

論文 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

足立 将人*1・益尾 潔*2

要旨: 機械式定着工法によるRC造T形, L形柱梁部分架構について, コンクリート目標圧縮強度および柱梁接合部への直交梁接続の有無を実験因子とした加力実験を行った。柱梁接合部への直交梁の接続によって, T形接合部における柱主筋の抜け出しおよびT形・L形接合部におけるせん断変形の低減, これに伴う最大耐力の増大が確認された。また, T形およびL形部分架構において, 直交梁付き試験体では, 直交梁側面からの横拘束に起因し, 直交梁無し試験体に対して柱曲げ降伏後の変形性能が改善されることを明らかにした。
キーワード: 機械式定着, T形部分架構, L形部分架構, 終局耐力, 変形性能, 直交梁

1. はじめに

RC造柱梁接合部のせん断耐力を算出する際, 靱性保証型設計指針¹⁾では実験結果に基づき, 直交梁の有無による補正係数を考慮している。筆者らは, 過去に行った機械式定着工法によるRC造T形部分架構について直交梁の有無を変数とした加力実験において, 直交梁の存在が接合部せん断耐力の増加のみならず, 梁主筋の定着耐力を向上させるとともに, 部分架構の変形性能が向上することを明らかにした²⁾。

本論文では, 直交梁の有無を主な実験因子として, 機械式定着工法によるRC造T形, L形柱梁部分架構について加力実験を行い, 両部分架構の終局耐力と変形性能に及ぼす直交梁の影響について検討を行った。

2. 実験計画

2.1 実験因子および試験体

(1) T形部分架構試験体

実験因子は, 表-1に示すように, コンクリートの目標圧縮強度(27N/mm², 54N/mm²), 直交梁の有無であり, 試験体数は6体である。試験体の形状寸法を図-1, 接合部詳細を図-2に示す。柱主筋定着部では, 図-1に

示す鉄製定着金物をネジ節鉄筋に嵌合させ, 無機グラウトを注入した。

直交梁無し試験体 T27-390-0, T54-490-0 では, 文献3)によるT形接合部の終局耐力の算定式に基づき, 柱曲げ降伏が先行した後, 柱主筋定着破壊を起こすよう, 柱および梁の配筋を定め, 接合部せん断余裕度 Q_{pu}/Q_{cu} を1.2~1.5程度とし, 接合部横補強筋比 p_{jwh} を0.3%程度とした。ここで, Q_{pu} は接合部せん断終局耐力時柱せん断力, Q_{cu} は柱曲げ終局耐力時せん断力であり, これらの計算耐力は, 鉄筋およびコンクリートの実強度を用い, 文献3)の提案による算定式を用いて求めた。

片側直交梁付き試験体 T27-390-P1, T54-490-P1 および両側直交梁付き試験体 T27-390-P2, T54-490-P2 の直交梁の断面寸法は, 文献2)によるT形部分架構と同様, 柱梁接合部に対する被覆率が50%となるように定めた。直交梁は, 片側, 両側直交梁付きともに, 後述のL形試験体と同位置として柱せい中央より偏心させた位置に配置し, 接合部コンクリートと一体打ちとした。

加力方法は文献4)と同様とし, 荷重履歴は, 目標層間変形角 R が(5,10,20,30,40,60)/1000 rad. の2サイクルずつの正負繰り返し荷重およびその後の正加力方向への単

表-1 T形部分架構試験体の実験計画

| 試験体 | F_c N/mm ² | 直交梁の有無 | 柱配筋 | | 梁配筋 | 接合部配筋 | |
|------------|----------------------------|--------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | 主筋 (p _g) | 定着長 l_{ac} | 主筋 (p _t) | 横補強筋 (p _{jwh}) | 柱頭補強筋 (p _{jvw}) |
| T27-390-0 | 27 | 無 | 8-D19 SD390 | 342mm =0.86D _g =18db | 4-D19 SD390 | 2-D10 3組 | 2-D10 3組 |
| T27-390-P1 | | 片側 | (1.44%) | | (1.06%) | | |
| T27-390-P2 | 両側 | | | | | | |
| T54-490-0 | 54 | 無 | 12-D19 SD490 | | 4-D22 SD490 | SD295A | SD295A |
| T54-490-P1 | | 片側 | (2.15%) | | (1.43%) | (0.33%) | (0.34%) |
| T54-490-P2 | | 両側 | | | | | |

(注) 1) F_c : コンクリートの目標圧縮強度
 2) D_g : 梁せい, d_b : 主筋径

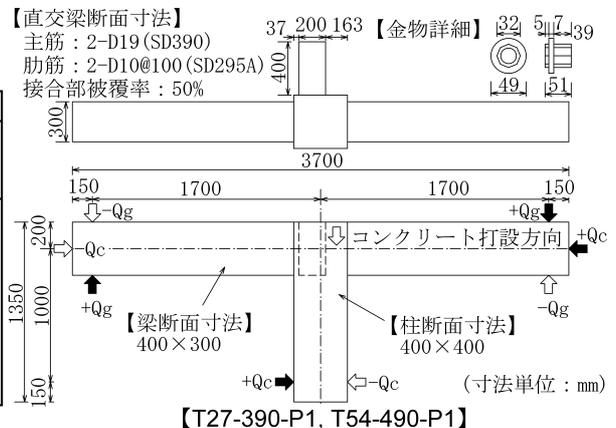


図-1 T形部分架構試験体の形状寸法

*1 (財) 日本建築総合試験所 構造部構造物試験室 博士(工学) (正会員)

*2 (財) 日本建築総合試験所 構造部長 工博 (正会員)

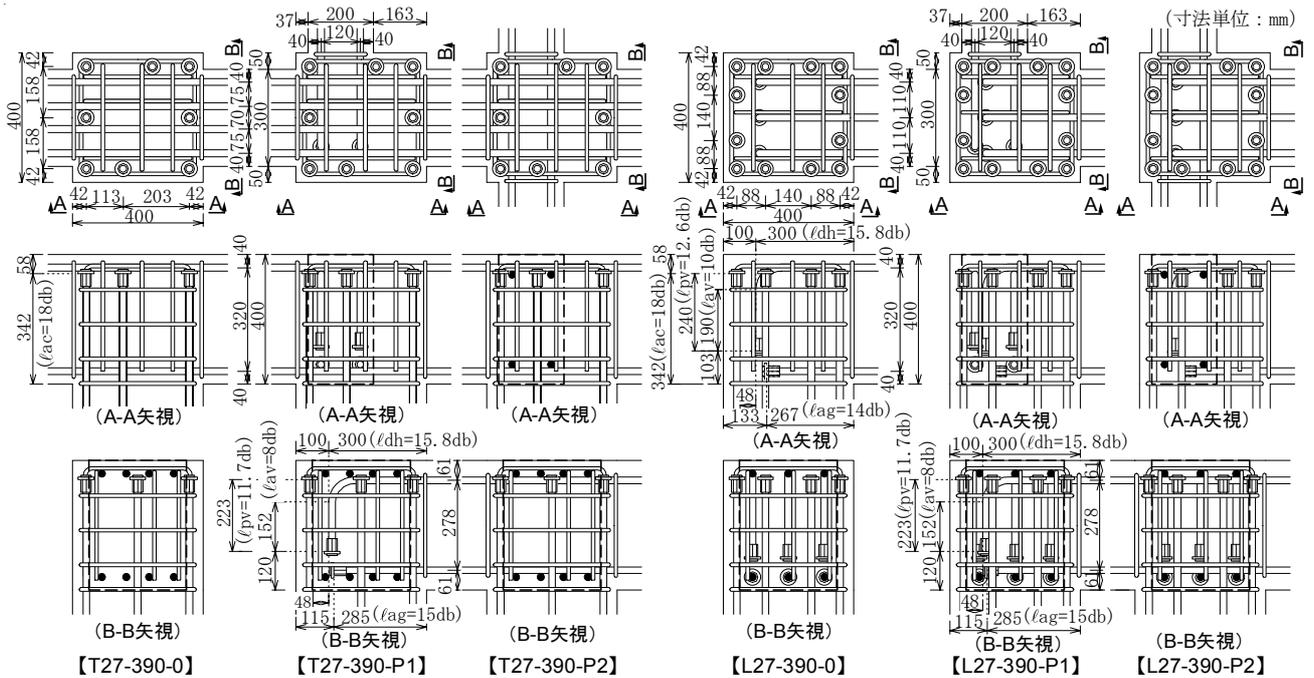
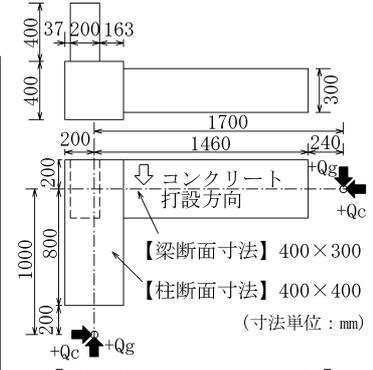


図-2 T形部分架構試験体の接合部詳細 (Fc27 試験体) 図-3 L形部分架構試験体の接合部詳細 (Fc27 試験体)

表-2 L形部分架構試験体の実験計画

| 試験体 | Fc N/mm ² | 直交梁の有無 | 柱配筋 | | 梁配筋 | | | 接合部配筋 | |
|------------|-------------------------|--------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | 主筋 (p _g) | 定着長 l _{ac} | 主筋 (p _t) | 上端筋定着長 l _{dh} | 下端筋定着長 l _{ag} | 横補強筋 (p _{jwh}) | 柱頭補強筋 (p _{jwv}) |
| L27-390-0 | 27 | 無 | 12-D19 | 342mm =0.86D | 3-D19 | 300mm =0.75D | 267mm =0.67D | 2-D10 3組 SD295A (0.33%) | 2-D10 3組 SD295A (0.34%) |
| L27-390-P1 | | 片側 | SD345 (2.15%) | | SD390 (0.80%) | | | | |
| L27-390-P2 | | 両側 | | | | | | | |
| L54-490-0 | 54 | 無 | 12-D19 | =18db | 4-D19 | =15.8db | =14db | SD295A (0.33%) | SD295A (0.34%) |
| L54-490-P1 | | 片側 | SD490 (2.15%) | | SD490 (1.06%) | | | | |
| L54-490-P2 | | 両側 | | | | | | | |

(注) 1) D: 梁せいまたは柱せい、db: 主筋径



【L27-390-P1, L54-490-P1】

図-4 L形部分架構試験体の形状

調載荷とした。

(2) L形部分架構試験体

実験因子は、表-2 に示すように、T形部分架構試験体と同様、コンクリート目標圧縮強度(27N/mm², 54 N/mm²), 直交梁の有無であり、試験体数は6体である。接合部詳細を図-3, 試験体の形状寸法を図-4 にそれぞれ示す。柱主筋および梁主筋定着部で用いた定着金物は、T形試験体と同一とした。

直交梁無し試験体 L27-390-0, L54-490-0 では、文献3) によるL形接合部の終局耐力の算定式に基づき、梁曲げ降伏が先行した後、接合部せん断破壊を起こすよう、柱および梁の配筋を定め、正加力時の接合部せん断余裕度 Q_{pu}/Q_{cu} を 1.0~1.2 程度とし、接合部横補強筋比 p_{jwh} を 0.3%程度とした。Q_{pu} は接合部せん断終局耐力時柱せん断力、Q_{cu} は梁曲げ終局耐力時せん断力であり、これらは鉄筋およびコンクリートの実強度を用い、T形部分架構試験体と同様、文献3)の提案による算定式を用いて求めた。

加力方向梁の上端主筋の投影定着長さ l_{dh} は、直交梁の

表-3 コンクリートおよび鉄筋の強度試験結果

(a) コンクリート

| 系列 | 強度種別 | σ _B (N/mm ²) | ε _{co} (×10 ⁻³) | E _c (kN/mm ²) | σ _t (N/mm ²) |
|----|------|--|---|---|--|
| T形 | Fc27 | 30.9 | 1.80 | 27.1 | 2.86 |
| | Fc54 | 54.8 | 2.27 | 35.1 | 3.59 |
| L形 | Fc27 | 33.1 | 1.79 | 29.0 | 2.81 |
| | Fc54 | 58.4 | 2.31 | 35.8 | 4.42 |

σ_B: 圧縮強度, ε_{co}: σ_B時ひずみ度
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 (%) |
|-------|-----|--------|--|--|-----------|
| 柱・梁主筋 | D19 | SD345 | 368 | 535 | 26 |
| | | SD390 | 410 | 602 | 24 |
| | | SD490 | 528 | 737 | 19 |
| 横補強筋 | D10 | SD295A | 366 | 521 | 26 |
| かんざし筋 | D10 | SD295A | 352 | 495 | 29 |

σ_y: 降伏点, σ_u: 引張強度

有無に係わらず(3/4)D_cとし、下端主筋の定着長さ l_{ag} は、(2/3)D_cかつ 14db とした。D_c は柱せい、db は梁主筋の直

CTY：柱主筋の引張降伏、JHY：接合部横補強筋の引張降伏

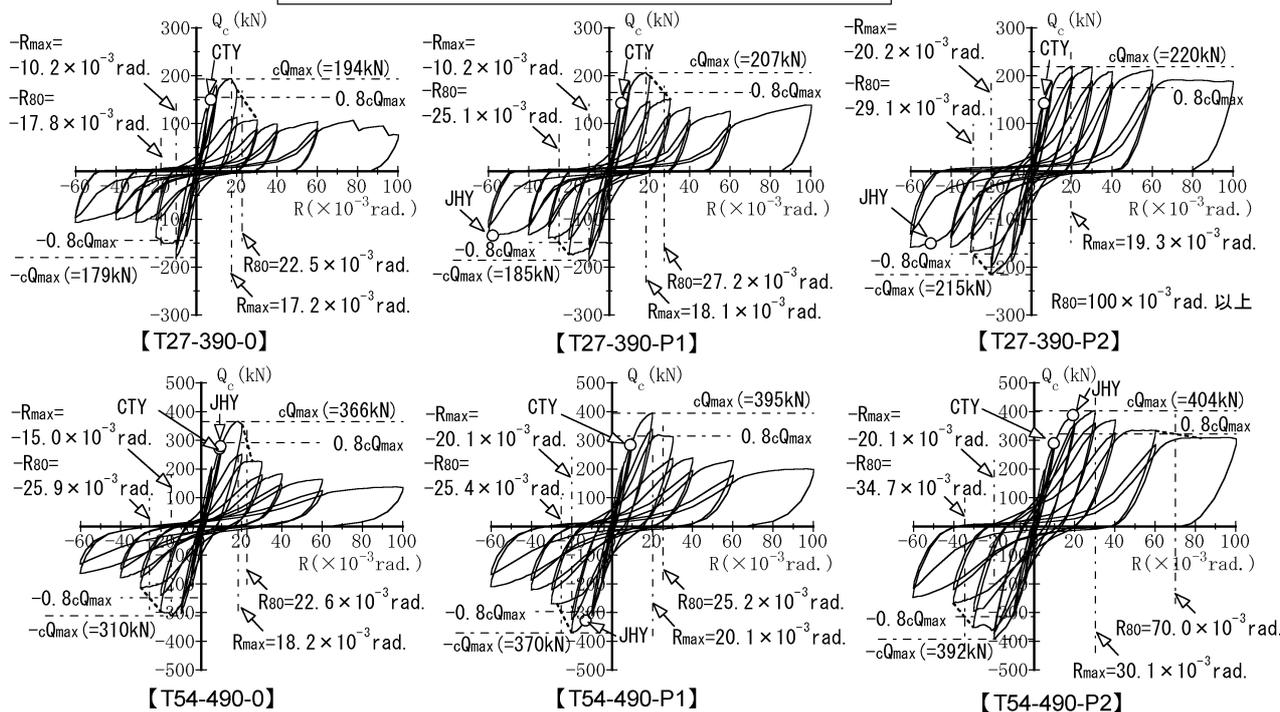


図-5 T形各試験体の Q_c - R 関係

径を示す。

片側直交梁付き試験体 L27-390-P1, L54-490-P1 および 両側直交梁付き試験体 L27-390-P2, L54-490-P2 の直交梁の断面寸法は、T形試験体と同様、柱梁接合部に対する被覆率が50%となるように定めた。片側、両側直交梁付きともに、直交梁は、梁主筋定着部の配筋の収まりから、柱せい中央より偏心させた位置に配置し、接合部コンクリートと一体打ちとした。加力方法は文献4), 载荷履歴はT形試験体とそれぞれ同様とした。

2.2 使用材料

試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の強度試験結果を表-3に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 T形部分架構試験体

(1) 荷重-変形関係および破壊性状

各試験体の Q_c - R 関係を図-5, $R=+30/1000$ 時の代表的な試験体の状況を写真-1に示す。 Q_c は柱せん断力, R は層間変形角である。同図中には、柱主筋と接合部横補強筋の降伏時期および最大耐力 cQ_{max} , 限界層間変形角 R_{80} を併記した。 R_{80} は、耐力が cQ_{max} の80%に低下した時の層間変形角実験値である。

各試験体ともに、柱主筋の引張降伏後、 $R=17/1000 \sim 30/1000$ 時に最大耐力 cQ_{max} に達した。その後、試験体 T27-390-0 および T27-390-P1 では、柱主筋定着金物近傍のかぶりコンクリートの損傷を伴い耐力が低下した。試

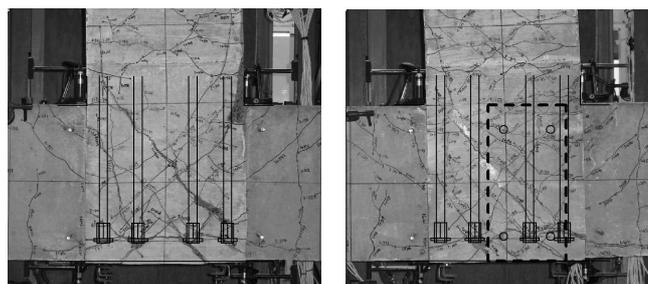


写真-1 $R=+30/1000$ 時の試験体の状況

験体 T54-490-0 および T54-490-P1 では、接合部せん断ひび割れの進展および拡大が顕著となり耐力が低下した。両側直交梁付き試験体 T27-390-P2 および T54-490-P2 では、 $R=100/1000$ まで耐力が急落せず、直交梁の接続が接合部せん断変形の低減に寄与することを示している。

各試験体とも、正加力時最大耐力に対し、負加力時の最大耐力が低下している。これは、正加力時に受けた損傷の影響および柱芯に対する直交梁の偏心に伴う加力方向の違いによる影響を受けたためと考えられる。

写真-1によると、試験体 T54-490-0 と比較して、T54-490-P1 では、定着金物を起点とした接合部せん断ひび割れによる損傷が少なく、片側のみに直交梁が接続している場合でも、接合部の損傷を低減させる効果を有することが確認できる。

(2) 最大耐力および限界層間変形角

前項で示したように、本実験では正負加力方向による試験体の最大耐力が異なった。通常、T形接合部の場合、

直交梁は柱梁接合部に対して偏心しない場合が多いので、ここでは、各試験体の正加力時および負加力時の Q_c - R 関係包絡線を用いて、正負平均包絡線を作成した。

コンクリート目標圧縮強度別に直交梁無し、片側直交梁付き、両側直交梁付きの場合をそれぞれ比較した Q_c - R 関係正負平均包絡線を図-6 に示す。同図には、正負平均包絡線における限界層間変形角 R_{80} および柱曲げ終局耐力計算値 Q_{cu} 、接合部せん断終局耐力計算値 Q_{pu} (Q_{pu1} : 直交梁無しおよび片側直交梁付き試験体, Q_{pu2} : 両側直交梁付き試験体) を併示した。

同図で示すように、Fc27 試験体および Fc54 試験体とも、直交梁無し試験体では、正負平均包絡線に基づく最大耐力は、 Q_{cu} を下回った。これは、正加力時と比較して、負加力時の耐力が低下する傾向が直交梁無し試験体で顕著であったことが要因として挙げられる。

両側直交梁付き試験体 T27-390-P2 では、最大耐力後の耐力低下が小さく、 R_{80} は 100/1000 を上回った。このように、直交梁無し試験体、片側直交梁付き試験体、両側直交梁付き試験体の順で、最大耐力および R_{80} の増加が見られ、特に接合部両側に直交梁が接続していることで、 R_{80} が顕著に増大した。

(3) 直交梁からの接合部側面圧縮応力

図-7 に、接合部せん断応力度 τ_p - R 関係包絡線および直交梁の接続により生じる接合部側面平均圧縮応力 σ_o - R 関係を示す。同図では、横軸に R 、縦軸正方向は τ_p として τ_p - R 関係包絡線を、縦軸負方向は σ_o として σ_o - R 関係を示しており、両関係は正負加力時の平均とした。 τ_p および σ_o は、それぞれ次式で算出した。

$$\tau_p = V_{ph} / (b_j \cdot D_{jh}) \quad (1)$$

$$V_{ph} = \xi_{ha} \cdot Q_c / 2 \quad (2)$$

$$\xi_{ha} = (h/\ell) \cdot (\ell_0/j_{gt}) - 1 \quad (3)$$

ここに、 V_{ph} : 接合部入力水平せん断力、 Q_c : 柱せん断力実験値、 ℓ_0 : 内法スパン、 j_{gt} : 梁主筋重心間距離、 b_j : 接合部有効幅(= $(b_g + b_c)/2$)、 b_g : 梁幅、 b_c : 柱幅、 D_{jh} : 接合部水平方向有効せい(= D_c)

$$\sigma_o = \sigma_{BO} \quad (\text{両側直交梁試験体}) \quad (4)$$

$$\sigma_o = \sigma_{BO} / 2 \quad (\text{片側直交梁試験体}) \quad (5)$$

$$\sigma_{BO} = \sum P_{BOi} / A_p \quad (6)$$

$$P_{BOi} = \varepsilon_{BOi} \cdot E_s \cdot A_s \quad (7)$$

ここに、 ε_{BOi} : 直交梁主筋ひずみ ($\varepsilon_{BOi} > \varepsilon_y$ の場合、 $\varepsilon_{BOi} = \varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_y = (\sigma_{sy} / E_s)$: 直交梁主筋の降伏ひずみ)、 E_s : ヤング係数(= 205 kN/mm^2)、 A_s : 直交梁主筋公称断面積、 A_p : 接合部側面の全面積

式(5)では、片側直交梁付き試験体の場合、直交梁が接続している面からは圧縮応力を受けるものの、反対面は無応力であるため、 σ_o を 2 で除している。

図-7 によると、柱主筋の抜け出しが顕著となって耐

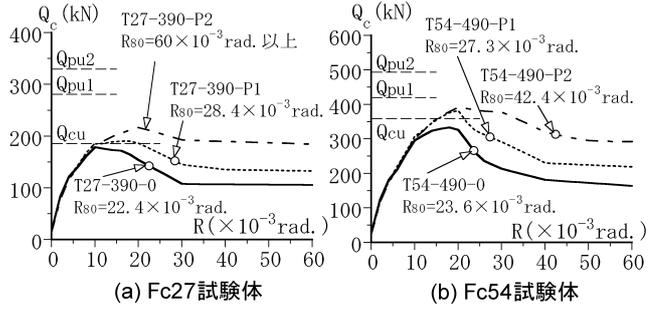


図-6 T形各試験体の Q_c - R 関係正負平均包絡線

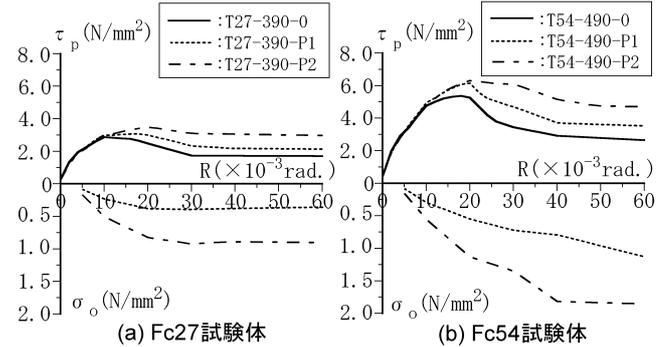


図-7 τ_p - R 関係および σ_o - R 関係 (正負平均)

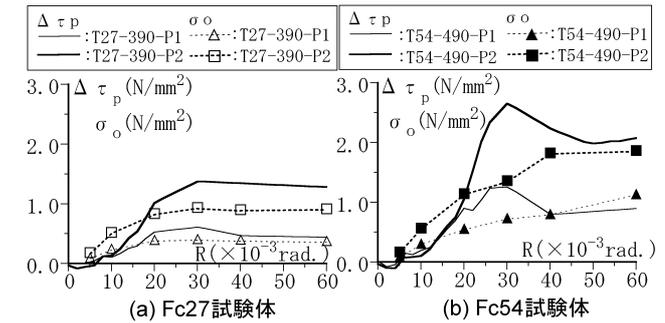


図-8 $\Delta \tau_p$ - R 関係および σ_o - R 関係 (正負平均)

力が低下した試験体 T27-390-P1 および T27-390-P2 では、最大耐力前後 ($R=20/1000$) まで σ_o が増加するものの、その後ほぼ一定値となった。また、接合部せん断変形が顕著となった試験体 T54-490-P1 および T54-490-P2 では、最大耐力以降も σ_o が増加し、 $R=60/1000$ 時には Fc27 試験体の 2 倍程度となった。

図-8 に $\Delta \tau_p$ - R 関係包絡線および σ_o - R 関係を重ねて示す。 $\Delta \tau_p$ は、図-7 に基づき、直交梁付き試験体と直交梁無し試験体との τ_p の差、すなわち直交梁の接続に伴う接合部水平せん断応力増加分とした。

同図に示すように、各試験体とも最大耐力 $R=20/1000$ 前後以降において、 $\Delta \tau_p$ と σ_o が同程度の値を示した。すなわち、片側および両側直交梁付きともに、T形接合部では、柱主筋引張降伏以降における水平せん断応力の増加分 $\Delta \tau_p$ は、直交梁による面外からの横拘束に伴う接合部側面平均圧縮応力 σ_o と同程度である。

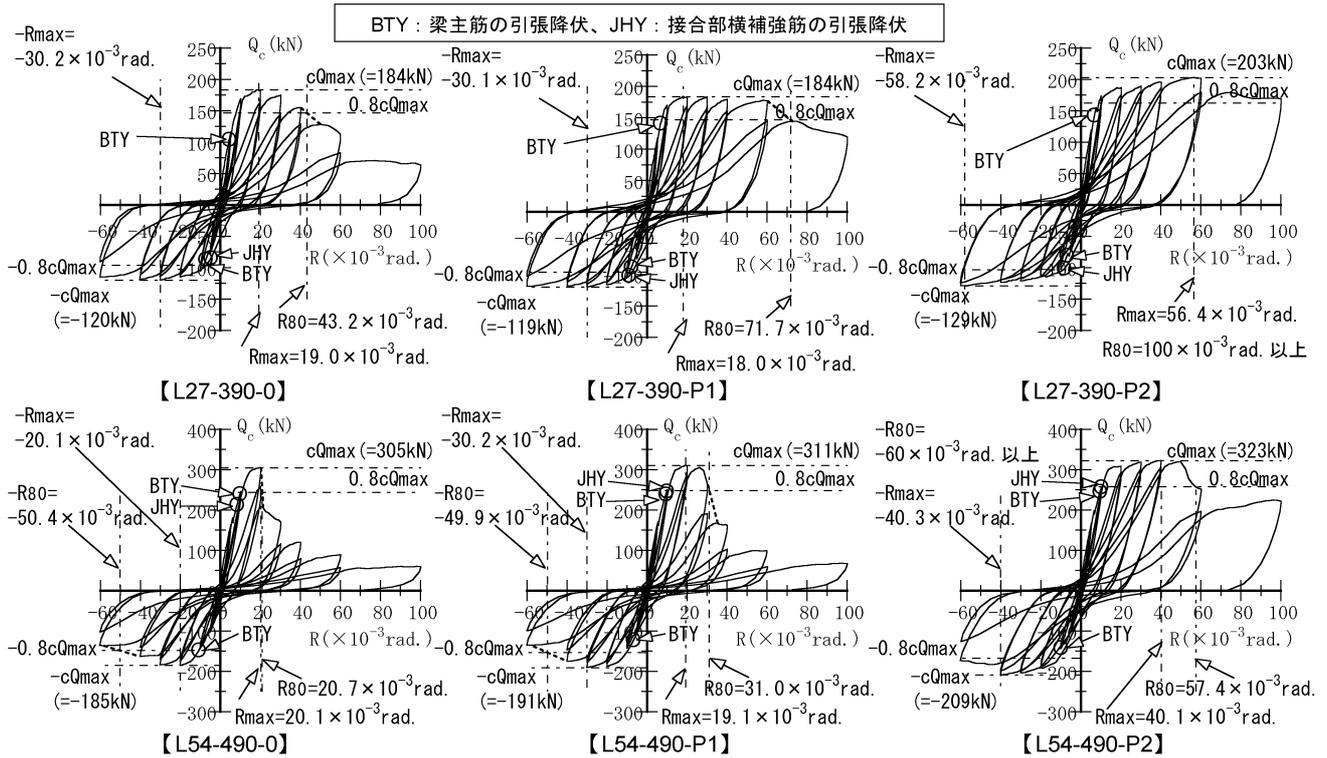


図-9 L形各試験体の Q_c - R 関係

3.2 L形部分架構試験体

(1) 荷重-変形関係および破壊性状

各試験体の Q_c - R 関係を図-9, $R=+40/1000$ 時の代表的な試験体の状況を写真-2 に示す。図中の記号の定義はT形試験体と同じである。

正加力時において、各試験体とも、梁主筋の引張降伏後、 $R=18\sim 20/1000$ 時に最大耐力 cQ_{max} に達し、その後、接合部せん断ひび割れの拡大および柱上面背面への進展、柱主筋定着金物近傍かぶりコンクリートの剥落を伴い、耐力が低下した。

負加力時において、各試験体ともに、梁主筋の引張降伏後、 $R=-20\sim -58/1000$ 時に最大耐力 $-cQ_{max}$ に達した。Fc27 試験体では、その後の耐力の低下は殆ど見られず、Fc54 試験体では接合部せん断ひび割れの拡大、かぶりコンクリートの剥落を経て、緩やかに耐力が低下した。

(2) 最大耐力および限界層間変形角

コンクリート目標圧縮強度別に直交梁無し、片側直交梁付き、両側直交梁付きの場合をそれぞれ比較した Q_c - R 関係正負平均包絡線を図-10 に示す。限界層間変形角 R_{80} および梁曲げ終局耐力計算値 Q_{cu} 、接合部せん断終局耐力計算値 Q_{pu} (Q_{pu1} : 直交梁無しおよび片側直交梁付き試験体, Q_{pu2} : 両側直交梁付き試験体) を同図に併示した。

正加力時において、Fc27 試験体および Fc54 試験体とも、同図(a)で示すように、最大耐力は梁曲げ終局耐力計算値 Q_{cu} を上回った。試験体 L54-490-0 および L54-490-P1

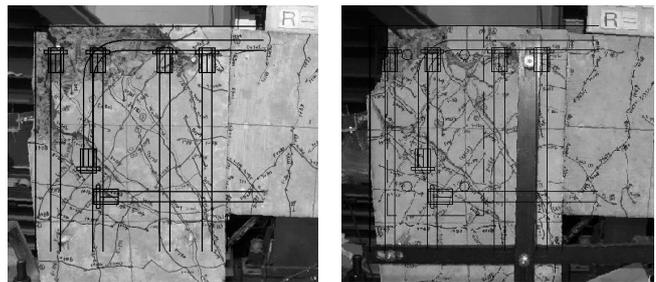


写真-2 $R=+40/1000$ 時の試験体の状況

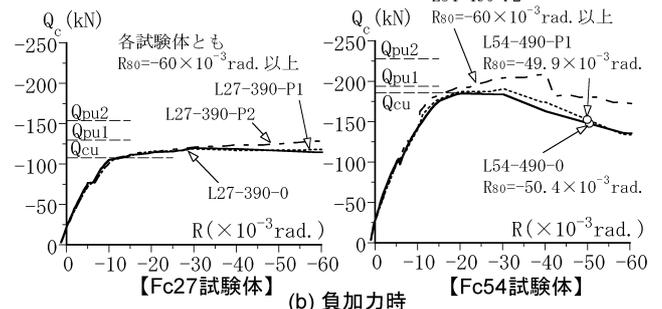
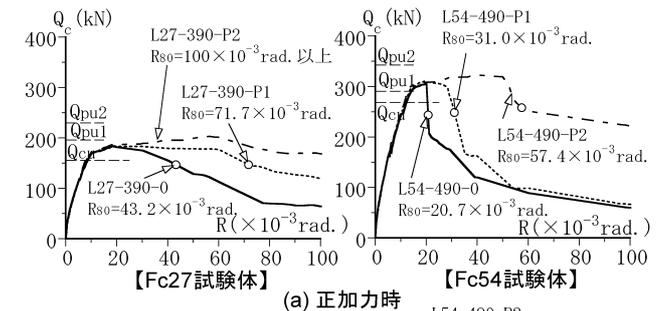


図-10 L形各試験体の Q_c - R 関係包絡線

では、 R_{80} がそれぞれ 21/1000, 31/1000 程度に留まった。これは、同図(a)で示すように、 Q_{pu} と Q_{cu} の値が同程度であり、接合部耐力余裕度 Q_{pu}/Q_{cu} が 1.0 に近かったことがその要因として挙げられる。Fc27 試験体および Fc54 試験体とも、直交梁無し、片側直交梁付き、両側直交梁付き試験体の順で、 R_{80} の増加が見られ、特に接合部両側に直交梁が接続していることで、 R_{80} が顕著に増大した。

負加力時において、試験体 L54-490-0 を除く各試験体では、同図(b)で示すように、最大耐力が梁曲げ終局耐力計算値 Q_{cu} を上回った。試験体 L54-490-0 および L54-490-P1 では、 R_{80} が-50/1000 程度となったが、他の試験体では、各試験体とも R_{80} が-60/1000 以上であった。

(3) 直交梁からの接合部側面圧縮応力

図-11 に、正加力時における接合部せん断応力 τ_p - R 関係包絡線および直交梁の接続により生じる接合部側面平均圧縮応力 σ_o - R 関係を示す。 τ_p および σ_o は、T 形試験体と同様、式(1), (4), (5)にて算出した。ただし、接合部水平方向有効せい D_{jh} は梁上端主筋投影定着長さ l_{dh} とした。各試験体とも、 σ_o は、接合部せん断ひび割れ発生後に増加し始め、梁主筋引張降伏時にほぼ対応する $R=10/1000$ 以降、その増加度合いが増している。

図-12 に、正加力時における $\Delta\tau_p$ - R 関係包絡線および σ_o - R 関係を重ねて示す。 $\Delta\tau_p$ は、T 形試験体と同様に算出した。

同図によると、 $\Delta\tau_p$ と σ_o は、T 形試験体における対応関係ほど良くないが、Fc27 試験体において、対応関係が認められる。したがって、T 形接合部と同様、L 形接合部についても、梁上端主筋の引張降伏における接合部水平せん断応力増加分 $\Delta\tau_p$ は、直交梁による面外からの横拘束に伴う接合部側面平均圧縮応力 σ_o に起因して生じたと考えられる。すなわち、直交梁無しに対する直交梁付きの L 形部分架構試験体における梁曲げ降伏後の変形性能の改善効果は、T 形部分架構試験体と同様、接合部側面に対する直交梁からの拘束に起因すると考えられる。

4. まとめ

コンクリートの目標圧縮強度および柱梁接合部への直交梁の接続の有無を実験因子とした T 形および L 形部分架構実験を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) T 形部分架構について、直交梁を有する試験体では、直交梁の無い試験体と比較して、最大耐力および限界層間変形角の増加、柱主筋抜け出し量および接合部せん断変形の低減が確認された。
- 2) L 形部分架構について、直交梁を有する試験体

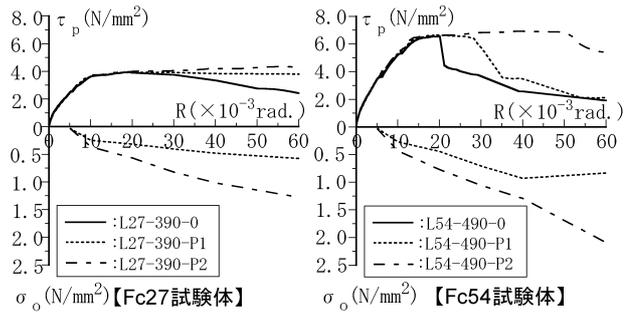


図-11 τ_p - R 関係および σ_o - R 関係 (正加力時)

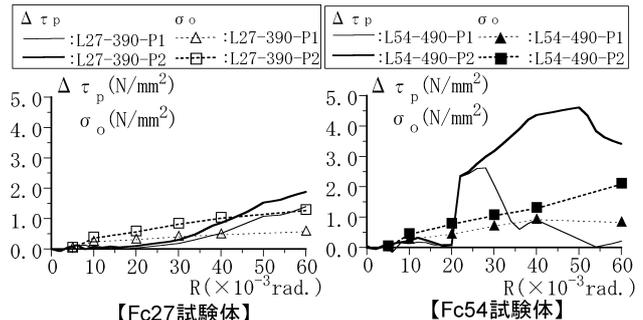


図-12 $\Delta\tau_p$ - R 関係および σ_o - R 関係 (正加力時)

では、直交梁の無い試験体と比較して、正負加力時における最大耐力および限界層間変形角の増加が確認された。

- 3) T 形および L 形部分架構において、直交梁付き試験体では、接合部側面に対する直交梁からの拘束に起因し、直交梁無し試験体に対して柱曲げ降伏後あるいは梁曲げ降伏後の変形性能が改善される。

謝辞 本実験は、ダイワスチール(株)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：鉄筋コンクリート造建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.241-277，1999.8
- 2) 益尾潔，足立将人：機械式定着による RC 造 T 形柱梁接合部の構造性能，日本建築学会構造系論文集，第 627 号，pp.819-826，2008.5
- 3) 益尾潔，井上寿也，岡村信也：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，日本建築学会構造系論文集，第 590 号，pp.95-102，2005.4
- 4) 井上寿也，益尾潔，岡村信也：機械式定着工法による曲げ降伏先行型・L 形および T 形 RC 造部分架構の終局耐力と変形性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.499-504，2003.6