

論文 柱鋼管コンクリート・梁Sとする混合構造の工業化構法に関する研究

佐々木仁*1・三瓶昭彦*2・内田和弘*3・松戸正士*1

要旨：本構法は、柱鋼管コンクリート・梁Sとする混合構造において、柱をプレキャスト化し、上下階のプレキャスト柱を柱脚において高強度無収縮モルタルにより乾式接合することを特徴とする工業化構法である。本報は、高強度無収縮モルタルにより乾式接合した鋼管コンクリート柱の曲げせん断実験を行った結果について検討したものである。実験結果より、曲げ耐力は累加強度式で評価できること、弾性範囲では平面保持の仮定が成立することなどが分かった。

キーワード：混合構造、鋼管コンクリート柱、鉄骨梁、プレキャストコンクリート

1. はじめに

近年、建築生産性、施工性の合理化などから、鉄骨（S）造、鉄筋コンクリート（RC）造、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造などの長所を組み合わせた混合構造の研究開発が盛んである。筆者らは、これまでに柱RC・梁Sとする構造形式において、十分な耐震性能を有する柱・梁接

合部のディテールを開発し、この種の構造の弱点であった柱・梁接合部の性能が大幅に向上できることを明らかにしてきた[1]。しかしながら、より長大スパンや高層建物へ適用していくには、柱を鋼管コンクリート造あるいはSRC造にする必要がある。

一般に、柱が鋼管コンクリート部材の場合、鋼管は溶接により接合されRC部は後打ちコンクリートが打設される。しかし、生産性や施工性の点からは、柱をPC化した工業化構法の開発が望まれる。

この際、鋼管要素の接合方法が問題となるが、図-1及び図-2に示す方法で鋼管継手に下階の鋼管を差込み、その間の隙間にモルタルを充填することにより一体化をはかることができれば、鋼管コンクリート柱のPC化が可能となる。従って、柱を鋼管コンクリート造、梁をS造とする混合構造の工業化をはかるためには、鋼管部の応力伝達、即ち、鋼管継手部の力学的性状を明らかにすることは重要である。

本論文は、柱頭・柱脚で鋼管及び主筋を高強度無収縮モルタルにより機械接合した鋼管コンクリート柱の曲げせん断実験を行い、柱部材及び鋼管継手部の力学的性能を検討したものである。

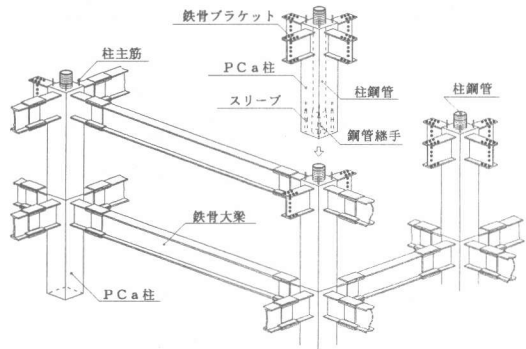


図-1 構法概要

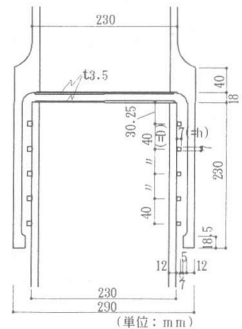


図-2 鋼管継手詳細

*1 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主任、工修、(正会員)

*2 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主席研究員、(正会員)

*3 (株)フジタ技術研究所建築研究部構造2グループ主任研究員、(正会員)

2. 柱鋼管コンクリート・梁S構造の工業化構法の特徴

本構法及び鋼管継手のディテールの特徴は、図-1及び図-2に示すように次の通りである。①柱の鋼管部分には、建方、施工性の点から丸形鋼管を用いる。②上階と下階のPC柱は、柱脚部において接合する。③鋼管の接合方法は、溶接によらず柱脚に埋め込まれた鋼管継手に下階から突出した鋼管を差込み、鋼管と鋼管継手の隙間に高強度無収縮モルタルを充填することにより一体化をはかる。主筋の接合は、モルタル充填式の機械式継手による。④鋼管継手部は、下階の鋼管（内管）の表面、あるいは上階の継手管（外管）の内面の円周に鉄骨リブが突起している。

3. 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体形状及び配筋図を図-3にそれぞれ示す。試験体は、実大のほぼ2/3模型の被覆形鋼管コンクリート柱で、比較用に継手のない試験体を用意し、計6体とした。NO.1～NO.3試験体は、本構法のPC柱を模擬したもので柱頭・柱脚に290φ×12mmの鋼管継手及び柱主筋用のスリーブ継手が配されている。NO.4～NO.6試験体は、比較用の在来工法を模擬したもので、鋼管継手及び柱主筋用の機械継手はなく、鋼管及び主筋が連続的に加力スタブに定着されている。各試験体とも柱断面は430×430mm、母材鋼管230φ×12mm、柱主筋4-D25で共通である。せん断補強は、曲げ降伏が先行するようSRC規準式によるせん断耐力が曲げ耐力を上回るように補強筋量を算定し、NO.1、NO.2、NO.4、NO.5試験体では、SD295A □-D10 @85、NO.3、NO.6試験体では、丸ボソ □-U9.2 @70とした。表-2に使用材料の試験結果を示す。

鋼管継手及び鉄筋の機械継手への高強度無収縮モルタルの充填は、予めコンクリートの打設前に完了させた。鋼管継手部分のモルタルは、鋼管を鉛直にセットした状態で充填した。RC部分の打設は、各試験体とも横打ちとし、柱部と加力スタブとの境界に打ち継ぎを設け、先に柱部次いでスタブを打ち込んだ。

4. 加力方法

加力は、変位制御による正負交番繰返しの大野式逆対称加力で行った。NO.1、NO.4試験体に関しては、一定軸力 $N = 77.1 \text{ tonf (N/N)}$ 。

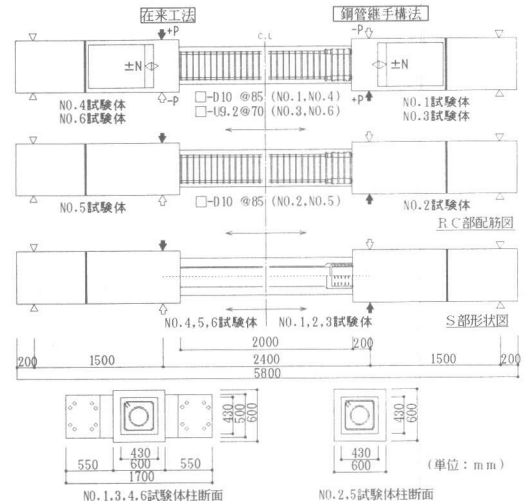


図-3 試験体形状配筋図

表-1 試験体一覧

試験体	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
軸力比 (N/N)	0.1	0	-0.3 ~ 0.2	0.1	0	-0.3 ~ 0.2
軸力 (tonf)	77.7	0	-105.6 ~ 155.4 (変動)	77.7	0	-105.6 ~ 155.4 (変動)
柱断面 (mm)	430×430 (被覆形)					
主筋	4-D25 (SD390)					
鋼管 (mm)	φ230×12 (SCW490)					
鋼管継手 (mm)	φ290×12 (SCW490)		継手なし			
フープ筋 Pw(%)	□-D10 @85 0.84	□-U9.2 @70 0.91		□-D10 @85 0.84		□-U9.2 @70 0.91

表-2 使用材料の試験結果

鋼材	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	破断伸び (%)	使用箇所
PL-12	3,980	5,453	2.04×10 ⁶	29.2	柱鋼管
PL-12	4,130	5,375	1.92×10 ⁶	31.4	鋼管継手
D25	4,393	6,240	1.78×10 ⁶	18.1	主筋
D10	3,617	4,997	1.69×10 ⁶	15.4	フープ筋
U9.2	13,820	14,875	1.85×10 ⁶	8.7	フープ筋
材料種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	圧縮強度時ひずみ (×10 ⁻⁶)		
コンクリート	364	2.21×10 ⁵	2,513		
充填モルタル	1,201	3.18×10 ⁶	4,918		

=0.1)を保持したまま水平力を作用させたのに対し、NO.3、NO.6試験体に関しては、比較的高層建物の側柱が引張から圧縮までの変動軸力を受ける場合を想定し、メカニズム時のせん断力と軸力（長期軸力を考慮）との関係に基づいて、 $N=6.8Q+60$ (tonf)の関係で制御した。軸力の変動幅は、圧縮側では $N=155.4$ tonf($N/N_0=0.2$)で、引張側では $N=-105.6$ tonf($N/N_0=-0.3$)であり、それらを越えるせん断力を載荷する場合は一定軸力とした。なお、詳細は文献[2]を参照されたい。

5. 実験結果

5.1 実験経過と荷重-変形関係

表-3に実験結果一覧を、図-4に最終ひび割れ状況を、図-5に柱せん断力と柱部材角との関係をそれぞれ示す。図-5中の一点鎖線は、SRC標準の一般化累加による曲げ終局耐力の計算値である。6体ともに端部のコンクリートの曲げ圧壊により耐力が決まった。NO.1、NO.2、NO.4、NO.5試験体($N/N_0=0$ 及び $N/N_0=0.1$)は、せん断ひび割れが柱部材角 $R=3.7\sim 4.8\times 10^{-3}$ rad.で発生した。その後、変形の増大につれ、鉄筋、次いで鋼管が $R=10\times 10^{-3}$ rad.の近傍で降伏した。鉄筋及び鋼管の降伏後も耐力は徐々に上昇し、継手のあるNO.1、NO.2試験体では $R=30\times 10^{-3}$ rad.で、継手のないNO.4、NO.5試験体では、 $R=20\times 10^{-3}$ rad.で最大耐力に達した。一方、NO.3、NO.6試験体($N/N_0=-0.3\sim 0.2$)は、正加力時(圧縮軸力時)では、せん断ひび割れ、鉄筋の降伏、鋼管の降伏の順に生じた。また、負加力時(引張軸力時)では、鉄筋の降伏が最も早く、次いでせん断ひび割れ($R=6\times 10^{-3}$ rad.)、鋼管の降伏($R=7.2\sim 8.8\times 10^{-3}$ rad.)の順に生じた。荷重-変形関係は、いずれの試験体とも紡錘型の履歴曲線を示していると思われるが、継手のあるNO.1、NO.2、NO.3試験体は、継手のないNO.4、NO.5、NO.6試験体に比べ $R=20\times 10^{-3}$ rad.以降の繰り返し加力で若干のスリップがみられる。

6. 結果の考察

6.1 せん断ひび割れ強度

表-3 実験結果一覧

試験体	せん断ひび割れ発生		降伏時				最大荷重時		
			鉄筋		鉄骨				
	荷重	変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重	変形	
NO.1	+	35.19	4.76	41.94	6.58	58.94	12.00	70.81	30.1
	-	31.72	4.13	41.33	6.53	56.54	11.97	66.65	19.2
NO.2	+	28.89	4.67	33.63	6.09	46.71	10.05	62.89	30.1
	-	26.35	4.33	32.53	6.05	44.65	9.55	62.06	30.1
NO.3	+	42.38	4.80	54.35	8.08	61.07	10.96	72.81	20.1
	-	20.71	5.71	19.14	5.00	26.13	8.84	44.54	50.0
NO.4	+	32.99	4.33	46.68	7.51	54.60	9.56	65.51	20.1
	-	29.75	4.01	45.78	7.65	43.08	7.62	65.54	20.1
NO.5	+	27.86	4.67	41.15	8.04	42.93	8.58	61.74	20.2
	-	24.15	3.74	33.32	6.06	42.82	8.58	62.13	20.1
NO.6	+	45.35	6.04	56.13	8.59	60.90	10.08	67.31	16.1
	-	22.25	5.64	21.28	4.97	27.10	7.24	47.01	50.5

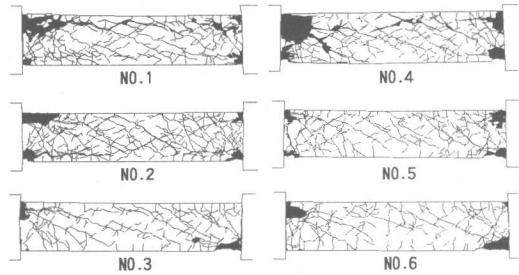


図-4 最終ひび割れ状況

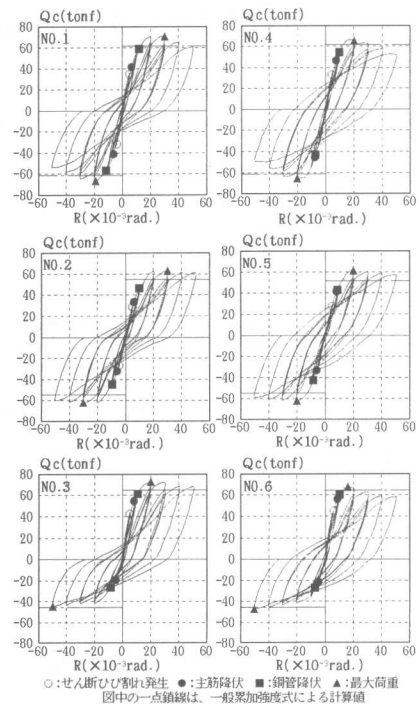


図-5 柱せん断力-柱部材角関係

せん断ひび割れ発生強度 (τ_{cr}) と柱軸力 (σ_0) との関係を図-6に示す。 τ_{cr} は、鋼管の効果をSRC規準に準じて考慮した式(1)による[3]。鋼管継手のある試験体は、柱端に最も早くせん断ひび割れが発生したことから、図-6中に示すように継手管断面位置で算定した。

$$\tau_{cr} = \frac{Q_{cr}}{(1+\beta) \cdot b' \cdot j} \quad (1)$$

ここに、 b' : コンクリートの有効幅(=b-sD)
 NO.1、NO.2、NO.3試験体: $b'=14\text{cm}$
 NO.4、NO.5、NO.6試験体: $b'=20\text{cm}$

$$\text{NO.1、NO.2、NO.3試験体: } \beta = 10 \cdot \frac{sA_1 + sA_2}{cA}$$

$$\text{NO.4、NO.5、NO.6試験体: } \beta = 10 \cdot \frac{sA_1}{cA}$$

Q_{cr} : せん断ひび割れ荷重

j : 鉄筋コンクリート部分の応力中心間距離(=0.75D)

図-6より、鋼管継手のある試験体の τ_{cr} は、式(2)に示すように0.15 σ_0 に比例し、RC梁のせん断ひび割れ強度の上限値に軸力の効果を考慮することができる。

$$\tau_{cr} = \frac{0.14 \cdot \kappa_c \cdot (500 + \sigma_B)}{(M/Q \cdot r, d) + 1.7} + 0.15 \sigma_0 \quad (2)$$

ここに、 κ_c : 断面寸法による形状係数

r, d : 圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離

$M/Q \cdot r, d$: シアスパン比

6. 2 最大耐力

最大荷重の実験値と計算値の比較を表-4に示す。各試験体とも、曲げ降伏が先行し端部のコンクリートの圧壊により耐力が決まった。SRC部材の曲げ耐力は、RC断面とS断面の耐力の和で評価する累加強度式が一般に採用され、実験結果ともほぼ対応することが知られている。そこで、曲げ耐力の計算値は、SRC規準による単純累加強度式と、一般化累加強度式の2つの累加強度式により検討する。継手のある試験体は、鋼管及び主筋の測定ひずみ値が柱端で最も大きいことから、RC要素及びS要素は継手管を考慮せず、クリアランス200cmとして計算値を求めた。

表-4より、単純累加強度式に対する実験値の比は、鋼管継手のある試験体では1.20~1.64(平均値1.41)、継手のない試験体では1.11~1.62(平均値1.38)の範囲にあった。また、一般化累加強度式に対する実験値の比は、鋼管継手のある試験体では0.98~1.16(平均値1.10)、継手のない試験体では1.04~1.11(平均値1.07)の範囲にあった。鋼管継手のある試験体の最大耐力は、単純累加強度式の1.41倍、一般化累加強度式の1.1倍であり累加強度式で安全側に評価することができる。

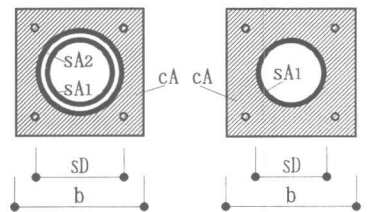
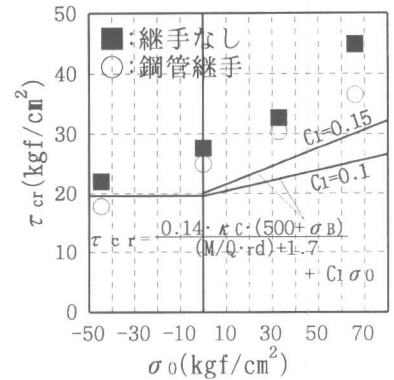


図-6 τ_{cr} と σ_0 との関係

表-4 最大耐力の計算値との比較

試験体	実験値 (tf)	曲げ耐力			
		計算値*1 1Qbu (tf)	計算値*2 2Qbu (tf)	実験値 計算値*1	実験値 計算値*2
NO.1 +	70.8	50.1	61.2	1.41	1.16
-	66.7			1.33	1.09
NO.2 +	62.9	38.4	55.7	1.64	1.12
-	62.1			1.62	1.11
NO.3 +	72.8	60.8	64.6	1.20	1.13
-	44.5			1.26	0.98
NO.4 +	65.5	50.1	61.2	1.31	1.07
-	65.5			1.31	1.07
NO.5 +	61.7	38.4	55.7	1.61	1.11
-	62.1			1.62	1.11
NO.6 +	67.3	60.8	64.6	1.11	1.04
-	47.0			1.32	1.04

計算値*1: 単純累加強度式、計算値*2: 一般化累加強度式

6.3 各断面の曲げモーメント・曲率関係

1) 曲率分布

継手のあるNO.1、NO.2、NO.3試験体について、鋼管及び鉄筋の測定ひずみ値より各断面の曲率を算出し、その曲率の材軸方向の分布を図-7に示す。鋼管要素の曲率の反曲点と、鉄筋要素の曲率の反曲点はほぼ一致している。柱頭・柱脚のA、G断面の挙動をみると、せん断ひび割れが発生するまでは、鋼管と鉄筋の曲率はほぼ一致し、弾性範囲では平面保持の仮定が成立している。また、鋼管の曲率は、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ までA~G断面区間はほぼ直線分布を示しているのに対し、鉄筋の曲率は、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ 時においてA、G断面が降伏したため曲率が増大し直線分布を示さなくなる。

2) 曲げモーメント分布

継手のある試験体について、鋼管及び鉄筋の測定ひずみ値より各断面の曲げモーメントを算出し、その材軸方向の分布を図-8に示す。鋼管のひずみは、その表面に材軸方向に貼付した1軸ゲージの値を用いた。曲げモーメントは、測定された圧縮ひずみと引張ひずみの平均値から計算した。応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮しない Bilinear を仮定した。鋼管の曲げモーメントと鉄筋の曲げモーメントは、降伏するまではA~G断面区間はほぼ一致し、直線分布を示している。柱頭・柱脚のA~BとF~Gの断面区間をみると、鋼管及び鉄筋とも $R=50 \times 10^{-3} \text{rad.}$ でほぼ柱せいの1倍の区間が曲げ降伏している。

6.4 鋼管継手部の負担曲げモーメント

図-9に鋼管継手部の各断面のひずみ値より算出した継手管(外管)及び母材鋼管(内管)の曲げモーメントの分担率を材軸方向の分布で示す。弾性範囲では、平面保持の仮定により分担率を求めることができる。ひずみ値は、鋼管の表面に材軸方向と円周方向に貼付した2軸ゲージの値を用いた。曲げモーメントは、平面応力を仮定した式(3)より求めた。

$${}_sM = {}_sZ_x \cdot {}_s\sigma \quad (3)$$

ここに、
$${}_s\sigma = \frac{{}_s\sigma_x - \nu {}_s\sigma_y}{1 - \nu^2}$$

${}_sZ_x$: 継手管及び母材鋼管の断面係数

${}_s\sigma_x$: 引張縁及び圧縮縁の材軸方向の応力度

$${}_s\sigma_x = \frac{{}_sE}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y)$$

${}_sM$: 鋼管の曲げモーメント

${}_sE$: 鋼管のヤング係数、 ν : 鋼管のポアソン比

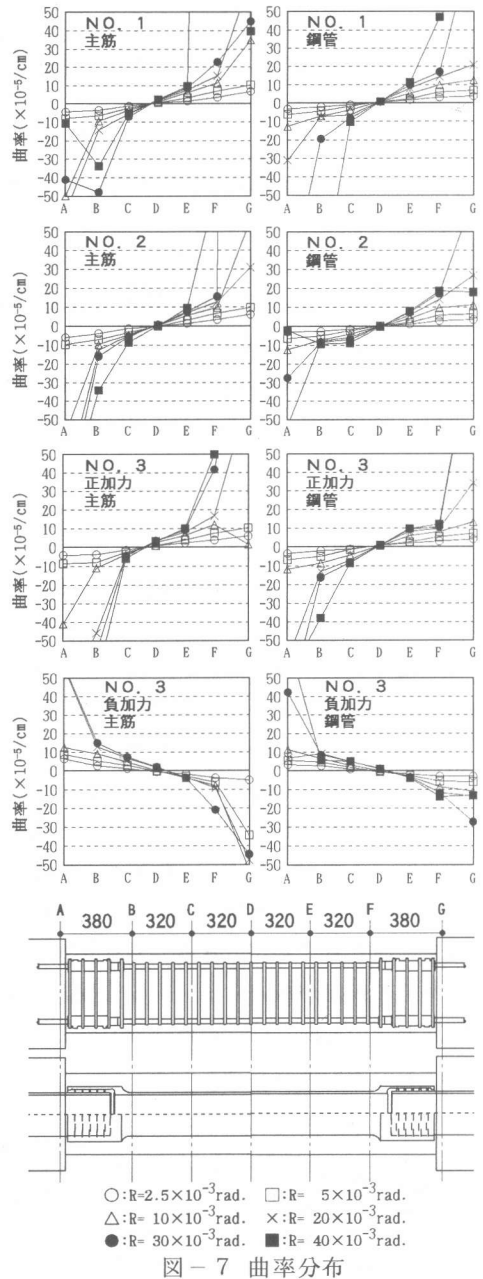


図-7 曲率分布

図-9より、母材鋼管は、①断面から⑤断面にかけてほぼ直線的に分担率が増加している。分担率の状況は、圧縮軸力時と引張軸力時に違いがみられる。圧縮軸力時の母材鋼管は、①断面で20%、⑤断面で60%程度となっており、その分担率は $R=20 \times 10^{-3}$ rad. まで殆ど変化しない。一方、引張軸力時の母材鋼管は、鉄筋降伏時の $R=5 \times 10^{-3}$ rad. まで①断面で0%、⑤断面で60%程度となっており、その後は①断面～④断面区間の分担率が増加する。従って、圧縮軸力時と引張軸力時では、継手部の応力伝達が異なり、特に引張軸力時の母材鋼管は、柱危険断面位置の母材鋼管が降伏した後は、埋め込み長さのほぼ1/2区間で曲げモーメントを分担しているものと思われる。

7. まとめ

柱鋼管コンクリート・梁Sとする混合構造において、柱をプレキャスト化し、上下階のプレキャスト柱を柱脚に埋め込まれた鋼管継手を介して接合することを特徴とする工業化構法に関して、鋼管継手で接合した鋼管コンクリート柱の実験結果より以下の知見を得た。

- せん断ひび割れ強度は、RC梁のせん断ひび割れ強度の上限値に $0.15\sigma_c$ の軸力を累加して推定できる。
- 最大曲げ耐力は、SRC規準の累加強度式で評価することができる。
- 弾性範囲では、平面保持の仮定が成立する。
- 鋼管要素の反曲点と鉄筋要素の反曲点は、ほぼ一致し外力による曲げモーメントの反曲点とも一致する。

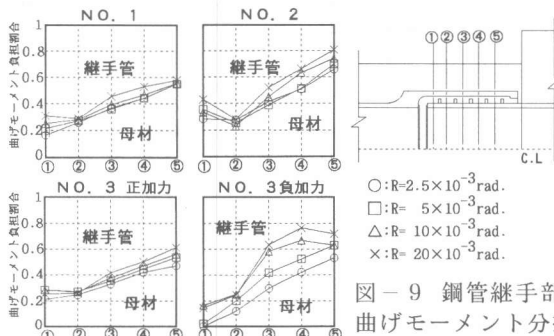


図-9 鋼管継手部の曲げモーメント分担率

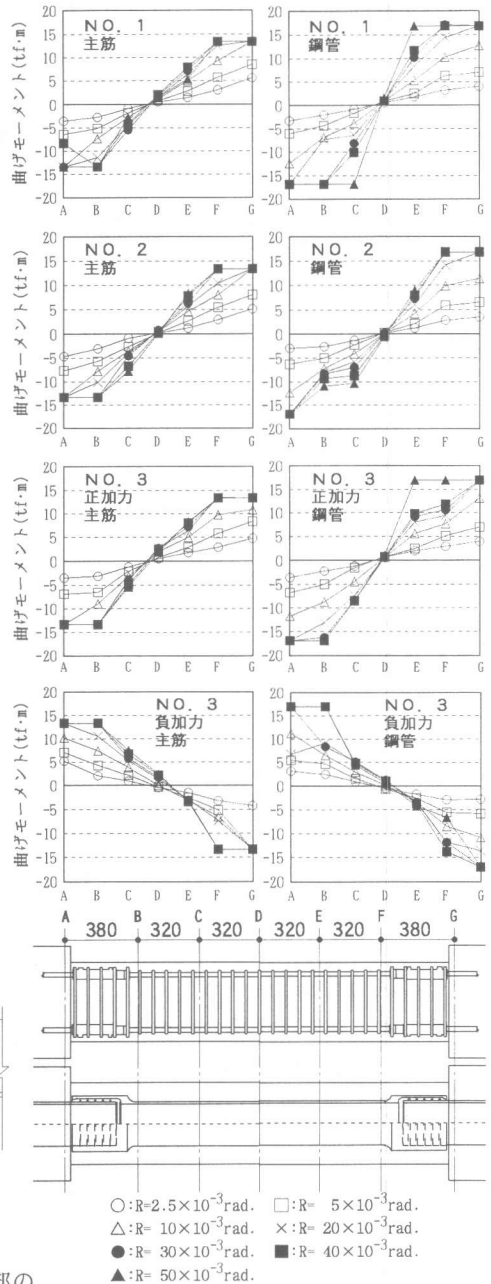


図-8 曲げモーメント分布

【参考文献】[1]佐々木仁・久保田勤・三瓶昭彦・山本哲夫・狩野芳一：柱RC・梁Sとする混合構造柱・梁接合部のせん断抵抗機構、日本建築学会構造系論文報告集、第461号、pp.133-142、1994.7 [2]三瓶昭彦・佐々木仁・内田和弘ほか：プレキャストSRC柱とS梁で構成されるハイブリッド構造構法に関する研究開発（その5～7）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1791-1796、1994.9 [3]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、pp.167-169、1987.6 [4]仲威雄・森田耕次・立花正彦：鉄骨鉄筋コンクリート柱脚の耐力と履歴特性に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第276号、pp.43-50、1979.10