

論文 機械的ずれ止めによる影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究

倉富 洋*1・松山 礼佳*2・田中 照久*1・塚 純一*3

要旨: 十字鉄骨とコンクリートのみを使用した鋼・コンクリート合成柱材において、コンクリートの経年変化等により鋼とコンクリート間で肌隙が生じた際の挙動について検討した。鋼とコンクリートの一体性を確保するためにパーリング鋼板および柱継手によって応力伝達を行なうことを目的とした。一定軸力下で正負交番繰返し水平力を与える実験を行なったところ、鋼とコンクリートの付着のみでは一体性を確保できなかったが、パーリング鋼板あるいは柱継手を設けることで、合成断面としての一般化累加強度を発揮し、鋼とコンクリート間で応力が伝達できることを明らかとした。

キーワード: 鋼・コンクリート合成柱材, 十字鉄骨, パーリング鋼板, 肌隙

1. 序

省人化および省力化を目指した十字鉄骨とコンクリートを用いた八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材(以下、SC柱材と略記)が優れた耐震性能を示すことは、著者らの既往の研究より明らかとしている¹⁾。これまで縮小試験体で構造性能を確認してきたが、実大に近い寸法とした際に懸念される、コンクリートが所定の圧縮強度を発揮しにくくなる寸法効果の影響は、図-1に示すような試験体を製作し、文献2)にてほとんど見られないことが確認できた。

コンクリートは経年変化によって乾燥収縮が進行し、鋼とコンクリート間で肌隙を生じることが懸念される。本SC柱材はコンクリートが外気に接せられるため、外的要因により鋼とコンクリートの一体性が損失され易くなる恐れがある。また、本SC柱材と鉄骨梁の柱梁接合部で

は内スチフナを使用しない簡素化されたディテール³⁾を提案しており、鉄骨梁の応力をコンクリートに確実に伝達させる必要がある。これらのことから、柱鉄骨に機械的ずれ止めを設けることで、鋼とコンクリートの堅固な一体性を図ることが合理的であるものと考えられる。

文献4)では、機械的ずれ止めとしてパーリング鋼板³⁾を使用し、鋼とコンクリート間で応力伝達が可能か本SC柱材の曲げせん断実験を実施した。その結果、鋼とコンクリート間に肌隙がある状態でも、柱鉄骨にパーリング鋼板を適切に配置することにより、柱脚部において鋼・コンクリートの合成断面としての曲げ耐力を発揮できることを実験的に明らかとした。そこで本研究では、文献4)の結果を踏まえ、まずはパーリング鋼板の配置および個数を変動させて検討する。次いで、柱継手部を構成する添板と高力ボルトの存在に着目し、これらが機械的ず

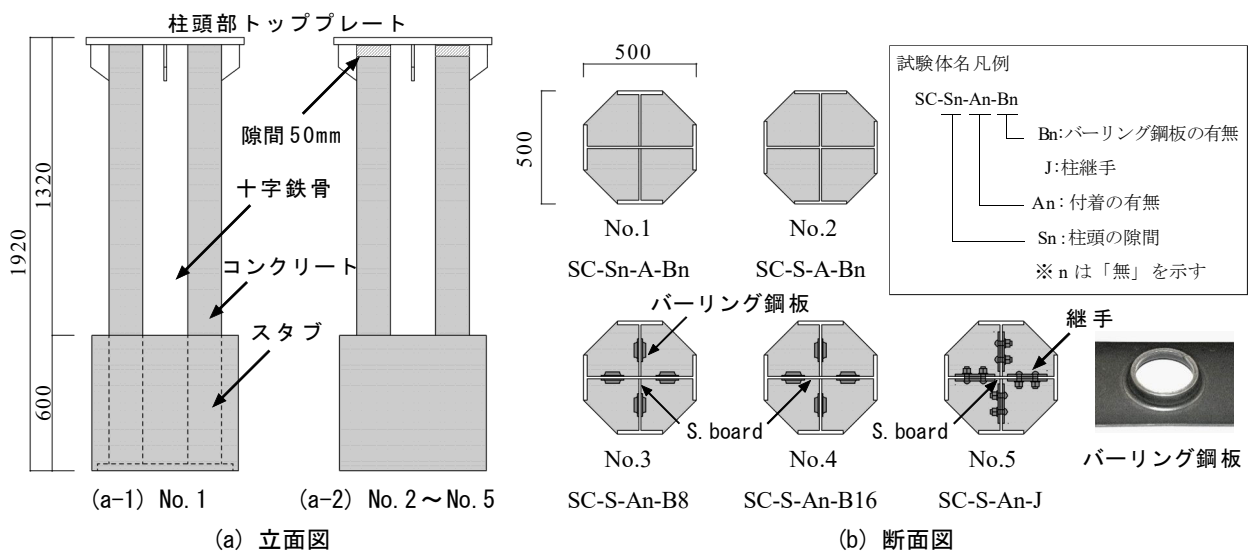


図-1 試験体詳細

*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 福岡大学大学院 工学研究科博士課程前期

*3 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

れ止めの役割を果たすものと考えた。本研究の目的は、パーリング鋼板および柱継手を機械的ずれ止めとし、鋼とコンクリートの一体性を確保するために必要な条件について、本SC柱材の曲げせん断実験により検証することである。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体詳細を図-1に示す。実大断面を想定して柱断面500x500mm、せん断スパン比3.0を有する試験体を5体制作した。以下に試験体の製作方法について概略説明する。本実験で使用した十字鉄骨は、強軸方向におけるH-500x200x10x16のロールH形鋼(SS400材)と、弱軸方向における上記H形鋼を切断したCT鋼を、ウェブ交差部で全長隅肉溶接して製作した。また、柱頭部には載荷治具との接続用の厚さ32mmのトッププレートを設け、柱鉄骨フランジとは完全溶け込み溶接、柱鉄骨ウェブとは隅肉溶接で接合した。コンクリートは呼び強度30N/mm²で、普通ポルトランドセメントと最大寸法20mmの骨材を用い、コンクリートには収縮に対する膨張剤などの添加は行なっていない。打設は縦打ちとし、脱型後に目視にてコンクリートが充填されていることを確認した。また、表-1中に、建築物の構造関係技術基準解説書⁶⁾に基づいてフランジおよびウェブの部材種別を計算した結果を示す。また、本実験に使用した鋼材の機械的性質を表-2に、実験時のコンクリートの圧縮強度を表-1中にそれぞれ示す。

試験体一覧を表-1に示す。試験体は全5体とし、実験変数には機械的ずれ止めの有無、パーリング鋼板の個数(8個または16個)、機械的ずれ止めの種類(パーリング鋼板または継手構成部材)を選定した。試験体SC-Sn-A-Bnは鋼とコンクリートの一体性が確保された基準試験体である。試験体SC-S-A-Bnは柱頭部のコンクリートに50mm高さの空隙を設け、圧縮軸力が直接コンクリートに伝達されないようにしている。即ち、本試験体は鋼とコンクリートの付着のみで応力伝達が可能かを検証するものである。次いで、試験体SC-S-An-B8、試験体SC-S-An-B16、試験体SC-S-An-Jは、柱頭部のコンクリートに空隙を設け、さらに鉄骨フランジおよびウェブ全面に1mm厚のスチレンボード(図-1中S.boardと表記)を貼ることで、鋼とコンクリート間の付着を完全に除去した試験体である。なお、以降の耐力計算において、スチレンボードの貼付による断面欠損は考慮していない。これらの試験体では、柱鉄骨が負担する応力をコンクリートに伝達させる術はパーリング鋼板あるいは継手部材に依ることになる。本実験で使用したパーリング鋼板は6mm厚の平鋼を加工したものであり、鉄骨ウェブに隅肉溶接で所定の箇所に取り付けている。なお、パーリング鋼板の孔径は50mm、突起高さは15mmであり、ウェブには50mmの貫通孔が設けられている。

パーリング鋼板取り付け位置および柱継手の詳細を図-2に示す。試験体SC-S-An-B8および試験体SC-S-An-B16では、それぞれパーリング鋼板を8個および16個使用した。試験体SC-S-An-B8では同一高さ位置に一段、試験体

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	柱十字鉄骨	フランジ幅厚比	部材種別**		載荷軸力* (kN)	$c\sigma_B$ (N/mm ²)	付着	機械的ずれ止め
				フランジ	ウェブ				
1	SC-Sn-A-Bn	CH-500x200x10x16	6.3	FA	FA	4756	40.5	有	無
2	SC-S-A-Bn	CH-500x200x10x16		FA	FA	4623	38.3	有	無
3	SC-S-An-B8	CH-500x200x10x16		FA	FA	4744	40.3	無	パーリング
4	SC-S-An-B16	CH-500x200x10x16		FA	FA	4689	39.4	無	パーリング
5	SC-S-An-J	CH-500x200x10x16		FA	FA	4689	39.4	無	継手

* 軸力比 n は 0.3 で共通。 $n = N / (s_c N_u)$ 、 N : 載荷軸力、 $s_c N_u$: SC 柱断面の圧縮耐力、 $s_c N_u = c A \cdot c \sigma_B + s A \cdot s \sigma_y$ 、 $c A$: コンクリート断面積、 $c \sigma_B$: コンクリートの圧縮強度、 $s A$: 十字鉄骨断面積、 $s \sigma_y$: 鉄骨の降伏点強度

** 部材種別の判別: フランジは $FA = 0.322(E / s_f \sigma_y)^{1/2}$ 、 $FB = 0.406(E / s_f \sigma_y)^{1/2}$ 、 $FC = 0.525(E / s_f \sigma_y)^{1/2}$ 、 ウェブは $FA = 1.46(E / s_w \sigma_y)^{1/2}$ で計算。
 E : 鋼材のヤング係数、 $s_f \sigma_y$ 、 $s_w \sigma_y$: それぞれ、 フランジおよびウェブの降伏点強度

表-2 鋼材の機械的性質

使用箇所	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Eln (%)	$Y.R.$
パーリング	SN490	6	388	558	2.05×10^5	28.6	0.70
ウェブ	SS400	10	368	469	2.00×10^5	38.8	0.78
フランジ	SS400	16	319	439	2.05×10^5	47.7	0.73

t : 板厚、 σ_y : 降伏点強度、 σ_u : 引張強さ、 E : ヤング係数、 Eln : 伸び率、 $Y.R.$: 降伏比

SC-S-An-B16では二段配置している(図-2(a),(b)参照)。文献4)においてパーリング鋼板を32個螺旋状に配置したところ、柱頭から数えて第一段目のパーリング鋼板で圧縮軸力を柱鉄骨からコンクリートに伝達でき、柱脚部において合成断面としての一般化累加強度を発揮した。このため、本実験ではパーリング鋼板の個数を減少させ、反曲点位置に近い箇所には設けることとした。

柱継手位置を図-2(c)に示す。本試験体の十字鉄骨は製作後に切断し、上下鉄骨間は7mmの隙間を設けるようにした。フランジは現場溶接を想定した完全溶け込み溶接接合とし、ウェブは高力ボルト接合とした。ウェブ継手部における添板には347x170x9(SS400材)を、トルシア形高力ボルトS10Tには呼び径20mm、首下長さ60mmを、それぞれ使用した。

2.2 荷重方法

荷重装置を図-3に示す。荷重は5000kN試験機を用いて所定の軸力を作用させ、一定に保持した状態で1000kNの水平ジャッキで正負交番繰返し水平力を荷重した。載

荷治具と試験体はPC鋼棒で締め上げて支持ビームと一体化させた。荷重形式は、部材角2.0%までは0.5%ずつ漸増させ、部材角2.0%から4.0%まで1.0%ずつ漸増させるものとした。各変位振幅とも2サイクルずつ繰り返した。ここで、部材角は水平ジャッキ加力位置における水平変位を柱材長 L で除した値である。水平力は水平ジャッキに取り付けたロードセルにて計測した。変形は、柱脚のスタブ部分に変位計フレームを設置し、柱材の水平変位および軸縮みを測定した。ひずみゲージは主に鉄骨フランジおよびウェブに貼付し、パーリング鋼板および継手の機械的ずれ止め相互間におけるウェブの材長方向にも貼付した(図-2参照)。

3. 実験結果

3.1 圧縮軸力荷重時におけるひずみ分布

図-4に所定の圧縮軸力荷重時におけるウェブの材長方向ひずみ分布を示す。ひずみの値は同一高さ位置に貼付したひずみゲージで計測された平均値である。同図(a)

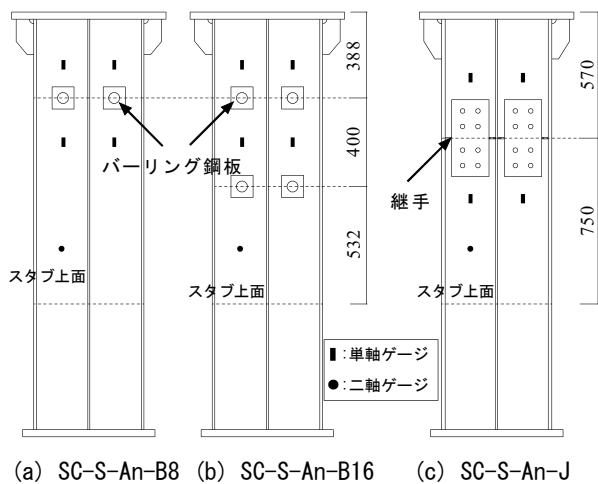


図-2 機械的ずれ止めの取り付け位置

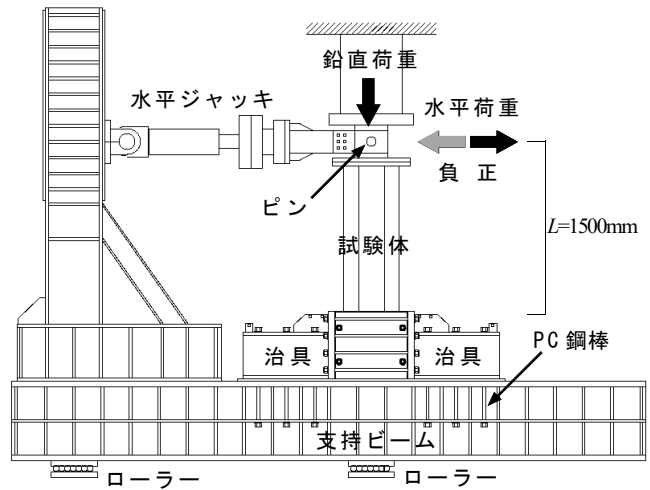


図-3 荷重方法

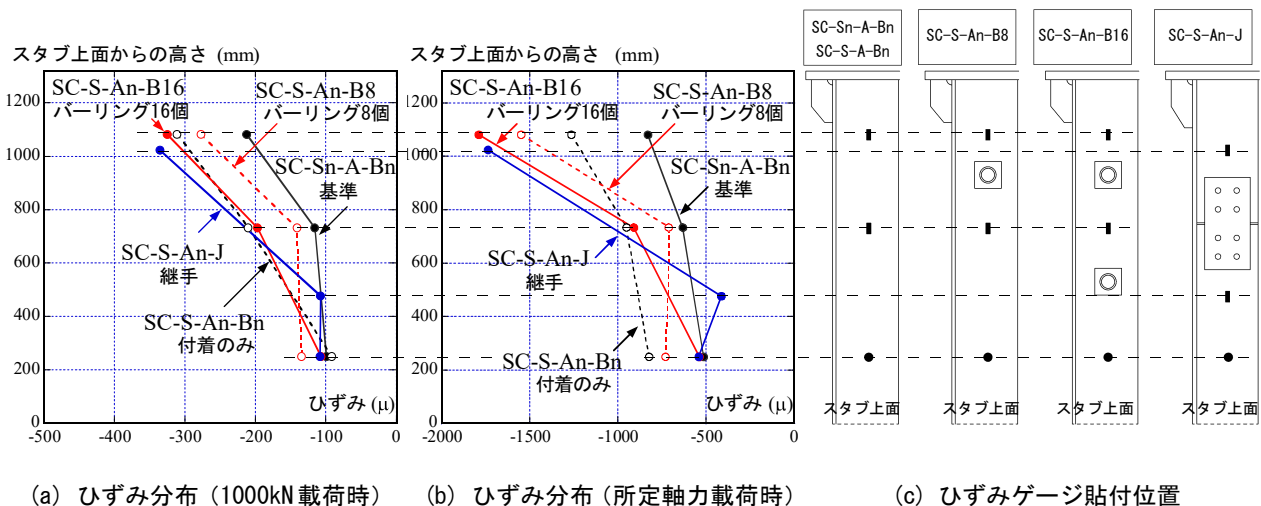


図-4 圧縮軸力荷重時における柱ウェブのひずみ分布

には内柱に長期軸力として作用することを想定した圧縮軸力およそ1000kN載荷時の、同図(b)には所定の圧縮軸力載荷時のひずみ分布を記載している。いずれの試験体も柱頭から柱脚に向かって鉄骨ウェブのひずみが小さくなる。1000kN載荷時には、機械的ずれ止めを設けずに鋼とコンクリートの付着のみで応力の伝達を図った試験体SC-S-An-Bnでも、柱脚部において基準試験体と同等のひずみとなっており、コンクリートへ軸力を伝えられていることがわかる。

同図(b)より、試験体SC-S-An-Bnでは鉄骨ウェブのひずみ増減は僅少であり、柱頭から柱脚にかけて鉄骨からコンクリートへ円滑に軸力が伝達できていないものと考えられる。そのため、3.2項で詳述する水平抵抗力も基準試験体ほどの耐力を發揮できなかった。一方で、バーリング鋼板を設けた試験体SC-S-An-B8およびSC-S-An-B16と、継手を設けた試験体SC-S-An-Jでは、機械的ずれ止めを介することで鉄骨ウェブのひずみが段階的に減少している。これは、機械的ずれ止めによって軸力がコンクリートへ流れた証左である。柱脚部付近においては、試験体SC-S-An-B16とSC-S-An-Jのひずみは、基準試験体SC-Sn-A-Bnと同程度のひずみが計測されていた。水平力一部材角関係においても基準試験体に近い履歴性状を示しており、鋼とコンクリートが一体となって挙動しているものと推察される。継手を設けることでコンクリートに応力を伝達できた要因は、継手を構成する添え板、ボ

ルト頭部およびナット部分などの突起物により、コンクリートへ支圧力として作用したためだと考えられる。一方で、バーリング鋼板8個を配置した試験体SC-S-An-B8では基準試験体ほどウェブのひずみが小さくなっていなかった。このことから、少なくとも一段にバーリング鋼板8個を配置しただけではコンクリートに応力を伝達するに十分ではないことが窺える。

3.2 水平力一部材角関係

図-5に水平力一部材角関係を示す。同図(f)に全ての試験体の包絡線を示しており、縦軸には各除荷点におけるPA効果を考慮した柱脚位置での抵抗モーメントを各試験体の一般化累加強度 M_{pc2} で除した値を、横軸には部材角を取っている。表-3に主要な実験結果を記載した。図-5中の破線は鋼材の降伏応力度とコンクリート強度を用いて計算した一般化累加強度 M_{pc} (表-3中 M_{pc1} と表記)を柱脚部で發揮するとして式(1)で求めた塑性崩壊機構形成時の耐力である。同図中の実線はコンクリート強度を0.85倍して計算した一般化累加強度(表-3中 M_{pc2} と表記)で求めたものである。

$$Q = \frac{M_{pc}}{L} - N \cdot R \quad (1)$$

ここで、 L : スタブフェイスから水平加力位置までの距離、 N : 柱軸力、 R : 部材角である。

図-5より、試験体SC-S-A-Bnを除いた全ての試験体で実験耐力は M_{pc2} で計算した塑性崩壊機構形成時の耐力

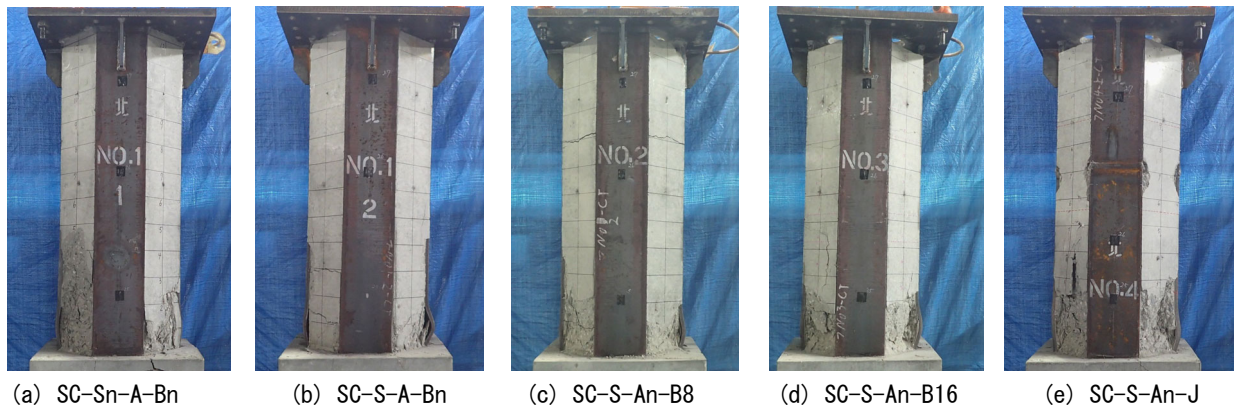


写真-1 実験後の試験体

表-3 主要な実験結果一覧

試験体名	実験耐力								計算耐力		$\frac{M_{max}}{M_{pc1}}$		$\frac{M_{max}}{M_{pc2}}$	
	Q_{max} (kN)		R_{max} (%)		M_{max} (kNm)		R_{max} (%)		M_{pc1}	M_{pc2}	正	負	正	負
	正	負	正	負	正	負	正	負	(kNm)	(kNm)				
SC-Sn-A-Bn	798	-790	1.50	-2.64	1318	-1403	1.98	-3.11	1254	1185	1.05	1.12	1.11	1.18
SC-S-A-Bn	609	-631	0.76	-2.02	1134	-1175	4.00	-3.77	1230	1165	0.92	0.96	0.97	1.01
SC-S-An-B8	703	-722	1.42	-2.05	1227	-1266	3.91	-3.38	1252	1183	0.98	1.01	1.04	1.07
SC-S-An-B16	652	-708	3.03	-2.63	1199	-1305	3.48	-3.97	1242	1175	0.97	1.05	1.02	1.11
SC-S-An-J	686	-694	1.89	-2.09	1222	-1219	3.86	-3.67	1242	1175	0.98	0.98	1.04	1.04

を上回っていることがわかる。いずれの試験体も実験終了時まで紡錘形の履歴性状を示したものの、付着のみで鋼とコンクリートの応力を伝達させようとした試験体 SC-S-A-Bn は基準試験体と比較して履歴ループが小さく描かれており、小変形域から水平抵抗力の上昇が見られず、やや鉄骨の履歴性状に近い挙動を示した。これは、3.1項でも述べたように、柱鉄骨からコンクリートへの応力伝達が円滑に行えなかったためだと考えられる。機械的ずれ止めを設けた三試験体は試験体 SC-S-A-Bn に対して挙動が改善されており、鋼とコンクリート間での応力のやり取りがなされていることがわかる。しかしながら、基準試験体と比較して、試験体 SC-S-An-J、試験体 SC-S-An-B16、試験体 SC-S-An-B8 の順に、計算耐力に達

するまでに必要な変形量が増加しており、如何に早期に計算耐力を発揮させるかが課題であると云える。パーリング鋼板個数8個を配置した試験体 SC-Sn-An-B8 では部材角3.0%で計算耐力に達することからも、パーリング鋼板個数の多寡が影響しているものと推察される。試験体 SC-Sn-An-B16 と SC-Sn-An-J ではほぼ同等の挙動を示したことから、本実験条件下で云えば、柱継手を構成する添え板や高力ボルトは、パーリング鋼板16個と同等以上の応力伝達能力を有しているものと考えられ、柱継手のある階層ではパーリング等の機械的ずれ止めを設ける必要性がないことが期待できる。パーリング鋼板の配置箇所および定量的評価については更なる検討が必要であると考えられる。

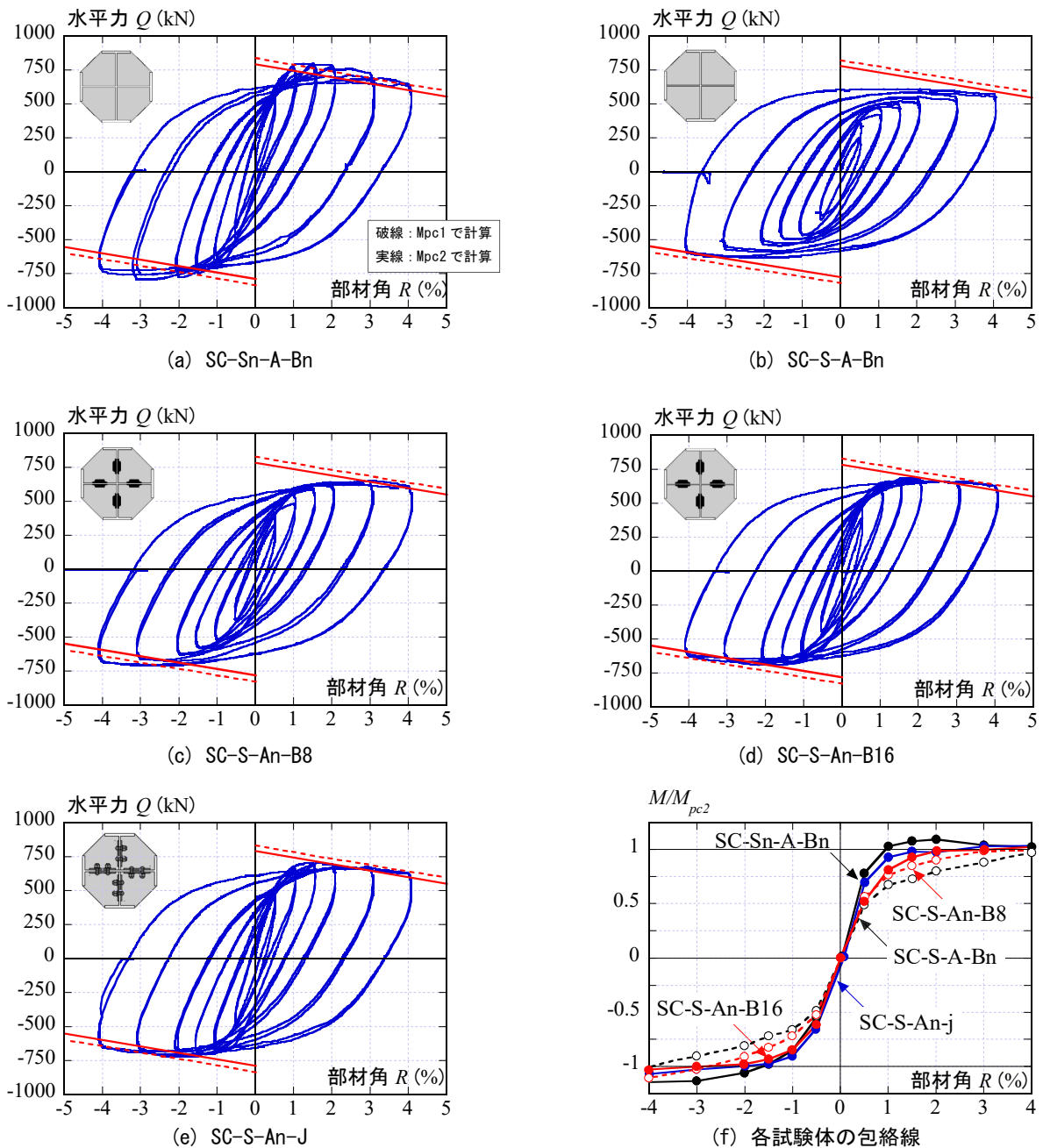


図-5 水平力-部材角関係

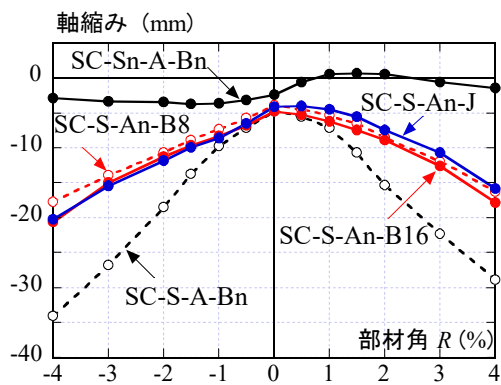


図-6 軸縮みの推移

写真-1に実験後の試験体を示す。全ての試験体において、部材角1.0%までに柱脚部付近の鉄骨間のコンクリートにひび割れが発生した。パーリング鋼板および継手有りの試験体では、機械的ずれ止め配置位置で水平方向にひび割れが観察された。また、試験体SC-Sn-A-Bn, SC-S-A-Bn, SC-S-An-Jは部材角1.5%で、試験体SC-S-An-B8, SC-S-An-B16は部材角2.0%で、それぞれ柱脚部位置での軸端フランジの局部座屈が観察された。一体性が十分に保たれていない試験体SC-S-A-Bnにおいて、フランジが局部座屈しても急激な耐力低下に繋がらなかった要因は、充填されたコンクリートが座屈抑制および捩じれ剛性の増大に寄与したためだと考えられる。

3.3 軸縮み挙動

図-6に軸縮み-部材角関係を示す。縦軸には、2サイクル目の各除荷点における軸縮み量を取っている。同図より柱頭コンクリートに隙間がない基準試験体SC-Sn-A-Bnが最も軸縮みが抑えられていることがわかる。一方で、付着のみの試験体SC-S-A-Bnは軸縮みが大きく蓄積されたことから、鋼とコンクリート間の付着だけでは軸縮みの抑制にはつながらないことが窺える。一方で、パーリング鋼板および継手を設けた三試験体に明瞭な差異は観察されなかった。基準試験体と同程度に抑制することはできないが、部材角3.0%において軸縮み15mm(軸歪にして1.0%)以内に抑えられていることから、パーリング鋼板および継手部材による機械的ずれ止めの効果が見られたものと考えられる。

4. 結論

八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材のパーリング鋼板および柱継手部における機械的ずれ止めの効果について検討するため、一定軸力下における繰返し載荷実験を行なったところ、以下の知見を得た。

1) 鋼とコンクリートの付着のみで応力伝達を期待した試験体は合成断面としての一般化累加強度を発揮することができなかった。乾燥収縮等による経年劣化において鋼とコンクリート間で肌隙が生じる際の対応には、

機械的ずれ止めを設ける必要がある。

- 2) 鋼とコンクリート間の応力伝達において、パーリング鋼板および柱継手を構成する添え板や高力ボルトなどの機械的ずれ止めを設けることは有効であり、ウェブとコンクリート間での肌隙や柱頭部での空隙が生じた場合でも鋼・コンクリートの合成効果が期待できるようになる。
- 3) 柱継手による機械的ずれ止めの効果は、圧縮軸力載荷時におけるひずみ挙動および水平力-部材角関係からパーリング鋼板16個配置した場合と同等以上の効果が期待できる。

謝辞

本研究は平成31年度科学研究費助成事業・基盤研究(c)(課題番号18K04452, 研究代表: 堺純一)の助成を受けた。また、試験体の製作および載荷実験にあたり、福岡大学教育技術職員の石橋宏一郎氏と大野敦弘氏および、吉村威吹氏、松本和佳子氏、寺田修氏をはじめとする同大学堺研究室の卒研究生にお世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 川原健輔: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.60B, pp.65-71, 2014.3
- 2) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 池田将啓: 寸法効果による影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1069-1074, 2019.7
- 3) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 瀧上大貴: 鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1117-1122, 2018.7
- 4) 倉富洋, 松山礼佳, 田中照久, 堺純一: 寸法効果および機械的ずれ止めによる影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する研究, 第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp54-pp61, 2019.11
- 5) 田中照久, 堺純一, 河野昭彦: 貫通鉄筋を有するパーリングシアコネクタの力学的性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1027-1032, 2015.7
- 6) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会: 2015年版建築物の構造技術関係技術基準解説書, 2015
- 7) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014