論文　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

井上　寿也[*1]・益尾　潔[*2]・岡村　信也[*1]

要旨：機械式定着工法による中間階柱と外端梁からなるト形部分架構については，構造性能が解明されつつある。これに対して，最上階のL形およびT形部分架構の終局耐力と変形性能については，未解明な点が多く，現在のところ，同接合部の配筋詳細の設計方法が定まっていない。本論文では，L形およびT形接合部の合理的な設計方法の確立を目指し，梁曲げ降伏先行型のL形部分架構および柱曲げ降伏先行型のT形部分架構の終局耐力と変形性能を実験的に明らかにした。

キーワード：機械式定着，L形・T形接合部，曲げ降伏先行型，終局耐力，変形性能

1.　はじめに

機械式定着工法による中間階柱と外端梁からなるト形部分架構については，構造性能が解明されつつある[1)]。一方，T形およびL形接合部の柱主筋定着部は，通常，柱断面(接合部水平断面)の外周部に配置され，柱梁接合部に接続する梁幅は柱幅よりも小さい。これらに起因し，T形およびL形接合部での柱主筋定着部ならびにL形接合部での梁上端主筋定着部の応力状態は，ト形接合部での梁主筋定着部の場合と異なる。

本論文では，接合部に接続する柱または梁の曲げ降伏後の変形性能を調べることに主眼を置き，ねじ節鉄筋を用いた機械式定着工法による梁曲げ降伏先行型のL形部分架構と柱曲げ降伏先行型のT形部分架構の終局耐力と変形性能を実験的に明らかにする。

本実験計画では，部分架構試験体の限界層間変形角実験値 R_u が1/25以上となることを目標にした。この値は，文献(2)に示される終局限界状態で保証すべき梁の部材変形角の目安値(1/50)の2倍である。ただし，R_u は，耐力が最大耐力の80%に低下した時の値と定義した。

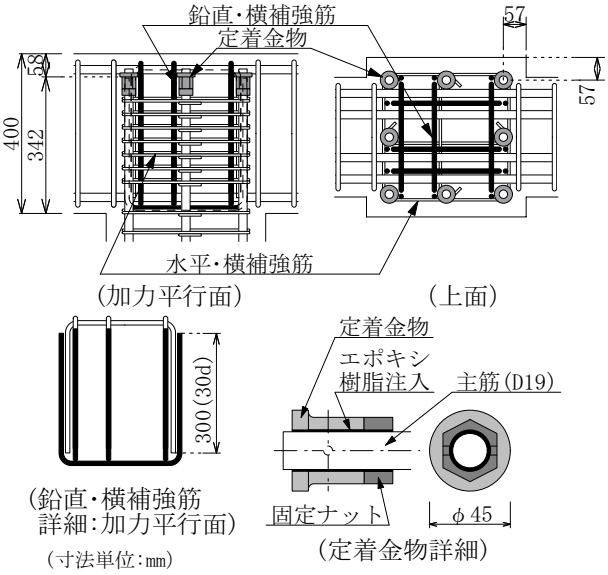


図-1　T形接合部の配筋詳細

表-1　T形部分架構の実験計画

試験体	F_c N/mm^2	柱 主筋	柱 横補強筋 [p_w]	梁 主筋	梁 横補強筋 [p_w]	接合部水平・横補強筋 配筋	接合部水平・横補強筋 p_{jwh}	Q_{pu}/Q_{cu}	$_cQ_{cu}/_cQ_{gu}$
T345-30-6	33	8-D19 SD345	3-S6@50 [0.48%]	4-D19 SD295A	2-S10@90 [0.53%]	3-S6(7組)	0.53%	1.66	0.64
T345-30-4						3-S6(5組)	0.38%		
T490-60-6	55	8-D19 SD490	3-S6@35 [0.68%]	4-D19 SD390	2-S10@60 [0.79%]	3-S6(7組)	0.53%	1.64	0.63
T490-60-4						3-S6(5組)	0.38%		

【共通因子】　F_c：コンクリートの目標圧縮強度
柱断面：400×400mm，梁断面：300×400mm，柱主筋：p_g=1.44%，梁主筋：p_t=1.06%
接合部鉛直・横補強筋：2-D10(3組)，SD295A，p_{jwv}=0.37%，割フープ形式
接合部水平・横補強筋および柱,梁の横補強筋：KSS785(溶接閉鎖型)
Q_{pu}，Q_{cu}，$_cQ_{cu}$，$_cQ_{gu}$の定義：本文2.1節に示す。

$p_{jwh}= n_h \cdot a_{wh}/(B_c \cdot j_{tg})$，　$p_{jwv}= n_v \cdot a_{wv}/(B_c \cdot j_{tc})$
B_c:柱幅，n_i，a_{wi}:横補強筋の組数と1組の断面積（i=h:水平方向，i=v:鉛直方向）
j_{tg}:梁の上下主筋の重心間距離，j_{tc}:最外縁柱主筋間距離

*1 (財)日本建築総合試験所　構造部構造物試験室　工修　(正会員)
*2 (財)日本建築総合試験所　構造部長　工博　(正会員)

2. 実験計画

2.1 T形部分架構

試験体は，**表-1**，**図-1**に示すように，縮小率が約1/2のT形部分架構である(**図-2**参照)。実験因子は，コンクリートの目標圧縮強度，柱主筋の鉄筋種別と柱梁接合部の水平・横補強筋量であり，試験体数は4体である。

本実験に供した柱梁接合部には，いずれの試験体も，終局耐力の確保と現場での配筋工事の施工性を考慮し，2つのU形鉄筋を組み合わせた割フープ形式の鉛直・横補強筋を配置した。

本実験では，接合部せん断余裕度Q_{pu}/Q_{cu}を1.65程度とした。Q_{cu}およびQ_{pu}は，文献(3)に示す式(1)および式(2)より求めた。

$$Q_{cu} = \min\ (_cQ_{cu},\ _cQ_{gu}) \quad (1)$$

$$Q_{pu} = \min\ (Q_{puh},\ Q_{puv}) \quad (2)$$

ここに，$_cQ_{cu}$，$_cQ_{gu}$は柱および梁の曲げ終局耐力時の柱せん断力，Q_{puh}，Q_{puv}は，水平および鉛直方向の接合部せん断耐力時の柱せん断力である。Q_{puh}，Q_{puv}は，靱性保証指針[2)]に基づいた評価式である。ただし，文献(3)と異なる点は，鉛直･横補強筋で柱梁接合部を補強したことを考慮して，接合部の形状による係数をL形では0.45，T形では0.7としたことである。また，梁主筋の鉄筋種別は，柱と梁の曲げ終局耐力時の柱せん断力の比率(以下，柱梁耐力比と呼ぶ) $_cQ_{cu}/_cQ_{gu}$が約60%強となるように設定した。

使用材料の強度試験結果を**表-2**に，載荷装置を**図-2**に示す。載荷履歴は，目標層間変形角Rが(0.5,1,2,3,4,6)/100rad.の正負2サイクルずつの繰り返し載荷およびその後の正加力方向への単調載荷とした。層間変形角Rの定義は**図-2**中に示す。

2.2 L形部分架構

試験体は，**表-3**，**図-3**に示すように，縮小率が約1/2のL形部分架

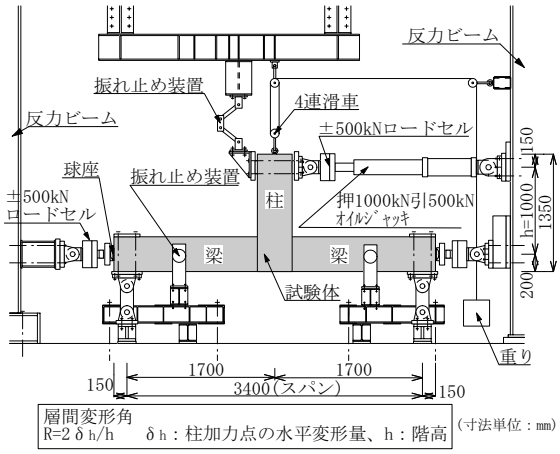
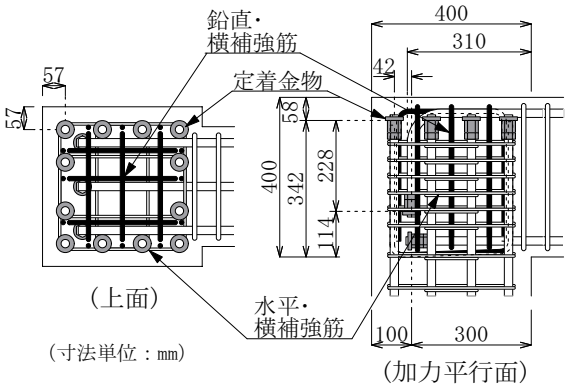


図-2　T形部分架構の実験装置



鉛直・横補強筋および定着金物の詳細は，T形接合部と同じ

図-3　L形接合部の配筋詳細

表-2　使用材料の強度試験結果

(a) コンクリート

強度種別	σ_B (N/mm^2)	ε_{co} (×10^{-3})	E_c (kN/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
Fc33	37.3	2.41	28.2	2.98
Fc55	57.0	2.40	34.0	4.22

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(種別)		σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	伸び (%)
主筋	D19	SD295A	322	470	29
		SD345※	377	543	25
		SD390	446	610	22
		SD490※	513	703	19
横補強筋	S6	KSS785	929	1177	11
	S10		1058	1189	9
	D10	SD295A	344	475	28

1) σ_y：降伏点，σ_u：引張強度
2) ※を付した鉄筋は、ねじ節鉄筋を示す。

表-3　L形部分架構の実験計画

試験体	Fc N/mm^2	梁 主筋 配筋	梁 主筋 p_t	梁 横補強筋 [p_w]	接合部水平・横補強筋 配筋	接合部水平・横補強筋 p_{jwh}	Q_{pu}/Q_{cu} 正	Q_{pu}/Q_{cu} 負	$_cQ_{cu}/_cQ_{gu}$ 正	$_cQ_{cu}/_cQ_{gu}$ 負
L345-30-3	33	3-D19 SD345	0.80%	2-S10@60 [0.79%]	4-S6(6組)	0.60%	1.25	1.80	2.05	2.33
L345-30-3w					4-S6(4組)	0.40%				
L345-60-4	55	4-D19 SD345	1.06%	4-S10@100 [0.95%]	4-S6(6組)	0.60%	1.26	1.82	1.54	1.75
L490-60-3		3-D19 SD490	0.80%	3-S10@80 [0.89%]			1.23	1.78	1.50	1.71

【共通因子】　F_c：コンクリートの目標圧縮強度
柱断面：400×400mm，梁断面：300×400mm
柱主筋：12-D19(SD345,p_g=2.15%)，柱横補強筋：4-S6@80(p_w=0.40%)
接合部鉛直･横補強筋：2-D10(3組)，SD295A，p_{jwv}=0.37%，割フープ形式
接合部水平･横補強筋および柱,梁の横補強筋：KSS785(溶接閉鎖型)
Q_{pu}，Q_{cu}，$_cQ_{cu}$，$_cQ_{gu}$の定義：本文2.1節に示す。
p_{jwh}およびp_{jwv}の定義は、T形接合部と同じ。

構であり，柱，梁の断面寸法は，T形部分架構の場合と同じである(**図 -4** 参照)。実験因子は，コンクリートの目標圧縮強度，梁引張主筋量，梁主筋の鉄筋種別および接合部の水平・横補強筋量であり，試験体数は4体である。

接合部せん断余裕度 Q_{pu}/Q_{cu} は，正加力時の値を1.25程度とした。正加力時は，柱せん断力に伴って発生する梁軸力が圧縮の場合(L形が閉じる場合)，負加力時は，その逆の場合(L形が開く場合)である。柱主筋量は，柱梁耐力比がいずれも1以上となるように設定した。載荷装置を**図 -4** に示す。使用材料および載荷履歴は，T形部分架構と同じである。Rの定義は**図 -4** 中に示す。

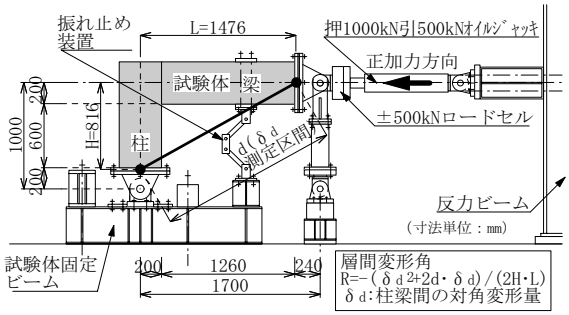
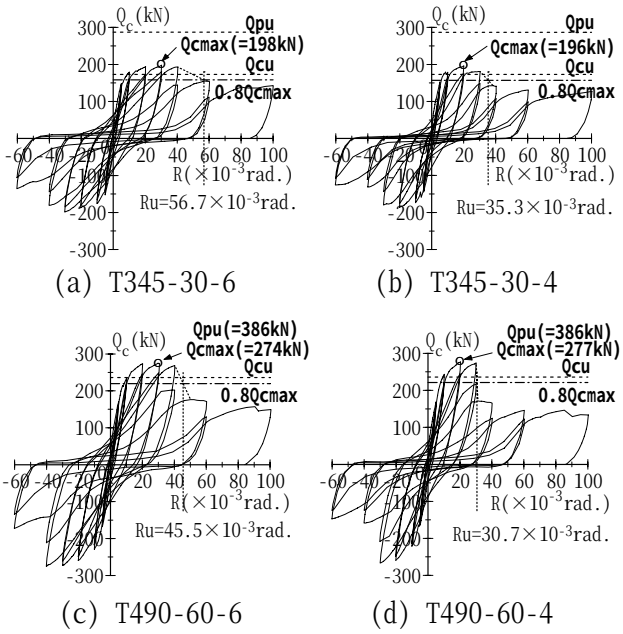


図 -4　L形部分架構の実験装置



(a) T345-30-6　(b) T345-30-4

(c) T490-60-6　(d) T490-60-4

図 -5　T形架構試験体の Qc − R 関係

3.　T形部分架構の実験結果および考察

3.1　破壊性状

Qc − R 関係を**図 -5**，代表的な試験体の破壊状況を**写真 -1** に示す。Qc は柱のせん断力，R は層間変形角であり，**図 -5** 中には，限界層間変形角 Ru を併記した(Ru の定義：1章参照)。

各試験体ともに，柱端部付根での柱主筋の引張降伏後，同位置の曲げひび割れ幅が著しく拡大するとともに，柱梁接合部のせん断ひび割れが引張側柱主筋の定着金物位置に向かって進展し，R=2/100～3/100rad.時に最大耐力に達した。

Ru 到達前後には，引張側柱主筋の定着金物位置から水平方向にひび割れが進展するとともに，同定着金物近傍で柱断面隅角部のかぶりコンクリートが剥離した。これらの現象は，柱梁接合部からの柱主筋の抜け出しの進展とともに背面側への押し出しを伴って発生した。以上より，各試験体ともに，T形接合部は，**図 -6** に示した抵抗機構を形成し，Ruは，柱主筋の引張降伏後の定着破壊によって決定したと考えられる。

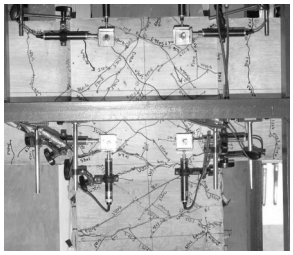


写真 -1　試験体 T490-60-6 の R=4/100rad. 時の状況

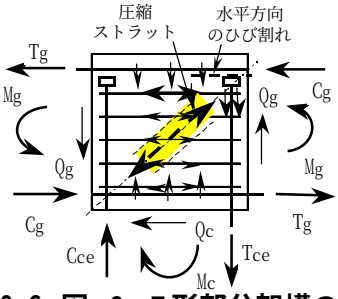


図 -6　T形部分架構の抵抗機構

3.2　終局耐力と変形性能

図 -5 中には，Qcu および Qpu を併示した。これによると，各試験体ともに，終局耐力計算値は，柱の曲げ終局耐力によって決まり，最大耐力実験値に対して妥当に評価された。また，Qpu/Qcuが同じ場合，水平・横補強筋比 p_{jwh} が小さいと，Ru が減少した。すなわち，p_{jwh} が0.53%の試験体では，実験計画で設定したRu目標値(4/100rad.)を上回ったのに対し，p_{jwh} が0.38%の試験体では，Ru 目標値(4/100rad.)を下回った。

3.3　柱主筋のひずみ

引張側隅角部柱主筋のひずみ ε_{Ci} と R の関係を**図 -7** に示す。これによると，柱端部付根のひずみ ε_{C4} は，著しい塑性ひずみが生じ，定着金物直下のひずみ ε_{C3} は，Ru 前後で降伏ひずみ度

に到達した。すなわち，柱主筋のひずみは，柱端部付根が降伏した後，塑性ひずみが急増し，これに伴い，接合部内の柱主筋の塑性化が進行するとともに，付着劣化が生じたと推察される。

3.4　柱梁接合部の水平・横補強筋のひずみ

Fc55シリーズ試験体における柱梁接合部の水平・横補強筋(外周筋)のひずみε_{Hi}とRの関係を**図-8**に示す。これによると，両試験体ともに，ε_{Hi}は，Ru到達時点では$1.5\sim2.5\times10^{-3}$程度に留まり，Ru以降，柱主筋定着部の定着破壊の進行に伴い，定着金物直下の外周筋のひずみε_{H1}が急増して$2.5\sim3\times10^{-3}$程度に達した。

4.　L形部分架構の実験結果および考察

4.1 破壊性状

Qc－R関係を**図-9**，代表的な試験体の破壊状況を**写真-2**に示す。Qcは柱のせん断力，Rは層間変形角であり，**図-9**中には，限界層間変形角Ruを併記した(Ruの定義：1章参照)。

(1) 正加力時

各試験体ともに，梁端部付根での梁上端主筋の引張降伏後，同位置の曲げひび割れ幅が著しく拡大するとともに，柱梁接合部のせん断ひび割れも進展し，R=2/100～6/100rad.時に最大耐力に達した。次に，R=6/100rad.の段階またはそれ以降において，梁端付根での曲げひび割れ幅の拡大に伴い，梁端側の柱主筋の定着金物近傍の柱断面隅角部コンクリートが剥落した。この曲げひび割れ幅の拡大は，上記の柱主筋定着部が負加力時に引張力を受けた際に，定着耐力を損なう要因になると考えられる。

(2) 負加力時

各試験体ともに，梁端部付根での梁下端主筋の引張降伏および柱梁接合部のせん断ひび割れ発生後，引張側柱主筋の定着金物位置での水平方向の

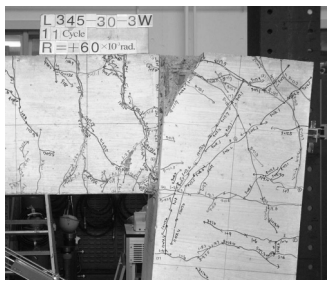


写真-2　試験体L345-30-3wのR=6/100rad.時の状況

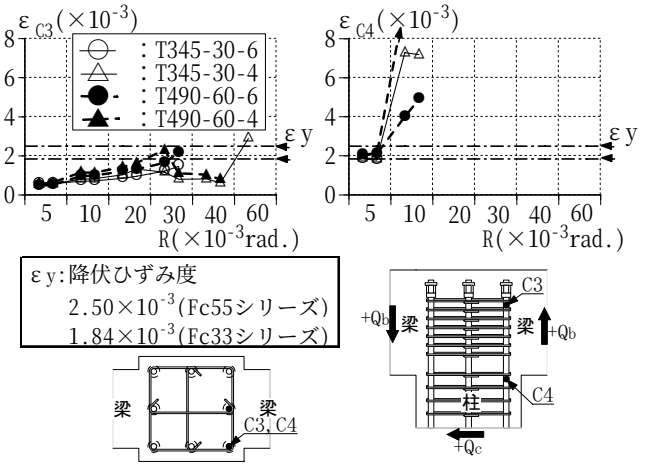


図-7　T形架構試験体のεCi－R関係

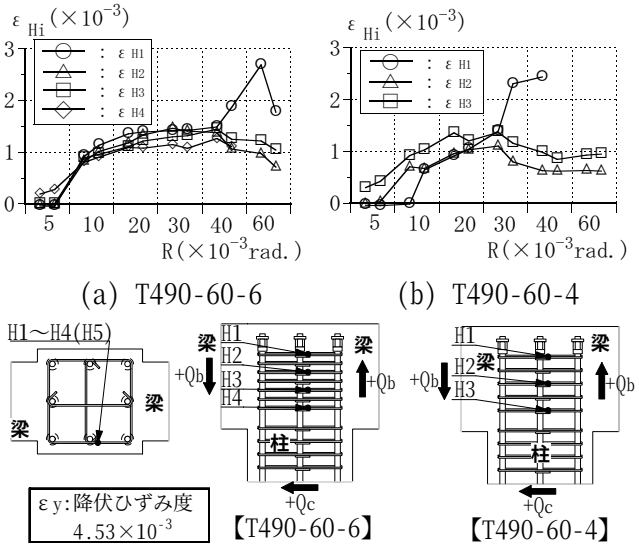


図-8　T形架構試験体のεHi－R関係

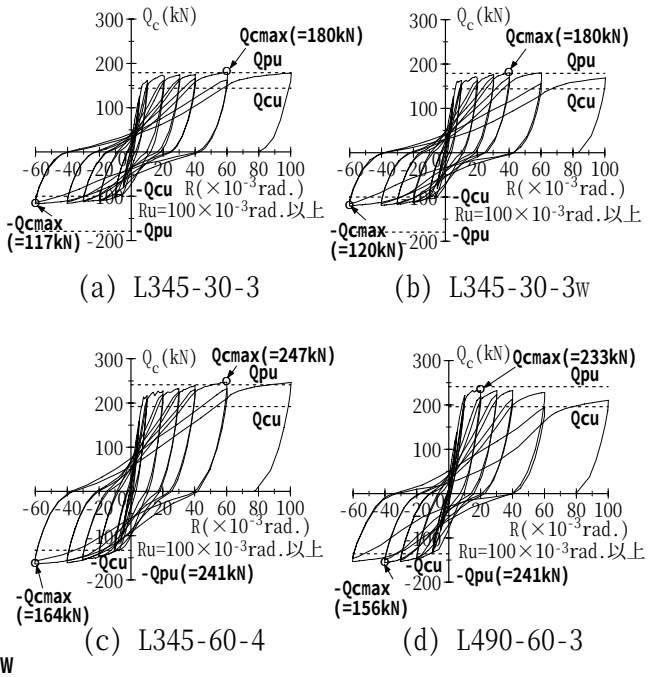


図-9　L形架構試験体のQc－R関係

ひび割れが発生した。次に，後者のひび割れが進展し，R=-3/100～-4/100rad.時に柱梁接合部上面のかぶりコンクリートが剥離するとともに，上記の水平方向のひび割れが圧縮側柱主筋に向かって円弧状に進展した。

4.2　終局耐力と変形性能

図-9中には，Q_{pu}およびQ_{cu}を併記した。これによると，各試験体の両加力時ともに，終局耐力計算値は,梁の曲げ終局耐力によって決まり，最大耐力実験値に対して妥当に評価された。また，いずれの試験体も，R_uは10/100rad.以上となり，本実験で与えたQ_{pu}/Q_{cu}のもとでは，十分な変形性能を示した。

4.3　梁主筋のひずみ

正加力時および負加力時の引張側梁主筋のひずみε_{Bi}とRの関係を**図-10**に示す。これによると，梁上端主筋のひずみは，梁端部付根(危険断面)のε_{B4}，折曲げ起点のε_{B3}の順に降伏ひずみ度に達し，R=6/100rad.時には，折曲げ後の余長部先端の定着金物近傍のε_{B1}も降伏ひずみ度の前後までに達した。梁下端主筋のひずみは，梁端部付根(危険断面)のε_{B9}が降伏ひずみ度に達した後，定着金物近傍のε_{B9}が，R=4/100rad.の段階で降伏ひずみ度に達した。

上下端主筋の上記ひずみの推移は，正加力時または負加力時に，梁端部付根で梁上下主筋が降伏した後，塑性ひずみが急増し，これに伴い，接合部内の梁主筋の塑性化が進行するとともに，付着劣化が生じたためと推察される。

したがって，梁上端主筋の定着力は，折曲げ部の支圧抵抗および折曲げ終点以降での余長部に沿う付着抵抗と定着金物近傍での支圧抵抗によって保持されると考えられる。ただし，いずれの試験体も，折曲げ終点でのひずみは，降伏ひずみ度の前後までに達しているので，終局限界状態では，梁上端主筋の引張降伏強度に相当する定着力は，後者の付着抵抗と支圧抵抗によって保持させる必要があると考えられる。

4.4　柱主筋のひずみ

正加力時および負加力時の引張側柱主筋のひずみε_{Ci}とRの関係を**図-11**に示す。これによると，両加力時ともに，柱主筋の引張降伏は，Fc33シリーズの試験体では認められないのに対して，Fc55シリーズの試験体では柱端部付根で発生し，柱梁接合部への入力せん断力が大きいL345-60-4の場合，正加力時に著しい塑性ひずみが生じた。

以上より、いずれの試験体も、両加力時ともに、

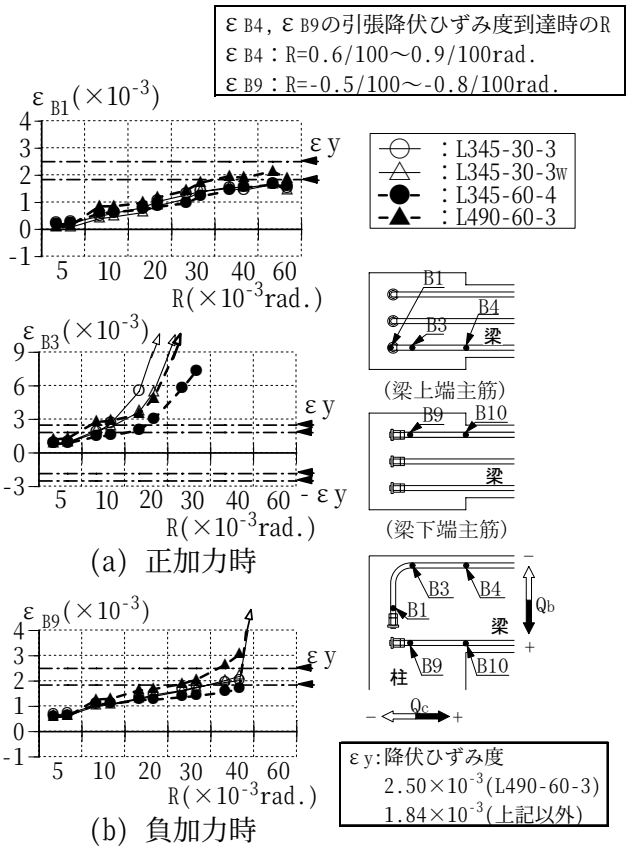


図-10　L形架構試験体のε_{Bi}－R関係

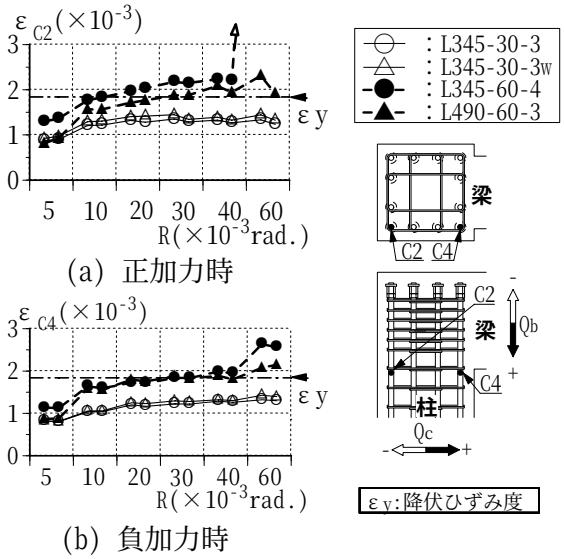


図-11　L形架構試験体のε_{Ci}－R関係

梁端部付根での梁主筋の引張降伏に伴い梁が曲げ降伏したが、柱梁耐力比が1.5程度では、層間変形角の増大に伴い、柱主筋も柱端部付根で引張降伏し、柱梁接合部内に柱主筋の塑性化が進行すると言える。

4.5　柱梁接合部の水平・横補強筋のひずみ

試験体L345-30-3wにおける柱梁接合部の水平・横補強筋(外周筋)のひずみε_{Hi}とRの関係を**図-12**に示す。これによると，正加力時には，柱軸に沿うε_{Hi}はいずれも同程度であり，負加力時には，上側のひずみε_{H1}は，下側に比べて大きくなる傾向がある。また，L345-30-3w以外の試験体についても同様の性状を示した。

これらのひずみは，**図-13**に示す抵抗機構の形成に伴って発生したと推察される。この場合，正加力時の抵抗機構は，下記の2つを考えている。

① 梁上端主筋と出隅側の柱主筋がそれぞれ引張力を受け，両者の重ね部に重ね継手と同様の抵抗機構が形成される。

② 梁上端主筋の折り曲げ部とL形接合部入隅の圧縮域との間に圧縮ストラットが形成される。

負加力時には，梁端部付根上端と柱端部付根圧縮域の間に圧縮ストラットが形成される。ただし，負加力時の引張側柱主筋の定着金物近傍では，正加力時に隣接の梁端部付根で曲げひび割れ幅が著しく拡大し，負加力時に定着金物位置のコンクリートに損傷が集中するため，支圧応力の条件が厳しく，定着金物直下のひずみが増大すると考えられる。すなわち，定着金物直下の水平・横補強筋は，上記の損傷を遅延させる効果を有すると考えられる。

5.　まとめ

「T形部分架構」

(1)いずれの試験体も，終局耐力は，柱の曲げ終局耐力によって決定し，最大耐力実験値に対して妥当に評価された。

(2)接合部せん断余裕度(Q_{pu}/Q_{cu})が同じ場合でも，柱梁接合部の水平・横補強筋比p_{jwh}が小さいと，限界層間変形角が減少した。すなわち，p_{jwh}が0.53%の場合は，実験計画の際に設定した目標限界層間変形角(4/100rad.)を上回り，p_{jwh}が0.38%の場合は，目標限界層間変形角(4/100rad.)を下回った。

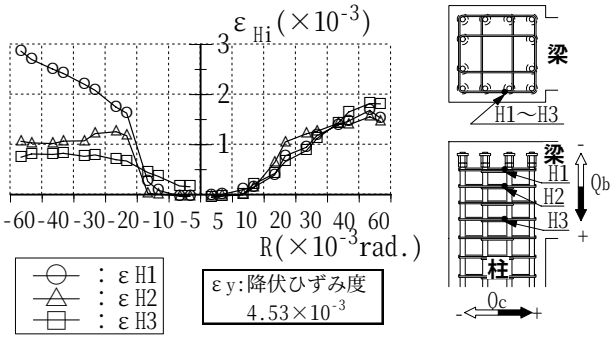
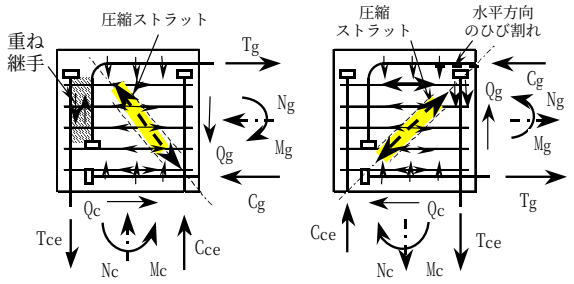


図-12　試験体L345-30-3wのεHi－R関係



(a) 正加力時　　(b) 負加力時

図-13　L形部分架構の抵抗機構

「L形部分架構」

いずれの試験体も，終局耐力は，正加力時および負加力時ともに，梁の曲げ終局耐力によって決定し，最大耐力実験値に対して妥当に評価された。また，本実験で与えた接合部せん断余裕度(Q_{pu}/Q_{cu})のもとでは，いずれも十分な変形性能を示した。

参考文献

1)例えば，村上雅英ほか：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

2)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，pp.80-84，pp.245-249，1999

3)益尾潔ほか：機械式定着具を用いたL形およびT形RC造柱梁接合部の終局時における入力せん断力評価式と設計条件，GBRC，No.108，pp.22-31，2002.7