

論文 RC造小梁主筋の機械式定着および折曲げ定着に関する実験的研究

益尾 潔^{*1}・今西達也^{*2}

要旨：1999年版RC構造計算規準に示された折曲げ定着によるRC造小梁主筋の必要投影定着長さは、柱梁接合部への大梁主筋の必要投影定着長さを準用して定められているが、その妥当性は実験的に検証されていない。これらの背景より、本論文では、小梁主筋の機械式定着および折曲げ定着に関する実験結果を示すとともに、実験結果の破壊形式を考慮し、両定着による終局耐力を精度よく評価できることを示した。

キーワード：小梁主筋定着，機械式定着，折曲げ定着，破壊形式，終局耐力

1. はじめに

1999年版RC構造計算規準¹⁾では、柱梁接合部への大梁主筋の必要投影定着長さを準用し、折曲げ定着による小梁主筋の必要投影定着長さを定めている。現在、後者の必要投影定着長さは、実用上支障²⁾を来す恐れがあるとし、その改定に向けて研究³⁾が進められている。

GBRC機械式定着委員会指針⁴⁾においても、柱梁接合部への大梁主筋の必要定着長さを準用した機械式定着工法による小梁主筋の必要定着長さを提案している。しかしながら、その妥当性は、折曲げ定着と同様、小梁主筋定着に関する実験によって検証されていない。これらの背景より、新開発の機械式定着具⁵⁾に関する確認実験の一環として本実験を計画した。

2. 試験体

試験体の形状寸法を図-1、接合部配筋詳細を図-2に示す。実験因子は、表-1に示すように、小梁上端筋の定着種別および定着長さ l_a であり、試験体数は6体である。機械式定着試験体の小梁上端筋定着部に用いた機械式定着具⁵⁾は、鉄筋先端部に円形リング定着板を挿入した後、鉄筋端部を加圧しながら、定着板の両側に鉄筋こぶを形成させて製造される。各試験体に用い

たコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。

機械式定着の定着長さ l_a は、仕口面から定着板内面までの距離とし、折曲げ定着の定着長さ l_a は、仕口面からの梁主筋の水平投影定着長さ $l_{dh}-1db$ と同じとした。折曲げ定着試験体の場合、RC構造計算規準¹⁾による小梁主筋の必要投影定着長さと鉄筋径の比(l_{ab}/db)は33となる。 db は小梁主筋の直径を示す。

なお、大梁は、ACI 318⁶⁾に基づき、大梁のねじり耐力が小梁曲げ終局耐力時ねじりモーメントを上回るように設計した。

3. 実験方法

本実験は、図-3に示すように、大梁両端の下部をすべり支承と球座で支持し、大梁両端をH形鋼反力ビームに固定した上で、油圧ジャッキ

表-1 実験計画

試験体	大梁配筋		小梁配筋			定着長さ	
	主筋 (pt)	肋筋 (pw)	上端筋 (pt)	肋筋 (pw)	定着種別	l_a (mm)	l_a /db
BM-L12	4-D25 (0.81%)	2-D13 @75 (0.75%)	3-D25 (1.35%)	2-D10 @100 (0.47%)	機械式	300	12
BM-L10						250	10
BM-L8						200	8
BB-L12					折曲げ	300	12
BB-L10						250	10
BB-L8						200	8

(注) 小梁下端筋：いずれも先端180°フック付きの3-D16(SD345)

* 1 (財) 日本建築総合試験所 構造部長 工博 (正会員)

* 2 (財) 日本建築総合試験所 構造部 構造物試験室 主査 博(工) (正会員)

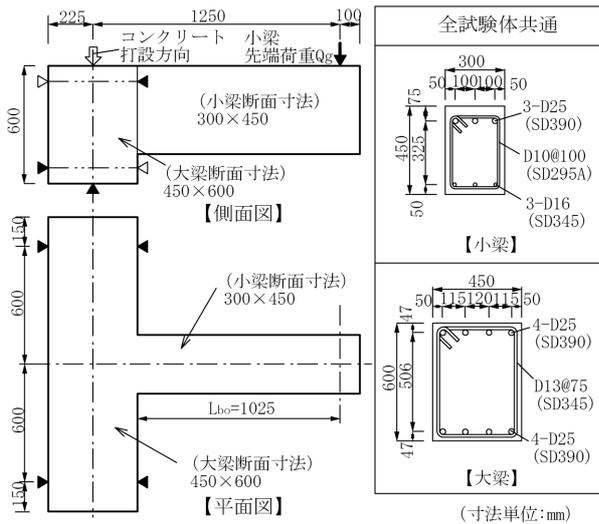


図-1 試験体の形状寸法

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

σ_B (N/mm^2)	ϵ_{co} ($\times 10^{-3}$)	E_c (kN/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
31.4	1.85	28.4	2.99

σ_B : 圧縮強度, ϵ_{co} : σ_B 時ひずみ
 E_c : ヤング係数, σ_t : 割裂強度

(b) 鉄筋

使用部位	呼び名	鋼種	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	伸び (%)
小梁上端筋	D25	SD390	425	613	23
大梁主筋	D25	SD390	425	613	23
小梁下端筋	D16	SD345	391	563	26
小梁肋筋	D10	SD295	332	471	31
大梁肋筋	D13	SD345	377	544	27

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強度

を用いて小梁先端部に鉛直荷重を加えて行った。試験体各部の変位量は、大梁端(背面側)のピン支承およびピン・ローラー支承で支持した測定フレームを基準に測定した。

目標の載荷履歴は、下式による長期許容耐力 Q_{aL} と短期許容耐力 Q_{aE} を上限荷重とする各3サイクルの片振り繰返し載荷および正加力方向への単調載荷とした。

$$Q_{aL} = (a_t \cdot f_{tL} \cdot j) / L_{bo}, \quad Q_{aE} = (a_t \cdot f_{tE} \cdot j) / L_{bo}$$

$a_t, f_{tL} (=215N/mm^2), f_{tE} (=390N/mm^2)$: 小梁上端筋の断面積, 長期および短期許容引張応力度, j : 小梁の応力中心距離 ($j=0.9d$ とした。 d : 有効せい), $L_{bo} (=1025mm)$: 小梁せん断スパン長

4. 実験結果および考察

4.1 荷重-変形関係および破壊性状

実験因子の違いを比較した $Q_b - \delta_b$ 関係の包

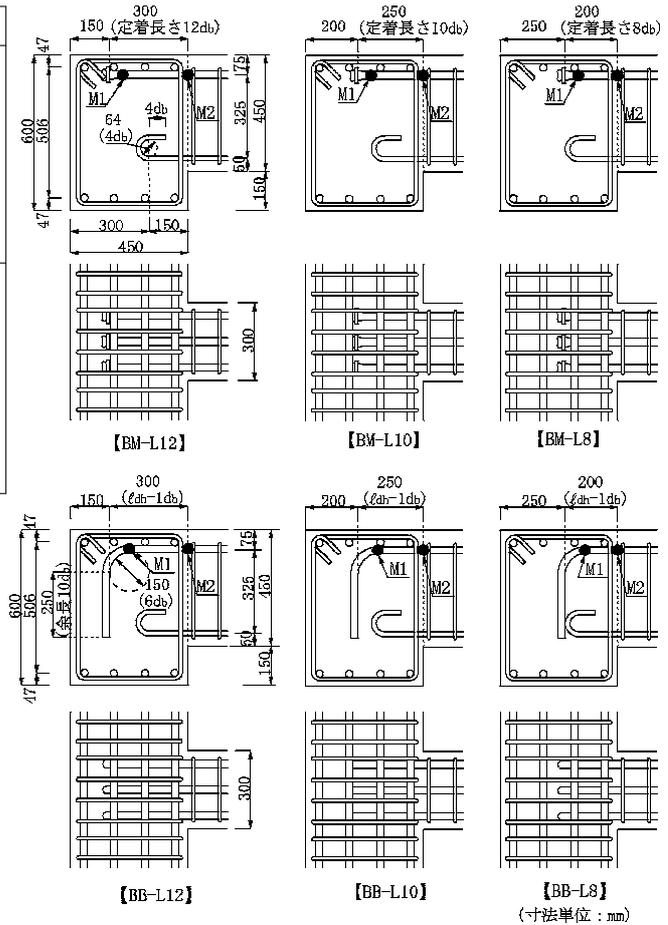


図-2 接合部配筋詳細

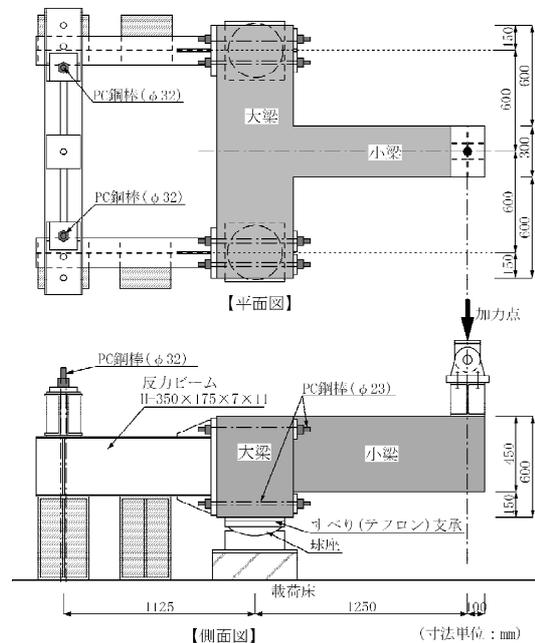
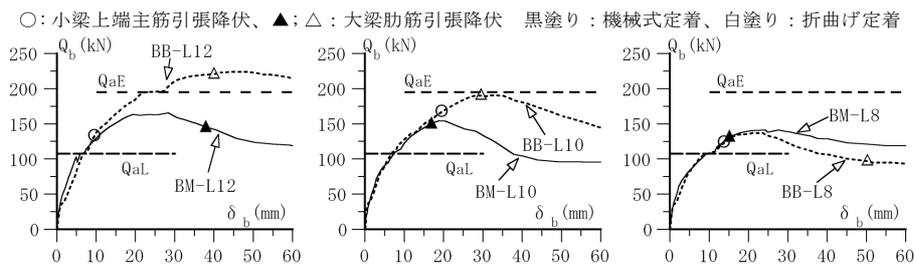


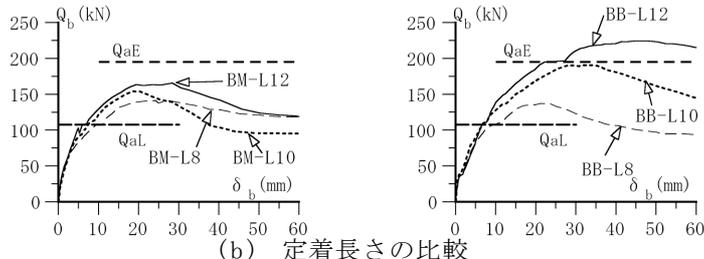
図-3 実験装置

絡線を図-4に示す。 Q_b は小梁先端荷重, δ_b は小梁先端変位である。

機械式定着試験体は、いずれも Q_{aL} に到達後、 Q_{aE} に達せず、最大耐力に達し、最大耐力前後に、

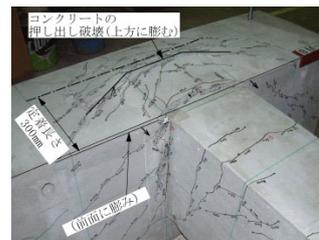


(a) 機械式定着試験体と折曲げ定着試験体の比較



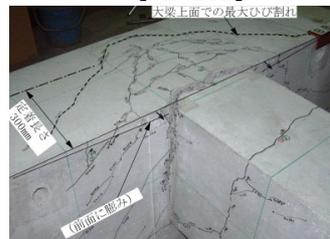
(b) 定着長さの比較

図-4 $Q_b - \delta_b$ 関係(包絡線)



(a) 機械式定着試験体

[BM-L12]



(b) 折曲げ定着試験体

[BB-L12]

写真-1 破壊性状

小梁主筋定着部近傍の大梁上面の筋が引張降伏したが、小梁主筋は引張降伏しなかった。

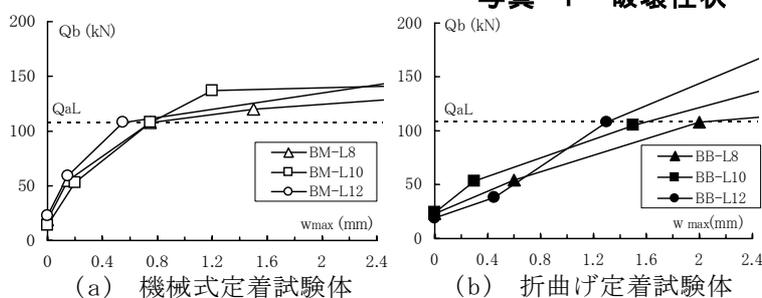
折曲げ定着試験体 BB-L12 は、 Q_{aE} に到達後、最大耐力に達し、BB-L10 と BB-L8 は、 Q_{aE} に達せず、最大耐力に達し、各試験体とも、 Q_{aL} から最大耐力の間に小梁主筋が引張降伏した。小梁主筋定着部近傍の大梁上面の筋は、BB-L12 と BB-L10 では最大耐力直前に引張降伏し、BB-L8 では最大耐力後の耐力低下域で引張降伏した。

最大耐力実験値は、機械式定着試験体では Q_{aL} の 1.3~1.5 倍、折曲げ定着試験体では Q_{aL} の 1.3~2.1 倍であり、それぞれ定着長さの減少に伴い減少した。

写真-1 に、 $l_a=12d_b$ の機械式定着試験体と折曲げ定着試験体の破壊状況を示す。

機械式定着試験体では、最大耐力前後より、大梁上面かぶりコンクリートの上方への押し出し破壊が進行したので、破壊形式は小梁上端筋の上面押し出し定着破壊型とした。

折曲げ定着試験体のうち特に $l_a \leq 10d_b$ の試験体では、小梁端に隣接する大梁上面の曲げひび割れ幅の拡大のほか、小梁上端筋の抜け出しに伴う大梁側面の斜めひび割れが著しく拡大したので、破壊形式は小梁上端筋の掻き出し定着破壊型とした。



(a) 機械式定着試験体

(b) 折曲げ定着試験体

図-5 $Q_b - w_{max}$ 関係

4.2 小変形領域における諸性状

(1) $Q_b - w_{max}$ 関係

$Q_b - w_{max}$ 関係を図-5 に示す。 w_{max} は小梁端近傍の大梁上面での最大ひび割れ幅の測定値である(写真-1 参照)。

両定着試験体とも、 w_{max} は小梁端部の曲げひび割れ発生後著しく増大した。文献(7)による小梁の長期許容引張応力度 f_{tAL} 時の最大曲げひび割れ幅の計算値(0.28mm)に対し、 Q_{aL} 時の w_{max} は、機械式定着試験体では 2.0~2.7 倍(0.55~0.75mm)、折曲げ定着試験体では 3.9~6.4 倍(1.1~1.7mm)となり、それぞれ小梁上端筋の定着長さ l_a が短いほど大きくなる傾向がある。

(2) $Q_b - \epsilon_{M1}, \epsilon_{M2}$ 関係

$Q_b - \epsilon_{M1}, \epsilon_{M2}$ 関係を図-6 に示す。 $\epsilon_{M1}, \epsilon_{M2}$ は、図-2 中の M1, M2 での小梁上端筋ひずみ測定値である。同図中には、常用式($\epsilon_M = Q_b \cdot L_{bo} / (E_s \cdot a_t \cdot j)$, E_s : 鉄筋のヤング係数)による計算結果を一点鎖線で示した。

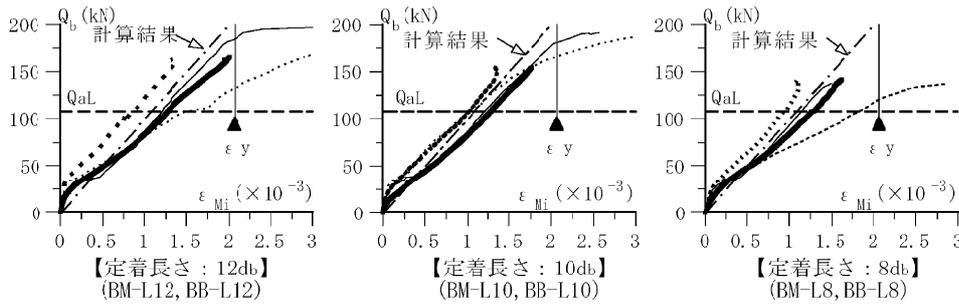
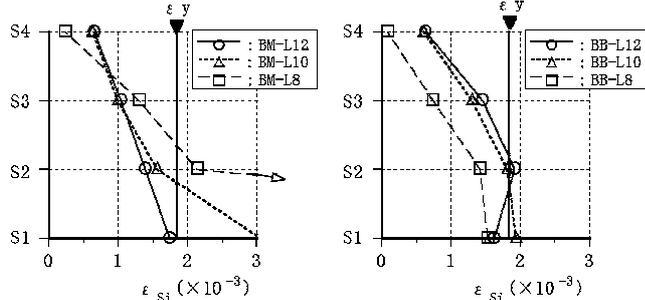


図-6 $Q_b - \epsilon_{M1}, \epsilon_{M2}$ 関係



(a) 機械式定着試験体 (b) 折曲げ定着試験体

図-8 最大耐力時の ϵ_{si} 分布

両定着試験体の ϵ_{M2} は同程度であり、計算値と概ね一致する。また、曲げひび割れ後の ϵ_{M1} は、概ね、機械式定着では ϵ_{M2} よりも小さく、折曲げ定着では ϵ_{M2} よりも大きい。すなわち、図-7に示すように、機械式定着では、定着板内面コンクリートの支圧応力の発生に伴い、小梁上端筋に沿う付着応力が維持されるので、 ϵ_{M1} は ϵ_{M2} よりも小さくなり、折曲げ定着では、小梁上端筋の上面側には支圧応力が発生しないので、付着劣化が早期に起こり、 ϵ_{M1} は ϵ_{M2} よりも大きくなると思われる。

(3) 最大耐力時の大梁筋筋の ϵ_{si} 分布

最大耐力時の大梁筋筋のひずみ ϵ_{si} 分布を図-8に示す。両定着試験体とも、 ϵ_{si} は、小梁上端筋定着部近傍では降伏ひずみ ϵ_y を超えるか、それに近い値となり、大梁内で順次減少し、機械式定着試験体では、小梁上端筋の定着長さ l_a が短いほど大きい。

5. 小梁上端筋の定着耐力に関する検討

5.1 小梁上端筋の掻き出し定着耐力

小梁上端筋の掻き出し定着耐力 T_{cu} は、本実験結果に基づき、AIJ 靱性保証型指針式⁸⁾と同様に定式化した下式によって算定する。

	機械式定着	折曲げ定着
M1	●●●●●	-----
M2	—————	—————

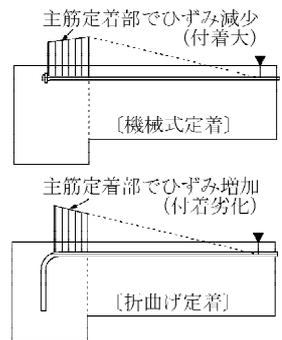


図-7 上端筋ひずみ分布の模式図

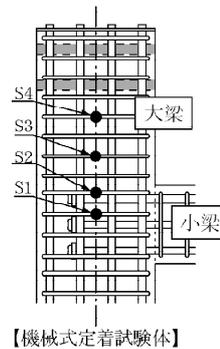


図-9 掻き出し定着耐力に対する有効幅および有効高さ

ただし、小梁上端筋定着部の応力状態は、AIJ 靱性保証型指針式で対象とするト形柱梁接合部の場合と異なることより、式(2)に示すように、コンクリートの有効係数 ϕ_c を考慮し、コンクリート寄与分 T_c を算定することとした。

$$T_{cu} = T_c + T_w \quad (1)$$

$$T_c = \phi_c \cdot b_e \cdot d_e \cdot 0.313 \sqrt{\sigma_B} \sqrt{(l_a^2 + j^2)} / j \quad (2)$$

$$T_w = \phi_w \cdot A_w \cdot \sigma_{wy} \quad (3)$$

T_c : コンクリート寄与分, T_w : 大梁筋筋寄与分, ϕ_c : コンクリートの有効係数, b_e, d_e : コンクリートの有効幅および有効高さ, l_a : 小梁上端筋の定着長さ, j : 小梁の応力中心距離 ($j = (7/8) \cdot d$ とする), d : 有効せい, σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2), ϕ_w : 大梁筋筋の有効係数, A_w : b_e 内に配置される大梁上面側の筋筋の全断面積, σ_{wy} : 大梁筋筋の降伏強度 (N/mm^2)

b_e と d_e は、図-9に示す掻き出し破壊面の仮定³⁾に基づき、下式で算定する。

$$b_e = n_b \cdot d_b, \quad d_e = l_a + n_d \cdot d_b \quad (4)$$

nb, nd: 有効幅および上面かぶり厚さに対する鉄筋径倍数, db: 小梁上端筋の直径

機械式定着の場合, 定着板が搔き出し定着耐力に寄与するとし, beにDa相当分, deにDa/2相当分を加算する。Daは定着板直径を示す。

大梁筋筋の有効係数 ϕ_w は, 図-8に示す大梁筋筋のひずみ測定値に基づき, $\phi_w=0.5$ とし, コンクリートの有効係数 ϕ_c は, 各試験体の終局耐力計算値と最大耐力実験値がほぼ一致するように, $\phi_c=0.7$ とする。

5.2 機械式定着による小梁上端筋の大梁上面押し出し定着耐力

機械式定着による小梁上端筋の大梁上面押し出し定着耐力 Tau は, 本実験結果に基づき, 下式に示すように, 益尾・窪田式⁹⁾による梁主筋側面剥離定着耐力の基本支圧強度 σ_{auo} に対し, 大梁上面押し出し定着耐力の有効係数 ϕ_g を考慮して算定する。

$$Tau = k1 \cdot k2 \cdot k3 \cdot k4 \cdot k5 \cdot k6 \cdot \sigma_{auo} \cdot \Sigma Ap \quad (5)$$

$$\sigma_{auo} = \phi_g \cdot (31.2 \sigma_B^{0.5} - 1.26) \cdot \sigma_B \quad (6)$$

k1~k6: 益尾・窪田式による補正係数, ΣAp : 定着金物の支圧面積の総和

式(5)では, 小梁上端筋の上面押し出し定着耐力に対する大梁筋筋の抵抗を無視($p_{jwh}=0$)し, 接合部横補強筋 p_{jwh} による補正係数 $k5$ は, $k5=0.9$ とする。また, 上面押し出し定着耐力の有効係数 ϕ_g は, 各試験体の終局耐力計算値と最大耐力実験値がほぼ一致するように, $\phi_g=0.5$ とする。

各試験体の終局耐力計算値と最大耐力実験値を表-3, $bQ_{max}/Q_{bu} - Q_{ju}/Q_{bu}$ 関係を図-10に示す。 bQ_{max} は最大耐力実験値, Q_{bu} は小梁曲げ終局耐力時せん断力, Q_{ju} は表-3の脚注に示す定義による小梁定着耐力時せん断力であり, 各計算耐力は材料試験結果による実強度を用いて算定した。また, 同図中には, 一之瀬らの実験¹⁰⁾に対する検討結果を併示した。

機械式定着試験体の終局耐力計算値は, すべて小梁上端筋の上面押し出し定着耐力, 折曲げ定着試験体の終局耐力は, $l_a=12db$ の試験体BB-

表-3 終局耐力計算値と最大耐力実験値

試験体	Q _{bu} (kN)	Q _{au} (kN)	Q _{cu} (kN)	Q _{ju} (kN)	Q _{ju} /Q _{mu}	実験値		
						bQ _{max} (kN)	bQ _{max} /Q _{bu}	bQ _{max} /Q _{ju}
BM-L12		160	270	160	0.75	166	0.78	1.04
BM-L10		147	201	147	0.69	154	0.72	1.04
BM-L8		135	151	135	0.64	142	0.67	1.05
BB-L12	213	—	236	236	1.11	224	1.05	0.95
BB-L10		—	179	179	0.84	191	0.90	1.07
BB-L8		—	126	126	0.59	137	0.64	1.09

(注) bQ_{max}: 最大耐力実験値、Q_{bu}: 小梁曲げ終局耐力時せん断力
Q_{au}: 大梁上面押し出し定着耐力時せん断力
Q_{cu}: 搔き出し定着耐力時せん断力
機械式定着: Q_{ju}=min(Q_{au}, Q_{cu})、折曲げ定着: Q_{ju}=Q_{cu}

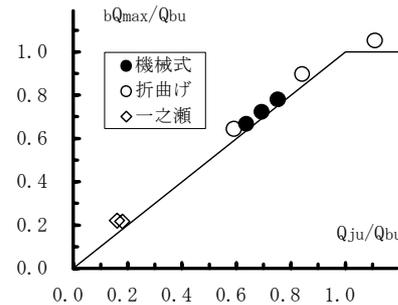


図-10 小梁上端筋の検討結果

L12では小梁曲げ終局耐力, それ以外の試験体では小梁上端筋の搔き出し定着耐力によって決定し, それぞれ破壊形式は実験結果と一致した。また, 各定着耐力計算値は最大耐力実験値とよく一致した。

5.3 小梁上端筋の必要定着長さの算定式

機械式定着による小梁上端筋は, $T_{cu} \geq T_a$ かつ $Tau \geq T_a$ とする必要がある。 T_{cu} は搔き出し定着耐力, Tau は上面押し出し定着耐力であり, T_a は下式による設計用引張力である。

$$T_a = \phi_a \cdot f_{tL} \cdot A_t \quad (7)$$

ϕ_a : 定着耐力に対する安全率

小梁上端筋の必要定着長さは, 下式による搔き出し定着耐力および上面押し出し定着耐力に対する必要定着長さの大きい方で決定する。下式では, 簡略化のために, $l_a/j=1$ を仮定した。

1) 搔き出し定着耐力に対する必要定着長さ

式(2), 式(4), 式(7)より, 下式が得られる。

$$l_{ao}/db = \phi_a \cdot S \cdot f_{tL} / \sqrt{\sigma_B \cdot n_d}, \quad S = 2.53nr/nb \quad (8)$$

nr: 小梁上端筋の本数

2) 上面押し出し定着耐力に対する必要定着長さ
GBRC 機械式定着委員会指針式⁴⁾より, 下式が得られる。

$$l_{ao}/db = 12 \phi_a \cdot f_{taL} / (k_6 \cdot \sigma_{auo}) - 45 \quad (9)$$

定着耐力に対する安全率 ϕ_a は、SD345 の規格引張降伏点に対する長期許容引張応力度の比とほぼ同じ、 $\phi_a = 1.6$ を仮定する。安全率 ϕ_a は破壊安全率であるので、別途、長期荷重下のひび割れ幅およびクリープたわみに対する安全性を検討する必要がある。

5.4 小梁上端筋の必要定着長さの計算例

5.3節による必要定着長さの算定式を用い、コンクリートの設計基準強度 F_c を変化させて求めた機械式定着および折曲げ定着の必要定着長さ l_{ao}/db を図-11 に示す。

本計算例では、小梁幅を 350mm、必要定着長さ l_{ao} の最小値を 12 db とし、 l_{ao}/db の算出に際して、式(4)による倍数 n_b および n_d を以下のように設定した。ただし、各場合とも、 $l_{a1}/db = 12$ 、 $D_a/db = 2.4$ 、 $n_{do} = 3$ とした。

$$\begin{aligned} \text{機械式定着} : n_b &= (250\text{mm}/db) + (l_{a1}/db) + (D_a/db), \\ n_d &= n_{do} + (D_a/2db) \end{aligned}$$

$$\text{折曲げ定着} : n_b = (250\text{mm}/db) + (l_{a1}/db), \quad n_d = n_{do}$$

また、大梁上面押し出し定着耐力は、小梁主筋 1 本当たりの耐力に鉄筋本数を乗じて算定した。

本計算例によると、機械式定着の l_{ao} は、小梁主筋の本数に係わらず、大梁上面押し出し定着耐力に対する必要定着長さによって決定し、 $F_c 27$ 以下の場合、 $20db$ 以上となる。なお、機械式定着具近傍に大梁上面押し出し破壊防止のための補強筋を配置すれば、必要定着長さを短くできると推察される。

図-11 中には、RC 計算規準¹⁾による SD345 の鉄筋 1 本当たりの仕口幅が $5db$ の時の必要投影定着長さ l_{ab} を併示した。提案式による折曲げ定着の l_{ao} は l_{ab} と比べ短く、実務設計へ適用可能であると考えられる。提案式の適用の際には、前述の長期荷重下のひび割れ幅やクリープたわみの影響ならびに小梁端部の支持条件を考慮する必要がある。

6. まとめ

1) 小梁上端筋の定着耐力は、主として、機械式

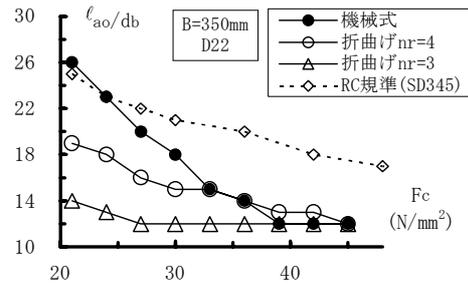


図-11 小梁上端筋の必要定着長さの計算例

定着では上面押し出し定着破壊、折曲げ定着では搔き出し定着破壊によって決定する。

- 2) 機械式定着および折曲げ定着とも、小梁端での小梁上端筋の長期許容引張応力度時における最大曲げひび割れ幅は、小梁上端筋の定着長さ l_a が短いほど大きく、曲げひび割れ幅制限値 (0.3mm) よりも大きくなる恐れがある。
- 3) 本論文では、上記の実験的知見に基づき、小梁上端筋の定着耐力の評価式および必要定着長さを提案した。

謝辞

本実験は、(株)ディビーエスが開発した機械式定着具に関する確認実験の一環として行ったものであり、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1999
- 2) 福島順一：2003年版JASS5を準用した定着運用マニュアルの概要と今後の課題、コンクリート工学、Vol. 42, No. 12, pp. 23-31, 2004. 12
- 3) 花井伸明、市ノ瀬敏勝：RC小梁主筋の必要定着長さに関する提案、日本建築学会大会梗概集、構造IV、pp. 475-476, 2006
- 4) 日本建築総合試験所・機械式鉄筋定着工法研究委員会：機械式鉄筋定着工法設計指針、2006. 1
- 5) 日本建築総合試験所：DBヘッド定着工法評価概要報告書、2006. 11
- 6) American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318. 2002
- 7) 鈴木計夫、大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅に関する研究(その1)、日本建築学会論文報告集、第303号、pp. 9-19, 1981. 5
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、8章 柱梁接合部の設計、pp. 241-277, 1999
- 9) 益尾潔、窪田敏行：機械式定着工法によるRC造ト形接合部の終局耐力に関する設計条件、日本建築学会構造系論文集、第590号、pp. 87-94, 2005.
- 10) 花井伸明、市ノ瀬敏勝：小梁定着部実験速報、AIJ鉄筋コンクリート構造計算規準改定小委員会 定着WG資料、2006. 7