

令和6年度「公共建築の日」及び「公共建築月間」記念講演会

大規模地震災害における 公共建築物の 機能確保の意義

2024(令和6)年11月11日(月)

東京証券会館 8階ホール

大規模地震災害における公共建築物の機能確保の意義

和田 章 東京工業大学名誉教授、公共建築賞審査委員会委員長

米田雅子 東京科学大学特任教授、宇都宮大学理事

竹内 徹 東京科学大学教授、日本建築学会会長

1. はじめに

昨年は1923年9月に起きた関東大震災から100年、来年は1995年1月に起きた阪神・淡路大震災から30年である。2024年1月1日には令和6年 能登半島地震が起きた。世界で起こる大小の地震の10%は日本で起こると言われるが、プレートの動きは地球の営みであり、複雑なプレートの上の日本国土に暮らす我々は覚悟を決めて社会を作り日々の生活を進めなくてはならない。

関東大震災の翌年の1924年には、世界で初めての耐震基準が市街地建築物法の施行規則に書き加えられた。ここでは構造物そのものの耐震設計法が定められたが、建築の機能維持のことには触れていない。第二次世界大戦の間に、資材不足、鋼材不足があり、臨時的に許容応力度を大きめにされるなどが行われた。これに続き1950年に、建築基準法と同施行令に耐震基準が定められた。今から振り返ると、戦前の基準に比べ若干弱くなったように思える。

1981年には地震災害からの教訓、多くの研究成果をもとに新耐震設計法がまとめられ、①「中小地震動には構造物に大きな損傷無く」、②「大地震動時には構造物の損傷を許容するが、人命保護のために構造物の倒壊を防ぐ」の2つの新しい考えの二段階設計法が建築基準法・同施行令に組み込まれた。ここでは構造物そのものの耐震設計に関して詳しく決められているが、建築の機能、機能維持などには何も触れていない。建築基準法は最低基準であり、機能維持はここで定めるのではなく、発注者、建主、設計者、施工会社の努力に任せるという考え方だと思われる。

2. 官庁施設の総合耐震計画基準（1996）と官庁施設の総合耐震・対津波計画基準（2013）

国土交通省大臣官房営繕部は日本に建てられている官庁施設や公共建築物に目を配らせており、建築基準法には書かれていない重要な項目について各種の基準を設けている。阪神・淡路大震災の翌年（1996）には「官庁施設の総合耐震計画基準」が定められ、2011年3月に起きた東日本大震災を受けて、2013にこの基準は「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」として制定された。この計画基準は建築基準法を超える基準であり、必ずしも官庁建築や公共建築だけでなく、一般の建築の設計・施工にも生かされている。

計画基準には、災害を受けにくい敷地の選定、構造体の耐震安全性確保、建築非構造部材や建築設備などの耐震安全性確保、そして機能維持、機能保持のことまで書かれている。さらに免震構造・制振構造の設計、既存施設の耐震化が書かれ、新しい章として官庁施設の津波対策についても詳細に書かれている。

構造物の靱性に期待した骨組構造は大地震時に柱梁などの骨組部材が塑性変形を起し、大地震後に使えなくなる恐れがあり、建築の機能維持を求める場合には不向きである。一方、剛強な耐震構造は言葉通り大地震を受けても壊れにくいですが、地震時に内部に生じる加速度が非常に大きく、設備機器や病院などの医療機器が壊れやすくなる。大型旅客機が飛び立つ前に、乗員と乗客はシートベルトを締め、食事カートを固定しているが、普段の生活や行動の中で、いつ起こるか分からない地震に備えて、同じ

ように人々や各種のものを床や壁に固定することはできない。これに対処するためには、建築内部の加速度を減じる方法、免震構造の活用が必須である。免震構造に比べて加速度低減効果は少ないが、大地震時に骨組の損傷が軽減される制振構造の活用も必要である。

1994年ノースリッジ地震を受けた南カリフォルニア大学病院、1995年兵庫県南部地震を受けた計算センターで、免震構造の加速度低減の効果が示され、病院の機能維持が完全に図られ、大規模なコンピュータシステムが完全に守られた。米国では、サンフランシスコ国際ターミナルビル、シリコンバレーのApple本社ビルに使われ、中国、トルコ、イタリア、ルーマニア、チリなどにも広がっている。国内では、国土交通省、経済産業省、外務省、財務省、東京駅などの重厚な建築が免震化され、新築では、多くの病院、計算センター、官庁施設、公共建築、事務所建築、消防施設、さらに大規模な集合住宅から戸建て住宅にも免震構造が使われている。

3. 免震構造の利点と推進

建築基準法では、大地震時に建物重量に $C_0=1.0$ 以上を乗じて求まる水平力が作用するとされている。この大きな水平荷重に対して、構造物の塑性変形能力に期待して骨組の必要耐力をこの $D_s=0.25$ 倍から 0.55 倍まで低減して良いとされている。「靱性」は「損傷」である。損傷を受けた構造物は取り壊されることになりやすい。さらに、大地震時の基礎固定の一般的な建物内の応答は $1.0G$ 以上になり、免震構造の内部の応答の 10 倍を越える。現代社会には建物の中に壊れやすく脆いもの、不安定なものが多くあり、建物が剛強で壊れないとしても、地震直後の社会の機能維持は難しくなる。これらは重要事項であるにもかかわらず、一般の人々に伝わっていない。

免震構造 (seismic isolated structures) の場合、数百年に一度、極めて稀に襲うとされる大地震動を受けるときに生じる一階の層剪断力係数は $C_i=0.15$ 以下である。基礎固定の普通の建築が、数十年の間に 2 、 3 度のように稀に受けるとされる中小地震に対する一次設計用剪断力係数は $C_0=0.20$ 以上、この水平力に対して許容応力度設計が行われている。免震構造の $C_i=0.15$ 以下はこれより小さい。この考察から明らかなように、大地震時の免震構造の基礎、上部構造は、一般建築よりやや小さな水平荷重に対して許容応力度設計を行えば良い。構造体に必要な力学的性能は「一般的な建築よりやや小さな強度」であり「過剰な靱性確保」は不要になる。上部構造の設計が容易になるだけでなく施工性が高いが高まる。この良さを十分に活用すれば、免震構造は一般的な構造より安くできるに違いない。

これまで専門家は、「免震建築は数百年に一度の大地震を受けても被害を受けない技術」であると説明してきた。しかしこの説明を聞いた一般の人々には「遠い将来になるまで役立つことはない技術」だと思われる可能性がある。これについて、2023年に日本建築学会大会で指摘があり、「免震建築には明日から享受できる良さがたくさんある」ことを議論した。

- a. 意匠設計、構造設計、設備設計に際し、地震の少ない国のような自由な設計が可能になる。
- b. 建物内部に激しい揺れが起きないため、快適で美しい建築空間の設計が可能になる。
- c. 免震構造は層間変形角が小さいため、天井、設備配管、間仕切り壁、サッシュ、ガラスなどの設計が自由になり、美しい意匠が可能になる。
- d. 免震構造の大地震動時の設計層剪断力係数は 0.15 以下、基礎固定の建物の中小地震動時（一次設計）の 0.2 より小さいため、1981年までに使われていた許容応力度設計法が使える。
- e. 新耐震設計法の二次設計（保有水平耐力）は不要になり、骨組の増分応力解析も不要になる。
- f. 設計用層剪断力が小さく弾性設計が可能のため、柱本数を減らすことができ、柱・梁の断面を

小さくすることもできる。

- g. 耐震壁や筋違を活用して、剛性と耐力を外郭または中央のコアなどで集中的に確保し、その他の部分の柱や骨組を軽快にすることができる。
- h. 上部構造に偏心がある場合でも、免震層に偏心が無く上部構造が低層のときは、1981 年以前のように弾性的な捩れ変形を考慮すれば良い。
- i. 鉄筋コンクリート構造で求められる靱性保証のための過剰な剪断補強筋などが不要になり、コスト軽減と施工性向上が図られる。
- j. 鋼構造で求められる鋼部材の幅厚比制限が緩和でき、接合部は存在応力で設計できるので保有耐力接合は不要になり、鋼材量の軽減だけでなく施工性の向上が図られる。
- k. 集合住宅、病院や行政施設、計算センター、美術館、事務所、工場、大型倉庫など、大地震直後に機能を維持しなければならない建築の構築に適している。
- l. もし大地震を受けても、機能は維持され、建物を取り壊さなくても良い、建て直す必要もない。そして都市の命も続くことになる。

4. 制振構造の利点と推進

制振構造にはいろいろな取り組みが行われているが、ここで考察する制振構造（damped structures、passive controlled structures）は、骨組の設計を工夫し、上部構造の骨組の弾性限界の変形域を一般の構造物より若干大きく取るようにし、小さな層間変形からエネルギー吸収を発揮する制振部材を骨組の要所要所に組み込む構造法である。結果として、大地震時の応答変形が骨組の弾性変形域を超えないようにすることができる。制振部材（damping members, sacrifice members）は座屈拘束筋違、摩擦筋違、粘性壁、オイルダンパーなど多様であるが、骨組を守るために進んで地震エネルギーを吸収する。大地震時には柱梁などの主要部材には大きな損傷は起きず、制振部材の性能確認を行えば良い。

1990 年代から鉄骨の高層ビルに適用が始まり、高層鉄筋コンクリート構造、最近では低層建築にも応用されている、ほとんど全ての建築に使える技術であり、免震構造と同様、上手に設計すれば、一般の耐震建築より安くできる。近い将来に地震が起こるとされているから、地震後に使えなくなり建て直す一般的な建築に比べ、制振建築は圧倒的に大きな価値がある。

5. 実大免震試験機（E-Isolation）の設立と稼働

免震構造・制振構造に使われる実大の免震部材や制振部材を対象に、大荷重・大変位・実速度の載荷が可能な動的試験機は 20 年以上前に米国、続いて中国、イタリア、トルコなどの地震国に設置され稼働しているが、日本には設置されていなかった。これが可能な実大免震試験機の実現は、構造設計者、橋梁技術者、設計事務所、建設会社、免震部材・制振部材のメーカーだけでなく、土木工学や建築学に関わる研究者の大きな夢であった。日本学術会議土木工学・建築学委員会（委員長：米田雅子 2017-2020）は提言（2019 年 4 月 16 日）の発出によって、実大免震試験機の必要性を強く主張してきた。この動きは国土交通省、文部科学省および内閣府に広がり、試験機の具体的な設置への機運が高まっていった。

実大免震試験機に関する研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所）の中の一つの課題として公募が行われ、これに採択されたプロジェクトである。こ

の研究は、京都大学の高橋良和を研究代表者、東京工業大学の竹内徹、吉敷祥一、大成建設の篠崎洋三などの多くの研究者や技術者の叡智を結集し、防災科学技術研究所と E-Defense のご協力を得て実施された。具体的には、構造計画研究所の設計監理のもと、大成建設、三菱重工機械システム、日鉄エンジニアリング、黒沢建設などの先進企業の努力と協力によって 2023 年 3 月に予定通りに兵庫県三木市の E-Defense の南の隣地に完成した。

実大免震試験機的设计・製作・施工に携わった研究者および多くの関連企業の 300 人を超える熱意ある人々は、地震国日本には免震構造・制振構造の進展と信頼性確保が重要であるとの共通認識を持ち、世界一の性能の実大免震試験機を設置する目標に向かって真剣に取り組んだ。



写真 1 兵庫県三木市に完成した実大免震試験機 (E-Isolation)

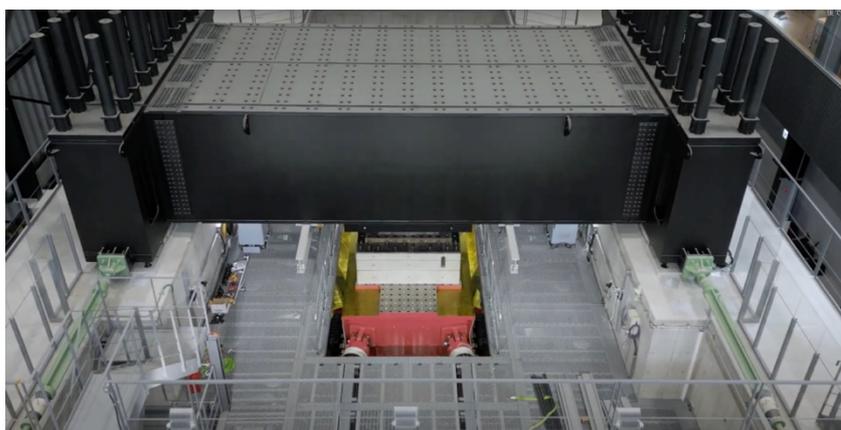


写真 2 上加振台 (赤色) と反力梁 (黒色) の間に試験体を設置して、試験する

6. 免震構造および制振構造の安全性確保と信頼性向上

免震構造、制振構造は、これらに組み込まれる積層ゴムやオイルダンパーなどの免震部材や制振部材が工業製品であるという点が一般の構造物と異なる。これらの部材に使われる鋼材、ゴム、粘性体などの材料が仕様書通りの性能や性質を持っていることは大前提であるが、免震部材や制振部材は複雑な

工程で生産されるため、加工精度、接着、組立の正確さ、最終的な調整によって各製品の性能が発揮される。これらの性能は丁寧な製作によって発揮されるものであり、鋼材やゴムの材料の性質がわかっていても、組み立てた一つ一つの製品の性能の良否を数値解析で調べることは原理的にできない。

メーカー各社は不良品の出荷を起こさないために、免震部材や制振部材の全製品を対象にして、製品に損傷を与えない範囲の荷重、変位、速度の载荷条件で出荷試験を行なっている。この载荷条件は、各社の試験機に能力の限界もあり、免震部材や制振部材が大地震に発揮すべき荷重、変位、速度に比べて小さく、設計者や施工者が期待している製品の性能を十分に調べているとは言えない。

実大免震試験機（E-Isolation）はこの限界を打破するために、2023年春に設置された公的試験機である。この新しい試験機を活用することにより、免震部材・制振部材の大地震時を想定した大荷重・大変位、実速度の試験が可能になり、新しい免震部材や制振部材の開発研究はもちろん、各種の製品の第三者試験が可能になり、免震構造および制振構造の安全性の確保と信頼性を圧倒的に向上することができる。

7. 動的性能認証制度（一般財団法人免震研究推進機構）の紹介

一般財団法人免震研究推進機構では、免震装置及び制振装置(材料、部材などとも言われています)を対象とした「動的性能認証制度」を2024年7月1日より開始致しました。2023年3月に完成した実大免震試験機(E-Isolation)を用いて、第三者機関として免震装置・制振装置の実大・実荷重・実変位、実速度の動的試験を行い、これらの動的性能を動的性能認証委員会によって把握・検討し、「動的性能認証書」および「試験報告書」を提出します。これによって、免震装置・制振装置、さらに免震構造・制振構造の信頼性を向上し、これらの構造を国内外に普及することを目的としています。

「動的性能認証制度」には、次に述べるように (a)動的性能認証と (b)個別動的性能認証の2種類を設けています。年月の経過により両者の試験実績が蓄積され、免震装置・制振装置への信頼と理解が深まることを期待します。

(a) 動的性能認証

メーカーの依頼により、免震装置・制振装置の動的性能を認証します。同じ型番の3体の製品について、実大免震試験機を用いて各種の静的・動的試験を行います。これらの試験結果からこの製品の動的性能を認証します。認証は3年間有効とし、定期的に動的性能認証を行うことによって、この免震装置・制振装置の長期に亘る信頼性を確保することができます。

製品のシリーズの中にはいくつかの型番があり、これらは大きさなどが異なります。シリーズに属する製品群の動的性能は、認証試験を行った製品の動的性能から推定できると考えますが、この推定はメーカーの技術者、これらを用いる設計者に進めて戴けるようお願い致します。

(b) 個別動的性能認証

個別の建築プロジェクトに設置される免震装置・制振装置の動的性能を認証します。実際の建築物に組み込まれる製品の一部を選び、実大免震試験機を用いて動的性能を把握し認証します。これにより、この免震構造・制振構造の信頼性をより高めることができます。大きな建築プロジェクトの場合、設置する製品と同じ製品を2体ほど多く製作し、(a) 動的性能認証と同じように多様な限界試験を行うことは、この免震構造・制振構造の信頼性確保のためにさらに意義があります。

8. まとめ

トルコでは、2013年に地震地域に建設される大規模病院は免震建築が義務付けられ、2023年の大地震時に早速大きな成果を挙げた。中国では2022年に保育園から各種の学校、老人施設、病院、官庁施設など、大地震時に機能が失われると社会が混乱してしまう建築物を対象にして、免震構造・制振構造が義務付けられている。現在では、毎年4千棟以上の免震ビルが建設されている。

能登地震では、金沢市の石川県立図書館と七尾市の恵寿病院が免震構造で建てられていて、地震時、地震後に建物の機能維持が完全にできたことは有名である。国内には既に数千棟の免震構造、さらに多くの制振構造があるが、今後は地震後に機能維持が求められるすべての公共建築、そして多くの民間建築に免震構造または制振構造が使われることを期待する。

日本学術会議提言の抜粋（2019年4月16日に発出）

提言

免震・制振のデータ改ざん問題と
信頼回復への対策



平成31年（2019年）4月16日

日本学術会議
土木工学・建築学委員会

要 旨

1 作成の背景

2015年3月に、東洋ゴム工業(株)の高減衰積層ゴム免震支承のデータの改ざん問題が公表され、154棟の免震構造の建物について新しい製品への取り替えのための大掛かりな工事が進められている。同時に、行政と構造設計者・施工技術者は、このような製品の試験データの改ざんが起きないように、製作工場の立会い検査を充実させるなどの対策を講じてきた。それにもかかわらず、2018年10月にKYB(株)、(株)川金コアテックの免震構造用オイルダンパー及び制振構造用オイルダンパーについて、出荷検査のデータの改ざん問題が再び公表された。データが改ざんされたダンパーが組み込まれた建物は、可能性のあるものを含めると約1100棟に上っている。

世界に先駆けて地震国日本において研究が進み、市民に期待され、実用化を進めてきた免震構造と制振構造の信頼性が揺らいでいる。いずれの製品も建物に組み込まれているため、再検査や取り替えは容易でなく、建物の居住者・使用者を不安に陥れ、建設業界・設計業界、不動産業界に混乱を招いている。免震・制振技術に向けられる市民の目は厳しくなっている。

データ改ざんの被害者・関係者にとって、抜本的な対策が喫緊の課題となっている。土木工学・建築学委員会では、積層ゴム免震支承及びオイルダンパーなどを含めて、本問題の背景を調べ、免震・制振構造の信頼回復と今後の健全な発展のために必要な対策を検討し、この提言を纏めた。

2 現状及び問題点

大地震後に続けて使えることを目指した免震構造や制振構造を作るためには、設計通りの免震支承や制振用のダンパーなどの製品の性能を担保することが必須であり、そのために確実な試験による性能検査が必要である。製造や検査に関わる技術者を性善説にもとづき暗黙に信頼し、製品の性能確認を、主に製造会社の自社出荷検査に任せてきたことに、本問題発生の根本的な要因がある。

実物の製品を用いた免震支承やダンパーの性能確認について、わが国では製造会社所有の試験機を用いた全数検査が長年にわたり行われている。これは必要なことであるが、実大の製品を地震時の実際の状況に近い形で試験できる装置がないために、ほとんどの場合、低速度、縮小モデル、単純な加力法、限られた繰り返し回数の試験を基に、種々の方法で外挿して実大製品の性能を推測している。このように、各製造会社独自の方法による自主検査は、データ改ざんが行われる温床になりやすく、外部の技術者は改ざんに気付くことができず、発覚を逃れてきた。

これらの製品の取り替え工事は、多大な労力と巨額の費用がかかると言われ、たとえ製造会社がこの全額を負担するとしても、この仕事は、所有者、居住者、設計・施工の関係者だけでなく日本にとっての大きな損失であり、二度と同じことが起きないための対策が必要である。

3 提言の内容

(1) 第三者の試験施設を用いた抜き取り検査の実現

工業製品の性能を確認するシステムとして、製造者と利害関係のない第三者の試験施設を用いて抜き取りの性能試験を行うことは一般的に行われていることであり、国際的にも工業製品の品質管理の常套手段である。免震支承やダンパーについても、製造会社による全製品の自社検査に加えて、建設中の建物に組み込まれる前の製品の一部を、発注者、設計事務所、建設会社などの指示により任意に抜き取り、第三者による客観的な試験を行い、製品の性能を担保することが必要である。免震・制振装置は海外からも輸入されており、輸入品について国内の第三者による抜き取り試験の実施体制を整備することが必要である。

(2) 大型製品の実大試験施設の導入

免震支承やダンパーの性能検証をするためには実大試験が必要である。米国、中国、台湾、イタリアには本格的な試験施設があり、発注者、設計事務所、建設会社などの指示に対応して、実物大の製品の動的試験を行うことが可能である。

その一方で、日本には実大動的試験設備がなく、免震構造や制振構造の安全確保に必要な、免震支承やダンパーの実大試験施設の整備が急がれる。

日本は免震・制振技術で世界をリードしてきたが、現状のままでは国際競争力の低下も懸念されるため、研究や技術開発の面からも整備が望まれる。

(3) 共用の大型試験設備を持つ検査機関の設置

共同利用を前提とした大型試験施設を保有する第三者検査機関の設置が必要である。この設立にあたっては、官民連携で、国の支援に加えて、民間から広く資金を募ることを考える。検査機関が設置されると、製造会社とは独立に、免震支承やダンパーの本格的な試験を行うことができる。発注者、設計事務所、建設会社などからの要望により、実際に設置される前の免震装置やダンパーそのものを任意に抜き取って持ち込み、試験を行うことができる。

なお、2019年1月15日に日本学術会議公開シンポジウム「免震・制振データ改ざんの背景と信頼回復への道筋」を開催し、この提言案を説明し、会場の300名を超える参加者と議論し、アンケート調査を行った。総合討論では本提言に賛同する意見が多く出され、アンケート回答者(275名)の約83%が第三者機関の必要性に、約90%が大型試験施設の必要性に賛同し、本提言の実現が広く期待されていることが明らかになった。