杭撤去による地盤のＳ波速度変化を微動探査から推定する可能性

杭撤去　微動　Ｓ波速度変化

建築研究所　国際会員　○新井　洋
大阪大学　正 会 員　柏　尚稔
国土技術政策総合研究所　非 会 員　喜々津 仁密

1. はじめに

国土交通省の総合技術開発プロジェクト「建築物と地盤に係る構造規定の合理化による都市の再生と強靱化に資する技術開発」（2020-2023 年度）では，福岡市の協力を得て，4 階建て RC 造の杭基礎建物の解体撤去に伴う杭の引抜き前後の地盤物性の変化を把握する調査研究を行っている．その一環として，筆者らは，敷地の全体的な地盤物性の変化を簡便に評価する可能性を検討するため，杭撤去前後に微動探査を行う機会を得たので，その概要と結果を報告する．

2. 対象建物と敷地および微動観測の概要

図 1 に，対象建物の敷地と基礎伏図を示す．杭は，場所打ち RC 杭 15 本（杭径 700-900mm，杭長 12-14m）で，うち 10 本が撤去され，残り 5 本が存置された．杭撤去前の 2021 年 10 月と杭撤去後の 2022 年 4 月に，敷地内の 5 地点（図 1）で深さ 16-18m までの PS 検層が行われている．検層結果に基づく地盤の S 波速度（V_S）構造を，図 2 に破線で示す．

微動探査は，固有周期 1 秒の速度計を用いて，3 成分 1 点観測と鉛直動アレイ観測を行った．1 点観測は，建物の上部構造が解体中の 2021 年 10 月に，周辺の 4 地点（図 1 の○印）で行った．アレイ観測は，基礎梁とパイルキャップまで解体されて杭頭が露出した状態の 2021 年 12 月および全ての解体撤去が完了して整地された状態の 2022 年 3 月に，それぞれ行った．アレイの形状は，杭撤去前後ともに，直線（6 点×間隔 0.25m）および中心 1 点を持つ 5 角形（等価半径 1, 2, 4, 7, 15m）とした．等価半径 4, 7, 15m アレイの微動計配置を図 1 に示す．等価半径 7m アレイを展開した範囲が撤去杭の位置を概ねカバーしている．いずれの観測も，微動波形は増幅後，サンプリング周波数 100-500Hz で A/D 変換（24bit）し，モバイル PC に記録した．記録波形が定常性を保っている区間を選び，1024 ポイントのデータを 20-60 セット程度作成して，以後の解析に用いた．なお，直線アレイ観測では，その延長線上に成人 3 名を配置して，その場駆け足により高周波の鉛直動を励起させた．

3. 微動の H/V スペクトルと鉛直動の分散曲線

図 3 に，1 点観測から得られた建物周辺 4 地点の微動 H/V スペクトル[1)]を茶実線で示す．図中の緑破線は，杭撤去前の PS 検層結果（図 2 の緑破線）から，水平動のレイリー波 / ラブ波振幅比 = 0.7 と仮定して求めた基本モードの表面波の理論 H/V スペクトル[1)]である．図 3 より，4 地点の微動 H/V スペクトルは概ね一定であり，その周期特性は理論 H/V スペクトルのそれと対応していることから，深さ 20m 程度以浅の地盤は敷地内で水平成層構造と見なしてよいと考えられる．

図 4(a), 5(a)に，杭撤去前後のアレイ観測から得られた鉛直動の分散曲線（位相速度と周波数の関係）を，対応するアレイ規模ごとに○×□△印で示す．位相速度の解析には F-k スペクトル法[2)]および Wavenumber スペクトル法[3)]を用いた．図 4(a), 5(a)から，杭撤去の前後で，分散曲線は大きく異なっており，地盤物性の変化した可能性が示唆される．

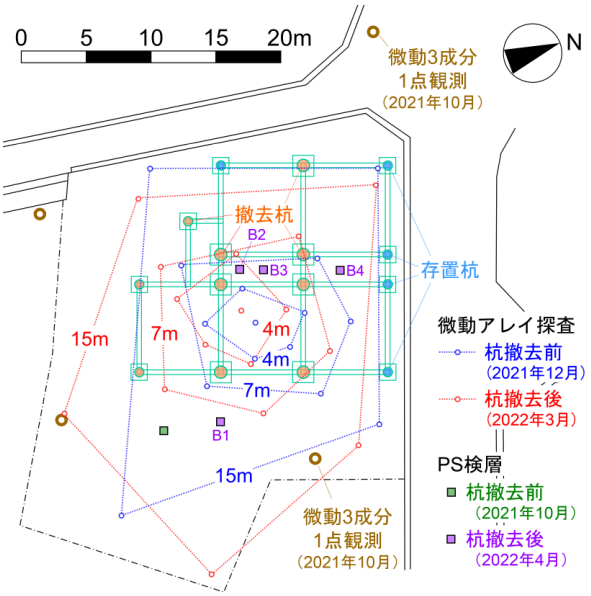

図 1　対象建物の敷地と基礎伏図および杭撤去前後の PS 検層位置と微動観測点（1 点観測とアレイ観測）

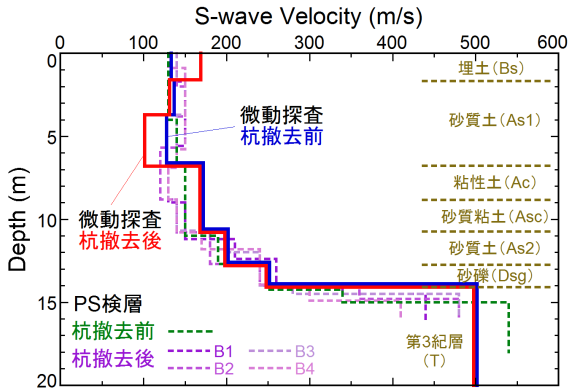

図 2　杭撤去前後の PS 検層結果に基づく地盤の S 波速度構造および微動探査による推定 S 波速度構造

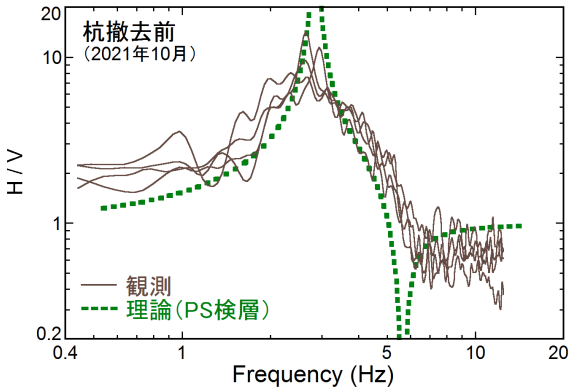

図 3　杭撤去前の微動 H/V スペクトルと PS 検層結果から算定した理論 H/V スペクトルとの比較

Possible Use of Microtremors to Estimate S-wave Velocity Changes Caused by Removing Piles

Hiroshi ARAI (BRI), Hisatoshi KASHIWA (Osaka Univ.) and Hitomitsu KIKITSU (NILIM)

© 公益社団法人 地盤工学会

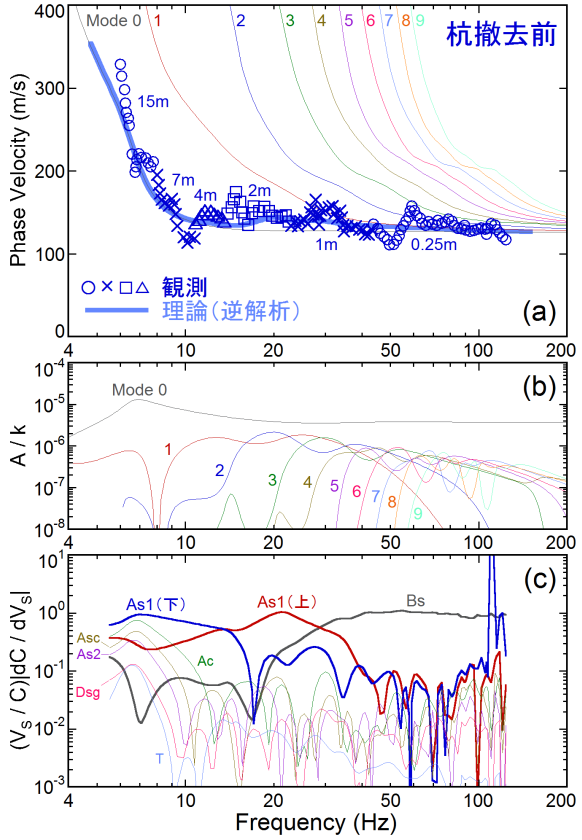

図 4 杭撤去前の鉛直動の分散曲線と逆解析で得られた推定 S 波速度構造から算定したレイリー波理論値との比較

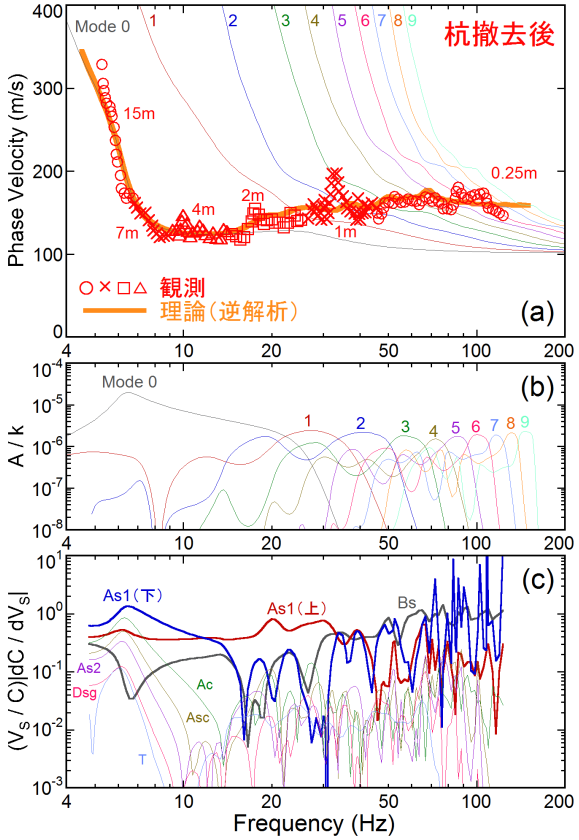

図 5 杭撤去後の鉛直動の分散曲線と逆解析で得られた推定 S 波速度構造から算定したレイリー波理論値との比較

4. 分散曲線の逆解析による地盤 S 波速度の変化

得られた分散曲線がレイリー波によるものと考え，基本モードから高次モードまで考慮した逆解析 [4]を行った．この際，図 2 の S 波検層結果に基づいて，地盤の深さ 14m 以浅を 7 層にモデル化し（それ以深は半無限体），各層の厚さ・密度・P 波速度は仮定した．また，各層の V_S は，後述する感度分析から，深さ 6.7m 以深では図 2 の検層結果を参考に仮定し，それ以浅の 3 層（埋土層 Bs，砂質土層 As1 上部，砂質土層 As1 下部）について同定対象とした．このため，杭撤去前後の地盤 V_S の変化は，深さ 6.7m 以浅の 3 層について検討する．

逆解析から推定された杭撤去前後の地盤の V_S 構造を，図 2 に実線で示す．ここで，図 4(a), 5(a)の太実線は，杭撤去前後の推定地盤構造に対応するレイリー波の基本モードから高次モードまで考慮した理論分散曲線 [4]である．いずれの理論値も観測値をよく説明しており，推定 V_S 構造の妥当性が示唆される．図 2 から，杭撤去前後の推定 V_S の変化は，埋土層 Bs（深さ 1.6m 以浅）で増加，砂質土層 As1 下部（深さ 3.7-6.7m）で減少の傾向が認められる．推定 V_S の増加は，杭撤去後の重機等による整地により地表面付近が締め固められたため，推定 V_S の減少は，杭撤去により地盤に緩み領域が生じたためと推察される．

図 4(b), 5(b)に，杭撤去前後のレイリー波のモード振幅スペクトル [5]を示す．図 4(a), 5(a)との対比から，杭撤去前の地盤では観測周波数の全域で基本モードが卓越し，位相速度は正分散となるが，杭撤去後の地盤では 20Hz 程度以上で高次モードが卓越し，逆分散となる．これは，図 2 より，地盤の推定 V_S が，杭撤去前は深いほど大きくなっているのに対して，杭撤去後は深さ 6.7m 以浅で逆の傾向となっているためで，改めて，高次モードの影響を適切に考慮することの重要性が確認される．

図 4(c), 5(c)に，レイリー波の位相速度に対する地盤各層 V_S の無次元化偏微分係数（感度）スペクトル [5]を示す．感度の相対的に高い地層の V_S が，その周波数帯の位相速度に大きな影響を与えることを意味する．すなわち，図 4(a), 5(a)との対比から，分散曲線の逆解析において，大凡，等価アレイ半径 r_e が 1m 以下の観測値から埋土層 Bs（深さ 1.6m 以浅）の V_S が，r_e = 1-2m の観測値から砂質土層 As1 上部（深さ 1.6-3.7m）の V_S が，r_e = 4-7m の観測値から砂質土層 As1 下部（深さ 3.7-6.7m）の V_S が，それぞれ同定されている．一方，深さ 6.7m 以深の地層の V_S は，それ以浅に比べて感度が相対的に低く，逆解析から信頼性のある同定結果を得ることが難しい．このことが，逆解析で深さ 6.7m 以深の V_S を仮定した理由である．

5. まとめ

微動探査は，杭撤去により地盤に緩み領域が生じたかどうかを掘削せずに把握するための簡便な手法として，現況の技術のままでも有効である可能性を指摘した．とくに，逆解析まで行わなくても，分散曲線の段階で，地盤 V_S に変化（緩み領域）の生じた可能性を推察できる点は，大きなメリットと言える．今後，さらに事例の蓄積が待たれる．

謝辞：建物解体に伴う杭の引抜き前後の微動観測では，福岡市に便宜を図っていただいた．記して謝意を示す．

<参考文献> 1) 時松，新井：AIJ 構造系論文集, **511**, 69-75, 1998.　2) Capon: Geophysics, **34**(1), 21-38, 1969.　3) Dainty & Harris: BSSA, **79**(4), 1231-1250, 1989.
4) Tokimatsu *et al*.: J. Geotechnical Engineering, ASCE, **118**(10), 1544-1558, 1992.　5) 斎藤：地震波動論，東京大学出版会, 359-387, 2009.

© 公益社団法人 地盤工学会