

論文 RC部材とエンドプレートを有するS部材で構成される切替え部の耐力評価

青山 尚樹*1・西村 泰志*2

要旨: 既報¹⁾では、軸力・曲げせん断を受けるS部材とRC部材で構成される切替え部の応力伝達機構及び耐力評価法を提案した。本報は、引続き、支圧力を効果的に作用させる目的でS部材端部にエンドプレートを配置した切替え部の破壊性状を実験的および理論的に検討するものである。実験結果から、エンドプレートに作用する支圧力によって、変形性能の改善および耐力の増大が確認され、S部材端部のエンドプレートに作用する支圧力の影響が確認された。また、軸力・曲げせん断を受ける場合の応力伝達機構および耐力評価法にエンドプレートの効果を加味した手法によって、実験結果を評価できることが示された。

キーワード: RC部材, S部材, エンドプレート, 切替え部, 応力伝達機構, 抵抗機構, 耐力評価法

1. はじめに

近年、施工および構造の合理化を意図して、異種構造で構成される多種多様な部材および構造システムが数多く提案され、実施されている。例えば、梁端部はSRC造・中央S造、梁端部はRC造・中央S造とする複合梁、下階はSRC造・上階はRC造あるいはS造とする様々な構造システムがある。

この様な異種構造で構成されるハイブリット構造の更なる発展を期すためには、切替え部を含む部材全体の破壊性状におよぼす様々な要因を明らかにし、異種構造間の応力伝達機構に基づく合理的な設計法を確立することが必要である。

軸力・曲げせん断を受けるS部材とRC部材で構成される切替え部において、S部材端部にエンドプレートを設けることによって、支圧力を効果的に作用させることで、切替え部のさらなる変形性能の改善、および耐力の向上が期待できると考えられる。この様な視点から、本研究は、エンドプレートを有するS部材とRC部材で構成される切替え部の破壊性状を実験的および理論的に明らかにし、切替え部の耐力評価に及ぼすエンドプレートの影響を明らかにする。

2. 応力伝達機構と耐力評価法

2.1 応力伝達機構

図-1に、既往の研究結果^{2,3)}に基づいて考えられた応力伝達機構を示す。(a)は、S部材に作用する外力とRC部材に埋込まれたS部材に作用する支圧力および摩擦力によって釣合系を構成することを示している。なお、ここでいう支圧力とは、剛性と強度の異なるものが接触する部分に作用する圧縮応力度のことを呼んでいる。

(b)と(c)は、(a)のS部材フランジ面に作用する支圧力お

よび摩擦力を、一对の偶力と偶力の部分を差し引いた残りの支圧力に分けた応力状態を示している。(b)は、曲げモーメントに抵抗する一对の偶力、(c)は、せん断力に抵抗することを示している。

S部材フランジ面に作用する支圧力は反作用として、(b-1)に示すように、RC部材隅角部に配置された主筋に向かう力になり、コンクリートを押し広げ、せん断補強筋に引張力を生じさせ、それに伴って(b-2)に示すように、コンクリートに斜め圧縮束を形成し、トラス機構によって抵抗することを示している。なお、このときのコンクリート圧縮束の有効断面幅は(b-1)に示す網かけ部分としている。(b-3)は、(b)のS部材フランジに作用する摩擦力が、コンクリートを介して主筋に直接伝達されることを示している。

(c)は、フランジに作用する支圧力がRC部材隅角部に配置された主筋に向かう力となる。この力に対して(c-1)に示すように、せん断補強筋に引張力が生じ、コンクリートに斜め圧縮束を形成し、アーチ機構によって抵抗することを示している。なお、このときのコンクリート圧縮束の有効断面幅は、(c-2)の網かけ部分としている。

(d)は、S部材端部のエンドプレート上下面に作用する支圧力を示している。

エンドプレート下面に作用する支圧力はRC部材に直接伝達される。一方、エンドプレート上面に作用する支圧力は(d-1)に示すようにRC部材隅角部に向かう力となりコンクリートに斜め圧縮束を形成しコンクリートを押し広げ、せん断補強筋および主筋の付着力によって抵抗することを示している。なお、エンドプレート上面に形成されるコンクリート圧縮束およびせん断補強筋は、前述の抵抗機構で使用されているため、この効果は、比較的小さいと考えられる。

*1 大和ハウス工業株式会社 (元大阪工業大学大学院生) (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部建築学科教授 博(工) (正会員)

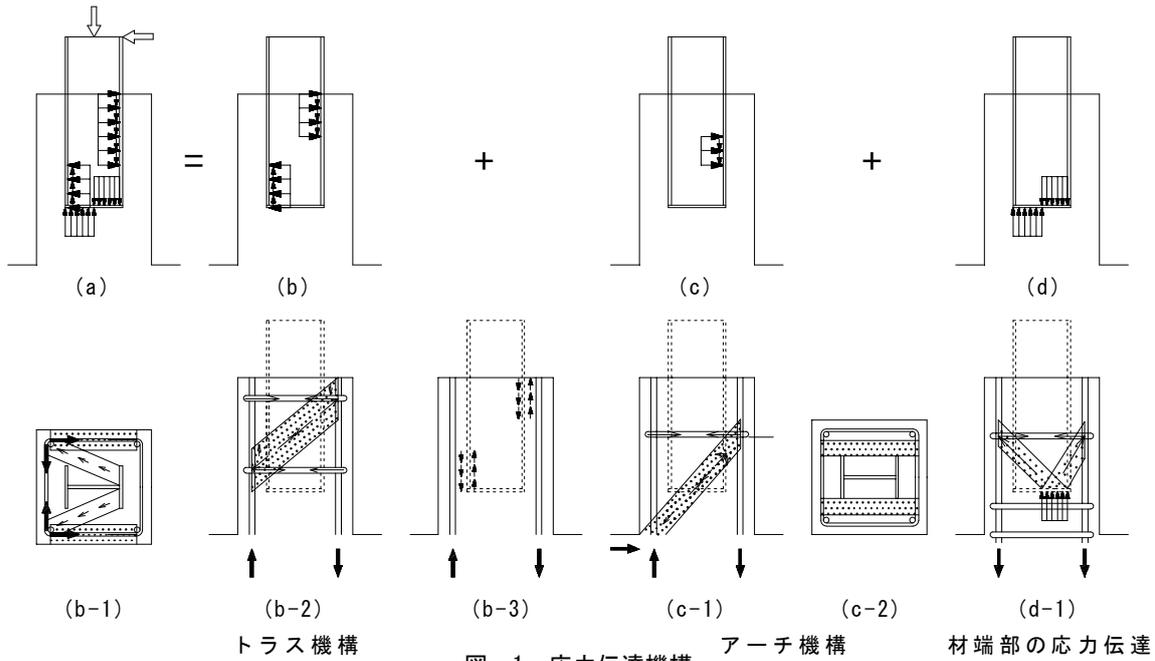


図-1 応力伝達機構

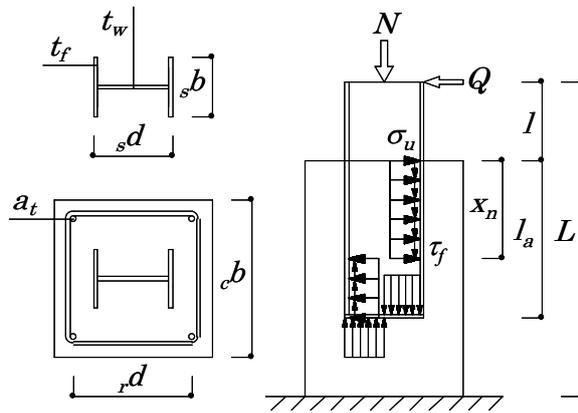


図-2 使用記号

- A_b : 偶力が作用する片側フランジの面積
- a_t : 引張主筋の断面積
- a_w : 切替え部中央部のせん断補強筋の断面積
- rd : 主筋間距離
- sd : S部材のせい
- A_c : トラス機構のコンクリート圧縮束の断面積
- A_r : 支承面積
- A_s : 支圧面積
- L : 加力位置からRC端部までの距離
- l : 外力が作用する位置からS部材埋込み始点位置までの距離
- l_a : RC部材に埋め込まれたS部材の長さ
- p_w : せん断補強筋比
- N : 軸力
- Q : 負荷荷重
- AQ : アーチ機構によって決定される耐力
- rQ : 摩擦力によって決定される耐力
- TQ : トラス機構によって決定される耐力
- NQ : S部材端部の支圧力に依存する耐力
- JQ_u : S部材フランジ側面に依存する耐力
- Q_u : 切替え部の耐力
- si : RC部材端部から切替え部中央までの距離
- x_n : RC部材に埋め込まれたS部材の埋込み始点位置から中立軸位置までの距離
- θ : トラス機構のコンクリート圧縮束と材軸に直交する軸とのなす角度
- θ_2 : アーチ機構のコンクリート圧縮束と材軸に直交する軸とのなす角度
- σ_B : 圧縮強度
- σ_u : 支圧応力度
- σ_y : せん断補強筋の降伏応力度
- $r\sigma_y$: 主筋の降伏応力度
- τ_{bu} : 付着強度
- τ_f : 摩擦強度

2.2 耐力評価法

軸力・曲げせん断を受ける切替え部の耐力 Q_u は、前述の応力伝達機構に基づいて、S部材フランジ側面の支圧力および摩擦力に依存する耐力 JQ_u と S部材端部の支圧力に依存する耐力 NQ から、

$$Q_u = JQ_u + NQ \quad (1)$$

によって評価できると考える。

2.2.1 鉄骨フランジ側面に依存する耐力

切替え部の耐力 JQ_u は、トラス機構によって決定される耐力 TQ とアーチ機構によって決定される耐力 AQ 、さらに摩擦力によって決定される耐力 rQ の累加によって、

$$JQ_u = TQ + AQ + rQ \quad (2)$$

とする。なお、それぞれの機構は、図-1(a)に示す、埋め込まれた鉄骨側面に作用する支圧力と摩擦力により発現されるものである。したがって、それぞれの機構に対して剛塑性を仮定すれば累加は可能であると考えられる。

まず、切替え部の耐力を求めるために、S 部材端部に作用する荷重 Q と RC 部材に埋込まれる S 部材フランジに作用する支圧応力度 σ_u との関係を求める。

S 部材を剛と考え、フランジ全幅 s にわたって σ_u の応力度が一様に分布しているものと仮定すると、力の釣合条件より、

$$Q + \sigma_u \cdot (l_a - x_n) \cdot s \cdot b - \sigma_u \cdot x_n \cdot s \cdot b = 0 \quad (3)$$

となる。したがって、

$$Q = \sigma_u \cdot (2x_n - l_a) \cdot s \cdot b \quad (4)$$

となる。

また、S 部材フランジ面に作用している支圧応力度の中立軸に関する曲げモーメントの釣り合いから、

$$Q \cdot \left(\frac{l_a}{2} + \frac{x_n}{2} + l \right) - \sigma_u \cdot x_n \cdot \frac{l_a}{2} \cdot s \cdot b = 0 \quad (5)$$

となる。式(4)、式(5)より x_n は、

$$x_n = -l + \sqrt{l^2 + l \cdot l_a + \frac{l_a^2}{2}} \quad (6)$$

として得られる。

(1) トラス機構によって決定される耐力 TQ

トラス機構は、せん断補強筋、コンクリート、主筋によって構成される。したがって、トラス機構の耐力を決定する要因は、

- ①せん断補強筋が引張降伏する場合： σ_{u1}
- ②コンクリート圧縮束が圧縮強度に達する場合： σ_{u2}
- ③主筋の強さによって決定される場合： σ_{u3}

となる。したがって、トラス機構の耐力を發揮した時の支圧応力度 σ_u は、

$$\sigma_u = \min(\sigma_{u1}, \sigma_{u2}, \sigma_{u3}) \quad (7)$$

によって決定される。なお、主筋の強さによって決定される場合の σ_{u3} は、主筋が降伏応力度 $r\sigma_y$ に達する場合 σ_{u3-1} および主筋が付着強度 τ_{bu} に達する場合 σ_{u3-2} のうち、最小値を採るので、

$$\sigma_{u3} = \min(\sigma_{u3-1}, \sigma_{u3-2}) \quad (8)$$

とする。

ここで、せん断補強筋が降伏応力度 σ_y に達する場合は、

$$\sigma_{u1} = \frac{\sigma_y \cdot p_w \cdot c \cdot b}{s \cdot b} \quad (9)$$

コンクリートの圧縮束が圧縮強度 $c\sigma_B$ に達する場合は、

$$\sigma_{u2} = \frac{c\sigma_B \cdot \cos\theta \cdot A_c}{(l_a - x_n) \cdot s \cdot b} \quad (10)$$

主筋が降伏応力度 $r\sigma_y$ に達する場合は、

$$\sigma_{u3-1} = \frac{r\sigma_y \cdot a_t}{(l_a - x_n) \cdot s \cdot b \cdot \tan\theta} \quad (11)$$

主筋が付着強度 τ_{bu} に達する場合は、

$$\sigma_{u3-2} = \frac{\tau_{bu} \cdot \varphi}{s \cdot b \cdot \tan\theta} \quad (12)$$

として求められる。

以上より、トラス機構によって決定される耐力 TQ は、式(7)を式(4)に代入することによって、

$$TQ = \sigma_u \cdot (2x_n - l_a) \cdot s \cdot b \quad (13)$$

となる。

(2) 摩擦力によって決定される耐力 FQ

摩擦力によって決定される耐力 FQ は、

$$FQ = \min(\tau_f, \tau_b) \cdot s \cdot d \cdot A_b / l \quad (14)$$

として求める。なお、摩擦強度 τ_f は、鉄骨フランジ面に作用する圧縮応力度 σ_u によって影響される。圧縮応力度 σ_u は式(7)によって求められる。摩擦強度 τ_f と圧縮応力度 σ_u との関係は、既往の実験結果³⁾から $\tau_f = 0.684\sigma_c$ とする。また、 τ_b は主筋の付着強度 τ_{bu} からトラス機構の耐力を發揮させるために必要とする付着応力度を差し引いた値である。

(3) アーチ機構によって決定される耐力 AQ

アーチ機構によって決定される耐力 AQ は、せん断補強筋の降伏応力度によって決まる耐力 AQ_T とせん断補強筋が存在する位置での主筋の付着強度によって決まる耐力 AQ_R のうち、

$$AQ = \min(AQ_T, AQ_R) \quad (15)$$

として求められる。なお、 AQ_T および AQ_R は、

$$AQ_T = \sigma_y \cdot a_w \cdot s_i / L \quad (16)$$

$$AQ_R = \frac{\tau_{bu} \cdot \varphi \cdot (2x_n - l_a) \cdot s_i}{\tan\theta_2 \cdot L} \quad (17)$$

として求める。

以上より、式(13)、式(14)および式(15)から求められる値を累加することで鉄骨フランジ側面に依存する耐力 JQ_u が求められる。

2.2.2 鉄骨フランジ端部に依存する耐力

鉄骨端部の支圧応力度の分布を図-1(d)のように、矩形分布と仮定する。今、鉄骨フランジに作用する摩擦力の影響を無視するとエンドプレートに作用するモーメントと軸力の関係は図-3 のようになる。なお、最大支圧強度は、

$$\sqrt{A_r / A_s} \cdot \sigma_B \quad (18)$$

とする。ここではエンドプレート上面の支圧力の効果は小さいと考え無視した。

なお、耐力式に用いられた記号は図-2 を参照されたい。

3. 実験

軸力によって、S 部材端部に取り付けたエンドプレートに生じる支圧力が、仮定された抵抗機構、あるいは応力伝達機構にどのような影響を与えているのか検討するために、実験変数を S 部材降伏圧縮耐力の 0.2, 0, -0.1 とした計 3 体の片持ち梁形式の試験体が計画された。EPN00 試験体は作用軸力比 0, EPN02 試験体は作用軸力比 0.2, EPN-01 試験体は作用軸力比 -0.1 の 3 試験体である。なお、-0.1 は引張軸力比を示す。

図-4 に計画された試験体の形状寸法、配筋詳細を示す。試験体は下端から、固定部、RC 部材、切替え部、S 部材へと各部材が直列的に切替る試験体である。固定部は 400mm×600mm×600mm で、荷重を負加したときに試験体が動かぬようにするための物である。切替え部の RC 断面は 200mm×300mm であり、主鉄筋は圧縮および引張側に D16(SD295)が 4 本ずつ計 8 本配筋されている。せん断補強筋は、D6(SD295)を 50mm 間隔で配筋した。切替え部における各試験体のせん断補強筋比は、0.64 % である。S 部材は、公称寸法が H-200×100×5.5×8 (SS400) を使用し、S 部材端部に用いたエンドプレートは板厚 9mm(SS400)を使用し、S 部材端部に隅肉溶接されている。RC 部材に埋込まれる S 部材の長さは 300 mm としている。

コンクリートは縦打ちとし、コンクリート打設後 7 日後に脱型し実験実施まで空気養生した。

表-1 に使用された材料の力学的特性を示す。

図-5 に載荷装置を示す。実験は、試験体の固定部を固定し、所定の軸力を負荷したのち、S 部材上端部に水平荷重を正負漸増繰り返し載荷した。載荷サイクルは、部材変位角 0.5, 1.0, 2.0, 3.0%までは正負 2 回繰り返し、以後正方向に一方方向載荷した。なお、部材変位角は載荷点位置でのたわみ δ を載荷点位置から RC 端部までの距離 L で無次元化した値 R (rad.)とする。

4. 実験結果

4.1 ひび割れおよび最終破壊状況

図-6 に最終破壊状況写真と最大耐力発揮時の載荷面側から見たひび割れ図を示す。各試験体共、部材変位角 1.0%までは、切替え部正面に生じた斜めひび割れ状況は類似していた。しかし、圧縮軸力を負荷した EPN02 試験体では斜めひび割れが固定部まで達している。また、他の 2 体の試験体と異なり、主筋に沿った付着ひび割れが初期載荷段階から生じ、変形の増大に伴って固定部近傍まで進展した。

各試験体の最終破壊状況から、切替え部に生じた斜めひび割れ状況は、EPN00, EPN02 試験体ともに類似している。しかし、切替え部以下においては、圧縮軸力を負

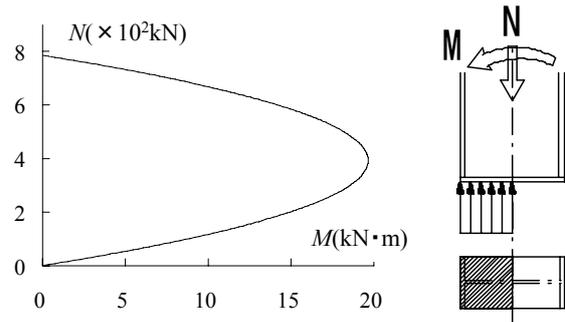


図-3 S 部材終端部の耐力

表-1 使用された材料の力学的特性

| 材料 | 鉄骨 | | | |
|--------|--|---|---|---|
| | 降伏応力度 σ_y (N/mm ²) | 引張強度 σ_u (N/mm ²) | ヤング係数 E_s $\times 10^5$ (N/mm ²) | |
| 鉄骨 | PL-5.5 | 370 | 467 | 2.05 |
| | PL-8 | 302 | 436 | 2.07 |
| | PL-9 | 276 | 416 | 2.05 |
| 主筋 | D16 | 337 | 512 | 1.89 |
| せん断補強筋 | D6 | 352 | 461 | 1.67 |
| 材料 | | 圧縮強度 σ_B (N/mm ²) | 割裂強度 σ_t (N/mm ²) | ヤング係数 E_c $\times 10^4$ (N/mm ²) |
| コンクリート | | 22.7 | 2.70 | 2.53 |

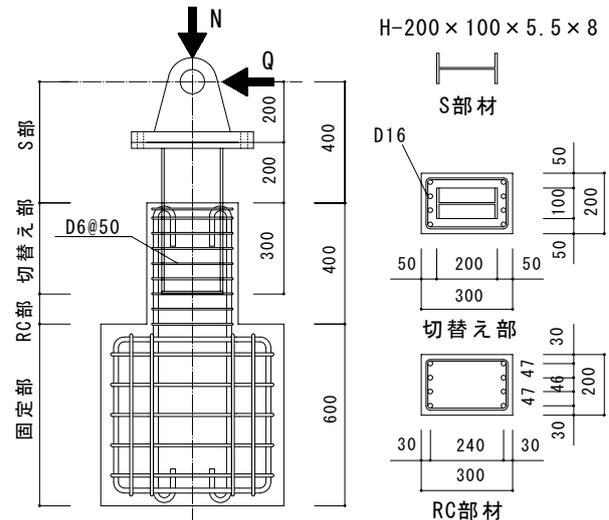


図-4 試験体の形状寸法

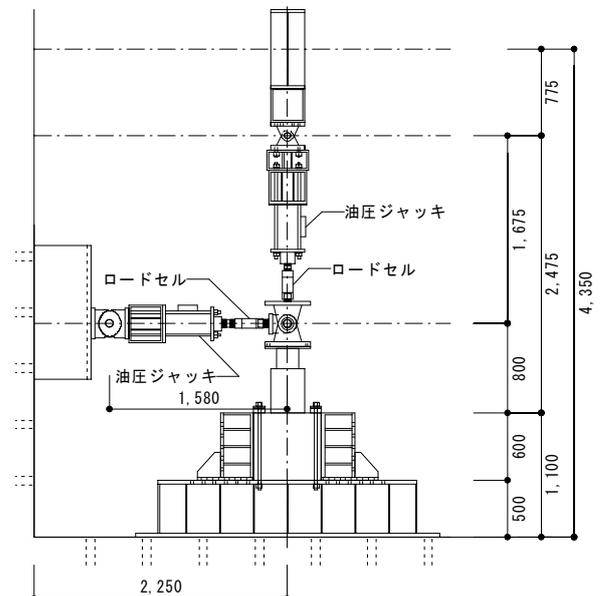
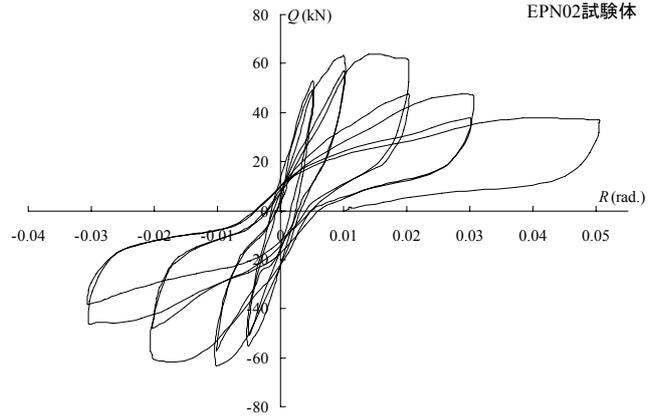
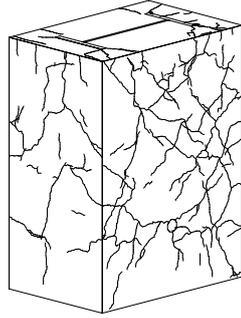


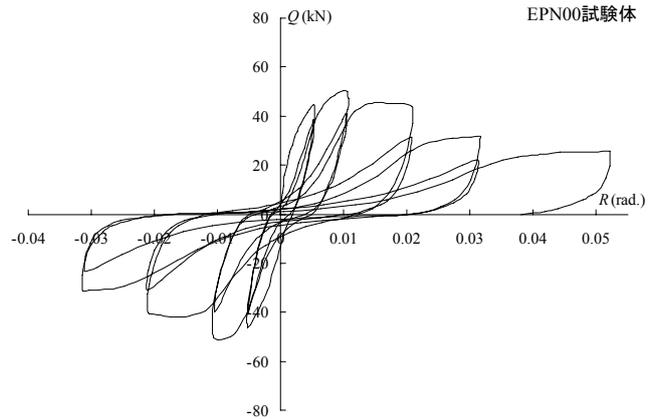
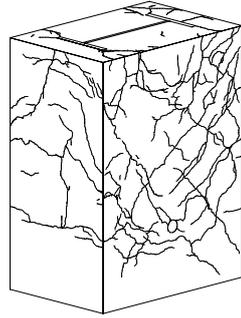
図-5 載荷装置



EPN02 試験体

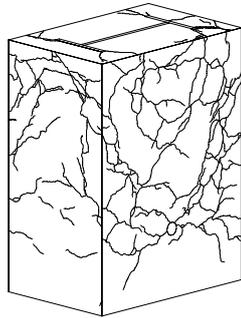


EPN00 試験体



EPN-01 試験体

実験終了時



最大荷重時

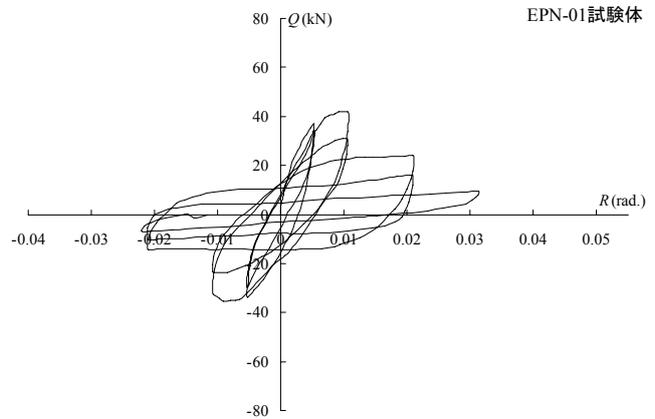


図-6 ひび割れ状況

図-7 荷重変形曲線

荷した EPN02 試験体は、斜めひび割れが垂直に固定部へと向かうひび割れに進展しているものもあり軸力の影響が大きいと考えられる。また、載荷面側や載荷面逆側に生じた主筋に沿った付着ひび割れも EPN02 試験体は固定部まで達しており他の試験体と比して顕著である。引張軸力を負荷した EPN-01 試験体は引張軸力によって S 部材の抜け出しが観察された。

4.2 荷重変形関係

図-7 に荷重変形曲線を示す。圧縮軸力を負荷した EPN02 試験体、軸力が負荷されていない EPN00 試験体共に逆 S 字の曲線を描いているが、EPN02 試験体は EP

N00 試験体に比べ、すべりが少ない履歴を示した。引張軸力を負荷した EPN-01 試験体は部材変位角 1.0%までは紡錘形に近い履歴を示したが、部材変位角 2.0%時に急激に剛性が低下し、部材変位角 3.0%時に軸力が保持できなくなり実験を中断した。

図-8 に部材変位角 0.5%正載荷時の荷重変形関係を示す。EPN00 試験体は、曲げひび割れ発生後、大きな剛性低下がみられる。EPN02 試験体は、ひび割れ発生に伴って剛性低下がみられるが、EPN00 試験体程明確ではない。一方、EPN-01 試験体は載荷初期から徐々に剛性低下がみられるが、ひび割れ発生後の急激な剛性低下はみられない。

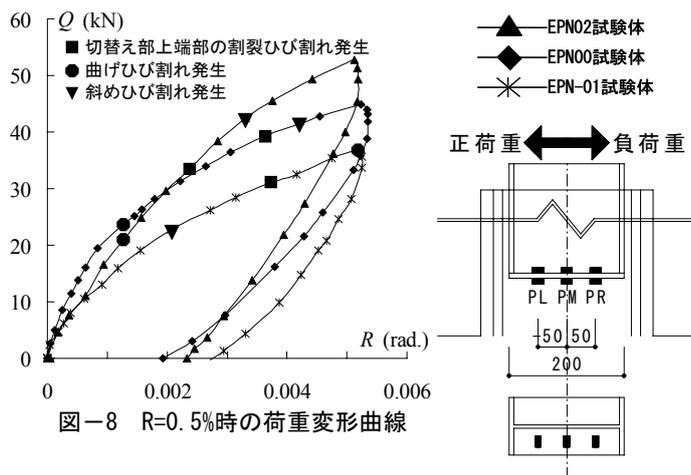


図-8 R=0.5%時の荷重変形曲線

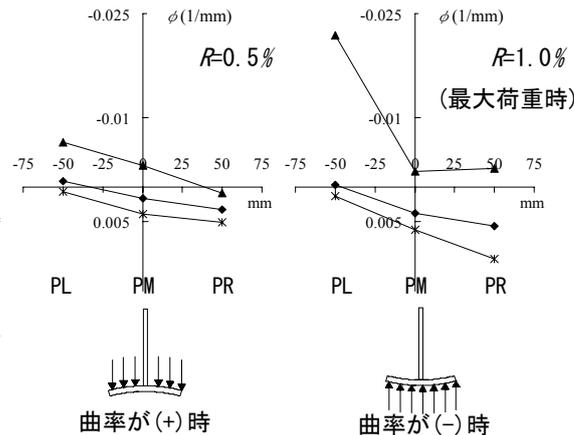


図-9 エンドプレートの曲率分布

4.3 ひずみ状況

図-9 に正載荷時のエンドプレートの曲率分布状況を示す。縦軸は曲率 ϕ 、横軸はひずみ測定位置を示している。EPN00, EPN-01 試験体は、エンドプレートの曲率は上に凸になっている。これは、エンドプレートに上から下向きに支圧力が作用しているためと考えられる。しかし、EPN02 試験体は載荷初期の段階から、下に凸になっている。これは、エンドプレートに下から上向きに支圧力が作用しているためと考えられる。また、最大耐力発揮時、PL 位置の曲率が大きくなっている。これは、下から上向きに作用する支圧力が増大している為と考えられる。これらのことから、圧縮軸力が負荷されることで、エンドプレート下面に作用する支圧力の影響が大きくなると考えられる。

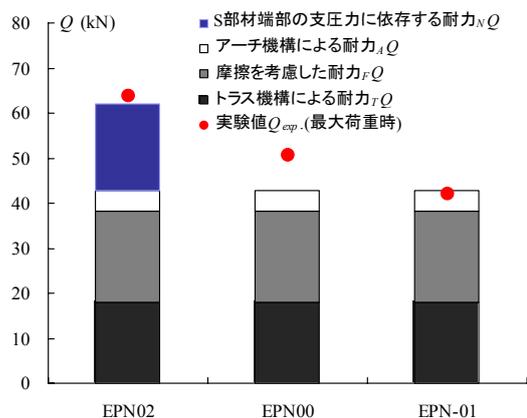


図-10 耐力評価法の妥当性

5. 耐力評価法の妥当性

図-10 に、前述の耐力評価法により導かれた計算値と実験値を示す。■は、トラス機構によって決定される耐力 TQ 、■は、S 部材フランジ側面に作用する摩擦力によって決定される耐力 FQ 、□は、アーチ機構によって決定される耐力 AQ である。これら AQ, FQ, TQ を累加した値が、S 部材フランジ側面に依存する耐力 JQ_u を示している。■は、S 部材端部に作用する支圧力に依存する耐力 NQ を示している。●は、実験値である。

図-10 より、アーチ機構の負担分が小さいことがわかる。また、切替え部の耐力に及ぼす S 部材端部の支圧力に依存する耐力の占める割合が大きいことがわかる。

圧縮軸力を負荷した EPN02 試験体はエンドプレート下面に作用する支圧力に依存する耐力を累加することでよく評価できている。しかしながら、軸力を負荷していない EPN00 試験体については、エンドプレート上面の支圧力の効果は小さいと考え、エンドプレート上面に作用する支圧力の効果を加味していない為、計算値は実験値よりも小さな値となった。一方、エンドプレート上面に作用する支圧力の影響を考慮していない EPN-01 試験体

の計算値は実験値と対応している。このことから、エンドプレート上面に作用する支圧力の効果については更に検討が必要である。

6. まとめ

変形性能および耐力に及ぼすエンドプレートの影響は大きいことが示された。また、軸力・曲げせん断力を受けるエンドプレートを有する S 部材と RC 部材の切替え部の応力伝達機構および耐力評価法が示され、実験値を概ね評価できることが示された。しかしながら、エンドプレート上面に作用する支圧力の応力伝達機構については未解決な点も多く今後の検討課題である。

参考文献

- 1)青山, 南坂, 西村: RC 部材と S 部材で構成される切替え部の耐力評価, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.3, pp.165-170, 2007
- 2)南坂, 青山, 西村:S 部材と RC 部材が直列的に結合される接合部の応力伝達機構(その 20), 日本建築学会大会学術講演便覧集, C-1, pp.1109-1110, 2006
- 3)春風, 馬場, 西村:S 部材と RC 部材が直列的に結合される継手接合部の応力伝達機構(その 6), 日本建築学会大会学術講演便覧集, C-1, pp.1077-1078, 2001