日本初の免震建築建設から間もなく25年

第12回 免震フォーラム

原点に立ち戻って 免震建築を再考する

わが国初となった免震建築・千葉県八千代台免震住宅が1983年に建設されてから、もうすぐ四半世紀となる。免震建築の設計、施工、部材、維持管理などの基準を作成し、日本の免震構造の発展と普及、啓発を進めてきた日本免震構造協会はこれを記念し、９月に開いた第12回免震フォーラムで「原点に立ち戻って免震建築を再考する」をテーマにシンポジウムを開いた。多様な意見が出されたフォーラムの講師とパネラーの講演を通じて、日本の免震建築の歩みを振り返るとともに今後の課題や目標を展望する。

人命、資産、機能の保全図る

技術格差の改善が業界の発展へ

社団法人日本免震構造協会会長

西川　孝夫氏に聞く

――免震構造の歴史は

地震の多い日本列島には、古くから免震構造の考え方がありました。例えば、彦根城の御書院は一種の免震構造になっていて、建物を凹面状の岩盤上に載せています。このことで地震の衝撃をやわらげることができることを感覚的に知っていたのでしょう。

戦前の１９３５年には、佐野利器先生が書かれた「家屋耐震並びに耐風構造」に免震構造のことが減震構造として紹介してあります。また、岡隆一先生が、不動銀行の姫路支店と下関支店を免震構造で建設されました。これは、日本で最初に実用化された免震構造の建物になると思います。その後、東京理科大学１号館が免震構造で建設されています。

こうした蓄積を重ね、83年に現在と同じような積層ゴムによる免震構造の八千代台免震住宅が完成しました。積層ゴムをシステマチックに使用した初の免震建物です。

現在、ダンパーや支承などの新技術が開発されていますが、免震の基本的な仕組みは八千代台免震住宅のころと同じです。

――免震構造の現状は

免震構造は原則として固い地盤の上に固い建物を乗せ、間に柔らかいバネを設けることで、地震の際に入ってくるエネルギーをバネに吸収させる仕組みです。しかし、日本の都市部はほとんど沖積層なので、あまり固い地盤がありません。ですから、柔らかい地盤の上での免震構造の研究が進められてきました。理論的な検証も含めて軟弱地盤での免震構造の研究が大いに進んだ結果、多くの免震構造が建設されるようになってきました。

免震建物は、ビルもので千数百棟、戸建住宅で３０００－４０００棟程度かそれ以上が建設されています。ビルものは、超高層ビルの総数とあまり変わりません。免震構造は、兵庫県南部地震で評価が高まり増加しました。震災直後に増えたのはマンションで、その後は病院などです。最近に建てられた病院は、ほとんど１００％の確率で免震構造が採用されています。逆に、オフィスビルでは情報センターなどの例外を除き、ほとんど増えていません。

免震構造は、大規模災害時に企業活動の継続性を確保するためのＢＣＰに効果があると思います。例えば、工場などの生産ラインや災害時の集中対策センターといったところを免震化するだけで、被災後の対応がすばやく行えるとともに、被害も軽減することが可能であろうと思います。学校の免震化も進んでいます。また、免震建築に対する地震保険料は一般建物の７割に軽減されます。

免震構造の普及で多少ネックになるのがイニシャルコストの問題です。その際、安全に対するコストの考え方がポイントになります。建物が竣工後に一度も大きな地震を経験しなければ別ですが、一度でも大地震を経験すれば、イニシャルコストとランニングコストの和であるライフサイクルコストは大きく下がります。地震が多い日本では免震構造にかけるコストは決して高くないと思います。

――免震部材の劣化の問題は

免震装置に多く採用される積層ゴムの劣化について心配する人もいます。確かに、現在の免震建築自体は二十数年の歴史しかないため、１００％安心かどうかは、分からない面もあります。しかし、定期点検中にでも、なにか不具合があれば、原則として免震装置は取り替えが可能ですので、劣化に対する安全は確保できます。現に、積層ゴムを取り替える練習も行われています。

免震建築、特に高層免震建築で、足元を固めないため倒れないか心配になる、といわれたこともあります。実際は、過大な引っ張り力が起きないように十分余裕をもって設計しているので心配ないのですが、こうした誤ったイメージを持っている方も、少なからずいらっしゃるようにみえます。

協会は、免震工法や設計を中心とする技術委員会で、パンフレットの作成やイベント開催時に模型を持ち込むなどして一般の人にＰＲしています。その結果、「免震」という言葉を正しく理解していただける方が多くなったと思います。

――原子力発電所における免震構造について

以前は、耐震設計の対象としている大規模地震は海で起きるといわれましたが、兵庫県南部地震で定説が崩れ、さらに中越沖地震ではひずみ集中帯など新しい概念が出ています。地震に対する価値観が多様化し、どこにいても地震に遭う可能性があります。

中越沖地震では、柏崎の原子力発電所が被害を受けました。現在の原子力発電所の耐震基準では、原子力発電所の耐震重要度クラスをＡＢＣの３段階に分けており、今回は重要度Ｃの場所が破損しました。基準からすれば安全の範囲内ですが、放射能を扱うだけに小さな事故も見過ごすことはできません。原子力発電所のように、事故が起きてからでは手遅れになる施設では、免震構造の必要性を感じます。

原子力発電所の免震化は、フランスや南アフリカで行われており、日本でも90年代に研究が盛んになりましたが、さほど発展はしませんでした。今回、原子力発電所の免震化の研究に向けた機運が再び高まっています。最近は免震レトロフィット技術も進歩しましたので、既存の施設でも免震化が可能です。日本の土木技術をもってすれば、原子力発電所の免震レトロフィットも十分できると思います。

――免震構造の問題点は

今後は、免震構造の分野を魅力ある産業として発展させることが必要です。東京のように免震に関わる仕事がコンスタントに受注できる環境であれば設計事務所が免震を専業で経営するのも可能かもしれません。しかし、免震構造には勉強も必要なため、まだ多くの設計事務所が余裕を持って取り組める環境でないと思います。

大きなゼネコンは、建築に関わるあらゆる人材を抱えているので、免震にも対応できます。その点、小さなゼネコンで免震建築を作ることができるところは少ないと思います。免震装置は工業製品ですから、手製品の建築と精度が格段に違います。この違いの融合が、ノウハウになります。ですから、専門工事業が免震工法を施工できれば、営業の「売り」になると思います。

まだ地方の業者には、免震建築を施工できないところが多いようです。そのため、施工技術や点検などの技術者育成に関するセミナーやシンポジウムの要望が増えています。そうした格差の改善が今後の課題だと思いますし、それができないと業界自体の発展も難しいでしょう。

――協会の活動について

協会には、学校の先生方が多く入会しています。そのため、アカデミックな側面が強く出ており、ブランド力も高まっています。また、協会による研究成果は、多くの免震建築に採用されています。

今後の免震構造の展開を考えると、メーカーに頼った技術開発だけでなく、ダンパーの最適な組み合わせを見つけることも重要になります。理論的には多くの組み合わせがありますが、最適な組み合わせには、いろいろな意見があります。理論的な研究は学会と協会、ベースの研究開発を協会と民間、性能の確認と施工性の具体的な運用を民間というように、連携して取り組むのも方法かもしれません。

協会には各分野から人材が集まっているため、多様な意見交換が行われており、いい方向に向かっていると思います。

これまでの免震建築と構造技術に関する経緯

１８９１	河合浩蔵「地震の際大震動を受けざる構造」（日本初の免震）
１９１４	家屋耐震構造論　佐野利器 震度法
１９２３	関東地震
１９２４	鬼頭健三郎「建築物耐震装置」 市街地建築物法改正　設計震度０・１
１９２７	中村太郎「地震動エネルギー吸収設備」
１９２８	岡隆一「免震基礎」
１９３５	佐野利器「家屋耐震並びに耐風構造」
１９３８	鷹部屋福平「制振性耐震構造」
１９４８	福井地震
１９５０	建築基準法公布
１９５１	大築志夫「伝達震力限定装置」
１９６４	勝田千利他「自動制御による免震法」 新潟地震
１９６５	松下清夫他「免震構造の解析」
１９６８	十勝沖地震
１９７０	基準法施行令改正　せん断補強
１９７３	川股重也「質量ポンプ」
１９７５	大分県中部地震
１９７７	積層ゴムの開発 「新耐震設計法（案）」（建設省建築研究所） 「既存鉄筋コンクリート造耐震診断基準」
１９７８	宮城県沖地震
１９８０	基準法施行令改正（新耐震基準）
１９８３	多田英之・山口昭一「八千代台免震住宅」 日本海中部地震
１９８９	日本建築学会「免震構造設計指針」
１９９３	釧路・北海道南西沖地震 日本免震構造協会（ＪＳＳＩ）設立
１９９５	兵庫県南部地震
２０００	免震建築物の技術基準に関する建設省告示
２００３	「免震建物点検技術者」講習・試験開始
２００４	国土交通大臣指定性能評価機関になり、性能評価業務開始 日本免震構造協会創立10周年記念国際シンポジウム「応答制御建築物の性能に関するシンポジウム」 新潟県中越地震
２００５	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
２００６	免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説（戸建て免震住宅）（日本建築センター）
２００７	新潟県中越沖地震

日本免震構造協会賞

■第１回
功労賞　中野清司、跡部義久

■第２回
技術賞　周期３秒前後の建物免震に関する一連の研究
技術賞　超高層免震、稲城市立病院、第一生命府中ビルディング、ＮＥＷ山梨ＩＴセンター

■第３回
技術賞　レトロフィット免震に関する一連の研究
〈特別賞〉免震住宅の普及化への取り組み
作品賞　興亜火災神戸センター、角川書店新本社ビル
〈特別賞〉沢の鶴資料館

■第４回
技術賞　非同調マスダンパー効果を持つ中間層免震構造の設計法の開発、風による免震部材挙動と免震建物風応答評価法、〈特別賞〉慶応義塾大学理工学部創想館
作品賞　山口県立きららスポーツ交流公園多目的ドーム（きらら元気ドーム）、慶應義塾大学日吉来往舎
〈特別賞〉ＳＢＳスタジオ棟

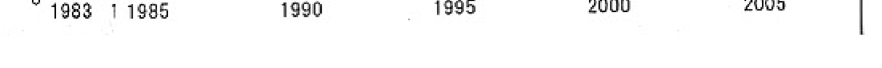
■第５回
技術賞　建物上部に大型タワーを搭載する免震建物に関する一連の取り組み
〈普及賞〉村上市庁舎免震改修工事
作品賞　兵庫県立美術館、プラダブティック青山店、ポーラ美術館、セ・パルレ中央林間
〈特別賞〉大阪市中央公会堂保存再生

■第６回
技術賞　履歴減衰型免震部材の統一的復元力モデルの開発、フリープラン・長寿命・高耐久を実現した日本初の超高層ＰＣａＰＣ免震建物
作品賞　マブチモーター本社棟、清水建設技術研究所新本館、九州国立博物館

■第７回
功労賞　山口昭一
技術賞　〈特別賞〉パーシャルフロート免震構造の開発
作品賞　慶應義塾大学（三田）南館、信濃毎日新聞本社ビル、ホテルエミオン東京ベイスターツＣＡＭ、〈特別賞〉国際医療福祉大学附属熱海病院

■第８回
技術賞　柱脚周りに限定された補強機構を用いた中間層免震レトロフィット
作品賞　国立新美術館、東京建設コンサルタント新本社ビル、味の素グループ高輪研修センター

日本の免震構造の推移



講師による講演

我が国の免震構造のこれまでを総括

健全普及で都市に耐震性

東京工業大学総合研究院教授
建築物理研究センター長

和田　章氏

最大級の地震動が発生しても問題がないように建物を設計することは容易ではありません。これを解決するには、従来の建築構造とほぼ同じ費用で飛躍的に高い耐震性を持たせる構造法の開発が急務であり、これに対応できるのが「免震構造」と「制振構造」です。

耐震工学の研究の焦点は、建築構造の飛躍的に高い耐震性の追求にあります。免震構造やパッシブ制振構造などの新しい技術を進歩・普及させ、個々の建物の耐震性を向上させることで、都市の耐震性の向上に努めなくてはなりません。その意味で、健全な免震構造の普及が重要です。

この二十数年に開発されてきた免震部材を確かなものにすると同時に、さらなる優れた部材の開発が望まれます。また、免震部材には積層ゴム、鋼材、鉛を用いたダンパー、オイルダンパーなどがあります。基礎構造と上部構造との接合部設計が非常に重要です。

Ｅディフェンス（兵庫県三木市の大型震動台）の油圧減を利用した実大実速度実変形動的試験装置の設立をぜひとも要望し、地震大国日本で、アメリカ・サンディエゴまで行かずとも日本国内で実験ができるようにする必要があります。免震構造の地震観測データをはじめとする積極的情報公開も有益です。

実地震での免震建築の有効性

２度の大地震で機能実証

三菱地所設計構造設計部副部長

溜　正俊氏

２００４年10月23日の新潟県中越地震において、震源近傍の小千谷市内に建つ免震建物で強震記録が得られました。この建物はＲＣ造５階建ての医療関連施設で、兵庫県南部地震の被害の教訓から、地震後の機能維持を念頭に免震構造として計画・設計され、１９９７年５月に完成しました。

強震記録を解析した結果、免震装置によって建物の揺れ（最大加速度）が約４分の１に低減され、設計通りの挙動を示したことが確認されました。室内什器・設備機器を含めてほぼ無被害であり、十分な免震効果が発揮されたといえます。

この建物は、今年の新潟県中越沖地震でも免震効果を確認することができました。小千谷市内の震度は04年の地震を下回りますが、一度大地震を受けた免震構造が、その後の地震においても機能を発揮することの実証例となります。

今後の課題として、特に病院、医療関連施設では免震化による安全性確保をより一層進めるとともに、インフラや備蓄を考えた総合的な機能維持を考える必要があります。また、免震建物には地震計等を設置し、その効果を工学的に検証していくべきだと考えます。

免震部材の発展と今後

地域・街区の免震化が必要

福岡大学工学部建築学科教授

髙山　峯夫氏

免震部材が出始めたころは、積層ゴムの評価方法や設計値に準じた性能の確保、建物を長期間支持できるかといった問題に、設計者は手探りの状態で挑んでいました。

免震建物がわが国で誕生して約25年、社会的に受け入れられたのは、兵庫県南部地震以降の15年程度です。２０００年に免震部材は認定材料となり、05年には積層ゴムにＩＳＯがつくられ、試験法や製品規格がまとめられました。現在は、ＪＩＳ化に向けた作業が進められています。

免震建物や免震部材の適用範囲の拡大により、確認すべき性能事項や範囲が広がってきており、実績と実証データを更新・蓄積していくことが必要です。製品検査をきちんとして、免震構造の信頼性を確保することが一番重要です。メーカーだけでなく、設計者や施工者が協力し、免震材料の性能と品質のさらなる向上を目指すことが求められています。

夢は、被災後に建物が残った後、ライフラインの問題がないように地域や街区全体を免震化することです。特に、密集市街地での免震化は必要だと思います。究極的には、３次元の免震化を目指したいです。

免震建築の高層化と長周期地震

想定外の地震動に対応を

東京理科大学理工学部建築学科教授

北村　春幸氏

超高層建物、免震構造建物、免震材料の設計では、応力や変形の最大応答値が限界値以下であることに重点を置いてきました。短時間に最大値を発生させる標準波による応答値エネルギーに着目してきたといえます。

しかし、最近の地震の傾向をみると、標準波だけを基準にせず、想定外の地震動に対応できる限界性能を規定する必要があります。例えば、長時間に大量のエネルギーを入力する長周期地震や、兵庫県南部地震で観測された短時間に大きなエネルギーを入力する直下型といった予期せぬ地震を想定する必要があります。

さまざまな地震動に対応した実験は設計者や製造者により始められています。こうした実験結果は免震構造の信頼性を高めることとして期待されています。

免震構造が確立して25年。設計者は、時刻歴応答解析で振動を解析し、変形を納めるといった計算だけでなく、積層ゴムの性能を理解した上で建物の挙動や壊れ方までを設計できるようになる必要があります。プロの免震設計者が多く出て、予期せぬ地震に対応できる優れた設計者像を確立してほしいと思います。

パネルディスカッション

熱が与える影響探る

鹿島研究・技術開発本部小堀研究室室次長

竹中　康雄氏

風荷重は一定水平力を含むため、建物に使われているクリープ性のある材料の変形を時間とともに増大させます。免震部材では、クリープ性を持つ鉛や高減衰ゴムが使われている現状を考え風に対する設計方法を見直す必要性があり、免震部材の実験を行いました。

80㍍クラスの高層ビルの風応答解析をして継続時間５時間の風荷重を求め、鉛入り積層ゴムと高減衰積層ゴムを荷重制御により長時間加振実験を行いました。実験結果では、荷重が増えないのに変形が増大していくクリープ現象が見られ、これを無視した地震時と同じ評価方法による変形の２倍以上大きいことが分かりました。高減衰積層ゴムでは適切な設計評価方法がなく今後の課題です。

長周期地震動では、ダンパーが繰り返し大きな変形を受けてエネルギーを吸収するため、素材が温度上昇し性能が劣化する恐れがあります。融点が約３２７度の鉛を封入した鉛入り積層ゴムの実大加振実験では、鉛プラグの温度が90度にまで達し、エネルギー吸収性能が半分に低下したケースが発生しました。熱は鉛プラグが接する上下方向にはよく伝わりますが、ゴムのある横方向には逃げにくいことが分かっています。この熱の影響がどのような影響を与えるかを探っていきたいと思います。

適切なターゲットを

日本設計構造設計群構造設計グループシニアエンジニアグループ長

人見　泰義氏

免震構造は地震外力を小さくでき、通常の耐震設計では採用できないスレンダーな躯体が可能で、地震の多い日本で諸外国の建築にあるような、スリムなデザインを可能にする有効な手段です。初期の免震構造は、免震効果の大きな整形の建物に主に使われてきたが、最大限の免震効果にとらわれなければ、その利用範囲は拡大します。

例えば、大空間施設での免震技術の利用は上下動の低減に有効であり、山口ドームにおいては、38基の積層ゴムで支えるドームの屋根は軽量であるため、免震効果を最大とするよりも、風により免震装置が引き抜けないように、バランスに注意して設計されています。

東京・六本木の国立新美術館でも、大空間に免震構造が採用されています。特徴的なことは、アトリウムに柱を持たず、カーテンウオールなどの外皮が躯体となって全体を支えていることです。この構造を可能にするために、建物の下部に積層ゴム、アトリウム下部に転がり支承を使用しています。

免震構造は、地震の規模など想定した入力（ターゲット）に対し、免震システムをトータルにチューニングしながら最適な免震建物に仕上げるので、想定外の入力に対しては、大きなダメージを受ける可能性があります。斬新なデザインを採用する場合には特に、ターゲットを適切に設定し、想定外の入力に対しても安全性を確保できる、余裕のある設計が求められています。

地震動に謙虚に対応

日本大学理工学部建築学科・耐震構造研究室准教授

古橋　剛氏

長く設計の現場で用いられているエル・セントロ地震動は、わが国の耐震設計に大きな功績がある波形です。この地震動は、短周期域で大きい応答加速度が長周期域では小さくなり、長周期域で大きくなる応答変形は減衰を付与することで小さくなる性質があり、超高層や免震建物の原理を説明するのに最適な地震動でもあります。ただし、この地震動は設計者に「地震とはこういうものだ」という観念を強く焼き付けていないでしょうか。

近年の強震観測では、震源近くにもかかわらず教科書的な性質でない地震動が得られています。例えば、新潟県中越沖地震の際のＫ－ＮＥＴによる柏崎の記録は、２秒以降に大きな応答加速度があり、周期４－６秒では応答変位は減衰にかかわらずほぼ一定です。また、２－10秒では実用的な減衰の範囲では応答変形を75㌢以下にできません。こうした性質の地震動の存在は、兵庫県南部地震や台湾の集集地震などの際にも指摘されています。

遠距離の地震による長周期、長時間の地震動の問題も指摘されていますが、近距離の地震でもわれわれの予想しない性質の地震動もあるようです。謙虚に対応していく必要があります。

性能高める努力は責務

日建設計構造設計部門構造設計室主管

吉江　慶祐氏

私が免震構造に関わり始めてから約15年の間、免震構造は発展を続け、高層ビルへも適用されています。

高層免震建物では風荷重の影響が大きくなりますが、一般的には免震ダンパーは風荷重に対して降伏させません。そのため、ダンパーの量を必要以上に増やした設計が必要ですが、それでは地震に対する免震効果が損なわれてしまいます。その結果、免震効果を落とすか採用をあきらめるかをしなくてはいけません。

風荷重に対する高層免震建物の安全性・健全性の評価を行い、免震構造の性能を高める努力をすることは設計者の責務だと思います。免震構造に対する風荷重の検討に取り組み始めたところです。

免震層が弾性範囲を超える場合の風荷重に対する解析は、時刻歴応答解析が必要ですが、継続時間が長い風荷重の場合は大量の計算が必要となります。コンピューターの計算速度が向上しているとはいえ、設計者にとっては大きな負担となります。そこで、時刻歴応答解析を用いない弾塑性応答計算方法を研究しています。風力による建物へのエネルギー入力の仕組みが明らかになってきたので、これを利用し、耐震設計で実用化されているエネルギー法の考え方を応用できることが分かってきました。