

鉄骨造高層建物のE-ディフェンス振動台実験結果

1. 研究背景・目的

東北地方太平洋沖地震は、東日本を中心に未曾有の大被害をもたらしました。首都圏でも事業や生活の継続が長期間妨げられ、大都市の脆弱性が顕在化しました。

その教訓から、文部科学省は、委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクトー都市機能の維持・回復に関する調査研究ー」を立ち上げ、その一環として、「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」と「建物健全度評価のためのモニタリングシステム開発」を目的に、鉄骨造高層建物を対象に徐々に破壊を進行させ最終的には崩壊させ、建物の余力等を検証する振動台実験を実施しました。(図1)

研究の成果目標は以下のとおりです。

- 1) 建築基準法で想定される以上の想定外地震動に対し、建物の余力がどの程度かを検証するため、都市の基盤をなす高層ビルが崩壊するまでの余裕度を定量化。
- 2) 被災建物が健全か否かを速やかに判断する方策として、被災後の建物の健全度を即時モニタリングし、損傷の位置・程度を把握する仕組みを構築。

2. 実験内容

1980~90年頃の設計施工を対象とした鉄骨造18層建物の1/3試験体(1×3スパン、平面5×6m、高さ25.3m、重量約420トン)(写真1)を製作しました。振動台実験の試験体としては世界最大規模のものです。

この試験体を実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)(図2)で「南海トラフ三連動地震動」として作成した波による加振を行いました。この波は、国土交通省「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」(平成22年12月)の手法を用いて、南海トラフ三連動地震が生じた場合の大都市圏における地震動評価を行い、それらの平均を概ね包絡するような模擬地震波として作成した波(三連動平均レベル、擬似速度応答スペクトル(減衰定数5%)^{注1)} pSv=110cm/s、継続時間約8分、マグニチュード8.7相当)です。(図3)

加振のスケジュールは、建築基準法で要求される地震動相当の波(告示極稀地震動相当レベル)を入力し、試験体の基本的な振動特性と設計入力レベルでの応答の確認を行いました。さらに、三連動平均レベルを基準に、三連動最大級レベル(1.64倍)、それを超えるレベルとして2倍、2.3倍・・・と徐々に加振のレベルを大きくし、最終的には試験体を崩壊させて、どの程度の余力があるのかを実測データを収集することにより検証しました。

今回の実験では、徐々に進行する建物の破壊を的確に検知する可能性と有効性を確認するために、新たに開発した”健全度即時評価モニタリングシステム”の検証実験を同時に行いました。この検証実験では、(1)各層に設置したセンサによる、建物全体系一層レベルの損傷の推定と、(2)接合部ごとに稠密に設置したセンサによる、部材レベルの損傷の推定の有効性確認を行いました(図4)。

なお、試験体の基本的な振動特性や崩壊余裕度の明確な把握のために、加振は1方向としました。また安全性の確保のため、防護フレームで試験体の完全崩壊を保護しました。

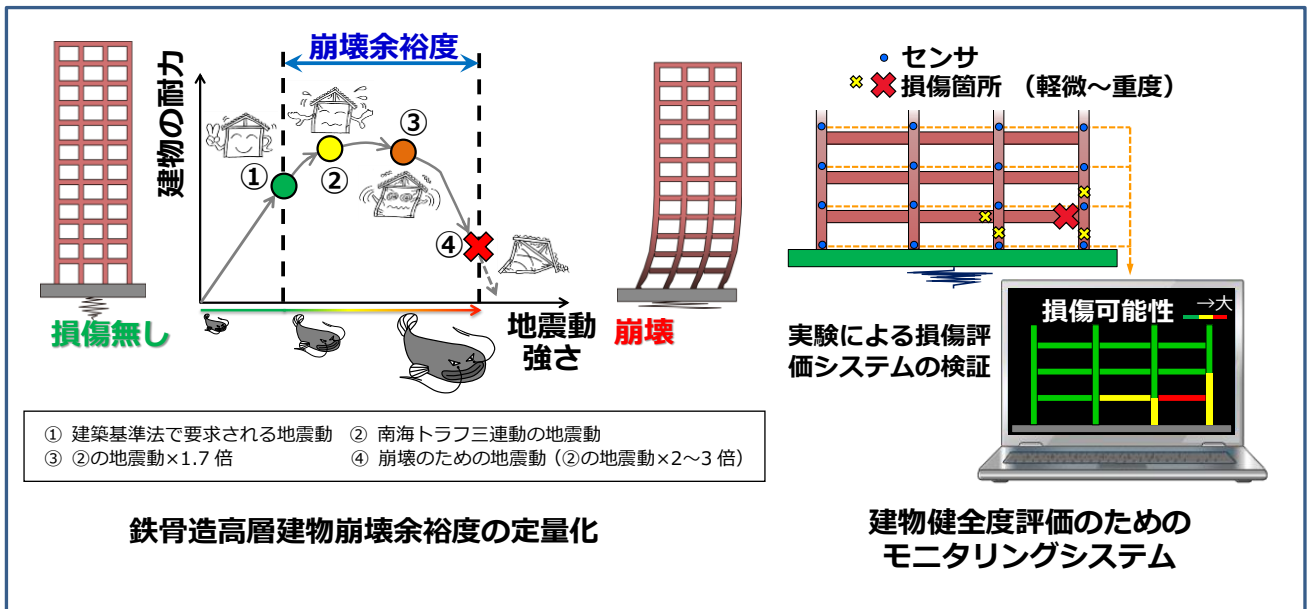


図1 実験目的の概要

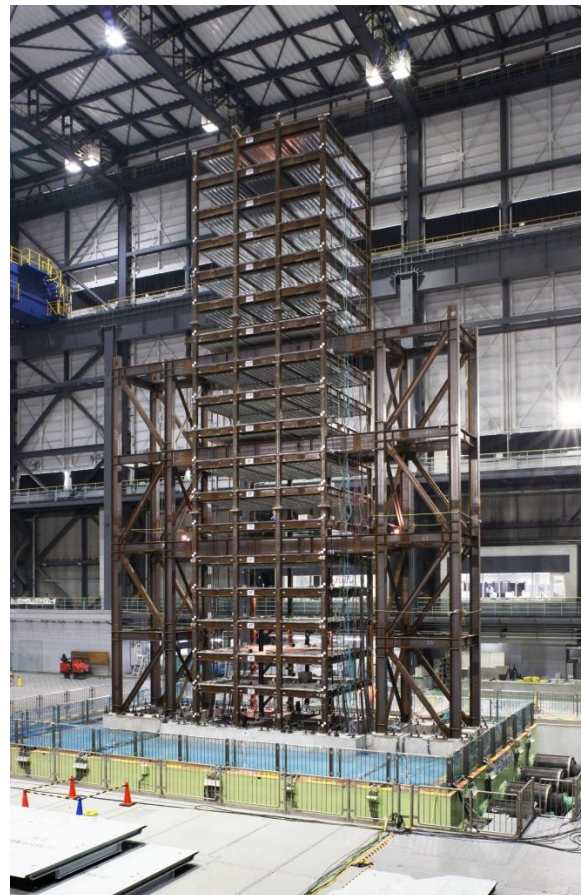
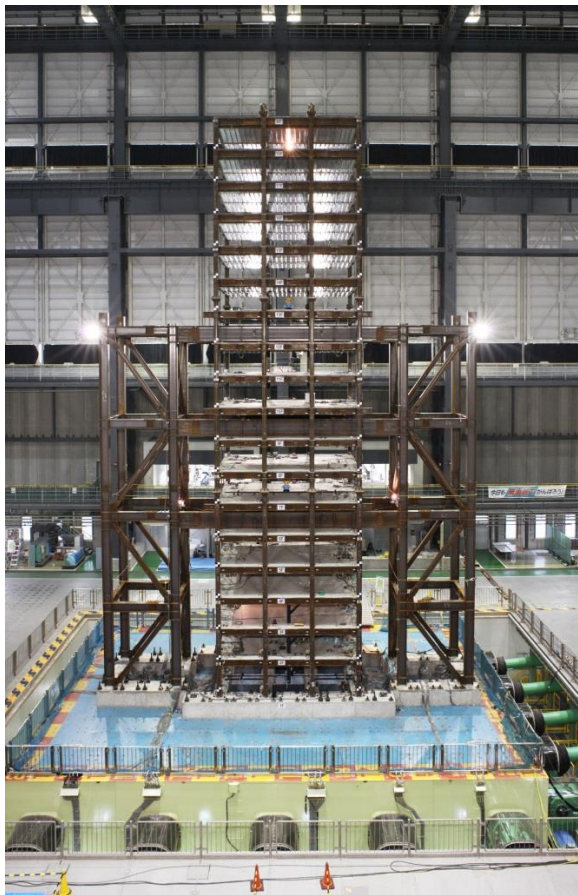


写真1 試験体概要

(鉄骨造18層建物・1/3縮小試験体；1×3スパン,平面5×6m,高さ25.3m,重量約420t)

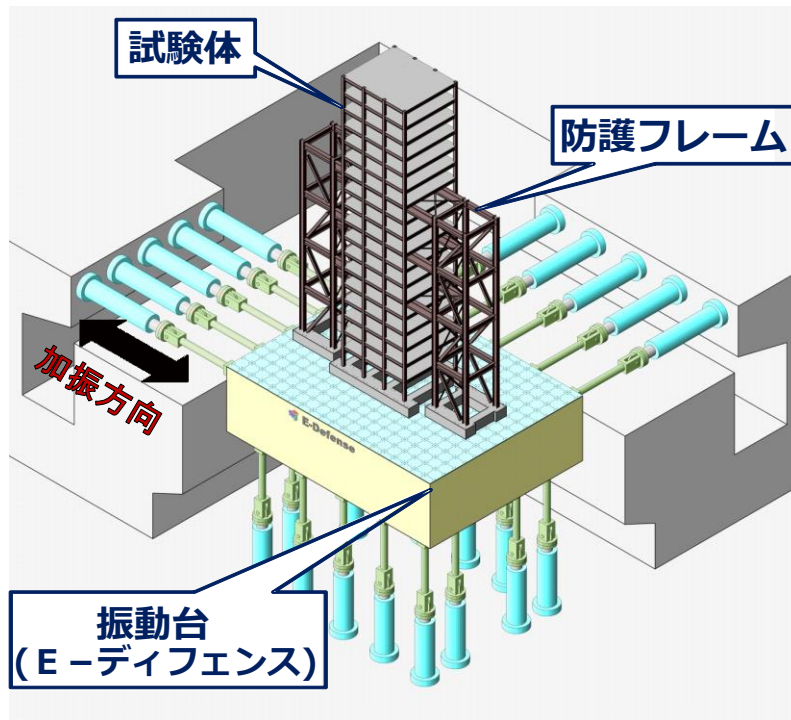
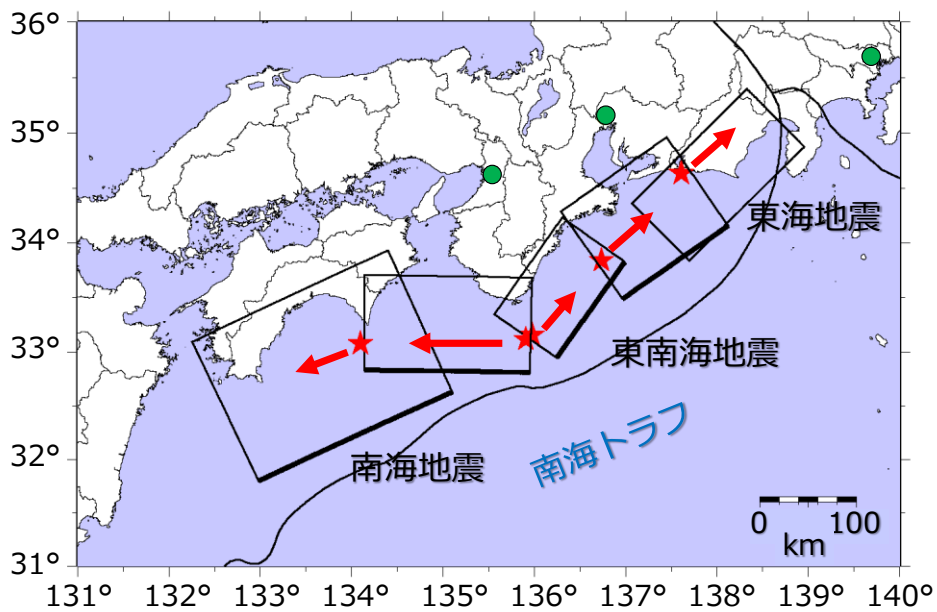
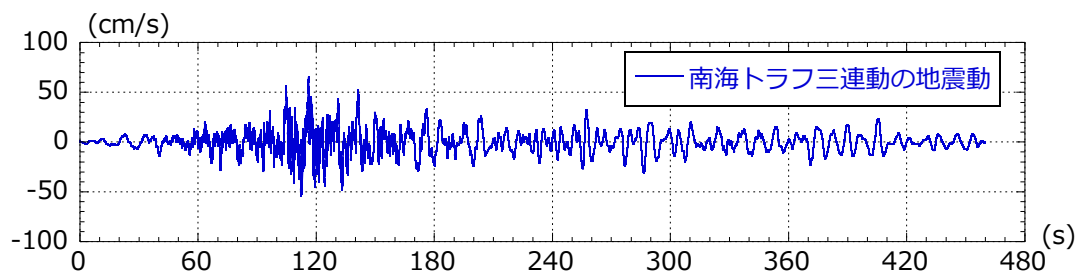


図2 振動台実験の概要

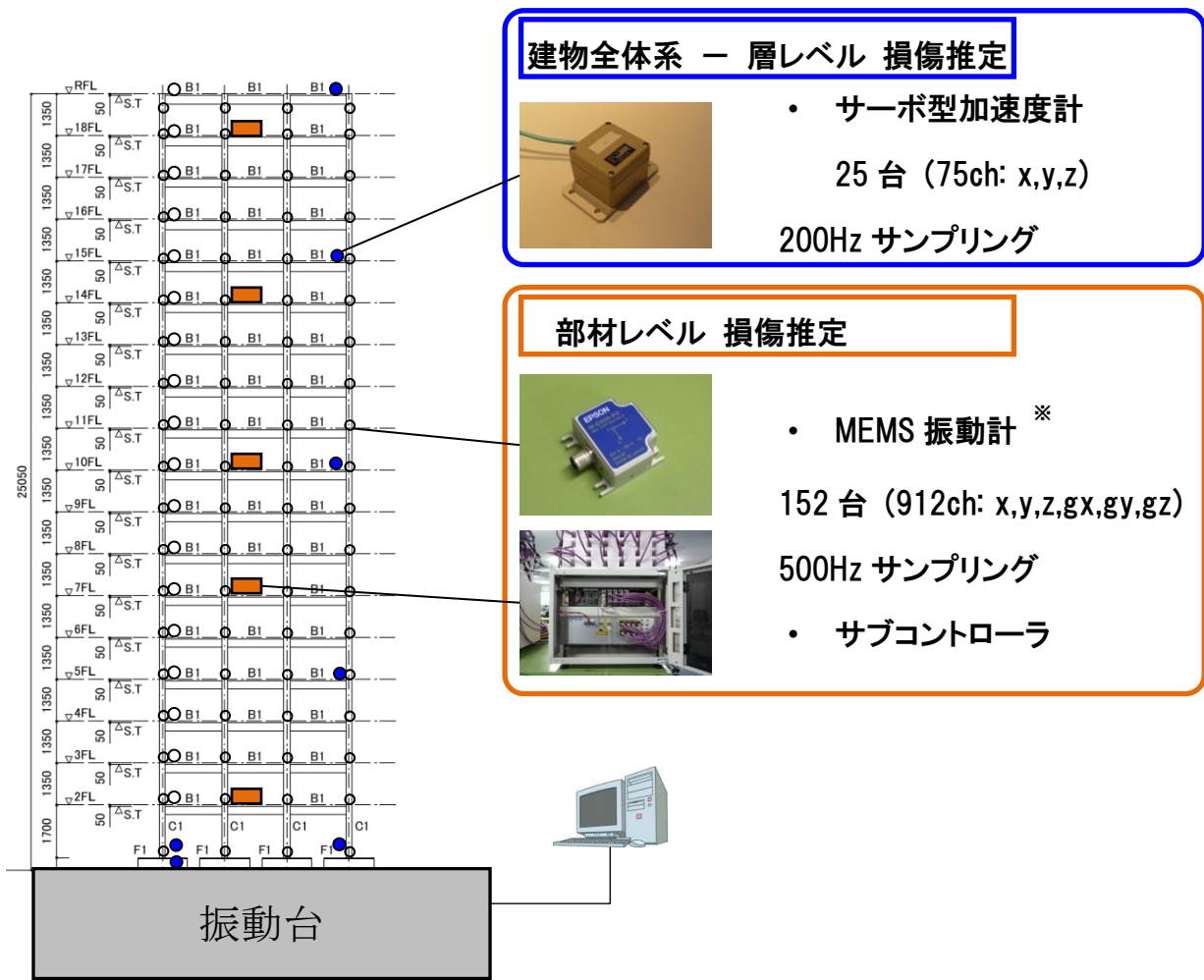


(a) 南海トラフ三連動地震の震源モデル



(b) 入力地震動波形 (三連動平均レベル、 $pSv=110\text{cm/s}$)

図3 振動台実験の入力地震動



* MEMS(メムス、Micro Electro Mechanical Systems): 微小電気機械素子およびその創製技術

図 4 本実験で用いる”健全度即時評価モニタリングシステム”

3. 実験結果

(1) 結果の概要

加振レベルと実験結果を以下に示します。(表1)

入力加振レベルは、実大での減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルにおける周期0.8秒以上の値(pSv値)で表現しています。

表1 実験経過と損傷状況

実験日	入力加振レベル(倍率)	地震の想定	頂部変位	最大層間変形角(生起階)	試験体の損傷状況
12月9日	40cm/s (0.37倍)	告示極稀地震動の1/2レベル	8.5cm	1/170 (14階)	弾性挙動(損傷なし)
	81cm/s (0.74倍)	告示極稀地震動レベル	15.3cm	1/110 (3,14階)	梁端降伏(2~4階の一部)
	110cm/s (基準=1倍)	三連動平均レベル	20.6cm	1/94 (14階)	梁端(2~7階の一部) 1階柱脚降伏
12月10日	110cm/s (1倍)	三連動平均レベル	21.7cm	1/91 (14階)	同上
	180cm/s (1.64倍)	三連動最大級レベル	30.8cm	1/62 (11階)	梁端(2~14階)降伏 梁端(2~5階)亀裂発生
	180cm/s (1.64倍)	三連動最大級レベル	31.7cm	1/55 (11階)	梁端(2~14階)降伏 梁端(2~5階)亀裂発生
12月11日	220cm/s (2倍)	三連動想定最大超えレベル	33.0cm	1/53 (11階)	梁端(2階)下端破断
	250cm/s (2.27倍)	三連動想定最大超えレベル	31.6cm	1/45 (3階)	梁端(2~3階)下端破断
	300cm/s (2.73倍)	三連動想定最大超えレベル	37.5cm	1/31 (2階)	梁端(2~5階)下端破断
	340cm/s (3.1倍)	三連動想定最大超えレベル	49.0cm	1/16 (2階)	梁端破断上階に進展 1階柱脚局部座屈
	340cm/s (3.1倍)	三連動想定最大超えレベル	56.3cm	1/13 (2階)	梁端破断上階に進展 1階柱脚部座屈進展
	420cm/s (3.8倍)	三連動想定最大超えレベル	64.7cm	1/10 (2階)	下5層の全梁端破断 1階柱脚部座屈進展
	420cm/s (3.8倍)	三連動想定最大超えレベル	100cm	1/6 (2階)	下5層の全梁端破断 1階柱脚破断
	420cm/s (3.8倍)	三連動想定最大超えレベル	—	倒壊	下5層の全梁端破断 1階柱脚破断

(2) 入力加振レベル毎の実験結果

a. pSv110cm/s入力時（三連動平均レベル）

2～7階の梁端の一部が降伏^{注2)}し、1階の柱脚に降伏が生じましたが、塑性化^{注2)}の程度は小さく、梁端破断^{注3)}等も生じていません。最大層間変形角^{注4)}はほぼ1/100以下で、損傷は継続使用可能なレベルであると判断されます。

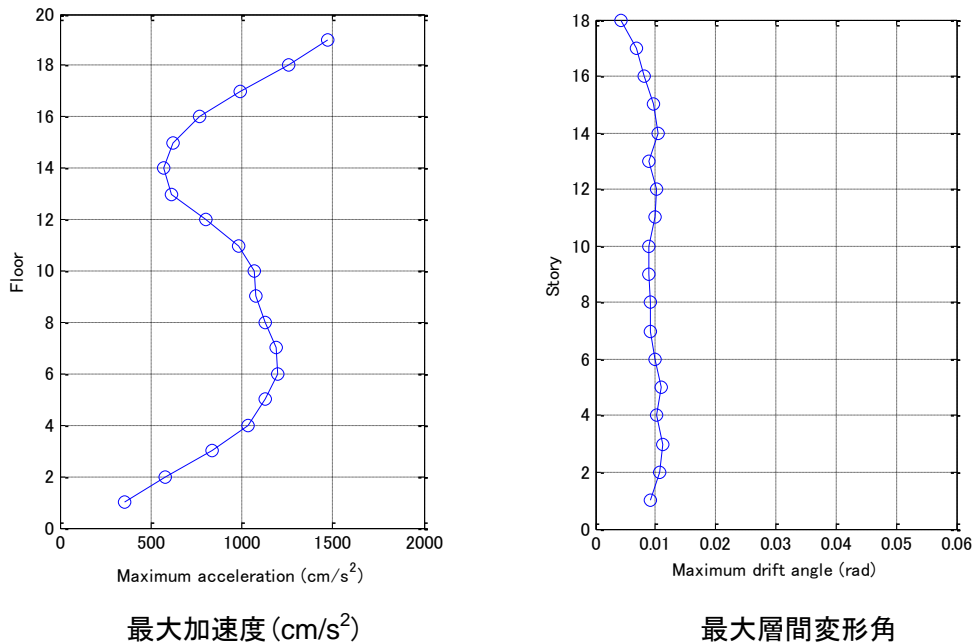


図5 実験結果（三連動平均レベル pSv=110cm/s）

b. pSv220cm/s入力時（三連動最大級を超えるレベル＝三連動平均レベルの2倍）

2～14階の梁端部が降伏し、2～3階の梁端部下端が破断しました。最大層間変形角は1/100を大きく超え、11階で1/54を記録しましたが、この状態でも、構造体は崩壊にはまだ十分に余裕のある状態で、直ちに崩壊・倒壊につながる状態ではないと判断されました。ただ、天井・外壁・内装などの2次部材や設備などに大きな被害があるものと予想されます。

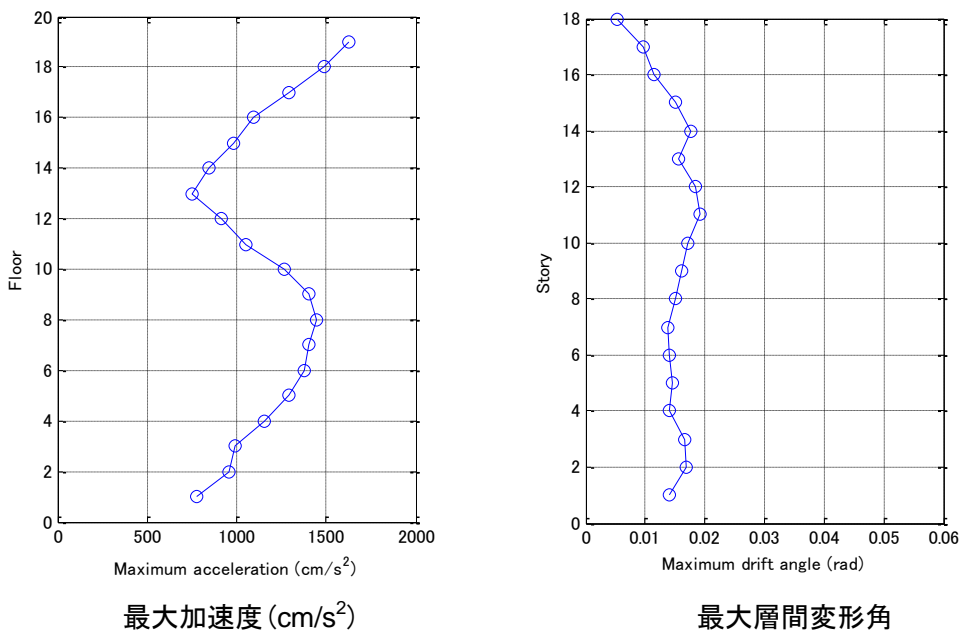


図6 実験結果（三連動最大級を超えるレベル pSv=220cm/s）

c. pSv340cm/s 入力時（三連動最大級を超えるレベル＝三連動平均レベルの 3.1 倍）

2～5 階以上の梁端部が破断し、1 階の柱脚が局部座屈^{注 5)}を起こしました。柱の局部座屈はこれが進展すれば自重を維持できなくなる危険な損傷です。最大層間変形角も 2 階で 1/19 となり、特に下 5 層に大きな変形が集中して生じています。この状態は、構造体自体はやっと立っているだけの状態であり、建物内から即刻避難すべき状況であると考えられます。

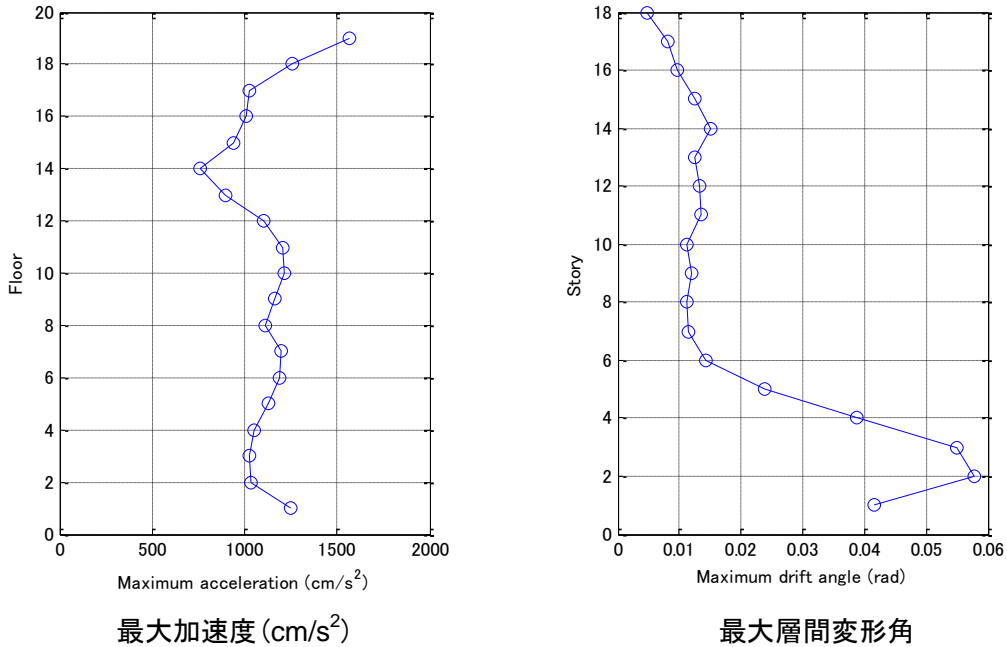
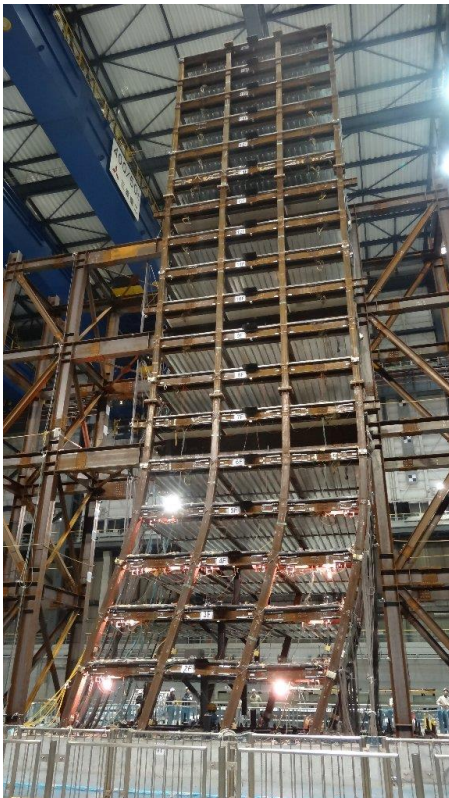


図 7 実験結果（三連動最大級を超えるレベル pSv=340cm/s）

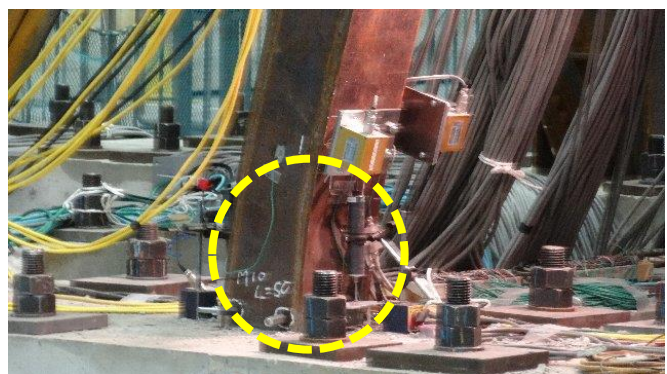
d. pSv420cm/s 入力時＝倒壊（三連動最大級を超えるレベル＝三連動平均レベルの 3.8 倍）



最終崩壊形（試験体は倒壊して防護フレームに寄りかかっている）



梁端フランジの破断



1 階柱脚の局部座屈（四角い柱がへこんでいる）

(3) まとめ

今後も詳細な検討を継続しますが、現時点で得られた知見は以下の通りです。

- ・1980～90年頃に設計された標準的な18階建てクラスの超高層ビルは、三大都市圏において想定される平均レベルの南海トラフ地震に対して、構造の損傷がほぼ継続使用可能な状態に留まることがわかりました。
- ・また想定される最大級の南海トラフ地震を超えるレベル（平均レベルの2倍）に対しても2～3階の梁端に破断は生じるものの、まだ倒壊までには十分な余裕があることがわかりました。
- ・それをさらに上回る平均レベルの3.1倍の地震に対しては、下層から中層にかけて、梁の端が破断し、かつ1～5階が大きく変形して、柱にも局部的に座屈が生じ、構造的な安全性の限界に近い状態になることがわかりました。ただし、完全に崩壊したのは、さらに大きな入力である平均レベルの3.8倍の地震時でした。
- ・今回の実験により、超高層建物の最終崩壊状態を確認することができ、そこに至るまでの部材の損傷の進行の仕方や、梁の破断や柱の局部座屈、破断などの部材の損傷と建物全体の安全性の関係を把握することもできました。
- ・また、モニタリングシステムにおいても最終倒壊までの各種データが取得されており、層の塑性化状況の把握や、部材の損傷状況を把握するためのシステム構築に関する貴重なデータを得ることができました。
- ・このように鉄骨造超高層ビルのE-ディフェンスでの崩壊に至るまでの実験で、極めて多くのデータや新知見を得ることができました。詳細な分析結果は今後報告書に取りまとめる予定ですが、その際の詳細なデータ分析やシミュレーション解析により、さらに多くの新知見が得られるものと思われれます。これらの知見は今後の超高層ビルの設計や地震に対する安全性の評価に大いに役立てられます。
- ・来年度にはRC造の実験が予定されているほか、基礎地盤系及び建物-杭-地盤系についても研究に取り組んでおり、今回の実験同様、その成果が大いに期待されます。

尚、実験時収録した動画の一部を <http://www.toshikino.dpri.kyoto-u.ac.jp/>にて公開しております。

用語解説

注1：擬似速度応答スペクトル

速度応答スペクトルは、1 質点モデルに地震動を入力した時の応答最大速度を固有周期ごとに表わしたものだ。今回は、質点モデルの減衰定数を5%とした場合の応答最大加速度を角振動数 ω (オメガ) で除して算定しているのだから、この場合には減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルと呼ばれる。

注2：降伏、塑性

梁、柱等の構造部材に加えた力を解放した時に、元の変形0の状態に戻らなくなる現象を降伏と呼び、その後の状態を塑性と呼ぶ。

注3：梁端破断

長周期地震動により、梁が多数回の繰返し変形を受けると、最終的に梁の下フランジに写真に示すような破断が生じる。さらに、変形が進むと、破断は梁の上端にまで進展する可能性がある。



注4：最大層間変形角

地震応答解析結果の応答最大層間変位を階高で割った値。超高層ビルの設計では、極めて稀に起こる地震動に対して、これが1/100以下になるように設計される。

注5：局部座屈

柱が、加わる荷重に対して波打つように変形して、耐力が低下する損傷。柱に局部座屈が生じて変形が進行すると、自重を保持できなくなり倒壊につながる可能性が高まる。

