

## 論文 はり貫通形式 RCS 接合部の応力伝達におよぼす直交梁の効果

馬場 望\*・西村泰志\*\*

**要旨**：本研究は、最も基本的な接合部形式の一つである S 梁が RC 柱を貫通する形式で、直交梁を有するディテールに着目して、RCS 柱はり接合部の内部パネルから外部パネルへの応力伝達におよぼす直交梁の効果を実験的に検討した。その結果、直交梁は、鉄骨フランジ上下面にてこ機構に基づく支圧力によって外力に抵抗し、また、外部パネルの耐力は、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに大きく依存することが示された。さらに、直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこ機構とアーチ機構による外部パネルの抵抗機構が示された。

**キーワード**：RCS 接合部、はり貫通形式、直交梁、抵抗機構

## 1. 序

柱は鉄筋コンクリート（以下、RC という）造、はりは鉄骨（以下、S という）造で構成されたハイブリッド構造（以下、RCS 構造という）の柱はり接合部に関して、その合理的な設計法を確立するためには、S 部分から RC 部分、特に、鉄骨フランジ幅内の内部パネルから鉄骨フランジより外側の外部パネルへの応力伝達機構の解明が不可欠である。既往の研究により、直交梁のない柱はり接合部の内部パネルから外部パネルへの応力伝達は、内部パネルと外部パネルとの間に生ずるねじりモーメントによってなされるものおよび鉄骨梁上下面に形成される水平圧縮束によってなされるもの<sup>1)</sup>の2つの機構が存在することが明らかにされている。筆者らは、最も基本的な接合部形式の一つである S 梁が RC 柱を貫通する形式に着目し、一連の実験的および解析的研究によって、上述の応力伝達機構の妥当性を検討し、十字形内部接合部の力学モデルを提案した<sup>2)</sup>。一方、接合部に直交梁を有する場合、上述の2つの機構のほかに、直交梁によって内部パネルの応力を直接外部パネルに伝達させる機構が存在する。したがって、実際の接合部に関して合理的な設計法を確立するため

には、直交梁の影響を加味した力学モデルの確立が必要である。

このような観点から、本研究は、直交梁を有するはり貫通形式 RCS 接合部に関して、内部パネルから外部パネルへの応力伝達におよぼす直交梁の効果を実験的に検討し、外部パネルの耐力評価を試みるものである。

## 2. 耐力評価の試み

## 2.1 外部パネルの抵抗機構

Fig. 1 は直交梁を有するはり貫通形式 RCS 接合部の外部パネルの抵抗機構を模式的に示したものである。外部パネルは、直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこ機構とアーチ機構によって外力に抵抗することを意味している。これらの作用は、直交梁にねじりモーメントを生じさせ、その耐力は直交梁のねじり耐力に依存する。

内部パネルの回転に対して、直交梁は鉄骨フランジ上下面にてこ機構に基づく支圧力によってねじりモーメントを生じさせ、直交梁はそのねじりモーメントに対して抵抗する。一方、外部パネルに作用する柱圧縮力  $C_c$  およびせん断力  $Q_c$  による外部パネルの回転は、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメント（一对の偶力

\* 大阪工業大学大学院博士後期課程 工修（正会員）

\*\* 大阪工業大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

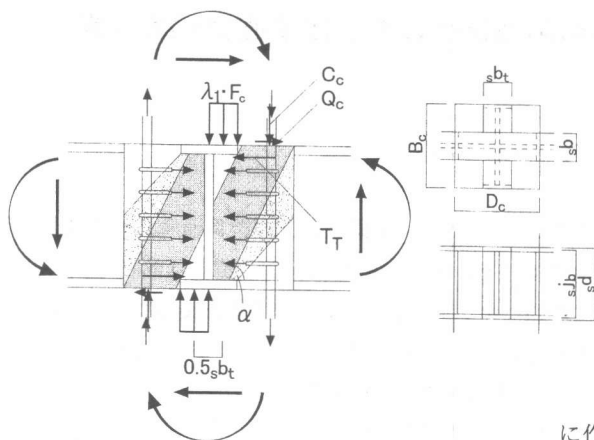


Fig. 1 Resistance Mechanism of Outer Panel on S Beam-RC Column Joint with Transverse Beam

$T_T$ に置換したことに対応する) および接合部のせん断補強筋の引張力によって拘束され、外部パネルではアーチ機構を形成して外力に抵抗すると考えられる。すなわち、このアーチ機構は、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに依存する釣合系と接合部のせん断補強筋の引張力に依存する釣合系が構成されることを意味している。

この抵抗機構に基づいて、直交梁を有する柱はり接合部の外部パネルの終局耐力  $M_{ut}$  は、各抵抗機構の耐力を累加することによって

$$M_{ut} = \min.(M_{st}, M_{bt} + \min.(M_{a1}, M_T) + M_{a2}) \quad (1)$$

として求められる。ここに、 $M_{st}$  は直交梁のねじり耐力、 $M_{bt}$  は直交梁の鉄骨フランジにてこ機構に基づく支圧力による抵抗モーメント、 $M_{a1}$  は内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに依存するアーチ機構による抵抗モーメント、 $M_{a2}$  は接合部のせん断補強筋に依存するアーチ機構による抵抗モーメント、 $M_T$  は内部パネルと外部パネルとの間のねじり耐力である。

なお、接合部がふさぎ板を有する場合、直交梁のフランジに作用するせん断力が直接ふさぎ板に伝達され、ふさぎ板はせん断抵抗要素として働くことが考えられる。また、アーチ機構の構成はふさぎ板がない場合と大差はないと考え


られるが、ふさぎ板の一部がせん断補強筋の働きを有することも考えられる。これらの詳細な検討については今後の課題である。

## 2.2 各抵抗機構の評価

直交梁の鉄骨フランジにてこ機構に基づく支圧耐力  $M_{bt}$  は、てこ機構による直交梁の鉄骨フランジ上下面の応力塊を矩形と考え、その大きさを  $\lambda_1 \cdot F_c$  とし、応力は直交梁の鉄骨フランジ幅  $s \cdot b_t$  の  $s \cdot b_t / 2$  に作用しているものと仮定すると


$$M_{bt} = 0.5 \cdot s \cdot b_t \cdot (B_c - s \cdot b) \cdot \lambda_1 \cdot F_c \cdot (0.5 \cdot s \cdot b_t) \quad (2)$$

として求められる。ここに、 $B_c$  は柱幅、 $s \cdot b$  は主梁の鉄骨フランジ幅、 $F_c$  はコンクリートの圧縮強度、 $\lambda_1$  は局部支圧係数である。

内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに依存するアーチ機構は、Fig.1の  で示されたコンクリート圧縮束によって構成されると考える。柱はり接合部のコンクリート圧縮束の圧縮力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、アーチ機構による耐力  $M_{a1}$  は

$$M_{a1} = 0.55 \cdot D_c \cdot \sin \alpha \cdot (B_c - s \cdot b) \cdot F_c \cdot (0.55 \cdot D_c) \quad (3)$$

として求められる。ここに、 $\alpha$  はコンクリート圧縮束とはり部材材軸とのなす角度である。コンクリート圧縮束のせいは、文献2) に示された力学モデルに基づいて  $0.55 \cdot D_c$  とする。

一方、接合部のせん断補強筋の引張力に依存するアーチ機構は、Fig.1の  で示されたコンクリート圧縮束によって構成されると考えられる。この機構による耐力はせん断補強筋の降伏引張力によって決定され、しかもこの引張力が非常に小さいため、アーチ機構による耐力は非常に小さいと考えられる。接合部のせん断補強筋の引張力に依存するアーチ機構による最大耐力は

$$M_{a2} = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \frac{s \cdot j \cdot b}{2} \cdot B_c \cdot \frac{s \cdot j \cdot b}{2} \quad (4)$$

によって求められる。ここに、 $p_w$  は接合部のせ

せん断補強筋比,  $\sigma_{wy}$  はせん断補強筋の降伏応力度,  $s_b$  は鉄骨フランジ重心間距離である。

また, 内部パネルと外部パネルとの間のねじり耐力  $M_T$  は, 文献 2) に示されたねじり耐力式

$$\frac{M_T}{s_b d^2 \cdot (3 \cdot D_c - s_b d)} \cdot \frac{1}{F_c} = 0.26 + 3.22 \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \frac{B_c}{D_c} \cdot \frac{1}{F_c} \quad (5)$$

によって評価できるものとする。ここに,  $s_b$  ははりせい,  $p_w$  は接合部のせん断補強筋比,  $\sigma_{wy}$  はせん断補強筋の降伏応力度である。

### 3. 実験計画

Fig. 2 は前述の直交梁の効果を検討するために計画された実験の概要を示す。計画された試験体は, 主梁鉄骨フランジ上下面と柱コンクリートが接触しないようにそれらの間に高さ 30 mm のスリットを設けることによって, 内部パネルの支圧抵抗が除去されている。その上で, 直交梁の働きを明確にするために, 計 4 体の試験体が計画された。

TR-53t および BR-53t 試験体は, 柱はり接合部内にせん断補強筋が配置されたタイプである。TR-53t 試験体は, 内部パネルと外部パネルとの間のねじりによる応力伝達におよぼす直交梁の影響を明らかにしようとしたものである。この試験体では, 直交梁の鉄骨フランジ上下面と柱コンクリートが接触しないように, それらの間にスリットが設けられている。BR-53t 試験体は, 内部パネルと外部パネルとの間のねじりの影響を除去するために, 内部パネルと外部パネルとの間に幅 3 mm のスリットが設けられている。この試験体によって, 外部パネルに直接寄与する直交梁の効果を調べることができる。また, TR-CP32t および TR-CP23t 試験体は, せん断補強筋のかわりに柱はり接合部の外周部をふさぎ板で覆ったタイプである。これらの試験体は, 直交梁によってなされる応力伝達におよぼすふさぎ板の影響を明らかにしようとしたものであり, ふさぎ板の板厚  $t_{cp}$  をそれぞれ 3.2 mm

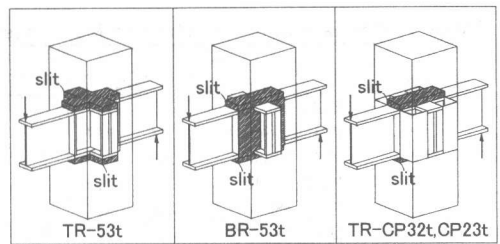


Fig. 2 Test Program

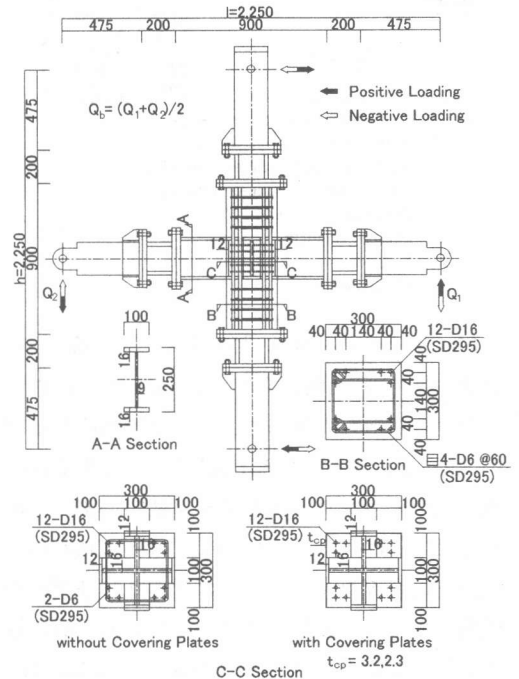


Fig. 3 Detail of Test Specimens

および 2.3 mm とした。

Fig. 3 は試験体の形状寸法, 配筋詳細および断面を示す。計画されたいずれの試験体とも形状寸法, RC 柱の配筋および S 梁のディテールは同じであり, 内部パネルがせん断破壊しないように設計されている。Table 1 に使用材料の力学的特性を示す。

実験は柱両端をピン支点とし, はり両端に正負 2 回の漸増繰返し載荷を行うものである。なお, 柱材に軸力は負荷されていない。

## 4. 実験結果とその考察

### 4.1 ひび割れおよび破壊状況

**Table 1 Mechanical Properties of Materials**

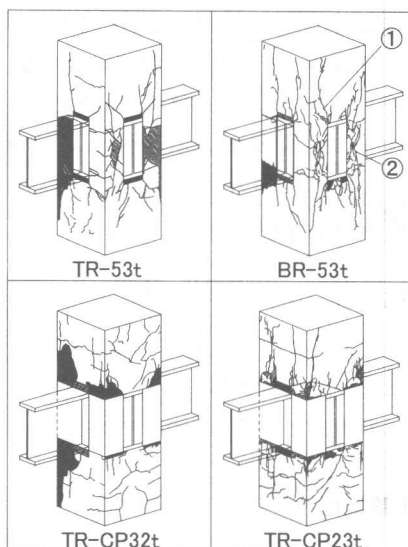
Material	Stress	$\sigma_y$	$\sigma_u$	note
		(MPa)		
Steel	PL2.3 (SS400)	201	324	4
	PL3.2 (SS400)	338	429	3
	PL9 (SS400)	289	437	1-4
	PL12 (SS400)	257	413	1-4
	PL16 (SS400)	261	422	1-4
Reinforcing Bar	D6 (SD295)	319	504	1-2
	D16 (SD295)	342	522	1-3
	(SD345)	419	580	4
Material	Stress	$F_c$	$F_t$	note
		(MPa)		
Concrete		21.2	2.81	1
		28.5	2.26	2
		27.6	2.24	3
		29.8	2.57	4

note 1 : Values used for specimen TR-53t  
 2 : Values used for specimen BR-53t  
 3 : Values used for specimen TR-CP32t  
 4 : Values used for specimen TR-CP23t  
 $F_c$  : Compressive strength  
 $F_t$  : Splitting strength  
 $\sigma_y$  : Yield stress  
 $\sigma_u$  : Maximum stress

Fig. 4 は各試験体の最終破壊状況を示す。各試験体とも、相対変位角が 0.01 rad. までに柱材に曲げひび割れが生じた。せん断補強筋タイプの TR-53t および BR-53t 試験体では、直交梁両側の接合部コンクリートにせん断ひび割れが観察された。BR-53t 試験体は、TR-53t 試験体に比べて接合部コンクリートのせん断ひび割れが顕著であり、直交梁の鉄骨フランジ上下面に接する柱コンクリートの圧壊が観察された。TR-53t 試験体は、最大耐力発揮後の接合部コンクリートの剥落が大きく、内部パネルと外部パネルがねじりにより完全に分離しているのが確認された。一方、ふさぎ板タイプの TR-CP32t および TR-CP23t 試験体では、柱コンクリートとふさぎ板の境界でコンクリートの剥落および直交梁の鉄骨フランジ上下面と柱コンクリートとの間に隙間が観察された。また、TR-CP23t 試験体では、柱側面でふさぎ板の面外方向の膨らみが顕著であった。Table 2 に代表的なひび割れ発生荷重および最大荷重を示す。

**4.2 履歴性状**

Fig. 5 は各試験体の正載荷時における履歴曲線の包絡線を示す。縦軸ははり両端に負荷された荷重の平均値  $Q_0$  を柱の部材接合端の抵抗モー



**Fig. 4 Crack Observations after Test**

**Table 2 Test Results**

Specimen	①**)	②	Maximum Load (kN)
	(kN)	(kN)	
TR-53t	29.3 (32.3)	33.5 (32.3)	35.5 (34.6)
BR-53t	30.6 (28.7)	30.6 (28.7)	39.1 (37.9)
TR-CP32t	-	71.2 (73.5)	92.1 (90.7)
TR-CP23t	-	46.3 (57.4)	88.7 (86.6)

\*) ( ) : Negative Load

\*\*) ①② : Cracking Pattern as Shown in Fig. 4

メントに置き換えコンクリートの圧縮強度  $F_c$  で無次元化した値、横軸は相対変位角  $R$  である。せん断補強筋タイプの TR-53t 試験体は、最大耐力発揮後の耐力低下がみられる。これは、前述のように、最大耐力発揮後内部パネルと外部パネルがねじりによって完全に分離したためである。一方、BR-53t 試験体の最大耐力発揮後の耐力低下はそれほどみられない。これは、直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこの機構に基づく支圧力に依存しているためと推察される。また、ふさぎ板タイプの TR-CP32t および TR-CP23t 試験体ともに、最大耐力発揮後の耐力低下がみられるが、最大耐力発揮後の耐力低下率は TR-53t 試験体とほぼ等しいことから、最大耐力発揮後の耐力低下は内部パネルと外部パネルとの間の

ねじり破壊によるものと推察される。これらのことから、外部パネルの最大耐力は、内部パネルと外部パネルとの間のねじりに大きく依存することがわかる。なお、TR-CP32t 試験体の最大耐力の値は TR-CP23t 試験体の値を上回っており、本実験の範囲では、ふさぎ板の板厚が大きいほど外部パネルの耐力を若干増大させることがわかる。

### 4.3 ひずみ分布

Fig. 6 は BR-53t 試験体のせん断補強筋の荷重 - ひずみ度曲線を示す。縦軸ははり両端に負荷された荷重の平均値  $Q_b$ 、横軸はせん断補強筋に貼付されたひずみゲージから得られた軸ひずみ度  $\varepsilon$  である。BR-53t 試験体は、内部パネルと外部パネルとの間にスリットが設けられているので、外部パネルに作用する柱圧縮力およびせん断力による外部パネルの回転は内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントによって拘束することができず、外部パネルでは、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに依存する釣合系は構成されないと考えられる。したがって、図に示されるひずみ状況は、外部パネルではせん断補強筋の引張力に依存する釣合系を構成するアーチ機構が形成されることを意味していると考えられる。しかしながら、この機構の耐力はせん断補強筋の降伏引張力によって決定され、しかもこの引張力は非常に小さいため、アーチ機構による耐力は非常に小さいと考えられる。上述および履歴性状から、BR-53t 試験体の耐力は直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこの機構に基づく支圧耐力によって決定されていると考えられ、外部パネルの終局耐力におよぼす直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこの機構の影響は大きいと考えられる。

Fig. 7 は TR-CP23t 試験体の直交梁に配置されたふさぎ板の荷重 - ひずみ度曲線を示す。縦軸ははり両端に負荷された荷重の平均値  $Q_b$ 、横軸は図に示す位置に貼付されたひずみゲージから得られたはり材軸方向のひずみ度  $\varepsilon$  である。既往の研究<sup>3)</sup>により、接合部が直交梁を有する

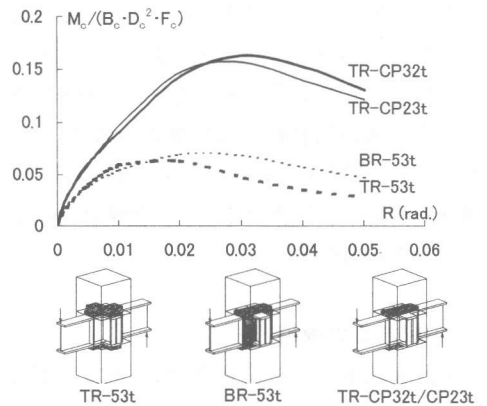


Fig. 5 Envelope Curves for Hysteresis Loops

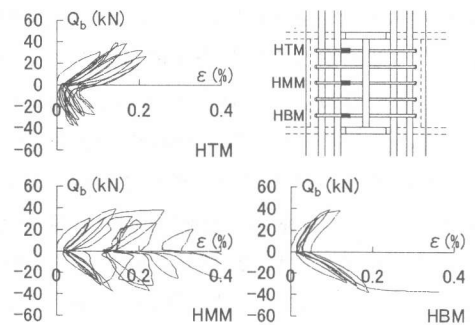


Fig. 6 Load - Axial Strain Relationships of BR-53t Specimen

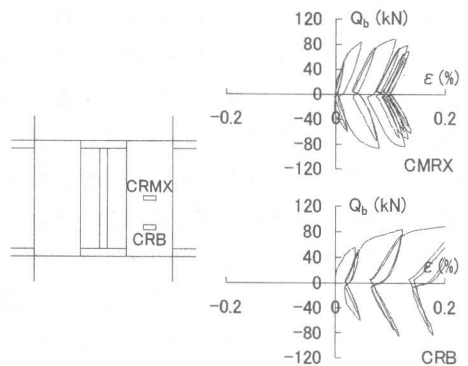





Fig. 7 Load - Strain Relationships of TR-CP23t Specimen

場合、ふさぎ板はそれ自身でせん断抵抗要素としての働きを有することが報告されている。しかしながら、本実験においては、せん断ひずみと比べてはり材軸方向の引張りひずみが卓越した。

これは、外部パネルの回転に伴って、ふさぎ板側面には外部パネルのコンクリートによって押し広げられようとする力が働き、この力に対してふさぎ板は引張抵抗したためと考えられる。なお、この結果は、Fig. 1 で示されたせん断補強筋の引張力に依存するアーチ機構に対応するものと考えられる。

## 5. 実験結果の適用

Fig. 8 は本実験結果を用いて、2章で試みた耐力評価法の妥当性を検討したものである。図中の  は直交梁鉄骨フランジにてこ機構に基づく支圧耐力  $M_{br}$ 、 は内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメント  $M_T$ あるいはねじりモーメントに釣合を依存するアーチ機構による耐力  $M_{a1}$ のうち小さい方の耐力  $\min.(M_T, M_{a1})$ 、 は接合部のせん断補強筋の引張力に釣合を依存するアーチ機構による耐力  $M_{a2}$ の計算値を示す。● は実験値を示す。計算では、局部支圧係数  $\lambda_1$  は、BR-53t 試験体の最大耐力から (2) 式および (4) 式を用いて逆算し、安全側に数値を丸めた  $\lambda_1 = 5$  を採用した。また、本実験結果を参考に、ふさぎ板は全断面をせん断補強筋に置換 ( $2 \cdot t_{cp} / B_c$ ,  $t_{cp}$ : ふさぎ板厚) して評価した。なお、ここでは、直交梁のねじり耐力は充分大きいものとする。なお、図中の値は柱のせん断力  $Q_c$  に換算した値である。ふさぎ板タイプの試験体の計算結果から、内部パネルと外部パネルとの間のねじり耐力が全体の耐力の 6 割程度を占めている。これは、外部パネルの耐力は内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに大きく依存するという実験結果に対応している。TR-CP32t 試験体に関して、計算値は実験値に対して若干大きめの結果を与えている。これは、実験結果における TR-CP32t 試験体のふさぎ板は引張降伏していないにもかかわらず、引張降伏しているとしてふさぎ板の引張力に釣合を依存するアーチ機構による耐力を累加したためと考えられる。また、TR-53t 試験体の実験値は概ね評価されていることから、

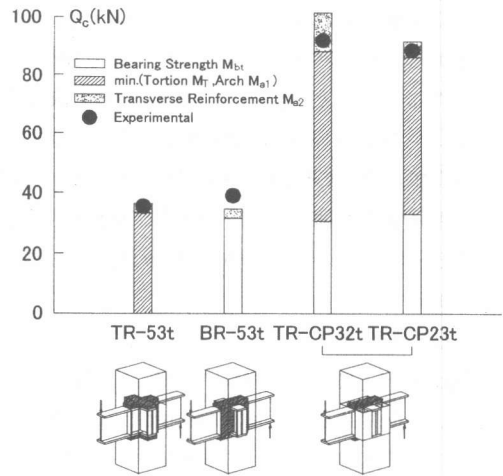


Fig. 8 Application of Proposed Method

接合部が直交梁を有する場合であっても、文献 2) に示されたねじり耐力式を適用できると考えられる。

## 6. 結語

直交梁を有するはり貫通形式 RCS 柱はり接合部の内部パネルから外部パネルへの応力伝達におよぼす直交梁の効果を実験的および理論的に検討した結果、以下のような結論が得られた。

- 1) 直交梁は、鉄骨フランジの上下面にてこ機構に基づく支圧力によって外力に抵抗する。また、外部パネルの耐力は、内部パネルと外部パネルとの間のねじりモーメントに大きく依存する。
- 2) 直交梁の鉄骨フランジ上下面にてこ機構とアーチ機構による外部パネルの抵抗機構が示された。なお、この抵抗機構および耐力評価法については、今後、更に詳細に検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) Tauqir M. Sheikh, Gregory G. Deierlein et al. : Beam-Column Moment Connections for Composite Frames Part 1, Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 11, pp.2858-2876, November, 1989
- 2) 馬場 望, 西村泰志他: 柱 RC ・はり S とするはり貫通形式内部柱はり接合部の内部パネルから外部パネルへの応力伝達機構, 日本建築学会構造系論文集 第 513 号, pp.173-180, 1998.11
- 3) 日本建築学会 構造委員会 鉄骨鉄筋コンクリート構造運営委員会 混合構造小委員会: 柱 RC 梁 S とする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム, 1994.12