

[81] RCラーメン柱部材におけるせん断補強方法に関する研究

正会員 船越 稔 (広島大学)  
正会員 岡本 享久 ( " )

1. 緒言

RC構造物の柱部材は一般に偏心軸圧縮力と同時にせん断力を受けているが、この場合のせん断力に対する合理的な設計方法は未だ十分確立されていない。帯鉄筋は軸方向鉄筋の座屈の防止と組立をも目的とした補助の鉄筋として取扱われているが、せん断補強筋としての機能を有することも知られている。従って十分な帯鉄筋が配置されていない柱部材に地震力などの水平力が作用する際には、せん断力の作用によって偏心軸圧縮力を受ける柱部材断面の耐力低下が起こる場合がある。よって補強材としての帯鉄筋の配置は梁における腹鉄筋のように合理的な設計計算にもとづいて決定することが望ましい。本研究はコンクリートの品質、柱部材の軸方向鉄筋比、帯鉄筋の配置および軸方向力とせん断力との比率を変えて鉄筋コンクリート箱形ラーメン供試体の破壊試験を行い、これらの諸要因が鉄筋コンクリート柱部材の耐力、変形および破壊性状に及ぼす影響、せん断補強材としての帯鉄筋の機能、箱形ラーメンとしての挙動などに検討を加え、RC柱部材の耐震設計上の一資料を得ることを目的としたものである。

2. 使用材料および試験の方法

(1). セメント、骨材および混和剤

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、比重は3.16であった。細骨材は太田川産(広島県)の川砂で、比重2.58、吸水率1.90%、粗粒率2.72%のものを用いた。粗骨材はJIS A 5005に合う砕石を使用し、比重2.70%であった。大部分の供試体には一般に減水剤(ポソリス No.5L)をセメント重量の0.25%用いた。

(2). 鋼材

箱形ラーメン供試体の柱部の鉄筋には鉄筋比を変える目的でD-13, D-16およびD-19(いずれもSD-30)の3種を正負対称に配置し、梁部の鉄筋にはSD-30, D-19を正負対称に配置し、さらに梁部の剛性をます目的で引張側にSD-30, D-16を2本追加配置した。柱部の帯鉄筋にはφ6およびφ9(SR-24)の普通丸鋼を用いた。使用した鉄筋の引張試験結果は表-(1)に示すとおりである。

(3). コンクリートの配合

コンクリートは試験時の目標圧縮強度を180 kg/cm<sup>2</sup>および300 kg/cm<sup>2</sup>の2種として配合を定め、試験体と各種強度用供試体とは全く同一の条件で製造し、養生したものである。表-(2)にコンクリートの配合、フレッシュコンクリートの品質試験結果を示した。

(4). 試験の方法

本実験に用いた試験体は図-(1)に示すような軸線長145cm×80cmの鉄筋コンクリート箱形ラーメンであり、試験体の断面は柱部で15cm×20cm、梁部で15cm×25cmである。柱部の鉄筋比は1.6%、2.6%および3.7%の3種に変化させ、柱部の帯鉄筋量は、梁の場合のせん断補強率( $Kr_{0sy}$ )で表示すると、0, 35, 60,

表-(1) 鉄筋の引張試験結果

	断面積 mm <sup>2</sup>	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 ×10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
SR-24, φ6	23.9	38.3	56.6	2.1
SR24, φ9	64.8	32.9	45.0	"
	65.8	28.5	36.9	"
SD30, D16	194.0	38.4	57.7	"
	190.1	39.6	61.1	"
SD30, D19	277.2	38.6	58.4	"

表-(2) コンクリート配合

供試体番号	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤	Slump (cm)
F-0-180-0	59	47	164	ポソリス	4.0
F-10-180-0	75	50	195	なし	5.3
F-20-180-0					
F-35-180-0	70	50	163	ポソリス	11.1
F-50-180-0					
F-35-180-30	65	47	160	"	11.1
F-35-180-60					
F-10-180-60	63	47	156	"	10.7
F-50-180-60					
E-10-180-0	60	47	159	"	8.3
E-35-180-0					
G-10-180-0	59	47	157	"	8.3
G-35-180-0					
F-0-300-0	45	47	175	なし	6.6
F-10-300-0	55	48	192	"	7.5
F-50-300-60					
F-20-300-0	60	48	175	ポソリス	9.6
F-50-300-0					
F-35-300-0	55	48	168	"	12.0
F-35-300-100					
F-60-300-0	53	48	175	"	8.6
F-70-300-60					
F-20-300-30	58	48	174	なし	5.9
F-50-300-60					
F-20-300-60	58	48	193	"	5.9
F-35-300-60					

100 kg/cm<sup>2</sup>の4種に変えた。なお梁部には補強のため10cm肉隔にφ9mmの閉合スタースラップを配置した。載荷は図(1)に示すようにジャッキ4台を使用し、まず100t用ジャッキ2台で、所定の軸力を与えた後、これを一定に保持し、次に50t用ジャッキ2台で、側方向から柱部中央に作動させ破壊に至るまで荷重を増加させた。なお軸力は0~70tの間で変化させた。

3. 試験の結果と考察

(1) RC柱部材における偏心軸圧縮力とせん断力との相互作用

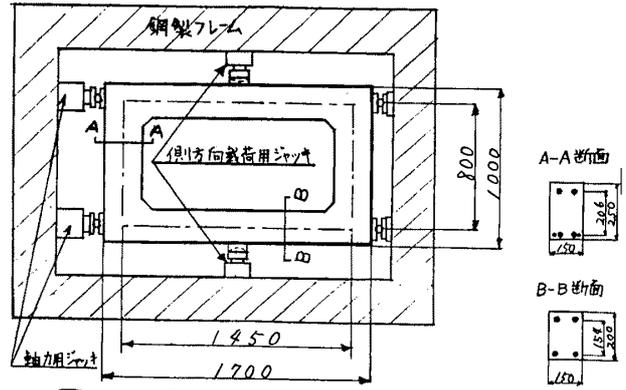
表(1)は試験結果の一覧である。

図(2)はせん断補強率( $Kr_{0sy}$ )が0%の試験体の破壊荷重( $R_u$ )と軸力( $N$ )との関係を示し、図中の実線は $N, \sigma_c$ および $Kr_{0sy}$ と $R_u$ との関係が最も合理的になるように求めた $R_u-N$ の曲線である。極限強度設計方法による柱部材中央断面の斜め破壊時の軸力( $N_b$ )は、 $\sigma_c=180$  kg/cm<sup>2</sup>で $N_b=21.5t$ ,  $\sigma_c=300$  kg/cm<sup>2</sup>で $N_b=36.5t$ である。破壊は $\sigma_c$ の大小に関係なく、 $N$ が0~10tでは梁のせん断引張破壊に類似し、 $N=20t$ 前後で梁の斜引張破壊に似た形式となり、 $N$ が35t以上になると柱部材の斜めびわけに陥って可憐な脆性的なものであった。

$R_u$ と $N$ との関係は偏心軸方向圧縮力のみを受ける柱部材の相互作用線と類似している。すなわち、 $N_b$ 以下の軸力では $N$ の増大とともに $R_u$ は増加するが、 $N_b$ 以上の $N$ に対して $R_u$ は減少する傾向を示した。無補強の柱の場合、斜めびわけ発生はほぼ同時に終局耐力に達しているため、この $R_u-N$ の関係は $R_u \leq 2bd$  ( $b$ :柱部材の幅、 $d$ :有効高さ)で除せばコンクリートの受けもつせん断応力( $\tau_c$ )と $N$ の関係となる。ACI 318-77は偏心軸圧縮力とせん断力とを受ける部材のコンクリートが分担するせん断応力( $\tau_c$ )を  $\tau_c = 0.50\sqrt{f_c} + 176\rho_w \frac{V_u d}{M_u}$ ,  $M_u = M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8}$ , (kg/cm<sup>2</sup>) で表わし、 $\tau_c$ の上限値を  $0.93\sqrt{f_c} \sqrt{1 + \frac{N_u}{35A_g}}$  としている。この規定によると $\tau_c$ の上限値は軸力の増加とともに下がる値となるが、本実験において、軸力が $N_b$ 以上になると $\tau_c$ が減少することが認められたので、せん断応力上限値の固定にあたっては、この点に十分な配慮が必要であると思われた。

(2) 偏心軸圧縮力とせん断力とを受けるRC柱部材における帯鉄筋の機能。

図(3)は $\sigma_c=180$  kg/cm<sup>2</sup>,  $300$  kg/cm<sup>2</sup>における破壊荷重( $R_u$ )とせん断補強率( $Kr_{0sy}$ )との関係を軸力( $N$ )をパラメータに示したものである。 $\sigma_c=180, 300$  kg/cm<sup>2</sup>の2種とも $Kr_{0sy}$ が0から35%の範囲で

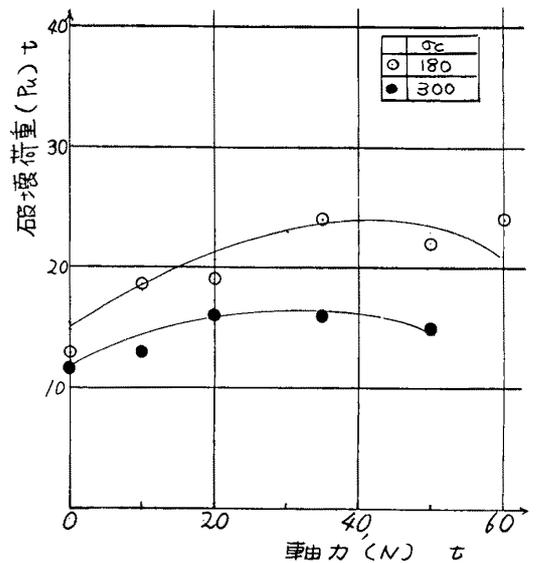


図(1) 試験体の寸法、載荷方法 (mm)

表(3) 試験結果

供試体番号	軸力(N) (t)	コンクリートの圧縮強度( $\sigma_c$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	せん断補強率( $Kr_{0sy}$ ) (%)	コンクリートの引張強度( $f_{ct}$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げひびく発生率( $\rho_w$ ) (%)	曲げせん断ひびく発生率( $\rho_{sl}$ ) (%)	ウェブせん断ひびく発生率( $\rho_{sw}$ ) (%)	破壊荷重( $R_u$ ) (t)
F-0-180-0	0	199	0	22	3	6	8	11.6
F-10-180-0	10	194	0	20	5	10	12	13.0
F-20-180-0	20	194	0	20	7	13	14	16.0
F-35-180-0	35	176	0	16	10	12	16	16.0
F-50-180-0	50	176	0	16	12	12	15	15.0
F-35-180-30	35	179	35	19	10	20	19	22.5
F-10-180-60	10	183	60	20	5	12	12	25.0
F-35-180-60	35	179	60	19	11	20	20	24.6
F-50-180-60	50	183	60	20	12	21	19	22.0
E-10-180-0	10	195	0	20	5	10	13	13.0
E-35-180-0	35	195	0	20	9	12	16	16.0
G-10-180-0	10	179	0	18	6	10	13	14.0
G-35-180-0	35	179	0	18	9	12	17	17.0
F-0-300-0	0	324	0	32	2	7	10	12.9
F-10-300-0	10	304	0	29	6	11	18	18.6
F-20-300-0	20	304	0	28	6	14	19	19.0
F-35-300-0	35	300	0	26	10	21	24	24.0
F-50-300-0	50	304	0	28	11	22	20	22.0
F-60-300-0	60	338	0	27	—	—	—	23.8
F-20-300-30	20	307	35	25	6	15	19	26.0
F-50-300-30	50	307	35	25	12	26	25	28.5
F-20-300-60	20	301	60	25	7	13	18	29.0
F-35-300-60	35	301	60	25	10	21	26	31.0
F-50-300-60	50	304	60	29	13	24	26	29.0
F-70-300-60	70	338	60	27	—	—	—	28.3
F-35-300-100	35	300	100	26	10	21	29	34.8

(注) 主鉄筋比( $\rho_w$ )は E9170で1.6%, F9170で2.6%  
G9170で3.7%



図(2)  $R_u$ と $N$ との関係 ( $Kr_{0sy}=0$ %)

$Kr\sigma_{sy}$ の増加に伴う  $P_u$  の増加割合は軸力の他の相違に因縁なくほぼ一定となるが、 $Kr\sigma_{sy}$  が35から60 $\%$ の範囲では  $N$  が大なる時ほど  $Kr\sigma_{sy}$  の増加に伴う  $P_u$  の増加割合は減少し、この傾向はコンクリート強度が高い場合、顕著であることが認められた。柱部材の荷重とたわみの関係より、同一荷重におけるたわみは、 $N_b$  以下の軸力で、 $Kr\sigma_{sy}$  の増加につれ 10~20% ほど小さくなるが、 $N_b$  以上の軸力では  $Kr\sigma_{sy}$  の増加とともに 5% ほど小さくなった。しかし、終局時のたわみは  $N$  の大小に因縁なく  $Kr\sigma_{sy}$  が大なるほど大きくなり破壊性状は延性的となった。

現在のところ帯鉄筋の配置方法に關する具体的な設計計算は見あたらぬが、軸力が  $N_b$  より小なるとき、帯鉄筋の受けもつせん断応力 ( $\tau_s$ ) が  $Kr\sigma_{sy}$  にほぼ比例し、しかも  $\sigma_c$  の影響を受けないことから、梁においてMörshが提案したトラス理論の考え方で  $\tau_s$  を数量的に表すことが可能と思われる。しかし、軸力が  $N_b$  以上になると、ある量以上の補強をしても  $\tau_s$  の増加割合が減少することがあり、軸力の影響も加味して考える必要があるように思われた。

(3). 偏心軸方向圧縮力とせん断力とを受けるRC柱部材の破壊耐力に及ぼす  $\sigma_c$  と鉄筋比 ( $\rho_w$ ) の影響。

図-4)は破壊荷重 ( $P_u$ ) と  $\sigma_c$  との関係、軸力 ( $N$ ) 及びせん断補強率 ( $Kr\sigma_{sy}$ ) をパラメータに示したものである。 $Kr\sigma_{sy}=0$   $\%$  の場合、 $\sigma_c$  の増大に伴う  $P_u$  の増加は  $N=0\sim35$  t の間で  $N$  の大きさに因縁なくほぼ一定となり、 $N$  が35 t を越えると  $N$  が大なる時ほど大なることが認められ、 $Kr\sigma_{sy}=10, 60$   $\%$  の場合も同様の関係があった。したがって、 $Kr\sigma_{sy}$  の大小に因縁なく、 $\sigma_c=180$   $\%$ 、300  $\%$  の範囲での  $P_u$  の増加割合は軸力が  $N_b$  以上とすると大なることがわかった。

図-5)は  $Kr\sigma_{sy}=0$   $\%$ 、 $\sigma_c=180$   $\%$  で  $N=10$  t および35 t の試験体の破壊荷重 ( $P_u$ ) と鉄筋比 ( $\rho_w$ ) の関係を示したものである。 $N=10, 35$  t とし、 $\rho_w=1.5\sim3.7$   $\%$  の範囲では、 $\rho_w$  の値が大きくなるほど  $P_u$  はほとんど増加せず、 $\rho_w$  の影響はわずかである。これは試験体が無補強であったためにせん断破壊をおこし、曲げ耐力を十分に發揮できなかったこと、本実験における  $\rho_w$  の値が相対的に大きいためと思われる。

4). RC箱形ラーメンとしての挙動

図-6)は  $N=35$  t、 $\sigma_c=180$   $\%$ 、 $Kr\sigma_{sy}=60$   $\%$  の試験体について柱部材の左縮縁及び引張縁に柱部材中央

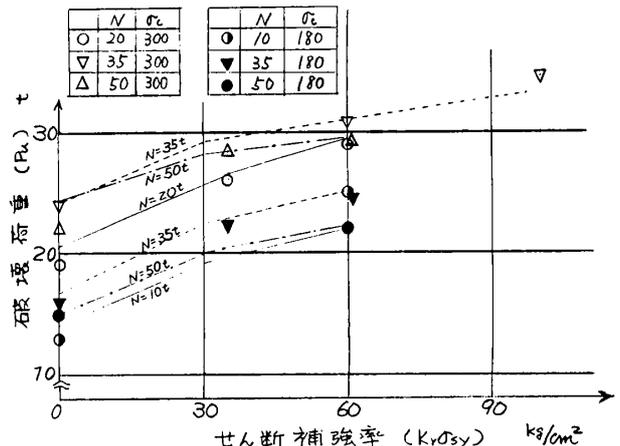


図-3)  $P_u$  と  $Kr\sigma_{sy}$  の関係

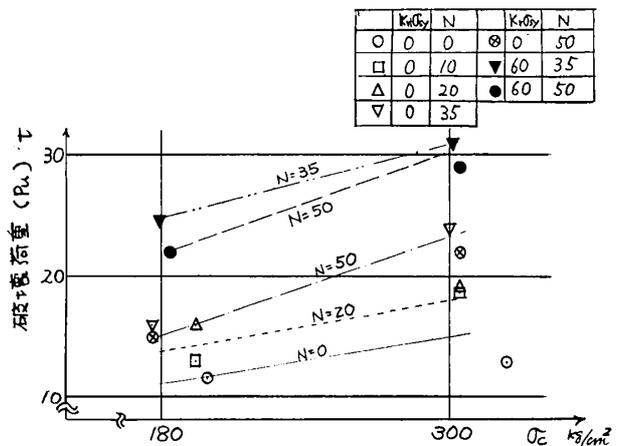


図-4)  $P_u$  と  $\sigma_c$  との関係

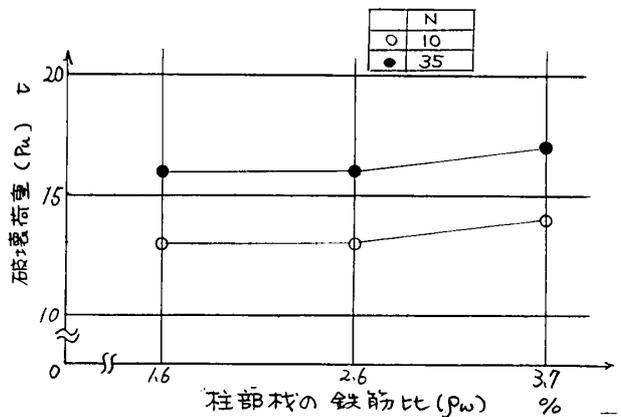


図-5)  $P_u$  と  $\rho_w$  の関係

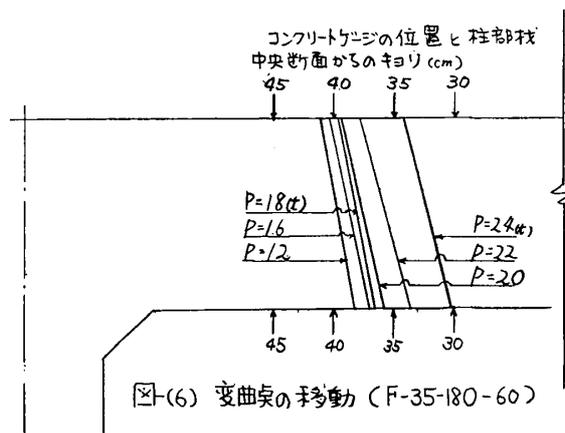


図-6) 変曲卓の移動 (F-35-180-60)

断面から 30, 35, 40, 45 cm に貼ったコンフリートゲージのひずみ分布よりひずみが 0 の位置を求め、各荷重段階別に示したものである。弾性理論より計算した変曲点は柱部材中央断面から 40 cm の位置にある。曲げひびわれ発生前ではひずみの測定結果から求めた変曲点はほぼ弾性理論の値と一致しているが、その後の荷重増加により変曲点は内側に移動し始め、斜めひびわれ発生以後 ( $P > 20t$ ) では大きく内側に移動していることが認められた。しかもこの変曲点は柱部材軸に対して傾斜しており、引張縁に近くなるほど柱部材中央に近づくことを示している。したがって塑性設計においてはこのような現象が起こり得ることとして配筋その他に留意する必要があると思われる。

図-(7)~(9)は、 $\sigma_c = 300 \text{ kg/cm}^2$  で  $N$  と  $Kr\sigma_{sy}$  が変化した 3 本の試験体のひびわれ状況を示す。  $Kr\sigma_{sy} = 0 \text{ kg/cm}^2$ 、 $N = 20t$  の場合、曲げひびわれが  $P = 7t$  で入り、 $P = 13t$  付近で曲げせん断ひびわれに進展するが、最終的にはウエブせん断ひびわれに似た斜めひびわれの発生と同時に破壊に陥り、行着ひびわれが発生した。  $Kr\sigma_{sy} = 0 \text{ kg/cm}^2$ 、 $N = 60t$  の場合は曲げひびわれ、曲げせん断ひびわれともに発生せず隅角部と載荷点を結ぶ線上で激しい破壊となった。  $Kr\sigma_{sy} = 100 \text{ kg/cm}^2$ 、 $N = 35t$  の場合は、まず曲げひびわれが柱部材中央断面引張縁に、次に梁部材引張縁に入り、曲げせん断ひびわれが発生し進展するとともに、柱部材隅角部付近の引張縁にも曲げひびわれが入り、 $P = 29t$  付近で発生したウエブせん断ひびわれによって破壊した。この破壊は非常に延性的な破壊で、ウエブせん断ひびわれの先端部コンクリートの圧壊によって終局耐力に達した。

#### 4. 結語

偏心軸圧縮力とせん断力とも受ける RC 箱形ラーメン柱部材の耐力、変形及び破壊性状、帯鉄筋の機能等を知る目的で実験を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1). 偏心軸圧縮力とせん断力とも受ける柱部材のコンクリートの受け持つせん断耐力 ( $T_c$ ) と軸力の関係は圧縮破壊域では減少し、せん断耐力の上限値の選定には十分な配慮を要する。
- (2). 帯鉄筋の配置方法は、引張破壊域ではトラス理論によって具体的な計算式による表示が可能と思われるが、圧縮破壊域では帯鉄筋を増しても帯鉄筋の受け持つせん断耐力が減少する場合があります。軸力の影響を考慮しにくいものがある。
- (3). コンクリートの圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) の増加に伴う破壊時のせん断耐力 ( $T_u$ ) の増加割合は引張破壊域ではほとんど一定であるが、圧縮破壊域では軸力が大きくなる場合著しいことが認められた。

本研究の実験の実施にあたり、大学院・池田司専任、学部4年田川和雄の両君より多大な援助を受けました。また本研究に対し昭和53年度科学研究費補助金が授けられたことと行記し可。

