

論文 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

高谷 真次*1・丸田 誠*2

要旨: 各種機械式継手を柱梁接合部内に設けた十字型骨組縮小試験体に軸力及び正負交番水平力を加える構造実験を行い, 柱梁接合部内の機械式継手は, 接合部耐力に影響を与えないことを確認した。また, 梁主筋の接合部内付着に関する検討を行い, 機械式継手の有無に関わらず, 付着強度は柱断面の水平方向位置によって大きく異なり, 梁主筋圧縮側では, 梁主筋引張側と比較して大きな付着強度を有することや, 機械式継手小口支圧面による付着性能向上効果は, 小口が柱断面の梁主筋引張側端部近傍にある場合はほとんど認められない可能性があることを確認した。

キーワード: 柱梁接合部, 機械式継手, 付着, ストラット, プレキャスト

1. はじめに

高層 RC 造建物の施工にはプレキャスト工法を採用することが多いが, それらの中には, 柱梁接合部内で機械式継手を用いて梁主筋を接合する場合がある。その場合の骨組復元力特性は, 通し配筋の場合と比較して変わらないことが既往の文献¹⁾などで述べられており, さらに, 機械式継手を含んだ鉄筋の付着性状に関する研究²⁾も行われている。しかし, いまだ柱梁接合部内機械式継手の付着を定量的に評価するには至っていないため, 建物ごとに性能確認実験を行う必要があった。

本研究では, 各種機械式継手を柱梁接合部内に設けた十字型骨組縮小試験体に, 軸力及び正負交番水平力を加える構造実験を行い, 接合部内機械式継手の付着性状について定量的な評価を試みたのでここに報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体形状を図-1に, 試験体一覧を表-1に, 鉄筋, コンクリートの機械的性質を表-2, 表-3に示す。試験体の縮尺は実建物の約2/3を想定している。実験因子は, 柱梁接合部内機械式継手の有無, 個数, 種類とした。

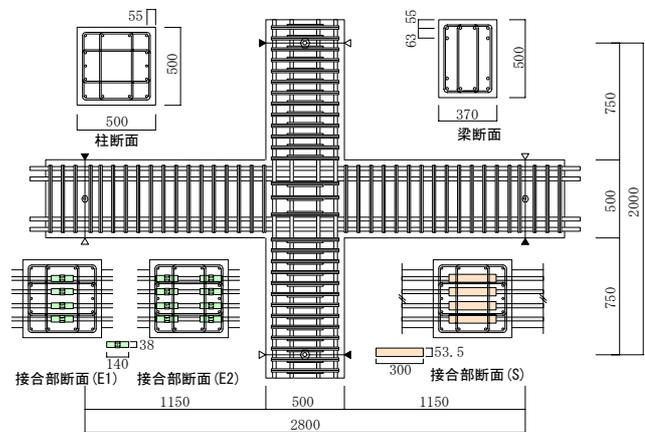


図-1 試験体形状 (N)

表-1 試験体一覧

試験体名	N	E1	E2	S
パネルゾーン内継手	無	EJ1	EJ2	SL
梁	断面B×D(mm)	370×500		
	主筋・材質	12-D25・SD490		
	鉄筋比pt (%)	1.64		
	補強筋・材質	4-D10@80 (SD785溶接閉鎖型)		
柱	断面B×D(mm)	500×500		
	主筋・材質	14-D22・SD490		
	鉄筋比pg (%)	2.17		
	補強筋・材質	4-D10@70 (SD785溶接閉鎖型)		
接合部	Hoop	3-罫-D10 (SD785溶接閉鎖型)		
	鉄筋比pw (%)	0.34		

コンクリート強度: $F_c=36\text{N/mm}^2$, 軸力0.15BDFc

EJ1: ネジ継手を接合部中央に一つ

EJ2: ネジ継手を接合部内に二つ, SL: スリーブ継手を中央に一つ

2.2 加力方法

鉄骨フレームと反力床を組み合わせる構築した反力フレームの中で試験体上下部を単純支持し, 柱頭に設置した軸力載荷用ジャッキにより

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 主管研究員 博士 (工学) (正会員)

表-2 鉄筋の機械的性質

径	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	降伏ひずみ $\epsilon_y(\times 10^{-6})$
D10	849.3	1025.4	4075
D22	534.0	695.1	2772
D25	516.8	672.5	2661

表-3 コンクリートの機械的性質

試験体	圧縮試験			割裂試験
	圧縮強度 σ_B (MPa)	弾性係数 E_c (MPa)	ポアソン比	割裂強度 σ_t (MPa)
N	36.3	3.04×10^4	0.185	2.48
E1	38.3	2.92×10^4	0.154	2.77
E2	39.6	2.99×10^4	0.186	3.33
S	40.0	3.07×10^4	0.157	2.86

一定柱軸力 ($0.15BDF_c=1350kN$) を与えた後、左右両梁端部に設置した押引ジャッキにより梁に左右逆対称せん断力を与えた。実験は層間変形角(R)で制御(1/800rad.を1回, 1/400~1/25を各2回, 1/10を正加力1回)し, 正負交番繰り返し載荷を行った。

3 実験結果

3.1 破壊状況

表-4 に実験結果一覧と計算耐力との比較を, 図-2 に最大耐力時ひび割れ状況を, 写真-1 に最終破壊状況を示す。(接合部強度は参考文献3)

全試験体とも以下の破壊経過をたどった。

梁曲げひび割れは $R=1/800$ までに, 柱曲げひび割れは $R=1/400$ までに発生した。柱梁接合部せん断ひび割れは, 試験体 N, E2 においては $R=1/400$ から $R=1/200$ へと向かう途中で, 試験体 E1, S においては $R=1/800$ から $R=1/400$ へと向かう途中でそれぞれ確認した。

梁主筋のひずみは, $R=1/100$ から $1/50$ へと向かう途中で一部が降伏ひずみに達した。

各試験体ともに $R=1/50$ 時に最大耐力到達後, 柱梁接合部の破壊によって耐力が低下したが, 急激な耐力低下は起こらなかった。

また, 柱梁接合部が破壊して耐力低下が生じて, 実験終了時まで柱軸力を保持していた。

3.2 荷重変形関係

図-3 に梁端の荷重-変形関係と接合部せん断強度計算値⁴⁾に達する時の梁せん断力を併記し

て示す。

表-4 実験結果一覧

試験体		N	E1	E2	S	
梁曲げ ひび割れ	実験値	kN	71	71	81	70
	計算値Q1	kN	78	80	81	82
	実験値/計算値		0.91	0.89	1.00	0.86
柱曲げ ひび割れ	実験値	kN	193	170	160	171
	計算値Q2	kN	203	206	207	208
	実験値/計算値		0.95	0.83	0.77	0.82
柱梁接合部 せん断 ひび割れ	実験値	kN	213	185	184	171
	計算値Q3	kN	179	182	184	185
	実験値/計算値		1.19	1.02	1.00	0.92
接合部強度	実験値	kN	464	456	484	481
		rad.	1/50	1/50	1/50	1/50
	計算値Q4	kN	456	469	478	479
	実験値/計算値		1.02	0.97	1.01	1.00

荷重は梁端に加えたせん断力

$$Q1 = 1.8\sqrt{10.2\sigma_B} \cdot Ze/L/102$$

$$Q2 = (1.8\sqrt{10.2\sigma_B} \cdot Ze + \frac{102N \cdot D}{6})/H \times H/L/102$$

$$pQ3 = \sqrt{10.2\sigma_B + 32.5\sqrt{\sigma_B} \cdot \sigma_0} \cdot \left(\frac{Bg+B}{2}\right) \cdot D/102$$

$$pQ4 = 5.0\sqrt{10.2\sigma_B} \cdot \left(\frac{Bg+B}{2}\right) \cdot D/102$$

$$Q_i = \frac{pQ_i}{j_b \frac{L}{H}} \quad (i=3,4)$$

σ_B : コンクリート圧縮強度 (MPa), σ_0 : 軸圧縮応力度 (MPa)

Ze : 鉄筋を考慮した断面係数 (cm^3), L' : せん断スパン (cm)

H' : 柱せん断スパン (cm), L : 梁スパン (cm), H : 柱スパン (cm)

N : 軸力 (kN), B : 柱断面幅 (cm), Bg : 梁断面幅, D : 柱断面せい (cm)

j_b : 梁応力中心間距離 (cm)

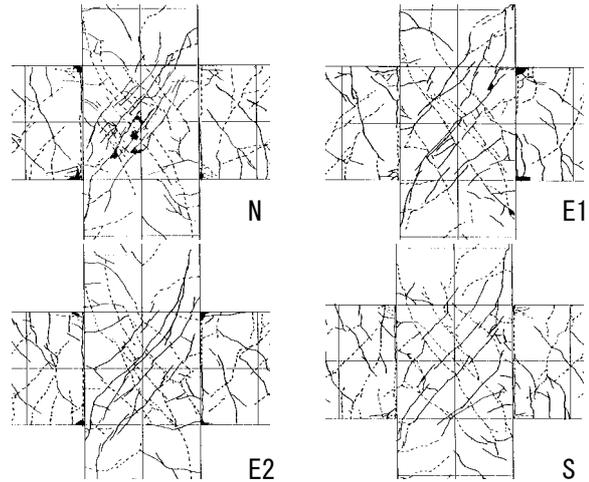


図-2 最大耐力時ひび割れ状況図

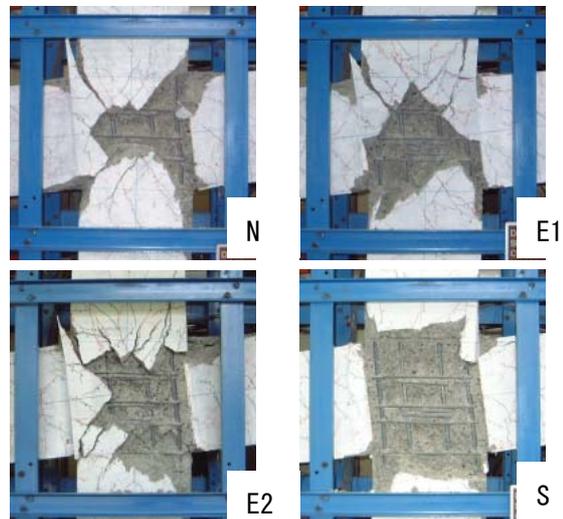


写真-1 破壊状況

全試験体ともに最大耐力発揮後、耐力が低下し始めたが、耐力低下は小さく、R=1/25においては最大耐力の約80%、R=1/10においても最大耐力の約75%の耐力を保持していた。

各試験体の実験結果が互いによく似ていることから、接合部破壊する場合であっても、剛性、最大耐力および靱性能に関しては、接合部内に用いた梁主筋機械式継手はほとんど影響がないと判断できる。

図-4 に示した接合部せん断応力-せん断変形角関係図を見ると、試験体が最大耐力を示した

R=1/50 に達するまでは、全試験体がほぼ同じ結果となっている。しかし、変形角がそれ以上になったとき、試験体S、E2の接合部変形が試験体Nに比べて大きくなっている。試験体E1については、負加力方向に大きな残留変形が生じたため上記のような傾向の判断が困難となった。

3.3 鉄筋ひずみ分布

図-5 に最大耐力時の接合部内梁主筋ひずみ分布を示す。図中の点線部分はひずみを計測で

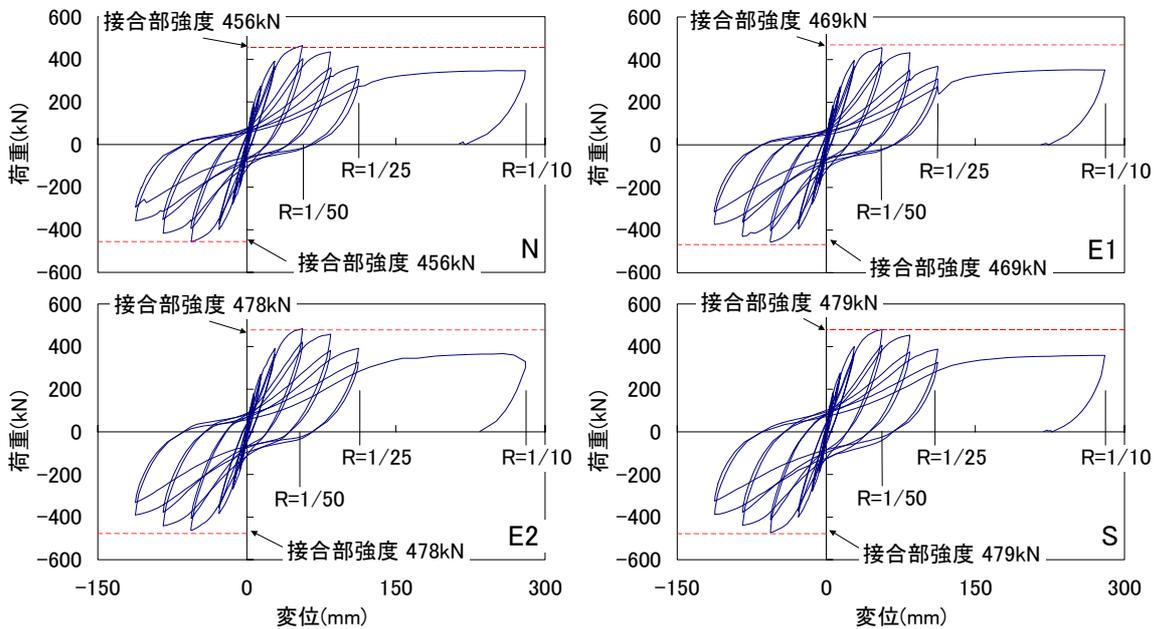


図-3 荷重-変形関係図

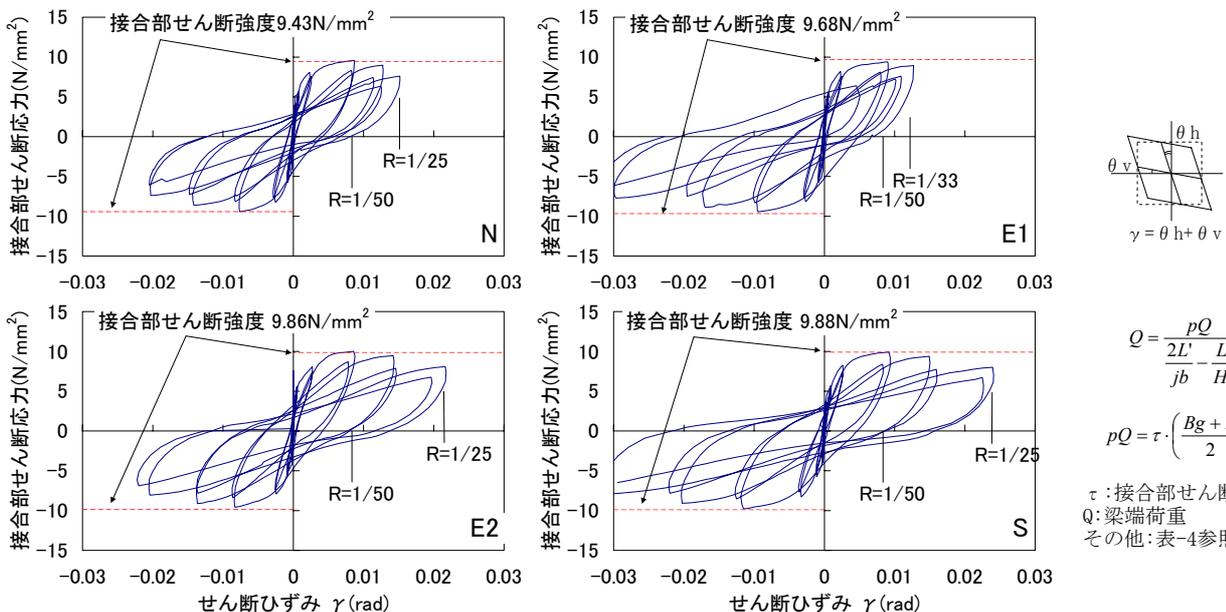


図-4 接合部せん断応力-せん断変形角関係図

きなかった範囲を示す。また、継手部のゲージは継手金物に添付したものである。

柱梁接合部に機械式継手のない試験体Nでは、接合部内梁主筋のひずみ分布に目立った急変はなく、付着が一樣であることがわかる。また、一部の梁主筋圧縮側端部において主筋に引張ひずみが発生した。それに対して接合部内に機械式継手を持つ試験体E1, E2では梁主筋圧縮側端部において主筋に引張ひずみが発生しなかったが、試験体Sでは引張ひずみが発生した。両者の付着性状は同程度であると思われる。

また、継手にあたる部分でひずみ分布が急激に変化しているが、この機械式継手端におけるひずみ分布の急変は、鉄筋が負担していた応力を継手と鉄筋の両者が負担するためである。

さらに、接合部内にネジ式機械式継手を2つ持つ試験体E2においては、柱梁接合部中央（機械式継手間）の鉄筋ひずみがN試験体と比較すると若干大きな値となっている。これは、梁主筋引張側端部に近い機械式継手部分では付着強度が低く、鉄筋に作用する力が接合部コンクリートへあまり伝達されなかったことを示している。一方、梁主筋圧縮側端部に近い機械式継手の左右では大きなひずみ差が計測されており、この部分には、鉄筋に作用する力を接合部コンクリートへ伝達するだけの付着強度があったことを示している。このひずみ差は、E1試験体の接合部中央に配された継手の左右で計測されたひずみ差よりもかなり大きくなっており、この範囲の付着強度が接合部中央と比べて大きかったことがわかる。また、その傾向は機械式継手のない試験体Nにおいてもみられる。材軸直交方向に拘束力を受けると付着強度が上昇する⁴⁾という報告もあり、接合部内水平位置による付着強度の差は、柱軸方向圧縮応力の差によって生じていると考えられる。

4 実験結果の検討

4.1 付着性状の検討

機械式継手を含む鉄筋の付着性状を検討する

ためには、接合部内鉄筋の応力分布を推定する必要がある。ところが、継手部は鉄筋・充填剤・継手が混在しているため、計測したひずみ値だけで応力を推定するのは困難である。そこで、機械式継手によって接合された鉄筋の継手部分の応力-ひずみ関係を得るために、継手で接合された鉄筋の引張試験（各3本）を行い、図-6のような応力-ひずみ関係（ひずみは平均値）を得た。図中には、骨組実験から得られたB1鉄筋（図-5参照）のR=1/50時の継手部分のひずみを同時に示している。

この関係は骨組実験の接合部内継手においても成立していると仮定して、図-5の鉄筋ひずみ

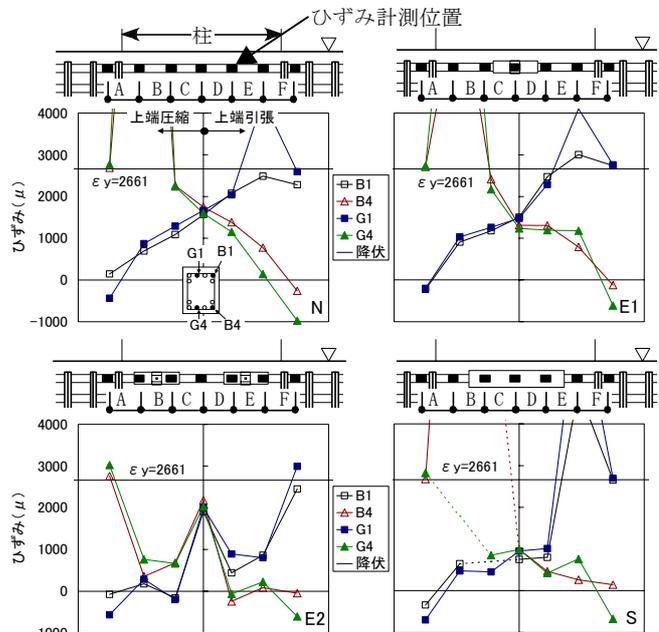


図-5 梁主筋（継手部を含む）のひずみ分布

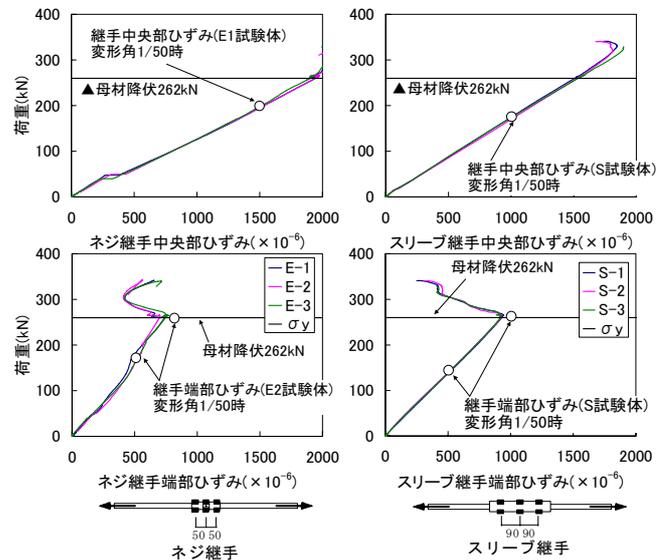


図-6 継手の荷重-ひずみ関係図

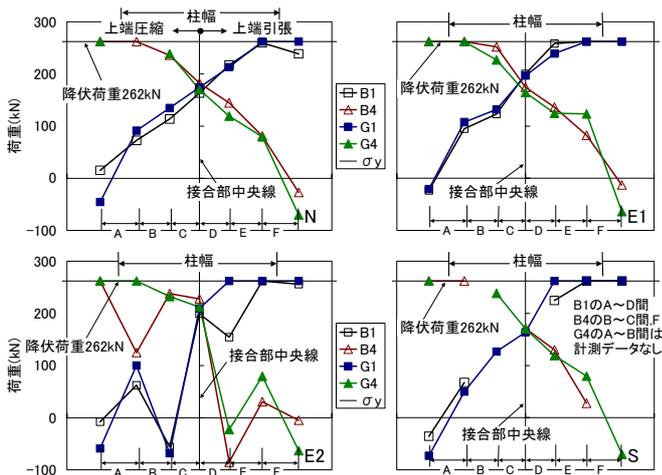


図-7 梁主筋(継手部を含む)の応力分布 (R=1/50 時)

分布を応力分布に変換した値を図-7に示す。その際、鉄筋応力は完全弾塑性の応力-ひずみ関係を仮定して求めた。弾性係数は 2.1×10^5 (MPa) とした。

各ひずみゲージ間を図-5(図-7)のように A~F 区間に区分する。A~C 区間と D~F 区間に着目すると、付着力は梁主筋引張側で小さく、梁主筋圧縮側で大きい傾向となっている。

試験体 E2 で上図の区間 B, D において鉄筋(継手部)に生じている応力が逆転しているのは、以下の理由が考えられる。

継手の特性として、継手端部は荷重をほとんど負担せず、継手中央は全荷重を負担することになるため、継手表面に生じるひずみ分布は図-8(a)のようになる。本実験においては、ひずみゲージ位置を図-8(b)のように柱梁接合部中心からの距離で統一したために、施工誤差によって継手が設計位置からずれたときには、図-8(a)のように継手のゲージと継手中心間の距離に差が生じて、ひずみの計測値が鉄筋応力と対応しないものになったと推測される。

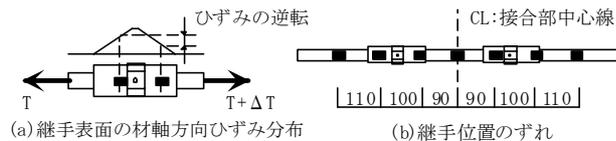


図-8 継手ひずみ分布と継手のずれ

試験体 N では、一部の鉄筋が抜け出す傾向を示しており、最大耐力時において付着強度に到達していたと判断できる。そこで、平均付着強度を算出すると 7.96 (N/mm²) となった。

一方、靱性保証型設計指針⁵⁾による付着強度は、 $\tau_u = 0.7(1 + \sigma_0 / \sigma_B) \sigma_B^{2/3} = 8.82$ (N/mm²) であり、指針式は接合部内平均付着強度をおおむね評価できる。

試験体 S の区間 C~D では、スリーブ継手表面の付着によって力がコンクリートへ伝達されており、計測できた合計 3 本の主筋から継手の平均付着応力(周長 168mm, 測定区間 180mm)を算出すると 3.71 (N/mm²) となった。これは、鉄筋の約半分であり、1991 年版 RC 規準⁶⁾における異形鉄筋と丸鋼の短期許容付着応力の比(丸鋼: 1.99 N/mm², 異形鉄筋: 4.16 N/mm²) とほぼ一致している。継手表面状態から、ネジ継手、スリーブ継手ともに、付着性能は丸鋼と同等であると判断することができるので、付着強度は異形鉄筋の半分としておおむね評価できる。

4.2 付着耐力の定量的評価

付着性状の検討結果を踏まえて、柱梁接合部内に機械式継手を有する鉄筋の継手近傍における接合部内付着強度の定量的評価を行う。

文献 2) と同様に継手を含む鉄筋の付着強度 (F) を図-9のように、継手小口の支圧 (F1)、継手の付着 (F2)、鉄筋の付着 (F3) の重ね合わせ (F=F1+F2+F3) と考える。

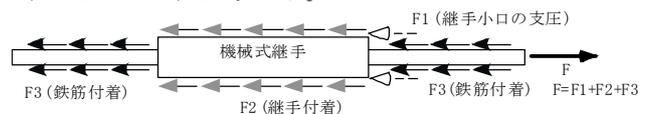


図-9 継手部分の付着

表-5 に各種継手近傍(継手両端の鉄筋部分を含む)における評価結果を示す。試験体 E2 では、二つの継手を梁端圧縮側 E2C と梁端引張側 E2T に分類して評価した。最大耐力時の実験時平均応力差 F_{ave} (図-5 の B1, B4, G1, G4 鉄筋の平均) と計算付着力 F を、継手 E1 は区間 C~D, 継手 E2C は接合部中央から梁端圧縮側の区間(図-7 の B1, G1 では A~C, B4, G4 では D~F), 継手 E2T は接合部中央から梁端引張側の区間(図-7 の B1, G1 では D~F, B4, G4 では A~C), 継手 S は区間 B~E でそれぞれ算出した。

計算付着力の算出は次のように行った。小口

の支圧F1を、支圧係数1として $F1=1 \times$ 小口面積 $\times \sigma_B$ とした。鉄筋の付着F3は、接合部内付着強度の水平方向位置による変化を考慮するために、靱性指針式の軸応力項に、柱端曲げモーメントの影響を加味して算出した。具体的には、柱を中心に圧縮側と引張側に二分し(図-10参照)、それぞれの領域での軸圧縮応力 σ_0 を、試験体に与えた一定軸力と最大耐力時に発生する柱端曲げモーメント(Mc)を柱主筋間距離(jc)で変換した偶力(Tc)との重ね合わせから算出した。継手の付着F2は鉄筋の半分として評価した。

$$Mc = Q_{max} \times L / 2 \times (H - D_g) / H, T_c = Mc / j_c$$

Q_{max} : 最大耐力時梁端荷重, L: 梁スパン

H: 柱スパン, D_g : 梁せい

また、E2TとSにおいて、図-7で継手小口左右の応力差があまりないことを考慮して小口の支圧F1を無視した。

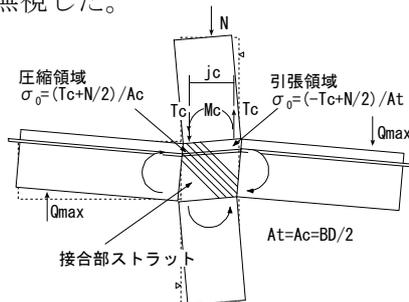


図-10 接合部ストラット

表-5 継手部分の付着に対する検討

試験体 名前	継手	実験時応力差		計算付着力				比較 Fave
		Fave kN	区間長 mm	F1 kN	F2 kN	F3 kN	F kN	
E1	E1	115.2	180	24.0	75.6	29.0	128.6	1.12
E2	E2C	245.8	250	24.8	94.8	100.2	219.8	0.89
	E2T	48.3	250	0.0	59.1	62.5	121.6	2.52
S	S	205.9	380	0.0	234.2	59.5	293.6	1.43

ばらつきはあるが、E1, E2C, Sの継手近傍の付着強度は計算式によって評価できている。

一方、E2Tは計算値が実験値を大きく上回った。靱性保証型指針式は、柱軸力が正の場合の実験結果をもとに導出された柱梁接合部平均付着強度をあらわしているにも関わらず、材軸直交方向に引張応力が生じている部分に対して局所的に適用したことが一因である考えられる。

定着性能が期待できる継手小口位置の限定と、接合部内水平位置ごとの正確な付着強度評価は今後の課題であるが、継手小口位置が梁主

筋引張側柱端から柱せいの1/3以上離れているE1, E2Cの結果から、条件を限定すれば、継手を含む鉄筋の付着強度に、小口の定着として支圧係数1.0程度は見込めるものと思われる。

5 まとめ

- 1) 各試験体とも、 $R=1/50$ 時に最大耐力に達し、柱梁接合部の破壊により耐力低下した。また、最大耐力は、柱梁接合部の計算耐力と良好な一致を示しており、柱梁接合部内における鉄筋機械式継手の有無、継手形状、継手個数は、接合部耐力に影響を与えなかった。
- 2) 梁主筋が通し配筋の場合と接合部内に機械式継手を有する場合の柱梁接合部内付着性状はほぼ同等である。
- 3) 柱梁接合部内の付着強度は、水平方向位置によって大きく異なり、梁主筋圧縮側では梁主筋引張側と比較して大きかった。また、継手小口が柱断面の梁主筋引張側端部近傍にある場合は、付着性能は向上しない可能性があることを確認した。

参考文献

- 1) 永井寛, 加藤友康, 別所佐登志: 高層RCチューブ骨組の構造性能に与える接合部内梁主筋継手・定着法の影響, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 21, No. 3, 709-714, 1999
- 2) 又刈克英, 阿瀬正明, 南宏一: スプライン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), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 133-134, 2001
- 3) 加藤友康, 別所佐登志: 高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の構造性能評価, 鹿島技術研究所年報, 第41号, 157-162, 1994
- 4) 金久保利之, 酒井貴洋, 米丸啓介, 福山洋: 横拘束力の影響を考慮した補強コンクリート部材の局所付着割裂性状(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 621-622, 2000
- 5) 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
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991