遂行されました。

引用文献

- 1) Moffat, R., Fannin, R.J. and Garner, S.J. (2011). Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil, Canadian Geotechnical Journal, **48**:399-412.
- 2) Moffat, R. and Fannin, R.J. (2011b). A Hydromechanical Relation Governing Internal Stability of Cohesionless Soil, Canadian Geotechnical Journal, **48**:413-424.
- 3) Sherard, J.L, Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R. (1984). Filters for silts and clays, Journal of the Geotechnical Engineering, **39** (2):701-718.
- 4) 佐藤真理・藤澤和謙 (2017) 外部応力による地中空洞崩落・道路陥没発生メカニズムの解明, 平成 28 年度道路保全地盤技術向上に資する調査・研究最終報告書 (2017), https://www.jiban.or.jp/file/doro/H28dorohozenjosei_hokoku_Sato.pdf

- 5) 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, 10 (1) : 113-125.
- i) 祖父江陵 (2019) 二次元浸透流による細粒土の礫質土への流出の影響に関する研究. 島根大学学士論文.
- ii) Bonelli, S. (2012), Erosion of Geomaterials. 115-154. ISTE Ltd, London.