

上部構造物の耐震性を考慮した地盤改良の最適化に関する検討

小嶋啓介¹・丸尾晋一²

¹正会員 工博 福井大学助教授 工学部建築建設工学科(〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

²学生員 福井大学大学院 環境設計工学専攻(〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

通常の地盤改良では、支持力および剛性の確保が評価の中心であり、液状化対策などを除いて耐震性がクローズアップされることは少ない。本研究では、地盤改良に伴う振動性状の変化を、上部構造物への入力地震動を低減させる方向で利用し、耐震工学的見地から最適な地盤改良の評価・設計方法を検討する。はじめに、せん断土槽による加振実験により、改良層により、模型地盤の卓越振動数や応答倍率が変化することを検証した。ついで上記の問題を、上部構造物の最大応答加速度を目的関数と考え、その値を最小化するように、改良範囲や改良率の最適値を探索する最適化問題として定式化し、模型実験および数値モデルに適用した結果を示す。

Key Words : ground improvement, shear wave velocity, Q-value, laminar box, shaking table test, multi reflection method, optimization

1. まえがき

従来の地盤改良は、求められる支持力あるいは変形性の確保といった静的な問題に対処する手段として用いられてきた。ここでは、地盤改良に伴うせん断波速度や減衰特性の変化を利用して、上部構造物に悪影響を及ぼす入力動を効果的に低減する方法について、せん断土槽内に作成した模型地盤の加振実験と、重複反射法に最適化手法を組み合わせた数値シミュレーションの両面から検討する。

2. 模型地盤加振実験

図-1に模型地盤の加振実験に使用したせん断土槽と、模型地盤および加速度計の設置位置を示す。せん断土槽は、肉厚2mm、外径30mm×30mmのアルミ製角管で作成した内法の幅600mm、奥行き300mm、厚さ30mmの枠を、ローラーベアリングを介して、16段積み重ねた構造であり、内側にはゴムメンブレンが配されている。せん断枠は1段につき±25mmの水平移動量が確保され、土槽自体の共振振動数は1Hz以下であり、ロッキング等の影響も小さいことを確認している。

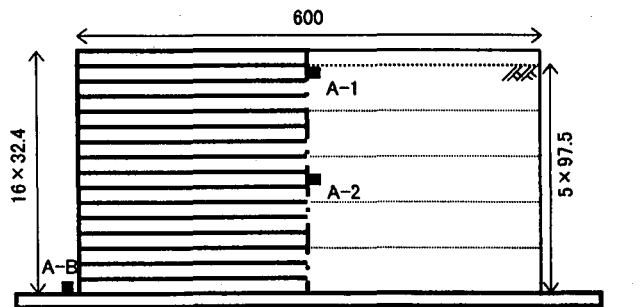
地盤材料としては、気乾状態(含水比はほぼ0%)の珪砂7号を用いた。珪砂7号の物理特性は、 $G_s=2.649\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=1.005$, $e_{\min}=0.787$, $D_{50}=0.195\text{mm}$ である。模型地盤の作成に際しては、空中落下の落下

高さと同程度の目開きならびに木槌による締固めを併用し、約4~95%の4種類の相対密度を実現した。せん断枠3段分を模型地盤の単位層厚とし、15段目までの5層分の厚さの地盤を作成した。表-1に今回実施した4ケースの相対密度を示す。表中のアルファベットは疎密の程度を示し、数字は層数を示している。たとえば、M2D3は、中密層が表層から2層で、密層がその下部に3層存在することを意味している。

図-2(c)は入力波の時刻歴である。入力波は、1~50Hzの定常波を乱数を用いて合成し、最大加速度を200galに調整して作成した。図-2(a)と(b)は、表-1に示す均一地盤であるD5とL5の、表層における応

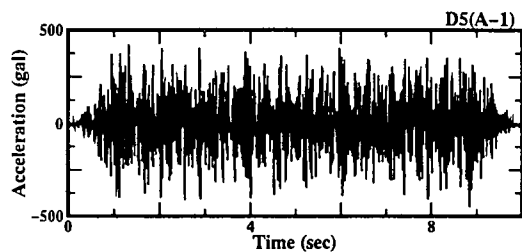
表-1 模型地盤の相対密度

| | | 相対密度(%) |
|------|-----|---------|
| D5 | | 95.8 |
| M2D3 | M2 | 57.9 |
| | D3 | 95.8 |
| L5 | | 3.6 |
| M'L3 | M'2 | 14.1 |
| | L3 | 3.6 |

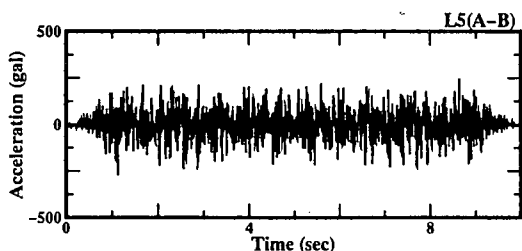


■加速度計 単位(mm)

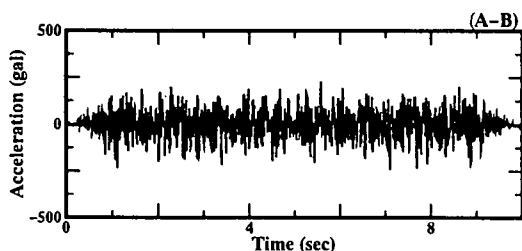
図-1 せん断土槽と模型地盤の概要



(a) D5の表層応答加速度



(b) L5の表層応答加速度



(c) 入力加速度

図-2 模型地盤の加速度時刻歴

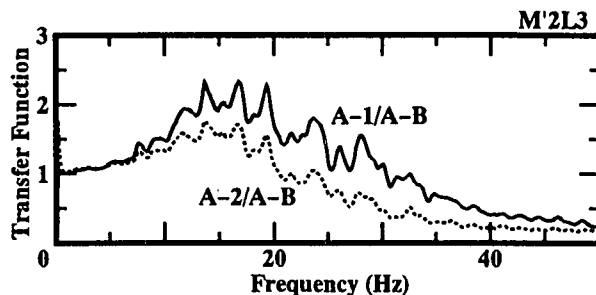
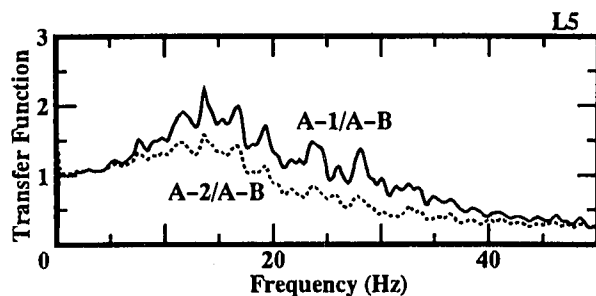
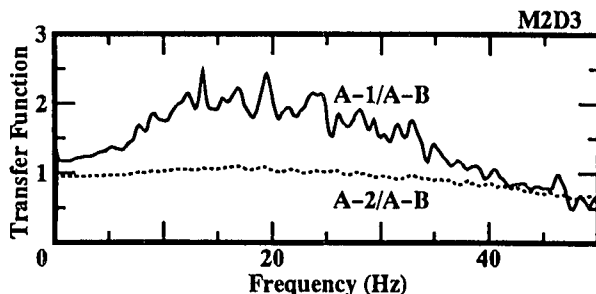
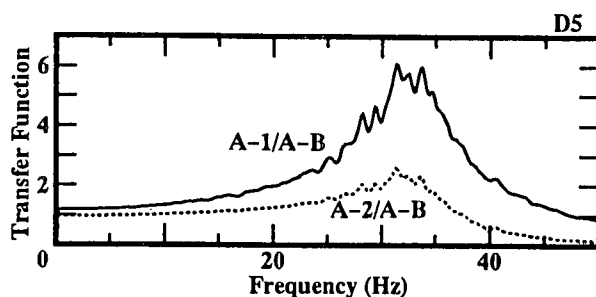


図-3 模型地盤の表層、中間層の応答倍率

答加速度時刻歴であるが、全層を密としたD5の方が最大応答加速度が大きくなっている。

図-3は各ケースで、入力(加速度計 A-B)に対する表層(A-1)および中間層(A-2)の応答倍率を示している。応答倍率の周期特性は中層、表層ともに良く似た傾向を示しており、全体としてみた場合には、単一のピークを有すように解釈できる。卓越振動数は、D5、M2D3、M'2L3、L5の順に低い方向にシフトしていることが見て取れるが、相対密度が小さくなるにつれてシャープさが失われ、やや乱れた応答特性が現れる傾向も認められる。

模型地盤では密度の変化を地盤改良の効果と見なし、たとえば、元の地盤が密な D5 の状態にあるとした場合、M2D3 は、上層2層を柔らかく改良したことになる、また、元の地盤が緩い L5 の状態にあるとした場合には、M'2L3 は、上層2層を硬く改良したと見なすことができる。D5 から M2D3 に改良した場合、卓越周期は 33Hz 付近から、18Hz 程度に低くなり、最大応答倍率も 6 程度あったものが、2.5 まで低減されている。L5 から M'2L3 では、改良層である M'層が未改良層の L 層と相対密度に大きな差がないことから、密な地盤ほど顕著な変化は見られないが、いずれにしても、相対密度を変化させることにより、卓越周期をずらすこ

とは可能であることが確認される。

3. 地盤改良の最適化手法の定式化

水平成層地盤上の 1 質点構造物の応答は、基盤への入力地震動→重複反射法による地表面振動→構造物の応答という径路で容易に求めることができる。地盤改良により、対象層のせん断波速度 V_s と Q 値が変化すると、構造物への入力地震動も変化することになる。ここでは、地盤改良による V_s と Q 値の変化は、次のように独立に設定できると仮定する。

$$V_s^i = V_{s0}^i \times C_v^i, \quad Q^i = Q_0^i \times C_Q^i \quad (1)$$

ここに、1 : 改良対象層、 C_v 、 C_Q : せん断波速度と Q 値の改良率、 V_{s0} 、 Q_0 : せん断波速度と Q 値の改良以前の初期値をそれぞれ示している。実際の注入、

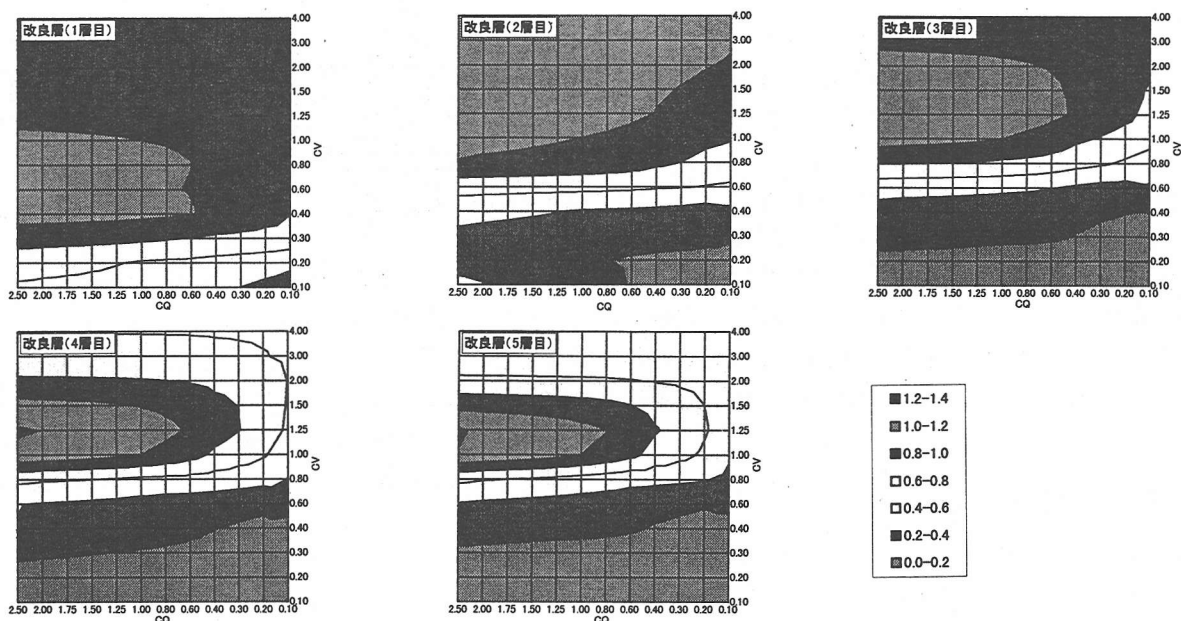


図-4 せん断波速度とQ値の変化に伴う最大応答加速度のコンター

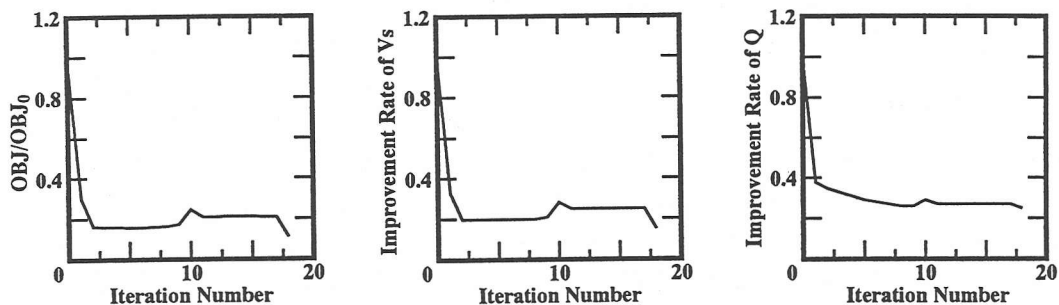


図-5 Case-1: 第2層を改良対象とした場合の逆解析結果

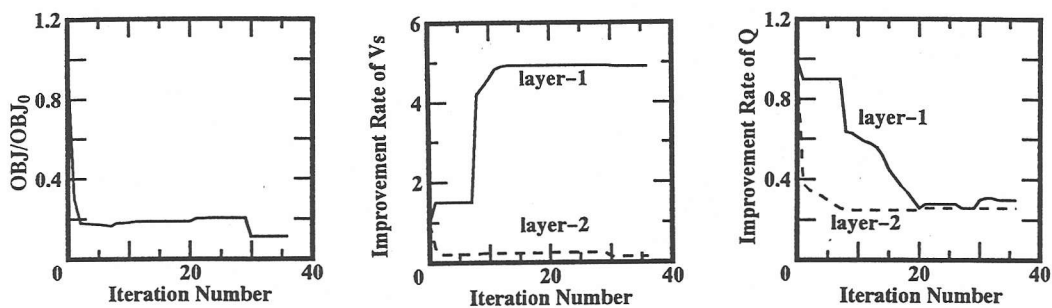


図-6 Case-2: 第1, 2層を改良対象とした場合の逆解析結果

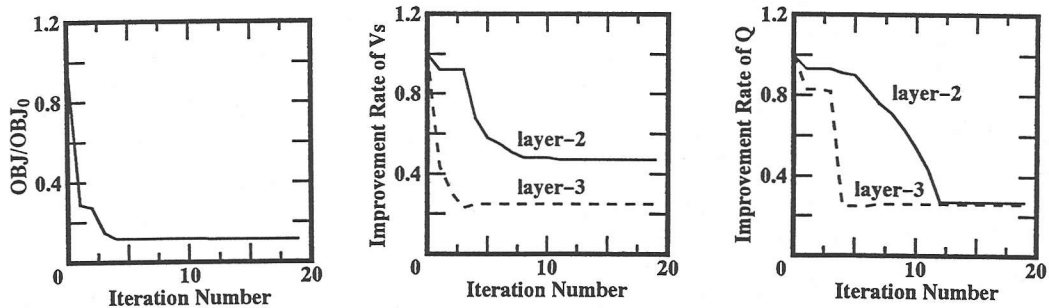


図-7 Case-3: 第2, 3層を改良対象とした場合の逆解析結果

固化等の改良工法を念頭においた場合には、改良率にはおのずと限界があり、せん断波速度が初期値より小さくなるとは考え難いこともあるが、ここでは実現可

能か否かはとりあえず問わないこととする。ただし、改良率の上下限については、常識的な範囲として、とりあえず次のような条件を設定した。

$$0.2 < C_v < 5.0, \quad 0.2 < C_q < 5.0 \quad (2)$$

地盤改良によって、上部構造物の耐震安定性の向上を図ろうとする場合、次のような2つのケースが考えられる。

Case-A: 特定の構造物のみを対象にする場合には、その固有周期が与えられているため、地盤改良によって、地盤の固有周期をずらすことによって、構造物の応答が小さくなることが予想される。したがって、評価関数 J として、構造物の地震時最大応答加速度 α_{max} を採り、その最小値を与えるような地盤改良度の決定問題として次のように定式化される。

$$J = \alpha_{max} \Rightarrow \text{minimize} \quad (3)$$

Case-B: 新規造成地のように、構造物が特に限定されていない場合には、様々な振動特性を持つ多様な構造物の集合全体の耐震性の向上を図る必要がある。ここでは、Housner のスペクトル強度 I_h の考え方を取り入れ、次式を目的関数として採用する。

$$J = I_h = \int_{f_1}^{f_2} S_v(h, T) dT \Rightarrow \text{minimize} \quad (4)$$

ここに、 S_v : 速度応答スペクトル、 T 、 h : 構造物の固有周期と減衰定数、 f_1 、 f_2 : 構造物の固有周期の上下限をそれぞれ示す。

特定の基盤入力波を対象とする場合には、地盤改良によって、その卓越周期付近の帯域の増幅を妨げ、 f_1 から f_2 までの周期域の表層の応答を低減する改良方法も存在すると思われる。しかしながら、2で示した実験のように、広い周期帯域にわたる成分を有する入力地震動を対象とする場合には、式(4)の適用は困難と考えられるため、この報告では式(3)の適用結果のみを示す。また、最適化計算にあたり、制約条件はSUMTによりを取り入れ、最適化ルーチンとしては、準Newton法に属するBFGS法を用いた。

はじめに5層からなるモデル地盤上に、地盤の卓越周期と同等の固有周期を持つ1質点構造物が存在するモデルを考える。図-4はせん断波速度とQ値の改良率を変化させて、最大応答加速度である目的関数の変化を調べたものである。改良対象層を1層目とした場合には、せん断波速度を大きくする方向では、効果がほとんど現れず、小さくする方向でも初期値の20%程度まで減少させない限り、明確な効果が現れない。一方、3、4、5層を改良層とする場合には、せん断波速度を小さくする方向での効果はより大きくなり、大きくする方向でも、ある程度の効果が見込めることがわかる。

図-5は2層目を改良層としたCase-1の最適計算結果であり、左から構造物の最大応答加速度である目

表-2 逆解析結果の一覧

| 解析モデル | Case-1 | | Case-2 | | Case-3 | |
|--------------|----------|------|----------|------|----------|--|
| | 2層 | 1層 | 2層 | 2層 | 3層 | |
| 改良層 | | | | | | |
| 改良度(V_s) | 0.15 | 4.91 | 0.15 | 0.47 | 0.25 | |
| 改良度(Q) | 0.25 | 0.30 | 0.26 | 0.27 | 0.26 | |
| 初期目的関数 | 16369.96 | | 16369.96 | | 16369.96 | |
| 改良度(OBJ) | 0.11 | | 0.11 | | 0.12 | |

的関数とその初期値で基準化した値、せん断波速度の改良率およびQ値の改良率を示している。 V_s 、Q値ともに減少する方向に探索され、それともない目的関数が劇的に減少し、その後は V_s 、Q値ともに制約条件の下限付近で推移している様子が認められる。式(2)の制約条件を考慮して、図-4のコンターをみれば、最適化計算によって、目的関数の最小値を与える改良率が推定されていることが確認できる。

次に任意の2層を改良対象とした場合を示す。図-6は上層の2層を改良層としたCase-2、図-7は2、3層目を改良層としたCase-3の最適化計算結果である。Q値の改良率はどのケースでも制約条件の下限付近に推定されているのに対し、せん断波速度は、Case-2では1層目が硬く、2層目が柔らかくなる方向に、またCase-3では、3層目が制約条件の下限付近、2層目も初期値の50%程度に減少する方向に探索されている。Case-2では、1、2層間で透過係数が小さく、Case-3では、1、2層間と2、3層間のそれぞれで透過係数が小さくなるように、せん断波速度が探索されるとも解釈できる。表-2は3ケースの逆解析結果の一覧であるが、地盤改良の効果は、ほとんど同一であり、ここで示した複数の層を改良するケースでは、予想外に効率が悪いという結果も示された。さらに、複数の層を改良対象とする場合には、解の一意性の確認、効率的な改良層の選択など、今後検討すべき問題も山積している。

4. あとがき

水平堆積地盤上の1質点構造物を対象とし、地盤改良によりせん断波速度と減衰定数を変化させられるものとして、構造物の耐震安定性の面から見た最適な地盤改良方法について検討を行った。しかしながら、現実にはせん断波速度や減衰定数が自由に变化させられることは困難であり、既存の地盤改良法によって、せん断波速度やQ値がどの程度変化するかなど、実務へ応用する際の基本的な問題点について、今後段階的に検討を加える予定である。

参考文献 1)小嶋, 丸尾, 西畑, 塩谷: 上部構造物の耐震安定性を考慮した最適な地盤改良法の検討(2), 土木学会第54回年次学術講演会概要集, III, 1999, 投稿中.