

論文 下界定理による RC 柱はり内部接合部のせん断強度

市之瀬 敏勝*1・梶原 卓行*2

要旨:RC柱梁内部接合部のせん断強度解析式の確立を目的として、諸要因がせん断抵抗機構におよぼす影響についての考察をおこなった。梁主筋上下同量で、接合部せん断破壊型の接合部に対し、各せん断抵抗機構の負担割合をコンクリート圧縮強度より決定し、せん断耐力を求めた。

キーワード:柱梁内部接合部、せん断強度、ストラット機構、トラス機構

1. はじめに

RC内部柱梁接合部のせん断強度に関しては、多くの実験により、コンクリート強度の影響が大きく、せん断補強筋や柱軸力の効果は小さいなどの報告がなされている。梶井、藤井ら [1] は、柱・梁の主筋の応力シフトを考慮すれば、この現象を解析により説明できることを示した。本報告では、梶井ら [1] と類似の解析方法を用いて、種々の要素が接合部のせん断強度に及ぼす影響を調べる。

2. 接合部のモデル化

接合部を図1のようにモデル化する。梁主筋断面積 A_b は、上下同量とする。二段配筋の場合は重心位置の一段配筋に置き換える。柱中段筋 A_e は柱の中心線上に集中させる。解析範囲は図1に網かけをした、高さ $2j_b$ の領域、すなわち梁主筋間距離の2倍の高さの範囲とした。これは、柱が曲げ降伏せず、柱曲げひび割れ幅の範囲が限定されるために、柱危険断面を横切るような抵抗機構(後述)も考えられるからである。また、この解析領域に働く外力を図2のように仮定する。柱と梁のコンクリート圧縮力は、幅 x_b, x_c の間で一様に分布するものとし、

$$0 \leq x_b \leq \frac{D_b}{2}, \quad 0 \leq x_c \leq \frac{j_c}{2} \quad (1)$$

の範囲で任意の値を取り得ると仮定する。柱、梁主筋の応力、 T_b, T_c などは降伏強度の範囲内で任意の値を取り得ると仮定する。 U_b, V_c は梁・柱のせん断力であり、梁、柱の曲げモーメントとの釣合条件から自動的に決まる。

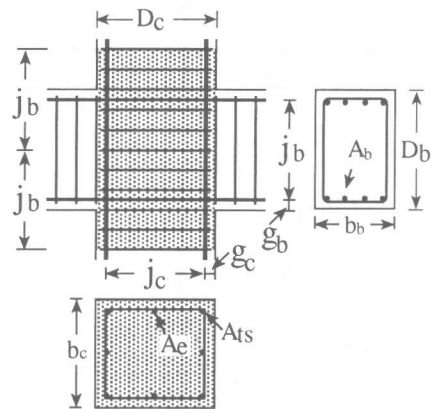


図1 接合部モデル

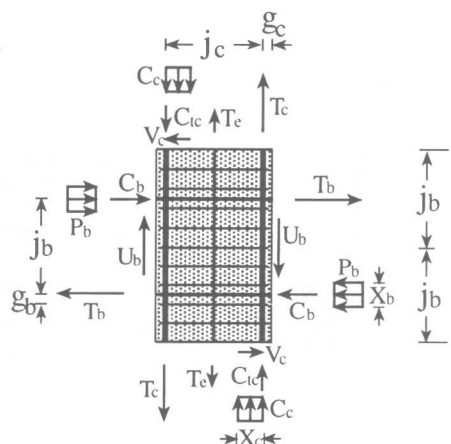


図2 接合部に働く外力

*1 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博 (正会員)

*2 名古屋工業大学学生 工学部社会開発工学科

3. セン断抵抗機構

図3に示す5つのせん断抵抗機構を仮定する。5という数は、図1, 2のモデルに対応している。すなわち、図1, 2では、柱と梁のコンクリート圧縮力、柱と梁の主筋の付着応力、および横補強筋の応力という5つの自由度があるためである。図3の機構のうち、準ストラット機構A、トラス機構Aの妥当性については議論の余地があるが、筆者らが现阶段で想定できる機構としてはこれが最良と考えた。図3の機構が負担する力を表1に示す。表からもわかるように、ストラット機構A, C, Dは、横補強筋の応力を伴わず、準ストラット機構A、トラス機構Aは横補強筋の引

表1 セン断抵抗機構

機構名		コンクリート圧縮力		付着力		せん断力		補強筋 締め付け力	接合部中央 圧縮応力
		柱	梁	柱	梁	柱	梁		
ストラット機構	A	C_{sa}	-	-	Q_{sa}	V_{sa}	U_{sa}	-	σ_{sa}
	C	C_{sc}	P_{sc}	-	-	V_{sc}	U_{sc}	-	σ_{sc}
	D	-	P_{sd}	R_{sd}	-	V_{sd}	U_{sd}	-	σ_{sd}
準ストラット機構A		C_{qa}	-	R_{qa}	Q_{qa}	V_{qa}	U_{qa}	W_{qa}	σ_{qa}
トラス機構A		C_{ta}	-	R_{ta}	Q_{ta}	V_{ta}	U_{ta}	W_{ta}	σ_{ta}
合計		C_c	P_b	T_c+C_{tc}	T_b+C_b	V_c	U_b	$\leq b_c \cdot j_b \cdot p_w \cdot \sigma_{wy}$	σ_B

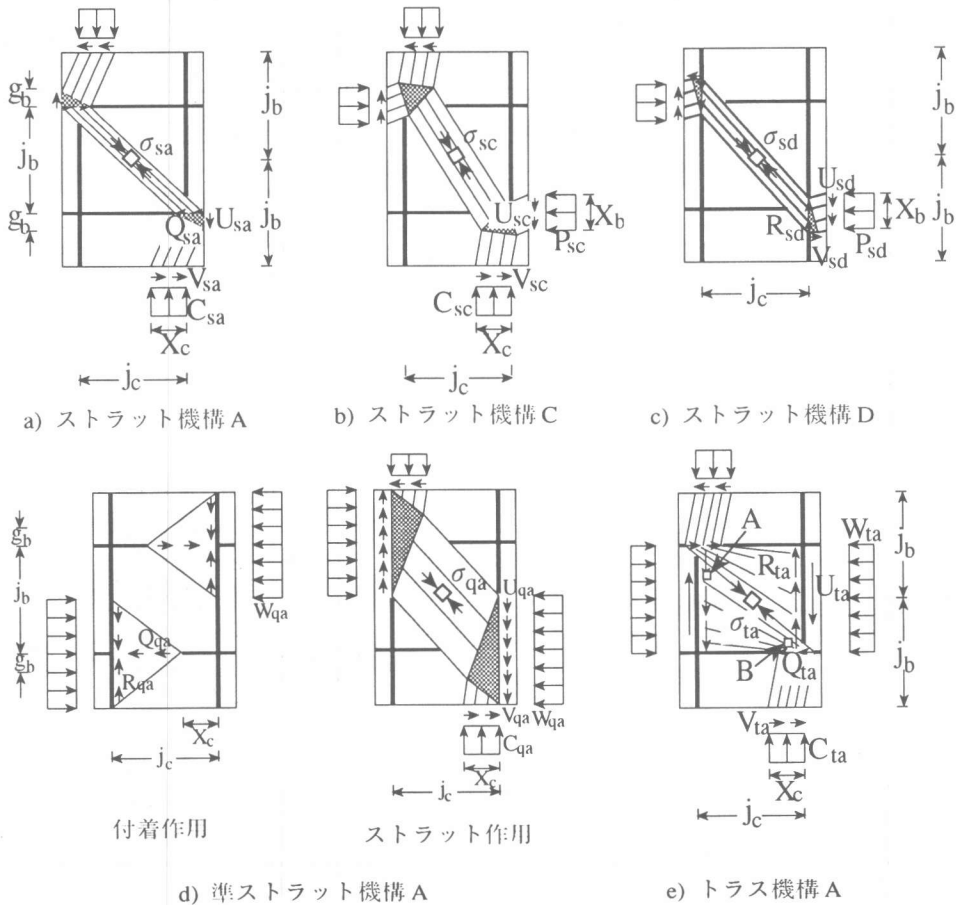


図3 セン断抵抗機構

張力を伴う。この引張力はコンクリートコアに締め付け力（図2のWqa, Wta）を与える。ストラット機構A、準ストラット機構Aは梁主筋の付着作用を伴う。ストラット機構Dは柱主筋の付着作用を伴う。トラス機構Aは柱・梁主筋の付着作用を伴う。ストラット機構Cは付着作用を伴わない。これらの機構により接合部中央に生じるコンクリートの圧縮応力を、 σ_{sa} 、 σ_{sc} などと表す。本解析では、次の3つの条件の範囲内で、5つの機構の接合部のせん断応力の総和 τ が最大となる様な各機構の負担割合およびコンクリート圧縮力の幅 x_b 、 x_c を算定する。数値計算はパソコン上での繰り返し計算によった。

1) せん断強度時には、 σ_{sa} 、 σ_{sc} など圧縮応力の総和がコンクリートの圧縮強度 σ_B に等しくなる。
 柱、梁のせん断強度の算定では有効強度係数 ν を用いる場合が多い。これは、元来3次的に不均一なトラス機構の圧縮応力場を均一な2次元応力場に置換することを補償するためのものと筆者らは解釈している。一方、接合部ではストラット機構の卓越が予想されるので、圧縮強度そのものを使用することにした。

2) ストラット内部の柱梁主筋の付着応力は、付着強度 $3\sqrt{\sigma_B}$ MPaの範囲内になければならない。
 六車、森田 [2] の実験を参照して、極めて拘束の大きいコンクリート内の付着強度は $3\sqrt{\sigma_B}$ 程度であろうと判断した。

3) 柱・梁主筋、補強筋の応力は降伏強度を超えることはできない。

接合部せん断応力 τ の定義は、滝沢 [3] に従って、パネルモーメント M_p と接合部パネルの体積 V_p との比、次式 (2) とした。この定義は、梁の危険断面での応力中心間距離が j_b になるとき、通常の τ の定義と一致する。

$$\tau = \frac{M_p}{V_p} \quad (2)$$

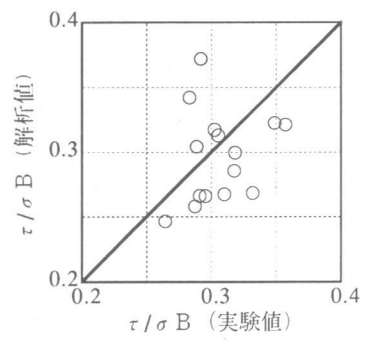


図4 実験値と解析値の比較

表2 試験体の諸元と解析結果との比較

文献	試験体名	図番号	σ_B (MPa)	梁筋 段数	Dc/Db	ph. σ_{hy} / σ_B	pt. σ_{by} / σ_B 梁	pt. σ_{cy} / σ_B 柱	軸力 比	$\tau_{実}$ / σ_B	$\tau_{解}$ / σ_B	実/解
山口他 [4]	JPC-25	-	31.3	1	1.00	0.142	0.22	0.12	0.19	0.35	0.32	1.08
	JPC-24	5	33.4	1	1.00	0.076	0.13	0.11	0.18	0.29	0.27	1.09
	JPC-28	5	34.2	1	1.00	0.037	0.13	0.11	0.17	0.29	0.26	1.11
塩原[7]	J-3	11	81.1	2	1.00	0.091	0.25	0.46	0.11	0.28	0.34	0.83
柴田他 [5]	C3-H0	6	31.4	1	0.86	0.196	0.21	0.39	0.28	0.29	0.37	0.78
	C3-M0	6	32.6	1	0.86	0.094	0.20	0.37	0.27	0.31	0.31	0.97
	C3-L0	6	31.7	1	0.86	0.004	0.21	0.38	0.28	0.32	0.29	1.11
	C5-L0	9	32.6	1	0.57	0.003	0.14	0.39	0.27	0.30	0.32	0.95
Meinheit Jirsa [6]	2	10	43.9	1	1.00	0.039	0.14	0.24	0.24	0.26	0.25	1.07
	5	10	37.7	1	1.00	0.045	0.17	0.29	0.04	0.30	0.27	1.11
	6	10	38.7	1	1.00	0.044	0.16	0.28	0.46	0.31	0.27	1.16
	3	7	27.6	1	1.00	0.062	0.23	0.17	0.40	0.29	0.30	0.95
	4	7,8	28.0	1	1.00	0.061	0.22	0.42	0.37	0.32	0.30	1.06
神野[8]	No.2	-	28.3	1	1.00	0.130	0.38	0.70	0.17	0.36	0.32	1.11
森本[9]	No.2	-	33.6	1	1.00	0.066	0.15	0.29	0.10	0.33	0.27	1.24
平均			36.4	1.1	0.94	0.073	0.20	0.31	0.23	0.31	0.30	1.04
標準偏差			13.1	0.26	0.118	0.052	0.06	0.16	0.12	0.03	0.04	0.12

pt. σ_{by} / σ_B 梁, pt. σ_{cy} / σ_B 柱: 梁, 柱の引張鉄筋比×降伏強度/コンクリート強度

$$M_p = \left(1 - \frac{j_b}{H} - \frac{j_c}{L}\right) \cdot H \cdot V_c \quad (3)$$

H, L : 柱、梁の反曲点間の距離

$$V_p = b_c j_c j_b \quad (4)$$

4. 解析結果

既往の実験データのうち、表2に示す15体について解析を行った。実験値と解析値との比は、平均1.04、標準偏差が0.12であり、適合性はよい。コンクリート強度で基準化した実験・解析の比較を図4に示す。以下、要因ごとに検討を進める。

4-1 セン断補強筋量の影響

山口ら [4]、柴田ら [5] は、他の条件を各々一定としてせん断補強筋比 p_h のみを変化させた実験を報告している。この p_h を連続的に変化させたときの解析結果を図5、6に示す。図中の τ_{sa} 、 τ_{sc} などは、ストラット機構A、Cなどによるせん断強度の負担分を表わす。図5で τ_{sc} が大きく、図6で τ_{sd} が大きいのは、4-2、4-3で述べるように、柱と梁の主筋量が図6の方が大きいのである。図5、6とも、 p_h が増加してもせん断強度はあまり増加せず、実験値（図中の黒丸）と同様の傾向であった。しかし、負担分は大きく変化した。特に、 p_h の増加につれて τ_{qa} （準ストラット機構A）が増大する。つまり、ストラットの外での梁主筋の付着力が増大する。その結果、紙面の都合で図は省略するが、梁主筋の圧縮力 C_b が増加し、コンクリート圧縮力 P_b は減少する。なお、 τ_{sa} 、 τ_{sc} などの負担分が p_h の増加につれて必ずしもなめらかに変化しないのは数値誤差であるが、接合部せん断強度が負担割合の変化に鈍感であることが誤差に拍車をかけている。

4-2 柱主筋強度の影響

Meinheitら [6] は柱主筋の本数のみを変化させた実験を報告している。この試験体について、柱主筋の本数の代わりに柱主筋強度を変化させて解析を行った。この結果を図7に示す。 σ_{cy} が増加してもせん断強度はほとんど増加しない。これは、 τ_{sd} の値が増加しても、それにともない τ_{sa} の値が減少しているためである。またこれより、梁主筋付着力で負担していたせん断力を柱主筋

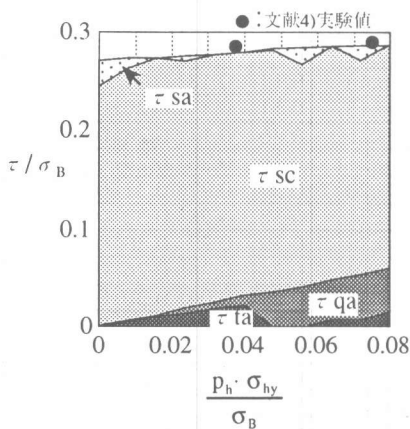


図5 補強筋量とせん断強度の関係
(山口ら [4], 柱・梁の主筋量小)

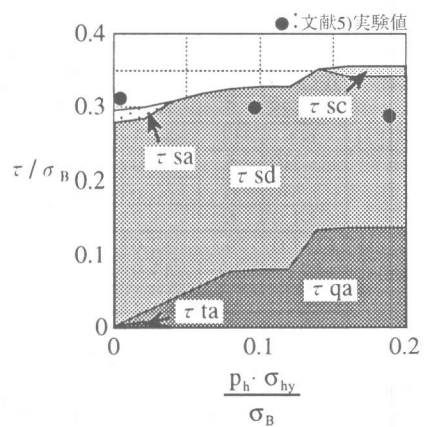


図6 補強筋量とせん断強度の関係
(柴田ら [5], 柱・梁の主筋量大)

付着力で負担するようになることがわかる。

4-3 梁主筋強度の影響

4-2で用いた試験体（Meinheitら [6]）について、梁主筋強度を変化させたときの結果を図8に示す。横軸上で0.12までの範囲では、せん断強度は直線的に増加する。これは、実際には接合部がせん断破壊したわけではなく、梁の曲げ強度で接合部のせん断入力が決定した範囲である。この範囲では、ストラットCが多く負担する。その後もせん断強度が緩やかに上昇するのは、梁の曲げ強度と接合部のせん断強度との間の相互作用を意味する。このとき、ストラットAからストラットDに負担が移るが、これは柱の主筋強度を増加させたときと同様である。

4-4 柱せい、梁せいがせん断力に与える影響

柴田ら [5] は柱せいが梁せいよりもずっと小さい場合の実験を行っている。この試験体について柱せいのみを変化させたときの結果を図9に示す。柱せいが増加するとき、せん断強度 τ は減少する。しかし、接合部の体積 V_p が増加するので、パネルモーメント M_p は増加する。つまり、架構としての強度は増加する。

4-5 軸力がせん断力に与える影響

Meinheitら [6] は軸力が大きい場合についての実験をおこなっている。この試験体について、

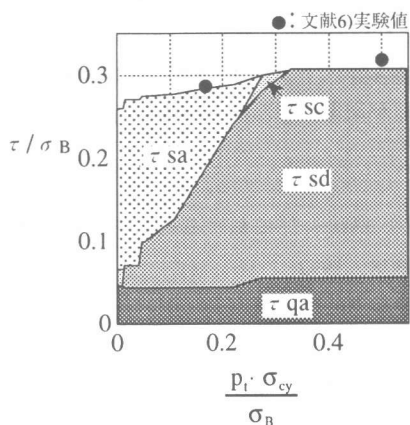


図7 柱主筋強度とせん断力の関係

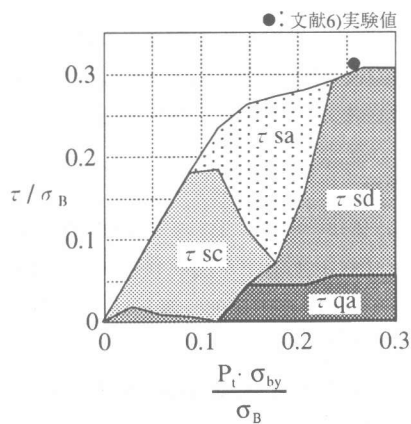


図8 梁主筋強度とせん断力の関係

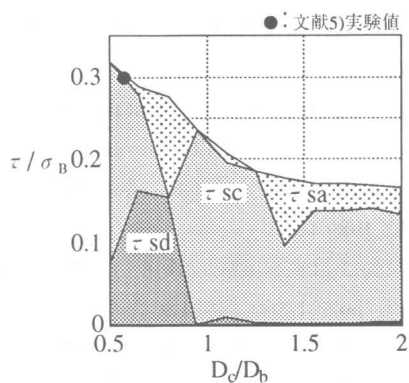


図9 柱せいとせん断強度の関係

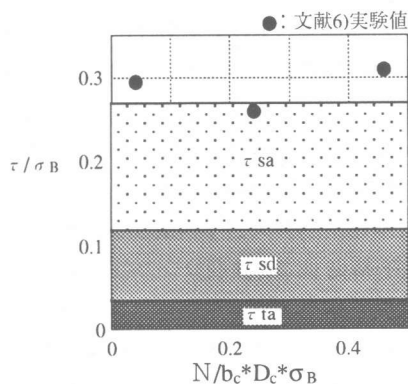


図10 軸力比とせん断強度の関係

軸力を変化させたときの解析結果を図10に示す。これよりせん断強度は軸力による影響をほとんど受けないことがわかる。これは、梶井ら [1] による解析結果とも一致する。

4-6 コンクリート強度の影響

塩原ら [7] により、高強度コンクリートで接合部破壊したという実験報告がなされている。この試験体についてコンクリート強度 σ_B のみを変化させたときの結果を図11に示す。 σ_B の増加にともなうせん断強度の増大は直線的ではない。

5. 結論

1. 補強筋量が増加しても、せん断強度はほとんど増加しないが、梁主筋の定着は良くなる。
2. コンクリート強度の増加にともなうせん断強度の増加は比例的ではない。
3. 軸力の変化はせん断強度に影響を与えない場合がある。
4. 柱主筋強度の増加にともなうせん断強度の増加はわずかである。強度が増加するにつれて、梁主筋付着力で負担していたせん断力を柱主筋付着力で負担するようになる。
5. 梁の曲げ強度で接合部のせん断入力力が決定される範囲では、ストラットCの負担が大きい。梁の曲げ強度がこれより増加すると、ストラットA、Dの負担が増え、せん断強度が少し上昇する。

参考文献

- [1] 梶井哲也、藤井 栄、森田司郎：鉄筋コンクリート内部柱・梁接合部におけるせん断抵抗機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.2, pp.373-378, 1992
- [2] 六車 豊、森田司郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究3、日本建築学会論文報告集、No.134, pp.1-10, 1967
- [3] 滝沢春男：Notes on Some Basic Problems in Inelastic Analysis of Planer R/C Structures (Part 1)、日本建築学会論文報告集、No. 240, 1976.2
- [4] 山口 輝明 他：プレキャストコンクリートの柱梁接合部の耐震性状に関する研究（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.833-837, 1992.8
- [5] 柴田 拓二 他：RC 十字形柱はり接合部のせん断抵抗性状に対するせん断補強筋の効果、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.443-446, 1989.10
- [6] D. F. Meinheit, J. O. Jirsa : Shear Strength of R/C Beam-Column Connections, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 107, No. ST11, November 1981.
- [7] 塩原 等 他：高強度鉄筋を主筋に用いた高強度鉄筋コンクリート造内柱はり接合部の耐震設計法、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.459-462, 1989.10
- [8] 神野 靖夫 他：高強度コンクリート内部柱・梁接合部の挙動に関する実験的研究（その1）実験の概要と結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp.591-560, 1991.9
- [9] 森本 仁 他：薄肉中空プレキャスト工法開発に関する実験的研究—U型・ロ型PCaを用いた接合部実験（その1）—、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.827-832, 1992.8

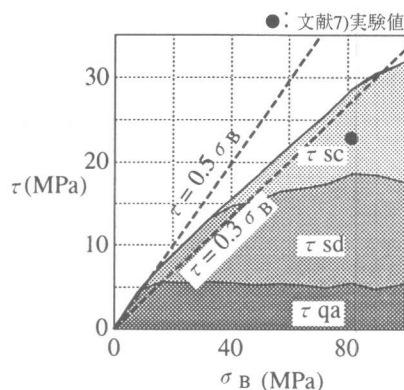


図11 コンクリート強度とせん断力の関係