

[108] 異種構造部材で構成される柱はり接合部の応力伝達機構

正会員 若林 實 (京都大学防災研究所)  
 正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)  
 正会員 ○ 西村泰志 (大阪工業大学工学部)

1. 序

高層骨組の構造形式として 最近、柱は鉄骨鉄筋コンクリート、はり純鉄骨とした構造形式が数多く用いられている。この構造形式の利点として、柱の軸力を鉄筋コンクリート部分で負担できること、柱鉄骨の局部変形をコンクリートによって拘束できること、コンクリートが柱鉄骨の耐火被覆材としての役割を果すこと、および柱はり共鉄骨鉄筋コンクリート構造の場合と較べて、コンクリート打設時の柱はり接合部の施工性が良いことなどがあげられる。しかしながら、このような構造形式における柱はり接合部の応力伝達機構は明らかにされないまま用いられているのが現状である。この様な観点に基づき、本報告は柱は任意の鉄骨量を有する鉄骨鉄筋コンクリート、はり純鉄骨で構成されたト字形の部分骨組架構の柱はり接合部の応力伝達機構を実験的および理論的に検討し、異種構造部材で構成された柱はり接合部に関する合理的な設計法の確立に対する基礎的な観点からの一資料を提供するものである。

2. 実験計画

試験体は図1に示す様に柱は鉄骨鉄筋コンクリート、はり純鉄骨で構成されるト字形の部分骨組架構であり、各試験体ともその形状寸法および各部材の断面寸法は同一である。試験体の設計では、ト字形の部分骨組架構に水平荷重系の外力が作用した場合の応力状態を想定して、柱材とはり材がほぼ同時に曲げ強度に達する様に設計された。実験変数は柱材の曲げ強度 $M_0$ を一定として柱断面を構成する鉄骨部分の曲げ強度 $M_s$ との比 $M_s/M_0$ とし、 $M_s/M_0=0.035, 0.65, 1.0$ の4種類 計4体の試験体が計画された。なお、 $M_s/M_0=0$ は柱が鉄筋コンクリート構造であることを示す。柱はり接合部の鉄骨ウェブパネル厚は各試験体とも $E 16$ が用いられ $6\phi$ のせん断補強筋が $50\text{mm}$ の間隔で設けられている。本実験は柱材の両端を回転および移動支点として、はり部材端部に正負の漸増くり返し荷重を負荷するものである。表1に各試験体断面の構成要素および使用材料の力学的特性を示す。

3. 実験結果

図2に各試験体の履歴曲線の包絡線および大変形時の第2サイクル目の履歴曲線を示す。縦軸ははり部材端部に負荷された荷重 $P$ 、横軸ははり部材端部の変形より求められた骨組としての部材角 $R$ を示す。なお、図中の $b_p$ ははり部材の曲げ強度から決定される荷重である。S065およびS100では実験から求められ

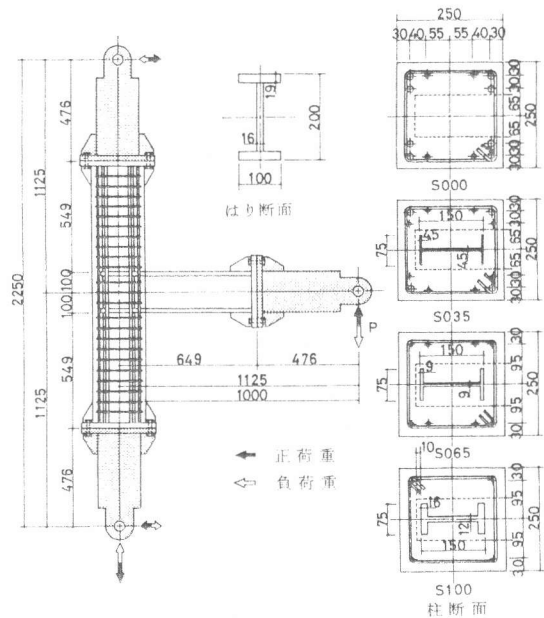


図1. 試験体の形状寸法および断面図

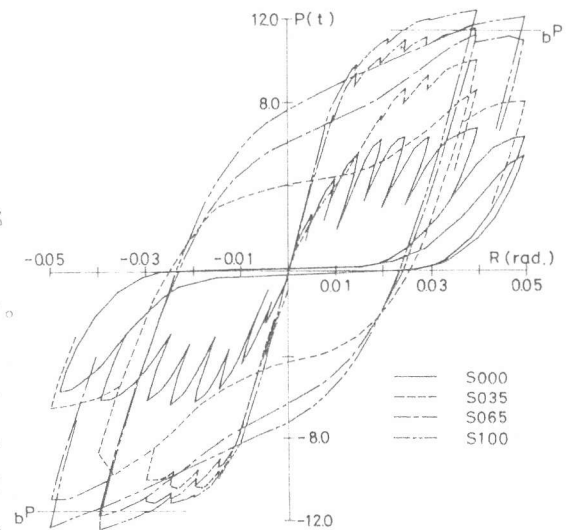


図2. 履歴特性

た耐力ははり部材の曲げ強度を発揮しており、エネルギー散逸量の大きいほぼ紡錘形の履歴性状を示す。しかしながら S035でははり部材の曲げ強度の85%程度しか発揮されておらず逆S字形の履歴性状を示す。はり部材から柱部材への応力伝達が支障なく行なわれる為に鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>1)</sup>では柱部材における鉄骨部分の曲げ強度の和 $csMA$ とはり部材における鉄骨部分の曲げ強度の和 $bsMA$ との比 $csMA / bsMA$ が $0.5 \leq csMA / bsMA \leq 2.0$ を満足することが推奨されているが、本実験に関してS100, S065, およびS035の $csMA / bsMA$ の値は各々1.19, 0.63および0.387であり上限値はともかく下限値0.5については本実験結果からもほぼ妥当な値ではないかと考えられる。一方、S000でははり部材の曲げ強度の60%程度しか発揮されておらず、エネルギー散逸量の非常に小さな逆S字形の履歴性状を示す。しかしながら、靱性という観点からみれば十分な性能を有するものと考えられ、耐力およびエネルギー散逸量を大きくする何らかの補強法を講ずればS000の様な構造形式も可能であると考えられる。

#### 4. 応力伝達機構と耐力評価法に関する一考察

図3 ははり部材から柱部材への応力伝達機構を各部材の自由体の釣合い状態によって示したものである。図3 (a) は鉄筋コンクリートの柱に純鉄骨のはり材が接合された場合を示したものである。この場合、はり部材は鉄筋コンクリート柱に埋込まれた部分のてこ作用に基づく支圧力および支圧力に基づく摩擦力と外力によって釣合い系を構成する。一方、上下の柱材は反作用として、この支圧力および支圧力に基づく摩擦力、鉄筋の引張力および反力によって釣合い系を構成すると考えられる。なお、この機構では、支圧力は鉄筋の引張力として上下の柱材に相互に伝達されることを意味する。図3 (b) は鉄骨の柱に鉄骨のはりが接合された場合を示したものであるが前述の鉄筋コンクリートの柱に純鉄骨のはりが接合された場合と同じ視点にたてば、埋込まれたはり部材のてこ作用に対する補強材として柱の鉄骨部材が接合されているとみることができる。この場合、はり部材は外力および上下の補強材としての柱の鉄骨部材の曲げ引張、圧縮力および上下の柱材からのせん断力によって釣合い系を構成する。一方、上下の柱材は反作用としての曲げ引張圧縮力、せん断力および支点反力によって釣合い系を構成すると考えられる。累加の考えに基づけば、柱が鉄骨鉄筋コンクリート構造の場合、図3(a), (b)の両者の機構が同時に作用するものと考えられ非常に複雑な応力伝達機構を呈するものと考えられる。ここでは、累加の考えに基づいて、これらの応力伝達機構を有する部分骨組架構の耐力を評価する手法を提案するものである。耐力を決定する要因としては、(I)部材の

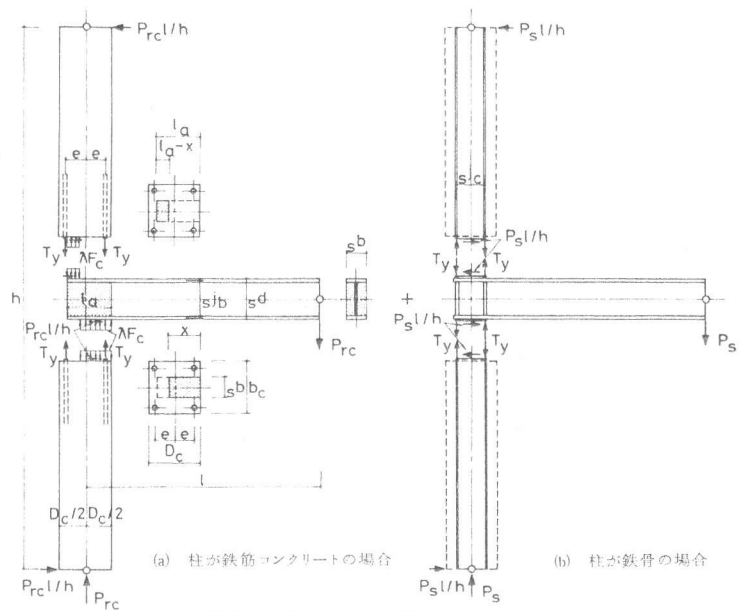


図3. 応力伝達機構

表1. 試験体断面の構成要素、材料の力学的特性および実験結果

試験体	試験体断面の構成要素				使用材料の力学的特性										実験結果						
	柱断面 $b_c \times D_c$ (mm)	柱材の鉄骨断面 (mm)	柱材 補強筋 (mm)	はり部材断面 (mm)	鉄骨柱材のS部分およびRC部分の負担モーメントの割合(X)		鉄骨				鉄筋				コンクリート			最大荷重 $P_{max}$ (t)	はり材の曲げ強度(計算値) $b^P$ (t)	$P_{max}/b^P$	
					S部分	RC部分	$R_t$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$\phi$	$\sigma_y$	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$f_c$	$f_t$	$f_t/f_c$				
S000			8-D16 4-D13 6 $\phi$ 50		0	100												6.83 (6.51) <sup>a)</sup>	0.583 (0.555)		
S035	250x250	H-150x75 x4.5x4.5	4-D16 8-D10 6 $\phi$ 50	H-200x100 x16x19	16	66	4.5	2.88	4.02	0.305	6 $\phi$	2.37	3.53	0.328	296	27.2	0.0919	10.11 (10.48)	0.863 (0.894)		
S065		H-150x75 x9x9	4-D13 4-D10 6 $\phi$ 50				65	35	12	3.33	4.76	0.298	D10	3.76				5.28	0.148	11.79 (11.91)	1.01 (1.02)
S100		H-150x75 x12x16	4-6 $\phi$ <sup>a)</sup> 6 $\phi$ 50				100	0	16	2.82	4.32	0.337	D13	3.65				5.55	0.167	12.44 (12.62)	1.06 (1.06)

\*1) せん断補強筋をとりつける為の補助主筋であり、柱はり接合部には定着されていない。 \*2) この値は実験計画の段階での値で、鉄骨部分および鉄筋コンクリート部分の負担モーメントを各 \*M<sub>s</sub> および M<sub>rc</sub> とすると、 $M_s/M_s + M_{rc} + M_{rc}/M_s + M_{rc}$  によって求められた。 \*3) 負荷重

強さによるものおよび(Ⅲ)接合部パネルによるものの2つが考えられる。以下、それぞれの要因に対する耐力の評価法を述べる。

(Ⅰ) 部材に基因する強さ はじめに、埋込まれた鉄骨部分のてこ作用による抵抗力を求める手法を述べる。鉄骨部材を剛と仮定し、図3(a)に示す様に、てこ作用による応力塊を矩形と考えその大きさを $\lambda F_c$ とし、フランジ全幅 $sb$ にわたって作用しているものとする。ここで $F_c$ はコンクリートの圧縮強度、 $\lambda$ は局部支圧係数を示す。これらの作用は反作用として上下の柱材の部材接合端に作用することになるので、その面でのコンクリートによる抵抗力を抵抗モーメント $M$ と軸力 $N$ で表わせば  $M_1 = \frac{N}{2} (Dc - \frac{N}{sb \cdot \lambda \cdot F_c})$ ,  $M_2 = \frac{N}{2} (2fa - Dc - \frac{N}{sb \cdot \lambda \cdot F_c})$  (A) となり図4に示す耐力線 $beIc$ が求められる。なお、この図で横軸 $M_1$ すなわち、

第1, 4象限ははり部材下面の部材接合端における抵抗モーメント、 $M_2$ すなわち、第2, 3象限ははり部材上面の部材接合端における抵抗モーメントを示す。また、図中の実線および破線は各々 $M_1$ および $M_2$ に対応する値を示したもので以下、本論で示される $M-N$ 相関曲線はこの様な表現方法をとるものとする。この支圧力は主鉄筋を通して上下の柱材に伝達されるので主鉄筋による耐力線を累加すれば図3(a)の構造形式に対する耐力線が求められる。すなわち、主鉄筋は圧縮側および引張側とも引張降伏していると考えられるので、

その時の抵抗力は $N = -2Ty$ となり図4の耐力線 $beIr$ が求められ、 $beIr$ と $beIc$ を累加することによって耐力線 $beIrc$ が求められる。柱材に補強材としての鉄骨がある場合、その最大の抵抗力は鉄骨断面の耐力線 $cIs$ によって評価されるものと考えられ、 $cIs$ に前述の $beIrc$ を累加することによって、鉄骨部材のてこ作用による抵抗力としての耐力線 $beIsrc$ が求められ、任意の軸力 $Na$ における鉄骨部材のてこ作用による抵抗モーメント $beM$ は $beM = beM_1 + beM_2$ によって評価されるので柱材の部材接合端における抵抗モーメント $beMc$ は $beMc = beM \cdot (\frac{h}{2} - \frac{s_d}{2}) / h$ によって示される。次いではり部材および柱部材の抵抗モーメントの検討が必要である。図4に柱材およびはり部材の耐力線 $cIsrc$ ,  $bIb$ を示す。なお、 $bIb$ は柱材の抵抗モーメントに置換して示されたものである。これらの考察より、任意の軸力のもとでの部材に基因する強さ $mM$ は  $mM = \min(beMc, bM, cM)$  の条件によって求められる。

(Ⅲ) 接合部パネルに基因する強さ 柱はり接合部の耐力ははりフランジに拘束されたコンクリートと鉄骨ウェブパネルで構成される鉄骨コンクリートパネルとフランジ幅より外側、すなわち $(bc - sb)$ 部分のコンクリートパネルの耐力の累加によって求められるものとする。前述の鉄骨部材のてこ作用による耐力線 $beIsrc$ は鉄骨コンクリートパネルに作用する鉛直方向の最大の入力せん断力となる。一方、水平方向のせん断耐力は鉄骨ウェブパネルとフランジに拘束されたコンクリートパネルのせん断耐力の和によって評価できるので、図4に示す様にその抵抗力を柱材の抵抗モーメント $pIs$ で表現すれば、 $beIsrc$ のうち $pIs$ で区切られた内側の領域(ABCDEFA部分)によって鉄骨コンクリートパネルとしての耐力が評価できる。コンクリートパネルの耐力は図5に示す様に柱および柱はり接合部は圧縮力にのみ抵抗するコンクリート筋違によって応力は伝達され、はり材は部材接合端におけるコンクリート筋違の釣合いを成立させる、いわば拘束力としての働きを持つモデルを想定する。すなわち、部材接合端において、コンクリート筋違に作用する圧縮力 $R_c, R_p$ および拘束力 $M_b / s_j b$ によって  $R_c^2 - (R_p \cdot \cos \theta_p - M_b / s_j b)^2 + (R_p \cdot \sin \theta_p)^2 \cdot (B)$  の釣合い式を満足する必要がある。コンクリート筋違の幅を $kD_c$ 、接合部におけるコンクリート筋違の応力度はコンクリートの圧縮強度 $F_c$ に達しているものとする。と系および支点での釣合い条件より $M_b = R_c \cdot h \cdot \sin \theta_c$ によって表現でき、この $M_b$ を(Ⅱ)

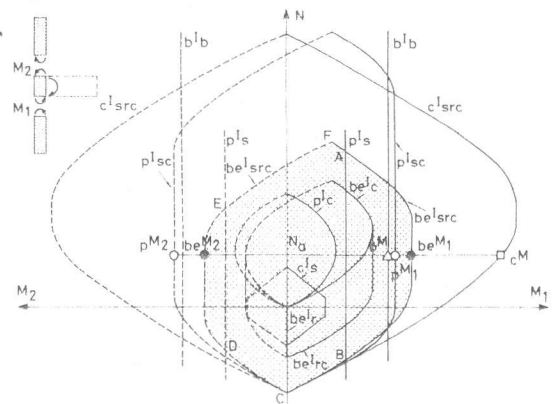


図4. 耐力の評価法

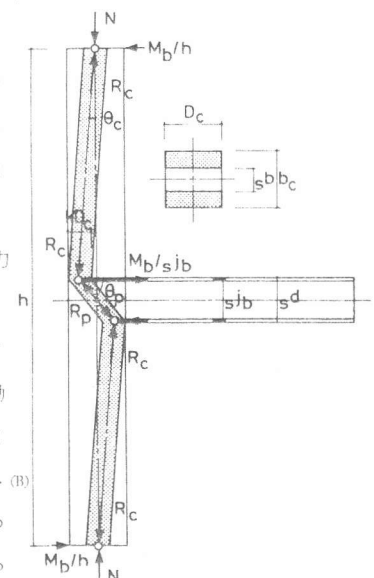


図5. コンクリート筋の応力伝達機構

式に代入してRcについて解けば  $R_c = \left[ -h \cdot \sin \theta_c \cdot \cos \theta_p \cdot R_p / s j b + \sqrt{(h \cdot \sin \theta_c \cdot \cos \theta_p \cdot R_p / s j b)^2 + (1 - h^2 \sin^2 \theta_c / s j b^2) R_p^2} \right] / (1 - h^2 \sin^2 \theta_c / s j b^2)$   
 ただし  $R_p = k \cdot D_c (h_e - s b) \cdot \sin \theta_p \cdot F_c$ ,  $\sin \theta_c = \frac{(1-k) D_c}{2} \sqrt{\frac{h^2 - s j b^2}{(D_c - k D_c)^2 + (D_c - k D_c)^2}}$ ,  $\sin \theta_p = s j b / \sqrt{(D_c - k D_c)^2 + s j b^2}$  が求められ Rc は中立軸比 k の関数として表現される。この Rc の垂直成分  $R_c \cos \theta_c$  および水平成分  $R_c \sin \theta_c$  は各々柱材に作用する軸力 N およびせん断力 Qc に相当するが、この N および Qc も同様に k の関数として表現され、k を変数として各々の成分を求めれば、任意の k に対するコンクリートパネルの保有しうる耐力線が求められる。図 4 の pIc はこの様な考えのもとにコンクリートパネルの耐力を柱部材の抵抗モーメントおよび軸力によって示したもので、pIsc はこの pIc と前述の鉄骨コンクリートパネルの耐力線を累加して求められた接合部パネルとしての耐力線を示す。この pIsc によって任意の軸力 Na における接合部パネルの耐力 pM が求められる。以上、部材および接合部パネルに基因する強さが求められたが、部分骨組架構としての耐力 tM は  $tM = \min(mM, pM)$  の条件によって求められる。

### 5. 耐力評価の妥当性

図 6 は前述の解析手法に基づいて求められた耐力線を示したもので縦軸は無次元化抵抗軸力 n，横軸は無次元化抵抗モーメント m1, m2 を示す。図中の beIsrc は鉄骨部材のてこ作用による抵抗力としての耐力線、bIb ははり部材の耐力線、cIrc, cIsrc は柱材の耐力線および pIsc は接合部パネルの耐力線を示す。なお、計算にあたっては既往の著者<sup>2)</sup>らの研究結果に基づいて 2.0 を採用した。また、鉄骨パネルの耐力線 pIs を求めるにあたって、フランジに拘束されたコンクリートの抵抗力は無視して求められた。

図 7 は解析値と実験値の対応を示したもので、横軸は解析値、縦軸は実験値を示す。解析値は実験値と良く一致しており本耐力評価の妥当性が示されるものと考えられる。

### 6. 結 語

柱は任意の鉄骨量を有する鉄骨鉄筋コンクリート、はり純鉄骨で構成される T 字形の部分骨組架構の実験および理論的な考察に基づいて、はり部材のてこ作用に基づく柱はり接合部における応力伝達機構が明らかにされた。また、その応力伝達機構から累加強度理論に基づく耐力評価の手法が提案され、実験値を良く説明できることが示された。なお、耐力の評価にあたってコンクリートの支圧強度が耐力に与える影響は大きく、支圧強度を実験的あるいは理論的に評価するための研究が必要であると同時に、支圧強度を増大させ、柱の鉄骨量が零あるいは少ない場合の履歴特性を改善する為の何らかの補強法の開発が今後の課題であると考えられる。

7. 謝 辞 本実験を行なうにあたり当時大阪工業大学建築学科卒研究生田辺徹次、松谷輝昭両氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

8. 参考文献 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1975年、p.p. 144~145  
 2) 南・西村・栗澤：埋込式鉄骨部材定着部の応力伝達機構に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、昭和57年10月、p.p. 1813~1814

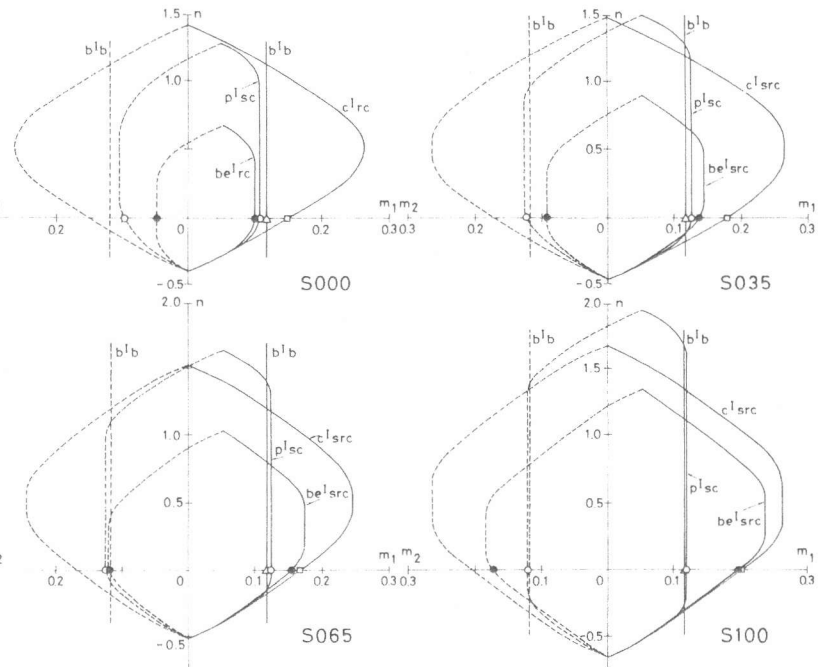


図 6. 耐力の算定

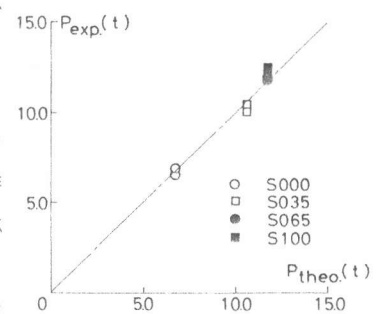


図 7. 実験値と解析値との対応