

2) 都市施設の耐震性評価と機能保持

独立行政法人 防災科学技術研究所 佐藤 栄児

1. はじめに

実大三次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）は、重さ 1,200t の構造物を震度 7 の地震動で揺さぶることができる実験施設です。サブプロジェクト②では、このEー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。

首都圏を中心とする政治、経済、医療、情報発信に関わる社会活動は、震災時はもちろん、震災後においても維持・継続されなければならない重要な機能です。本サブプロジェクトでは、医療施設と超高層建物をモデルケースとし、医療施設の機能保持のための対策手法および超高層建物の耐震性を、Eーディフェンスを活用し総合的に検証しました。

2. 震災時における重要施設の機能保持に関する研究開発

2. 1 目的

大地震被災後の政治、経済、医療、情報発信等に関わる社会活動の停止は、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、これら都市施設・機能を災害後も継続させることは不可欠な課題であり、最近では官公庁および民間機関において災害時等に備えたBCP（Business Continuity Plan:事業継続計画）の策定なども注目されています。

本研究テーマでは、大地震時に機能保持が求められる重要施設のなかで、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を対象として、その機能を震災時にも維持するための研究を行ってきました。医療施設の機能保持性能向上を目的として、Eーディフェンスを用いた医療施設の実大実験を実施し、そこで得られた様々な知見から、地震に備える医療施設の在り方を取りまとめてきました。

2. 2 医療施設の実大実験

医療施設を模擬した鉄筋コンクリート造 4 階建ての試験体(写真 1)(高さ約 18 m、各階床面積 80 m²(8 m×10 m))を建設し、診察室、人工透析室、手術室、病室などを配置しました(図 1)。室内には人工透析装置、手術用機器、医療棚など実際に用いられている様々な医療機器等を、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。建物の構造形式として、建物を震動台に直接固定する従来の“耐震構造”に加え、免震装置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。この免震構造は兵庫県南部地震(1995)以降、医療施設への導入が進んでいます。

実験では、複数の地震波で試験体を加振しましたが、以降では、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸波の最大加速度を 80 %にした震度 6 強の短周期地震動、



写真1 試験体全景

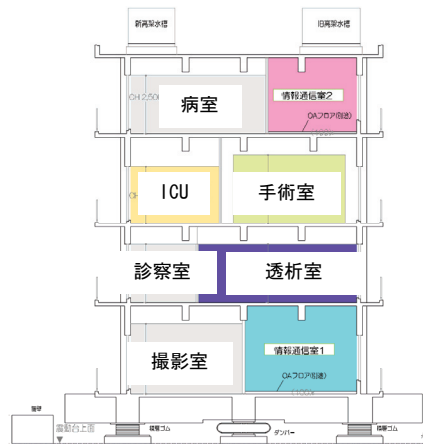


図1 配置図（試験体断面図）

および東海・東南海地震で名古屋市三の丸地区において想定されている長周期地震動、三の丸波(震度5強)を入力した実験結果を紹介します。

2. 3 既存医療施設の機能保持性能評価

(1) 耐震構造の実験結果

短周期地震動の加振では、床の最大応答加速度は約 2~3.4 倍に増幅され、最大で 2,000 cm/s^2 以上に達することが確認されました。構造的には建物の固有周期が伸びましたが、致命的な損傷は発生しませんでした。実験後の状況を写真2に示します。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が台上で回転し滑落寸前となっており、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。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、長周期地震動の加振では、床の最大応答加速度は 200~250 cm/s^2 程度で、構造的な被害はほとんどなく、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 50~80 cm 移動した程度でした。

(2) 免震構造の実験結果

短周期地震の加振では、高い免震効果が発揮され、床の最大応答加速度は十分に低減され、建物の構造的な被害もほとんどみられません。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平均で 60cm、最大で約 1 m 移動しましたが、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。

一方、長周期地震動の加振では、免震構造でありながら、床の最大応答加速度が約 1.3 倍に増幅してしまい 250 cm/s^2 程度となりました。これは、免震構造の固有周期と地震動が持っている最もパワーのある周期（卓越周期）とが近接しているため、免震建物が共振し応答が増幅してしまったためです。しかし共振しても応答加速度が 250 cm/s^2 程度であるため、



写真2 耐震構造における短周期地震波加振後の室内状況

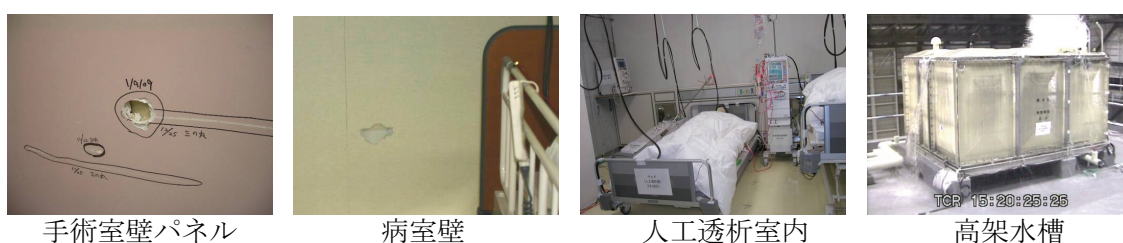


写真3 免震構造における長周期地震波加振後の室内状況

建物の構造的な被害はほとんどみられませんでした。実験後の室内の状況を写真3に示します。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無かったものの、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1 m以上移動しており、最大で3 m以上移動しているものや、移動中に転倒した機器もみられました。また、移動した機器がその周りにある機器などに激しく衝突し損傷する状況が多数観測され、手術室壁パネルと病室壁ボードなどの大きな損傷は、100 kg以上の機器が衝突したことにより発生しました。またキャスターをフリーにした透析装置が移動し床上のケーブル・チューブ類につまずき転倒するのが観測されました。スライド式扉は、激しく開閉し、扉の枠およびストッパーなどに衝突し、扉、枠、ストッパーの破損などがみられました。

免震構造であるから大丈夫という過信は危険であることが印象づけられる結果でした。

2. 4 機能保持向上技術に関する評価

前項の実験結果をうけ、地震時の医療施設の室内被害を低減する対策を検討し、その対策を施した場合の震動台実験を再度実施し、地震対策の効果と限界について確認しました。

地震時における医療施設の様々な被害を軽減させるための対策として、機器類の確実な固定が最も有効な方法と考えられますが、医療現場における様々な状況に対応するため、恒久的な機器類の固定の実施は、現実的でないとも考えられます。そこで、使用状況も考慮し、①キャスター機器の簡便・高度な固定対策、②機器の壁面等への簡易固定対策、③

衝突対策のための壁面の防護、④免震床・機器免震による対策、などの地震対策を検討しました。主な地震対策状況を写真4に示します。これらの地震対策を、実大医療施設の試験体内の機能に対して施し、震動台実験を実施しました。実験後の主な室内状況を、写真5に示します。免震構造の場合、写真からもわかるように、前述した地震対策を適切に施すことにより、キャスター機器の大きな移動により発生した被害を軽減させられることが確認でき、短周期地震動および長周期地震動においても、施設の機能は十分保持されることが確認できました。

一方、耐震構造に関しては、入力地震動の大きさのみで被害様相を評価できません。実験では、建築物の耐用年数中に一度以上受ける可能性が大きい地震動である、JMA 神戸波の最大速度を 25 cm/s に調整した地震動(最大加速度 275 cm/s²、震度 6 弱)を入力しました。その時の床の最大応答加速度は約 650 cm/s²でしたが、地震対策が有効に働き、ほとんど機能的に問題となる被害はありませんでした。一方、床応答加速度が、1 G(980 cm/s²)を超える階(写真5の耐震構造の場合)では、そうでない階と比較し、地震対策を施しても対策機器の破損などにより機器の移動、物品の散乱等がみられました。すなわち、床の応答加速度が約 500 cm/s²~600 cm/s² までであれば、地震対策を施すことにより、機器の移動、転倒、物品の散乱等はほとんどみられず、災害後の医療活動を継続できることが確認されました。

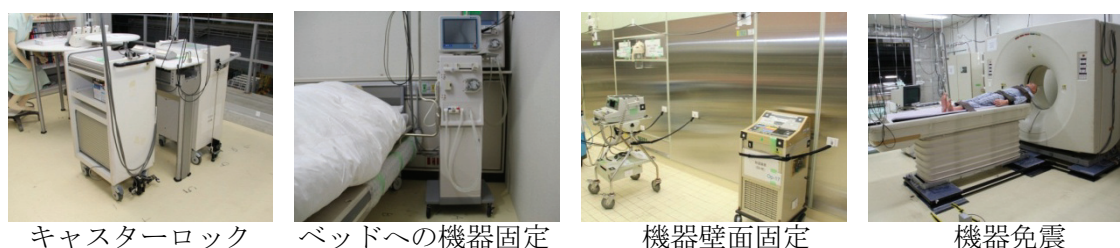


写真4 主な地震対策

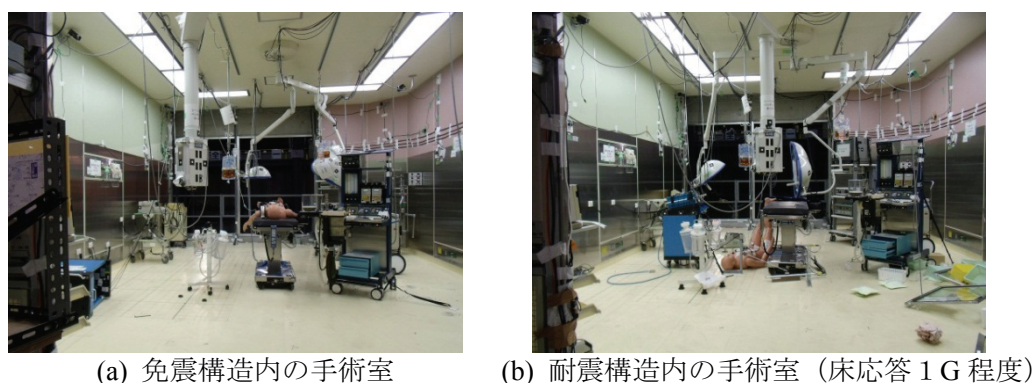


写真5 実験後の室内状況

3. 長周期地震動による被害軽減対策の研究開発

3. 1 目的

超高層建物群は、都市社会の中核機能を担っており、大地震による超高層建物の被害は、

社会全体に甚大な影響を与えることが予測されます。既存の超高層建物群が、重度の損傷および機能損失を受ければ、大規模な補修や、場合によっては取り壊しも避けられない事態に陥ります。こうしたことを未然に防ぐ観点から、超高層建物の耐震性能を見直し、耐震性能が不足する場合については、骨組補強によって塑性変形能力を確保するとともに、ダンパー等の導入によって建物の応答を低減する制振対策が望まれます。居住者の安全性について、大地震時において超高層建物に大振幅の床応答が生じると、オフィス空間や住宅は、家具什器の散乱状況等によって極めて危険な状況に陥ることが危惧されます。超高層建物内のオフィス空間、住宅について、大地震時の応答状況を総合的に検証し、被害様相を同定するとともに、対策の効果について検証する必要があります。本研究テーマでは、以上の問題に取り組み、長周期地震動による被害の軽減に資することを目的としています。

3. 2 実験概要

実験では、構造骨組と居室を超高層建物から部分的に切り出して、なるべく本物と近くなるように製作することで、実際の揺れのなかで超高層建物が被る損傷を再現しました。実験概要を図 2 に示します。実験は骨組の耐震性を検証するシリーズと室内空間の被害を検証するシリーズに分かれます。骨組実験では、地震時に最も大きな力がかかる下層部分の骨組における構造被害を対象としました。室内実験では、大きな揺れの発生する室内における被害を対象としました。いずれも実験対象以外の建物の揺れを積層ゴムでコンクリート板を挟む実験装置によって表現し（以降、縮約層と呼びます）、長周期地震動を入力した際に全体が超高層建物と同等の動きをするように工夫しました。

3. 3 超高層建物の骨組の耐震性能に関する実験

本実験では高さ約 80 m の鉄骨造建物を想定しました。骨組および縮約層については、超高層建物の平均的な剛性と強度になるように調整しました。実験における層間変形角の時刻歴波形を図 3 に示します。設計用地震動であるエルセントロ波において、層間変形角の最大値は、設計で規定された 0.01 rad よりも 10 %程度小さくなりました。図における長周

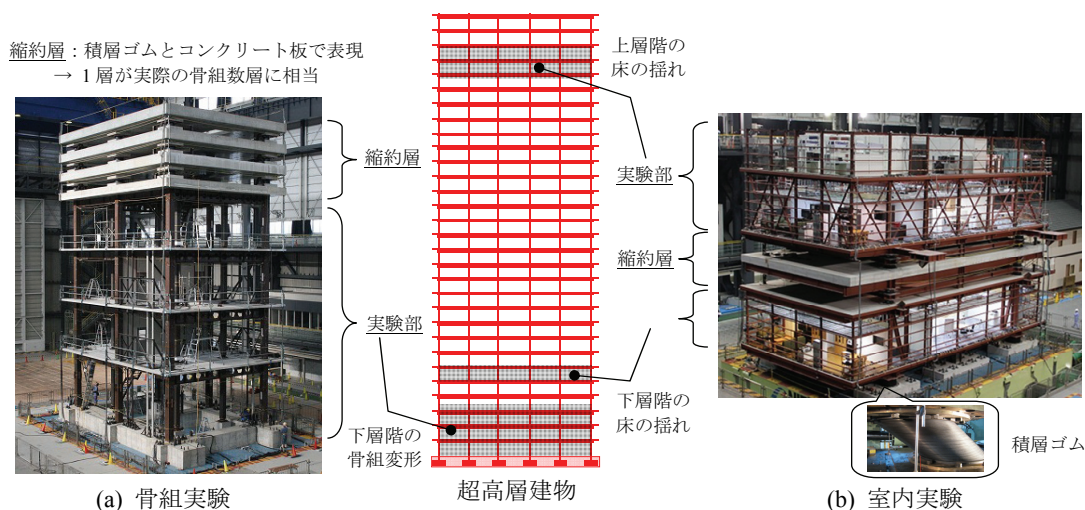


図 2 超高層建物に対する実験概要

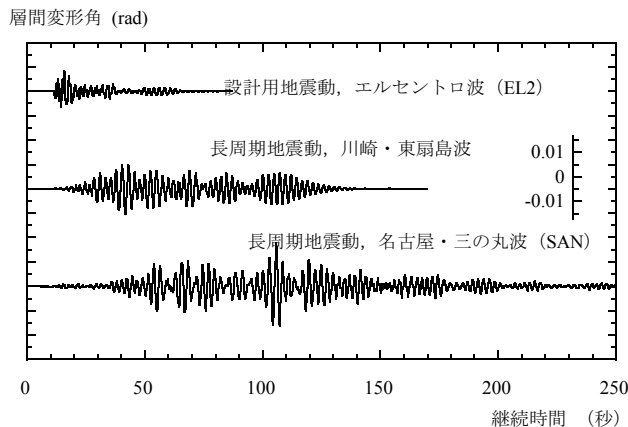


図3 骨組に生じた層間変形角の時刻歴波形



図4 梁端接合部

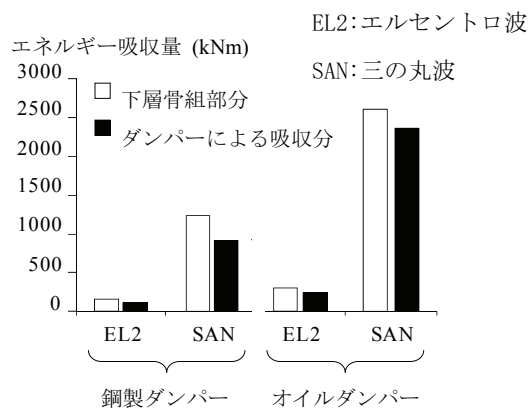
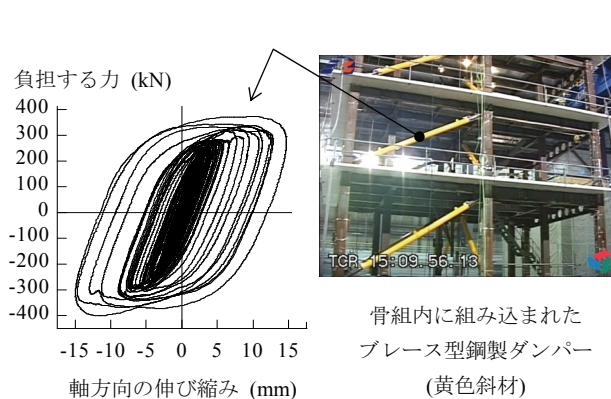


図5 ダンパーを用いる制振補強がもたらすエネルギー吸収効果

期地震動である東扇島波、三の丸波からを受ける超高層建物の骨組は、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倍程度までの変形を長時間にわたって何度も繰り返し受けることが分かりました。変形は梁端接合部(図4)に集中し、三の丸波の加振中に梁の下フランジが切れてしまうものが出てきました。針金を1回曲げただけでは抵抗する力は変化しませんが、同じ箇所を何度も繰り返し曲げているうちに、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超高層建物の骨組において起きる可能性があるのです。

次に、超高層建物の耐震改修をテーマとして、ダンパーを組み込んで揺れをおさえる制振化および梁端接合部の溶接補強による骨組の変形性能について検証しました。骨組内で斜めに配した部材(ブレース)は、骨組が変形する際に伸び縮みします。そこに組み込まれたダンパーは、図5左にあるように負担する力と伸び縮みする変形の関係において大きなループを何度も描きます。それぞれの面積がダンパーの吸収したエネルギーです。実験では、図5の右にあるように下層骨組部分で吸収したエネルギーの70%以上をダンパーによって負担できることが示されました。また、梁端接合部については下フランジを補強により変形性能は大幅に向上しました。これらの補強方法を組み合わせる等の対策を講じることが長周期地震動による被害軽減のためには大切です。

3. 4 超高層建物の室内被害に関する実験

本実験は高さ 120 m の 30 階建て相当の超高層建物の、長周期地震動による揺れで発生する室内被害の再現を目的に行いました。試験体の上層階と下層階を縮約層で連結し、上層階では 30 階建ての 27 階相当の揺れが、下層階では 6 階相当の揺れが発生するように、試験体を作成しました。試験体は約 20m×10m の広い平面と階高 3.6m の鉄骨骨組みで作成し、システム天井や間仕切り壁、空調設備を組み込んで室内空間を作成しました。床は高さ 5cm の二重床で仕上げをタイルカーペットとし、オフィス家具等を設置しました。

入力地震動として、①平成 7 年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測された記録の最大加速度を 25 %にした地震動 (JMA 神戸 25%波)、②平成 23 年東北地方太平洋沖地震で首都圏地震観測網 MeSO-net (サブプロジェクト①で整備) の西新宿観測点で観測された本震の記録(西新宿本震 100%波)、③首都直下地震で想定される長周期地震動特性を考慮した地震動として、西新宿観測点における東北地方太平洋沖地震の余震 (震央:茨城県沖、M:7.6) 記録の最大加速度を 330 %に拡張した地震動 (西新宿余震 330%波) を用いました。

試験体の床応答の大きさを最大加速度と震動台の揺れに対する倍率で表 1 に示します。各実験での室内の状況は、JMA 神戸 25%波・西新宿本震 100%波を入力した場合にはオフィス家具の移動・転倒は発生しませんでした。西新宿余震 330%波を入力した場合には上層階 (27 階相当) で家具の転倒や、キャスター付家具の移動・転倒が発生しました。

表 1 試験体の床応答最大加速度 (※震動台の値に対する倍率)

入力地震動	震動台 (1階相当)	下層階(6階相当)		上層階(27階相当)	
		加速度	倍率※	加速度	倍率※
JMA神戸25%	221cm/s ²	300cm/s ²	1.36	143cm/s ²	0.65
西新宿本震100%	98cm/s ²	125cm/s ²	1.28	136cm/s ²	1.39
西新宿余震330%	127cm/s ²	194cm/s ²	1.53	268cm/s ²	2.11



写真 6 上層階部分の室内の状況 (西新宿 330%波入力時)

写真 6 に、西新宿余震 330%波を入力した場合の上層階の室内の状況を示します。オフィス部分では、キャスター付の椅子や袖机は大きく移動しましたが、間仕切り壁にバンドで

移動防止の対策をしたコピー機は大きな移動が抑えられ、その効果が発揮されました。住宅部分では、棚類を簡単なL字金物で壁に固定するだけでも転倒防止効果が確認されました。一般的に耐震性能が優れている超高層建物ですが、長周期地震動によりゆっくり大きく共振した際には、室内被害が発生する可能性があります。しかし家具等への簡単な対策を施すことにより、室内被害を軽減できることが判りました。

4. おわりに

サブプロジェクト②では、震災時から震災後においても機能維持されなければならない重要施設である医療施設と、都市社会の中核機能を担っている超高層建物を対象として、大地震におけるそれらの建物の被害様相を予測し、防災・減災のための対策の提示を目的として、E-ディフェンスを用いた実大実験による研究に取り組んできました。

医療施設の実験では建物が耐震構造の場合と免震構造の場合を取り上げ、室内の医療機器に地震対策を実施しない場合と実施した場合とを、それぞれ比較検討しました。耐震構造で医療機器に地震対策を実施しない医療施設では、物品の落下・散乱、ドアの脱落などの被害に加えて、施設内にある無固定のほぼすべての機器が移動や転倒する被害が発生し、大規模災害時にすぐさま必要となる災害医療をはじめ、CT等を用いる高度な医療行為も実施できない状況であり、病院の機能を著しく低下させることが明らかになりました。また、免震構造で地震対策を実施していない場合では、短周期地震動に対しては医療施設の機能を十分保持できることが確認できましたが、長周期地震動に対してはロックされていないキャスター付き医療機器の移動等による被害が顕著であり、医療機器の手術室の壁への衝突による破損等は医療施設特有の衛生保持機能が低下する深刻な被害が確認されました。

一方、機器等に適切な地震対策を施した場合には、免震構造であれば、地震後においても十分に施設の機能を保持できると考えられます。耐震構造の場合にも地震対策は有効に働き、稀に発生する地震動においては機能的に大きな問題となる被害は発生しませんでした。極めて稀に発生する地震動においては、施設の機能を健全かつほぼ無損傷に保つためには、まだ多くの課題があると考えられます。

長周期地震動を受ける超高層建物の構造躯体を再現した実験では、超高層建物の一部を取り出した、世界的にも過去に例のない手法による試験体を用いて、実際の揺れのなかで超高層建物が被る損傷、被害様相を表現しうる振動破壊実験を実施しました。超高層建物の骨組の弱点を見極めるとともに、効率的な対策手法を提案し、耐震性能を定量的に検証することで耐震補強を促進する知見を得て資料として纏めました。また超高層建物の室内被害に関する実験では、長周期地震動を受ける超高層建物の上層階の揺れを再現する室内空間を作成し、オフィス空間や住宅の地震時の被害様相を映像等により明らかにするとともに、対策方法とその有効性を検証しました。

本研究の成果は、様々な局面で幅広く利活用できるように、最新情報を踏まえて、防災科研のウェブサイト (<http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>) にて公開する予定です。