

(31) S部材がアンカーボルトを介してRC部材に結合される非埋込み接合部の応力伝達機構

馬場 望¹・金井 真一²・西村 泰志³

¹正会員 大阪工業大学准教授 工学部建築学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail: baba@archi.oit.ac.jp

²正会員 (株) 繁建築構造設計事務所 (〒540-0011 大阪市中央区農人橋2-1-30)

E-mail: s-kanai@shigeru-st.net

³正会員 大阪工業大学教授 工学部建築学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail: nishimura@archi.oit.ac.jp

鉄骨部材がアンカーボルトを介して鉄筋コンクリート部材に結合されるト字形接合部について、鉄骨部材から鉄筋コンクリート部材への応力伝達機構を提案し、その妥当性を検討するために、接合部近傍に配置されたせん断補強筋が応力伝達機構におよぼす影響を実験的に検討した。その結果、アンカーボルトの埋込み長さが鉄筋コンクリート部材の有効せいより小さい場合、アンカーボルト近傍に配置されたせん断補強筋ほど、接合部の応力伝達におよぼす効果が大きいことが示された。また、提案された応力伝達機構および実験結果に基づいて、接合部の力学モデルおよび終局耐力を評価する手法が提案された。接合部の抵抗機構は、アーチ機構およびトラス機構によって構成される。その結果、本耐力評価法によって実験値を概ね評価できることが示された。

Key Words : joint, anchor bolt, embedded length, transverse reinforcements, stress transferring mechanism,

1. 序

鋼コンクリート合成構造接合部の一つに、鉄骨（以下、S という）部材が鉄筋コンクリート（以下、RC という）部材に埋め込まれず、アンカーボルト等を介してRC 部材に結合される接合部がある。代表的な部位としては、鋼構造露出柱脚が挙げられる。また、機械式定着工法を用いたRC 造柱梁接合部は、定着筋をアンカーボルトと見なせば同種の接合部とみなすことができる。したがって、これらの接合部の基本的な応力伝達機構はほぼ同じであり、構造形式や部位にかかわらず、基本的かつ統一的な接合部の抵抗機構や耐力評価法を構築することが可能である。

このような観点から、本研究では、S 部材がアンカーボルトを介して RC 部材に結合される接合部（以下、単に非埋込み接合部という）について、ト字形接合部に着目し、S 部材から RC 部材への応力伝達機構を提案する。また、提案された応力伝達機構の妥当性を検討するために、接合部近傍に配置されたせん断補強筋が応力伝達機構におよぼす影響を実験的に検討するとともに、非埋込み接合部の終局耐力の評価を試みるものである。

2. 接合部の応力伝達機構

図 1 にト字形接合部の基本的な応力伝達機構を示す。S 部材に曲げモーメントが作用すると、エンドプレート上の圧縮側では圧縮応力 C 、引張側ではアンカーボルトを介して定着板に支圧応力が作用し、これらの応力は反作用として RC 部材に伝達される。アンカーボルトの埋込み長さ L_d が RC 部材の有効せい d 程度（以下、 $L_d \cong d$ とする）の場合、図 1 (a) に示すように、A (B) 点では、接合部パネルのコンクリート圧縮束に作用する圧縮力 R_p 、RC 部材接合端に作用する曲げ圧縮力 C_q とせん断力 Q_q およびアンカーボルトの引張力 T_q を介して定着板に作用する支圧応力（エンドプレート下面に作用する圧縮応力 C_q ）によって釣合系を構成し、接合部ではアーチ機構が形成されると考えられる。また、RC 部材に伝達されたアンカーボルトの引張力 T_t およびエンドプレートの圧縮応力 C_t の反力は、RC 接合部断面の隅角部主筋に向かう力となり、RC 接合部パネルに配置されたせん断補強筋の引張力 pT_w として伝達される。この応力伝達によって、せん断補強筋の引張力 pT_w は、主筋の付着力およびコンクリートの圧縮束の圧縮力と釣合系を構成し、

トラス機構が形成されると考えられる。

しかしながら、アンカーボルトの埋込み長さ L_d が RC 部材の有効せい d より小さい（以下、 $L_d < d$ とする）場合、定着板高さ位置近傍では、RC 部材に大きな軸方向力が作用しない限り、接合部コンクリートは RC 部材接合端に作用する曲げ圧縮力による拘束力を期待することができない。この場合、図 1 (b) に示すように、アンカーボルトの引張力 T_a を介して定着板に作用する支圧応力の反力は、その作用位置から 45° 方向に想定された破壊面内において、破壊面内を貫通する RC 部材側のせん断補強筋に引張力 cT_w を生じさせる。したがって、図中の A 点において、せん断補強筋の引張力 cT_w 、主筋の付着力および RC 部材の曲げ圧縮力 cC_a とせん断力 cQ_a の合力の反力は、接合部のコンクリート圧縮束を介してエンドプレート圧縮側の B 点に伝達されることによって釣合系を構成し、接合部はアーチ機構を形成すると考えられる。また、引張側のアンカーボルト近傍に集中的にせん断補強筋（以下、集中補強筋という）を配置することによって、定着板に作用する支圧応力の反力は、集中補

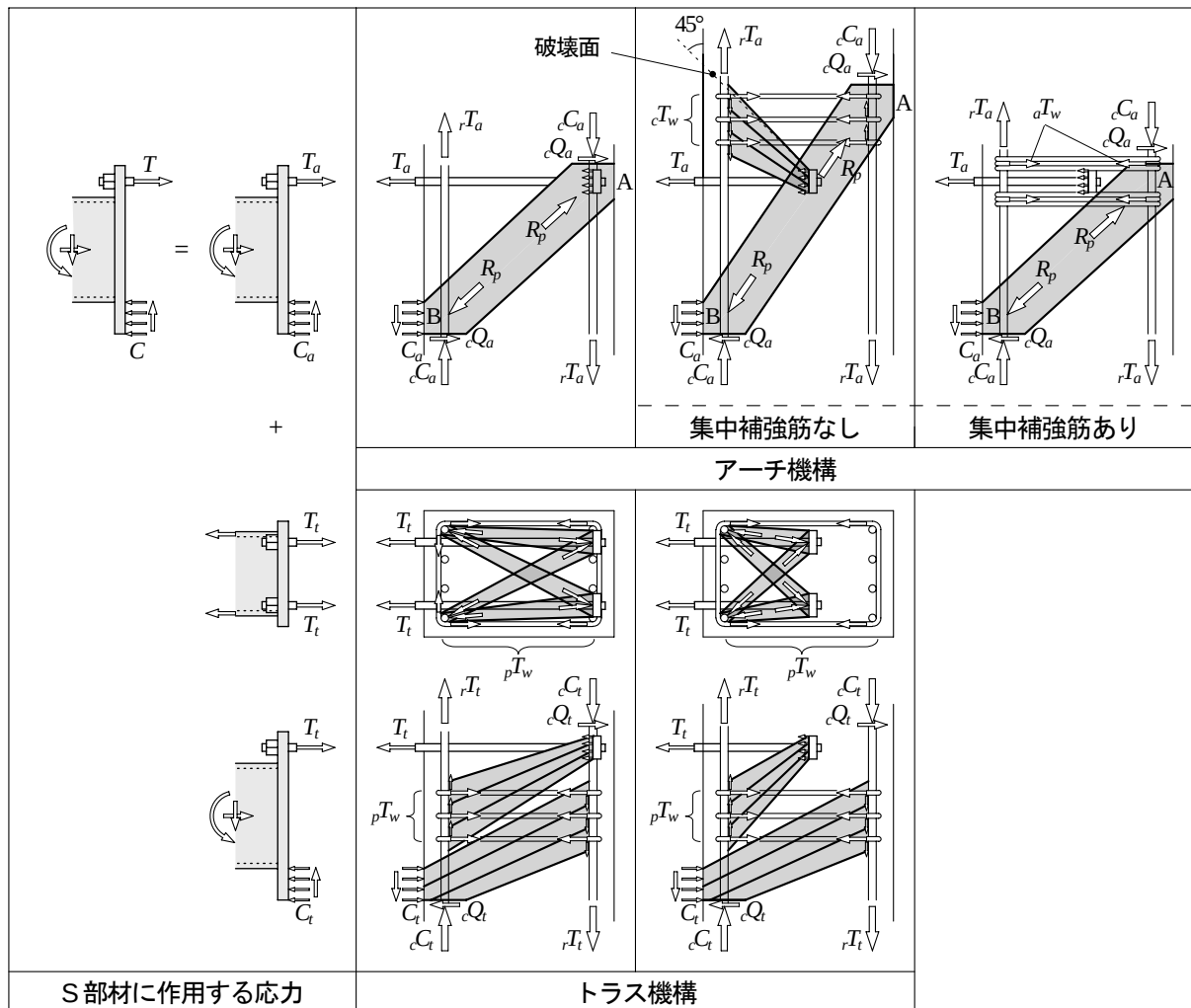
強筋の引張力 aT_w として A 点側に伝達される。この応力伝達によって、RC 部材接合端では圧縮力 R_p 、集中補強筋の引張力 aT_w および RC 部材接合端の曲げ圧縮力 cC_a とせん断力 cQ_a が釣合系を構成し、接合部ではアーチ機構が形成されると考えられる。一方、トラス機構は、 $L_d \div d$ の場合と同じように形成されると考えられる。

したがって、 $L_d < d$ の場合、引張側のアンカーボルトの近傍および破壊面内に集中的に横補強筋を配置して、S 部材から RC 部材への応力伝達を確保する必要がある。

3. 実験計画

$L_d < d$ の場合について、非埋込み接合部の応力伝達機構の妥当性を検討するために、接合部近傍のせん断補強筋の配置状況を実験変数とする計 5 体の試験体が計画された。

図 2 に代表的な試験体の概要を示す。試験体は実大の 1/3 程度の模型を想定している。S 部材は、 $\square$ -200×200



(a) $L_d \geq d$ の場合

(b) $L_d < d$ の場合

図 1 ト字形接合部の応力伝達機構

×25 (SM490A) とし、エンドプレートは PL-250×350×50 (SM490A) である。アンカーボルトは、M18 の PC 鋼棒 (C 種 1 号) を 6 本配置し、アンカーボルトの埋込み長さ L_d を 270 mm (RC 部材せい d の 0.6 倍かつ PC 鋼棒の呼び名の 15 倍) とした。RC 部材の断面寸法は 300×450 mm である。

図 2 に各試験体の接合部近傍のせん断補強筋の配筋状況を示す。T-A270RN 試験体は、接合部近傍にせん断補強筋が配置されておらず、アンカーボルトの引抜きに伴うコンクリートの抵抗力を調べる試験体である。T-A270JRO 試験体は RC 部材側の破壊面内、T-A270JRI 試験体は RC 接合部パネルにのみせん断補強筋が配置されている。T-A270 試験体は、接合部近傍に 2-D10 とするせん断補強筋が 70 mm の間隔 ($p_w=0.74\%$) で配置されている。T-A270TR 試験体は、アンカーボルト近傍に 2-D10 とする 6 組の閉鎖型せん断補強筋 (集中補強筋) が配置されている。なお、各試験体とも、接合部パネル側、RC 部材側各々の破壊面内に配置されているせん断補強筋量は同じであり、S 部材やアンカーボルトが RC 接合部パネルに先行して破壊しないように設計されている。表 1 に使用材料の力学的特性を示す。

実験は、図 2 に示すように、RC 部材を単純支持し、S 部材端部に単調荷重を行うものである。

4. 実験結果とその考察

図 3 に代表的な試験体の最終破壊状況を示す。せん断補強筋の有無や配筋状況にかかわらず、定着板位置からエンドプレート圧縮側に向かって、接合部パネルに斜めひび割れが生じ、アンカーボルトの引抜きに伴うコーン状ひび割れが観察された。T-A270RN 試験体は、曲げひび割れはほとんど観察されず、変形の増大に伴って、接合部パネルの斜めひび割れが RC 部材接合端を越えて RC 部材側に大きく進展したのに対し、T-A270 試験体は、曲げひび割れが観察されるとともに、接合部パネルの斜めひび割れが RC 部材の主筋に沿って進展していることがわかる。一方、T-A270TR 試験体は、複数の接合部の斜めひび割れが RC 部材接合端に進展する様相を呈して

表 1 材料の力学特性

材料	応力度	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 (N/mm ²)
鉄骨	PL25	349	524	2.02×10^5
	PL50	329	510	1.67×10^5
主筋	D16	375	525	1.71×10^5
せん断補強筋	D10	355	500	1.81×10^5
アンカーボルト	17mm	1171	1251	1.95×10^5
材料	応力度	圧縮強度 F_c (N/mm ²)	割裂強度 F_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
コンクリート		32.4	2.75	2.39×10^4

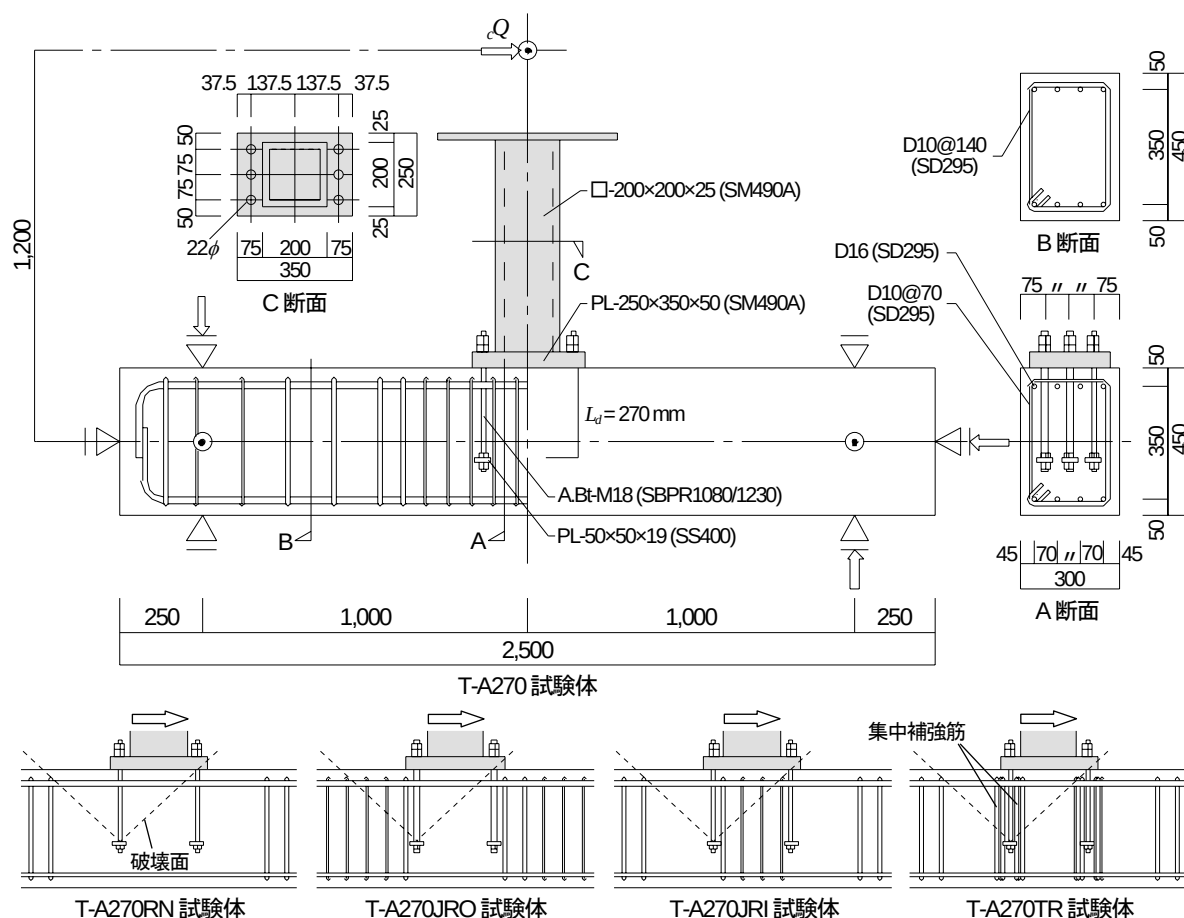


図 2 試験体詳細

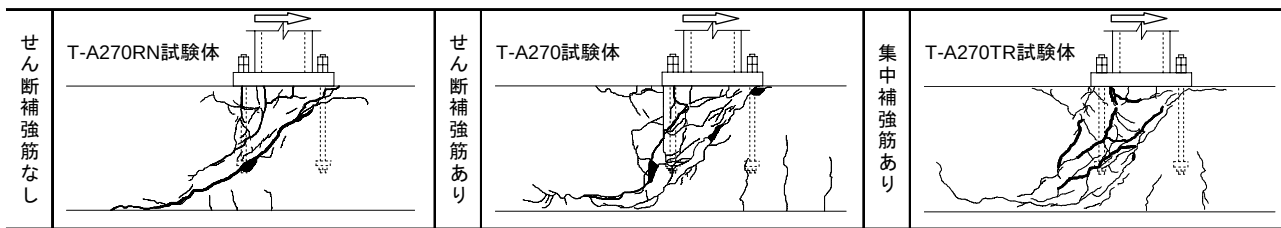


図3 最終破壊状況

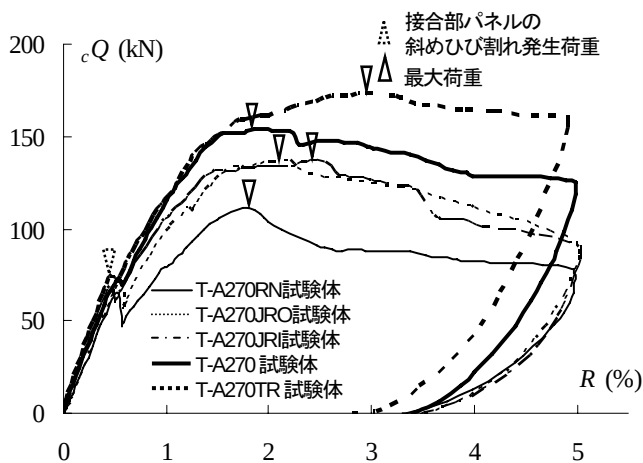


図4 荷重-変形関係

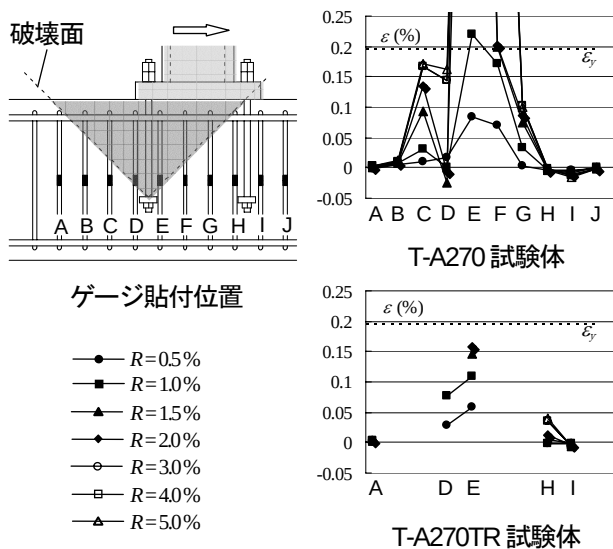


図5 せん断補強筋の軸ひずみ度推移状況

いる。

図4に各試験体の荷重-変形関係を示す。縦軸はS部材に負荷された荷重 Q 、横軸は層間変形角 R である。各試験体とも、 $R=0.5\%$ 付近で、接合部パネルの斜めひび割れ発生とともに荷重の低下が見られるが、その後、変形の増大に伴って荷重は増大している。全体的には、接合部近傍に配置されたせん断補強筋量の増大とともに試験体の最大荷重は増加していることがわかる。また、せん断補強筋がRC部材側および接合部パネル側のみ配置されるT-A270JROおよびT-A270JRI試験体の荷重-

変形関係はほぼ等しいことから、各試験体の最大荷重の差は、接合部近傍のせん断補強筋量に関係していることが推察される。しかしながら、集中補強筋を有するT-A270TR試験体は、破壊面内のせん断補強筋量が同じT-A270試験体と比べて最大荷重は増加しており、最大荷重発揮後の耐力低下の割合も小さいことがわかる。

図5にT-A270およびT-A270TR試験体の接合部近傍に配置されたせん断補強筋の軸ひずみ度推移状況を示す。縦軸は図に示すせん断補強筋の各点の軸ひずみ度 ε 、横軸は図中に示すひずみゲージ位置である。また、グラフ中の点線は、降伏ひずみ度 ε_y を示す。実験から得られた軸ひずみ度は、破壊面内に配置されているアンカーボルト近傍のせん断補強筋ほど軸ひずみ度が卓越し、アンカーボルトから離れるにつれて小さくなっている。また、集中補強筋を有するT-A270TR試験体は、荷重の増大とともに集中補強筋の軸ひずみ度が卓越している。

これらのことから、 $L_d < d$ の場合の非埋め込み接合部の応力伝達機構は、アンカーボルト近傍に配置されたせん断補強筋ほど応力伝達におよぼす効果が大きいと考えられる。

5. 終局耐力の評価

(1) 基本事項

上述の実験結果に基づいて、図1に示された非埋め込み接合部の応力伝達機構を図6に示すような力学モデルによって表現し、接合部の終局耐力の評価を試みる。接合部の終局耐力は、アーチ機構の終局耐力とトラス機構の終局耐力を一般化累加することによって評価できるものとする。

接合部の終局耐力の評価に際し、以下の仮定を設ける。

- 1) RC接合部パネルの有効幅 p_b は、 $p_b = (b + e_p b) / 2$ とする。ここに、 b はRC部材の幅、 $e_p b$ はエンドプレートの幅である。
- 2) エンドプレートに作用する圧縮応力の合力は、アンカーボルト位置に作用する。
- 3) S部材に作用するせん断力は、エンドプレートに作用する圧縮応力に伴って生じる摩擦力によってRC接合部に伝達されるが、RC部材断面の軸圧縮耐力に比

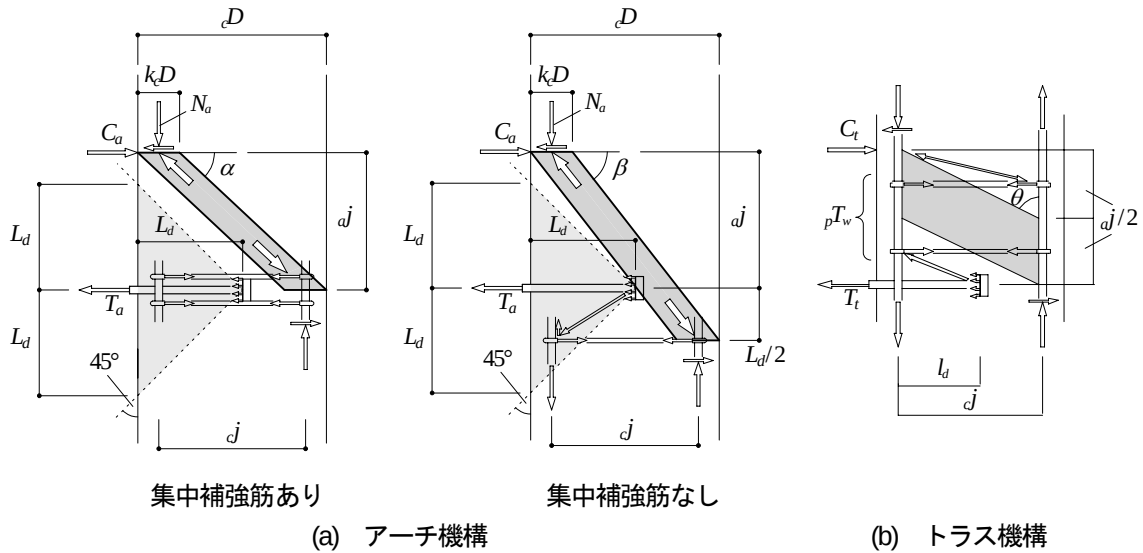


図6 ト字形接合部の抵抗機構 ($L_d < d$ の場合)

べて非常に小さいことから、これを無視できるものとする。

- 4) トラス機構の終局耐力は、せん断補強筋の引張降伏によって決定される。

(2) アーチ機構の終局耐力

アーチ機構の終局耐力は、RC 部材接合端の抵抗モーメントによって表現すると、接合部のコンクリート圧縮束に作用する圧縮力 R_p によって決定される耐力 M_a と、式(1)によって決定される耐力 M'_a のいずれか小さい方で評価できるものとする。

$$M'_a = (M_{cf} + M_{aw1} + M_{aw2}) \quad (1)$$

ここに、 M_{cf} はコーン状破壊時のコンクリートの抵抗力によって決定される耐力、 M_{aw1} はアンカーボルト近傍に配置された集中補強筋の引張抵抗力によって決定される耐力、 M_{aw2} は破壊面を貫通する RC 部材側のせん断補強筋の引張抵抗力によって決定される耐力である。

a) 集中補強筋が配置されている場合

コンクリート圧縮束の圧縮力 R_p は、図 6 (a) に示すように、接合部パネルのコンクリート圧縮束のせいを $k_c D$ と仮定し、コンクリートの圧縮強度 σ_B に達しているものとする、式(2)によって表現される。

$$R_p = p_b \cdot k \cdot c \cdot D \cdot \sin \alpha \cdot \sigma_B \quad (2a)$$

$$\sin \alpha = \frac{a j}{\sqrt{\{(1-k) \cdot c D\}^2 + a j^2}} \quad (2b)$$

ここに、 k は 0 から 1 の任意の値、 $c D$ は RC 部材せい、 α は接合部パネルのコンクリート圧縮束と RC 部材断面とのなす角、 $a j$ はアンカーボルトの重心間距離である。この圧縮力 R_p を RC 部材接合端の抵抗軸力 N_a と抵抗モーメント M_a によって表現すれば、式(3)のように求められる。

$$N_a = R_p \cdot \sin \alpha \quad (3a)$$

$$M_a = R_p \cdot \sin \alpha \cdot \frac{(1-k) \cdot D_c}{2} \quad (3b)$$

したがって、式(3)の k に任意の値を代入することによって、コンクリート圧縮束の圧縮力 R_p によって決定される耐力を求めることができる。

アンカーボルトの引抜きに伴うコーン状破壊によるコンクリートの抵抗力は、図 6 (a) に示すように、定着板に作用する支圧応力の作用位置から 45° 方向の破壊面を想定し、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説」¹⁾ に示される RC 造柱梁接合部の梁主筋かき出し定着破壊耐力を参考にして求める。コーン状破壊によるコンクリートの抵抗力は、アンカーボルトの引張抵抗力 T_{cf} によって、次式で求められる。

$$T_{cf} = 2 \cdot L_d \cdot c \cdot b \cdot 0.313 \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot \frac{\sqrt{L_d^2 + a j^2}}{a j} \quad (4)$$

また、集中補強筋の引張抵抗力によって決定される耐力は、アンカーボルトの引張抵抗力 T_{aw1} によって、次式で求められる。

$$T_{aw1} = n_s \cdot a_{aw} \cdot \sigma_{wy} \quad (5)$$

ここに、 n_s は集中補強筋の本数、 a_{aw} は集中補強筋の断面積、 σ_{wy} は集中補強筋の降伏強度である。式(4)および式(5)の各アンカーボルトの引張抵抗力 T (T_{cf} および T_{aw1}) を RC 部材接合端の抵抗モーメント M (M_{cf} および M_{aw1}) によって表現すれば、式(6)のようになる。

$$M = T \cdot \frac{a j}{h} \cdot \frac{(h - a j)}{2} \quad (6)$$

ここに、 h はRC部材の反曲点間距離である。

b) セン断補強筋が均等に配置されている場合

コンクリート圧縮束の圧縮力 R_p は、図 6 (a) に示すように、式 (2) および式 (3) と同様の手法によって求めることができる。ただし、接合部パネルのコンクリート圧縮束と RC 部材断面とのなす角 α については、式 (7) に示す β に置き換える。

$$\beta = \sin^{-1} \frac{(a_j + l_d/2)}{\sqrt{\{(1-k) \cdot cD\}^2 + (a_j + l_d/2)^2}} \quad (7)$$

ここに、 l_d は定着板から主筋重心までの距離である。この β を式 (2a) に代入し、求められた R_p を式 (3) に代入することによって、コンクリート圧縮束の圧縮力 R_p によって決定される耐力を求めることができる。

一方、破壊面を貫通する RC 部材側のせん断補強筋の引張抵抗力によって決定される耐力 M_{aw2} は、式 (8) によって求められる。

$$M_{aw2} = \frac{c p_w \cdot c \sigma_{wy} \cdot L_d \cdot e b_p \cdot (h - a_j)}{(h / a_j - 1) \cdot 2} \quad (8)$$

ここに、 $c p_w$ は RC 部材側の破壊面内のせん断補強筋比、 $c \sigma_{wy}$ はせん断補強筋の降伏強度である。

(3) トラス機構の終局耐力

トラス機構の終局耐力は、図 6 (b) に示すように、せん断補強筋の引張降伏によって決定されるものとする。そのときの耐力 M_{tw} は、式 (9) によって求められる。

$$M_{tw} = \frac{1}{2} p p_w \cdot p \sigma_{wy} \cdot a_j \cdot b_e \frac{\cos \theta}{\sin \theta} c j \quad (9a)$$

$$\cos \theta = \frac{a_j/2}{\sqrt{l_d^2 + (a_j/2)^2}}, \quad \sin \theta = \frac{l_d}{\sqrt{l_d^2 + (a_j/2)^2}} \quad (9b)$$

ここに、 $p p_w$ は接合部パネルのせん断補強筋比、 $p \sigma_{wy}$ はせん断補強筋の降伏強度、 θ は RC 部材材軸とコンクリート圧縮束とのなす角度、 $c j$ は主筋の重心間距離である。

表 2 実験値と計算値の比較

試験体名	実験値	計算値	$c Q_{exp} / c Q_{cal.}$
	$c Q_{exp.}$ (kN)	$c Q_{cal.}$ (kN)	
T-A270RN試験体	112	114	0.98
T-A270JRI試験体	137	143	0.96
T-A270JRO試験体	137	135	1.01
T-A270試験体	154	164	0.94
T-A270TR試験体	173	161	1.08

(4) 実験値と計算値の比較

表 2 に試験体の実験値と計算値を示す。なお、集中補強筋を有する T-A270TR 試験体は、接合部パネルにせん断補強筋が配置されていないため、一方の鉄筋に作用する引張力は他方の圧縮筋に伝達されるとみなし、トラス機構の耐力を主筋の引張降伏強度として算定した。実験値に対する計算値の平均値 $c Q_{exp} / c Q_{thea}$ は 0.99 であり、計算値は実験値を概ね評価できていることから、図 6 で示された抵抗機構の妥当性が推察される。

6. 結語

本研究の結果、アンカーボルトの埋込み長さが RC 部材の有効せいより小さい場合のト字形接合部に関する以下の知見が得られた。

- 1) 接合部の応力伝達機構およびそれに基づいた抵抗機構が提案された。
- 2) セン断補強筋が接合部の応力伝達におよぼす効果を高めるためには、アンカーボルト近傍に集中的に配置する必要がある。
- 3) 提案された耐力評価法によって、計算値は実験値を概ね評価できる。

参考文献

- 1) 日本建築学会，鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説，1999

STRESS TRANSFERRING MECHANISM OF JOINT CONNECTED S MEMBER WITH RC MEMBER USING ANCHOR BOLT

Nozomu BABA, Shinichi Kanai and Yasushi Nishimura

To clarify stress transfer mechanism of the joint connected steel member with reinforced concrete member using anchor bolt, five specimens were tested under monotonic loading. From the test results, it was shown that stress transfer from steel member to reinforced concrete member in the joint could be mobilized by transverse reinforcements arranged intensively around anchor bolt.

Based on the arch and the truss mechanism, the resistance mechanism of the outer panel was proposed. From these mechanisms, a method capable of estimating the ultimate strength of the joint were proposed. The predictions were shown to be in good agreement with the test results.