格子状改良を適用した場合の数値解析による液状化防止効果の検討

格子状地盤改良を適用するにあたり、浦安市の戸建て住宅地における状況を反映した街区モデルを設定し、道路を含めた一体的な改良体配置を検討する。そして、浦安市の地盤特性を反映した地盤モデルを作成して地震応答解析を実施し、レベル 1 地震動に対して液状化防止が可能な改良体の仕様を抽出する。

(1) 格子状地盤改良を適用する街区モデルの設定

図 1 に示す住宅と道路を一体としたエリアを対象とし、格子状改良の配置は図 2 に示す 4 通りとした。

Case1：住戸を 1 戸ずつ改良壁で囲い込むケース（道路 2 枚壁、改良壁厚：0.85m、Fc=1.5 N/mm^2） 今回報告

Case2：住戸4戸を一つの単位として改良壁を設けるケース（道路2枚壁、改良壁厚:0.85m、Fc=1.5 N/mm^2）

Case3：住戸 1 戸ずつ改良壁で囲い込むケース（道路 1 枚壁、改良壁厚：0.85m、Fc=1.5 N/mm^2）

Case4：住戸を1戸ずつ改良壁で囲い込むケース（道路1枚壁、住居部分は改良壁厚:0.50m、Fc=3.0 N/mm^2）

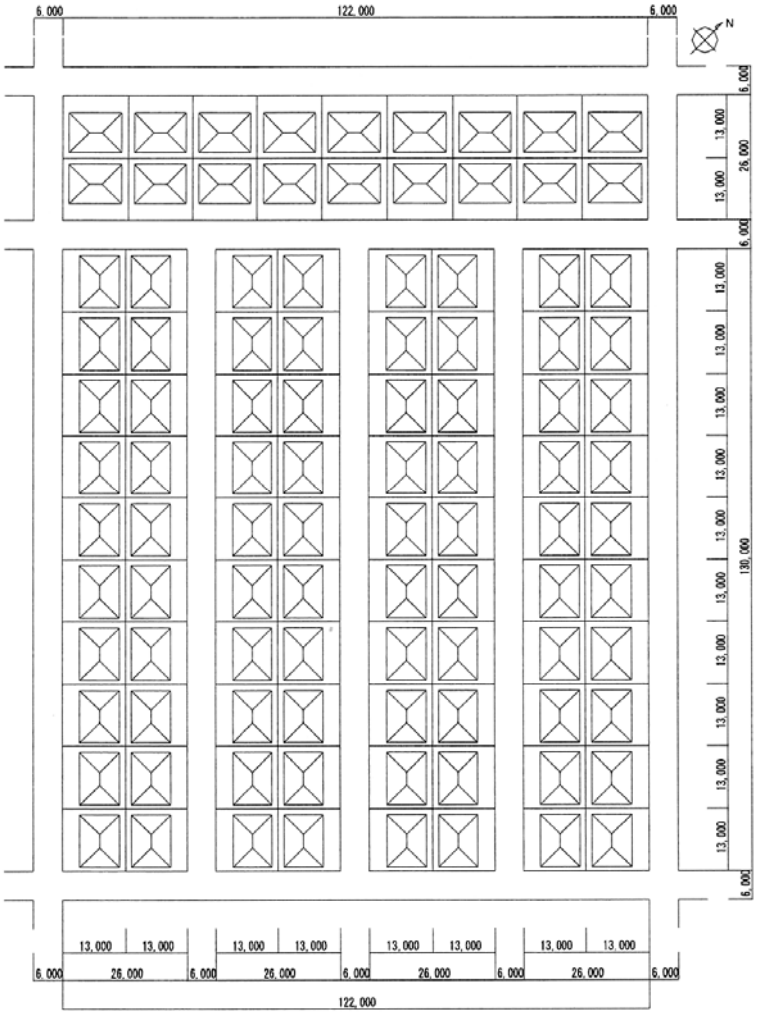
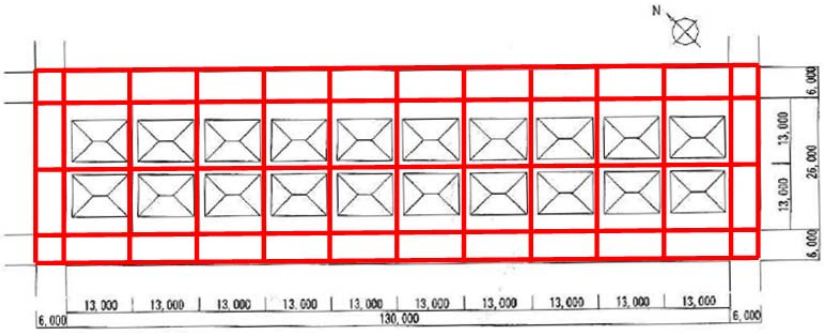
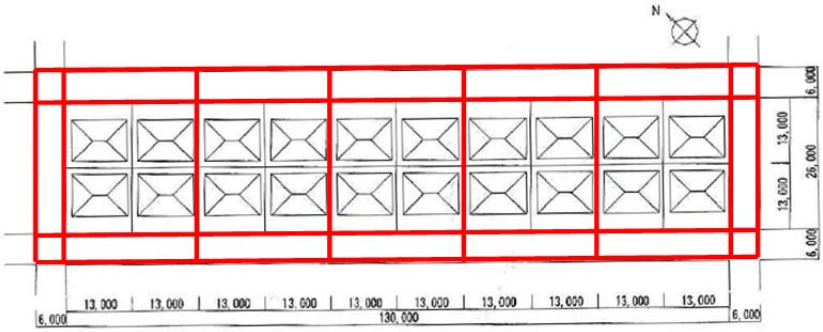


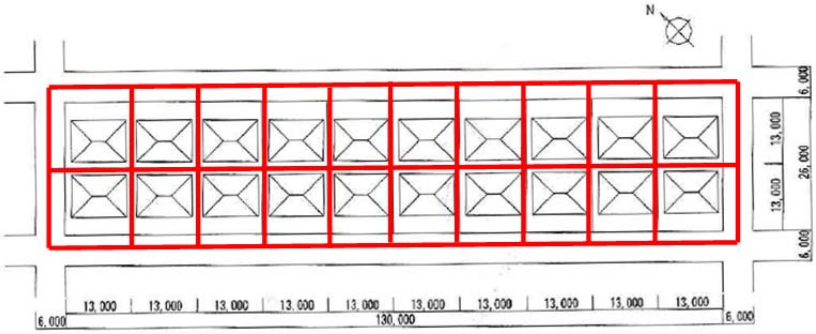
図１　検討対象街区



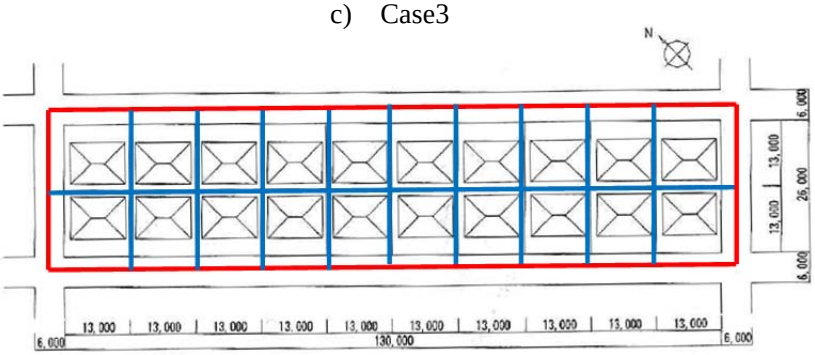
a)　Case1



b)　Case2



c)　Case3



d)　Case4

（赤）：壁厚 85cm

（青）：壁厚 50cm

図２　１街区を対象とした格子状改良の配置ケース

(2) 地盤モデルと改良地盤の仕様

地盤モデルは浦安市の平均的なモデル（図 3、BL 殿作成）とした。地下水位は GL-1m である。

改良地盤は実績の多い機械式撹拌で作成した改良体を想定してφ1.0m の柱状改良を 80cm 間隔で行った場合とした(ラップ幅 20cm、有効改良壁厚 85cm)。改良体の配置は図 4 に示すようになる。

地盤定数を表 1 に示す。地盤改良は地下水位以深の GL-1m～13m までとした。地盤の非線形特性は実験結果から得られたものであり、図 5 に示す。また、改良地盤の非線形特性は文献[2)]を参照した。

なお、改良体の初期せん断剛性 G_0 は設計基準強度 Fc から建築センター指針[1)]に示されている式に基づいて以下のように設定した。

$F_c=(1-1.3V_{quf})q_{uf}$　　(1)

V_{quf}：q_{uf} の変動係数であり、施工実績データが乏しい場合は 0.45 とする

q_{uf}：一軸強度の平均値

よって、

$q_{uf}=F_c/(1-1.3\times0.45)=2.4F_c$

同指針には､改良体のヤング係数 E_{50}, E_o と一軸強度 q_u の間に次の相関が提案されている。

$E_{50}=130q_u$（砂）　　(2)

$E_{50}/E_o=0.2$　　(3)

また、ヤング係数とせん断剛性の関係は次のとおりである。

$E_o=2(1+\nu)G_o$　　(4)

改良体のポアソン比 $\nu=0.26$ とされている。

以上より、$G_o=E_o/2(1+\nu)=5E_{50}/2(1+\nu)=5\times130/2(1+0.5)q_u=258q_u$

$G_o=258\times2.4F_c=619F_c$

改良体の F_c を 0.5 から 3.0N/mm^2 とすれば、

G_o は表 2 に示す値となる。

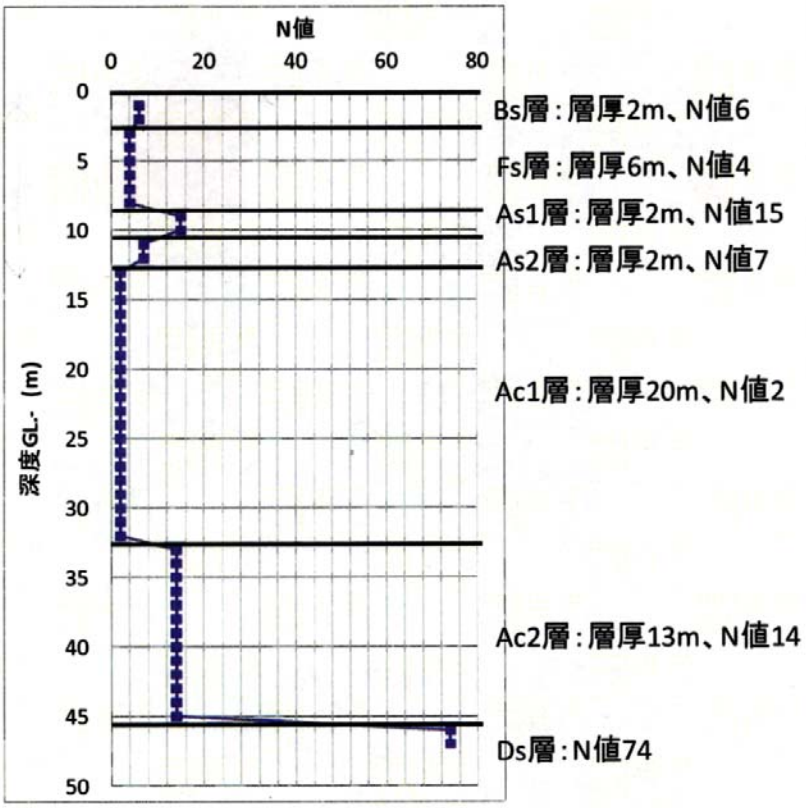


図 3　モデル地盤（地下水位 GL-1m）

表１　地盤定数一覧

土質名	N値	層厚(m)	細粒分含有率(%)	密度(t/m3)	せん断波速度(m/s)	初期せん断剛性(kPa)	ポアソン比	内部摩擦角(度)	粘着力(kPa)	間隙比	最大間隙比	最小間隙比	20%粒径(mm)	透水係数(cm/s)	構成式
			Fc	ρ	Vs	G_0	ν	ϕ'	c	e_0	e_{max}	e_{min}	D20	k	
Bs(乾燥)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.3333	31	0.00	0.79	1.01	0.61	0.090	1.4E-03	EP
Bs(飽和)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.3333	31	0.00	0.79	1.01	0.61	0.090	1.4E-03	EP
Fs	4	6	22	1.80	127	29,029	0.3333	30	0.00	1.02	1.47	0.88	0.070	7.7E-04	EP
As1	15	2	21.9	1.80	197	70,067	0.3333	35	0.00	1.03	1.44	0.78	0.069	7.4E-04	EP
As2	7	2	31	1.70	153	39,813	0.3333	30	0.00	1.25	1.76	1.06	0.030	1.1E-04	EP
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26,534	0.3333	0	13.00	2.34	-	-	-	5.1E-06	RO
Ac2	14	13	93.6	1.50	220	72,600	0.3333	0	91.00	2.58	-	-	-	2.8E-06	RO
Ds	74	-	10	2.00	388	301,088	0.3333	38	0.00	0.71	-	-	-	2.2E-03	–

EP：砂の弾塑性構成式(渦岡, 2000)
RO：修正R-Oモデル

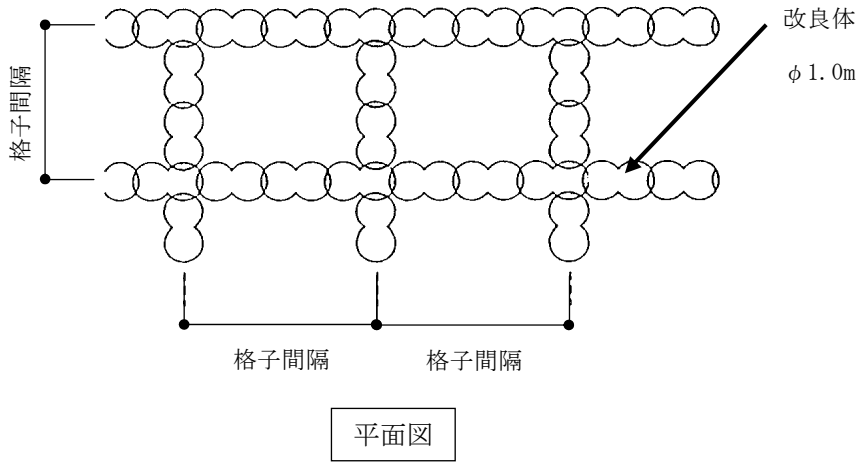
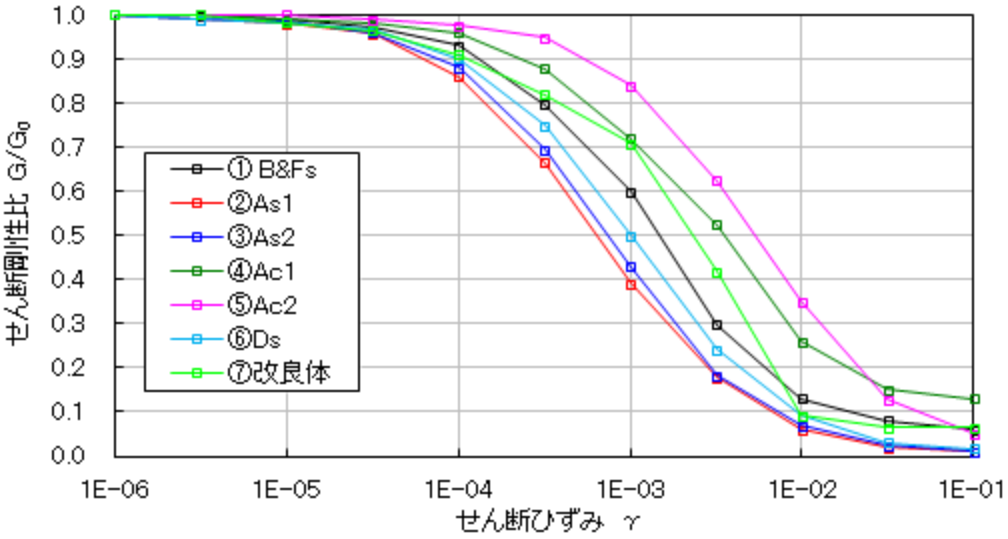
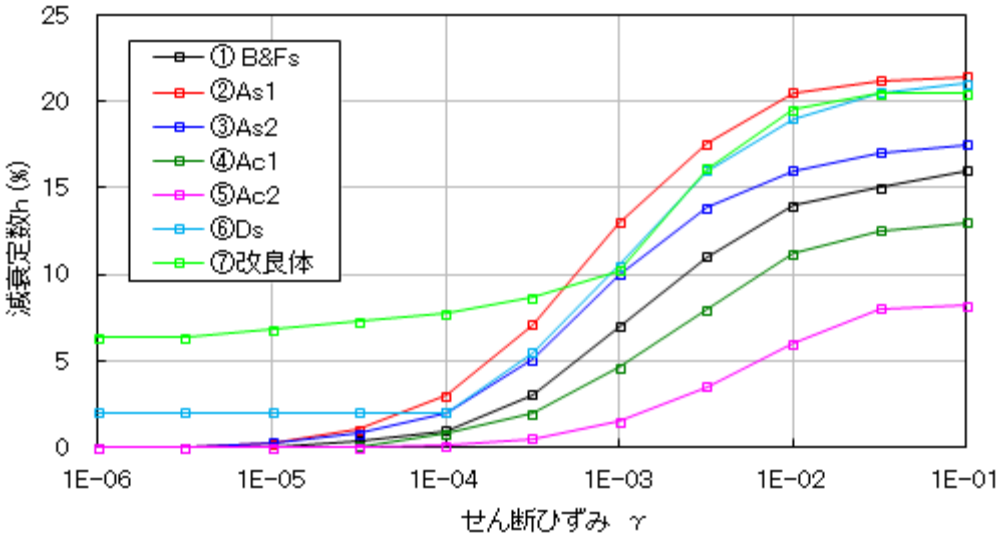


図４　機械式撹拌による改良体の配置



（１）G/G_0～γ



（２）h～γ

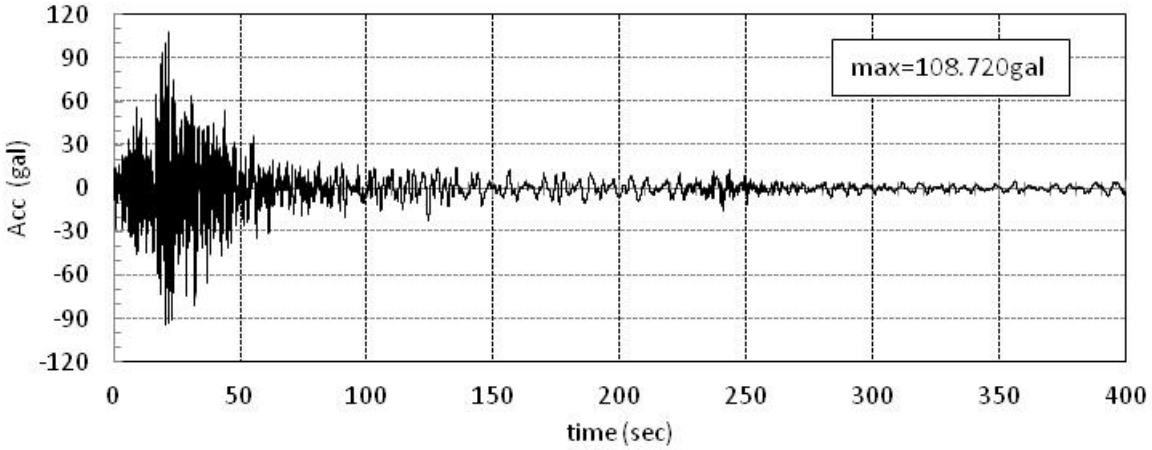
図５　地盤と改良体の非線形特性

表２　改良体の初期せん断剛性

F_c (N/mm^2)	q_{uf} (N/mm^2)	G_o (N/mm^2)
0.5	1.2	310
1.0	2.4	620
1.5	3.6	930
2.0	4.8	1240
3.0	7.2	1860

(3) 検討用地震動

解析に用いる地震動は図6に示すレベル1相当の東北地方太平洋沖地震（夢の島観測波、M=9.0）とした。



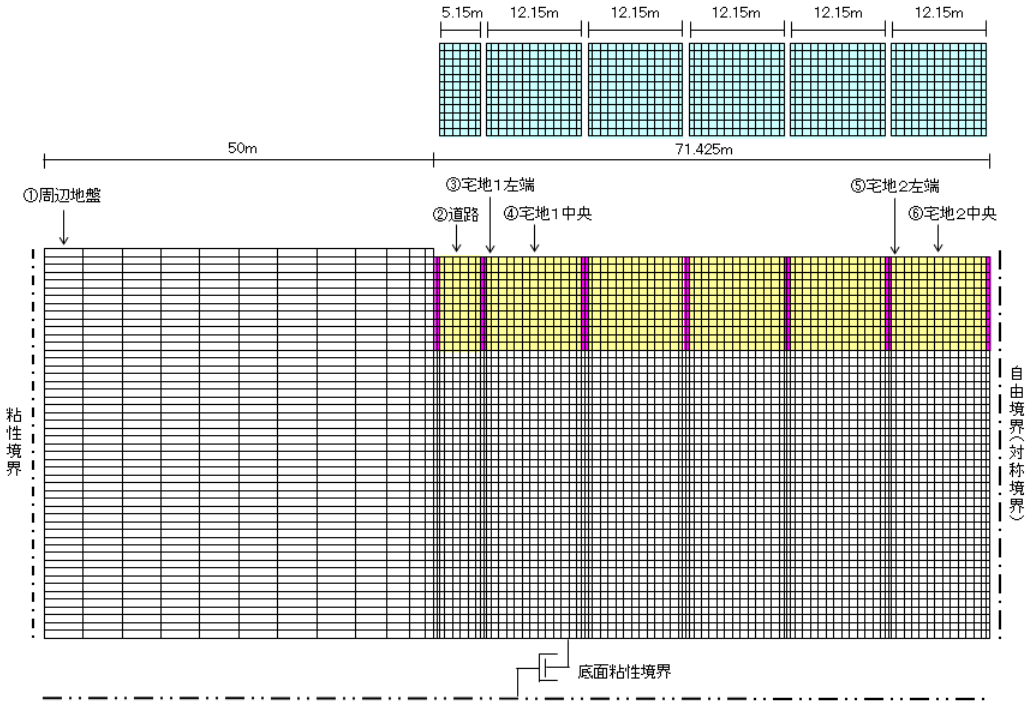
東北地方太平洋沖地震（夢の島観測波、M=9.0）

図6　入力地震波（2E）

(4) 2 次元 FEM による地盤のモデル化

格子状改良地盤による地盤の液状化防止効果は、周辺地盤も含めた 2 次元有限要素解析を実施して、格子内地盤の液状化に対する安全率である FL 値の分布を調べることで確認した。解析プログラムには Super FLUSH（等価線形解析）を用い、改良地盤と未改良地盤をそれぞれモデル化した。

図 7 に FEM モデル図を示す。解析断面は 1 街区を対象として、図 2 の長辺方向とし、軸対象として半分をモデル化した。改良体のうち、面外壁は奥行き方向に連続しているものとして表 1 の材料定数を与えているが、面内壁は奥行き方向の格子間隔毎に 1 枚あるとして密度およびせん断剛性を換算している。また、面内壁は格子に囲まれた地盤とモデル上で分離し、それぞれ左右端で面外壁と接続させている。



↓解析の出力位置

CASE1【改良体厚 0.85m、Fc=1.5】

図 7　2 次元 FEM モデル

(5) FEM 解析結果に基づく液状化判定

工学的基盤から地震動を入力して FEM モデル全体の地震応答解析を行い、格子状改良体に囲まれた地盤の最大せん断応力を求め、その値を用いて格子内地盤の液状化判定を行った。検討手順を以下に示す。

表 2 の地盤モデルを用いた地震応答解析結果から、格子中央部のラインにおける最大せん断応力 τ_{max} の深度分布を求める。なお、地盤のせん断応力評価において、地震のマグニチュード（M）を考慮して、地震応答解析で得られる最大せん断応力 τ_{max} を液状化判定の外力として用いる等価なせん断応力 τ_{eff} に換算する際の補正係数は

$$\gamma_n = 0.1(M-1) \qquad (5)$$

とした。したがって、M=9.0 に対しては γ_n=0.8 となる。

以上より、等価なせん断応力比は次式で表される。

$$\tau_{eff}/\sigma_z' = \gamma_n \times \tau_{max}/\sigma_z' \qquad (6)$$

ここに、σ_z'は検討深さにおける有効応力である。

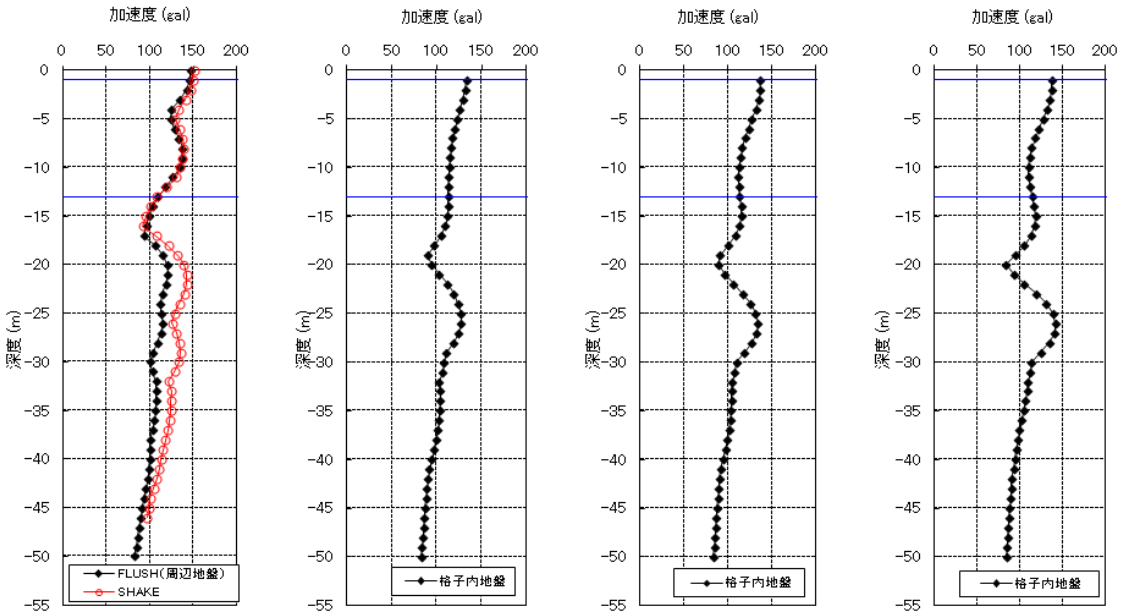
一方、液状化強度については、格子状改良を実施しても格子内地盤の液状化強度は変化しないものとし、建築基礎構造設計指針[3)]に基づいてN値から算定した。

液状化強度比は τ_l/σ_z' と表されるので、液状化に対する安全率 FL は下記の式で求められる。

$$FL = (\tau_l/\sigma_z') / (\tau_{eff}/\sigma_z') \qquad (7)$$

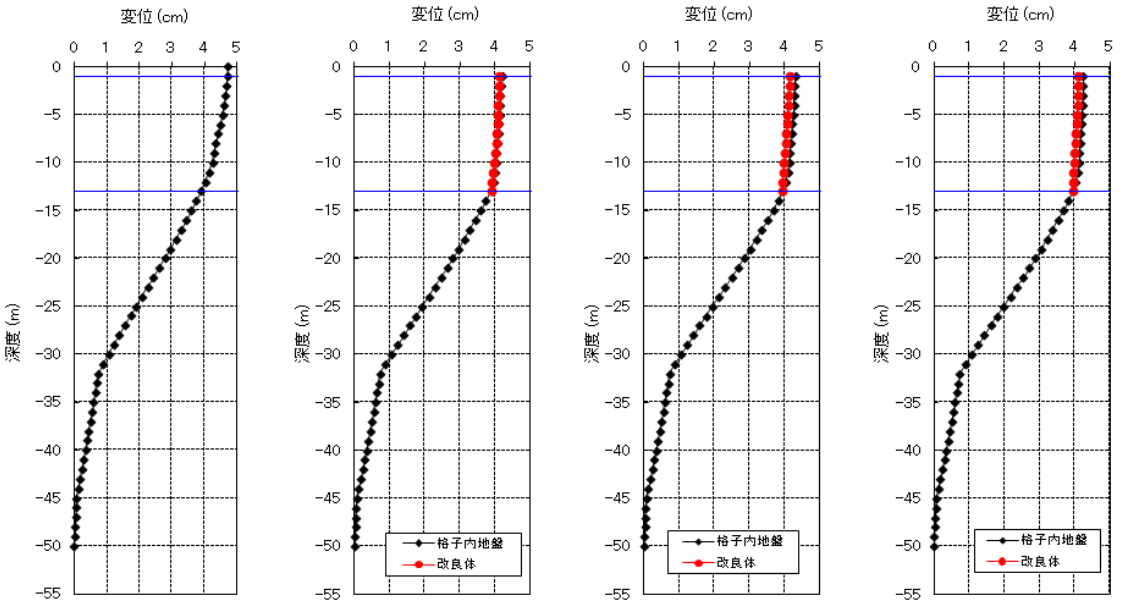
図 8 に地震応答解析結果を示す。「格子内地盤」とは格子状改良に囲まれた未改良地盤の応答値であり、「改良体」は格子状改良体（面内壁）における応答値である。「格子内地盤」のせん断応力は格子状改良があることで応力が小さくなっている。これに対して、改良体に発生するせん断応力は大きい。また、地表面加速度は 140～150 cm/s^2 程度である。

図 9 に格子状改良体に囲まれた地盤の位置（出力位置は図 7 参照）における FL 値の分布を示す。改良エリアの外側にある周辺地盤において GL-12m までは FL<1 となっており、液状化の可能性が高い。一方、改良エリアでは道路部分および宅地部分とも改良範囲では FL>1 となっている。



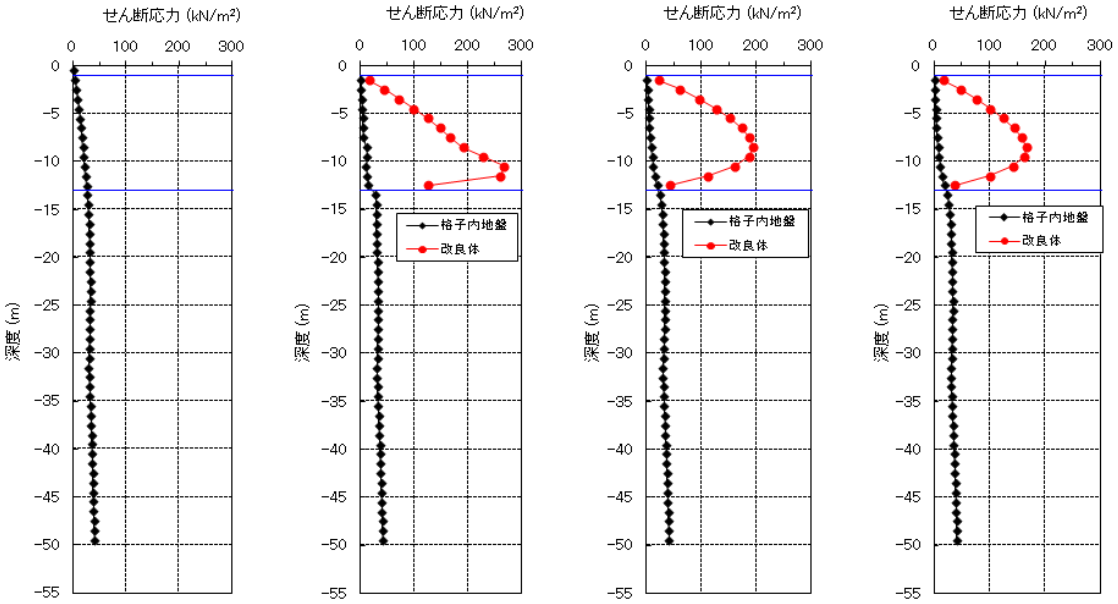
①周辺地盤　②道路　④宅地１・中央　⑥宅地２・中央

(a) 加速度



①周辺地盤　②道路　④宅地１・中央　⑥宅地２・中央

(b) 変位



①周辺地盤　②道路　④宅地１・中央　⑥宅地２・中央

(c) せん断応力

図 8　地震応答解析結果

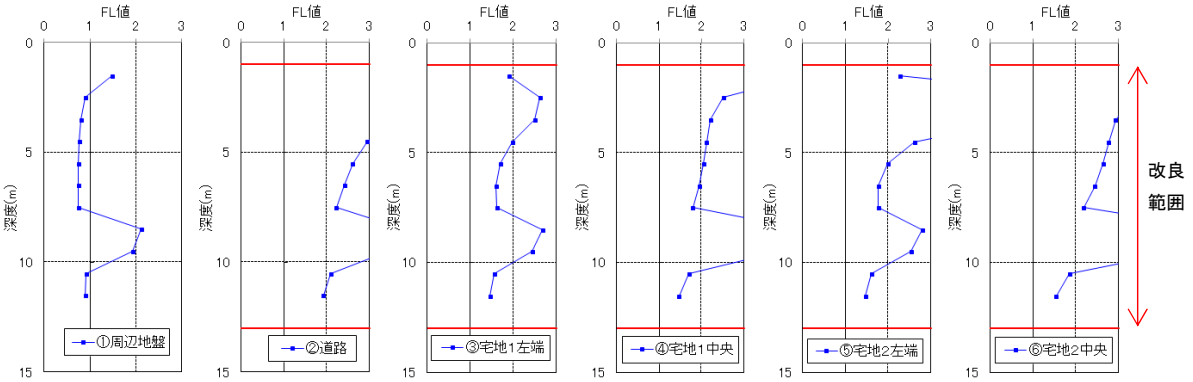


図 9　液状化検討対象層の FL 値分布【Case1・夢の島観測波(L1 相当)】

(6)格子状地盤改良体の安定性の検討

地震時応力に対して格子状地盤改良に発生する最大せん断応力が許容値（許容せん断応力度）以内かどうかを確認する。

・改良体のせん断強度

f_τ ＝min(0.3F_c＋$\sigma_n \tan\phi$, 0.5Fc) であるが、$\sigma_n \tan\phi$ の項を無視して f_τ＝0.3F_c とすると

f_c＝1.5 N/mm^2 では f_τ＝450 kN/m^2

f_c＝3.0 N/mm^2 では f_τ＝900 kN/m^2

FLUSH による解析結果より、改良体面内壁に生じる最大せん断応力は

267.39 kN/m^2（図 8、CASE1）であり、

安全率 Fs＝450 / 267.39＝1.7＞1.5（短期）

改良体は地震時応力に対して十分な安全性を保有している。

(7)今後の予定

・CASE2 以降の解析の実施

・地盤改良壁の強度を下げた場合の検討ケースを追加

＜参考文献＞

1） 日本建築センター：改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，pp. 349－355，2002
2） 黒田琢磨，田中英朗，富井隆，鈴木康嗣：深層混合処理工法による改良体の物性評価（その 3）改良体の動的変形特性に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp. 699－700，2001
3） 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001