

令和元年5月11日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04451

研究課題名(和文) 極大地震動時にも安定した変形能力を有する鋼架構柱脚の開発

研究課題名(英文) Development of column base of steel frame with stable plastic deformation capability even at huge earthquake motion

研究代表者

多賀 謙蔵 (TAGA, KENZO)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：40578259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造建築物に大きな入力が生じた場合、終局状態における柱脚部分の塑性化は避けられない。従って、極大地震に対する鋼構造建物の耐震性能を向上させるためには柱脚部の塑性変形能力を向上させる必要がある。

そのために、H形断面柱ならびに箱形断面柱の柱脚において、断面の中央に軸力を負担する鋼材を付加することによって圧縮側のフランジが局部座屈を開始した後も耐力が低下せず、高い軸力が作用する状態でも大きな塑性変形能力を発揮できるような補強方法を考案した。その効果を軸力作用下での繰り返し載荷による実験ならびに有限要素解析により確認し、十分な塑性変形能力を確保するための合理的な柱脚補強設計法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後備えるべき海洋型巨大地震などによる極大地震入力を受けた時に、建物の柱脚部に塑性ヒンジが発生し、倒壊に至る可能性がある。このことを避けるために、現有の鉄骨製作技術の範囲内での簡便な補強によって、極大地震動時にも局部座屈の発生を遅らせ、発生後もその進展を抑えることによって安定した塑性変形能力を発揮できる柱脚の方法を見出し、その設計法を提示した。この補強によって鉄骨造建物の耐震性能を大きく高め、極大地震動に対しても建築物の損傷低減を図ることができる。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the seismic performance of the steel structure building against huge earthquake ground motion, it is necessary to improve the plastic deformation capacity of the column bases.

We have established reinforcement methods that can demonstrate large plastic deformation capacity even in the condition of high axial force acting on column bases of H-shaped cross-section and Box-shaped cross-section. The method is to add steel plates that supports the axial force to the center of the cross section so that the plastic moment does not decrease even after the compression flange starts local buckling. By using this method, it has been confirmed that the plastic deformation capacity of the column bases is greatly improved by the cyclic loading tests and numerical simulations. In addition, we have proposed the design methods to reinforcement for column bases to ensure the satisfactory plastic deformation capacity.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 柱脚 局部座屈 塑性変形能力 付加鋼材 極大地震

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

建築物の耐震性を確保するうえで、地震荷重等の水平荷重に対するラーメン構造の望ましい崩壊形とされる全体崩壊形（図1）では、柱脚に塑性ヒンジが形成される。この部分での塑性化を避けるための手法として伸び能力を付与したアンカーボルトを引張り降伏させる方法や、鋼管型ダンパーを用いてエネルギー吸収を図る柱脚等が提案されているが、いずれも大入力時に大きな付加軸力が作用する場合には柱母材が曲げ圧縮状態で塑性化せざるを得ない。写真1は縮小18層鉄骨造試験体の振動台実験における倒壊時の圧縮側柱脚の状況で、このように比較的幅厚比の小さい柱断面であっても極大地震動時には局部座屈によって終局状態に至る可能性が高い。したがって、建物の規模に拘わらず、極大地震動によって柱脚が曲げ圧縮状態で塑性化するような状況を設計対象とする場合、軸力保持能力ならびに変形能力を高めた柱脚の部材断面形状を考案する必要がある。

一方、筆者らは、今後備えるべき極大地震動に対して建築物の損傷低減を図るうえで極めて有用な超高強度鋼材の合理的な活用法として、フランジのみを超高強度鋼材、ウェブを汎用鋼材としたハイブリッド柱部材を用いた架構（高耐震性架構）が有効であることを提案し、検証してきた。この構法を普及させるためにも柱脚の合理的な補強方法を考案する必要がある。

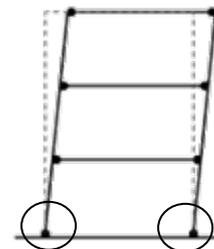


図1 全体崩壊形：柱脚に塑性ヒンジが発生



写真1 縮小18層鉄骨造試験体柱脚の局部座屈

2. 研究の目的

以上を背景として、今後備えるべき内陸直下地震や海溝型巨大地震などによる極大地震動に対しても建築物の損傷を小さくするための手法の構築にあたり終局時に過酷な応力状態となる柱脚に着目し、合理的な柱脚部材断面形状ならびにその設計法を提示することが本研究の目的である。すなわち、建築構造の基本形態である（柱と梁で構成される）ラーメン構造が過大な地震入力を受けた時に、最終的には柱の塑性ヒンジ発生が避け難い柱脚部について、現有の鉄骨製作技術の範囲内でできるだけ簡便な補強によって極大地震動時にも安定した塑性変形能力を発揮できる断面形状を見出すことならびにその設計法を提示することである。

3. 研究の方法

大きな曲げ圧縮力を受ける鋼架構柱脚部について、局部座屈の発生を遅らせ、発生後もその進展を抑えるための部材断面形状（補強方法）を考案し、実験的ならびに解析的に検証する。

具体的には次のように段階的に研究を進めた。

- (1) H形断面材について、先行研究での解析的検討の結果最も効果が期待できる補強タイプを中心とした詳細解析ならびに曲げ圧縮実験を実施する。（平成28年度）
- (2) 前年度の実験確認で最も効果が顕著な補強タイプを対象に、補強範囲、軸力比、板要素の幅厚比等をパラメータとした曲げ圧縮実験を実施する。得られた知見を箱形断面材の解析的検討に展開する。（平成29年度）
- (3) 箱形断面材を対象とした曲げ圧縮実験を実施する。得られた成果を統合し、H形断面材ならびに箱形断面材の補強設計法を構築する。（平成30年度）

4. 研究成果

(1) H形断面鋼構造柱脚部の塑性変形能力改善手法

平成28年度は、先行研究により効果が期待できる補強タイプについての詳細な数値解析を行って実験計画を行い、補強方法の異なる4種の試験体を製作し、曲げせん断実験（軸力なし）ならびに軸力を載荷したうえでの曲げせん断実験を実施し、補強効果の確認を行った。

① 試験体概要

図2に柱脚試験体の模式図を示す。白抜き部分が普通鋼材 SN490B、着色部分が高強度鋼材 H-SA700B を示している。フランジに高強度鋼材、ウェブに普通鋼材を使用し、高耐震性架構の柱をそのまま柱脚に用いた H形断面試験体 A、全断面普通鋼材を用いた H形断面試験体 C、全断面普通鋼材を用いた H形断面の中央に高強度鋼材を付加した試験体 D、中央に普通鋼材を付加した試験体 F、の4種類とする。

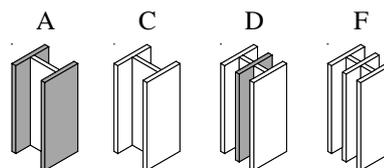


図2 柱脚試験体模式図

4種類の柱脚試験体の断面は、一定の軸力 $N=1850$ (kN)（試験体 A でフランジ、ウェブの応力がウェブの降伏応力の $2/3$ 倍 (239N/mm^2) を若干上回る軸力) を考慮した全塑性モーメント M_{pn} を揃えて設定する。試験体一覧ならびに材料引張試験の結果に基づく全塑性モーメント M_p および軸力を考慮した全塑性モーメント M_{pn} を表1に示す。なお、軸力比は（全断面積） \times （SN490B の σ_y ）で基準化した値である。幅厚比は、普通鋼材を FA ランク、高強度鋼材を FC ランク下限相当付近とする。溶接材料はおよび溶接条件はウェブの鋼材種に基づき選定している。

表 1 試験体一覧

試験体	断面寸法(mm)						材長 L (mm)	鋼材種			M_p (kNm)	M_{pn} 算定 軸力 N (kN)	軸力比	M_{pn} (kNm)
	H	B	t_w	t_f	B_a	t_a		ウェブ	フランジ	付加鋼材				
A	220	215	9	12	-	-	1960	SN490B	H-SA700B	-	470	1850	0.72	281
C	228	258	22	16	-	-		SN490B	SN490B	-	375			
D	224	226	9	14	226	12		SN490B	SN490B	H-SA700B	277			
F	224	226	9	14	226	25		SN490B	SN490B	SN490B	282			

(B : フランジ幅、 D : せい、 t_w : ウェブ板厚、 t_f : フランジ板厚、 B_a : 付加鋼材幅、 t_a : 付加鋼材板厚)

② 定軸力曲げせん断実験

曲げせん断実験により、設定した柱脚試験体の局部座屈挙動に関する基本的な性状を把握した後、設定した柱脚試験体の軸力作用下での塑性変形能力を比較検討するため、図 3 に示す単純梁形式の定軸力曲げせん断実験を行った。試験体の治具側端部をピンローラー支持、試験体側端部をピン支持し、軸力を導入した後、1850kN の一定軸力を保持しつつ、油圧ジャッキの変位制御により行う。載荷は軸力を考慮した全塑性モーメント M_{pn} に対するせん断変形を考慮した弾性部材回転角 θ_{pn} を基準に、 $\pm\theta_{pn}$ 、 $\pm 2\theta_{pn}$ 、 $\pm 4\theta_{pn}$ 、 $\pm 6\theta_{pn}$ 、 $\pm 8\theta_{pn}$ の変位振幅で各 2 回ずつ行う。

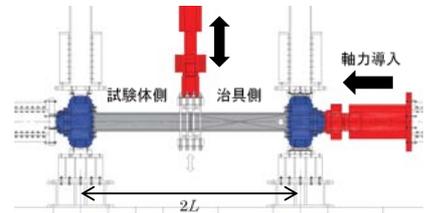


図 3 定軸力曲げせん断実験装置

各試験体の実験結果の無次元化 $M-\theta$ 関係および最終破壊状況を図 4 に示す。試験体 A は M_{pn} を超えてすぐ、フランジの局部座屈に伴って耐力低下が見られた。試験体 C、D、F はいずれも $\pm 6\theta_{pn}$ まで耐力低下が見られない。試験体 D は部材回転角が $\pm 8\theta_{pn}$ の載荷振幅で付加鋼材（高強度鋼材）の局部座屈に伴い耐力の低下が見られ、試験体 C、F は $\pm 8\theta_{pn}$ でも大きな耐力低下が見られなかった。

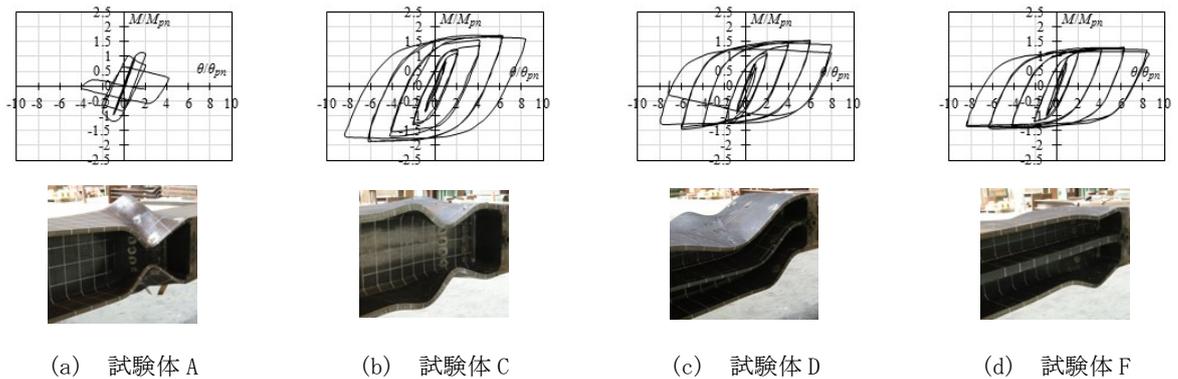


図 4 定軸力曲げせん断実験結果 無次元化 $M-\theta$ 関係および最終破壊状況

③ 得られた知見

- ・全断面普通鋼材を用い、ウェブ幅厚比が FA シック下限よりも小さい H 形断面および中央に付加鋼材を付加した断面の柱脚は、いずれもフランジに高強度鋼材を用いた H 形断面の柱脚と比較して塑性変形能力が改善された。これらの選択肢の中から、設計応力に応じて加工難易度、鋼材重量等を考慮して最適な柱脚の断面形状を選定することで、建物全体の耐震性能を向上させることができる。柱フランジに高強度鋼材を活用して上部構造の耐震性能を高める場合には重要な手段となる。
- ・中央に付加鋼材を付加した柱脚では軸力作用下での繰り返し水平変形後の軸縮みを低減する効果も期待できる。

(2) H 形断面鋼構造柱脚部の変形能力改善に関わる付加鋼材の必要高さ

平成 29 年度は、必要付加鋼材高さ算定式を提案することを目的として、補強高さをパラメータとした部分補強定軸力曲げせん断実験ならびに有限要素解析を行った。

① 試験体概要

付加鋼材により柱脚端部から一定の高さまでの範囲を補強した柱脚部（以降、「部分補強柱脚」と称する）の各部名称ならびに水平変形を与えた場合の曲げモーメント図を図 5 に示す。ひずみ硬化等による耐力上昇を考慮して、柱脚固定端位置の曲げモーメントを、補強断面の全塑性耐力 aM_{pn} を基準として $\alpha \cdot aM_{pn}$ 、付加鋼材境界位置の曲げモーメントを無補強断面の全塑性耐力 M_{pn} を基準として $\beta \cdot M_{pn}$ と表現する。このとき、付加鋼材境界位置で耐力劣化を生じさせないための付加鋼材高さ h は(1)式となる。

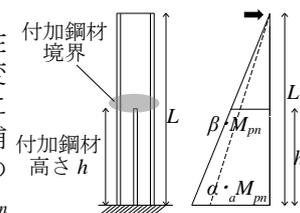


図 5 部分補強柱脚

$$h \geq \frac{\alpha \cdot aM_{pn} - \beta \cdot M_{pn}}{\alpha \cdot aM_{pn}} \times L \quad (1)$$

試験体一覧を表2に示す。導入軸力は、前年度の実験における試験体の軸力比と概ね等しくなる軸力 $N=1750\text{kN}$ ならびに無補強断面の軸力比が限界状態設計指針・同解説による柱の限界軸力比 0.75 となるときの軸力 $N=2050\text{kN}$ の2種類とする。表2の β は前年度の実験得られた補強断面の耐力上昇率から、 $M' = 50\text{kNm}$ 、 $\alpha=1.5$ と予測して計算した仮定値を表している

表2 部分補強柱脚試験体一覧

試験体	断面寸法(mm)						付加鋼材の鋼種	N (kN)	付加鋼材高さ h(mm)	α	β	aM_{pn} (kNm)	M_{pn} (kNm)
	H	B	t_w	t_f	B_a	t_a							
D-1750-1300	224	226	9	14	226	12	H-SA700B	1750	1300	1.5	0.93	254	108
D-1750-1100									1100		1.33		
D-1750-900									900		1.73		
D-2050-1300									1300		1.31	252	76.2
F-1750-1300									25		SN490B	1750	1300
F-1750-1100						1100	1.34						

(B: フランジ幅、H: せい、 t_w : ウェブ板厚、 t_f : フランジ板厚、 B_a : 付加鋼材幅、 t_a : 付加鋼材板厚)

② 部分補強モデルの定軸力曲げせん断実験ならびに有限要素解析

前年度と同様に、単純梁形式の定軸力曲げせん断実験を行った。各試験体の実験の結果得られた無次元化 $M-\theta$ 関係および最終破壊状況を図6に、実験から得られた試験体の $n-\beta$ 関係ならびに破壊パターンを図7に示す。無補強領域に局部座屈が生じたモデルは黒塗りとしている。 n は無補強断面の降伏軸力に対する軸力比である。 β の最大値が 1.0~1.2 程度の試験体は、柱脚固定端にのみ局部座屈が生じ、優れた塑性変形能力を發揮した。一方で、 β の最大値が約 1.5 以上であった試験体は、無補強領域の局部座屈の発生に伴って急激な耐力低下が見られた。

次いで、実験結果を精度よく模擬する有限要素解析モデルを用いて、付加鋼材高さをパラメータとする解析を行った。得られた $n-\beta$ 関係ならびに破壊パターンを図8に示す。 $\alpha=1.5$ 、 $\beta=1.4$ 程度の時に柱脚固定端にのみ局部座屈が生じ、優れた塑性変形能力を發揮するといえる。

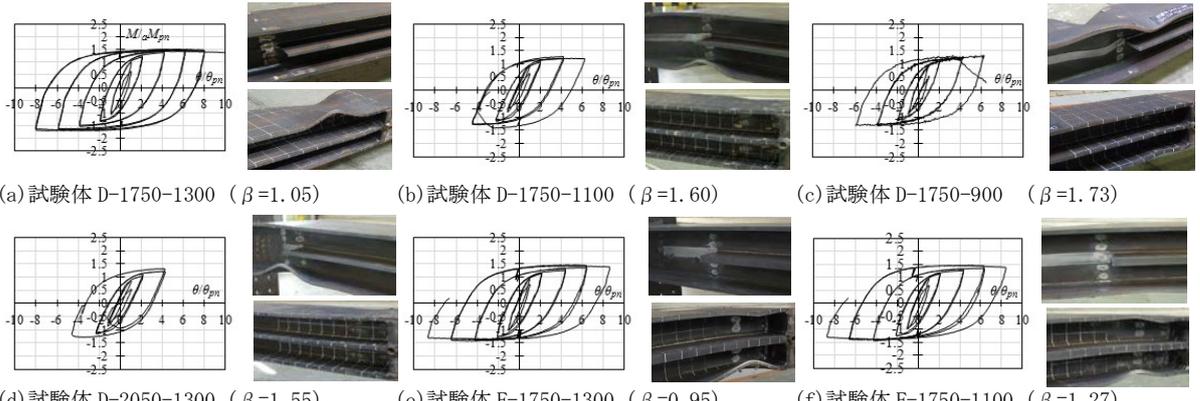


図6 部分補強実験結果 無次元化 $M-\theta$ 関係および最終破壊状況写真 付加鋼材境界近傍(上) 固定端近傍(下)

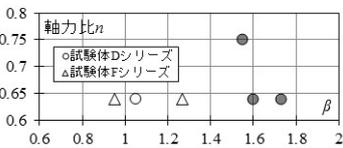


図7 実験結果 $n-\beta$ 関係

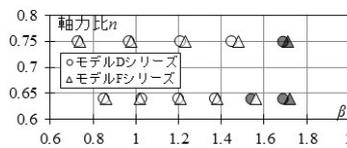


図8 解析結果 $n-\beta$ 関係

③ 得られた知見

- 付加鋼材境界位置で耐力劣化を生じさせないための付加鋼材高さ h は(1)式となる。このとき、ひずみ硬化等による耐力上昇を考慮して、柱脚固定端位置の曲げモーメントを、補強断面の全塑性耐力 aM_{pn} を基準として $\alpha \cdot aM_{pn}$ 、付加鋼材境界位置の曲げモーメントを無補強断面の全塑性耐力 M_{pn} を基準として $\beta \cdot M_{pn}$ として評価する
- 実験結果ならびに解析結果より、柱脚固定端にのみ局部座屈が生じ、 $6\theta_{pn}$ を2回繰り返しても耐力劣化を生じないような塑性変形能力を發揮するための α および β の値は $\alpha=1.5$ 、 $\beta=1.4$ 程度と考えられる。無補強領域において期待し得る耐力上昇率 β の値については、設計時には安全側に $\beta=1.0$ とすることが推奨される。

(3) 箱形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法

平成30年度は、前年度までにH形断面柱脚を対象として行った一連の検討により、提案している補強方法が効果的であることを確認したことを受けて、箱形断面材の補強に展開した。

① 試験体概要

図 9 に示すように箱形断面の中央に十字形の鋼材を付加する。十字形の鋼材を付加した柱脚は、圧縮側のフランジが局部座屈を開始した後も付加鋼材の一部が軸力を保持し、局部座屈の進展が拘束されることを意図している。各試験体の断面寸法一覧ならびに材料引張試験の結果に基づく軸力を考慮した全塑性モーメント aM_{pn} を表 3 に示す。柱脚試験体は、FA ランクの無補強箱形断面試験体 (A-0)、FA ランクの箱形断面に十字形鋼材を付加した試験体 (A-6、9、12)、FC ランクの箱形断面に十字形鋼材を付加した試験体 (C-6、9) の 6 体とする。

表 3 試験体一覧

試験体	$D=B$ (mm)	t (mm)	B_a (mm)	t_a (mm)	無補強部の幅厚比 ランク	軸力比 n	鋼材種		軸力 N (kN)	aM_{pn} (kNm)
							箱形断面	付加鋼材		
A-0	250	9	270	6	FA	0.65	BCR295	SN490B	2111	137.7
A-6									2111	259.8
A-9									2111	309.1
A-12									2436	308.8
C-6	250	6	270	6	FC	0.65	BCR295	SN490B	1363	204.8
C-9									1363	242.8

($B=D$: 断面せい 断面幅、 t : 板厚、 B_a : 付加鋼材幅、 t_a : 付加鋼材板厚)

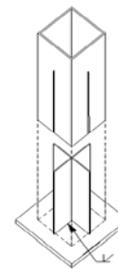


図 9 付加鋼材の取り付け方法

② 箱形断面柱脚補強の定軸力曲げせん断実験ならびに有限要素解析

前年度までの H 形断面の柱脚補強と同様に定軸力曲げせん断実験を行った。各試験体の実験結果を解析結果と併せて図 10 に示す。

次いで、実験結果を精度よく模擬する有限要素解析モデルを用いて、箱形断面および付加鋼材の断面サイズをパラメータとした解析を行った。モデルの塑性変形能力の優劣を無補強箱形断面の幅厚比 (B/t) - 付加鋼材の幅厚比 (b/t_a) 関係ならびに軸力に対する付加鋼材のみの降伏耐力 (N_{ay}/N) - 付加鋼材の幅厚比 (b/t_a) 関係にまとめて図 11 に示す。また、付加鋼材の補強高さをパラメータとした解析的検討を行い、補強高さに関する検討を行った結果を図 12 に示す。

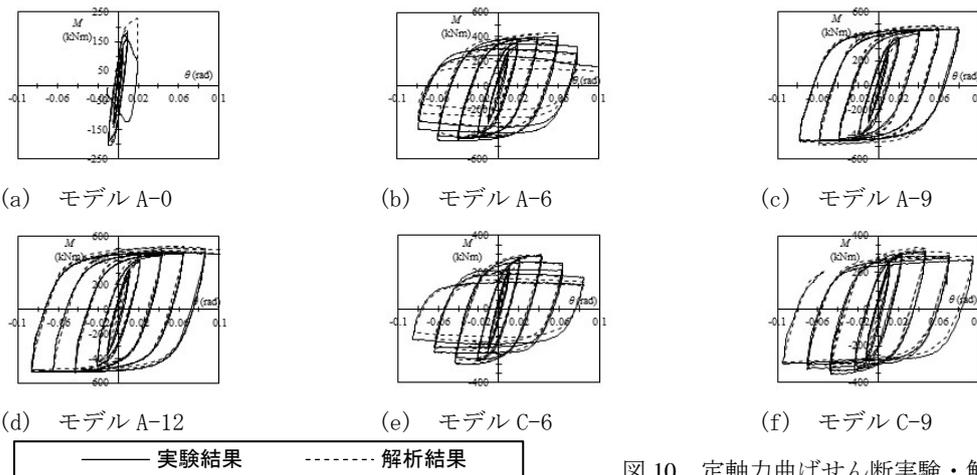


図 10 定軸力曲げせん断実験・解析結果

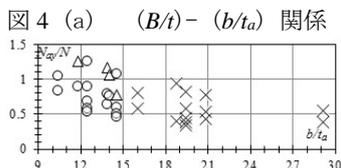
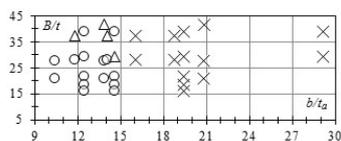
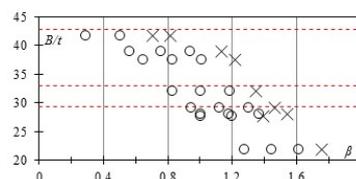


図 11 (b) (N_{ay}/N) - (b/t_a) 関係

±8θ_{pn} の 2 回目のサイクルまでの耐力低下が最大耐力の
10%未満: ○ 10~30%: △
30%以上: ×



±8θ_{pn} の 2 回目のサイクルまでの耐力低下が最大耐力の 30%未満: ○
付加鋼材境界の無補強領域に局部座屈が生じたモデル: ×

図 12 無補強箱形断面の幅厚比-β 関係

③ 得られた知見

- 定軸力曲げせん断実験の結果、箱形断面の中央に適切な板厚の十字形の鋼材を付加した場合、塑性変形能力が大きく改善されることが確認できた。
- 補強範囲を適切に設定した柱脚は、付加鋼材の幅厚比が 15 以下、かつ軸力に対する付加鋼材のみの降伏耐力が 0.5 以上の場合、大きな耐力低下は生じず、8θ_{pn} の載荷サイクルまで安定した挙動を示すことを有限要素数値解析より確認した。
- 補強範囲は、柱脚固定端の耐力上昇率 α ならびに、付加鋼材境界の無補強領域に期待し得る耐力上昇率 β を用いて算定することができる。無補強箱形断面の幅厚比ランクが FA ランクおよ

びFBランクの場合、 $8\theta_{pn}$ の載荷サイクルまで安定した挙動を示すことを条件とした場合、設計用には安全側に $\alpha=2.0$ 、 $\beta=1.0$ とすることが推奨される。

- ・無補強箱形断面がFCランクの場合の補強範囲は急な断面変化に伴う応力集中により付加鋼材境界に局部座屈が生じ、十分な塑性変形能力を発揮できない可能性がある。

(4) 今後の展望

本研究成果の社会実装に向けて、論文発表やセミナーでの話題提供を通じて建築構造設計実務者向けにアピールしていく所存である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

- ① 高橋優大、山内一輝、多賀謙藏、浅田勇人、田中剛：鋼構造建築物の柱脚補強による耐震安全性向上効果に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.26、2019年(投稿中)
- ② Lee Joonkwon、中村優人、多賀謙藏、浅田勇人、田中剛：H形断面鋼構造柱脚部の変形能力改善に関わる付加鋼材の必要高さ、鋼構造年次論文報告集、査読有、Vol.26、pp672-677、2018.11
- ③ Lee Joonkwon、中村優人、岸田明子、多賀謙藏：H形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、第12回日中建築構造技術交流会論文集、査読有、2017.9
- ④ 中村優人、Lee Joonkwon、多賀謙藏、浅田勇人、田中剛：H形断面鋼構造柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、鋼構造年次論文報告集、Vol.25、pp790-797、2017.11
- ⑤ 中村優人、福岡智之、岸田明子、多賀謙藏：鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、鋼構造年次論文報告集、Vol.24、pp237-244、2016.11

〔学会発表〕(計 7件)

- ① Yudai Takahashi、Kenzo Taga: Study on method to improve the plastic deformation capacity of steel structure column base、12th Pacific Structural Steel Conference、2019.11(発表予定)
- ② 高橋 優大、Lee Joonkwon、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：箱形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、北陸、2019.9。(発表予定)
- ③ 高橋 優大、Lee Joonkwon、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：箱形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、2019年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2019.6(発表予定)
- ④ Lee Joonkwon、中村 優人、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：H形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、東北、2018.9.
- ⑤ Lee Joonkwon、中村 優人、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：H形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究(その2)、平成30年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2018.6
- ⑥ 中村 優人、Lee Joonkwon、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：H形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、中国、2017.9.
- ⑦ 中村 優人、Lee Joonkwon、多賀 謙藏、浅田 勇人、田中 剛、竹島 徹、中尾 尊澄、梅本 優也：H形断面部材を用いた鋼構造建築物柱脚部の塑性変形能力改善手法に関する研究、平成29年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2017.6

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 剛
ローマ字氏名：(TANAKA Tsuyoshi)
所属研究機関名：神戸大学
部局名：大学院工学研究科
職名：・教授
研究者番号(8桁)：90243328

研究分担者氏名：浅田 勇人
ローマ字氏名：(ASADA Hayato)
所属研究機関名：神戸大学
部局名：大学院工学研究科
職名：・助教
研究者番号(8桁)：70620798

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。