

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。

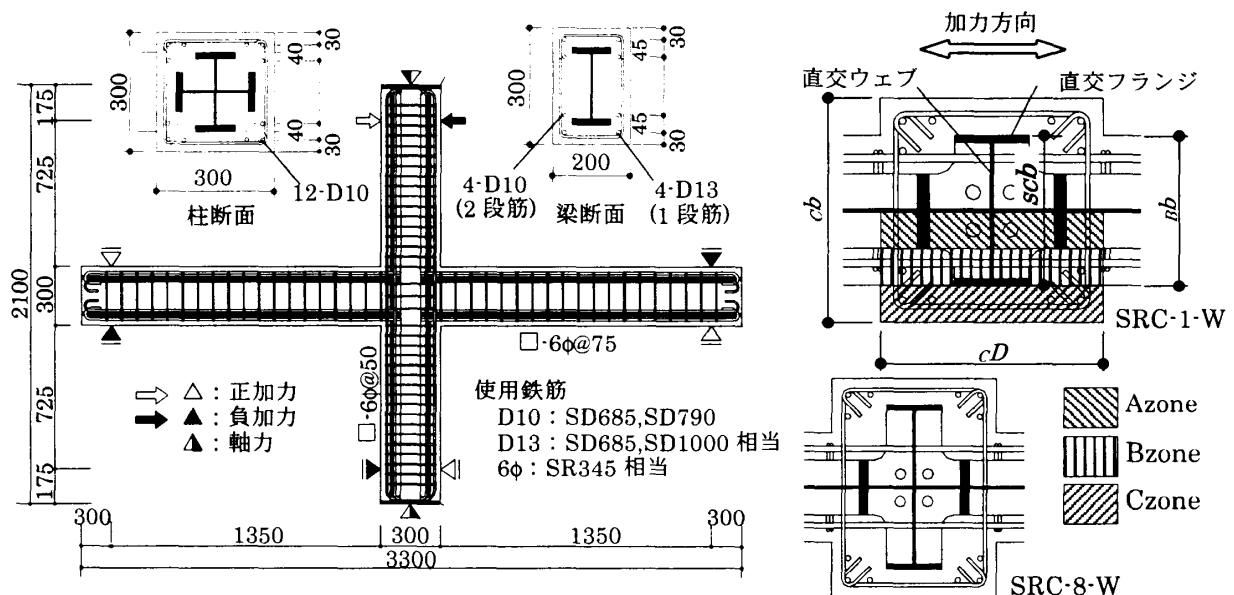


図-1 試験体概要および接合部詳細図(SRC-1-W, SRC-8-W)

*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)

表一 試験体諸元(※実験変数は試験体記号とその凡例で判読可能)

試験体	柱			梁		接合部			σ_B (MPa)	鋼材降伏点強度 σ_y (MPa)			
	$c_b \times c_D$ (mm)	鉄骨		$b \times D$ (mm)	鉄骨	p_w (%)	鉄骨						
		加力	直交				加力	直交					
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	300×300	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	⑦	—	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	300×500	⑧	③	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: 基準形状		使用鉄骨断面		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		②BH-200×200×4.5×16		D: 柱(梁)せい							
B: 直交梁付き		4: A-zone幅2倍		③BH-200×100×4.5×9		p_w : 剪断補強筋比							
W: 直交ウェブあり		5: B-zone幅2倍		④BH-300×100×4.5×9		σ_B : コンクリート強度							
H: 高強度コンクリート		6: C-zone幅2倍		⑤BH-130×100×4.5×16		σ_y : 鋼材降伏強度							
		7: 柱鉄骨H型		⑥BH-270×100×4.5×16									
		8: 直交フランジ位置		⑦BH-200×100×12×16									
		11: 梁柱せい比3/5		⑧BH-400×100×4.5×16									
		12: 柱幅500mm		⑨BH-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。表一 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)

表一 2 直交フランジおよびRC負担せん断力

試験体	ana_fJQ (kN)	ana_rcJQ (kN)	cal_rcJQ (kN) AIJ 規準式	ana_rcJQ cal_rcJQ
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。

$$cal.fJQ = \left(-0.3 \cdot \frac{scb}{bb} + 1.2 \right) \cdot cal.fJQ_1 \quad (1)$$

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), bb : 梁幅(mm)

$$cal.fJQ_1 = f \cdot A \cdot f \sigma_y / \sqrt{3}$$

$f \sigma_y$: 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试験体(●印)のみを用いて回帰分析すると下式が導かれる。

$$ana.rcJQ = 21.5 \sigma_B \quad (r=0.99) \quad (2)$$

ここで、 $ana.rcJQ$: 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 $\sigma_B=30 \sim 70$ MPa の範囲で線形関係にあることがわかる。

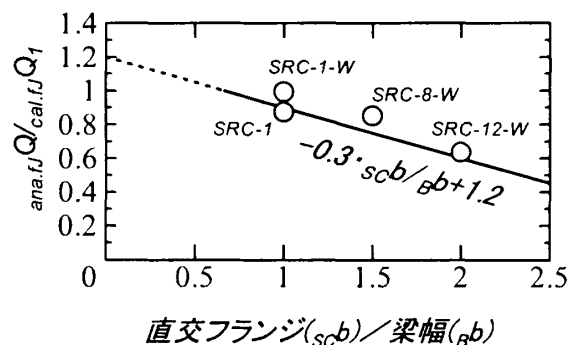


図-2 直交フランジ位置の影響

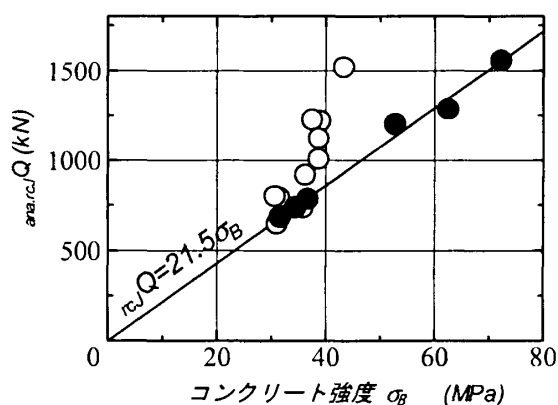


図-3 コンクリート強度の影響

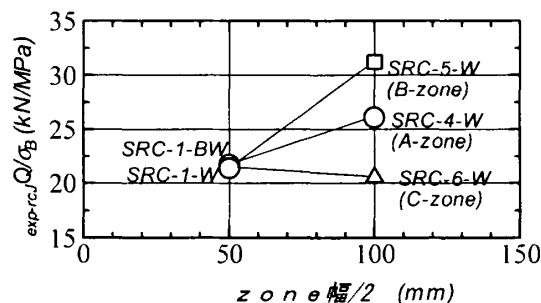


図-4 zone 幅の影響

(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 $ana.rcJQ$ 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ってくる。

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 θ 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。

$$ds = C x_n \cdot \sin \theta + B x_n \cdot \cos \theta \quad (3)$$

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。

$$cal.rcJQ = ds \cdot b \cdot v \sigma_B \cdot \cos \theta \quad (4)$$

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(b_b)と柱幅(c_b)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

試験体名	中立軸距離		(2)式による有効幅 b_2 (mm)	AIJ規準有効幅 b_s (mm)	b_2/b_s	提案有効幅 (mm)
	梁 Bx_n (mm)	柱 Cx_n (mm)				
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

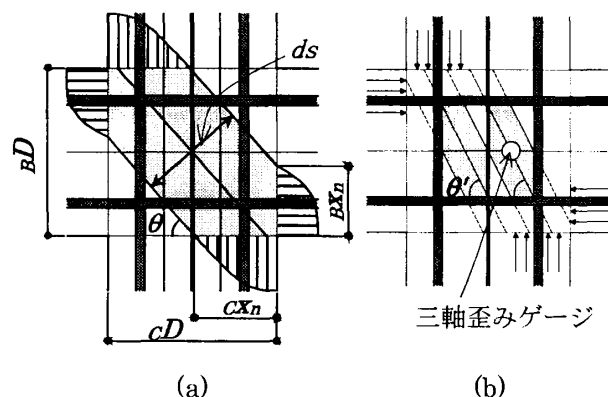


図-5 圧縮ストラット

均値は $v=0.69$ となる。ここで、RC 靱性保証型設計指針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_f 、そこか
ら柱面までの距離を C_o と定義(図-5参照)し、
(4)式により求められた有効幅と C_f の関係を図-
6に示す。図より C_f 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、 C_f と C_o との関係から、本実
験に限って $scb \geq bb$ 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。

$$b = scb - 0.17C_f + 50 \quad (5)$$

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

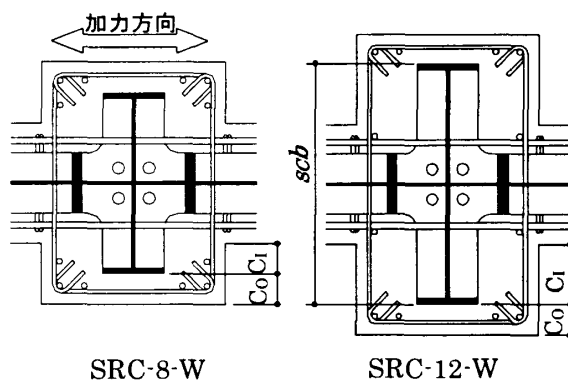


図-5 C_f と C_o の定義

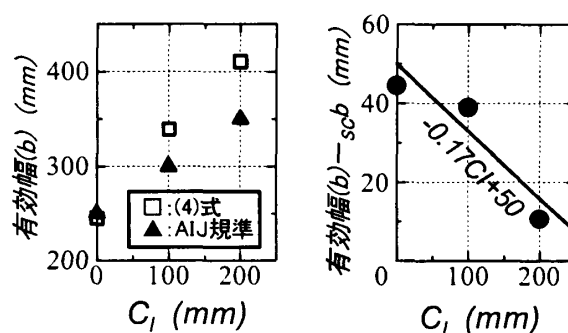


図-6 C_f と有効幅の関係

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			平均	1.04
				標準偏差			標準偏差	0.09
				変動係数			変動係数	0.09

係数を掛け、有効幅 $=\gamma(\alpha \times A_{zone} \text{ 幅} + \beta \times B_{zone} \text{ 幅})$ 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 $cal.rcJQ$ (4式) に 3つの鉄骨負担せん断力 $cal.sJQ$ 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

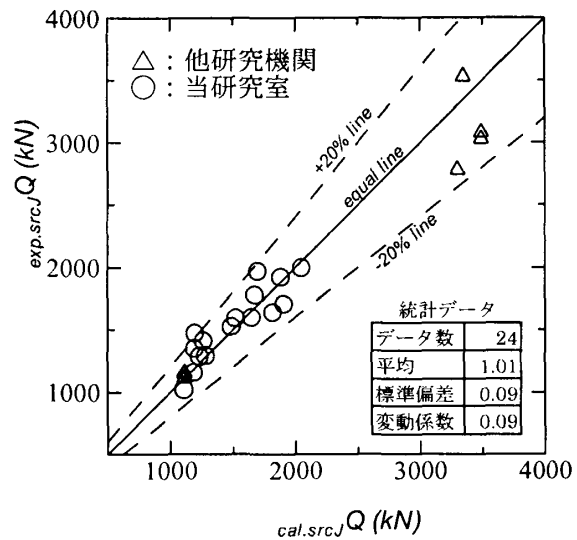


図-7 実験値と計算値の比較

SRC 造柱梁接合部終局せん断耐力評価式

$$cal.srcJQ = wJQ + fJQ + 0.5 \cdot frJQ + rcJQ \quad (8)$$

ここで、

$$wJQ = \frac{w \sigma_y}{\sqrt{3}} \cdot wA \quad (9)$$

$$frJQ = \frac{\alpha \cdot frb \cdot frt^2 \cdot fr \sigma_y}{4 \cdot m_B d} \quad (10)$$

記号

wJQ : 鉄骨ウェブせん断力, $frJQ$: 鉄骨枠効果耐力
 fJQ : (1)式, $rcJQ$: (4)式, σ_y : 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 $\alpha=8$)
 他は, AIJ-SRC 規準に準ずる。

- 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靱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