

論文 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

北野敦則*¹・城 攻*²

要旨: 1987年以降の文献より合成構造柱梁接合部に関する実験データを抽出し、柱梁接合部の終局剪断耐力に着目し、耐力算定法に関し検討を行った。柱梁ともSRC構造の場合、過去に当研究室で提案した修正式で評価できるが、さらに、応力伝達機構を考慮した耐力評価の必要がある。柱RC梁S構造の場合、SRC規準式を基に修正式を提案し、実験値と計算値の対応はSRC規準に比べ改善された。しかし、接合部構成要素による剪断耐力への影響が明確でなく、更に検討する必要がある。

キーワード: 柱梁接合部、終局剪断耐力、合成構造、SRC構造

1. はじめに

近年、建築物の高層化と材料の高強度化にともない、鋼とコンクリートによる新しい構造形式が提案されており、最近盛んに開発されているのが柱RC梁S構造である。しかし、設計法はSRC規準式[1]を基に、各設計者の判断にゆだねられている部分が多いのが現状である。また、現在のSRC規準では、式が複雑であることや、高強度材料に対応していないこと等の問題点が指摘されており、現規準での合成構造への応用は、一概に安全性が確保されているとはいえない。さらに、阪神・淡路大震災において少なからずSRC造の建物にも被害が生じ、これまで比較的少なかった柱梁接合部の被害事例がいくつか報告された。

本論文では、過去に国内で発表された論文から柱梁接合部の実験データを抽出し、柱梁接合部の終局剪断耐力に及ぼす影響要因を調査することを目的に、SRC規準式と既に公表されているいくつかの提案式の適合性について比較検討を行った。

2. 検討対象および方法

2.1 解析に用いた実験試験体

一般に合成構造とは、2種類以上の材料または部材を組み合わせることで造られた構造をいうが、本研究のデータベース構築時に取り扱った構造は、柱梁ともSRC構造、柱SRC梁S構造、柱RC梁S構造による柱梁接合部である。また、調査対象とした文献は、SRC規準が改訂され、柱RC梁S構造が開発され始めつつあった1987年以降の文献とし、実験的研究のみを対象とした。

文献を抜粋した論文集は、「日本建築学

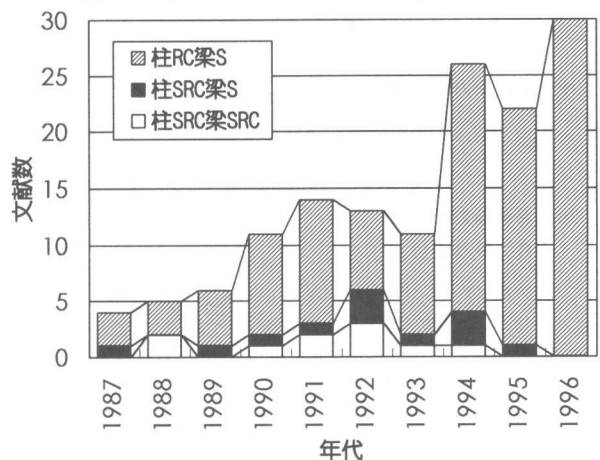


図-1 調査した文献数の推移

*1 北海道大学助手 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工修（正会員）

*2 北海道大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

会大会学術講演梗概集」、「日本建築学会構造系論文報告集」、「日本コンクリート工学協会年次大会論文報告集」の3論文集である。この中から内部柱梁接合部の剪断耐力算定に必要なデータを明記してある試験体を抽出し、その情報をデータベース化した。調査対象とした文献の年代別推移を、図-1に示す。図-1によると合成構造柱梁接合部に関する文献数は年々増加しているが、柱梁ともにSRC構造の文献は1992年をピークに減少しているのが分かる。これは、解析的にある程度の成果が得られるようになった事と、最近の傾向として純SRC構造から合成・混合構造へと移りつつある事などが理由としてあげられる。図-2は、本論文で対象とした試験体の破壊形式の分布である。破壊形式は最大耐力時で、Jは柱梁接合部剪断破壊型、BJは梁降伏後接合部剪断破壊型、Bは梁曲げ破壊型、Cは柱破壊(支圧破壊、曲げ破壊)型を表す。また、柱SRC梁S構造はデータ数が少ないため割愛した。なお、図-3に代表的な柱RC梁S構造を示す。

2.2 検討方法

前述した文献の実験結果と試験体の諸元を用いて接合部剪断応力度実験値 $\exp \tau$ と、各計算式から接合部剪断応力度計算値 $\text{cal } \tau$ を算出し、比較検討する。

以下に算出方法およびSRC規準式を示す。

接合部剪断応力度

$$\exp \tau, \text{cal } \tau = \frac{JQ}{b_e \cdot mcd} = \frac{JM_u}{b_e \cdot mcd \cdot mbd} \quad \dots(1)$$

ここで、 $b_e = (cb + sb)/2$ (柱梁ともSRCの場合)
 $= cb/2$ (柱RC梁Sの場合)

接合部剪断力実験値

$$\exp JQ = \left(\frac{\ell - mcd}{mbd} \cdot \frac{h}{\ell} - 1 \right) \cdot \exp CQ \quad \dots(2)$$

接合部剪断力計算値

SRC規準式[1]

$$\begin{aligned} \text{cal } JM_u &= JMC + JMs \\ &= cVe \cdot (JFs \cdot J\delta + w\rho \cdot w\omega) + \frac{1.2 \cdot sV \cdot s\omega}{\sqrt{3}} \quad \dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 $cVe = b_e \cdot mcd \cdot mbd$
 $sV = Jfw \cdot sbd \cdot scd$
 $JFs = \min \left(0.12\sigma_s, 18 + \frac{3.6\sigma_s}{100} \right)$

筆者らの1993年提案修正式[2]

$$\text{cal } JM_u = cVe \cdot (JFs \cdot J\delta) + \frac{1.1 \cdot sV \cdot s\omega}{\sqrt{3}} + \frac{\alpha \cdot bfr \cdot Jfr \cdot tr\omega}{4} \quad \dots(4)$$

ここで、 $JFs = 2.5\sqrt{\sigma_s}$ 、 $\alpha = 8$

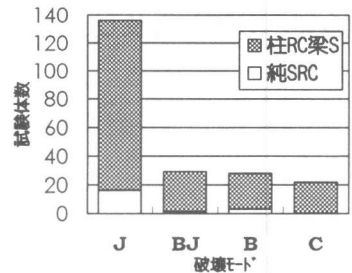


図-2 対象とした試験体数

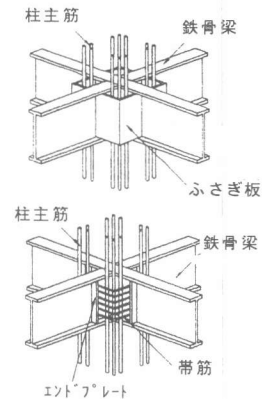


図-3 柱RC梁S構造の代表例

記号 (後出の式の記号も含む)

JQ	: 接合部剪断力
CQ	: 層剪断力
cb	: 柱幅
sb	: 梁幅
h	: 柱支点間距離
ℓ	: 梁支点間距離
mcd	: 柱主筋重心間距離
mbd	: 梁主筋重心間距離
scd	: 柱フランジ重心間距離
sbd	: 梁フランジ重心間距離
$s\omega$: 接合部ウェブ降伏応力度
$J\delta$: 形状係数(十字形: 3)
$w\rho$: 接合部剪断補強筋比
$w\omega$: 接合部剪断補強筋降伏応力度
Jfw	: 接合部ウェブ厚さ
σ_s	: コンクリート強度
$Jbfr$: 接合部フランジ幅
Jfr	: 接合部フランジ厚
$tr\omega$: 接合部フランジ降伏応力度
$Jftfr$: ふさぎ板厚
$tr\omega$: ふさぎ板降伏応力度
cD	: 柱せい
bD	: 梁せい
eb	: イントプレート幅
$e\omega$: イントプレート降伏応力度
ob	: 外部要素幅

(注)

計算式での単位系は重力単位系で示されているので、本論文では計算結果をSI単位系に換算して表した。

3. 既往の計算式と実験値との比較

3.1 純SRC構造の場合

図-4に柱梁ともSRC構造における接合部剪断応力の実験値と計算値とを比較して示す。鉄骨形状は梁については全てH形鋼を用い、柱についてはH形鋼の場合に強軸方向と弱軸方向の2種があり、更に2方向H形鋼(⊕)を用いているものがある。試験体は全て接合部剪断破壊型(J)であり、試験体数は17体と少ないが図-4より計算値に対する実験値の比(以下、実/計)は平均1.12となり多少安全側に評価される。しかし、実験値は大きく分散しており、筆者らはこの要因の一つとして接合部を囲む柱梁鉄骨フランジの枠効果であることを指摘した[2]。これは鉄骨フランジが厚い場合に、□形ラーメン架構の剪断変形した時と同様の耐力が付加されることを考慮したもので、(4)式を用いて評価すると図-5に示すように実/計は1.0に近くなるとともに変動係数も大幅に改善される。しかし、直交梁の有無や高強度材料が接合部剪断耐力に与える影響は大きいと思われ、今後、応力伝達機構を考慮した評価法を検討する必要がある。

3.2 柱RC梁S構造の場合

柱RC梁S構造について実験値と計算値の比較を図-6に示す。接合部の鉄骨形状は後述するように各種の方式を含んでいて、この段階では区別していない。試験体の破壊形式はJ型118体、BJ型28体で、B型とC型破壊は除いてある。SRC規準ではふさぎ板やエンドプレートのような補強材は耐力式に評価されていないが、これらは剪断抵抗要素としても働いていると考えられるので、加力面内方向に存在するそれらの水平断面積を用いて接合部ウェブと同等に評価したものである。しかしこの評価方法によると、J破壊型のみを対象としても実/計は0.82となり計算値が実験値に比べて過大に評価されてる。逆に、剪断抵抗要素を梁鉄骨による接合部ウェブ板のみと考えると、実/計は1.35となり実験値の方が大きくなり過小評価となる。また、いずれの場合も純SRC構造の接合部に比べて変動係数が大きくなっている。したがって、ふさぎ板やエンドプレートのような補強材の耐力式への評価方法を検討しなければならない。

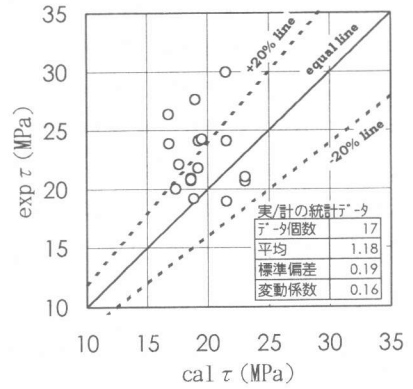


図-4 SRC規準式との比較(純SRC)

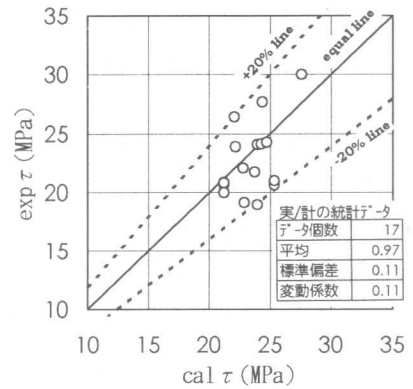


図-5 修正式との比較(純SRC)

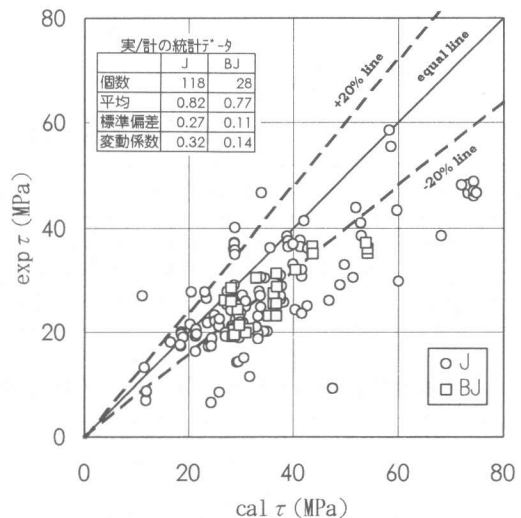


図-6 SRC規準式との比較(柱RC梁S)

次に、柱RC梁S造の接合部に対して提案されている接合部終局剪断耐力算定式[4]のうち、鉄骨ウェブないしは補強ふさぎ板を有する接合部を対象とした計算式を用いて実験値と計算値を比較する。使用した提案式を表-1に、結果のうち実/計の平均、標準偏差、変動係数を表-2に示す。11式、12式以外は平均が1.0以上となり安全側に評価されて、特に1、3、4式は実/計が大きい。1、2、3、11、12式は変動係数が0.5以上となり分散が大きい。6式と9式は比較的实验値と良い対応を示したが、6式は剪断抵抗要素の有効断面積が実験により決められていること、9式はふさぎ板形式の接合部に適応させたものであるが、耐力に評価していないなど、問題点があげられる。

表-1 使用した既往の提案式

式番号	接合部コンクリート	鉄骨ウェブ	補強鉄骨ふさぎ板	コンクリート柱補強筋	備考	特徴	文献[4]での記号
1	SRC	SRC	-	SRC		梁貫通・エドプレート・斜めスリット	BDFH
2	SRC [有効幅を $(b+b_b)/2$]	SRC	-	SRC [有効幅を $(b+b_b)/2$]		梁貫通・エドプレートを柱方向に延長	E
3	JCI	JCI	-	-	kc=0.42	梁貫通・梁ジョイントにスリット	G
4	SRC	SRC [係数を1.0]	$cb/2 \cdot m_c d \cdot s_b d \times r_p \times r \sigma_y$ ($r_p=2j_t r/cb$)	-		ふさぎ板・梁貫通	I1
5	SRC	JCI×0.9	$cb/2 \cdot m_c d \cdot s_b d \times r_p \times r \sigma_y$ ($r_p=2j_t r/cb$)	-		ふさぎ板・梁貫通	I2
6	JCI	JCI×wk	$r_k \cdot 2j_t r \cdot d \cdot s_b d \times 1.0 r \sigma_y / \sqrt{3}$	-	ck=0.32, wk=0.88, r_k=0.73	ふさぎ板・梁貫通	I4
7	SRC	SRC	$2j_t r \cdot r d \cdot s_b d \times 1.0 r \sigma_y / \sqrt{3}$	-		ふさぎ板+エドプレート・梁貫通	K
8	SRC	SRC	$cb/2 \cdot m_c d \cdot s_b d \times r_p \times r \sigma_y$ ($r_p=2j_t r/cb$)	-		ふさぎ板・梁貫通・接合部中央ジョイントに小型鋼管溶接	L
9	$(a_b - j_t a + a)(c_b - a_b)/4 \cdot (c_b - 2j_t a - a \cdot j_t a) \cdot a_b d \times 0.345 F_c$	$j_t w \cdot (c_b - a_t) \cdot a_b d \times 1.2 r \sigma_y / \sqrt{3}$	-	-	$\alpha=1$:直交梁有り $\alpha=0$:直交梁無し a_t :エドプレートの厚さ	ふさぎ板・接合部中央にリグバット	M
10	JCI×2 [ただし c_b に $m_c d$ を使う]	SRC [係数を1.0]	$2j_t r \cdot r d \cdot s_b d \times 1.0 r \sigma_y / \sqrt{3}$	-	$k=0.19\{(c_b/eD) \cdot (c_b/eb)\}^2 - 0.81(c_b/eD) \cdot (c_b/eb) + 0.38(c_b/eD) + 1.11$, eb :エドプレートの幅 eD :エドプレートの高さ	ふさぎ板+エドプレート・斜めスリット	Q
11	ASCE	$0.8 \cdot j_t w \cdot d \cdot s_b d \times 1.2 r \sigma_y / \sqrt{3}$	-	$0.9 c_b \cdot c_d \cdot s_b d \times r_p \cdot r \sigma_y$		梁貫通・エドプレート・斜めスリット	ZA
12	JCI	JCI	-	-	k_{SRC} :梁貫通型 0.54、 テーパー型 0.61、 エドプレート拘束型 0.77、 接合部コンクリート拘束型 1.07	梁貫通・テーパージョイント・エドプレート・ふさぎ板	ZB

注1)各要素の和で M_u を算出する。

注2)SRC:SRC規準式を準用、JCI:JCIがイトライソ式を準用、ASCE:ASCEがイトライソ式を準用

JCIがイトライソ式

$$Q = k_{SRC} \times 0.3 \sigma_b \times A_{c1} + w \alpha / \sqrt{3} \times A_w \quad A_{c1} = \frac{cb}{2} \times cD$$

ここで、 k_{SRC} = 接合部コンクリートの拘束度に応じた有効係数

$$A_w = j_t w \times cD$$

ASCEがイトライソ式

$$M_u = eb \cdot cD \cdot s_b d \times 5.42 \sqrt{F_c} + ob \cdot cD \cdot s_b d \times 1.28 \sqrt{F_c} + j_t w \cdot j \cdot cD \cdot s_b d \times 0.63 \sigma_y + 0.9 c_b \cdot cD \cdot s_b d \times w_p \cdot w \alpha$$

表-2 既往の提案式による実験値と計算値の比較

形式と個数	非ふさぎ板形式51体				ふさぎ板形式95体								全形式146体
	1	2	3	11	4	5	6	7	8	9	10	12	
式番号													
平均	1.40	1.13	1.36	0.81	1.30	1.16	1.08	1.23	1.20	1.02	0.98	1.13	
標準偏差	0.89	0.64	1.11	0.49	0.38	0.36	0.31	0.46	0.36	0.31	0.44	0.61	
変動係数	0.64	0.57	0.82	0.60	0.29	0.31	0.29	0.37	0.30	0.30	0.45	0.54	

4. 実験資料に基づく柱RC梁S構造の接合部剪断終局耐力式の提案

柱RC梁S構造に関し、前節の提案式において構成要素の計算式を参考に、ふさぎ板がある場合と無い場合に分けて計算式を検討した。コンクリート負担分はSRC規準式を用い、鉄骨負担分のみ修正を加えた。SRC規準式では、鉄骨負担項において枠効果などの影響を考慮し係数1.2を乗じているが、柱RC梁S構造の場合枠効果にまで至らない可能性があるため、係数を1.0とした。また、加力方向に沿ってエドプレートが存在する場合、前節の純SRC構造の修正式と同様に接合部ウェブ

がと同等に扱った。さらに、ふさぎ板が有る場合と無い場合で接合部ウェブの有効断面積を変えた。修正した実験値と計算値の比較を図-7と図-8に示す。SRC規準式で評価した場合と比較すると、ふさぎ板の無い場合、実験値と計算値がよい対応を示すように、ばらつきも改善された。ふさぎ板の有る場合、ばらつきは変わらないが、平均値が大幅に改善された。これら式は単なる式の組合せによる評価式であり、接合部の構成要素の応力伝達機構と実験データの詳細な検討によりさらに修正を加える必要がある。

修正式

$$JM_u = JMC + JMs, \text{ ここで } JMC = cVe \cdot (JFs \cdot J\delta + wD \cdot w\sigma_y)$$

ふさぎ板のある場合 (修正式A)

$$JMs = \frac{Jfw \cdot scd \cdot sbd \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} + 2 \cdot \frac{Jfe \cdot eb \cdot sbd \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} + 2 \cdot \frac{Jfr \cdot (cd - eb) \cdot sbd \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}}$$

ふさぎ板のない場合 (修正式B)

$$JMs = \frac{Jfw \cdot mcd \cdot sbd \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} + 2 \cdot \frac{Jfe \cdot eb \cdot sbd \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}}$$

表-3 実/計の統計データ

規準式		
ふさぎ板	有	無
個数	95	51
平均	0.76	0.91
標準偏差	0.14	0.35
変動係数	0.18	0.38
修正式		
ふさぎ板	有	無
個数	95	51
平均	0.96	0.94
標準偏差	0.17	0.25
変動係数	0.18	0.27

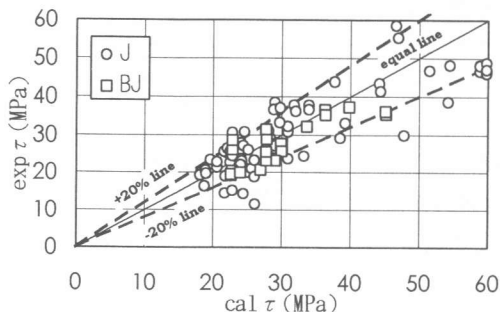


図-7 修正式Aとの比較(柱RC梁S)

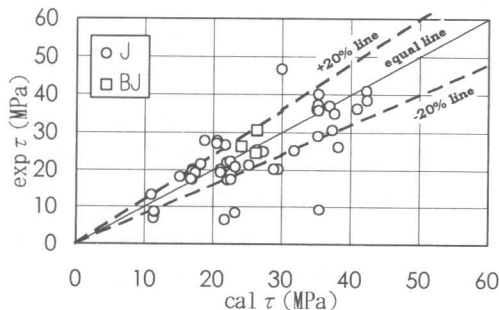


図-8 修正式Bとの比較(柱RC梁S)

5. 柱RC梁S構造の接合部終局剪断耐力に及ぼす諸要因の影響

5.1 コンクリート強度の影響

図-9にコンクリート強度 σ_B のみを実験変数とした試験体の接合部剪断強度との関係を示す。普通強度コンクリートの場合には σ_B が大きくなると剪断強度 τ_{exp} も上昇するものが多く、高強度コンクリートの場合は、剪断強度の上昇は明確でない。図中に破線で示したデータは、SRC規準を用いて鉄骨ウェブ負担分を計算し、 τ_{exp} から差し引いた値であり、RC負担分と考えられる。SRC規準式のコンクリート剪断強度式及びJCIガイドラインのコンクリート剪断強度式と比較すると、高強度コンクリートでの対応が悪い。したがって、高強度コンクリートまで含めたコンクリート剪断強度の評価が必要である。

5.2 ウェブ厚の影響

図-10に接合部ウェブ厚を実験変数とした試験体の剪

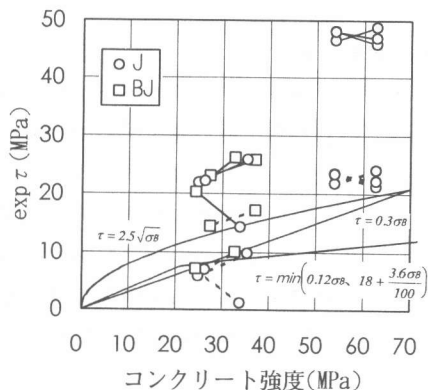


図-9 コンクリート強度と剪断応力度関係

断応力度との関係を示す。梁ウェブが接合部内に貫通していない場合の接合部ウェブを中板という。中板が厚くなると剪断強度も上昇し、接合部剪断強度に与える影響は大きく、強い相関関係を示すのに対し、梁ウェブが貫通している場合は剪断強度の上昇率にばらつきがあり、平均すれば中板型に比べると寄与率が小さい。この理由としては、梁ウェブが貫通している場合には、ウェブによる枠効果が剪断耐力に与える影響が少なくないために相対的にウェブ厚の効果が小さくなると考えられる。

5. 3 ふさぎ板の影響

図-11にふさぎ板厚を実験変数とした試験体と剪断強度との関係を示す。ふさぎ板が厚くなると剪断強度も上昇しており、剪断耐力に与える影響が少なくない。しかし、ある厚さを越えると耐力の上昇が鈍る傾向が見られる。また、前項で述べたウェブ、中板厚の増大に対する剪断強度の上昇率と比較すれば、ふさぎ板の方の上昇率が小さいので、ウェブや中板と同等には評価できない。さらに、ふさぎ板が、接合部内コンクリートの拘束に効果があるとして、剪断補強筋に換算して耐力式に評価する方法の提案もあり、これらも含めて今後の検討を加える必要がある。

5. 4 エンドプレートの影響

エンドプレート厚のみを実験変数とした試験体はないが、加力方向に沿うエンドプレート厚は剪断変形を強制されるので剪断耐力に影響を及ぼし、特に中板が上下分離して非充腹梁形式となっている場合には有効に働くことが報告されている。また、加力方向に直交するエンドプレートは梁圧縮部からの作用力をRC梁のコンクリートに代わって接合部へ有効に伝達し、接合部内のRC部分の有効水平断面積を拡大すると考える報告もあるが、耐力評価に具体的に算入した提案式は少ない。

6. おわりに

1987年以降の文献より合成構造柱梁接合部に関する実験データを抽出し、柱梁接合部の終局剪断耐力に着目し、耐力算定法に関し検討を行った。柱梁ともSRC構造の場合、過去に当研究室で提案した修正式で評価できるが、さらに、応力伝達機構を考慮した耐力評価を検討する必要がある。柱RC梁SRC構造の場合、SRC規準式を基に修正式を提案し、実験値と計算値の対応はSRC規準に比べ改善された。しかし、コンクリート強度、接合部ウェブ厚、ふさぎ板厚を変数とした実験データより、それぞれの剪断強度評価を更に検討する必要があることがわかった。また、エンドプレートについても応力伝達機構を考慮した耐力評価が必要である。

【参考文献】[1]日本建築学会編、「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、1987；[2]北野ほか、「SRC造内部柱梁接合部の剪断抵抗性能に及ぼす接合部水平断面形状の影響(その1,その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1993；[3]日本コンクリート工学協会、「混合構造研究委員会報告書」、1991；[4]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

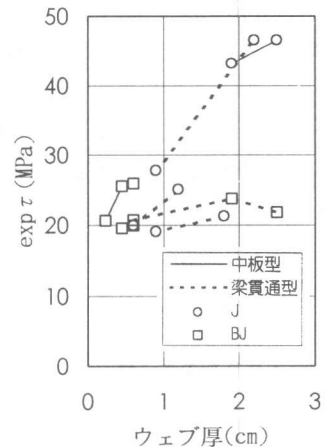


図-10 ウェブ厚と剪断応力度関係

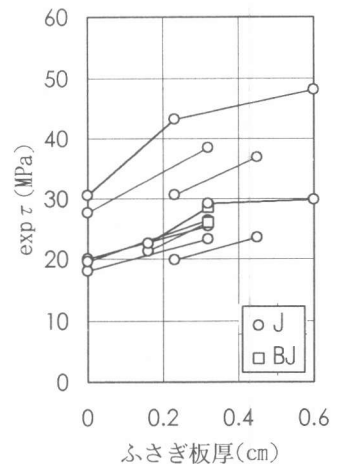


図-11 ふさぎ板厚と剪断応力度関係