

特別講演Ⅱ

免震構造技術の実際と課題

社団法人 日本免震構造協会専務理事 可児 長英

日本の免震構造の建設棟数は世界で最も多い状況にある。この棟数は 1995 年の阪神・淡路大震災以降、徐々に増加している。免震建物が地震時と地震後に良い免震効果を示したことが主たる理由である。社会が免震構造システムの利点に気づき、建物の構造安全とともに建物の基本性能である人命の保護・財産の保全・建物機能の維持ということを受け入れ始めたことでもある。これらの三つの基本性能は、大地震時にこそ満たされなければならないことである。

この免震構造システムは、これらの基本性能を満たすことを目指した現時点で適切な地震対策法といえよう。どの建物の用途にも、また、新築はもちろんレトロフィットにも用いることができる。

ここでは、現在の免震構造システムの現況と本システムに関するいくつかの課題について紹介する。

1. 日本の免震構造概要

日本は、多くの壊滅的な地震を経験してきた。1995 年の兵庫県南部地震では多くの建物、特に分譲マンションや戸建て住宅が損傷を受け、なかでも病院の倒壊は人々に衝撃を与えた。

そして、その後地震災害を軽減できるテクノロジーとして「免震構造」が構造設計の一つのコンセプトとして登場し、柔軟で多様かつ高い耐震設計法として適用され始めた。

現時点で、900 棟以上の免震マンションと 3,000 戸の免震戸建て住宅が建設されている。また、兵庫県南部地震後、ほとんどの新しい病院は免震構造で設計されている。日本の免震建物と住宅の総数は 5,000 棟以上(表 1)になる。今では、免震構造が建設されていない県は皆無である。しかし、それらの多くは地震がよく起きる関東地域に分布している。

ここ 10 年の間では、顕著な傾向として高層免震マンション(写真 2)が徐々に増加している。高層免震マンションは 120 棟ほど建設されている(表 1)。

表 1 日本の免震構造の概数

| 免震構造の内訳    |              | 概数      | 備考                  |
|------------|--------------|---------|---------------------|
| 免震ビルの総数：   |              | 2,000 棟 |                     |
|            | 分譲マンション：     | 45%     | 1983 年～2007 年まで     |
|            | 高層の分譲マンション：  | 6%      | 2000 年から増加          |
|            | 免震レトロフィット：   | 4%      |                     |
|            | 関東地域の免震構造建物： | 45%     |                     |
|            | アイソレータの数：    | 6,000 台 | 2004 年～2007 年までの年平均 |
|            | ダンパーの数：      | 1,000 台 |                     |
| 戸建免震住宅の総数： |              | 3,000 戸 |                     |

我が国で最も大きい(広い)免震建物は神奈川県相模原市の上九沢団地(300m×120m)である(写真 1)。この団地は、人工の免震ベース上に 21 棟の建物からなる巨大なマンション群として計画・設計されたものである。

また、既存建物に対する耐震改修として、免震構造によるレトロフィットは約 80 棟が実施されたが、その建物の多くは 1950 年以後に竣工したものである。それ以前の年代のものは 15%ほどである。また、レトロフィット中のいわゆる「居ながらにして施工」はおよそ半数の建物で実施されていて事業継続の上からも建築主の評価を得ている。

一方、免震構造の設計に際しては、技術者は設計のクライテリアを設定するが、一般に、入力地震動の大きさとその地震動時の上部構造の応答加速度と応答層間変位、免震層の応答変位、免震装置の変形量などである。構造計算の方法は現在殆どの場合、直接、地震動に対する建物の応答解析を行い応答加速度や応答変位を得られる「時刻歴応答解析法」を用いている。また、2000 年に「等価線形化法」による構造計算方法などの技術基準を規定した免震建築物に関する告示が出されたので、この方法による免震構造も出始め 2006 年ではその年の免震建築物全体の 10 %までになっていた。



船越教授(東京電機大学)とパートナーによる設計、アイソレータ 242 台を使用。



写真 1 神奈川県相模原市の上九沢のマンション群



三菱地所設計による設計：高層マンション 3 棟、1 棟当たりアイソレータ 28 台を使用

写真 2 免震構造による、高層分譲マンション、神奈川県横浜市

しかし2007年5月に改正限界耐力計算法、6月には改正基準法の施行で殆ど告示の「等価線形化法」の計算方法によるものは見られなくなった。ごく最近では時刻歴応答解析法による免震建築物になっている(図1)。現在、日本免震構造協会では告示第6の計算方法の復活のための活動を行っている。なお、協会では関連する図書類を編集又は出版を行っているので参照されたい。<sup>1,2,3,4,5,6,7)</sup>

最近生産される装置のうち、アイソレータとダンパーそれぞれの使用比率は、アイソレータに関して、鉛プラグ入り及び天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)系 65%、高減衰ゴム系積層ゴム支承(HDR) 20%、PTFEを用いたスライダー (SL) と転がり支承系 15%、ダンパーに関しては鋼材(SD) 40%、鉛材(LD)25%、オイルダンパー(OD)系 35%である。生産台数については、NRB系とHDR系及びSL系を含めて、年平均で6,000台のアイソレータ、1,200台のダンパーが製造されている。

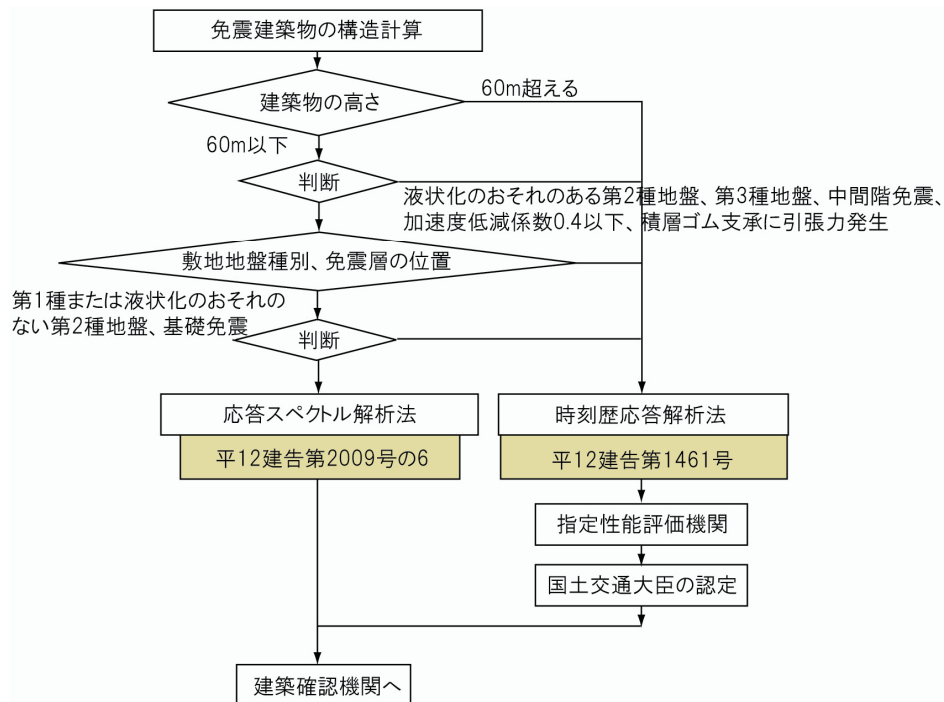


図1 構造計算方法のルート

## 2. 免震構造建物の免震効果

免震構造の建設棟数は、主に二つの理由で徐々に増加している。表2に示すような地震が発生し、免震効果が体験されかつ設置した地震計の記録も結果を示したこと、免震構造の建物は、地震後もインフラの回復と動時にすぐに使用できたことである。以下に調査の結果を概要する。

表2 最近の地震

| 地震名        | 大きさ | 日付                   |
|------------|-----|----------------------|
| 平成15年十勝沖地震 | 8.0 | 2003年09月26日金曜日、04:50 |
| 新潟県中越地震    | 6.8 | 2004年10月23日土曜日、17:56 |
| 福岡県西方沖地震   | 7.0 | 2005年03月20日日曜日、10:53 |
| 能登半島地震     | 6.9 | 2007年03月25日日曜日、09:41 |
| 新潟県中越沖地震   | 6.8 | 2007年07月16日月曜日、10:13 |
| 岩手・宮城内陸地震  | 7.2 | 2008年06月14日土曜日、08:43 |

2.1. 上記の地震発生後、釧路市内の免震構造建物の状況を調査した。4 棟の免震建物があり、建物階数は3～9階建て、用途は事務所・銀行・病院であり、構造はRCまたはSRC造、基礎はべた・杭基礎、装置類は積層ゴム支承と履歴型ダンパーが使用されている。

これらの建物では、机・棚からの落下物もなかったこと、居住者の多くは、ゆっくりとした揺れを感じたこと、基礎に対する上部構造の加速度の低減比は、 $1/4 \sim 2/3$ であったこと、免震構造の応答も設計レベルであったことが示された。<sup>9,10,11,12,13)</sup>

## 2.2. 新潟県中越地震

新潟県中越地震について、免震構造の建物を訪問し、居住者に地震時の状況などを伺った。震源地に近い3棟で、階数は2～8階建て、用途は老人健康施設・データセンター・学校、上部構造はRC造とS造、基礎はいずれもべた基礎であり、震央から6～20kmである。<sup>14,15,16,17)</sup>

震源に最も近い小千谷市の老人健康施設では棚や机からの落下物もなく、地震で損傷した小千谷病院施設の人達の避難所になった。この施設の水平方向変位はすべり支承のすべり痕跡から140mm程度であった。設置された地震計の記録から、上部構造の加速度比は $1/4$ であった。大きく低減されていた。

長岡市のデータセンターの地震時の変位は設置したオービターにより、80mmであった。オフィス機器類の移動も皆無であった。余震が多かったため、数日間は、従業員達の一時避難所となった。

長岡駅近くの北陸学園は、高減衰ゴム系積層ゴム支承を用いた免震構造である。机の移動や棚からの落下物もなく、その後の余震時の建物の揺れ方について、居住者の多くは大きな船に乗っているときのようなゆっくりとした揺れを感じたと話している。免震層の変位は200mm程であり、設置された地震計の記録で、上部構造の加速度比は $1/4$ に低減されていた。

## 2.3. 福岡県西方沖地震

福岡では1898年に地震があつて依頼の地震となった。福岡大学の高山教授は市内の免震建物10棟を直ちに調査した。大半の建物の応答は50cm/sの設計レベル以下であったと報告している。階数は4～14階建て、用途は寄宿舍・マンション・事務所・病院・ホテルと用途は多種である。上部構造はRC造、SRC造とS造、基礎はべた基礎または杭基礎である。震央からは25km程である。免震層の応答変位は、150～300mmであった。設置された地震計によれば、上部構造の加速度比は、 $1/3 \sim 1/2$ であった。これらの建物内では家具・什器等の移動・落下はかった。免震装置類はNRB、SD、LDで代表される。

## 2.4. 能登半島地震

能登半島近傍の3棟の建物があり調査ほうこくによれば、これら建物の階数は2～5階建て、用途は消防署・技術研究所である。上部構造はRC造、基礎はべた基礎である。震央に一番近い建物は30km程になる。免震装置類はNRB、SD、LDで代表される。七尾市の消防署の変位はおよそ100mmで伸縮継手の移動跡による。署内での家具・什器類の移動はなかったが、停電が起き、自家発電を使用した。他の建物は震央から70～80kmに位置し応答もかなり小であった。

## 2.5. 新潟県中越沖地震

小千谷市の老人健康施設に関する調査報告では、新潟県中越地震の時よりも応答はかなり低く、

ベースと上部構造の加速比のほぼ半分であった。また、長岡市のデータセンターのオービターは、40 mm 未満の変位を示した。<sup>21,22)</sup>

## 2.6. 岩手・宮城内陸地震

栗原市の病院に関する調査報告によると、院内の人々は建物のゆっくりとした動きを感じた、従業員、患者にも負傷者はなく、医者と看護師は、地震で負傷した人々の治療に対処することができた。停電したが、自家発電によった。本病院は地元の災害拠点としても活動した。応答変位はオイルダンパーのロッド移動跡からおよそ 90 mm であった。<sup>23)</sup>

## 3. 免震構造システムに関する課題

日本の最初の免震構造は戸建住宅として 1983 年に建設された。以降、技術者は免震構造システムを調査・研究し、改良してきた。免震構造システムはこの 20 年の間に多くの地震でその効果を発揮した。免震建物も用途や規模も初期の頃とは異なり種々建設され、10 年前位から高層の免震建物も出現しその数も毎年増加している。

このなかで、免震構造システムに関連したいくつかの解決すべき課題も生じてきている。以下にこれらを示す。

3.1 最近、長周期成分を有する或いは長時間継続する地震波に対する建物の応答について、技術者と研究者の間で議論されている。これらの地震波の特性は直接免震構造システムに影響を与える。特にダンパーのエネルギー吸収能力が注目される。建物の安全性を確実なものにするためにも、この際それらの能力を再確認しておくことが必要である。上述の地震波を想定して工場で、長周期あるいは長時間に関連したテストを行い、主に熱の上昇や繰り返しとダンパーのエネルギー吸収能力との関係のデータをとり、周期依存、繰り返し依存や耐久性についてダンパーの性能を明示する。

3.2 最近の地震で、免震装置と構造躯体との接合部の損傷が見られた。装置が全て大臣認定品となっている現状では装置を設計者が設計することもなくなっている。以前は全ての部分に設計者が関与していたが、このところ世代も変わって死角になっているかもしれない。再度、免震装置の接合部分に関する詳細設計を実施する必要がある。良い免震効果を得るためにも綿密な設計が要求される。

3.3 一般に、免震構造の場合の上部構造の剛性は免震層に比し十分に剛性が高いが、最近、特に免震構造による建物でも比較的剛性が低いものも出てきている。アイソレーション比率が低いと、上部構造の応答加速度はあまり低減されない。免震構造の上部構造の設計の考え方について再度議論をしておく必要がある。

3.4 次に免震装置に関しては、大径(直径 1,600 mm クラス)の積層ゴム支承の場合、装置製作会社の有する試験機的能力から直接その特性を求めることができない。そのため特性を表現できる式によることになるが、近い将来能力の高い試験機での実機による試験が望まれる。

さらに、最近、建物重量が軽い木造住宅や高層建物にも免震構造が採用されるようになり、台風や季節風に対する風応答と免震装置類の特性(エネルギー吸収性能)との関係を明確にしておく必要がある。

#### 4. 近未来システムに関する事項等

コンピュータ技術が急速に発達しているなか、建築物の構造システムに関する技術もここ 1/4 世紀の間大きく変化してきた。社会の多くの技術がコンピュータを用い何らかの制御を伴いながら進展している。近い将来、建物の構造システムの分野でも同様な技術の進展が見られるはずである。特に免震構造が受動的ではあるが応答加速度や変位を制御するようになった。すでにセミアクティブな制御による免震構造システムも出現している。現在よりもっと安定したコンピュータシステムと計測装置により、より確実に制御ができる構造システムが開発され、近い将来、このようなシステムが実用化していくものと思われる。

また、福田前首相等によって提案された 200 年住宅の構想に基づく数世代にわたって使用できるような高耐久性でサスティナビリティの高い住宅システムの開発もはじまったが、同様に高耐久性をもつ構造システムや免震装置類なども近未来に要求されると思われる。

次に、地震時の免震構造建物の特性を明確にし、上述の応答制御システムを構築する上にも地震計測装置に加えてモニタリングのための計測装置も備えておくことが望まれる。これまでも免震構造システムの実特性や免震効果を知るために一部の免震構造建物に、地震計が設置され、地震時の免震構造の挙動を捉えてきた。これにより地震時の免震効果を確認することができた。しかし、このような建物の数は少ない。全国各地の主要な都市において、公的な建物に計測装置類を設置し、永続的な計測と情報のディスクローズを行うことにより、免震構造に関する特性をより明確なものに近づける必要がある。このことにより、近い将来、建設される免震構造の設計に反映させることができるし、結果として、上述の高耐久型の建物につなげることも可能になる。

装置についても永続的な調査が望まれる、その一つの例が広州大学の周教授の研究室で行われている積層ゴム支承の 50 年間にわたるクリープ試験である。調査は一代では終わらないので先生の後継者に託すことになる。同様な試験を日本でも公的な機関で同様に 50 年を目指して調査することを期待したい。

一方、上述の技術を進展するにも技術者が必要で現在日本の建築系の大学は 100 校ほど有りその中で動力学がカリキュラムにあるところは 20 校ほどと思われる。今後の技術者の育成のため、カリキュラムに振動理論や制御理論等が加わることを希望する。

地震時と地震後に基本的な性能である人命の保護、財産の保全、建物の機能の維持ができ、市民の生命と生活を守り、或いは企業の事業継続のための構造システムとして免震構造の果たす役割は大きい。今後の健全な普及と拡大に期待したい。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課他編(2001年5月)「免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説」、工学図書出版
- 2) JSSI 技術委員会(2005年11月)「JSSI 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例」、JSSI
- 3) JSSI 技術委員会(2005年6月)「JSSI 免震構造施工標準-2005」、経済調査会
- 4) JSSI 維持管理委員会(2007年8月)、「免震建築物の維持管理基準-2007」、JSSI
- 5) JSSI 技術委員会(2001年6月)、「免震建物の建築・設備標準-2001」、JSSI
- 6) JSSI 技術委員会(2005年2月)、「免震部材標準品リスト」、JSSI

- 7) ガイドライン作成部会 (2006年6月)、「既存鉄筋コンクリート造建築物の免震・制震による耐震改修ガイドライン」、日本建築防災協会
- 8) 平成18年度成果報告書、(2007年3月)、「免震装置及びシステムに係る調査事業」、調査プロジェクト報告、NEDO Code100009926、pp06002383~06002384
- 9) 竹中康雄他 (2004年2月)、「平成15年の十勝沖地震における釧路市内に建つ免震建物の地震観測」、「menshin」、JSSI No.43、pp31-35
- 10) 鹿嶋俊英他 (2004年2月)、「釧路合同庁舎で観測された2003年十勝沖地震の記録」、「menshin」、JSSI No.43、pp36-38
- 11) 藤堂正喜他 (2004年2月)、「2003年十勝沖地震による釧路信用組合本店の観測記録」、「menshin」、JSSI No.43、pp39-40
- 12) 境 茂樹他 (2004年2月)、「釧路市に建つ免震病院の地震時挙動」、「menshin」、JSSI No.43、pp41-43
- 13) JSSI 普及委員会報告 (2004年8月)、「平成15年十勝沖地震における免震建物居住者へのアンケート調査」、「menshin」、JSSI No.45、pp34-37
- 14) 和田 章他 (2005年2月)、「新潟県所在の免震建築物の調査報告」、「menshin」、JSSI No.47、pp41-46
- 15) 溜 正俊他 (2005年2月)、「平成16年新潟県中越地震における免震建物の地震観測記録」、「menshin」、JSSI No.47、pp31-35
- 16) 矢川 豊他 (2005年5月)、「長岡市に建つ情報センターの免震効果」、「menshin」、JSSI No.48、pp36-40
- 17) 竹中康雄他 (2005年5月)、「新潟県中越地震における長岡市内の学校免震建物地震観測記録」、「menshin」、JSSI No.48、pp56-59
- 18) 高山峯夫他 (2005年5月)、「2005年福岡県西方沖地震による免震建物の調査概要」、「menshin」、JSSI、No.48、pp47-51
- 19) 森本 仁他 (2005年5月)、「福岡県西方沖地震による大濠公園(免震)ビルの速報」、「menshin」、JSSI No.48、pp52-55
- 20) 田中伸幸 (2007年5月)、「平成19年(2007年)能登半島地震における免震建物の状況速報」、「menshin」、JSSI No.56、pp33-37
- 21) 溜 正俊 (2007年11月)、「平成19年新潟県中越沖地震における小千谷市内免震建物の地震観測記録」、「menshin」、JSSI No.58、pp23-25
- 22) 矢川 豊他 (2007年11月)、「長岡市に建つ情報センターの免震効果(その2)」、「menshin」、JSSI No.58、pp26-28
- 23) JSSI 会員による速報 (2008年7月)、「栗原市立中央病院の免震効果確認」、Kenplatz ビルディングニュース (日経BP社、7月15日号)

