

液状化対策工法としての 格子状地盤改良の解析的検討

古屋 弘¹・佐藤 清²・松田 隆³

¹正会員 (株)大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティーB棟)

²正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

³正会員 工博 (株)大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

格子状地盤改良工法は、セメントまたはセメント系固化材を用いて液状化対象層の地盤を改良壁で囲むことにより地盤を拘束するとともに、改良体自身のせん断抵抗によりブロック状に改良された地盤のせん断変形が抑止され、その結果液状化を防止する工法である。設計にあたっては、既往の実験結果や解析結果を基にして作成されたマニュアルに従うが、地震時の外力のつり合いを主体とした安定検討を行うため、十分な安全率を有する反面、経済的にはやや不利な設計となることが多い。

本報告は、上記の問題点について検討し、設計にフィードバックする目的で液状化対象層の動的強度特性、層厚、ならびに地盤改良体の格子ピッチをパラメーターとしたFEM解析を実施し、その結果をまとめたものである。

Key Words : Liquefaction, Soil improvement, Deep mixing soil stabilization, Design, Finite element method

1. はじめに

液状化対策の一つの工法としての深層混合による固化工法の中で、格子状地盤改良工法が確実性・経済性、さらに低騒音・低振動工法であることから近年施工実績が増えつつある。この工法の原理は、①液状化対象地盤に格子状に配置された改良体そのものが固化されているため液状化しない、②改良体内部の未改良地盤が拘束されるとともに、格子状に改良されたブロックのせん断変形が改良体のせん断抵抗により抑止される、の2点によるものであり、各種の模型実験¹⁾、数値解析²⁾の他、兵庫県南部地震の際の調査³⁾からもその効果が報告されている。

この工法の設計にあたっては、一般に震度法を基にした地震時の外力を基に安定検討(外部安定、内部安定、全体安定)を行うことにより改良体の強度、改良深度、格子ピッチ等を決定する⁴⁾。しかし、この設計法は既往の研究成果に基づき十分な安全率を見込んでマニュアル化されたものであるため、改良範囲や改良体のピッチに関してはやや過大な設計となる場合も多く、煩雑な外力および安定計算を行わなければならないといった問題点も存在する。

本報告は、格子状地盤改良工法の上記の点に着目し、特に経済的かつ効果的な改良ピッチの簡易な決定手法を確立する目的で、仮想地盤におけるFEMによるパラメーター解析を実施し、改良対象地盤の強度、層厚、改良ピッチに関して検討した結果についてまとめたものである。

2. 解析モデル

今回は、液状化対策としての格子状地盤改良工法の格子ピッチに関する検討を行うことを目的としたため、以下のような条件の下に解析を行った。

(1) 検討モデルの設定

解析対象地盤は層厚 $D=5\sim 20m$ の単一砂層 ($F_c=20\%$) が液状化層として存在し、基盤層との間に $10m$ の粘性土層が介在する地盤を想定した。この地盤を液状化対策として格子状に地盤改良を行

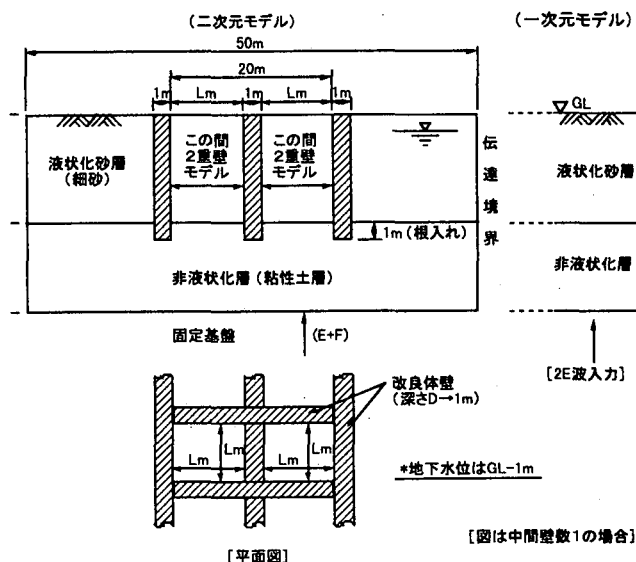


図-1 解析モデル概要

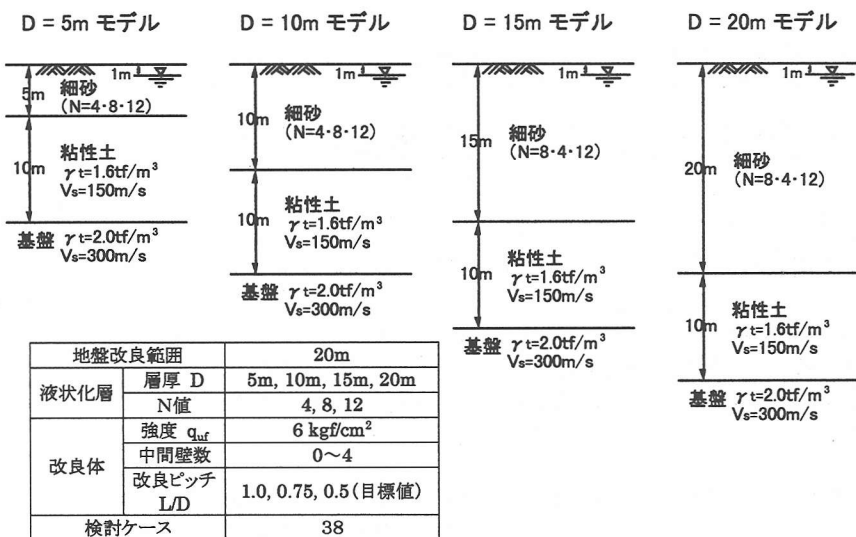


図-2 解析ケースと地盤モデル

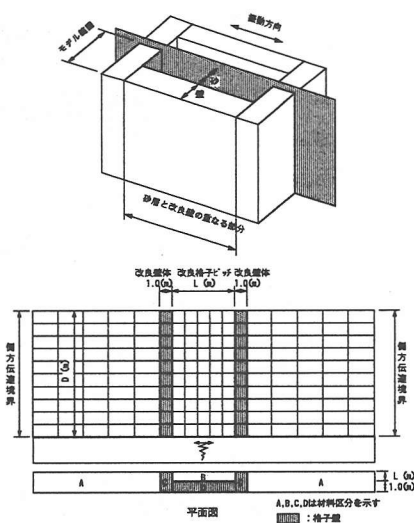


図-3 2重壁モデル概要図

表-1 地盤定数

	細砂層	粘性土層	基礎層
湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$ (飽和密度 ρ_{sat})	1.7 (1.9)	1.6	2.0
せん断波速度 $V_s(m/sec)$	※1	150	300
初期せん断剛性 $G_0(tf/m^2)$	※2	3673	18400

※1 $V_s = 80 \times N^{1/3}$

※2 $G_{oc} = (\pi/9.8) \times V_s^2$
 $G_o = G_{oc}(\sigma_v'/\sigma_{v0}')^{0.5}$

表-2 改良体諸元

改良壁厚 $t(m)$	1.0
密度 $\rho(t/m^3)$	原地盤と同じ(砂層:1.9、粘性土:1.6)
改良強度 $q_{uf}(kgf/cm^2)$	6.0
ヤング率 $E(kgf/cm^2)$	6000
ポアソン比 ν	0.167

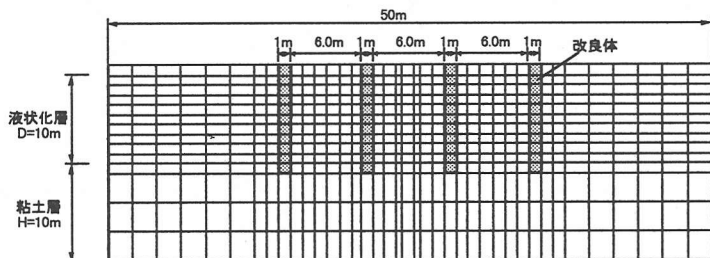


図-4 解析モデル
(液状化層厚 $D=10m$, 中間壁 2 の場合)

うものとし、20mの範囲を改良対象範囲としている。なお、液状化対象地盤の地下水位は $GL-1.0m$ 、改良体は粘性土層に1.0m貫入させるものとした。

今回の解析においては、液状化層厚(D)、液状化対象層の N 値、改良体の格子ピッチ(L)をパラメータとし、 $L/D=1.0, 0.75, 0.5$ を標準として中間壁を設定した。解析概要を図-1に、解析ケースと地盤モデルを図-2に示す。

(2) 解析方法

解析は以下の①～⑥の手順で実施した。

- ① 液状化層厚(D)、 N 値をパラメータとした一次元的動的解析モデル(12ケース)作成。
- ② 「道路橋示方書・同解説⁷⁾」タイプⅡ地震波(1995年、神戸海洋気象台地盤上波形：図-5参照)を2E波として未改良地盤の解析実施。
- ③ ②の結果より基礎応答波($E+F$ 波)を求める。
- ④ 図-2に示すケース(38ケース)について二次元的動的解析を実施する。なお、①のモデルをフリーフィールドモデルとする。
- ⑤ 改良地盤の格子内の F_L を求める。
- ⑥ 各層厚(D)、 N 値において、 $F_L \geq 1.0$ となる改

良ピッチ(L)を整理する。

なお解析においては、1次元動的解析は[SHAKE]、2次元解析には等価線形法により地盤の非線形性を考慮できる全応力解析コード[F-DAPⅢ]を使用した。

(3) 解析モデル

今回の解析においては、3次元形状である格子状の改良地盤を2次元に置き換える必要がある。このためモデル化にあたっては、図-3に示すように改良部分を2重要要素モデルによって要素化した。すなわち、格子状改良となっている部分は面内方向(加振方向に平行)および面外方向(加振方向に垂直)に改良壁が存在するため、この部分を改良体と地盤の2重の要素を持たせ、2次元断面に垂直方向、および平行方向の改良領域を表現した。解析メッシュの一例を図-3に示す。

なお、解析に用いた入力定数は以下のように設定した。

a) 地盤定数

原地盤、改良体の地盤定数を表-1, 2に示す。原地盤において粘性土地盤は平均的な沖積粘土層を、基礎層は洪積砂層を想定した。

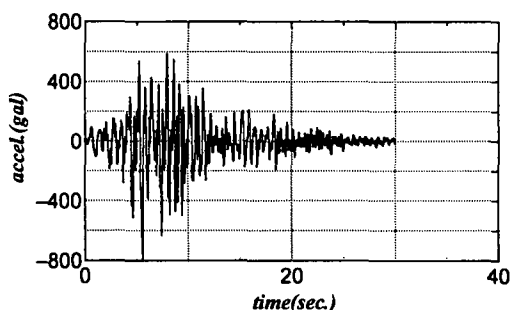
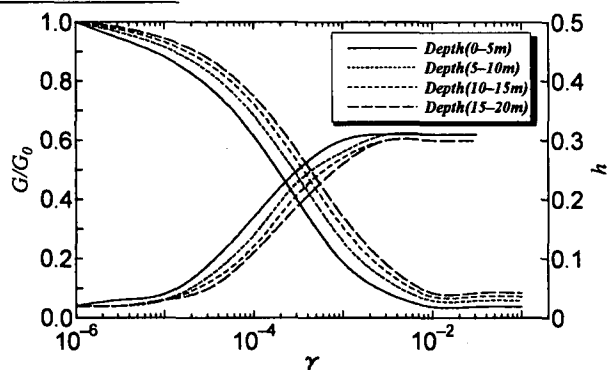


図-5 解析入力波 (2E波 Accmax=812.0gal)

砂層 (液状化層)



粘性土層

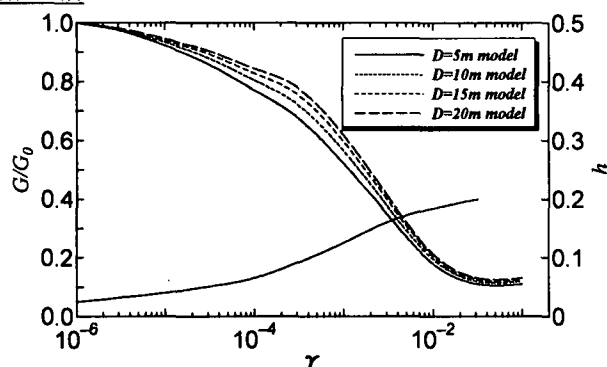


図-6 地盤の非線形特性

表-3 各モデルの液状化強度比 R

砂層層厚 D(m)	N値	砂層中央深度 での σ_v' (tf/m ²)	R (Fc=20%)
5	4	3.05	0.265
	8		0.440
	12		0.838
10	4	5.30	0.229
	8		0.378
	12		0.533
15	4	7.55	0.206
	8		0.333
	12		0.451
20	4	9.80	0.187
	8		0.301
	12		0.404

b) 初期せん断剛性(G_0)

地盤の初期せん断剛性(G_0)は表-1 に示すが、砂層においては拘束圧依存性を考慮し、以下のように設定した。

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

$$G_{oc} = (\rho_i / 9.8) \times V_s^2$$

$$G_o = G_{oc} (\sigma_v' / \sigma_{v_o}')^{0.5} \quad (2)$$

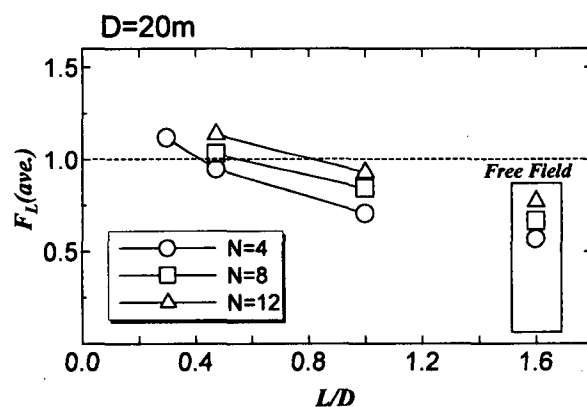
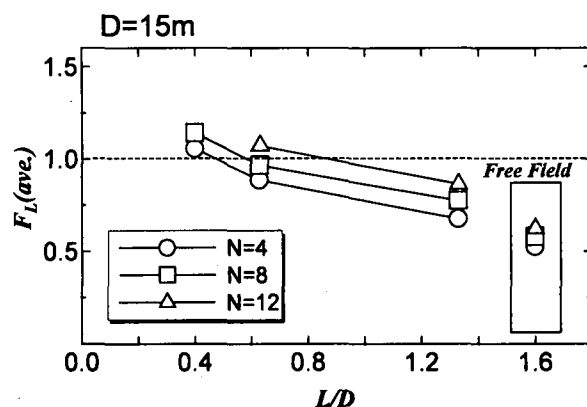
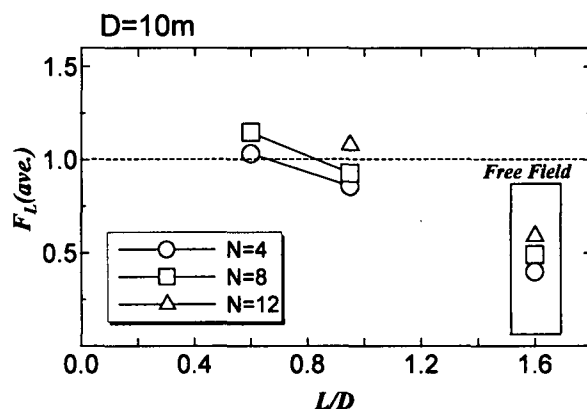
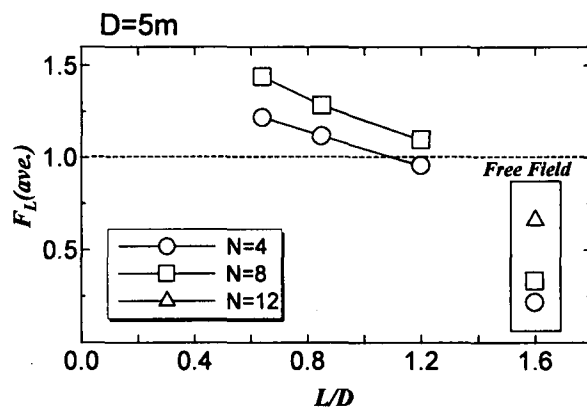


図-7 解析結果

ここで、

G_{oc}, σ_{v_o}' : 各モデル中央深度での有効上載圧、せん断剛性率

G_o, σ_v' : 深度z(m)での有効上載圧、せん断剛性率

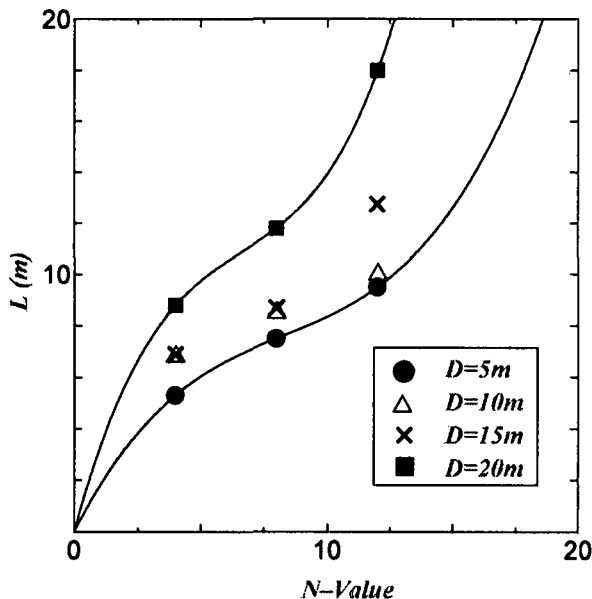


図-8 $F_L=1.0$ となる改良ピッチ

c)非線形特性

砂層、および粘性土層の $G/G_0 - \gamma$ 、 $h - \gamma$ は、岩崎ら⁵⁾および建設省土木研究所資料⁶⁾を参考に設定し、それらを図-6に示す。このとき、各土層とも拘束圧を考慮するが、特に砂層では5m毎にその中央深度での応力を求め、非線形特性を設定した。

$G/G_0 - \gamma$ の算定式を以下に示す。

$$G/G_0 = f(\gamma) \cdot P^{m(\gamma)} \quad (3)$$

ここで、

$f(\gamma)$: $P=1\text{kg/cm}^2$ での G/G_0 。

$m(\gamma)$: ひずみ関数で与えられる指数

P : 平均有効主応力

なお、基盤層および改良体（固化壁）は線形材料とし、 $h=0.02$ とした。

d)液状化強度

砂層の液状化強度（動的せん断強度比 R ）は、「道路橋示方書・同解説⁷⁾」により算定した。このときの R は、同一砂層内では拘束圧によらず一定値を示すものと考え、各モデルとも砂層の中央深度での σ_{vo}' を用いて算定した。結果を表-3に示す。

3. 解析結果と考察

図-7に各液状化層厚(D)における格子間隔と層厚の比(L/D ：以下改良比とよぶ)と格子内全要素の平均 F_L 値の関係を地盤の N 値毎に示す。図中には未改良時の F_L 値も併せて示しているが、格子状地盤改良を行ったことにより各層厚のケースとも F_L 値が上がっており、改良の効果が認められる。また、同一の改良比(L/D)においては N 値の大きい方が F_L 値も大きくなっていることがわかる。

以上の N 値と改良比の結果から、各液状化層厚(D)において $F_L=1.0$ となる格子ピッチ(L)をもとめ、

近似曲線とともに表したものが図-8である。この結果より、格子状地盤改良のピッチ(L)は液状化層厚(D)と N 値の関数で表すことのできる可能性を示している。さらに、今回の解析によって得られたこれらの関係を用いることにより、詳細な格子状地盤改良の設計に入る前の概略設計検討を容易に行うことのできる可能性を示している。

4. まとめ

今回の解析では、地盤の動的特性に関して物理試験およびサウンディング情報程度しか入手できない場合における解析定数の設定方法の一例を示し、これらを用いて液状化対象層の強度 (N 値) および層厚(D)と格子状地盤改良の格子ピッチ(L)との関係を検討する目的で、比較的単純なモデルを設定しパラメーター解析を実施した。

解析ケースも十分とはいえず、実際の液状化対策工の設計においては地盤構成の複雑さや対策を必要とする対象構造物等も併せて検討する必要があるため、この結果を直ちに実設計へ反映させることに対しては検討を要するが、今回の解析結果は、事前の工法選定時の簡易設計等には十分有用なデータとなりうるものと考えられる。

参考文献

- 1) 共同研究報告書第23号：耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書(その3)、建設省土木研究所、1988.12.
- 2) 佐藤、古屋、松田：有効応力解析による格子状地盤改良の液状化防止効果の考察、第32回地盤工学研究発表会講演集、pp.1085-1086、1997.
- 3) 鈴木 ほか：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) 共同研究報告書第186号：液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)、建設省土木研究所、pp.109-135, 1999.3.
- 5) 岩崎、龍岡、吉田：地盤の動的特性に関する実験的研究(Ⅱ)－広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性－、建設省土木研究所報告書第153号、1980.3.
- 6) 建設省土木研究所資料第1778号：地盤の地震時の応答特性の数値解析法 -SHAKE, DESRA-, 1982.2.
- 7) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、(社)日本道路協会、pp.94-95、平成8年12月