

地盤内空洞周囲の水の浸透に伴うゆるみ形成条件と密度低下の分類と体系化

島根大学 生物資源科学部 地域環境科学科

○早瀬友英

島根大学 学術研究院 環境システム科学系 正会員

佐藤真理

1. はじめに

地盤内空洞の主な発生原因として、埋設管の老朽管による損傷、地下構造物の埋め戻し土のゆるみ、水みちの存在といったものが挙げられる。空洞周囲に出来る低貫入抵抗領域、通称ゆるみに関しては研究が進んでいるものの、未解明な点が多い。本研究では水の浸透に伴うゆるみ形成と崩落を実験により再現し、その際に様々な条件を変化させてゆるみの拡大因子について明らかにすることを旨とする。

2. 実験概要

高さ40cm、横幅30cm、奥行き10cmの亚克力製の土槽を用いた。土槽の左壁面、高さ20cmの位置にチューブを接続し流入を行った。流入高さは流入口から水頭差57cmの高さに位置にしている。土槽の底部中央には幅0.5cm、奥行き8.5cmのスリットがあり、そこから水が排出される。スリットにはスポンジを挟むことで一部のケースを除き排水は許すが排土は許さないようにした。実験手順は亚克力土槽内に一定の相対密度で、初期含水比10%の珪砂を1層4cmとして、高さ30cmになるまで層を作製する。層間には色砂を敷く。珪砂は3号($D_{50}=3.0\text{mm}$)、6号($D_{50}=0.4\text{mm}$)、7号($D_{50}=0.09\text{mm}$)を単一または質量比1:1で混合して用いた。また、変形を観察しやすくするために各層間に色砂を敷く。

土層作成後、土槽前面の蓋を開け、土層の底部中央の土を高さ4cm、横幅8cmまたは横幅16cm、奥行き10cmだけ除去し、初期空洞を作成する。給水条件は、水400mlを1回の給水とし、所定の水頭差(57cmまたは73cm)に位置するタンク内の水が少なくなり次第400mlずつ給水をしていく。総流入水量は基本4800mlで、ケース2はパイピング発生時に給水を終了した。給水終了後1日経過してから、土槽前面の蓋を開け、土壌硬度計を用いて前面から硬度貫入試験を行うことにより土層の硬度を調べた。その後複数の位置で試料を採取し乾燥密度を計測し、ゆるみが発生した箇所と発生しなかった箇所の違いを調べた。ゆるみ範囲の定義は、目視で色砂により土層の変形が確認できた範囲とした。実験条件は試料や流入流出条件、初期空洞大きさを変化させた。詳細を表1に示す。

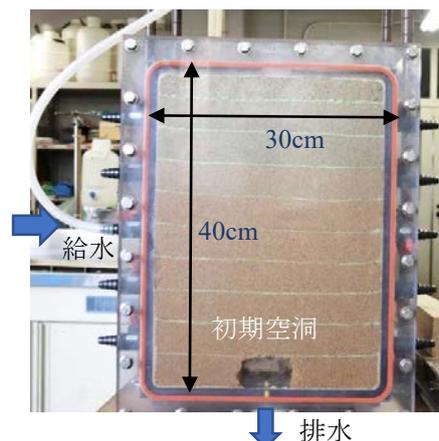


図1 実験土槽と給水・排水口の位置

表1 実験条件

ケース	試料	相対密度(%)	土層高さ(cm)	初期空洞幅(cm)	水頭差(cm)	総流入水量(ml)	排土	総排土量(g)
1	6号珪砂	65.8	40	8	57	4800	なし	なし
2	7号珪砂	61.0	31.7	8	57(途中から73)	5446	なし	なし
3	7号珪砂	61.0	30	16	57	4400	なし	なし
4	6号7号混合	70.0	30	8	57	4800	途中からあり	2095
5	3号6号混合	70.0	30	8	57	4800	なし	なし

3. 実験結果

ケース1の結果を図2に示す。以下の他のケースも同様に、図の一番左以外は点線部分を拡大した図である。給水開始23分が経過すると空洞真上でゆるみが発生し、2分後に空洞が崩落した。その後も同様の現象が断続的に2回

キーワード ゆるみ、地中空洞、道路陥没、乾燥密度、土壌硬度

連絡先 〒690-8504 島根県松江市西川津町1060 島根大学生物資源科学部 TEL085-232-6555 (佐藤)

発生した。ゆるみが発生し崩落する現象により、空洞は上方へと縮小しながら移動した。最終的に高さ約17cmまで縦長のゆるみ領域が形成され、元の空洞は押しつぶされた形となった。



図2 ケース1の実験中の様子

ゆるみが発生し崩壊を起こした地点では乾燥密度は低い値を示した。ゆるんでいない箇所では、実験前の乾燥密度とあまり差異はなかった。硬度試験の結果は、ゆるみ部直上の硬度(図2の白点部)が健全部分より少し低い値を示した。

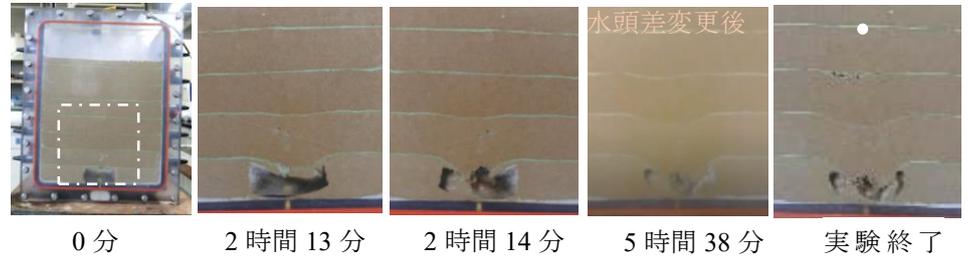


図3 ケース2の実験中の様子

ケース2の結果を図3に示す。給水開始2時間あたりから空洞上部にある土がゆるみを生じた。この地点でのゆるみは、高さ8cmまで発生し、その約10分後空洞の直上部のゆるみが崩壊した。その後変化が見られなくなったため、5時間15分で水頭差を57cmから73cmに変更した。するとゆるみ高さは徐々に上昇し、水頭差変更後23分でパイピングが生じた時は12cmとなり、その時点で給水も終了した。その後実験終了まで観察したところ、ゆるみは高さ約12cmから上には上昇することなく、空洞崩落や空洞の上方への進展も発生しなかった。乾燥密度の測定では、ゆるみ部分でも測定を行ったが特に小さな値を示すことはなく、測定位置による大きな差異はみられなかった。硬度試験は、土槽左側の方が右側より値が小さく、土槽中央のゆるみの直上の地点(図3の白点部)に関しても低い値を示した。パイピングが発生した付近(左側高さ24cm)は顕著に小さい値を示した。

ケース3の結果を図4に示す。給水開始4時間40分あたりから空洞上部がゆるみ始めた。5時間6分でゆるみ部分の一部が崩落した。この時のゆるみの範囲は高さ10cmまで確認できた。その後、給水を続けたが空洞部分の変化は見られなかった。最終的にゆるみは高さ14cmあたりまで確認できた。乾燥密度はゆるみ部分でも測定を行ったが、ゆるみ領域外地点の乾燥密度と差異はなかった。ただ、高さ4cmの両端2地点に関しては他より比較的小さい値を示した。硬度試験では、ゆるみ部分に近い中央高さ16cmの地点(図4の白点部)において、他の測定地点より顕著に小さい値を示した。また、高さ8cmの両端の2地点に関しても小さい値を示した。

ケース4の結果を図5に示す。給水開始2時間20分あたりからゆるみ始めた。給水開始7時間が経過しても大きな変化が見られなかったため、スリットのスポンジを取り除き、7時間15分から排水に加えて排土も行うようにした。排土により顕著にゆるみの範囲が変

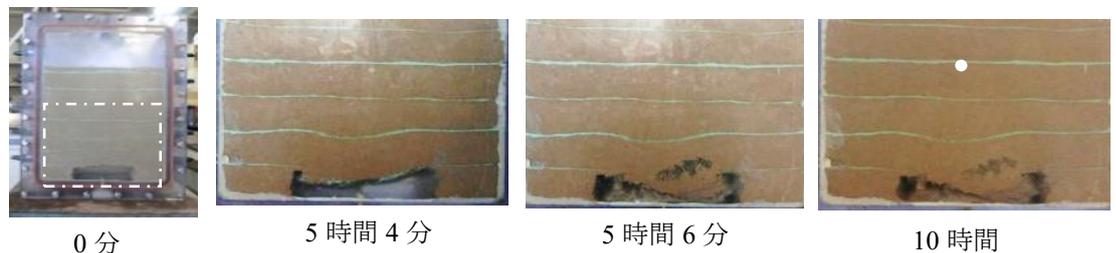


図4 ケース3の実験中の様子

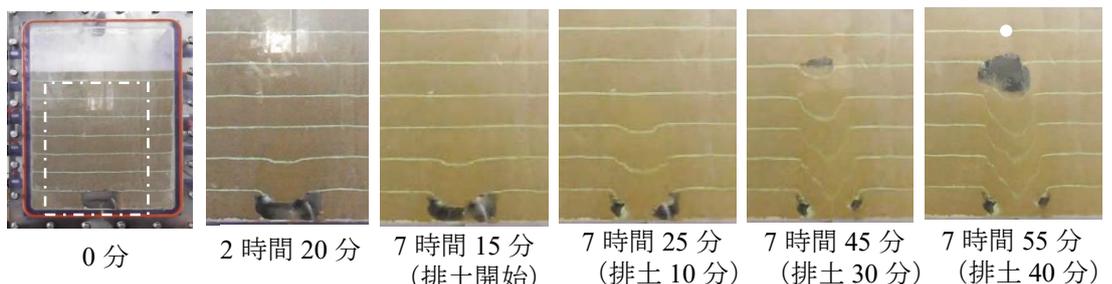


図5 ケース4の実験中の様子

化し、ゆるみ範囲は排土開始 10 分で高さ 14cm、排土開始 20 分で高さ 18cm まで広がった。排土開始 30 分が経過すると高さ 20cm 付近で空洞が発生し、その後は土が

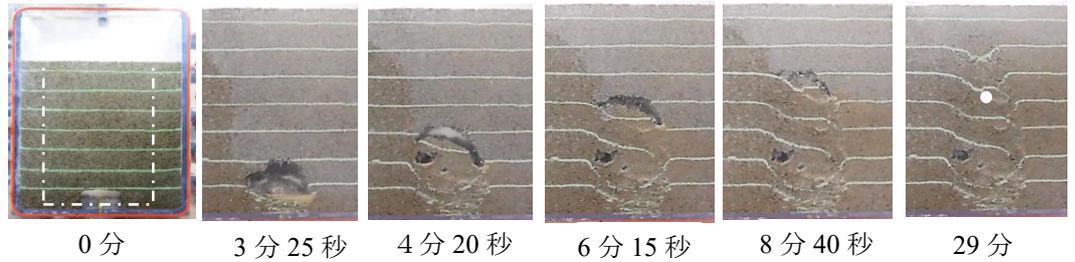


図6 ケース5の実験中の様子

流出していくことに伴い空洞は徐々に下方に拡大していった。乾燥密度は中央のゆるみ部分では低い値を示さなかった。硬度試験は、土層左側が右側より小さな値を示した。発生した空洞の直上でも測定をすると、極端に小さな値を示した(図5の白点部)。

ケース5の結果を図6に示す。給水開始3分が経過すると1回目の崩落を起こし、その後も何度も崩落を繰り返した。崩落に伴い、空洞も上方へと推移していき、給水開始10分でゆるみの高さは約24cmまで拡大した。その後は土層に大きな変化は見られなかった。本ケースの給水時間は30分程度で、他のケースに比べ極端に短かった。乾燥密度はゆるみ領域で4箇所測定し、うち2地点でゆるみ領域外と比較して密度低下が確認できた。硬度試験は、ゆるみ領域内の測定箇所(図6の白点部)が他の測定地点と比べ小さい値を示した。

4. ゆるみと空洞高さの推移

図7に各ケースにおける時間経過に伴うゆるみ及び空洞高さの推移を示す。実験中の画像をImageJで読み取り、底面から最長となる箇所の長さを算出した。5つのケースから、空洞が崩落しゆるみが広い範囲に発生する条件は限られる事が判明した。ケース1,5と、ケース2,3,4で傾向は大きく分かれた。7号珪砂を用いず細粒分が少ないケース1,5においては、ゆるみ高さと同様に両方同時に浅部に進行するため、空洞下部にゆるみ領域があるのに対し、7号珪砂を含むケース2,3,4においては、ゆるみの進展に対して空洞進展はゆるやかなペースであり、空洞上部に広範囲ゆるみ領域がある傾向となった。

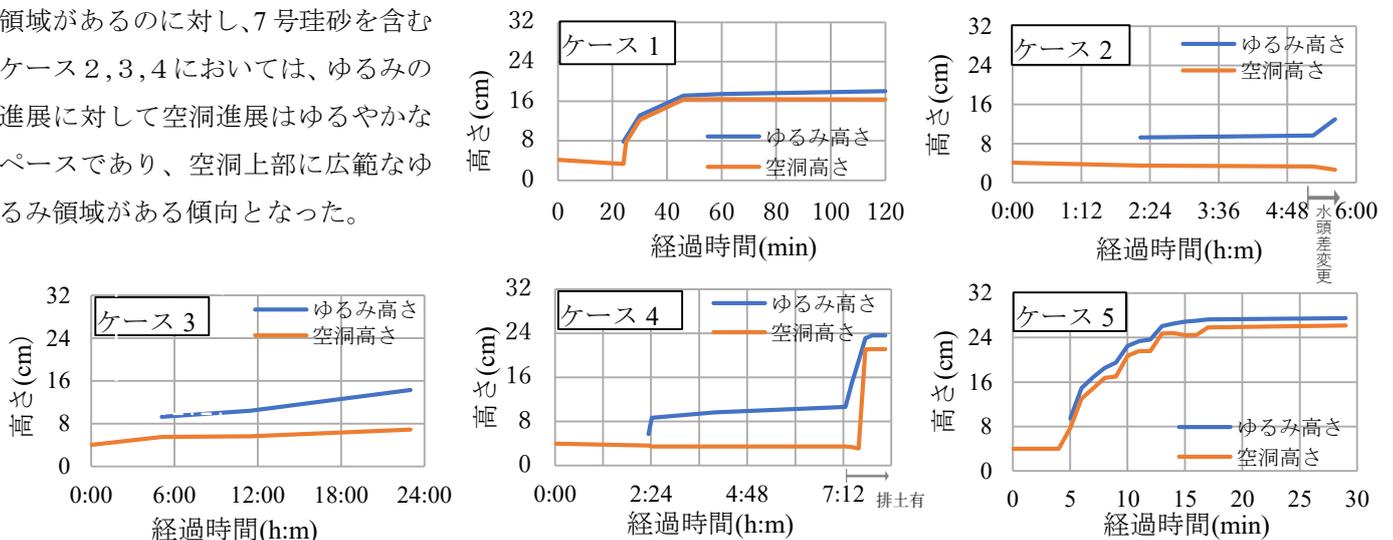


図7 時間経過に伴うゆるみ及び空洞高さの推移

5. 乾燥密度の低下状況

図8に各ケースにおける実験前の乾燥密度および実験後のゆるみ領域内と領域外での乾燥密度の結果を示す。灰色のマーカーは実験前に目標とした乾燥密度であり、地盤の作成過程でケース1,2,3は目標値よりやや小さい値となっている。ゆるみ領域内とゆるみ領域外の密度はそれぞれ測定地点の平均をとったものである。測定

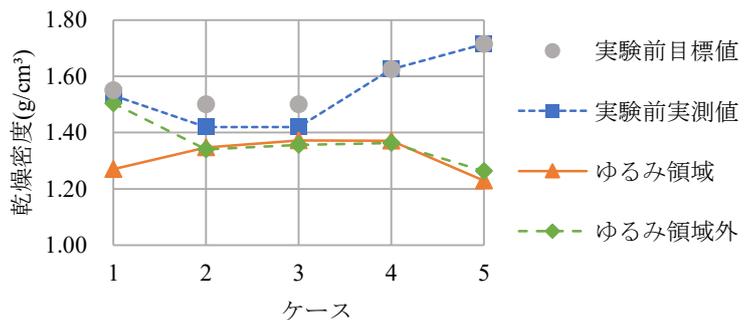


図8 乾燥密度測定結果

結果より、6号珪砂で実験したケース1のみゆるみ領域外とゆるみ領域で顕著な乾燥密度の違いがあった。ゆるみ領域では乾燥密度が1-2割程度減少した。7号珪砂を使用したケース2, 3においては、乾燥密度の低下がゆるみ領域内外どちらでも殆ど見られなかった。6号と7号を混合したケース4や3号と6号を混合したケース5では、ゆるみ領域内外どちらにおいても準備時の乾燥密度よりも低い乾燥密度になり、ゆるみ領域の内外での差は殆ど見られなかった。原因については今後の検討が必要であるが、いずれにせよゆるみが目視で確認された地盤においても、実際の乾燥密度は低下していない可能性があるとして示唆された。

6. 実験結果のまとめ

各ケースのゆるみ状況について表2にまとめる。7号珪砂を含まない比較的粒径の大きい材料を用いたケースでは、排土がなくても次々に崩落を繰り返し、ゆるみが広範囲に形成されていき、空洞も上部へと進展した。またゆるみ部分では密度低下も確認された。一方6号より細かい粒度の、本研究においては7号珪砂を用いたケースでは、排土がない限り初期空洞上部にゆるみが生じるだけで空洞崩落を繰り返すことはなく、ゆるみ部分の密度低下はみられなかった。この結果から、試料の粒度組成によりゆるみ形成と空洞崩落の様子が大きく変化すると考えられる。他の影響因子としては、水頭差を上昇させると、ゆるみ高さは上昇したことから、浸透条件もゆるみ範囲に影響すると考えられる。スリットからの土砂流出を許容すると、7号珪砂を含む材料でも土砂流出と共に空洞が表層に進展し広い範囲にゆるみが形成された。細粒分が含まれていても、土砂流出を伴う条件では粒径の大きい材料と同様に空洞やゆるみが拡大する可能性が示された。土壌硬度に関しては、測定した全てのケースでゆるみの直上部は値が低く、珪砂の種類に関わらずゆるみの影響を受けていると考えられる。

7. 結論

空洞崩落しゆるみが広い範囲に発生する条件は限られる。ある程度以上の細粒分を含む土の場合、空洞崩落は連続的に発生せず、特に水頭差が小さければ空洞上部の限られた範囲でのゆるみにとどまり、且つゆるんだ範囲の密度低下も限られる可能性が高い。開口部からの土砂流出を許すと土砂流出と共に、6号珪砂より細かい地盤でも空洞崩落によるゆるみが上方に進展する。実地盤調査³⁾で見られるように空洞下にゆるみが広がっている場合、粗い材料でなければ土砂流出口がどこかに存在している可能性が高く、ゆるみのパターンによる空洞や周囲地盤の診断が可能となるかもしれない。

表2 ゆるみ形成状況のまとめ

ケース	試料	排土の有無	ゆるみ高さ (cm)	主要な空洞の高さ(cm)	地盤の乾燥密度の低下範囲	ゆるみ部の土壌硬度
1	6号珪砂	×	17	16	ゆるみ部	低下
2 (水頭差 57cm)	7号珪砂	×	8	2	—	—
2 (水頭差 73cm)	7号珪砂	×	12	2	なし	低下
3	7号珪砂	×	14	5	なし	低下
4 (排土なし)	6号7号混合	×	9	0	—	—
4 (排土あり)	6号7号混合	○	24	21	ゆるみ部健全部	低下
5	3号6号混合	×	27	26	ゆるみ部健全部	低下

参考文献

- 1)吉澤幸佑 (2014) : 地中レーダによる路面下の空洞探査について,平成26年度スキルアップセミナー関東, No.15.
- 2)桑野玲子・Renuka,HIS. (2013) : 砂の内部浸食に伴う空洞部周辺ゆるみ部分の強度と剛性の評価, 生産研究, 65巻, 4号, 539-543.
- 3)三木偉信・藤井邦男・張ヶ谷昌彦・小島佳幸・桑野玲子 (2019) : 道路陥没防止を目的とした路面下空洞原因の実態調査報告 その1, 第54回地盤工学研究発表会 (さいたま市) .