

論文

[2091] 二方向水平加力を受ける腰壁・垂壁付 RC 柱の破壊性状について

正会員 ○城 攻 (北海道大学工学部)
 正会員 後藤 康明 (北海道大学工学部)
 正会員 柴田 拓二 (北海道大学工学部)

1. 序

一方向にのみ腰壁・垂壁を有する柱では、 μ 比が壁面内方向と直交方向で異なるために実際の地震動の入力のように任意方向の水平力を受けるときには両方向の破壊形式や靱性性能の相違ならびに両方向の曲げ降伏ヒンジ発生位置の分離の程度によって、それぞれ一方向の正負繰返水平力を受けた場合と異なる挙動を示す可能性がある。本研究はこのような柱が二方向曲げ剪断を受けて破壊に至るときの耐力と変形状を、壁高さや剪断補強筋比を変化させて実験的に検討したものである。

2. 実験概要

(1) 試験体 本実験に用いた試験体は内法高さ 140 cm、一辺30cmの正方形断面柱の上下に剛な梁(幅30cm、成35cm)を直交する二方向に設けた実大のほぼ 1/2程度
 の上下対称形立体 I 字型模型で、その一つの方向に左右同一高さで壁厚が柱幅の1/4(7.5cm)の腰壁・垂壁を有している(壁面内方向を X 方向、直交方向を Y 方向と呼ぶ)。配筋は柱主筋を12-D13($p_w=1.69\%$)とした他、梁筋と壁筋も図1に示すように全試験体で共通とした。壁高さや柱の剪断補強は試験体によって異なり、CW20とCW40 (Iシリーズ)は、壁高さは夫々20cmと40cmで剪断補強に普通強度鉄筋を用い $6\phi@50\text{mm}$ ($p_w=0.37\%$)とした。CW35 (IIシリーズ)は壁高さが35cmで、剪断補強には高強度鉄筋を用い $5\phi@50\text{mm}$ ($p_w=0.90\%$)とした。破壊形式は全試験体とも柱降伏型であるが、CW20とCW35は曲げ破壊型とし、CW40では終局曲げ耐力と終局剪断耐力がほぼ同程度である。これら3種の試験体を加力方法の違いにより夫々2体ずつ合計6体作成した。表1と表2にそれぞれコンクリートと鉄筋の力学的性状を示す。

(2) 加力方法 図2に加力装置概略を示す。軸圧は $N/bD=40\text{kg/cm}^2$ で一定とし、試験体上梁に取り付けられた2台のアクチュエーターによって水平変位を制御した。加力時の上梁の水平面外回転を拘束するために試験体の上下に取り付けた十字型鋼製梁端をつなぐ2台1組の自動平行維持ジャッキを2組取り付け、また、柱軸回りの回転を拘束するために鋼製水平ハシゲラフを取付けた。

載加履歴は柱断面の X、Y 両主軸方向に交互に加力する図3(1)の方法(以下主軸加力という)と、両主軸の降

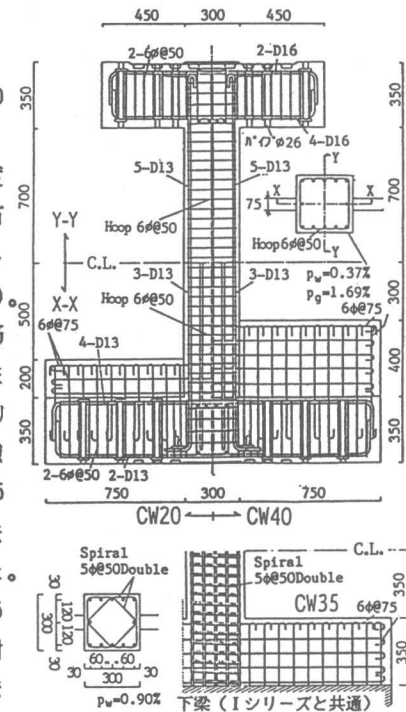


図1 試験体概要

表1 コンクリートの力学的性状

試験体	比重 g/cm ³	σ_{cb} kg/cm ²	σ_{tb} kg/cm ²	E1/3 10 ³ kg/cm ²
CW20-1	2.39	339	27.8	2.57
CW20-2	2.39	339	28.6	2.41
CW40-1	2.36	312	31.0	2.21
CW40-2	2.32	282	25.7	2.17
CW35-1	2.38	413	34.8	3.43
CW35-2	2.38	411	35.9	3.17

表2 鉄筋の力学的性状

種別	σ_y kg/cm ²	ϵ_y μ	のび %
D13 (I)	3880	2330	23.2
D13 (II)	3960	2560	22.1
6φ	3800	3870	23.0
5φ (外)	12920	8560	---
5φ (内)	12230	8190	---

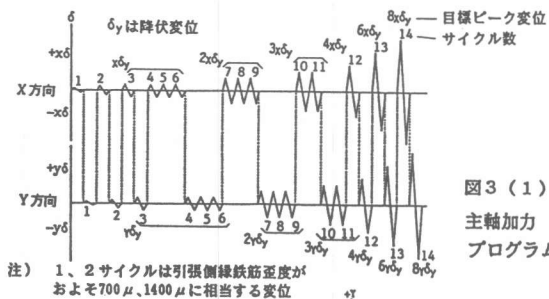
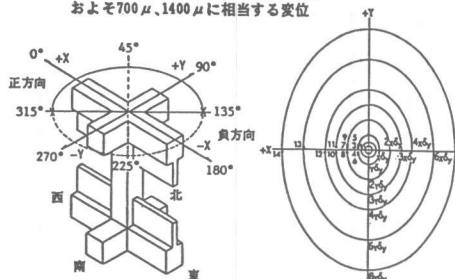


図3 (1)
主軸加力
プログラム



時計回りサイクル：
1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 13
反時計回りサイクル：
4, 6, 8, 10, 12, 14

図3 (2)
二軸加力
プログラム

伏変位を基準として楕円状経路の変位強制加力をした図3(2)の方法(以下二軸加力)の2種類を用いた。載荷履歴の相違を試験体名では夫々「1」、「2」として区別した。部材の降伏は、X方向加力では開口端部の、Y方向加力では柱頭柱脚部の引張側最外縁鉄筋のうち(X方向で6ヶ所、Y方向で10ヶ所が判定の対象)歪度がほぼ2200 μ を越えるものが半数以上となった時を実験時の便宜上の降伏と定義した。

(3) 計測項目 柱軸力、両方向の柱剪断力、柱各部水平変位と曲げ変形、上下梁間鉛直方向変位、壁と柱の間の相対変位、柱主筋・柱剪断補強筋・壁筋の歪度等を計測した。

3. 亀裂及び破壊性状

図4に2軸加力試験体の実験終了時破壊状況を示す。
■一軸加力ではX方向加力で開口(腰壁垂壁間を開口と称する)端近傍に生じ、Y方向加力では柱頭柱脚位置に生ずる。二軸加力試験では開口端近傍あるいは柱頭柱脚位置に亀裂が発生するときの荷重の方向が必ずしも主軸方向近くとは限らない。
■剪断初亀裂は加力方法の種別に関係なく南北面(図3参照)では主にX方向加力時に発生し、東西面では主にY方向加力時に発生して、隣接する2面を貫通するものはなかった。
■終局時の破壊性状は、全試験体とも鉄筋の降伏後に最大耐力に至るが、曲げ破壊を生じたCW20とCW35は壁や柱の圧潰や剥落によって徐々に耐力が低下した。

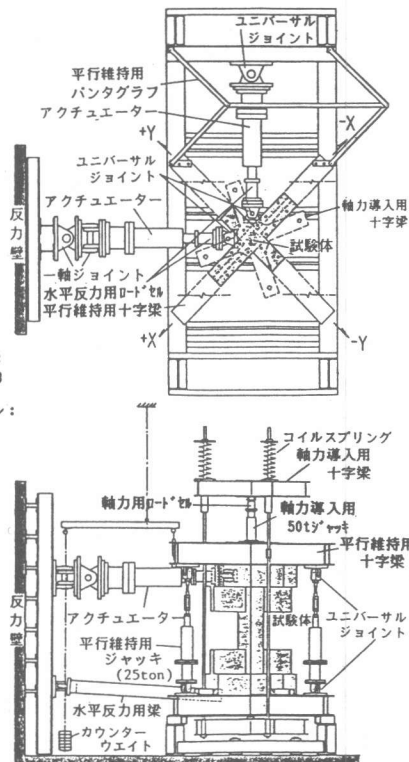


図2 加力装置

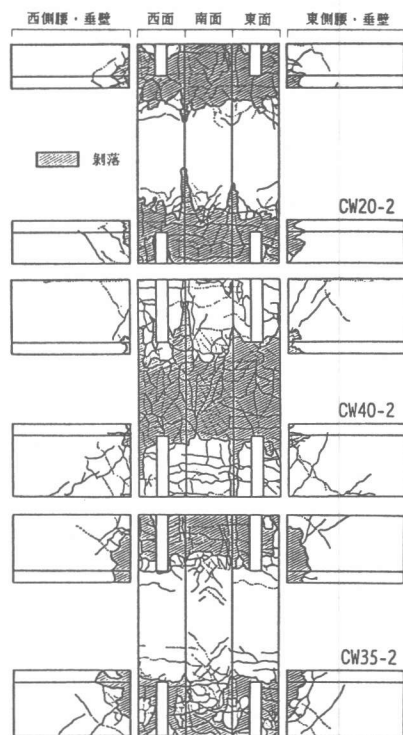


図4 実験終了時破壊状況 — 正方向(領域)加力時亀裂
--- 負方向(領域)加力時亀裂

柱に高剪断補強を行ったCW35では壁の破壊が顕著であった。CW40はシアースパン比の小さくなるX方向加力時に開口部の対角線上に剪断破壊を生じ、急激に耐力が低下した。■壁の亀裂は、低サイクル時には柱との付根沿いに多く発生し、変位量が大きくなると壁面に剪断亀裂を生じた。Y方向加力では梁との付根沿いに面外曲げによる亀裂を生じた。

4. 荷重変形関係

図5に柱剪断力-層間変形角(各主軸方向成分)を例示し、図6に全試験体のスケルトンカーブを示す。曲げ破壊を生じたCW20とCW35の4体は比較的紡錘形に近いループ形状を示した。このうち壁の破壊が顕著であったCW35では、X方向加力時の最大耐力後の剛性は緩やかではあるが大きく低下した。CW40の2体はX方向で剪断破壊を生じた直後、このX方向では一気に耐力が低下しループ形状も逆S字型となったのに対して、Y方向では耐力は低下したが、そのループ形状は紡錘形へと変化した。また、特にCW20とCW35のうち二軸加力を行った試験体では、ループ形状にピンチ効果が少なく、各サイクルの変位ピークと荷重ピークの発生時期にずれを生じた。スケルトンカーブ上の剛性低下は二軸加力を行った試験体の方が著しかった。

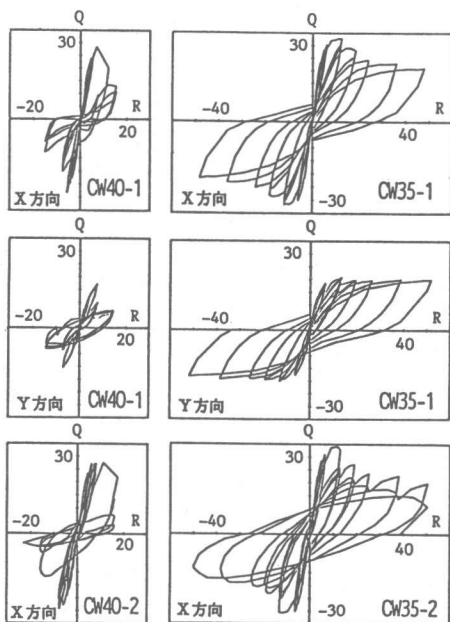


図5 柱剪断力-層間変形角

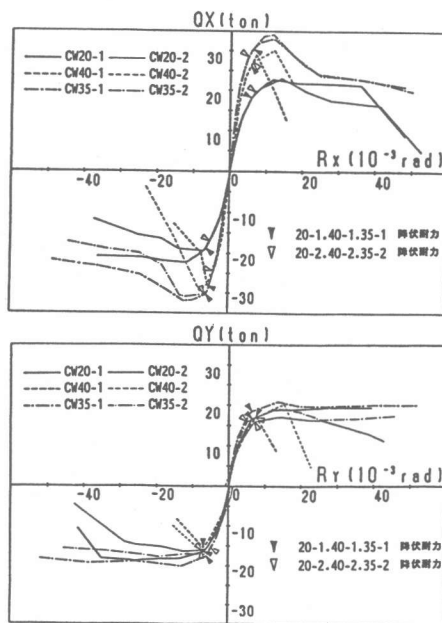


図6 スケルトンカーブ

5. 耐力

既往の計算式による諸耐力計算値と実験値のうちX、Y方向の正加力時のみを表3、4に示す。

(1) 曲げ初亀裂耐力 主軸加力では、X方向加力時には開口端付近に、Y方向加力時には柱頭・柱脚付近に曲げ初亀裂が発生しているため、曲げ初亀裂時柱せん断力の算出にはそれぞれ開口高さと同全長を用いた。実験値の計算値に対する比はCW35-1で大きな値を示すものがあるが、表には掲げていない負加力時を含めて 0.66~1.81 (平均1.10) となり概ね良い対応を示している。

図7に二軸加力試験体の1サイクル目の曲げ亀裂発生耐力二軸相関図を示すが、QX、QYは夫々剪断力のX、Y方向成分であり、太実線は加力履歴を表している。このうちX方向に対応する曲げ初亀裂は開口端付近に発生した亀裂を、Y方向に対応する曲げ初亀裂は柱頭・柱脚付近に発生した亀裂を解析の対象として、これらの亀裂発生時耐力を一軸式及び二軸式による計算値と

比較する。二軸式中の剪断力Qは両主軸成分の合力である。結果としては、開口端付近（X方向に対応）の亀裂は二方向の変形成分が生ずるため亀裂時加力方向θを考慮した二軸式計算値に良く対応し（0.83~1.80、平均1.17）、柱頭・柱脚付近（Y方向に対応）の亀裂は壁による拘束のためX方向応力成分を無視したY方向一軸式計算値とよく対応している（1.17~1.66、平均1.42）。

（2）剪断初亀裂耐力 主軸方向加力成分で表される実験値の計算値に対する比は、CW40-2の+Y方向で1.56となるがこれは剪断力の方向が170°の時に発生したもので、亀裂の傾斜角も15°と小さいため、明瞭な剪断亀裂とは言いがたい。これを除くと、負加力時も含めて 0.80~1.19（平均1.02）となり、ばらつきが小さく良い対応を示していると言える。

（3）降伏耐力 実験時に部材の降伏として定義した危険断面引張縁鉄筋の半数降伏時には、全試験体の実験値の計算値に対する比は0.81~1.20（平均1.04）となり概ね良い対応を示した。剪断破壊を生じたCW40の一部には、実験終了時まで降伏しない鉄筋があったが、この他は2倍の降伏変位での繰返しサイクル終了までに引張縁の全鉄筋が降伏している。この時の実験値の計算値に対する比は0.91~1.30（平均1.11）である。全鉄筋降伏時耐力は半数降伏時耐力を概ね上回っているが、二軸加力を行った試験体では下回るものがみられた。

（4）最大耐力 曲げ破壊したCW20とCW35の最大耐力実験値の終局曲げ耐力計算値に対する

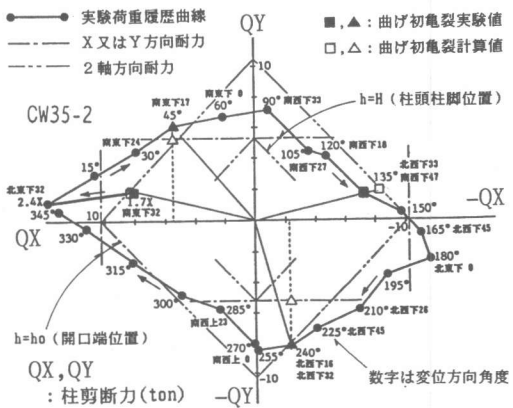


図7 二軸加力試験体曲げ亀裂発生耐力二軸相関図

表-3 主軸正加力方向耐力時柱剪断力実験値及び計算値一覧（2軸加力試験体では主軸方向耐力成分を示す）[単位: ton]

試験体	耐力(t)	曲げ初亀裂耐力			剪断初亀裂耐力			降伏耐力			最大耐力			破壊		
		exp	cal	e/c	exp	cal	e/c	exp	cal	e/c	実験	終局曲耐力	終局剪断耐			
CW20-1	X	7.9	6.9	1.15	15.1	17.9	0.84	18.3	17.7	1.03	22.9	18.9	1.22	22.9	1.00	B
	Y	6.0	5.0	1.20	16.7	14.8	1.13	16.7	15.3	1.09	20.2	15.1	1.33	20.0	1.00	B
CW20-2	X	10.7	6.9	1.54	14.4	17.9	0.80	19.5	17.7	1.10	23.1	18.9	1.23	22.9	1.01	B
	Y	8.1	5.0	1.62	17.3	14.8	1.17	13.6	15.3	0.89	17.1	15.1	1.13	20.2	0.84	B
CW40-1	X	8.4	11.4	0.74	24.0	21.9	1.09	25.9	29.3	0.88	29.0	25.0	1.16	30.7	0.94	S
	Y	4.3	5.0	0.87	-	14.4	-	17.3	15.2	1.14	17.3	15.1	1.15	19.6	0.88	-
CW40-2	X	7.6	11.1	0.68	17.4	21.1	0.82	23.6	25.1	0.81	30.0	24.8	1.21	29.3	1.02	S
	Y	6.1	4.9	1.24	21.6	13.8	1.56	16.8	15.1	1.11	20.1	15.0	1.34	18.8	1.07	(B)
CW35-1	X	15.0	10.2	1.47	23.5	23.1	1.02	30.5	25.9	1.18	32.9	27.8	1.18	39.2	0.84	B
	Y	9.4	5.2	1.81	18.3	16.1	1.14	18.7	15.6	1.20	21.0	15.7	1.34	29.4	0.71	B
CW35-2	X	8.0	10.2	0.78	22.8	23.1	0.99	28.7	25.8	1.11	34.1	27.8	1.23	39.1	0.87	B
	Y	6.1	5.2	1.17	14.6	16.1	0.91	16.8	15.6	1.08	19.3	15.7	1.23	29.4	0.66	B

exp: 実験値 cal: 計算値
 - : 亀裂発生時不明瞭
 * : 降伏時と同時発生
 「B」は曲げ破壊、
 「S」は剪断破壊、
 「-」は+X方向で剪断破壊したために最大耐力を発揮できなかったもの

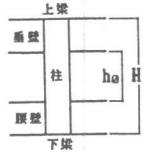


表-4 2軸θ方向曲げ初亀裂耐力

試験体	方向	exp	θ°	cal	e/c	
CW20-2	X	+	10.7	6	1.70	
		-	10.5	193	5.9	1.80
	Y	+	8.1	89	5.1	1.59
		-	9.0	248	4.0	2.28
CW40-2	X	+	7.8	13	9.5	0.83
		-	7.2	123	8.3	0.87
	Y	+	10.0	38	3.5	2.86
		-	9.6	219	3.5	2.76
CW35-2	X	+	8.2	13	8.5	0.96
		-	7.3	167	8.6	0.85
	Y	+	8.1	48	3.7	2.19
		-	8.6	254	4.2	2.05

柱の各面での曲げ初亀裂時加力方向実験値θと亀裂発生高さを用いて計算耐力を求めた。

■ 曲げ初亀裂耐力計算式 $Q_{b0} = 2Mc/h$
 【主軸方向：一軸式】
 $Mc = 1.8/\sigma_{cb} \cdot Z_e \cdot M_D/6$
 Z_e : 鉄筋を考慮した等価断面係数
 A_e : 鉄筋を考慮した等価断面積
 σ_{cb} : コンクリート強度
 【2軸θ方向：二軸式】
 $Mc = 1.8/\sigma_{cb} \cdot Z_{exy} \cdot M \cdot Z_{exy}/A_e$
 $Z_{exy} = \frac{1}{\cos\theta/Z_{ex} + \sin\theta/Z_{ey}}$
 Z_{ex}, Z_{ey} : それぞれ主軸方向の鉄筋を考慮した断面係数

■ 剪断初亀裂耐力計算式 $kc = 1.0$
 $Q_{c0} = (1 + \frac{\sigma_o}{150}) \{ \frac{0.074kc(500 + \sigma_{cb})}{H/Qd + 1.7} \} bd$

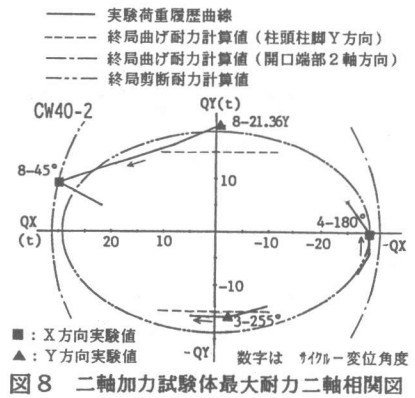
■ 降伏耐力計算式 $Q_y = 2My/h$
 $My = My_o + My_1$
 $My_o = g_1 \cdot a \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5ND(1-N/bD\sigma_{cb})$
 : 最外縁鉄筋によるモーメント
 $My_1 = \sum a_i e_i (\sigma_t \cdot e_i / e_o)$
 : 中立軸より引張側にある中間筋の付加モーメント

■ 終局曲げ耐力計算式 $Q_{ou} = 2Nu/h$
 $Nu = 0.5a_o \sigma_u g_1 D + 0.5ND(1-N/bD\sigma_{cb})$

■ 終局剪断耐力計算式
 $Q_{su} = (0.9 + \frac{\sigma_o}{250}) \{ \frac{0.1k_u k_a (\sigma_{cb} + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.4\sqrt{p_u \cdot \sigma_y} \} bd$
 ここに $k_u = 1.0$

(各計算式で柱剪断力を求める際の柱有効高さは、2軸θ方向曲げ初亀裂時以外は) 図の記号を用いて X方向: $h = h_o$, Y方向: $h = H$ とした。

比は1.02~1.35 (平均1.19) となり、実験値が計算値を上回った。壁を有するX方向について、ここでは柱の有効高さとして開口内法高さ h_0 を用いて計算しているが、RC規準で提案されている剛域を考慮し、有効高さを $h_0 + D/2$ (D は柱径)とした場合、計算値はさらに小さく見積られ相対的に実験値が大きくなる。一方、剪断破壊を生じたCW40-1,2の+X方向では最大耐力実験値の終局耐力実験値に対する比は夫々0.94、1.02となり、概ね良く対応している。著者らは既に実験により柱の二方向加力時の剪断耐力は両軸方向剪断耐力の楕円補間で求まることを明らかにしているが[1]、CW40-2は二軸加力中 $\theta = 17^\circ$ 方向で剪断破壊を生じたもので(図8中 8-45°、■印の所で剪断破壊)、実験値の二軸計算値に対する比は $31.4(t)/27.7(t) = 1.13$ となり、加力履歴の過程で二方向剪断耐力を超過したとも考えられるが、破壊の方向は明らかにX方向であった。以上より腰壁・垂壁によって特に壁面内曲げ耐力が増大しやすく剪断耐力には影響しないことが判り、曲げ破壊型に設計した部材でも剪断破壊を生ずる可能性示された。



6. 鉄筋歪度

(1) 主筋歪度分布 図9にコナ筋歪度分布を例示する。CW40は柱高中央部で剪断破壊を生じたため、剪断亀裂が到達したと思われる部分での歪度が急増しているが、柱頭・柱脚部及び開口端部の主筋歪度は降伏に至らないものも多い。弾性範囲では引張側・圧縮側共にX方向加力時で開口端から10cm柱頭よりに $\epsilon > 10^{-3}$ を生じるものが多く、Y方向加力時では柱頭・柱脚位置に生じた。CW20では柱頭・柱脚部分と開口端部で最も早く降伏し、その後の繰返し加力により歪度が著しく増大し $\epsilon > 10^{-2}$ となっている。CW35では開口端位置より概ね10~15cm付近と柱頭・柱脚部の歪度の増大が著しかった。また、二軸加力を行った場合に圧縮降伏しやすく、CW35-2では柱頭から10cmの位置で圧縮降伏するものが多い。CW20とCW35では実験終了時まで歪硬化域 ($\epsilon > 20000 \mu$) に至るものが多かった。

X軸に直交する柱東西面の中段筋の歪度分布は、X方向加力の低サイクル時においてCW20では引張側、圧縮側とも開口端位置に $\epsilon > 10^{-3}$ が生じている。しかし、CW40とCW35では、引張側の $\epsilon > 10^{-3}$ 位置が開口端位置から10cm柱頭よりに生じているのに対し、圧縮側では開口端位置に生じている。これは壁の柱内の応力分布に与える影響が引張側と圧縮側で異なることを示すもので圧縮側では壁からの圧縮反力が最大となる位置に柱筋の最大圧縮歪を生ずるものと考えられる。

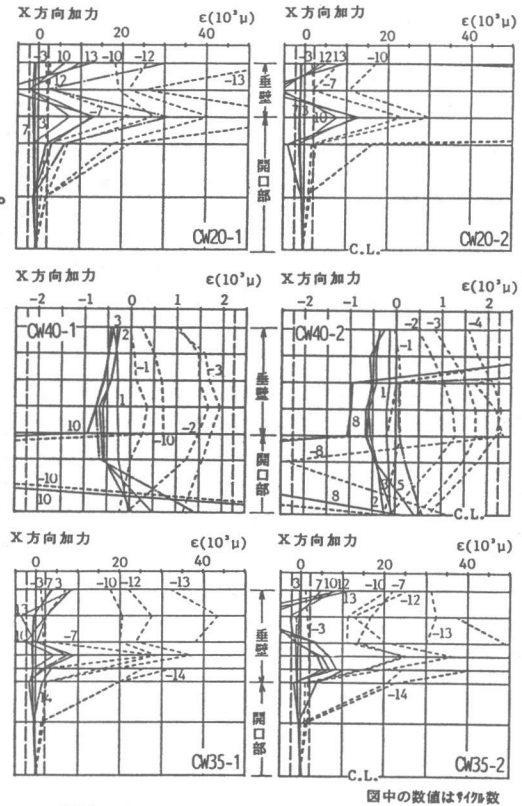


図9 柱コーナー筋歪度分布

(2) 剪断補強筋歪度分布 図10に剪断補強筋歪度分布を例示する。剪断力が働く方向に加力される時は全試験体ともほぼ開口端近傍にひびくを生じる。ひびく位置の鉄筋はCW20、CW40では降伏歪 $\epsilon_y=3800\mu$ に達したが、CW35では 2000μ 未満であった。二軸加力試験体では剪断抵抗効果と拘束効果が混在し、その分布形状は主軸加力試験体と比較すると複雑になる傾向があった。

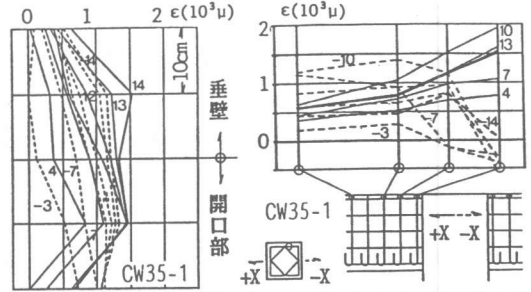


図10 剪断補強筋歪度分布

図11 垂壁鉛直筋歪度分布

(3) 壁筋歪度分布 水平筋の柱沿いの歪度分布は柱主筋の分布に対応し、最大歪発生位置が柱主筋のひびく位置と一致している。図11に壁鉛直筋の梁沿いの歪度分布を例示するが、X方向加力で圧縮側となる壁の柱に最も近い壁筋のみが圧縮歪を生じ他は引張歪を生じた。即ち、柱近傍の壁筋は柱と同様の挙動を示すが、遠い部分では剪断抵抗が働いていると考えられる。

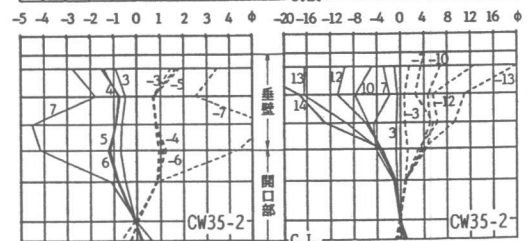
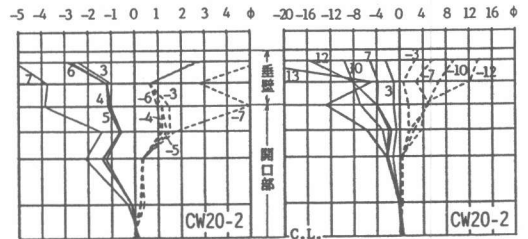


図12 X方向曲率分布

7. 部材変形

図12に柱の曲率分布を例示する。Y方向加力では低サイクル時から柱頭・柱脚部が最大であったが、X方向加力では降伏時には柱頭・柱脚部と開口端付近にひびくが現れ、その中間の壁が接続する区間での曲率は小さかった。これはX方向加力時において開口端部と柱頭・柱脚部と開口端部の2ヶ所に比較的大きな回転が強制され、その中間部は壁による変形拘束が生じていたと見ることができる。CW35は $2\delta y$ の7サイクルで開口端部のひびくが柱頭部へ移動した。CW40では剪断破壊を生じたため破壊後は曲率の増加はみられなかった。CW40を除く全試験体とも最終的には加力方向にかかわらず柱高さ中央付近から遠ざかるにつれて曲率は大きくなり、柱頭・柱脚部で最大となった。

8. 結語

二方向加力を受ける腰壁・垂壁付RC柱の破壊性状を把握するために壁高さ、柱剪断補強、加力方法の異なる6体について実験的に検討を行ったが、結果を以下のように要約できる。

- 破壊状況：初亀裂発生時期は加力方法による差異は見られなかったが、剥落圧潰の発生時期は二軸加力を行ったものの方が早かった。しかし、最終的な破壊状況に大きな違いはなかった。
- 荷重変形関係：二軸加力を行った試験体の方が、耐力あるいは変形能力で劣る傾向がみられた。
- 各部変形：柱主筋歪度は壁に接合する面の中段筋が圧縮側では開口端位置、引張側では柱頭よりの位置にひびくを生じた。曲率はX方向加力時においても終局時には柱頭柱脚部で増大した。
- 諸耐力：二軸加力時の曲げ初亀裂耐力は、開口端部と柱頭・柱脚部に発生する亀裂耐力計算値としてそれぞれ二軸式、一軸式が対応し、柱の部位によって変形に対する拘束条件の違いが明らかとなった。剪断初亀裂耐力、降伏耐力、終局剪断耐力については実験値主軸方向成分が各々の耐力計算値と良く対応した。（本研究は文部省科学研究補助金を受けて行われたものである）

[1] 揚場明他「二軸曲げ剪断をうけるRC長方形断面柱の破壊性状について」日本建築学会北海道支部研究報告集N054