

KORC東扇島流通センター増築工事

ヒグチアソシエイツ
樋口 久吾



同
丹沢 康



同
上山 貴子



1. 何故免震構法を採用したか

1995年の阪神・淡路大震災を契機に地震の大きさについての関心が大きくなった。

どれくらい強く建物を設計すれば起こりうる最大の地震に耐えられるのか？

本倉庫のボリュームは地下を駐車場、地上7～10階が想定され、倉庫建物としては階数が大変多く、ブレース構造で経済的に計画する為には免震構造にする必要があった。

それには地震力を通常の30～50%に小さくできればネックの1階入り口面でのブレース箇所の確保が可能になり高層倉庫が実現し易くなる。

一方、施主のKORCは次のような経営戦略に基づいていた。湾岸に流通センターを数多く展開しており、この地域に大地震が発生した場合、営業に支障がでるとともに再建時間が長くなり、猛烈なスピード時代の競争に遅れてしまうリスクが生じる。

従って如何なる大地震に対しても安全な流通センターを予算内で建設することが求められた。

以上をまとめると免震構造にすることによって

- (1) 施主の長期経営戦略実践
- (2) 高層倉庫をブレース構造で計画
- (3) 各階の加速度を150～200cm/sec²程度で保管荷物の安全確保
- (4) 杭頭の水平力負担を軽減などが可能になる。

2. 解決すべき問題と設計目標の設定

一番大きな問題は軟弱埋め立て地盤で、しかも大地震時に液状化が生ずる問題である。

地盤改良を行うか、行わないか又その時の杭を含めた基礎の設計目標の設定である。

鋼管巻き杭頭（現場造成杭）と基礎梁の取り合いの問題。深い地下工事の山止め仮設のSMWの厚さと外周擁壁の厚さ、それに免震層のクリアランスの合計の最小限距離と必要最小限度の建物幅の問題。これは一階の荷捌きのキャパ確保の為とそれに対応する荷待ちトラックの台数確保の問題、大型トレーラヘッドの地下進入スロープと切り回し確保の問題。最後は使用鉄骨量を少なくしかつ免震効果を上げるブレースシステムの構成の問題で上記諸問題を以下のように対応した。

(1) 軟弱液状化地盤問題

地盤改良は行わず杭頭及び基礎梁強化

(2) 杭頭と基礎梁の取り合い

SRC基礎梁とし両者を現場溶接する。

(3) 隣地境界線からの最小限距離

擁壁盗みを上部フーチングレベルに設ける。

(4) SMWの厚さ

鉄骨の芯を境界側に偏心させる。

(5) トラック台数確保と地下駐車場

15.2mの大スパンを採用。

(6) ブレースシステム

施工性故にシングルブレース採用(X型でない)

これらの問題は最終目標のコストと緊密に関連する事になるが、設計のクライテリアは次の様に設定した。杭及び基礎構造は地盤の問題から最も応答量の確定が難しい事と施主の要望からレベル1、(カテゴリー1、2に対応)とも許容応力度以内、レベル2と余裕度検討レベルに対しては弾性限耐力以内を設定した。免震装置はレベル1では安定変形以内、レベル2と余裕度検討レベルでは性能保証変形以内で設定した。

上部構造はレベル1で許容応力度、レベル2で弾性限耐力以内、余裕度検討レベルで終局耐力以内としている。

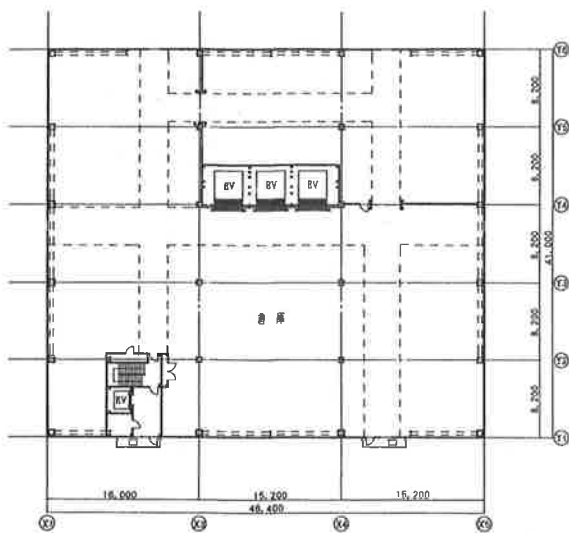


図-1 基準階平面図 1:800

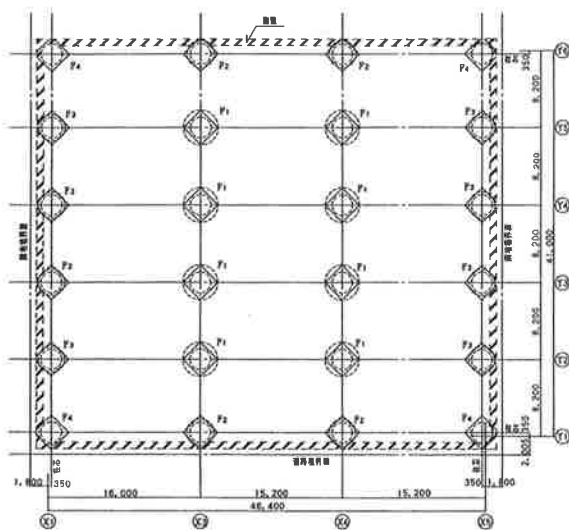


図-2 免震装置配置図(杭伏図) 1:800

3. 免震装置概要

本建物に採用する免震装置は、高減衰積層ゴム(横浜ゴム製)であり、その配置を図-2に示す。外周四隅がUHD-G6-090H(ϕ 900)で4基、四隅を除く外周がUHD-G6-110H(ϕ 1100)で12基、中央部がUHD-G6-130H(ϕ 1300)で8基である。また、免震装置は軸組図に示すように、地下駐車場の下に配置している。

B1階床固定時の上部構造の1次固有周期がX方向0.893sec、Y方向0.876secであるのに対し、免震装置を考慮した建物の1次固有周期は、ゴム歪み200%時にX方向3.393sec、Y方向3.391secであり、同じく $\gamma=200\%$ 歪み時の履歴エネルギー消費率は等価粘性減衰定数(heq)で18.5%である。

本システムによる長期最大面圧は113.4kgf/cm²であり、設計目標である120kgf/cm²をクリアしている。

4. 解析結果と設計目標の確認

地震応答解析のモデルは図-5に示すように、免震層下部を固定とした9質点等価せん断型ロッキングスウェイモデルを仮定し、X・Y両方向にそれぞれ設定する。上部構造各層の復元力特性は、X・Y方向共に静的増分荷重による骨組の非線形解析結果から得られたQ- δ 関係をTri-Linear型にてモデル化し、減衰はB1階床固定時の水平1次固有周期に対してh=1%

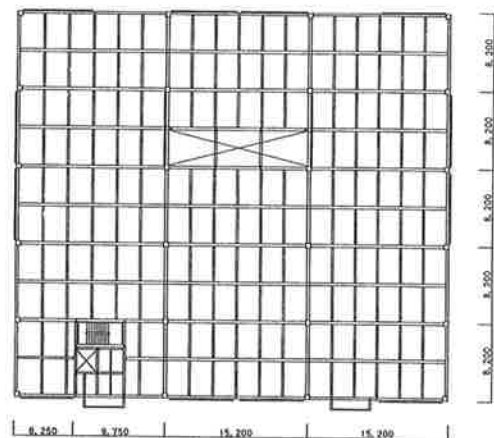


図-3 基準階伏図 1:800

の初期剛性比例型内部粘性減衰を考慮した。

免震層の復元力特性は高減衰積層ゴムのせん断履歴特性を実験式に基づく非線形モデル(菊地モデル)とした水平ばねと線形の回転ばねにモデル化し、減衰は水平方向については積層ゴムの履歴減衰のみを、回転については、 $h=1\%$ を考慮した。

入力地震動はそれぞれ特性の異なる強震観測記録波形3波、及び地域波として本建物建設地近傍の川崎区模擬地震波形2波とし、レベル1はカテゴリ-C1に属するように、レベル2はカテゴリ-C2に属するように、また、余裕度検討レベルとしてカテゴリ-C2・C3に属するように、それぞれ設定する。設計クライテリアは表-1とした。また、レベル2時には積層ゴムに引張力を生じさせないようにし、余裕度検討レベルにおいても過度の引抜き力が生じないように設定する。

各入力地震動に対する最大応答値を表-2、3に示す。ここで性能変動を考慮した解析とは、高減衰積層ゴム製造時のばらつき、温度変化及び経年変化に伴う剛性・減衰の変動の3項目を考慮し、剛性変

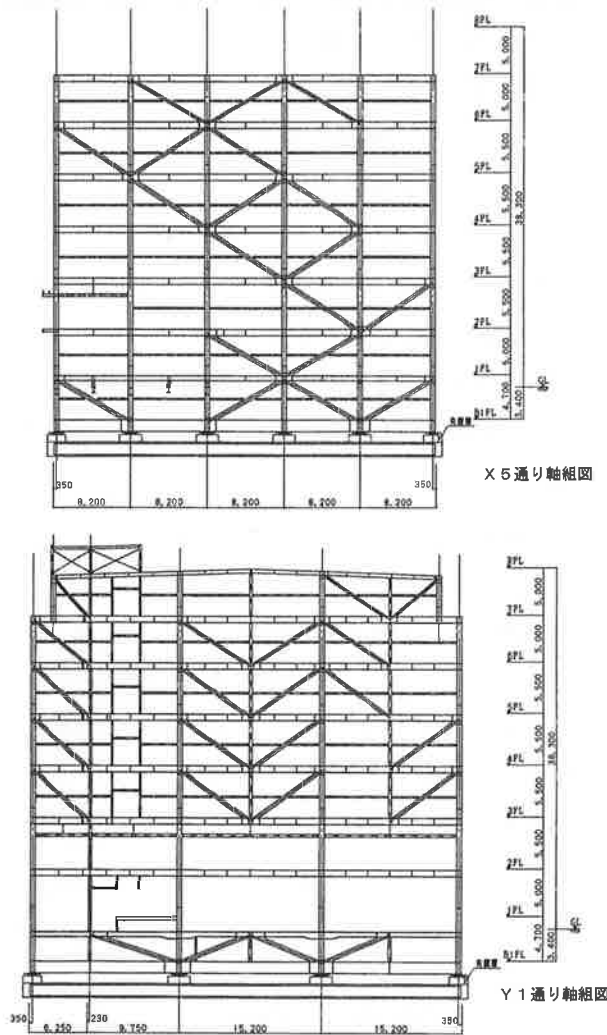


図-4 軸組図 1:800

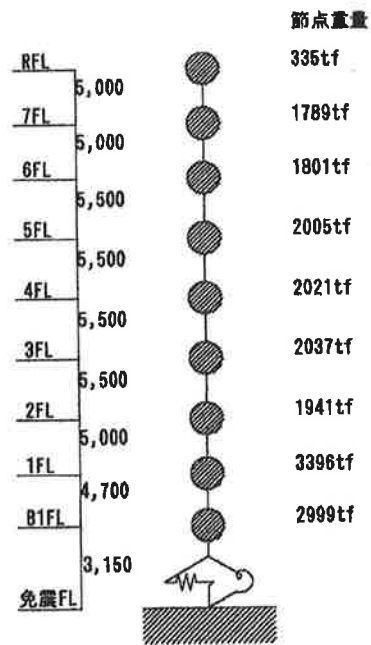


図-5 解析モデル

表-1 耐震性能目標

地震動のカテゴリ	レベル1	レベル2	余裕度検討レベル
上部構造	C1	C2	C2、C3
免震装置	A	B	C
下部(基礎)構造	A	A	B

上部構造・下部構造
A: 許容応力度以内
B: 弾性耐力以内
C: 終局耐力以内

免震装置
A: 安定変形以内……………相対水平変位は40cm ($\gamma=200\%$) 以下
B: 性能保証変形以内……………相対水平変位は50cm ($\gamma=250\%$) 以下
(擁壁クリアランスで決まる)
C: 限界変形以内……………相対水平変位は50cm ($\gamma=250\%$) 以下
(擁壁クリアランスで決まる)

表-2 層せん断力係数 (免震層)

LEVEL	地震波名	方向	標準解析		性能変動解析		
			標準	SOFT*1	HARD*2	Cmin.*3	
レベル1	EL CENTRO NS	X	0.067				
		Y	0.067				
	TAFT EW	X	0.060				
		Y	0.060				
レベル2	EL CENTRO NS	X	0.076	0.063	0.114	0.103	
		Y	0.080	0.063	0.114	0.106	
	TAFT EW	X	0.076	0.063	0.098	0.083	
		Y	0.076	0.063	0.098	0.083	
レベル2	HACHINOHE NS	X	0.088	0.071	0.110	0.106	
		Y	0.089	0.071	0.111	0.107	
	AS9*4	X	0.125	0.092	0.158	0.155	
		Y	0.123	0.099	0.153	0.153	
レベル2	AS20*5	X	0.091	0.077	0.115	0.119	
		Y	0.091	0.076	0.111	0.012	
	余裕度検討レベル	EL CENTRO NS	X	0.172	0.106	0.224	0.199
			Y	0.169	0.106	0.235	0.211
TAFT EW		X	0.165	0.140	0.214	0.184	
		Y	0.165	0.139	0.214	0.184	
余裕度検討レベル	HACHINOHE NS	X	0.193	0.154	0.205	0.209	
		Y	0.194	0.154	0.209	0.211	

表-3 免震層水平相対変位 (cm)

LEVEL	地震波名	方向	標準解析		性能変動解析	
			標準	SOFT*1	HARD*2	Cmin.*3
レベル1	EL CENTRO NS	X	17.3			
		Y	17.6			
	TAFT EW	X	13.8			
		Y	13.8			
レベル2	HACHINOHE NS	X	18.1			
		Y	18.4			
	EL CENTRO NS	X	23.7	23.1	26.6	29.9
		Y	24.2	23.0	26.6	30.5
レベル2	TAFT EW	X	22.2	22.6	21.1	22.5
		Y	22.2	22.6	21.1	22.5
	HACHINOHE NS	X	27.6	27.3	25.2	30.7
		Y	27.9	27.3	25.7	31.0
レベル2	AS9*4	X	37.4	36.6	35.9	40.9
		Y	37.0	36.6	35.0	40.6
	AS20*5	X	29.0	29.7	26.7	33.9
		Y	28.5	29.3	25.4	33.5
余裕度検討レベル	EL CENTRO NS	X	46.3	38.4	45.3	48.0
		Y	45.7	38.3	46.9	50.0
	TAFT EW	X	45.0	46.0	44.1	45.7
		Y	45.0	45.9	44.1	45.7
余裕度検討レベル	HACHINOHE NS	X	49.8	49.0	42.8	49.6
		Y	50.0	49.0	43.5	49.6

*1 SOFT : 剛性が最も低くなる場合
 *2 HARD : 剛性が最も高くなる場合
 *3 C min. : 減衰が最も低くなる場合
 *4 AS9 : 川崎区模擬地震波 (塩浜周辺)
 *5 AS20 : 川崎区模擬地震波 (田島町周辺)

動-18%~+34%、減衰変動-26%~±0%を定義した解析である。また、レベル2、余裕度検討レベルにおける太字の値は最大応答値を示している。

レベル1での各応答値はいずれも上部・下部構造において許容応力度内、免震装置において安定変形以内である。レベル2時における免震層の層せん断力係数は標準解析において、予備的応答解析による応答値(免震装置レベルの層せん断力係数0.150)を下回っており、設計せん断力に対して各部材は短期許容応力度以内である。また、性能変動考慮モデルにおいても最大値0.158と、弾性限耐力内にある。水平相対変位は免震層での変形が支配的であり、標準解析による上部構造の層間変位は最大1/587、また、免震層の変形は、27.9cm(安定変形以内)である。性能

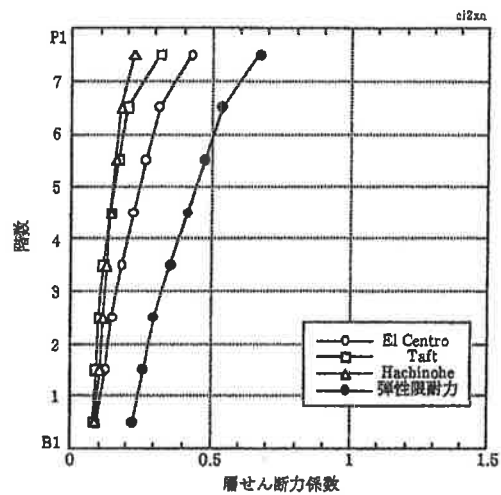


図-6 最大応答せん断力係数 (X方向 レベル2)

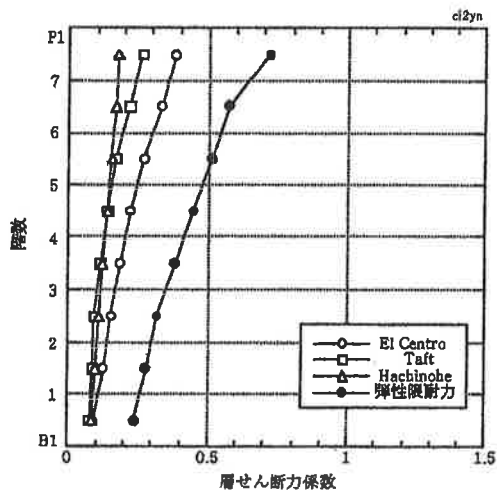


図-7 最大応答せん断力係数 (Y方向 レベル2)

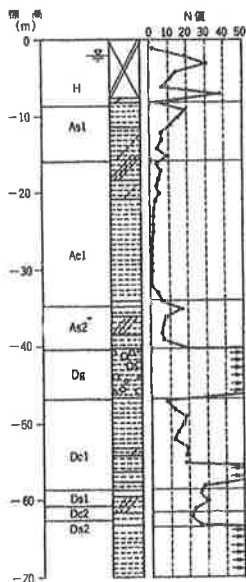


図-8 地盤ボーリング図

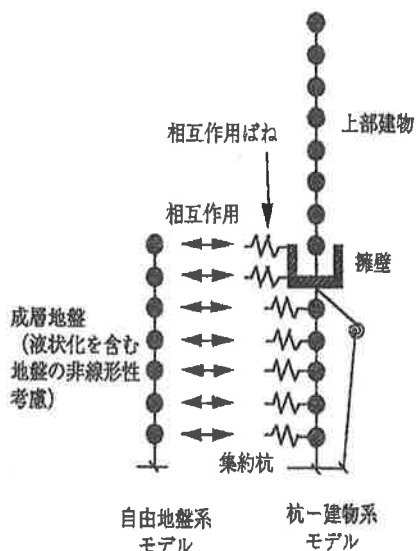


図-9 連成解析モデルのイメージ

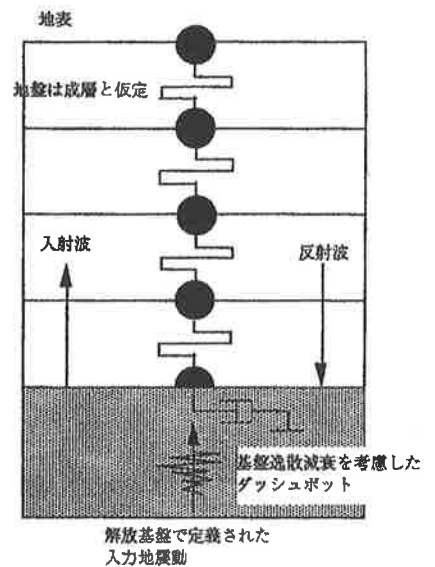


図-10 自由地盤解析モデルの概念

変動解析ではそれぞれ1/509、40.9cm(性能保証変形以内)である。余裕度検討レベルにおいては上部・下部構造共に性能変動考慮モデルで決まり、保有耐力以内であり、免震層の変形は最大50.0cmで、性能保証変形以内である。

薄層地盤の地盤剛性は自由地盤の応答ひずみに応じて等価剛性

Winkler型ばねとダッシュポットを並列にしたモデル

相互作用ばね

相互作用ばね剛性は等価剛性

5. 建物一杭一地盤連成応答解析について

本解析モデルを図-9にしめす。地盤一杭一建物の相互作用の解析は自由地盤系の地震応答解析を別個に行い、その応答結果を杭一建物系の解析に際して相互作用力として入力することで行っている。

入力地震動●レベル2相当で工学的基盤への入力として当該地盤環境を考慮して作成した模擬地震波と臨海波（日本建築防災協会作成）を検討したが、目標とする周期帯域1～4秒では臨海波が他の地震動の速度スペクトルを包絡するので、入力地震動として臨海波を使用する。

- 上部建物 上部建物の復元力特性は非線形
- 免震装置 免震装置の復元力特性は菊地モデル
- 擁壁 無限大の剛性をもつ等価せん断型モデルに置換
復元力特性は線形
- 集約杭 集約杭は曲げせん断梁要素に置換
剛性、重量は全杭を合計
回転ばねとダッシュポットを並列にしたロッキングモデル
- ばね ばね剛性及びダッシュポットの減衰係数は3次元薄層法により算定した杭頭インピーダンスをもとに設定

最大加速度310.64cm/sec²、継続時間120秒(レベル2)
 入力地震動解析概要●地震時に地盤の液状化が予想されるため、有効応力モデルを用いた逐次積分法による地震応答解析を行い地盤の挙動を把握しながら、建物基礎底での入力地震動をもとめた。解析フローを図-13に各使用モデルを図-10～12に示す。地盤のモデル化は柱状図によるが、層厚は地盤を地層構成ごとに分割し、更に各層の層厚が1～6m程度になるように34分割している。工学的基盤はG L—65 mの細砂層としている。解析は非排水状態を仮定し、修正R-Oモデルの履歴減衰の他にh=2%のモード減衰を与えた。

入力地震動解析結果●地盤の1次固有周期は1.17秒で、常時微動測定結果の1.1~1.3秒と良く一致している。図-14に示す様に最大変位分布はGL-7.0mを境に急増し、最大変位は27cmとなっている。図-15の最大加速度はGL-14mから急増しているが、液状化した層でパルス的なノイズと考えられる。図-16で間隙水圧比がGL-8~12mで0.95を越えており液状化が発生していると判断できる。図-17では最大歪みはGL-8m近傍で8%程度と大きく10mでは0.02%程度となっている。図-18では液状化している層の剛性低

下は0.05程度と大きく、していない層では0.4~0.6程度である。

図-21(2)に基礎底レベルにおける擬似速度応答スペクトルを示す。

図-21(1)の基礎の擬似速度応答スペクトルと比べると液状化により1秒以下の部分の減少と長周期域での増大が認められる。

建物連成応答解析結果●各応答結果を図22~26に示す。最大応答せん断力、最大応答転倒モーメント分布には地盤変動応力も一緒に示す。ここでは建物と擁壁の質量を0.0として解析している。集約杭の杭頭せん断力はX,Y方向それぞれ3222 t、3212 tであり、擁壁のそれは948 t、946 tである。

上部構造の最大応答加速度については276cm/sec²、最大層間変形角は1/759で、最下階の最大せん断力係数は0.107と弾性限耐力時のベースシャー係数より小

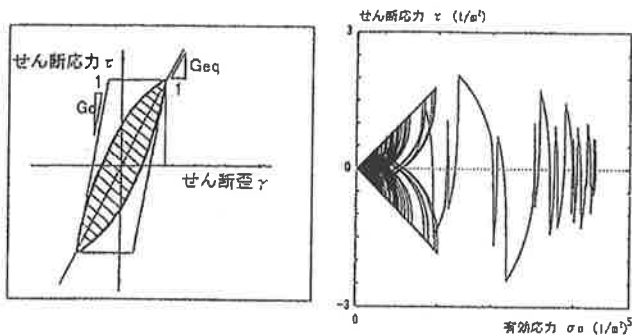


図-11 R=0モデル

図-12 有効応力経路モデルの例

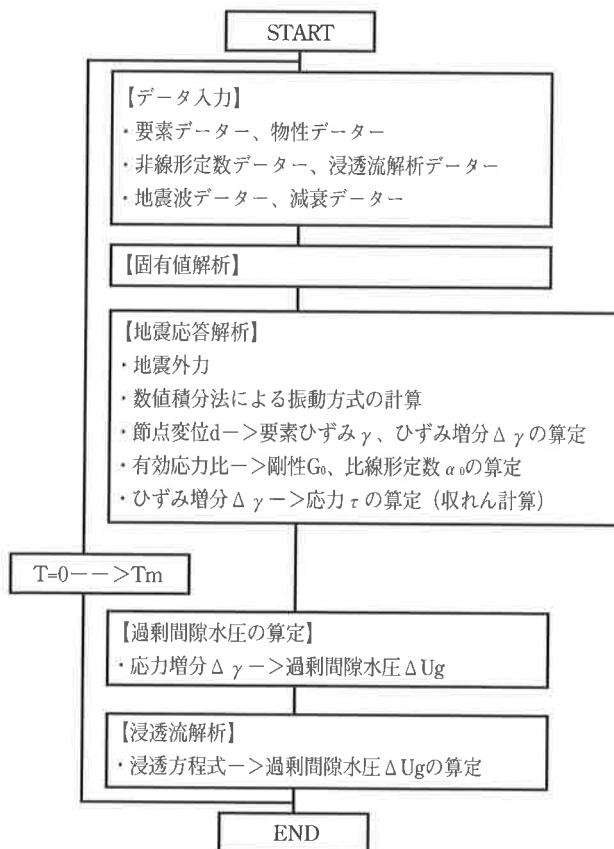


図-13 解析フロー

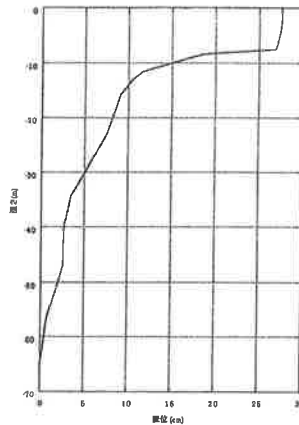


図-14 地盤の最大応答変位分布

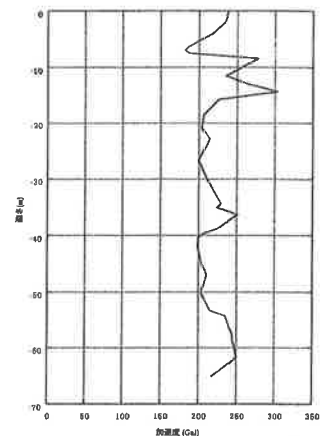


図-15 地盤の最大応答加速度分布

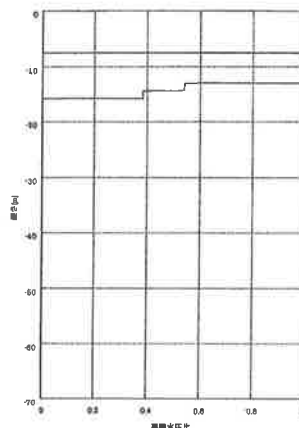


図-16 地盤の最大間隙水圧分布

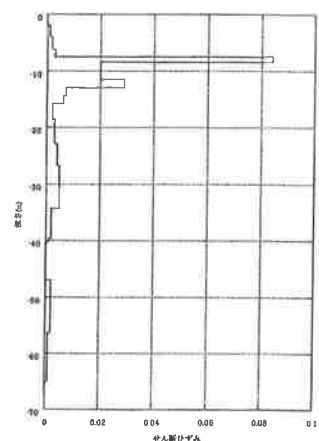


図-17 地盤の最大せん断ひずみ分布

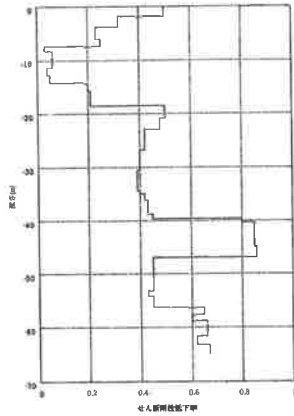
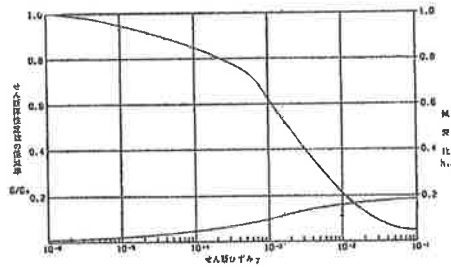
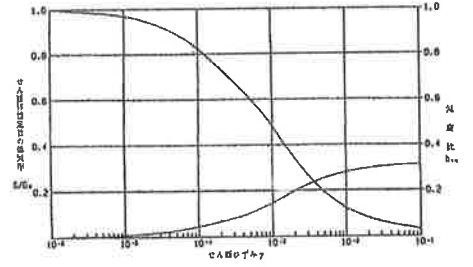


図-18 地盤の剛性低下分布

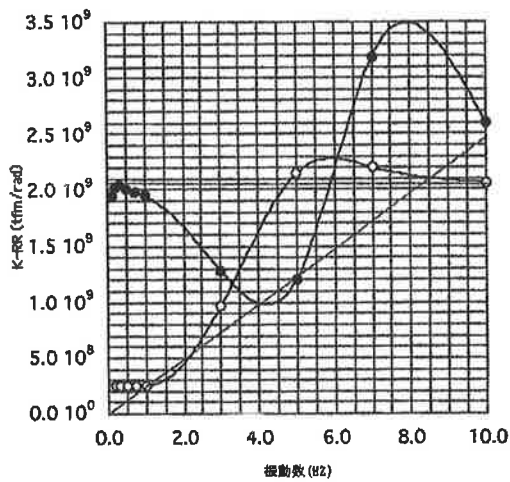


(1) GL-16.0~16.8cm



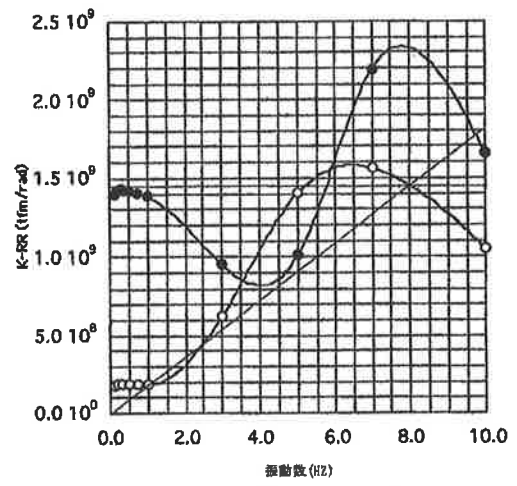
(2) GL-37.0~37.8cm

図-19 G/Go- γ 曲線 h/ho- γ 曲線の解析値の比較



$K = 2.09 \times 10^9 \text{ t/m/rad}$
 $C = 3.94 \times 10^7 \text{ t/m s/r}$

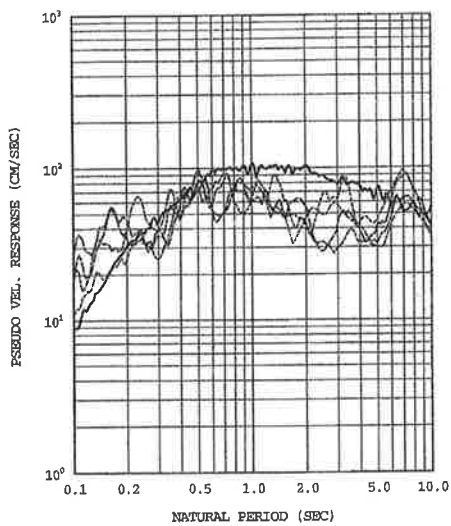
(1) X方向



$K = 1.40 \times 10^9 \text{ t/m/rad}$
 $C = 2.93 \times 10^7 \text{ t/m s/r}$

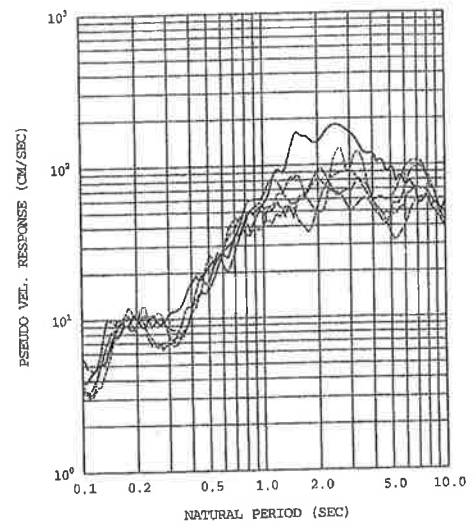
(2) Y方向

図-20 ロッキングばね設定に用いた杭頭インピーダンス



Pseudo velocity response spectrum (h=0.05)

(1) 基礎レベル



Pseudo velocity response spectrum (h=0.05)

(2) 基礎底レベル

図-21 擬似速度応答スペクトル (h=0.05) 臨海波 当該地盤を考慮した模擬地震波

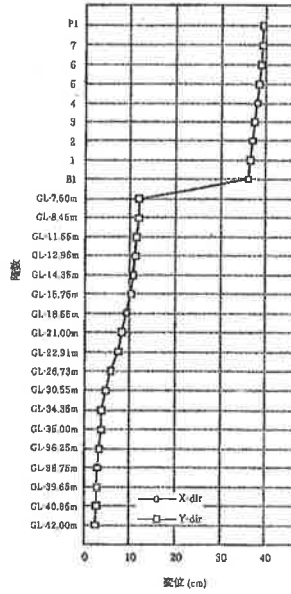
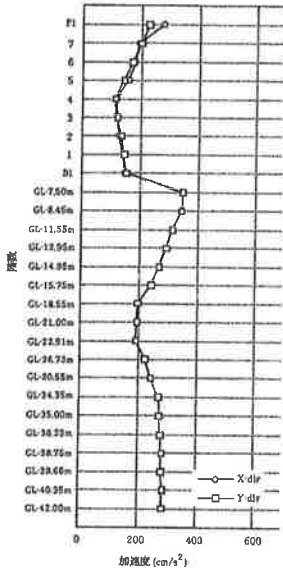


図-22 最大応答加速度分布 図-23 最大応答変位分布

さい。免震層の最大応答変位は33.7cmで性能保証変形50cmを下回っている。免震装置の面圧は33.3～123.3kgf/cm²である。以上よりクライテリアは満足されている。

6. まとめ

軟弱地盤で液状化が発生する地盤においても免震効果を達成できたが、地盤は非常に不確実な要因が多いのでクライテリアの設定においては余裕をもたせる事が必要だった。また性能変動要因の影響の大きさを強く感じたのでより一層高性能の安定した免震装置の改良・開発が待たれる。建物を安全に作り上げようとする時、各部の詳細の重要性を再認識した。

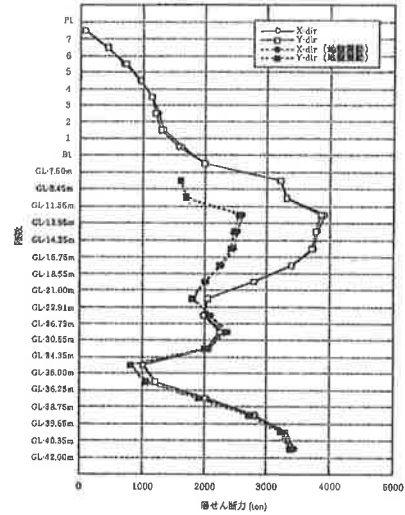


図-24 最大応答層せん断力分布

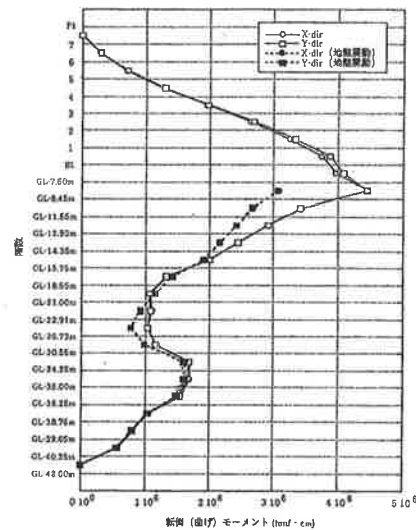


図-25 最大応答転倒(曲げ)モーメント分布
(上部構造：最大応答転倒モーメント)
(下部構造：最大応答曲げモーメント)

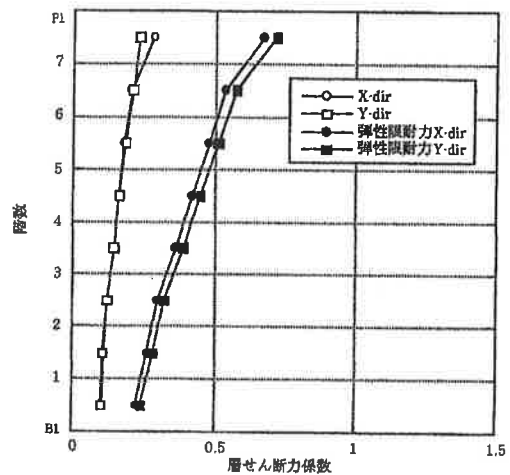


図-26 最大応答層せん断力分布

<建築概要>

建物名称：KORC東扇島流通センター

所在地：神奈川県川崎市川崎区東扇島26-5

建築主：小林運送株式会社

設計者：一級建築士事務所(株)ヒグチアソシエイツ

施工者：清水建設(株)

施工期間：1997年12月～1999年2月

敷地面積：5,000m²

建築面積：1,978.05m²

延べ床面積：15,229.98m²

構造・階数：S造(一部SRC造)地下1階地上7階

基礎形式：場所打ちコンクリート杭

(アースドリル拡底工法) 杭頭鋼管巻き

軒 高：38.30m



写真 建物全景

参考文献

- 1) 社本、時末、有泉(1992)：一次元有効応力解析の实地盤に対する適用性、日本建築学会構造系論文報告集 第433号・1992年3月、pp113-119
- 2) 今津、福武(1986)：砂礫材料の動的変形特性、第21回土質工学研究発表会、pp509-512
- 3) 清水、社本、中村、西川、陶野(1989)：既存地震における液状化噴砂地点の調査および解析事例 第24回土質工学研究発表会、pp975-978
- 4) 佐藤、社本(1989)：砂地盤の液状化に関する遠心模型実験の解析、第24回土質工学研究発表会、pp985-986
- 5) 社本、佐藤(1989)：模型砂地盤の液状実験と数値解析によるシミュレーション、第24回土質工学研究発表会、pp999-1000
- 6) 長谷川正幸：点加振3次元薄層法による群杭基礎の解析、第7回日本地震工学シンポジウム pp979-894.1986
- 7) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、1996
- 8) 岩崎敏男、龍岡文夫、高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ)、土木研究報告、第153号、1980
- 9) 岩崎敏男、常田賢一、吉田精一、龍岡文夫：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会発表講演集、pp625-628、1980