

論文 SRC 造柱梁接合部の終局剪断耐力に関する実験的検討

門田 晃*1・北野 敦則*2・後藤 康明*3・城 攻*4

要旨：鉄骨鉄筋コンクリート造柱梁接合部の耐震性能に関して、既に当研究室が提案した終局せん断耐力修正式について未検討であった偏平断面及び偏心接合を変数とする試験体の剪断実験によって以下の知見を得た。即ち、直交梁が加力方向に偏心した場合、直交ウェブを境に角度の異なる圧縮ストラットが形成され、偏心による耐力低下が見られた。柱せい又は柱幅が広がった偏平断面柱の場合でも、修正式は実験値と適合することが確認できた。加力梁が柱に対して偏心した場合、接合部の破壊性状では偏心側と反対側とで大きく異なったが、偏心による剪断耐力の低下はRC造に比べると小さいことがわかった。

キーワード：鉄骨鉄筋コンクリート造、柱梁接合部、終局剪断耐力、柱断面、偏心

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(以下 SRC)造柱梁接合部の剪断破壊に関する実被害としては、1995年の兵庫県南部地震において初めて報告され、改めて SRC 造柱梁接合部の構造設計の重要性が示された。

当研究室ではこれまでに SRC 造柱梁接合部の実験を行ない、日本建築学会 SRC 規準式¹⁾と

実験値の不適合性を指摘し、諸家の既報の実験データを用いた統計解析から接合部剪断耐力は、コンクリート、接合部ウェブ、直交フランジ及び枠効果の4つの剪断抵抗要素で評価できるとして修正式を提案してきた²⁾。本研究ではこの修正式において未検討であった偏平断面及び偏心接合を影響要因として実験を行ない、その適応性を検討したので報告する。

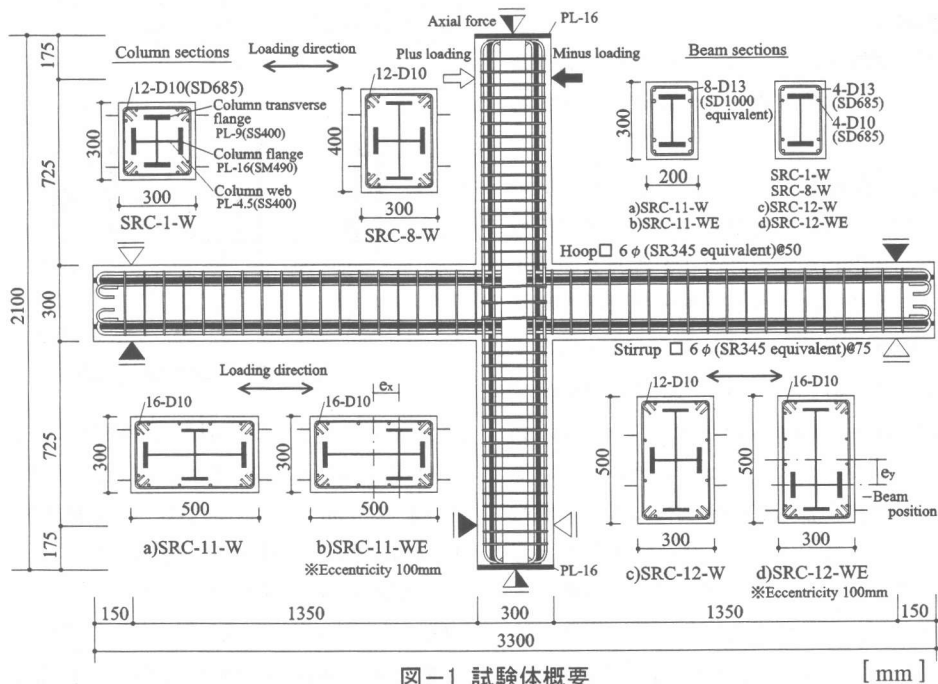


図-1 試験体概要

[mm]

*1	西松建設(株)	工学院工学研究科社会基盤工学専攻	工修(正会員)
*2	北海道大学助手	工学院工学研究科社会基盤工学専攻	工修(正会員)
*3	北海道大学助教授	工学院工学研究科社会基盤工学専攻	工博(正会員)
*4	北海道大学教授	工学院工学研究科社会基盤工学専攻	工博(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体	柱							梁				接合部	σ_B (MPa)
	$c_b \times c_d$ (mm)	p_w (%)	鉄筋	加力方向 鉄骨	e_x	直交方向 鉄骨	e_y	$b_b \times b_d$ (mm)	p_w (%)	鉄筋	鉄骨	p_w (%)	
1)SRC-1-W	300×300	0.37	A	①	0	②	0	200×300	0.25	a	①	0.19	34.4
2)SRC-8-W	400×300	0.28	B	①	0	③	0	200×300	0.25	a	①	0.14	38.7
a)SRC-11-W	300×500	0.37	C	④	0	②	0	200×300	0.25	b	①	0.19	37.5
b)SRC-11-WE	300×500	0.37	C	④	100	②	0	200×300	0.25	b	①	0.19	36.7
c)SRC-12-W	500×300	0.22	B	①	0	⑤	0	200×300	0.25	a	①	0.11	43.3
d)SRC-12-WE	500×300	0.22	C	①	0	⑤	100	200×300	0.25	a	①	0.11	42.8

注)実験変数は試験体記号とその凡例で判読可能
なお1),2)は共に過年度試験体で1)は基準試験体である

使用柱主筋

A: 12-D10(SD345)

B: 12-D10(SD685)

C: 16-D10(SD685)

使用梁主筋

a: 4-D13(SD685), 4-D10(SD685)

b: 8-D13(SD1000相当)

使用鉄骨断面

①: BH-200×100×4.5×16

②: BH-200×100×4.5×9

③: BH-300×100×4.5×9

④: BH-400×100×4.5×16

⑤: BH-400×100×4.5×9

試験体記号

第1項: 鉄骨鉄筋コンクリート

第2項: 柱・梁断面形状種別

第3項 W: 直交ウェブあり

E: 偏心あり

記号)

b: 部材幅 D: 部材せい

p_w : 剪断補強筋比

e_x, e_y : 柱鉄骨のx, y方向偏心距離

して修正式を提案してきた²⁾。本研究ではこの修正式において未検討であった偏平断面及び偏心接合を影響要因として実験を行ない、その適応性を検討したので報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に試験体概要、表-1に試験体諸元及びコンクリート強度、表-2に鋼材の力学的特性を示す。

試験体は、多層多スパンSRC矩形ラーメンの中間階内柱梁接合部を想定し、柱梁の中央反曲点位置で切り出した実大の約1/2縮尺スケール平面十字型の試験体である。基準試験体(柱せい $c_b=300\text{mm}$ ×柱幅 $c_d=300\text{mm}$, 無偏心)に対する実験変数は、a) $c_b=500\text{mm}$, b) $c_b=500\text{mm}$ で $e_x=100\text{mm}$, c) $c_b=500\text{mm}$, d) $c_b=500\text{mm}$ で $e_y=100\text{mm}$ とし、計4体製作した。c), d)の試験体はそれぞれ a), b)の試験体の柱断面強軸加力に対して弱軸加力を想定したものである。全試験体とも接合部剪断破壊を想定し、接合部剪断耐力が柱と梁の曲げ耐力及び剪断耐力よりも下回るように設計した。しかし、柱せいが500mmのSRC-11-Wの試験体は、実験時に梁にコンクリートの曲げ圧壊が生じたため、他の3体の試験体にはこれを防ぐため図-2に示すような外部補強を行な

表-2 鋼材の力学的特性

Classification	σ_y (MPa)	ϵ_y (μ)	Elongation (%)	E (GPa)
D19(SD700)	807	4420	14.2	183
D13(SD1000 equivalent)	967	5050	3.0	191
D13(SD685)	729	3780	12.3	193
D10(SD685)	707	3870	13.2	183
6 ϕ (SR345 equivalent)	378	2170	16.1	175
PL-16 (SM490)	381	2050	24.6	186
PL-9 (SS400)	305	1590	26.5	193
PL-4.5 (SS400)	301	1480	25.7	205

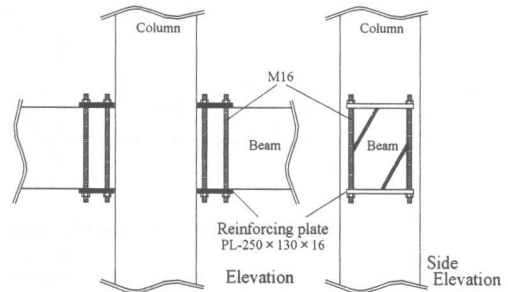


図-2 梁端部補強道具

った。コンクリートの設計基準強度は、全ての試験体で30MPaに設定した。鉄筋は、柱主筋に柱幅500mmのSRC-12-Wの試験体で12-D10(SD685)を、それ以外の試験体には16-D10(SD685)を使用した。梁主筋には、柱せい500mmシリーズのSRC-11-W及びSRC-11-WEの試験体に8-D13(SD1000相当)を、柱幅500mmシリーズのSRC-12-W及びSRC-12-WEの試験体には1段目に4-D13(SD685)、2段目に4-D10(SD685)を使用し、剪断補強筋は全ての試験

体に□-6φ(SR345相当)を使用した。

鉄骨は全試験体とも、柱梁フランジに板厚16mmのSM490材を、柱梁ウェブ及び柱直交フランジにはそれぞれ板厚4.5mmと9mmのSS400材を使用し、柱は組立十字形鋼、梁は組立H形鋼とし、接合部は梁貫通型としている。

2.2 加力方法

加力は地震時における内柱梁接合部の応力状態を再現するため、上下柱に一定軸力($1/6 \cdot b \cdot D \cdot \sigma_b$)を導入した後、柱頭部に強制水平変位を与える一方向正負漸増繰返し加力を行なった。柱頭との接合はユニバーサルジョイントを使用して端モーメントの発生を防いで剪断力のみを伝え、梁端はピンローラーとなるように反力ロッドで支持した。梁が偏心したSRC-12-WEの試験体は、柱頭、柱脚にそれぞれ直交水平拘束ロッド2本ずつ用いて鉛直軸周りの回転を防いだ。

加力制御は±3サイクルピーク時に接合部終局剪断耐力計算値(SRC規準式)の80%に至るように設定し、それまでのピーク値を1/3ずつ増分する荷重制御とし、+3サイクルピーク時の柱頭変位 δ を規準変位として+4サイクル目のピーク変位とした。それ以降のサイクルはピーク変位が $n \times \delta$ ($n=2,3,4,6,8$)となるように $n=2,3,4$ は各2回、 $n=6,8$ は各1回とする変位制御による

繰返し加力を行なった。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊性状

図-3に最終破壊状況を示す。なお、梁が偏心したSRC-12-WEは、偏心側接合部面とその反対側の両面を示す。全試験体において±1サイクルで梁に曲げ初亀裂が発生し、接合部では、±2サイクル〜±3サイクルで曲げ初亀裂と剪断初亀裂が発生した。柱せい500mmのSRC-11-Wを除く試験体では±5サイクル以降、梁の亀裂の発生と伸展は少なかったが、柱せい500mmのSRC-11-Wは±5サイクル以降でも亀裂の発生、伸展が顕著で、±6サイクルから梁付け根部に圧壊が開始した。しかし、±11サイクルからは梁付け根部での圧壊及び亀裂の拡幅は収まり、接合部の剪断亀裂の拡幅が顕著になった。

直交梁が偏心したSRC-11-WEでは、直交ウェブを境に角度の異なる圧縮ストラットが生じた。このことからコンクリートの応力伝達機構において、直交ウェブを境に2つに分かれたコンクリートの内部応力が、左右でそれぞれ異なっているものと思われる。

柱幅が広いSRC-12-Wは、±5サイクルまでの接合部剪断亀裂発生数が少なかったが、変位

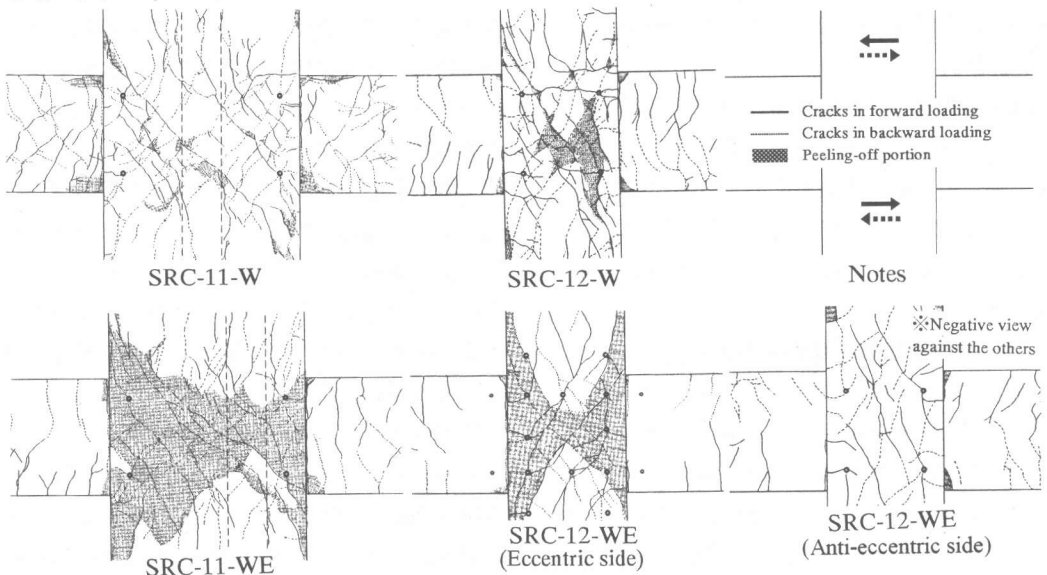


図-3 最終破壊状況

表-3 接合部剪断耐力結果

試験体	接合部剪断初亀裂発生耐力 Q_{jc}					接合部終局剪断耐力 Q_{ju}					σ_B (MPa)
	exp(kN)		cal(kN)	exp/cal		exp(kN)	SRC規準式		修正式		
	+	-		+	-		cal(kN)	exp/cal	cal(kN)	exp/cal	
SRC-1-W	371	236	356	1.04	0.66	1280	1030	1.25	1210	1.06	351
SRC-8-W	468	515	483	0.97	1.07	1590	1120	1.42	1430	1.11	395
SRC-11-W	906	952	663	1.37	1.43	2100	1740	1.21	2150	0.98	383
SRC-11-WE	661	595	649	1.02	0.92	1980	1730	1.14	2120	0.94	374
SRC-12-W	608	608	632	0.96	0.96	1920	1270	1.52	1740	1.11	442
SRC-12-WE	608	435	625	0.97	0.70	1690	1260	1.34	1720	0.98	437
平均				1.06	0.96			1.31		1.03	

の増大と共に接合部剪断亀裂の拡幅が顕著となった。これは、柱幅が広がったことにより、柱中心部の応力に比べてパネル表面の応力が小さくなったためと思われる。

梁が偏心した SRC-12-WE は、偏心側接合部のパネル中央で直交フランジが露出するほどコンクリートの損傷が著しかったのに対し、反対側のパネル面は偏心側に比べるとコンクリートの損傷は軽微であった。これは、梁からの応力伝達が偏心側に集中したためと思われる。

柱せい 500mm の SRC-11-W の試験体を除く 3 試験体の破壊モードは、接合部剪断亀裂が顕著であることから接合部剪断破壊であると判断した。他方、柱せい 500mm の SRC-11-W の試験体は、梁付け根部において曲げ圧壊が著しく進行したが、±11 サイクルから接合部剪断亀裂が顕著になったことから、梁の曲げ圧壊が先行し最終的に接合部剪断破壊に移行したと判断した。

3.2 耐力

過年度試験体の SRC-8-W と基準試験体の SRC-1-W を加えた計 6 体で考察を行なう。表-4 に接合部剪断耐力結果を示す。なお、AIJ 規準式の計算式では、直交フランジを考慮していないので、本研究では鉄骨のウェブの断面積に直交フランジの断面積を算入して求めている。

(1) 接合部剪断初亀裂発生耐力

実験値と計算値の対応は概ね良い対応を示している。柱幅を 300mm, 400mm, 500mm と変化させた SRC-1-W, SRC-8-W, SRC-12-W の試験体の実験値を見ると、柱幅が広くなるとともに実験値が大きくなっている。これは、内部コンクリートと表面コンクリートの変形に相違が

あり、内部から表面までの応力伝達の遅れが原因であるためと思われる。

(2) 接合部終局剪断耐力

実験値/計算値の平均値は、SRC 規準式で 1.31 と大きく、修正式では 1.03 と良い対応を示した。両方の接合部終局剪断耐力計算式は、共に実験耐力の平均を与える式であるが、SRC 規準式では、+20%を超える試験体が多いことから SRC 規準式では接合部終局剪断耐力を過大評価しているしていることが分かる。

柱せい 500mm の SRC-11-W は、実験値と修正式の計算値の対応が非常に良かったことから、柱せいが大きく、柱が偏平断面になっても修正式が適用できることが分かった。

直交梁が偏心した SRC-11-WE は、偏心していない SRC-11-W よりも実験値が若干小さくなり、偏心の影響が見られない。しかし、SRC-11-W は梁の曲げ圧壊が先行し接合部剪断破壊に移行したために、純粋に接合部剪断破壊した場合よりも耐力が小さかったと予測できる。このため、両者の最大耐力の差はもう少し大きいと思われ、直交梁が偏心することにより接合部剪断耐力が低下すると考えられる。これは、直交ウェブを境に 2 つ領域に分かれた左右のコンクリートの剪断耐力に差があるため、剪断耐力の低い方で耐力が決まり、RC の合計耐力が発揮できなかったためと思われる。

柱幅 500mm の SRC-12-W は、直交フランジが接合部有効幅 $(c+b_b)/2$ よりも外側に跳ね出し、柱幅 400mm の SRC-8-W の直交フランジは、有効幅内に収まっているが梁幅よりも外側に跳ね出しているため、これらは梁幅内に直交フラン

ジが存在する場合よりも負担剪断力が小さくなることが予想された。しかし実験値/修正式の計算値は両試験体とも1.11と対応が良いことから、直交フランジが有効幅より外側に存在しても、有効幅内にある場合と同等の剪断力を負担していることが分かった。

梁が偏心したSRC-12-WEは、実験値が、偏心していないSRC-12-Wよりも14%ほど小さくなった。RC造の場合、柱に対して梁が本実験と同様の形状で偏心接合された接合部耐力は、偏心していない場合の耐力の60%ほどに低下することが報告されている³⁾が、SRC造の場合、内部鉄骨自体の偏心による耐力低下が小さいため、RCとの合計耐力の低下が少ないと考えられる。

(3) 実験値と計算値との比較

図-4に当研究室でこれまでに実験を行なった試験体^{4),5),6)}を加えた全試験体(計20体)と、当研究室で作成したデータベース⁷⁾(1987年度~1999年度分)から、他の研究機関で行われた純SRC造で接合部剪断破壊した試験体^{8),9)}(計8体)を抽出したものを合わせた計28体を対象にしてSRC規準と修正式による計算値と実験値の関係を示す。

全試験体(計28体)の実験値/計算値の平均値は、SRC規準式で1.28と大きく、コンクリート、ウェブ、直交フランジ、及び直交フランジの4つを剪断抵抗要素として評価した²⁾修正式では、実験値/計算値が1.0に近くなるともに変動係数も改善される。

修正式は当研究室で行なったSRC造柱梁接合部の実験データ(計9体)を用い、各剪断抵抗要素の応力分担の分析結果から式を導いていることから、当研究室で実験を行なった試験体に関してSRC規準式よりも修正式の方が実験値と計算値の適応が良いのは当然との指摘もあった。しかし、今回、他の研究機関で行われた試験体8体を加えた計28体のSRC規準式と修正式での実験値と計算値の比較結果から、修正式の妥当性が確認できた。ただし、試験体数は28体と少ないので、今後、さらに試験体を増や

して検討する必要がある。

3.3 接合部剪断応力度(τ_j)—接合部剪断変形角(γ_{int})関係

柱梁フランジ交差部の幅中央4隅に取り付けた標点を用いて接合部対角線長さの変化量より算出した接合部剪断変形角 γ_{int} と、接合部剪断応力度 τ_j 関係のスケルトンカーブを図-5に示す。接合部剪断応力度の算出には、柱主筋の重心間距離と有効幅からなる接合部有効断面積を用いている。

全試験体ともに、接合部剪断初亀裂が発生す

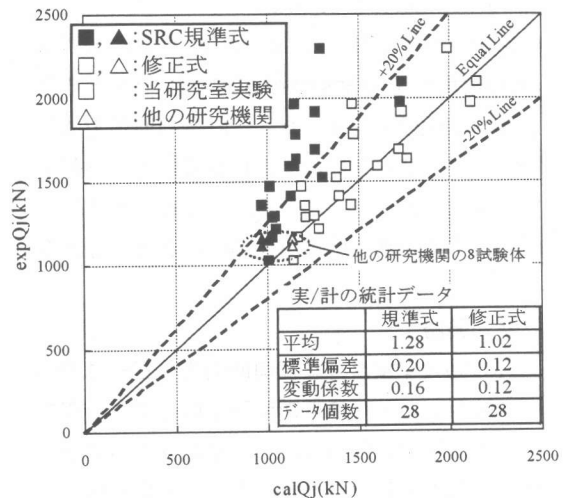


図-4 実験値と計算値の比較

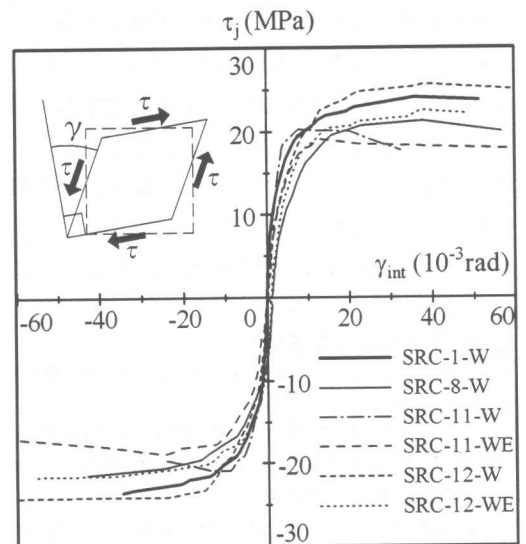


図-5 剪断応力度—剪断変形角関係

る±2～±3 サイクル ($\gamma_{int}=2\sim6\times 10^{-3}rad$) に剛性低下を生じた。SRC-11-W を除く試験体では、接合部剪断初亀裂の発生が顕著となる±5 サイクル ($\gamma_{int}=7\sim14\times 10^{-3}rad$) から変位の増大とともに接合部剪断変形角 γ_{int} が急激に増大し、最終的に接合部剪断変形角 γ_{int} が約 $50\times 10^{-3}rad$ まで変形していることから、破壊モードは接合部剪断破壊であることが確認できる。

他方、破壊モードが異なる SRC-11-W の試験体は、梁付け根部の圧壊が先行し接合部剪断破壊へ移行したことから接合部剪断変形角 γ_{int} は約 $30\times 10^{-3}rad$ に留まった。

柱せいが広がった SRC-11-W と SRC-11-WE の試験体は、基準試験体の SRC-1-W と比べると急激な剛性低下を見せた。これは剪断耐力においてコンクリートの剪断抵抗要素に占める割合が相対的に大きいことから、RC 挙動が卓越したために急激な剛性低下が起こったと考えられる。

4. 結語

SRC 造柱梁接合部終局剪断耐力修正式において未検討であった偏平断面及び偏心接合を変数として試験体を作成し、その適応性の検討を目的とした加力実験によって以下の知見を得た。

- I) 直交梁が加力方向に偏心した場合、直交ウェブを境に角度の異なる2つの圧縮ストラットが形成され、終局剪断耐力はやや小さくなった。
- II) 柱せい又は柱幅が広い偏平断面柱でも、修正式は実験値と適合することが確認できた。
- III) 加力梁が柱に対して偏心した場合、接合部の破壊性状では偏心側と反対側とで大きく異なったが、偏心による剪断耐力の低下は RC 造に比べると小さい。

【参考文献及び引用分訳】

- 1) 日本建築学会, 「鉄筋鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」, 1987
- 2) 北野, 城: SRC 造内部柱梁接合部構成要素の剪断応力分担に関する考察, 日本建築学会大会梗概集(中国), 1999.9
- 3) 日本建築学会, 「阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計」, 1998
- 4) 北野ほか: SRC 造内部柱梁接合部の剪断抵

抗性状に及ぼす接合部パネル形状等の影響, 日本建築学会大会梗概集(東北), 1991.9

5) 北野ほか: SRC 造内部柱梁接合部の剪断抵抗性状に及ぼす接合部水平断面の影響, 日本建築学会大会梗概集(関東), 1993.9

6) 北野ほか: SRC 造内部柱梁接合部の剪断耐力に及ぼす影響要因に関する実験的検討, 日本建築学会大会梗概集(東北), 2000.9

7) 北野, 城: SRC 造及び柱 RC 梁 S 造柱梁接合部の終局剪断耐力に関する考察, コンクリート工学年次論文, Vol.19, No.2, pp1455-1460, 1997

8) 谷口ほか: 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), 日本建築学会大会梗概集(関東), 1988.10

9) 寺岡ほか: 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, 日本建築学会大会梗概集(北陸), 1992.8

【Appendix】

接合部剪断初亀裂発生耐力

$$\tau_{jc}=0.1\cdot(1+\beta)\cdot\sigma_B$$

$$\beta=(15J_{tw}\cdot s_c d)/(c\cdot b\cdot m_c d)$$

記号は SRC 規準に準ずる

柱梁接合部終局剪断耐力

[SRC 規準式]

$$Q_{ju}=\{cV_e(JF_s\cdot J\delta + w_p\cdot w\sigma_y) + 1.2sV_s\sigma_y/\sqrt{3}\}/m_B d$$

$$cV_e=(c(b+B)b)/2\cdot m_B d\cdot m_c d$$

$$sV_s=J_{tw}\cdot s_B d\cdot s_c d$$

$$JF_s=\min(0.12F_c, 18+3.6F_c/100)$$

記号は SRC 規準に準ずる

[修正式]

$$Q_{ju}=r_c Q_j + w Q_j + 0.9_f Q_j + 0.5_{fr} Q_j$$

$$r_c Q_j = c A \cdot 0.39 \cdot \sigma_B$$

$$w Q_j = s_w \sigma_y / \sqrt{3} \cdot A_w$$

$$f Q_j = f \sigma_y / \sqrt{3} \cdot A_f$$

$$fr Q_j = (\alpha \cdot b_{fr} \cdot t_{fr}^2 \cdot \sigma_y / 4) / m_B d$$

記号)

- σ_B : コンクリート強度(N/mm²)
- $r_c Q_j$: RC部負担剪断力(N)
- $w Q_j$: 接合部ウェブ負担剪断力(N)
- $f Q_j$: 直交フランジ負担剪断力(N)
- $fr Q_j$: 柱梁フランジ枠効果負担剪断力(N)
- $c A$: 接合部のコンクリート有効断面積(mm²)
- A_w : 接合部ウェブ断面積(mm²)
- $s_w \sigma_y$: 接合部ウェブ降伏応力度(N/mm²)
- $f \sigma_y$: 直交フランジ降伏応力度(N/mm²)
- b_{fr} : 柱梁フランジ幅(mm)
- t_{fr} : 柱梁フランジ厚(mm)
- $fr \sigma_y$: 柱梁フランジ降伏応力度(N/mm²)
- α : 枠効果形状係数(十字形=8)