

第2章 エネルギー吸収性状からみた破壊形式の定量的評価

2.1 はじめに

RC柱は、断面諸元や応力状態により破壊形式が異なる。主な破壊形式は「曲げ降伏による破壊」、「せん断降伏による破壊」、「付着劣化による破壊」等であり、実際のRC柱では、これらの破壊形式が複合して現われることが多い。

従来は、主として目視によって、経験的にRC柱の破壊形式を判定していた場合が多かった。明らかに破壊形式が判定できる場合には、そのような定性的な判定手法でもよいが、破壊形式が複合して現われる場合、例えば、載荷過程によって破壊形式が変化していく場合には、定量的な判定手法が必要となる。

一般に、破壊の程度が激しい部分では、塑性変形量が大きく、そのため、エネルギーを多く吸収する。

そこで、本章では、RC柱に生じる曲げ変形とせん断変形によって吸収されるエネルギー量の割合を用いて、破壊形式を定量的に示すことを試みた。さらに、曲げ変形とせん断変形によって吸収されるエネルギー量の材軸方向の分布を調べることにより、局部で生じた破壊状況を詳細に示した。

2.2 実験概要[2.1]

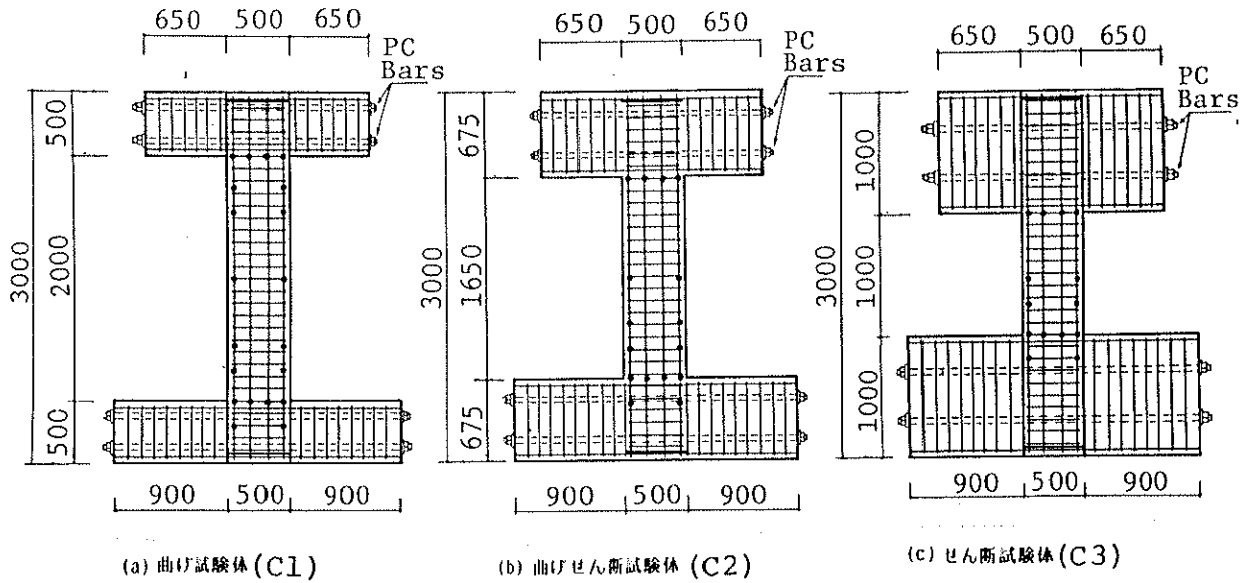
2.2.1 試験体

試験体は、図-2.1 と表-2.1 に示すように上下にはりがついた実大のRC柱であり、破壊形式の異なる3体（試験体名 C1, C2, C3）を製作した。本実験は、エポキシ樹脂による補修効果を確認する研究の一環として行われたものであるため、同一試験体を補修前後で2回実験しているため、補修前の試験体にはOを、補修後にはRをつけて両者を区別する（注2.1）。

なお、試験体の柱はり交差部分（以下、定着部分と呼ぶ）の挙動を実構造物に近づけるために、加力はりの幅を柱幅より狭くした（はり幅=40cm）。

試験体は、水平にして3体同時に実験室内で打設した。打設後1箇月程してから、補修後の実験が終了するまで、上下のはりにPC鋼棒によって軸力（ $\sigma_0 = 30 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ ）を与え、実験加力中にはりにひびわれが生じないようにした。

材料の試験結果を表-2.2 と表-2.3 に示す。



● denotes measuring points of steel strain. (Unit; mm)
Main bars were welded to anchor plates.

図-2.1 試験体の配筋図

表-2.1 試験体諸元

	曲げ試験体 <C1>	曲げせん断 試験体<C2>	せん断試験体 <C3>
b × D (cm)	50 × 50	40 × 50	50 × 50
内法長さ (cm)	200	165	100
柱主筋	12-D22	14-D22	12-D22
柱帯筋	9φ @100	9φ @100	9φ @100
柱断面 ← 加力方向 →			
	主筋の中心のかぶり厚さ50mm		
外形略図			
設計方針	せん断破壊する前に両端部の曲げ降伏が先行する。	曲げ降伏耐力とせん断耐力ほぼ等しい。	曲げ降伏する前にせん断破壊が先行する

表-2.2 鉄筋の材料試験結果

使用部位	径	降伏強度 Kg/cm ²	引張り 強度 Kg/cm ²	ヤング率 ton/cm ²	のび率 %
柱 帯筋	9φ	3430	4610	1780	31
はりあばら筋	D13	3660	5350	1640	26
柱はり主筋	D22	3240	4930	1900	22
はり 主筋	D25	3720	5680	1520	21

表-2.3 コンクリートの
材料試験結果

材令	割裂強度 Kg/cm ²	圧縮強度 Kg/cm ²	割線剛性 ton/cm ²
4週	24.7	276	248
14週	21.7	296	271

4週強度は補修前の実験開始の、また
14週強度は補修後の実験終了の時の
コンクリートの強度を示す。

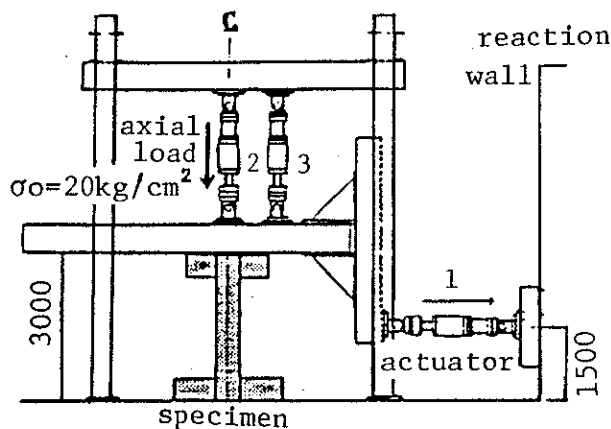


図-2.2 加力装置図

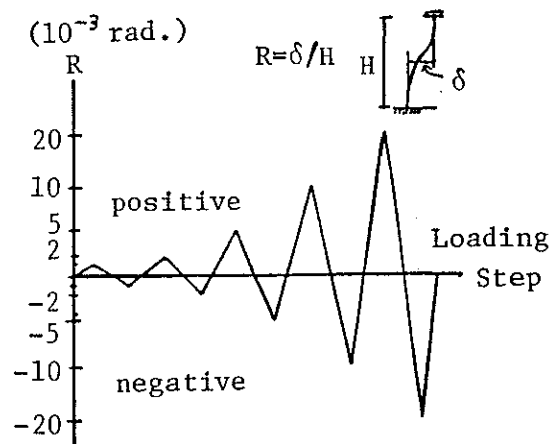


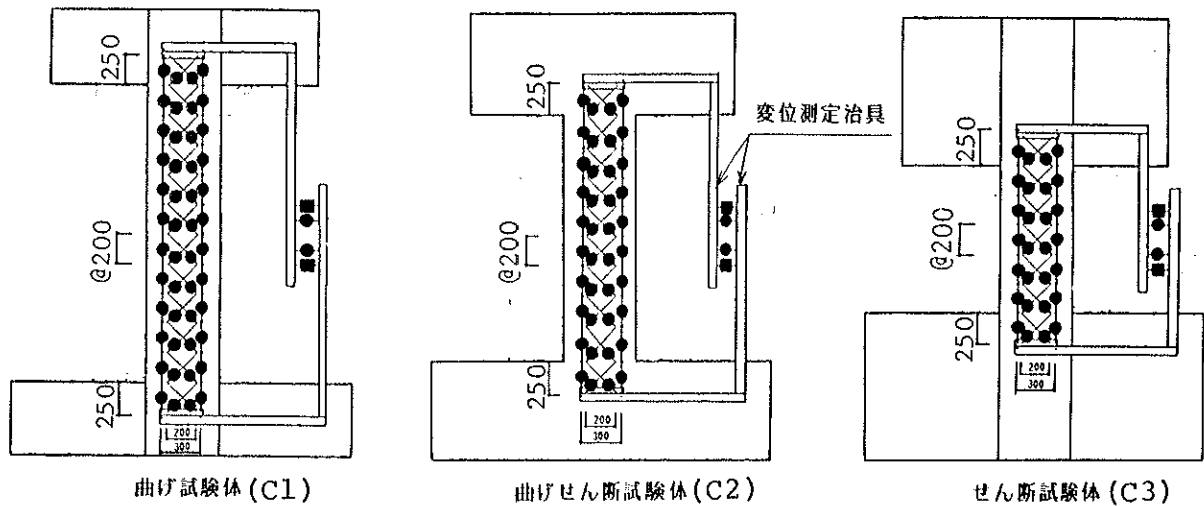
図-2.3 加力計画

2.2.2 実験方法

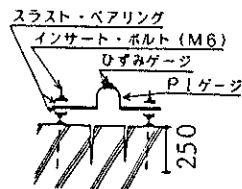
加力方法は図-2.2 に示すように一定の軸圧縮力 ($\sigma_0 = N/bD = 20\text{kg/cm}^2$) を与えた状態で、I型をした鉄骨製加力ばりを介してせん断力を試験体を与えるものであり(注2.2)、上下のはりの相対水平変位を図-2.3 に示すように制御する漸増正負交番水平加力である。

変形については、図-2.4(a)に示すように柱の可撓部分から上下のはりにそれぞれ25cm入り込んだ点での相対水平変位を、試験体の両面で測定した。柱の曲率とせん断ひずみの分布は、予め打設時に約25cm程埋め込まれたM6の長ボルトを起点として、図-2.4(b)に示すようにPIゲージを用いて測定した。なお、主筋のひずみは、図-2.1 に示す箇所で測定した。また、1つの測定断面につき表裏2箇所測定し、鉄筋の局部的な曲げによる影響が入らないように考慮した。

加力中の変形の制御には、変位測定治具より測定された試験体の可撓部分中央での相対水平変位を用いた。



(a) 変位測定点図



(b) PIゲージの取付け詳細図

● 1/1000 mm 精度
■ 1/100 mm 精度

単位: mm

図-2.4 変位の測定方法

2.2.3 実験経過

各サイクル終了時のひびわれ発生状況を図-2.5 に示す。

(a) 曲げ試験体 (C1)

C1O試験体では第1サイクルではりのつけ根に曲げひびわれが入った。第4サイクルで曲げせん断ひびわれが進行し、負加力の折返し近くで柱脚部の圧壊が始まり、第5サイクルの負加力で圧壊が激しくなりはじめた。

C1R試験体では、第3サイクルで補修箇所を避けて曲げせん断ひびわれが入った。第5サイクルで柱頭部のかぶりコンクリートが剥離し、第6サイクル正加力で柱頭部のコンクリートは圧壊し、せん断ひびわれが拡がり耐力が低下した。

(b) 曲げせん断試験体 (C2)

C2O試験体では第1サイクルで柱に小さな曲げひびわれが入った。第3, 4サイクルでせん断ひびわれが激しくなり、第5サイクルで柱主筋に沿った付着ひびわれが激しくなり、柱中央がふくらみ出し耐力が低下した。

C2R試験体では第1サイクルで柱とはりのつけ根に曲げひびわれが入った。第5サイクルでは柱脚部のひびわれ幅が大きく開き、負加力で耐力が低下した。第6サイクルの正加力では上部のせん断ひびわれ幅が大きく開き、せん断ずれが生じた。

(部材角)	1サイクル	2サイクル	3サイクル	4サイクル	5サイクル	6サイクル
	(1/1000) 終了後	(2/1000) 終了後	(5/1000) 終了後	(10/1000) 終了後	(20/1000) 終了後	(>20/1000) 終了後
C1O						
	18.6 -16.8	26.8 -25.3	40.5 -40.0	43.2 -43.3	49.5 -46.8	
			曲げ降伏開始			
C1R						
	15.6 -20.3	26.9 -26.1	40.9 -45.8	52.4 -48.3	57.8 -51.2	41.0
				曲げ降伏開始		激しいせん断破壊
C2O						
	21.8 -22.4	31.4 -31.1	46.4 -39.4	48.0 -41.8	40.2 -33.3	
				付着破壊開始	激しい付着破壊開始	
C2R						
	21.7 -19.1	35.4 -31.8	53.6 -47.9	61.3 -57.9	64.3 -52.3	62.1
				曲げ降伏開始		激しいせん断破壊開始
C3O						
	26.1 -26.6	37.4 -35.8	52.8 -48.1	45.2 -40.3	31.0 -27.3	
		対角方向せん断ひびわれ発生	激しいせん断破壊開始			
C3R						
	25.7 -26.2	46.1 -47.1	68.8 -67.9	79.8 -60.0	53.5 -53.9	36.8
				激しいせん断破壊開始		帯筋の破断

数字は、各サイクルの正負での最大荷重を示す。(単位: ton)

図-2.5 各試験体のひび割れ進行状況

(c) せん断試験体 (C3)

C3O試験体では第1サイクルで曲げひびわれが入った。第4サイクルではそれまでに入っていた対角方向のせん断ひびわれが大きく拡がり耐力が低下した。また軸方向の縮みも著しくなり、試験体は目視できる程面外にふくらみ、柱脚部のひびわれ幅も1cm以上となった。第5サイクルではせん断ひびわれが大きく拡がるとともに、新たなせん断ひびわれも入り、耐力も半分程に落ちた。

C3R試験体では第2サイクルで初めて曲げひびわれが入った。第4サイクルでは、対角方向のせん断ひびわれが入り大きく開いた。第5サイクルではそれまでに発生していたひびわれの幅が拡がり、試験体が面外にふくらみ耐力が低下した。第6サイクルにはせん断ひびわれが1.5 cm程と大きく拡がり帯筋が破断した。

2.2.4 相対水平変位の計算

各区間の曲率とせん断ひずみを、式(2.1)～式(2.2)によって材軸方向に積分することにより(注2.3)、それぞれ曲げ変形とせん断変形による水平変位が求まる。

$$\delta s = \sum \gamma_i \Delta h \quad (2.1)$$

$$\delta b = \sum \phi_i \Delta h (H/2 - h_i) \quad (2.2)$$

$$\delta t = \delta s + \delta b \quad (2.3)$$

ここで、 δs ; せん断変形による水平変位

δb ; 曲げ変形による試験体中央での水平変位

δt ; 試験体中央での水平変位

H ; 試験部分の長さ

h_i ; 試験体中央からi番目の測定区間の中央までの長さ

Δh ; 測定区間の長さ

γ_i ; i番目の測定区間の平均せん断ひずみ (注2.4)

ϕ_i ; i番目の測定区間の平均曲率

2.2.5 荷重-変形曲線(注2.5)

式(2.3)による水平変位 δt と水平せん断力 Qh の関係を図-2.6に示す。これらの図に基づいて、各試験体の破壊性状について述べる。なお、ここで用いた水平せん断力 Qh は、No.1～No.3のアクチュエーターに生じる水平分力の合力である。

C1OとC1Rの破壊形式は共に曲げ降伏型であった。変形性状には、ほとんど差が認められなかったが、C1Rの耐力が、C1Oと比べて全体的に2割上昇している。

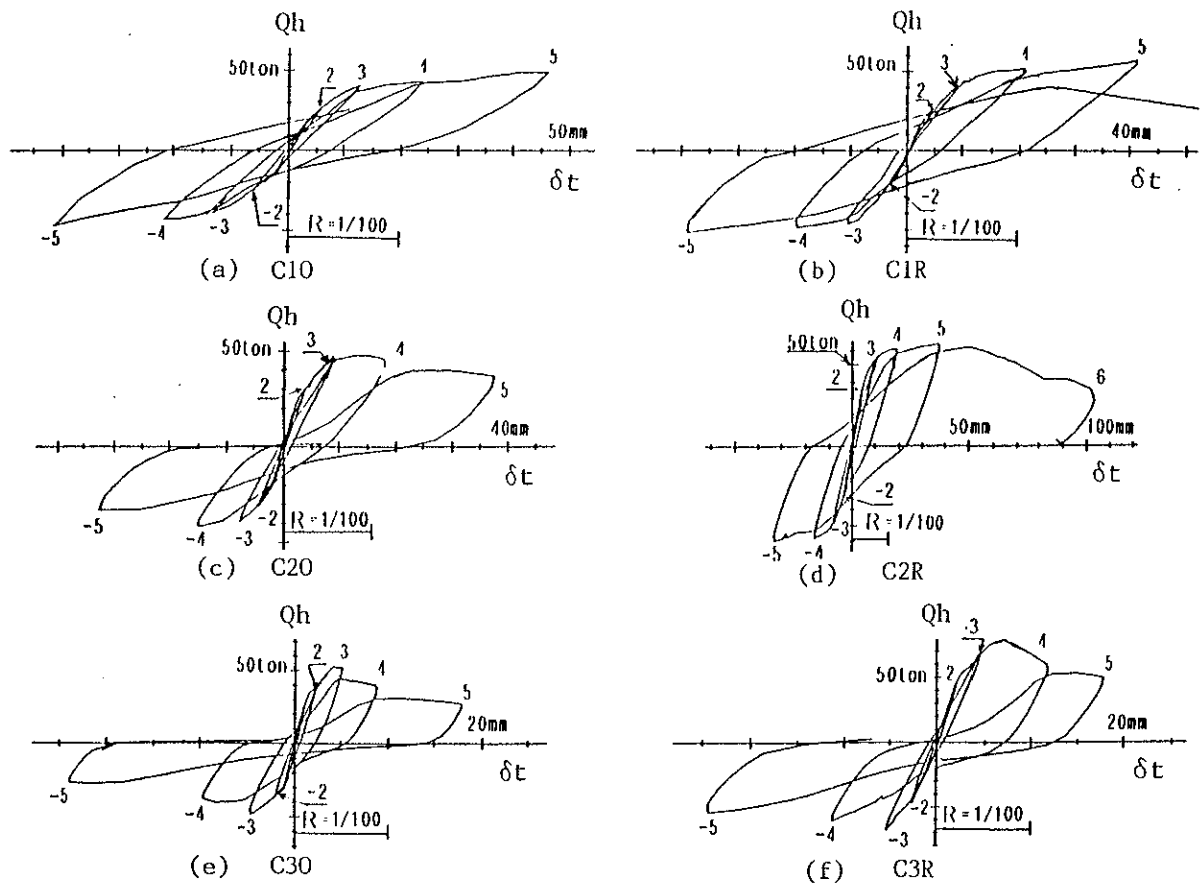
(b) 曲げせん断試験体 (C2)

C2Oはせん断破壊から、最終的に付着破壊したのに対し、C2Rでは定着部分で曲げ降伏したため、両試験体の変形履歴性状が異なり、補修により変形能力の向上が認められた。

(c) せん断試験体 (C3)

C3OとC3Rの破壊形式が共にせん断破壊型であったので、C3Rの耐力がC3Oに比べ全体に約1.5倍に上昇したことを除くと、両試験体の性状はほとんど同じであった。

最大耐力の実験値と実強度に基づいたファイバーモデル(注2.6)による曲げ降伏耐力と日本建築学会のRC規準のせん断降伏耐力算定式(注2.7)による値を表-2.4に示す。



図中の数字は、サイクル数を示す。

図-2.6 荷重-変形曲線

表-2.4 最大耐力

(単位-ton)

		曲げ試験体		曲げせん断試験体		せん断試験体		
		補修前	補修後	補修前	補修後	補修前	補修後	
実験値	最大耐力	正	49.5	57.8	48.0	64.3	52.8	79.8
		負	46.8	51.2	41.8	61.3	48.1	70.0
	破壊形式	曲げ	曲げ	せん断	曲げ	せん断	せん断	
理論値	曲げ降伏時せん断力	41.2		53.5		82.4		
	せん断降伏時せん断力	44.5		42.9		66.6		

2.3 破壊分布の定量化

大部分の変形がひびわれ幅の拡大により生じる鉄筋コンクリート部材の場合、各載荷段階におけるひびわれ状況（破壊程度）とエネルギー吸収分布の対応を調べることは、破壊分布を定量化する手段として有効であると思われる。

そこで、以下に示す方法を用いて、曲げ変形とせん断変形により各測定区間で吸収されるエネルギー量を算出した。

2.3.1 水平変形によるエネルギー吸収量の算定式の誘導

本節では、図-2.7 に示すように材端で曲げモーメント M_0 と水平力 Q_h 及び鉛直力 N_v を受ける RC 柱が、大変形時に吸収するエネルギー量を算定する方法について述べる。

大変形では、全体変形の大部分が、曲げ降伏ヒンジの回転によって生じており、

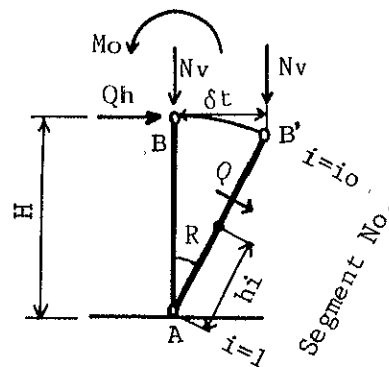


図-2.7 水平変形によるエネルギー吸収量の算定方法

A-B間で生じる弾性たわみと直線A-B間のずれによる影響は少ないと思われるので、計算を簡単にするために、大変形時の材軸は、柱脚Aと柱頭Bを結ぶ直線で表わした。

また、曲げ変形とせん断変形によって材の軸方向伸縮は生じないものとする。

荷重段階 n において、RC柱に作用するせん断力は、変形後の材軸A-B'に直交する力の合力 Q_n であり、式(2.4)のように表わされる。

$$Q_n = Q h_n \cdot \cos R_n + N_v \cdot \sin R_n \quad (2.4)$$

ここで、 $Q h_n$; 荷重段階 n での水平外力

N_v ; 鉛直力 (一定)

R_n ; 荷重段階 n での部材角

また荷重段階 n において、材軸上の区間 i に作用する曲げモーメント M は、式(2.5)で表わされる。

$$M_{in} = Q h_n \cdot (H - h_i) \cdot \cos R_n - M_{0n} + N_v \cdot (H - h_i) \cdot \sin R_n \quad (2.5)$$

ここで、 H ; A-B間の距離 (測定起点間の距離)

h_i ; A点から区間 i の中心までの距離

M_{0n} ; 荷重段階 n で、柱頭Bに作用する曲げモーメント (左回を正)

従って、荷重段階 n で曲げ変形とせん断変形によって吸収されるエネルギー量 $d E_{bn}$ と $d E_{sn}$ は、それぞれ式(2.6)と(2.7)で表わされる。

$$d E_{bn} = \sum_{i=1}^{k_n} M_{in} \cdot d \phi_{in} \cdot \Delta h \quad (2.6)$$

$$d E_{sn} = \sum_{i=1}^{k_n} Q_n \cdot d \gamma_{in} \cdot \Delta h \quad (2.7)$$

ここで、 $d \phi_{in}$; 荷重段階 n において区間 i で生じる平均曲率の増分

$d \gamma_{in}$; 荷重段階 n において区間 i で生じる平均せん断ひずみの増分

Δh ; 区間の長さ

一方、荷重段階 n で生じた増分材端回転角 $d \theta_n$, 増分曲げ変形量 $d \delta_{bn}$, 増分せん断変形量 $d \delta_{sn}$, 増分水平変形量 $d \delta_{tn}$ は、それぞれ式(2.8) ~ (2.11)で表わされる。

$$d \theta_n = \sum_{i=1}^{k_n} d \phi_{in} \cdot \Delta h \quad (2.8)$$

$$d \delta_{bn} = \sum_{i=1}^{k_n} (H - h_i) \cdot d \phi_{in} \cdot \Delta h \quad (2.9)$$

$$d \delta_{sn} = \sum_{i=1}^{k_n} d \gamma_{in} \cdot \Delta h \quad (2.10)$$

$$d \delta t_n = (d \delta b_n + d \delta s_n) / \cos R_n \quad (2.11)$$

そこで、式(2.6) に式(2.5), (2.8), (2.9) を代入し、 $\sin R_n \approx R_n$, $\cos R_n \approx 1$ と仮定すると式(2.12)が得られる。

$$d E b_n = Q h_n \cdot d \delta b_n - M o_n \cdot d \theta_n + N v \cdot R_n \cdot d \delta b_n \quad (2.12)$$

また、式(2.7) に式(2.4), (2.10)を代入し、 $\sin R_n \approx R_n$, $\cos R_n \approx 1$ と仮定すると式(2.13)が得られる。

$$d E s_n = Q h_n \cdot d \delta s_n + N v \cdot R_n \cdot d \delta s_n \quad (2.13)$$

載荷開始から載荷段階 n_0 までに曲げ変形とせん断変形によって吸収したエネルギー量 E_b と E_s は、それぞれ式(2.14)と式(2.15)で表わされる。

$$E_b = \sum_{n=1}^{n_0} d E b_n \\ = \sum_{n=1}^{n_0} Q h_n \cdot d \delta b_n - \sum_{n=1}^{n_0} M o_n \cdot d \theta_n + N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} R_n \cdot d \delta b_n \quad (2.14)$$

$$E_s = \sum_{n=1}^{n_0} d E s_n = \sum_{n=1}^{n_0} Q h_n \cdot d \delta s_n + N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} R_n \cdot d \delta s_n \quad (2.15)$$

従って、水平変形に伴ってRC柱が吸収するエネルギー量 E_h は、式(2.14)と式(2.15)から式(2.11)を考慮して式(2.16)で表わされる。

$$E_h = E_b + E_s \\ = \sum_{n=1}^{n_0} Q h_n \cdot d \delta t_n - \sum_{n=1}^{n_0} M o_n \cdot d \theta_n + N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} R_n \cdot d \delta t_n \quad (2.16)$$

一方、RC柱に軸方向伸縮が生じない場合、載荷段階 n_0 で水平力 Q_h と材端曲げモーメント M_o 及び鉛直力 N_v がなす仕事量 W_q , W_m 及び W_v は、式(2.17) ~ (2.19) で表わされる。

$$W_q = \sum_{n=1}^{n_0} d W_{q_n} = \sum_{n=1}^{n_0} Q h_n \cdot d \delta t_n \quad (2.17)$$

$$W_m = \sum_{n=1}^{n_0} d W_{m_n} = \sum_{n=1}^{n_0} (-M o_n \cdot d \theta_n) \quad (2.18)$$

$$W_v = \sum_{n=1}^{n_0} d W_{v_n} = N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} d \delta t_n \cdot \tan R_n \\ = N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} R_n \cdot d \delta t_n \quad (2.19)$$

ここで、 $d W_{q_n}$; 載荷段階 n で水平外力がなす仕事量の増分

$d W_{m_n}$; 載荷段階 n で材端モーメントがなす仕事量の増分

$d W_{v_n}$; 載荷段階 n で鉛直外力がなす仕事量の増分

従って、外力がなす全仕事量 W は、式(2.20)で表わされる。

$$W = W_q + W_m + W_v \\ = \sum_{n=1}^{n_0} Q h_n \cdot d \delta t_n - \sum_{n=1}^{n_0} M o_n \cdot d \theta_n + N v \cdot \sum_{n=1}^{n_0} R_n \cdot d \delta t_n \quad (2.20)$$

式(2.20)と式(2.16)は、一致しており、外力がなす仕事量とRC柱が吸収した

全エネルギー量は、等しいことが認められる。

実験では、RC柱は、逆対称な変形が生じていたので $d\theta_n = 0$ と仮定すると、外力がなす全仕事量 W は、式(2.21)で表わされる。

$$W = \sum_{n=1}^{n_0} (Q_h h_n + N_v \cdot R_n) \cdot d\delta t_n \quad (2.21)$$

C10試験体の部材角が $R = 20/1000$ の時の水平力 Q_h と鉛直軸力 N_v は、共に約50tonであったので、式(2.21)より軸力作用位置の水平移動に伴う偏心鉛直軸力による増分仕事量は、外力がなす全仕事量の増分の約2%であり、偏心軸力による影響は、無視できるものと考えられる。

そこで、次節以後では、載荷段階 n_0 までに外力がなす全仕事量 W を式(2.22)で算定し、その値 W_h を水平外力 Q_h による仕事量と呼ぶことにする。

$$W_h = \sum_{n=1}^{n_0} Q_h h_n \cdot d\delta t_n \quad (2.22)$$

また、次節以降では、区間 i が載荷段階 n_0 までに、曲げ変形とせん断変形によって吸収するエネルギー量 E_b と E_s は、それぞれ式(2.23)と式(2.24)を用いて算出した。

$$\begin{aligned} E_{b_i} &= \sum_{n=i}^{n_0} M_{in} \cdot d\phi_{in} \cdot \Delta h \\ &= \sum_{n=i}^{n_0} \{ Q_h h_n (H - h_i) - M_{0n} \} \cdot d\phi_{in} \cdot \Delta h \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$E_{s_i} = \sum_{n=i}^{n_0} Q_n \cdot d\gamma_{in} \cdot \Delta h \quad (2.24)$$

2.3.2 各測定区間の吸収エネルギー量の分布

(a) 測定方法

柱の内法部分の曲げ変形とせん断変形によるエネルギー吸収量を、それぞれ式(2.23)と式(2.24)を用いることによって算出した。定着部分では、作用している応力が実測できないので、エネルギー吸収量は直接算出できない。そのため、定着部分のエネルギー吸収量は、式(2.22)で得られた水平外力による仕事量と柱内法部分のエネルギー吸収量の差とした。したがって、この部分では曲げ変形とせん断変形によるエネルギー吸収量には分離できないが、柱内法部分の最外端部の性状から判断して、曲げ変形によるエネルギー吸収量が大半を占めるものと思われる。

(b) 結果と考察

図-2.8は、水平外力による仕事量に対する柱内法部分と定着部分のエネルギー吸収量の割合と部材角の関係を示したものである。柱内法部分については、曲げ変形とせん断変形によるエネルギー吸収量を区別して示してある。

図-2.9は、曲げ試験体の柱内法部分における曲げ変形によるエネルギー吸収量の割合と部材角の関係を示したものである。図-2.10は、柱内法部分におけるせん断変形によるエネルギー吸収量の割合と部材角の関係を示したものである。なお、図-2.8、2.9、及び2.10の横軸に用いられている部材角は、式(2.3)をもとに算出したものである。

これらの図をもとに各試験体の破壊性状とエネルギー吸収性状の関係について述べる。

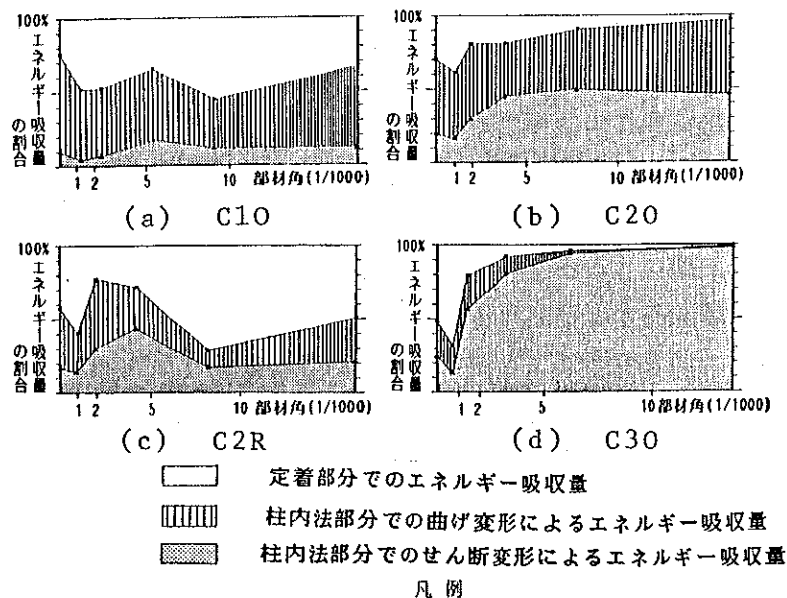


図-2.8 エネルギー吸収分布の推移

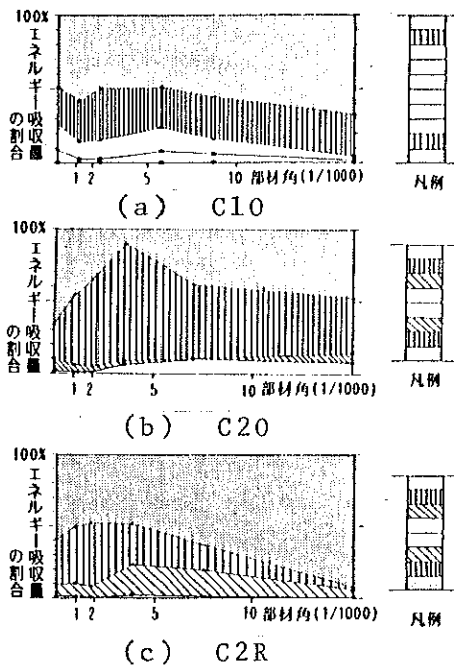


図-2.9 曲げ変形による
エネルギー吸収分布の推移

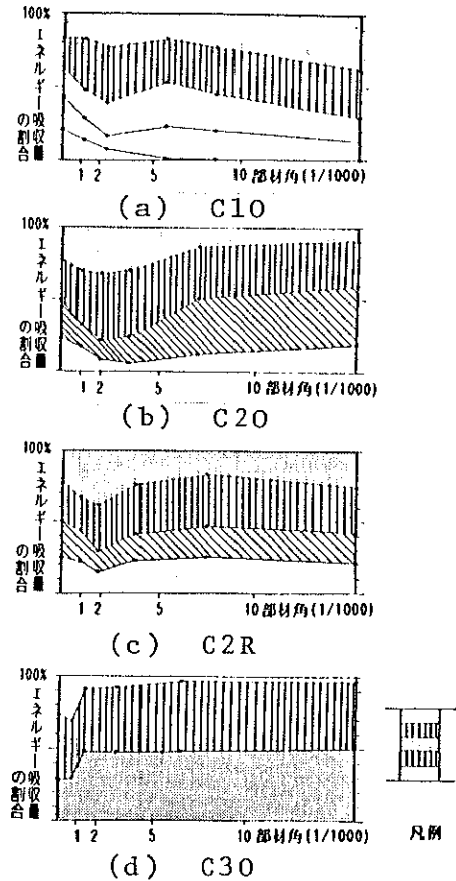


図-2.10 せん断変形による
エネルギー吸収分布の推移

C10試験体 図-2.8 (a) に示すように、水平外力による仕事量の約40%は定着部分で占められている。柱内法部分については曲げ変形によるものが約45%、また、せん断変形によるものが約15%である。前者についてみると、図-2.9 (a) に示すように曲げ変形によるエネルギー吸収量の約85%は、柱せいとほぼ等しい柱頭柱脚部分（それぞれ2つの測定区間）で占められている。後者についてみると、図-2.10 (a) に示すように終局時にはせん断変形によるエネルギー吸収量の約60%は柱両端部に集中しており、その部分で発生した曲げせん断ひびわれの拡大で生じた塑性変形によるものである。

C20試験体 C20試験体は、図-2.5 に示すように部材角の増加とともに、曲げ降伏直前からせん断破壊へ移行し最終的に付着破壊を起こしたが、曲げ降伏によるせん断耐力とせん断降伏耐力が近いため、柱内法部分に関しては、図-2.8 (b) に示すように曲げ変形とせん断変形によるエネルギー吸収量の割合が弾塑性域にわたってほぼ同じであった。また、図-2.9 (b) と図-2.10 (b) に示すように、部材角が5/1000までは、曲げせん断ひびわれの成長に伴い、せん断変形によるエネルギー吸収分布は柱の両端部に集中して

いる。しかし、最終的には付着破壊であったため、部材角が5/1000以降では、せん断変形によるエネルギー吸収量は全体に分散している。

C2R試験体 C2R試験体では、図-2.5に示すように柱両端部へ破壊が集中したため、図-2.8(c)に示すように定着部分のエネルギー吸収量の割合は、C20に比べて大きくなっており、「隅角部の曲げひびわれ」→「曲げせん断ひびわれ」→「曲げ降伏」へ変化した破壊過程に伴って、エネルギー吸収分布も他の試験体と比べて大きく変化している。これは、エポキシ樹脂注入により補修した本試験体ではひびわれ発生本数が少ないため、ひびわれ発生部分へ変形が集中したためと思われる。また、最終破壊型式は曲げ降伏型であったため、図-2.9(c)に示すように柱内法部分の曲げ変形によるエネルギー吸収量も、柱内法部分の両端へ集中している。図-2.10(c)に示すようにせん断変形によるエネルギー吸収量は、部材角が20/1000までは、ほぼ均一に分布している。

C30試験体 図-2.8(d)に示すように対角方向にせん断ひびわれが発生する前は、隅角部の曲げひびわれによる両端部のエネルギー吸収量が多かったが、対角方向にせん断ひびわれが発生した後は、せん断変形によるエネルギー吸収量の割合が急増し、せん断降伏以後は、全体の90%以上を占めた。また、図-2.10(d)に示すようにせん断変形によるエネルギー吸収量の大部分は柱中央部に集中している。

せん断試験体では、せん断降伏後は平面保持の仮定が崩れるため、曲率の測定値が乱れている。また、図-2.8(d)に示すようにせん断降伏後では曲げ変形によるエネルギー吸収量は非常に少ないため省略した。

2.3.3 鉄筋とコンクリートのエネルギー吸収量の割合

曲げ降伏型部材では、終局時には、部材の塑性変形は、主として引張り鉄筋の塑性変形によって生じていると一般に考えられている。そこで、C10試験体を例に、エネルギー吸収性状という観点から各測定区間において素材ごと（鉄筋とコンクリート）のエネルギー吸収分布を調べる。

(a) 断面内のエネルギー吸収量の割合

鉄筋とコンクリートの付着ずれが生じていないものと仮定し、曲率測定に用いたPIゲージのひずみを直線補間することにより、その区間での主筋の平均的なひずみが算出できる。図-2.11は、このようにして求めた主筋のひずみと直接実測された主筋のひずみを、比較したものである。

ひずみゲージの値は局所的な鉄筋のひずみ量であるため、ひびわれ発生箇所からの距離や、付着ずれの影響を受けている。また、塑性域では、ひずみゲージの断線や剥離などにより、大変形まで鉄筋のひずみを正しく直接測定できない。これらの理由により、直接実測した値はPIゲージの測定値より推定した値と異なっているものがある。しかし、全体的にみると、PIゲージによる鉄筋のひずみの推定値と直接実測した値は、ほぼ対応して

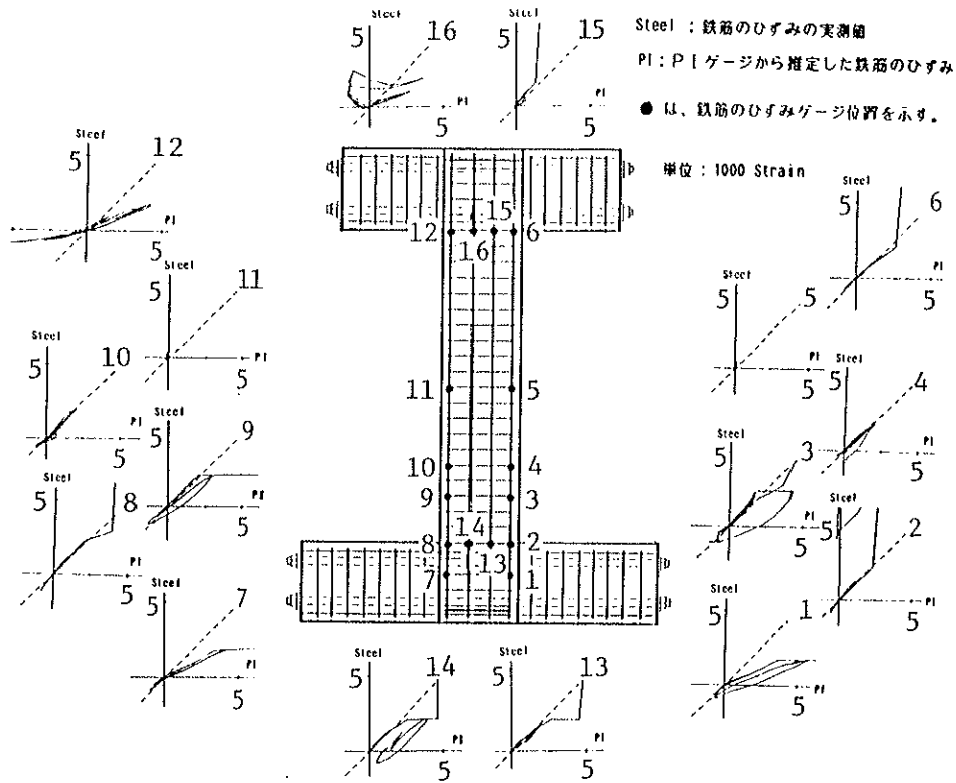


図-2.11 P1ゲージから推定した鉄筋のひずみと実測値の比較
 (C10試験体)

いるものと思われるので、鉄筋のひずみには、P1ゲージから推定した値を用いることに
 する。

鉄筋のエネルギー吸収量をひずみの履歴から求めるためには、繰返し加力を考慮した応
 力-ひずみ関係を仮定する必要がある。ここでは、鉄筋の応力-ひずみ関係をBi-Linear
 型と仮定した。

図-2.12に示した鉄筋のエネルギー吸収量は、断面内の全鉄筋（圧縮側と引張り側）が
 吸収したエネルギー量の総和であり、曲げ変形によるエネルギー吸収量に対する全鉄筋の
 エネルギー吸収量の割合を縦軸に示し、横軸には曲率を示した。また、図中の実線はファ
 イバーモデル（注2.6）を用いて一方向加力を想定した理論値である。なお、理論値の算
 出に用いた鉄筋の応力-ひずみ関係は、鉄筋のエネルギー吸収量の算出に用いたものと同
 じである。曲げ降伏前では、実験値は理論値付近にはらついているが、降伏後は、実験値
 の方が理論値より大きくなっている。これは、変位履歴の影響であり、鉄筋とコンクリー
 トの復元力特性の相違によるものと推定される。すなわち、コンクリートの応力-ひずみ
 関係はスリップ型であるので、一定変位で繰返してもほとんどエネルギーを吸収しないの
 に対して、鉄筋の応力-ひずみ関係はBi-Linear型であるので、繰返し応力を受けた際に

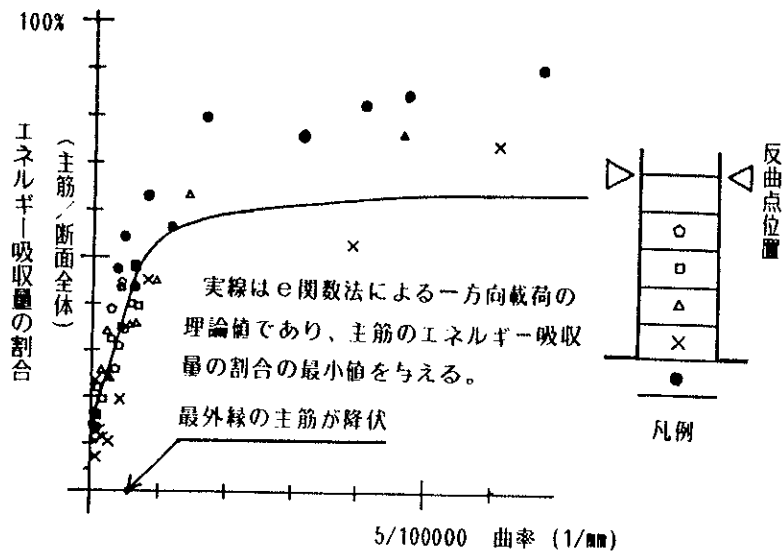


図-2.12 主筋のエネルギー吸収量の割合と曲率の関係
(C10試験体)

、鉄筋はコンクリートと比べてエネルギーを多く吸収するためである。

コンクリートがひびわれする以前では、断面全体に対する鉄筋のエネルギー吸収量の割合の実験値は約10～15%（理論値は約16%）であるが、降伏後は80%以上になっている。

一方、帯筋は圧縮側主筋の座屈止めと、コア部分のコンクリートを拘束する役割をはたしており、主筋のエネルギー吸収を助けているものと考えられる。そのため帯筋自体のエネルギー吸収量の割合は少ないが、柱全体のエネルギー吸収性状へ与える影響は非常に大きいものと思われる（注2.8）。

(b) C10試験体のエネルギー吸収分布

各荷重段階における曲げ試験体の素材ごとのエネルギー吸収分布は、図-2.8(a)、2.9(a)、2.10(a)及び2.12の結果より求めることが出来る。ここでは、代表例として弾性時と終局時の素材ごとのエネルギー吸収分布を示し、弾性と塑性でのエネルギー吸収性状を比較検討する。

図-2.13に示すように、弾性時には全体の約85%のエネルギーをコンクリートが吸収し、鉄筋は約15%を吸収しているのに対して、終局時には全体の約60%のエネルギーを鉄筋が吸収していることが認められる。

弾性時において、[]で示した値は、弾性理論値であり、計算の際に仮定した定着部分の可撓長さは $1/4D$ （ D は柱せい）である。図-2.13(a)に示すように、弾性時のエネルギー吸収分布の実験値と理論値はよく一致していることが認められる。

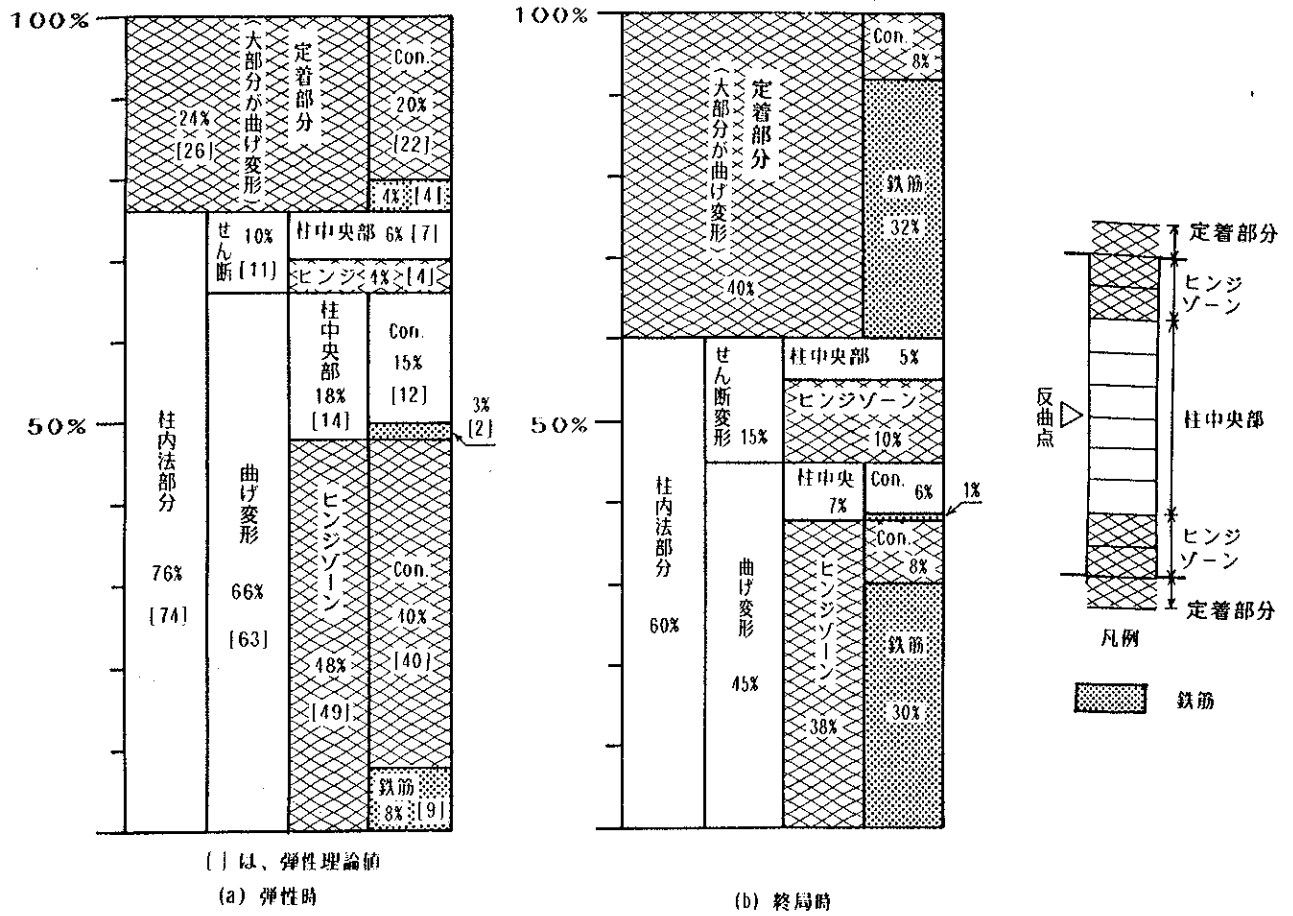


図-2.13 素材ごとのエネルギー吸収分布
(C10試験体)

2.4 まとめ

本章では、部材の破壊経過や破壊形式を定量的に判定するために、曲げ変形とせん断変形によって生じる破壊程度を素材が吸収したエネルギー量を用いて定量的に表わした。以下に、本章で得られた知見を試験体ごとに示す。

曲げ試験体 降伏ヒンジ部分では、曲げ変形によって吸収されるエネルギー量が増加するに伴い、せん断変形によるエネルギー吸収量も増加する。これは、曲げせん断ひび割れの発生により、曲げ変形とせん断変形が連成するために生じる現象であると考えられる。

素材ごとのエネルギー吸収量の分布では、弾性時には水平外力による仕事量の85%がコンクリートによって吸収されているのに対して、終局時には、全体の60%が鉄筋によって吸収されており、塑性変形時に鉄筋の果たす役割が大きいことが認められた。

曲げせん断試験体 C20試験体は、曲げ変形によるエネルギー吸収量とせん断変形によるエネルギー吸収量がほぼ等しい破壊、すなわち複合破壊を示した。部材角が5/1000以下では、曲げせん断ひび割れの成長に伴い曲げ変形とせん断変形によるエネルギー吸収量は、柱の両端部に集中していたが、それ以降では、付着破壊の進行により、せん断変形によるエネルギー吸収量が全体に分散した。

C2R試験体は、破壊形式がC20と異なり曲げ降伏したため、曲げ変形によるエネルギー吸収量は両端部に集中した。

せん断試験体 せん断ひび割れ発生前では、柱の両端部の曲げ変形によるエネルギー吸収量が大きかったが、せん断ひび割れの発生により、柱の中央部分でせん断変形によるエネルギー吸収量が急増した。

以上、本章で示した手法を用いることにより、破壊形式の判定を定量的に行なうことが出来た。

2.5 注釈

(注2.1) 補修は次の工程[2.2]によって行われた。

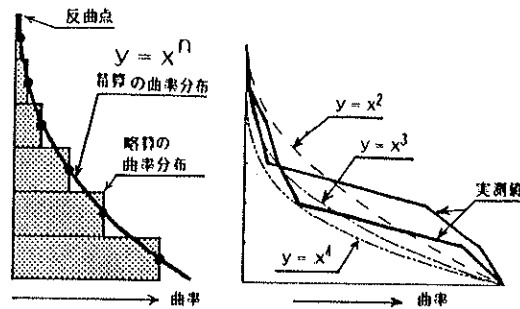
- ① 表面のゴミ、レイタンス、ペンキ等を除去する。
- ② 断面の欠損部分はエポキシ系樹脂モルタルで断面復旧する。
- ③ 注入用パイプを取付けひびわれ部分をシールする。
- ④ エポキシ系樹脂を低圧(約3 kg/cm²)で数時間持続的に注入する。
- ⑤ 注入用パイプを除去し、表面を平坦にする。

なお、本実験で用いた補修工法におけるエポキシ樹脂の浸透性については、0.04mm程度のひびわれ幅に対しても確実に樹脂が注入されていることが実験的に確認されている[2.3]。

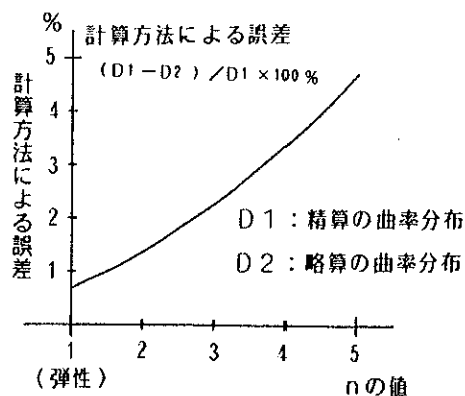
(注2.2) アクチュエーターNo.1は試験体にせん断力を、またNo2.は軸力を与えるものである。No.3は加力治具等を水平に保持するものである。

(注2.3) 曲率を測定区間で一定と仮定した時の略算による誤差の検討

実際の曲率分布は、注図-2.1(a)に示すようにある程度連続的に分布していると思われるが、曲率計算に用いる標点間の伸びは標点間のひずみの平均値に対



(a) 計算に用いた曲率分布 (c) 誤差検討に用いた曲率分布曲線と実測値の比較



(b) 計算方法による誤差

注図-2.1 略算による誤差の検討

応するので、測定区間で曲率が一樣に分布しているものと仮定した。このような仮定で得られた略算値の誤差の検討を次に示す。

計算方法： 曲率分布がn次曲線で近似できるものとして、曲げ試験体の高さの半分を想定し、測定区間を柱材軸方向に6等分して略算と精算を行なった。注図-2.1(a)に示すように略算では階段状に曲率が分布し、精算ではn次曲線に分布する。注図-2.1(b)は精算値に対する略算値の誤差を示したものであり、注図-2.1(c)から実際の曲率分布は3~4次曲線に近いので、略算による誤差は約4%であると思われる。

(注2.4) せん断ひずみの算出方法

本実験では、測定区間内の曲率を一定と仮定し[2.4]、以下の式を用いてせん断ひずみを算出した。

$$\gamma = \varepsilon(45\text{度}) - \varepsilon(135\text{度}) \quad \text{注式(2.1)}$$

ここで、 γ ；せん断ひずみ

$\varepsilon(45\text{度})$ ；45度方向のひずみ

$\varepsilon(135\text{度})$ ；135度方向のひずみ

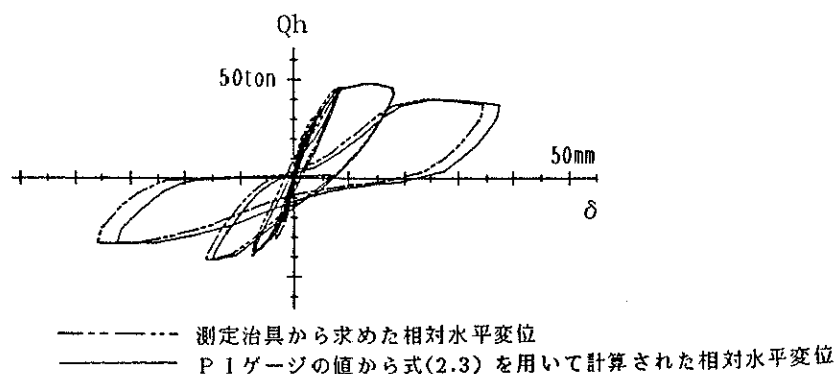
(注2.5) 測定方法の違いによる相対水平変位の誤差の検討

水平変位には次の2種類がある。

- ① 両面測定によるねじれ変形と端部回転を補正した試験体中央での水平変位
- ② P Iゲージの値を式(2.3)に従って求めた水平変位

代表例として注図-2.2にC20試験体の水平変位の比較を示す。小変形時には、水平変位はほぼ一致しているが、大変形になると多少異なっている。これらの原因として以下に示す理由が考えられる。

- ① P Iゲージによる水平変位は片面だけで測定したため、ねじれ変形の影響を受けやすい。



注図-2.2 測定方法の違いによる相対水平変位の比較
(C20試験体)

- ② 図-2.4(a)に示すように曲率測定用の標点とせん断ひずみ測定用の標点
離れており、その間に発生したひびわれによる変形は測定されていない。
- ③ 曲率を算出する時に平面保持を仮定しているため、せん断ひびわれや付着
ひびわれなどで曲率が乱れ、その値を用いて式(2.2)で算出するためである。

(注2.6) ファイバーモデル(文献[2.5]参照)で用いた仮定

ファイバーモデルの仮定は次の通りである。

- ① 鉄筋の応力-ひずみ関係は、注図-2.3(a)に示すようなBi-linear型とする。
- ② 注図-2.3(b)に示すように圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係の包絡
線は、梅村魁博士のe関数法による。ただし、初期剛性は学会式注式(2.2)
による値を用いた。引張り側の剛性は圧縮側の初期剛性と同じにし、 $\sigma_t =$
 $1.8 \sqrt{F_c}$ でひびわれが生じ、その後応力を解除し、引張り応力が生じない
ようにした。

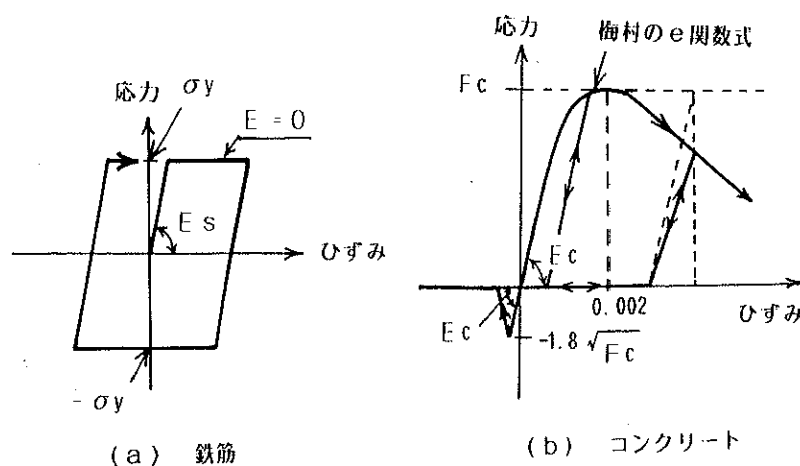
$$E_c = 2.1 \times 10^5 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times \sqrt{F_c} / 200 \quad \text{注式(2.2)}$$

- ③ コンクリート断面を柱せい方向に20等分したファイバーモデルを用いた
(注2.7) 日本建築学会RC規準のはりのせん断耐力算定式(中間式)に軸力による補
正を加え、注式(2.3)を用いた。

$$Q_{sv} = \left(\frac{0.0738 \rho_t^{0.23} (180 + F_c)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{\rho_w \sigma_y} + 0.1 \sigma_o \right) \cdot b_j$$

注式(2.3)

- (注2.8) せん断破壊型の場合は、帯筋はせん断変形に対して直接抵抗するが、鉄筋量
が少ないため、柱全体のエネルギー吸収量に対する帯筋自身のエネルギー吸収
量の割合は少ないものと考えられる。



注図-2.3 素材の応力-ひずみ関係

2. 6 参考文献

- [2.1] 潘 文和, 今井 弘, 村上雅英, 木村英夫, 山本芳栄: 「補修前後の実大RC柱の弾塑性性状に関する実験的研究—総合プロジェクト鉄筋コンクリート造震災構造物の復旧技術の開発 その6~その8」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和58年 9月
- [2.2] ショーボンド建設KK. ビックス工法カタログ
- [2.3] 九富 理, 宮川豊章, 岡田 清: 「RC部材のひびわれへの樹脂注入による防食効果について」, 第37回土木学会年次講演会講演集 V部, 昭和57年10月, pp. 315~316
- [2.4] 平石久廣: 「耐震壁のせん断変形と曲げ変形の算出方法」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和57年10月, pp. 1435~1436
- [2.5] 岡田恒男, 関 松太郎, 伊藤秀夫: 「鉄筋コンクリート部材の復元力特性」, 東京大学生産技術研究所, 生産研究, 第25巻 2号, 1973年 2月, pp. 17~21