

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06295

研究課題名(和文) 巨大地震動および津波に対する鋼構造埋込み柱脚の設計法の確立と補強工法の開発

研究課題名(英文) Design of steel structure embedded column bases for huge earthquake and tsunami

研究代表者

田中 剛 (Tanaka, Tsuyoshi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90243328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造建築物の柱脚の中で、埋込み柱脚は最も耐力、剛性を確保しやすい柱脚であり、地震被害の事例も少ない。しかし、外柱埋込み柱脚の場合、前面コンクリートのかぶり厚さが小さいとパンチングシャー破壊が生じる可能性がある。この破壊に対する補強方法がいくつか提案されてきたが、鋼柱周りの補強筋の効果を含めたパンチングシャー破壊耐力の一般性のある耐力評価式は確立されていない。本研究では、外柱埋込み柱脚を対象とした載荷実験を行い、接合部の応力伝達機構を検討するとともに、補強筋の効果を検討した耐力評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In the column bases of the steel structure building, the embedded column base is easy to secure the most proof strength and rigidity, and there are few cases of earthquake damage. However, in the case of an outer embedded column base, if the thickness of the front cover concrete is small, destruction of the punching shear may occur. Several reinforcement methods for this destruction have been proposed, but the generality of the strength evaluation formula of the punching shear fracture resistance including the effect of the reinforcement around the steel column has not been established.

In this study, we carried out the loading experiments on the outer embedded column base, examined the stress transfer mechanism at the connection, and proposed the strength evaluation method considering the effect of the reinforcement.

研究分野：工学

キーワード：鋼構造 埋込み柱脚 パンチングシャー破壊 U字筋補強 帯筋お経 構造実験 最大耐力 極限解析

1. 研究開始当初の背景

鉄骨造建物の柱脚が、巨大地震や津波によって重大な損傷を受けると建物の倒壊や流失に繋がり、極めて甚大な被害を引き起こす。1995年兵庫県南部地震では、柱脚の破壊が建物の倒壊を引き起こし、2011年東北地方太平洋沖地震では、柱脚の破壊が建物の流失に繋がり、多数の人命が失われている。

鋼構造柱脚（露出柱脚、根巻き柱脚、埋込み柱脚）の設計手法は、主に1970年代後半～80年代前半に行われた実験に基づき構築されており、短期許容応力度設計に用いられる降伏耐力および二次設計に用いられる最大耐力が提示されている。

埋込み柱脚は、鋼柱の有している耐力および塑性変形能力を発揮させることが可能であるとともに、剛接合に近い柱脚とすることができるため、上部建物の層間変形を抑制し、仕上げ材や2次部材の損傷も少なくすることができる優れた柱脚構法である。実際、埋込み柱脚に関しては、倒壊に繋がる地震被害は報告されていない。

しかし、中低層鉄骨造建物には露出柱脚が採用されること多く、埋込み柱脚が採用されることは少ないのが現状である。その理由には、以下の2つが挙げられる。

- ① 柱脚におけるパンチングシャー破壊耐力の推定式が確立されていない。特に外柱柱脚では、安全側の設計を行うには過密な補強筋の配筋が要求されるため、施工難度が非常に高くなる。さらに、補強筋の設計方法も確立しているとは言い難く、「鋼構造接合部設計指針（日本建築学会）」では、「適切な補強筋の配置に留意する。」と記載されているに留まっている。
- ② 基礎梁のコンクリートが打設される以前に第1節の鉄骨建て方を行う必要があり、建て方精度の確保が困難であり、工期にも余裕が必要となる。

本申請課題は、上記①の課題を解決することが目的である。②の課題については、①の課題解決と設計事務所およびゼネコンの工夫により解決できると考えている。

2. 研究の目的

巨大地震や津波に対して最後まで建物を支持するのは主体構造であり、鉄骨造建物では特に倒壊や流失に繋がるような柱脚の破壊が生じないようにすることが必須である。また、機能維持が求められる建物に対しては、適切な損傷レベルを設定し、その範囲内に柱脚の応答を抑える必要がある。

柱脚の破壊を防止するためには、①巨大地震および津波を受けた場合、柱脚特有の履歴挙動を考慮して作用する応力（軸力、せん断力、曲げモーメント）を精度良く予測し、柱脚への要求性能を明確化する、②作用力に対して複雑な応力伝達を行う柱脚の履歴挙動を定式化し、破壊挙動を予測する、③得られた研究成果を簡便な設計法に昇華させる、こ

とが不可欠であると申請者は考えている。

そのために、以下の課題を設定し、これらを解決する研究を遂行する。

- ① 巨大地震動および津波に対する柱脚への要求性能明確化のための骨組の静的・動的解析
- ② 破壊挙動予測のための構造実験
- ③ 上記①および②より得られた成果に基づく耐震設計法の提案

本報告では、上記②に関して得られた知見を報告する。

3. 研究の方法

試験体は図1に示すL字形の埋込み形式の外柱試験体で、合計25体の試験体を製作した。表1に試験体一覧を、図2に柱脚詳細の例を示す。

シリーズ1では埋込み深さ d 、U字筋比 p_r および先行する載荷方向が、シリーズ2ではU字筋と鋼柱フェイスの距離 l_u および埋込み深さ d が、シリーズ3ではU字補強と帯筋補強の有無が、そしてシリーズ4では帯筋補強

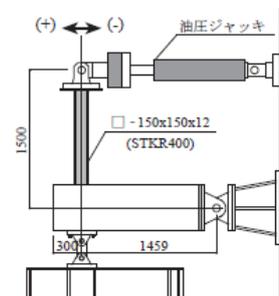


図1 試験体形状

表1 試験体一覧

(a)Series 1			
試験体名	d/D_c	$p_r(\%)$	先行する載荷方向
1.5-1.47/P-I	1.5	1.47	正載荷 (P)
2.0-1.47/P-I	2.0		
3.0-1.47/P-I	3.0		
2.0-2.93/P-I	2.0	2.93	負載荷 (N)
2.0-1.47/N-I		1.47	
(b)Series 2			
試験体名	d/D_c	$l_u(\text{mm})$	l_u/D_c
2.0-UR-II	2.0	-	-
2.0-1.10-II		165	1.10
2.0-0.63-II		94	0.63
2.0-0.14-II		23	0.14
3.0-1.10-II	3.0	165	1.10
3.0-0.14-II		23	0.14
(c)Series 3			
試験体名	d/D_c	$p_r(\%)$	$p_r(\%)$
2.0-0-0-III	2.0	-	-
2.0-1.02-0-III		1.02	-
2.0-0-0.69-III		-	0.69
2.0-1.02-0.69-III		1.02	0.69
3.0-0-0-III	3.0	-	-
3.0-1.02-0-III		1.02	-
3.0-0-0.69-III		-	0.69
3.0-1.02-0.69-III		1.02	0.69
(d)Series 4			
試験体名	d/D_c	帯筋の有無	$p_r(\%)$
2.0-0-IV	2.0	無	-
2.0-0.38-IV		有	0.38
2.0-0.63-IV		有	0.63
3.0-0-IV	3.0	無	-
3.0-0.31-IV		有	0.31
3.0-0.69-IV		有	0.69

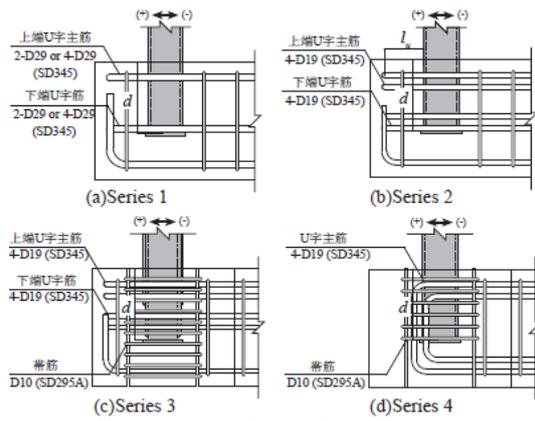


図2 柱脚詳細の例

の有無および帯筋比 $c p_w$ が実験因子である。ここで、U字筋比 p_r は基礎梁全断面に対するU字筋群の全断面積の比と定義する。荷重は柱端に取り付けた油圧ジャッキにより行い、荷重履歴は正負漸増交番繰返し荷重である。

4. 研究成果

(1) 実験結果

図3に最終破壊状況の例を、図4に柱せん断力 cQ と層間変形角 R の関係の例を示す。ほとんどの試験体で正荷重時には鋼柱フランジ面コーナー部から前面コンクリート側に向かって斜め方向のひび割れが進展し、負荷重時にはベースプレート付近から斜め上方向に蹴り上げるようなひび割れが進展し、それぞれパンチングシャー破壊に至った。前面コンクリートをU字筋で囲まず無補強とした試験体では、他の試験体と比べて早期にパンチングシャー破壊が生じ、急激な耐力低下を示した。U字筋と鋼柱フェイスの距離 l_u を最も小さくした試験体 2.0-0.14-II、3.0-0.14-II およびシリーズ4の試験体では、前面コンクリート側の鋼柱フェイス付近の断面に縦ひび割れが生じて荷重が低下した。埋込み深さ d を柱せいの3倍とし、U字筋またはU字筋および帯筋の両方で補強した試験体 3.0-1.10-II および 3.0-1.02-0.69-III は鋼柱が曲げ降伏し、紡錘型に近い履歴性状を示した。

(2) 破壊時の応力状態

パンチングシャー破壊の例を写真1に、正荷重側における最大荷重時の前面コンクリ

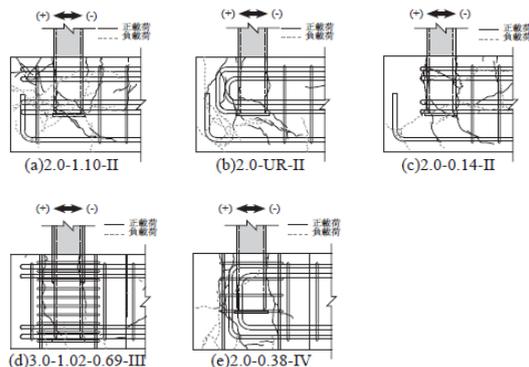


図3 ひび割れ発生状

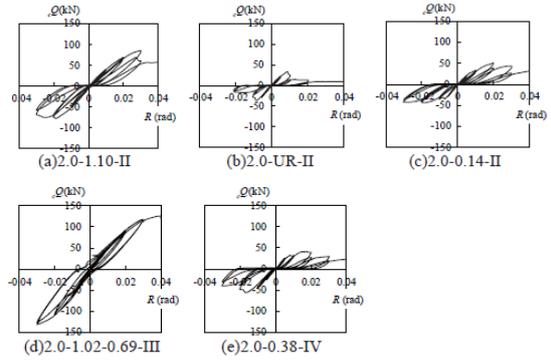


図4 荷重-変形関係



写真1 パンチングシャー破壊

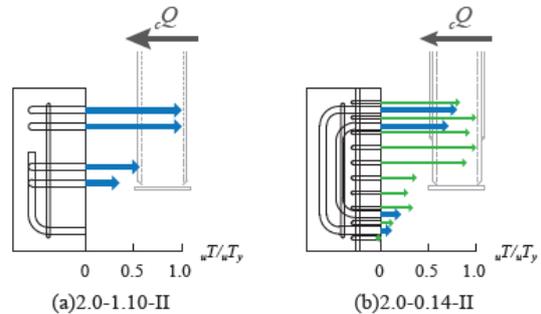


図5 鉄筋の軸力分布

ート側鋼柱フェイス断面の補強筋の軸力分布の例を図5に示す。青色の矢印はU字筋の軸力を表し、緑色の矢印は帯筋の軸力を表す。鉄筋の軸力は鉄筋に貼付した歪ゲージの値を用い、応力-歪関係を完全弾塑性型と仮定して計算した。なお、鉄筋の軸力は降伏軸力によって無次元化している。

パンチングシャー破壊が生じた試験体では、前面コンクリート側鋼柱コーナー部から斜めにひび割れが進展し、基礎梁上層部が抜け出すような破壊を生じている。また、図5に示すように、上段の補強筋にほとんど降伏軸力に相当する大きな引張軸力が生じている。

破壊状況より、柱からの支圧力の伝達は、補強筋のコーナー部に集中し、図6に示すような圧縮束を形成したと考えられる。この抵抗機構により、鋼柱コーナー部から補強筋折り曲げ位置周辺に向かってひび割れが進展し、パンチングシャー破壊に至ったものと考えられる。

(3) 耐力評価

実験結果を踏まえ、パンチングシャー破壊が生じた試験体を対象として耐力評価を行う。

① 崩壊機構 I

図7に示す崩壊機構Iを仮定し、上界定

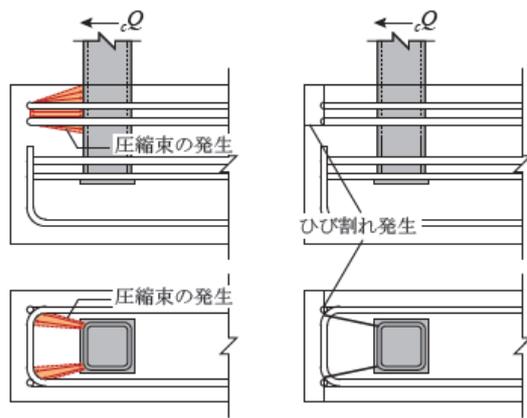


図6 支圧力の補強筋への伝達

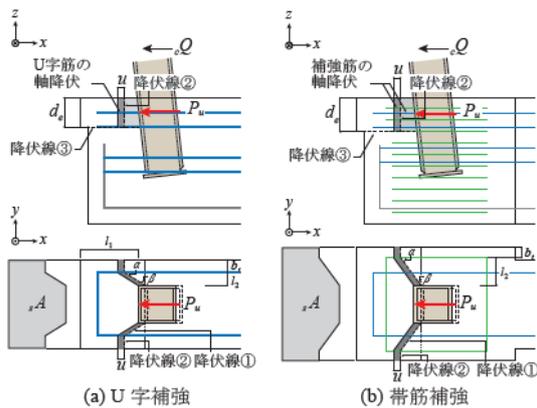


図7 崩壊機構 I

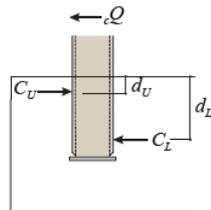


図8 鋼柱に関する力の釣り合い

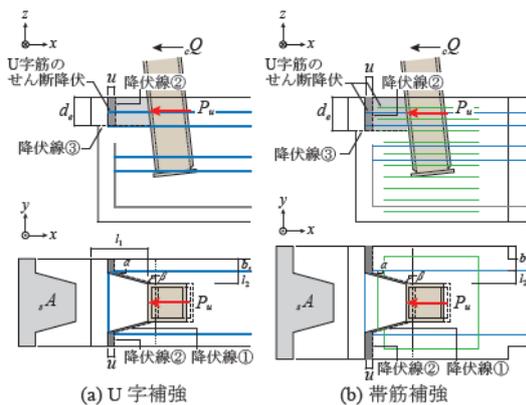


図9 崩壊機構 II

理に基づく極限解析によって崩壊荷重 P_u を誘導し、パンチングシャー破壊耐力 $cQ_{ps}^{(I)}$ を算出する。崩壊荷重 P_u により、図7に示すような降伏線を生じ、前面コンクリート上層部に水平変位が生じると仮定する。この水平変位に伴い、ひび割れの通過する鉄筋が軸降伏する。

以上の仮定を用いるにあたって、図7に示

す有効せい d_e を定義する必要がある。写真1の破壊状況から、ここでは、U字補強を施した試験体では基礎梁天端から上段U字筋の軸部まで、帯筋補強を施した試験体では上段U字筋の1段下の帯筋の軸部までを有効せい d_e とする。極限解析により誘導した崩壊荷重 P_u は前面コンクリート側の支圧反力として柱に作用する。図8に示す鋼柱周りの力のつり合いより、崩壊機構Iによるパンチングシャー破壊耐力 $cQ_{ps}^{(I)}$ を算出する。

② 崩壊機構 II

崩壊機構Iでは、U字筋と鋼柱フェイスの距離 l_u をパラメータとした際の耐力変化の傾向を評価することができない。よって l_u の影響を考慮できる崩壊機構IIを検討する。

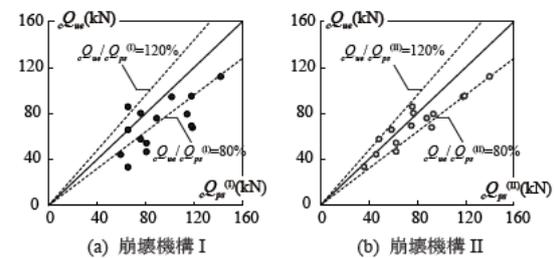
実験結果より、U字筋折り曲げ位置にひび割れが進展する破壊が多く見られたため、崩壊機構IIでは降伏線①の角度 β を図9に示すように仮定する。水平変位に伴い、ひび割れの通過する鉄筋がせん断降伏する。

崩壊機構Iと同様にして崩壊荷重 P_u を誘導し、崩壊機構IIによるパンチングシャー破壊耐力 $cQ_{ps}^{(II)}$ を算出する。

③ 実験値との比較

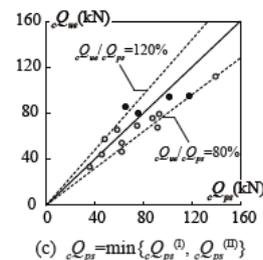
$cQ_{ps}^{(I)}$ および $cQ_{ps}^{(II)}$ の小さい方をパンチングシャー破壊耐力 cQ_{ps} とし、実験における最大荷重時の柱せん断力 cQ_{ue} と比較する。実験値と計算値を比較したものを図10に示す。図中には崩壊機構Iにより決定した耐力の計算値と実験値の比較を黒色で、崩壊機構IIにより決定した耐力の計算値と実験値の比較を白色でプロットしている。実験値と計算値の比は、0.74 ~ 1.31、平均値は0.94となり、計算値は実験値と概ね良い対応をしている。

ほとんどの試験体で、パンチングシャー破壊耐力 cQ_{ps} は崩壊機構IIにより決定した。崩壊機構IIは補強筋折り曲げ位置への応力集中を考慮に入れており、図9に示されるパンチングシャー破壊発生メカニズムと一致する。



(a) 崩壊機構 I

(b) 崩壊機構 II



(c) $cQ_{ps} = \min\{cQ_{ps}^{(I)}, cQ_{ps}^{(II)}\}$

図10 実験値と計算値の比較

(4) まとめ

本研究では、外柱埋込み柱脚基礎梁接合部を対象とした載荷実験を行い、各実験因子が接合部の弾塑性挙動および破壊性状に及ぼす影響を調べた。また、パンチングシャー破壊を生じた試験体を対象として補強筋の効果を考慮した普遍性を有する崩壊機構を仮定し、極限解析に基づき正載荷側における最大耐力を評価した。計算値は実験値と概ね良く対応しており、提案した耐力評価法によりパンチングシャー耐力を推定することができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Kimihiro HIRANO, Tsuyoshi TANAKA, Hayato ASADA: Effect of reinforcement on punching shear strength in embedded column base connections, Proc. of the 16th International Symposium on Tubular Structures, Melbourne, 査読有, 2017.12, pp. 279-284
- ② Yuki YAMANO, Hayato ASADA, Tsuyoshi TANAKA: Static Loading Tests on Exterior Column Base Embedded in Grade Beam, Proc. of 11th Pacific Structural Steel Conference, Shanghai, 査読有, 2016.10, pp. 1143-1148

[学会発表] (計 12 件)

- ① 平野公大・田中剛・浅田勇人・前田純花：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その9 帯筋の補強効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 投稿済, 2018.9
- ② 前田純花・田中剛・浅田勇人・平野公大：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その10 実験因子の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 投稿済, 2018.9
- ③ 前田純花・田中剛・浅田勇人・平野公大：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構に関する研究 その5 外柱柱脚の接合部破壊に対する帯筋の補強効果, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第58号・構造系, 投稿済, 2018.6
- ④ 山野優希・田中剛・浅田勇人・平野公大：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その7 補強筋の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.927-928, 2017.9
- ⑤ 平野公大・田中剛・浅田勇人・山野優希：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その8 実験因子の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.929-930,

2017.9

- ⑥ 平野公大・田中剛・浅田勇人・山野優希：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構に関する研究 その4 外柱柱脚の接合部耐力に対する補強筋の効果, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第57号・構造系, pp.185-188, 2017.6
- ⑦ 山野優希・田中剛・浅田勇人・平野公大：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その5 外柱柱脚の実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.1153-1154, 2016.8
- ⑧ 平野公大・田中剛・浅田勇人・山野優希：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その6 各因子の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.1155-1156, 2016.8
- ⑨ 平野公大・田中剛・浅田勇人・山野優希：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構に関する研究 その3 外柱柱脚のパンチングシャー破壊, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号・構造系, pp.529-532, 2016.6
- ⑩ 富谷保彰・田中剛・浅田勇人・山野優希：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その3 外柱形式を対象とした実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.625-626, 2015.9
- ⑪ 山野優希・田中剛・浅田勇人・富谷保彰：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構その4 各因子の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.627-628, 2015.9
- ⑫ 山野優希・田中剛・浅田勇人・富谷保彰：埋込み柱脚基礎梁接合部の応力伝達機構に関する研究 その2 外柱形式を対象とした実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第55号・構造系, pp.353-356, 2015.6

[その他]

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a1/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 剛 (TANAKA, Tsuyoshi)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90243328

(2) 研究分担者

浅田 勇人 (ASADA, Hayato)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70620798