

格子状地盤改良による液状化対策を行った鉄骨免震構造の設計方法に関する検討

近藤秀信 * 小川敦 ** 北川麻記 *** 仙葉香織 *

本報告では液状化が予想される地盤で液状化層において液状化が発生しないように対策を施し、直接基礎として設計した基礎免震構造による病院建物における液状化対策の手法および地震動に与える影響検討の方法および検討結果を示す。

液状化対策は、基礎フーチング直下を交点とし格子状に地盤改良を行う方法とし、2次元地盤モデルの有限要素法解析により検討を行った。検討の結果、格子状地盤改良により地盤の液状化を抑止し、地震動の増幅を小さくできることが確認できた。

キーワード：液状化対策，地震動，免震構造

1. はじめに

液状化が予想される地盤に建物を建設する場合には、液状化層以深を支持層とする杭基礎として表層地盤が液状化しても建物本体には被害が及ばないように対策を行うか、または建物下部に液状化が発生しないように地盤に対して対策を施す方法がある。

本報告では液状化層において液状化が発生しないように対策を施し、直接基礎として設計した基礎免震構造による病院建物における液状化対策の手法および地震動に与える影響検討の方法および検討結果を示す。

2. 構造計画概要

2. 1 建物概要

建物の概要は Fig. 1 に示すように、地上 6 階建て、建物高さ 28.5m で、平面形状は 111.6m×64.75m の長方形の形状であり、短辺方向 14m、長辺方向 12.4m スパンに柱を配置し、階高は 6.5m～3.95m としている。

構造形式は基礎免震構造であり、下部構造を鉄筋コンクリート造とし、免震装置直上の基礎から上部構造を鉄骨造としている。なお、1～5 階は純ラーメン構造、6 階はブレース付きラーメン構造としている。

免震装置は Fig. 2 に示すように支承材として建物中央部に天然ゴム系積層ゴム支承を、建物外周部に高減衰ゴム系積層ゴム支承を、建物外周部のフレーム内に減衰装置として増幅機構付き減衰装置（減衰こま）を X, Y 方向とも 6 基ずつ設置している。

- * 建築事業本部 設計本部 構造設計部
構造第 2 グループ
- ** 技術本部 技術研究所 基礎技術研究室
- *** 建築事業本部 設計本部 耐震設計部
耐震設計グループ

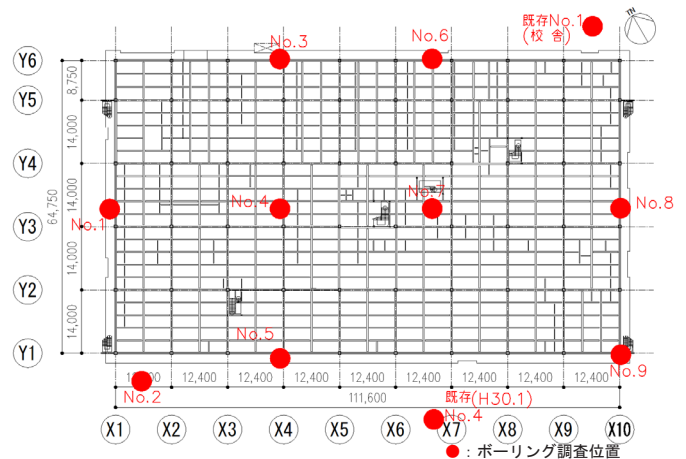


Fig. 1(A) 伏図

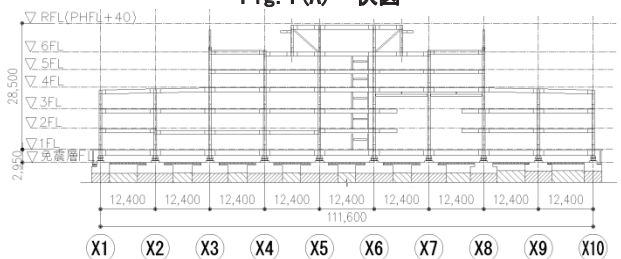


Fig. 1(B) 軸組図

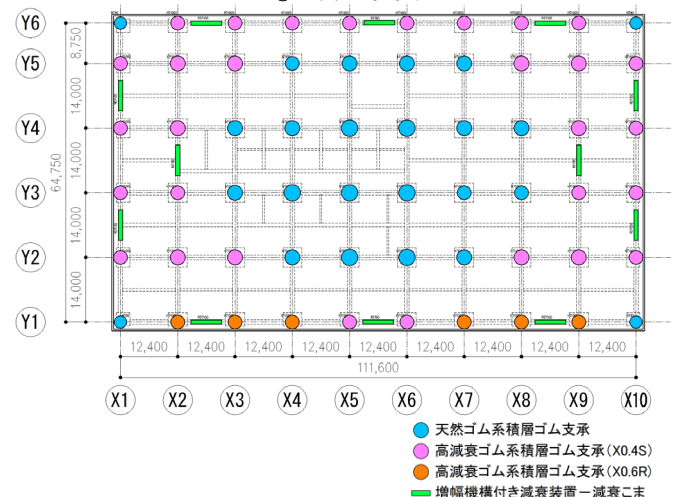


Fig. 2 免震層伏図

Table 1 建物長辺方向の等価周期

免震層固定	微小変形時 (20mm)	レベル1相当 (200mm)	レベル2相当 (400mm)
1.46 s	2.29 s	3.83 s	4.61 s

()内は免震層の層間変位を示す。

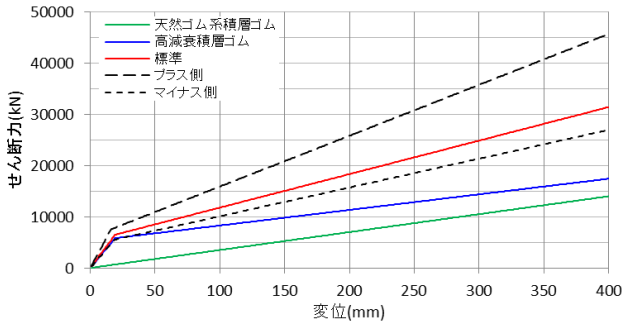


Fig. 3 免震層の復元力特性

建物長辺方向の等価周期を Table 1 に、免震層の復元力特性を Fig. 3 に示す。

2. 2 地盤概要

当該敷地で実施した地盤調査報告書¹⁾より、Fig. 4 に想定地層断面図を示す。地層構成は、表層に 1m 程度の盛土があり、その下部に軟弱な沖積粘土層及び沖積砂質土層が 10~15m 程度堆積し、それ以深は N 値 50 以上の強風化花崗岩が続く地盤となっている。

建物の支持地盤となる強風化花崗岩は、北西から南西方向に傾斜を有する地形となっている。地下水位は深度 0.2~0.8m である。

液状化発生の危険度は、強風化花崗岩以浅の沖積砂質土層において、PL 値は設計用水平加速度 150gal で 9.2「液状化の危険度が高い」、200gal~350gal で 16.8~26.7「液状化の危険度が極めて高い」と判定される。また、地盤変位の略算予測 (Dey) 値は、150gal で 19.7cm と「影響は中」、200gal~350gal で 25.5cm~29.2cm と「影響は大」と判定されており、液状化の可能性が高い地域となっている。

孔内 PS 検層の結果を Fig. 5 に示す。調査結果より、S 波速度 410m/s を示す深度 17m 以深の強風化花崗岩を解放工学的基盤面と設定した。

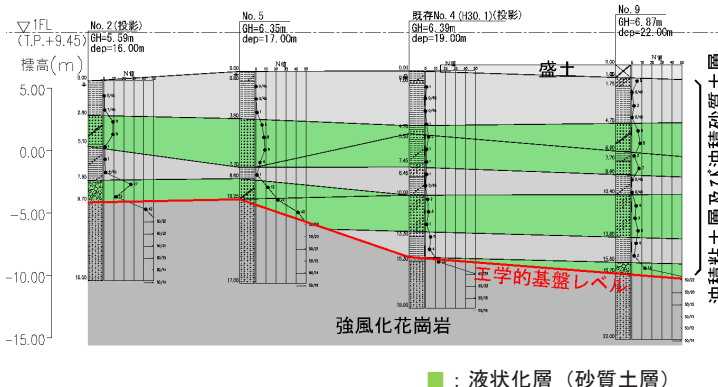


Fig. 4 想定地層断面図

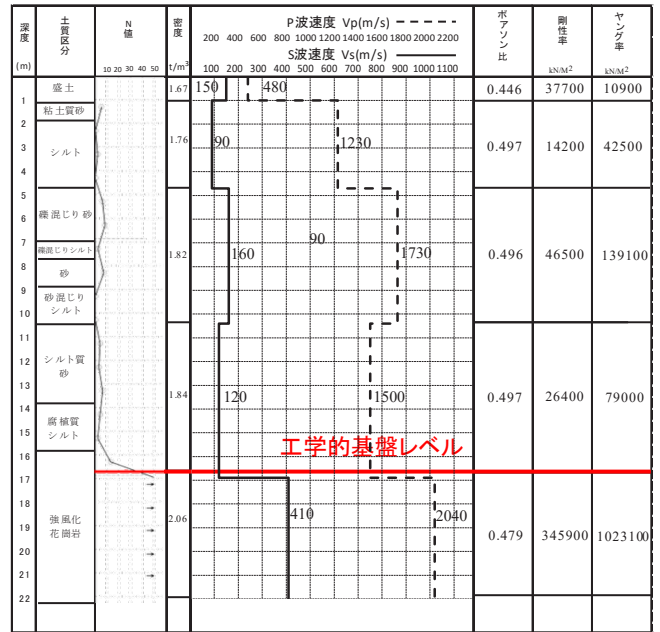


Fig. 5 孔内 PS 検層結果図 (ダウンホール法)

3. 液状化対策

3. 1 液状化対策の概要

Fig. 4 の砂質土層 (■部) において液状化が発生する可能性があるため、液状化対策として支持層 (深度 9.7m~16.7m) まで Fig. 6 に示す通りセメント系固化材による柱状地盤改良 (エポコラム工法) を行った。

基礎フーチング直下の地盤改良部 (■部) は建物重量を支持する。当該改良部を交点として、格子状に地盤改良を行う (■部) ことで地盤改良体に囲まれた未改良部分の地盤の過剰間隙水圧の上昇を抑制し、液状化対策とするものである。文献²⁾においても格子状形式改良地盤による液状化対策について記載があり、本件ではその液状化対策効果について有限要素法解析による検討を実施している。

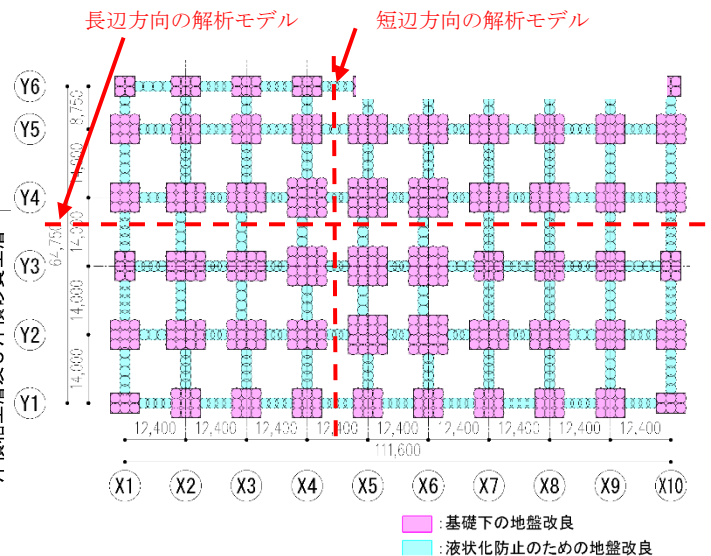


Fig. 6 地盤改良伏図

3. 2 液状化対策に関する解析的検討

3. 2. 1 解析概要

地盤の液状化対策効果について検討するために液状化解析（解析プログラム：FLIP³⁾・⁴⁾）を行った。格子状地盤改良の改良効果を考慮できるように2次元の解析モデルによる検討を行った。

解析は工学的基盤のレベルに応じて、建物短辺方向、建物長辺方向のそれぞれについて行った。Fig. 6に解析モデルの切断面位置のイメージを示す。Fig. 7に長辺方向の解析モデルを示す。

地盤の物性はPS検層のVsと標準貫入試験のN値および土質試験の細粒分含有率から文献⁵⁾を参考に決定した。Table 2に物性値の一覧を示す。

地盤改良体の物性は文献⁶⁾を参考に決定した。Table 3に地盤改良体の物性値の一覧を示す。

解析モデルは奥行き方向の単位幅に対して2次元でモデル化されているため面内方向の地盤改良体の剛性を直接考慮できない。そこで、地盤と面内方向の地盤改良体は2重要素とし、接点を共有せず、面外方向と面内方向の地盤改良体の接点を共有させて格子状改良の拘束効果を再現することとした。面内方向の地盤改良体は、スパンに対する改良体の厚さの比から定めた換算壁厚を有する平面要素とした。

3. 2. 2 解析結果

解析例として、入力地震動 AW1-L2 (4.1 作成地震動参照)における変形図および過剰間隙水圧比のコンター図を Fig. 8(a), (b)に示す。変形図はモデルの縮尺に対して変形増分を20倍として表現している。

変形図によれば、地盤改良体の外側は鉛直および水平方向に大きく変位しているが、地盤改良体および地盤改良体に囲まれた部分はほとんど変形していないことから、格子状地盤改良によるせん断変形抑止効果が確認できる。

また、過剰間隙水圧比のコンターによれば、地盤改良体の外側の過剰間隙水圧の上昇程度(橙～赤)に対して、地盤改良体に囲まれた未改良部分の地盤の過剰間隙水圧の上昇程度(青～橙)は抑えられており、格子状地盤改良による液状化抑止効果が確認できる。

格子状地盤改良に囲まれた未改良部分に着目すると、過剰間隙水圧比の最大値は、0.88～0.97である。

文献⁷⁾では、過剰間隙水圧比が0.95以上であれば完全

液状化状態と見なして良いとされている。また、文献⁸⁾では、液状化時の地表変位Dcyが5cm以下であれば液状化の程度は軽微であるとしている。これらの指標を参考とすると、一部完全液状化状態に達しているが、最終時刻における地表面の鉛直変位は最大2.3mmと小さい値であり、液状化の程度は軽微であると言える。

L2の地震動に対して液状化に対する格子状地盤改良の効果が確認でき、上部構造に影響を及ぼすような地盤の変状は生じないと判断した。

Table 2 地盤の物性値

層名	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	N値	細粒分含有率 Fc(%)
lay1	-1.00	1.00	1.67	150	5.0	-
lay2	-1.70	0.70	1.76	90	5.0	-
lay3	-2.70	1.00	1.76	90	0.1	-
lay4	-3.70	1.00	1.76	90	2.0	-
lay5	-4.70	1.00	1.76	90	0.1	-
lay6	-5.80	1.10	1.82	160	6.0	6.3
lay7	-6.90	1.10	1.82	160	8.0	6.3
lay8	-7.70	0.80	1.82	160	2.0	6.8
lay9	-8.80	1.10	1.82	160	7.0	6.8
lay10	-9.60	0.80	1.82	160	0.1	-
lay11	-10.40	0.80	1.82	160	0.1	-
lay12	-11.50	1.10	1.84	120	4.0	28.8
lay13	-12.60	1.10	1.84	120	3.0	28.8
lay14	-13.80	1.20	1.84	120	6.0	28.8
lay15	-14.80	1.00	1.84	120	4.0	-
lay16	-15.80	1.00	1.84	120	2.0	-
lay17	-16.70	0.90	1.84	120	13.0	7.0
lay18 (工学的基盤)	-	-	2.06	410	50	-

Table 3 地盤改良体の物性値

設計基準強度Fc	1200 kN/m ²	
一軸強度の平均値d _{uf}	2880 kN/m ²	
変形係数	E ₅₀	374400 kN/m ²
	E ₀	1872000 kN/m ²
ポアソン比ν	0.26	

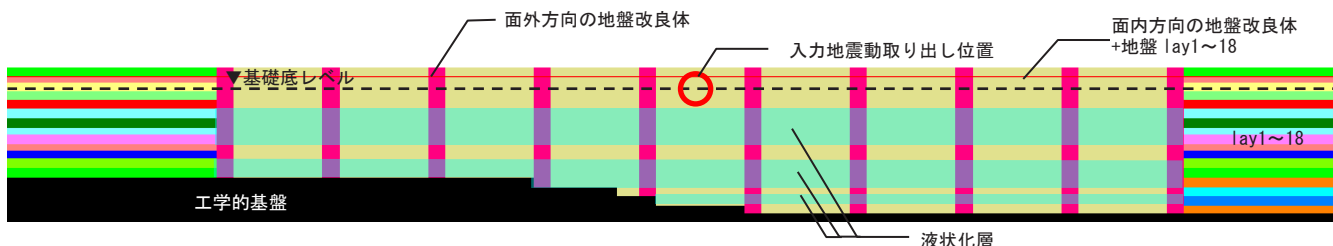
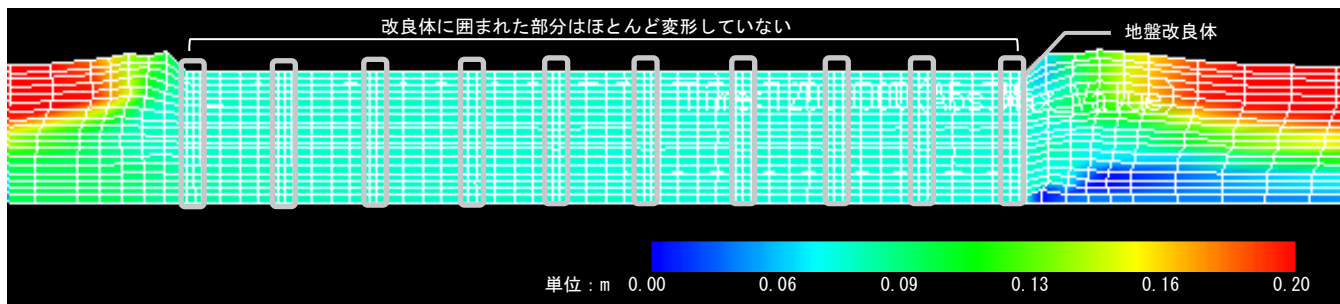
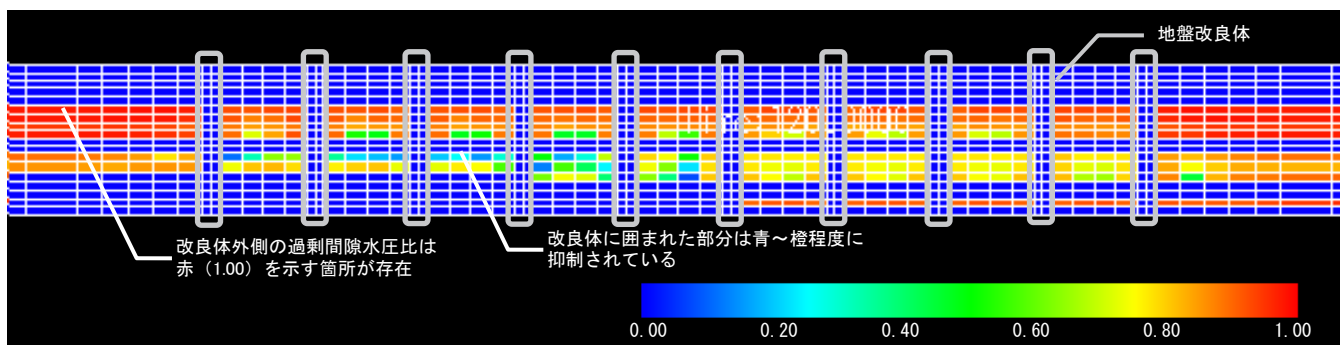


Fig. 7 解析モデル



(a) 変形図 (水平変位のコンター図, 最大値)



(b) 過剰間隙水圧比のコンター図 (最大値)

Fig. 8 解析結果 (AW1)

4. 地震動と応答結果

4. 1 作成地震動

地震波作成において液状化の考慮, モデル化および解析手法により建物の応答解析結果は大きく異なることが予想される。

Table 4 に示すように地震波作成時の条件を4つのケース (地盤改良の有無, 液状化解析か逐次積分法, 1次元地盤モデルか2次元地盤モデルの組合せ) に分け, それぞれの条件毎に地震波を作成し, 得られた地震波および応答スペクトルの比較検討を行った。

Table 5 に case2 の地盤改良有りの逐次積分法の地盤モデルの物性値を示す。格子状地盤改良を行った地盤の複合地盤としての等価せん断波速度を, 地盤と改良体の剛性と改良形状にもとづいて参考文献⁹⁾から算出した。

地震動は告示波のレベル2 模擬地震動波形3波 (AW1 (乱数), AW2 (HACHINOHE1968), AW3 (JMA KOBE 1995 NS)) とし, 作成した基礎底面レベルの波形の諸元を Table 6 に, 加速度時刻歴波形を Fig. 9 (a)~(d) に, 擬似速度応答スペクトルを Fig. 10 (a)~(c) に示す。

Table 5 case2 地盤モデルの物性値

層名	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	改良体考慮 Vs(m/s)
lay1	-1.00	1.00	1.67	300
lay2	-1.70	0.70	1.76	270
lay3	-2.70	1.00	1.76	270
lay4	-3.70	1.00	1.76	270
lay5	-4.70	1.00	1.76	270
lay6	-5.80	1.10	1.82	320
lay7	-6.90	1.10	1.82	320
lay8	-7.70	0.80	1.82	320
lay9	-8.80	1.10	1.82	320
lay10	-9.60	0.80	1.82	320
lay11	-10.40	0.80	1.82	320
lay12	-11.50	1.10	1.84	240
lay13	-12.60	1.10	1.84	240
lay14	-13.80	1.20	1.84	240
lay15	-14.80	1.00	1.84	240
lay16	-15.80	1.00	1.84	240
lay17	-16.70	0.90	1.84	240
lay18 (工学的基礎)	-	-	2.06	410

Table 4 地震動の作成条件

解析手法 改良の有無	1次元地盤モデル		2次元地盤モデル
	逐次積分法 (全応力)	液状化解析 (有効応力)	液状化解析 (有効応力)
非改良	case1	-	-
改良	case2	-	-
非改良	-	case3	-
改良	-	-	case4

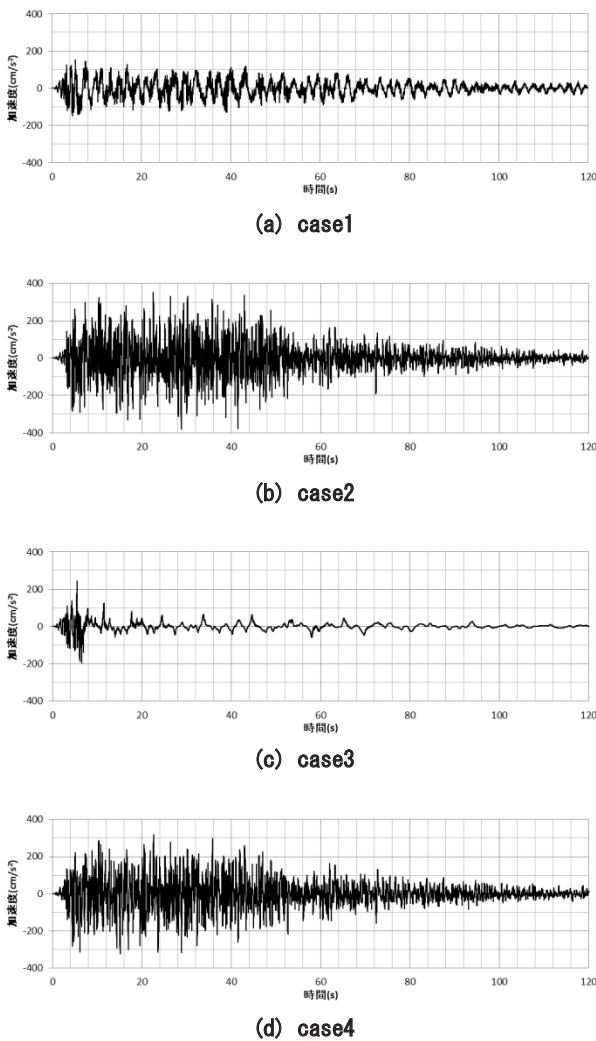


Fig. 9 基礎底面における加速度時刻歴波形 (AW1)

Table 6 各地震動諸元

		最大加速度 (cm/s^2)	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)	継続時間(s)
AW1	case1	154.8	68.7	38.5	120.0
	case2	381.4	55.6	37.2	
	case3	245.1	48.9	62.1	
	case4	324.0	54.9	37.0	
AW2	case1	195.7	62.3	51.0	200.0
	case2	389.5	63.5	42.3	
	case3	202.0	43.0	80.3	
	case4	296.0	61.0	42.5	
AW3	case1	166.9	62.4	49.6	60.0
	case2	400.2	56.7	43.5	
	case3	364.0	57.9	107.9	
	case4	350.9	53.9	43.6	

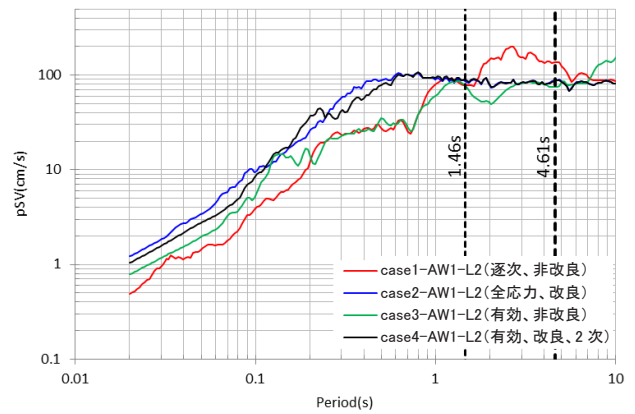


Fig. 10(a) 擬似速度応答スペクトル (AW1) (h=0.05)

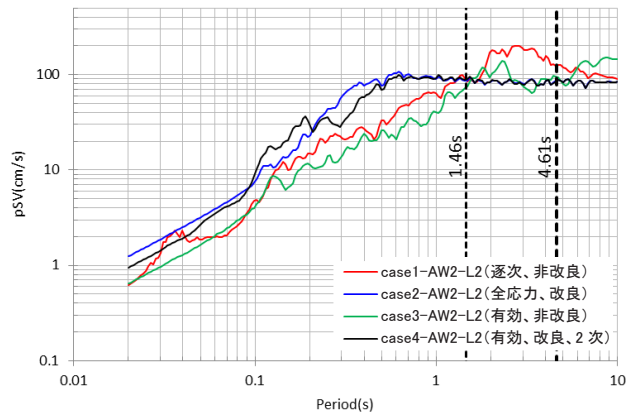


Fig. 10(b) 擬似速度応答スペクトル (AW2) (h=0.05)

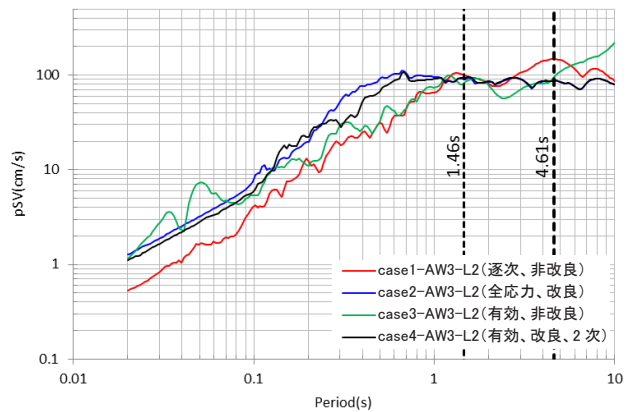


Fig. 10(c) 擬似速度応答スペクトル (AW3) (h=0.05)

これらの比較から以下のことが言える。

地表面加速度は case2 が最大値となっており、速度応答は概ね case1 が最大となっている。

加速度時刻歴波形を各ケースで比較すると case1 および case3 では改良を考慮していないため、初期の数秒以降は液状化の影響が大きく生じていることが確認できる。case4は有効応力解析を用いているが3.2に示したように格子状改良により液状化は生じておらず case2 の時刻歴加速度波形と非常に近い波形となっている。

擬似速度応答スペクトルを確認すると、3波共に case1 および case3 は液状化の影響により長周期側に大きくなっており、免震層固定時の固有周期が 1.46 秒、地震動レ

ベル2相当の免震層変形時で4.61秒としている本建物においては明らかに不利な地震動と考えられる。また、case2とcase4の擬似速度応答スペクトルは地表面での増幅が少なく2つのcaseは類似した形状となっている。

4.2 解析モデル概要

4.1で作成した地震動を用いて上部構造の時刻歴応答解析を行い、応答の比較検討を行った。

解析モデルは上部構造各階を質点とする質点系地震応答解析モデルとし、上部構造各層及び免震材料(免震層)を等価せん断型ばねとする。

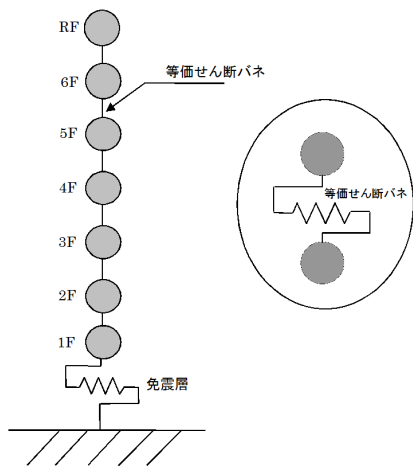


Fig. 11 地震応答解析モデル図

上部構造の復元力特性は弾性モデルとする。内部粘性減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数は免震層固定時の上部構造の1次固有円振動数に対して1階以上は1%、免震層は0%とする。

免震材料の復元力特性は、天然ゴム系積層ゴム支承は弾性、高減衰ゴム系積層ゴム支承は修正 Bi-linear 型、RDT (減衰こま) は回転慣性、静止摩擦、粘性抵抗力を加算した減衰力を考慮した精算モデルにて解析を行うものとし、内部粘性減衰は考慮していない。また、免震材料の性能変動は考慮していない。

解析方法は直接積分法 (ニューマークβ法, $\beta=1/4$) による。時間の刻みは $\Delta t=0.0001$ 秒とする。解析プログラムは、RESP-MX (構造計画研究所) を用いる。

4.3 応答結果

上部構造の時刻歴応答解析の比較を行った結果を Table 7, Fig. 12~14 に示す。

応答の結果として以下のようにになっている。

応答加速度は AW1 の地盤改良を考慮した case2, case4 が少し大きな値となっているが、AW2 および AW3 では case1~4 のいずれも大きな違いは見られない。

応答変位は地盤改良を考慮していない case1 が AW1~AW3 の3波共に最大となっており、次いで同じく地盤改良

を考慮していない case3 が大きな値を示している。地盤改良を考慮した case2, case4 はほぼ同様の結果となっている。特に免震層の応答変位は地盤改良の有無による違いが非常に大きく、case1 の変位は case2 および case4 の応答変位の約2倍となっている。

上部構造の層間変形角は 1F~3F は case1 が最大の値となっているが、4F~6F は case1, case2, case4 と同程度の値である。特に case2, case4 の結果はいずれの階においてもほぼ同様である。case3 については他3ケースに比べ僅かに小さい変形角となった。

応答層せん断力係数は case1 が下層階で最も大きい値となるが、上階での増加量は小さく、AW1, AW3 の上層階 (4F~6F) では case2, case4 の方が大きな値となっている。case3 は免震層および1階は case1 に次いで大きい上階は比較的小さくなる。case2, case4 は概ね同様の結果となっているが、5F, 6F においては AW1, AW3 で case2 の方が大きな値を示している。

Table 7 最大応答結果のまとめ

検討case	単位	AW1		AW2		AW3			
		解析値	階	解析値	階	解析値	階		
case1	上部構造	最大応答加速度	cm/s ²	160.26	RFL	174.67	RFL	201.22	RFL
		最大応答速度	cm/s	92.63	RFL	82.13	2F	103.89	RFL
		層せん断力係数	-	0.163	6F	0.178	6F	0.205	6F
	免震層	層間変形角	rad	1/234	1F	1/220	1F	1/166	1F
		最大応答速度	cm/s	86.49	1FL	81.90	1FL	84.35	1FL
		層間変位	cm	44.60	MFF	49.33	MFF	72.65	MFF
case2	上部構造	最大応答加速度	cm/s ²	223.01	RFL	158.46	RFL	290.83	RFL
		最大応答速度	cm/s	65.69	RFL	66.51	RFL	74.12	RFL
		層せん断力係数	-	0.227	6F	0.162	6F	0.296	6F
	免震層	層間変形角	rad	1/269	2F	1/298	3F	1/223	4F
		最大応答速度	cm/s	63.24	1FL	52.06	1FL	62.72	1FL
		層間変位	cm	22.21	MFF	23.16	MFF	35.51	MFF
case3	上部構造	最大応答加速度	cm/s ²	105.60	RFL	156.81	RFL	178.32	RFL
		最大応答速度	cm/s	54.33	RFL	64.01	4F	76.14	RFL
		層せん断力係数	-	0.108	6F	0.160	6F	0.182	6F
	免震層	層間変形角	rad	1/302	1F	1/301	1F	1/258	3F
		最大応答速度	cm/s	48.38	1FL	60.18	1FL	59.75	1FL
		層間変位	cm	37.62	MFF	38.38	MFF	44.06	MFF
case4	上部構造	最大応答加速度	cm/s ²	188.02	RFL	164.94	RFL	257.37	RFL
		最大応答速度	cm/s	65.00	RFL	60.94	RFL	77.14	RFL
		層せん断力係数	-	0.191	6F	0.168	6F	0.262	6F
	免震層	層間変形角	rad	1/277	2F	1/288	3F	1/244	3F
		最大応答速度	cm/s	62.53	1FL	51.05	1FL	59.73	1FL
		層間変位	cm	22.19	MFF	23.02	MFF	34.89	MFF

以上より、以下のようなことが読み取れる。

地盤改良の効果を考慮しない場合は液化化の影響により、地震動のパワーが長周期側にシフトし、免震層の変位が大きくなる傾向にある。

一方、地盤改良の効果を考慮する場合には、免震層の変位は小さくなる。それに伴い免震効果も小さくなり上層階の加速度および層せん断力係数は大きくなる傾向となるが、設計上問題になるほどの差異は生じていない。

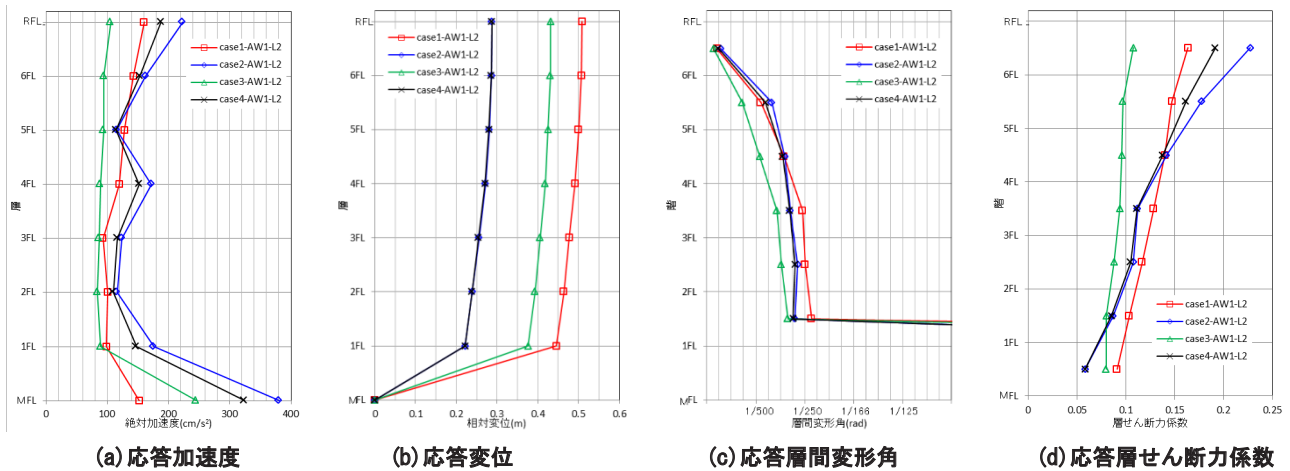


Fig. 12 AW1 最大応答結果

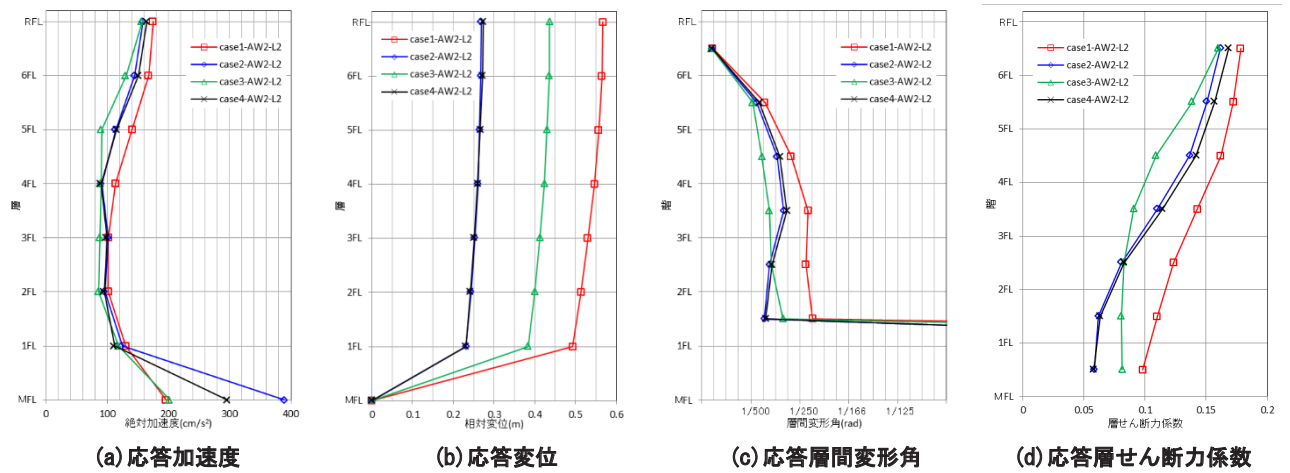


Fig. 13 AW2 最大応答結果

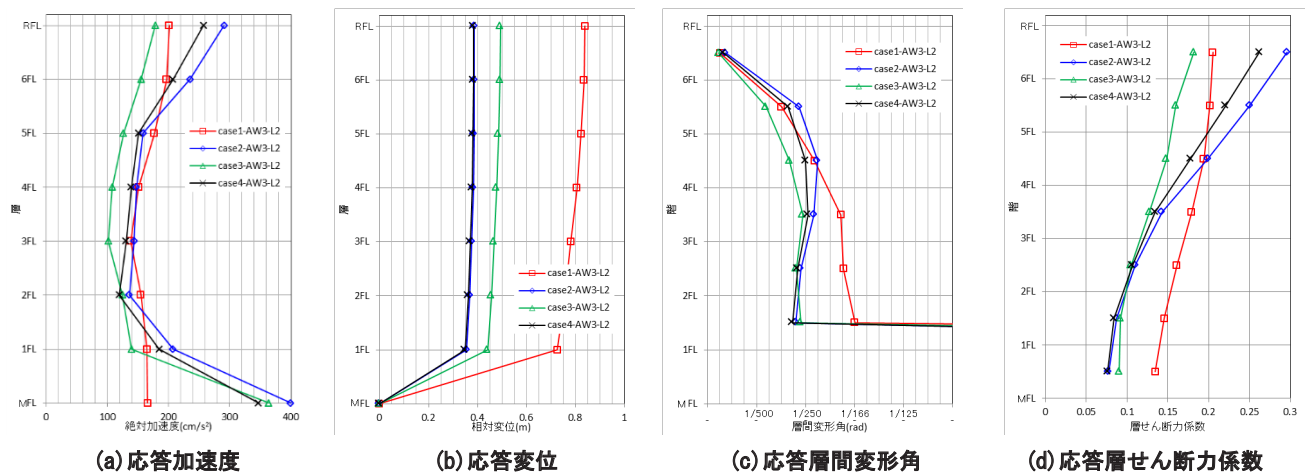


Fig. 14 AW3 最大応答結果

5. まとめ

液状化対策として、基礎フーチング直下を交点とし格子状に地盤改良を行い、2次元地盤モデルの有限要素法解析により検討を行った。また、地震波作成において液状化の考慮、モデル化および解析手法の違いによる建物の応答解析結果に与える影響検討を行った結果以下のことが確認できた。

- (1) 格子状地盤改良を行うことで地盤の液状化を抑止し、地震動の増幅を小さくできる。
- (2) case2の地盤改良を考慮した1次元地盤モデルの逐次積分法と、case4の地盤改良を考慮した2次元地盤モデルの液状化解析結果がほぼ同様の結果となったことから2次元地盤モデルによらずとも、地盤改良の効果を適切に1次元地盤モデルに考慮すれば、精度の高い解析を行うことが可能であると言える。
- (3) 地盤改良をせず、液状化を考慮した地震動 case1, case3 ではやや長周期側（1秒後半以降）で擬似速度応答スペクトルが大きくなっており、本建物のように1.5秒～4.5秒付近に固有周期がある低層の免震構造においては、建物にとって厳しい地震動となる。

上記(2)については、格子状地盤改良により液状化対策を施し、時刻歴応答解析にて設計する建物の企画検討段

階や基本設計時において、有効な手法であると思われる。

また、(3)より、格子状地盤改良による液状化対策は、本建物においては地震応答を小さく抑えることができ有効な対策であったと言える。

参考文献

- 1) 病院新築事業 地盤調査報告書, 平成30年11月.
- 2) 日本建築学会: 建築基礎のための地盤改良設計指針案, 2006.11.
- 3) Towhata, I. And ISHIHARA, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International conference on numerical method in geomechanics, Nagoya, pp. 523-530, 1985.
- 4) S. Iai, et. al.: STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, SOILS AND FOUNDATION, Vol. 32, No. 2, 1-15.
- 5) 森田年一, 井合進, Liu Hanlong, 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.
- 6) 国土交通省 都市局 国土技術政策総合研究所, 液状化被災市街地における格子状地中壁工法の検討・調査について(ガイドランス(案)), 平成25年4月.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編, 平成24年9月.
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001年10月.
- 9) 石川明, 浅香美治, 社本康広: 均質化法を用いた部分改良地盤の等価S波速度の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, pp. 67-72, 2007年3月.

Study on Design Method of Steel-Isolated Structure with Liquefaction Countermeasure (Lattice Columnar Improvement)

Hidenobu KONDO, Atsushi OGAWA, Maki KITAGAWA and Kaori SEMBA

Abstract

In case of building on the liquefied ground, measures are taken to prevent damage to the building even if the surface layer is liquefied by a pile foundation with a depth deeper than the liquefied layer as a supporting layer, or to prevent liquefaction from occurring on the lower part of the building against the ground.

This report presents the method of liquefaction countermeasures, and the methods and results of the effects of seismic motion in the design of hospital building by measures to prevent liquefaction of liquefied layer with a base isolated foundation structure planned as a spread foundation.

Key words: Liquefaction measures, Seismic motion, Seismic isolation structure
