

論文 柱梁接合部内にスリーブ継手を有する梁主筋の付着性状に関する実験的研究

高津 比呂人^{*1}・木村 秀樹^{*2}

要旨：PCa 工法において、梁主筋の継手を柱梁接合部内に設ける場合があるが、その場合、設計で想定する通し梁主筋の定着とは異なった検討が必要であることが考えられる。そこで、スリーブ継手を有する鉄筋の付着性状を把握するために、スリーブ継手表面の付着強度およびスリーブ小口の支圧強度に着目して実施した要素実験結果を実施し、架構実験結果と比較した結果、梁主筋引張側ではスリーブ小口の支圧による見かけの付着強度の上昇はあまりないこと、スリーブ継手表面の平均付着応力が 6.5N/mm^2 程度と比較的大きな値であるため、接合鉄筋に換算すると異形鉄筋と同等の付着応力度を発揮していることが確認された。

キーワード：スリーブ継手、付着性状、支圧強度、プレキャストコンクリート、柱梁接合部

1. はじめに

高層鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の施工の効率化を図るためプレキャスト（以下、PCa）RC 梁主筋の機械式継手（スリーブ継手）を柱梁接合部内に設ける場合がある。しかしながら、スリーブ継手を有する鉄筋の付着機構は、継手自身の形状が異形鉄筋である梁主筋とは異なるため、付着耐力の不足や劣化により、降伏変形が増大する事など¹⁾が考えられる。

スリーブ継手を有する鉄筋の付着強度 F は、図-1 に示すように、鉄筋の付着 (F_r) とスリーブ継手表面の付着 (F_s) とスリーブ継手小口の支圧 (F_b) の足し合わせにより評価できるものと考えられ、スリーブ継手を有する鉄筋の付着強度に関する研究も行なわれている²⁾。しかしながら、スリーブ継手単体の付着強度およびスリーブ継手小口の支圧強度に着目した研究は少なく³⁾、未だに解明されているとは言えない。

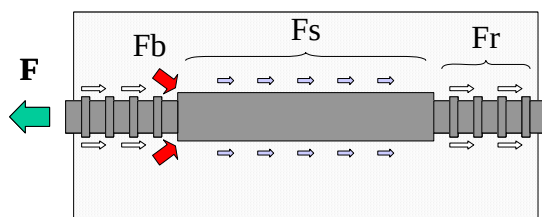


図-1 スリーブ継手部の付着

そこで、本論文ではスリーブ継手を有する鉄筋の付着性能を設計上取り込むための基礎資料を得るために実施した、スリーブ継手単体の付着試験およびスリーブ小口の支圧試験結果について報告し、既報の架構実験⁴⁾におけるスリーブ継手を有する梁主筋の接合部内付着強度との比較を行なう。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-2に、試験体一覧を表-1に示す。スリーブを配置した中央部以外は全て共通の形状とし、スリーブ配置部分の形状のみをパラメータに合わせて変更した。スリーブ継手小口までの試験体上面からの埋め込み深さは66mmとした。また、スリーブ継手の後側（図中下側）には鉄筋を配置しなかった。

スリーブ表面の付着強度を確認する試験体（b1, b2）ではスリーブ継手の両端部をアンボンド（箱抜き）とし、中央部分のみを付着区間とした。逆に、スリーブ小口の支圧強度を確認する試験体では、スリーブ継手部分をアンボンドとし、スリーブ表面の付着をなくして小口の

*1（株）竹中工務店技術研究所 建設技術研究部 研究員 工修（正会員）

*2（株）竹中工務店技術研究所 建設技術研究部 主任研究員 工博（正会員）

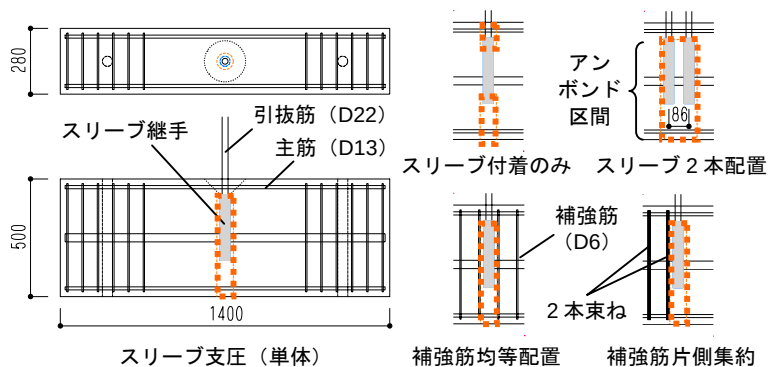


図-2 試験体形状

表-1 試験体一覧

試験体名	スリーブ 本数	スリーブ 付着	スリーブ 支圧	せん断 補強筋	側圧	アンボンド 区間
b1	1	○	×	×	×	スリーブ両端
b2		○	×	×	○	
b3		×	○	○	×	
b4		×	○	×	×	スリーブ全体
b5		×	○	○(集約)	×	
b6		×	○	×	○	
b7		○	○	×	×	なし
b8		○	○	×	○	
b9	2	×	○	○	×	スリーブ全体
b10		×	○	×	×	
b11		×	○	○(集約)	×	
b12		○	○	×	×	なし

集約：補強筋をスリーブの片側に集約配置している

表-2 コンクリート、
継手モルタル材料特性

	σ_B [N/mm ²]	$E_c (\times 10^4)$ [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]
コンクリート	56.4	2.77	3.61
継手モルタル	111.5	4.08	-

σ_B ：シリンダー圧縮強度， E_c ：ヤング係数

σ_t ：割裂引張強度

表-3 鉄筋材料特性

	σ_y [N/mm ²]	$E_s (\times 10^5)$ [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]
引抜筋(D22)	727.5	1.95	941.0
主筋(D13)	363.6	1.94	526.9
補強筋(D6)	431.6	1.95	600.3

σ_y ：降伏強度， E_s ：ヤング係数， σ_t ：引張強度



写真-1

試験体加力状況

(b3)

支圧のみで抵抗するようにした。支圧破壊モードはコーン破壊を想定したため、その群効果を確認するためのスリーブを2本配置した試験体も製作した(b9～b12)。

スリーブ付着とスリーブ小口の支圧が両方あるケース(b7, b8, b12)ではアンボンド区間を設けず、スリーブを完全に埋め込んで試験体を製作した。パラメータは、せん断補強筋の有無とその配置及びスリーブ継手と直交方向に試験体に導入する側圧(プレストレス力 $=0.1\sigma_B$)とした。なお、今回実験で使用したスリーブ継手は、長さ280mm、外径43mm、内径27mmの円筒形のものを使用した。コンクリート、継手充填モルタル、鉄筋の材料特性を表-2, 3に示す。

2.2 加力と計測

試験体両端をPC鋼棒で床に固定し、コンクリートに埋め込んだスリーブ継手を有する鉄筋(引抜筋)をジャッキで引き上げるにより、単調引抜加力を行なった(写真-1)。スリーブを2本配したb9～b12は、鋼製治具を介して2本の鉄筋を同時に引き上げた。計測は、引抜力と側圧、引抜筋の抜け出し量、引抜筋、主筋、

せん断補強筋のひずみについて行なった。

3. 実験結果

3.1 スリーブ継手の付着応力度

b1およびb2の付着応力(τ)－滑り変位(S)関係を図-3に示す。図の縦軸は、計測荷重をスリーブの周長と付着長さで割って算出した値である。また、滑り変位は、変位計により計測した引抜筋の抜け出し量から、実測ひずみより算出した引抜筋の伸びを差し引いた値である。ここでは、最初に変位が大きく進んだ点の付着応力を付着耐力とした。

b1およびb2の付着耐力および付着耐力時の滑

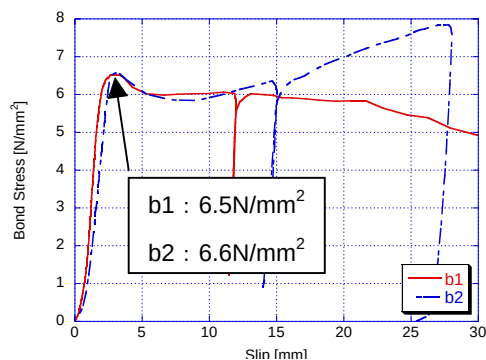


図-3 τ － S 関係 (b1, b2)

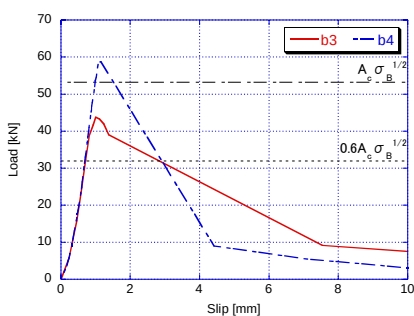


図-4 T-S 関係 (b3, b4)

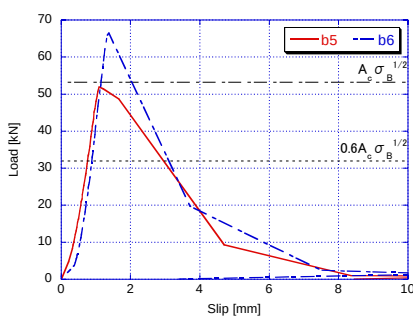


図-5 T-S 関係 (b5, b6)



写真-2

最終破壊状況 (b3)

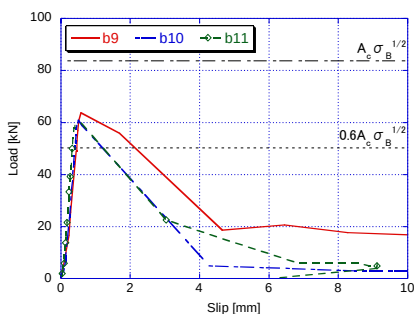


図-6 T-S 関係 (b9~b11)

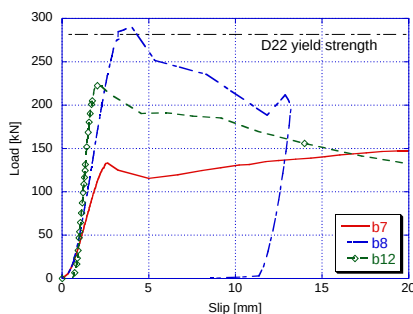


図-7 T-S 関係 (b7, b8, b12)

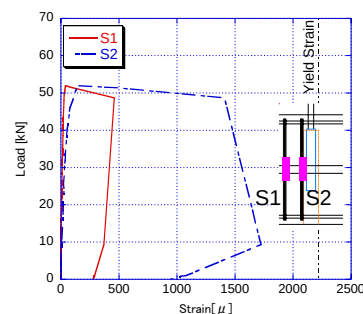


図-8 補強筋ひずみ(b5)

り変位に、ほとんど差は見られなかった。ただし、側圧のある b2 は、付着耐力後一旦付着応力が下がった後に変位の進行とともに再び付着応力が上昇する現象が見られた。比較的大きな変形(15mm 程度)まで、ほぼ一定の耐力を示した。

3.2 スリーブ小口の支圧強度 (単体引抜)

b3~b6 の引抜荷重 (T) - 滑り変位 (S) 関係を図-4, 5 に示す。図には各種合成構造設計指針⁵⁾による頭付きアンカーボルトの短期許容引張力 ($0.6A_c \sigma_B^{1/2}$) とコーン破壊耐力 ($A_c \sigma_B^{1/2}$) を示す (A_c : コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影面積)。

いずれの試験体も最大荷重到達時にはかぶり部分のコンクリートがコーン状に割裂破壊し (写真-2)、その後急激に耐力を喪失する様子が確認された。b3 のみがコーン破壊耐力を大きく下回ったが、それ以外の試験体の最大耐力は、コーン破壊耐力と同程度であった。

せん断補強筋を配置していない b4 に対し、せん断補強筋を配置した b3, b5 の最大耐力の方が小さい結果となった。一方、側圧の無い b4 に対し、側圧のある b6 は最大耐力が約 13% 上昇した。

これらのことから、スリーブ小口の支圧強度

に対して、せん断補強筋の効果は不明確だが、側圧により耐力が上昇することが確認された。

3.3 スリーブ小口の支圧強度 (2 本引抜)

b9~b11 の引抜荷重 (T) - 滑り変位 (S) 関係を図-6 に示す。単体引き抜きの場合と同様に最大荷重到達後には急激に耐力を失った。いずれも頭付きアンカーボルトの短期許容引張力⁵⁾に到達したものの、コーン破壊耐力には達しなかった。最大耐力に、補強筋の有無および配置の影響はほとんど見られなかった。

3.4 スリーブ継手を有する鉄筋の付着強度

b7, b8, b12 の引抜荷重 (T) - 滑り変位 (S) 関係を図-7 に示す。図には引抜筋 (D22) 1 本の降伏荷重を併せて示す。最大耐力時には b1, b2 を除く他の試験体同様コンクリートが割裂破壊の様子が確認されたが、スリーブ継手表面の付着が存在するため、耐力を急激に損失するような現象は見られなかった。

単体引抜の b7, b8 では、側圧のない b7 に対し、側圧のある b8 が 2 倍以上の耐力を発揮し、引抜筋も降伏した。この結果からも、側圧の存在により付着耐力が上昇することが確認された。

一方、2 本引抜の b12 の場合、最大耐力は単体

引拔で側圧のない b7 の 1.67 倍であり、引拔筋は降伏しなかった。これには、群効果による耐力低下の影響があったと考えられる。

3.5 補強筋の効果

引拔荷重と補強筋ひずみの関係の例を図-8 に示す。他の補強筋を配した試験体も同様の傾向を示した。補強筋ひずみが大きく進行するのはいずれも最大耐力発揮後であった。また、ひずみが大きく進行するのはスリーブ継手小口からの 45° コーン状破壊面⁵⁾を横切る S2 であり、引拔筋から離れた位置にある S1 のひずみはほとんど進行しなかった。

3.6 計算耐力との比較

実験結果と計算値の比較を表-4 に示す。なお、ここでは鉄筋の付着は埋め込み長さが $3d_b$ (d_b : 鉄筋の公称径) と短く、引拔荷重も小さいので無視した。

Tc1 ではスリーブ小口の支圧強度を、特に 2 本引拔の場合、やや危険側に評価する結果となり、 $0.6T_{c1}$ (短期許容引張力) により安全側の評価ができることが確認された。

また Tc2 では、単体引拔で補強筋がある b3, b5 について、やや危険側に評価する傾向があった。さらに、2 本引拔の場合には、実験結果を過小評価する事がわかった。

一方、スリーブ継手部分の付着強度を図-1 に示すように鉄筋の付着・スリーブ継手表面の付着・スリーブ継手小口の支圧の足し合わせにより評価できるとすると、b7 のスリーブ継手を有する鉄筋の付着強度は、b1 より求められるスリ

ーブ表面の付着応力度 6.5N/mm^2 と b4 の補強筋及び側圧のないスリーブ小口の支圧強度を足し合わせたものとほぼ等しくなるはずだが、

$$6.5 \times 43 \pi \times 280 / 10^3 + 58.8 = 305 [\text{kN}] \quad (1)$$

と、b7 の最大耐力の約 2.3 倍となった。

同様に、b2 より求められるスリーブの付着応力度 6.6N/mm^2 と b6 の補強筋がなく、側圧のあるスリーブ小口の支圧強度を足し合わせると、

$$6.6 \times 43 \pi \times 280 / 10^3 + 66.5 = 316 [\text{kN}] \quad (2)$$

と、b8 の最大耐力の約 1.1 倍となった。

さらに、b1 と b10 の補強筋及び側圧のないスリーブ小口の支圧強度を足し合わせると、

$$6.5 \times 43 \pi \times 280 \times 2 / 10^3 + 60.8 = 553 [\text{kN}] \quad (3)$$

と、b12 の最大耐力の約 2.5 倍となった。

これらの事から、側圧のある場合には単純足し合わせと同等の強度に達するのに対して、ない場合は、単純足し合わせ強度に到達しない事がわかった。本実験では、全引拔荷重に占める付着による荷重負担の割合が大きいため、b7 や b8 より、要素試験の b1, b2 のスリーブ付着長さが短かった事によって、特に軸力が無い場合には付着強度をやや大きめに評価していることが影響していると考えられる。

4. 実験結果の検討

4.1 架構実験における付着性状

図-9 に示す PCa 架構実験⁴⁾において、柱梁接合部内のスリーブ継手を有する梁主筋の付着性状の検討を行なった。なお、試験時の接合部コンクリート圧縮強度は 73.0N/mm^2 で、柱軸力比は 0.15 の一定軸力で加力を行ない、実験では通し配筋の一体打ち試験体と梁主筋に継手のある PCa 試験体で同様の履歴性状を示した。

検討にあたっては、図-10 に示す鉄筋およびスリーブ継手の引張試験結果による荷重-変形関係が、試験体の接合部内でも成立していると仮定し^{6),7)}、接合部内鉄筋及びスリーブ継手に貼り付けたひずみゲージの値を荷重に変換した。図-11 に算出した値を示す。図には比較用に継手のない場合の荷重分布も示す。なお、鉄筋の

表-4 実験結果と計算値の比較

試験体名	T_{max} [kN]	T_{c1} [kN]	$\frac{T_{\text{max}}}{T_{c1}}$	$0.6T_{c1}$ [kN]	$\frac{T_{\text{max}}}{0.6T_{c1}}$	T_{c2} [kN]	$\frac{T_{\text{max}}}{T_{c2}}$
b1	123.3	-	-	-	-	-	-
b2	178.4	-	-	-	-	-	-
b3	43.8	53.2	0.82	31.9	1.37	52.4	0.83
b4	58.8	53.2	1.11	31.9	1.84	33.1	1.78
b5	51.9	53.2	0.98	31.9	1.63	52.4	0.99
b6	66.5	53.2	1.25	31.9	2.09	43.3	1.53
b7	133.1	-	-	-	-	-	-
b8	291.4	-	-	-	-	-	-
b9	63.7	83.7	0.76	50.2	1.27	49.6	1.28
b10	60.8	83.7	0.73	50.2	1.21	30.3	2.01
b11	59.8	83.7	0.72	50.2	1.19	30.3	1.98
b12	222.6	-	-	-	-	-	-

T_{c1} : コーン状破壊耐力⁵⁾ $= A_c \sigma_B^{1/2}$, T_{c2} : 掻き出し破壊耐力¹⁾ $= k_n \cdot (T_c + T_w)$

応力-ひずみ関係は完全弾塑性と仮定した。

このようにして算出した荷重分布から $R=\pm 1/300[\text{rad.}]$, $R=\pm 1/133[\text{rad.}]$ における付着力の分布（区間の荷重差）を図-12(a)~(d)に、 $R=\pm 1/100[\text{rad.}]$ までの計算値一覧を表-5, 6に示す。

図-11 および図-12 より、継手がある場合の荷重分布や付着力の分布は、継手がない場合と大差ないことが確認された。

ただし、変形が $R=1/300[\text{rad.}]$ と小さい場合、継手がある試験体では梁主筋圧縮側の D-E 間の付着力が継手のない通し配筋の試験体に比べて大きくなっている。これは、継手が支圧抵抗と付着抵抗によりほとんど変形しないため、梁主筋圧縮側の E 位置でのひずみがほぼ 0 となり、圧縮ひずみが D 側にシフトしたためであると考えられる。

また、接合部ひび割れ発生および梁主筋降伏後の $R=1/133[\text{rad.}]$ では、継手がない通し配筋の場合 F-G 間の付着力が最大になるのに対して、継手がある場合には梁主筋が圧縮側となる E-F 間の付着力が最大となっている。同様の傾向は

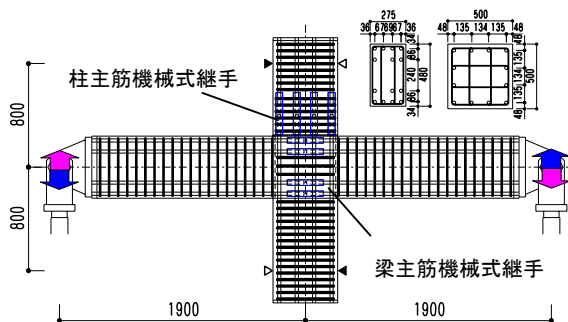


図-9 試験体形状

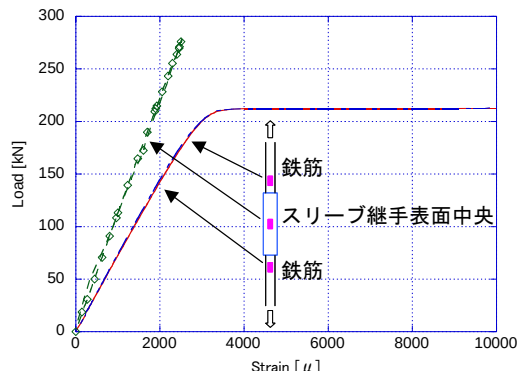


図-10 スリーブ継手を有する鉄筋の引張試験結果

$R=-1/133[\text{rad.}]$ の場合にも見られた。このことから、図-1に示すようなスリーブ継手を有する鉄筋の付着において、梁主筋引張側のスリーブ小口の支圧抵抗はそれほど大きくないと言える。

4.2 要素実験結果との比較

スリーブ継手表面の平均付着応力度は、表-5

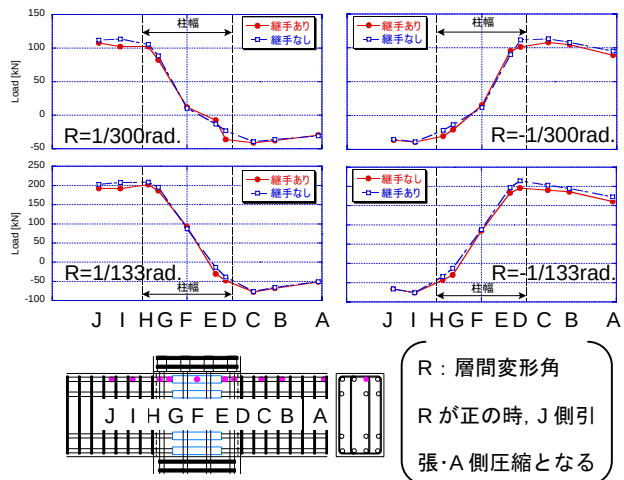


図-11 梁主筋の荷重分布

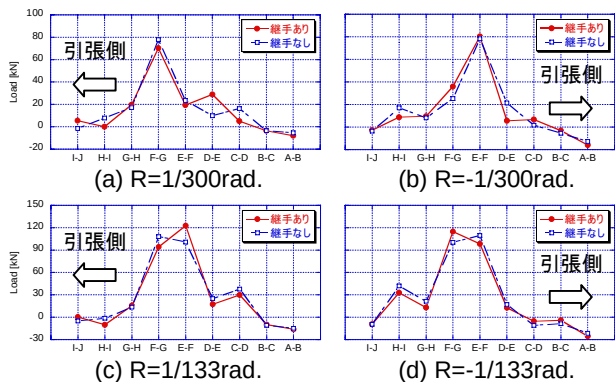


図-12 付着力の分布

表-5 付着力の分布（正側, J側引張）

層間変形角 [rad.]	継手	I-J	H-I	G-H	F-G	E-F	D-E	C-D	B-C	A-B
1/1000	あり	5.3	0.8	11.9	18.5	28.3	-4.3	-1.6	0.2	-3.0
	なし	-3.2	7.9	15.7	18.5	9.8	3.7	7.6	-1.0	-2.8
1/500	あり	6.2	2.1	18.4	38.9	12.4	23.0	0.6	-1.4	-4.9
	なし	-2.6	10.3	16.5	47.5	14.4	6.0	12.1	-1.7	-2.7
1/300	あり	5.5	0.0	19.7	70.3	19.4	28.9	5.1	-3.6	-8.0
	なし	-1.5	7.9	17.0	78.0	23.5	9.9	16.4	-3.4	-5.3
1/200	あり	3.8	-4.6	16.6	96.4	64.0	13.4	13.6	-6.6	-11.1
	なし	-2.3	4.0	15.9	93.0	58.0	15.3	23.6	-6.5	-9.4
1/133	あり	0.3	-10.1	15.5	94.1	122.8	17.3	29.9	-10.0	-16.2
	なし	-4.9	-1.3	13.3	108.2	100.9	25.1	37.8	-10.8	-15.1
1/100	あり	0.0	0.0	0.0	94.0	144.6	18.6	50.3	-26.4	-8.1
	なし	0.0	0.0	0.0	97.1	119.0	30.1	58.5	-13.0	-18.7

表-6 付着力の分布（負側, J側圧縮）

層間変形角 [rad.]	継手	I-J	H-I	G-H	F-G	E-F	D-E	C-D	B-C	A-B
-1/1000	あり	0.0	0.7	6.3	13.6	15.8	14.2	8.4	-8.6	-10.9
	なし	-0.6	7.7	2.5	7.5	15.9	18.7	9.9	-5.0	-5.7
-1/500	あり	-0.5	3.5	7.8	22.0	48.2	9.1	9.6	-4.9	-12.0
	なし	-1.9	11.6	5.1	13.7	45.5	22.0	5.8	-5.4	-8.9
-1/300	あり	-2.7	8.7	9.6	35.9	80.5	5.6	6.7	-3.2	-15.9
	なし	-3.6	17.1	8.1	25.3	78.4	21.5	1.7	-5.4	-12.7
-1/200	あり	-5.5	17.0	11.4	65.3	86.6	18.0	3.3	-2.8	-19.4
	なし	-5.1	24.6	14.4	56.8	94.8	20.6	-2.0	-5.9	-17.5
-1/133	あり	-9.4	32.8	12.9	114.7	98.4	12.7	-5.4	-4.1	-25.5
	なし	-9.6	41.8	21.3	100.4	109.5	17.1	-11.1	-8.8	-21.5
-1/100	あり	-14.5	257.2	-198.3	142.1	106.7	0.0	0.0	0.0	-25.4
	なし	-9.3	299.1	-239.4	136.1	103.2	0.0	0.0	0.0	-15.3

の $R=1/100[\text{rad.}]$ 時の、スリーブ小口の支圧力の影響を受けないと考えられる E-F 間（長さ 160mm）の付着力（スリーブ継手を直径 43mm の円筒と仮定）より計算すると、

$$144.6/43 \pi / 160 \times 10^3 = 6.7 [\text{N/mm}^2] \quad (4)$$

となり、要素実験結果から得られたスリーブ継手の付着応力度とほぼ等しい値を示した。

同様に、表-6 の $R=-1/100[\text{rad.}]$ 時の F-G 間（長さ 160mm）の付着力から、

$$142.1/43 \pi / 160 \times 10^3 = 6.6 [\text{N/mm}^2] \quad (5)$$

となり、要素実験結果および正加力時と同等の値を示した。

スリーブ継手全体の平均付着応力度が要素試験結果で得られた 6.5N/mm^2 を発揮したとし、それを接合している梁主筋 D22 の周長（70mm）に換算すると、

$$6.5 \times 43 \pi / 70 = 12.5 [\text{N/mm}^2] \quad (7)$$

であり、靱性保証型指針¹⁾による梁通し配筋の設計用付着応力度の計算値 12.3N/mm^2 を上回る結果となった。要素実験の結果から、軸力のある場合にはスリーブ継手表面の付着強度とスリーブ小口のコーン破壊強度の単純足し合わせと同等の強度を発揮する可能性があり、実際のスリーブ継手を有する梁主筋の柱梁接合部内の付着強度はこの値を上回ると考えられるので、スリーブ継手小口から柱面までの埋め込み深さを確保することにより、通し配筋の試験体と同等の性状を示すものと考えられる。

ただし、梁降伏先行型の架構で層間変形角 $1/100$ を超え、接合部コンクリートの劣化が進行することにより、主筋の抜け出しやエネルギー吸収性能の低下を招く恐れがあると考えられる。

5. まとめ

- 1) PCa 工法に用いられるスリーブ継手表面の平均付着応力度は、コンクリート圧縮強度が 56.4N/mm^2 の場合、 6.5N/mm^2 程度である。
- 2) スリーブ継手小口の支圧強度は、各種合成構造設計指針⁵⁾によるコーン状破壊耐力の短期許容引張力により安全側に推定できる。

- 3) スリーブ継手を有する鉄筋の付着強度は、側圧のある場合、スリーブ表面の付着強度とスリーブ小口の支圧強度の足し合わせにより評価できるが、側圧のない場合には、単純足し合わせが成立しない。
- 4) スリーブ継手を有する梁主筋の柱梁接合部内での付着力の分布を算出した結果、スリーブ表面の付着抵抗が大きく、小口の支圧抵抗はさほど大きくない事が確認された。
- 5) スリーブ継手表面に生じる付着抵抗を接合鉄筋の付着応力度に換算し、その値が靱性保証型指針¹⁾による梁通し配筋の設計用付着応力度の計算値と同等またはそれ以上の値を示せば、柱梁接合部内梁主筋に継手がある場合とない場合で、通常設計で考える層間変形角 $1/100$ 以下の範囲では、同様の履歴性状を示すものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説,1999
- 2) 例えば、又刈ほか：スプライススリーブ継手を含んだ鉄筋の付着性状に関する実験的研究（その 1）,日本建築学会学術講演梗概集,pp.133-134,2001.9
- 3) 山元ほか：鉄筋コンクリート部材に定着されたモルタル充填式継手金物の定着性能に関する実験的研究（その 1, その 2）,日本建築学会学術講演梗概集,pp.35-38,2004.8
- 4) 梅村ほか：柱梁接合部内に梁主筋の機械式継手を設けた PCaRC 部材の実験的研究,日本建築学会学術講演梗概集,pp.33-34,2006.9
- 5) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説,1985
- 6) 高谷ほか：柱梁接合部内機械式継手の付着性状に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,vol.25,No.2,pp.463-468,2003.7
- 7) 新上ほか：柱梁接合部内に機械式継手を用いた RC 造架構の加力実験,三井住友建設技術研究所報告,No.3,pp.105-112,2005