

首都の人命と生活を守るためになすべきことを探る ～都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究～

防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター センター長 中島 正愛

1. はじめに

サブプロジェクト2では、実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を用いる実大実験により、大地震に対する都市施設の被害を予測し、防災・減災対策法を提示することで、社会の地震に対する安全性を高める研究に取り組んでいます。E-ディフェンスは、旧科学技術庁が兵庫県南部地震における被害を受けて建設した世界最大の振動台です（図1）。重さ1200tの構造物を震度7の地震動で揺さぶることができます。

政治、経済、医療、情報発信など、社会経済活動の基幹を担う重要施設の安全性の確保、機能性の維持は、高機能化が進む都市、おいては日本全体の地震防災において極めて重要な意味を持ちます。本サブプロジェクトは、医療施設の耐震性と機能、高層建物の耐震性と機能をモデルケースとして、そうした問題を実験的研究から浮き彫りにし、かつ対策法を提示することで、実際に被害が生じる前に予防することの重要性を訴えます。

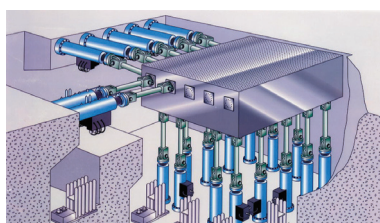
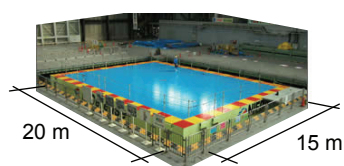


図1 E-ディフェンス

2. 医療施設の実大震動台実験

都市部に大地震が発生した場合、建物の倒壊を防ぐことは重要です。一方、被災後の政治、経済、

医療、情報発信等社会活動の停止は、被害の拡大やその後の復興にも多大な影響を与えるため、これら都市機能を災害後も継続させることも不可欠な課題です。そこで、大地震時における重要施設の機能保持に関する研究を進めることとし、特に大地震時における救急救命、被災後の生命維持の拠点となる医療施設の機能を震災時にも保持するための研究を行います。

医療施設を模擬した鉄筋コンクリート造4階建の試験体（図2）（高さ約18m、各階床面積80m²(8m×10m)）を建設し、1階に撮影室、情報通信室、2階に診察室、人工透析室、スタッフステーション、3階に手術室、集中治療室（ICU）、4階に病室、情報通信室を配置しました。室内にはX線撮影装置、人工透析装置、手術用機器、医療棚、情報通信機器など、実際に用いられている様々な医療機器類を、床・壁固定、床置き、キャスター付き（ロック又はフリー）など、それぞれの通常の使用状況にあわせた設置方法で設置しました。さらに、屋上には新旧2つの高架水槽を配置し、複数材質の給排水管、形式の異なるスプリンクラーを設置しました。

建物の構造形式として、試験体を震動台に直接固定する従来の“耐震構造”に加え、建物の揺れを抑えることを意図して積層ゴムを介して建物を支持する“免震構造”の2つの形式を採用しました。入力地震動として、短周期成分が卓越している地震動（以下、短周期地震動）としてエルセントロ波（6弱）、兵庫県南部地震で観測されたJMA神戸波（6強）、関東地震において推定されている横浜波（6強）を、長周期成分が卓越している地震動（以下、長周期地震動）として東海・



図2 実大医療施設試験体



図3 耐震構造時被害状況（短周期地震動）

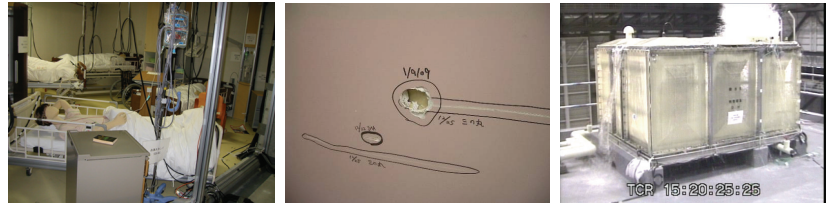


図4 免震構造時被害状況（長周期地震動）

東南海地震で想定される名古屋三の丸波（5強）を採用しています。

耐震構造での実験結果として、短周期地震動では、床の応答加速度が入力地震動の加速度に対し約2～3.4倍に増幅され、最大で $2,000\text{cm/s}^2$ 以上に達しているものも確認されました。室内被害としては、ほとんど全ての機器が移動し、床や壁に金物等で固定されていない機器（CT スキャナ撮影部、手術台など）および什器の移動、棚内に納められていた医薬品等の物品の散乱、スライド式扉の脱落、機器の転倒・落下などが確認されました。また手術台のマネキン人形(重さ45kg)が台上で回転してずり落ちそうになっており、大地震時に人体が受ける振動の激しさを物語っています（図3）。このような状況下では、高度な医療行為は当然のことながら通常の医療行為ですら即座に実施することは困難であると推測されます。

一方、長周期地震動では、床の最大応答加速度は $200\sim 250\text{cm/s}^2$ 程度で、増幅率としては、1～1.3倍であり、室内被害としてキャスター付き機器・ベッドでキャスターをロックしていないものが約50～80cm移動した。また、屋上の高架水槽にスロッシングが発生し、新旧両方の水槽から水が噴出する現象が確認されました。

免震構造に関しては、短周期地震動において、

床の応答加速度が入力加速度の $1/3\sim 1/2$ に低減され、高い免震効果が発揮されており、構造的な被害もみられませんでした。室内の被害としては、キャスター付き機器・ベッドでキャスターをロックしていないものが約50～60cm程度で移動しており、病院機能に大きく影響する被害は確認されませんでした。

しかし、長周期地震動においては、床の応答加速度が免震構造でありながら約1.3倍に増幅してしまいました。これは、免震建物が共振し応答が増幅してしまったためで、この共振により建物はゆっくりゆらゆらと大きく揺れるのが観測されました。そのため、室内の被害としては、直接床に設置された機器やキャスターをロックした機器には特に問題はなかったものの、キャスターをフリーにした機器は、室内を走り回り、多くのものが1m以上移動しており、最大で3m以上移動した機器もありました。また、移動による衝突や転倒する機器もみられました（図4）。これら機器の激しい衝突により、手術室壁パネルと病室壁ボードなどが大きく損傷するのも確認されています。キャスター付き機器を有効に移動しながら使用する手術室では、激しく機器が移動し混乱する様子が観測されています。屋上階に設置した新旧の高架水槽はスロッシングの影響により、天板に

設けられた蓋およびベンチレーターから水が噴出するとともに、旧水槽では蓋の止め具部分の破損により、蓋が開き大量の水が噴出する状況となりました。

3. 長周期地震動を受ける高層建物の被害と対策

現在、東海地震などの海溝型巨大地震の発生が高い確立で予測されています。首都圏に数多く建設されている高層建物は、このような大きな地震に見舞われた経験がありません。想定以上の地震動に対して、骨組の損傷状況、内壁や配管などの建物を構成する要素の被害状況を大規模な実験により確かめます。実験では、いままでに最も多く建設された高さ 80m 程度の鉄骨造の高層建物を想定しました。図 5 に実験の様子を示します。まず、震動台の上に、4 階建ての鉄骨造の骨組を用意し、その上に 3 個のコンクリートの錘を載せました。コンクリートの錘の間に積層ゴムを挟むことで高層建物と同じようにゆっくりと大きく揺れる動きを再現しました。試験体の屋上には、ペントハウスを設けて室内空間を用意しました。

以降では、震動台を長周期地震動で揺さぶった時に、骨組および居室に生じた被害を順番に述べ

ます。揺れを受けると骨組はゆがんで、柱が傾きます。設計では、上下の床の水平変位の差をその階の高さで除した変形角を最もよく参照します。図 6 に長周期地震動(名古屋三の丸波)の揺れと、比較のため、設計で想定する地震動の揺れを併せて示します。長周期地震動を受ける超高層建物の骨組みは、設計で考えられていた変形の数倍もの大変形を一気に受けるのではなく、設計で考えられていた値の 1.5 倍程度の変形を長時間に渡って何度も繰り返し受けることがわかります。骨組の中では、特に大きな力を受ける梁の根元に変形が集中しますが(図 7)、長周期地震動を受けてここが何度も押したり引いたりされるうちに、溶接部分で鉄骨が切れてしまいました。梁の根元にそのような損傷が生じると、大規模な補修が必要になります。その数や程度によっては、継続して使用することを放棄しなければいけない状況も出てくるかもしれません。現在、その対策技術として最も期待されるのがダンパーによって共振を抑える方法です。

耐震改修を主題とした実験を昨年 9 月に実施しました(図 8)。ダンパーは、実験において、骨



図 5 振動台上の試験体

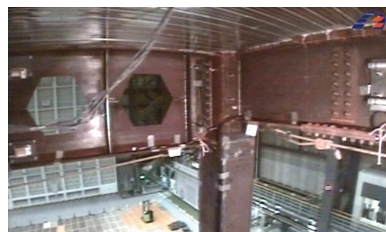


図 7 大きな力が加わる梁と柱の接合部分

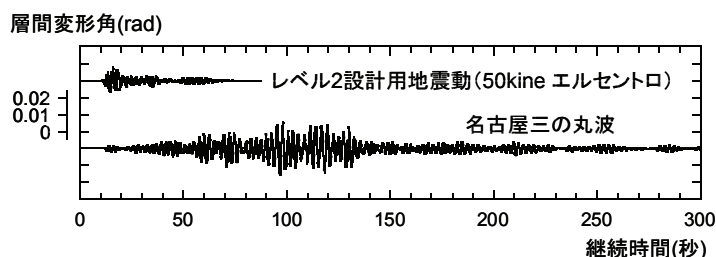


図 6 対策の無い骨組が受けた変形角



図 8 オイルの圧力を利用するダンパー

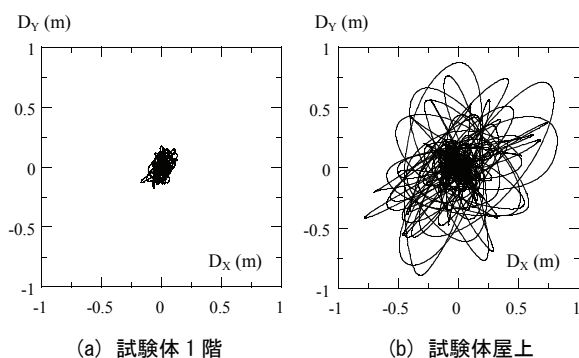


図9 床の水平2方向の動き



図10 高層階（19階相当）の室内

組が吸収していたエネルギーの8割近くを肩代わりして、骨組の損傷を大きく減少させました。一連の内容は、設計や耐震改修のための技術資料として纏められる予定です。

高層建物での床の動きは高層階では数倍に増幅されます。屋上に設置した居室には19階相当揺れが与えられました（図9）。ここでは、政府機関や自治体、オフィスビル関係者やマンション住民に防災資料を提示することを目的として、多くのビデオ映像を収録しました（図10）。オフィスの書棚は、揺れの開始から十数秒後に転倒し始め、デスクに覆いかぶりました。衝突を繰り返すキャスター付きのコピー機は周辺に多くの損傷を与え続けました。キッチンにおいて冷蔵庫が転倒し、食器・調理器具は滑落、飛散し凶器に変わりました。このような揺れのなかで、室内の人は立っていることができず、衝突してくる家具、機器等を、無防備に上半身で受けてしまいます。一連の実験では、家具や機器に転倒防止対策、ストッパーなどを施した、全く同じタイプの居室を用意して、高い効果を確認しています。

4. まとめ

（1）医療施設

医療施設実験より、短周期地震動が襲ってきた場合、免震構造は非常に有効であり、高い機能保持性能があることが確認されました。しかし、免震構造の苦手とする長周期地震動の場合は、構造的な被害はなくとも、室内状況等の結果から、思わぬ室内被害や機能低下が発生し、折角費用を費やして耐震性の高い免震構造にしても地震対策の効果が半減してしまうことが考えられます。

耐震構造ではもちろんのこと、耐震性の高い免震構造といえども動きやすい機器の固定など最低限の地震対策は必要であることが明らかになりました。

今後は、大地震時から多くの病院機能を守るため、今回取得できた実験データによって明らかになった知見、情報や実験映像データを広く公開していく予定です。

（2）高層建物

針金を1回曲げただけでは白っぽくなるだけで、抵抗する力は変化しません。しかし、同じ箇所を何度も繰り返し、押したり戻したりしているうちに、とうとうそこで切れてしまいます。同じことが、長周期地震動に共振する高層建物の骨組に起きる可能性が確認されました。高層階は前後左右に1メートル以上、数分間にわたって動き続けます。対策がなければ、室内の人たちは命の危険にさらされます。大都市の超高層建物群が一度にこのような状況に陥れば、被害の大きさは計り知れません。こうした被害を防ぐために、耐震改修を念頭に柱梁の接合部分を補強する方法、揺れを抑えるダンパーを組み込む方法に関する検討を継続して進めています。居室の被害は、家具等に適切な対策法を講じることにより激減します。

本サブプロジェクトの実験映像は、下記のホームページにて公開されています。

<http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>