

「連載」高強度・太径鉄筋を用いた配筋設計施工の品質保証 第③回

機械式定着工法の研究動向

益尾 潔 ●一般社団法人建築構造技術支援機構 代表理事

機械式定着工法の開発研究経緯

機械式定着工法は、1970年代に、RC建物の高層化に伴い、現場施工の合理化の観点から開発が始まり¹⁾、以下の3期を経て、2010年代になり、第4期に至っている。

第1期(1970年代～1980年代)には、超高層RC建物が出現し、図1の機械式定着具などが開発され始めた。この時期には、藤井・森田らによって、折曲げ定着による梁主筋定着耐力の研究²⁾が行われた。この研究成果は、その後の機械式定着の研究ならびに日本建築学会の靱性保証型設計指針、1999年版、2010年版RC構造計算規準の主筋定着設計の規定につながっている。

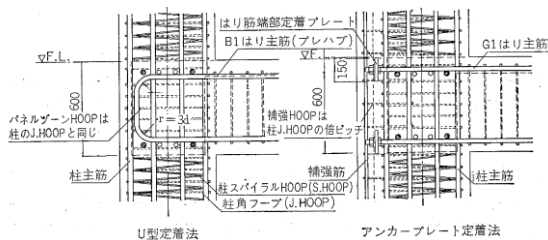


図1 別所ら開発した梁主筋端部定着詳細¹⁾

第2期(1990年代)には、NewRC総プロの一環として、村上・窪田ら³⁾によって、ト形接合部に埋め込まれた定着板とナットを組み合わせた機械式定着具を用いた梁主筋定着部について、図2の加力方法で実験が行われ、梁主筋定着耐力の設計式が提案された。また、この時期には、ねじ鉄筋用の定着金物が考案され、実用化され始めた^{4),5)}。

T: 梁主筋に加える引抜き力
 C: 梁端部圧縮力、R: 反力(柱せん断力)
 Vj: 接合部せん断力、H: 階高
 la: 梁主筋定着長さ、j: 梁応力中心距離

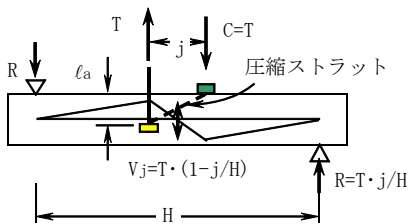


図2 村上・窪田らの実験の加力方法²⁾

第3期(2000年代)には、鉄筋の高強度化、太径化に伴い、電炉鉄筋メーカーを中心に、ねじ鉄筋および一般異形鉄筋に用いる各種定着金物が開発され、第三者機関の技術評価を取得している。これらの定着金物については、本連載の第②回で詳述している。

これらの開発の一環として、梁主筋定着部の実験研究⁶⁾、ト形接合部^{7),8)}およびT形、L形接合部^{9)~11)}の実験が精力的に行われた。このほか、590N/mm²級高強度鉄筋と120N/mm²級高強度コンクリートを用いたト形接合部¹²⁾、小梁主筋定着部¹³⁾やSRC柱梁接合部^{14)~16)}の実験が行われた。

これらの研究成果は、文献17)の機械式定着工法設計指針としてまとめられている。これを契機に、第4期では、機械式定着工法は、超高層建物だけでなく、高さ60m以下の一般建物にも普及しつつある。

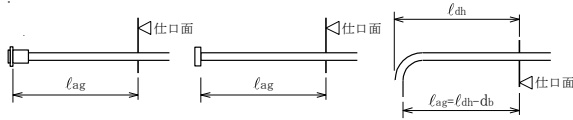
次に、第3期のRC関連実験研究の知見を中心に紹介する。

ト形接合部

ト形接合部では、下記の①～③の知見が得られた⁸⁾。

- ① 機械式定着とU型定着の梁主筋定着耐力および接合部せん断耐力は同程度であり、接合部耐力余裕度が同じ場合、梁曲げ降伏後の変形性能は同程度である。
- ② 接合部横補強筋は、梁曲げ降伏後の変形性能の改善効果を有する。
- ③ 直交梁は、接合部せん断耐力だけでなく、梁主筋定着耐力の増大効果ならびに梁曲げ降伏後の変形性能の改善効果を有する。

①の知見は、機械式定着とU型定着によるト形接合部について、定着金物種別、梁主筋鋼種、定着長さ、コンクリート圧縮強度を系統的に比較した実験を基に得られた。同実験では、図3に示すように、機械式定着では仕口面から定着板内面までの距離、U型定着では $l_{ah}-d_b$ をそれぞれ梁主筋定着長さ l_{ag} と定義し、両定着長さを同じにし、ト形接合部の構造性能を比較している。 l_{ah} は仕口面からの折曲げ部先端までの水平投影長さ、 d_b は梁主筋直径を示す。



(ねじ鉄筋用) (一般異形鉄筋用)

【機械式定着】

【U型定着】

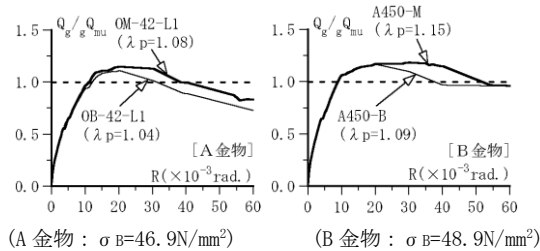
図3 梁主筋定着長さ l_{ag} の定義⁸⁾

図4は、機械式定着とU型定着を比較したト形接合部の無次元化梁せん断力(Q_g/gQ_{mu})—層間変形角(R)関係の1例である。 Q_g/gQ_{mu} は、梁せん断力 Q_g を梁曲げ終局耐力時せん断力 gQ_{mu} で除した値である。

左図のA金物では $\lambda_p=1.05$ 程度、右図のB金物では $\lambda_p=1.1$ 程度である。 λ_p は接合部耐力余裕度を示す。同図の試験体は、すべて $l_{ag}/d_b=12$ 、 $l_{ag}/D_c=0.67$ としている。 D_c は柱せいを示す。同図によると、梁曲げ降伏後、機械式定着による耐力(太線)は、U型定着(細線)よりも高い。

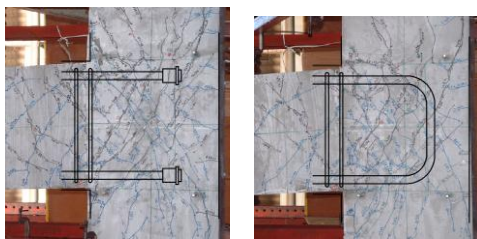
写真1に、図4左の機械式定着試験体OM-42-L1とU型定着試験体OB-42-L1の $R=40/1000$ 時のひび割れ状況を示す。 $(R=40/1000)$ は、文献17)で定義している十分な変形性能を保証すべき設計限界層間変形角 $RuD(1/50)$ を2倍した層間変形角である。

(注)太線：機械式定着、細線：U型定着



(A金物： $\sigma_B=46.9\text{N/mm}^2$) (B金物： $\sigma_B=48.9\text{N/mm}^2$)

図4 機械式定着とU型定着の比較⁸⁾



(機械式定着OM-42-L1) (U型定着OB-42-L1)

写真1 ト形接合部のひび割れ状況($R=40/1000$)⁸⁾

この写真によると、機械式定着の場合、柱梁接合部中央のせん断ひび割れ幅は、U型定着よりも大きくなる傾向がある。すなわち、機械式定着の場合、定着金物近傍に大きな支圧力が作用し、その結果、定着金物から派生する接合部せん断ひび割れ幅が拡大すると考えられる。ただし、 $(R=40/1000)$ 時でも、機械式定着、U型定着ともに、コンク

リートが剥落するような著しい損傷は柱梁接合部に発生していない。

②の知見は、接合部横補強筋量を変化させた実験より得られた。図5は、接合部横補強筋を中子筋なし(外周筋のみ)と中子筋ありの試験体の配筋図であり、同試験体の $Q_g/gQ_{mu}-R$ 関係を図6に示す。

左図はSD295、右図は785N/mm²級の接合部横補強筋を用いた実験結果である。左図では梁主筋本数を上下3本(図5)、右図では梁主筋本数を上下4本とし、コンクリートの圧縮強度を40N/mm²程度と60N/mm²程度とすることで、全試験体ともに、 $\lambda_p=1.1$ 程度としている。

図6によると、中子筋あり試験体(細線)の梁曲げ降伏後の変形性能は、中子筋なし試験体(太線)よりも明らかに改善される。すなわち、梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊は、接合部横補強筋の横拘束効果によって遅延する。

この知見は、T形、L形接合部でも得られている。これらの知見を基に、文献17)では、梁曲げ降伏後の変形性能確保のための必要接合部横補強筋比を規定している。

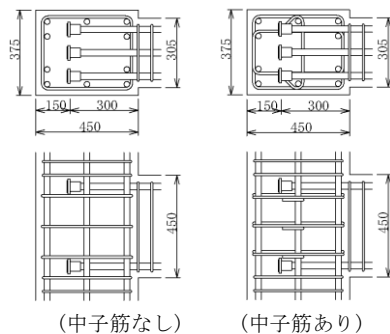


図5 接合部横補強筋量を比較した試験体($l_{ag}=12d_b$)⁸⁾

—：中子筋なし、—：中子筋あり

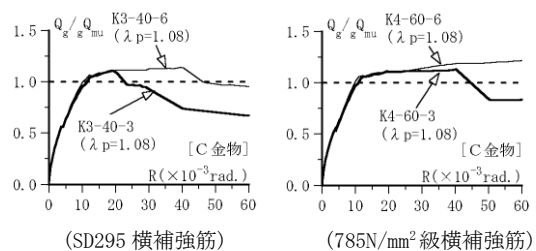


図6 接合部横補強筋量の比較⁸⁾

③の知見は、両側および片側直交梁付きと直交梁なし試験体を用いた実験より得られた。

図7は、直交梁付き試験体の配筋図であり、同試験体の $Q_g/gQ_{mu}-R$ 関係を図8に示す。図7の試験体では、直交梁の幅を柱せいの半分にすることで、接合部被覆率を50%としている。接合部被覆率は、加力構面に平行な接合部見付け面積に対する直交梁断面積の比率と定義している。

図8によると、直交梁付きの場合、梁曲げ降伏後の耐力

および変形性能は、直交梁なしよりも改善される。特に、両側直交梁付きの改善効果は明瞭に現れる。

両側直交梁付きの効果は、柱梁接合部のせん断ひび割れの進展を、直交梁が柱梁接合部の両側面から横拘束することで現れ、片側直交梁付きの場合、直交梁が存在しない側の柱梁接合部側面では、横拘束が期待できないので、明瞭な改善効果が現れない。

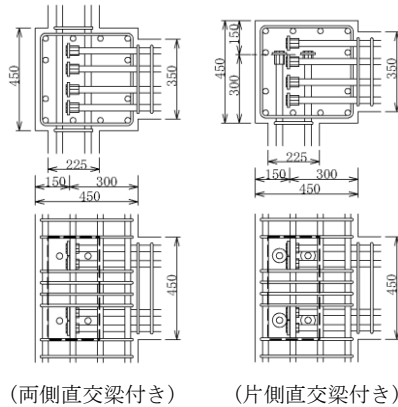


図7 両側および片側直交梁付き試験体 ($l_{ag}=12db$)⁸⁾

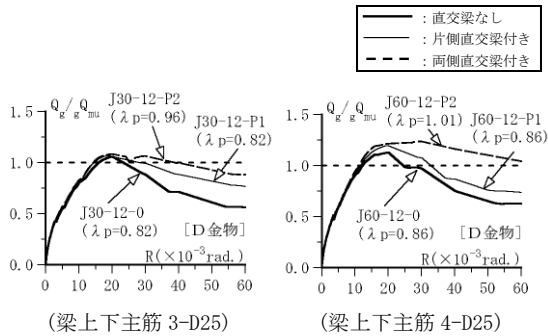


図8 直交梁付きと直交梁なしの比較⁸⁾

T形、L形接合部

日本建築学会の靱性保証型設計指針では、折曲げ定着を対象とし、接合部せん断終局耐力に対する形状係数 κu を、T形接合部ではト形接合部との類似性から0.7、L形接合部ではSRC計算規準の規定などを参考にして0.4としている。

折曲げ定着によるT形、L形接合部の場合、実験は数少なく、実験的根拠は不明確であるが、上記の κu を用いて算定された接合部せん断終局耐力を基に設計される。我が国のこれまでの地震では、T形、L形接合部の被害が報告されていない。この点もT形、L形接合部の実験が少ない1つの理由であると推察される。

機械式定着工法は、第三者機関の技術評価を取得しなければ、事実上使用できない。このことから、機械式定着工法によるT形、L形接合部の実験が多数行われている。T形、L形接合部の問題点は、以下の2点である。

- 1) T形接合部の場合、柱主筋の引張降伏後の変形性能の確保がト形接合部に比べて難しい。
- 2) T形、L形接合部では、柱、梁主筋定着長さだけでなく、接合部横補強筋やかんざし筋などの接合部配筋詳細が複雑である。

これらの実験を踏まえ、文献9)では、機械式定着工法によるT形、L形接合部の設計条件が提案されている。

さらに、合理的な設計法の構築を目指し、ト形接合部と同様、T形、L形接合部の場合にも、柱または梁曲げ降伏後の変形性能に及ぼす直交梁の影響を調べるための実験¹⁰⁾が行われた。文献11)では、T形、L形接合部についても、接合部横補強筋量の影響を定量化し、変形性能確保のための必要接合部横補強筋比の算定を可能にするとともに、柱主筋が仕口面で引張降伏するT形接合部の実験を基に、柱主筋定着耐力を梁主筋定着耐力と同様に算定できることを明らかにしている。

以上より、T形、L形接合部でも、(1)ト形接合部で示した知見②と③と同様の知見が得られた。

高強度材料を用いたト形接合部

文献17)の設計指針では、文献12)の実験を踏まえ、図9に示すように、高強度材料の適用範囲を定めている。すなわち、高強度材料は、590N/mm²級と685N/mm²級の高強度鉄筋および45N/mm²以上120N/mm²以下の高強度コンクリートとしている。同指針による高強度材料を用いた設計法は、同図に示すように、SD490以下の普通強度鉄筋と高強度コンクリートを組合せた場合にも適用できる。

文献12)では、図9の高強度材料の適用範囲を対象とし、定着金物種別、梁主筋鋼種、定着長さ、コンクリート圧縮強度を変えた実験を行い、普通強度材料と同様の設計式を用い、梁主筋定着耐力および接合部せん断終局耐力を算定できることを示している。

ただし、梁主筋の短期許容引張応力度を、490N/mm²を超える値にすると、梁端部曲げひび割れ幅が修復限界に達する恐れがあるので、設計上、注意が必要である。

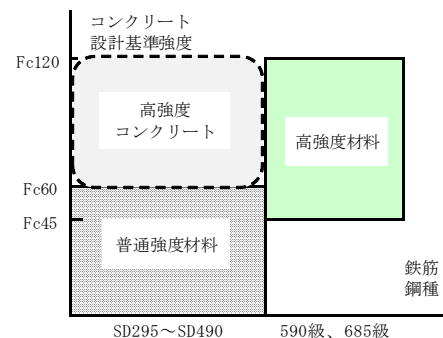
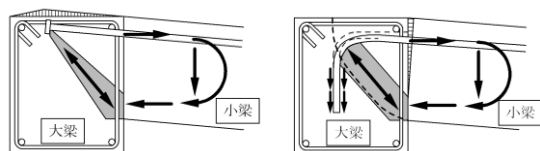


図9 普通強度材料と高強度材料の適用範囲⁸⁾

小梁主筋定着部

小梁主筋定着部の実験¹³⁾では、定着方式、定着金物種別、定着長さ、コンクリート強度および上面拘束筋の有無を因子とした実験を行い、機械式定着の場合、主筋が引張降伏する前に、図 10 に示した上面押し出し定着破壊が発生する恐れがあることを明らかにしている。

すなわち、機械式定着の場合、折曲げ定着部の余長が負担する下向きの抵抗力を期待できないため、定着部近傍のコンクリートにひび割れが発生した後、下部からの突き上げ作用によって、上面押し出し定着破壊が発生する。この破壊形式は、柱断面外の直交梁内に配置された基礎梁上端筋などでも発生する恐れがあるので、設計上、注意が必要である。



(a) 上面押し出し定着破壊 (機械式定着) (b) 掻き出し定着破壊 (折曲げ定着)

図 10 小梁主筋定着部の典型的な破壊形式¹³⁾

今後の展望

コンクリート系構造物における梁、柱主筋定着の適用範囲は広く、鉄筋の高強度化、太径化が進むと、実務設計上、種々の問題が出現する。第 4 期(2010 年代)では、これらの問題解決に向けた実験が行われつつある。

RC 造最上階 L 形接合部について、柱、梁主筋定着部の配筋詳細を工夫した L 形接合部の実験、RC 建物でしばしば遭遇する段差梁付き柱梁接合部や基礎梁主筋定着部を想定した柱梁接合部の実験が行われている。

次の第④回「機械式定着工法の実務動向」では、これらの諸課題と関連した実務課題についても執筆したい。

【参考文献】

- 1) 別所、岡本、吉田：はり定着法に関する実験的研究、鹿島建設技報、第 21 号、pp. 529-544, 1973. 6
- 2) 藤井、森田、川上、山田：90° 折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価、AIJ 構造系論文報告集、第 429 号、1991. 11
- 3) 村上、藤、窪田：引き抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価、JCI 論文集、第 8 巻、第 2 号、pp. 1-10, 1997. 7
- 4) 加藤、別所：新考案定着金物を用いた高層 RC 柱梁接合部内の梁主筋定着法に関する実験研究、鹿島建設技報、第 45 号、pp. 75-80, 1997. 12
- 5) 太田、窪田、福田、村上、池山：機械式定着の引抜き試

験による耐力、AIJ 大会梗概集、構造Ⅳ、pp. 527-530, 1999. 9

- 6) 窪田、大淵、福田：外部柱梁接合部への梁主筋の機械式定着耐力に関する研究、AIJ 大会梗概集、構造Ⅳ、pp. 559-560, 2003. 9
- 7) 益尾、窪田：機械式定着工法による RC 造 T 形接合部の終局耐力に関する設計条件、AIJ 構造系論文集、第 590 号、pp. 87-94, 2005. 4
- 8) 益尾、足立：機械式定着による RC 造 T 形柱梁接合部の構造性能、AIJ 構造系論文集、第 627 号、pp. 819-826, 2008. 5
- 9) 益尾、井上、岡村：機械式定着工法による RC 造 T 形および L 形柱梁接合部の終局耐力に関する設計条件、AIJ 構造系論文集、第 590 号、pp. 95-102, 2005. 4
- 10) 足立、益尾：機械式定着工法による RC 造 T 形および L 形柱梁部分架構の構造性能に及ぼす直交梁の影響、JCI 年次論文報告集、Vol. 31, No. 2, pp. 337-342, 2009. 7
- 11) 益尾、足立：機械式定着による柱主筋定着耐力ならびに RC 造 T 形、L 形部分架構の変形性能、JCI 年次論文報告集、Vol. 31, No. 2, pp. 343-348, 2009. 7
- 12) 益尾、足立：機械式定着による RC 造 T 形柱梁接合部の構造性能—高強度材料を用いた場合—、AIJ 構造系論文集、第 632 号、pp. 1841-1848, 2008. 10
- 13) 益尾、足立、田川：機械式定着による RC 造小梁主筋の定着耐力および必要定着長さ、AIJ 構造系論文集、第 631 号、pp. 1625-1632, 2008. 9
- 14) 足立、益尾：機械式定着工法による SRC 造 T 形柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究、AIJ 大会梗概集、構造Ⅲ、pp. 1139-1140, 2009. 8
- 15) 足立、田川、益尾：機械式定着工法による SRC 造 T 形柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究、JCI 年次論文報告集、Vol. 30, No. 3, pp. 1381-1386, 2008. 7
- 16) 益尾、田川、足立：機械式定着による SRC 造 T 形および L 形柱梁接合部の終局耐力に関する設計条件、AIJ 構造系論文集、第 637 号、pp. 543-550, 2009. 3
- 17) 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(2010 年改定)、2010. 5