

締固めグラベルパイル工法による宅地の液状化対策効果に関する研究

環境防災研究室 修士2年 金子 大

1. はじめに

2011年3月11日に東北から関東地方にわたり甚大な被害をもたらした東日本大震災では、内陸部や沿岸部においては液状化による宅地地盤での液状化被害が多数発生した。現在の地盤改良ではセメント固化材により六価クロムが発生し、また地盤内での固化不良や土地価値の減少といった問題がある。そこで自然砕石を用い、環境負荷の少ないグラベルパイル工法の有用性が期待される。

本研究では、(株)グランテックが開発したスクリー・プレス工法(締固めグラベルパイル工法)の液状化抑止効果の検証のため、改良地盤をモデル化し、土・水連成弾塑性有限要素解析コード「DBLEAVES」を用いて解析を行った。

2. 締固めグラベルパイル工法

近年、自然材料である砕石を用いることで環境負荷も少なく、低騒音・低振動であることから宅地向けの施工機が完成した。図-2.1には本工法の施工順序を示したものである。

- ① 特殊形状のスクリーを地中に回転挿入する。排土しない為、周囲の土は圧密固化される。
- ② 引き上げ時には先端からエアを送り送られていく為、健全な孔が出来る
- ③ 砕石を投入して押圧パイプで転圧する為、更に周辺の土は圧密固化され、砕石も締め固められる。
- ④ これを何回も繰り返して、GLまで砕石を転圧する。
- ⑤ 砕石パイルはグラベルドレーンとして間隙水圧消散効果があり、周囲の地盤は圧密により密度が上昇している。

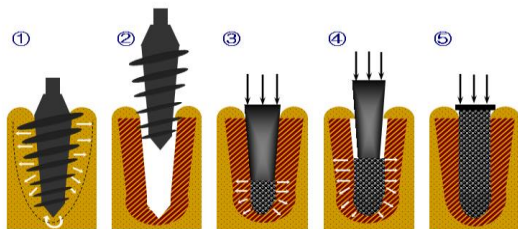


図-2.1 本工法の施工順序

3. 研究手法

スクリー・プレス工法の現場実証実験が行われた富山県高岡市万葉ふ頭より採取された試料について三軸圧縮試験を行い、実験により得られた結果と「DBLEAVES」による解析結果のフィッティングにより現地地盤のパラメータを決定する。そのパラメータと砕石のパラメータを締固めグラベルパイル工法の施工を再現した2次元地盤モデルに適用し、液状化抑止効果の解析を行う。

4. 三軸圧縮試験

表-4.1、表-4.2 に、現地試料を用いて行った実験ケースを示す。図-4.1 に現地試料より得られた静的非排水せん断試験の結果を示す。

図-4.2 に両振幅ひずみ $DA = 5\%$ における繰返し応力振幅比と繰返し回数の関係図を示す。液状化強度は $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.210$ と得られた。

表-4.1 静的非排水三軸試験ケース

試料	有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	載荷速度(%/min)
伏木現地採取試料	50	100	0.1
	70		
	100		

表-4.2 繰返し非排水三軸試験ケース

試料	有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	周波数(Hz)	繰返し応力振幅比
伏木現地採取試料	100	100	0.1	0.124
				0.179
				0.219
				0.275

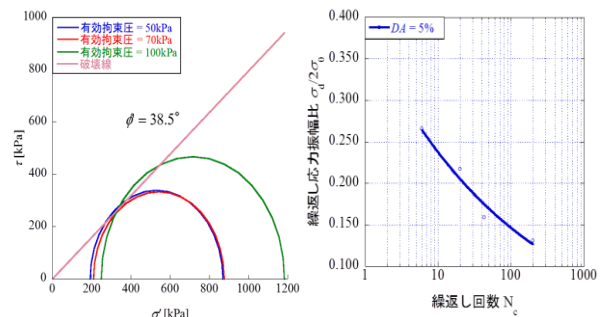


図-4.1. モールの応力円 図-4.2 液状化強度曲線

5. 2次元解析

5.1 グラベルパイル打設時の拡径による締固め改良の計算

図-5.1(左図)はグラベルパイル配置の模式図を示す。締固めグラベルパイル工法による施工では碎石用スクリーにより地中に回転挿入していく。そこに碎石を投入し転圧して半径 $r_0=20\text{cm}$ 、杭長 4m の碎石パイルが完成する。今回は最も簡単な条件として隣り合うグラベルパイルの同時施工を仮定し、パイル 1 本の造成過程を解析により再現する。計算領域は、改良対象の杭周地盤である。図-4.1(右図)に、砂杭間隔 $a=1.0\text{m}$ (計算領域 $a/2=0.5\text{m}$) の場合の有限要素メッシュと境界条件、水理条件を示す。以下では、有限要素メッシュ左側を「拡径側」、有限要素メッシュ右側を「杭間中央部」とする。

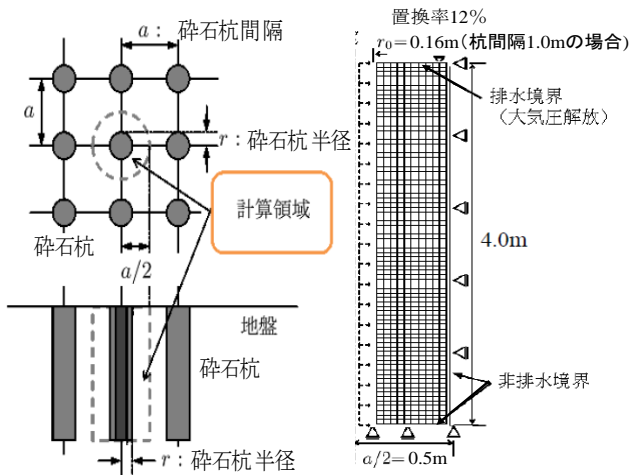


図-5.1 杭間密度増大モデル図

本研究では簡易的に計算するため、左側の拡径側から強制変位を与えていく。パイルは実配置で杭間 1.0m としたとき、パイルの直径は 40cm なので、置換率が 12% となる。それを平面ひずみ条件下でモデル化するとパイルに必要な幅は 0.12m となる。モデルは杭間隔 $1/2$ モデルなので、拡径側から強制変位を 0.06m 与えた。今回は軸対象でなく平面ひずみでの計算を行った。強制変位終了後に変化した初期応力と強制変位による体積ひずみから出した間隙比を杭間地盤の密度増大砂のパラメータとして使用した。

5.2 解析条件

締固めグラベルパイルによる液状化抑止効果について DBLEAVES を用いて評価する。本解析では一様地盤をモデル化し、解析領域は幅 140m 、層厚 20m の砂地盤を想定した。

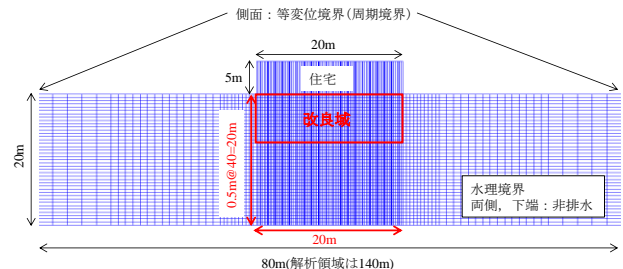


図-5.2 解析モデル

図-5.2 に解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。両側側面に等変位境界を設定することで水平無限地盤と仮定し、排水境界は地表面に設定した。地表面には木造 2 階建ての住宅を仮想し、接地圧は 10kN/m^2 とした。2次元平面ひずみにより周辺地盤の密度増大効果を再現し、変化した初期応力と強制変位による体積ひずみから出した間隙比を杭間地盤の密度増大砂のパラメータとして使用した。入力地震動には最大加速度 85gal (浦安波)、 234gal (八戸波)の波形を使用した。住宅メッシュ中央直下の改良エリアにおける地表面、 $\text{G.L.}-2.0\text{m}$ 、 $\text{G.L.}-4.0\text{m}$ の地盤とパイルの過剰間隙水圧比、沈下量を出力し改良効果の比較を行う。

本解析では密度増大や透水係数が改良効果に与える影響を検証し、複合改良効果との関係性について探る。また、改良による不同沈下への影響についても調べた。Case1 は密度増大の有無の比較より改良体自身の液状化抑止効果について検証した。Case2 では、透水係数の変化による改良体の効果の変化を検証した。Case3 では住宅メッシュを考慮せず、地表面に等分布荷重を載荷することで地表面の変化を調べ、工法の施工による不同沈下の抑制を検証した。表-5.1 に解析ケースを示す。

表-5.1 解析ケース

ケース	杭間隔	置換率 (%)	入力地震動最大加速度 (gal)	地盤条件		密度増大あり	透水係数 (cm/s)	住宅メッシュ考慮				
				無改良	改良							
Case1	1.0	12	85	無改良	改良	あり	1	あり				
						なし						
						あり						
Case2	1.0	12	85	無改良	改良	あり	1	あり				
						なし						
						あり						
			234			無改良	改良	あり	1	あり		
								なし				
								あり				
Case3	1.0	12	85	無改良	改良	あり	1	なし				
						なし						
						あり						
			234			無改良			改良	あり	1	なし
										なし		
										あり		
85	無改良	改良	あり	1	なし							
			なし									
			あり									

5.3 解析結果

密度増大効果の考慮の有無による過剰間隙水圧比・沈下量低減率の比較より、複合液状化抑止効果に対する密度増大効果と改良体自身の寄与率を求めた。寄与率の計算としては、密度増大を考慮しない場合の過剰間隙水圧比・沈下量低減率について密度増大を考慮した場合の結果で除することで複合改良効果における改良体自身の寄与率とした。また、1 から改良体自身の寄与率を引くことで密度増大効果の寄与率とした。Case1 における過剰間隙水圧比に対する寄与率を図-5.3 に沈下量に対する寄与率を図-5.4 に示す。図より、過剰間隙水圧比では入力地震動が大きくなるほど複合の液状化抑止効果に対する密度増大の寄与率が上昇していることがわかる。沈下量では、地表面付近においては沈下量の抑制に対し、密度増大が大きく寄与する結果となった。また、入力地震動の違いによる各効果の寄与率についてはあまり変化がない。したがって、沈下量においては、改良エリアにおける密度増大効果や改良体自身の改良による依存が小さく、改良深度以深の層の液状化による沈下に依存することが考えられる。

密度増大効果は、過剰間隙水圧比や地表面における沈下量の低減といった液状化抑止効果に影響することがわかった。したがって、周辺地盤の締固めによる密度増大効果について適正な評価を行う必要がある。現状の締固めの計算は2次元により x 方向に強制変位を与えている。杭間を短くするほど強制変位量が大きくなる。強制変位量が大きくなるほど y 方向へのひずみが生じる。y 方向へのひずみが生じた分、x 方向、側方向の応力増大が過小に計算されている可能性がある。表-5.2 に締固め計算による各深度における K 値の変化を示す。表より、密度増大がない場合に比べ、改良率 12%では 13 倍以上、改良率 50%では、17 倍以上と大きく増大していることがわかる。したがって、密度増大を考慮した場合のみを考えれば、側方拘束が増大し、改良効果に対する寄与を増大させることになる。しかし、改良率 12%と改良率 50%では、K 値の増加が 1.25 倍とあまり差がない結果となった。表-5.3 に置換率の違いによる y 方向へのひずみの違いを示す。表より、改良率 50%では y 方向に 50%近くひずみが生じていることがわかる。したがって、x 方向、側方向の応力が過小に評価された可能性がある。現在のモデルでは、密度増大を考慮する場合としない場合では、密度増

大を過大に評価しているが、さらなる密度増大効果を考慮した間では、増大を過小評価しているという問題点があると考えられる。

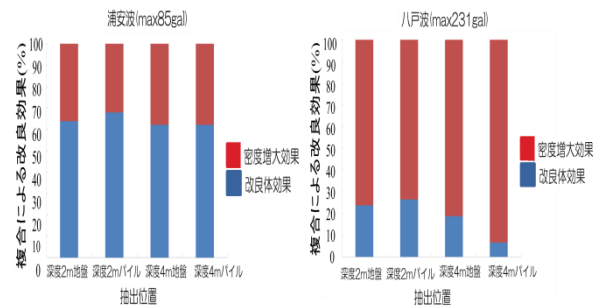


図-5.3 過剰間隙水圧比における各効果の寄与率

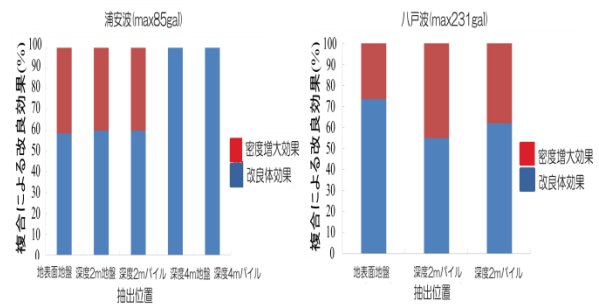


図-5.4 沈下量における各効果の寄与率

表-5.2 拡張による K 値の変化

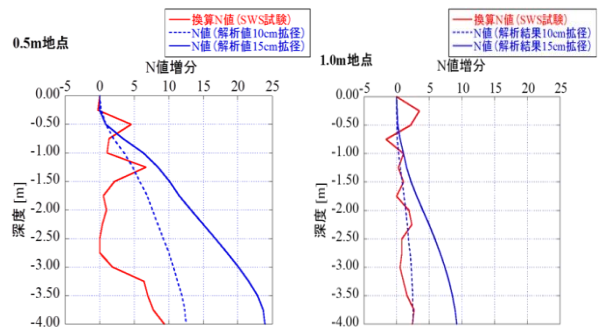
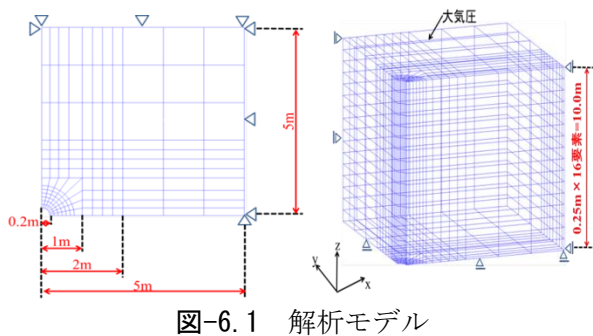
	初期値	改良率12%(杭間1.0m)	改良率50%(杭間0.5m)
G.L.	0.297	4.120	5.170
G.L.-1.0m	0.298	4.380	5.470
G.L.-2.0m	0.299	4.770	6.000
G.L.-3.0m	0.302	5.140	6.550
G.L.-4.0m	0.304	5.310	6.810

表-5.3 拡張による y 方向へのひずみ増分

	改良率12%(杭間1.0m)	改良率50%(杭間0.5m)
G.L.	6.5	45.9
G.L.-1.0m	7.8	49.5
G.L.-2.0m	9.8	51.5
G.L.-3.0m	11.3	52.1
G.L.-4.0m	11.8	52.2

6. 3次元拡張モデルにおける周辺地盤の締固めの再現

2次元解析において密度増大効果が液状化抑止効果に大きく寄与していることがわかった。しかし、2次元解析では密度増大効果を過大評価している。そこで、3次元モデルによる締固め再現を行い現地試験と比較することで密度増大効果の妥当性の検証を行った。図-6.1 に解析で用いる有限要素メッシュを示す。



締固めの再現は、パイルを築造した際に側方に締固められた土砂の等価変位量分を杭径境界面から強制変位を与えることで行った。等価変位量は、拡径によるパイル側方地盤の締固め量から算出する。掘削により地盤は半径にして20cm側方に締固められる。碎石を投入し、碎石に静的载荷を与えながらパイル築造を行った際に、さらに10cm側方に締固められる。パイル築造後のパイル半径は30cmとなり、30cmの体積分の土砂が側方に締固められたことになる。築造後の面積から変位量を計算すると、等価変位量は15cmとなる。したがって、15cmの強制変位を与えることとした。掘削時に締固められた土砂の変位のみを考慮した解析(10cmの強制変位)も行った。解析結果によるN値は、マイヤーホフの式を用いることで計算を行った。サウンディング試験を行った位置と同位置の各深度の間隙比について、現地物理試験より得られた最大・最小間隙比から相対密度を計算し、マイヤーホフの式を変形したものに適用し、N値を求めた。拡径後の間隙比は拡径後の体積ひずみから算出した。この計算より拡径前と拡径後のN値の増分を求め、現地試験の結果との比較を行い、解析結果の妥当性の検証を行った。

図-6.2に現地試験結果と解析結果のN値増分の比較図を示す。杭中心から0.5m地点におけるN値の比較では15cm強制変位の解析結果が現地試験結果の増分値を大きく上回る結果となった。10cmにおける強制変位では、ほぼ増分値が一致する結果となった。杭中心から1.0mにおける比較においても、10cmの強制変位载荷の結果が現地試験結果におけるN値増分とほぼ一致する結果となった。現地試験では、地表面付近において静的载荷の影響が大きく、深度が深くなるとその影響が小さくなる結果となったため、深度が深くなるほど15cmの拡径の解析結果と大きく偏差ができたと考えられる。したがって、深度によらず一様な密度増大効果の評価を行う場合は、掘削による側方への締固めのみを考慮した10cmの拡径法を用いることで妥当性のある密度増大効果が得られると考えられる。

6. 結論

締固めグラベルパイル工法では、過剰間隙水圧比の抑制において、密度増大効果が全体の抑止効果の3割以上を占める結果となった。また、透水係数を増大させた場合においても、密度増大を考慮した場合、改良体自身の効果にあまり変化がないという結果が得られた。したがって、本工法における密度増大の効果を適切に評価できる手法の構築が必要であると考えられる。今回は、3次元モデルを用いて単杭における密度増大効果を評価することができた。今後は施工履歴を取り入れた評価手法の開発を行う必要がある。また、今回は碎石の代用として捨石のパラメータを用いている。実際の施工ではパイル材料として碎石7号を用いている。今後は、碎石7号のパラメータを用いて碎石の投入量による地盤挙動の違いを評価したうえで、最適な投入量の決定を行う必要がある。