

ロージュ道後

フジタ 福島泰之



同 吉田 聡



シャトー企画設計事務所 酒井 猛



1. はじめに

本建物は愛媛県松山市に建設中の地上15階、塔屋1階の共同住宅である(図-1)。免震部材は1階と基礎の間に設置している。

建築主の危機管理に対する関心の高さや安全性向上の要求などにより、免震構法を採用している。

本建物は塔状比が張間方向で4.4と大きいものの、構造計画上の工夫により免震部材に生じる引抜きを抑制している。ここでは主に免震部材に生じる引抜きを抑制するための構造計画とその検証について述べる。

階数：地上15階、塔屋1階

軒高：42.24m

最高高さ：51.24m

構造：上部 鉄筋コンクリート造
免震部材 鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム

基礎 現場造成杭



図-1 建物外観パース

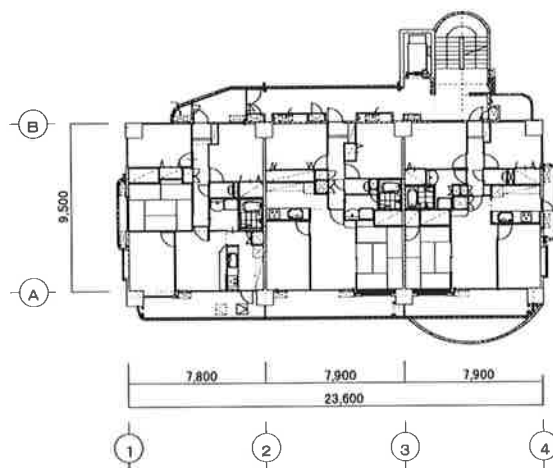


図-2 基準階平面図

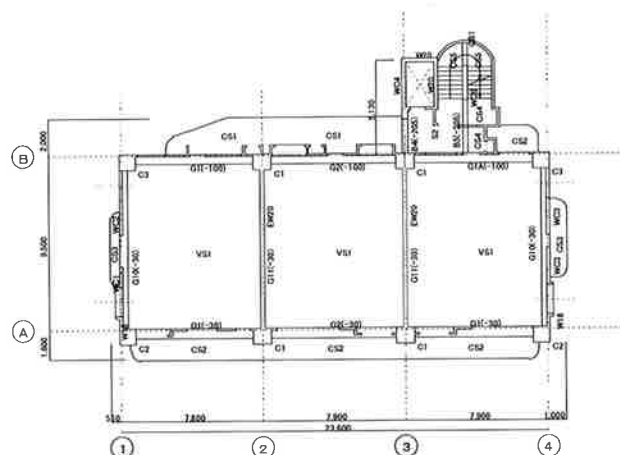


図-3 基準階伏図

2. 建物概要

建築主：日本勤労者住宅協会

建設地：愛媛県松山市石手3丁目甲496-1

用途：共同住宅

敷地面積：1703.05m²

建築面積：302.59m²

延床面積：3608.82m²

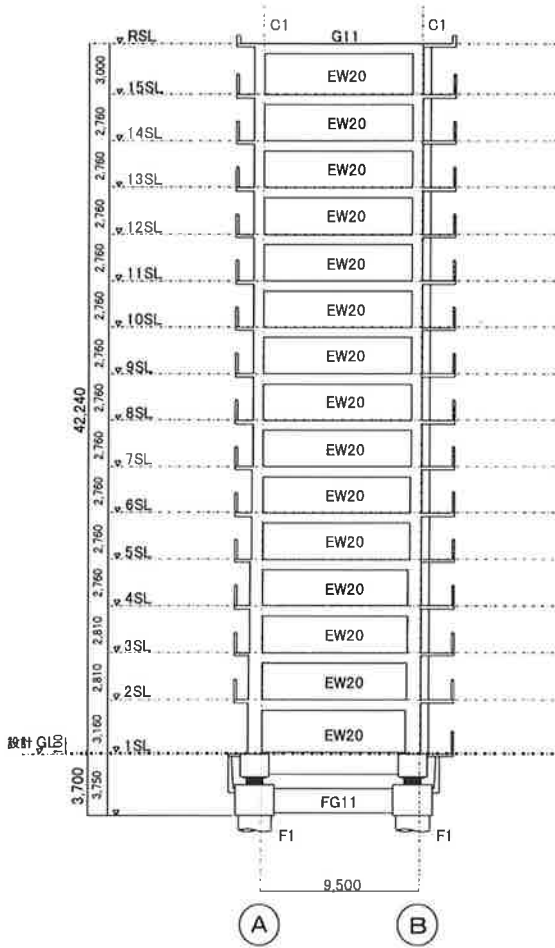


図-4 張間方向軸組図

3. 構造計画概要

3.1 上部構造

本建物は桁行 (X) 方向23.6m、張間 (Y) 方向9.5mに対し、高さが42.24mである (図-2に基準階平面図、図-3に基準階伏図、図-4に張間方向軸組図を示す)。X方向は純ラーメン構造、Y方向は耐震壁付きラーメン構造である。Y方向では塔状比が4.4と大きいため、設計当初より免震部材に生じる引抜きが懸念された。

上部構造の計画に際しては、免震部材に生じる引抜きを抑制するために、局所的に地震力が増大するような架構を避け、極力偏心のない形状とし、また「自重とバランスした地震力負担」をするフレームとすることに主眼をおいている。

具体的には、図-5に示すように、妻面となる1、4通りに壁柱を設け、妻フレームの剛性を高めることで、無開口耐震壁となる中フレームの地震力負担を減らしている。これにより妻フレームと中フレームのフレーム自重比が約1:1.7となるのに対し、静的な応力解析における地震力負担比は約1:2となり、各フレームは自重にバランスした地震力負担が実現できている。

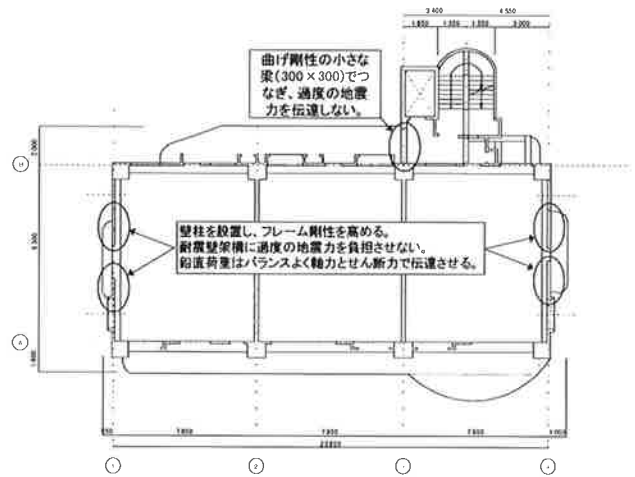


図-5 上部構造計画

また3通りのエレベータとのつなぎ梁の曲げ剛性を小さくし、自重の少ないエレベータ部が過度に地震力を負担しないような構造としている。静的な応力解析においては、ベースシア係数0.15、荷重分布形をAi分布とした場合においても、各免震部材に引抜きが生じない架構となった。

3.2 免震部材

図-6に免震部材配置図を示す。使用した免震部材は $G=4\text{kg/cm}^2$ の鉛プラグ入り積層ゴム (750~1000φ) で、偏心調整とエレベータ部の地震力負担を軽減するため、エレベータ下に天然ゴム系積層ゴムを配置している。

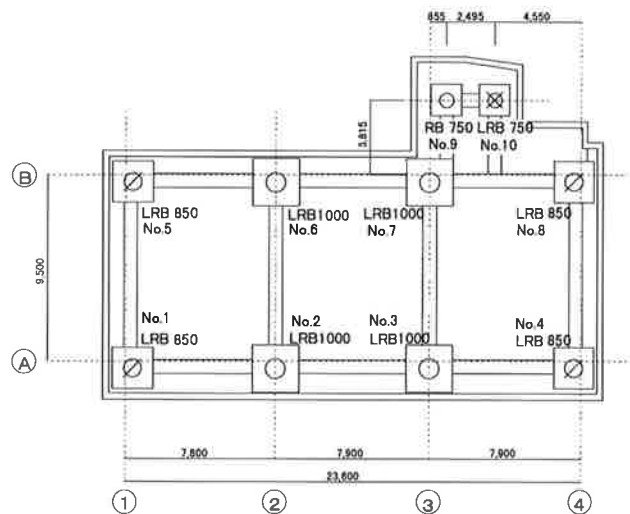


図-6 免震部材配置図

免震層を長周期化し、上部構造に伝わる地震力を極力低減するために、配置計画にあたっては面圧を平均100kg/cm²程度、積層ゴムによる固有周期4秒、鉛プラ

グによる降伏せん断力を $0.04W$ (W :建物重量)となるように計画した。

免震部材の変形能力は、最も径の小さい 750ϕ により設定し、地震時応答軸力を勘案して終局限界変形を 55cm 、性能保証変形を 40cm 、安定変形を 30cm とした。

鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデルについては、従来修正バイリニアモデルが使われている。しかし修正バイリニアモデルでは、以前より、大変形を経験後の小振幅時の繰り返しの履歴減衰が表現されていない、除荷時の履歴形状が実験結果を適切に捉えていない等の指摘を受けている。

特に除荷時の履歴形状については、上部建物の地震応答解析結果に影響を与えると考えられるため、本建物では、修正バイリニアモデルを改良した新しい復元力モデル(以後修正BROモデルと呼ぶ)を用いて解析を行っている。

図-7に修正BROモデルと実基LRBの実験結果の履歴ループを重ね書きして示す。修正BROモデルは実験結果とよく整合している。

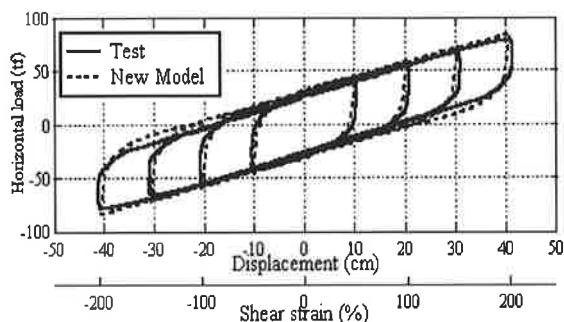


図-7 修正BROモデルと実験結果の比較

3.3 基礎構造

本敷地地盤は、設計GLより -9m 付近までが砂層 ($V_s=200\sim 300\text{m/sec}$)、それ以深が基盤岩である砂岩 ($V_s=1500\text{m/sec}$ 以上)であり、常時微動測定結果およびPS検層結果による地盤周期が 0.12 秒となる第1種地盤である。

基礎形式は設計GL -9m 以深の砂岩を支持層とする現場造成杭(ベント工法)とした。杭径は 2000ϕ 、 1700ϕ および 1200ϕ である。

4. 地震応答解析概要

4.1 設計目標

地震応答解析における上部構造、免震部材の設計目標値を表-1に示す。

表-1 設計目標値

入力レベル	設計目標	
	上部構造	免震部材
レベル1	<ul style="list-style-type: none"> ●短期許容応力度低下 ●耐震壁はコンクリートの短期許容せん断応力度以下 	<ul style="list-style-type: none"> ●最大せん断歪：100%以下
レベル2	<ul style="list-style-type: none"> ●弾性限耐力以下 ●耐震壁のせん断応力度は$0.05F_c$以下 	<ul style="list-style-type: none"> ●最大せん断歪：150%以下 (安定変形以下) ●引張力：生じない ●最大局部歪の極限歪に対する安全率：1.5以上
余裕度検討レベル	<ul style="list-style-type: none"> ●終局耐力以下 ●耐震性のせん断応力度は$0.10F_c$以下 	<ul style="list-style-type: none"> ●最大せん断歪：200%以下 (性能保証変形以下) ●引張力：引張応力度5kgf/cm^2以下 ●最大局部歪の極限歪に対する安全率：1.0以上

4.2 解析モデル

解析モデルはスウェイ・ロッキングを考慮した等価せん断型の質点系モデルと、各柱・梁・壁・免震部材を部材レベルでモデル化した立体モデルの2つのモデルとした。なお両モデルについて、固有値解析結果および地震応答解析による最大応答値がほぼ一致することを確認している。

(a) 質点系モデル

質点系モデルでは上部構造および免震部材の水平変形に対する検討を行う。

上部構造の復元力特性は、静的弾塑性解析により求めた荷重-変位関係をトリリニアにモデル化し、履歴法則は剛性低下型(武田モデル)とした。免震部材は修正BROモデルでモデル化している。

減衰は歪エネルギー比例型とし、上部構造に3%、免震層のスウェイに0%、ロッキングに1%とする。

(b) 立体モデル

立体モデルでは上下動を考慮した免震部材の支持能力を検討する。

上部構造は、各部材についてひび割れ発生による1次剛性低下と、鉄筋降伏による2次剛性低下を考慮したトリリニアのスケルトンを与え、履歴法則は剛性低下型(武田モデル)とした。免震部材はせん断ばねと鉛直ばねにより表現し、せん断ばねでは鉛プラグ入り積層ゴムに修正BROモデル、天然ゴム系積層ゴムに線形モデル、鉛直ばねでは鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴムとも線形モデルの履歴法則とした。また各せん断ばねは、Multi Shear Springとしている。

減衰は剛性比例型とし、上部建物振動が卓越する4次モードに対して3%としている。

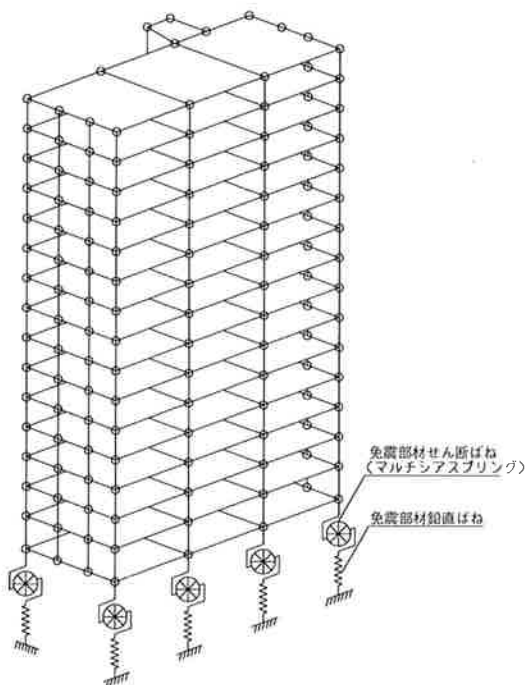


図-8 立体モデル

4. 3 検討用地震動

検討用地震動は、以下に示す既往の観測記録波4波と模擬地震動3波とした。

EL CENTRO NS

TAFT EW

HACHINOHE NS,EW

ARTDGO1A：1686年安芸灘地震対象(点震源モデル)
($A_{max}=738.4\text{cm/s}^2, V_{max}=37.0\text{cm/s}$)

ARTDGO2A：中央構造線対象(面震源モデル)
($A_{max}=771.7\text{cm/s}^2, V_{max}=39.3\text{cm/s}$)

ARTDGO3A：1946年南海地震対象(面震源モデル)
($A_{max}=252.5\text{cm/s}^2, V_{max}=17.2\text{cm/s}$)

地震動の入力レベルは、建設地周辺の地震環境や地理的条件などを考慮し、記録波についてはレベル1で22.5cm/sec、レベル2で45cm/sec、余裕度検討レベルとして65cm/secとした。また模擬地震動に関しては、ARTDGO1AおよびARTDGO3Aをレベル2、ARTDGO2Aを余裕度検討レベルとした。

4. 4 質点系応答解析結果

等価せん断型の質点系モデルでは上部構造および免震部材の水平変形が設計目標値以下となっていることを確認した。参考としてレベル2地震時の最大応答値を図-9、図-10に示す。

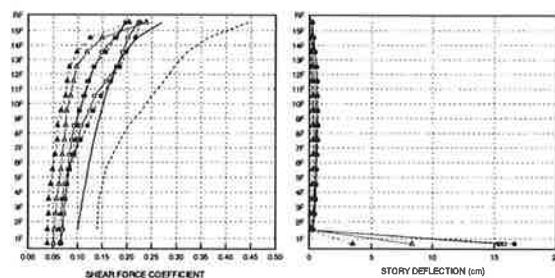


図-9 最大応答値(X方向 レベル2)

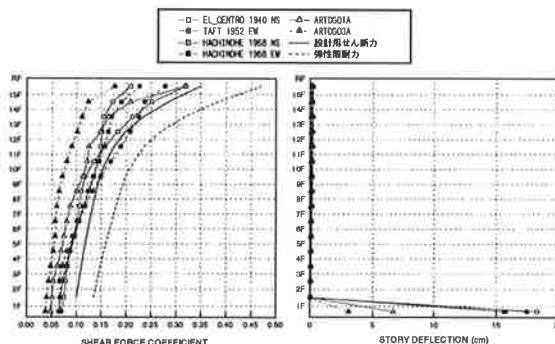


図-10 最大応答値(Y方向 レベル2)

4. 5 立体モデルによる免震部材の支持能力の検討

立体モデルによる解析では以下の2つの検討を行う。

- Y方向架構の剛性のバランスの確認
 - 積層ゴムの局部歪および引抜きに対する検討
- 以下の(a)、(b)に上のそれぞれについて示す。

(a) Y方向への水平1方向入力による架構特性の確認

塔状比の大きいY方向に対する水平1方向入力を行い、構造計画上意図した架構特性となっていることを確認する。

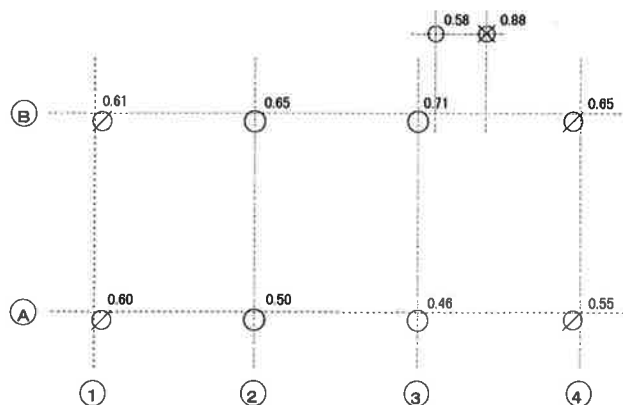


図-11 各免震部材の上下動に対する許容震度
(許容震度=地震時応答軸力/長期軸力)

図-11に各免震部材の上下動に対する許容震度を示す。上下動に対する余裕率は、地震時の応答軸力の最小値を長期荷重時軸力で除したのものと定義している。図の結果は検討用地震動のうち、最も厳しい結果となったTAFT EWに対するものである。

図より各値はおおむね0.5~0.6となっており、局所的に小さな値となっている所はない。構造計画上意図した「自重とバランスした地震力負担」ができていことが分かる。

(b) 水平2方向+上下方向同時入力による免震部材の支持能力の検討

免震部材の支持能力の検討を行うために水平2方向+上下方向同時入力による地震応答解析を行う。各免震部材の変動軸力に対し、引張側は引抜きの有無を、圧縮側は局部歪の検討を行う。局部歪 ϵ は、水平変形による平均せん断歪 γ と、鉛直軸力によるせん断歪 ϵ_V の和で表され、次式に示すように極限歪 ϵ_u に対する安全率 f が設計目標値以上であることを確認する。極限歪 ϵ_u は500%としている。

$$\epsilon = \gamma + \epsilon_V \leq \frac{\epsilon_u}{f}$$

検討用地震動は、EL CENTRO、HACHINOHEの2波とし、水平動のベクトル最大値を45cm/sec、65cm/secに基準化する。上下動の振幅比率は水平動と同じとする。

以下の表-2、表-3に支持能力の検討結果を抜粋して示す。表中の部材位置は、図-6の免震部材配置図による。

いずれの免震部材にも引抜き力は発生しておらず、また局部歪の極限歪に対する安全率も1以上である。

本建物の引抜きに対する限界特性を把握するために、水平動の最大速度値を変えた引抜きの検討を行った。入力最大速度値は75cm/sec、85cm/secとし、検討用地震動は上と同じである。

検討を行った結果、EL CENTRO波において、最大速度85cm/secとした時にA通りと4通りの交点位置(部材位置No.4)の免震部材に面圧で2.3kg/cm²の引抜きが生じた。図-12に85cm/sec入力した場合のA-4免震部材の時刻歴軸力図を、図-13に入力最大速度値に対するA-4免震部材の最小軸力値をプロットした図を示す。

表-2 引抜きの検討結果 (EL CENTRO)

部材位置	部材径	時刻	長期荷重時軸力 (tf)	地震時応答軸力 (tf)	鉛直軸力 (tf)	面圧 (kgf/cm ²)
1	850	2.06	548	-293	255	44.9
2	1000	2.21	844	-440	404	51.4
3	1000	2.21	847	-439	408	51.9
4	850	3.86	566	-485	81	14.3
5	850	2.36	512	-408	104	18.3
6	1000	2.36	968	-431	537	68.3
7	1000	3.71	994	-411	583	74.2
8	850	4.11	562	-265	297	52.3
9	750	2.31	285	-168	117	26.4
10	750	3.96	272	-71	201	45.5

表-3 局部歪の検討結果 (EL CENTRO)

部材位置	部材径	時刻	長期荷重時軸力 (tf)	地震時応答軸力 (tf)	鉛直軸力 (tf)	最大局部歪時水平変形 (cm)	最大局部歪 (%)	安全率
1	850	3.91	548	321	869	33.9	340	1.47
2	1000	3.91	844	478	1322	34.6	340	1.47
3	1000	3.91	847	577	1424	35.1	357	1.40
4	850	3.91	566	496	1062	35.6	397	1.26
5	850	3.91	512	447	959	34.6	365	1.37
6	1000	3.91	968	359	1327	34.9	344	1.46
7	1000	3.91	994	374	1368	35.2	352	1.42
8	850	3.91	562	103	665	35.9	317	1.58
9	750	3.91	285	150	435	35.7	329	1.52
10	750	3.91	272	53	325	35.7	291	1.72

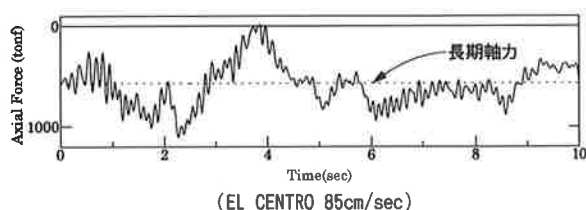


図-12 A-4 免震部材の時刻歴軸力図

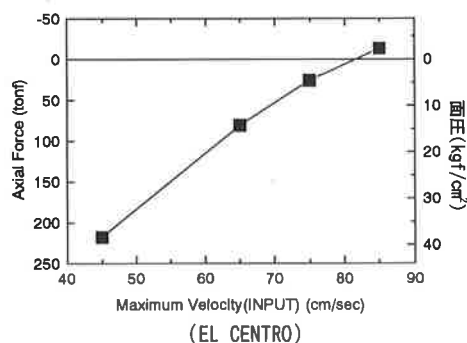


図-13 A-4 免震部材の応答最小軸力

5. おわりに

本建物のような塔状比が大きい建物に対する免震構造の適用例として、一般的な免震部材を使いながら、フレーム剛性のバランスと、免震層の長周期化により引抜きを抑制できた事例を紹介した。

今後免震構造の適用範囲を拡大していくなかで、本建物の事例が参考となれば幸いである。