

# 論文 RC 柱 S 梁乾式接合法の相違が十字形骨組の履歴性状に及ぼす影響

李 文聰\*1・河野 州峰\*2・江崎 文也\*3・田中 照久\*4

要旨:プレキャストRC柱と鉄骨梁を乾式接合した十字形骨組について、一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行い、履歴性状及びエネルギー吸収量について検討した。外ダイヤフラムを埋込高ナットを介して乾式接合すると、SRC柱と鉄骨梁を溶接で接合した場合と類似したエネルギー吸収の大きい紡錘形の履歴性状を示すことができたが、通しボルトのみの接合や高力ボルト埋込接合のみではスリップ型の履歴性状を示した。

キーワード: RC柱, 鉄骨梁, 接合, 外ダイヤフラム

## 1. 序

プレキャストRC柱と鉄骨梁を乾式接合により剛接合することができれば、地震時に損傷を受けた鉄骨梁を容易に取り替えることが可能になるが、一般に、乾式接合で剛接合にすることはかなり困難であるとされている。著者らは、埋込高ナットを利用して、全周に外ダイヤフラムに相当するT型鋼（以下CTとする）を高力ボルトにてRC柱と接合するとともに、各面のCTを添え板とL型アングルにより接合する乾式接合法を提案し、鉄骨梁をSRC柱の鉄骨と溶接接合した場合と類似したエネルギー吸収の大きい紡錘形の履歴性状となる見通しを得たり。しかし、実験前に締付けによりRC柱に初期ひび割れが生じ、実験中に梁とCTの溶接部が破断した。そこで、このような現象を防止するために、梁とCTの溶接部をプレートで補強するとともに、RC柱を貫通させたPC鋼棒(20φ)により鉄骨梁を接合する方法を提案し、この方法による接合部の力学性能を実験的に検討した。

本論は、通しボルト接合、埋込ボルトおよび埋込高ナットの3つの方法でRC柱と鉄骨梁を乾式接合した十字形骨組について、一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行い、従来のSRC柱に鉄骨梁を接合した骨組の履歴性状との比較検討より、その接合方法の相違が骨組の

履歴性状に及ぼす影響について検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。試験体形状を図-1に示す。表-2に使用した材料の力学的性質を示す。試験体は、一般の事務所建築物を想定した実物のおよそ1/2.5の縮尺モデルで、SRC柱・鉄骨梁の基準試験体2体とRC柱・鉄骨梁乾式接合試験体4体の合計6体である。試験体名は、イーロの2つの識別記号で示した。イは、RC:柱がRCで鉄骨梁を乾式接合した試験体、SRC:柱がSRCで梁が鉄骨の試験体、P:接合部分にPC鋼棒の使用を示す。ロは、各年度の試験体を示す。鉄骨梁の加力間の距離は、SRC-06とRCP-06では4,000mmで、RC-07とRC-09及びRCP-09では2,500mmである。いずれの試験体とも柱の軸力方向Nは、柱軸方向応力度比 $N/(bD\sigma_c)$  ( $b$ :柱幅,  $D$ :柱せい  $\sigma_c$ :コンクリート圧縮強度)で0.15となる大きさとした。図-2にRC柱と鉄骨梁の接合詳細を示す。RCP-06は、鉄骨梁のある面と直交する面に外ダイヤフラムに相当する溝形鋼を通しボルトでRC柱と接合し、鉄骨梁端部に溶接で接合した外ダイヤフラムを通しボルトでRC柱と接合するとともに、添板により外ダイヤフラム

表-1 試験体一覧

寸法単位: mm

試験体名	柱				鉄骨	梁		柱・梁接合部
	断面 $b \times D$	スパン $h$	主筋	帯筋		断面	スパン $l$	
SRC-06	300×300	740	12-D13 (主筋比1.69%)	D6@50 (帯筋比0.43%)	H-100×100×5.5×8	H-200×100×5.5×8	4000	[-200×70×70×10
RCP-06								
SRC-07					H-100×100×5.5×8		2500	CT-196×100×8×12
RC-07								
RC-09								
RCP-09								

\*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

\*2 株式会社 鴻池組

\*3 元福岡大学工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*4 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)

同士を高力ボルトで接合した。RC-07は、接合部の被覆鋼管に取り付けた埋込高力ボルトにて、外ダイヤフラムに相当するCTと鉄骨梁端部に溶接で接合したCTをRC柱と接合し、添板により各面のCT同士を高力ボルトで接合した。RC-09とRCP-09には接合部内のRC部材に□-175×175×6の角形鋼管が挿入されている。但し、RC-09は、埋込み高ナットを利用して、高力ボルトにて外ダイヤフラムに相当するCTと鉄骨梁端部に溶接で接合したCTをRC柱と接合するとともに、各面のCT同士を添え板とL型アンクルにより接合した。RCP-09は、RC-09

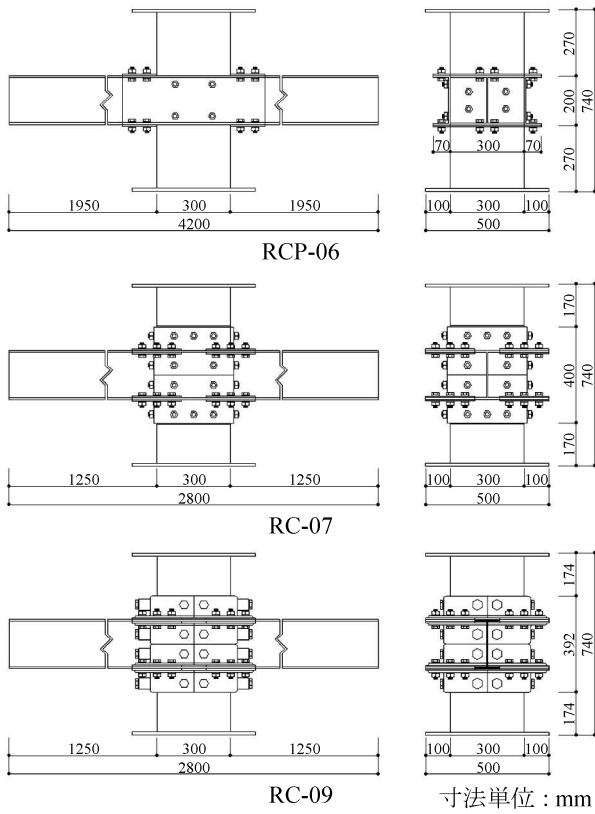


図-1 試験体形状

表-2 材料の力学的性質

鉄筋

種別	試験体名	$a(\text{cm}^2)$	$\sigma_s(\text{MPa})$	$\sigma_u(\text{MPa})$	$E_s(\text{GPa})$	$\epsilon_u(\%)$	試験片
D6	SRC-06 & RCP-06	0.32	378	535	185	14.1	JIS Z 2201の2号
	SRC-07 & RC-07		378	535	185	14.1	
	RC-09		378	535	185	14.1	
	RCP-09		350	521	194	17.8	
D13	SRC-06 & RCP-06	1.27	360	533	190	18.6	JIS Z 2201の2号
	SRC-07 & RC-07		353	521	182	26.7	
	RC-09		353	521	182	26.7	
	RCP-09		346	509	187	16.9	

$a$ :断面積  $\sigma_s$ :降伏点強度  $\sigma_u$ :引張強度  $E_s$ :ヤング係数  $\epsilon_u$ :伸び

鉄骨

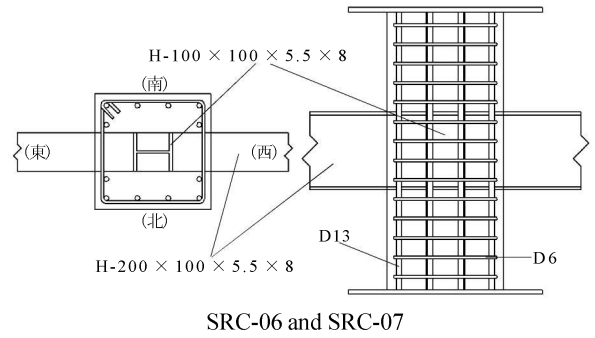
鋼材	試験体名	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\sigma_u(\text{MPa})$	$E_s(\text{GPa})$	試験片
H-200×100×5.5×8	SRC-07 & RC-07	296	325	184	JIS Z 2201の5号
SS400	RC-09 & RCP-09	290	453	206	

$\sigma_y$ :降伏点強度  $\sigma_u$ :引張強度  $E_s$ :ヤング係数

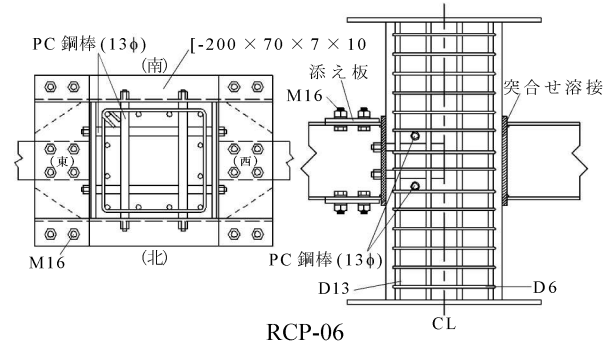
コンクリート

試験体名	$\sigma_B(\text{MPa})$	$E_c(\text{GPa})$	$\epsilon_c(\%)$	材齢
SRC-06 & RCP-06	32.2	27.0	0.239	120日
SRC-07 & RC-07	25.2	24.0	0.224	94日
RC-09	25.0	25.4	0.230	492日
RCP-09	21.7	21.7	0.234	75日

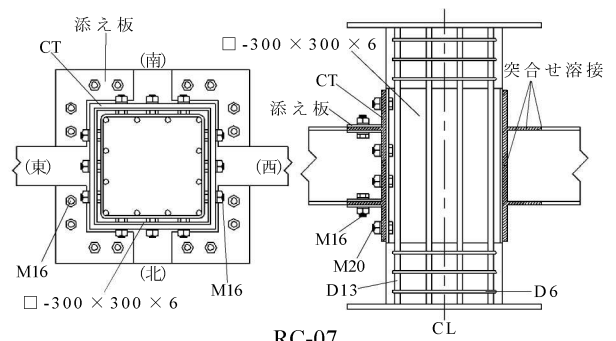
$\sigma_B$ :シリンダー圧縮強度  $E_c$ :コンクリートのヤング係数  $\epsilon_c$ :強度時のひずみ



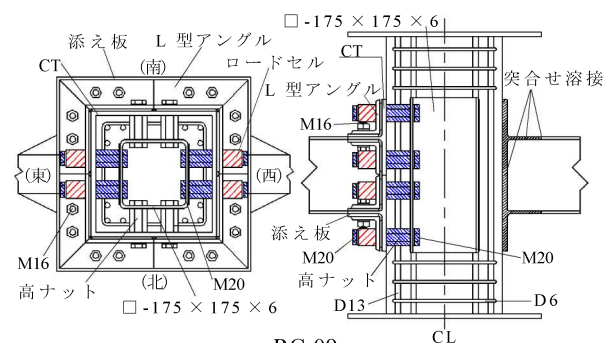
SRC-06 and SRC-07



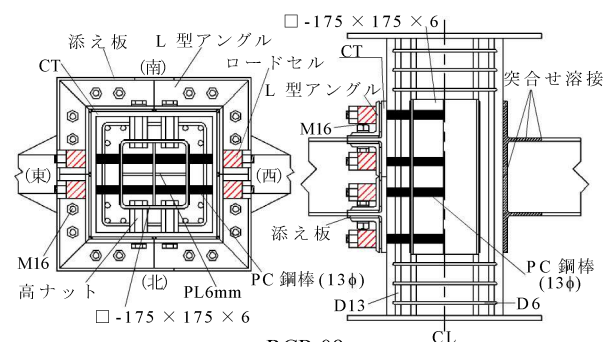
RCP-06



RC-07



RC-09



RCP-09

寸法単位: mm

図-2 接合詳細図

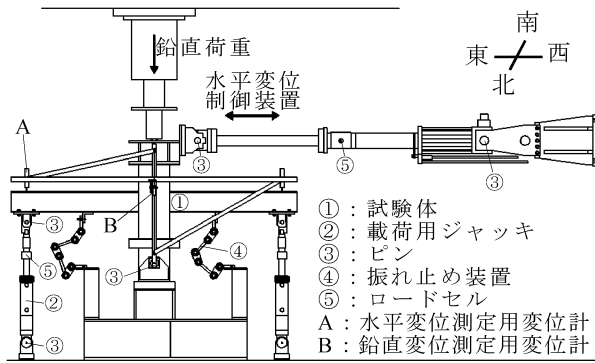


図-3 加力装置

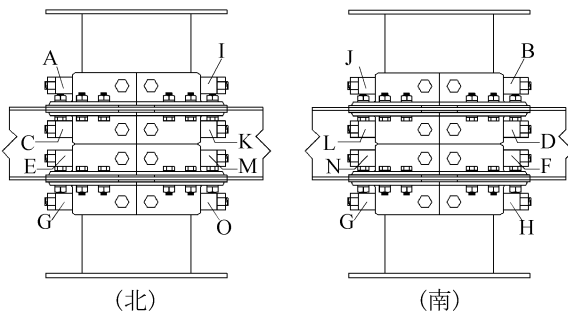


図-4 接合ボルトロードセル位置

の鉄骨梁端部のCTを通しボルトで接合したものである。

## 2. 2 載荷方法および載荷プログラム

図-3に示す加力装置を用いて、部材角 $R$ を0.5%ずつ増加させ、限界耐力設計の安全限界変形角 $1/75$ の2倍程度まで3回ずつ一定軸力下の漸増変位振幅正負交番繰り返し載荷を行った。制御部材角 $R$ は、図-3に示すように梁の左右加力位置間の相対鉛直変位 $\delta$ を、加力間の距離で除した値 $R=(\delta/\text{加力間の距離})$ である。

## 2. 3 測定方法

図-3に示すような柱上下のピン位置のボルトに取り付けた測定フレームに定着した変位計にて、梁の加力位置の鉛直変位を測定した。また、RC柱の伸びを測定するために、柱上下の定着鋼板に取付けたボルト間の相対変位を測定した。柱梁接合部近傍の鉄骨梁フランジおよび主筋のほか、鉄骨梁と直交方向の接合部に取付けた外ダイヤフラム中央位置にゲージを貼付してひずみを測定した。RC-09およびRCP-09試験体では、図-4に示す位置に梁方向の計16ヶ所の高力ボルト及びPC鋼棒にドーナツ形のロードセルを取付け、緊張力を測定した。RC柱のひび割れおよび破壊状況は、制御変位で目視によるスケッチにより記録した。

## 3. 実験結果

### 3. 1 履歴性状及び実験後試験体の破壊性状

表-3に実験結果を示す。図-5に水平荷重 $Q$ と部材角 $R$ の関係及び実験後試験体の破壊性状を示す。試験体

SRC-06及びRCP-06に関しては、鋼材の引張試験をしていないため、梁の全塑性モーメントによる水平せん断耐力計算値は示していない。基準試験体となるSRC-06及びSRC-07はいずれも紡錘形の履歴性状を示している。SRC-07に関しては鉄骨梁の全塑性モーメントによる水平せん断耐力計算値と水平せん断耐力実験値はほぼ同等の値を示している。RCP-06では $R$ が0に近づくにつれてスリップ現象が現れた。実験終了後に外ダイヤフラムを取り除いてみると、外ダイヤフラムとコンクリート接触面に滑りを生じた痕跡が観察された。これは、外ダイヤフラムとして用いた溝形鋼を4-13φのPC鋼棒で締付けを行なったが、鉄骨の曲げ耐力が発揮できるまでのすべり抵抗がなかったことが原因と考えられる。一方、RC-07では、 $R$ が-1%時に鋼管の面外曲げが生じたために鉄骨梁の全塑性モーメントによる引張力がうまくダイヤフラムに伝達されず、逆S字形の履歴性状となるスリップ現象が現れた。これは、鉄骨フランジの引張力が外ダイヤフラムに伝達されるよりも鋼管に取付けた高力ボルトに引張力が伝達され、それが原因で被覆鋼管の面外曲げが生じたことによるものと思われる。しかし、実験終了後に接合を取り除いた後、鋼管を取り外すとコンクリートとCTの接触面には滑りが無いことが観測された。RC-09およびRCP-09ともに紡錘形の履歴性状を示している。また、水平せん断耐力実験値は曲げ耐力による水平せん断耐力計算値よりも大きくなった。但し、RC-09及びRCP-09は $R$ が±0.5%を超えると、剛性が急激に低下してきたが、SRC-06及びSRC-07は $R$ が±1.0%を超えると、剛性が急激に低下してきた。乾式接合の場合は、従来のSRC柱と鉄骨梁接合に比べて剛性が急激に低下するときの変形が小さい。RC-09に関しては、実験終了時に接合を取り除いた後、コンクリートとCTの接触面には滑りが無いことが観測された。RCP-09に関しては、載荷時 $R=±$

表-3 実験結果

試験体名	$Q_u$ (kN)		$R_u$ (%)		$Q_{fu}$ (kN)
	+	-	+	-	
SRC-06	93.1	-96.1	2.49	-2.47	111
RCP-06	100	-104	2.3	-2.27	
SRC-07	113	-112	3.0	-2.98	111
RC-07	94.1	-94.8	2.97	-2.98	123
RC-09	156	-150	2.99	-2.98	148
RCP-09	155	-149	2.97	-2.96	148

$Q_u$ : 水平せん断耐力実験値

$R_u$ :  $Q_u$ 時の部材角

$Q_{fu}$ : 梁の全塑性モーメントによる水平せん断耐力計算値

$$Q_{fu} = (M_p / l_y) \cdot L / h$$

$M_p$ : 鉄骨梁の全塑性モーメント

$l_y$ : 梁端部ピン位置から柱表面までの距離

$L$ : 梁端部ピン位置から節点までの距離

$h$ : 柱端部ピン位置から節点までの距離

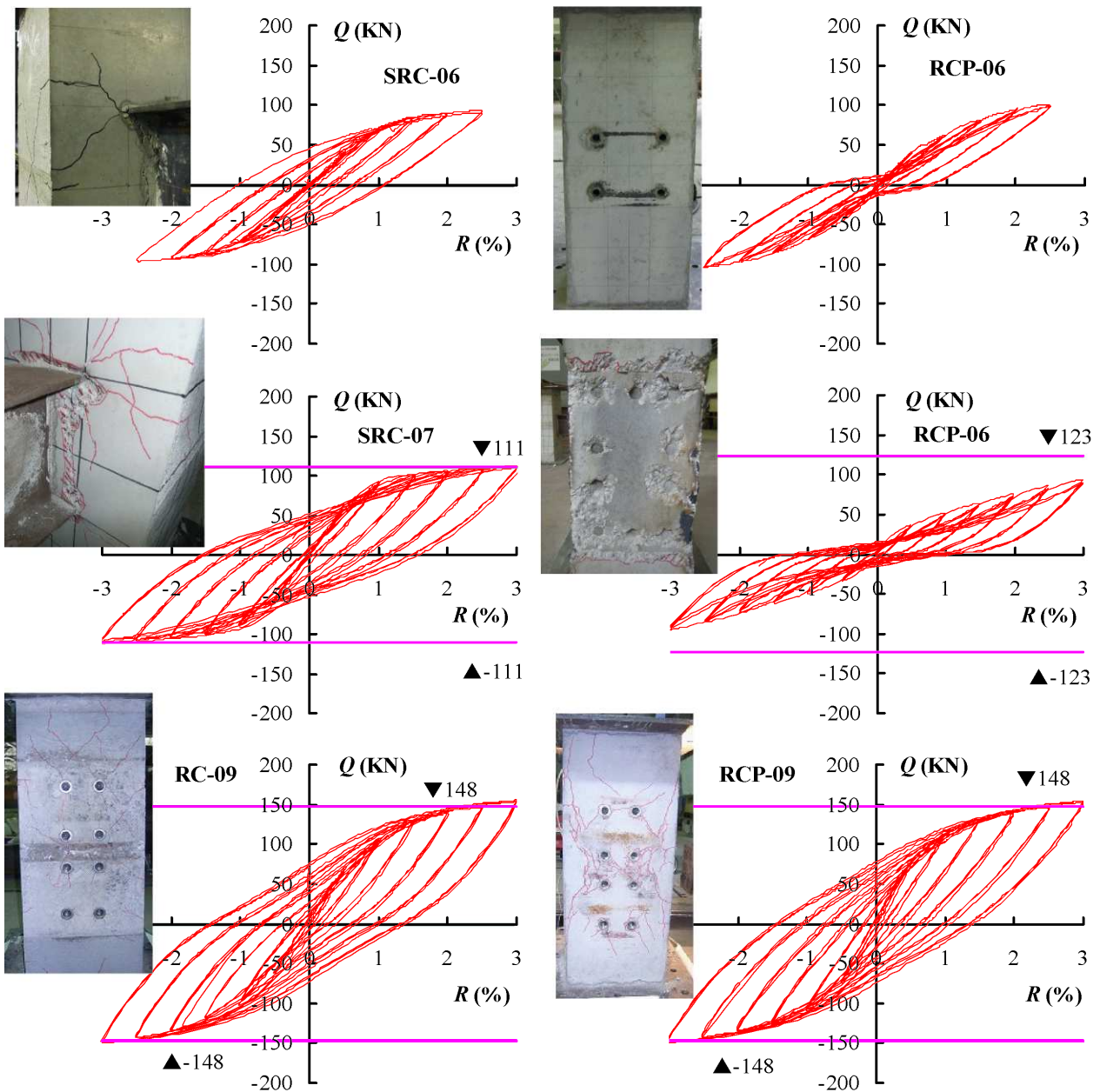


図-5 水平荷重 $Q$ と部材角 $R$ の関係及び実験後接合部の破壊状況

1.0%近くで毎回破裂音のような金属音が鳴ったが、実験終了時に接合を取り除いた後、コンクリートとCTの接触面には滑りが無いことが観測された。

### 3.2 水平耐力

安全限界変形角 $1/75$ の2倍程度までの範囲での最大水平荷重として水平耐力を検討すると、RC-06の水平耐力はSRC-06とほぼ同程度となったが、RC-07の水平耐力はSRC-07のそれより低い値を示しているため、この接合法では梁の全塑性モーメントの耐力までは発揮できていないことがわかった。SRC-07の水平耐力は計算値とほぼ同程度となったが、RC-09、RCP-09の水平せん断耐力がSRC試験体のそれより少し高い値を示しているのは、鉄骨梁の塑性ヒンジが生じる位置が柱面より200mm離れて

いるためである。計算値より多少大きくなっているのは、補強プレートの溶接による影響と考えられるが、いずれも全塑性モーメントの耐力まで本接合法で力が伝達されている。

### 3.3 鉄筋ひずみ履歴

図-6にRC柱鉄筋ひずみ履歴の一例を示す。各試験体の鉄筋ひずみによれば、鉄筋降伏ひずみには達していないので、各試験体の主筋は降伏していないことがわかる。

### 3.4 鉄骨ひずみ履歴

図-7に鉄骨梁端部フランジのひずみ履歴の一例を示す。接合部近傍の鉄骨梁フランジのひずみによれば、各試験体とも鋼材の降伏ひずみを超え、鉄骨梁は全塑性

モーメント近傍または、それ以上に達していることが分かる。

### 3.5 ダイアフラムのひずみ履歴

図-8にCTダイアフラムのひずみ履歴を示す。RC-09, RCP-09ともRの増大とともにひずみの値が増えていることから、外ダイアフラムを介して鉄骨梁に作用する曲げモーメントによる引張力が一部伝達されていることがわかる。RC-09試験体よりRCP-09試験体の方が、外ダイアフラムにより多くの梁端部の曲げモーメントによる引張力を伝達することが確認できた。

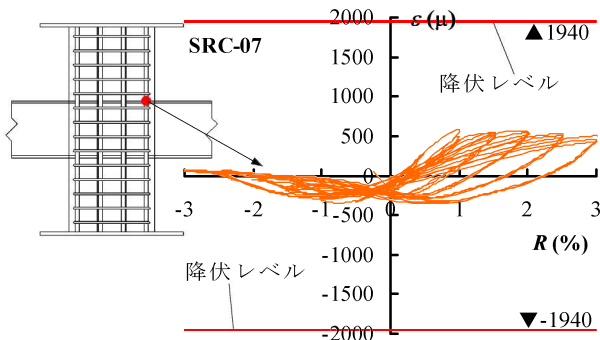


図-6 柱主筋のひずみ測定位置及び測定結果

### 3.6 緊張力

図-9にA(図-4を参照)のロードセルの緊張力を示す。PC鋼棒の初期の緊張力は $T=95(\text{KN})$ 、高力ボルトの初期の緊張力は $T=115(\text{KN})$ 前後で締め付けた。このグラフから、実験終了時には双方とも約4割程度緊張力が減少したことが確認できた。RC-09に関しては、部材角Rが大きくなるにつれて緊張力Tが緩んでいることが分かった。これは梁端部の曲げモーメントの一部がボルトにて伝達されたため、埋込高ナット装着部近傍のひび割れ等の原因により、ボルト接合による締め付けが緩んだ

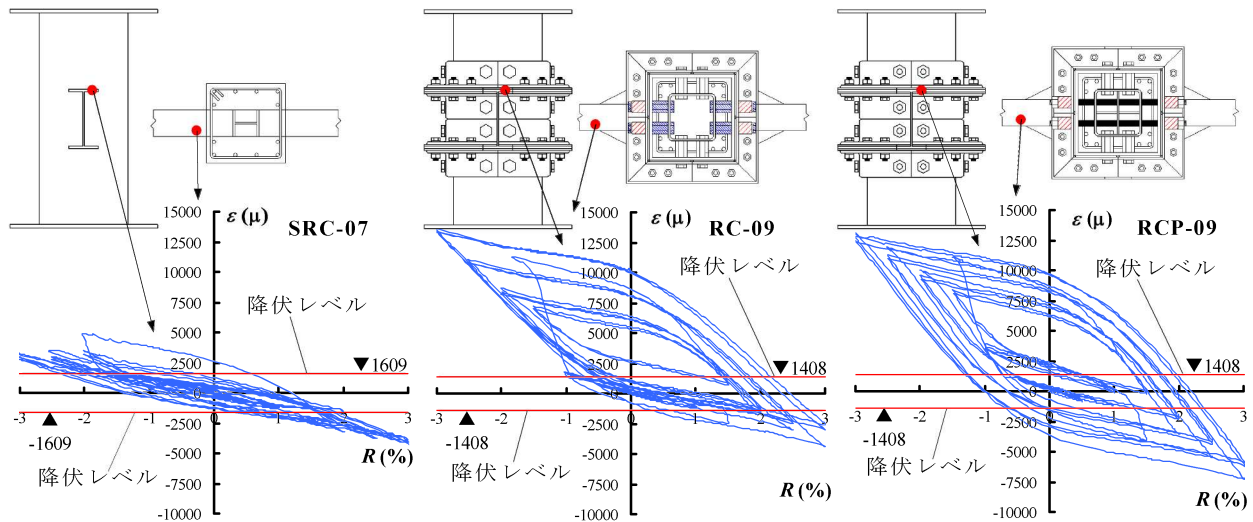
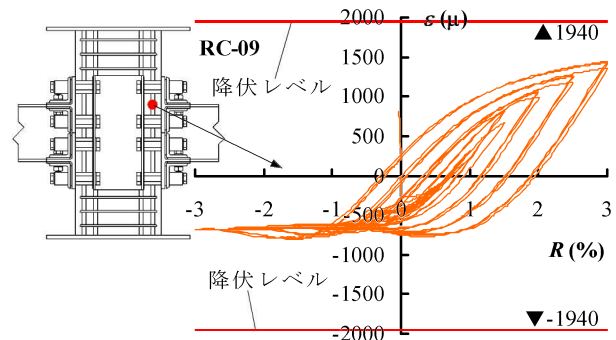


図-7 鉄骨梁端部のひずみ測定位置及び測定結果

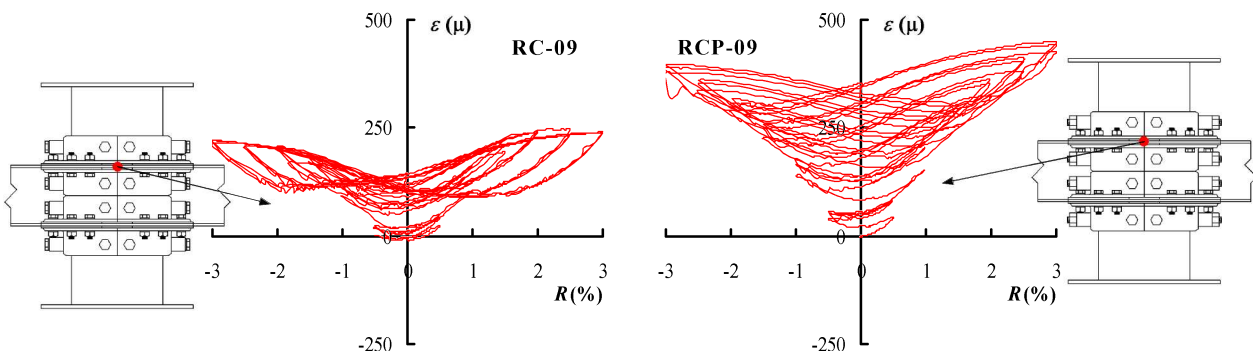


図-8 ダイアフラムのひずみ測定位置及び測定結果

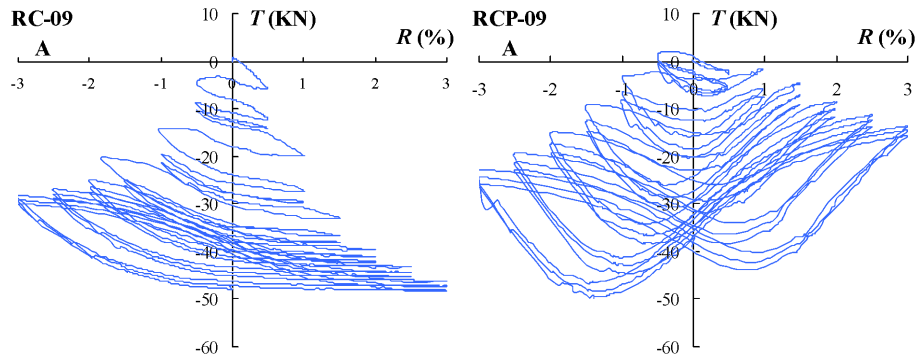


図-9 PC鋼棒及び高力ボルトのTとRの関係

ためと考えられる。RCP-09に関しては、荷重の繰り返し回数が多くなるにつれて減少する結果となった。これは、梁の曲げモーメントより接合ボルトに引張力が伝達され、その結果接合ダイヤフラムに変形が生じて緊張力が減少したものと考えられる。

### 3.7 エネルギー吸収

表-4に3サイクルのエネルギー吸収量の累積を示し、図-10にそのグラフを示す。SRC-06とRCP-06を比較すると、部材角R=1.0%時まではほぼ同程度のエネ

表-4 エネルギー吸収量の累積

	SRC-06	RCP-06	SRC-07	RC-07	RC-09	RCP-09
0%	0	0	0	0	0	0
0.5%	17	19	41	236	263	295
1.0%	386	408	1028	1182	1722	2246
1.5%	3200	1604	5556	3100	6700	7611
2.0%	9556	4317	13917	6167	15878	17778
2.5%	13200	9583	26319	10767	31500	33889
3.0%			42361	16722	54667	56917

単位：J

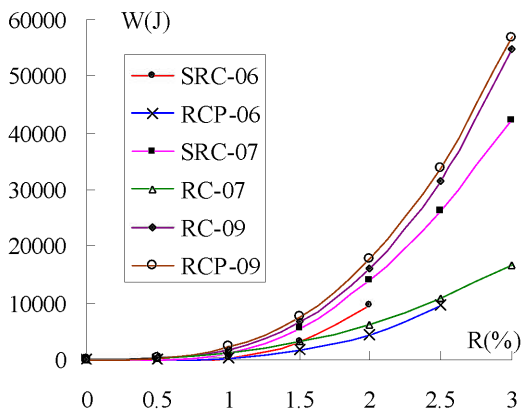


図-10 エネルギー吸収量の累積

ルギー吸収量を示すことができたが、R=2.0%時になると約1/2程度のエネルギー吸収量しかないことが確認できた。これはRCP-06が、部材角Rが0に近づくにつれてスリップ現象が生じたためである。SRC-07とRC-07を比較すると、部材角R=1%時まではほぼ同程度のエネルギー吸収量を示すことができたが、R=3.0%時になると約1/2.5程度のエネルギー吸収量しかないことが確認できた。

RC-07が、Rが-1.0%時に鋼管の面外曲げが生じたために鉄骨梁の全塑性モーメントによる引張力がうまくダイヤフラムに伝達されず、逆S字形の履歴性状になったものと思われる。RC-09とRCP-09に関しては、ともに類似したエネルギー吸収量を得ることができた。SRC-07と比較しても、今回提案した試験体の方がエネルギー吸収が多少大きいことがわかる。

### 4. 結論

RC柱・鉄骨梁乾式接合法による十字形骨組の一定軸力下の正負交番繰り返し水平力载荷実験を行い、SRC柱・鉄骨梁接合の基準試験体との比較を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 高ナット埋込による接合の場合は、基準試験体と類似したエネルギー吸収の大きい紡錘形の履歴性状を示すことができた。
- 2) ダイヤフラムを通しボルトのみで締付した場合や埋込高力ボルトのみで接合した場合は、スリップ現象が生じてエネルギー吸収性能が低下した。
- 3) 乾式接合の場合は、従来のSRC柱と鉄骨梁接合に比べて剛性が急激に低下するときの変形が小さい。

今後は、今回計測していない直交方向のボルト接合部にもロードセルを装着し、どのくらいの緊張力が伝達されたかを確認するとともに、剛性の低下が早期に生じないような乾式接合法を検討することが課題である。

### 謝辞

試験体製作にあたっては、福岡大学の研究室の卒論生に協力を得た。加力装置の製作および組み立てにあたっては、福岡大学工学部建築学科技術職員平國久雄氏にお世話になった。ここに、関係者各位に感謝します。

### 参考文献

- 1) 河野州峰・江崎文也・李文聰・田中照久：RC柱鉄骨梁簡易接合法に接合法に関する研究，コンクリート工学年次論文集（北海道），vol.31，No2，pp.1147-1152，2009