

論文

[2207] 長締め高力ボルト引張接合による混合構造の柱はり接合部の弾塑性挙動

山添 裕<sup>\*1</sup>、西村泰志<sup>\*2</sup>、南 宏一<sup>\*3</sup>

1. 序

近年、建設コストの合理化、経済性の視点から、柱は鉄筋コンクリート（以下RCという）、はり純鉄骨（以下Sという）で構成される混合構造の建物が建設されるようになってきた。軸方向力にコンクリートが有利であるという構造上の利点から柱をRCとし、軽量化、大スパン化を図るためにはりをSとする構造は、省力化及びプレハブ化などが図られ、建築生産・施工における社会的要求に答えることができる。このような異種構造部材で構成される構造システムの成否は、柱はり接合部の応力伝達に支障のないディテールの開発にある。

本研究は、長尺の高力ボルトを用いたエンドプレート引張接合によるディテールの性能について検討する。

2. エンドプレート引張接合による柱はり接合部のディテール

各研究機関で様々なディテールが提案されているが<sup>1) 2)</sup>、施工面、応力伝達などそれぞれに問題点があり、更に新しいディテールの開発の余地が残されている。図-1に示すように、本研究で検討する長尺の高力ボルトを用いたエンドプレート引張接合によるディテールの利点として

- 1) 接合部内にはり鉄骨を全く欠いているので、コンクリートの充填性が良く施工性の向上を図ることができる。
- 2) エンドプレートおよびプレストレスによって接合部内のコンクリートを拘束できる。
- 3) エンドプレートの大きさを変えることで、はり鉄骨の大きさあるいは、接合部の大きさを自由に変えることができる。
- 4) 接合部内の鉄骨の溶接が全くなく経済的である。
- 5) 柱部材とはりブラケットを工場で組立て、プレハブ化が可能である。

等があげられる。このディテールの実用化のためには、高力ボルトの締め付け力、せん断耐力の評価、エンドプレートの寸法、2方向載荷の影響等を検討する必要がある。本報は、高力ボルトの締め付け力が接合部の弾塑性性状に及ぼす影響について検討する。

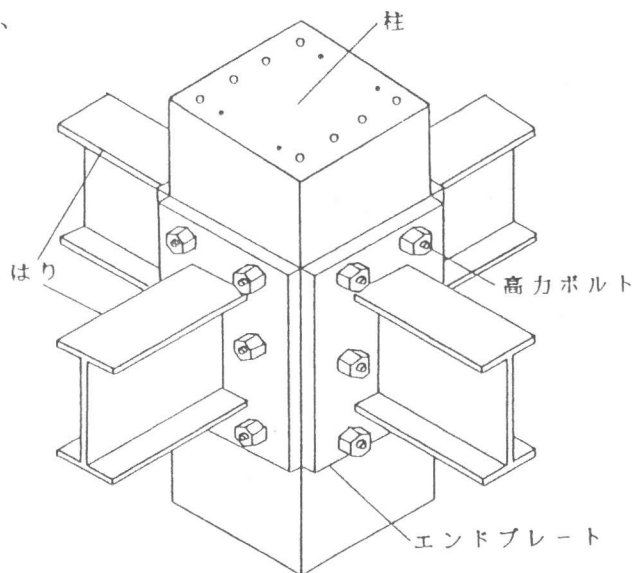


図-1 柱はり接合部のディテール

\*1 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)  
 \*2 大阪工業大学助教授 工学部建築学科、 工博(正会員)  
 \*3 福山大学教授 工学部建築学科、 工博(正会員)

### 3. 実験 1

#### 3.1 実験計画

実験 1では、はり崩壊型を想定したト字形試験体を用いて、エンドプレートの締め付け力がト字形骨組の弾塑性挙動に及ぼす影響を実験的に明らかにする。実験変数はエンドプレートの締め付け力  $\sigma_p$  ( $\sigma_p = \sum T_i / A$ ,  $T_i$ :高力ボルト 1本当たりの締め付け力,  $A$ :エンドプレートの断面積) で、0(手締めの状態)、21.2、42.4kgf/cm<sup>2</sup>の3種類である。なお、締め付け力  $\sigma_p = 24.2$ kgf/cm<sup>2</sup>は、はり部材の理論最大せん断力と柱部材とはり部材エンドプレートとの間の摩擦力がほぼ等しくなるように決定した。摩擦力の算定はコンクリートとエンドプレートとの摩擦係数を0.4と想定した。締め付け力はこの値を基準とし、0の場合また2倍の場合について検討した。面外方向のエンドプレートも面内方向のエンドプレートと同様の締め付け力で行われている。表-1に実験変数を示す。

図-2に試験体の形状寸法、接合部詳細を示す。試験体の柱断面は  $B_c \times D_c = 250$ mm  $\times$  250mmで、柱主筋は8-D16、4-D13、帯筋は50mm間隔でD6を配筋した。鉄筋の材質はSD295である。はり鉄骨の断面はH-200  $\times$  100  $\times$  5.5  $\times$  8で、材質はSS400である。はり部材端部にはエンドプレートが溶接され、17φの高力ボルト6本で柱材に引張接合されている。なお、高力ボルトは貫通孔を設けて打設後挿入した。エンドプレートの板厚は、エンドプレート張り出し部のコンクリートの応力分布を矩形と仮定し、その大きさを  $2F_c$  ( $F_c$ はコンクリートの圧縮強度)とし、この応力によってエンドプレート張り出し部のモーメントが全塑性モーメントに達しないように25mmと剛に近い板厚とした。

表-1 試験体一覧

試験体名	実験変数	
	作用軸力比	エンドプレート締め付け力(kgf/cm <sup>2</sup> )
ZTT-0	0.2	0
ZTT-3	0.2	21.2
ZTT-6	0.2	42.4

表-2 使用材料の力学的性質

鋼材				
鋼材	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏歪 ( $\times 10^{-6}$ )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
フランジ(PL-8)	3542 (3560)*	4558 (4960)	2625 (1730)	$2.00 \times 10^6$ ( $1.96 \times 10^6$ )
ウェブ(PL-5.5)	4186 (4140)	5015 (5240)	2156 (2040)	$2.03 \times 10^6$ ( $1.95 \times 10^6$ )
エンドプレート(PL-25)	3020 (3380)	4900 (5280)	2125 (2000)	$1.96 \times 10^6$ ( $1.65 \times 10^6$ )
補強筋(D6)	4215 (3380)	5512 (5280)	2457 (2000)	$1.96 \times 10^6$ ( $1.65 \times 10^6$ )
柱主筋(D13)	3635 (3600)	5247 (5190)	2056 (1910)	$2.14 \times 10^6$ ( $1.98 \times 10^6$ )
(D16)	3356 (4300)	5390 (5590)	2128 (2320)	$1.79 \times 10^6$ ( $1.84 \times 10^6$ )

\* ( )の値はZTT-3に用いられた材料の試験結果である。

コンクリート				
試験体名	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	脆度係数	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
ZTT-0	271	27.2	0.100	$2.11 \times 10^5$
ZTT-3	253	19.2	0.076	$1.64 \times 10^5$
ZTT-6	271	27.2	0.100	$2.11 \times 10^5$

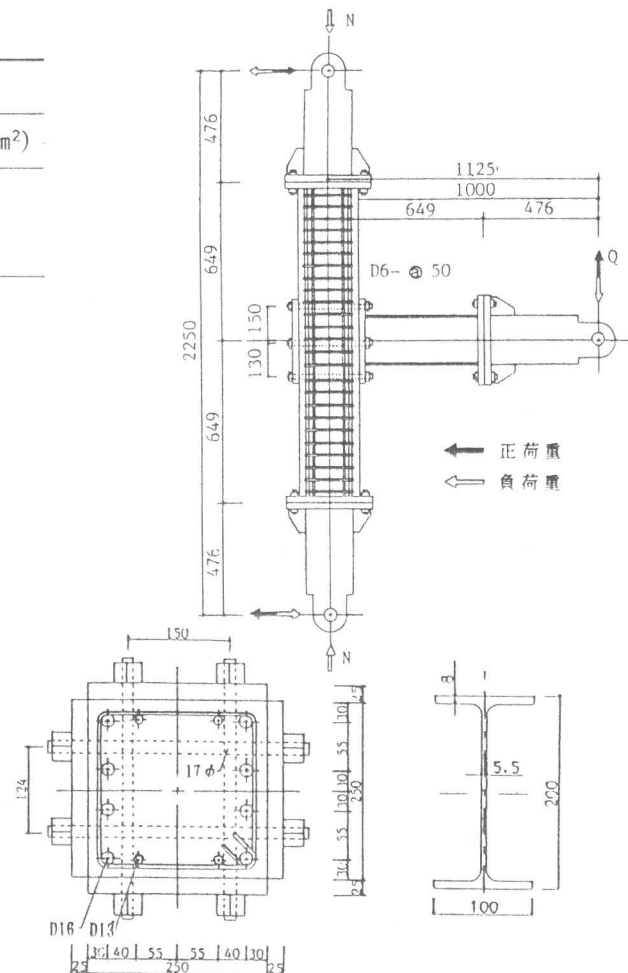


図-2 試験体の形状寸法、接合部詳細及びはり断面

表-2に使用材料の力学的性質を示す。実験は柱材の両端を回転支点とし、柱の終局圧縮耐力の20%の所定の軸力を載荷した後、はり部材端部に繰返し荷重を負荷した。

### 3.2 実験結果

$\sigma_p=42.4\text{kgf/cm}^2$ の試験体では、接合部内に斜張力ひび割れの発生が見られなかった。一方、 $\sigma_p=21.2\text{kgf/cm}^2$ の試験体では接合部内に若干の斜張力ひび割れの発生が見られた。柱部分に生じる曲げひび割れに関して、 $\sigma_p=21.2\text{kgf/cm}^2$ の試験体に比べ、 $\sigma_p=42.4\text{kgf/cm}^2$ の場合にはひび割れ数が多く生じ、斜張力ひび割れの発生状況と異なる傾向が観察された。なお、曲げひび割れ幅の大きさには顕著な相違はみられなかった。なお、斜張力ひび割れは実験終了後、面外のエンドプレートをはずして観察された結果である。

図-3に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸ははり部材端部に負荷された荷重  $Q(\text{tf})$ 、横軸は相対変位部材角  $R(\text{rad.})$  である。1および2は曲げひび割れおよびはり鉄骨降伏時を示す。 $sQ_b$ は、はり鉄骨の終局曲げ耐力から求められるせん断力である。各試験体とも鉄骨はりの履歴特性が卓越したエネルギー消費能力に優れた紡錘形の履歴曲線を示し、 $R=0.05\text{rad.}$ まで耐力低下は生じない。

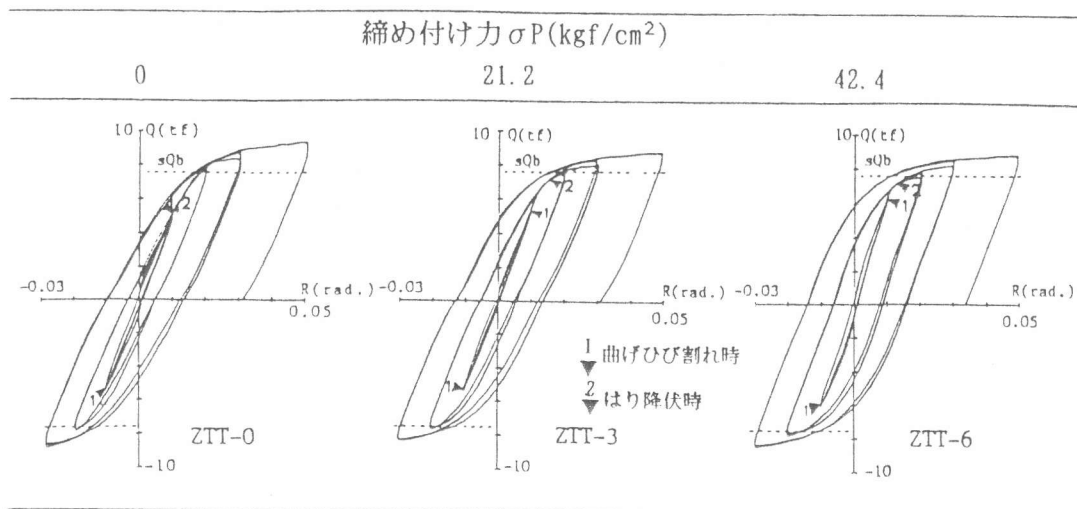


図-3 履歴曲線

図-4にエンドプレートの締め付け力による履歴性状の相違を  $R=0.01, 0.03\text{rad.}$  時の固有ループで示す。縦軸は、はり部材端部に負荷した各振幅の荷重  $Q_i$  をその振幅の最大荷重  $Q_{\text{max}}$  で無次元化した値  $Q_i/Q_{\text{max}}$ 、横軸ははり端部の各振幅の相対変位角  $R_i$  をその振幅の最大変位角  $R_{\text{max}}$  で無次元化した値  $R_i/R_{\text{max}}$  である。 $R=0.01\text{rad.}$  時、 $\sigma_p=42.4\text{kgf/cm}^2$ の試験体では、 $\sigma_p=0, 21.2\text{kgf/cm}^2$ と比べて、最大荷重に至るまで固有ループにやや膨らみが見られ、滑りの少ない性状を示している。 $R=0.03\text{rad.}$  でも最大荷重に至るまでループに膨らみが見られ、除荷過程の途中まで剛性は同じであるが、締め付け力  $42.4\text{kgf/cm}^2$ の試験体は他の試験体に比べて荷重が  $0\text{tf}$  時の残留変形に差が見られる。

図-5に  $\sigma_p=0, 21.2, 42.4\text{kgf/cm}^2$  の  $R=0.01\text{rad.}$  までの荷重-変形曲線と接合部を剛と仮定して求めた柱はり接合部の初期剛性の計算値を示す。 $\sigma_p=42.4\text{kgf/cm}^2$  の試験体は、 $\sigma_p=0, 21.2\text{kgf/cm}^2$  の試験体より剛性が高く、締め付け力の増大により剛性が大きくなる。

図-6に各試験体のエンドプレートの目開き状況を示す。縦軸ははり部材端部に負荷された荷重  $Q(\text{tf})$ 、横軸はエンドプレートの目開き量  $\delta(\text{mm})$  である。----- は、所定の締め付け力に対応する引張力が生じるために必要とするはり端のせん断力  $Q_{\text{pr}}$  である。各試験体とも、 $Q_{\text{pr}}$  に達する

まで、エンドプレートの目開きは生じず、 $Q_{pr}$ を超過した後エンドプレートの目開きが生じる。 $\sigma_p = 21.2 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体では、変形が進むにつれ締め付け力が低下していることが観察されるが、 $\sigma_p = 42.4 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体では変形が進むにつれ目開き量は増加するものの締め付け力の低下はあまり見られない。また、締め付け力の増大にともない目開き量も減少する傾向がある。このことが、前述のように履歴曲線に滑りがみられる一因と考えられる。なお、 $\sigma_p = 0 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体の場合エンドプレートの滑り量は相対変位部材角 $R = 0.05 \text{ rad}$ 時で $0.8 \text{ mm}$ 程度であった。

従って、本実験の範囲では、 $\sigma_p = 42.4 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体で最も良好な履歴特性が得られた。

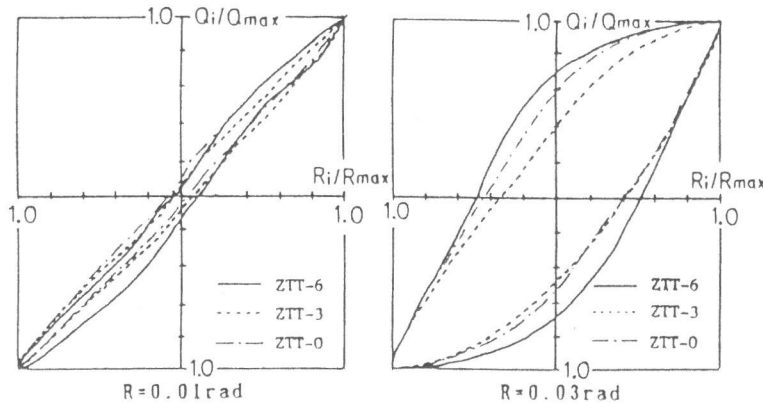


図-4 固有ループ

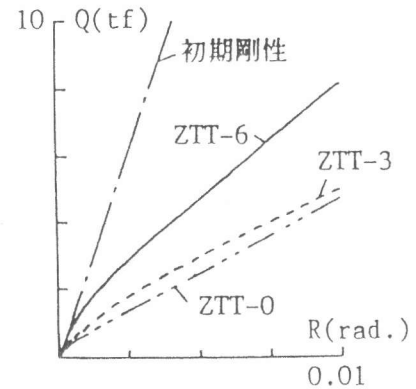


図-5 荷重-変形曲線の包絡線

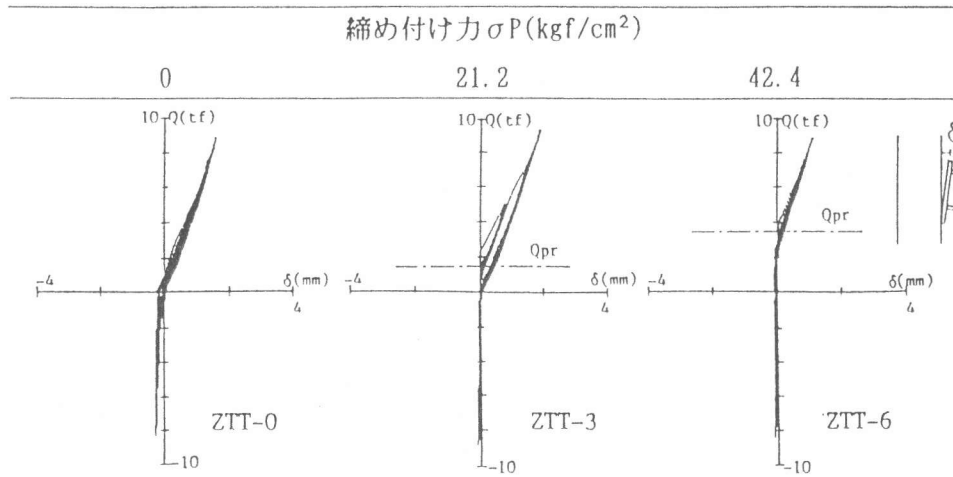


図-6 エンドプレート目開き状況

## 4. 実験 2

### 4.1 実験計画

実験 2では、十字形試験体を用いて、エンドプレートの締め付け力による接合部のせん断耐力の影響を検討する。実験変数はエンドプレートの締め付け力  $\sigma_p$  で、 $0$  (手締めの状態)、 $42.4$ 、 $84.8 \text{ kgf/cm}^2$  の 3種類である。なお、実験 1の  $\sigma_p = 42.4 \text{ kgf/cm}^2$  で最も良好な履歴特性が得られたため、この値を基準とした。表-3に実験変数を示す。

図-7に試験体の形状寸法、接合部詳細及び断面を示す。柱部分の断面構成、材料特性は実験 1と同じである。はり鉄骨の断面は  $H-200 \times 100 \times 9 \times 16$  で、材質は  $SS400$  である。接合部内にせん断補強筋は配していない。エンドプレートは  $23 \phi$  の高力ボルト 6本で柱材に引張接合された。なお、高力ボルトは、高力ボルトをコンクリート打設前に所定の位置に設置したが、高力ボルトとコンクリートとの付着力が生じないように高力ボルトにグリスを塗りナイロン製の被膜で保護した。表-4に使用材料の力学的性質を示す。実験方法は実験 1と同じである。

表-3 試験体一覧

試験体名	実験変数	
	作用軸力比	エンドプレート締め付け力(kgf/cm <sup>2</sup> )
ZJT-0	0.2	0
ZJT-6	0.2	42.4
ZJT-12	0.2	84.8

表-4 使用材料の力学的性質

鋼材	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏歪 ( $\times 10^{-6}$ )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
フランジ (PL-16)	3650	5160	2540	$2.19 \times 10^6$
ウェブ (PL-9)	3200	4590	2840	$2.14 \times 10^6$
エンドプレート(PL-25)	3020	4900	2125	$1.96 \times 10^6$
補強筋(D 6)	4215	5512	2457	$1.92 \times 10^6$
柱主筋(D13)	3635	5247	2056	$2.14 \times 10^6$
(D16)	3356	5370	2128	$1.79 \times 10^6$
コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	脆度係数	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	272	27.2	0.100	$2.11 \times 10^5$

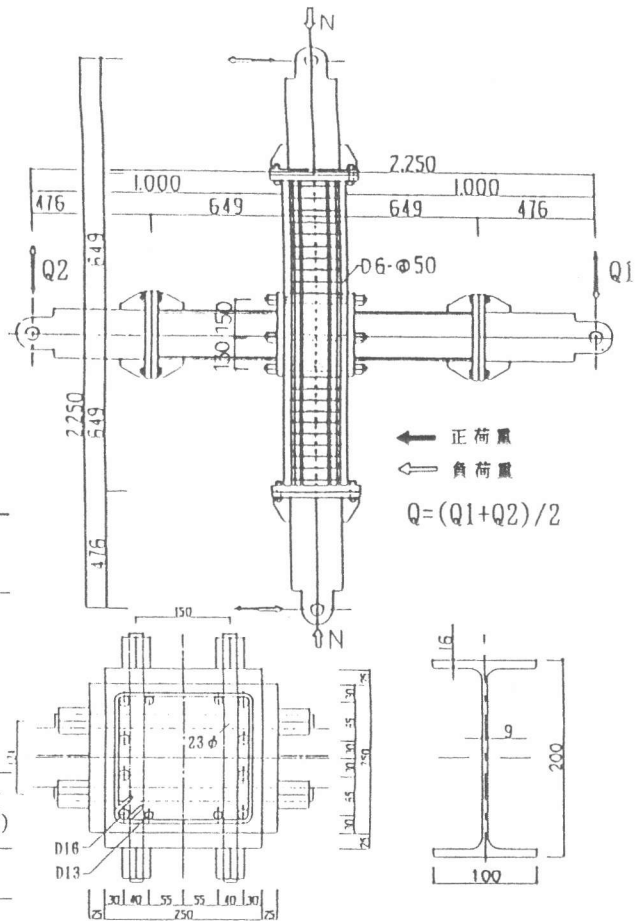


図-7 試験体の形状寸法、接合部詳細及びはり断面

#### 4.2 実験結果

図-8に最終ひび割れ発生状況を示す。締め付け力の増大にともない接合部の斜張力ひび割れの発生量がやや減少する。曲げひび割れの発生数は各試験体ともほぼ同じであった。なお、 $\sigma_p = 84.8 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体では、相対変位部材角  $R = 0.05 \text{ rad}$ .時に柱部材接合端のエンドプレートの近傍でコンクリートの圧壊が進み、かぶりコンクリートが剥落し、柱崩壊の状況を呈した。

図-9に履歴曲線を示す。縦軸ははり部材端部に負荷された荷重  $Q(\text{tf})$ 、横軸は相対変位部材角  $R(\text{rad.})$ である。○および△は曲げひび割れおよび柱主筋降伏時を示す。 $s_{Qb}$ 及び $s_{Qc}$ は、はり及び柱の終局曲げ耐力より求められたせん断力である。各試験体とも、ややエネルギー消費能力に乏しい逆S字形の履歴曲線を示した。締め付け力の値の差に拘らず最大耐力に相違はみられない。

$\sigma_p = 0, 42.4 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体では $R = 0.05 \text{ rad}$ .に至っても耐力低下は生じない。一方、 $\sigma_p = 84.8 \text{ kgf/cm}^2$ の試験体では若干耐力の低下が見られた。これは、前述のように、柱部材接合端のエンドプレートの近傍で柱部分のコンクリートの圧壊が進展したためと考えられる。このような破壊の生じた原因として、本実験では、はり端のエンドプレートは剛に近いものを用いていることによる拘束効果によって、柱端部の拘束効果が相対的に弱くなり、このため、接合部内のコンクリートは圧壊が抑えられる傾向にあるが、エンドプレート近傍の柱部分ではコンクリートの圧壊が進むためと考えられる。なお、各試験体柱崩壊型になったため明確ではないが、本ディテールの場合、実験から逆算して求められるコンクリートパネルの終局平均せん断応力度はコンクリートの圧縮強度の最低 35%は確保できる。

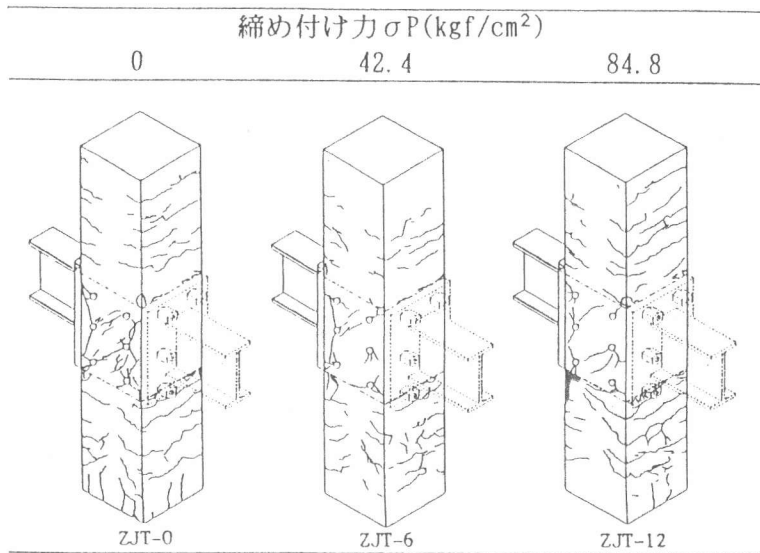


図-8 ひび割れ発生状況

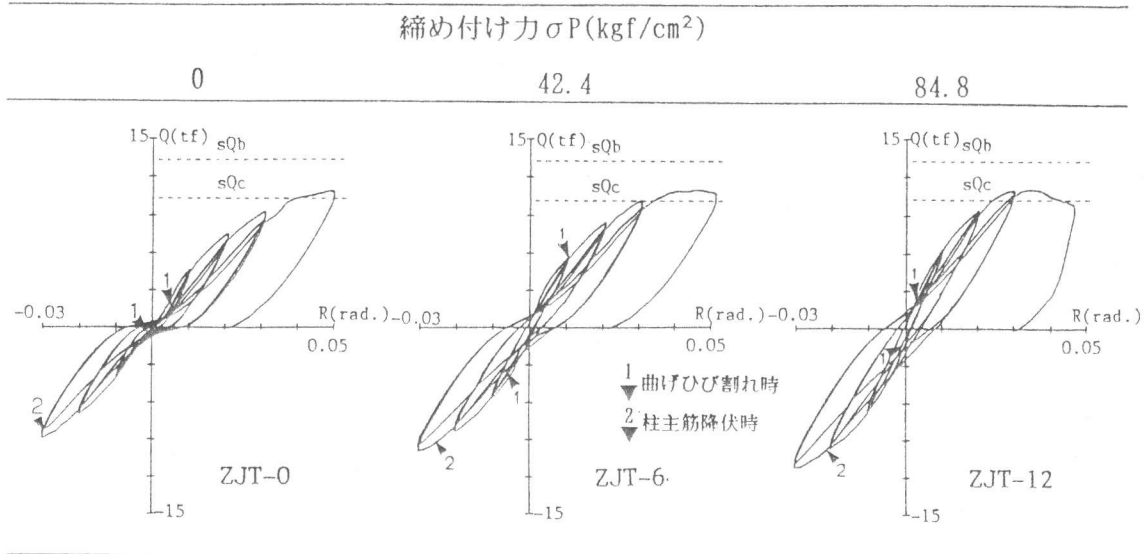


図-9 履歴曲線

## 5. 結論

1) 長締め高力ボルト引張接合によるト字形部分骨組の弾塑性挙動に関して、エンドプレート締め付け力の差は初期剛性、曲げ耐力発揮時の変形、残留変形等に影響を及ぼすことが確認された。また、何れの試験体でも  $R=0.05\text{rad.}$  に至っても耐力低下は生じなかった。本実験の範囲では、 $\sigma p=42.4\text{kgf/cm}^2$  の試験体で最も良好な履歴特性が得られた。

2) 長締め高力ボルト引張接合による接合部のせん断耐力に関して、各試験体柱崩壊型になったため明確ではないが、本ディテールの場合、実験から逆算して求められるコンクリートパネルの終局平均せん断応力度はコンクリートの圧縮強度の最低 35%は確保できる。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会： 混合構造委員会報告、1991.12
- 2) 日本建築学会： 大会(北陸)、SRC造部門<sup>1</sup> 礼<sup>2</sup>ディスカッション資料、混合構造の現状とその展望、1992.8