

杭式深層混合処理工法の液状化対策効果に関する解析検討

Analytical Study on the Liquefaction Countermeasure Effect of the Pile Type Deep Mixing Method

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO
高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

液状化を考慮した FEM 解析により深層混合処理工法杭式改良の液状化防止効果を検証した。また、すでに液状化対策工法として実績を有する格子式改良と杭式改良の解析結果とを比較することにより、液状化対策としての杭式改良の適用性を明確にすることを試みた。解析の結果、杭式改良についてもおおむね 35%以上の改良率で液状化を防止する効果が認められた。

キーワード：深層混合処理工法、杭式、格子式、液状化、FEM 解析

The liquefaction countermeasure effect of the pile type deep mixing method was verified with the FEM analysis considered liquefaction of the ground. Applicability of the pile type improvement for the liquefaction countermeasure was discussed to compare analysis results of the grid type and the pile type. It was confirmed that the pile type improvement was effective against liquefaction with improvement rate over 35% .

Key Words: Deep Mixing Method, Pile Type, Grid Type, Liquefaction, FEM Analysis

1. はじめに

近年、液状化対策工法として深層混合処理工法による工事件数が増加傾向にある¹⁾。深層混合処理工法は主にセメント系の安定材を攪拌混合し地盤を固化させて液状化を防止するものであるが、施工中の振動・騒音が少なく周辺地盤の変位もある程度抑制することが可能なことから、市街地や既設構造物への近接施工に適用性が高いという特徴を有している。

深層混合処理工法の改良形式としては、ブロック式（全面改良）、格子式、壁式、杭式がある。このうち、液状化対策としてはブロック式、格子式を適用しているのが一般的である。格子式改良は格子状に囲まれた改良体の内部に未改良土を有するが、改良体が地震時のせん断変形を抑制することによって液状化を防止すると言われている²⁾。また、兵庫県南部地震（1995）を経験した格子状改良地盤が周辺の液状化による壊滅的な被害に対して健全であったことが確認³⁾されている。

これに対して、杭式改良は施工性の面では有利であるが、他の改良形式に比べて液状化対策効果は低い⁴⁾と考えられている。最近の振動台実験による研究によると、改良体を杭式に配置することで地震時のせん断ひずみが

小さくなり、せん断変形が抑制されて液状化対策効果があると考えられた事例が報告^{5),6)}されており、杭式改良についてもその改良効果を検討する余地があるように思われる。

そこで、本報告では液状化を考慮した FEM 解析により深層混合処理工法杭式改良の液状化防止効果を検証する。また、すでに液状化対策工法として実績を有する格子式改良と杭式改良の解析結果とを比較することにより、液状化対策としての杭式改良の適用性を明確にすることを試みた。

2. 解析方法

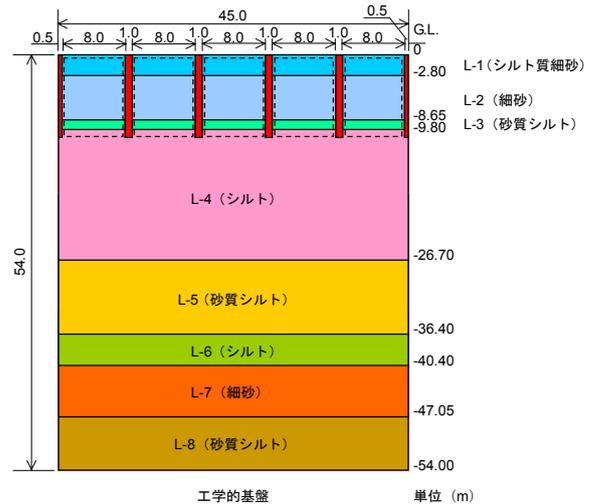
(1) 解析ケース

表-1 に実施した解析ケースを示す。解析は改良形式および改良率を変化させたケースを実施した。改良形式は無改良（自由地盤）、深層混合処理工法の格子式と杭式とし、杭式については表層改良の有無について比較した。自由地盤については、動的変形特性に関する解析パラメータの設定方法の異なる A 法、B 法について比較して、解析パラメータ設定の妥当性について検討した。

解析は液状化の発生を考慮することとして、有効応

表-1 解析ケース

ケース	入力波	対策工法	改良仕様		備考
			改良率	改良ピッチ	
F1-1	八戸	無改良	0	-	自由地盤:A法
F1-2	大船渡				
F2-1	八戸				自由地盤:B法
F2-2	大船渡				
T20-1	八戸	格子式	21%	8m	ピッチは格子間
T20-2	大船渡				
T44-1	八戸				
T44-2	大船渡				
L25-1	八戸	杭式	25%	4m	表層改良無
L25-2	大船渡				
L44-1	八戸				
L44-2	大船渡				
M25-1	八戸	格子式	25%	8m	表層改良有
M25-2	大船渡				
M35-1	八戸				
M44-1	八戸				
M44-2	大船渡		44%	3m	



(a) 格子式 (改良率 21%)

方法に基づく 2 次元 FEM 解析プログラム FLIP⁷⁾を用いて行った。

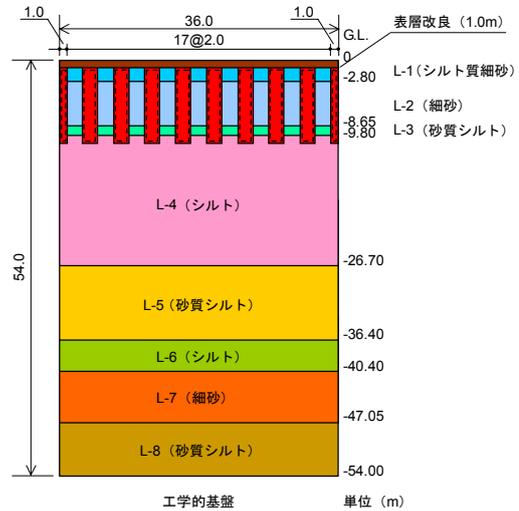
(2) 解析モデル

図-1 (a), (b) にそれぞれ格子式改良率 21%と杭式改良率 25%の解析モデルを示す。解析の対象とする地盤は L-1~L-8 の 8 層から成る水平成層地盤で、G.L.-54.0m の層境界を工学的基盤としている。液化対象層は、L-1, L-2, L-3 の 3 層とした。なお、地下水位は G.L.とした。

本来 3 次元構造を有する改良地盤を 2 次元問題として解析を行う場合、改良地盤を忠実に表現することが難しいのでモデル化において何等かの簡略化を行う必要がある。そこで、本検討では改良地盤のモデル化に要素の貼合せモデルを採用して、可能な限り実際の挙動に近い条件となるよう配慮した (要素の貼合せモデル: 改良体の物性で表された要素と改良体間地盤の物性で表される要素とを前後に貼り合わせてモデル化する方法)。

具体的には、格子式改良のケースについては、格子壁に挟まれる要素 (図中点線で表す部分) を 2 重節点として、格子間の地盤要素と奥行き方向の壁をそれぞれモデル化している。また、MPC 拘束 (多点拘束) により、点線で表す部分の左右両端と下端の節点は X,Y 方向の変位を同一とする拘束条件を適用している。この部分の地盤要素と奥行き方向の壁の支配幅は、単位奥行き幅に対してそれぞれ想定した改良仕様に応じて算出される比率を与えた。これにより、奥行き方向の壁とその内部の地盤は格子間の左右両端と下端を除きそれぞれ自由に變形する挙動を表現でき、さらに、奥行き方向の壁の存在による効果を解析結果に反映することが可能である。

杭式改良のケースでは、杭が存在する部分に地盤要



(b) 杭式 (改良率 25%)

図-1 解析モデル

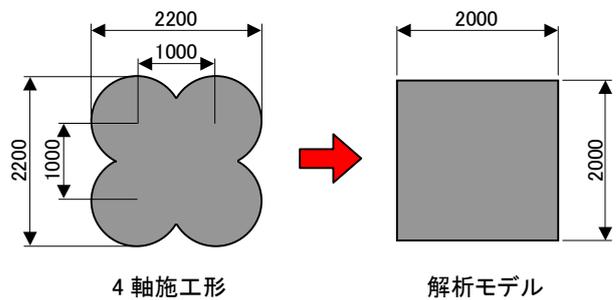


図-2 改良杭のモデル化 (杭式)

素と杭要素がそれぞれの支配幅で貼合されている。また、それぞれ 2 重節点で表された要素は MPC 拘束により、点線で表す部分の左右両端と上下両端 (表層改良がない場合は下端) の節点に対して X,Y 方向の変位を同一とする拘束条件が適用されている。

表-2 解析パラメータ (地盤：A法)

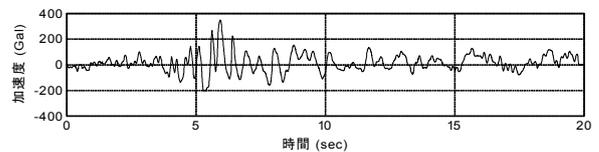
土層	層境界深度 (m)	Vs (m/s)	層平均 N値	FC (%)	IP	Na	N _{63.5}	SIGMO (kPa)	G _{max} (kPa)	PMG	K _{ms} (kPa)	PMK	POI	材料特性データ(マルチスプリング要素)											
														自重	動解	HMAX	COH	PHIF	PHIP	S1	W1	P1	P2	C1	
L-1	シルト質細砂	2.80	124	3.7	26.0	19.0	4.9	98.0	3.435E+04	0.0	8.96E+04	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	39.0	28.0	0.005	7.8	0.50	0.90	1.30	
L-2	細砂	8.65	173	10.2	21.8	22.4	10.5	98.0	6.846E+04	0.0	1.79E+05	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	40.0	28.0	0.005	17.1	0.50	0.84	1.00	
L-3	砂質シルト	9.80	159	4.0	63.0	17.0	16.7	3.7	2.496E+04	0.0	6.51E+04	0.0	0.33	0.60	1.60	0.22	0.00E+00	39.0	28.0	0.005	8.2	0.50	0.94	1.30	
L-4	シルト	26.70	126	2.0	91.0	34.0	1.0	98.0	1.920E+04	0.0	5.01E+04	0.0	0.33	0.60	1.60	0.18	0.00E+00	20.1							
L-5	砂質シルト	36.40	191	7.0	50.0	12.0	5.3	98.0	3.670E+04	0.0	9.57E+04	0.0	0.33	0.60	1.60	0.22	0.00E+00	13.6							
L-6	シルト	40.40	168	4.7	98.0	44.0	2.7	98.0	3.299E+04	0.0	8.60E+04	0.0	0.33	0.60	1.60	0.18	0.00E+00	18.1							
L-7	細砂	47.05	293	49.0	21.0	NP	46.8	98.0	1.990E+05	0.0	5.19E+05	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	27.4							
L-8	砂質シルト	54.00	302	27.6	80.0	28.0	25.2	98.0	5.274E+04	0.0	1.38E+05	0.0	0.33	0.70	1.70	0.22	0.00E+00	14.6							
工学的基盤	細砂	435	126.0																						

表-3 解析パラメータ (地盤：B法)

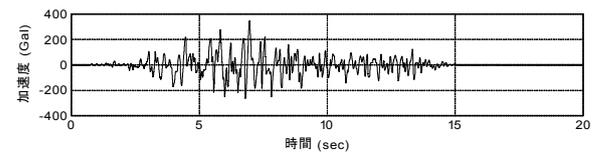
土層	層境界深度 (m)	Vs (m/s)	層平均 N値	FC (%)	IP	Na	N _{63.5}	SIGMO (kPa)	G _{max} (kPa)	PMG	K _{ms} (kPa)	PMK	POI	材料特性データ(マルチスプリング要素)											
														自重	動解	HMAX	COH	PHIF	PHIP	S1	W1	P1	P2	C1	
L-1	シルト質細砂	2.80	124	3.7	26.0	19.0	4.9	98.0	2.909E+04	0.0	7.59E+04	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	39.0	28.0	0.005	7.8	0.50	0.90	1.30	
L-2	細砂	8.65	173	10.2	21.8	22.4	10.5	98.0	5.719E+04	0.0	1.49E+05	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	40.0	28.0	0.005	17.1	0.50	0.84	1.00	
L-3	砂質シルト	9.80	159	4.0	63.0	17.0	16.7	3.7	4.032E+04	0.0	1.05E+05	0.0	0.33	0.60	1.60	0.22	0.00E+00	39.0	28.0	0.005	8.2	0.50	0.94	1.30	
L-4	シルト	26.70	126	2.0	91.0	34.0	1.0	98.0	2.540E+04	0.0	6.62E+04	0.0	0.33	0.60	1.60	0.18	0.00E+00	27.0							
L-5	砂質シルト	36.40	191	7.0	50.0	12.0	5.3	98.0	5.855E+04	0.0	1.53E+05	0.0	0.33	0.60	1.60	0.22	0.00E+00	22.0							
L-6	シルト	40.40	168	4.7	98.0	44.0	2.7	98.0	4.489E+04	0.0	1.17E+05	0.0	0.33	0.60	1.60	0.18	0.00E+00	25.1							
L-7	細砂	47.05	293	49.0	21.0	NP	46.8	98.0	1.628E+05	0.0	4.25E+05	0.0	0.33	0.90	1.90	0.22	0.00E+00	22.1							
L-8	砂質シルト	54.00	302	27.6	80.0	28.0	25.2	98.0	1.559E+05	0.0	4.06E+05	0.0	0.33	0.70	1.70	0.22	5.56E+01	30.0							
工学的基盤	細砂	435	126.0																						

表-4 解析パラメータ (改良体)

改良体	qu (kN/m ²)	E (kN/m ²)	POI	ρ _t (g/cm ³)
F-1 表層改良	200	1.00E+05	0.35	1.8
F-2 CDM	500	2.50E+05	0.35	1.8



(a) 八戸波



(b) 大船渡波

図-3 入力波形

なお、改良体はいずれも非液状化層である L-4 層に 1m 根入れした状態とした。改良体のモデル化において、杭式改良は 4 軸の深層混合処理工法 CDM-Land⁴⁾ による改良を想定して、2m×2m 幅 (φ1200×4) の杭を仮定している (図-2)。格子式の壁厚は 1.0m とし、格子間隔は手前、奥行き方向で同一と仮定した。

動的解析での境界条件は側方を繰返し境界とし、底面は底面粘性境界とした。

(3) 入力波形

入力波形を図-3 に示す。使用した波形は十勝沖地震 (1968) の際に八戸港で観測された波形と宮城県沖地震 (1978) の際に大船渡港で観測された波形を最大加速度 350gal に調整したものである。ただし、動的解析底面は粘性境界としており、2E 波にして入力されている。

(4) 解析パラメータの設定

表-2~表-4 に設定した解析パラメータの一覧を示す。地盤は L-1~L-8 の 8 層構成とし、L-8 層の下の細砂層を工学的基盤として底面粘性境界に設定した。対象地盤の材料定数として、N 値と細粒分含有率 FC、塑性指数 I_p が得られており、地盤の解析パラメータはこれらの材料定数から「港湾技研資料：FLIP パラメータ簡易設定法」⁹⁾ に準じて設定した。液状化対象層は L-1, L-2, L-3 の 3 層である。改良体は線形平面要素とし一軸強度を仮定して弾性係数を以下の方法で設定した。

$$E = 500q_u \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (1)$$

土の動的変形特性を規定するパラメータ (せん断剛性 G、内部摩擦角 φ、粘着力 c) を N 値または土の物理試験結果から設定する方法は、砂質土・粘性土について、いくつか提案されている。このうち、本解析では以下の A 法、B 法による設定方法について検討した。

A 法：沿岸開発技術センター「埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版)」¹⁰⁾ に基づく方法

・砂質土のせん断弾性係数 G_m

$$G_m = 144N^{0.68} \quad (2)$$

・粘性土のせん断弾性係数 G_m

$$G_m = (285 - 2I_p)\sigma'_m \quad (3)$$

$$G_m = 1.6I_p + 185 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \sigma'_m^{0.5} \quad (4)$$

※ (3), (4) のいずれか大きい方を採用

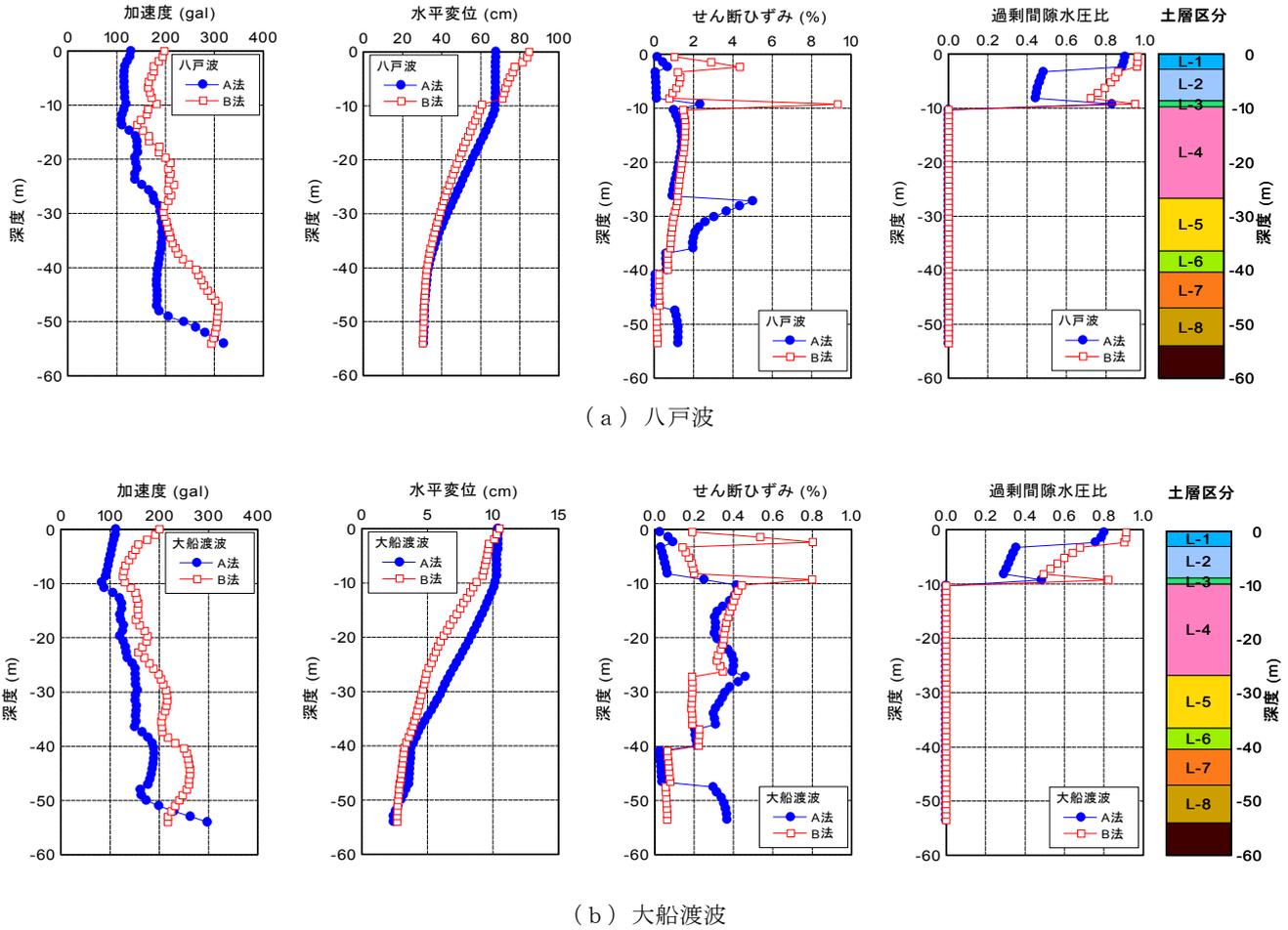


図-4 最大応答値深度分布（自由地盤）

- ・減衰定数 h_{max} および基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は「埋立地の液状化対策ハンドブック」¹⁰⁾による。
- ・内部摩擦角 ϕ ，粘着力 c （液状化対象層以外）

$$\phi = \arcsin(\tau_{max} / \sigma'_m) \quad (\text{ただし, } \phi \leq 30^\circ) \quad (5)$$

$$\tau_{max} = G_m \gamma_{0.5} \quad (6)$$

$$c = \tau_{max} - \sigma'_m \sin \phi \quad (7)$$

B法：N値からせん断波速度を推定する方法¹¹⁾（道路橋示方書）

- ・せん断弾性係数 G_m

$$G_m = \rho V_s^2 = \frac{\gamma_L}{g} V_s^2 \quad (8)$$

- ・砂質土のせん断波速度 V_s

$$V_s = 80N^{1/3} \quad (9)$$

- ・粘性土のせん断波速度 V_s

$$V_s = 100N^{1/3} \quad (10)$$

- ・その他のパラメータの設定方法はA法と同じ

$$\sigma'_m = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v \quad (11)$$

$$K_{ma} = (2/3)\{(1 + \nu)/(1 - 2\nu)\}G_{ma} \quad (12)$$

ここで、

σ'_m ：平均有効主応力（有効拘束圧）

σ'_{ma} ：基準有効拘束圧

G_{ma} ：基準有効拘束圧における G_m

K_{ma} ：体積弾性係数

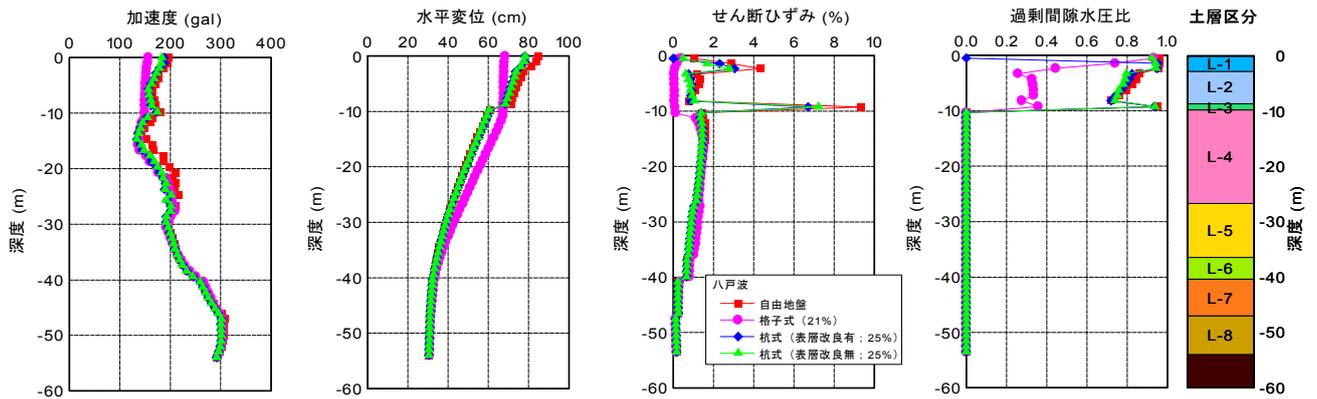
ν ：ポアソン比（標準0.33）

K_0 ：静止土圧係数

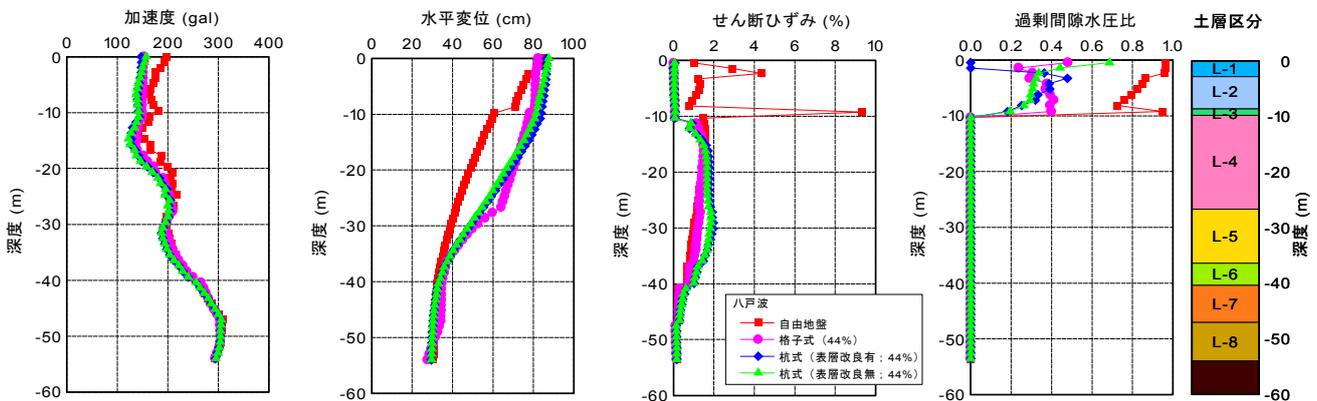
3. 解析結果

(1) 自由地盤の応答

図-4 (a)，(b) にそれぞれ八戸波と大船渡波を入力加速度として実施した自由地盤の解析結果として、加速度、水平変位、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の最大応答値分布を土の動的変形特性設定方法の異なるA



(a) 改良率 (格子式 21%, 杭式 25%)



(b) 改良率 44%

図-5 最大応答値深度分布 (八戸波)

法, B 法について比較して示した。

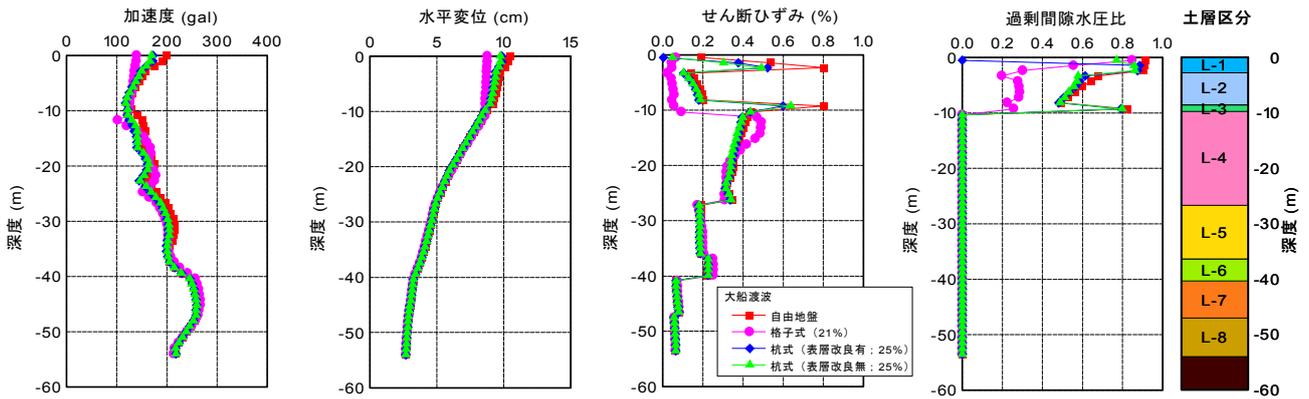
加速度分布について, A 法では最下層の L-8 層のひずみが B 法のそれに比べて大きいことから, まず L-8 層での加速度の低下が B 法に比べて著しい。加速度応答はせん断ひずみの分布に対応しており, 非線形化の卓越している区間で減衰する傾向が分かる。

非液状化層のせん断ひずみを比較すると, 例えば L-5 層 (G.L.-26.7~-36.4m) では, A 法のせん断ひずみが B 法のそれより大きく発生しているが, 設定したせん断弾性係数は A 法が $3.670 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ であるのに対して, B 法では $5.855 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ と同じ層においてもせん断弾性係数が小さい場合ほどせん断ひずみは大きく発生している傾向が認められる。また, 八戸波に対する A 法の結果は, 非液状化層の L-5 層で 5%のせん断ひずみを生じており, 非液状化層のひずみとしては過大と思われる。

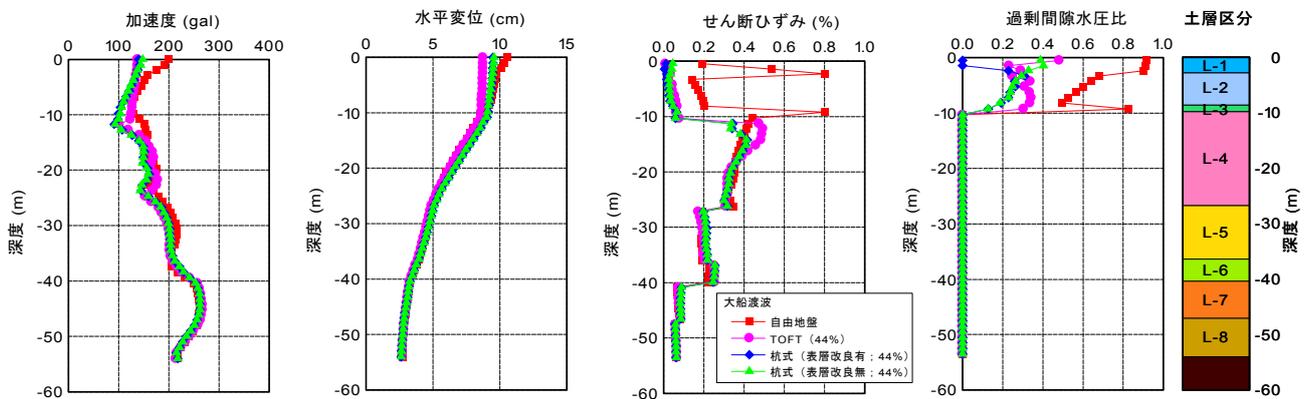
液状化層については, いずれの結果も L-1 層と L-3 層のひずみと過剰間隙水圧比の値が大きく, L-2 層の結果はこれらに対して小さな値に止まっている。また, A 法に対して B 法のせん断ひずみ・過剰間隙水圧比の方

が大きい。液状化に関する全般的な傾向として, A 法のパラメータでは非液状化層の非線形性に起因する減衰が大きく, 完全液状化には至らないことが認められる。また, 八戸波 B 法では L-1, L-3 層で激しく液状化するが, 大船渡波ではいずれの方法でも完全液状化には至っておらず, 液状化の程度に対して波形の影響は大きい。L-1, L-3 層が激しく液状化した八戸波 B 法でも L-2 層の過剰間隙水圧は 0.9~0.7 程度であることから, 準液状化の状態 (ひずみは 1%を超えているので) までにしか達していない。これは L-2 層の補正 N 値 N_a (=22.4) が 20 を超えていることから理解できる。

これらの結果を踏まえ, 以降, 液状化に対する対策効果の検討には, 地盤パラメータに B 法の設定方法を採用するのが適当と判断される。また, 本解析地盤については N 値や物理試験結果から解析パラメータを推定したが, 液状化対象層の下には厚いシルト層が堆積しており, その非線形性が液状化対象層の応答にも大きく影響している。したがって, 液状化対策の実務設計として液状化解析を適用して詳細な検討をするには, 最低限 PS 検層を実施してせん断波速度を測定する等,



(a) 改良率 (格子式 21%, 杭式 25%)



(b) 改良率 44%

図-6 最大応答値深度分布 (大船渡波)

解析精度を向上させるための調査試験が必要であると
考えられる。

(2) 改良地盤の応答

図-5, 図-6 にそれぞれ八戸波および大船渡波による改良地盤の最大応答値深度分布を自由地盤の解析結果と比較して示した。また, 図-7 には八戸波に対する解析結果の最大過剰間隙水圧比コンター図を示した。

非液状化層の応答は, 八戸波に対する改良地盤 L-5 層のせん断ひずみが自由地盤に比べて若干大きく水平変位が大きくなっていること, 大船渡波に対する格子式の改良体直下地盤で応力集中によるせん断ひずみが他のケースに比べて大きいほか, 自由地盤の応答と一致している。

液状化対象層 (L-1~L-3) について比較すると, 改良率の低い杭式 25%の過剰間隙水圧比は自由地盤のそれと同程度の値を示しており, 八戸波の結果については完全液状化の状態に達していると判断される。しかしながら, 自由地盤に比べるとこの層 (L-1, L-3) のせん断ひずみはやや小さくなる傾向がある。

低改良率の格子式 21%のケースでは, L-1 層で高い過剰間隙水圧比を生じる傾向があるが, 自由地盤および杭式改良 25%に比べて L-2, L-3 層の過剰間隙水圧比は低く, あわせて剛性の高い壁の拘束効果によりせん断ひずみの値は杭式改良に比較して小さい。

改良率 44%の結果は格子式および杭式とも改良範囲 (液状化対象層) のせん断ひずみは自由地盤に比べて小さく改良形式によらず同程度となっている。また, この改良率では杭式改良の方が L-2, L-3 層の過剰間隙水圧比は格子式改良よりむしろ小さくなる傾向があり, 杭式改良においても改良率を上げるにより拘束効果が発揮されていることが分かる。

杭式改良において表層改良の有無については, 表層改良深度で過剰間隙水圧発生の有無の違いがあるのみで, 本解析結果では表層改良による明瞭な挙動の違いは認められない。

これらの結果から, 格子式改良については低改良率の 21%でもせん断変形抑制による拘束効果を発揮して過剰間隙水圧の発生を抑える効果があるが, L-1 層に対しては液状化を完全に防止するまでには至っていない

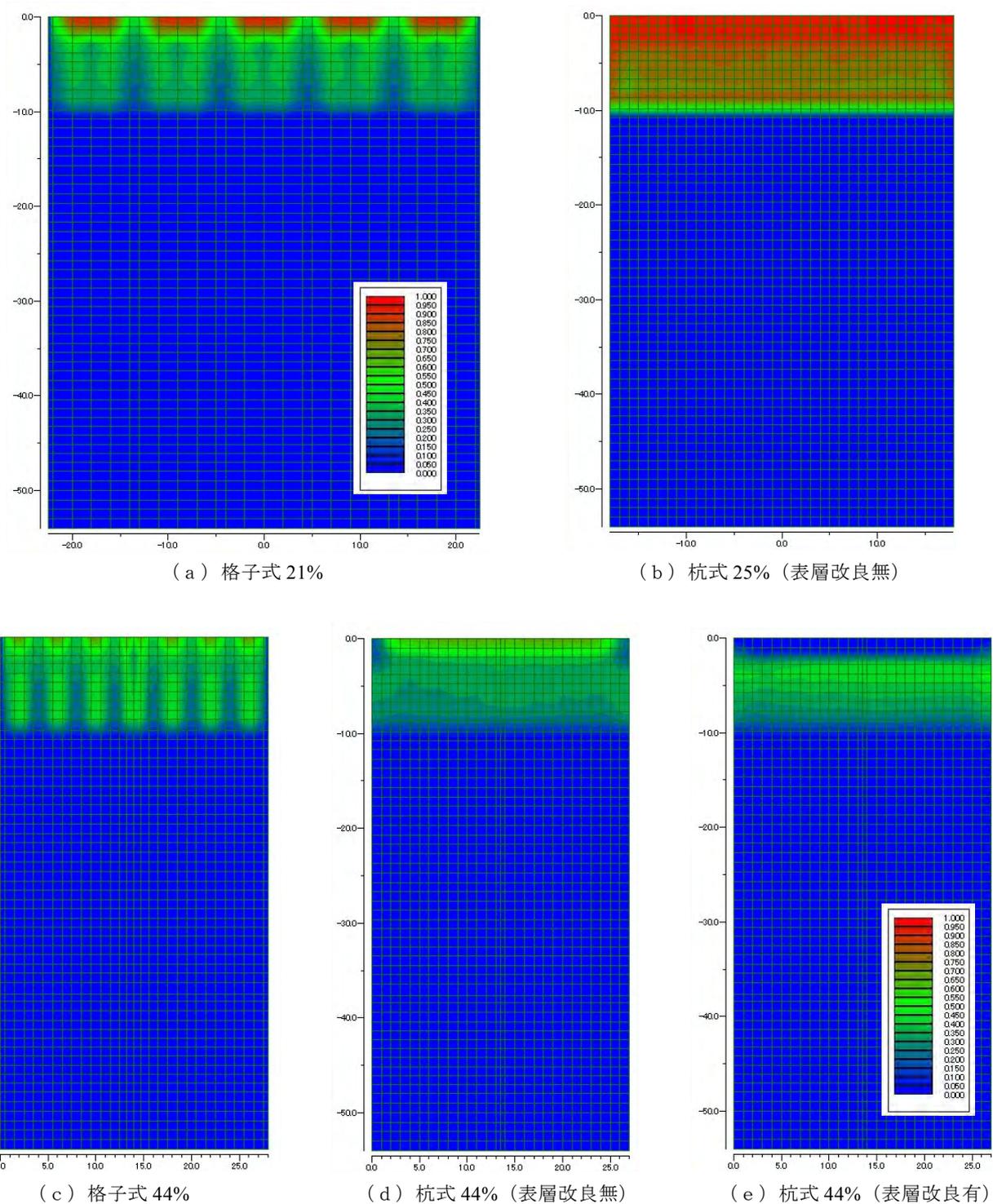


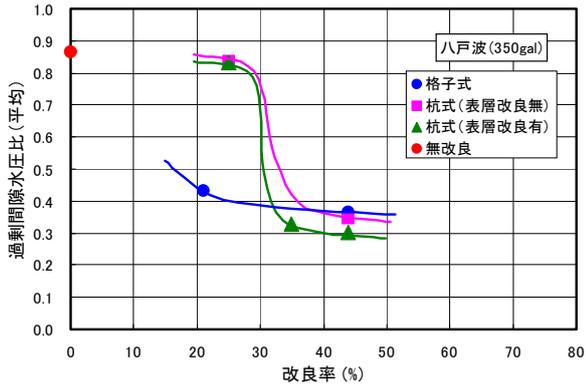
図-7 最大過剰間隙水圧比コンター (八戸波)

こと、杭式改良 25%の低改良では液状化防止効果はほとんどないことが明らかである。一方、44%に改良率を高めるといずれの改良形式についてもせん断変形を抑制して、液状化を防止する対策効果が現れている。

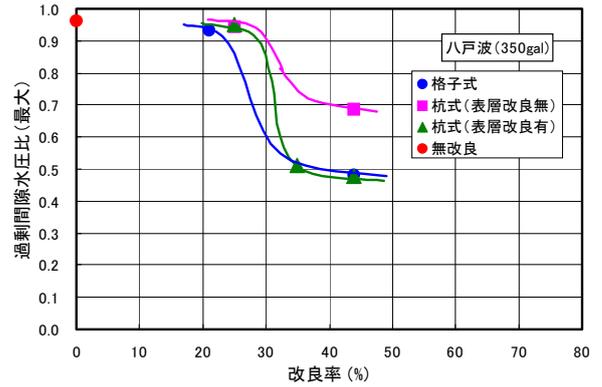
(3) 改良効果の比較

図-8 に液状化対象層 (L-1, L-2, L-3) の過剰間隙水

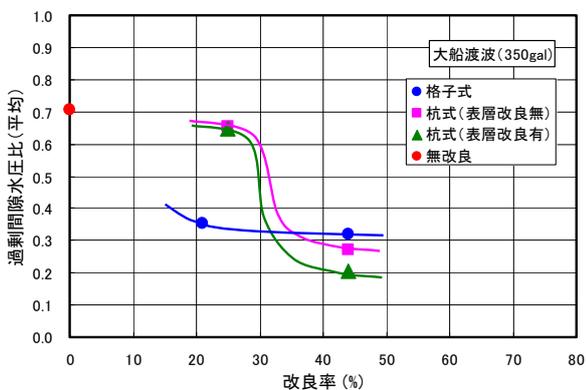
圧比の平均値と改良率の関係を整理して示す。杭式改良率 25%の過剰間隙水圧比は、無改良より若干その値が低下している程度で、液状化対策としての効果は認められない。これに対して、杭式改良率 35%、44%の過剰間隙水圧比は 0.4 を下回り、液状化抑止効果を発揮していることが認められる。このように、杭式改良ではある改良率以上にならないと、液状化抑止効果が生



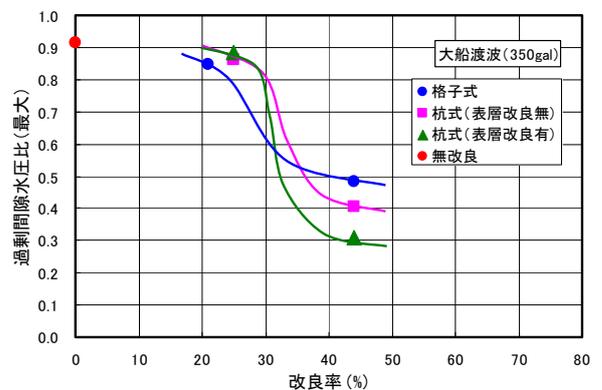
(a) 八戸波



(a) 八戸波



(b) 大船渡波



(b) 大船渡波

図-8 改良率と過剰間隙水圧比(平均値)の比較

図-9 改良率と過剰間隙水圧比(最大値)の比較

じないことが明らかであり、本ケースでは改良率 30%~35%がその境界に相当していることが分かる。表層改良の有無に関しては、表層部を改良したケースの方がその部分の過剰間隙水圧が発生しないため、改良効果が高くなる結果となっている。

格子式改良の解析結果からは、21%の結果においても改良効果が認められる。これは、構造上、杭式改良に比べてせん断変形を抑制する効果が高いためであると考えられる。しかしながら、改良率が高くなっても杭式のような劇的な変化はなく、やや改良効果が高まる程度であり、35%、44%改良率の結果については杭式改良(表層改良有)のほうが、過剰間隙水圧比の低減効果が大きい。

図-9 に液状化対象層(L-1, L-2, L-3)の過剰間隙水圧比の最大値と改良率の関係を整理して示す。過剰間隙水圧比の最大値で整理した場合、平均値で整理した場合に比べ全般に高めの結果を示すが、大きく異なるのは格子式 21%の結果である。低改良率のケースではせん断ひずみは大きくないものの、いずれも L-1 層で

液状化に達していることから、格子式改良についても改良効果が認められない結果となっている。また、最大値に対する整理では、杭式改良の場合に表層改良ありの場合がない場合よりも明確な形で改良効果が高まっていることが分かる。

このように、改良体間の未改良地盤の過剰間隙水圧比を平均する場合と最大値で比較する場合とで、改良効果に対する見解はやや異なるが、全般的には格子式改良の方が杭式改良よりも液状化対策効果は高いと考えられる。しかしながら、解析結果は杭式改良についても非液状化層に十分根入れして杭頭部を連結する等、杭固定度を高めて適切な改良率を設定することにより、液状化対策効果を発揮することを明らかにしていると考えられる。

4. まとめ

本報告では、杭式深層混合処理工法の液状化対策効果を格子式改良と比較した FEM 解析により検討した。

その結果、杭式改良についても非液状化層に十分根入れして杭頭部を連結する等、杭固定度を高めて適切な改良率を設定することにより、せん断変形抑制による拘束効果を発揮して格子式改良と同程度の液状化対策効果を発揮することが明らかになった。また、本解析条件においては、おおむね 35%以上の改良率で液状化防止効果が発揮されると考えられた。

参考文献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法，pp.196-197, 2004.
- 2) 例えば，鈴木義雄，時任和哉，鈴木吉夫，馬場崎亮一：固化工法による耐液状化基礎地盤改良工法の適用事例，基礎工，Vol.17, No.9, pp.87-95, 1989.
- 3) 鈴木吉夫，斉藤聡，木村玄，木林長仁，細見尚史：格子状地盤改良による液状化対策を施した建築基礎の調査報告，基礎工，Vol.23, No.10, pp.54-58, 1995.
- 4) 古賀泰之，谷口栄一，中角功，栗波啓治：深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験，土木学会第 41 回年次学術講演概要集，III，pp.201-202, 1986.
- 5) 安田進，村澤譲，小西武，田中智宏，内山純一：杭式に配置した改良体の液状化抑制効果，第 38 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1881-1882, 2003.
- 6) 田中智宏，安田進，村澤譲，小西武，内山純一：杭式深層混合処理工法による液状化対策効果，土木学会地震工学論文集，Vol.27, No.210, 2003.
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 8) CDM 研究会：CDM-Land4 工法技術マニュアル，2002.
- 9) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No.869, 1997.
- 10) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997.
- 11) Imai, T.: P-and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. of the 9th Int. Conf. ICSMFE, Vol.2, pp.257-260, 1977.