

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04433

研究課題名（和文）梁偏心および柱軸力の影響を考慮した外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の設計法

研究課題名（英文）Design method of beam to square hollow section column connection with exterior diaphragm considering the effect of beam eccentricity and axial force of column

研究代表者

松尾 真太郎（MATSUO, Shintaro）

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：40583159

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）：鋼構造骨組の柱梁接合形式の一つである外ダイアフラム形式を対象に、その弾塑性挙動に与える梁偏心と柱軸力の影響を検討し、接合部の曲げ耐力の算定方法を提案することを目的として、接合部を含む部分架構骨組の載荷実験を系統的に実施した。その結果、降伏から破壊に至るまでの挙動を確認するとともに、梁偏心によって付加される梁端ウェブ接合部の曲げモーメントの影響を明らかにし、その影響を既往の耐力式に累加することで評価できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とする「梁の偏心」は、実建築物において内部空間の有効活用や外壁の施工性などの観点から実用上採用されやすい方法である。一方で、外ダイアフラム形式は代表的柱梁接合形式であり、今後も広く適用されていく可能性のある構法であるが、本構法における梁偏心の影響に関する研究は特殊な形を有する外ダイアフラムに多く、より一般的な外ダイアフラムを対象として梁偏心に対してどのように設計すれば良いかを示しておくことは、実用上極めて重要である。

研究成果の概要（英文）：For the exterior diaphragm type, which is one of the beam-to-column connection types of steel structural frames, we aim to investigate the effects of beam eccentricity and column axial force on the elasto-plastic behavior and propose a method for calculating the bending strength of the connection. For the purpose, we systematically conducted loading tests of partial frames including connections. As a result, the behavior from yield to fracture was confirmed, and the effect of the bending moment of the web connection at the beam end added by the beam eccentricity was clarified. In addition, we showed that the strength of the connection can be evaluated by superposing the web moment to the bending strength evaluated by the existing strength formula.

研究分野：建築学

キーワード：外ダイアフラム 角形鋼管 柱梁接合部 梁偏心 柱軸力 降伏耐力 外柱 繰返し曲げせん断実験

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

柱梁接合部はラーメン架構を設計する上で最も重要な部位の一つである。兵庫県南部地震において多数観察された完全溶込み溶接部近傍の母材の脆性破断を受け、これまでに多くの合理的な柱梁接合形式が提案され、かつそれらの力学的性能が検証されてきた。その中の一つである外ダイアフラムに着目し、これまでに中柱・外柱を対象とした設計式の提案、段違いパネルや2方向加力などの特殊な条件に対する検討などが行われてきた。外ダイアフラム形式は、加工工程が少なく溶接施工も簡単となるため、施工性および経済性に優れ、コンクリート充填鋼管(CFT)柱構造への対応も容易であるという利点を有するが、鋼構造建築物への外ダイアフラムの適用例は、他の接合形式(通しダイアフラム、内ダイアフラム)に比べて非常に少ないのが現状である。また、外柱(側柱・隅柱)に使用する場合の対応にも工夫が要求される。実用上、梁フランジ側面に外壁が取り付けやすいことや内部空間を最大限広く活用することを考慮して、外柱に取り付く梁を偏心させて設置することが多いことから、梁が偏心して取り付け外ダイアフラム(以下、偏心梁付き外ダイアフラム)をどのように設計すれば良いかを提示することは実用上極めて重要である。梁の偏心の影響を考慮した外ダイアフラム形式柱梁接合部の既往の研究は種々見られるが、リング形式のものや外ダイアフラムの寸法がかなり大きい形式である特殊な形状のものが多く、これらの成果が一般的な外ダイアフラムに対して適用できるか否かは不明である。

2. 研究の目的

本研究では、外ダイアフラム形式柱梁接合部を対象として単純引張実験および部分架構実験を行い、偏心梁付き外ダイアフラム形式柱梁接合部の弾塑性挙動を調査し、接合部の耐力に与える梁偏心および柱軸力の影響ならびに終局挙動にいたる破壊性状を明らかにするとともに、耐力評価法について検討する。具体的には、以下のことを検討する。

- (1) 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の引張側梁フランジ接合部における単純引張挙動
- (2) 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の曲げせん断挙動に及ぼす梁偏心および外ダイアフラム詳細の影響
- (3) 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の曲げせん断挙動に及ぼす梁偏心と柱軸力の影響
- (4) 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の曲げ耐力評価

3. 研究の方法

上記(1)～(4)の研究課題について、以下に述べる方法をとった。

- (1) 本研究で対象とする外ダイアフラム形状(記号)を図1に示す。このような接合部を含む引張フランジ側を想定した接合部単純引張試験体を用いて、接合部の単純引張力を加える実験を実施した。鋼管幅厚比(D/t_c)、梁偏心率(e/D)、外壁側の外ダイアフラムせい(h_{do})、水平ハンチ角度()を実験変数とする計8種類である。記号は図1に記載の通りである。
- (2) 外ダイアフラム形式柱梁接合部を有する角形鋼管柱とH形断面偏心梁からなる部分架構試験体を用いた繰返し曲げせん断実験を実施した。鋼管幅厚比は1種類に定め、梁偏心率(e/D)、外壁側の外ダイアフラムせい(h_{do})、水平ハンチ角度()の組合せによる計6種類の実験データを取得した。なお、採用した外ダイアフラムのディテールはいずれも上記の単純引張試験体と同一のものとしている。
- (3) (2)で採用した部分架構試験体を基準として、柱軸力を2水準、梁偏心率を2水準設定し、繰返し曲げせん断実験を実施した。計4種類の実験データを取得した。(2)の実験結果は柱に軸力が作用しない場合に相当し、これら4種類の実験結果との比較対象となる。代表的な試験体形状を図2、載荷装置を図3に示す。
- (4) (2)と(3)で対象とした部分架構試験体に基づいて、有限要素法解析(FEM解析)を実施し、実験結果の再現性を確認するとともに、鋼管幅厚比・梁偏心率・柱軸力比をパラメータとした多数の解析結果を取得し、特にウェブ接合部の曲げ耐力への寄与について分析し、既往の降伏曲げ耐力評価式への適用性について検討する。

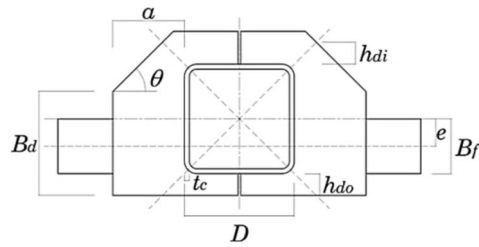


図1 外ダイアフラム形状(記号)

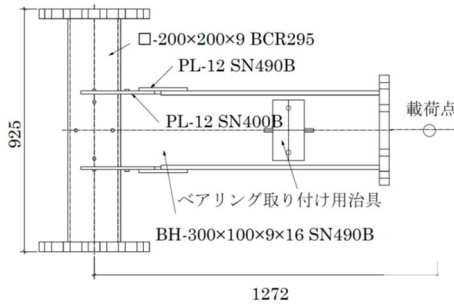


図2 部分架構試験体の一例(無軸力)

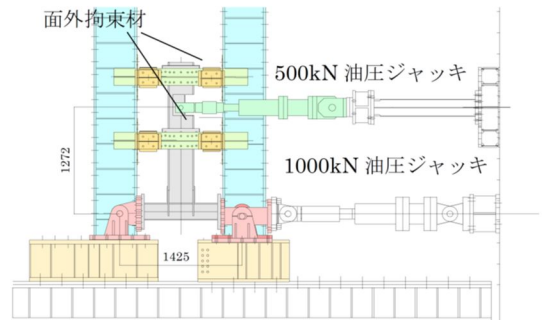


図3 一定軸力下繰返し曲げせん断実験の荷荷装置

4. 研究成果

(1) 接合部の単純引張挙動

実験では主に接合部の降伏耐力や塑性化後の挙動に着目して検討した。その結果、偏心接合部の降伏耐力は概ね偏心側の外ダイアフラムの塑性化により決まっていることが確認された。また、偏心率が大きくなるほど耐力は低下するが、その低下率については外壁側の外ダイアフラムせい h_{do} を除いて、概ね同程度(2割弱の低下)であった。 h_{do} については小さすぎると偏心率による耐力低下が顕著に現れるため、接合部の詳細決定においては偏心率と h_{do} の組み合わせは重要な検討項目となる。

本実験で得られた降伏耐力実験値について、既往の研究¹⁾で提案されている耐力式による算定値と比較した結果、概ね両者は対応する結果となったが、偏心率の大きい試験体に対してやや過小評価する傾向にある。なお、有限要素法解析により、偏心側と反偏心側における荷重分担の傾向についても別途検討し、特に反偏心側の荷重分担については、偏心率の増大に伴ってほぼ線形的に減少することが確認され、これは既往の研究¹⁾における評価式の導出仮定に整合するものである。

(2) 接合部の繰返し曲げせん断挙動

偏心率が接合部の曲げせん断挙動に与える影響は、 h_{do} が小さい試験体では明瞭に現れた(降伏耐力で10%程度低下)、その他の試験体については明瞭な耐力差は生じなかった(図4)。この理由として梁が偏心して取り付く場合には、鋼管の面外剛性が大きくなるため、ウェブの曲げ耐力負担率が上昇することが考えられ、実験でも確認できた(図5)。

梁偏心および柱軸力の有無に関わらず履歴性状は安定するが、偏心がある場合には塑性変形能力が低下する。また、柱軸力により塑性変形能力の低下を助長すること、さらには偏心率が大きいほどその影響が大きく現れることも確認できた(表1)。これより、柱軸力の影響は、弾性限界や全塑性に相当するレベルでの接合部曲げ耐力にはさほど影響を与えないと考えてよいが、一方で接合部の降伏をある程度許容するためには変形能力の検討も必要であり、設計にあたっては柱軸力の影響を踏まえた復元力モデルなどの適用が求められることも考えられる。この点については今後の課題である。

破壊性状としては、偏心側の外ダイアフラムにおける破断およびそれに付随したウェブへの亀裂進展が確認された。

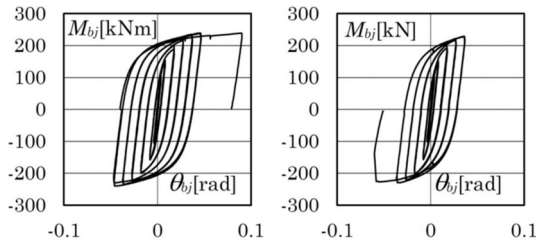


図4 荷重 - 変形関係の一例
(左：無偏心，右：偏心)

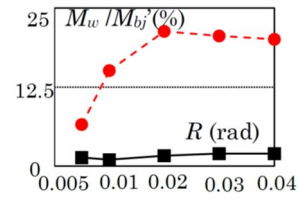


図5 梁端ウェブ接合部のモーメント負担率
(□：無偏心，○：偏心)

表1 各試験体の塑性変形能力実験値

No.	名称	n_o	塑性変形能力			$(n_o) / (n_o=0)$
			正側	負側	正負平均	
1	22-e0	0	3.6	3.4	3.5	0.90
		0.35	3.2	3.1	3.2	
2	22-e25	0.35	3.2	2.9	3.0	
3	22-e50	0	1.7	1.8	1.8	0.66
		0.2	1.1	1.2	1.2	
4		0.35	1.5	1.5	1.5	0.84

e0：偏心なし，e25：偏心率0.125，e50：偏心率0.25， n_o ：軸力比

(3) 降伏曲げ耐力評価式

梁偏心率 鋼管壁厚比 柱軸力比を主パラメータとして、部分架構試験体と同一条件でのFEM解析を系統的(計40ケース)に実施し、梁端ウェブ接合部が負担する曲げモーメントについて検討した結果、実験と同様に偏心率の大きい場合により負担割合が高くなることが確認できた。また、鋼管壁厚比が負担割合に与える影響も明瞭に現れることが確認できた(図6)。

現状では、梁端ウェブ接合部の曲げモーメント負担率を理論的に予測するには至っていないため、本研究では影響度の高い梁偏心率と鋼管壁厚比を因子とした回帰分析により、梁端ウェブ接合部の負担曲げモーメント M_w を誘導し、接合部の降伏曲げ耐力 jM_y を次式で与えることを提案した。図7は回帰分析の基になった M_w と e/D および D/t_c の関係の解析結果である。

$$M_w = 16.6 \left(\frac{e}{D} \right) - 0.26 \left(\frac{D}{t_c} \right) + 11.8, \quad jM_y = (D_b - t_d) \cdot P_y + M_w$$

ここで、 D_d ：ダイアフラムの外法寸法， t_d ：ダイアフラム板厚， P_y ：ダイアフラムの降伏引張耐力である。

jM_y の FEM 解析値と上式による計算値を比較したものが表2であり、計算値が無偏心タイプの降伏耐力をやや上回るものの、偏心タイプの降伏耐力は良好に評価していることが確認できる。なお、本研究では、軸力比が耐力に与える影響は小さいことが実験的にも解析的にも確認されたので、耐力式においてもその影響を無視している。

以上、現段階において本研究で提案する耐力式は一定の精度を有しており、接合部設計における耐力評価は可能と考えられる。しかし、検討範囲は限られたものであり、引き続き本評価式の改良も含めた適用性検証を進めていく予定である。また、本接合形式を対象とした保有耐力接合設計に関しては、軸力比の影響も含めたより詳細な分析が必要であり、今後の課題とする。

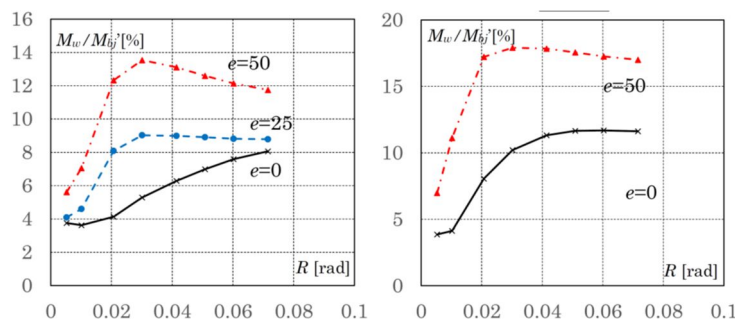


図6 梁端ウェブ接合部のモーメント負担率解析結果一例(左： $D/t_c=22$ ，右： $D/t_c=17$)

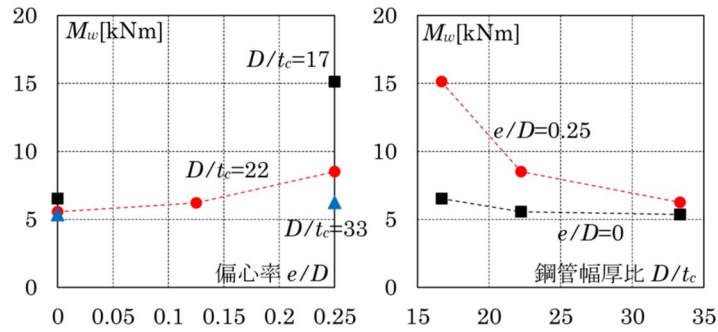


図7 降伏耐力時の M_w - e/D および D/t_c の関係

表2 降伏曲げ耐力の計算値と FEM 解析値の比較

モデル名称	解析値	既往の評価式	解析値 /計算値	修正評価式	解析値 /計算値
	[kNm]	[kNm]		[kNm]	
22-e0	147.2	157.6	0.93	163.6	0.90
22-e25	147.7	138.6	1.07	146.7	1.01
22-e50	132.5	119.6	1.11	129.7	1.02
17-e0	167.7	197.0	0.85	204.5	0.82
17-e50	158.8	149.1	1.06	160.8	0.99
33-e0	125.0	127.0	0.98	130.2	0.96
33-e50	112.9	96.7	1.17	104.0	1.09

モデル名称について e0 : 偏心なし, e25 : 偏心率 0.125, e50 : 偏心率 0.25, 17 ~ 33 : 鋼管幅厚比

< 引用文献 >

- 1) 松尾真太郎：外ダイアフラムを用いた角形鋼管柱梁接合部の耐力と設計法，京都大学学位論文，2009年3月

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 崔越, 松尾真太郎, 熊谷祐飛	4. 巻 28
2. 論文標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式柱梁接合部の曲げせん断特性に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 426-435
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 -

1. 著者名 崔越, 松尾真太郎, 熊谷祐飛	4. 巻 26
2. 論文標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 635-641
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤尾聡, 松尾真太郎, 熊谷祐飛, 崔越
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その4 部分架構骨組実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊谷祐飛, 松尾真太郎, 赤尾聡, 崔越
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その5 各部の歪性状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 崔越, 松尾真太郎, 赤尾聡, 熊谷祐飛
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その6 偏心率の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 崔越, 松尾真太郎, 赤尾聡
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その7 軸力の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 熊谷祐飛, 石渡光, 松尾真太郎, 崔越
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その1 実験計画および結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 崔越, 松尾真太郎, 石渡光, 熊谷祐飛
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その2 FEM解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石渡光, 熊谷祐飛, 松尾真太郎, 崔越
2. 発表標題 偏心梁付き外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動 その3 有限要素法解析による応力伝達の検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
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

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