

大地震時における初期の超高層建物の骨組性能評価 ～鋼構造柱梁接合部に注目した実大実験分析と数値解析～

名古屋大学工学部環境土木建築学科建築学コース
長江研究室 野々山優輔

1. 研究の背景と目的

大都市圏には多くの超高層建物が建設されているが、その設計では主要部材の塑性化を許容している。現在、海溝型の巨大地震に伴い長周期地震動が発生することが予測されている。設計時の想定を大きく上回る地震エネルギーが建物に入力されるとの指摘がなされており、骨組破断も含む終局状態までを考慮した骨組性能を定量的に評価することは極めて重要な課題である。

本研究では、数値解析による超高層建物の適切な性能評価手法の構築を見据え、初期の超高層建物を対象とし、柱梁接合部を切り出した試験体に対する荷重実験を実施した。加えて、2008年に行われたE-ディフェンス実験の再分析を通して数値解析における適切なモデル化に必要な技術資料を蓄積する。

2. 部分架構試験体の概要

本実験では、超高層鋼構造骨組のうち外柱とそれに接合する梁を対象として、それらの反曲点で切り出したト形試験体を、初期の超高層建物を模した仕口（旧時代仕口）現在の超高層建物を模した仕口（現在仕口）の2種類用意し、柱を共有することで1体の試験体としている。

梁は両仕口共通でH形鋼 H-500×200×16×10 (SN490B) とし、柱は角形鋼管 口-400×200×16 (BCR295) に内ダイアフラムを入れて模している。現場溶接形式を想定しており、梁ウェブは、シアプレートを経た高力ボルト摩擦接合で、梁フランジの開先の向きは下向き溶接を表現している。シアプレートは柱に両面隅肉溶接で接合した。旧時代仕口においてスカラップはアールを取らない1/4円形および耳形とした。昨年度(2016年度)の試験体も含めた接合部の仕様の相違点を表1および図1に示す。

表1 試験体仕口の仕様相違点

対象	2017年度実験 試験体		2016年度実験 試験体
	初期超高層建物の柱梁接合部	現在用いられる柱梁接合部	初期超高層建物の柱梁接合部
鋼種	SN490B	SN490B	SM490B
部材断面	H-500×200×16×10	H-500×200×16×10	H-500×200×16×10
スカラップ形状	上フランジ:1/4円形状 下フランジ:耳型形状	上フランジ:スカラップ底にアールをとる 下フランジ:スカラップ底にアールをとる	上フランジ:1/4円形状 下フランジ:1/4円形状
シアプレートのボルト本数	6本(S10T)	12本(S10T)	6本(F10T)
シアプレートの板厚	12mm	12mm	9mm
溶接方法	ガスシールドアーク溶接	ガスシールドアーク溶接	ガスシールドアーク溶接
溶接ワイヤ	YGW11	YGW18	YGW18
パス間温度管理	しない	する	しない
エンドタブ	溶接後も切断しない (鋼製エンドタブ)	溶接後に残らない (フラックスタブ)	取り付けない

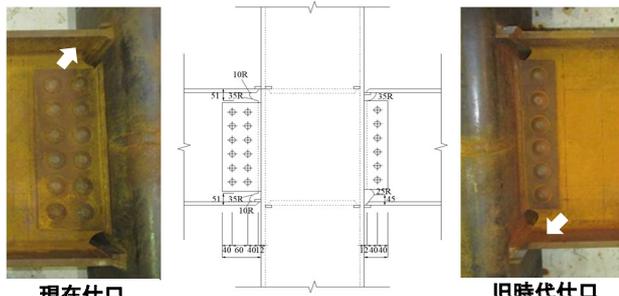


図1 つくば試験体接合部詳細

3. 実験条件

図2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1に示す変位を入力し、実質的に梁端荷重とした。

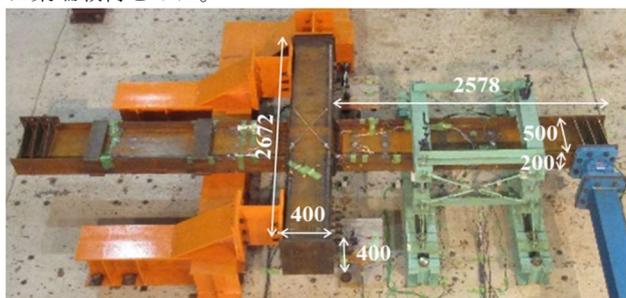


図2 2017つくば部分架構試験体全景 単位:mm

表2 入力波形

サイクル	1-6	6-12	13-18	19-22	23-24	25-26	27-28	29-30	31-42
変位 mm	10	13	20	26	39	52	78	104	130
層間変形角 rad	1/260	1/200	1/130	1/100	3/200	1/50	3/100	1/25	1/20

4. 損傷過程

試験体の損傷過程を追跡する。旧時代仕口に関しては23サイクル目に降伏耐力に達し、27サイクル目でスカラップ底とエンドタブ端に亀裂が生じ、29サイクル目に両側フランジともに破断した。現在仕口に関しては23サイクル目に降伏耐力に達し、29サイクル目でスカラップ底に亀裂が生じ、31サイクル目に両側フランジともに破断した。両者の最大曲げ耐力はそれぞれ1036 kNm、1103 kNmとなっており、両者ともに鋼材試験結果と鋼構造接合部設計指針¹⁾に従って算出した最大曲げ耐力926 kNを上回っているため溶接品質は良好であったと考えられる。

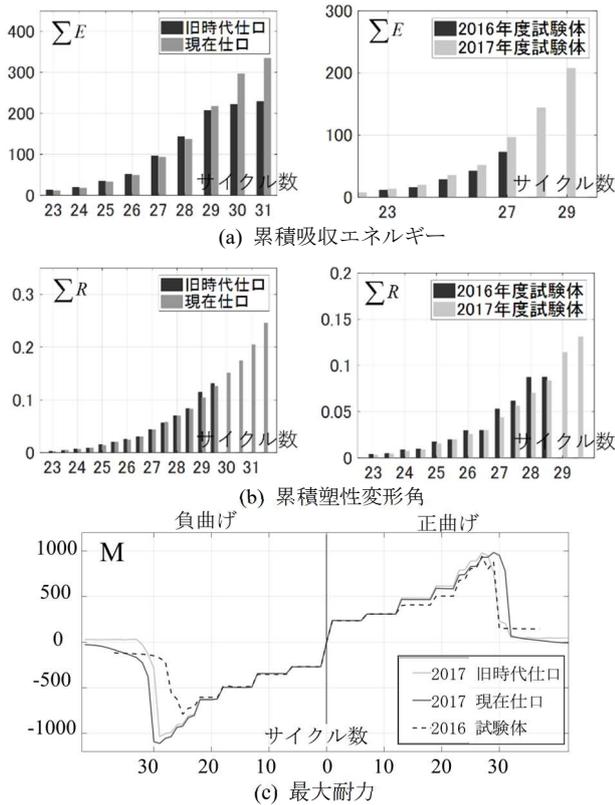
5. 接合部ディテールの違いによる変形性能の比較

層間変形角と梁端曲げモーメントが描く履歴によって囲まれた部分の面積から部材が吸収したエネルギーであると、エネルギーの観点から両者の性能の比較を行う。部材のフランジが破断するまでの吸収エネルギーの累積値は旧時代仕口では207.7 kN・m・rad、現在仕口は334.6 kN・m・radとなり、前者は後者の62%程度の値にとどまっている。

また、梁端部の曲げモーメントが0のときに残留する層間変形角を累積させた値を累積塑性変形角と定義すると、その値は旧時代仕口においては0.114 rad、現在仕口においては0.205 radとなり前者は後者の56%程度の値にとどまっている。

6. 溶接品質の違いによる変形性能の比較

2016年度に同実験システムで行った柱梁接合部破壊実験の結果と比較する。2016年度の試験体は溶接時からエンドタブを使用していないことから溶接品質の点で不利な状態にあると考えられる。2016年度実験試験体と2017年度実験旧時代仕口について前項と同様の視点から比較を行



M : 曲げモーメント (kNm) ΣE : 累積エネルギー (kN・m・rad)
 ΣR : 累積塑性変形角 (rad)

図3 実験結果

うと、最大耐力について前者は 942 kNm で後者の 91% の値、累積吸収エネルギーについて前者は 111.7 kN・m・rad で後者の 54% の値、累積塑性変形角について前者は 0.0815 rad で後者の 67% の値となる。

本比較から、主要部の溶接欠陥が架構の吸収できるエネルギー量を半減させることが分かる。

7. E-ディフェンス実験も加えた分析

2008 年 3 月、21 層の超高層建物の下層 4 層を部分的に切り出し、上部を錘とバネで代替する大型実験が E-ディフェンスを用いて行われた。この実験では実際の手順に従い RC 床スラブが施工されている。ここではこの影響について着目する。

一般に、RC 床スラブの存在は中立軸位置を上フランジ側に移動させ、下フランジの歪を増大させ部材の変形能力に大きな影響を及ぼすことが知られている。²⁾

実際に RC 床スラブ付きの E-ディフェンス実験で得られた梁端下フランジの歪記録と、前節にて述べた RC スラブのつかない柱梁接合部破壊実験において、両者の層間変形角が初めて 0.01 rad に達したときの梁下フランジの歪を比較すると、RC 床スラブがつけられたことによって下フランジの歪が最大で約 3 倍になっていることが分かり RC スラブ存在が下フランジの歪を助長する結果となった。

梁の剛性について理論値と実験値の比較を行う。床スラブが存在する場合、梁の剛性は変化し、それは床スラブが損傷していく過程でさらに変化をしていく。同じ手法で梁

端回転角を計測した昨年度 (2016 年度) の柱梁接合部破壊実験と E-ディフェンス実験の一連の加振のうち、建物応答が弾性内にとどまると予想された三の丸波 35% 加振と、試験体が大きく損傷した三の丸波 100% 加振の記録を対象とし、それぞれ理論値から算出した剛性とどれほど整合しているか検証する。合成梁の剛性は、各種合成構造設計指針³⁾と既往の研究⁴⁾を参照し定めた。初期剛性を梁端回転角が初めて 1/500 rad に達したときの記録から算出すると、表 3 に示す結果となる。鋼梁もしくは試験体に損傷が見られない場合、鋼梁の正曲げを以ては理論値と実験値の誤差は 15% 程度の範囲に収まる。一方、試験体が損傷している三の丸 100% 加振では、理論値と 3 割程度の誤差となっている。

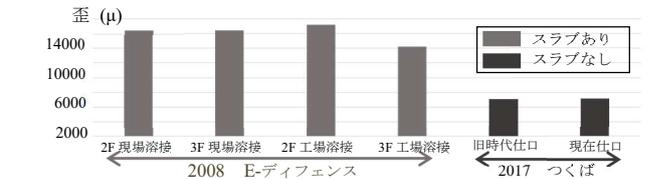


図4 層間変形角 0.01 rad 時の梁下フランジ歪 (図1 図5 参照)



(a) 梁端回転角計測

(b) 試験体全景

図5 2008 E-ディフェンス

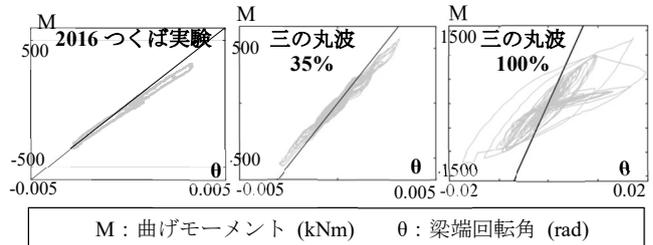


図6 梁初期剛性 理論値と実験値比較

表3 梁初期剛性

	理論値 (10 ³ kNm/rad)		実験値 (10 ³ kNm/rad)		比率 (実験値/理論値)	
	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
2016 つくば		120	91.8	135	0.765	1.125
三の丸波 35%	244	209	209	203	0.857	0.971
三の丸波 100%	244	209	162	147	0.664	0.703

8. 結論と今後の課題

柱梁接合部破壊実験から接合部の形式や溶接の品質の違いが部材の変形性能に与える影響について考察し、加えて床スラブ付きの E-ディフェンス実験を再分析することで床スラブが架構に及ぼす影響についても考察した。本研究で得た知見を数値解析モデルに展開し、超高層建物の適切な性能評価手法の構築に結び付ける。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、2012 年 3 月
- 2) 松宮智央、長江拓也、鍾育森、岡崎太郎、福山國夫、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、第 77 巻、第 671 号、pp.85-94、2012 年 1 月
- 3) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010 年 11 月
- 4) 松宮智央、吹田啓一郎、中島正愛、劉大偉、周鋒、溝渕裕也：大変形繰返し荷重下における鋼梁の履歴特性に及ぼす RC 床スラブの影響-RC 床スラブ付き鋼構造部分構造実大実験-、日本建築学会構造系論文集、第 598 号、pp.141-147、2005 年 12 月