

論文 異種構造部材で構成される合成柱の耐震性能

岡本昌泰 *・馬場 望 **・西村泰志 ***

要旨：本研究は、部材内で SRC 構造から RC 構造へ構造種別が切り替えられる合成柱において、SRC 部材の長さが部材長の 25% および 50% の場合に着目し、内蔵鉄骨断面、せん断補強筋量、および作用軸力が部材の破壊性状に及ぼす影響を検討した。その結果、本実験の範囲では、SRC 部材の長さが部材長の 50% の部材では、内蔵鉄骨断面が大きいほど、また、せん断補強筋量が多いほど最大耐力は向上することが示された。しかしながら、内蔵鉄骨断面およびせん断補強筋量の違いによって、等価粘性減衰定数に大きな相違は認められないことが示された。

キーワード：SRC-RC 部材、継手接合部、変形状、せん断破壊

1. 序

現在、建築物に要求される用途や性能の多様化に伴い、多種多様な構造をその特性に応じて組み合わせた構造物が建設されている。例えば、地下部分を鉄筋コンクリート（以下、RC という）造、上部構造の低層部分を鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC という）造、中層あるいは上層部分を鉄骨（以下、S という）造または RC 造とした合成構造物などがその一つとして挙げられる。今後、このような構造形式の多様化が更に進むものと予測される。しかしながら、SRC 部材と RC 部材（以下、SRC-RC 部材という）といった異種構造部材を接合することによって構成される継手接合部に関して、合理的な設計法は確立されていない。これは、異種構造部材間の応力伝達機構が明らかにされていないこと、あるいは実験資料が蓄積されていないこと等がその原因としてあげられる。

このような観点から、本研究は、部材内で SRC 構造から RC 構造へ構造種別が切り替えられる合成柱に関して、SRC 部材の長さが部材長の 25% および 50% の場合に着目し、内蔵鉄骨断面、せん断補強筋量、および作用軸力の相違が部材全体の破壊性状に及ぼす影響を実験的に検討する。

2. 実験計画

図-1 に試験体の形状寸法、配筋、および断面詳細を示す。実験変数は内蔵鉄骨長さ l 、SRC 断面の全塑性モーメント ${}_sM_p$ に対する内蔵鉄骨断面の全塑性モーメント ${}_sM_p / {}_{src}M_p$ 、せん断補強

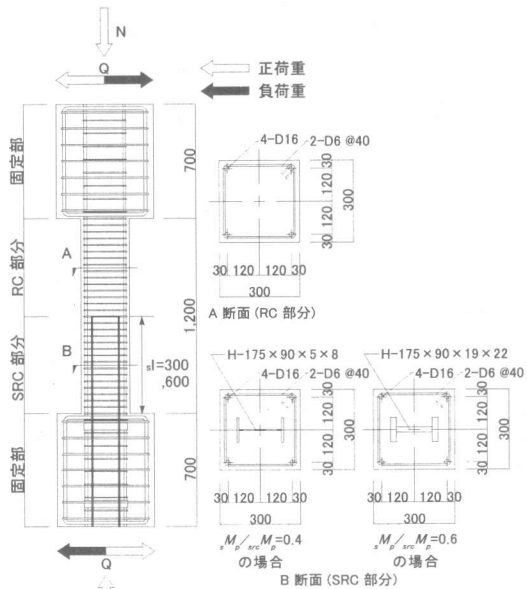


図-1 試験体の詳細 (単位: mm)

* 大阪工業大学大学院博士前期課程 (正会員)
 ** 大阪工業大学大学院博士後期課程 工修 (正会員)
 *** 大阪工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

筋比 p_w および作用軸力 N の 4 種類である。 l は、300 および 600 mm, $sM_p/srcM_p$ は、0.4 および 0.6, p_w は、0.27% および 0.53% のそれぞれ 2 種類である。作用軸力は、RC 断面の中心圧縮強度 N_{rc} の 20% および RC 断面の引張強度 T_{rc} の 30% の 2 種類である。表-1 に実験変数の一覧を示す。なお、本報は比較のため既報¹⁾より $sM_p/srcM_p=0.4$, $p_w=0.53\%$ で $l=300$ および 600mm の C242S3 および C242S6 試験体を抜粋して示している。柱断面は 300 × 300 mm

で各試験体一定である。内蔵鉄骨の公称寸法は $sM_p/srcM_p$ が 0.4 および 0.6 に応じて、それぞれ、H-175 × 90 × 5 × 8 および H-175 × 90 × 19 × 22 である。せん断補強筋は p_w が 0.27% および 0.53% に応じて、D6 を 80mm および 40mm 間隔で配置した。各試験体とも部材のせん断耐力が柱頭柱脚部の曲げ降伏により決定されるせん断力よりも大きくなるように設計した。

表-2 に使用材料の力学的特性を示す。

加力実験は、建研式載荷装置を用い、各試験体とも所定の一定軸力 ($N = 0.2 \cdot N_{rc}$ および $N = 0.3 \cdot T_{rc}$) を負荷した後、逆対称変形加力となるようパンタグラフにより回転を拘束し、L 形フレームを介して、正負 2 回の漸増繰返し水平力を負荷するものである。

表-1 実験変数

試験体 ¹⁾	$sM_p/srcM_p$	N/N_{rc}	p_w (%)	l (mm)	鉄骨断面
C241S3	0.4	0.2	0.27	300	H-175×90×5×8
C242S3 ²⁾			0.53		H-175×90×19×22
C262S3	0.6		600	H-175×90×5×8	
C241S6	0.4			0.27	H-175×90×19×22
C242S6 ²⁾				0.53	H-175×90×19×22
C262S6	0.6			H-175×90×5×8	
T342S6	0.4	-0.3			

¹⁾ 試験体名

²⁾ 既報¹⁾より抜粋

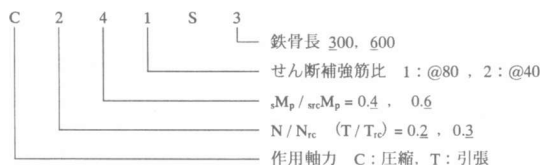


表-2 使用材料の力学的特性

試験体名	鉄骨				鉄筋			コンクリート			
	P.L	σ_y	σ_{max}	E	σ_y	σ_{max}	E	F_c	F_t	E	
C241S3	5	384	479	2.07×10^5	D6	351	524	1.84×10^5	29.8	2.53	2.58×10^4
C241S6	8	335	445	2.03×10^5		321	498	1.76×10^5			
T342S6	19	242	435	2.00×10^5							
C262S3	19	242	435	2.00×10^5							
C262S6	22	280	459	2.08×10^5							
C242S3	5	363	464	1.94×10^5	D6	340	516	1.78×10^5	25.0	2.46	2.51×10^4
C242S6	8	308	455	2.03×10^5	D16	320	460	1.98×10^5			

σ_y : 降伏応力度, σ_{max} : 引張強度, E: ヤング係数, F_c : 圧縮強度, F_t : 割裂強度

* 単位 (MPa)

表-3 ひび割れ発生荷重および最大荷重

試験体名	曲げひび割れ Q_{cr} (kN)	せん断ひび割れ Q_{fc} (kN)		付着ひび割れ Q (kN)	コンクリートの圧壊 Q (kN)	最大荷重 Q_{max} (kN)
		RC 部分	SRC-RC 境界部			
C241S3	71 (0.09)	224 (1.87)	205 (0.73)	205 (0.86)	212 (0.86)	231 (1.54)
	- 59 (-0.07)	- 210 (-1.20)	- 180 (-0.42)	- 218 (-1.01)	- 218 (-0.93)	- 219 (-1.01)
C262S3	97 (0.11)	170 (1.08)	232 (1.01)	230 (0.92)	232 (1.01)	233 (1.34)
	- 79 (-0.09)	- 206 (-1.73)	- 226 (-1.00)	- 227 (-0.86)	- 220 (-2.01)	- 227 (-0.86)
C241S6	52 (0.05)	-	-	178 (0.42)	230 (0.93)	247 (1.60)
	- 88 (-0.11)	-	-	- 196 (-0.46)	- 229 (-1.01)	- 230 (-1.59)
C262S6	117 (0.16)	294 (2.60)	294 (2.60)	266 (1.00)	297 (2.01)	300 (1.86)
	- 107 (-0.13)	- 299 (-2.01)	- 299 (-2.01)	- 284 (-0.94)	- 299 (-2.01)	- 302 (-2.86)
T342S6	19 (0.03)	64 (2.77)	73 (0.51)	74 (0.51)	82 (0.93)	108 (5.00)
	- 25 (-0.01)	-	- 84 (-1.16)	- 55 (-0.25)	- 82 (-1.01)	- 95 (-3.01)

() はひび割れ発生時の部材角 (%) を示す

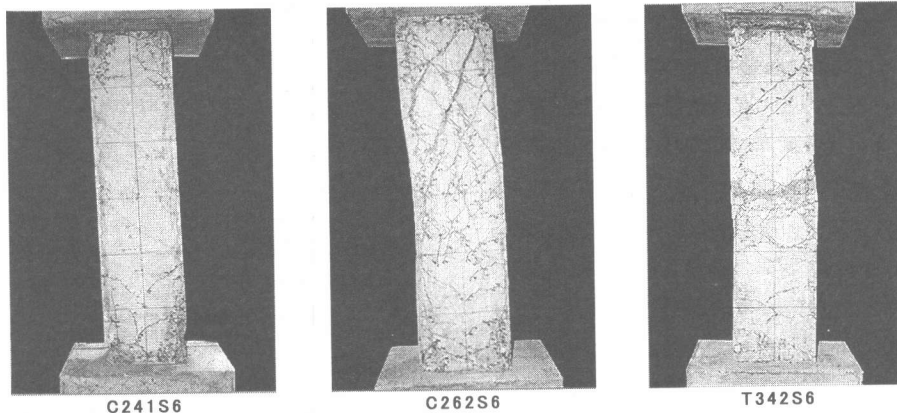


図-2 最終破壊状況

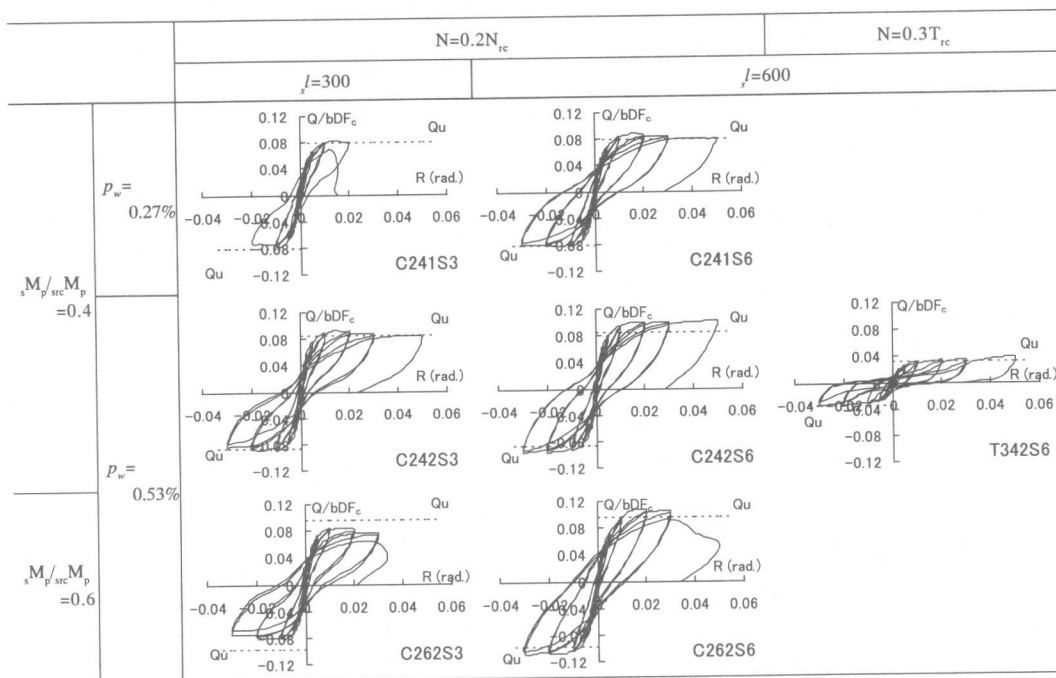


図-3 履歴曲線

3. 実験結果とその考察

3.1 破壊性状

図-2 に試験体の最終破壊状況の数例を示す。各試験体とも部材角 0.0025 rad . までに曲げひび割れが生じ、その後、引張軸力を受ける T342S6 試験体を除く各試験体とも部材角 0.005 rad . で曲げせん断ひび割れが生じた。ひび割れの発生過程をその破壊状況より分類すると、C241S6 試験体は、曲げせん断ひび割れ発生後、変形の増大に伴い柱頭および柱脚部のコンクリートが圧壊し最大耐力

を発揮した。C241S3, C262S3 および T342S6 試験体では、柱頭および柱脚部のコンクリートの圧壊後に、継手部周辺のせん断破壊、および内蔵鉄骨先端部のコンクリートの剥離により最大耐力に達した。これらの破壊状況は、既報りで示された C242S6 および C242S3 試験体のそれぞれの破壊状況と類似している。なお、C241S3 試験体では、部材角 0.02 rad . でせん断補強筋が破断し、主筋の座屈が観察された。C262S3 試験体では、部材角 0.03 rad . で継手部のかぶりコンクリートが広範囲にわ

たり剥離した。C262S6 試験体では、継手部周辺と RC 部分にはほぼ同時にせん断ひび割れが発生し、最終的には RC 部分のせん断破壊により終局状態に達した。表-3 に代表的なひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。

図-3 に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は負荷軸力による P- Δ 効果の影響を考慮した作用せん断力 Q をコンクリートの圧縮強度で無次元化した値、横軸は変位部材角 R である。 Q_u は柱頭部は RC 断面、柱脚部は SRC 断面の終局曲げ耐力から決定されるせん断力である。C241S3 試験体は、部材角 0.02 rad. 時の 2 回目の正載荷時に、継手部周辺でせん断破壊したため、また、C262S3 試験体は、部材角 0.03 rad. 時に、継手部のかぶりコンクリートが広範囲にわたり剥離し、急激に耐力が低下したため実験を終了した。圧縮軸力を受ける試験体のうち鉄骨長さが 600mm の試験体は、エネルギー吸収能力に優れたほぼ紡錘形の履歴曲線を示しているが、鉄骨長さが 300mm の試験体は、除荷時の変形のもどりが大きい逆 S 字形の履歴曲線を示している。作用軸力の影響は、引張軸力を受ける T342S6 試験体では、変形の増大に伴い、すべりを伴ったエネルギー吸収能力の小さい逆 S 字形の履歴曲線へと移行している。

図-4 に $M_p/srcM_p = 0.4$ について、作用軸力による履歴性状の相違を部材角 0.0025 rad. および部材角 0.03 rad. 時の固有ループによって検討したものである。縦軸は負荷軸力による P- Δ 効果の影響を考慮した各振幅の作用せん断力 Q をその振幅の最大荷重 Q_{max} で無次元化した値 Q/Q_{max} 、横軸は各振幅の変位部材角 R をその振幅の最大変位部材角 R_{max} で無次元化した値 R/R_{max} である。部材角 0.0025 rad. 時には、軸力のいかにかわらず、各試験体ともすべり現象はほとんどみられずほぼ紡錘形である。しかしながら、部材角 0.03 rad. になると、引張軸力を受ける T342S6 試験体では、大きなすべりを伴う履歴曲線に移行しているのがわかる。これは、引張軸力によって、切り替え部における SRC 部材と RC 部材の分離が促進されたためと推察される。

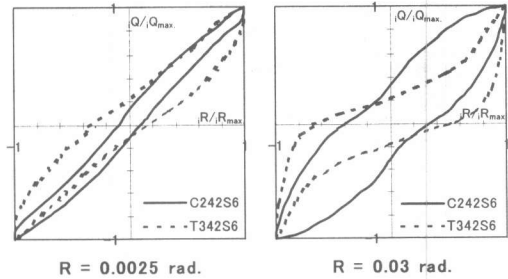


図-4 固有ループ

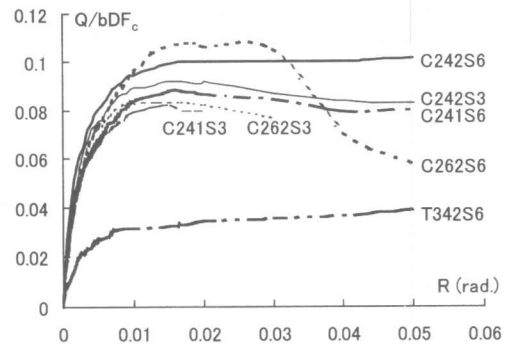


図-5 履歴曲線の包絡線

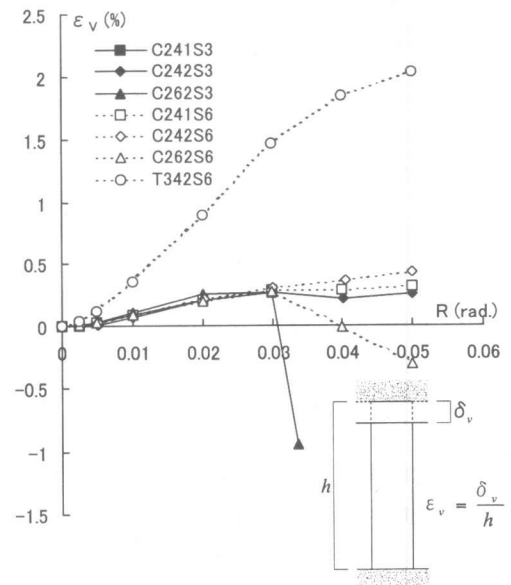


図-6 軸ひずみ分布

図-5 に各試験体の履歴曲線の正載荷時における包絡線を示す。圧縮軸力を受ける試験体で内蔵鉄骨長さが 300mm の試験体について比べると、最大耐力は、C242S3 試験体で最も大きく、せん断補

強筋比 $p_w = 0.53\%$ を小さくした C241S3 試験体では、最大耐力発揮後の耐力低下が著しい。これらの試験体の耐力低下は、部材の切り替え部の局部的破壊、または継手部周辺のせん断破壊によるものと推察される。また、内蔵鉄骨長さが 600mm の試験体では、 p_w および $M_p/srcM_p$ の値が大きい C262S6 試験体が最大耐力も大きい。最大耐力発揮後の耐力低下量で比較すると、C262S6 試験体の部材角 0.03 rad. 以降の耐力低下量が著しい。これは、RC 部分および継手部周辺に発生したせん断ひび割れによると推察される。C241S6 試験体では、最大耐力発揮後に若干ではあるが耐力が低下している。これは柱頭および柱脚部におけるコンクリートの圧壊によるものである。

図-6 に各試験体の軸ひずみ ϵ_v と変位部材角 R の関係を示す。縦軸は軸ひずみ ϵ_v 、横軸は変位部材角 R である。なお、軸ひずみ ϵ_v は、上下の固定部間の鉛直変位 δ_v を部材長 h で除した値 δ_v/h である。各試験体とも引張ひずみが生じ、変形の増大に伴って引張ひずみは大きくなっているが、圧縮軸力を受ける試験体で耐力低下を起こした C262S3, C241S6, C262S6 および既報より抜粋した C242S3 試験体では、部材角 0.03 rad. 以降ひずみの増分はなく、ほぼ一定かあるいは、引張ひずみから圧縮ひずみへ移行している。これは、SRC 部材と RC 部材の切り替え部において、局部的な破壊が進行し、柱頭および柱脚部の塑性化が進展しなくなったため、または、その切り替え部周辺、および RC 部分のせん断ひび割れの進展によるひび割れ面のずれに起因しているものと推察される。

図-7 に各試験体の等価粘性減衰定数 h_{eq} と変位部材角 R の関係を示す。なお、等価粘性減衰定数は、各サイクルの 2 回目の正載荷時の履歴面積に基づいて求めた。縦軸は等価粘性減衰定数 h_{eq} である。T342S6 試験体を除く各試験体とも、部材角 0.01 rad. までは、等価粘性減衰定数に相違は見られないが、部材角 0.01rad. 以降において変化がみられる。内蔵鉄骨長さが 600mm の試験体で圧縮軸力を受ける各試験体は、 $M_p/srcM_p$ および p_w の違い

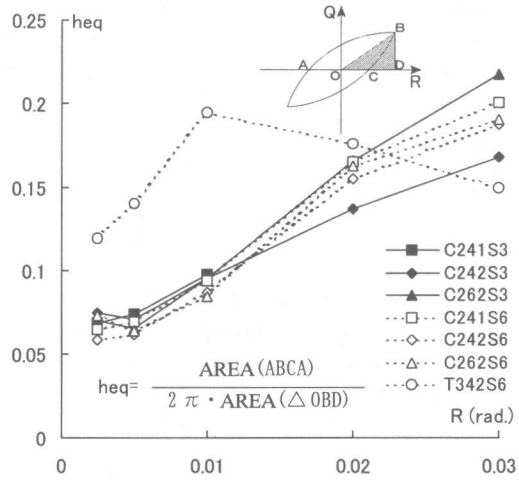


図-7 等価粘性減衰定数

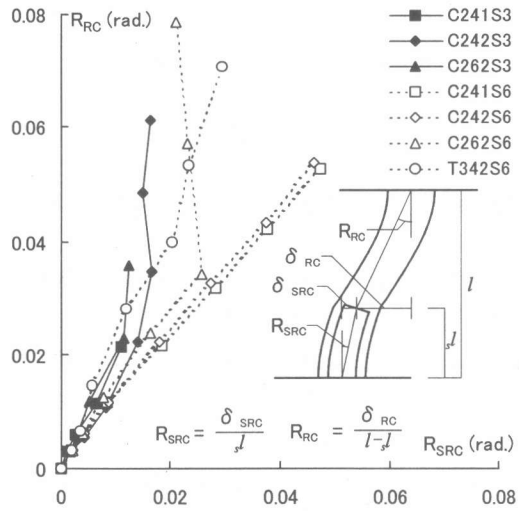


図-8 $R_{RC}-R_{SRC}$ 関係

による等価粘性減衰定数に相違は見られないが、内蔵鉄骨長さが 300mm の試験体では、 $M_p/srcM_p$ の値が大きいほど等価粘性減衰定数も大きくなっている。 p_w が等しく内蔵鉄骨長さが違う場合には、内蔵鉄骨長さが長い方が等価粘性減衰定数も大きい。また、T342S6 試験体では、部材角 0.01rad. 以降、等価粘性減衰定数が減少している。これは、図-4 の固有ループが示すように変形の増大に伴いすべりを伴う履歴性状に移行したためと推察される。

図-8 に SRC-RC 部材の RC 部分の変形から求

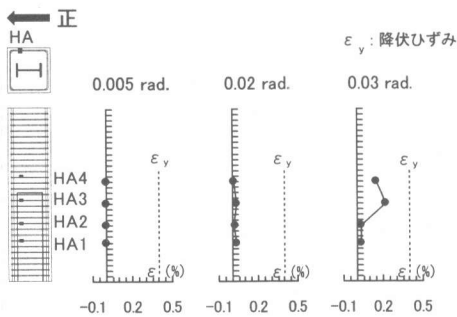


図-9 セン断補強筋の軸ひずみ分布

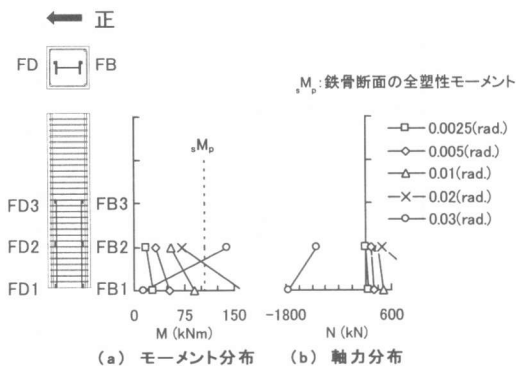


図-10 鉄骨のモーメントおよび軸力分布

れる部材角 R_{SRC} との関係を示す。縦軸は RC 部分の部材角 R_{RC} 、横軸は SRC 部分の部材角 R_{SRC} を示す。C241S6 および C242S6 試験体では、 R_{RC} の値に対して R_{SRC} の値が若干小さいが、RC 部分と SRC 部分はほぼ一体となって挙動している。内蔵鉄骨長さが 300mm の C241S3、C262S3 および既報より抜粋した C242S3 試験体では、部材角 0.01 rad. 以降、 R_{SRC} の値はほぼ一定であるのに対し、 R_{RC} の値は急激に増大している。C262S6 試験体についても部材角 0.01 rad. 以降、同様の傾向を示している。また、T342S6 試験体は、変形量が小さい段階から RC 部分の変形が卓越している。

3.2 ひずみ推移状況

図-9 に C262S6 試験体について、部材角が 0.005、0.02 および 0.03 rad. 時のせん断補強筋の軸ひずみの分布を示す。部材角が 0.005 rad. から 0.02 rad. までは、材軸に沿ってほぼ一定のひずみ状態である。しかしながら、部材角が 0.03 rad. 時には、HA3 および HA4 位置のひずみは降伏ひずみ

に達していないものの、他の位置のひずみに比べ、増大している。これは、鉄骨フランジに作用する支圧力が反作用として、RC 部分を押し広げる力となり、この押し広げる力に対し、せん断補強筋に引張力が生じるためであると推察される。

図-10 (a) および (b) に、C262S6 試験体について、部材角が 0.0025、0.005、0.01、0.02 および 0.03 rad. 時の鉄骨フランジ面のひずみ測定値より求められた鉄骨の負担モーメントおよび軸力分布を示す。図中の M_p は、鉄骨断面の全塑性モーメントである。負担モーメントについては、部材角 0.01 rad. ほどで柱脚部で鉄骨の全塑性モーメントに達している。また、せん断ひび割れが進展した部材角 0.03 rad. 時点では、柱脚部の鉄骨はモーメントをほとんど負担していない。軸力分布についてみると、部材角 0.02 rad. までは、変形の増大とともに引張軸力の値も増加傾向にあるが、部材角 0.03 rad. 時になると圧縮軸力に移行する。

4. 結語

合成柱の変形性状に関して、内蔵鉄骨長さ、内蔵鉄骨断面、せん断補強筋量および作用軸力の影響を明らかにするために、繰返し載荷の 5 体の試験体について実験を行い、それらの結果の検討によって、以下のような結論が得られた。

- 1) SRC 部材の長さが部材長の 50% の場合、内蔵鉄骨断面が大きいほど、また、せん断補強筋量が多いほど最大耐力は向上することが示された。しかしながら、内蔵鉄骨断面およびせん断補強筋量の違いで等価粘性減衰定数に顕著な相違は認められない。
- 2) SRC 部材の長さが部材長の 25% の場合、内蔵鉄骨断面が大きいと最大耐力は低下するが、等価粘性減衰定数は増加することが示された。また、せん断補強筋が少ない場合には、最大耐力発揮後の耐力低下が著しいことが示された。

参考文献

- 1) 岡本昌泰, 馬場望, 西村泰志: 鉄筋コンクリート部材から鉄骨鉄筋コンクリート部材への応力伝達, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 325-330, 1999