

液状化対策工法の組合せに関する 3次元 FEM 解析

平成 26 年 3 月

国土交通省国土技術政策総合研究所 都市研究部都市計画研究室

住宅の建ち並んだ液状化のおそれのある既成市街地においては、公共施設（道路）と宅地の一体的な液状化対策が講じられるよう、地盤条件に合った適切な液状化対策工法が選択される必要がある。

その検討のための基礎資料として、地下水位低下工法を主工法として、各種の液状化対策工法を副工法として組合せたケーススタディを 3次元 FEM 解析を用いて行い、それぞれの液状化対策工法の組合せによる地震動に対する宅地の液状化や変位等の挙動を分析し、液状化対策の効果について検証した。

1) 解析の条件

・街区の形状

図 1-1, 1-2 に示すような戸建住宅地を想定した街区モデルを設定した。区画の大きさは 13m×13m (約 50 坪)、13m×16.5m (約 65 坪)、10m×13m (約 40 坪)、10m×16.5m (約 50 坪) の 4 種類とした。

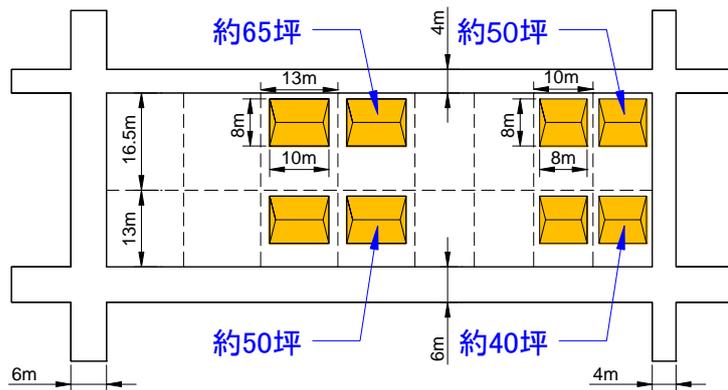


図 1-1 街区の平面形状

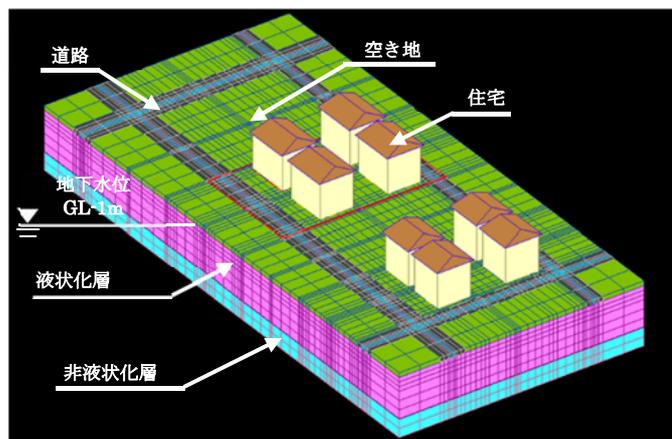


図 1-2 街区のモデル

・ 3次元 FEM 解析モデル

解析対象領域は、解析範囲を前述の街区の一部とした場合でも街区全体とした場合と比較して解析結果に違いがないことをあらかじめ確認した上で、図 1-2 の街区のモデルから図 1-3 に示す 50 坪と 65 坪の 4 区画を取り出して、住宅を 2 区画のみに配置した。

境界条件は、境界部での地震動の反射を防ぐために、側方境界は外側の領域に 100m の幅広要素を設定しその外周を等変位境界（繰り返し境界）とし、また、底面境界は、粘性境界とした。

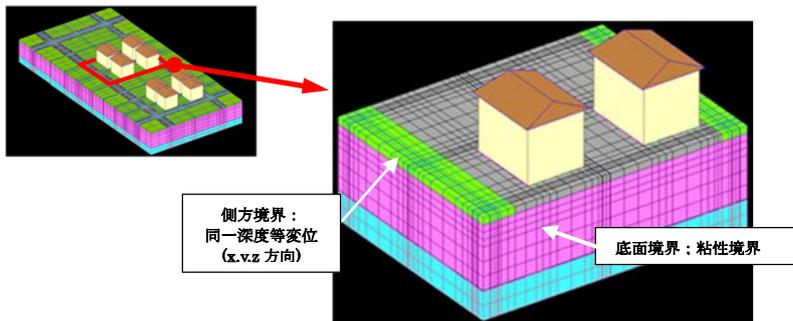


図 1-3 解析領域

・ 住宅のモデル

住宅は、構造計算の動的解析に用いる 1 質点系のモデルで表現し、上部の住宅部と底面の基礎部にそれぞれ 198.8kN の重量を設定した。また、住宅の偏心の影響を見るため、時松ら ¹⁾を参考に一戸に偏心重量を与えた。偏心有り、偏心無し各モデルを図 1-4、図 1-5 に示す。

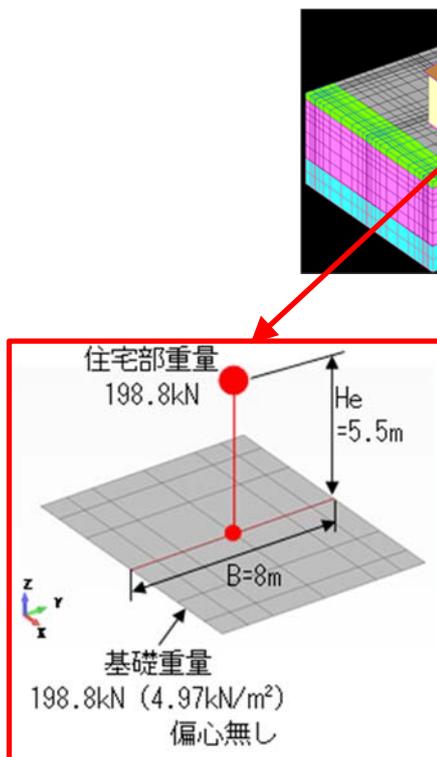


図 1-4 偏心無しモデル

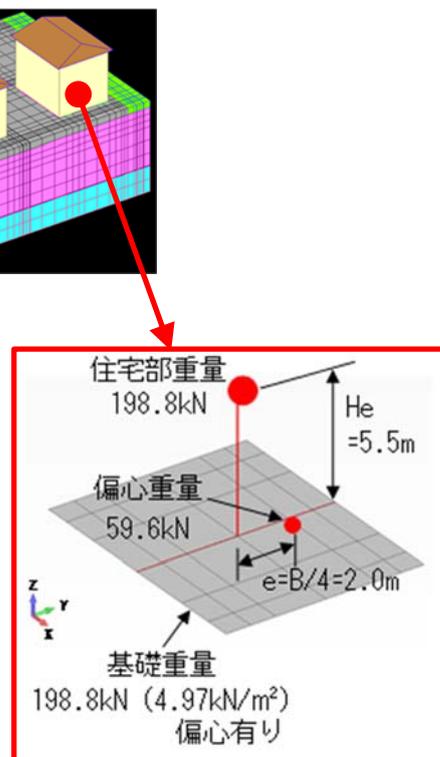


図 1-5 偏心有りモデル

・地盤のモデル

図 1-6 に示す液状化層厚 9m の地盤モデルを設定した。土層構成は表層（砂質土）、液状化層（砂質土）、非液状化層（粘性土）の 3 層構成とした。液状化層は N 値の異なる土層により構成しており、GL-1～2m を N 値=2、GL-2～3m を N 値=3、GL-3～10m を N 値=5 とした。

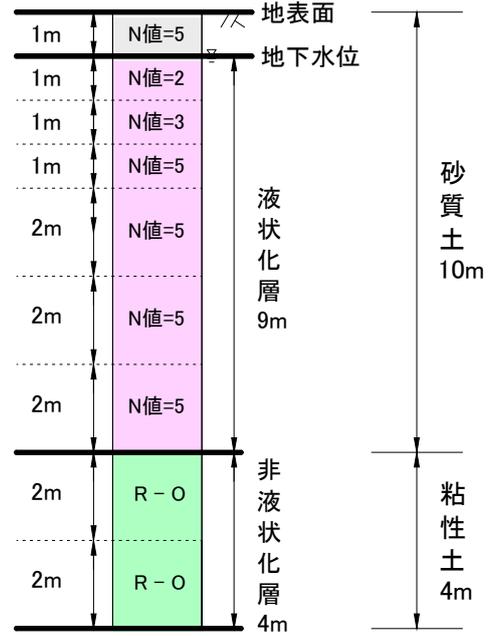


図 1-6 液状化層厚 9m の地盤モデル

2) 入力地震動

入力地震動は、プレート境界型地震と内陸直下型地震の 2 種類の地震動を設定した。

・夢の島波（地表面最大加速度 200gal（東日本大震災での観測の 1.5 倍）、M9.0）

プレート境界型地震として、防災化学技術研究所 K-NET 強震記録による平成 23 年東北地方太平洋沖地震の夢の島引き戻し波を 1.5 倍して用いた。図 2-1 に EW 波 (X 方向)、図 2-2 に NS 波 (Y 方向) の地震波形を示す。

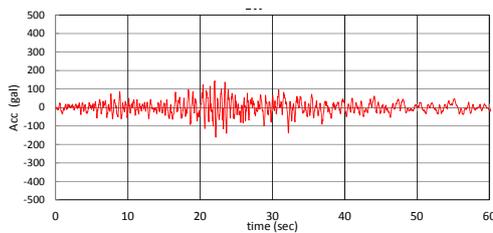


図 2-1 夢の島波 EW 波(X 方向)

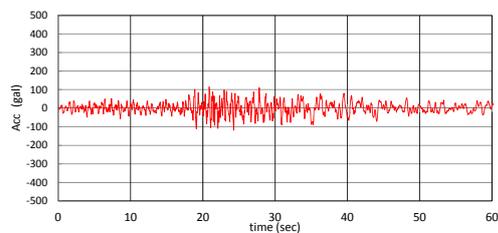


図 2-2 夢の島波 NS 波(Y 方向)

・東京湾北部波（地表面最大加速度 350gal、M7.3）

内陸直下型地震として内閣府の中央防災会議による東京湾北部地震波を用いた。図 3-3 に EW 波 (X 方向)、図 3-4 に NS 波 (Y 方向) の地震波形を示す。

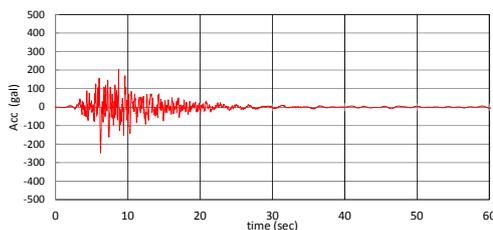


図 2-3 東京湾北部波 EW 波(Y 方向)

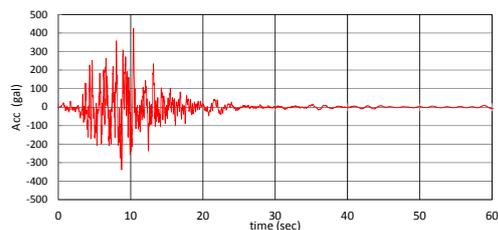


図 2-4 東京湾北部波 NS 波(X 方向)

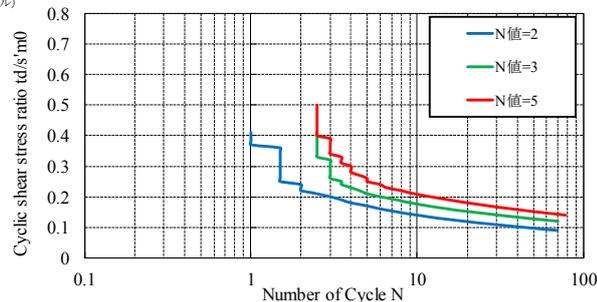
3) 解析プログラム

解析プログラムとして液状化解析手法 LIQCA 開発グループによる LIQCA3D11²⁾を使用した。解析に使用したパラメータを表 3-1 に示す。

表 3-1 解析に使用するパラメータの設定

パラメータ名		液状化層[As] 繰返し弾塑性			部分締固め 繰返し弾塑性	浅層盤状改良 繰返し弾塑性	格子状地中壁 弾性	非液状化層 [Ac] R-O
N値	-	-	2	3	5	15	5	-
相対密度(Meyerhof) ²⁾	Dr	[%]	24	31	42	73	42	-
密度	γ_t	[$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	18			18	18	17
透水係数	k	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	5.0E-05			5.0E-05	5.0E-07	1.0E-08
せん断弾性波速度	V_s	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	90	110	130	160	130	-
せん断弾性係数	G_0	[$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	14862	22202	31009	46972	31009	74405
初期間隙比 ¹⁾	e_0	-	0.83	0.82	0.80	0.65	0.80	0.80
液状化強度 ⁴⁾								
液状化層厚	H	[m]	9.00			9.00	9.00	-
有効上載圧	σ_m^*	[$\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$]	0.22	0.31	0.55	0.55	0.00	-
換算N値	N_1	-	3.13	4.73	6.80	20.39	-	-
補正N値係数	c_1	-	1.00			1.00	1.00	-
	c_2	-	0.00			0.00	0.00	-
補正N値	N_a	-	3.13	4.73	6.80	20.39	-	-
繰返し強度比	$R_{1,20}$ (τ/σ_v)	-	0.12	0.15	0.18	0.31	-	-
繰返し弾塑性モデル								
圧縮指数	λ	-	0.033	0.029	0.025	0.003	0.025	-
膨潤指数	κ	-	0.0025			0.0025	0.0025	-
擬似過圧密比	OCR*	-	1.0			1.0	1.0	-
有効土被り圧	σ_m^*	[$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]	36.2	41.8	54.0	54.0	54.0	-
静止土圧係数	K_0	-	1.0			1.0	1.0	-
無次元化初期せん断係数	G_0/σ_{m0}^*	-	411.1	530.9	574.2	869.9	574.2	-
内部摩擦角 ²⁾	ϕ'	[deg.]	35.0			35.0	35.0	-
変相角 ²⁾	ϕ_m^*	[deg.]	28.0			28.0	28.0	-
破壊応力比	M_r^*	-	1.16			1.16	1.16	-
変相応力比	M_m^*	-	0.91			0.91	0.91	-
液状化強度 ⁴⁾	$R_{1,20}$	-	0.12	0.15	0.18	0.31	-	-
硬化パラメータ	B_0^*	-	900	1400	1800	9100	1800	-
〃	B_1^*	-	30	30	50	90	50	-
〃	C_r	-	0			0	0	-
異方性消失パラメータ	C_d	-	2000			2000	2000	-
ダレイタンス係数	D_0^*	-	2.50	2.00	1.00	1.05	0.00	-
〃	n	-	3.60	4.00	4.00	6.00	0.00	-
塑性規準ひずみ	γ_{rsf}^{ps}	-	0.007	0.009	0.005	0.005	1000	-
弾性規準ひずみ	γ_{rsf}^e	-	0.015	0.050	0.100	0.420	1000	-
R-Oモデル								
ポアソン比	ν	-	-	-	-	-	0.26	0.35
粘着力 ²⁾	c	[kN/m^2]	-	-	-	-	-	100
内部摩擦角	ϕ	[deg.]	-	-	-	-	-	0
せん断弾性係数のパラメータ	α	-	-	-	-	-	-	1.85
〃	r	-	-	-	-	-	-	1.92
R-Oパラメータ ⁶⁾	a	-	-	-	-	-	-	1.0
〃	b	-	-	-	-	-	-	0.0
〃	h _{max}	-	-	-	-	-	-	0.2
〃	$\eta_{0.5}$	-	-	-	-	-	-	0.0015

液状化層の要素シミュレーション結果
(繰返し弾塑性モデル)



(注) 初期応力状態は、解析の地盤モデルを用いた初期応力解析より別途算定した。減衰は Rayleigh 減衰を採用し、初期剛性比例型で地盤の一次固有周期で減衰定数 1%となるように設定した。その他の解析条件として、計算時間増分 $\Delta t=0.002$ 秒、Newmark-B 法の係数は $\beta=0.3025$ 、 $\gamma=0.6$ とした。また、地震応答解析後に約 5.5 時間の圧密解析を実施した。

4) 解析ケース

解析ケースは、地下水低下工法を主工法とし、副工法として不飽和化、浅層盤状改良、柱状ドレーン、部分締固めの4つの工法を設定した。解析ケースを表4-1に示す。また、それぞれの対策の内容と範囲を表4-2～表4-4に示す。

表4-1 解析ケース一覧

入力 地震動	主工法		副工法	対策範囲		ケース 番号	備考	
				平面範囲	対策深さ			
夢の島	無対策			—	—	【a-1】	住宅荷重4.97kN/m ²	
	地下水水位低下工法	低下量1m	低下量1m	街区全面（道路部含む）	地表面-1mから-2mに地下水水位低下	【a-2】	地下水水位はGL-2m	
			低下量2m	街区全面（道路部含む）	地表面-1mから-3mに地下水水位低下	【a-3】	地下水水位はGL-3m	
		低下量1m	不飽和化4m	街区全面（道路部含む）	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-4】	飽和度95%	
			浅層盤状1m	住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-5】	薬液注入工法	
				街区全面（道路部含む）		【a-6】		
			柱状ドレーン （地表面から-6m）	住宅直下を除く敷地全面	住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-7】	ドレーン径：φ10cm 設置間隔：55cm
				住宅直下を除く敷地全面			【a-8】	
			部分締固め6m	住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【a-9】	木杭（目標N値=15）	
			部分締固め3m		地表面から-3mまでの厚さ3m	【a-10】		
			部分締固め4m	住宅直下を除く敷地全面 （受託の外壁から1m内側の範囲も含む）	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-11】	CPG工法（目標N値=15）	
	部分締固め1m	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-12】					
東京湾北部	無対策			—	—	【b-1】	住宅荷重4.97kN/m ²	
	地下水水位低下工法	低下量1m	低下量1m	街区全面（道路部含む）	地表面-1mから-2mに地下水水位低下	【b-2】		
			低下量2m	街区全面（道路部含む）	地表面-1mから-3mに地下水水位低下	【b-3】		
		低下量1m	不飽和化4m	街区全面（道路部含む）	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-4】	飽和度95%	
			浅層盤状1m	街区全面（道路部含む）	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-5】	薬液注入工法	
				住宅外壁から外側に1mの範囲のみ		【b-6】		
			柱状ドレーン （地表面から-6m）	住宅直下を除く敷地全面	住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-7】	ドレーン径：φ10cm 設置間隔：55cm
				住宅直下を除く敷地全面			【b-8】	
			部分締固め6m	住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【b-9】	木杭（目標N値=15）	
			部分締固め3m		地表面から-3mまでの厚さ3m	【b-10】		
			部分締固め4m	住宅直下を除く敷地全面 （受託の外壁から1m内側の範囲も含む）	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-11】	CPG工法（目標N値=15）	
	部分締固め1m	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-12】					

表4-2 対策の内容と範囲(1)

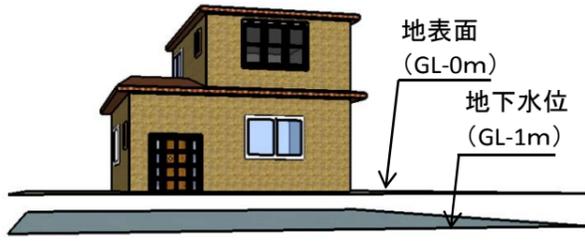
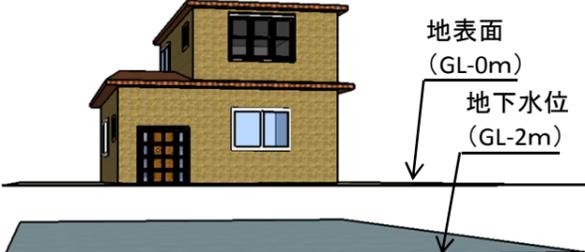
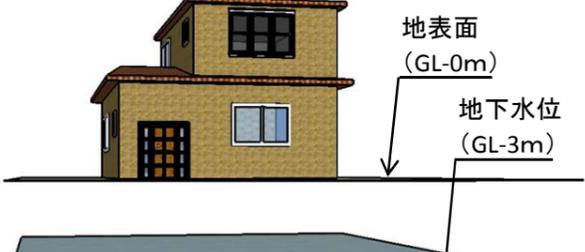
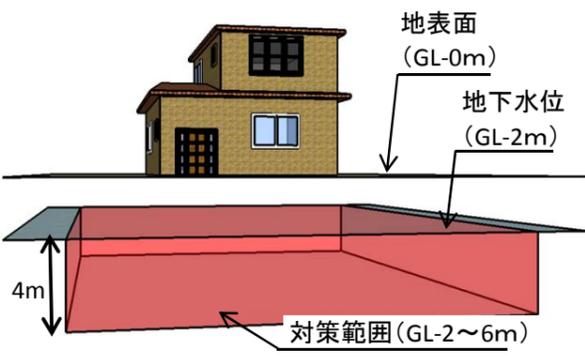
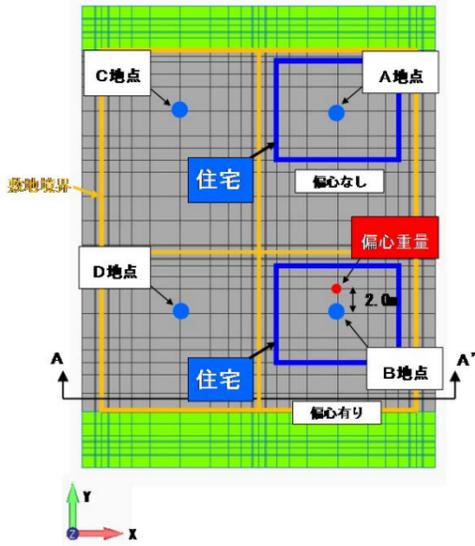
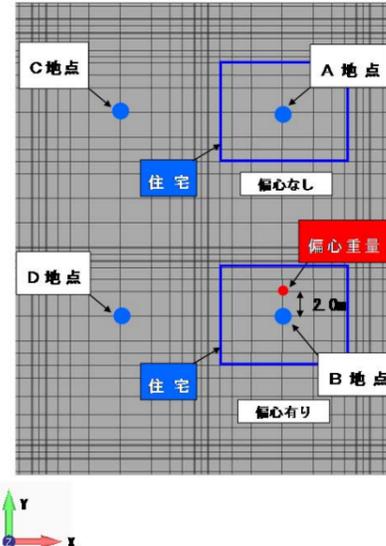
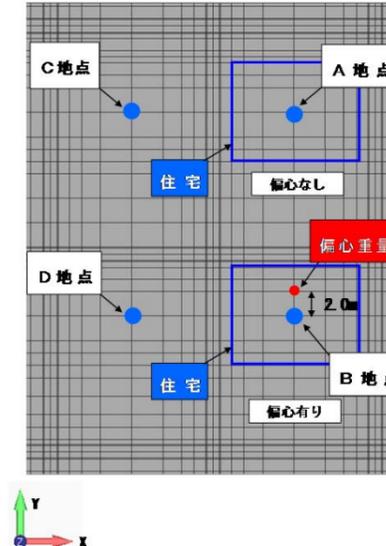
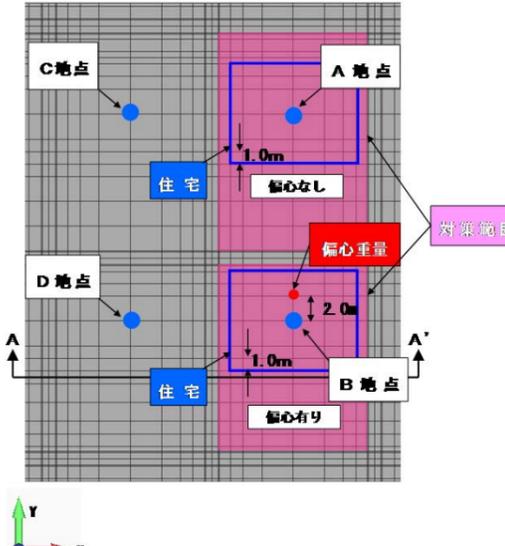
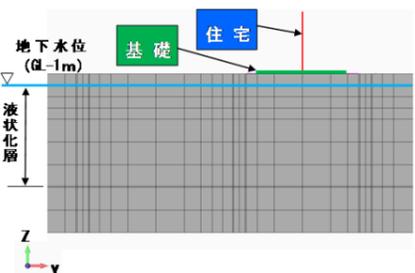
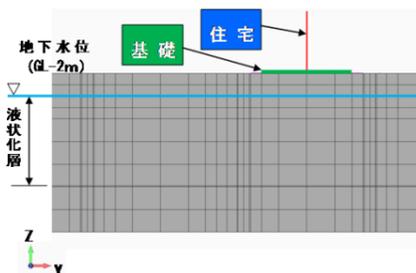
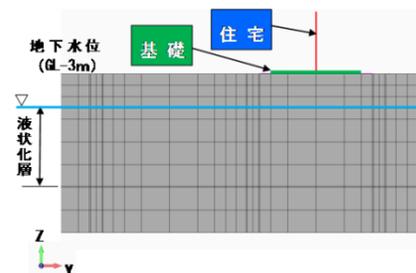
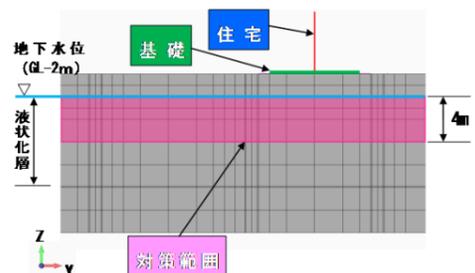
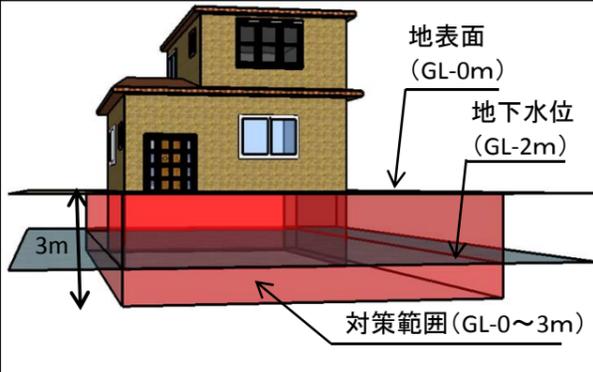
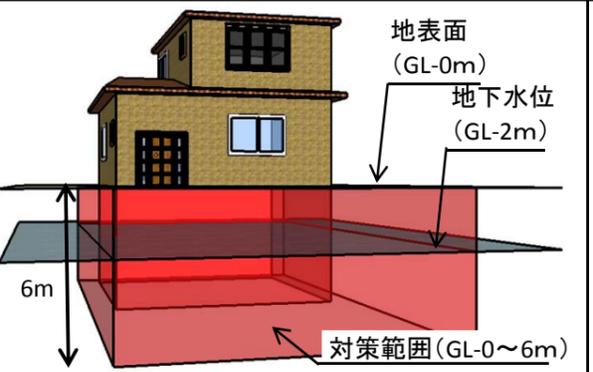
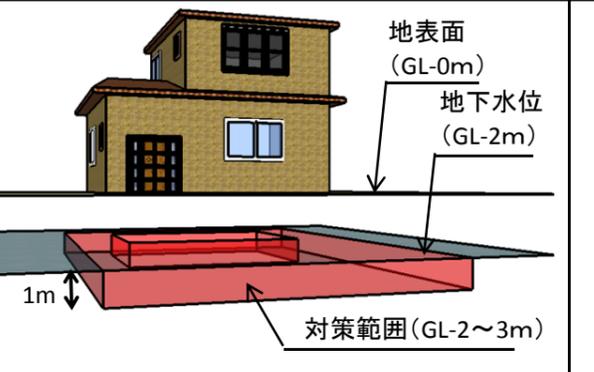
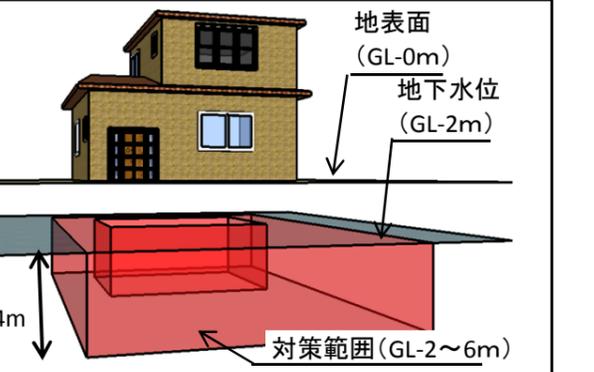
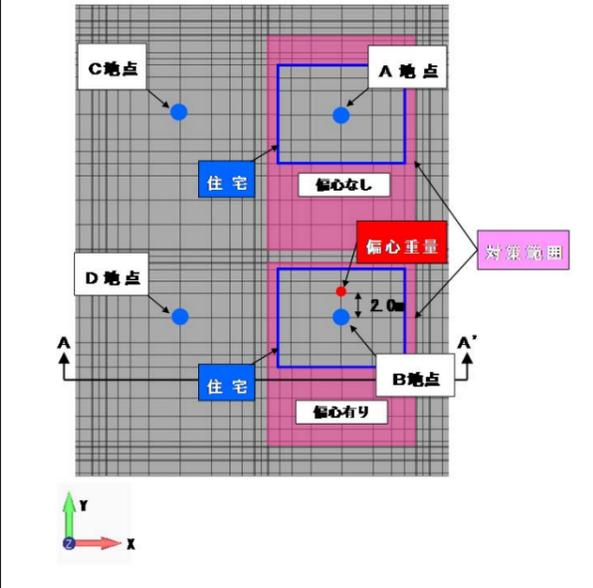
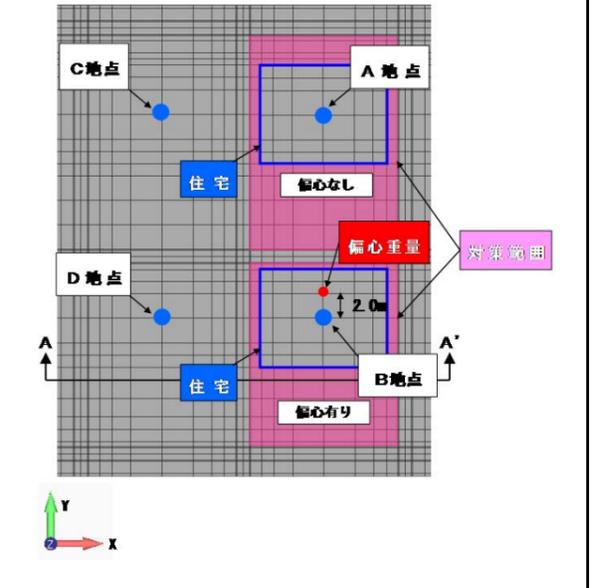
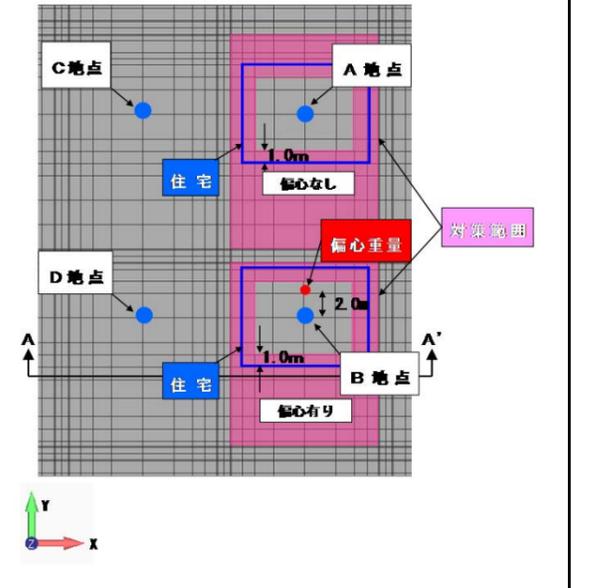
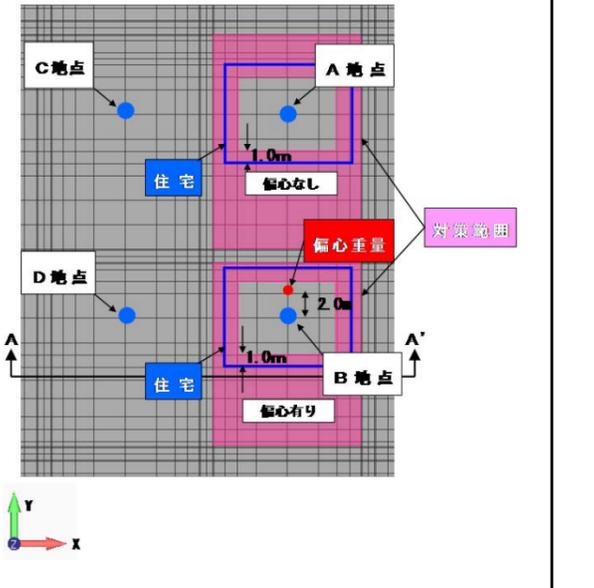
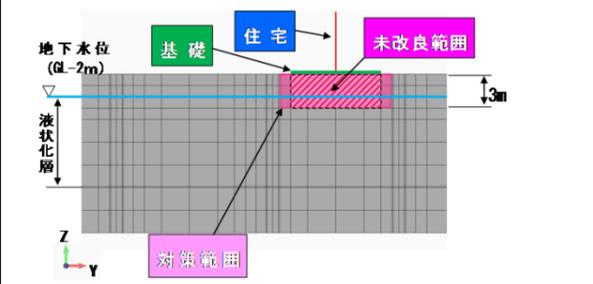
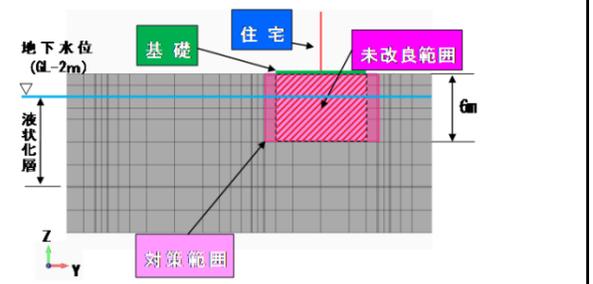
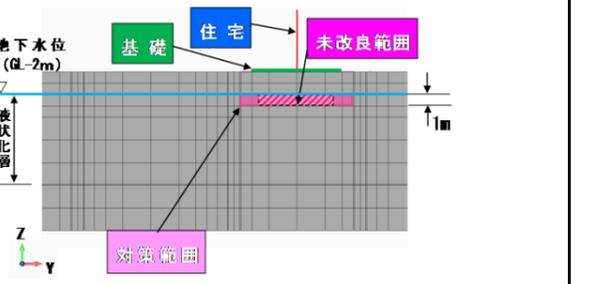
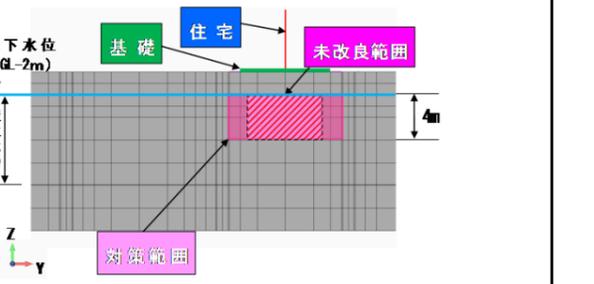
ケース番号	【a-1】、【b-1】	【a-2】、【b-2】	【a-3】、【b-3】	【a-4】、【b-4】
主工法	無対策（地下水位はGL-1m）	地下水低下1m（地下水位はGL-2m）	地下水低下2m（地下水位はGL-3m）	地下水低下1m（地下水位はGL-2m）
副工法	-	-	-	不飽和化4m
副工法のねらい	-	-	-	水で満たされた地中の間隙に空気を混入させ、地盤を不飽和化することで、液状化の抑制、住宅の沈下を低減させる。
対策範囲	-	平面範囲：街区全面（道路部を含む） 対策深さ：地表面-1mから-2mに地下水位低下	平面範囲：街区全面（道路部を含む） 対策深さ：地表面-1mから-3mに地下水位低下	平面範囲：街区全面（道路部を含む） 対策深さ：地表面-2mから-6mまでの厚さ4m
3D図面				
平面図				
断面図 (A-A')				

表4-3 対策の内容と範囲(2)

ケース番号	【a-5】、【b-5】	【a-6】、【b-6】	【a-7】、【b-7】	【a-8】、【b-8】
主工法	地下水低下工法1m (地下水位はGL-2m)			
副工法	浅層盤状改良 (薬液注入工法)		柱状ドレーン工法	
副工法のねらい	液状化層に浸透性の高い薬液を注入させ、液状化しにくい地盤に改良することで、液状化を抑制させる。		住宅周囲の地盤に透水性の高い柱状ドレーン(プラスチック製φ10cm)を50cm程度の間隔で配置し、早期に過剰間隙水圧を消散させ、住宅の沈下を低減させる。	
対策範囲	平面範囲:住宅直下を除く街区全面(道路部を含む) (ただし、住宅外壁から1m内側までの範囲を含む) 対策深さ:地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	平面範囲:街区全面(道路部を含む) 対策深さ:地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	平面範囲:住宅直下を除く敷地全面 対策深さ:地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	平面範囲:住宅の外壁から外側に1mの範囲のみ 対策深さ:地表面-2mから-6mまでの厚さ4m
3D図面				
平面図				
断面図 (A-A')				

表4-4 対策の内容と範囲(3)

ケース番号	【a-9】、【b-9】	【a-10】、【b-10】	【a-11】、【b-11】	【a-12】、【b-12】
主工法	地下水低下工法1m (地下水位はGL-2m)			
副工法	木杭などにより、地表から締固める方法		コンパクショングラウチング(CPG工法)などにより、地中を部分的に締固める方法	
副工法のねらい	住宅周辺に木杭を等間隔に打ち込んで、地盤を締固める。敷地内の地盤を締固めることで、液状化の発生を抑制し、住宅の沈下を低減させる。		改良範囲に注入管を貫入させ、流動性の高い材料を圧入して地盤を締固める。地中の液状化層を締固めることにより、液状化を抑制し、住宅の沈下を低減させる。	
対策範囲	平面範囲:住宅直下を除く敷地全面 対策深さ:地表面から-3mまでの厚さ3m	平面範囲:住宅直下を除く敷地全面 対策深さ:地表面から-6mまでの厚さ6m	平面範囲:住宅直下を除く敷地前面 (住宅の外壁から1m内側の範囲も含む) 対策深さ:地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	平面範囲:住宅直下を除く敷地前面 (住宅の外壁から1m内側の範囲も含む) 対策深さ:地表面-2mから-6mまでの厚さ4m
3D図面				
平面図				
断面図 (A-A')				

5) 解析結果

各解析ケースの最終的な住宅の沈下量と傾斜量を表5-1～表5-6に示す。また、各解析ケースの地盤の変形および過剰間隙水圧比[※]の変化の様子を加振経過時間ごとに表5-7～表5-12に示す。

※過剰間隙水圧比は、過剰間隙水圧を初期有効応力で除したものである。一般に、過剰間隙水圧比が0.95を上回ることが液状化発生の目安とされることが多い。

表5-1 解析結果一覧表【偏心無し】

入力地震動	主工法		副工法		対策範囲		ケース番号	沈下量(cm)				住宅の傾斜 (1/1000)			
								住宅外周1m①	住宅②	めり込み②-①	自由地盤(地点C,Dの平均値)③	X方向		Y方向	
												偏心無A地点	偏心有B地点	偏心無A地点	偏心有B地点
		平面範囲	対策深さ												
夢の島	無対策				—	—	【a-1】	39.7	65.2	25.5	9.3	17.1	-7.5	55.0	3.7
	地下水位低下工法	低下量1m		街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-2mに地下水位低下	【a-2】	24.9	26.5	1.6	19.5	-5.2	-6.5	4.7	-7.3	
		低下量2m		街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-3mに地下水位低下	【a-3】	11.5	12.1	0.6	11.4	0.1	0.0	0.3	0.0	
		低下量1m	不飽和化4m		街区全面 (道路部含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-4】	16.3	16.6	0.3	15.9	-0.3	-0.2	0.5	-0.3
			浅層盤状1m		住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-5】	20.6	22.7	2.1	10.7	-7.6	-6.4	6.4	-7.6
					街区全面 (道路部含む)		【a-6】	16.7	18.1	1.3	9.2	-5.6	-5.1	5.4	-7.1
			柱状ドレーン (地表面から-6m)		住宅直下を除く敷地全面	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-7】	34.0	35.4	1.4	27.5	-9.2	-7.8	7.8	-2.2
					住宅外壁から外側に1mの範囲のみ		【a-8】	35.7	38.9	3.3	19.0	0.1	-0.5	10.9	-1.2
			部分締固め6m		住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【a-9】	32.8	38.7	6.0	18.5	-7.8	-6.3	10.1	-9.3
			部分締固め3m			地表面から-3mまでの厚さ3m	【a-10】	19.7	22.2	2.5	21.2	-2.4	-2.6	8.1	0.6
			部分締固め4m		住宅直下を除く敷地全面 (住宅外壁から1m内側の範囲も含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-11】	36.6	39.0	2.4	21.1	-19.8	-4.3	10.4	-6.9
	部分締固め1m		地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-12】		17.3	26.8	9.6	19.8	-4.8	-6.5	6.0	-6.1		
東京湾北部	無対策				—	—	【b-1】	58.4	76.9	18.5	5.5	-9.5	-13.6	-3.2	5.3
	地下水位低下工法	低下量1m		街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-2mに地下水位低下	【b-2】	26.0	27.2	1.2	17.0	-2.9	-1.8	3.3	-2.7	
		低下量2m		街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-3mに地下水位低下	【b-3】	16.5	16.8	0.3	14.8	-0.4	0.1	1.6	-1.4	
		低下量1m	不飽和化4m		街区全面 (道路部含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-4】	14.6	14.9	0.3	13.6	-0.9	-0.2	0.5	-0.5
			浅層盤状1m		住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-5】	14.1	14.8	0.7	9.4	-2.7	-2.4	2.3	-2.6
					街区全面 (道路部含む)		【b-6】	9.9	10.2	0.3	8.3	-1.1	-0.8	1.4	-1.4
			柱状ドレーン (地表面から-6m)		住宅直下を除く敷地全面	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-7】	26.5	28.7	2.2	25.6	-8.0	-5.1	3.8	1.5
					住宅外壁から外側に1mの範囲のみ		【b-8】	27.8	29.1	1.3	23.7	-6.6	-7.1	5.8	-4.6
			部分締固め6m		住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【b-9】	23.4	26.7	3.3	12.5	-3.3	-2.5	4.9	-0.1
			部分締固め3m			地表面から-3mまでの厚さ3m	【b-10】	22.8	24.6	1.8	17.4	-1.3	-1.8	5.0	-2.8
			部分締固め4m		住宅直下を除く敷地全面 (住宅外壁から1m内側の範囲も含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-11】	23.5	24.8	1.3	12.7	-3.1	-3.0	2.7	1.0
	部分締固め1m		地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-12】		23.9	24.7	0.8	17.5	-0.5	-1.2	4.0	-2.3		

(注) ・地点Aは、偏心無しの住宅直下を示す。

・自由地盤の沈下量は、地点C,Dの平均値とする。

・めり込み沈下量は、住宅外周1m部の沈下量と住宅直下の沈下量との差により算出する。

表5-2 解析結果一覧表【偏心有り】

入力地震動	主工法	副工法	対策範囲		ケース番号	沈下量(cm)				住宅の傾斜 (1/1000)				
						住宅外周1m ①	住宅 ②	めり込み ②-①	自由地盤 (地点C,Dの平均値) ③	X方向		Y方向		
			偏心無 A地点	偏心有 B地点						偏心無 A地点	偏心有 B地点			
夢の島	無対策		—	—	【a-1】	57.8	83.9	26.1	9.3	17.1	-7.5	55.0	3.7	
	地下水位 低下工法	低下量1m	街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-2mに地下水位低下	【a-2】	28.0	29.8	1.8	19.5	-5.2	-6.5	4.7	-7.3	
		低下量2m	街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-3mに地下水位低下	【a-3】	11.5	12.1	0.6	11.4	0.1	0.0	0.3	0.0	
		低下量1m	不飽和化4m	街区全面 (道路部含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-4】	16.4	16.7	0.3	15.9	-0.3	-0.2	0.5	-0.3
			浅層盤状1m	住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-5】	22.1	24.3	2.1	10.7	-7.6	-6.4	6.4	-7.6
				街区全面 (道路部含む)		【a-6】	17.9	19.7	1.8	9.2	-5.6	-5.1	5.4	-7.1
			柱状ドレーン (地表面から-6m)	住宅直下を除く敷地全面	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-7】	33.3	34.9	1.6	27.5	-9.2	-7.8	7.8	-2.2
				住宅外壁から外側に1mの範囲のみ		【a-8】	34.9	38.4	3.5	19.0	0.1	-0.5	10.9	-1.2
			部分締固め6m	住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【a-9】	34.4	41.2	6.8	18.5	-7.8	-6.3	10.1	-9.3
			部分締固め3m		地表面から-3mまでの厚さ3m	【a-10】	25.9	29.2	3.3	21.2	-2.4	-2.6	8.1	0.6
			部分締固め4m	住宅直下を除く敷地全面 (住宅外壁から1m内側の範囲も含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【a-11】	36.7	39.4	2.6	21.1	-19.8	-4.3	10.4	-6.9
	部分締固め1m	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【a-12】		27.6	29.3	1.7	19.8	-4.8	-6.5	6.0	-6.1		
東京湾北部	無対策		—	—	【b-1】	67.3	82.5	15.2	5.5	-9.5	-13.6	-3.2	5.3	
	地下水位 低下工法	低下量1m	街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-2mに地下水位低下	【b-2】	26.9	27.9	0.9	17.0	-2.9	-1.8	3.3	-2.7	
		低下量2m	街区全面 (道路部含む)	地表面-1mから-3mに地下水位低下	【b-3】	16.6	16.8	0.3	14.8	-0.4	0.1	1.6	-1.4	
		低下量1m	不飽和化4m	街区全面 (道路部含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-4】	14.7	15.1	0.3	13.6	-0.9	-0.2	0.5	-0.5
			浅層盤状1m	住宅外壁から外側に1mの範囲のみ	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-5】	14.7	15.2	0.6	9.4	-2.7	-2.4	2.3	-2.6
				街区全面 (道路部含む)		【b-6】	10.1	10.4	0.3	8.3	-1.1	-0.8	1.4	-1.4
			柱状ドレーン (地表面から-6m)	住宅直下を除く敷地全面	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-7】	29.8	31.9	2.1	25.6	-8.0	-5.1	3.8	1.5
				住宅外壁から外側に1mの範囲のみ		【b-8】	29.5	30.8	1.3	23.7	-6.6	-7.1	5.8	-4.6
			部分締固め6m	住宅直下を除く敷地全面	地表面から-6mまでの厚さ6m	【b-9】	23.4	23.4	0.0	12.5	-3.3	-2.5	4.9	-0.1
			部分締固め3m		地表面から-3mまでの厚さ3m	【b-10】	24.4	26.2	1.8	17.4	-1.3	-1.8	5.0	-2.8
			部分締固め4m	住宅直下を除く敷地全面 (住宅外壁から1m内側の範囲も含む)	地表面-2mから-6mまでの厚さ4m	【b-11】	25.2	26.8	1.5	12.7	-3.1	-3.0	2.7	1.0
	部分締固め1m	地表面-2mから-3mまでの厚さ1m	【b-12】		24.3	25.1	0.8	17.5	-0.5	-1.2	4.0	-2.3		

(注) ・地点Aは、偏心無しの住宅直下を示す。
 ・自由地盤の沈下量は、地点C,Dの平均値とする。
 ・めり込み沈下量は、住宅外周1m部の沈下量と住宅直下の沈下量との差により算出する。

表5-3 解析結果(沈下量、住宅の最大傾斜)【夢の島波】

(偏心無し、A地点)

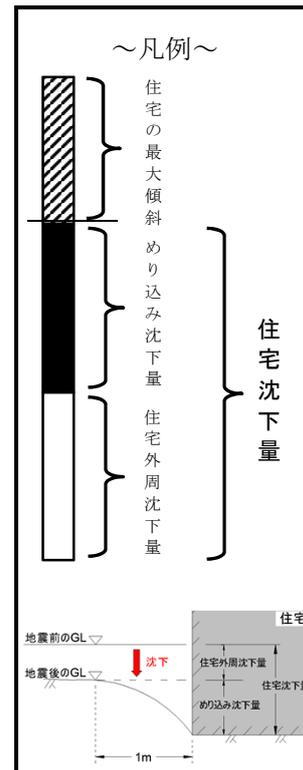
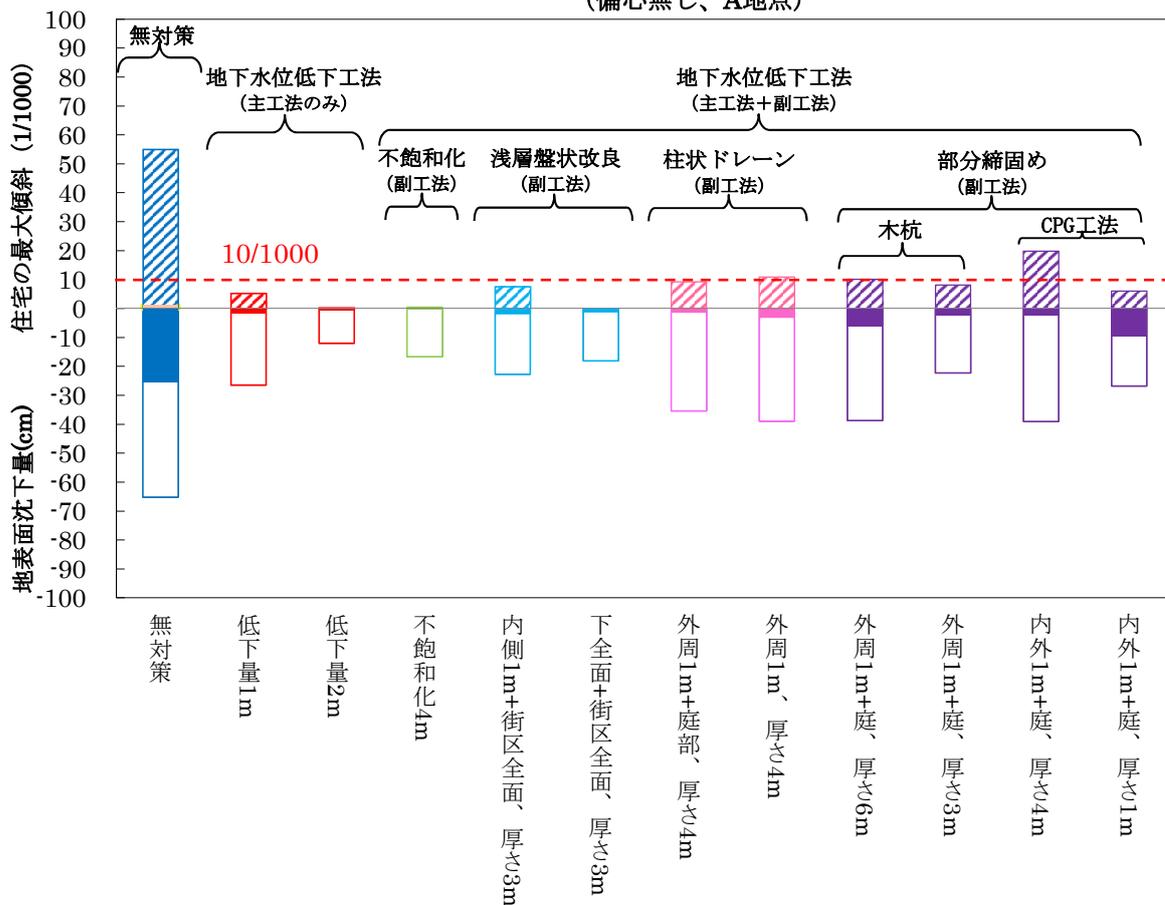


表5-4 解析結果(沈下量、住宅の最大傾斜)【東京湾北部波】

(偏心無し、A地点)

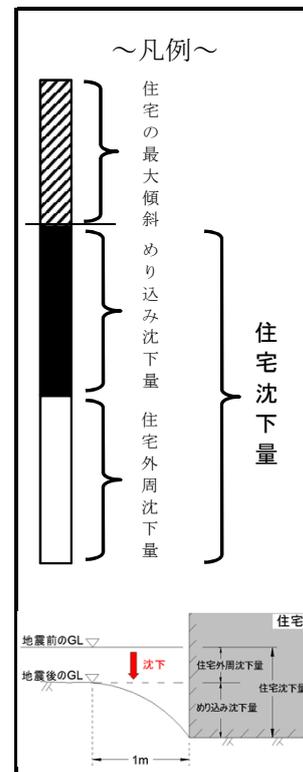
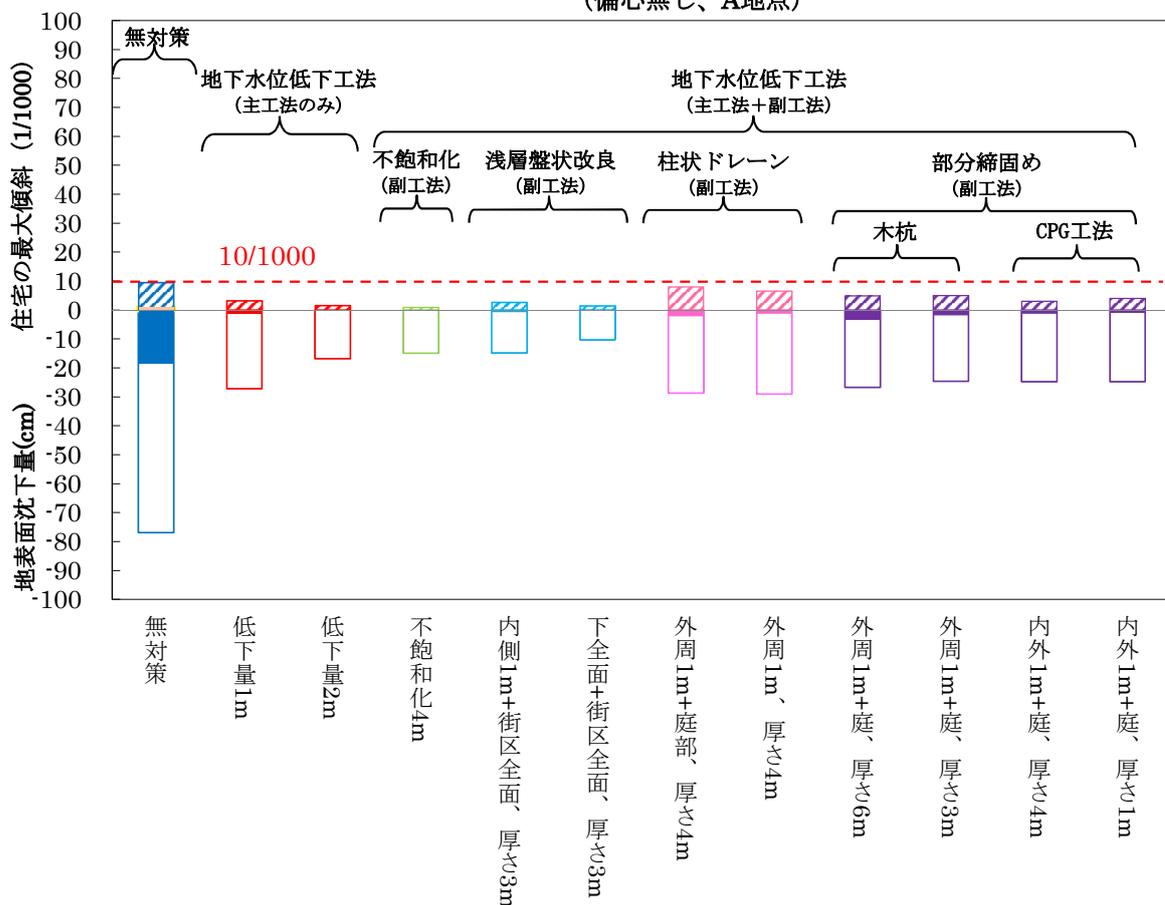


表5-5 解析結果(沈下量、住宅の最大傾斜)【夢の島波】

(偏心有り、B地点)

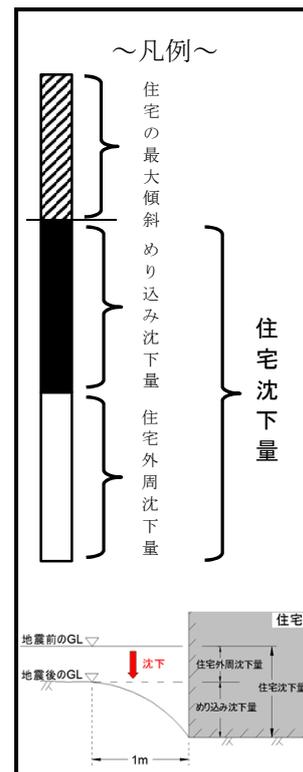
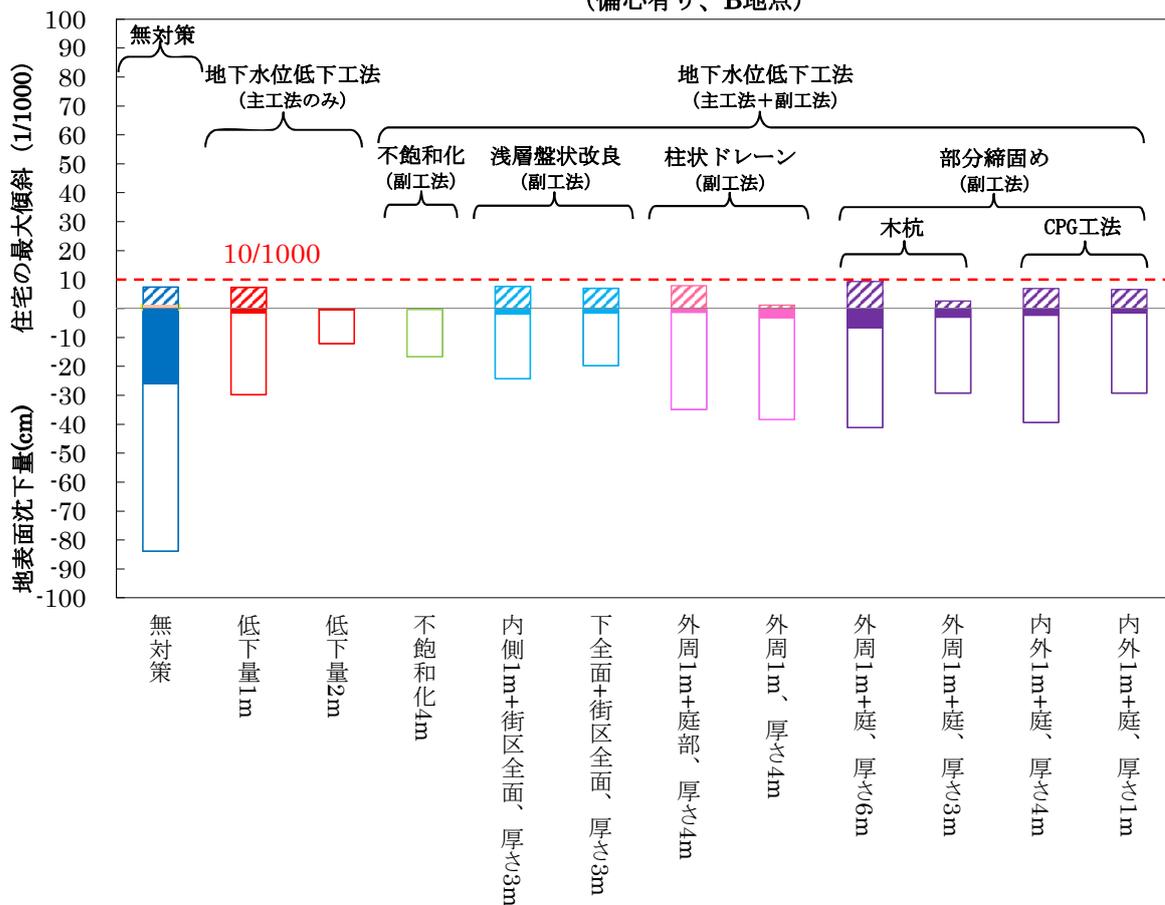


表5-6 解析結果(沈下量、住宅の最大傾斜)【東京湾北部波】

(偏心有り、B地点)

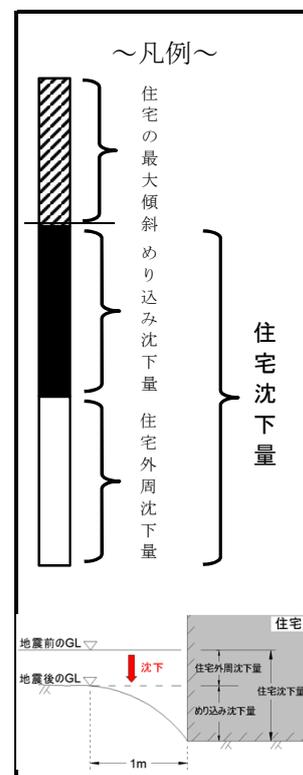
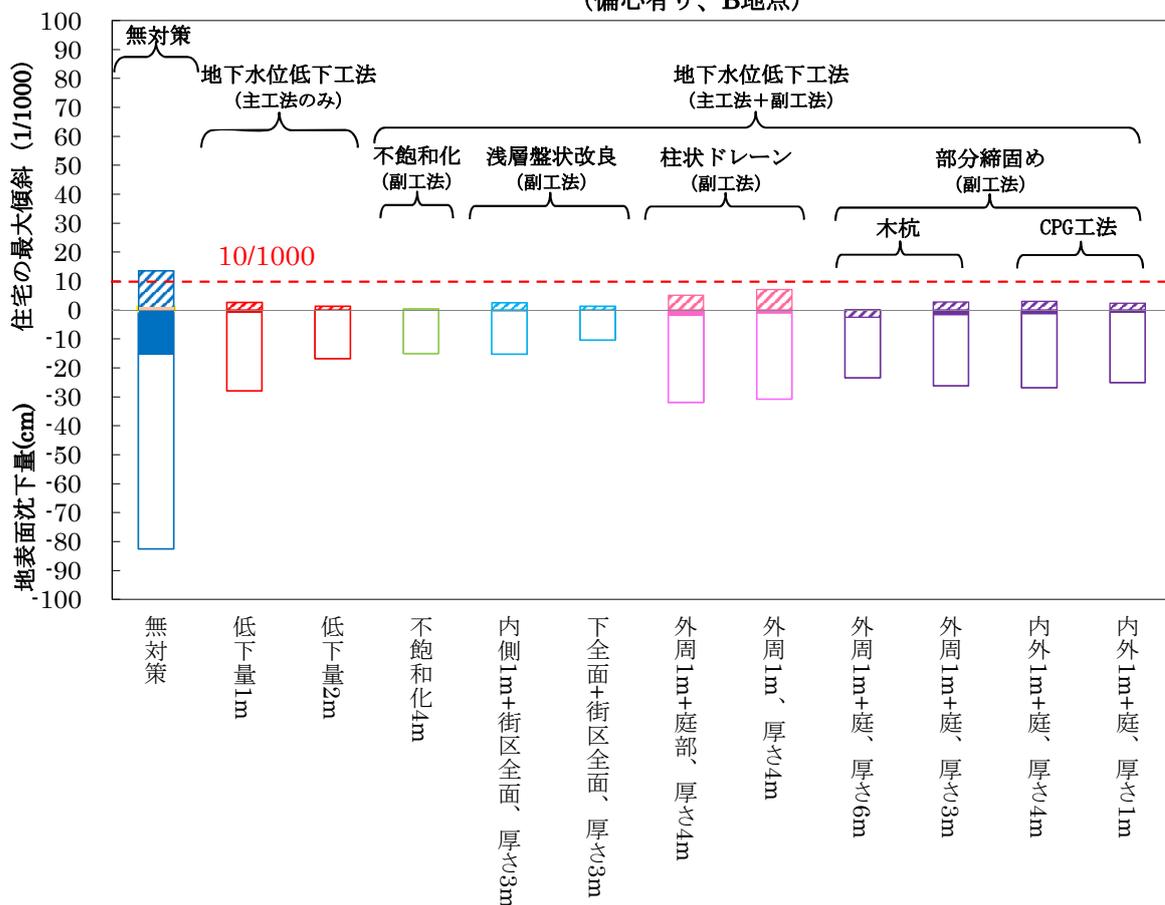


表 5-7 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：夢の島

		無対策【a-1】	地下水位低下工法 低下量 1m【a-2】	地下水位低下工法 低下量 2m【a-3】	地下水位低下工法 低下量 1m+不飽和化 4m【a-4】
A-A 断面	10s				
	20s				
	60s				
B-B 断面	60s				
	住宅沈下量	65.2cm	26.5cm	12.1cm	16.6cm
挙動の概要		加振 10 秒後に液状化層の上部 5m が液状化に至った。60 秒後にはさらに液状化層の下部 2m も液状化した。支持力が低下した地盤が住宅荷重による左右への左右へのはらみ出し、住宅が 65.2cm 沈下した。	無対策に比べ、地表面-1m~4m、-8~-10m の範囲の概ね液状化が抑制された。無対策に比べ地盤のはらみ出しが抑えられ、住宅の沈下量が約 60%低下した。	無対策に比べ地表面-1m~6m、-8~10m の範囲の液状化が抑制された。無対策に比べ地盤のはらみ出しが抑えられ、住宅の沈下量が約 80%低下した。	地表面-1~6m の範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ地盤の左右へのはらみ出しが抑えられ、住宅の沈下量が 37%低下した。

表 5-8 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：夢の島

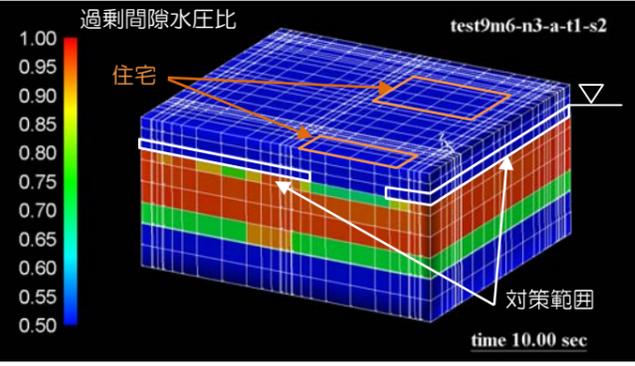
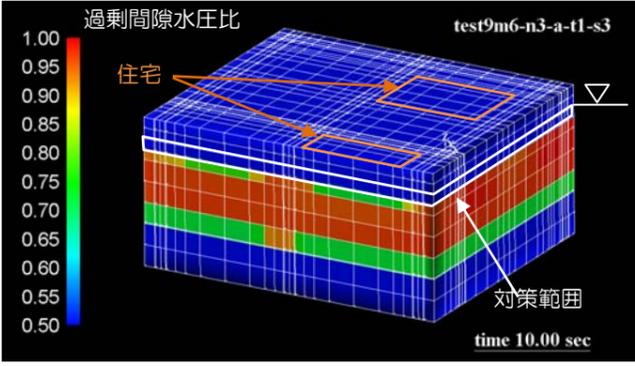
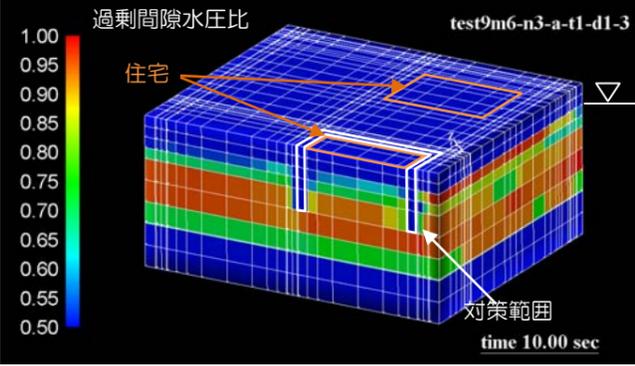
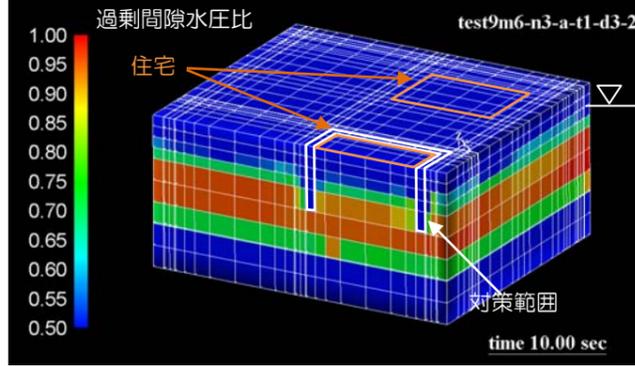
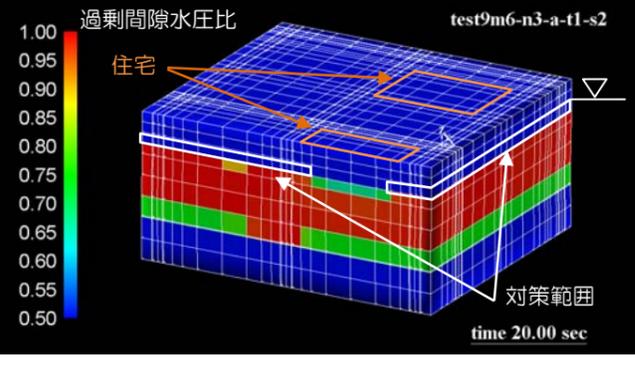
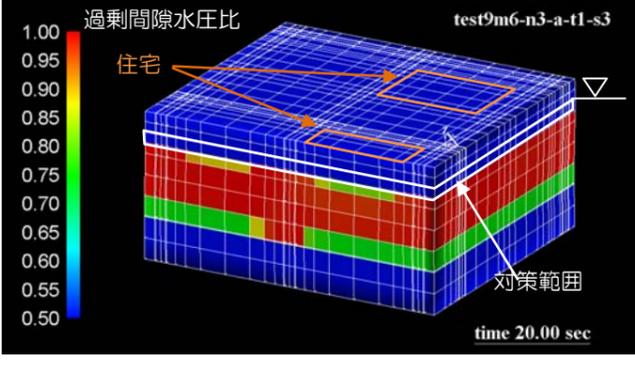
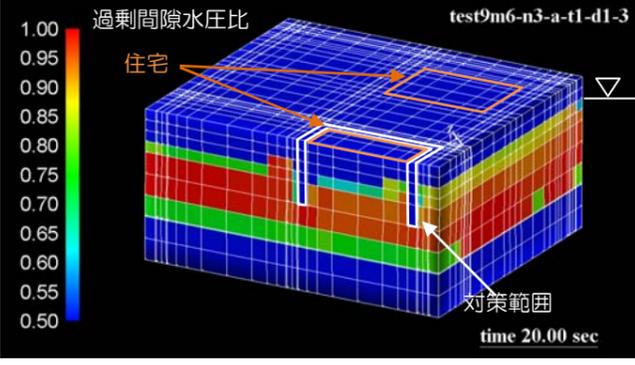
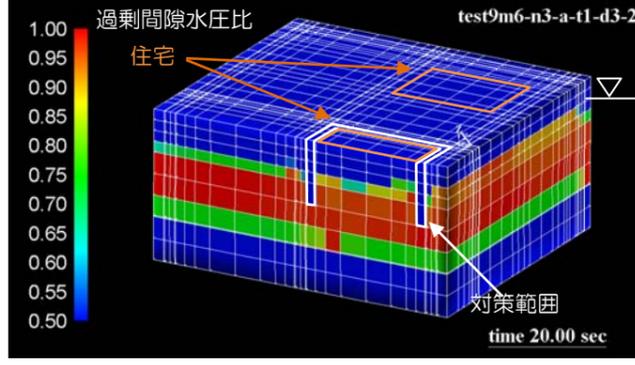
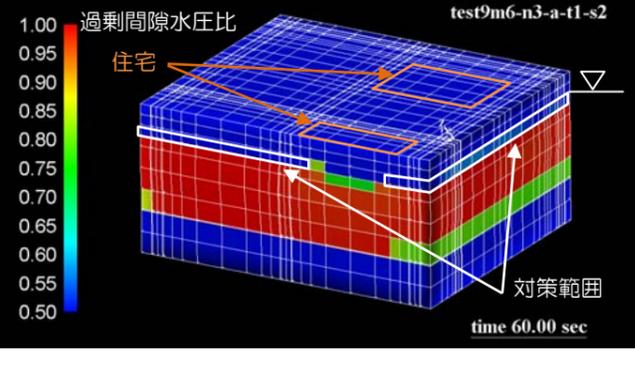
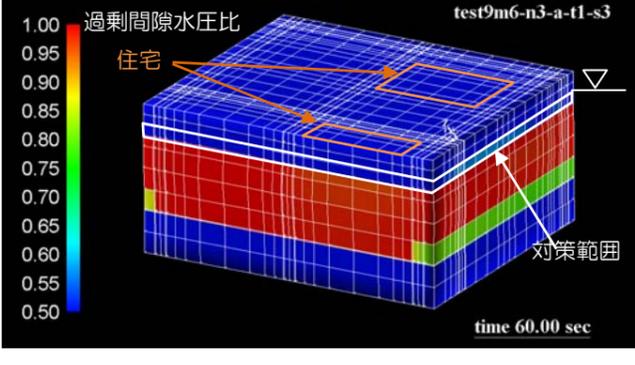
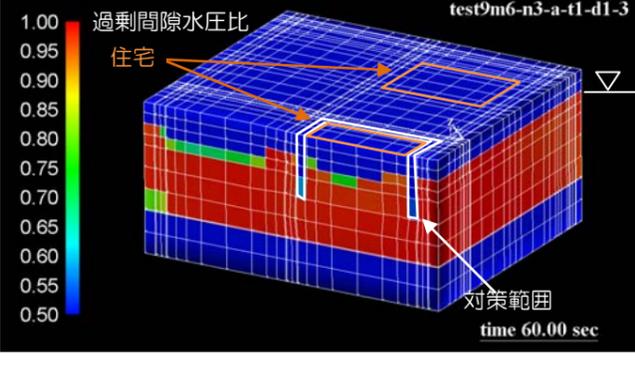
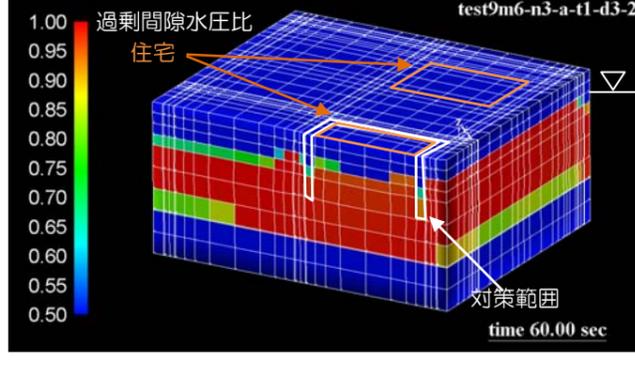
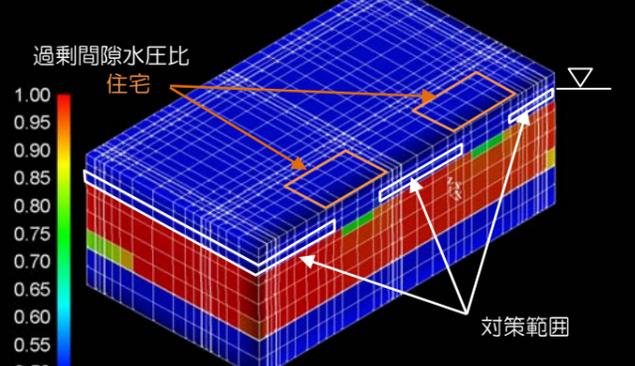
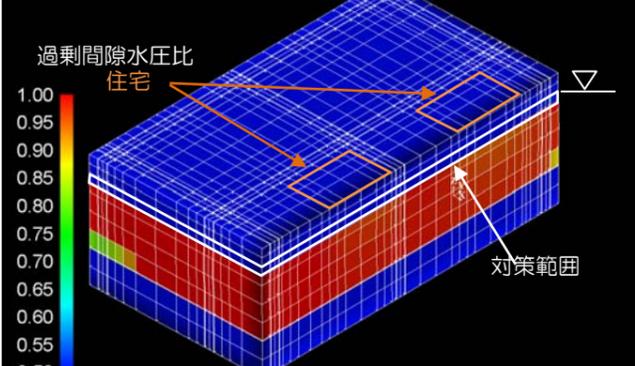
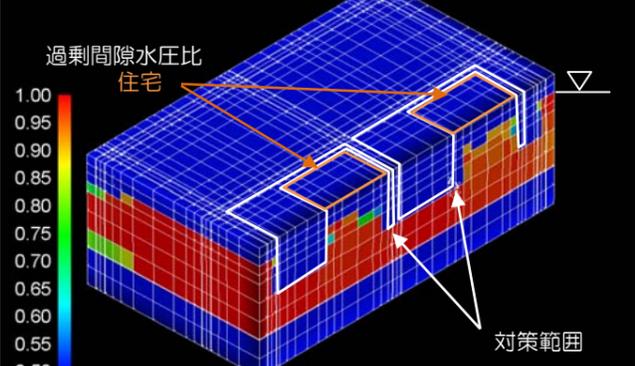
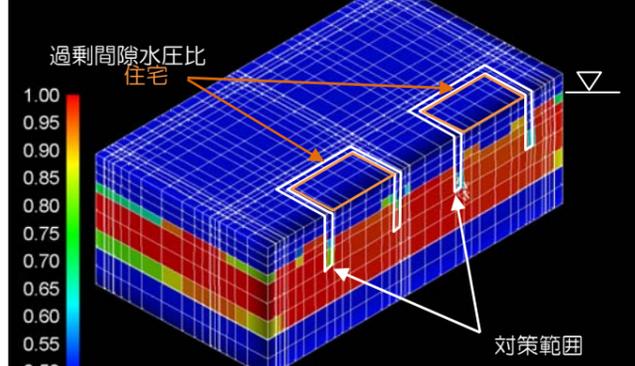
		地下水位低下工法 低下量 1m+浅層盤状 1m 住宅内側 1m+街区全面【a-5】	地下水位低下工法 低下量 1m+浅層盤状 1m 住宅下全面+街区全面【a-6】	地下水位低下工法 低下量 1m+柱状ドレーン (地表面から-6m) 住宅外周 1m+庭部【a-7】	地下水位低下工法 低下量 1m+柱状ドレーン (地表面から-6m) 住宅外周 1m【a-8】
A-A. 断面	10s				
	20s				
	60s				
	60s				
住宅沈下量		22.7cm	18.1cm	35.4cm	38.9cm
挙動の概要		地表面-1m~4m、-8~-10m の範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ地表面-2~3m の範囲の液状化が抑制され、住宅の沈下量が 14%低下した。	地表面-1m~4m、-8~-10m の範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ地表面-2~3m の範囲の液状化が完全に抑制され、住宅の沈下量が 30%低下した。【a-5】に比べ、住宅直下を含む全面を改良したことで対策効果が増加した。	地表面-1m~2m と地表面-2~4m の一部および対策範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m の比へ対策範囲より下部の土のはらみ出しが大きくなり、住宅の沈下量は 33%増加した。	地表面-1m~2m と地表面-2~4m の一部および対策範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m の比へ対策範囲より下部の土のはらみ出しが大きくなり、住宅の沈下量は 47%増加した。

表 5-9 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：夢の島

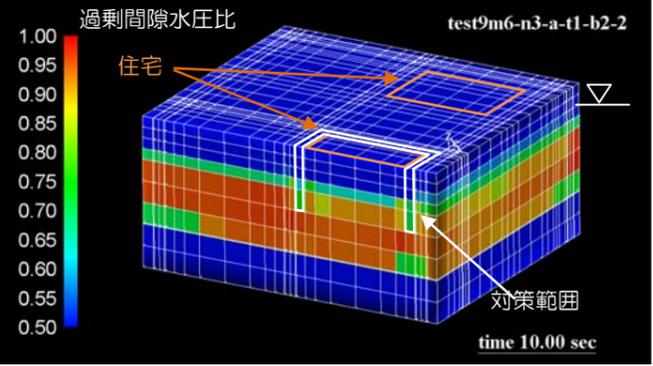
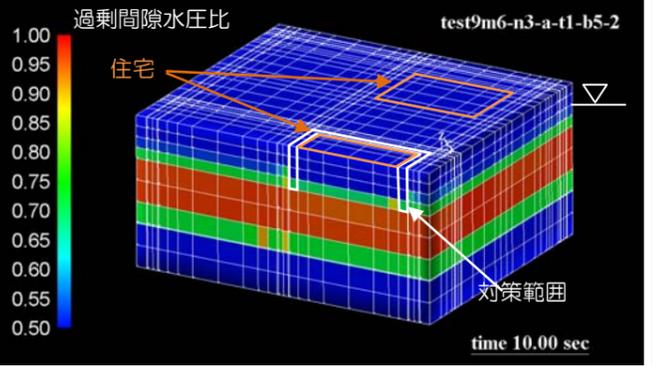
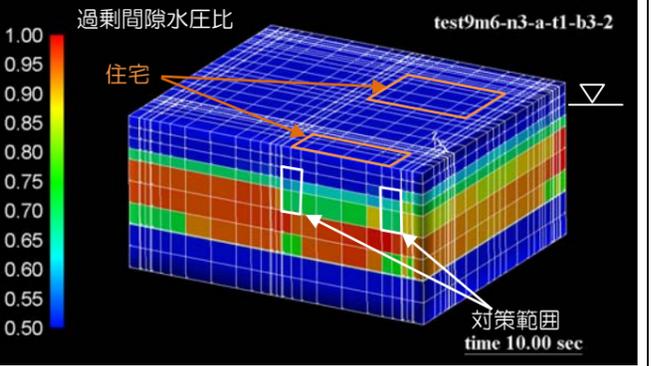
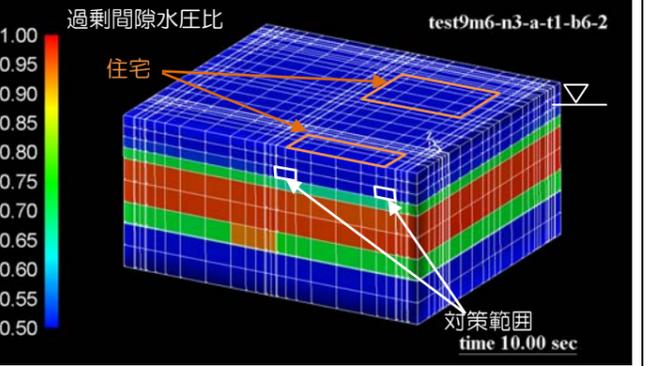
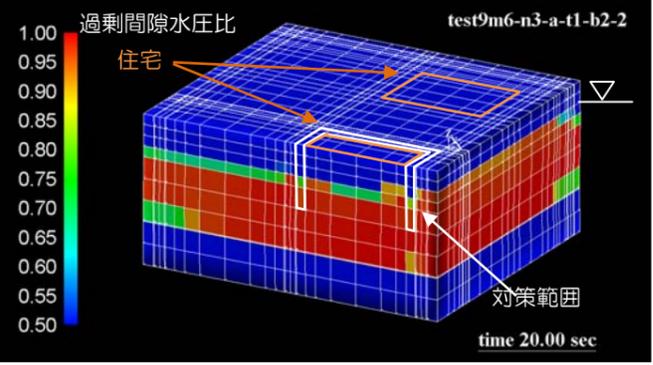
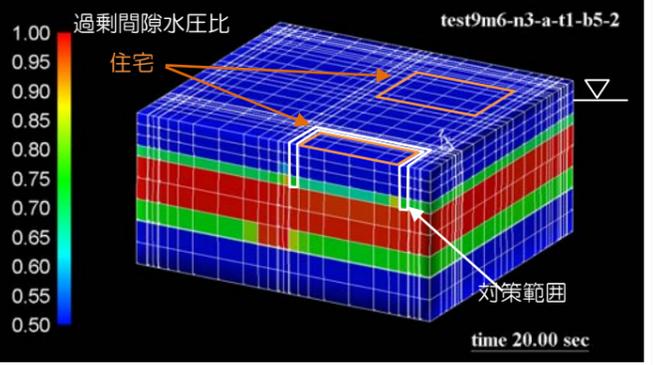
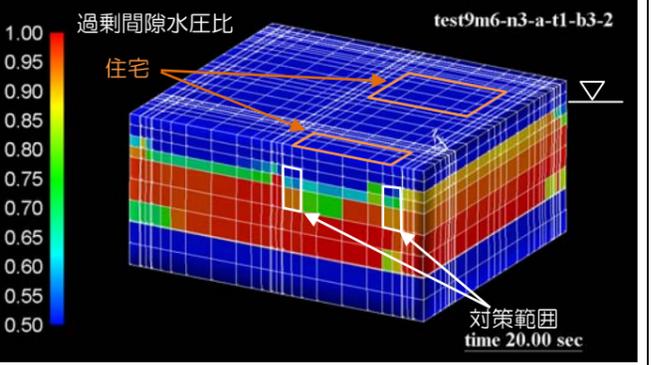
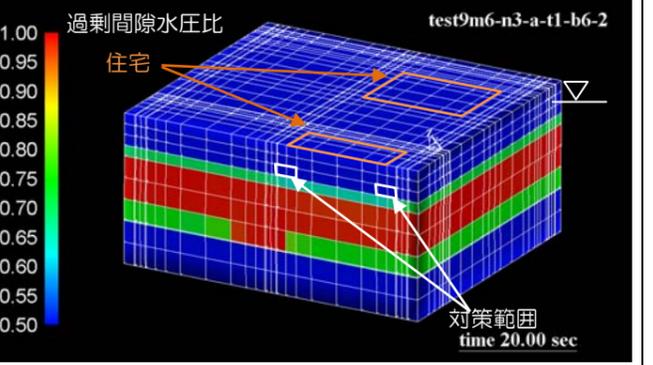
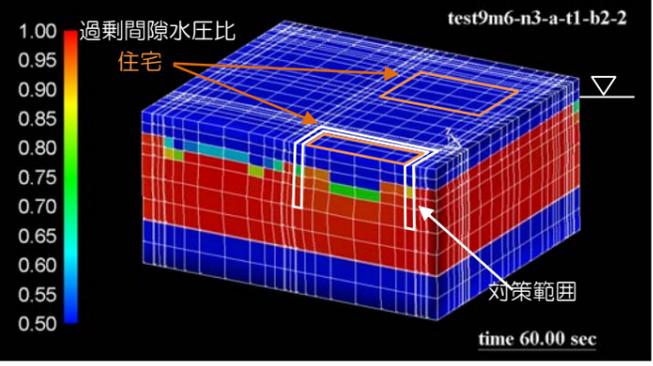
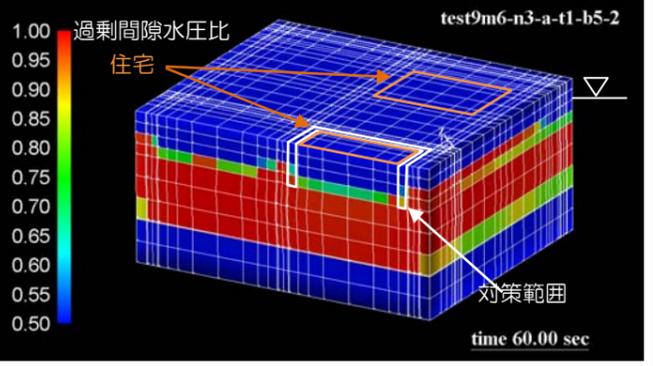
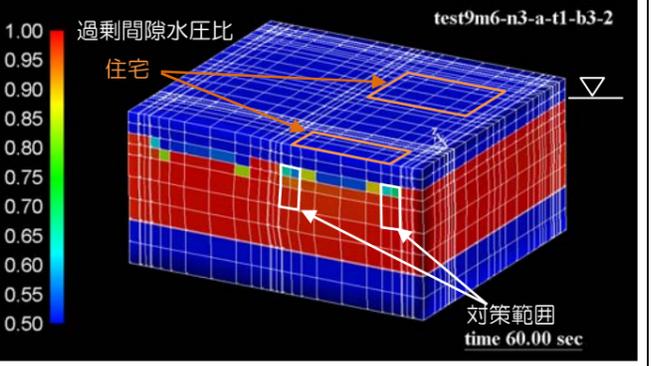
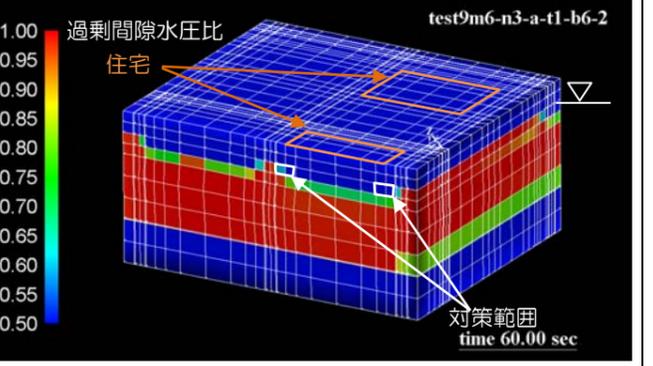
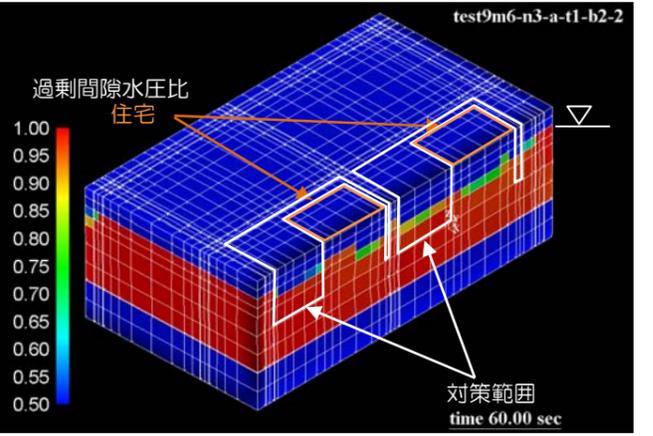
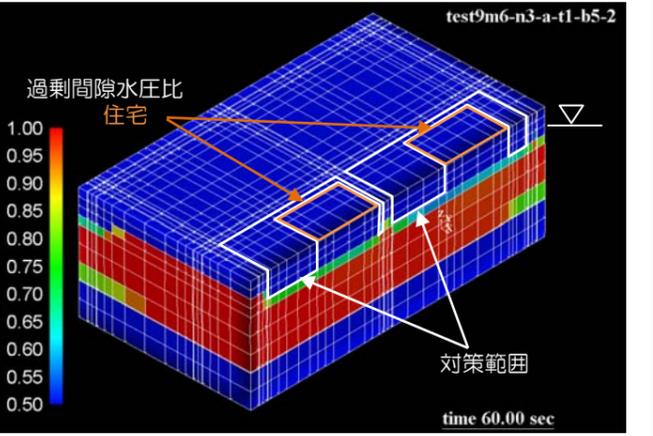
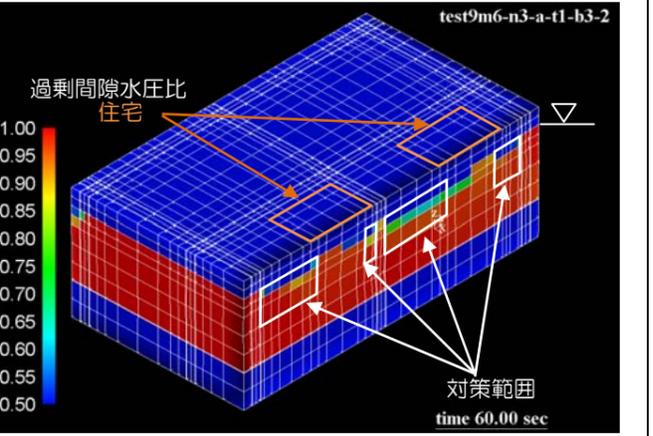
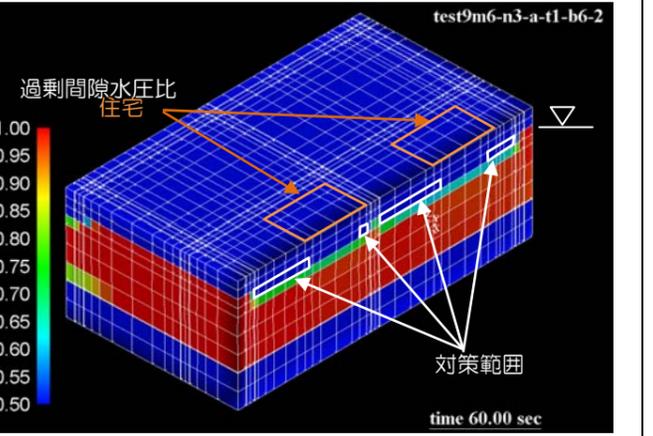
		地下水位低下工法 低下量 1m+部分締め6m 住宅外周 1m+庭部【a-9】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締め3m 住宅外周 1m+庭部【a-10】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締め4m 住宅外周 1m+庭部【a-11】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締め1m 住宅外周 1m+庭部【a-12】
A-A 断面	10s				
	20s				
	60s				
B-B 断面	60s				
住宅沈下量		38.7cm	22.2cm	39.0cm	26.8cm
挙動の概要		地表面-1m~2mと地表面-2~4mの一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、10 秒時には対策範囲内側の土の液状化は抑制されたが、60 秒ではその部分が液状化し、下部の土のはらみ出しが大きくなり、住宅の沈下量が 47%増加した。加振時間の経過に伴い剛性の異なる壁状の土が振動し、内部の土の加速度が増加した。	地表面-1m~2mと地表面-2~4mの一部液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、ほぼ同様の挙動を示しており、住宅の沈下量が 16%低下した。	地表面-1m~2mと地表面-2~3mの一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、10 秒時には対策範囲内側の土の液状化は抑制されたが、60 秒ではその部分が液状化し、下部の土のはらみ出しが大きくなり、住宅の沈下量が 47%増加した。加振時間の経過に伴い剛性の異なる壁状の土が振動し、内部の土の加速度が増加した。	地表面-1m~2mと地表面-2~4mの一部液状化が抑制された。地下水位低下 1m と比べ、概ね同様の傾向を示しており、住宅の沈下量が 1%増加した。

表 5-10 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：東京湾北部地震

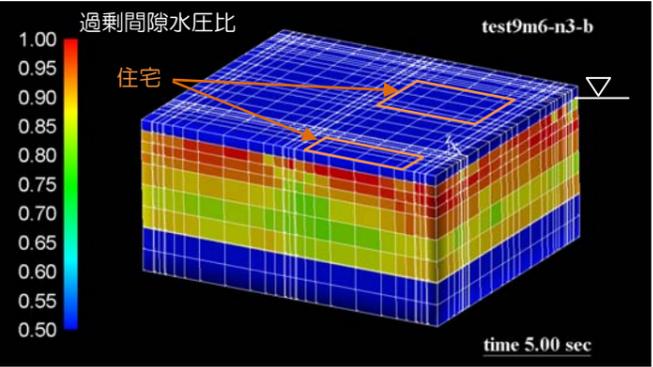
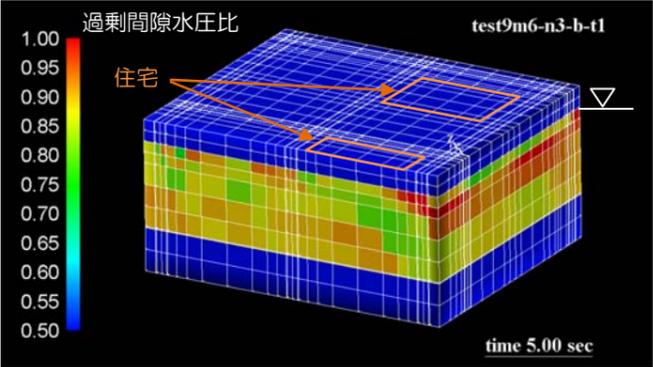
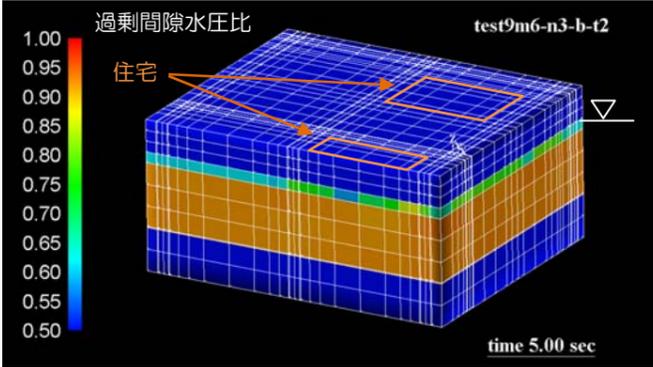
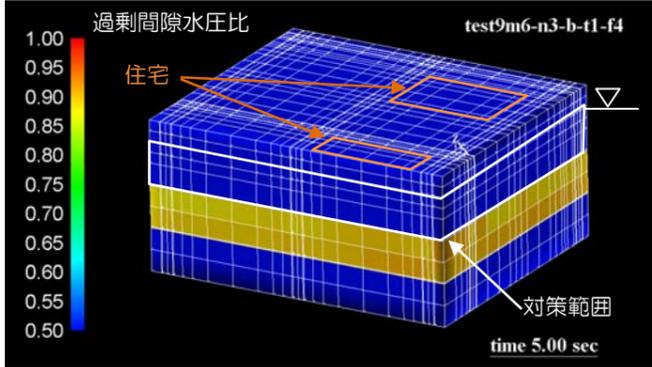
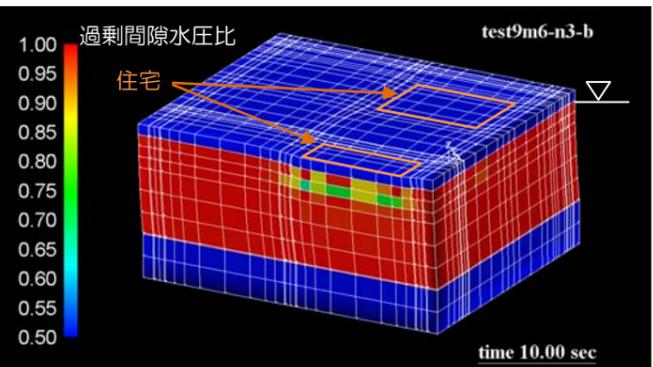
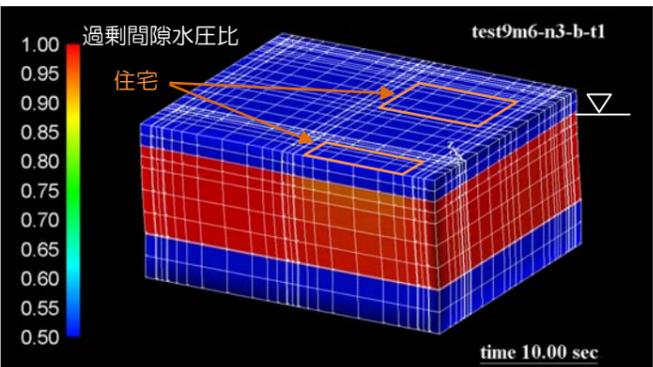
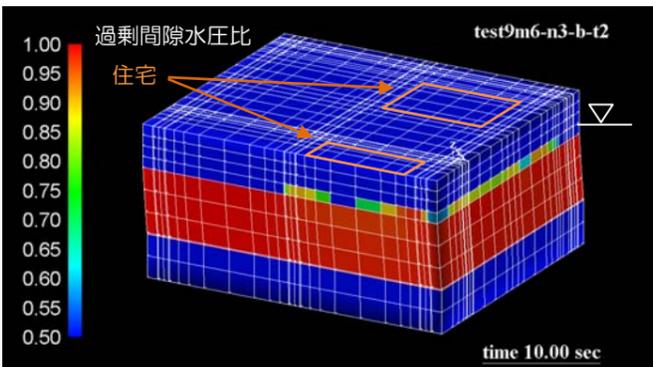
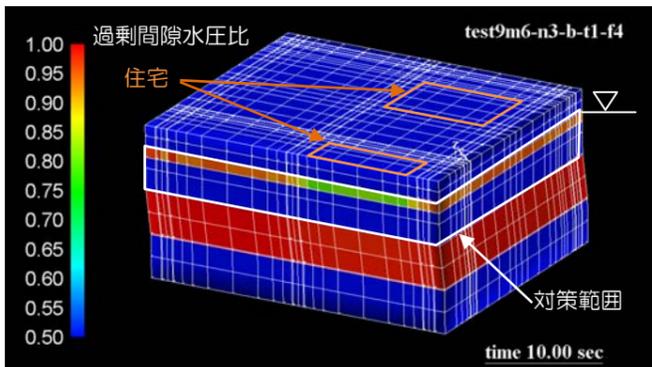
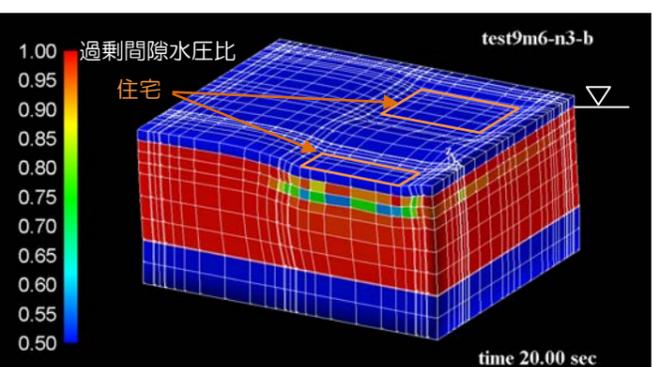
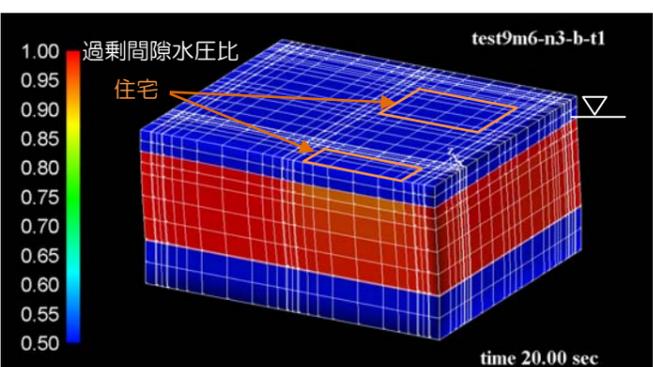
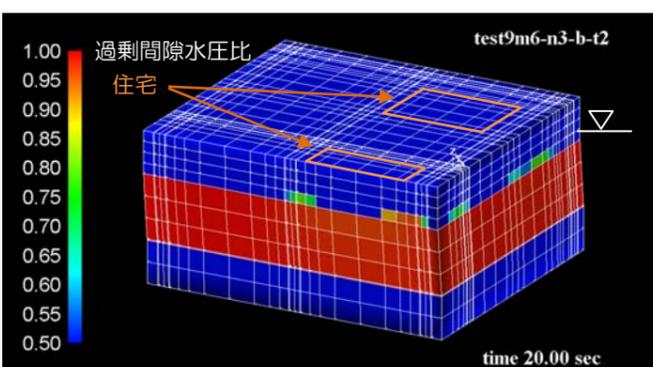
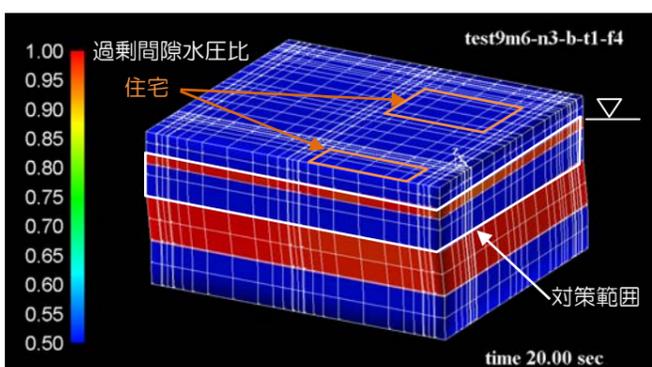
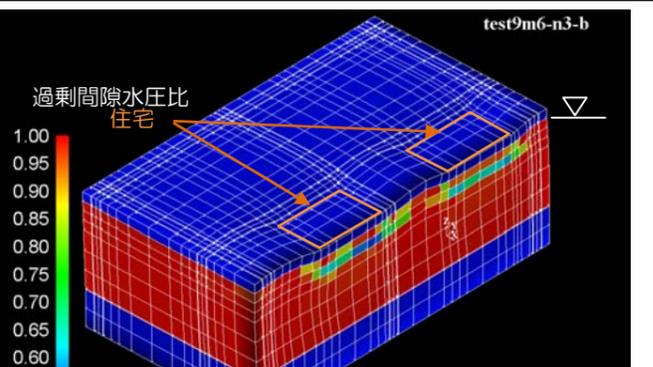
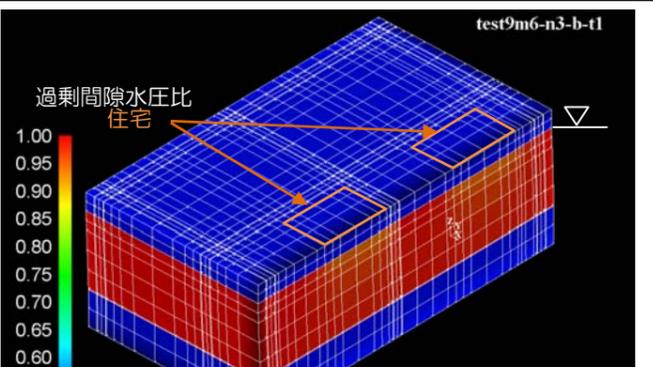
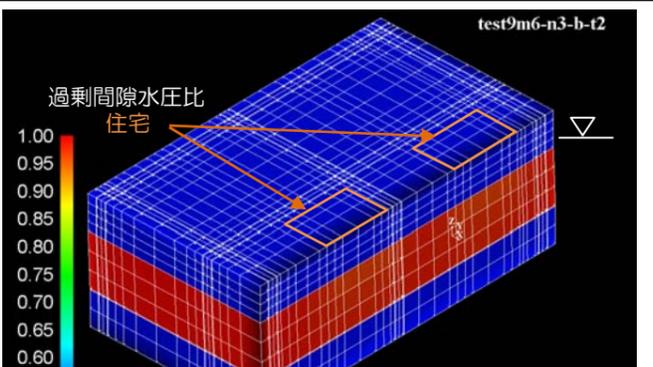
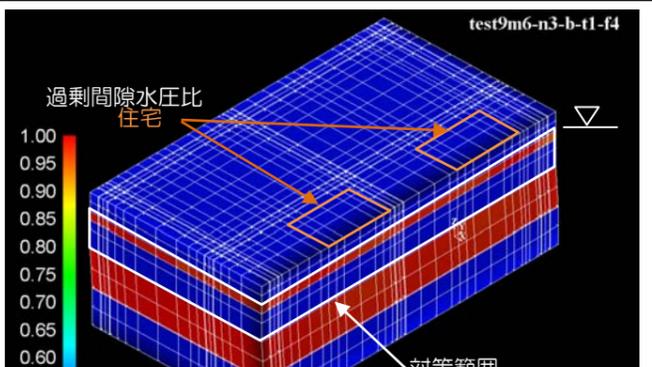
		無対策【b-1】	地下水位低下工法 低下量 1m【b-2】	地下水位低下工法 低下量 2m【b-3】	地下水位低下工法 低下量 1m+不飽和化 4m【b-4】
B-B断面	5s				
	10s				
	20s				
B-B断面	20s				
住宅沈下量		76.9cm	27.2cm	16.8cm	14.9cm
挙動の概要		加振 5 秒後には地表面-1~3m の一部が液状化し、10,20 秒後には地表面-3~10m の範囲が液状化に至った。支持力が低下した地盤が住宅荷重による左右への左右へのはらみ出し、住宅が 76.9cm 沈下した。	無対策に比べ、加振 5 秒後で地表面-1~3m の液状化は抑制されており、20 秒で地表面-1~2m の範囲の液状化が抑制された。住宅の沈下量は 65%低下した。	無対策に比べ、加振 5 秒後で地表面-1~3m と地表面-3~4m の一部の範囲で液状化抑制されており、住宅の沈下量は 78%低下した。	地表面-1~2m,3~6m の範囲の液状化を抑制した。地下水位低下 1m に比べ液状化した層の低減および地盤のはらみ出しが抑制され、住宅の沈下量が 80%低下した。

表 5-11 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：東京湾北部地震

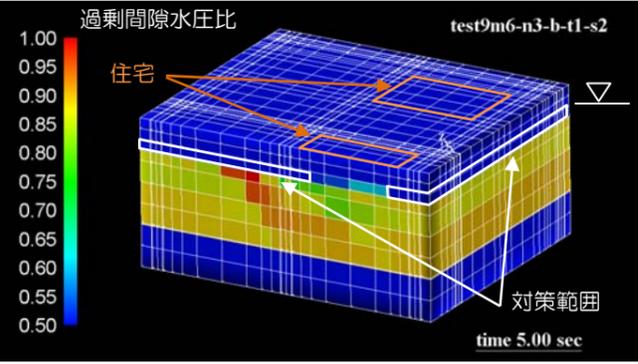
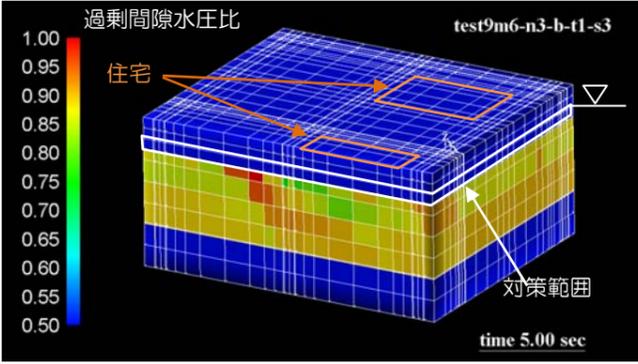
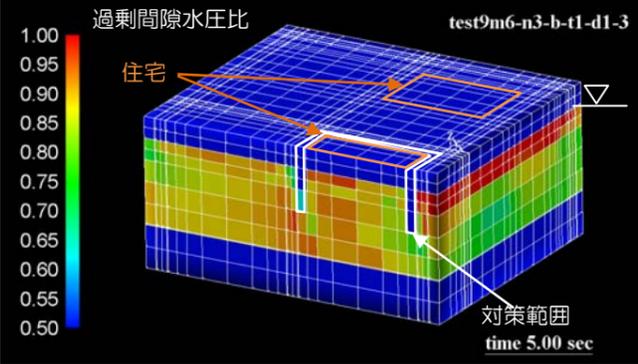
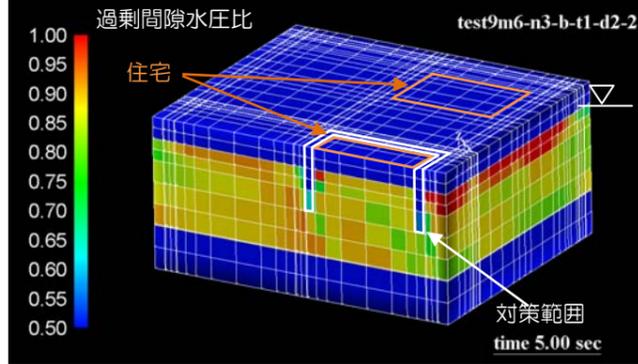
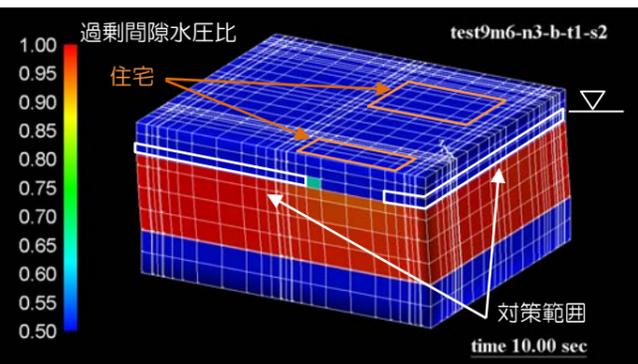
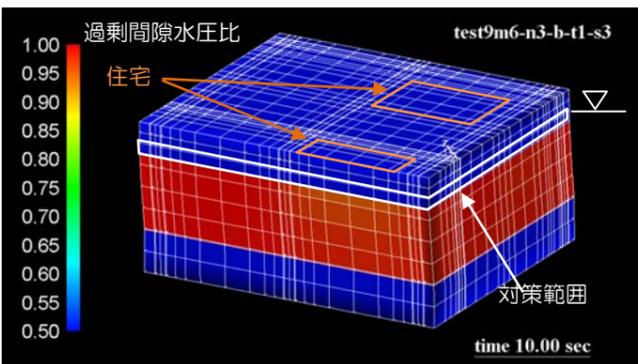
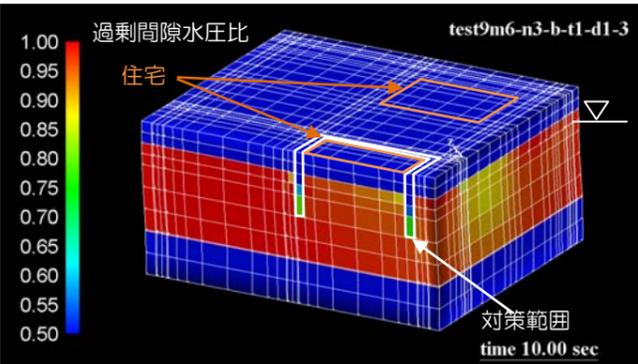
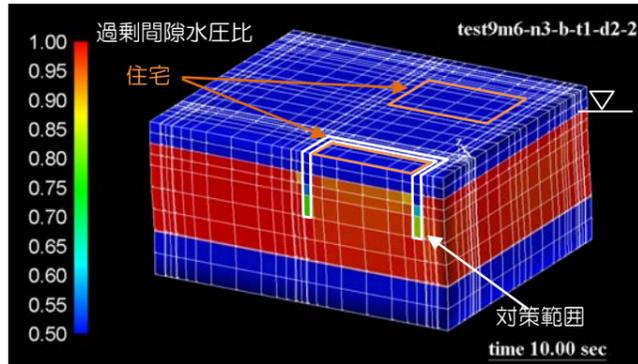
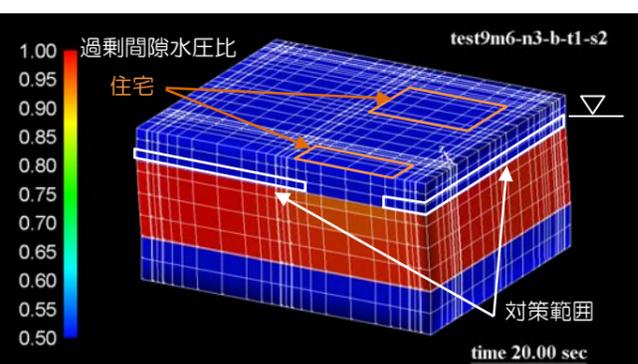
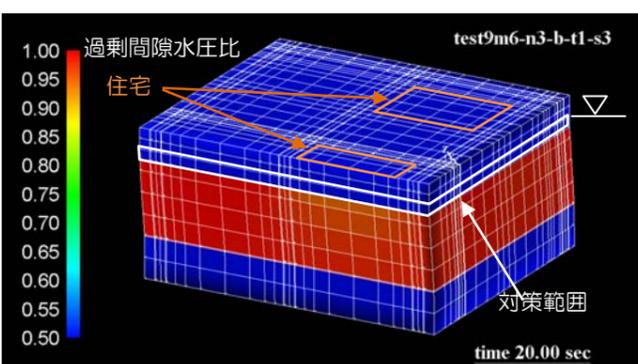
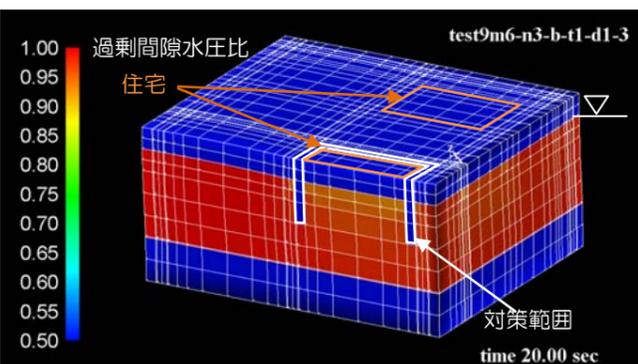
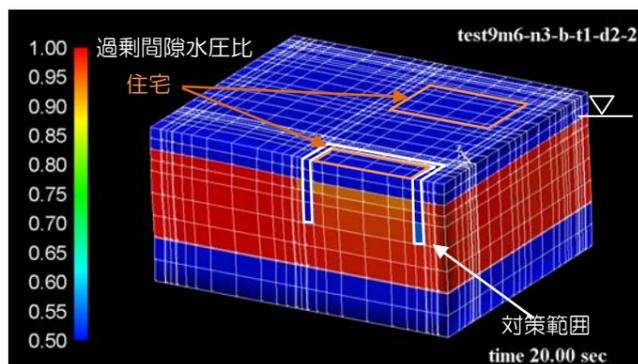
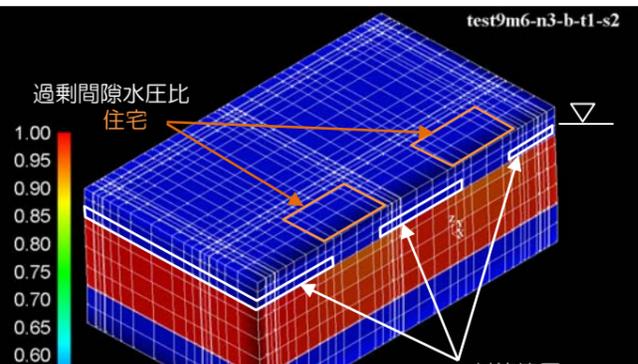
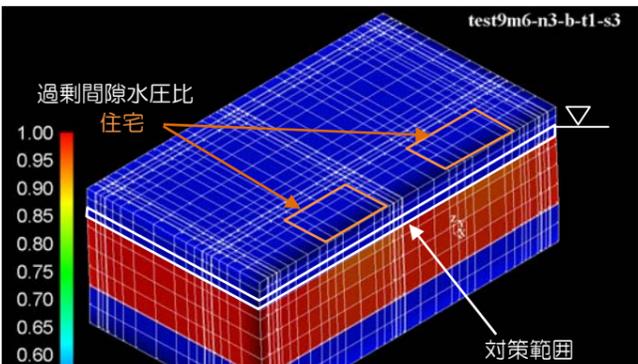
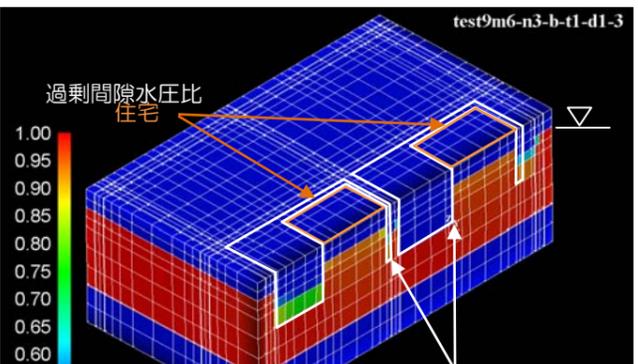
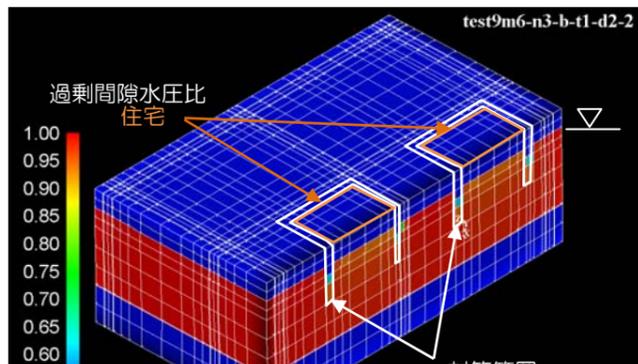
		地下水位低下工法 低下量 1m+浅層盤状 1m 住宅内側 1m+街区全面【b-5】	地下水位低下工法 低下量 1m+浅層盤状 1m 住宅下全面+街区全面【b-6】	地下水位低下工法 低下量 1m+柱状ドレーン (地表面から-6m) 住宅外周 1m+庭部【b-7】	地下水位低下工法 低下量 1m+柱状ドレーン (地表面から-6m) 住宅外周 1m【b-8】
B-B 断面	5s				
	10s				
	20s				
	20s				
住宅沈下量		14.8cm	10.2cm	28.7cm	29.1cm
挙動の概要		地表面-1m~3m の範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、地表面-2~3m の範囲の液状化が抑制され、住宅の沈下量が 45%低下した。	地表面-1m~3m の範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、地表面-2~3m の範囲の液状化が抑制され、住宅の沈下量が 63%低下した。【b-5】に比べ、住宅直下を含む全面を改良したことで対策効果が増加した。	地表面-1m~2m と対策範囲の液状化が抑制された。ドレーン部分で過剰間隙水圧比の上昇が確認された。地下水位低下 1m の比へ対策範囲より下部の土のはらみ出しが若干大きくなり、住宅の沈下量は 6%増加した。	地表面-1m~2m と対策範囲の一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m の比へ対策範囲より下部の土のはらみ出しが若干大きくなり、住宅の沈下量は 7%増加した。

表 5-12 変形および過剰間隙水圧比一覧表

入力地震動：東京湾北部地震

		地下水位低下工法 低下量 1m+部分締固め 6m 住宅外周 1m+庭部 【b-9】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締固め 3m 住宅外周 1m+庭部 【b-10】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締固め 4m 住宅外周 1m+庭部 【b-11】	地下水位低下工法 低下量 1m+部分締固め 1m 住宅外周 1m+庭部 【b-12】
B-B 断面	5s				
	10s				
	20s				
	20s				
住宅沈下量	26.7cm	24.6cm	24.8cm	24.7cm	
挙動の概要	地表面-1m~2m、対策範囲の一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、対策範囲の液状化が抑えられ、住宅の沈下量は 3% 低下した。	地表面-1m~2m、対策範囲の一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、対策範囲の液状化が抑えられ、住宅の沈下量は 10% 低下した。【b-9】では剛性の異なる壁状の土を深い位置まで混入したため、壁の振動により内部の土の加速度が大きくなり【b-10】よりも沈下量が大きくなった。	地表面-1m~2m、対策範囲の一部の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、5 秒時点での液状化の発生が早くなったが、地表面-2~3m 部分の対策範囲の液状化は抑えられ、住宅の沈下量は 9% 低下した。	地表面-1m~2m、対策範囲の液状化が抑制された。地下水位低下 1m に比べ、対策範囲の液状化は抑えられ、住宅の沈下量は 9% 低下した。	

6) 結果のまとめ

地下水位低下工法を主工法として各種の副工法との組み合わせによる液状化対策の効果について、3次元 FEM 解析を行い、異なる特徴を持った2種類の入力地震動に対する宅地の液状化や変位等の挙動を確認した。

地下水位低下工法単独のケースでは、地下水位低下が 1m の場合は、無対策と比較して地表面付近の液状化が抑制され、住宅の沈下量は、60%程度低減される結果となった。さらに地下水位低下を 2m とした場合では、80%程度の低減効果が見られた。

地下水位低下 1m を主工法として、各種の副工法を組合せた場合については、副工法として街区全面を均質に対策範囲とした不飽和化工法や浅層盤状改良工法のケースでは一定の効果が見られ、東京湾北部波のケースでは、地下水位低下 2m と同程度の効果を示した。一方、副工法の対策範囲を住宅外周部など一部に限った柱状ドレーン工法や部分締固め工法を組み合わせたケースでは十分な効果が見られなかった。これらのケースでは、対策が行われた部分では効果が見られる場合があるものの、対策部分に隣接する未対策部分では過剰間隙水圧比が上昇してしまう現象も見られた。

これらのことから対策工法の適用については、入力条件、地盤条件を詳細に考慮した上での工法選択が重要であり、対策工を部分的に行う場合には、全体のバランスに十分注意して、街区全体で効果を発揮できる対策とする必要がある。

今回の解析で使用した入力地震動の夢の島波は、東日本大震災で記録された加速度よりも 1.5 倍大きく、地表付近の地盤の N 値も低めに設定しているため、全体的に沈下や傾斜が大きい結果となった。

入力地震動による対策効果の違いについては、揺れは強いが継続時間が短い東京湾北部波のケースの方が、継続時間の長い夢の島波に比べて全体的に沈下量が少なく、対策工の効果がより発揮された結果となった。

住宅の偏心による影響は、入力地震動や対策工法によらず住宅重量を偏心させた方向と地震後の住宅の傾斜方向が一致することが確認された。

これらの解析結果は、「道路・宅地一体型の液状化対策における多様な工法の対策効果に関する3次元 FEM 解析業務」（請負者：(株)安藤・間）の成果の一部を取りまとめたものである。

参考文献

- 1)時松ら,地下水低下工法および排水工法に用いた既存戸建て住宅に対する液状化対策の実験的検討,第48回地盤工学発表会,2013.
- 2)液状化解析手法 LIQCA 開発グループ : LIQCA2D11,LIQCA3D11 (2011年公開版) 資料,平成23年12月6日