論文 SRC 造柱梁接合部のせん断応力伝達に及ぼす影響要因に関する検討

北野 敦則*1・城 攻*2

要旨:本研究は SRC 造柱梁接合部の終局せん断耐力に関し,応力伝達機構の解明を目的に, 実験時の各部歪み計測値データより各構成要素の負担せん断力を求め,せん断耐力に及ぼす 影響要因および RC 負担部の応力伝達機構について検討を行った。その結果,内部鉄骨直交 フランジの負担せん断力は,梁心からその位置まで距離に関係すること,RC 部の負担せん 断耐力は接合部両対角位置の柱および梁端面圧縮域で囲まれる斜め圧縮ストラットの圧縮時 耐力によって評価でき,その有効幅は柱幅および梁幅のみならず直交フランジ位置と被りコ ンクリート厚に関係することを明らかにした。

キーワード:SRC造,柱梁接合部,せん断破壊,圧縮ストラット,中立軸,接合部有効幅

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(以下 SRC)造柱梁接 合部は,兵庫県南部地震で初めてせん断破壊の 被害が報告され,改めて性能評価の必要性が示 されたが,鋼とコンクリートが混在しているた め応力伝達機構が複雑で,せん断抵抗機構は未 解明のままである。

筆者らはこれまでにSRC造柱梁接合部の実験 を行い,終局せん断耐力に関し日本建築学会(以 下 AIJ)SRC 規準式¹⁾と実験値の不適合性を指 摘し,実験データを用いた統計解析から主に内 部鉄骨の接合部のせん断抵抗要素を明確にし, 修正式を提案してきた²⁾。

本研究は,これまで未検討であった直交フラ ンジ負担せん断力および RC 部の応力伝達機構 について実験データより検討を行った。

2. 検討に用いた試験体および実験概要

図 - 1 に試験体概要および接合部詳細図,表 -1 に試験体諸元を示す。



図 - 1 試験体概要および接合部詳細図(SRC-1-W, SRC-8-W)

*1	北海道大学大学院助手	工学研究科社会基盤工学専攻	工修	(正会員)
*2	北海道大学大学院教授	工学研究科社会基盤工学専攻	工博	(正会員)

衣一 武殿仲間儿\公夫殿を奴は武殿仲記方とての儿別し刊読り

7		柱 梁		接		妾合部		$\sigma_{ m B}$	鋼材降伏点強剧		、点強度	ξσ _y		
試験体	_C b× _C D	鉄	骨	b×D	從骨	$\mathbf{p}_{\mathbf{w}}$	鉄	:骨	(MPa)		(M	IPa)		
	(mm)	加力	直交	(mm)	以月	(%)	加力	直交		PL-16	PL-12	PL-9	PL-4.5	
SRC-1-BW	300×300	1	3	200×300	1	0.19	1	3	31.6	368 - 321			341	
SRC-1-BWH 300×300		1	3	200×300	1	0.19	1	3	52.8	368	-	321	341	
SRC-1-W 300×30		1	3	200×300	1	0.19	1	3	34.4	361	-	303	353	
SRC-1 300×300		1	3	200×300	1	0.19	1	③注)	36.7	361	-	303	353	
SRC-2-BW	300×300	1	3	200×200	5	0.19	1	3	31.5	368	-	321	341	
SRC-3-BW	300×300	1	3	200×400	6	0.19	1	3	31.0	368	-	321	341	
SRC-4-W	400×300	2	4	300×300	2	0.14	2	4	38.6	361	-	303	353	
SRC-5-W	400×300	1	4	300×300	1	0.14	1	4	39.0	361	-	303	353	
SRC-6-W 400×300		1	3	200×300	1	0.14	1	3	35.8	361	-	303	353	
SRC-1-BW16 300×300		1	1	200×300	1	0.19	1	1	30.6	368	-	-	341	
SRC-7 300×300		1	-	200×300	1	0.19	$\overline{\mathcal{O}}$	-	36.2	361	320	-	310	
SRC-1-WH8 300×300 (1	3	200×300	1	0.19	1	3	62.5	361	-	290	310	
SRC-8-W 400×300		1	4	200×300	1	0.14	1	4	38.7	361	-	290	310	
SRC-11-W	SRC-11-W 300×500 8 3 200		200×300	1	0.19	8	3	37.5	381	-	305	301		
SRC-12-W 500×300 ①		9	200×300	1	0.11	1	9	43.3	381	-	305	301		
SRC-1-WH9 300×300		1	3	200×300	1	0.19	1	3	72.2	381	-	305	301	
備考)								注)ウェ	ブ無し					
試験体記号		1:基	基準形状 使月			 					凡例			
SRC:鉄骨鉄筋:	コンクリート	2:梁柱せい比2/3		①BH-200×100×4.5×16				b: 柱(梁)幅						
S:純鉄骨		3:梁柱せい比4/3		(2)BH-200×200×4.5×16					D: 柱(梁)せい					
B:直交梁付き		4:A-zone幅2倍		(3)BH-200×100×4.5×9				pw· 则断補強筋比						
W:直交ウェブあり		5:B-zone幅2倍		(4)BH-300×100×4.5×9				OB: コンクリート強度 の 細壮 悠 仕 強 庇						
H: 局强度コンクリート		6:C-zone幅2倍		(b) BH-130×100×4.5×16 (c) PH-270×100×4.5×16				Uv: 夠的降低強度						
		(:性妖育ff空 8.直応フランジ位置			⑦BH-900×100×19×16									
		0.直文//// 11. 翌柱せい比3/5			(8)BH-400×100×4 5×16									
	<u>12:柏</u>	幅50	Omm	<u>9BH</u>	I-400×100×4.5×9									

試験体は平面十字形で実大の約 1/2 縮小模型 で,上柱の頂部に変位漸増正負繰り返し加力を 行った。SRC 試験体は SRC-11-W を除いて接合 部がせん断破壊した。SRC-11-W は梁端の曲げ 圧壊が先行し,その後接合部がせん断破壊した。 表 - 1に材料強度をあわせて示す。

3. 各構成要素の評価

柱梁接合部のせん断耐力は,接合部鉄骨ウェ ブ,直交フランジ,鉄骨枠効果,RC部の各負担 せん断力の合計値で評価できる²⁾。

3.1 各構成要素負担せん断力の算出方法³⁾

鉄骨部の3要素については,実験時の歪みゲ ージ実測値を用いて,弾塑性応力歪み分析によ り各要素が負担しているせん断力(*ana_JQ*)を算 出した。RC部の負担せん断力はSRC接合部せ ん断力と上述の鉄骨部負担せん断力の差として 求めた。各構成要素の内,直交フランジ(*ana_fJQ*)

表-2 直交フランジおよびRC負担せん断力

試験体	<i>ana.fJ</i> Q (kN)	_{ana.rcJ} Q (kN)	_{cal.rcJ} Q (kN) AIJ 規準式	$\frac{ana.rcJ}{cal.rcJ}Q$
SRC-1-BW	288	685	468	1.46
SRC-1-BWH	493	791	468	1.69
SRC-1-W	189	647	465	1.39
SRC-1	208	1200	590	2.04
SRC-2-BW	312	736	484	1.52
SRC-3-BW	275	783	497	1.57
SRC-4-W	441	1010	712	1.42
SRC-5-W	226	1220	715	1.70
SRC-6-W	432	735	592	1.24
SRC-1-BW16	532	799	466	1.72
SRC-7	0	920	498	1.85
SRC-1-WH8	156	1290	649	1.98
SRC-8-W	257	1120	611	1.84
SRC-11-W	156	1230	972	1.26
SRC-12-W	202	1520	748	2.03
SRC-1-WH9	241	1560	983	1.58
平均				1.64

および RC (*ana.rcJQ*について算出された負担せん断力を表 - 2 に示す。

3.2 鉄骨部の評価

接合部ウェブおよび枠効果については,著者 提案による評価方法(後述(9),(10)式)²⁾とするが, 直交フランジに関しては以下の様に修正する。 直交フランジ位置が梁幅よりも外側に存在する 場合,即ち本実験における SRC-8-W(図-5) および SRC-12-W(同)の様な接合部断面の場 合は加力方向の梁からのはね出しが大きくなり 直交フランジの負担せん断力(*ana.fJQ*)が,基準試 験体(SRC-1-W)のそれよりも小さくなる(図-2)。そこで,梁幅(*Bb*)に対する直交方向のH形 鋼せい(*scb*)の比を用いて直交フランジの負担せ ん断力を下式のように評価した。

$$_{cal_{f}} Q = \left(-0.3 \cdot \frac{s_{C}b}{Bb} + 1.2\right) \cdot _{cal_{f}} Q_{I} \quad (1)$$

ここで,

cal.fJQ: 直交フランジ負担せん断力(kN) scb: 直交 H 形鋼せい(mm), sb:梁幅(mm) $cal.fJQ_1 = {}_fA \cdot {}_f\sigma_y / \sqrt{3}$ f\sigmay: 直交フランジ降伏強度(MPa)

_fA: 直交フランジ断面積(mm²)

- 3.3 RC 部の評価
- (1) コンクリート強度の影響

表 - 2 より RC 負担せん断力分析値(*ana.rcJQ*) とAIJ 規準式¹⁾による計算値(*cal.rcJQ*)を比較する と,それらの比の平均値は1.64 と AIJ 規準式は 分析値を過小評価しているのがわかる。

図 - 3 に横軸にコンクリート強度(*σ_B*),縦軸に 接合部 RC 負担せん断耐力(*ana.rcJQ*を示す。コン クリート強度を変数とした正方形断面試験体(印)のみを用いて回帰分析すると下式が導かれる。

 $_{ana.rcJ}Q = 21.5\sigma_B$ (r=0.99) (2)

ここで, ana.resQ: RC 負担せん断力(kN) σ_B : コンクリート強度(MPa)

相関係数(r)は0.99と非常に相関があることを 示しており,SRC 造柱梁接合部の場合コンクリ ート強度と接合部のRC 負担せん断力は *σ*_B = 30 ~70MPaの範囲で線形関係にあることがわかる。



図 - 2 直交フランジ位置の影響



図-3 コンクリート強度の影響



図 - 4 zone 幅の影響

(2) 各 zone 幅の影響

図 - 1 に示した 3 つのコンクリート応力伝達 域 A, B, C zone の幅を変化させた試験体につ いて, 横軸に各 zone 幅, 縦軸に ana.reJQをコン クリート強度で除した値を図-4に示す。図より, A, B, C zone 毎にそれぞれ RC 負担せん断力に 与える影響が違うことがわかる。

3.4 RC 部応力伝達機構の検討

接合部コンクリート内の A, B zone に埋め込 んだ 3 軸歪みゲージによる主応力度方向は,接 合部せん断ひび割れ後,図-5(b)に示す様に直交

ウェブで仕切られた左右の接合部鉄 骨枠の対角線を結ぶ角度0'方向を示 しているが,最大耐力近傍ではA,B zone 共に 45 度方向に近づくことが わかっている 7)。このことより,最 大耐力時では RC 接合部のせん断力 伝達は内部鉄骨の有無に関わらず主 として図-5(a)に示す様な対角線方 向の圧縮ストラットによるものと考 えられる。このため、柱および梁端 面の圧縮域を求めるために柱断面お よび梁断面において,圧縮側と引張 側のそれぞれで鉄骨フランジと鉄筋 の断面積から重心位置を求め,全て の鉄筋断面積として,断面を単純化 し中立

軸距離 *x_n* を求めた ⁴⁾。その結 果を表 - 3 に示す。

次に圧縮ストラット幅(*ds*)は(3)式で求めることが出来る。

 $ds=_C x_n \cdot sin\theta+_B x_n \cdot cos \theta$ (3) ここで, ds: 圧縮ストラット幅(mm) cx_n : 柱中立軸距離(mm) Bx_n : 梁中立軸距離(mm) θ : ストラット角度(水平面から)

また, せん断補強筋については, せん断耐力 にほとんど影響を及ぼさないことが既往の研究 で報告されている⁵⁾。よって, このストラットの 圧縮破壊時が RC 部の耐力とすれば, 下式(4)に より RC 負担せん断力を求めることができる。

> $cal.rcJQ = ds \cdot b \cdot v\sigma_B \cdot \cos \theta$ (4) ここで, b: 接合部 RC 部有効幅(mm) v: コンクリート強度有効係数

コンクリート有効係数vはせん断ひび割れの 影響を考慮した係数で通常v<1 である。vを求め るために,(4)式の *cal.rcJQ* に分析値(*ana.rcJQ*) を,RC 部接合部有効幅(*b*)を AIJ 規準式の梁幅 (*Bb*)と柱幅(*cb*)の平均と仮定し,それぞれ代入す る。基準試験体と同じ形状の試験体のみ(コン クリート強度のみが変数になっている試験体) についてvを求めると 0.68~0.75 に分布し,平

表-3 接合部有効幅

	中立	由距離	(2)式に	∆IJ担淮		提案 有効 幅 (mm)	
試験体名	梁 _B x _n (mm)	柱 _C x _n (mm)	よる 有効幅 b2(mm)	有効幅 bs(mm)	b2/bs		
SRC-1-BW	125	146	248	250	0.99	250	
SRC-2-BW	87	152	285	250	1.14	250	
SRC-3-BW	161	141	265	250	1.06	250	
SRC-1-BWH	118	145	273	250	1.09	250	
SRC-1-W	125	146	245	250	0.98	250	
SRC-1	122	144	249	250	1.00	250	
SRC-4-W	124	147	300	350	0.86	350	
SRC-5-W	113	139	387	350	1.11	350	
SRC-6-W	125	146	235	300	0.78	250	
SRC-1-BW16	125	141	299	250	1.20	250	
SRC-7	122	144	297	250	1.19	250	
SRC-1-WH8	118	149	246	250	0.99	250	
SRC-8-W	122	142	339	300	1.13	333	
SRC-11-W	123	269	229	250	0.92	250	
SRC-12-W	122	142	411	350	1.17	416	
SRC-1-WH9	123	148	249	250	1.00	250	



図-5 圧縮ストラット

均値はv=0.69となる。ここで,RC 靭性保証型設 計指針 4° では $v=0.7 - \sigma_B/200$ を与えているが, SRC 接合部の場合 RC 負担力は前述の様に σ_B に 対し線形関係にあるのでvは σ_B の影響を受けな いことになる。また,実験後の内部視察による 破壊状況から鉄骨に囲まれた接合部のコンクリ ートは損傷が少ないことから,鉄骨によるコン クリートの拘束効果を考慮するとvはRC 造に比 べて大きくなることが予測できる。よって本研 究ではv=0.69を用いた。

次にこのvを用いて(4)式より各試験体の有効 幅を求め,その結果を表-3に合わせて示す。

ここで,有効幅の基本仮定としてAIJ-SRC規 準による有効幅を用いたが,直交フランジ位置 が梁幅よりも外側にある SRC-8-W, SRC-12-W については,梁からの圧縮力がコンクリートを 介して直交フランジに向けて梁幅よりも外側へ 有効に応力伝達がされると考えられる。梁面か ら直交フランジの位置までの距離を C_I, そこか ら柱面までの距離を Co と定義(図-5参照)し, (4)式により求められた有効幅と Crの関係を図-6に示す。図より CIが大きいほど, AIJ 規準有 効幅から離れるので,梁幅よりも外側に直交フ ランジがある場合 AIJ 規準有効幅では評価でき ないことがわかる。また,(1)式から,直交フラ ンジの負担せん断力は梁心から離れると低減さ れるので,有効幅もその分低減されると考えら れる。したがって, C1と Coとの関係から,本実 験に限って scb Bb の場合の新しい有効幅(b)を 下記のように提案した。その結果を表 - 3 に合 わせて示す。



図 - 5 *C₁と C₀*の定義



 $b = scb - 0.17C_I + 50$

この他に 柱鉄骨が H型 断面の SRC-7 および直交 フランジ厚が厚い SRC-1-BW16 は AIJ 規準有効幅 よりも実際の有効幅が大 きく, Azone 幅の広い SRC-4-WとBzone 幅の広 い SRC-5-Wは,外形は同 じであるが(4)式による有 効幅は Azone 幅が広いと 規準式よりも小さく、 Bzone 幅が広いと大きく なっている。これは, vを 求めるために有効幅の定 義として AIJ 規準式を用 いているため,例えば図-4から zone 幅毎に RC 負 担せん断力増大率が異な ることから Azone 幅, Bzone 幅それぞれに有効

図 - 6 C,と有効幅の関係

表-4 応力伝達モデルによる接合部終局剪断耐力

試験体名	_{ana.rcJ} Q (kN)	σ_B (MPa)	_{cal.rcJ} Q (kN)	exp/ cal	_{cal.sJ} Q (kN)	_{cal.srcJ} Q (kN)	exp.srcJ Q (kN)	exp/ cal
SRC-1-BW	685	31.6	687	1.00	500	1190	1160	0.98
SRC-2-BW	791	31.5	665	1.19	531	1200	1470	1.23
SRC-3-BW	647	31.0	625	1.03	486	1110	1020	0.92
SRC-1-BWH	1200	52.8	1150	1.04	500	1650	1590	0.97
SRC-1-W	736	34.4	749	0.98	488	1240	1280	1.04
SRC-1	783	36.7	798	0.98	488	1290	1290	1.00
SRC-4-W	1010	38.6	1160	0.87	538	1700	1970	1.16
SRC-5-W	1220	39.0	1190	1.03	488	1680	1780	1.06
SRC-6-W	735	35.8	778	0.94	488	1270	1410	1.11
SRC-1-BW16	799	30.6	677	1.18	812	1490	1520	1.02
SRC-7	920	36.2	773	1.19	422	1200	1350	1.13
SRC-1-WH8	1290	62.5	1360	0.95	457	1820	1630	0.90
SRC-8-W	1120	38.7	1110	1.01	412	1520	1590	1.05
SRC-11-W	1230	37.5	1280	0.96	626	1910	1700	0.89
SRC-12-W	1520	43.3	1510	1.01	375	1880	1920	1.02
SRC-1-WH9	1560	72.2	1580	0.99	470	2050	2000	0.97
			平均	1.02			平均	1.04
			標準偏差	0.09			標準偏差	0.09
			変動係数	0.09			変動係数	0.09

係数を掛け,有効幅 = $\gamma(\alpha \times \text{Azone 幅}+\beta \times \text{Bzone}$ 幅)で評価する等,圧縮ストラット有効幅に関しては今後さらに精度の高い評価の検討が必要である。

4. SRC 造柱梁接合部終局せん断耐力評 価式の検討

前述までの検討結果から *cal.resJ*Q((4)式)に3つ の鉄骨負担せん断力 *cal.ssJ*Qを加え SRC 柱梁接合 部せん断力を求め,実験値と比較すると,実験 値と計算値の比は 0.87~1.20 に分布し,平均値 1.03,変動係数 0.08 と対応がよいことがわかる。

また,他の研究機関で行われた実験 ^{5),6)}につい てもこの式の適応性を検討した。その結果を合 わせて図-7に示す。他の研究機関で行われた試 験体8体を含めて実験値と計算値を比較すると, 実験値と計算値の比は 0.84~1.20に分布し,平 均値1.01,変動係数 0.09となり,提案式の妥当 性が示された。

5. まとめ

SRC 造柱梁接合部の終局せん断耐力に関し, 実験時歪みゲージを用いて接合部各構成要素の 負担せん断力を求め,せん断耐力に及ぼす影響 要因および RC 負担部の応力伝達機構を検討し た結果,以下の知見を得た。

(1) 鉄骨部に関し,直交フランジ負担せん断力は,梁幅よりも外側に直交フランジがある場合, 梁心から直交フランジ位置の距離で評価できる。
(2) RC 部の応力伝達は,ダブルストラットではなく,柱および梁の圧縮域間で形成されるストラットで評価できる。

(3) ストラット有効幅(b)は,直交フランジが梁 幅よりも外側にある場合,梁面から直交フラン ジ位置の距離で評価できる。

(4) 以上の知見をふまえて,SRC 造柱梁接合部の 終局せん断耐力式を提案した。

参考文献

1)日本建築学会:SRC構造計算基準・同解説,1999



図-7 実験値と計算値の比較

SRC 造柱梁接合部終局せん断耐力評価式 $_{cal.srcJ}Q = _{wJ}Q + _{fJ}Q + 0.5 \cdot _{frJ}Q + _{rcJ}Q$ (8) ここで,

$${}_{wJ}Q = \frac{{}_{w}\sigma_{y}}{\sqrt{3}} \cdot {}_{w}A \quad (9)$$
$${}_{frJ}Q = \frac{\alpha \cdot {}_{fr}b \cdot {}_{fr}t^{2} \cdot {}_{fr}\sigma_{y}}{4} \quad (10)$$

記号

wJQ:鉄骨ウェブせん断力,fxJQ:鉄骨枠効果耐力
 fJQ:(1)式,rcJQ:(4)式,_σy:鋼材降伏応力度
 wA:鉄骨ウェブ断面積,frb:柱梁鉄骨フランジ幅,frt:柱梁鉄骨フランジ厚
 α:枠効果における係数(ここではα=8)
 他は,AIJ-SRC 規準に準ずる。

 $4 \cdot {}_{mB} d$

2)北野敦則ほか: SRC 造内部柱梁接合部構成要素のせん 断応力分担に関する考察,AIJ 大会梗概集,C-1, pp.391-392,1999 3)北野敦則ほか: SRC 造内部柱梁接合部のせん断応力分 担に関する考察,コンクリート工学年次大会論文報告集, Vol.20, No.3, pp.799-804, 1998 4)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型 耐震設計指針・同解説,1999 5)谷口孝生ほか: SRC 柱はり接合部における帯筋の配筋 法に関する実験的研究(その1),(その2),AIJ大会梗 概集,C,pp.1305-1308,1988 6) 寺岡勝ほか:施工の簡易化をした SRC 構造柱・梁接合 部に関する実験的研究(その1), AIJ 大会梗概集, C, pp.1755-1756, 1992 7)北野敦則ほか:鉄骨鉄筋コンクリート造内部柱梁接合 部の応力伝達機構に関する考察,AIJ 大会梗概集,C, pp.383-384, 1994