

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04689

研究課題名（和文）軸力と曲げを受ける鋼構造梁端接合部の耐力評価と設計法の構築

研究課題名（英文）Development of Design Methodology of Steel Beam-to-column Connections Subjected to Bending and Axial Force

研究代表者

浅田 勇人（Asada, Hayato）

芝浦工業大学・建築学部・准教授

研究者番号：70620798

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：制振架構や剛床仮定が成立しないような鋼構造建築物では、梁に曲げモーメントだけでなく、軸力が同時に作用することになる。本研究ではこのような建築物の梁端接合部を対象とし、梁軸力が梁端接合部の耐力および塑性変形能力に与える影響を実験的・解析的に検討した。検討結果から、作用する軸力の大きさが梁ウェブ接合部の全塑性軸方向耐力以下にとどまる場合には、軸力によって破壊起点位置での歪集中が顕著に増大することはなく、軸力による塑性変形能力の顕著な低下も生じないことを明らかにし、軸力の影響を考慮した設計法の枠組を整えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで明らかとなっていなかった鋼構造梁端接合部が、曲げだけでなく、軸力を同時に受ける場合の力学挙動を検討し、軸力が耐力および塑性変形能力に与える影響を定量的に評価できた点において学術的な意義のあるものと考えられる。また、通常为重層建築物とは異なる応力条件下の梁端接合部の力学性能を明らかにしたことは、建築計画上の多様な要求に応えた構造計画の立案ならびに構造設計上の自由度と信頼性を高めることに貢献しており、社会的意義があるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In buildings where the vibration-controlled frame or rigid-floor-assumption does not hold, not only bending moments but also axial forces act on the beams simultaneously. This study experimentally and analytically investigated the effects of beam axial forces on the load-carrying capacity and plastic deformation capacity of steel beam-to-column connections with typical connection details employed in Japan. The results show that if the magnitude of the axial force acting on the beam-to-column connection is less than the plastic axial strength of the welded web connection, the axial force does not significantly increase the strain concentration at the point of failure, nor does it significantly reduce the plastic deformation capacity, thus providing a framework for a design method that takes the effect of axial force into account.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鋼構造 梁端接合部 耐力 塑性変形能力 耐震性能 軸力 曲げモーメント

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究が対象とする梁端接合部は、耐震性能上重要なエネルギー吸収部位であり、通常の重層建築物では、曲げモーメントの作用が卓越するため、その性能は曲げ(せん断)のみが作用する前提で設計法が整備されてきた。

一方で、昨今では、靱性架構とダンパーを組み合わせた制振架構が普及しており、このような制振架構では、梁に梁断面の降伏軸力に基づく軸力比に換算して 30% 程度の軸力が作用することが指摘されている¹⁾。また、制振架構に限らず、剛床仮定が成立しない場合や、梁と柱が直交しない架構が水平荷重を受ける場合には、曲げだけでなく軸力が梁端接合部に作用することになる。また、通常のラーメン構造における合成梁については未だ設計法が十分に確立していないが、この合成梁における床スラブの抵抗は、鋼梁に作用する軸力(偶力)とみなしすることができる。

以上のような問題を一般化し、設計法を確立するためには、軸力と曲げを同時に受ける梁端接合部の力学性能、すなわち耐力および塑性変形能力を明らかにすることが必要である。

2. 研究の目的

以上の研究背景を踏まえて、本研究では梁に作用する軸力が梁端接合部の耐力および塑性変形能力に与える影響を実験的・解析的に検討し、軸力と曲げを同時に受ける梁端接合部の設計法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、一定引張軸力下で繰返し曲げを与える角形鋼管柱梁接合部の載荷実験ならびに有限要素解析を行った。

【載荷実験】

試験体形状を図 1 に示す。試験体は H 形断面梁(SN400B)と角形鋼管柱(BCR295)を通しダイアフラム形式で接合した T 字形部分架構である。梁端接合部は工場溶接接合形式とし、スカラップ形状は 10R+35R の複合円型とした。試験体一覧を表 1 に示す。試験体は計 5 体であり、実験変数は柱の鋼管厚 t_c (=12mm, 19mm)、梁軸力の有無および軸力の大きさ n_b (=0, 7.5%, 15%) である。

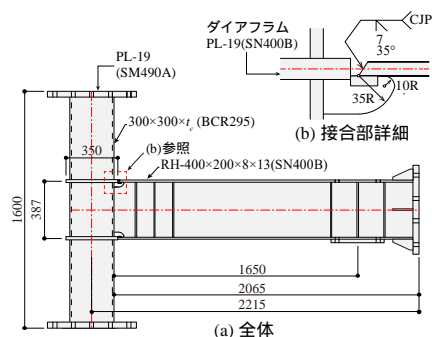


図 2 試験体形状

表 1 試験体一覧

試験体	梁	柱	軸力比 n_b (%)	軸力 N_b (kN)
12-0	RH-400×200×8×13(SN400B)	□-300×300×12(BCR295)	0	0
12-7.5			7.5	187
12-15			15	374
19-0	RH-400×200×8×13(SN400B)	□-300×300×19(BCR295)	0	0
19-15			15	374

軸力比 n_b : 梁断面に基づく降伏軸力を無次元化した軸力比

載荷試験体を対象とし、軸力が梁端接合部の耐力に与える影響を把握するために、文献 2) による鋼管壁の面外曲げ耐力を考慮した梁端接合部の全塑性耐力に関する N-M 相関曲線を図 2 に示す。図中には鋼管壁の面外曲げ耐力によって決定される崩壊荷重 jM_p^{ob*} と、スカラップによる断面欠損を考慮した梁の全塑性モーメント bM_{pe}^* の両方を示している。 $t_c=12\text{mm}$ の試験体の全塑性耐力は、軸力の大小にかかわらず、 jM_p^{ob*} で決定され、 $t_c=19\text{mm}$ の試験体では bM_{pe}^* で決定される。また、 jM_p^{ob*} で耐力が決定する場合(この場合、 $t_c=12\text{mm}$ が該当)には、軸力による

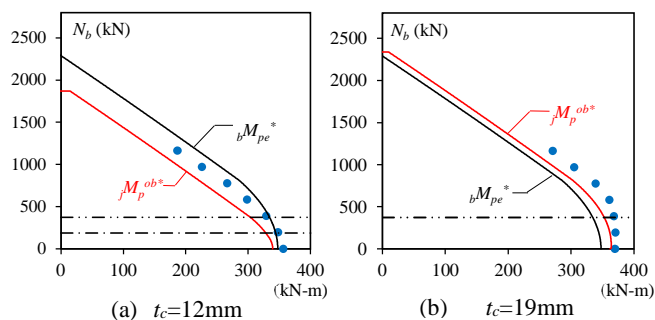


図 2 N-M 相関曲線

耐力低下がより顕著となることわかる。

試験体のセットアップを図 3 に示す。荷重は、試験体の柱の上下端を固定して、梁右端に取り付けたジャッキによって行った。軸力を導入した試験体では、まず水平ジャッキによって所定の引張軸力 N_b を与えた後、鉛直ジャッキによって、正負交番繰返し荷重を行った。荷重履歴は、梁の全塑性モーメント ${}_bM_p$ に対応する梁の弾性回転角の計算値 ${}_b\theta_p$ を基準とし、 $0.5{}_b\theta_p$ を 1 サイクル、 $2.0{}_b\theta_p$ を 2 サイクル行った後、荷重が最大荷重の 90% 以下に低下するまで $4.0{}_b\theta_p$ の一定振幅繰返し荷重を行った。また、梁端モーメント M_b を算出する際には、図 4 の通り、水平ジャッキによる付加曲げ M_j を考慮した。

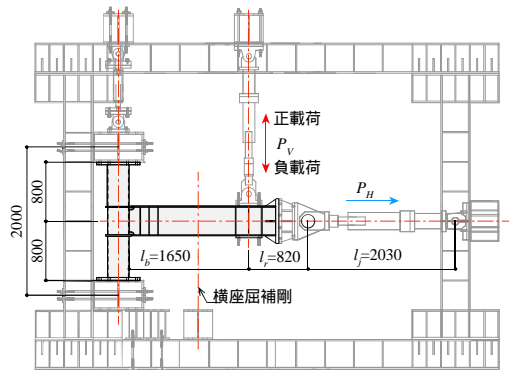
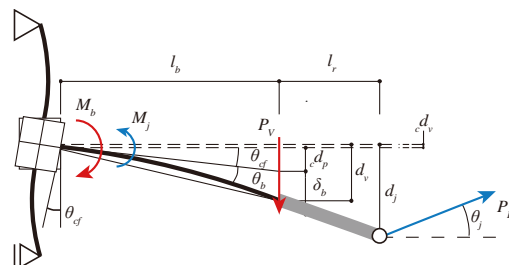


図 3 セットアップ



$$\square_{\square} = \square_{\square} \square_{\square} \square_{\square} \square_{\square} \cdot (\square_{\square} + \square_{\square}) + \square_{\square} \square_{\square} \square_{\square} \square_{\square} \cdot \square_{\square}$$

図 4 変形概念図

【有限要素解析】

梁の軸力が耐力および破壊起点に位置の歪集中に与える影響を検討するために、有限要素解析を行った。解析モデル(図 5)は荷重実験の試験体と同一形状である。解析変数は柱の鋼管厚 t_c ($=12\text{mm}, 19\text{mm}$) および梁の軸力比 n_b ($=N_b/N_y=0\% \sim 60\%$, N_y : 梁の降伏軸力) である。荷重は、柱上下端を固定し、軸方向引張力 N_b を梁頂部に導入した後、Y 方向に強制変位を一方方向に与えることで行う。応力歪関係は材料試験結果を用い、塑性域における構成方程式は、von Mises の降伏条件、連合流れ則および等方硬化則に従う。

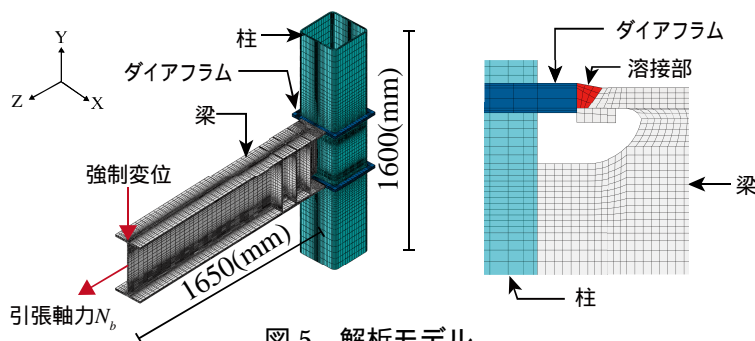


図 5 解析モデル

4. 研究成果

【荷重実験】

荷重変形関係と破壊状況の例を図 6 に示す。いずれの試験体もスカルップ底の延性き裂が梁フランジ板厚方向に進展し、荷重が低下した。

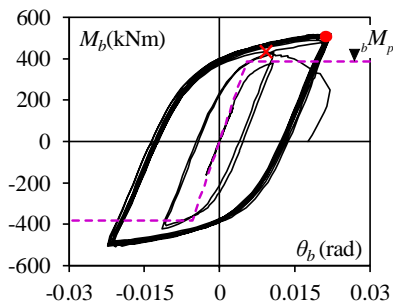


図 6 荷重変形関係と破壊状況

軸力が梁の耐力に与える影響を検討するために、骨格曲線を図 7 に示す。グラフの縦軸は M_b を梁の全塑性モーメント ${}_bM_p$ で除した無次元化梁端モーメント $M_b/{}_bM_p$ 、横軸は梁回転角 θ_b を ${}_b\theta_p$ で除した無次元化梁回転角 $\theta_b/{}_b\theta_p$ とする。図中の 印と 印はそれぞれ実験結果の降伏耐力 M_{ye} および全塑性耐力 M_{pe} であり、接線剛性が初期剛性 ${}_bK_e$ の $1/3$ および $1/6$ に低下したときの荷重

と定義する．図 7 より，柱の鋼管厚 t_c を 12mm の場合では，軸力無しの 12-0 に比べて，軸力比 $n_b=7.5\%$ とした 12-7.5 ではほとんど耐力の低下はみられないが， $n_b=15\%$ の 12-15 では M_{ye} が 10%， M_{pe} が 7% と低下している．一方で， $t_c=19\text{mm}$ の場合では，軸力による耐力の低下はほとんどみられない．総じて，鋼管厚が薄い方が軸力による耐力の低下が大きくなっている．最大耐力 bM_{max} についても，同様の傾向がみられるが， M_{ye} ， M_{pe} に比べると，軸力の有無による耐力の差は小さい．これは，引張軸力が作用する場合には，そうでない場合と比べて，歪硬化による耐力上昇が大きくなるためであると考えられる³⁾．

終局状態までの累積塑性変形倍率 η （塑性変形能力）と軸力比 n_b の関係を図 3 に示す．耐力と同様に，柱の鋼管厚によって，軸力が塑性変形能力に与える影響に違いがみられる．具体的には $t_c=12\text{mm}$ の場合， η_u は軸力の増大に伴い大きく低下しているのに対して， $t_c=19\text{mm}$ の場合では，ほとんど低下がみられない．軸力比 $n_b=15\%$ で比較すると， $t_c=12\text{mm}$ の試験体の η_u は， $t_c=19\text{mm}$ とした試験体の 40% 以下となっており，鋼管壁が薄く梁端接合部の曲げ耐力が鋼管壁の面外曲げ耐力 jM_p^{ob*} で決定する場合には，軸力によって塑性変形能力が顕著に低下することを確認した．

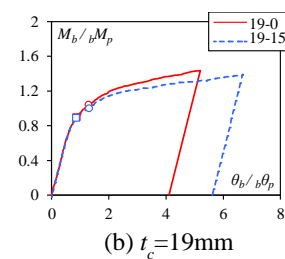
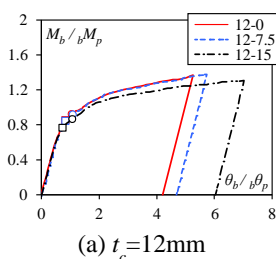


図 7 骨格曲線

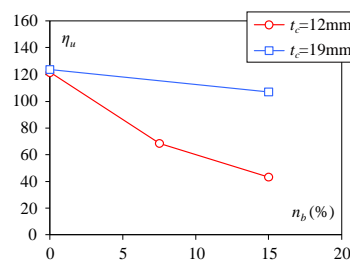


図 8 塑性変形能力

【有限要素解析】

梁端曲げモーメント M_b と梁端回転角 θ_b の関係を図 9 に示す．図 9 には Slope Factor 法によって求めた全塑性耐力を○で示す．図 2 に示した通り，全塑性耐力が鋼管壁の崩壊荷重で決定される場合の方 ($t_c=12\text{mm}$) が，軸力の増加に伴う耐力の低下が顕著であり，文献 2) に耐力評価法が妥当であることを確認した．実験の破壊起点位置であるスカルップ底の相当塑性歪 $p\epsilon_{eq}$ と軸力比 n_b の関係を図 10(a) に示す． $p\epsilon_{eq}$ は， $\theta_b / b\theta_p=4$ 時の値である．同一の n_b で比べると， $t_c=12\text{mm}$ の方が， $p\epsilon_{eq}$ が大きくなっている．すなわち，梁端接合部の全塑性曲げ耐力が，鋼管壁の面外曲げ耐力 jM_p^{ob*} で決定する場合，軸力によって破壊起点位置の歪がより顕著に増大しており，実験で確認されたように，塑性変形能力が大幅に低下したと言える．次いで，ウェブの無次元化軸方向力 jN_w を横軸に取って $p\epsilon_{eq}$ との関係を図 10(b) に示す．ここで，ウェブの無次元化軸方向力とは， N_b を鋼管壁の面外曲げ耐力を考慮した梁ウェブ接合部の全塑性軸方向耐力で除したものであり，軸力の大きさをウェブ接合部の耐力を基準としてみた指標である． jN_w を横軸にとると，鋼管厚によらず， $p\epsilon_{eq}$ と軸力比の関係はほぼ一つの曲線状に並ぶことになる．また， jN_w が 1 以下の範囲，すなわち，軸力 N_b がウェブ接合部の全塑性軸方向耐力以下の範囲では， N_b によって歪が顕著に増大するが， $jN_w > 1$ では，歪の増大は緩やかになる傾向が見られる．以上より， jN_w を用いることで，軸力による塑性変形能力の低下を，鋼管厚によらず一義的に評価できると言える．

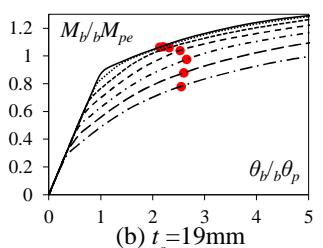
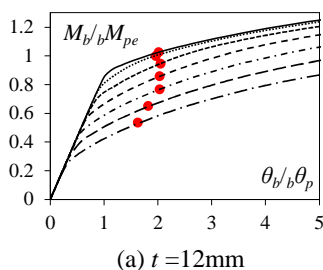


図 9 M_b - θ_b 関係

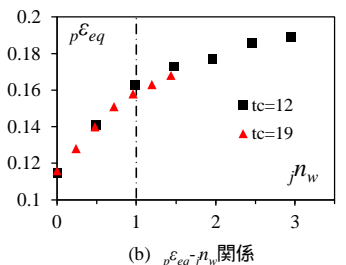
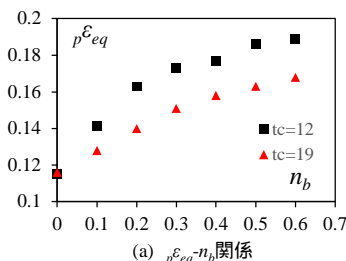


図 10 $p\epsilon_{eq}$ -軸力比関係

参考文献：

- 1) 高橋聡志, 吉敷祥一, 和田章：座屈拘束ブレースに関する実験研究および実物件調査，日本建築学会関東支部研究報告書，pp.233-236，2007.3
- 2) 浅田勇人, 田中剛, 吉見信之：角形鋼管柱に接合される梁端接合部が曲げと軸力を受ける場合の耐力評価，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 753 号，pp1701-1711，2018.11
- 3) Sim., H., Ballantyne, G., Chen, A., and Uang, C.M.: Effect of Beam Tension on Cyclic Performance of WUF-W Steel Moment Connection, Journal of structural Engineering, 143(9), 0407102, 2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上田久道, 今津才, 浅田勇人, メイ ソーメートレイ, 吉敷祥一	4. 巻 31
2. 論文標題 一定引張軸力下で繰返し曲げを受ける鋼構造梁端接合部の弾塑性挙動	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今津才, 上田久道, 浅田勇人, メイ ソーメートレイ, 吉敷祥一, 石田孝徳
2. 発表標題 軸力と曲げを受ける鋼構造梁端接合部に関する研究 - その1 一定引張軸力を受ける場合の実験計画と予備解析 -
3. 学会等名 日本建築学会大会 学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上田久道, 今津才, 浅田勇人, メイ ソーメートレイ, 吉敷祥一, 石田孝徳
2. 発表標題 軸力と曲げを受ける鋼構造梁端接合部に関する研究 - その2 一定引張軸力を受ける場合の実験結果 -
3. 学会等名 日本建築学会大会 学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hayato Asada, Tsuyoshi Tanaka
2. 発表標題 Numerical Investigation on Beam-to-column Connections Subjected to Combined Flexure and Tension
3. 学会等名 Proceedings of 10th International Symposium on Steel Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	吉敷 祥一 (Kishiki Shoichi) (00447525)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	
研究 分担者	田中 剛 (Tanaka Tsuyoshi) (90243328)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------