格子状地盤改良に対する擬似 3 次元解析手法の適用条件の検討

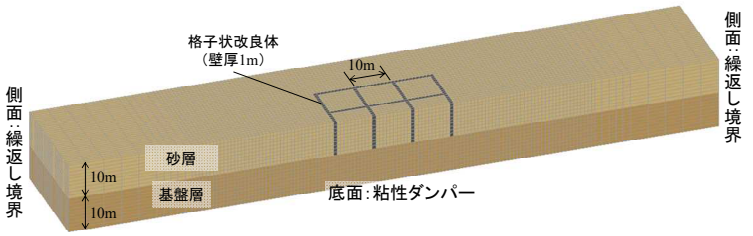
竹中土木　　正会員　○今井 政之、津國 正一
竹中工務店　　正会員　　金田 一広

１．はじめに

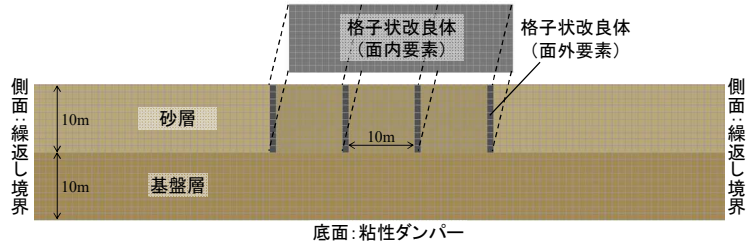
液状化対策工法の一つである格子状地盤改良工法において高度な設計を行うためには、非線形性を考慮した 3 次元 FEM 解析が一つの方策として考えられるが、解析モデル作成や計算に多くの時間を費やすため、実設計での活用は難しい。一方、格子状地盤改良の数値解析において、3 次元形状を 2 次元で模擬する擬似 3 次元モデルが提案されている [1]。過剰間隙水圧比に着目して、3 次元モデルと擬似 3 次元モデルの比較を行うと、擬似 3 次元モデルでは改良体の剛性を低減することで 3 次元モデルの水圧比に近づくことが既に報告したとおりである [2]。本論文では、水圧比だけでなく改良体にかかる応力に着目して両モデルの比較を行い、条件設定を検討するものである。

２．解析条件

数値解析は解析コード MuDIAN に地盤の構成式として YT モデルを導入して実施した。土の骨格曲線は双曲線モデルとし、液状化強度曲線から累積損傷度を用いて液状化を評価している。**図 1**(1)に 3 次元モデルを示す。半断面でモデル化しており、液状化層である砂層とその下に液状化しない基盤層をそれぞれ厚さ 10m と設定した。格子状改良体の壁厚は 1m、格子間隔（内寸法）は 10m とした。境界条件は、側方は繰返し境界、底面は粘性ダンパーとした。**図 1**(2)に擬似 3 次元モデルを示す。格子状改良体を面外要素と面内要素に分け、面外要素は砂層・基盤層と併せてモデル化し、面内要素は対応する面外要素に重なるように作成する。面内要素と面外要素は、面外要素部の 2 重節点を等変位拘束としている。格子間隔に合わせて、面内要素の厚さを 1m、格子内地盤の厚さを格子間隔と同じ 10m に設定した。解析に用いたパラメータを**表 1** に示す。擬似 3 次元モデルで格子状改良の解析を行う場合、奥行方向の変形が考慮できないために 3 次元と比較して改良体が格子内地盤要素を過剰に拘束すると考えられる。そのため、改良体の剛性を低減させることで擬似的な曲げを考慮することとする。**表 1** に示す改良体の剛性 G_0 は 3 次元モデルによる解析で用いた値であり、擬似 3 次元モデルでは剛性を低減した解析を行っている。なお、格子状改良体の面内要素および面外要素の両方の剛性を低減させることとした。入力地震動として**図 3** の不規則波を基盤層底面に 2E で入力した。



(1) 3 次元モデル



(2) 擬似 3 次元モデル

図 1　解析モデル

表 1　解析パラメータ

パラメータ	砂層	基盤層	改良体
ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.26
間隙率 n	0.455	0.455	—
透水係数 k(m/s)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	—
粘着力(kN/m²)	1	50	—
内部摩擦角 φf(°)	40	40	—
液状化強度 R_{L20}	0.146	—	—
初期せん断弾性係数 G_0(kN/m²)	5.06×10^{4}	4.29×10^{5}	9.3×10^{5}
初期平均有効応力 σ_{ref}(kN/m²)	200	500	—

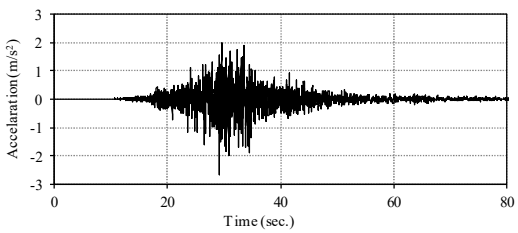


図 2　入力地震動

キーワード：液状化、格子状地盤改良、地震応答解析
連絡先：〒136-8570 東京都江東区新砂 1-1-1　株式会社竹中土木　Tel:03-6810-6307

3．解析結果と考察

図 3 に、格子中央部における過剰間隙水圧比の最大値の深度方向での分布を示す[2)]。擬似 3 次元モデルにおいて、改良体の剛性が初期値（2D-100%）のときは、地表付近以外で 3 次元モデルよりも水圧比が抑えられている。改良体の剛性を初期値の 25%（2D-25%）まで低減すると、全深度に渡って 3 次元モデルの水圧比と近い値となることが分かる。

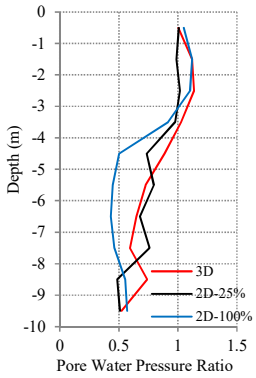


図 3　最大過剰間隙水圧比の深度分布

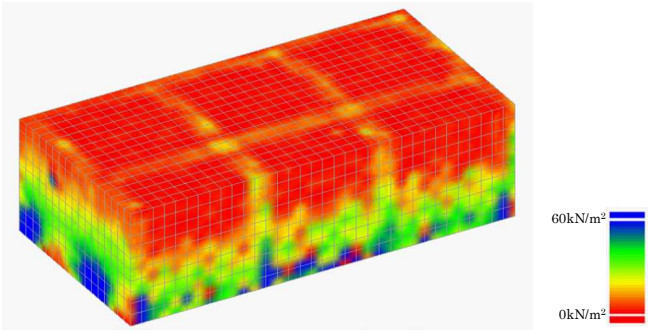
図 4 に加振開始から 30.6 秒時点での平均有効応力σ_m分布図を示す。3 次元モデルでは、地盤中央まで平均有効応力が 0 になり液状化している。擬似 3 次元モデルで剛性 100%のときは、液状化の範囲は地表から 1/3 程度の深さに留まっている。擬似 3 次元モデルで改良体の剛性を 25%まで低減すると、液状化の範囲が地表から深いところまで進行し、3 次元の結果に近づくことが分かる。この結果は図 3 で示した最大過剰間隙水圧比の深度分布とも一致する。

図 5 に、改良体にかかる最大せん断応力τ_{max}分布図を示す。擬似 3 次元モデルでは、改良体の面内要素と面外要素のみを表示している。剛性 100%の擬似 3 次元モデルで改良体にかかる最大せん断応力は、他の 2 ケースと比べて大きい。剛性そのものは 3 次元モデルと同じだが、擬似 3 次元モデルでは奥行き方向の変形が考慮されないことから、より拘束されていることから大きな応力がかかっていると考えられる。剛性を 25%まで低減させることで改良体にかかる応力が小さくなり、3 次元モデルの結果に近づく。

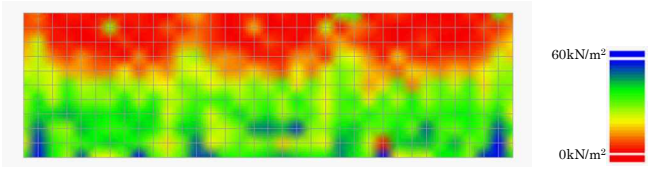
4．最後に

格子状地盤改良に対して、3 次元モデルと擬似 3 次元モデルによる解析を行った。格子内地盤の平均有効応力の分布および改良体にかかるせん断応力について比較したところ、擬似 3 次元モデルでは改良体の剛性を低減させることで、3 次元モデルの結果に近づくことが分かった。ただし、低減率については今回の地盤条件、格子状地盤改良の設定に対してフィッティングを行った結果であり、条件により値が変わることに注意する必要がある。

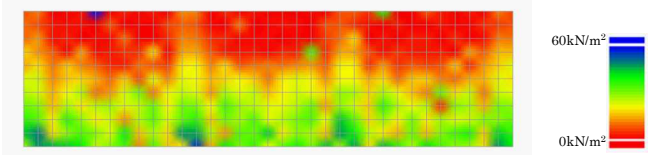
参考文献 : 1) 高橋ら(2012) : 液状化対策としての格子状固化処理工法の改良深さ低減に関する研究、 港湾空港技術研究所報告、Vol.51、No.2　2) 今井ら(2017) : 擬似 3 次元モデルを用いた格子状地盤改良工法の解析検討、土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-226



(1) 3 次元モデル

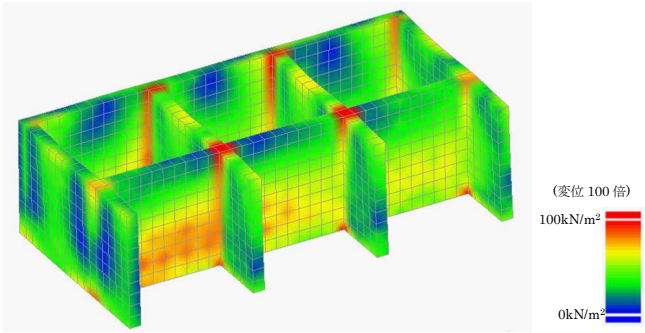


(2) 擬似 3 次元モデル（剛性 100%）

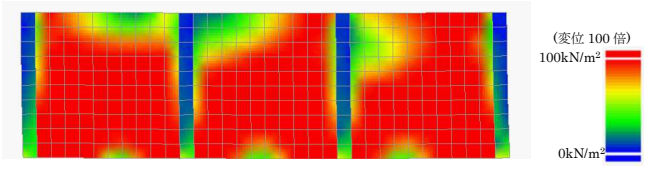


(3) 擬似 3 次元モデル（剛性 25%）

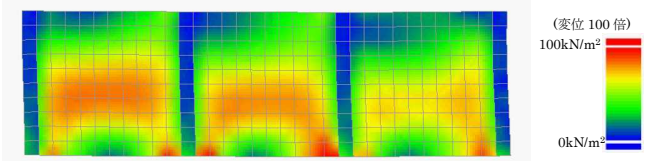
図 4　平均有効応力σ_m分布図（30.6 秒時点）



(1) 3 次元モデル



(2) 擬似 3 次元モデル（剛性 100%）



(3) 擬似 3 次元モデル（剛性 25%）

図 5　改良体にかかる最大せん断応力τ_{max}分布図