論文　端部補強した八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の耐震性能に関する実験的研究

河野　公晴[*1]・倉富　洋[*2]・田中　照久[*3]・堺　純一[*4]

要旨:八角形断面を有する鋼･コンクリート合成柱材の耐震性能を調べるために，一定軸力下で繰返し水平力を受ける載荷実験を行った。実験変数には，軸力比（柱断面圧縮耐力に対する作用軸力の比），鉄骨フランジの幅厚比，補強材の有無をとり，これらが本柱材の弾塑性変形性状に及ぼす影響について実験的に調べた。軸力比0.3を載荷した試験体は，優れた耐震性能を示したのに対し，軸力比0.5を載荷した試験体は，フランジの局部座屈が発生し，軸縮みが進行すると共に，急激な耐力の低下が見られた。そこで，バンドプレート等で補強を行ったところ，補強材がフランジの局部座屈を抑制し，優れた変形性能を示した。

キーワード:鋼･コンクリート合成柱材，十字鉄骨，高強度コンクリート，拘束効果，バンドプレート

1. 序

著者らは，鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略記）構造の特徴である高耐震性能の更なる向上と，施工における省力化・省人化を目指した鋼・コンクリート（以下SCと略記）合成柱材の開発を目的として，十字鉄骨とコンクリートのみで構成される八角形断面（**図-1**参照）を有する新しい鉄骨コンクリート柱材の弾塑性変形性状について実験及び解析的に研究を行っている。既往の研究により，30N/mm²級のコンクリート強度を用いた実験を行い，高軸力下でも優れた耐震性能を示すことを実験的に明らかとしている[1)]。

本論では，断面を小さくすることによる更なるコスト削減及び有効空間の確保を目的として，60N/mm²級のコンクリート強度を用いた本柱材の弾塑性変形性状について検討するため，一定軸力下で繰返し水平力を受ける柱材の載荷実験を行い，鉄骨比，軸力比が柱材の変形性能に及ぼす影響について実験的に調べた。

本柱材は十字鉄骨が開断面であるため，高軸力では変形の増大に伴い充填したコンクリートが剥落し，鉄骨フランジが局部座屈を起こすことによる不安定な弾塑性挙動を起こすことが危惧される。そこで，本柱材にバンドプレートによる柱端部の補強（**図-1**(b)参照）および薄鋼板による全面補強（**図-1**(c)参照）を行うことを考え，補強材の有無が柱材の変形性能に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験計画

2.1　試験体

試験体の概要を**図-1**に示す。試験体は，柱断面190mm×190mmの八角形断面で柱材長800mmのせん断スパン比2.11の柱であり，合計12体製作した。

表-1に試験体一覧を示す。本実験では60N/mm²級のコンクリートを用いており，実験変数に軸力比n(0.3，0.5)鉄骨フランジの幅厚比(5.0，8.3，11.1，21.7)，補強材の

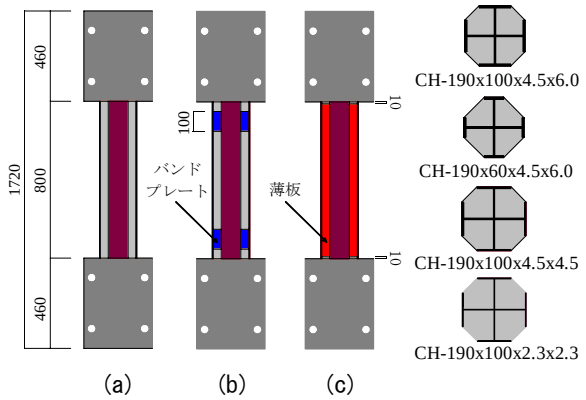


図-1　SC柱試験体

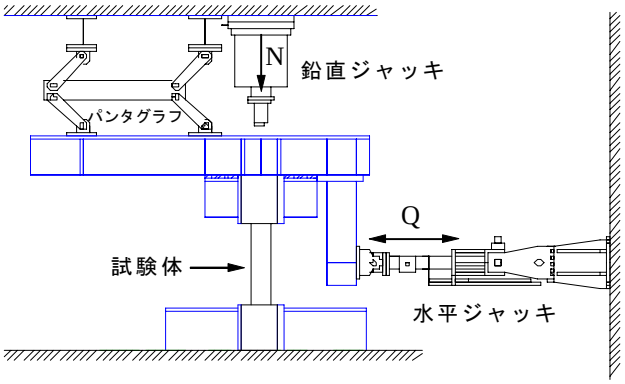


図-2　載荷装置

*1　福岡大学　工学部建築学科　（正会員）
*2　福岡大学　工学部建築学科助教・博士（工学）　（正会員）
*3　福岡大学　工学部建築学科助手　（正会員）
*4　福岡大学　工学部建築学科教授・博士（工学）　（正会員）

表-1　試験体一覧

シリーズ名	試験体名	内蔵鉄骨			コンクリート強度	補強方法	補強材の板厚	軸力比	載荷軸力
		寸法	鉄骨比(%)	フランジ幅厚比	${}_c\sigma_B$ (N/mm^2)		(mm)	n	N(kN)
シリーズⅠ	C(8.3)-0.30	CH-190×100×4.5×6.0	12.4	8.3	76.4	無	-	0.3	1065
	C(8.3)-0.50				74.2	無	-	0.5	1744
	C(5.0)-0.30	CH-190×60×4.5×6.0	10.9	5.0	77.2	無	-	0.3	889
	C(5.0)-0.50				75.1	無	-	0.5	1455
	C(21.7)-0.30	CH-190×100×2.3×2.3	5.51	21.7	73.5	無	-	0.3	810
シリーズⅡ	C(11.1)-0.30	CH-190×100×4.5×4.5	10.7	11.1	69.3	無	-	0.3	1019
	C11.1)-0.50				69.4	無	-	0.5	1701
	B(11.1)-0.30				69.9	バンドプレート	4.5	0.3	1024
	B(11.1)-0.50				67.6	バンドプレート	4.5	0.5	1675
	T(11.1)-0.50				70.0	薄鋼板による全面補強	2.3	0.5	1709
	C(21.7)-0.50	CH-190×100×2.3×2.3	5.51	21.7	71.7	無	-	0.5	1358
	B(21.7)-0.50				72.0	バンドプレート	2.3	0.5	1362

${}_c\sigma_B$: シリンダー強度，鉄骨比 = ${}_sA/A$，${}_sA$: 鉄骨断面積，A: 柱断面積，フランジの幅厚比 =$B/2t$，B: フランジの幅，t: フランジの板厚

表-2　鋼材の機械的性質

シリーズ名	t (mm)	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	E (N/mm^2)	$Elng.$ (%)	$Y.R.$
シリーズⅠ	2.3	267	372	2.10x10^5	46.0	0.72
	4.5	344	458	2.14x10^5	38.0	0.75
	6.0	359	455	2.02x10^5	34.5	0.79
シリーズⅡ	2.3	308	460	2.13x10^5	32.4	0.67
	4.5	415	524	2.19x10^5	32.0	0.79

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

試験体名凡例

C (8.3)-0.30

軸力比

鉄骨フランジ幅厚比

C：バンドプレート無し
B：バンドプレート有り
T：薄板による全面補強

有無(バンドプレートによる端部補強，薄板による全面補強)を選んだ。バンドプレート有りの試験体は，柱頭・柱脚フェイスから50mm離れたところに100mm幅の鉄骨フランジと同じ板厚の鋼板を隅肉溶接している。板厚2.3mmの鋼板を4面隅肉溶接して製作した鋼管で全面補強した試験体T(11.1)-0.50は，薄鋼板に軸力と曲げを負担させないようにするために，柱頭・柱脚フェイスから10mmの隙間を設けている。

表-2に鋼材の機械的性質を示す。

2.2　載荷方法及び測定方法

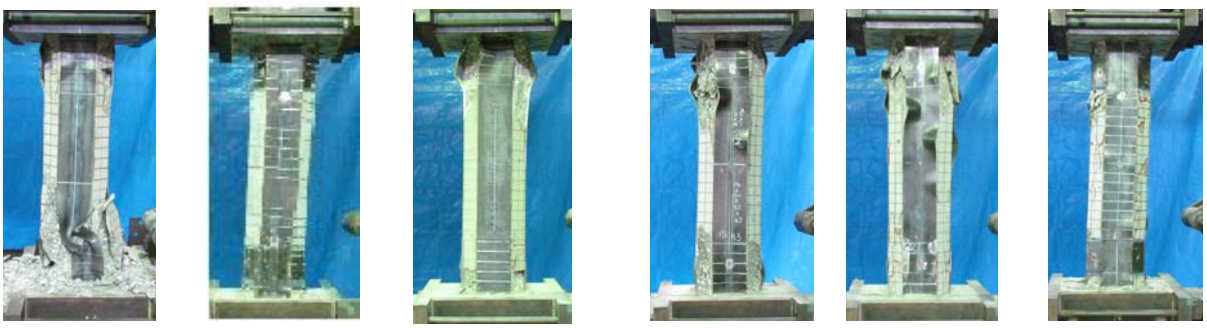
載荷装置を**図-2**に示す。載荷フレームと試験体はPC鋼棒で締め上げて一体化させた。載荷は，2000kNの鉛直力載荷装置によって所定の軸力を載荷した後，一定に保持した状態で500kNの水平力載荷装置で正負交番繰返し水平力を載荷した。載荷形式は，漸増載荷で，部材角R= 3.0%までは0.5%ずつ漸増させ，その後部材角R= 4.0%，6.0%まで載荷した。なお，各変位振幅とも2サイクルずつ繰返している。

変形は柱頭及び柱脚のスタブ部分に変位計フレームを設置し，柱材の水平変位及び中心軸縮みを測定した。また，歪の測定は，鉄骨フランジには1軸歪ゲージを貼付し，バンドプレートおよび薄板には2 軸歪ゲージを貼付し，鉄骨の歪を計測した。

3.　実験結果

3.1 崩壊性状

写真-1に実験終了後の試験体を，**表-3**に実験結果を，それぞれ示す。軸力比0.3を載荷した5体の試験体(C(8.3)-0.30，C(5.0)-0.30，C(21.7)-0.30，C(11.1)-0.30，B(11.1)-0.30)は，部材角R=2.5%前後で鉄骨フランジが局部座屈



(a) C(21.7)-0.30　(b) B(11.1)-0.30　(c) C(8.3)-0.50　(d) C(11.1)-0.50　(e) C(21.7)-0.50　(f) B(21.7)-0.50

写真-1　実験終了後の試験体

を起こしたが，鉄骨フランジの幅厚比が大きくなるにつれて，鉄骨フランジの局部座屈発生が早くなる傾向が見られた。特に，フランジ幅厚比の大きい試験体C(21.7)-0.30は，部材角R=1.0%で鉄骨フランジが局部座屈を起こし，その後変形を増大させると，部材角R =4.0%で急激に軸縮みが増大し，最終的には鉄骨が捩れるような変形を生じたため実験を終了した（**写真-1**(a)参照）。また，試験体C(11.1)-0.30と試験体B(11.1)-0.30を比較したところ，補強材の有無による違いは見られなかった（**写真-1**(b)参照）。

軸力比0.5を載荷した3体の試験体（C(8.3)-0.50, C(5.0)-0.50，C(11.1)-0.50）は，部材角R=2.0%付近で鉄骨フランジが局部座屈を起こし，部材角R=2.5%付近で軸力を保持することができなくなったため実験を終了した（**写真-1**(c)，(d)参照）。一方，バンドプレート或いは薄鋼板で補強したところ，鉄骨フランジの局部座屈の発生が抑制され，部材角R =6.0%の大変形時まで安定した挙動を示した。フランジ幅厚比の大きい試験体C(21.7)-0.50，B(21.7)-0.50は，それぞれ部材角R=1.5%，2.5%で，軸力保持不能となった（**写真-1**(e)，(f)参照）。

3.2　弾塑性挙動及び軸縮み挙動

表-3に実験結果を，**図-3**に水平力Q-部材角R関係を，**図-4**に軸縮みδ_v-部材角R関係を，それぞれ示す。**図-3**中の破線は，鋼材の降伏応力度およびコンクリートの圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度M_{pc}（**図-3**中M_{pc1}と表記）を柱頭，柱脚部でそれぞれ発揮するとして式(1)

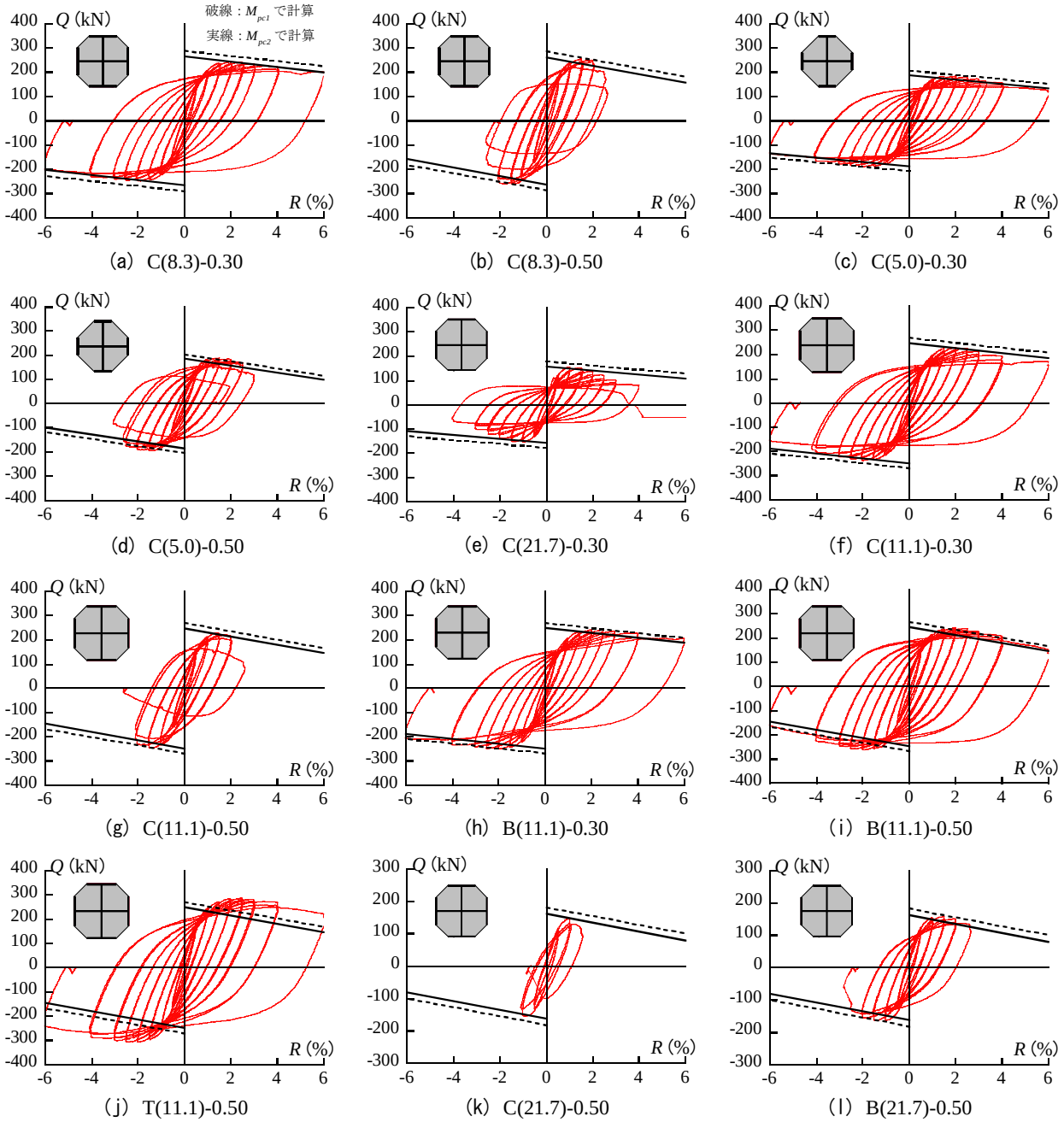


図-3　水平力－部材角関係

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SRC規準[2)]によるコンクリートの低減係数$_c r_u$を用いて計算した一般化累加強度（図−3中M_{pc2}と表記）で求めたものである。

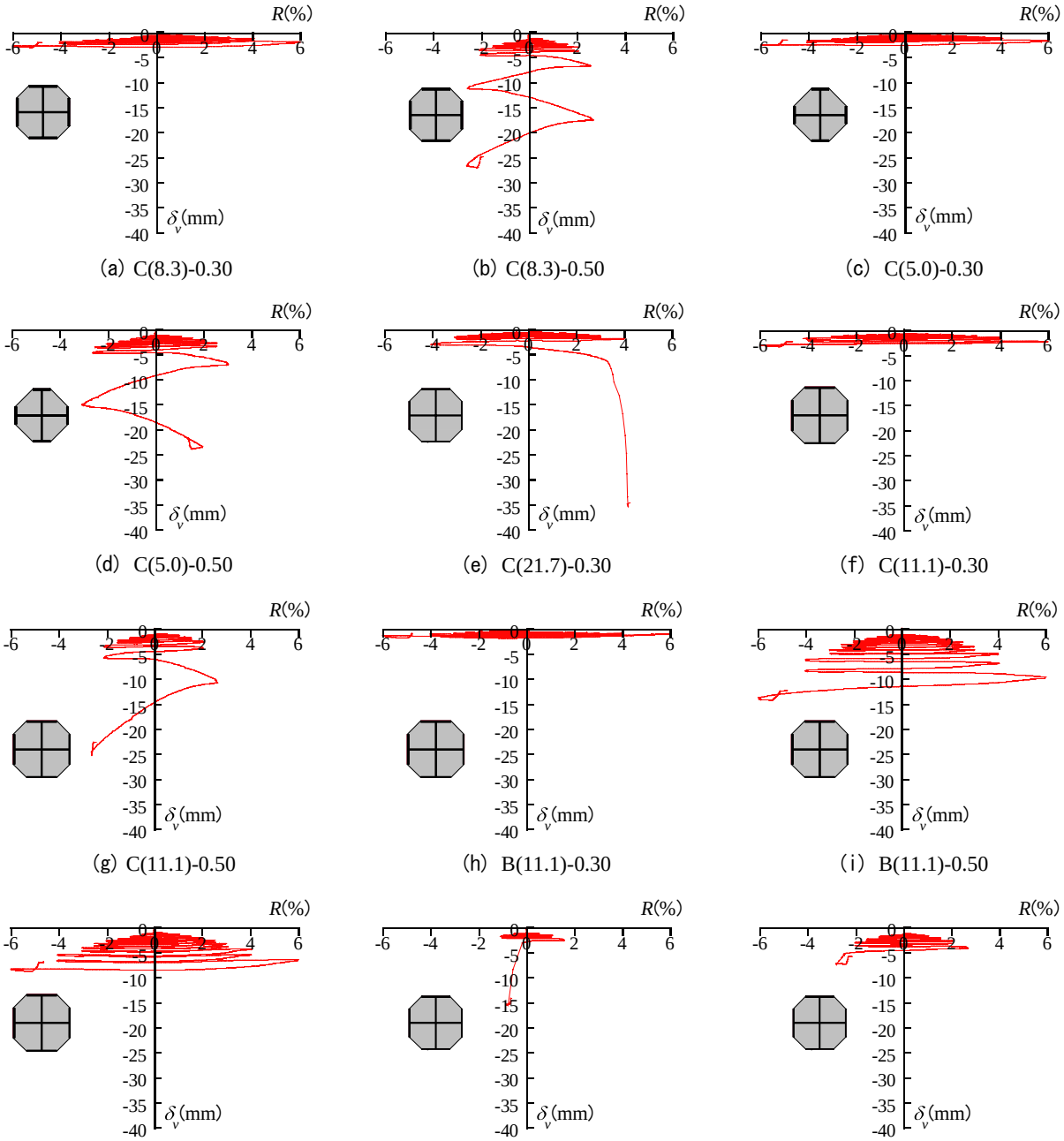
$$Q = \frac{M_{pc}}{L} - N \cdot R \qquad (1)$$

ここで，L：スタブフェイスから反曲点（材長の中間点を想定）までの距離，N：柱軸力，R：部材角である。

表−3および図−3より，試験体C(5.0)-0.50, B(11.1)-0.50, T(11.1)-0.50はM_{pc1}を発揮した。また，試験体C(21.7)-0.50を除いた全ての試験体は，M_{pc2}を発揮しているが，M_{pc1}には達しなかった。

図−3，図−4より，軸力比0.3を載荷した試験体では，鉄骨フランジの幅厚比に拘わらず，大変形時まで計算耐力を保持するエネルギー吸収能力に優れた紡錘形の履歴性状を示し，部材角R=6.0 %までほとんど耐力の低下が見られなかった。ただし，鉄骨フランジの幅厚比が21.7の試験体C(21.7)-0.30は，部材角R=4.0%で軸縮みが急激に増大し，軸力を保持できなかった。また，軸力比0.3を載荷した試験体では，バンドプレートで端部補強したことによる違いはあまり見られなかった。

軸力比0.5を載荷した試験体では，部材角R=2.0%付近までは耐力低下はあまり見られなかったが，部材角の増加とともに耐力の低下および軸縮みの増大が見られ，最



(a) C(8.3)-0.30　(b) C(8.3)-0.50　(c) C(5.0)-0.30

(d) C(5.0)-0.50　(e) C(21.7)-0.30　(f) C(11.1)-0.30

(g) C(11.1)-0.50　(h) B(11.1)-0.30　(i) B(11.1)-0.50

(j) T(11.1)-0.50　(k) C(21.7)-0.50　(l) B(21.7)-0.50

図−4　軸縮み－部材角関係

表-3 実験結果

シリーズ名	試験体名	実験耐力				計算耐力		$\frac{M_{max}}{M_{pc1}}$	$\frac{M_{max}}{M_{pc2}}$	崩壊過程		
		Q_{max}(kN)	R_{Qmax}(%)	M_{max}(kNm)	R_{Mmax}(%)	M_{pc1}(kNm)	M_{pc2}(kNm)			R_{cr}(%)	R_{bk}(%)	R_u(%)
シリーズⅠ	C(8.3)-0.30	242.1	1.98	106.7	2.47	116.1	105.9	0.92	1.01	0.5	3.0	6.0
	C(8.3)-0.50	253.7	1.49	113.2	1.97	114.6	104.7	0.99	1.08	0.5	2.0	2.5
	C(5.0)-0.30	183.0	1.99	80.3	1.99	82.6	75.2	0.97	1.07	0.5	3.0	6.0
	C(5.0)-0.50	187.2	1.50	84.3	1.91	81.4	74.2	1.04	1.14	0.5	2.5	3.0
	C(21.7)-0.30	153.8	0.97	64.8	1.47	71.2	62.7	0.91	1.03	0.5	1.0	4.0
シリーズⅡ	C(11.1)-0.30	228.2	1.99	99.8	2.48	107.8	99.1	0.93	1.01	0.5	2.5	6.0
	C(11.1)-0.50	226.7	1.47	100.7	1.47	107.9	99.2	0.93	1.02	0.5	2.0	2.5
	B(11.1)-0.30	241.0	2.50	107.0	6.00	108.3	99.4	0.99	1.08	0.5	2.5	6.0
	B(11.1)-0.50	241.4	1.98	111.9	2.50	106.7	98.1	1.05	1.14	0.5	2.5	6.0
	T(11.1)-0.50	286.2	2.47	135.1	3.92	108.3	99.5	1.25	1.36	1.0	4.0	6.0
	C(21.7)-0.50	145.4	0.98	63.5	0.98	72.9	64.6	0.87	0.98	0.0	0.5	1.5
	B(21.7)-0.50	157.1	1.48	70.9	1.48	73.1	64.8	0.97	1.09	0.5	1.0	2.5

R_{Qmax}：最大せん断力時の部材角，R_{Mmax}：最大曲げモーメント時の部材角，R_{cr}：初期曲げひび割れ発生時の部材角，R_{bk}：鉄骨フランジの局部座屈発生時の部材角，R_u：実験終了時の部材角

終的に急激に耐力が低下した。ただし，鉄骨フランジの幅厚比が21.7の試験体は，部材角R=1.5%で急激な耐力の低下および軸縮みの進行が見られた。また，バンドプレート或いは薄鋼板で補強したことにより，変形能力の増大が見られた。

4. 実験結果の考察

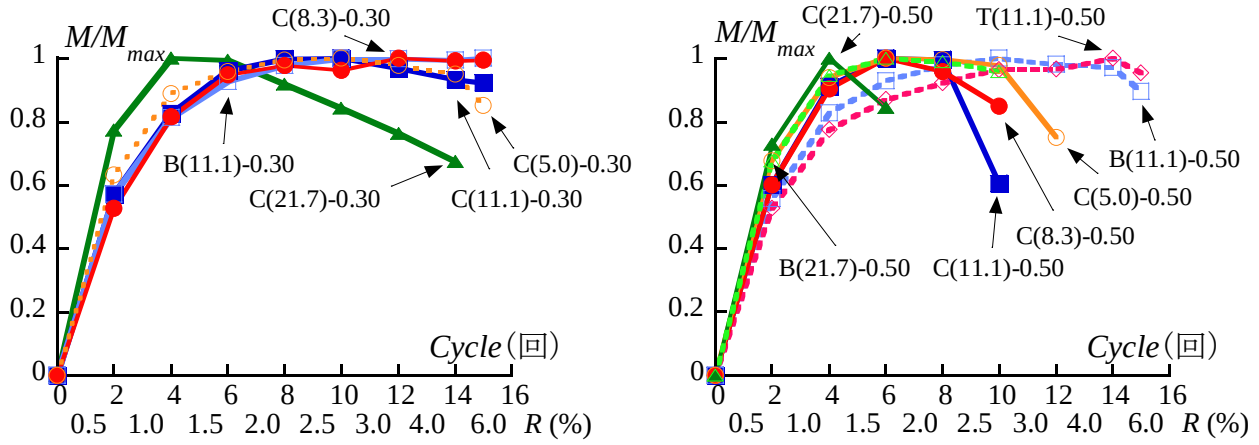
図-5に繰返しに伴う曲げ耐力の推移を示す。縦軸には各除荷点における$P\Delta$効果を考慮した柱脚位置での抵抗モーメントを各試験体の最大曲げモーメントで除した値を，横軸には繰返し回数をとっている。また，**図-6**に各除荷点の軸縮みδ_v-繰返し回数*Cycle*関係を示す。

図-6より，軸力比が大きいほど軸縮みが大きくなっており，軸力比の違いは軸縮みの進行に大きな影響を及ぼすことが分かる。また，鉄骨フランジの幅厚比の違いは軸力比0.3に限れば，部材角R=3.0%まで軸縮みの進行に明確な影響を及ぼさないことが分かった。

図-5より，軸力比0.3では，鉄骨フランジの幅厚比が21.7を除く試験体は，部材角R=6.0%まで鉄骨フランジの幅厚比に拘わらず同様な性能を発揮していることが分かる。一方，鉄骨フランジの板厚が薄い試験体（幅厚比21.7）は他の試験体と比べて耐力の低下が著しいことが分かる。このことから，鉄骨フランジの板厚の違いは曲げ耐力の低下に影響を及ぼすことが考えられる。

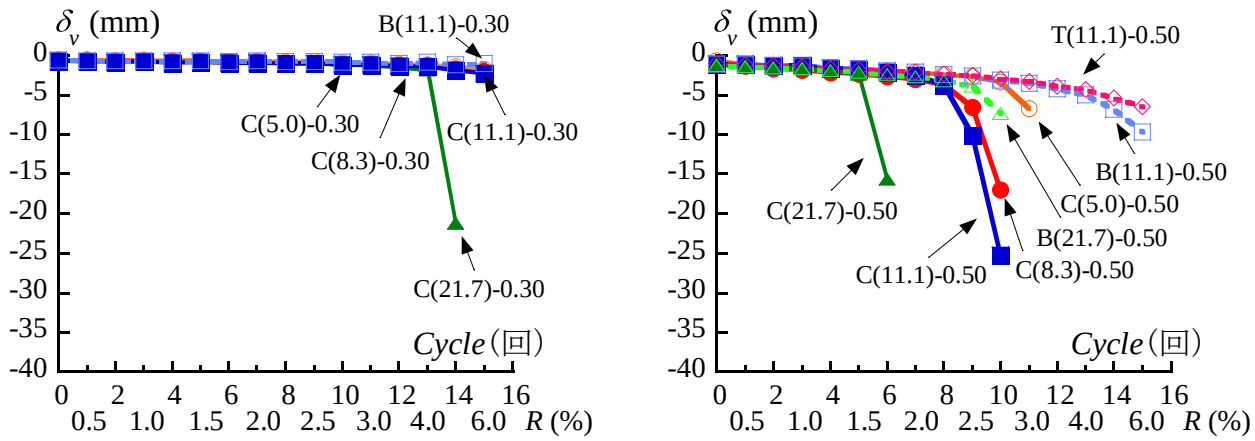
また，C(8.3)-0.30とC(5.0)-0.30を比較すると，曲げ耐力の推移にほとんど違いが見られなかったことから，フランジ幅の違いは柱材の曲げ耐力の低下に影響しないことが分かる。

補強材の有無が柱材の耐震性能に及ぼす影響は，軸力比0.3を載荷した試験体ではあまり見られなかったが，軸力比0.5を載荷した試験体では，横補強することにより変形性能が大きく上がることが確認された。試験体B(11.1)-



(a) 軸力比0.3　　(b) 軸力比0.5

図-5 曲げ耐力の推移



(a)　軸力比0.3　　(b)　軸力比0.5

図-6　軸縮みの推移

0.50でも十分な耐力と変形性能を示しているので，鉄骨フランジの幅厚比が11.1程度であれば，薄鋼板で全面補強する必要はないと考えられる。

軸力比0.5において，薄肉鋼管で全面補強した試験体T(11.1)-0.50とバンドプレートで端部補強した試験体B(11.1)-0.50の間にはかなり耐力の違いが見られる。これは，薄肉鋼管とバンドプレートによるコンクリートの拘束効果が異なるためで，材長方向に直交する方向の歪ゲージの引張りの値が，薄肉鋼管で全面補強した試験体の方が大きく生じていることからも説明できる。（**図-7**参照）

5. 結論

十字鉄骨とコンクリートで構成された八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の載荷実験を行った結果，以下のことが明らかとなった。

軸力比0.3の場合，以下のことが明らかとなった。

1)鉄骨フランジの幅厚比が5.0～11.1までは，全ての試験体が鉄骨フランジの幅厚比に拘わらず，部材角R=6.0％まで安定した挙動を示している。また軸縮みも同様に軸縮みが増大することはなかった。

2)鉄骨フランジの幅厚比が21.7の試験体については，変形が大きくなるにつれて耐力が低下しているが，部材角R=4.0%までは軸力を保持できている。ただし，最終的には軸力を保持できなくなり崩壊に至った。

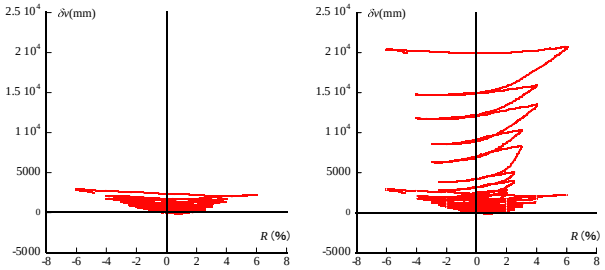
3)鉄骨フランジの幅厚比が11.1の試験体の場合は，バンドプレートで補強することによる違いはあまり見られなかった。

軸力比0.5の場合，以下のことが明らかとなった。

4)鉄骨フランジの幅厚比が小さくなるにつれて，優れた変形能力を示している。

5)鉄骨フランジの幅厚比に拘わらず，バンドプレートで補強することによって変形能力が向上している。

6)バンドプレートによる端部補強で十分であることが分かった。



(a)　試験体B(11.1)-0.50のバンドプレート　　(b)　試験体T(11.1)-0.50の薄肉鋼管

図7　横補強材の歪分布

謝辞

本研究は平成25年度科学研究費助成事業・基礎研究(c)（課題番号24560706，研究代表：堺純一）の助成を受けた。また，試験体の製作及び載荷実験にあたり，福岡大学工学部建築学科技師の平國久雄氏及び吉田圭志郎氏，佐藤翔太氏をはじめとする平成25年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒研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性状に関する実験的研究　その1，その2．柱材の曲げせん断性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1381-1384，2013.8

2）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，2001.1