超高層鋼構造建物の構造材および非構造部材の性能評価と損傷モニタリング技術の開発

名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻 長江研究室 鳥谷尾駿佑

1. 序論

超高層建物は、主要部材の塑性化を許容している。一方現 在、設計用地震動の強さを超えた地震動を生む地震が発生 すると予測されている。そうした中、建物の終局挙動を把握 し、継続使用の可能性を逐一確認するためのメソッドは極 めて重要といえる。

そこで本研究では、耐震性能に重要な影響を与える柱梁 接合部の部材切り出し実験から破断までの終局挙動を解明 し、数値解析により梁端損傷が与える実建物崩壊挙動の影 響へと展開する。

2. 柱梁接合部破壞実験

2.1 実験概要

本実験に使用する試験体は、多くの初期超高層建物に採 用された柱梁接合部の接合形式に則して製作した。鋼構造 骨組の外柱とそれに接合する梁を反曲点位置で取り出した 部位を想定し、なおかつ一つの試験体で静的および動的の2 種類の実験を行えるよう、十字型とした。

梁はH形鋼H-500×200×16×10(SM490A)とし、柱は内ダイ アフラムを入れた角形鋼管□-400×400×16(BCR295)で代用し た。梁フランジは柱表面に完全溶込み溶接により接合した。 梁ウェブは、シアープレートを介した高力ボルト摩擦接合 で、シアープレートは柱に両面隅肉溶接で接合した。スカラ ップはアールをとらない半径 35mm の 1/4 円形とした。図1 に試験体の様子を示す。柱の両端を振動台上でピン支持し、 梁の先端には反力床に固定されたロードセルとピンで接合 した。振動台に表 2 に示す変位を入力し、実質的に梁端載 荷とした。

2.2 損傷過程の追跡

試験体の損傷過程を追跡する。23 サイクル目(層間変形角 にして 3/200)に降伏モーメントに達し、27 サイクル目(層間 変形角 3/100)に最大耐力に達した。フランジ破断及びシア ープレート全塑性時の曲げモーメントの和として算出した 最大曲げ耐力に対して実験値は 0.96 倍であった。

25 サイクル目(層間変形角 1/50)でフランジ溶接部の破断 開始に伴う負勾配が認められ、27 サイクル目で片方のフラ ンジ溶接部が完全に破断した。溶接部断面の破断状況から は、溶接部端点および第1パスにあたる範囲が溶け込み不 足であることが確認された。

2.3 数値解析モデルの概要

作成した解析モデルは、前述の試験体を模擬した 2 次元 フレームモデルである。柱と梁は、試験体の柱梁部材の中心 線で構成される線材で、弾性棒としてモデル化している。パ ネルゾーンにあたる部分は剛域とし、柱梁それぞれの材端 には回転ばねを設けている。柱梁接合部における終局挙動 のモデル化の適切性を検討するため、この回転ばねに与え る復元力特性を変化させながら、実験と同等の効果を与え



(a)全景 図 1 試験体 単位:mm

(b)破断の様子

る振幅を与えて数値解析を行った。検討に用いた復元力特 性モデルは、耐力低下や破断を表現できるイバラメディナ クラウィンクラーモデル(IMK モデル)を採用している。

2.4 モデル化の適切性の検討

モデル化の適切性を定量的に評価するため、履歴ループ の合致性の他に部材が吸収したエネルギーを評価の指標と した。今回のモデル化では、本実験で得られた履歴性状がピ ンチングに類似することから、バイリニアモデルの他、IMK ピンチングモデルの採用を考えた。耐力低下や負勾配の有 無に着目して8種類のモデルの検討を進めたが、その中で 最適と思われる条件で得られた結果を図2に示す。ひずみ 硬化係数を 0.12 とし、耐力低下、負勾配を考慮したピンチ ングモデルである。最大耐力はどのモデルでも大きく外れ ることはなかったが、耐力低下を考慮した分接合部の劣化 が表現できている。バイリニアでは実験に対し最大で6倍 の過大評価となってしまった吸収エネルギーも、ピンチン グの効果によって最大でも 1.7 倍までに抑えられている。

2.5 E-ディフェンス実験への適用

2013年2月、超高層建物の1/3スケール模型で接合詳細 を模擬した18層鉄骨造骨組の試験体を用いて、東海・東南 海・南海の三連動地震動を模擬した地震動に対する挙動解 明のため、E-ディフェンス実験が行われた⁵。試験体の全景 を図3に示す。過去の研究4で本実験データをもとに構築 された2次元フレーム解析モデルを展開し、材端回転ばね に弾塑性モデルを導入して動的解析を行った。導入したモ デルはひずみ硬化係数 0.01 のバイリニア型と、破断を加味 したものの2種類で、ぞれぞれの動的応答を検討した。加 振倍率 2.00 で得られた実験結果に基づいて求めた塑性率を 破断モデルのパラメータとして導入し、加振倍率 2.27 での 動的解析を行った。その結果、1層目から4層目までの梁端 がすべて破断した。1 階層せん断力と層間変形角の関係につ いて、実験結果⁴⁾と解析結果を図4(a)に示す。解析結果は実 験結果にそぐわない挙動を示しているが、極端に層剛性が 低下しており、梁端破断の影響が層に多大な影響を与えて いることが分かる。さらに、図4(b)に示す層毎の最大層間変 形角からは特に、下層部の変形への影響が明確に表れてい る。

3 カーテンウォールを用いた損傷モニタリング技術の開発 前節では、構造躯体の損傷評価指標として層間変形角の 有用性を説いた。本章では、超高層建物の外装材として一般 的に用いられるメタルカーテンウォールの高い層間変位追 従性能に着目して、カーテンウォールの挙動を逐一把握す ることで躯体の損傷を推測できるモニタリング手法を提案 する。

3.1 2006 年度 E-ディフェンス振動台実験と数値解析

2007 年 3 月に、大地震を受ける超高層建物の床応答と層 間変形を実架構に与える実験が行われた。本実験の試験体 には、超高層建物に多く採用されている方立方式のメタル カーテンウォールが取り付けられ、従来の設計で扱われて きた層間変形角を上回る変形レベル(最大で 0.017rad, 0.02rad, 0.04rad の 3 種)におけるデータを取得している。

図 6 に示す、方立に取り付けた変位計を測定高さで除し た部材角と層間変形角の関係から、方立と躯体それぞれの 変形が類似していることが分かる。このことから、方立の変 形をモニターすれば、建物の変形すなわち損傷程度を推測 できるといったモニタリング手法に着想を得た。この目標 には、センサーおよび方立変形を事前に予測できる数値解 析モデルが必要であると考えられ、まずは、本実験をベース に数値解析モデルの作成を試みた。



カーテンウォールをフレームモデルでモデル化するにあ たり、1. 方立と構造躯体の接合条件、2. 方立と無目の接合条 件、3.シーリング材のせん断負担、4.ガラスパネルのスライ ド挙動、5. ガラスパネルのロッキング挙動の 5 つの条件を 考慮する必要があると考えた。1. および 2. は、試験体の様 子と設計思想から、ピン接合と判断した。3、4 は過去にモ デル化を試みた例が少ないため、力学的知見に基づいて構 築することに挑戦した。3. はシーリング材のせん断変形に 着目して、考え得るせん断変形方向からせん断ばねの向き を決め、 $\tau - \gamma$ 関係から導き出されるせん断剛性を導入した。 なお、弾性せん断係数は過去の研究より引用した。ガラスと フレームの間に設けたクリアランスの分だけフレームが水 平方向に変形すると、フレームがガラスに接触し、ガラスを 押し始めると予想されることを踏まえた図7を設定した。 4. はガラスパネルの設置条件をローラーとすることで表現 した。5. は図 8(a)のように、ガラスパネルと無目との接触 位置2箇所に鉛直ばねを設け、パネルの荷重の半分に相当 する引張力が作用したときに変形し始めるような復元力特 性(図8(b))を与えることで、ローリングの挙動とした。フ レームから見たガラスの相対挙動を捉えた実験結果と比較 すると、本解析モデルの妥当性が確認できた(図9)。

3.2 層間変位追従試験

2018年1月に、不二サッシ、文化シャッター、防災科学 研究所および各大学機関協働で実験が行われた。試験体の 様子を図10に示す。階高4000mmで2層分の高さで模擬し、 1階床レベルと3階床レベルの躯体部分に逆位相で変位を





て 1/500rad から 1/30rad までの 7 つのステップを設定し、 各ステップについて静的と動的実験を交互に行った。図10 左上に示すように、試験体方立部に角速度センサーを2つ、 各階に異なる高さで設置し、その層の層間変形角の測定を 試みた。角速度センサーより得られた波形の一例を図 11(a) に示す。結果は、層間変形角 0.015rad に相当する変位を動 的で与えたときの2層目方立の角速度を示している(単位: rad/s)。0.1-50Hz の幅でバンドパスフィルターを施し、1 階 積分するよりその点の角度を求めると、図 11(b)のようにな った。最大値は正側載荷で 0.01rad となり、目標値である 層間変形角の 0.015rad には届かない結果となった。ステッ プごとに同様の処理を施し、層間変形角との比率を取った ものを図12に示す。変形角の小さいステップ2を無視する と、角速度計より求めた角度に対して層間変形角の方が総 じて約 1.5 倍大きいという結果となった。一方、角速度計 周辺の変位計より求めた局所的な変形角と比較するとほぼ 一致していたことから、本試験体のようなメタルカーテン ウォールに取り付けた角速度計は、層間変形角こそ表現で きないものの局所変形は精度よく表現できることが分かっ た。同時に、方立の変形が高さ方向に応じて不均一さも示し ていることが分かり、方立の変形分布データの獲得の必要 性がより強まったといえる。

3.3 NCREE 振動台実験

2018年9月、台湾のNCREE (National Centre for Research on Earthquake Engineering) にて、台湾国立成功大学,一 条工務店,防災科学技術研究所,不二サッシの協力のもと振 動台実験を行った。基礎すべり構造の検証や基礎配管性能、 カーテンウォール性能・ジャイロセンサーによる変形角評 価、スプリンクラー性能といった複合的な目的をはらんで いるが、本研究ではモニタリング技術の開発に向けて、カー テンウォールに焦点を絞って取り扱う。





図 13 試験体

先にも述べたように、本実験に はスプリンクラーの耐震性能を 検証する目的が含まれている。こ れは、2018 年 12 月に行われるス プリンクラー付き 10 層 RC 造試験 体を用いた E-ディフェンス振動 台実験を見越していることを意 味し、実験計画もそれになぞらえ たものとなっている。具体的に は、2015 年に行われた 10 層 RC 造 試験体を用いた E-ディフェンス 振動台実験の結果から、等価高さ にあたる7階床加速度を、本実験 の入力波として使用している。図 13 に示す試験体は、NCREE 振動台



性能を確認するためのシステムから一部を借用してきたも のである。剛強な設計となっていることを利用し、入力波の 長周期成分を試験体に効果的に与えることで、7階床に取り 付けられたスプリンクラーと同等の応答を疑似的に作り出 している。

4 スプリンクラーの耐震性能評価

非構造部材の一環として、建築の中では研究が数段遅れ ているスプリンクラーの耐震性能評価に関しても、本研究 で扱うこととする。

4.1 NCREE 振動台実験

3.3節で取り上げた NCREE 振動台実験では、スプリンクラ ー横引き配管設備が試験体 2 階床下に取り付けられ、剛強 な接合条件を有する斜材を設けるといった米国式の耐震措 置が施された。10 層 RC 造 7 階床応答波入力時において、取 り付け床と遜色ない挙動を示し、損傷も一切見られなかっ たことから、米国式の耐震措置の有用性が確認された。一方 日本においては、斜材はおろか耐震措置が施されていない 建物がほとんどである現状と、2011 年の東北地方太平洋沖 地震で頻発した配管損傷被害を受けて、スプリンクラー設 備の耐震措置に関するガイドラインが 2018 年 5 月に漸く発 表された。実験的根拠を伴う記述の不足を背景に、2018 年 12 月にE-ディフェンスにてスプリンクラー横引き配管を取 り付けた 10 層 RC 造試験体を用いた振動台実験が行われた。

4.2 2018 年 E-ディフェンス振動台実験

2015 年と根本的に等しい設計方針で作成された 10 層 RC 造試験体を用いて、RC 造柱梁接合部破壊機構の究明・補強 方法の提案をはじめとする骨組に関するさらなる追求と、 基礎すべり開発に向けたすべり基礎構造のデータ蓄積を目 的に振動台実験が行われた。本研究では、10 階および屋上 階床下に導入されたスプリンクラー横引き配管の耐震性能 評価および耐震措置法の改善に対象を絞って分析を行った。デルの導入による配管損傷評価を同時に行う。 図18に、耐震措置法別のスプリンクラーを示す。

推奨される天井裏の設備間同士の幅は 150mm とされ、損 傷評価のクライテリアのとして挙げられている。図 19 は、 3タイプの配管の最大応答変位を比較している。非対策タイ プに対して理想タイプは平均して 26.4%、米国式は 5.0%ま で応答変位を抑えることが出来ており、斜材導入の効果に より 150mm を超えなかった。ただし、枝管の先端すべてに 赤丸で囲った接合部近辺のみに斜材を入れる耐震措置を妥 協案として提出している。ガイドラインタイプを用いた実 験も行ったが、分析が進み次第報告する。3次元要素解析に よるモデル化を行った。

今後 1 か月で床応答加速度との関連性や解析による適切 な措置方法の模索を行っていく。

5 非構造部材を含む実建物モデルを用いた動的解析

非構造部材の損傷は、補修費用や建物の継続利用面に直 結する重大な被害である。本章では、カーテンウォールおよ びスプリンクラー横引き配管が取りついた超高層鋼構造建



物を想定し、建物解析と同時に非構造部材の損傷評価が行 える解析モデルの構築を目指した。2006年 E-ディフェンス 振動台実験の想定モデルとなった21層鋼構造建物を、第2 章と同様の手法でモデル化し、動的解析を行った。

変形集中が予期される層を非構造部材取付位置とし、第3 章で構築したカーテンウォールモデル導入による方立変形 評価、等価1自由度で模したスプリンクラー横引き配管モ

6 結論

超高層鋼構造建物の柱梁接合部破壊を原因とする建物崩 壊挙動について、実験および解析モデルに基づいて検証し た。層間変形角の把握による建物損傷予測の可能性と、カー テンウォールの層間変位追従性に着目して、カーテンウォ ールを用いたモニタリング技術開発に着手した。技術の実 用化を目指して、センサー取り付け位置断定を目的とした 斜材を設ける理想タイプは、スプリンクラーの施工費用が2 解析モデルの構築、不足する方立変形分布データの蓄積を 割増大する高価な方策であり、ガイドラインでは図18(b)中 行った。一方建物の継続利用および財産価値の観点から損 傷抑制が望まれる非構造部材の一つとしてスプリクラーを 取り上げ、日本に未だない耐震措置法の確率を目的とした 実験データの蓄積と分析に取り組んだ。

> 以上の総括として、実建物スケールの超高層鋼構造建物 解析モデルに、本研究で実施した実験に基づく非構造部材 モデルを導入することで、骨組およびスプリンクラー双方 の損傷をまとめて評価できるツールの作成を試みる。

参考文献

- 松宫 智央, 長江 拓也, 錘育 霖, 岡崎 太一郎, 福山 國夫, 1) 中島 正愛:超高層鋼構造建物の柱梁接合部に関する4層骨組 振動台実験,日本建築学会構造系論文集, No. 671, pp. 85-94, 2012.1.
- 2) Lignos, D.G., and Krawinkler, H: Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.132(11), pp1291-1302, 2011
- 波多野 智也, 飛田 潤, 長江 拓也, 福和 伸夫, 平山 義治: 3) 鉄骨造超高層建物の振動台実験における汎用強震計による 構造損傷評価,日本建築学会大会学術講演梗概集め,構造II, p953, 2015
- 「都市機能の維持回復に関する調査研究」報告書, 京都大学 4) 防災研究 所,2013
- 5) Shahram Taghavi, Eduardo Miranda : Seismic Performance and Loss Assessment of Nonstructural Building Components, 7NCEE,
- Jul. 2002. スプリンクラー設備等の耐震措置に関するガイドライン、 6)



図 20 非構造部材を含む解析モデルイメージ