

改良地盤に支持された中層免震建物の振動特性に関する研究
(その1) 地盤改良の調査結果及びS波速度構造の推定

正会員 後藤圭佑*1 同 護雅史*2
同 福和伸夫*3 同 飛田潤*4

地盤改良 深層混合処理工法 等価せん断波速度
PS 検層 浅層レーリー波探査 ソイルセメントコラム

1. 背景と目的

名古屋大学医学部付属病院では、現在、外来診療棟の新築工事が行われている。著者らは、当該建物の振動特性を把握するため、土圧計や光ファイバーセンサーを多点に設置し、建設過程の各段階における土圧計測を定期的に行うとともに、施工時には地震計を建物内外に多数設置し、建物の地震時挙動を計測する予定である。これにより、動的相互作用効果を含めた建物の実挙動の解明が期待される。このような観測は過去に少ないので、今後の重要な資料となり得る。

当該建物では、直接基礎を実現するために、地盤の支持力向上及び液状化防止を目的として、地盤改良工事が行われている。本稿では、地盤改良前後に実施した地盤調査資料の分析や、各種静的・動的な土質試験結果に基づき、地盤改良効果について分析した結果を報告する。

改良地盤に支持された建物の振動性状を把握するためには、改良地盤の物性値を適切に評価する必要がある。そこで、本稿では、各種調査結果より得られる改良体及び未改良部のせん断波速度から改良地盤の等価せん断波速度の推定も試みる。

さらに、(その2)では、薄層要素法を用いた解析的検討により、インピーダンスの観点からその妥当性を評価する。

2. 地盤改良工事概要

敷地は名古屋大学鶴舞キャンパス内にあり、熱田台地と呼ばれる洪積台地と、大首根層と呼ばれる段丘面の境界付近に位置する。図1に本工事の平面図及び調査位置図を示す。建築面積は約100m×50mであり、基礎底面は地表面から深さ約3mに設定されている。図1に示すように、北西部を除く全建築面積の約4分の3が改良対象地盤となっている。地盤改良には、深層混合処理工法が用いられ、直径1.0m、中心間隔1.3m、深さ7.25mのソイルセメントコラムが2203本施工された。

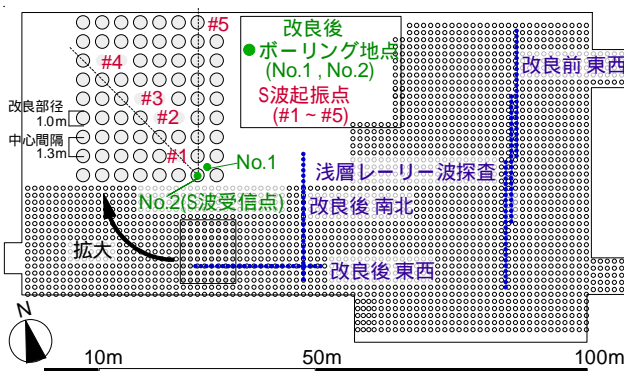


図1 地盤改良工事の平面図及び調査位置図

3. 地盤調査

地盤改良の前後で行われた調査内容を表1にまとめて示す。地盤改良前には、液状化調査の一環として凍結サンプリングを始め、詳細な調査が行われている。ここでは、地盤改良後に著者らが実施した、ボーリング調査及びPS検層について、改良前の結果と比較することで地盤改良効果を分析する。さらに、改良前後で実施した浅層レーリー波探査より、地盤のS波速度構造を推定¹⁾した結果についても併せて示す。

3.1 ボーリング調査結果

図2に地盤改良前後における地盤の柱状図及びN値に併せ、一軸圧縮試験より得られた改良体の圧縮強度 q_u 、変形係数 E_{50} の深さ方向分布を示す。改良後の柱状図から、未改良部は上部から砂礫を主とした埋土層(N値25-37)約3m、洪積砂層(N値11-32)約4m、洪積砂礫層(N値23-51)約3mで構成されており、砂礫層は比較的締まった状態である。表層部の約3mは、既存の基礎を掘り起こして解体したため、埋め戻し土となっている。この点を考慮して、4m以深の地層を改良前と比較すると、先の理由により、N値が減少している層もあるものの、ほぼ対応した結果が得られている。従って、未改良部の状態は、地盤改良後もある程度保持されていると考えられる。

3.2 PS検層結果

PS検層は改良前の地盤で一箇所、改良後にソイルセメントコラム(図1, No.2)のコアボーリング孔を利用して、GL-10mの深度まで1m毎に板叩き法によって実施した。改良前の調査は、当該建物の北東側で実施されており、改良後の位置と異なる。起振点は図中の印に示す5地点、#1, #2, #3, #4, #5であり、それぞれ受振点-起振点間隔が0.5m, 5.0m, 5.7m, 10m, 10mである。図3に地盤改良前後の結果を示す。これより、受振点-起振点間隔が広がる程せん断波速度 V_s は小さくなるこ

表1 地盤改良の前後に行われた調査・試験

改良前	改良後
・調査ボーリング(3)	・調査ボーリング
・孔内水平載荷試験(1)	改良部(1) 未改良部(1)
・標準貫入試験(3)	・標準貫入試験(2)
・PS検層(1)	1箇所は改良部先端
不攪乱資料採取	・S波速度検層(1)
・ロータリー式	改良部の孔を利用
・三重管サンプラー(2)	10m×3起振点
・凍結サンプリング(1)	・浅層レーリー波探査(2)
土質試験	東西・南北
・密度試験	直線アレイ23m
・含水比試験	土質試験
・液性限界	・改良部の一軸圧縮試験
・一軸圧縮試験	・圧密試験
・繰返し非排水三軸試験(液状化)	・繰返し三軸試験(動的変形)
	()内の数字は実施数量

と分かる。また、#4, #5の結果に有意な差は見られず、改良体の配列の影響は小さい。図3から、地盤改良対象層の平均的な V_s を概算すると、改良前では約220m/sである。一方、改良後については、受振点-起振点距離がある程度長い場合には、地

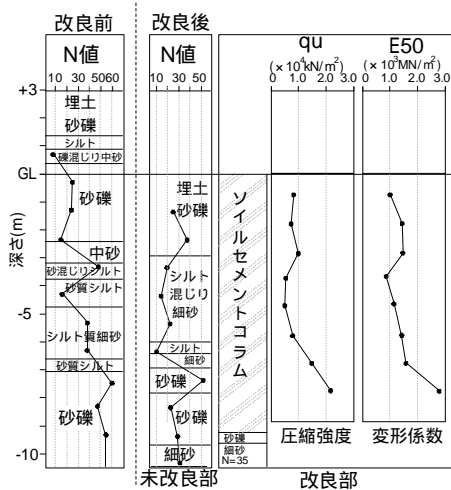


図2 改良前後のN値及び改良部の一軸圧縮試験結果

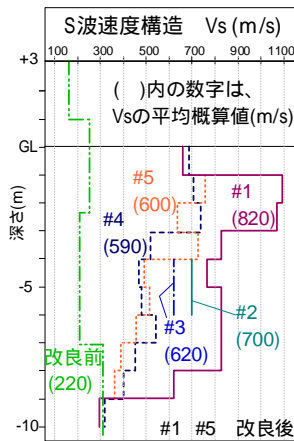


図3 改良前後のPS検層結果

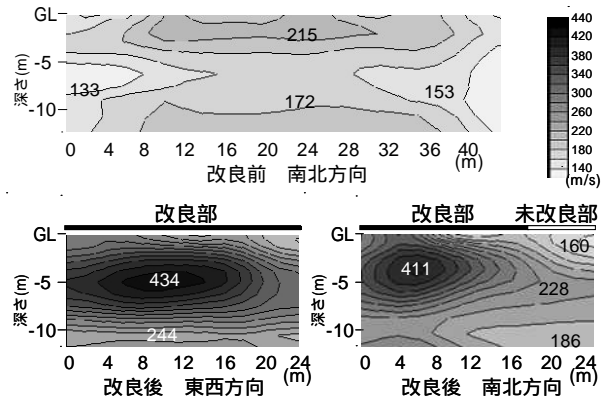


図5 浅層レーリー波探査によるS波速度構造の推定

盤全体の平均的な V_s を示していると考え、600m/s 前後と推定される。

次に、別の方法を用いて、改良体の等価な V_s を推定することを試みる。まず、受振点-起振点距離が小さい#1の結果は、ほぼ改良体の V_s (V_{s1} とする) と見なせるとして、これを同図から 820m/s とする。上述したように、図2より、改良前の地盤と改良後の未改良部の N 値に大きな差が見られないことから、両者の V_s (V_{sG} とする) は等しいと仮定する。以上から、改良体 ($V_{s1}=820\text{m/s}$) と未改良部 ($V_{sG}=220\text{m/s}$) から構成される地盤全体の等価な V_s を両者のせん断剛性における面積重み付け平均から求める ($V_{s_{ave}}$ とする)。その結果、 $V_{s_{ave}}=582\text{m/s}$ となり、PS 検層の結果に概ね対応する。

次に、圧縮強度 qu 及び変形係数 $E50$ から改良体の V_s を推定する。圧縮強度 qu と V_s の間には式[1]に示す近似式が成り立つ²⁾。また、初期変形係数 E_0 と V_s の間には、「 $E_0=2(1+\mu)V_s^2$ 」 μ :ポアソン比、 ρ :密度(g/m^3)の関係があるが、 $E50$ はある程度塑性化が進んだ状態(ひずみ度が 5×10^{-3} 程度)の変形係数であり、 $E50/E_0$ は5程度とされる²⁾。これらの関係から、 $E50$ と V_s の間には式[2]に示す近似式が成り立つ。ここでは、文献2)やPS 検層結果を参考に、 $\mu=0.3$ とし、 ρ は深さ方向の測定結果($1.8 \sim 2.2 \text{ g/m}^3$)を用いた。

$$qu=172\exp(0.005Vs)-172 \quad (\text{kN/m}^2) \quad [1]$$

$$E50 \times 5=2(1+\mu) V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2) \quad [2]$$

計算結果を#1におけるPS 検層結果と併せて図4に示す。圧縮強度、変形係数より推定される V_s はそれぞれ概ね 700~800m/s、1000~1200m/s であり、これらの間にPS 検層結果がある。なお、 qu 及び $E50$ は、深くなる程値が大きくなるが、これはGL-6.5m以深が砂礫層で含水率が低く、セメント改良効果が高いためと考えられる。一方、PS 検層結果は、深くなる程値が小さくなっており、この点は検討の余地がある。

3.3 浅層レーリー波探査結果

浅層レーリー波探査による調査結果について以下に示す。図1に示したように、改良前(ただし、表層部の約3mは取り除かれた後)は南北方向に43m、改良後は東西、南北方向に23m直線アレイを組んで計測した。観測波形から位相速度曲線(分散曲線)を求め、これよりS波速度構造を逆解析により推定した³⁾。図5に推定結果を示す。改良前と改良後-南北方向の未改良部における V_s はほぼ同等の値を示しており、両地点で地盤構造が大きく異なっていないことが分かる。 V_s は概ね400m/s程度まで向上している。ただし、PS 検層結果に比べると200m/s程小さくなっており、両者の関係については、さらに検討する必要がある。

ここで、(その2)でインピーダンスを算定するに先立って、PS 検層結果より求めた改良地盤のせん断波速度 $V_{s_{ave}}$ を既往の手法³⁾の低減率を用いて補正する。すなわち、図6において面積改良率 R 及び未改良地盤の V_s に対する改良部の V_s の比 a から低減率を定め、これを $V_{s_{ave}}$ に乗じ、改良地盤の等価せん断波速度 ($V_{s_{eq}}$ とする) を求める。その結果、 $V_{s_{eq}}=338\text{m/s}$ であった。浅層レーリー波探査結果は、これと比べてやや大きい。

4. まとめ

本稿では、地盤改良の効果やその評価について、各種調査結果を中心に検討した結果を示した。今後は、PS 検層結果、浅層レーリー波探査結果及び既往の研究³⁾により得られた改良地盤のせん断波速度値が異なる点等について、詳細な分析を実施する予定である。

4. まとめ

本稿では、地盤改良の効果やその評価について、各種調査結果を中心に検討した結果を示した。今後は、PS 検層結果、浅層レーリー波探査結果及び既往の研究³⁾により得られた改良地盤のせん断波速度値が異なる点等について、詳細な分析を実施する予定である。

謝辞、参考文献は(その2)にまとめて示す。

*1 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院

*2 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授・博士(工学)

*3 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博

*2 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授・工博

*1 Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya

*2 Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*3 Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

*4 Semi Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.