

鑄造柱継手の力学的性能に関する実験的研究

カク オツキン 市岡 大幸
Yixin Hao, Daikou Ichioka

概 要

筆者らは、鑄造により製作した柱継手を提案した。本研究では、鑄造化した柱継手「鑄造仕様」の逆対称曲げ試験及び FEM 解析を行い、接合部耐力と変形能力を確認した。また、上記試験により鑄物内部欠陥等による脆性破壊が起こらないことも確認した。これらの結果により、鑄造化することの製造、性能面などのメリットを含めて適用の有効性を検証した。

結果として、以下の2点を明らかにすることができた。

- ①接合部耐力が降伏線理論による耐力式で評価できる。
- ②変形角 1/50rad まで、安定した履歴が得られ、割れや亀裂などは見られなかった。

Experimental Study on Mechanical Performance of Cast Column Joint

Abstract

The authors have proposed a column joint manufactured by casting. In this study, an antisymmetric bending test and FEM analysis of the cast column joint "casting specification" was performed to confirm the strength and deformation capacity of the joint. In addition, it was confirmed by the test that brittle fracture due to internal defects in the casting did not occur. Based on these results, the effectiveness of the application was verified, including the merits of casting in terms of manufacturing and performance.

As a result, it was possible to clarify the following two points.

- ① The load resistance of the joint can be evaluated by a load resistance formula based on yield line theory.
- ② Stable hysteresis was obtained up to 1/50 rad deformation angle, and no cracks were observed.

キーワード：鑄造, 柱継手, FEM 解析, 逆対称曲げ試験

1. はじめに

現在、3・4階建て重量鉄骨造の150角形鋼管の柱継手において、従来工法の柱継手「溶接仕様」は溶接工数が多く、生産負荷が大きいことが問題である。そのため、鋳造化等の生産の省力化を進めている。

本報では、鋳造化した柱継手「鋳造仕様」の逆対称曲げ試験及びFEM解析を行い、接合部耐力と変形能力を確認する。また、上記試験により鋳物内部鑄巣等による脆性破壊が起らないことも確認する。鋳造化することの製造、性能面などのメリットを含めて適用の有効性を検証した。

2. 柱継手の概要

柱継手の概要を図1に示す。「溶接仕様」と「鋳造仕様」柱継手の断面性能の比較を表1に示す。

柱継手は、角形鋼管柱を対象としており、接合方法はエンドプレート形式の高力ボルト引張接合である。接合ボルトはトルシア形高力ボルト(S10T)相当の両ネジボルト(以下、BCボルトUという)を用いている。□-150×150×9/12の柱材を適用対象とし、鋼種はBCR295とTSC295を適用範囲とする。

「溶接仕様」の柱継手は、図1に示すように、H形断面が縦横に交差した形状(クロスH断面)で、端部にエンドプレートと接合プレートが溶接されている。クロスHのフランジとエンドプレート及び接合プレートの溶接は完全溶込み溶接としている。柱継手は柱の中央付近に設け、エンドプレートとタッププレートとBCボルトUで現場接合する。

「鋳造仕様」の柱継手は、曲りがある十字の形状(以下、中空十字型断面という)で、端部エンドプレートと接合プレートが鋳造加工で一体化されている。中空十字型断面は、接合プレートからエンドプレート方向にテーパがついており、徐々に断面増大する。

なお、「鋳造仕様」の設計は「溶接仕様」と同様の扱いとし、終局時に柱継手を弾性域に留めることを条件に設計する。エンドプレートの面外曲げ耐力は終局時に柱継手に作用するモーメント以上であることを確認する。エンドプレート面外曲げ耐力 M_y は降伏線理論¹⁾を用いて算定する。エンドプレートの面外曲げ降伏機構を図2に、エンドプ

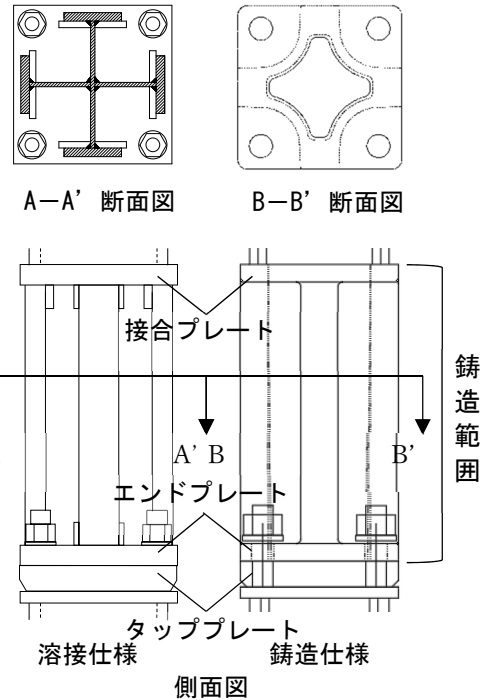


図1 柱継手の概要

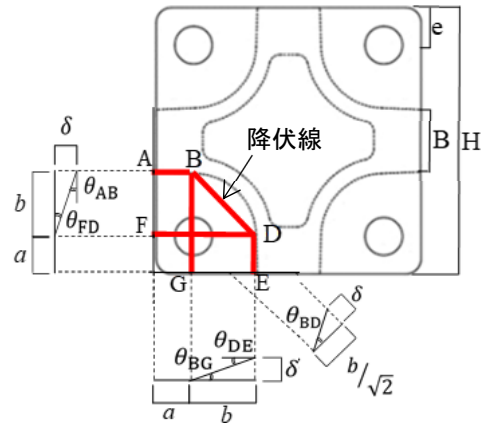


図2 エンドプレートの面外曲げ降伏機構

表1 柱継手断面性能の比較

断面性能		溶接仕様①	鋳造仕様②	②/①
断面積	[mm ²]	5,167	6,692	1.3
断面二次モーメント	[mm ⁴]	9,501,907	12,564,774	1.3
断面係数	[mm ³]	118,774	157,060	1.3
基本強度	[N/mm ²]	325	275	0.8
降伏モーメント	[kN・m]	38.6	43.0	1.1

表2 エンドプレートの面外曲げ耐力の比較

エンドプレートの面外曲げ耐力[kN・m]		終局時継手部に作用するモーメント[kN・m]
「溶接仕様」	「鋳造仕様」	
47.5	41.1	18.1

レートの面外曲げ耐力の「溶接仕様」との比較を表2に示す。「鋳造仕様」のエンドプレートの面外曲げ耐力は「溶接仕様」より小さいが、終局時継手部に作用するモーメントより大きい。

エンドプレート面外曲げ耐力 M_y の計算過程を

以下に示す。

図2により、各降伏線の回転角を次式で与える。

$$\theta_{AB}=\theta_{FD}=\theta_{DE}=\theta_{BG}=\delta/b$$

$$\theta_{BD}=\sqrt{2}\delta/b$$

各降伏線の長さを次式で与える。

$$L_{FD}=L_{BG}=a+b$$

$$L_{AB}=L_{DE}=a$$

$$L_{BD}=\sqrt{2}b$$

降伏線の単位長さ当たりの全塑性モーメント $L M_p$ を次式で与える。

$$L M_p=t_c^2 \cdot e F_y / 4$$

なお、 t_c はエンドプレート厚さ、 $e F_y$ はエンドプレートの F 値を示す。

各降伏線における内部仕事の総和 E は、

$$E=2E_{AB}+2E_{FD}+E_{BD}=\{(a+b)/b\}t_c^2 \cdot e F_y \cdot \delta$$

エンドプレートの面外曲げによる局部耐力を P_p とし、外力による仕事 W を次式で与える。

$$W=P_p \cdot \delta$$

内部仕事 E と外力仕事 W を等しいとすると、

$$P_p=\{(a+b)/b\}t_c^2 \cdot e F_y$$

エンドプレート面外曲げ耐力 $e M_y$ は次式による。

$$e M_y=2 \cdot \frac{2}{3} P_p \cdot l_b$$

なお、ボルト張力の回転中心を継手断面の端部と仮定し、最外縁ボルト芯までの距離を応力中心間距離 l_b とする。

3. 柱継手の逆対称曲げ試験

3.1 試験概要

図3、表3に柱継手の逆対称曲げ試験の試験体の仕様を示す。鋳造物の内部鑄巣を切断面で確認し、写真1に示す。写真2に試験体を示す。

試験体である柱継手は鋳造によるもので、鋳鋼 SCW480²⁾の品質適合品である。「溶接仕様」と同様に、柱とは完全溶込み溶接で接合し、柱継手は4本の M22 BC ボルト U によりボルト接合される。28mm 厚の 490N/mm² 級鋼材に設けた逆ねじタップ孔と接合される。接合プレートは 22mm 厚である。試験体は3体全て同じ仕様である。

表3 試験体仕様

試験体	ボルト孔	ボルト	接合PL板厚	柱継手材料	タップ孔PL板厚
1	φ24	M22	22mm	鋳鋼 (SCW480)	28mm (SN490B)
2		BCボルトU			
3		※			

※：トルシア形高力ボルト（S10T）相当の両ネジボルト

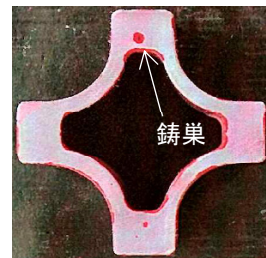
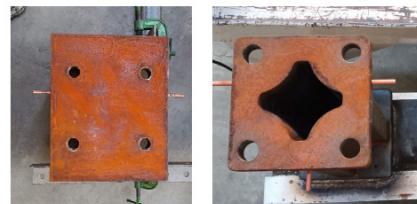


写真1 鋳造物の内部鑄巣



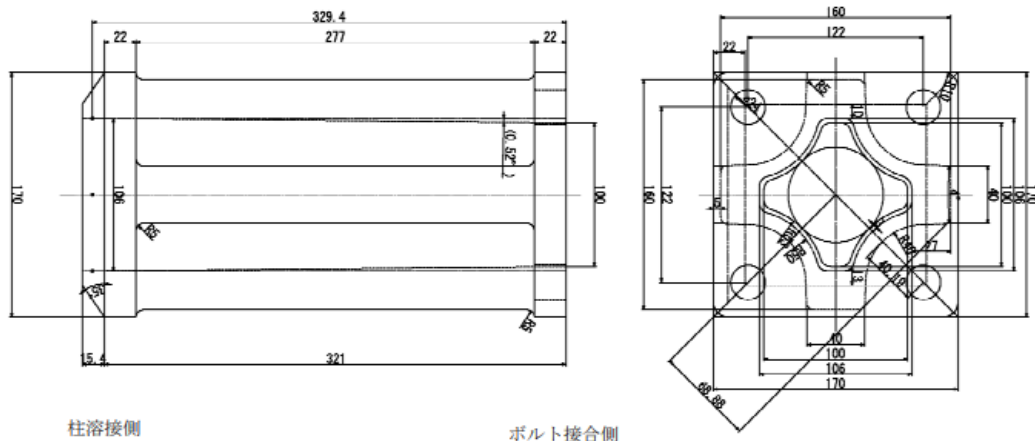
(a) タップPL側接合面

(b) 柱継手側接合面



(c) 柱継手と柱を溶接した試験体

写真2 試験体



柱溶接側

ボルト接合側

図3 試験体仕様（柱継手部分）

本試験体柱継手鋳鋼部分の素材試験結果を表 4 に示す。

3.2 試験方法

図 4, 写真 3 に試験装置と荷重方法の概要を, 図 5 に荷重状況を示す。荷重は正側単調荷重で行い, ボルト接合面のずれ量 $\delta=0.2\text{mm}$ を超えたときを接合面のすべりが発生したと判断し, その時点で試験を終了した。図 6 に変位計測方法を示す。荷重部直下の鉛直変位 DG1, DG2, ボルト接合面の鉛直方向相対変位 DG4, DG5, そして, ボルト接合面の仕口の開き DG3 を計測した。DG4, DG5 は接合面を挟んでそれぞれのプレート側面に M6 スタッドを溶接し, アングルを介して変位計を, 2 面に取付けた。仕口の開きを計測した DG3 は, 仕口面から 50mm の位置の柱継手下面に M6 スタッドを取付け, タッププレートとの相対変位を計測した。

また, 接合部のボルトによる短期許容曲げ耐力 ${}_bM_y$ を次式で与える。

$${}_bM_y = 2P_{by} \cdot l_b = 49.9\text{kN} \cdot \text{m}$$

エンドプレートによる短期許容曲げ耐力 ${}_eM_y$ は

前述したエンドプレートの面外曲げ耐力である。

$${}_eM_y = 41.1\text{kN} \cdot \text{m}$$

中空十字型断面による短期許容曲げ耐力 ${}_mM_y$ を次式で与える。

$${}_mM_y = F \cdot Z = 49.3\text{kN} \cdot \text{m}$$

なお, 「鋳造仕様」の短期許容曲げ耐力の設計値はボルト, エンドプレート, 中空十字型断面の短期許容曲げ耐力の最小値とし, $41.1\text{kN} \cdot \text{m}$ となる。

接合部の短期許容せん断耐力を次式で与える。

$${}_jQ_{y1} = 4\mu \cdot P_{by} = 318.6\text{kN}$$

上記式記号の諸元を表 5 に示す。

表 4 鋳鋼部分の素材試験結果

鋼種	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	降伏比 [%]	破断伸び [%]
SCW480 (JIS規格)	275以上	480以上	-	20以上
本試験鋳鋼材	316	543	58.2	25.3

表 5 上記式記号の諸元

記号	値	
F	SCW480基準強度 [N/mm ²]	275
Z	中空十字型断面断面係数 [mm ³]	179,445
P_{by}	高力ボルトの短期許容引張耐力 [kN]	177
l_b	応力中心間距離 [mm]	141
μ	すべり係数 [-]	0.45

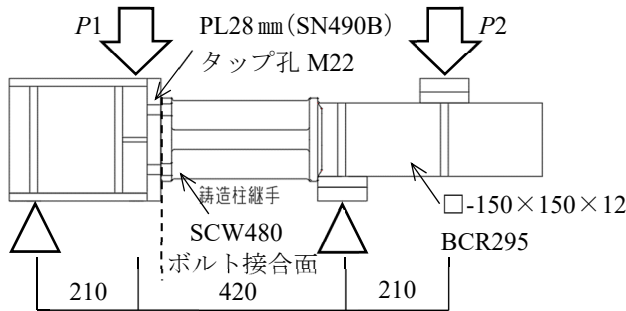


図 4 試験装置と荷重方法

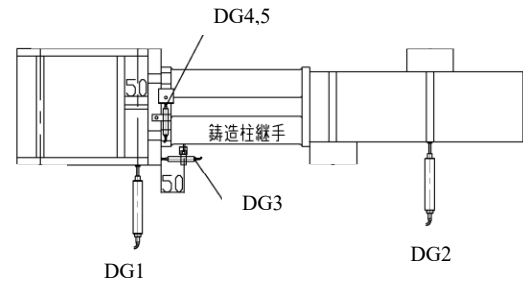


図 6 変位計測方法

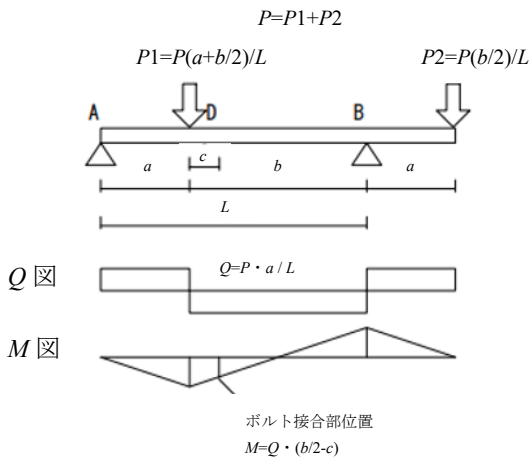


図 5 荷重状況

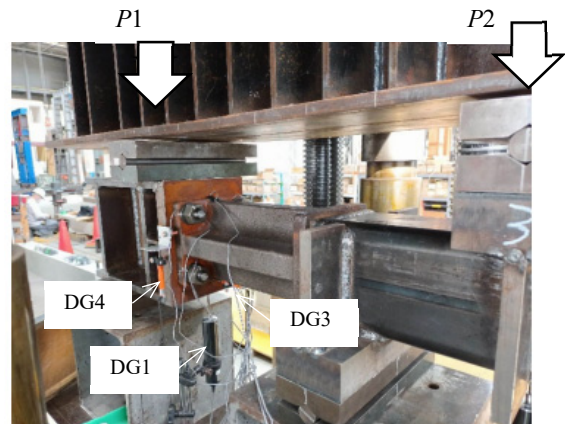


写真 3 試験状況及び変位計測位置

3.3 実験結果

表 5 に試験結果一覧を示す。各試験体継手部の曲げモーメント $M(\text{kN}\cdot\text{m})$ - 変形角 $\theta(\text{rad})$ 曲線を図 7 に示す。試験体 1 を赤線、試験体 2 を緑線、試験体 3 を青線、「鋳造仕様」の解析値を黒実線、初期剛性の解析値を黒点線で示す。なお、試験体は載荷点の変位を相殺しておらず、初期沈みが生じたが、解析値に比べ、初期剛性の差がないため、本試験結果に与える影響はないと判断した。変形角 1/50rad まで、安定した履歴が得られ、試験体に割れや亀裂などは確認できなかった。

各試験体継手部のせん断力 $Q(\text{kN})$ - 仕口の開き量 $\delta_1(\text{mm})$ 曲線を図 8 に示す。図より $Q \approx 250\text{kN}$ から仕口の開きが起こり始める。その後、接合部のすべり量 δ_2 が 0.2mm を超えるまで安定した履歴が得られた。表 5 より、試験でのすべり荷重 Q_e は、短期許容せん断耐力 $j_0 Q_{y1}$ に対して、1.29 から 1.60 倍の安全率を有していた。本結果は導入張力による基準化を行っていないが、十分な安全率を有していると判断できる。

せん断力 $Q(\text{kN})$ - すべり量 $\delta_2(\text{mm})$ 曲線を図 9 に示す。すべり量の性状としては、仕口の開き量 δ_1 (図 8) が 2 次勾配に移行するのと同様のタイミングで、すべり量についても 2 次勾配に移行した。

3.4 FEM 解析

試験の妥当性を確認するため、柱継手の FEM 解析を行った。「鋳造仕様」の解析モデルは図 10 に示すように試験体、試験治具と鋼管を合わせてモデル化したものである。高力ボルトをスパイダーモデル (1D のトラス要素) とすることで解析時間の削減を図った。

図 7 に試験値と解析値は弾性範囲内ほぼ同等の挙動を示している。また、表 5 に示すとおり、試験体 1 と試験体 3 では初期剛性の試験値の解析値に対する比率は 1.05 倍となり、ほぼ同等となっている。試験体 2 は初期沈みの影響で、初期剛性解析値の 0.91 倍となった。

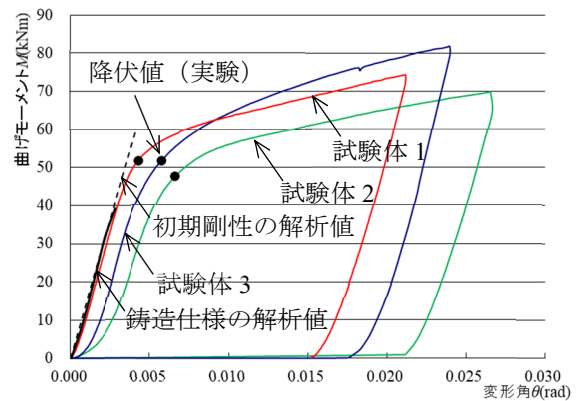


図 7 継手部曲げモーメント-変形角曲線

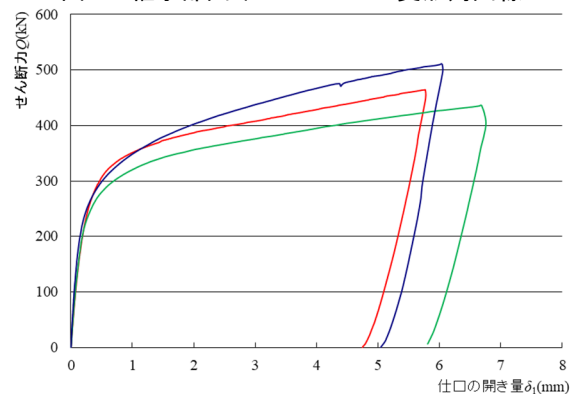


図 8 せん断力-仕口の開き量曲線

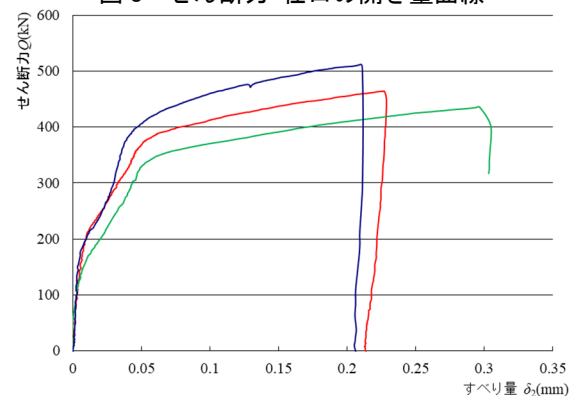


図 9 せん断力-すべり量曲線

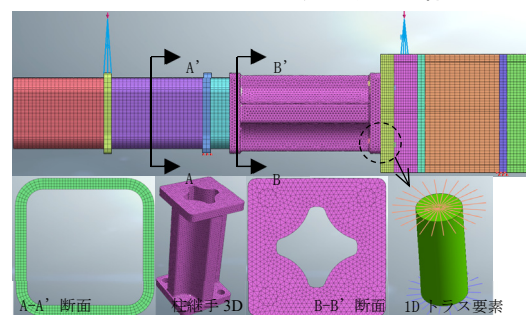


図 10 解析モデル (鋳造仕様)

表 5 試験結果一覧

試験体	柱継手設計耐力					初期剛性 FEM値 K_F [kN · m/rad]	実験値			比較		
	短期許容 せん断力 $j_0 Q_{y1}$ [kN]	aM_y	bM_y	cM_y	M_{y_min} (cM_{y1}, M_{y2}, M_{y3})		すべり荷重 Q_e [kN]	降伏耐力 M_e [kN · m]	初期剛性 実験値 K_e [kN · m/rad]	$Q_e / j_0 Q_{y1}$	M_e / M_{y_min}	K_e / K_F
1	318.6	41.1	49.9	46.7	41.1(EPL)	14,564	455.9	51.9	15,262	1.43	1.26	1.05
410.9							47.8	13,307	1.29	1.16	0.91	
508.3							51.7	15,303	1.60	1.26	1.05	

4. まとめ

「鑄造仕様」の柱継手について、逆対称四点曲げ試験と FEM 解析を行い、それぞれ以下の知見を得た。

- (1) 接合部耐力が降伏線理論による耐力式で評価できる。
- (2) 変形角 $1/50\text{rad}$ まで、安定した履歴が得られ、割れや亀裂などは見られなかった。

今後の課題として、鑄造仕様を運用するために、JIS 認証の取得が必要である。

また、鑄造技術を適用することで、より複雑な接合形状にも対応できる可能性があり、適用範囲の拡大が期待できる。

謝辞

本研究にあたり、株式会社アステック入江の関係者の皆様には多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 井上一郎: 建築鋼構造 その理論と設計, pp.2-176, 2007.12
- 2) 日本工業規格: JISG5102 - 1991 (溶接構造用鑄鋼品), 2019

執筆者紹介

ひとこと

本開発は将来予想される溶接工不足を補う目的で着手した。JIS 認証を取得することで複雑な接合部の鑄造生産が可能となり、大きく期待できる開発だと考える。今後も鑄造技術を様々な部位に展開していきたい。



カク オツキン
修士 (工学)