

上部構造部の耐震安定性を考慮した地盤改良の最適化に関する検討

○(株)塩浜工業 正会員 佐藤 毅
福井大学工学部 正会員 小嶋 啓介

1. まえがき 従来の地盤改良は構造物の重量に耐える支持力の確保や、有害な変形を防止するというように、主に静的な問題を対象に論じられてきた。しかしながら、地盤改良に伴う剛性および減衰特性の変化により、地震動の伝播特性も変化するため、支持力や剛性を確保しつつ、上部構造物への入力地震動を低減できるような改良法も存在するはずである。ここでは、地盤改良に伴う動的パラメータの変化を利用して、上部構造物への入力地震動を低減するための最適な地盤改良法を、動的パラメータの最適化問題としてモデル化し、共役勾配法およびGAを用いて数値シミュレーションを実施した結果を報告する。

2. 最適化問題の定式化 水平成層地盤上の1質点構造物の応答は、重複反射による地表面振動+構造物の応答という経路で、2次元および3次元問題の場合は、時間領域の動的FEMにより各々求められるとする。地盤改良に伴う動的パラメータの変化について、次の二通りの仮定を設ける。第1のケースは、せん断波速度 V_s および Q 値(減衰定数 h)が独立に改良できるとする場合、第2のケースは、地盤改良の効果を1軸圧縮強度で評価することが多いことを考慮し、1軸圧縮強度を媒介とし、 V_s および Q 値が従属的に修正される場合である。

Case-1 $V_s^l = V_{s0}^l \times C_v^l, Q^l = Q_0^l \times C_Q^l$ (1)

Case-2 $q_u^l = C_{qu} \times q_{u0}^l$ (2) $V_s = 138.3qu^{0.417}$ (3) $1/Q \cong 0.033 + 0.00039V_s$ (4)

ここに、 C_v, C_Q, C_{qu} :改良層 l のせん断波速度、 Q 値および1軸圧縮強度の改良率、 V_{s0}, Q_0, q_{u0} :改良層のせん断波速度、 Q 値および1軸圧縮強度の改良前の値である。実際の注入、固化等の改良工法を念頭に置いた場合、改良率には上下限があるので、その上下限については別途設定する必要がある。特定の上部構造物を対象とする場合、その動的安全率を最大にするような改良方法を求めることになるが、研究の第1段階として構造物を線形弾性とし、評価関数 OBJ として式(5)および(6)のように、構造物の地震時最大加速度 a_{max} または層間変位などを最小とする地盤改良度の決定問題として定式化する。

$J = a_{max}(C_v^l, C_Q^l) \rightarrow minimize$ (5)

$J = a_{max}(C_{qu}^l) \rightarrow minimize$ (6)

なお、式(5)、(6)を最小化する改良度の決定には、準ニュートン法に属するBFGS法と、単純ルーレットルールとエリート選抜に基づくGA(Genetic Algorithm)を利用したそれぞれの場合についてシミュレーション結果を示す。なお、GAを適用するにあたって、適応度関数としては式(5)あるいは(6)の逆数を採用した。

3. 適用結果 図-1は、典型的な沖積平野上に単純な1層構造物が直接基礎によって建設される場合を想定した有限要素分割図である。図の第1層あるいは1、2層の軟弱層を地盤改良範囲として設定し、エルセントロ波を入力した場合の検討を行う。はじめに、図-1の地盤および構造物を1次元問題とし、GAを用いて最適化を行った結果を示す。この場合、図-1に示した改良範囲は水平方向に無限に広がっていることになる。また、改良度の上下限は、初期値の50~150%に設定した。

図-2は第1層および第1、2層を改良対象とした場合のCase-1の50世代までの最適計算過程を示している。同図中のOBJで示したAve.とBestとは、GAにおける全個体の平均値と最適個体の値をそれぞれ示している。表層のみを改良層としても効果は小さいのに対し、表層と第2層を改良層とする場合には、表層を硬く、第2層を相対的に軟らかく改良することにより、構造物の応答加速度を小さくできることがわかる。図-3は表層と第2層を改良対象とした場合で、Case-1と2の最適化過程を示している。Case-2では、 V_s と Q が1軸圧縮強度の改良率を介して、式(3)および(4)によって従属的に改良されるため、自由度が大きいCase-1に比較して改良効果は相対的に低いことがわかる。図-4および5

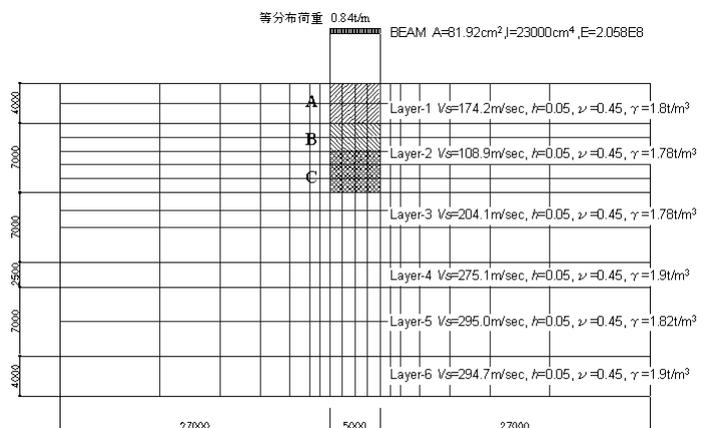


図-1 モデル地盤の有限要素メッシュと動的物性定数

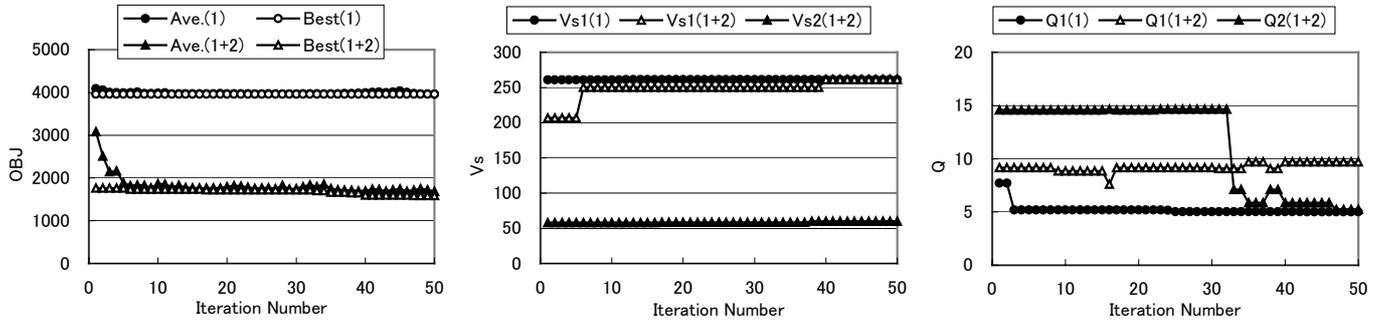


図-2 1層および1, 2層を改良対象とした場合の最適化計算過程

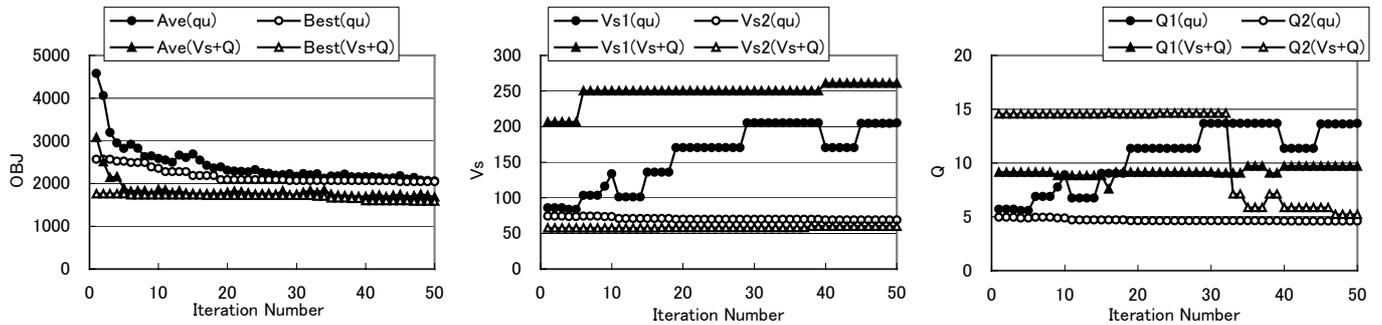


図-3 Case-1と2の最適化計算過程

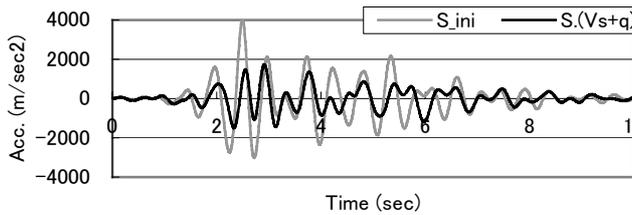


図-4 Case-1の最適化による構造物の応答の変化

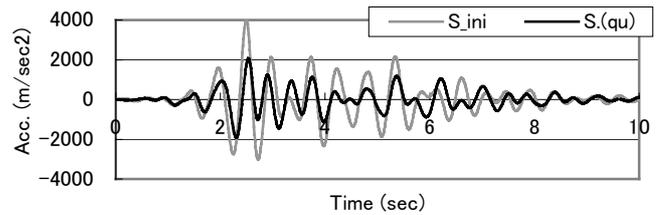


図-5 Case-2の最適化による構造物の応答の変化

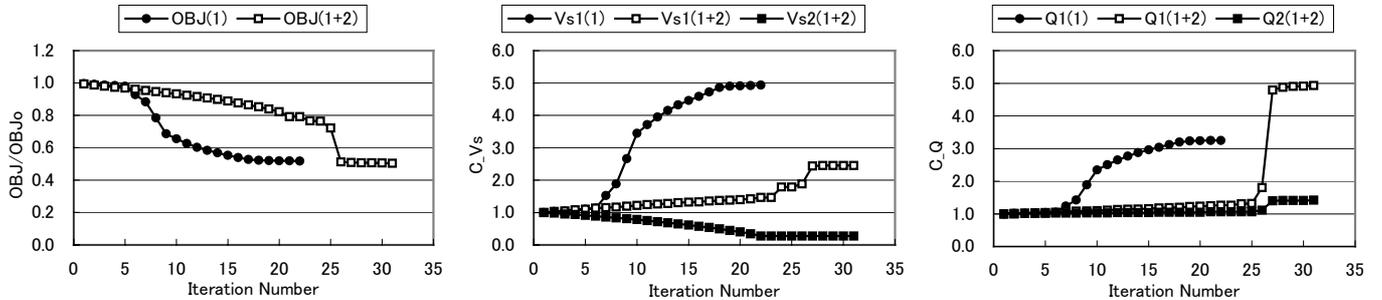


図-6 1層および1, 2層を改良対象とした場合の最適化計算過程（FEM）

は図-3に対応する、構造物の改良前後の応答加速度を示している。改良前は4000gal程度あった最大加速度が、改良に伴ってそれぞれ1600ならびに2000gal程度まで改善されていることが認められる。

次に、図-1のモデルの応答を動的FEMによって求めた場合の適用結果の1例を示す。この例では、改良度の上下限として、20~500%に設定し、BFGS法を採用した場合の結果のみを示す。図-6は改良範囲として、表層のみとした場合（Aの範囲）と表層+第2層とした場合（A+B+Cの範囲）の最適計算過程を示している。建物直下の比較的狭い範囲を改良域に設定しているにも関わらず、構造物の応答を50%程度まで低減できていることがわかる。上部2層を改良範囲に設定した場合、先の例と同様に、第1層は硬く、第2層は軟らかく改良することにより、表層への地震動の伝播を抑える効果が高いことが確認できる。実際には、軟らかく改良することはないが、軟弱層の下部の一部を未改良のまま残すような施工は検討の余地があると思われる。

4. あとがき 構造物基礎地盤の改良に伴う動的パラメータの変化を利用して、構造物の地震時安全率を最大にするような最適な地盤改良法を探索する問題を、動的パラメータの最適化問題としてモデル化し、共役勾配法およびGAを用いて数値シミュレーションを実施した結果を報告した。今後、計算時間を要する動的FEMとGAの組み合わせに対し適用例を蓄積し、共役勾配法との比較検討を行い、解の信頼性などを検討していく予定である。