

論文 [2024] 高強度太径鉄筋を用いたはり主筋定着法に関する実験研究

張 愛暉*³・別所 佐登志*¹・加藤 友康*²

1. はじめに

本研究は、超高層RC造建物の外柱はり骨組のはり主筋を柱はり接合部内で定着する場合を想定し、高強度太径鉄筋D41(SD490)と高強度コンクリート($F_c600\text{kgf/cm}^2$ 及び $F_c360\text{kgf/cm}^2$)を組み合わせた場合におけるはり主筋の接合部からの引抜実験である。目的は、外柱はり接合部へのU型定着、L型定着及び定着板型定着によるはり主筋の定着性状を究明することである。

2. 試験体

試験体は、試験用はり主筋が定着される柱はり接合部とその上下に連続する柱の一部に相当する加力用柱とから構成される。ここでは、柱が85cm角で、はりせいが80cmの接合部を想定し、定着はり主筋一本分の柱はり接合部の応力分担幅(加力柱の厚さ)を22cmと仮定して試験体とした。

全試験体とも、定着はり主筋は太径異径ネジ鉄筋D41(SD490)、柱主筋はD19(SD685)、柱横補強筋はD10(SD785)を用いた。接合部横補強筋比は0.33%である。本実験のパラメータは、定着主筋の折り曲げ直径R、直線部埋め込み長さ、定着形式(U型、L型、定着板型[T型])及びコンクリート強度である。試験体一覧を表-1、試験体寸法及び配筋状況の一例を図-1に示す。使用材料の力学的性質を表-2に示す。

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	折り曲げ直径 R	埋め込み直線部長さ ℓ_s	水平投影長さ ℓ_{ah}	余長 ℓ_e	タイプ	F_c (kgf/cm ²)
1	U60-R6-15	6 d	15 d	779	6 d	U	600
2	U60-R6-10		10 d	574			
3	U60-R6-0		(15 d)	779			
4	U60-R3-15	3 d	15 d	718			
5	U60-R3-10		10 d	513			
6	U60-R3-0		(15 d)	718			
7	L60-R6-15A	6 d	15 d	779	6 d	L	360
8	L60-R6-15B				12 d		
9	U36-R6-15				(15 d)		
10	U36-R6-0						
11	T60-00-15	—	15 d	615	—	T	600

注) L60-R6-15B

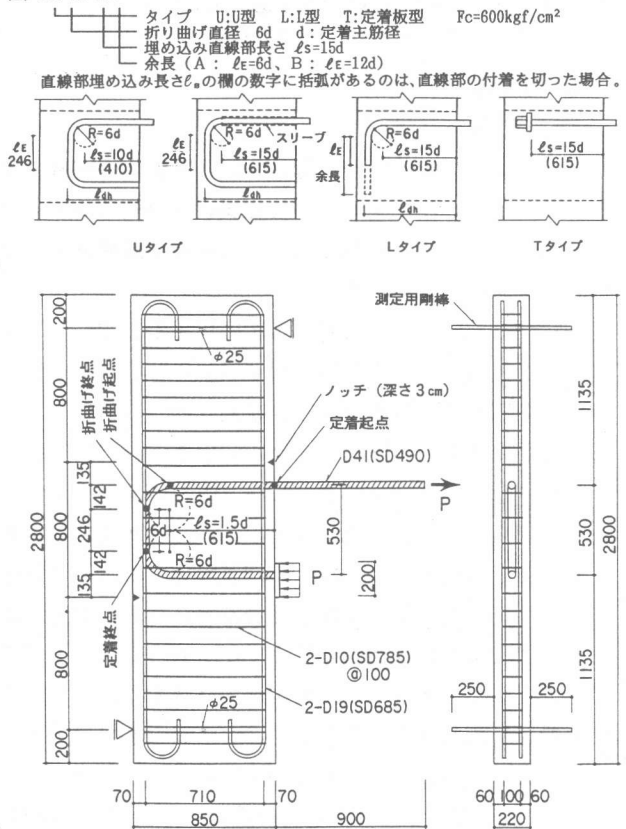


図-1 試験体配筋図一例

* 1 鹿島技術研究所 第三研究部専門部長(正会員)
 * 2 鹿島技術研究所 第三研究部主任研究員
 * 3 鹿島技術研究所 第三研究部研究員(正会員)

3. 実験方法

加力は、試験体の加力柱の両端をピンローラー支持し、試験用はり主筋に引張力を作用させると同時に、これと同等の圧縮力をはり接合端面の圧縮域（圧縮領域高さが20cmと仮定）に作用させた。なお、本実験では、引張方向のみの繰り返し加力とした。表-3に加力サイクルを示す。実験状況を写真-1に示す。計測は、作用荷重、鉄筋の抜け出し、鉄筋の接合部内のすべり（折曲げ起点と柱側面との相対変形）、はり主筋及び主要点の鉄筋のひずみについて行った。

表-3 加力サイクル

サイクル ¹⁾	1	2	3~4	5	6
荷重	Py ²⁾ /3	2Py/3	0.95Py	降伏棚領域 4ε _y まで	歪硬化領域 25000μまで
P(tf)	2.5	5.0	6.5	約7.2	約8.8

注 1) 加力は引張方向のみの繰り返し加力とした。
2) Py: 鉄筋の降伏耐力 Py=72.0tf

4. 実験結果

4.1 破壊経過

図-2に各試験体の最大荷重をNo.8試験体の定着主筋の荷重・ひずみ曲線上に示す（各試験体の最大荷重時のひずみを用いてプロットした）。代表的な試験体のひび割れ状況を図-3に示す。

No.1とNo.2試験体は、定着主筋が降伏するまえに、主筋に沿う付着割裂ひび割れ(B)、漏斗状せん断ひび割れ(S)、曲げひび割れ(F)、斜めせん断ひび割れ(DT)の順に生じた。その後、定着主筋の降伏点を越え、ひずみ硬化領域に入り、ひずみが約25000μに達しても、耐力の低下を示さず、破壊に至らなかった。直線部埋め込み長さが15dで付着なしのNo.3試験体では、No.1とNo.2試験体とほぼ同じ荷重で曲げひび割れが生じたが、付着割裂ひび割れが定着主筋の降伏荷重のほぼ半分の時点で、主筋の曲げ加工部で微小に生じた。その後、定着主筋が降伏する前に、斜めせん断ひび割れが生じるとともに、鉄筋のすべり量が急激に増え、定着破壊し、耐力が低下した。

No.4試験体では、荷重が降伏荷重の1.19倍、ひずみが約25000μまでも、耐力が低下せず、破壊に至らなかった。No.5試験体では、定着主筋が降伏するまでは、No.4試験体とほぼ同様の性状を示したが、斜めせん断ひび割れの開きがNo.4試験体より顕著であった。定着主筋降伏後、主筋

表-2 使用材料の力学的性質
*コンクリート

No.	圧縮強度 σ _B (kgf/cm ²)	割裂強度 σ _c (kgf/cm ²)	ヤング率 E 1/3 (10 ⁵ kgf/cm ²)
1	587	40	3.30
2	570	41	3.41
3	619	35	3.25
4	655	43	3.42
5	641	34	3.49
6	604	43	—
7	640	36	3.43
8	627	41	3.42
9	377	31	3.43
10	376	27	—
11	594	38	3.52

注) No.11試験体は早強コンクリート

*鉄筋

径及び材質	降伏点 σ _y (kgf/cm ²)	引張強さ σ _{max} (kgf/cm ²)	伸び率 %
D41(SD490)	5370	7130	23.5
D19(SD685)	7210*	9270	9.4
D10(SD785)	8450*	10600	12.5

注*) 0.2%セットオフ法で求めた値

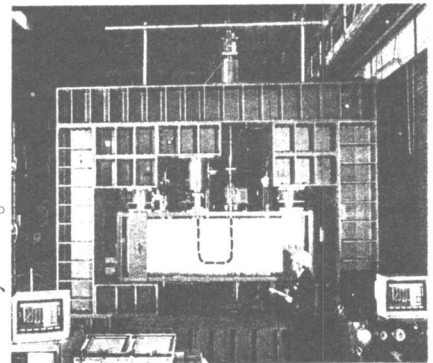


写真-1 実験状況

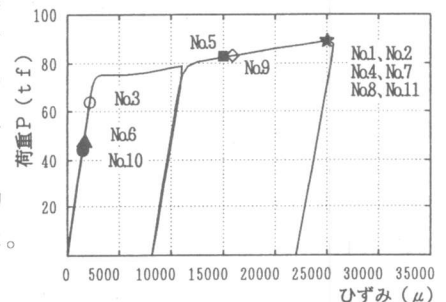


図-2 各試験体の破壊荷重及び定着主筋のひずみ

ひずみが約 15000μ の時点で、接合部のかぶりが剥離し、主筋がすべり出し、定着破壊し、耐力が急激に低下した。実験終了後の観測により、主筋曲げ加工部のコンクリートの膨脹が認められた。直線部埋め込み長さが $15d$ で付着なしのNo.6試験体では、主筋の降伏荷重のほぼ半分の時点で、曲げひび割れが生じた。その直後、漏斗状せん断ひび割れ及び斜めせん断ひび割れが発生するとともに、定着耐力が低下した。定着破壊後の主筋のすべり量が大きかった。

No.7とNo.8両試験体は、No.1試験体とほぼ同様な性状を示した。No.1試験体に比べ、せん断ひび割れが少なかった。主筋降伏後、主筋ひずみが約 25000μ までも耐力低下を示さず、破壊に至らなかった。

コンクリート強度以外、No.1試験体と同条件のNo.9試験体では、降伏するまでは、No.1試験体とほぼ同様な性状を示したが、定着主筋降伏後、主筋ひずみが約 15000μ の時点で、接合部のかぶりコンクリートが剥離し、主筋のすべりが顕著に生じ、定着破壊し、耐力が急激に低下した。直線部埋め込み長さが $15d$ で付着なしのNo.10試験体では、主筋の降伏荷重のほぼ三分の一の時点で、曲げひび割れが生じ、次の加力で、漏斗状せん断ひび割れ及び斜めせん断ひび割れが顕著に生じ、耐力が低下し、定着破壊となった。

直線部埋め込み長さ $15d$ のところに定着板のあるNo.11試験体では、付着割裂ひび割れがほかの試験体とほぼ同じ荷重で生じたが、曲げひび割れ荷重はほかの試験体より大きかった。曲げひび割れの直後、漏斗状せん断ひび割れ及び斜めせん断ひび割れが生じ、横補強筋のひずみが急激に増えた。その後の加力では、斜めせん断ひび割れが顕著に生じ、横補強筋のひずみが増えた。さらに、定着主筋のひずみが約 25000μ に達するまで加力したところ、横補強筋が降伏ひずみに達したものの、定着破壊はしなかった。

実験終了後、定着破壊したNo.3、5、9試験体のかぶりをはつて調べた結果、3体とも折曲げ部外側では、定着主筋とコンクリートの間に 5mm 位の隙間が生じていたが、折曲げ部内側では、顕著なコンクリート圧壊は見られなかった。No.5試験体の折曲げ部の状況を写真-2に示す。

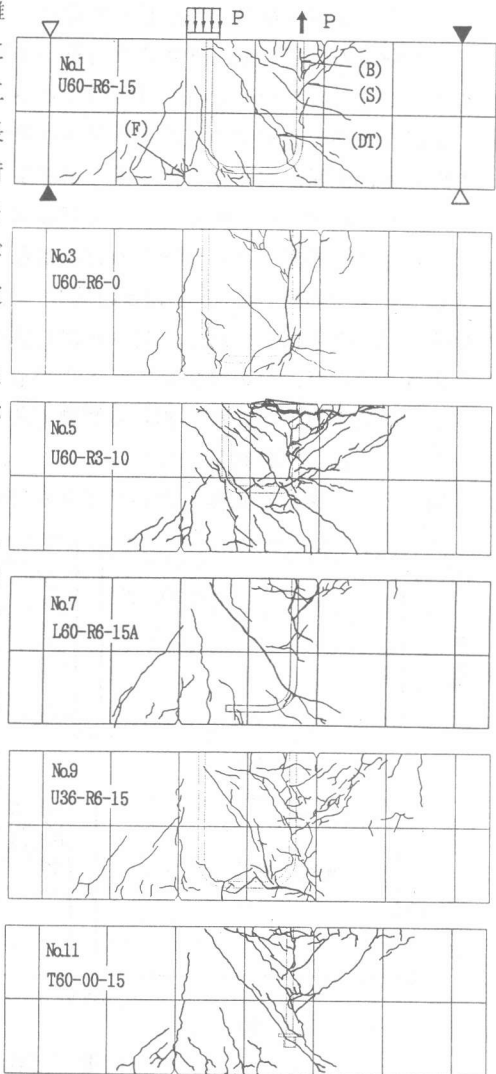


図-3 ひび割れ状況(代表例)

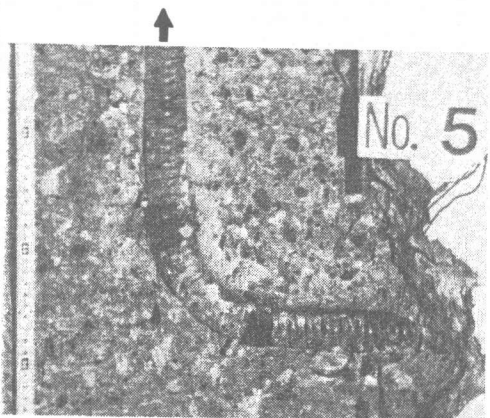


写真-2 試験後の折曲げ部状況 (No.5)

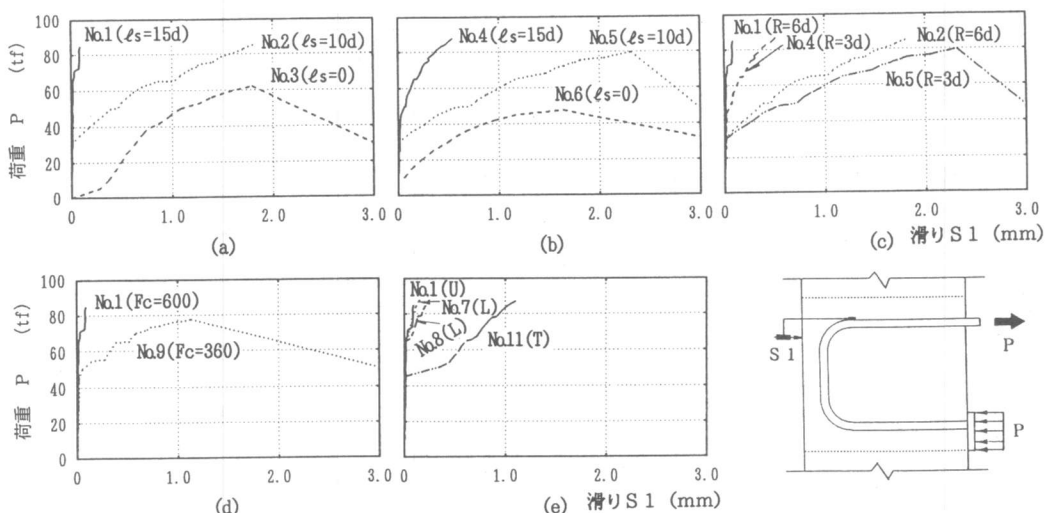
4. 2 定着主筋の折曲げ起点の滑り

各試験体の定着主筋に作用する荷重－主筋折曲げ起点の滑り（定着主筋滑り）関係を、図－4に示す。この図から、概ね以下のことが言える。

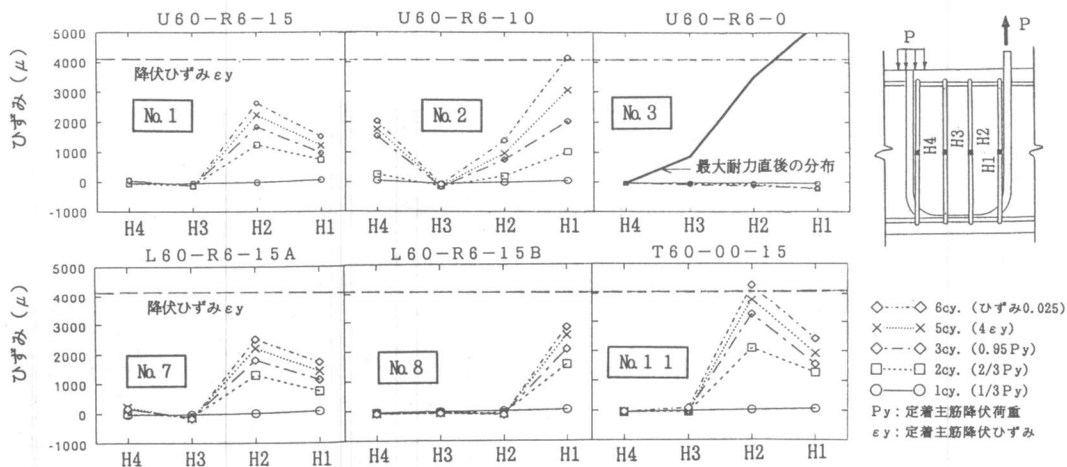
①定着主筋の直線部の埋め込み長さが長ければ、滑り量が少ない（図 a、b）。 ②定着主筋の折曲げ直径が大きければ、滑り量が少ない（図 c）。 ③コンクリート圧縮強度が小さければ、滑り量が多い（図 d）。 ④直線部埋め込み長さと同じであれば、LタイプとUタイプの滑り量にはほとんど差はない（図 e）。 ⑤Lタイプ定着では、定着余長が6 d（d：定着主筋径）のNo.7と12 dのNo.8とでは、滑り量に顕著な差はない（図 e）。 ⑥定着板試験体No.11の滑りは、埋め込み長さが同じ15 dであるU型（No.1、4）及びL型の試験体（No.7、8）より大きく、P=45.0tfの低い荷重レベルで滑りの急増が生じた。この急増はコーン状ひび割れの発生と同時にあり、このひび割れの影響であると思われる（図 e）。

4. 3 接合部横補強筋ひずみ分布

図－5に代表的な試験体の各サイクルピーク時の接合部横補強筋のひずみ分布を示す。U型お



図－4 荷重－定着主筋の折曲げ起点の滑り関係



図－5 荷重－横補強筋ひずみ関係

よびL型試験体では、直線部埋め込み長さによって、横補強筋ひずみ分布が若干違う。埋め込み長さが15dの試験体(No.1、4、7、8、9)では、横補強筋の最大ひずみは2000~3000 μ であるに対し、埋め込み長さが10dの試験体No.2、5では、横補強筋の最大ひずみは4000~5000 μ と大きく、ほぼ降伏した。埋め込み直線部の負担する定着力が違ふと思われる。直線部付着なしの試験体No.3、6、10では、最大耐力時の横補強筋のひずみは非常に小さいが、最大耐力の直後では、入力荷重の低下にも関わらず、横補強筋のひずみは急激に増加した。特にNo.3試験体では、横補強筋の最大ひずみは5300 μ に達した。

定着板試験体No.11では、横補強筋の最大ひずみは直線部埋め込み長さが同じである試験体(No.1、4、7、8、9)に比べて大きい。これは、この試験体は折り曲げ部と余長部がないため、埋め込み直線部の付着により横補強筋に伝わる力が大きいからと考えられる。

5. 考察

5.1 最大耐力の検討

表-4 定着耐力実験値と計算値の比較

各試験体の最大耐力実験値と別所式¹⁾、²⁾及び藤井・森田式³⁾による最大耐力計算値の比較を表-4に示す。別所式は、許容応力度式であり、定着耐力は埋め込み直線部の付着力、余長部の付着力、折曲げ部の付着力及び機械摩擦力の和としている。一方、藤井・森田式では、定着は主筋の折曲げ部に形成されるコンクリート・ストラットの圧縮により求められる耐力を定着耐力としている。別所式及び藤井・森田式による最大耐力計算値が共に定着主筋の降伏荷重(以下降伏荷重と呼ぶ)より大きかったNo.1、2、4、7、8試験体では、耐力低下が見られず、定着破壊はしなかった。

No.	試験体名	実験値		別所式		藤井・森田式		破壊モード ⁵⁾
		Pmax ¹⁾	Pmax./Py ²⁾	Fu ³⁾	Fu./Py	Pu ⁴⁾	Pu./Py	
1	U60-R6-15	85.1 *	1.18	95.1	1.32	105.9	1.47	RU
2	U60-R6-10	85.5 *	1.19	80.7	1.12	79.9	1.11	RU
3	U60-R6-0	62.1	0.86	54.7	0.76	—	—	BF
4	U60-R3-15	88.0 *	1.22	90.3	1.25	83.3	1.16	RU
5	U60-R3-10	79.7	1.11	75.1	1.04	60.7	0.84	BF
6	U60-R3-0	47.3	0.66	44.6	0.62	—	—	BF
7	L60-R6-15A	89.2 *	1.23	100.4	1.39	108.8	1.51	RU
8	L60-R6-15B	89.2 *	1.23	134.9	1.87	108.8	1.51	RU
9	U36-R6-15	77.6	1.08	74.1	1.03	90.5	1.26	BF
10	U36-R6-0	44.0	0.61	40.4	0.56	—	—	BF
11	T60-00-15	87.2 *	1.18	a. コンクリートによるコーン状破壊耐力 ⁶⁾ Pc=68.9tf Pc/Py=0.96 b. 横補強筋によるコーン状破壊耐力 ⁶⁾ Ps=142.3tf Ps/Py=1.98				RU

注 1) *: 最大耐力未確認 2) $P_y = s \sigma_y A = 72.0 \text{tf}$ 3) 別所式による計算値
4) 藤井・森田式による計算値
5) RU: 定着主筋降伏耐力の1.1倍以上かつひずみ25000 μ まで確認
BF: 定着破壊
6) 引抜耐力、文献⁵⁾参照

定着破壊したNo.3、5、6、9、10試験体では、別所式による最大耐力計算値が降伏荷重より小さいか、或いは降伏荷重に近い値となった。別所式による定着破壊の判別の適合性があると言える。一方、藤井・森田式では、No.5試験体についての計算値は降伏荷重より小さく、定着破壊と予測できたが、No.9試験体については、耐力計算値は降伏荷重の1.26倍であり、定着破壊を予測できなかった。また、定着破壊した試験体の中で、埋め込み直線部に付着がないNo.3、6、10試験体では、藤井・森田式による評価が困難であり、ここでは評価を行わなかった。

以上の結果を要約すると、別所式及び藤井・森田式による最大耐力が共に降伏荷重より大きければ、定着破壊は生じず、どちらかの式による最大耐力が降伏荷重より小さければ、定着破壊となったといえる。

定着板試験体No.11では、コーン状破壊面を横切る補強筋から計算された耐力は142.3tfで、降伏荷重の1.98倍であった。実験では、コーン状ひび割れは定着主筋が降伏する前の45.0tfで生じ、

コーン状破壊面のコンクリート耐力計算値(69.9tf)より小さかった。これは、試験体に曲げせん断応力が作用しており、単純な鉄筋引抜実験ではないからと思われる。

5. 2 付着定着性状の検討

表-5に、定着はり主筋が降伏した試験体について、はり主筋降伏時と最大耐力時の埋め込み直線部の負担する定着力と主筋に作用する引張力の比(以下分担率と呼ぶ)及び埋め込み直線部の付着応力度を示す。埋め込み長さが15dの試験体では、主筋降伏時と最大耐力時共に、直線部定着分担率の平均値は35%くらいと小さい。これは、漏斗状せん断ひび割れにより、主筋の付着は劣化し、主筋の定着が直線部の付着定着から、折り曲げ部の機械的定着に移るものと考えられる。埋込み長さが10dの試験体の分担率は、埋め込み長さ15dの試験体よりも更に小さい。これは、No.2,5試験体の埋め込み直線部の漏斗状せん断ひび割れがほかの試験体よりも多いからである。

表-5 埋め込み直線部定着分担率及び付着応力度

試験体	主筋降伏時		最大耐力時	
	分担率 ¹⁾	付着応力度 ²⁾ (kgf/cm ²)	分担率 ¹⁾	付着応力度 ²⁾ (kgf/cm ²)
No.2(U60-R6-10)	0.10	9.3	0.16	17.1
No.5(U60-R3-10)	0.28	26.5	0.20	20.0
平均	0.19	17.9	0.18	18.6
No.1(U60-R6-15)	0.43	39.7	0.41	43.6
No.4(U60-R3-15)	0.34	31.5	0.31	34.1
No.7(L60-R6-15A)	0.41	38.5	0.37	39.8
No.8(L60-R6-15B)	0.31	30.6	0.26	29.0
平均	0.37	35.1	0.34	36.6
定着板試験体 No.11(T60-00-15)	0.76	74.1	0.74	80.7

注 1) 埋め込み直線部定着分担率は下式により求めた。

$$\text{分担率} = (P - P_{34}) / P$$

P: 定着主筋に作用する引張力 (kgf)

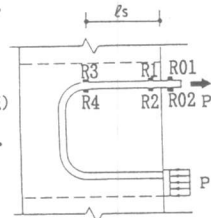
P₃₄: ゲージR3とR4のひずみから求めた
折曲げ起点の内部応力 (kgf) (右図参照)

2) 埋め込み直線部の付着応力度は下式により求めた。

$$\text{付着応力度} = (P - P_{34}) / (\psi \ell_s)$$

ψ : 定着主筋の周長 (cm)

ℓ_s : 埋め込み直線部長さ (cm)



定着板試験体No.11では、主筋降伏時及び最大耐力時ともに、主筋埋め込み直線部の分担率は7割以上であり、ほかの試験体の直線部分担率より倍くらい大きかった。

6. まとめ

U型試験体の定着破壊は、定着主筋のディテール及びコンクリート強度によって、破壊形式は違うと予想して、高強度太径鉄筋と高強度コンクリートの組み合わせを対象に、はり主筋の引抜実験を行い以下の結論を得た。① Fc600、はり主筋[D41(SD490)]、折り曲げ直径R=6dの場合、直線部埋め込み長さが10d以上であれば、定着破壊はしない。しかし、折り曲げ直径R=3d、直線部埋め込み長さが10d以下であれば、定着破壊する恐れがある。② Fc360とはり主筋[D41(SD490)]の組み合わせで、折り曲げ直径R=6dの場合、直線部埋め込み長さを15d以上としなければ、定着破壊が起こる可能性がある。③ Fc600において、定着板による定着の場合、直線部埋め込み長さが15d以上であれば、定着破壊はしない。④ 別所式及び藤井・森田式による最大耐力が共に降伏荷重より大きい場合、定着破壊はしない。⑤ 定着板による定着機構は、U型とL型の定着機構と異なり⁴⁾、今後の検討が必要である。

今後、諸タイプの定着形式の定着機構をより明確に解明するため、非線形有限要素解析を行う予定である。

【参考文献】

1. 別所ほか、「太径異径鉄筋を用いたU型はり主筋定着法の実験研究」鹿島建設技術研究所年報 第25号 P.143-148
2. 別所ほか、「高層鉄筋コンクリート造骨組のU型はり主筋定着法に関する研究」(その2,その3) 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和52年10月 pp.1795-1798
3. 藤井ほか、「90°折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価」日本建築学会構造系論文報告集 第429号 1991年11月 P.65-75
4. 城ほか、「高強度太径異径鉄筋の付着性状について(I~III)」、日本建築学会北海道支部研 報告集No.6 0 昭和62年3月 P.117-128
5. 各種合成構造設計指針・同解説 P.191