

地中空洞周りの波動伝播特性に関する個別要素法解析

東京大学生産技術研究所	学生会員	○中田 祐輔
東京大学生産技術研究所	正会員	大坪 正英
東京大学生産技術研究所	非会員	Umair Ali
東京大学生産技術研究所	フェロー会員	桑野 玲子

1. はじめに

地盤中の地層構造を認識するために弾性波試験による方法が多く用いられているが、空洞の存在が検知できない例が報告されている。著者らが実施した模型実験(図1)では空洞の存在による弾性波速度、および通過周波数帯域の低減を確認した^[1]。しかし、それらの要因は明らかではない。そこで本研究では、模型実験の状況を考慮した個別要素法(DEM)を用いて空洞周辺における波動伝播特性について検討した。

2. 不飽和状態を考慮した接触理論

Ali らの研究では地中空洞が形成するための必要条件の一つとして粒子間粘着力を挙げている^[2]。本研究では、オープンソース LAMMPS^[3]に Ali らが実装した不飽和モデルを簡略化したものを使用した。ガラスビーズの物性(ヤング係数 71.6GPa、ポアソン比 0.23、比重 2.5)を考慮した直径 1.2-2.2mm の球体粒子を用いた。粒子間の接触理論は Hertz-Mindlin に従うが、粒子間に 5kPa のサクシオンを考慮した(破断距離 0.001mm)。空洞を十分に安定化させる目的で現実的な値よりも大きなサクシオン値を設定した。

3. DEM 模型地盤

幅(X)200mm、奥行(Y)20mm、高さ(Z)約 180mm の地盤を気中落下法で作製した(図2)。X・Z 方向は剛壁、Y 方向は周期境界を適用した。粒子間摩擦係数は 0 とし、間隙比 0.572 の密な地盤を作製した。次に、粒子間サクシオンを発生させ不飽和状態を再現した。摩擦係数を 0.5 に増加させた後に空洞 S(40×100mm) または空洞 L(60×150mm) 領域内の粒子を削除した。

地盤が安定した後に、地盤中央から 50mm 側方の表面、あるいは空洞直上で P 波を起振させた。幅 30×厚み 20mm の領域にある粒子群(図2)に対し、周波数 20kHz、両振幅 200nm の余弦波パルスに沿うように変位させることで P 波を発生させた。

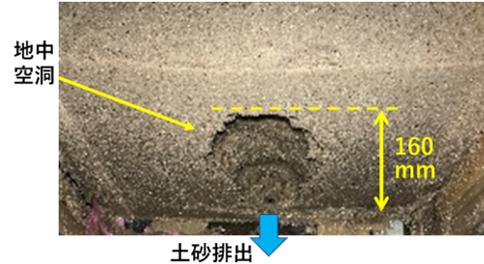


図1 模型実験の結果(3次元空洞の鉛直断面図)

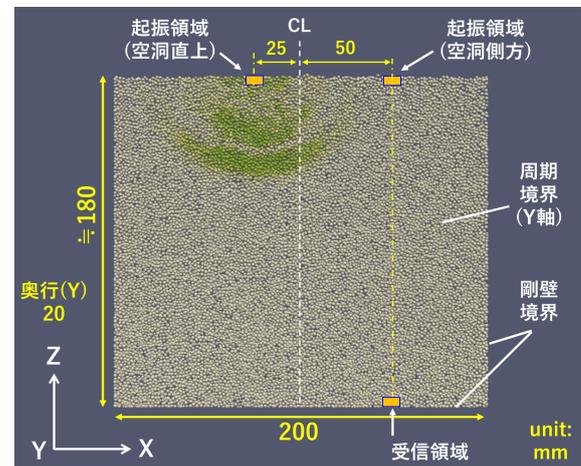


図2 作製した DEM 地盤と弾性波解析手法

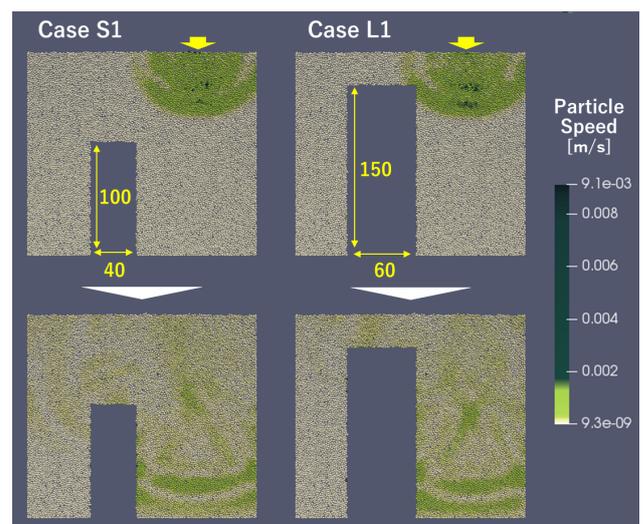


図3 空洞側方の波動伝播様子

キーワード 弾性波伝播, 個別要素法解析, 地中空洞, 動的計測

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6843

4. 空洞なし地盤における波動伝播

空洞なし地盤の場合、起振位置から深度方向に放射状に弾性波が伝播した(図2)。深度に比例して有効拘束圧は上昇するため、徐々に速度が増加する傾向が確認された。対象とする地盤モデルではX方向の境界を剛壁とするため、非現実的な反射波の影響を含むことを確認した。

5. 空洞側方の波動伝播

地盤中央から50mm(空洞中央から75mm)離れた表面を起振させた場合の伝播特性を図3に示す。空洞の大きさにかかわらず、鉛直下向きに伝播する波に及ぼす空洞の影響は限定的であった。図2に示す受信領域への到着時刻は空洞の有無にかかわらずほぼ同じであった。ただし、空洞側面で反射した波は複雑な伝播特性を示したため、空洞からの距離をパラメータとしたDEM解析を実施予定である。

6. 空洞直上の波動伝播

地中空洞の多くが下水管路の接続部から吸出しに起因することを踏まえて、その直上で起振させた場合の波動伝播特性を分析した。図4に示すように空洞天端での反射および回折した波が空洞に沿って伝播する様子が観測された。

受信領域粒子群の時刻歴応答および周波数スペクトルを図5、6に示す。空洞なしの場合に比べて、空洞が大きいほど波の立ち上がりが若干遅いこと、高周波成分が減衰することが確認された。

一方、起振位置に反射してきた波の到着時刻を測定したところ、空洞Sは0.495ms、空洞Lは0.225msであった。この時刻と、空洞天端までの距離(空洞S:80mm、空洞L:30mm)はおおよそ比例関係にあることより、表層での弾性波速度が既知の場合に空洞深度を推定するための一手法となり得ることが示された。

7. まとめ

本研究では地中空洞が存在する場合の弾性波伝播特性を理解するために個別要素法解析を実施した。地中空洞近傍を伝播する場合、均質な地盤に比べて伝播特性が大きく影響を受けることが示唆された。空洞直上で弾性波を発生させた場合、空洞天端位置で反射することが確認された。また、空洞位置で回折し深部まで伝達した場合、高周波成分が減衰する傾向を確認した。本論文ではP波伝播特性について報告したが、S波についても現在取り組んでいる。

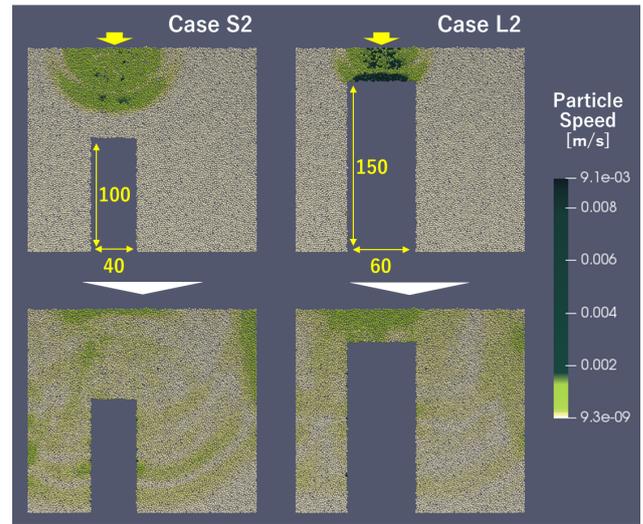


図4 空洞直上からの波動伝播様子

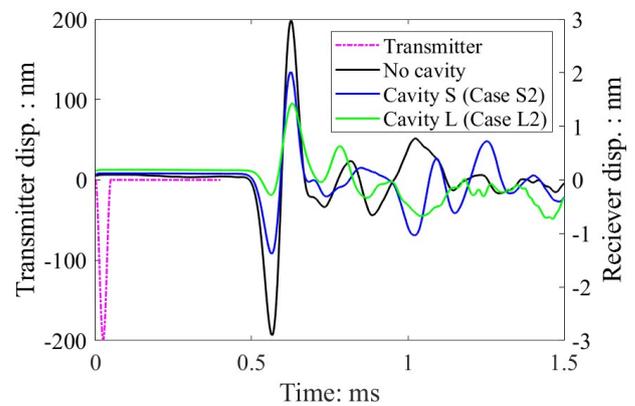


図5 受信領域粒子群の時刻歴応答

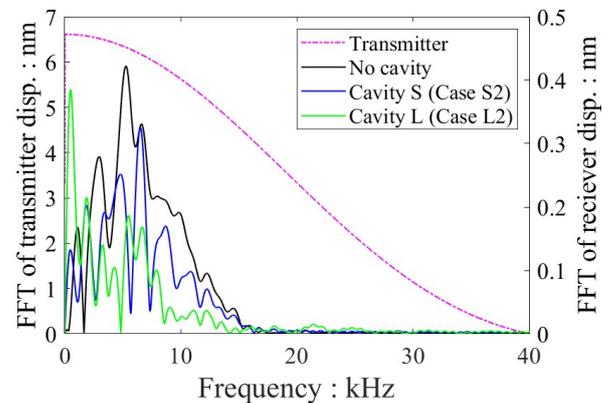


図6 受信領域粒子群の周波数応答

参考文献

- [1] 中田ら (2019) 弾性波伝播特性における地盤内空洞の影響に関する基礎的検討. 第54回地盤工学研究発表会. [2] Ali, et al. (2019) Implementation of suction-tension model for cavity simulations using DEM. 第54回地盤工学研究発表会. [3] Plimpton, S. (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. Journal of Computational Physics.