

免震構造

高山 峯夫・福岡大学

1. 免震構造の概要

1.1 免震建物の特徴

現行の耐震設計法では、比較的頻繁におこる中小地震時(レベル1という)には建物はほとんど被害を生じないこと、極めて稀に起こる大地震時(レベル2という)には構造物の崩壊によって人命が失われないことを前提に、大地震時に部材レベルでの降伏、即ち部分的に建物が壊れることを許容している。図1に示すように従来の耐震構造は構造体に強さと粘り(変形能力)を持たせ、地震力に対して踏ん張って耐えるように造られており、上層ほど大きな地震力を受ける。これに対して免震構造とは建物基礎から上の階全体(上部構造)、あるいは建物中間層以上の階全体を免震部材の上ののせて(免震部材を設置した階を「免震層」と呼ぶ)、免震層のみを大きく変形させることで地震力による水平方向の激しい動きを抑え、建物全体をゆっくり揺れるようにした構造システムである。図2には免震構造とした時の時刻歴応答解析(地震動に対する建物の応答を時々刻々と数値計算する解析手法)による加速度応答波形を非免震建物の結果と比較して示す。入力地震動にはEL CENTRO(NS)波という観測波形を用いた。非免震建物の応答が入力波に比べ大きく増幅しているのに対し、免震構造の応答は大きく低減され、長周期で揺れている。

免震部材は建物の重量を支えながら水平方向に対して地震動を吸収するアイソレータ(Isolator)と、大きな変形を抑え振動を減らすダンパー(Damper)からなる。地震エネルギーの吸収方法からは、在来構造が建物全体でエネルギーを消費しなければならないのに対し、免震構造では免震層でほとんど全てのエネルギーを消費する。この様に免震構造は、地震時の変形を免震層に集中させることで、上部構造の層間変形や応答加速度を小さくできる非常に明快な構造システムであるといえる。在来構造との比較において免震建物に期待できる効果を以下に示す。

構造躯体の地震時安全性の向上

収容物の振動・移動・転倒防止(2次被害の防止)

安心感・居住性の向上

設計自由度の拡大

非構造部材の破損防止

コンピュータ機器等の機能性保持

このように免震構造は住宅をはじめ、災害時の防災拠点となる学校・放送施設や病院、収容物の価値が高い美術館・博物館・コンピュータセンター、及び歴史的価値の高い建物への耐震改修などに積極的に適用されることが望まれる。

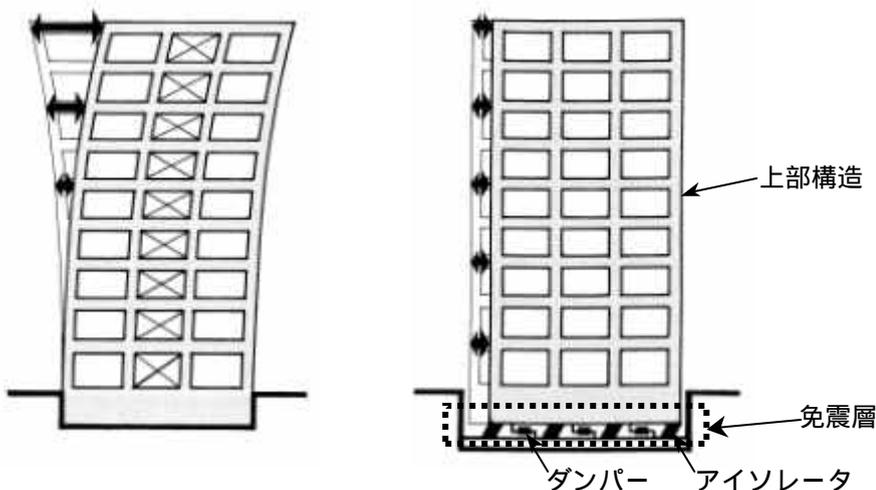


図1 耐震構造(左)と免震構造(右)の揺れ方⁵⁾

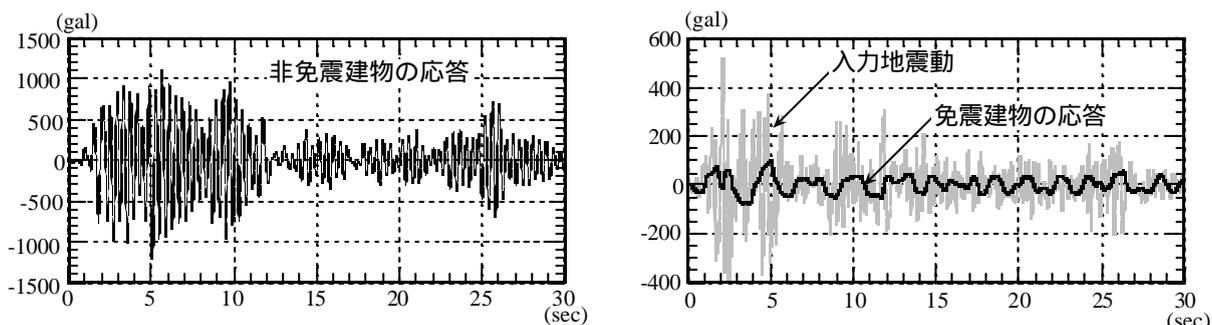


図2 加速度応答波形の比較

1.2 免震構造の歴史²⁾¹⁰⁾

建物を地盤から免震(絶縁)する方法としては古くからいろいろな提案がなされてきている。文献の上で特に免震をうたったものは、1891年の河合浩蔵が提案した「地震ノ際大地震ヲ受ケザル構造」である。これは、振動に対して鋭敏な機器を収納する建築物の構造について述べたものである。また、海外では1909年のイギリス人医師J. A. Calantarientsによる特許が最も古い。彼の特許は、構造体を滑石(雲母)の層を介して基礎から隔離するというものであった。関東大震災の翌年(1924年)には山下興家のパネ付き柱や鬼頭健三郎のボールベアリング装置等が提案されている。また、1928(昭和3)年以降、岡隆一は免震基礎(両端ピンの免震柱)を提案し、幾つかの建物に適用している。その後、昭和初年から約10年間にわたる、いわゆる柔剛論争(柔構造推進派と剛構造推進派との論争)があり、結果的には耐震工学の未成熟もあり、剛構造思想による設計法が法律に裏打ちされて主流となる。

振動理論と耐震設計が結びつき始めるのは、1960年代からである。1964年の高さ制限撤廃告示、動的解析手法の普及に伴う1981年新耐震設計法の施行により、一応の体系化が終了した。1970年代には、コンピュータや構造解析手法の発達により、地震時の建物挙動をある程度推定することができるようになった。かくして、日本にも超高層建築の時代が到来した。

免震構造を成立させる為に必要なアイソレータ(積層ゴム部材)の開発が、日本では1980年代から始まった。積層ゴムの開発と超高層建築で養った解析技術により、免震建築の性能が認められ、現在では免震建築普及の時代に入っている。

1.3 アイソレータ

アイソレータは建物を支持し、地震時には柔らかく水平方向に大きく変形できることが必要である。現在、アイソレータには写真1に示すような積層ゴムが多く用いられている。積層ゴムは、円形の薄い鋼板(中間鋼板と呼ぶ)と薄いゴムシートを交互に積層した構造となっている。積層ゴムに圧縮荷重が作用する場合、ゴムシートが横方向へはらみ出そうとするのを中間鋼板が拘束するため、圧縮変形量は非常に小さく、硬い特性を示す。水平変形時には、中間鋼板がゴムシートのせん断変形を拘束しないため、水平剛性はゴム自身の柔らかさとなる。この様なメカニズムにより積層ゴムは巨大な建物荷重を支えた状態で、水平方向に柔らかく変形することが可能となる(写真2参照)。

積層ゴムを用いた免震システムとしては、天然ゴム系積層ゴムと各種のダンパーを組み合わせたシステム(機能分離型)、及び高減衰型積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムのようにアイソレータとダンパーの機能を一体化したシステム(機能一体型)に分けることができる。

天然ゴム系積層ゴムは、引張強さや伸び、耐クリープ性(クリープとは一定荷重の下で時間とともにひずみが増大する現象)に優れ、温度変化による物性変化の少ない天然ゴムを主体とした積層ゴムであり、復元力特性(構造物または材料の荷重と変形の関係、履歴特性とも言われる)は線形弾性である。一方、鉛プラグ入り積層ゴムは、積層ゴム中心の孔に挿入した鉛棒(積層ゴム外径の1/5~1/7程度)の塑性変形を利用し、高減衰型積層ゴムは特殊配合のゴム材料によりゴム分子間の摩擦や粘性を高くすることでエネルギーを吸収している。当然ながら、これらの復元力特性は弾塑性的な挙動を示す。積層ゴムの他には、テフロンとステンレス板とのすべりと摩擦を利用したアイソレータも用いられる。ここで、「弾性」とは外力によって形や体積に変化を生じた物体が力を取り去ると再びもとの状態に回復する性質、「塑性」は外力を取り去ってもひずみが残る、変形する現象であり、「弾塑性」とは弾性と塑性の両方の性質を併せ持っている状態をいう。

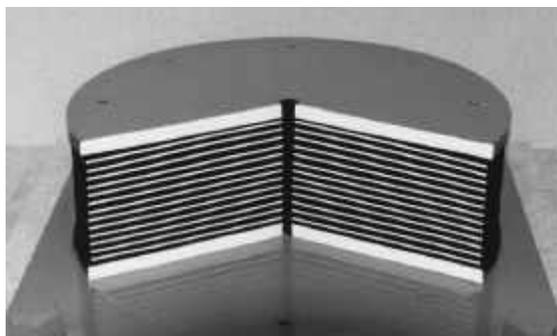


写真1 積層ゴムアイソレータの断面
(白い部分が鋼板、黒い部分がゴム層)



写真2 積層ゴムの水平変形状態
(積層ゴム直径50cm, 圧縮力600ton, 水平変形40cm)

1.4 ダンパー

ダンパーには多くの種類が提案、実用化されているが、主に鋼材や鉛などの塑性履歴を利用する弾塑性型(写真3, 4参照)が主流である。その他に、摩擦によるエネルギー吸収を利用する摩擦型や粘(弾)性材料の粘

性抵抗を利用する粘性型などもある。ダンパーには建物荷重の支持能力は基本的に求められていない。最終的にダンパーは、地震により建物に投入されたエネルギーを全て吸収しなければならない。また、免震層の最大変形を所定の限度内に収めるために必要な減衰能力と変形能力が要求される。

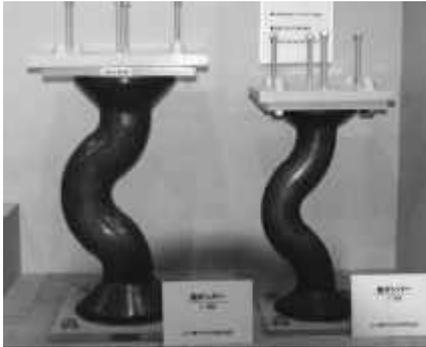


写真 3 鉛ダンパー

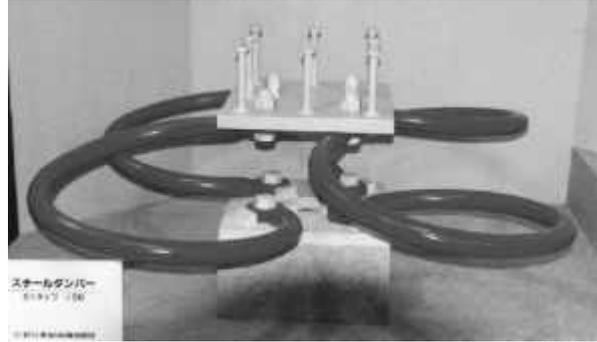


写真 4 スチールダンパー

2. 免震建物の現状

現在、免震構法で建物を建設する場合、建築基準法第38条による大臣認定が必要である。大臣認定を受けようとする場合、事前に(財)日本建築センターの免震構造評定を受けることになっている(建築基準法の改正により今後はより簡単な手続きで建設できる可能性もある)。平成10(1998)年までの免震構造評定件数は、514件(567棟)である。一つの評定で複数棟の建物が評定を受けることがあるため、建物棟数は評定件数よりも多くなっている。免震建物の内容は、同センター発行の「ビルディングレター」に掲載されている性能評定シートから読みとることができる。公表されている性能シートは平成9(1997)年12月現在で526棟分である。

我が国で最初の積層ゴムを使った免震建物は八千代台免震住宅(千葉県八千代市)である。本建物は、RC造2階建てで昭和57(1982)年に評定を完了し、翌58年に竣工した。その後の約10年間の免震構造の建設は90棟程度であった。この間の建設はゼネコン各社の研究開発的な目的での自社の寮や研究所が多く見られた。

平成7(1995)年の評定件数はそれまでの全評定件数に匹敵する程に急増した。さらに平成8(1996)年は前年の3倍以上となる227棟が設計されている。この急激な増加は1994年1月17日のノースリッジ地震やその1年後の兵庫県南部地震が契機となったことは想像に難くない。いずれの地震においても免震構造を採用した建物において地震観測記録が得られ、免震構造の効果が実証されたためと考えられる。しかし、翌年の平成9(1997)年は140棟程度と免震建物の数は減っている。これは平成8年の免震建物数で大部分を占めていた免震マンションの建設が半減したことが原因である。

建設地域別では、東京の130棟以上を先頭に、神奈川、千葉、埼玉、静岡などの関東エリア、兵庫、大阪の関西地区が続く。これらの地域にはそれぞれ30棟以上の免震建物が建設されている。用途別で見れば、平成7年以降はマンションなどの共同住宅が50~60%を占めているものの、平成6年以前には見られなかった病院などへの免震構造の採用が増加してきている。これは、災害時の防災拠点としての機能性維持を目標とした設計が行われるようになってきた結果であろう。

3. 免震建物の設計¹⁾²⁾³⁾

免震建物の地震時性能は免震層(免震部材)の設計に大きく依存している。アイソレータの水平剛性を小さくすればするほど、免震建物の周期が長くなり建物への地震入力も低減され、応答加速度(あるいは層せん断力)は非常に小さくなる。逆に、免震層の応答水平変形は増加する傾向にある。この様に応答加速度と応答変位は相反する性質を示す。しかし、ダンパーの特性(減衰量)を適切に付与することで、応答加速度を低減し、かつ応答変位も適切な範囲内に納めることが可能となる。

積層ゴムアイソレータは基本的に建物の柱下に1体設置する。積層ゴムのサイズは支持荷重の大きさと必要な変形能力に基づいて決定される。免震層の変形能力は最小径の積層ゴムで決定されるため、サイズに大きな差異が生じないように、建物の柱配置(柱軸力)などにも配慮した構造計画が重要である。

ダンパーは免震層の応答変位をコントロールし、振動を早期に収束させるために必要である。ダンパーの総量は時刻歴応答解析結果などを参考に決定される。建物の捩れ変形を抑制するために、建物の重心(地震力の作用中心)と免震層の剛心(抵抗力の中心)をできるだけ一致するようにダンパーを配置することが有効である。

免震建物の建築計画では、建物周辺に免震層の応答変位に対応した敷地の余裕が必要となること、建物への出入り口や可動部分のディテール、及び免震層上下階への移動方法などへの配慮が欠かせない。設備計画上は、ガス・電気・水道などの配管類が免震層の変形に追従できるディテールとする必要がある。また、免

震層を駐車場などとして有効利用する場合には免震部材の防火対策が必要となる。

免震構造では上部構造は強度設計とする。即ち、静的に作用する水平力に対して上部構造は強度的に耐えればよく、従来の耐震設計で要求されるエネルギー吸収能力(靱性)確保のための制約条件からは解放される。上部構造の設計用せん断力係数は時刻歴応答解析結果などを参考にして決める。在来建物は耐震設計されることにより、地震荷重以外の荷重に対して余剰の耐荷力が付与されることになるが、免震構造では地震荷重以外の荷重が設計を支配することになる。この意味で免震建物においては地震荷重以外の荷重に対する設計にはより慎重でなければならない。

4.九州の免震建物

4.1 免震建物一覧

平成10(1998)年2月までの九州内の免震構造建物の評定一覧を表1に示す。これによれば、九州内で全16棟(評定12件)が設計されており、長崎と沖縄を除く各県に1つ以上の免震建物があることになる。ただし、評定が終了しても、実際には未着工の物件もある。建物の用途としては集合住宅・ホテル・事務所が殆どを占めているが、宮崎の免震建物は病院である。これらの建物の中から、4.2節では野多目集合住宅(A1西棟)を取り上げ、免震設計について詳しく述べる。

表1 九州内の免震建物の一覧(1998年2月現在)

建設地	評定番号	建物名	評定完了年	用途	延床面積(m ²)	地上階数	構造
福岡	131	(仮称)東亜建設工業九州支店 吉塚寮	1996	寄宿舍	1168.62	4	RC
	187	野多目集合住宅第1期(A1西棟)	1996	共同住宅	6972.90	14	RC
		野多目集合住宅第1期(A1東棟)			7059.60	14	RC
		野多目集合住宅第1期(A2棟)			5384.20	12	RC
		野多目集合住宅第1期(A3棟)			4038.20	6	RC
	207	(仮称)八幡マンション	1997	共同住宅	4529.55	14	RC
	228	建設技術研究所福岡支社ビル	1997	事務所	4519.15	7	RC
	341	(仮称)大濠公園ビル	1996	事務所	5856.14	9	SRC
416	福岡県庁衛星通信局舎	1997	通信施設	124.00	2	RC	
佐賀	218	佐賀パークホテル	1996	ホテル	2876.16	12	RC
熊本	260	(仮称)パークマンション水前寺公園(A棟)	1997	共同住宅	6650.93	14	RC
		(仮称)パークマンション水前寺公園(B棟)			4610.67	11	RC
大分	430	(仮称)鈴木ビル	1997	共同住宅	4344.00	9	RC
宮崎	266	池井病院	1997	病院	5499.56	5	RC
鹿児島	502	(仮称)鹿児島純心女子大学大講義室棟	1998	学校	4181.00	4	RC
	508	(仮称)鹿児島(山之口本通り)SGホテル	1998	ホテル	4800.00	13	RC

4.2 野多目集合住宅における免震設計³⁾⁴⁾

(a) 建物概要

建物名称：野多目台集合住宅第1期新築工事

所在地：福岡市南区野多目台3丁目204-2他

設計監理：東急建設株式会社一級建築士事務所

敷地面積：14,343.89m²

建築面積：A1西棟：1,361.05m²、A1東棟：749.34m²

A2棟：646.11m²、A3棟：892.38m²

構造種別：鉄筋コンクリート造

基礎：場所打ちコンクリート杭

構造形式：桁行方向はラーメン構造、張間方向はラーメン構造+独立連層耐力壁構造

免震部材：

A1西棟：天然ゴム系積層ゴム(41体)+鉛ダンパー(10体)+スチールダンパー(10体)

A1東棟：鉛プラグ入り積層ゴム(24体)

A2棟：鉛プラグ入り積層ゴム(22体)

A3棟：高減衰型積層ゴム(27体)

(b) A1西棟の概要

写真5にA1西棟・東棟の外観写真を、図3にA1西棟の基準階床伏図及び軸組図を示す。A1西棟は地上14階建、地下1階、塔屋1階、軒高39.97m、建物重量11,913tである。A1西棟の用途は2階以上を住宅とし、1階を店舗、地下1階を駐車場としている。基準階の平面は、長辺方向が28.7m、短辺方向が16.3mとなっている。地下階および1階は、基準階に対し3方向に平面的な広がりを呈し、長辺方向が50.2m、短辺方向が33.7mとなっている。このような建物形状ゆえ柱軸力も高層部と低層部との差が大きく、捩れ振動を起こしやすい構造となっている。そのため捩れの影響を考慮した応答解析を実施したが、水平変位の並進成分に対する捩れ変位の比率は1.01～1.07の範囲にあり、ねじれ振動の与える影響が少ないことを確認している。免震部材は、1階床梁と地下1階柱頭部の間に配置している(写真6参照)。図4には免震部材の配置図を示す。

(c) 地盤概要

福岡市周辺は、古生代の変成岩類や中生代白亜紀の花崗岩類、及びこれを覆う古第三期の堆積岩類などからなっている。このうち、当該敷地周辺は南方の背振山地を形成する花崗岩類からなっている。本計画地の地層構成は地表から2m程度が埋土であり、深度GL-2～8mにまさ土系の粘性土層と砂質土層が交互に堆積し、N値50以上の風化花崗岩がそれ以深に分布している。また、風化花崗岩は深度GL-11m以深の位置がS波速度400m/sec以上となっている。基礎は風化花崗岩を支持層とした杭基礎としている。



写真5 A1東棟・西棟の北側外観

鉛ダンパー スチールダンパー 防火カバー (積層ゴム)

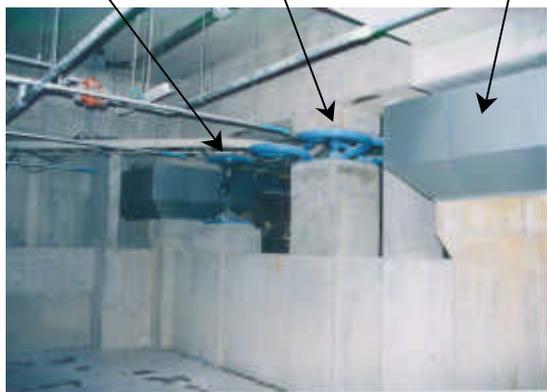


写真6 A1西棟の免震部材と免震ピット (図4中の四角囲みで示した場所を撮影)

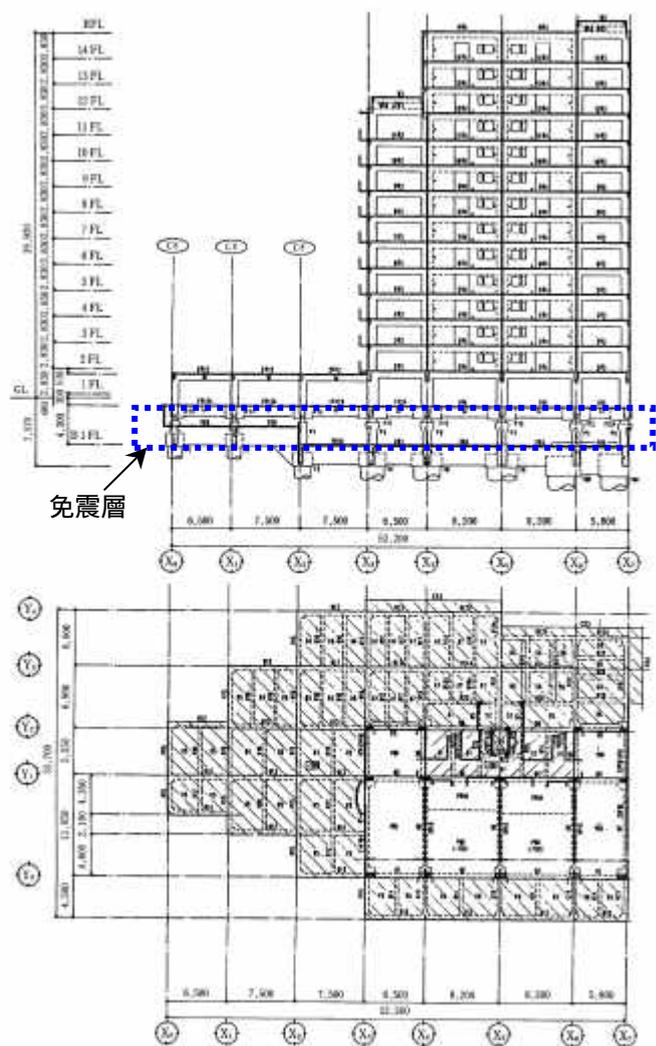


図3 A1西棟 基準階床伏図及び軸組図

(d) 構造設計概要

本建物の構造設計は、表2に示す耐震性能目標を設定し、それを満足する断面を決定するために、予備時刻歴応答解析を行い、設計用層せん断力を決定している。

静的耐震設計では、1次設計として設計用層せん断力による許容応力度設計を行い、骨組を構成する部材が短期許容応力度であることを確認している。2次設計として許容応力度設計された骨組の静的漸増載荷解析を行い、いずれかの層の最大層間変形角が1/100に達したとき、または積層ゴムに10kg/cm²の引張面圧が作

積層ゴムの位置と直径

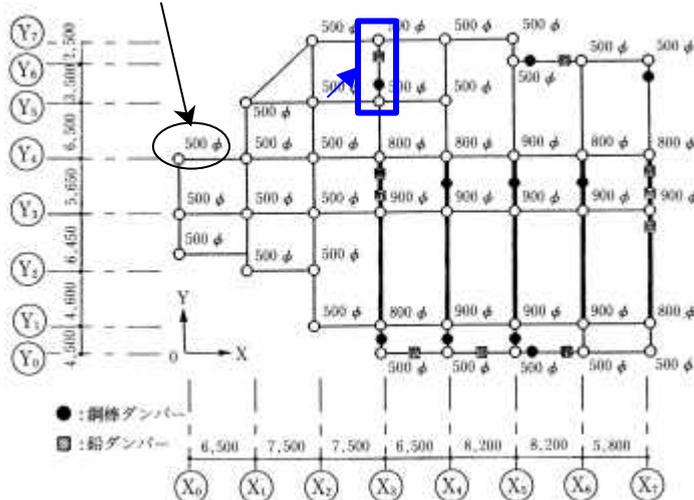


図 4 A1 西棟 免震部材の配置図

用した時の強度を算定し、保有水平耐力と定義している。

動的解析では、地震動の強さをレベル1、レベル2、及び安全余裕度検討用とした時刻歴応答解析を行い、表2に示す耐震性能目標に基づき上部構造及び免震部材の評価・判定を行っている。ここで、入力地震動のレベルは建設地の特性を考慮し、レベル1地震動としては最大速度を22.5cm/s、レベル2地震動として45.0cm/s、安全余裕度検討用として67.5cm/sを用いている。入力地震動波形には、EL CENTRO(NS)、TAFT(EW)、八戸(NS)等の観測記録波形の他に建設地の地盤構造を反映した人工地震波も採用している。なお、EL CENTRO波はImperial Valley地震(1940)、TAFT波はKern County地震(1952)、八戸波は十勝沖地震(1968)での代表的な記録波形である。

表 2 耐震性能目標

地震動	上部構造	免震部材	基礎構造
レベル 1 22.5cm/s	最大層間変形角 1/300 以下 最大応答加速度 200gal 以下	最大せん断ひずみ 100% 以下	
レベル 2 45.0cm/s	最大層せん断力が弾性限層せん断力以下 最大層間変形角 1/200 以下 最大応答加速度 300gal 以下	最大せん断ひずみ 150% 以下 積層ゴムに引張力を作用させない	杭が短期許容応力度以下、 並びに短期許容支持力度以下
安全余裕度検討用 67.5cm/s	最大層せん断力が保有水平耐力以下	最大せん断ひずみ 300% 以下 積層ゴムに有害な引張力を作用させない	杭が終局強度以下、 並びに極限支持力度以下

せん断ひずみとは積層ゴムの全ゴム層厚に対するせん断変形の比率

5. 今後の展望

免震建物は、阪神大震災以降、適用件数と適用範囲が拡大してきており、徐々に免震設計技術が普及していることが認められる。従来、免震構造は高層建物や軟弱地盤には不向きであると言われていたが、近年では高層建物(60m以上)や軟弱地盤上の建物への免震構造の採用などが行われつつある。これは、免震部材の性能が向上するとともに限界性能の十分な把握がなされてきた結果である。また、東京・上野の国立西洋美術館(ル・コルビジエ設計)などのような既存建築への耐震補強法としても免震構造を利用することも行われている。しかし、免震建物の設計に際しては、在来構造では必要なかった動的応答解析や日本建築センターでの評価を受ける必要があるため、今後多くの設計者(技術者)が日常的に免震設計に取り組めるような環境整備が急務であろう。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993
- 2) 日本免震構造協会編：免震構造入門、オーム社、1995
- 3) 多田英之監修：4秒免震への道、理工図書、1997
- 4) 東急建設(株)：野多目台集合住宅、ビルディングレター、pp26-33、1996.12
- 5) 建築構造システム研究会編：図説テキスト 建築構造、彰国社、1997
- 6) 日本免震構造協会編：免震建築の設計とディテール、ディテール133号別冊、彰国社、1997
- 7) (財)郵政建築研究センター：大地震から既存ビルをいかに救うか 日米免震・制震レトロフィット事例、1996
- 8) R.I.スキナー、W.H.ロビンソン他：免震設計入門、鹿島出版会、1996
- 9) 相沢覚編著：免震構造の設計と施工、理工図書、1997
- 10) 大橋雄二：地震と免震、朝倉書店、1996
- 11) 鹿島都市防災研究会編：制震・免震技術、鹿島出版会、1996