

格子状地盤改良工法（TOFT工法）の概要

平成24年8月24日

1. TOFT 工法の概要

TOFT 工法は主に堤防の液状化対策を目的として、1986 年～1992 年にかけて建設省土木研究所と民間 4 社の共同研究で開発された工法で、2001 年には建築学会賞を受賞している。この TOFT 工法の開発経緯は図 1-1 に示されており、建設省土木研究所との共同研究以降も自主研究として技術開発は継続して実施されてきた。

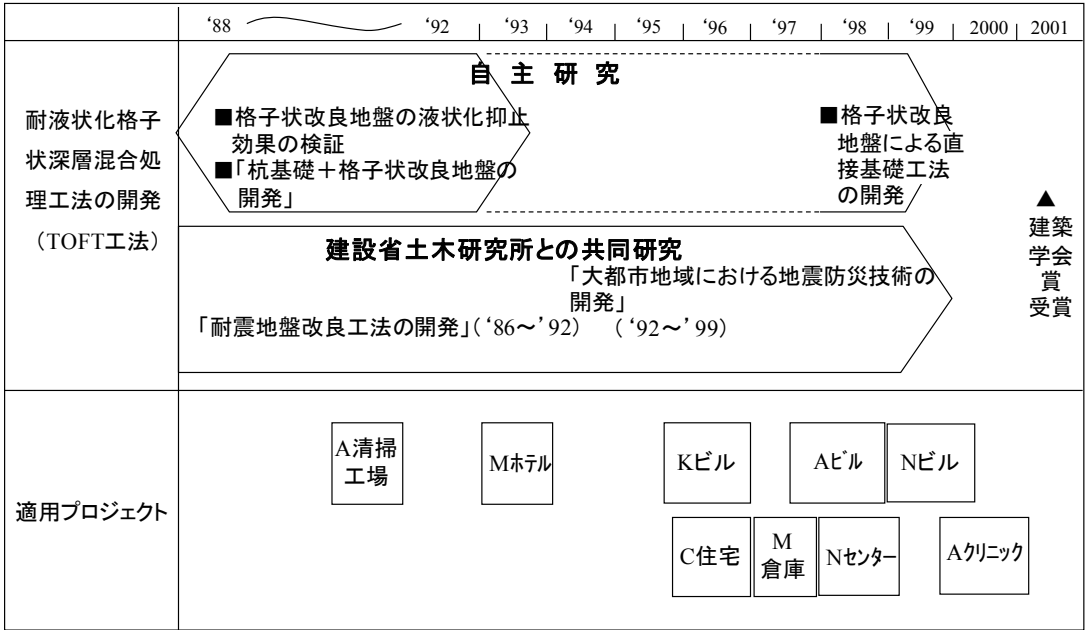


図 1-1 TOFT 工法の開発経緯と適用プロジェクト

図 1-2 は TOFT 工法の液状化防止メカニズムを示している。未改良地盤では、地震時に大きなせん断応力が発生するが、液状化する地盤を格子状に地盤改良すると、地震時のせん断応力の大部分が改良された地盤側に作用するため、格子状改良壁で囲まれた地盤内の発生せん断応力が大幅に低減され、液状化を防止することができる。

液状化しやすい地盤を格子壁で囲い込むことによって、地盤の水平変位を抑え液状化を防止します。

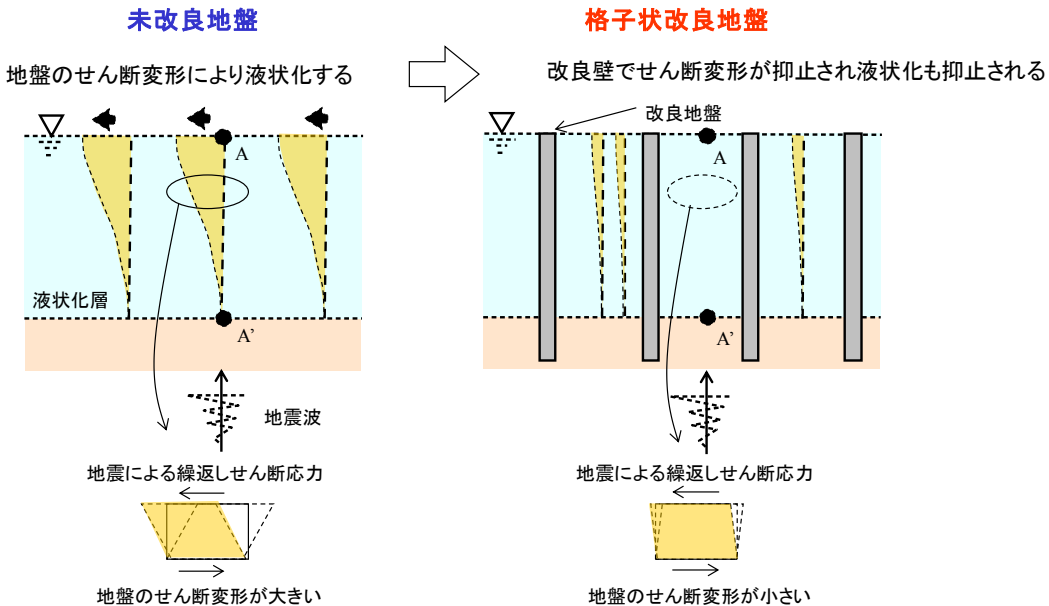


図 1-2 TOFT 工法の液状化防止原理

図 1-3 は平成 21 年 5 月末時点での TOFT 工法の施工実績を示す。累計改良土量は約 400 万 m³ に達し、液状化対策工法として幅広い分野で採用されている。

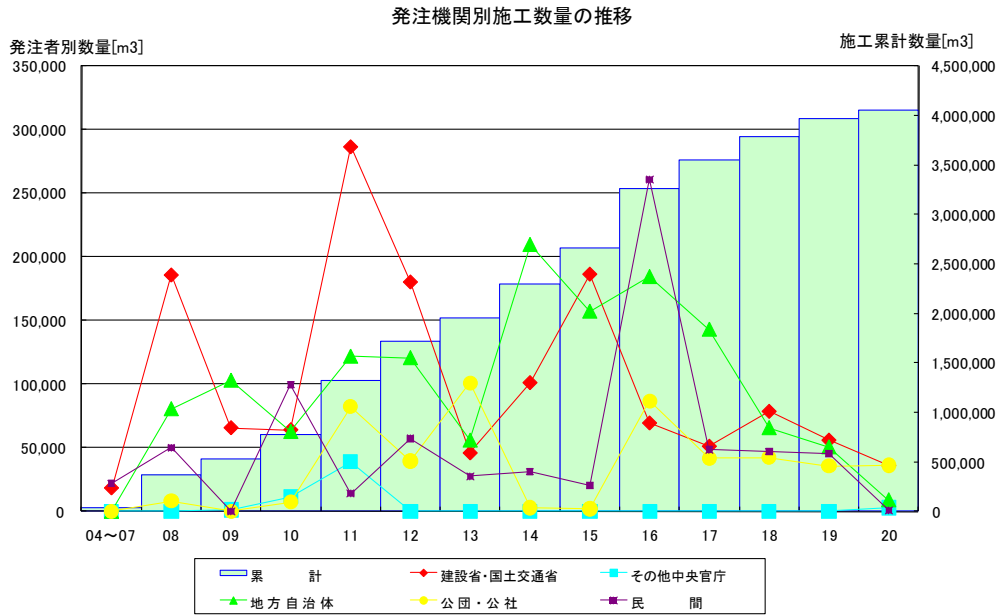


図 1-3 TOFT 工法の施工実績(平成 21 年 5 月末時点)

表 1-1 に示されているのは、TOFT 工法の施工実績の一覧表である。施工件数は 446 件である。

表 1-1 TOFT 工法の施工実績一覧(平成 7 年度～平成 20 年度)

項目	発注機関名	～平成7年度	平成8年度	平成9年度	平成10年度	平成11年度	平成12年度	平成13年度	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	総合計
実施件数(件)	建設省・国土交通省	2	13	7	7	15	18	7	15	16	11	7	10	7	7	142
	その他中央官庁	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5
	地方自治体	0	10	8	12	21	20	22	21	16	22	21	16	12	5	206
	公団・公社	0	2	0	1	9	3	7	2	2	3	3	5	2	3	44
	民間	1	5	0	5	1	6	5	4	3	3	5	6	2	1	49
	合計	3	30	16	26	48	47	41	42	37	43	36	37	23	17	446
改良数量(m ³)	建設省・国土交通省	18,294.4	185,959.8	65,709.2	64,124.4	266,897.0	180,462.6	45,849.0	101,195.8	186,624.6	69,421.2	51,117.0	78,592.0	55,920.6	35,941.9	1,426,109.5
	その他中央官庁	0.0	0.0	1,130.0	11,489.0	39,130.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,852.0	54,601.0
	地方自治体	0.0	80,675.4	103,127.0	62,773.8	122,095.5	120,819.2	56,031.6	209,856.0	157,422.3	184,614.4	143,242.0	65,758.9	50,682.9	9,031.1	1,366,040.1
	公団・公社	0.0	8,225.8	0.0	7,330.0	92,517.2	39,607.8	100,884.0	2,827.0	2,148.0	86,771.2	41,900.0	42,391.8	35,816.0	36,316.3	486,547.2
	民間	22,199.0	50,031.1	0.0	99,631.3	14,111.0	57,343.0	27,624.8	31,233.2	20,462.0	260,958.0	48,589.0	47,120.5	45,465.0	850.0	725,517.9
	合計	40,493.4	324,902.2	169,866.2	245,348.5	544,460.7	398,232.7	230,389.4	345,112.0	366,656.9	601,664.9	284,848.0	233,863.0	187,884.5	84,993.3	4,058,815.6
累計	40,493.4	365,395.6	535,361.8	780,710.2	1,325,170.9	1,723,403.6	1,953,793.0	2,298,905.0	2,665,561.9	3,267,226.8	3,552,074.8	3,785,937.8	3,973,822.3	4,058,815.6	4,058,815.6	

図 1-4 は TOFT 工法の施工実績の中から、建物への適用件数だけをピックアップした施工実績件数を示しており、2010 年までに 40 件近い施工実績がある。

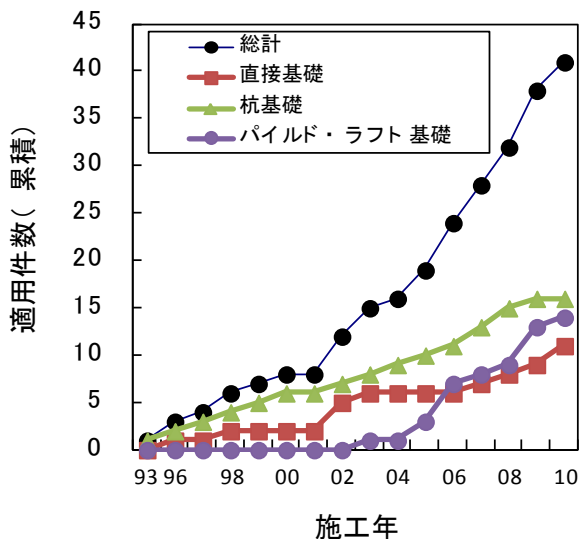
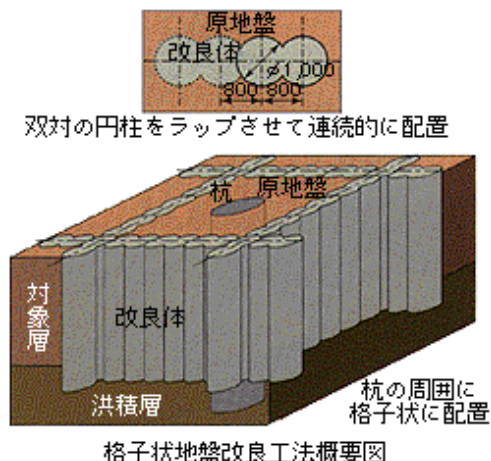


図 1-4 TOFT 工法の建物への適用件数(1993 年～2010 年)

図 1-5 は TOFT 工法で施工された地盤改良のイメージを示している。通常は直径 1m の改良杭を同時に 2 本施工できる 2 軸の機械式攪拌による深層混合処理工法によって、改良杭をラップさせながら壁を施工する。



掘り出しによる出来型の確認

図 1-5 TOFT 工法の改良イメージ

図 1-6 に示しているように TOFT 工法の液状化防止効果については、実験・数値解析・観測で数多くの検証がされている。

振動台実験	遠心模型振動実験
<p>液状化防止効果の可能性を検証するための模型振動実験</p> <p>格子状改良地盤模型 振動台 地盤内の間隙水圧・加速度の計測 加振装置</p> <p>(土木研究所にて実施)</p>	<p>実大規模と相似則を合わせた状態での模型振動実験</p> <p>1/N縮尺 実物大を再現</p> <p>模型 加振装置 搭載 回転 プラットフォーム プレートフォーム カウンターウエイト モーター 遠心力 Ng (g: 重力加速度)</p>
数値解析	観測
<p>有限要素法 (FEM) による3次元有効応力解析</p> <p>過剰間隙水圧比分布図</p>	<p>実地盤における地震時の間隙水圧、加速度の観測</p> <p>地震時の地盤内の過剰間隙水圧 (Δu)、加速度の観測</p>

図 1-6 TOFT 工法の液状化防止効果の検証

2. TOFT 工法の液状化防止効果の検証

2.1. 振動台実験

図 2-1 は格子間隔 8cm, 16cm, 24cm, 32cm, 40cm, 80cm の格子を剛土槽(250cm×68cm×60cm)内に作製し、土木研究所で行われた振動台実験の平面図と断面図を示している。

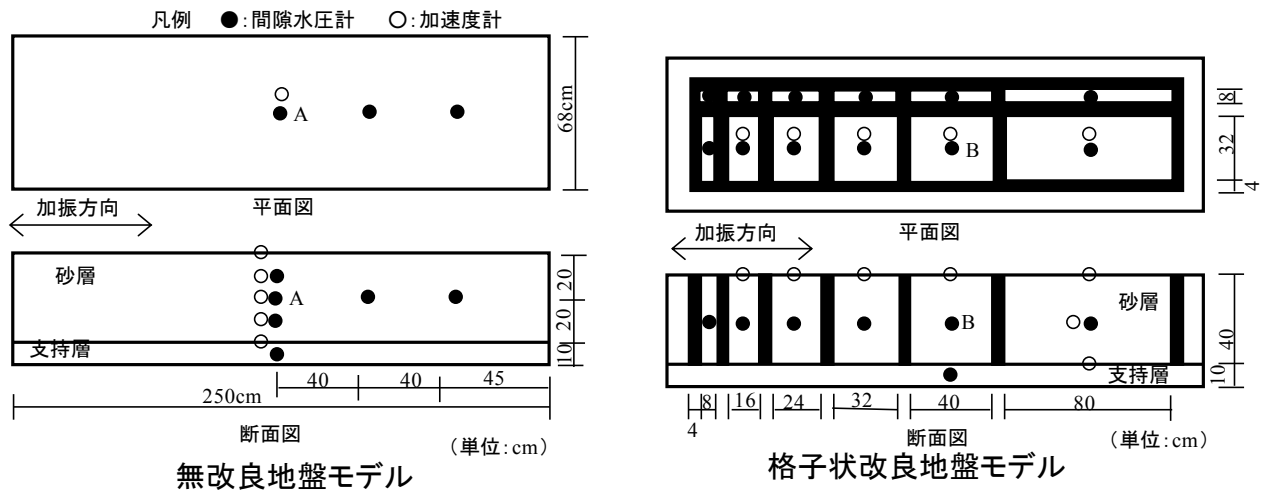


図 2-1 振動台実験の平面図と断面図(参考文献①「深層混合工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験(その 2)-格子状改良地盤の液状化抑制効果について-」第 23 回土質工学研究発表会, pp.1019-1020, 1988)

図 2-2 には振動台実験の加振条件と過剰間隙水圧時刻歴が示されており、無改良地盤に比べて格子状改良地盤内の過剰間隙水圧発生量が大幅に低減されていることが分かる。

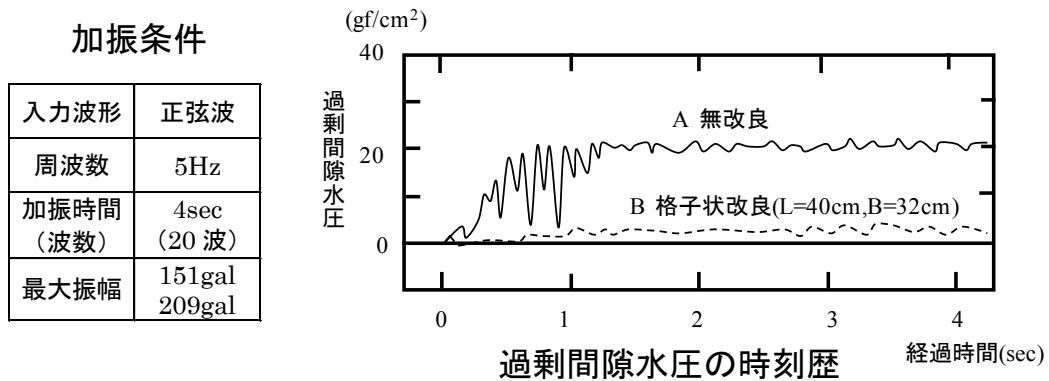
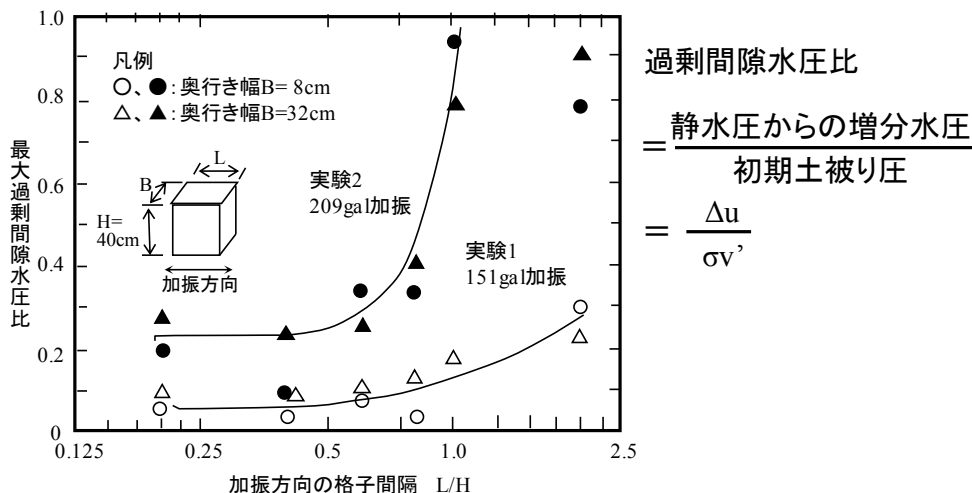


図 2-2 加振条件と過剰間隙水圧時刻歴

図 2-3 は図 2-1 の模型を用いた振動台実験結果を整理したもので、加振方向の格子間隔が広がると格子内地盤の過剰間隙水圧比が高くなり、液状化抑制効果が低下していることを示している。

入力最大加速度 208gal の実験 2 では、加振方向の格子幅 L と液状化層厚さ H の比で整理した L/H が 0.8 以下だと最大過剰間隙水圧比が 0.5 以内に収まっていることから、TOFT 工法の当初の設計では、L/H が 0.8 以下になるように格子間隔の設計を行っていた。

しかし、入力最大加速度 151gal の実験 1 に着目すると、L/H=2.0 でも最大過剰間隙水圧比は 0.3 以下で、L/H が 0.8 を超えても入力地震動の大きさが小さければ液状化抑制効果があることが分かる。



過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma_v'$ と格子間隔の関係 (深さ20cm)

■ 格子間隔が狭くなるほど発生する過剰間隙水圧は小さくなり、液状化抑止効果が高くなる

図 2-3 過剰間隙水圧比と格子間隔の関係(振動台実験結果)

その後に行われた遠心模型振動実験結果と解析結果から、L/H を用いる方法とは別に、設計で考慮する地震動に応じて合理的に格子間隔を設計する方法が、建築基礎のための地盤改良設計指針案(建築学会、2006年)に明記されており、2006年以降、この方法で広く設計が行われている。

下式は、地盤改良設計指針案に示されている格子中央地盤に発生するせん断応力比 $\left(\frac{\tau_d}{\sigma_z'}\right)_{Grid}$ を求める提案式である。

$$\left(\frac{\tau_d}{\sigma_z'}\right)_{Grid} = \gamma_n \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} \cdot \gamma_d' \cdot FL(L) \cdot FG(G) \cdot FH(H)$$

$\gamma_n=0.1(M-1)$ ($M=7.5$ と仮定, M : マグニチュード), α_{max} は自由地盤での地表面最大加速度

図 2-4 は提案式の補正係数を示している。格子間隔 L だけから補正係数 FL(L)が決まるため、液状化層厚とは独立に格子間隔を設定できるようになっている。提案式によると L/H=0.8 以上のものも可能になっている。

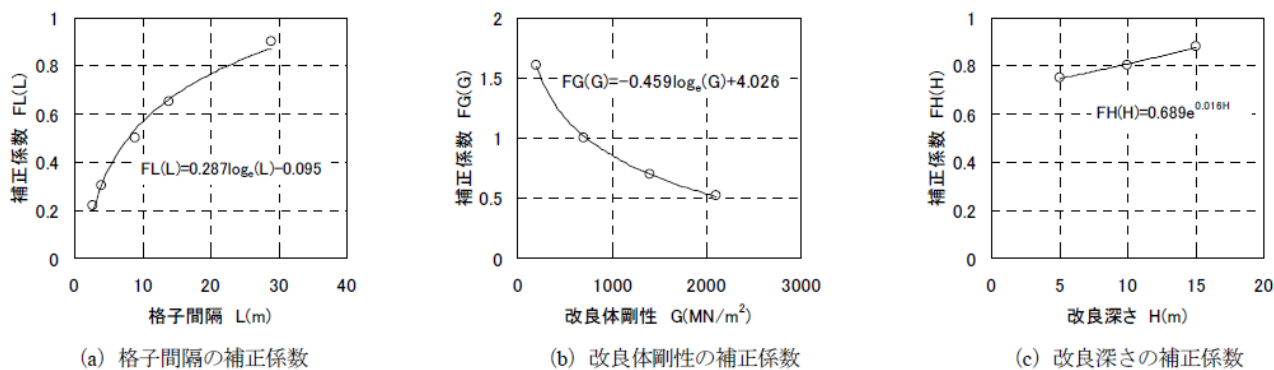


図 2-4 補正係数とパラメータの関係

2.2. 遠心模型振動実験と数値解析

図 2-5 は格子間隔 4m,6m,8m,10m と格子間隔の異なる格子状改良地盤をモデル化して行われた遠心模型振動実験の平面図と断面図を示している。実験で用いられた入力地震動の最大加速度は 187gal。

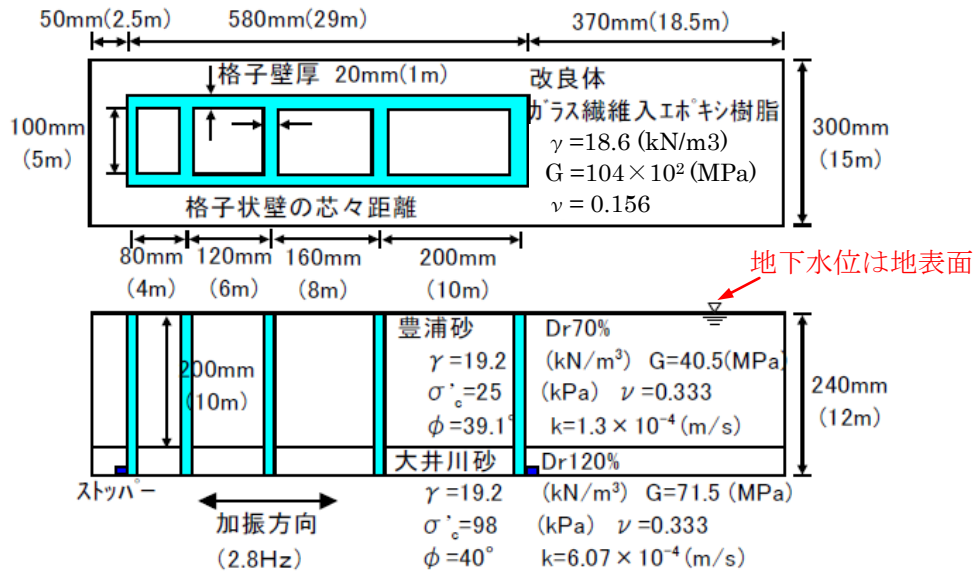


図 2-5 遠心模型振動実験の平面図(上)と断面図(下)(括弧内は 1G 場に換算した寸法を表示)
 (参考文献②「格子状改良地盤の過剰間隙水圧発生量を予測できる解析法の検討」土木学会年次講演会、2001 年、pp.172-173)

図 2-6 は遠心模型振動実験をシミュレーションするための 3 次元解析モデルである。シミュレーションは有効応力解析(解析コード MuDIAN)で行った。

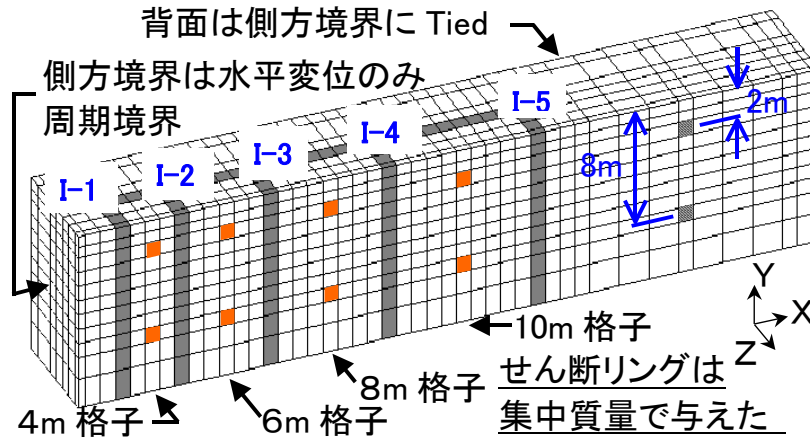


図 2-6 遠心模型振動実験のシミュレーションに用いた 3 次元解析モデル

図 2-7(a)は浅い部分(GL-1.5m~GL-2.5m)での過剰間隙水圧比時刻歴の実験結果と解析結果を、(b)では深い部分(GL-6.5m~GL-7.5m)での過剰間隙水圧比時刻歴の実験結果と解析結果を比較している。周辺地盤では全深度で液状化が発生しているのに対して、深い部分では格子内地盤で液状化の発生は見られないが、浅い部分では格子間隔が広がると液状化抑制効果が低下して、格子間隔 10m の格子内地盤では液状化の発生が確認される。

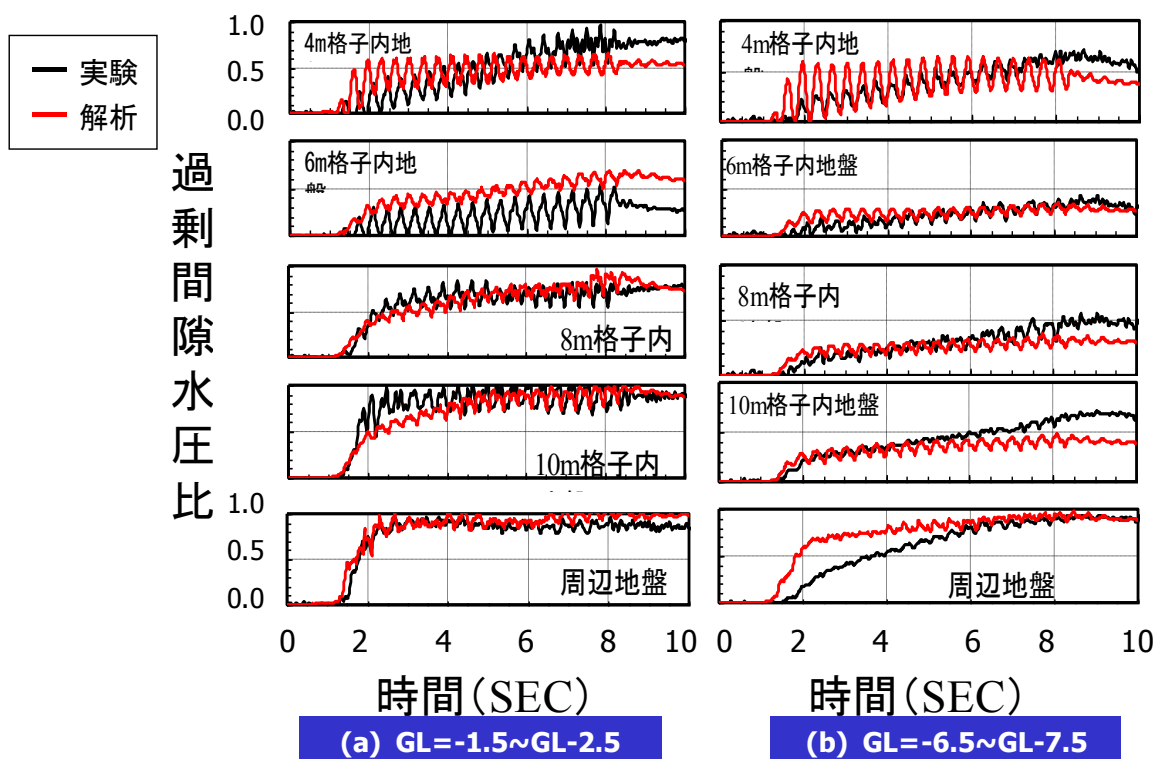


図 2-7 過剰間隙水圧比時刻歴の実験結果と解析結果の比較

2.3. 観測結果

表 2-1 に兵庫県南部地震(1995年)と東北地方太平洋沖地震(2011年)時に、TOFT 工法の液状化防止効果が観測された事例を示す。

表 2-1 TOFT 工法の観測事例

事例	建物規模	地下水位	地表面最大加速度	格子間隔	液状化痕跡
神戸市のMホテル (1995年)	S14階建て	GL-1.2m	約350gal	8m ~ 24m	なし
浦安市のD駐車場 (2011年)	SRC4階建て	GL-1.8m	約150gal	15.6m × 16.5m	なし

3. 地下水位の影響

地下水位が地表面にある遠心模型振動実験のシミュレーション結果では、拘束圧の低い地表面付近の格子状改良地盤内で過剰間隙水圧が液状化発生レベルまで上昇しているが、実地盤では地下水位が地表面にあることは殆ど考えられない。

地下水位の変化と液状化発生の関係を確認する遠心模型振動実験が行われた。図 3-1 に示している遠心模型振動実験は、地下水位が地表面にある場合と、地下水位が GL-1m・GL-3m にある条件で実験を行っている。遠心加速度 30g では液状化層厚さ H=6m、格子間隔 L=1.8m~5.4m に相当する。遠心加速度 50g では H=10m、L=3.0m~9.0m、遠心加速度 100g では H=20m、L=6.0m~20.0m にそれぞれ相当する。

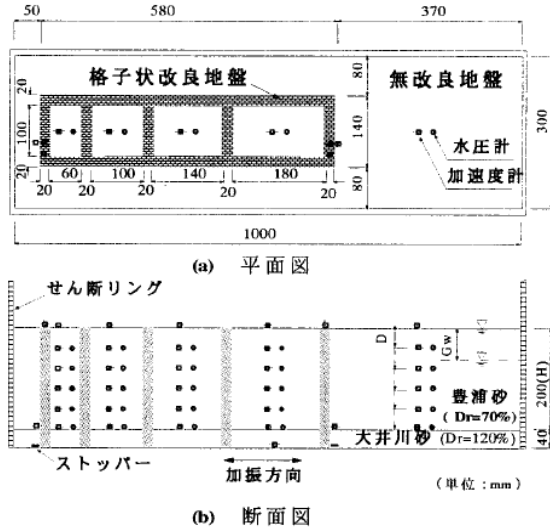


図-1 モデル地盤概要

表-1 実験条件

液状化層厚 (m)	遠心加速度 (g)	周数 (Hz)	入力加速度 (gal)	地下水位 (m)	L/H	砂の物性
20	100	1.4	支持層天端 70~80	GL-0m	0.3	豊浦砂-D _r =70% U _c =1.5 ρ _{max} =1.635(g/cm ³) D ₅₀ =0.16(mm) ρ _{min} =1.326(g/cm ³)
10	50	2.8	130~150	GL-1m	0.7	大井川砂-D _r =120% U _c =1.87 ρ _{max} =1.551(g/cm ³) D ₅₀ =1.15(mm) ρ _{min} =1.298(g/cm ³)
6	30	3.3	200~220 (sin20波)	GL-3m	0.9	

※ 遠心加速度30g(砂層厚6m)については地下水位GL-3mのケースを省略
L:格子壁間隔, H:液状化層厚, 数値はプロトタイプに換算

図 3-1 地下水位と過剰間隙水圧発生量の関係を求めた遠心模型振動実験(参考文献③「深層混合処理工法を用いた格子状改良地盤による液状化対策(その2)」建築学会大会、1998年、pp.593-594)

図 3-2 では図 3-1 に示す遠心模型振動実験で得られた過剰間隙水圧比の最大値を比較している。地下水位が GL-1m・GL-3m にある結果については、地下水位の低下 G_w と液状化層厚さ H の比である地下水位低下率 G_w/H≒0.16 の実験結果をまとめたものである。

地下水位が地表面にある場合に比べて地下水位が地表面以下(GL-1m, GL-3m)にある場合には、過剰間隙水圧比の最大値が小さく、液状化抑制効果が高い傾向がある。液状化層厚さと地下水位位置の条件は本委員会での検討条件と対応していないが、地下水位が下がれば格子状改良地盤の格子間隔を広くしても、液状化抑制効果が得られるものと推察される。

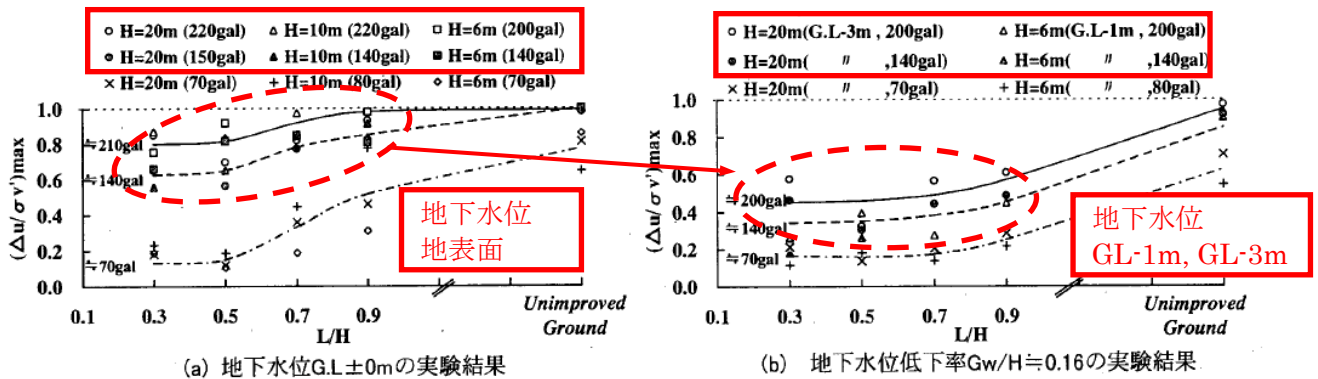


図-4 L/H (L:格子壁間隔, H:液状化層厚) と (Δu/σ'v) max の関係

図 3-2 地下水位位置と過剰間隙水圧比の関係

図 3-3 は個別要素法による解析で求めた格子状改良地盤で囲まれた地盤部分の土粒子の動きと、平均有効応力比のコンター図を示している。格子間隔を広くすると液状化が発生しやすい傾向があり、地盤部分の土粒子の動きも大きくなる傾向があるが、地下水位を地表面から GL-2m に下げることによって液状化の発生が抑制され、地盤部分の土粒子の動きを抑制する効果があることが分かる。また地盤部分の土粒子の変位軌跡は、面外壁からの距離が大きくなると大きくなることも分かる。

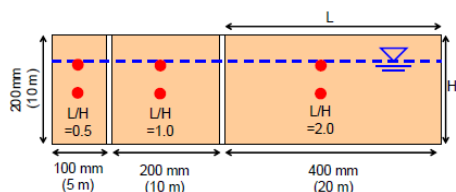
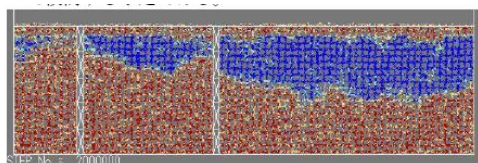
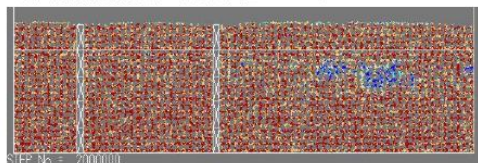


図 1 解析モデル (括弧内は実物換算値)

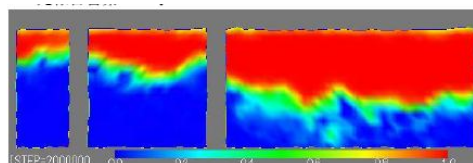


(a) 接点数分布 (地下水位 $z = 0$ m)

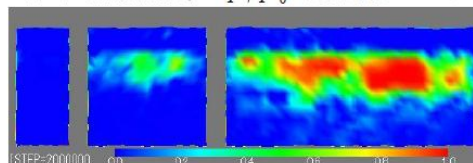


(b) 接点数分布 (地下水位 $z = -2$ m)

図 2 加振終了直後の各要素の接点数分布

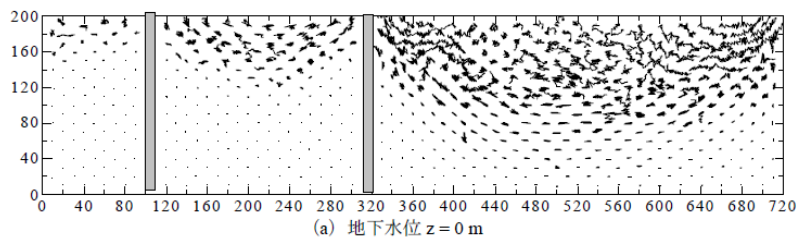


(a) 平均有効応力比, $-\Delta p'/p'_0$ (地下水位 $z = 0$ m)

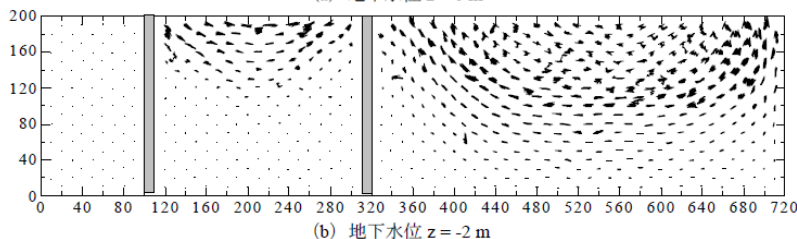


(b) 平均有効応力比, $-\Delta p'/p'_0$ (地下水位 $z = -2$ m)

図 3 加振終了直後の平均有効応力比 ($-\Delta p'/p'_0$)



(a) 地下水位 $z = 0$ m



(b) 地下水位 $z = -2$ m

図 4 地盤変位の軌跡 (地盤変位を 10 倍にして表示)

図 3-3 格子状改良地盤内の土粒子の動き(参考文献④「格子状地盤改良による液状化対策効果に関する個別要素法解析」、地盤工学研究発表会、2008 年、pp.1825-1826)