

論文 最上階 L 形柱梁接合部に機械式定着を用いる場合の構造方式に関する実験的研究

清原 俊彦*1・高橋 文美*2・楠 浩一*3・田才 晃*4

要旨: 最上階 L 形柱梁接合部における梁上端主筋への機械式定着の適用を可能にすることを目的として、柱を梁上部に突出させ、柱主筋の定着位置を柱梁接合部外に配する方法を検討し、L 形柱梁接合部を含む部分架構の静的加力実験を実施した。その結果、柱梁接合部せん断余裕度が 1.0 程度でも柱を突出させることで安定した履歴曲線を得ることが出来、最上階 L 形柱梁接合部における梁上端主筋へ機械式定着が適用できる可能性がある。また、併せて直交梁の有無による L 形柱梁接合部の性状の差異を実験的に明らかにした。

キーワード: 機械式定着, L 形柱梁接合部, 柱梁接合部せん断余裕度

1. はじめに

近年、柱梁接合部における梁主筋の定着に機械式定着工法が広く用いられているが、最上階 L 形柱梁接合部における梁上端主筋を直線定着とした場合には折曲げ定着と比較して著しく構造性能が劣化することが知られており、L 形柱梁接合部における梁上端主筋は折曲げ定着が用いられている。

本研究では、L 形柱梁接合部における梁上端主筋への機械式定着を適用するために柱を梁上部に突出させ（柱突出形）、柱主筋の定着位置を柱梁接合部外とした場合の構造性能を明らかにすると共に、直交梁の有無による L 形柱梁接合部の性状の差異を明らかにすることを目的として静的加力実験を行うことにした。

2. 実験計画

2.1 実験因子

試験体は梁曲げ降伏が他の破壊に先行するように設計した。在来形で直交梁の無い FL-4 試験体を基準とし、直交梁の有無を変動させた FL-5, FL-6 試験体、FL-4 の柱を突出形とした FL-1, FL-1 に対して片側に直交梁を設けた FL-3, コンクリート強度を変動させた FL-2, FL-4 の主筋定着を全て折り曲げ定着とした FL-7 の計 7 体の試験体とした。表-1 に試験体一覧、図-1 に代表的な試験体の配筋図を示す。

2.2 使用材料

表-2 にコンクリートの材料試験結果を、表-3 に鉄筋の材料試験結果を、それぞれ示す。尚、コンクリートは早強コンクリートを用い、Fc27 の試験体は材齢 17 日～31 日、Fc45 の試験体は材齢 29 日にて実験を行なった。

表-1 試験体一覧

試験体名	形状	Fc (N/mm ²)	梁		柱主筋定着法	直交梁	接合部せん断余裕度(*1)	柱梁耐力比(*2)	
			主筋	主筋定着法				正加力	負加力
FL-1	柱突出形	27	2-D25(SD345)上下	上,下端:機械式	機械式	無	1.08	3.42	2.99
FL-2		45	2-D25(SD490)上下			無	1.28	2.52	2.19
FL-3		27	2-D25(SD345)上下			片側	1.08	3.42	2.99
FL-4	在来形	27	2-D25(SD345)上下	上端:曲げ下げ 下端:機械式	機械式	無	1.08	3.42	2.99
FL-5						片側	1.08	3.42	2.99
FL-6						両側	1.27	3.42	2.99
FL-7						180°フック	無	1.08	3.42

【共通事項】
 梁: b×D=360×400(mm), ストラップ 2-D10(SD295A)@100
 柱: b×D=480×480(mm), 主筋 8-D25(USD685), フープ 3-D10(SD295A)@100
 直交梁: b×D=240×400(mm), 主筋 2-D22(SD345)上下, ストラップ 2-D10(SD295A)@200

(*1)柱梁接合部せん断耐力の梁曲げ降伏時接合部せん断力に対する比。接合部せん断耐力は靱性保証型指針¹⁾による。形状係数 κ は、全試験体で κ=0.4 とした。梁曲げ降伏時接合部せん断力は梁主筋降伏時引張力に等しいとした。
 (*2)柱曲げ降伏モーメントの梁曲げ降伏モーメントに対する比。梁には柱せん断力に等しい大きさの軸力が、柱には梁せん断力に等しい大きさの軸力が作用するとして算定。梁曲げ降伏モーメントは下式による。²⁾

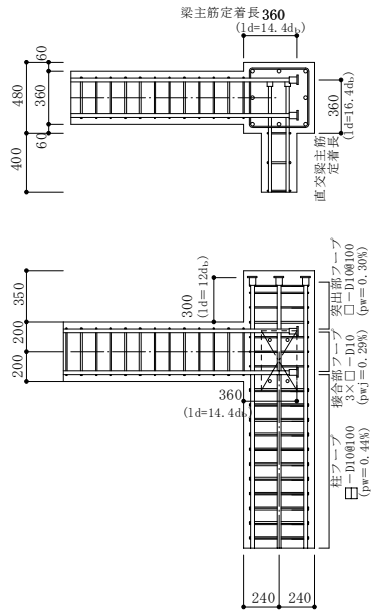
$$M_u = 0.8a_s\sigma_s D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c}\right) \quad (N \geq 0), \quad M_u = 0.8a_s\sigma_s D + 0.4ND \quad (N < 0)$$

*1 (株)堀江建築工学研究所 (正会員)

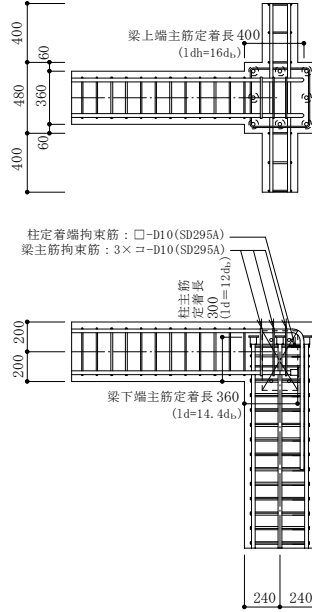
*2 横浜国立大学 大学院 工学府 社会空間システム学専攻

*3 横浜国立大学 大学院 工学研究院 准教授 博(工) (正会員)

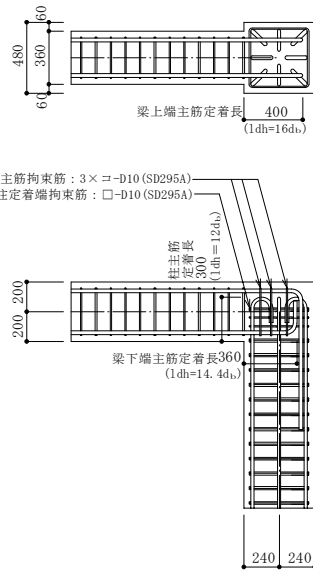
*4 横浜国立大学 大学院 工学研究院 教授 工博 (正会員)



FL-3 (柱突出形)



FL-6 (在来形)



FL-7 (在来配筋)

図-1 試験体配筋図

表-2 コンクリート材料試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁴ (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
Fc27	27.9	2.49	2.42
Fc45	55.0	3.16	3.69

表-3 鉄筋材料試験結果

		降伏点 (N/mm ²)	降伏歪 (%)	ヤング係数 ×10 ⁵ (N/mm ²)
D25	SD345	385	0.202	1.97
	SD490	524	0.281	1.96
	USD685	734	0.591	1.93
D22	SD345	405	0.216	1.93
D10	SD295A	355	0.185	1.92

2.3 加力方法

図-2 に加力装置図を示す。柱が水平になるように試験体をセットし、梁及び柱の反曲点を想定している位置をピン支持としている。柱の支持点は加力点が鉛直方向に移動しないようにジャッキを設け、水平方向にセットしたジャッキにより柱を押し引きすることで柱梁接合部にせん断力を与えるようにした。載荷スケジュールを図-3 に示す。尚、直交梁端部は自由端としている。

柱、梁、柱梁接合部の各変形成分は、接合部内に埋めこんだ 4 本のボルトで計測フレームを支持し計測し、柱梁接合部のせん断変形成分 δ_p は式(1)により算定した。

$$\delta_p = \left(1 - \frac{a}{2L} - \frac{b}{2H}\right) \cdot \gamma \cdot H \quad (1)$$

ただし、 a 、 b は接合部ボルト間の幅、高さ、 γ は接合部せん断変形角、 L 、 H はそれぞれ接合部中心から梁反曲点、柱反曲点までの距離である。

3. 実験結果

3.1. 破壊経過

(1) 在来形試験体

在来形試験体の代表例として FL-4 試験体の破壊経過を以下に示す。図-5 に FL-4 試験体のひび割れ模式図を示す。正負加力共、 $R=1/200$ に向かうサイクルで柱、梁の曲げひび割れが顕著となる。 $R=+1/100$ までに梁側の柱主筋定着部を通るひび割れ①が生じる。 $R=-1/100$ までに、柱中断筋定着部と柱曲げ圧縮領域とを結ぶ斜めひび割れ②と柱定着端を結ぶひび割れ③が生じる。 $R=+1/50$ のサイクルでは①のひび割れが口開き、柱梁接合部斜めひ

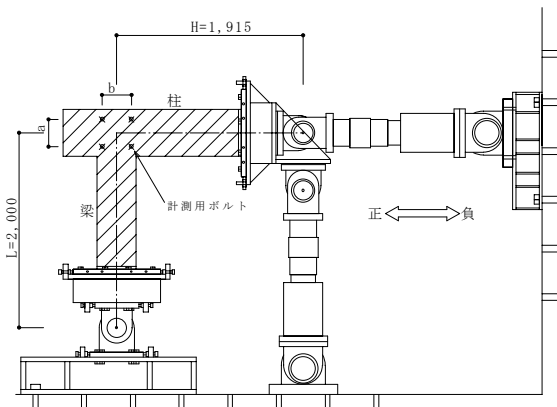


図-2 加力装置図

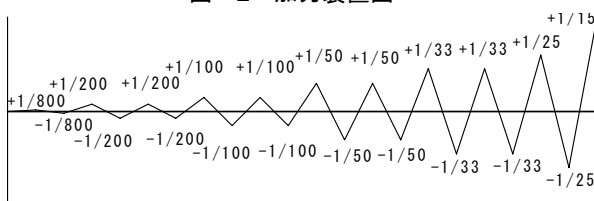


図-3 加力スケジュール

び割れ④が生じる。R=-1/50 に向かうサイクルで柱中段筋定着部を通る角度の浅い斜めひび割れ⑤が生じる。R=+1/33 に向かうサイクルでは①のひび割れが大きく口開くと共に⑥のひび割れが生じる。R=-1/33 のサイクルでは③、⑤のひび割れが拡幅する。その後の加力サイクルでは、正加力時は①、⑥のひび割れが大きく口開き、負加力時は梁端部（柱際）に生じたひび割れが大きく口開く。それ以外には顕著なひび割れの進展は無い。

FL-4 に対して片側にのみ直交梁を設けた FL-5 試験体は、直交梁の無い面での観察ではひび割れの進展過程は FL-4 と大差無かった。FL-4 に対して直交梁を両側に設けた FL-6 では、直交梁があるため、柱梁接合部のひび割れの進展は殆ど見られない。①に相当するひび割れは FL-6 でも見られたが、このひび割れが顕著になったのは R=+1/33 に向かうサイクルであり、FL-4 と比較して発生時期が明らかに遅い。

(2) 在来配筋試験体 FL-7

柱主筋、梁主筋とも折曲げ定着とした FL-7 試験体の破壊経過を以下に示す。図-6 に FL-7 試験体のひび割れ模式図を示す。R=1/200 までは FL-4 試験体と同様、柱及び梁の曲げひび割れが発生する程度で、柱梁接合部には顕著なひび割れは発生しない。R=-1/100 に向かうサイクルで、梁側の柱主筋に沿ったひび割れ①及び梁側の柱主筋定着部から柱曲げ圧縮領域を結ぶ斜めひび割れ②が生じる。R=-1/50 に向かうサイクルで①のひび割れが進展、柱頂部に達する(③のひび割れ)と共に、②に概ね平行なひび割れ④が生じる。R=+1/50 の2回目のサイクル以降は正加力時は③が大きく口開く。正加力時の柱梁接合部斜めひび割れ⑤は R=+1/33 に向かうサイクルで生じた。R=-1/33 に向かうサイクルで①のひび割れが梁側に進展⑥し、大きく口開く。これ以降、負加力時は⑥が大きく口開き、他のひび割れの発生は顕著では無い。

(3) 柱突出形試験体

柱突出形試験体の代表例として FL-1 試験体の破壊経過を以下に示す。図-4 に FL-1 試験体のひび割れ模式図を示す。正負加力共、在来形試験体と同様に R=1/200 に向かうサイクルで柱、梁の曲げひび割れが顕著となる。正加力では R=+1/100 に向かうサイクルで柱梁接合部に斜めひび割れ①が発生する。負加力時も R=-1/100 に向かうサイクルで柱梁接合部に斜めひび割れ②が発生する。これ以降、変形を大きくしても柱梁接合部には顕著なひび割れの進展は見られず、梁端部（柱際）に生じた曲げひび割れが口開くのみである。

FL-1 に対し、梁主筋鋼種及びコンクリート強度を高めた FL-2 試験体の破壊経過は FL-1 とほぼ同様である。ただし、柱梁接合部斜めひび割れは R=1/50 に向かうサイクルで発生しており、FL-1 試験体に比べて発生時期が遅

かった。

FL-1 に対して片側に直交梁を設けた FL-3 試験体の破

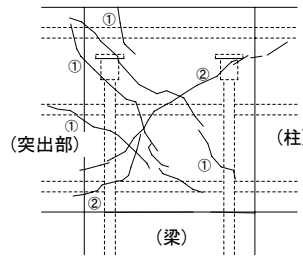


図-4 FL-1 ひび割れ模式図

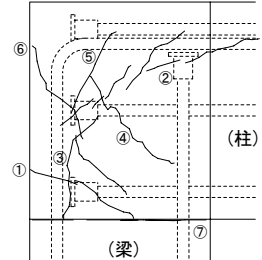


図-5 FL-4 ひび割れ模式図

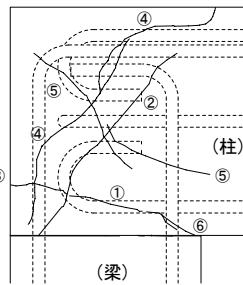


図-6 FL-7 ひび割れ模式図



写真-1 FL-1 破壊状況 (R=±1/25)

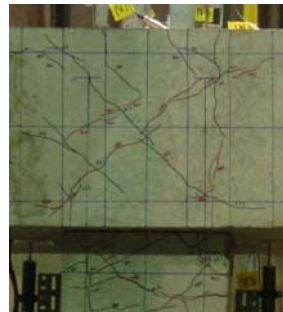


写真-2 FL-2 破壊状況 (R=±1/25)

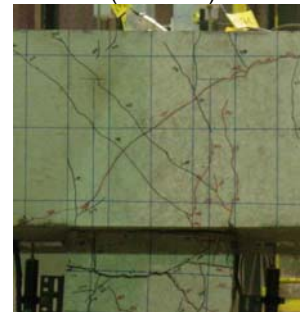


写真-3 FL-3 破壊状況 (R=±1/25)

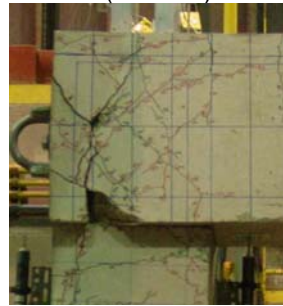


写真-4 FL-4 破壊状況 (R=±1/25)

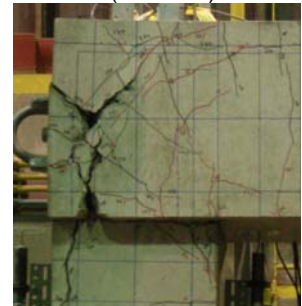


写真-5 FL-5 破壊状況 (R=±1/25)



写真-6 FL-6 破壊状況 (R=±1/25)

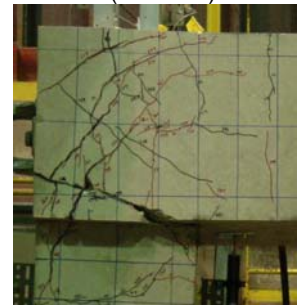


写真-7 FL-7 破壊状況 (R=±1/25)

壊経過は、直交梁の取り付けかない面での観察ではひび割れの進展過程はFL-1と大差無かった。

写真-1～写真-7に、 $R=\pm 1/25$ 加力終了時の柱梁接合部近傍のひび割れ発生状況を示す。尚、写真-1～写真-7は図-4～図-6と同様に写真右方に柱、下方に梁が接続している状況である。

3.2 復元力特性

(1) 在来形試験体

FL-4 試験体の柱せん断力(Q_c)－層間変形角(R)関係を図-10に示す。正加力側、負加力側共に、 $R=1/100$ を超えたあたりで梁主筋が降伏した。正加力側は $R \approx 1/65$ で最大耐力に達し、その値は軸力を考慮して算定した梁曲

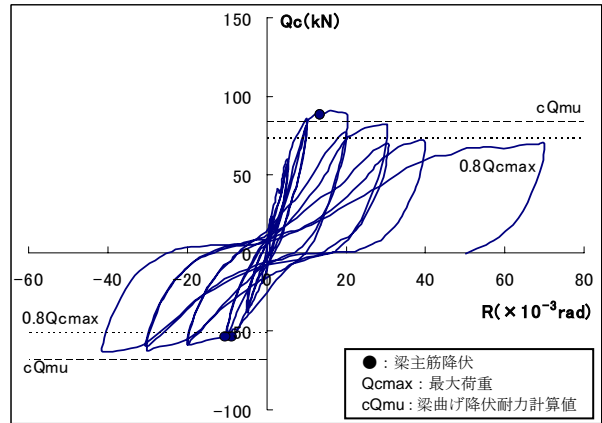


図-10 FL-4 試験体荷重－変形関係

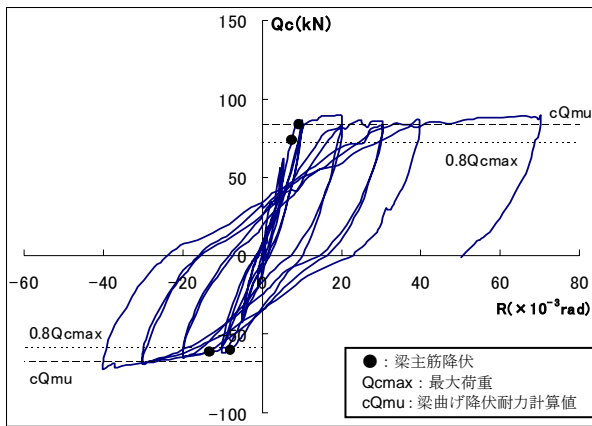


図-7 FL-1 試験体荷重－変形関係

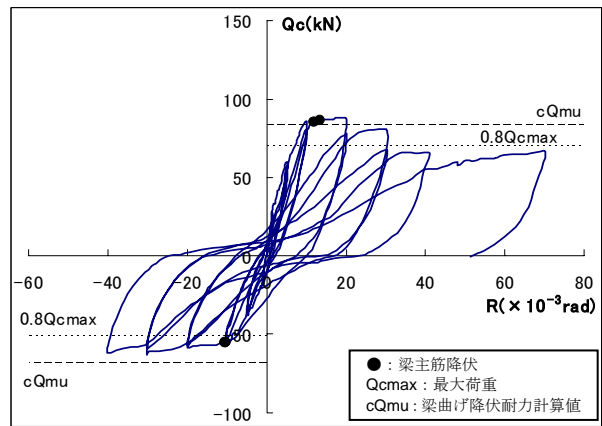


図-11 FL-5 試験体荷重－変形関係

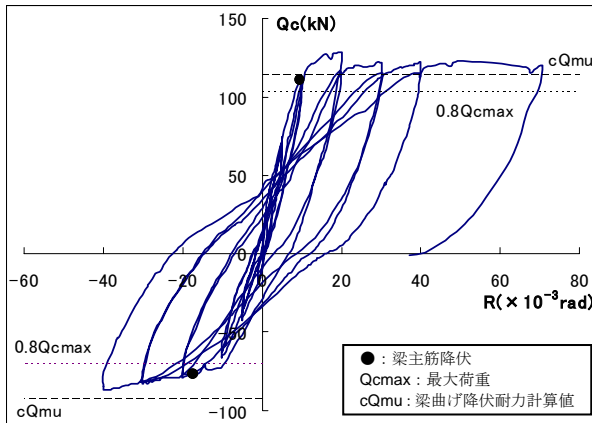


図-8 FL-2 試験体荷重－変形関係

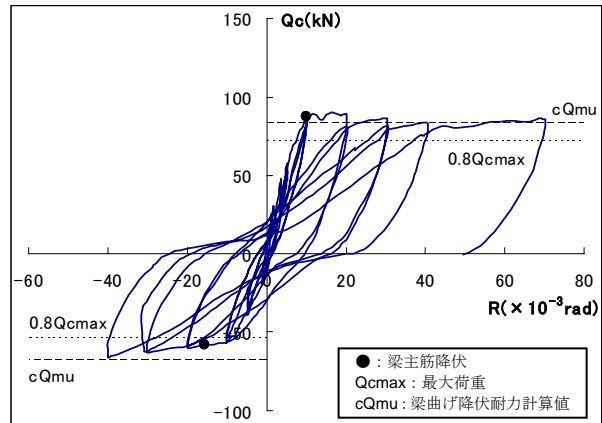


図-12 FL-6 試験体荷重－変形関係

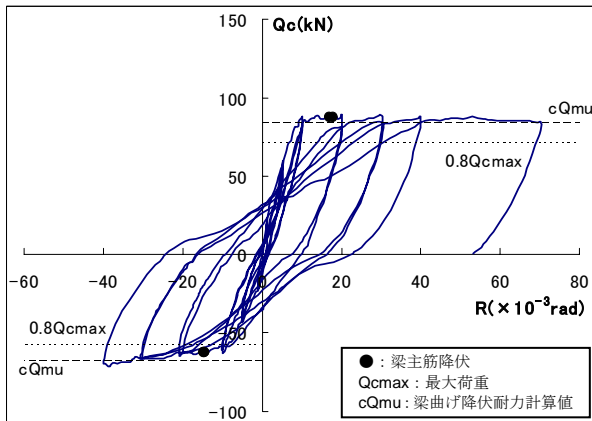


図-9 FL-3 試験体荷重－変形関係

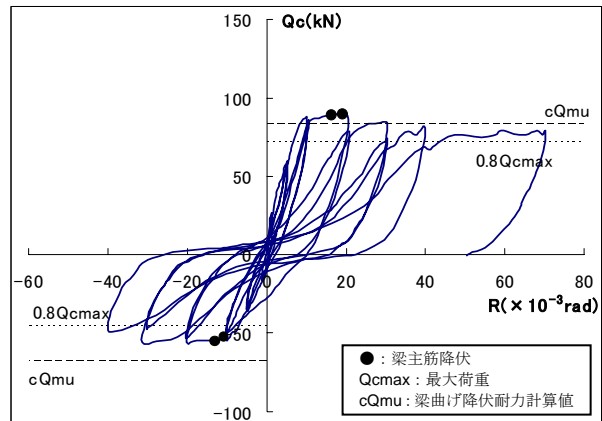


図-13 FL-7 試験体荷重－変形関係

げ降伏時せん断力計算値を上回っている。最大耐力以降、徐々に耐力が低下するが、最大耐力 80% 低下時の変形角は 1/25 程度であった。一方、負加力側は $R=1/25$ まで耐力が漸増しているが、梁曲げ降伏時せん断力計算値には至らない。

FL-4 に対し片側に直交梁を設けた FL-5 試験体の荷重-変形関係は FL-4 と大差ない。両側に直交梁を設けた FL-6 試験体については、正加力側は载荷終了まで耐力低下は見られなかった。

柱主筋、梁主筋とも折曲げ定着とした FL-7 は FL-4 と概ね同様の荷重-変形関係を示したが、最大耐力以降の耐力低下の度合いは、正加力側で FL-4 よりも緩やかであり、負加力側は FL-4 よりも著しい。

(2) 柱突出形試験体

FL-1 試験体の柱せん断力(Q_c)-層間変形角(R)関係を図-7 に示す。在来形に比べて安定したループを描いており、正加力側、負加力側共に、载荷終了まで耐力低下は生じず、最大耐力は梁曲げ降伏時の計算値を上回っている。

FL-1 に対して直交梁を片側に設けた FL-3 試験体は、FL-1 と同様の性状を示した。

FL-1 に対して、梁主筋鋼種、コンクリート強度を高めた FL-2 試験体も FL-1 と同様に安定した履歴を示した。

3.3 変形成分割合

図-14 に FL-1, FL-4, FL-6, FL-7 各試験体について、柱変形成分割合、梁変形成分割合、柱梁接合部変形成分割合の推移を比較して示す。図中、横軸に全体変形を、縦軸に各変形成分割合を示している。いずれの試験体も加力初期から大変形時まで梁の変形成分割合が非常に大きい。

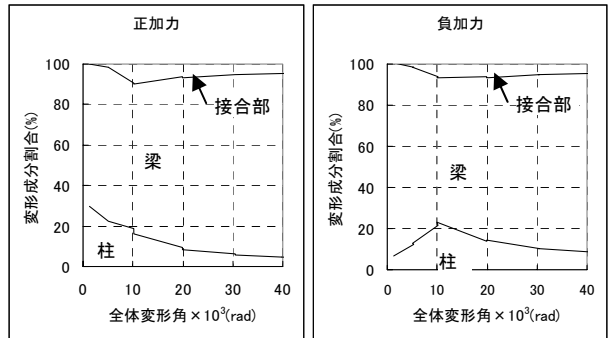
定着部ディテールが異なる以外、形状や配筋状況の等しい FL-4 と FL-7 は変形成分割合の推移も類似している。在来形で直交梁のない FL-4 及び FL-7 の変形成分割合を、柱突出形の FL-1 や両側直交梁付の FL-6 に比較すると、柱梁接合部変形成分割合が大きい。柱を突出させる、または直交梁を付けるなどして柱梁接合部にコンクリートボリュームを付加することにより柱梁接合部の変形、損傷を低減することが可能であると思われる。

3.4 梁主筋歪

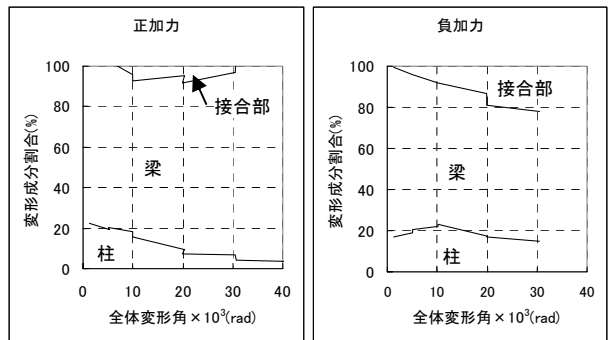
図-15 に FL-1, FL-4, FL-6 各試験体の梁主筋歪の推移を比較して示す。図中、配筋図に黒塗りで歪ゲージ位置を示している。グラフのプロット位置と配筋図の歪ゲージ位置は対応しており、グラフ中の右側 2 つの計測結果が柱梁接合部内での計測結果である。

各試験体とも $R=1/100$ から $R=1/50$ の間で梁主筋が降伏するが、 $R=1/50$ 程度の変形までは、柱面近傍に歪が集積し、柱面近傍以外の歪ゲージの値は概ね弾性範囲であ

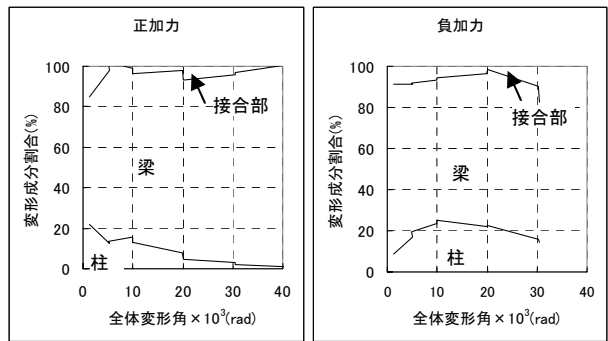
ることが分かる。また、 $R=1/50$ 程度の変形までは、柱梁接合部内での歪分布に歪勾配があり接合部内で付着が確保されているものと思われるが、FL-4 試験体の上端主筋については $R=1/100$ で殆ど歪勾配が無くっており、柱梁接合部内で付着劣化が生じているものと思われる。



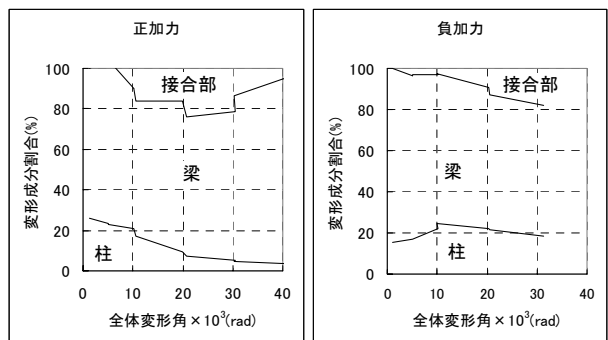
(a)FL-1 (柱突出形) 変形成分割合の推移



(b)FL-4 (在来形) 変形成分割合の推移



(c)FL-6 (両側直交梁付) 変形成分割合の推移



(d)FL-7 (在来配筋) 変形成分割合の推移

図-14 変形成分割合の推移

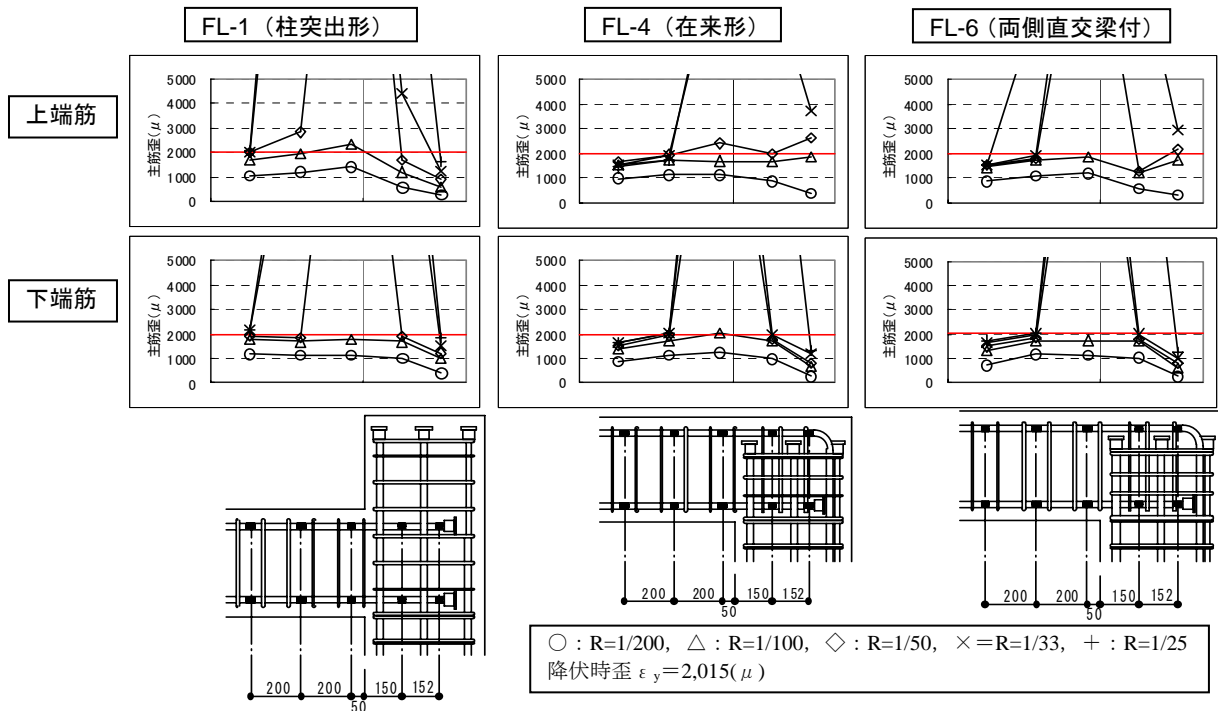


図-15 梁主筋歪の推移

表-4 最大耐力及び最大耐力時変形一覧

試験体名	正加力				負加力			
	最大耐力 ^{*1} Qcmax(kN)	計算値 ^{*2} cQmu(kN)	最大耐力時 変形角 ×10 ³ (rad)	R80 ^{*3} ×10 ³ (rad)	最大耐力 ^{*1} Qcmax(kN)	計算値 ^{*2} cQmu(kN)	最大耐力時 変形角 ×10 ³ (rad)	R80 ^{*3} ×10 ³ (rad)
FL-1	90.0	83.9	19.1	≥66	72.2	67.7	40.1	≥40
FL-2	129.0	114.3	19.5	≥66	87.1	92.2	40.0	≥40
FL-3	89.0	83.9	29.7	≥66	71.1	67.7	38.7	≥40
FL-4	91.3	83.9	16.2	38.0	62.9	67.7	41.4	≥40
FL-5	88.1	83.9	18.5	37.5	63.1	67.7	30.4	≥40
FL-6	90.3	83.9	16.2	≥66	65.9	67.7	39.7	≥40
FL-7	90.1	83.9	18.2	≥66	56.3	67.7	20.3	≥40

*1: 柱せん断力で表示, *2: 梁曲げ降伏時柱せん断力計算値, *3: 最大耐力80%低下時変形角

柱の突出や直交梁の無い FL-4 試験体の上端主筋はコンクリートボリュームによる拘束が小さいため、FL-1 や FL-6 に比較して早期に梁主筋の付着が劣化したものと思われる。

4. まとめ

表-4 に最大耐力及び最大耐力時変形の一覧を示す。

靱性保証型設計指針による柱梁接合部せん断設計式を用いて梁曲げ降伏が先行するように計画した試験体の静的加力実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- いずれの試験体も計画通り梁曲げ降伏が生じ、梁の変形が全体変形に対して支配的となった。ただし、直交梁の取り付けがない在来形試験体は大変形時に耐力低下を生じた。
- 両側に直交梁を設けることで在来形試験体の復元力特性は改善した。

柱突出形の試験体は在来形に比較して安定した履歴曲線を描いた。柱を梁上部に突出させれば、最上階梁上端主筋にも機械式定着を適用できる可能性がある。

謝辞

本研究は(財)日本建築防災協会に設置された機械式定着工法研究委員会の研究プロジェクトの一環として行われたものである。また、鉄筋などの材料を東京鉄鋼(株)より提供いただいた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型設計指針・同解説, pp.245, 1997.7
- 2) 2007年版建築物の構造関係技術基準解説書, pp.626, 2007