

局所的なゆるみを有する地盤内の弾性波伝播に関する個別要素法解析

大成建設株式会社 正会員 ○中田 祐輔
 東京大学生産技術研究所 国際会員 桑野 玲子
 東京大学生産技術研究所 国際会員 大坪 正英

1. 背景と既往研究

地盤陥没は近年大きな問題となっており、陥没が発生する前段階である地盤内空洞の段階で発見し対処することが有効であるが、物理探査では空洞を検知できない例¹⁾が報告されており、地盤内空洞周辺の弾性波伝播については十分解明されていないのが現状である。地盤内空洞を再現して行った模型実験²⁾では、空洞近傍を伝播する弾性波の速度だけでなく周波数特性も変化することが確認されている。本論文では、地盤内空洞周辺の、局所的なゆるみを有する地盤における弾性波伝播特性を理解することを目的とし、ゆるみ部と周辺地盤の境界部を再現したモデルで個別要素法による解析を行った。

2. 解析モデル

Ali ら³⁾によれば、地盤内空洞周辺では図1のようなゆるみが形成される。空洞近傍での弾性波伝播特性の変化にゆるみが与える影響を検討するため、空洞近傍を緩い層、空洞から離れた領域を密な層とした柱状モデルで単純化し(図1右図)、個別要素法による数値解析を行った。

解析はオープンソース LAMMPS⁴⁾を用いて行った。粒径 2mm の同一物性(土粒子密度 2.5、ヤング率 71.6GPa、ポアソン比 0.23)の粒子 3 万個をある柱状領域内にランダムに発生させ、3 軸方向から 100kPa の圧縮応力を与えることで図2に示す寸法の柱状モデルを作製した。モデルは Z 軸方向のみ壁面境界で、X、Y 軸方向は周期境界とした。ヘルツ・ミンドリッ接触理論を採用し、圧縮の際にモデルを二分して粒子間摩擦係数を 0.01 と 0.5 と分けることで、密度の異なる 2 層を作製した(壁面摩擦は 0.01)。作製されたモデルの間隙比は緩い層で 0.697、密な層で 0.565 であった。弾性波は両振幅 5nm、周波数 20kHz の正弦波 1 波分とし、壁面境界を Z 軸方向に変位させることで P 波を発生させた。この際に粒子間摩擦係数を 0.6 に増加させることで弾性挙動に着目した。S 波についても検討したが、本報では P 波の結果のみを報告する。

3. 弾性波速度

モデルの Z 軸中心線上に位置する粒子の変位を、時間領域に対して示した図を図3に示す。濃い色で示されている箇所が P 波の到達を表しており、その傾きが P 波速度である。いずれの方向から弾性波を発生させた場合についても、層境で密度と正の相関をもって速度が変化している様子が確認できる。密な層から緩い層に伝播させた際の P 波速度(図3(b))について一次回帰分析を行うと、密な層では 528m/s、緩い層では 343m/s となった。実際の計測では伝播途中の速度変化は観測することはできないため、弾性波速度は受信側端部までの到達時間から、伝播経路上の平均値として算出されることになる。

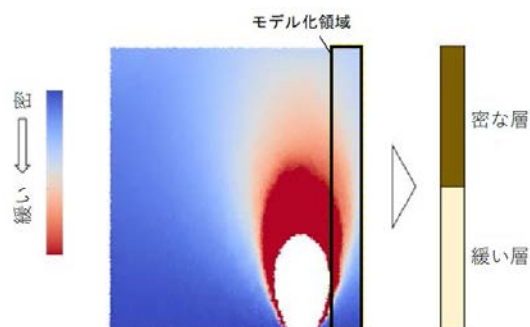


図1：モデル化領域の概念図

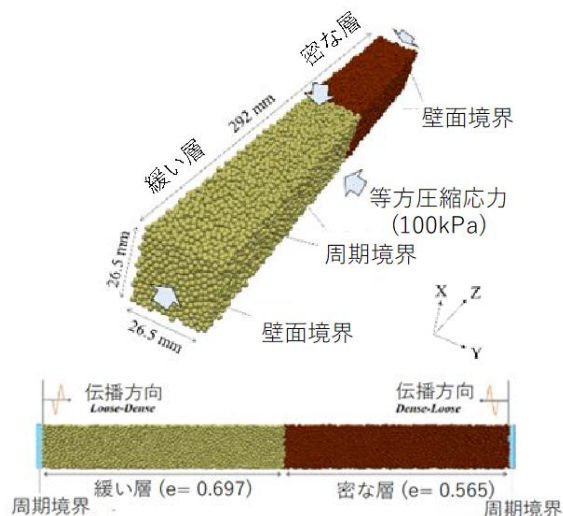


図2：解析に使用した DEM モデル

キーワード 地盤内空洞 弾性波探査 個別要素法

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 大成建設株式会社 土木設計部 TEL 090-4933-5606

4. 最大通過周波数

粒子の集合体は弾性波に対して周波数フィルターのように振る舞い、通過できる周波数の最大値 (f_p) は密度の大小と正の相関を示すこと確認されている⁵⁾が、密度の異なる層間の境界での挙動を、個別要素法を用いて検討した例はない。

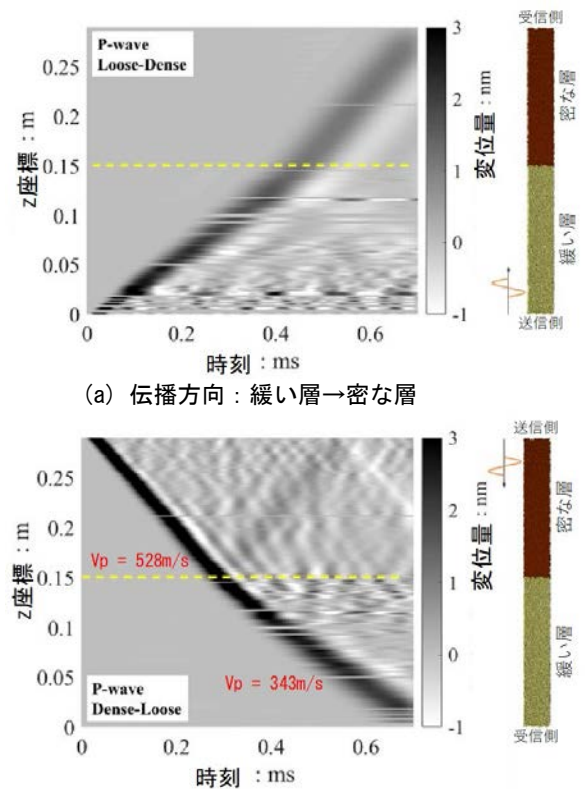
モデルの Z 軸中心線上の各粒子の変位に対してフーリエ変換を行い、周波数領域に対して示した結果を図4に示す。濃い色で表されている範囲が、粒子を通過した周波数領域を表している。密な層から緩い層に伝播するケース(図4(b))では、 f_p は密な層の内部で25kHz程度に達したのち、緩い層との境界において10kHz程度まで低下している。一方で、緩い層から密な層に弾性波を伝播するケース(図4(a))では、緩い層の内部で f_p は10kHz程度に達し、密な層との境界において目立った変化は見られなかった。弾性波速度と異なり、 f_p の値は、伝播経路上で密度が増加しても上昇せず、伝播経路上の最小値によって決定されることが確認された。

5. 今後の展望

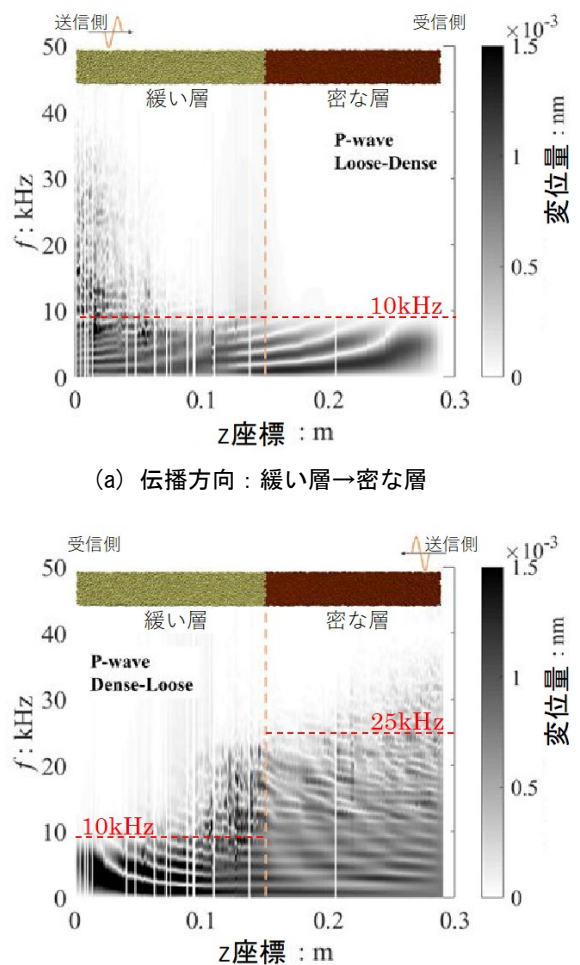
既往研究¹⁾では、空洞周辺地盤で物理探査を行い、密度低下の傾向を確認したものの、弾性波速度分布が平均化され空洞位置は特定できなかった。本解析からは、 f_p が緩い層で減少すること、地盤端部で受信される弾性波周波数の最大値が緩い層の f_p の値に支配されることが確認された。実際の試験への適用を考えると、空洞のない箇所での計測結果との f_p 値の比較から測線上のゆるみ領域を把握し、かつゆるみ領域の密度を推定できる可能性がある。また、速度分布が平均化されて検知しづらい局所的なゆるみも、測線上で f_p が十分に減少する長さがあれば、周波数に着目することで検知することができる可能性がある。今後模型試験において計測結果と密度分布を比較し、数値解析結果と比較して検討する。

参考文献

1. 小南ら (2018) 地盤陥没と水みちの関係と地下流水音測定の有効性, 東京大学修士論文.
2. 中田ら (2020) 地盤内空洞周りの弾性波伝播特性と応力伝達機構, 東京大学修士論文.
3. Ali, U. Otsubo, M. Kuwano, R. (2019) Suction-tension model for verifying ground cavity formation using discrete element method, Proceedings of the 15th International Conference on Geotechnical Engineering, December 5-7, 2019, Lahore, Pakistan.
4. Plimpton, S. (1995) Fast parallel algorithms for short-range molecular-dynamics, Journal of Computational Physics 117(1), pp. 1-19.
5. Otsubo, M., O'Sullivan, C., Hanley, K. J., Sim, W. (2017) Influence of packing density and stress on the dynamic response of granular materials, Granular Matter, 19(50), pp. 1-18, 2017.



(a) 伝播方向：緩い層→密な層
図3：中心軸上粒子の z 軸方向変位（時間領域）



(b) 伝播方向：密な層→緩い層（上）
図4：中心軸上粒子の z 軸方向変位（周波数領域）