

調査研究課題			
テーマ名	外部応力による地中空洞崩落メカニズムの解明	研究期間	2 カ年
研究代表者	佐藤真理 (島根大学生物資源科学部)		
共同研究者	藤澤和謙 (京都大学大学院農学研究科)		

最終報告概要

道路陥没事故は埋設管破損部からの土砂流出が主要な原因と考えられる。降雨時に浸透流に伴い土砂流出により破損部付近で形成された空洞が、地表部付近へと徐々に進展することで最終的に陥没が発生する。空洞が埋設管周囲で拡大する場合、一定の土被りがありアーチ構造が維持され一時的に安定な状態となるため、空洞の上方へのさらなる進展には大量の浸透流かもしくは何らかの衝撃による空洞の崩落が必要である。本研究では空洞を伴う地盤の浸透流解析と空洞の崩落現象の模型実験による再現、を実施した。浸透流解析は、多孔質領域と流体領域の同時解析による多孔質領域と流体領域は異なる支配方程式により各々に計算されることが多いが、ソイルパイプや地中空洞を含む実際の地盤や土構造物への水理学的状況を明らかにするために、各領域での流れを連続的に同時解析することが必要不可欠である。しかしながら既往の解析手法ではセル形状が長方形に限られており、現実に即した複雑な土構造物、空隙形状を反映することが出来ない。本研究では既往の計算手法を改良し節点での値を内挿することで、非構造セル形状での計算を可能にした。計算の妥当性を検討するため、円形空洞を有する多孔質中の浸透流解析を実施し既往の研究との比較を行った。

空洞の崩落現象は、F ある程度拡大した空洞において、交通荷重の繰り返しや軽微な地震動により突発的に発生すると予測されるものの、その具体的なメカニズムは未だ不明な点が多い。初年度は小型アクリル土槽の作成と、作成後試行実験として円形空洞振動台実験を実施した。実験の結果空洞の崩落は振動の外力だけでは極端な状況を作らないと発生しないということが明らかになったため、次年度は新土槽による実験を行った。新土槽では解析と同様に浸透流を地盤内に発生させ、土砂流出による空洞拡大を再現した。その際健全な地盤条件のほかに空洞上部にあらかじめ亀裂を作り弱層とし空洞の崩落プロセスへの影響を調べた。実験中の空洞拡大の様子を下図に示す。



地中空洞崩落実験と浸透流解析

1. はじめに

道路陥没事故は埋設管破損部からの土砂流出が主要な原因と考えられる。降雨時に浸透流に伴い土砂流出により破損部付近で形成された空洞が、地表部付近へと徐々に進展することで最終的に陥没が発生する。空洞が埋設管周囲で拡大する場合、一定の土被りがありアーチ構造が維持され一時的に安定な状態となるため、空洞の上方へのさらなる進展には大量の浸透流かもしくは何らかの衝撃による空洞の崩落が必要である。本研究では空洞を伴う地盤の浸透流解析と空洞の崩落現象の模型実験による再現、を実施した。浸透流解析は、多孔質領域と流体領域の同時解析による多孔質領域と流体領域は異なる支配方程式により各々に計算されることが多いが、ソイルパイプや地中空洞を含む実際の地盤や土構造物への水理学的状況を明らかにするために、各領域での流れを連続的に同時解析することが必要不可欠である。著者らはこれまで Darcy-Brinkman 式 (e.g., Bars and Worster, 2006¹⁾) を用いた Kim and Choi (2000)²⁾ の有限体積法による数値解析手法に基づき離散化し、部分段階法を用いた時間積分を行い高精度の計算³⁾を実施した。しかしながら既往の解析手法ではセル形状が長方形に限られており、現実 に即した複雑な土構造物、空隙形状を反映することが出来ない。本研究では既往の計算手法を改良し節点での値を内挿することで、非構造セル形状での計算を可能にした。計算の妥当性を検討するため、円形空洞を有する多孔質中の浸透流解析を実施し既往の研究との比較を行った。

空洞の崩落現象は、Fig. 1 に示すように崩落はある程度拡大した空洞において、交通荷重の繰り返しや軽微な地震動により突発的に発生すると予測されるものの、その具体的なメカニズムは未だ不明な点が多い。前年度は小型アクリル土槽の作成と、作成後試行実験として円形空洞振動台実験を実施した。実験の結果空洞の崩落は振動の外力だけでは極端な状況を作らないと発生しないということが明らかになったため、本年度は新土槽による実験を行った。新土槽では解析と同様に浸透流を地盤内に発生させ、土砂流出による空洞拡大を再現した。その際健全な地盤条件のほかに空洞上部にあらかじめ亀裂を作り弱層とし空洞の崩落プロセスへの影響を調べた。実験の結果空洞拡大に弱層は殆ど影響を及ぼさなかったが、地表部での変状がやや大きくなること が示された。本報告書では浸透流解析について 2 章で手法と解析結果を、3 章で空洞崩落実験の装置と実験結果を、4 章で全体についての考察と総括を述べる。



Fig. 1. Collapse of the cavity

2. 浸透流解析

2. 1 解析手法

式(1) に示す Darcy-Brinkman 式を支配方程式とする。Kim and Choi (2000)²⁾ の有限体積法による数値解析手法に基づき離散化し、部分段階法を用いた時間積分を行い計算した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i u_j}{\lambda} \right) = -\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\lambda g}{k} u_i \quad (1b)$$

ここに、二次元であるため $i, j = 1, 2$, u_i は流速, p は圧力 (ピエゾ圧), ρ は流体の密度, ν は動粘性係数, λ は間隙率, k は透水係数, g は重力加速度の大きさであり, x_i と t は直交座標と時間を表す。式(1) は流体領域では Navier-Stokes 式に、多孔質領域では Darcy 則を近似的に満たす浸透流の連続式に対応する。各セルにおける変数の配置を Fig. 2 に示す。セル中心で流速 u_x, u_y と圧力 p が計算され、セル境界上各辺中点での流速 $(u_i)_{\text{face}}$ とベク

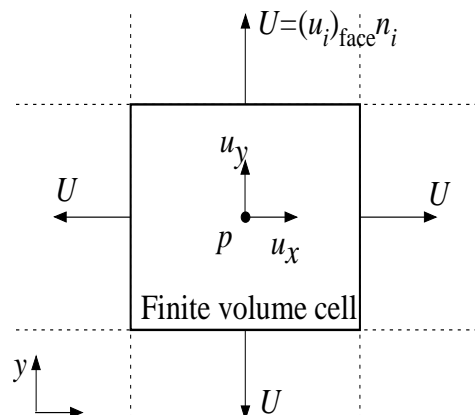


Fig. 2. Computational cells and stored variables

トル n_i の内積としてフラックス U が定義される.

$$U = (u_i)_{\text{face}} n_i \quad (2)$$

計算時にはセル各辺の中点での圧力と流速を内挿する必要があるが, Kim and Choi (2000)²⁾ により式(3), (4)が与えられる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{P_f} = \nabla \phi \cdot n = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\delta_1 + \delta_2} - \frac{\phi_b - \phi_a}{\Delta \eta_{ab}} \tan \theta \quad (3)$$

$$\phi_f = \phi_c + \frac{\phi_a - \phi_b}{\Delta \eta_{ab}} |\varepsilon| \quad (4)$$

ここに, P_1, P_2 はセル 1, 2 の中心であり, P_a, P_b はセル 1, 2 で共有する接点である. P_f, P_c はそれぞれ辺 $P_a P_b$ の中点と, P_1 と P_2 を結んだ直線と辺 $P_a P_b$ の交点を表す. ε_i は P_c と P_f の距離, $\Delta \eta_{ab}$ は辺 $P_a P_b$ の長さであり, ϕ_i は点 P_i での値を表す. ϕ_c は線形補間であれば,

$$\phi_c = \frac{\delta_1 \phi_2 + \delta_2 \phi_1}{\delta_1 + \delta_2} \quad (5)$$

で与えられる. ここに, δ_i は P_i と P_c の距離を表す. まず ϕ_c について, 多孔質体と流体領域の境界面においてより正確な計算を行うために流速と圧力と異なる補間を行った. 接線方向流速に関しては境界層近傍にスリップが発生するという Beaver-Joseph 条件 (例えば Bars and Worster, 2006¹⁾) を考慮した. 具体的な内挿手法は藤澤ら (2013)³⁾ を参照されたい. 非構造セルではさらに ϕ_a, ϕ_b を内挿する必要があるが, 本研究ではある接点 P_m の値 ϕ_m を計算するために, P_m を中心とする半径 r の円 Ω 内部でのつり合いを考え, 各セルに分割して整理すると, 最終的に, 式(6)で与えられる. ここに, K_i はセル i において ϕ_c を参考に流速では $1/k$, 圧力では k とし, e_i, θ_i はそれぞれセル i における P_i と P_m の距離, 点 P_m を挟む 2 辺がなす角度を表す.

$$\phi_M = \frac{\sum_i \frac{K_i \theta_i}{e_i} \phi_i}{\sum_i \frac{K_i \theta_i}{e_i}} \quad (6)$$

節点が境界層に接している場合, 接線方向流速を Beaver-Joseph 条件を満たすために式(7), (8)のように与えた.

$$\phi_M = \frac{\sum_i \frac{\theta_i}{e'_i} \phi_i}{\sum_i \frac{\theta_i}{e'_i}} \quad (7)$$

$$e'_i = \begin{cases} \frac{e_i}{\sqrt{k_i \nu / g \lambda}} & \dots \text{流体領域} \\ \frac{e_i}{\sin \varphi_i} & \dots \text{多孔質領} \end{cases} \quad (8)$$

Fig. 3 のようにセル 2, 3, 4 が多孔質領域であり, セル 1, 5 が流体領域である場合を想定する. 両領域の境界となる辺は 2 辺あるが, セル 1, 2 の境界の辺を S_{12} , セル 4, 5 の境界の辺を S_{45} , と呼ぶ. φ_i は P_4 または P_5 と P_m をむすぶ直線と, 辺 S_{45} または S_{12} がなす角度である. なお P_m における接線と法線は, 辺 S_{12} と S_{45} のように境界を形成する辺の接線, 法線ベクトルをそれぞれ平均することで定義した. なお非構造セルへの境界条件の付与は計算が煩雑になるため, 境界条件を与えるセルは従来通り長方形セルに限定した.

以上より, セル中心の圧力と流速から, 節点とセル各辺の中点における値を内挿し, Kim and Choi (2000)²⁾ の有限体

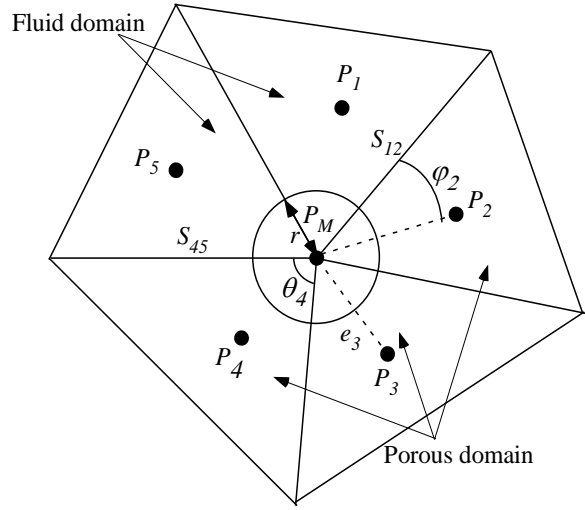


Fig. 3. Interpolation of the variables at the

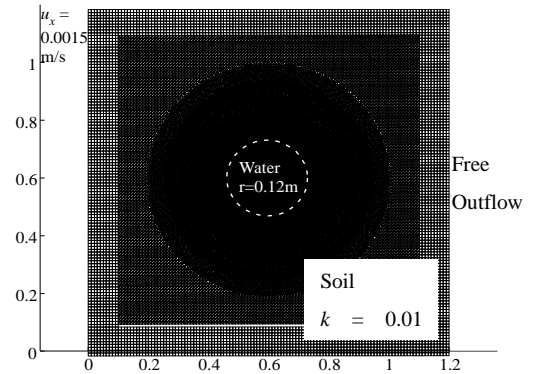


Fig. 4. Geometry and coordinates of seepage analysis including cavity

積法による数値解析手法に基づき離散化し、部分段階法を用いた時間積分を行い計算した。なお具体的な計算手順と離散化の詳細は藤澤ら (2013)³⁾ を参照されたい。

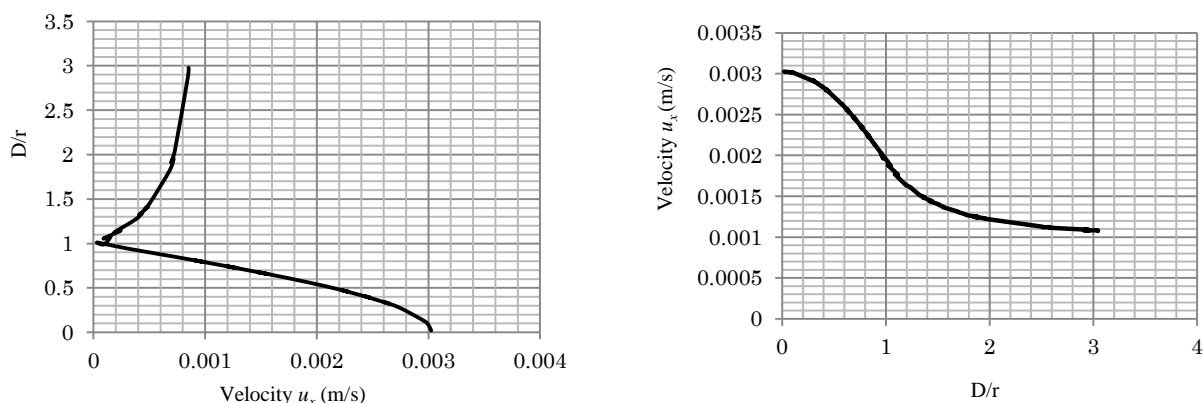


Fig. 5. Velocity u_x (Up) along $x = 0.6$ m (Down) along $y = 0.6$ m

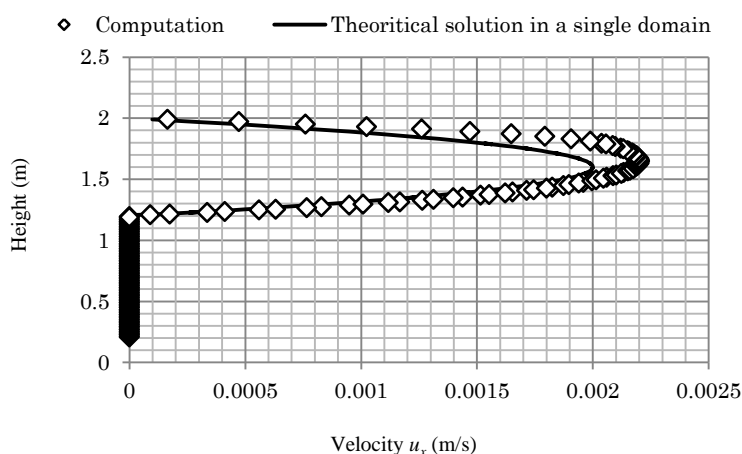


Fig. 6. Velocity u_x along $x = 1.0$

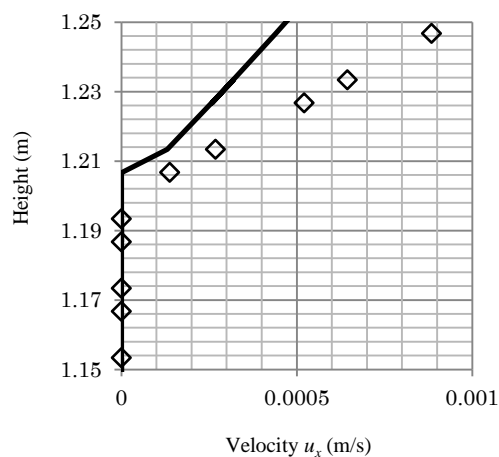


Fig. 7. Details of Fig. 6

2. 2 地中空洞浸透流解析

2. 2. 1 解析条件

Fig. 4 に用いた計算メッシュと境界条件、流体領域と多孔質領域の位置を示す。計算メッシュ中心、 $x = 0.6$ m、 $y = 0.6$ m からの距離を D m とすると、流体領域は計算メッシュ中心から $D < 0.12$ m の円形領域であり、周囲に多孔質領域がある。メッシュ分割は $D < 0.4$ m の範囲では同心円状に三角形セルを作成し、それより外側では格子状にメッシュ分割を行った、境界条件として水路の左端から x 方向の様な浸透流、 $u_x = 0.0015$ m/s を与え $\partial p / \partial n = 0$ とし、また右端では自由流出入境界とした。上下端ではフリースリップ条件とした。

2. 2. 2 解析結果

$x = 0.6$ m 上と $y = 0.6$ m 上の x 方向流速分布 u_x を Fig. 5 に示す。 D/r は中心からの距離 D m と空洞半径 r m (本研究では $r = 0.12$ m) の比である。したがって $D/r = 1$ が多孔質体と空洞の境界面を示す。Fig. 5 より、 $x = 0.6$ m 上の流速分布は、空洞中心で流入流速の約 3 倍の大きな流速が発生し、空洞と多孔質体の境界に近づくにつれ流速がゼロ近くまで減少する。その後、多孔質体内では境界から離れるにつれ流入流速に漸近した。 $y = 0.6$ m 上の流速分布は、 $x = 0.6$ m 上と異なる傾向をとり、空洞中心から離れるにつれて流速が単調減少した。これらの傾向は佐野 (1983)⁴⁾ による理論解と極めてよく一致しており、本計算手法による両領域の浸透解析の妥当性を示している。また参考として、水平方向に多孔質体 () と流体の境界層があり、水平方向一次元浸透流を発生させたときの鉛直方向流速分布を Fig. 6 に示す。直線は流体領域と多孔質領域、それぞれが単独で存在した場合の理論解 (管路流れとダルシー則) である。多孔質領域は理論解とほぼ一致するが、流体領域では Beaver-Joseph 条件を考慮したために若干計算値の方が大きな値となった。また Fig. 7 は Fig. 6 の $1.15 < x < 1.25$ (m) の範囲を拡大した結果である。境界近くでの局所的なスリップが計算され、流体領域での流速は理論値と 2 倍程度異なる。Beaver-Joseph 条件を考慮する必要性が示された。

2. 2. 3 結論と今後の課題

本研究では既往の提案手法に新たに節点での値の内挿手法を組み込み、非構造セル形状での計算を可能とした。計算手法により多孔質体と流体両領域の流れを精度良く計算することが可能であり、既往の研究とも傾向が一致した。また Beaver-Joseph 条件を考慮し、流速と圧力で異なる値の内挿を行うことでより厳密な浸透流解析が実施できることが示された。今後は開発した研究手法にさらに不飽和条件や乱流モデルを実装し、様々な状況の実構造物を数値解析により明らかにすることを旨とする。

3. 空洞崩落模型実験

3. 1 装置概要と実験手順

装置模式図を Fig. 8 に示す。装置は内寸高さ 400 mm、幅 300 mm、奥行き 100 mm の小型アクリル土槽である。前面を開閉可能とし、また振動台に載せた時の安定のために後方に台を設置した。実験手順はまず土槽を横に倒し、前面の蓋を開けて一定厚さ毎につき固めて地盤を作製する。その後表層部を削り地盤を一定深さとする。円形空洞は突き固め時に事前に円柱を設置し、突き固め終了後円柱を取り除くことで作成する。最終的に Fig. 9 のようになる。本研究基礎的な挙動を明らかにするため、空洞形状を半径 100 mm または 200 mm の円形とし、地盤深さを 400 mm とした。実験条件をまとめた結果を Table. 1 に示す。ケース名後 W が付いている条件は、円形空洞周囲に半径 200 mm の穴が開いたビニールをかけた上で、霧吹きにより空洞周囲の含水比を上昇させた。用いた材料は 7 号ケイ砂であり、全てのケースで相対密度 90%、含水比 10% とした。また加速度は比較的低い値としたが、これは比較的低い震度での崩落の繰り返しを想定したためである。

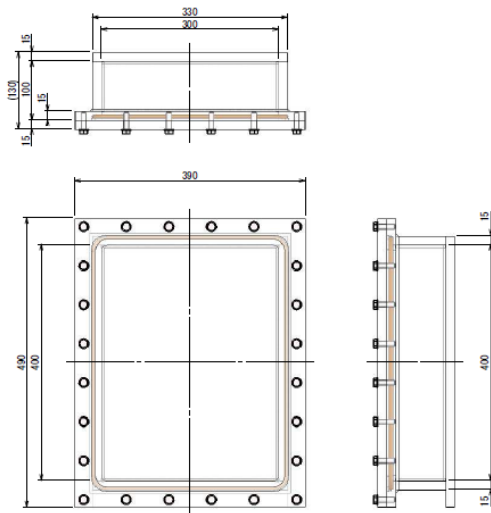


Table 1. Test conditions

ケース名	加速度 (Gal)	相対密度 Dr (%)	含水比 (%)
100_31	31	90	10
100_37	37	90	10
100_46	46	90	10
200_31	31	90	10
200_37	37	90	10
200_46	46	90	10
200_93	93	90	10
200_111	111	90	10
200_138	138	90	10
100_31W	31	90	10 (空洞周囲霧吹き)
100_37W	37	90	10 (同上)
100_46W	46	90	10 (同上)

Fig. 8. Schematically Figure of the test apparatus

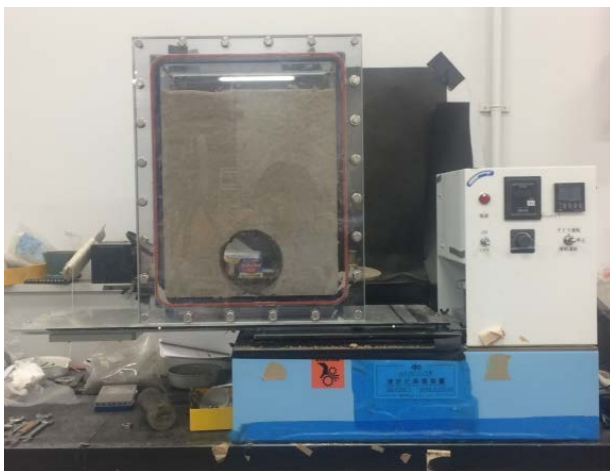


Fig. 9. Soil chamber with the shaking table

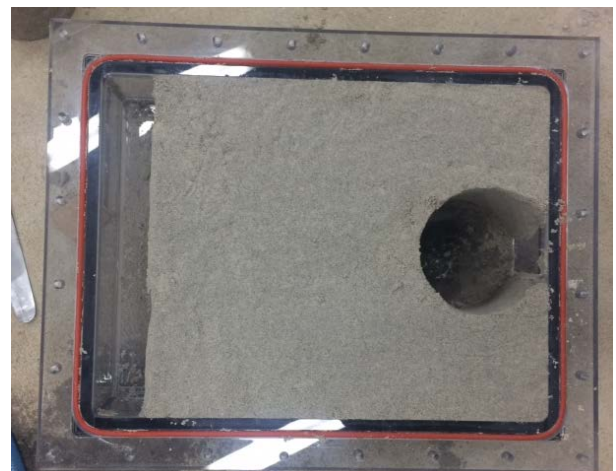


Fig. 10. Preparation of the model ground

3. 2 実験結果と改善策の検討

どのケースでも空洞は崩落しない結果となった。この結果となった原因としては、1) 高密度地盤であったこと、2) 円形形状が安定的であったこと、3) 含水比が比較的lowく、サクションが働いたこと、4) 加速度が低すぎたこと、が考えられる。特に2) に関しては例えば Sato et al. (2010)⁵⁾ が示すように申請者らの過去の実験で地中空洞は円形ではなく扇形に近いことが多く、また均一な形状とはならない。これらの結果をもとに浸透流による自然な形の空洞形成が可能な実験装置を新たに開発した。

4. 浸透流空洞形成実験

4. 1 装置概要と実験手順

装置模式図を Fig.11 に示す。大きさや基本的な仕組みは3章の空洞崩落と変わらないが、i) 表層での変状測定のためにレーザー変位計設置部があること、ii) 左右壁中央部高さ 15cm の箇所直径 8 mm の穴をあけ、そこからチューブを接続し水の流入を可能にしたこと、iii) 底面中央に 5mm 幅の土砂流出口をあけ土砂流出による空洞形成を可能としたこと、の三点が改良点である。用いたレーザー変位計は Fig.12 のような小型のものであり、土槽上部壁面に固定して使用した。キャリブレーション結果を Fig.14 に示す。1.0 秒間隔での計測を実施した。土槽に接続するチューブの先には漏斗をつけ約 100cm の一定高さから大気圧条件で水を左右から同時に流入させた。

実験手順についてであるが、今回は空洞崩落実験と異なり空洞の形成は浸透流の流入により行う。実験条件について Table 2 に示すが、SP_H に関しては地盤を空洞崩落実験同様に突き固めて作成したのちにそのまま水を左右壁の穴から流入させて実験を行った。SP_C に関しては地盤を突き固めて作成後土槽前面の蓋を開け Fig.15 に示すように地盤表層近くに幅 2mm 長さ 10cm の亀裂をつくりこれをあらかじめ弱層としてから SP_H と同様水を流入させた。水の流入は 1 回あたり左右から各 200ml 計 400ml であり、土砂と水の流出が終了後再度水を流入を行うという作業を繰り返した。1 サイクルにかかる時間はおおよそ 5 分である。実験中 1 回の水の流入での流出口からの土砂と水の流出量を測定した。土砂は乾燥重量であり、地盤の乾燥密度初期含水比は両ケースともに同一である。なお所属機関の変更により実験材料が 7 号ケイ砂から宇部ケイ砂 6 号に変更されたことを留意されたい。粒度分布は Fig.13 に示す。

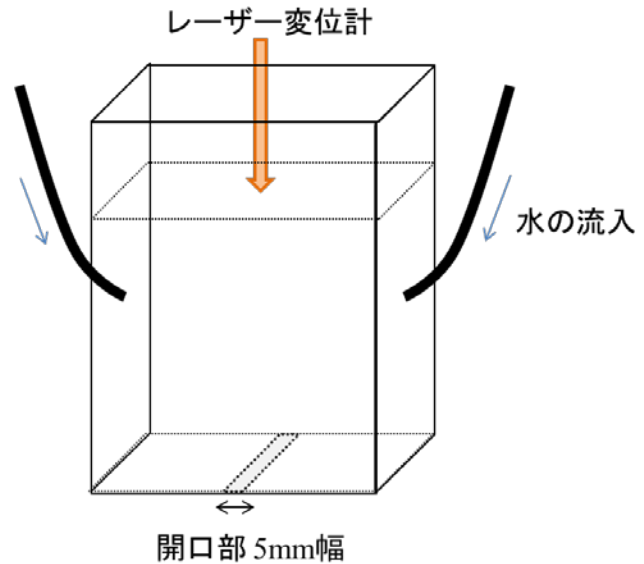


Fig.11 Schematically Figure of sinkhole test due to seepage

Table 2. Test cases of sinkhole test due to seepage

ケース名	乾燥密度(g/cm ³)	含水比 (%)
SP_H	1.397	12
SP_C	1.397	12



Fig.12 Laser displacement sensor

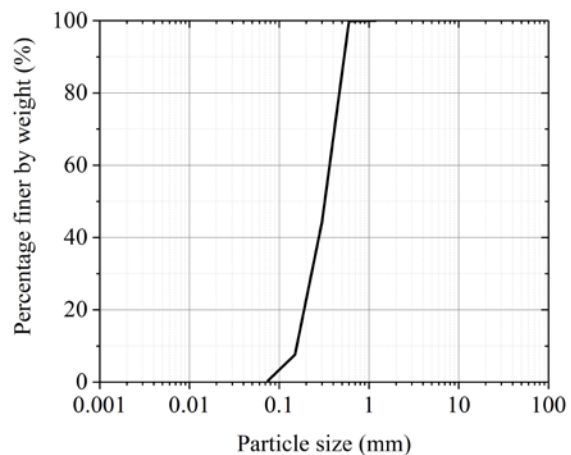


Fig.13 Particle size distribution of Ube keisa no.6

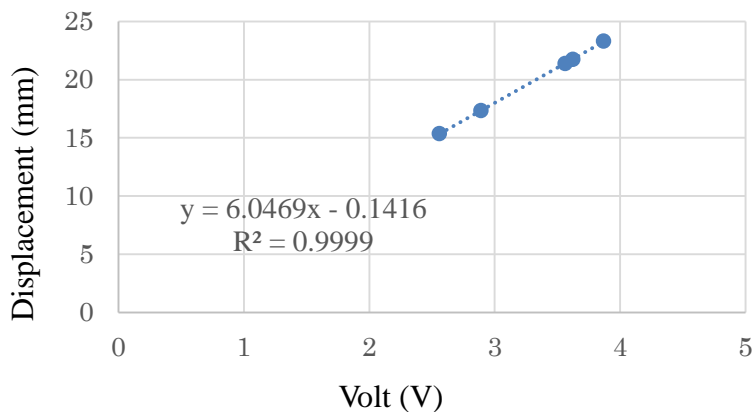


Fig.14 Calibration of the laser displacement sensor

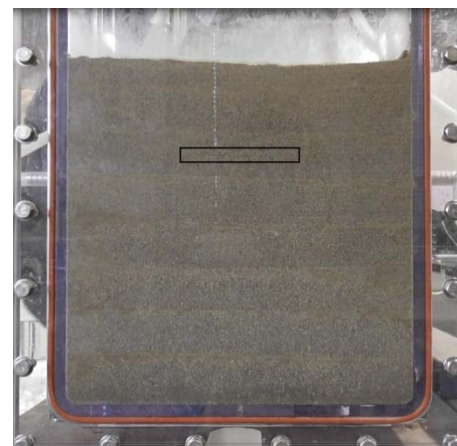


Fig.15 Position of the crack (SP_C)

4. 2 実験結果

SP_H と SP_C での土砂流出量と排水量の推移を Fig.16 に示す。Fig.16 よりどちらも 3 回目の水の流入で排水と排砂が発生した。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条件は同様であるが、排水排砂絶対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、排水排砂量が 5 サイクル目に向けて上昇し、その後一旦減少した後には再び 10 サイクル目に向けて増加した。排水量と排砂量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ではなかった。

空洞拡大の様子であるが、SP_H において排水排砂が発生した 3 サイクル目からの拡大の推移を Fig.17 と Fig.18 に示す。SP_C も基本的な拡大の様子は同様であるが参考のために 5 サイクル目と 10 サイクル目、実験終了時の空洞の様子を Fig.19 に示す。SP_H の 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。これは土槽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 Fig.17 中央のように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て拡大することで Fig.19 右のように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 Fig.18 に示すように亀裂が拡大し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て排出され、最終的には Fig.18 右のように 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 についても傾向は殆ど同一であるが、相違点は 5 サイクル目の上部の崩落の有無にあった。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た（詳しくは Fig.19 を参照されたい）。空洞の崩落が無い場合、Fig.19 に示すように空洞の下端、流出口付近で安息角となるように空洞が拡大した。

レーザー変位計についての結果を Fig.20 に示す。Fig.21 に示すように亀裂を入れた 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 Fig.20 右 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。

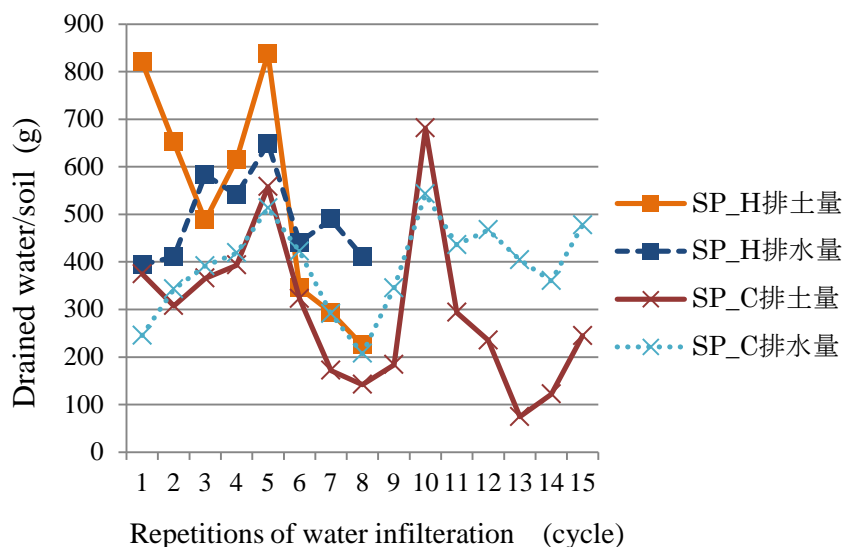


Fig.16 3-5 Weight of drained water and soil



3サイクル目排水後

5サイクル目排水中

5サイクル目排水後

Fig.17 3-5 cycle of SP_H

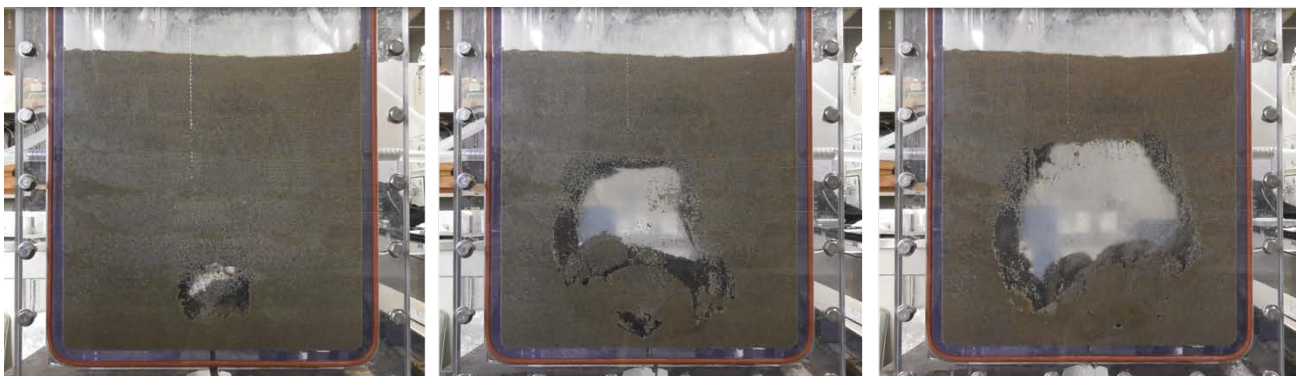


7サイクル目排水中

7サイクル目排水後

8サイクル目排水後

Fig.18 3-5 cycle of SP_H

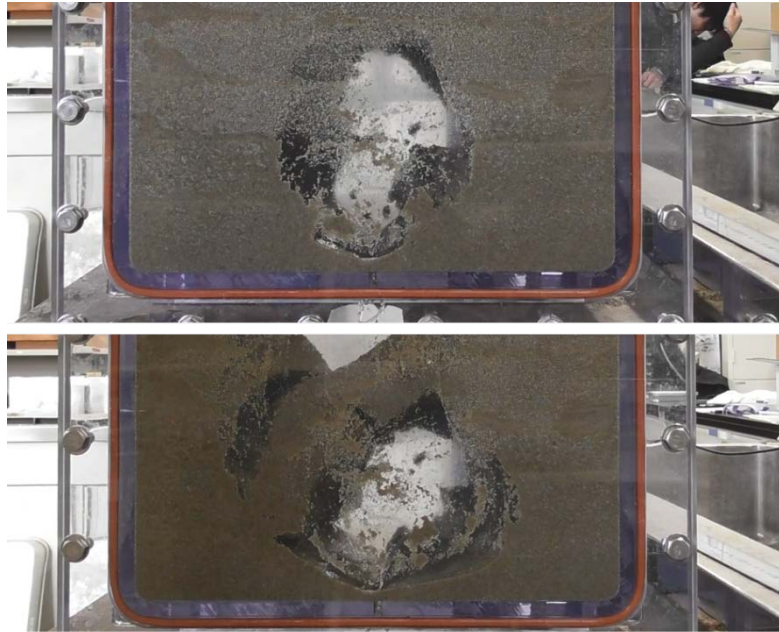


5サイクル目排水中

10サイクル目排水中

実験終了時

Fig.19 3-5 cycle of SP_H



左：5サイクル目排水後 右：9サイクル目排水後

Fig.20 Variety of the cavity formation (SP_C)

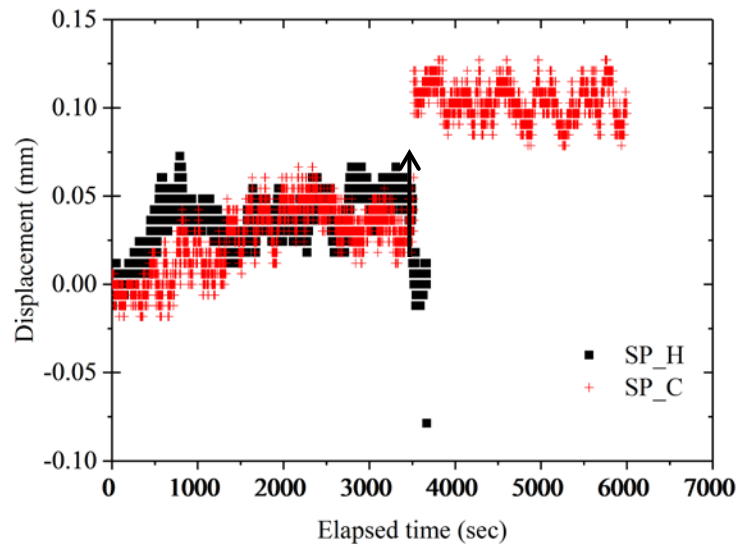


Fig.21 Displacement at the surface ground

5. 空洞崩落プロセスについての検討

空洞崩落プロセスについて3章で検討した外部応力(地震動は交通荷重)等は結果として空洞崩落への影響が軽度であることが示された。これの一つの原因は、空洞は不飽和の時にはサクシオンが働きまたアーチ構造により安定するからであると思われる。本実験は土かぶり圧が極めて小さい条件であるため、実地盤ではさらに崩落が起きづらいことが予想される。4章の実験により空洞の崩落は流入口から流出口に至る水みち周囲が徐々に含水比が上昇し、既存の空洞が変形し不安定箇所が崩れることで拡大すると推測された。崩落が起きない場合の変形は空洞左右で流出口脇の底部から土砂が流出し、空洞が左右に変形することが確認された。空洞の崩落にはこの空洞形状の変化も影響すると考えられる。模式図をFig.21に示す。一度不安定箇所が崩落するとその後はまた新たな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Fig.22に示したような土砂や水の流出量は増減を繰り返す結果からも示唆される。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。崩落した地盤は流出口付近に留まるがこれはその後の浸透流により流出する。崩落は突発的であり突き固め境界層などの目

に見えない弱層が影響しており予測が困難であったものの、崩落の発生タイミングが空洞の進展速度に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

浸透流解析については空洞に水が流入している状況を再現したが、実際の実験では不飽和地盤内にサクシオンにより水が流れ、空洞内はほぼ水浸しなかった。そのため今後は不飽和浸透流を解析で実装する必要がある。ただし境界部での流速は地盤内と異なる可能性も考えられる。実際に空洞の崩落は水の流入後排水中の早い段階で発生しており、浸透力が加わったことが示唆される。

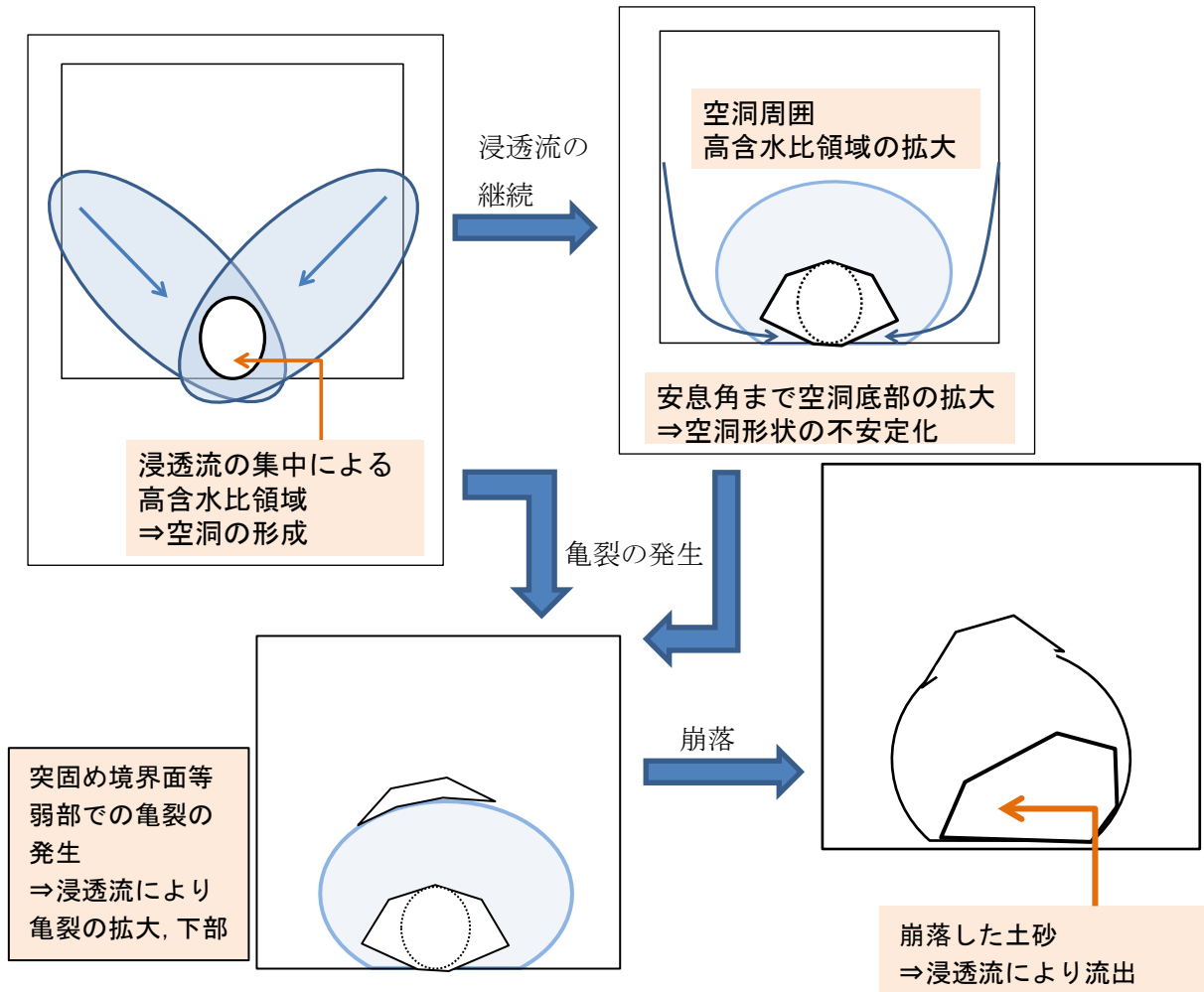


Fig 22. Process of collapse and expansion of the cavity

6. 本助成研究のまとめと今後の展望

2カ年の研究助成により浸透流解析と実験の両側面から、道路陥没を引き起こす地中空洞の詳細について研究を行った。その結果当初想定していた地震動や交通荷重等の外部応力では崩落せず浸透力とサクシオンの消失による崩落が起きるプロセスが示された。崩落は突発的であり予測は困難であるものの大きな影響を持つことが示された。実地盤での浸透流方向や浸透力分布の推定が崩落形状や崩落速度予測にとって重要であると考えられる。また前述したように浸透流解析は飽和地盤に限られているものの、地中空洞について実態を把握するには不飽和浸透流解析が必要であると示唆された。今後は本助成金により得た知見をさらに発展させ、実地盤における地中空洞の危険性判断や予防につながる技術の構築に役立てていく予定である。

参考文献 1) Bars, M.L. and Worster, M.G. (2006) : Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification, *Journal of Fluid Mechanics*, 550, 149-173. 2) Kim, D. and Choi, H. (2000) : A second-order time-accurate finite volume method for unsteady incompressible flow on hybrid unstructured grids, *Journal of Computational Physics*, 162, 411-428. 3) 藤澤和謙, 有本慎一, 村上章 (2013) : Darcy-Brinkman 式を用いた非圧縮性流れと Darcy 流の同時解析手法, *農業農村工学会論文集*, 81(5), 419-428. 4) 佐野 理 (1983) : 多孔質媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる

粘性流, ながれ, 2, 252-259. 5) Sato, M. and Kuwano, R. (2010) : Model tests for the evaluation of formation and expansion of a cavity in the ground, Proc. of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, pp.581-586.

