構造設計のための
メモランダム
10

曲げ系の架構と
せん断系の架構（その3）

ビル建築に用いられるラーメン架構は，或る層に生じた応力や変形が上下の層へ伝達される度合によつて，曲げ系の架構とせん断系の架構に分類される。典型的な曲げ系の架構である耐震壁付き架構では，耐震壁が心棒のように働くために応力や変形の上下層への伝達度が非常に大きく，また典型的なせん断系の架構であるウオールガーダー形式のラーメン架構では応力が剛性の大きなはりに吸収されるために上下の層の間の影響度が非常に小さいことを，2回にわたつて考察した。これまでの考察では，応力と変形の上下層への伝達度や架構の水平バネが，曲げ系の架構とせん断系の架構でどのように違つてくるかに焦点をあててきたが，今回は，架構に蓄えられるひずみエネルギーがどのように分布するかを調べてみたい。

構造物の各部分に蓄えられる**ひずみエネルギー**の計算式は，構造力学のどの教科書にも載つているが，実際の建物の各部分にどのようにひずみエネルギーが分布するかを示した例はないといつてよいだろう。今回の考察は，ひずみエネルギー分布の表示方法も含めて，架構の性質を把握する1つの方法の提案にもなつている。

■ 各部材に蓄えられるひずみエネルギーの計算

構造物の各部分に蓄えられるひずみエネルギーの計算式は構造力学の教科書にも載つているが，ここでは，柱・はり・耐震壁で構成されるビル建築の架構を対象に，各部材に蓄えられるひずみエネルギーの計算式を導いてゆこう。この場合，架構の各部材のひずみエネルギーの計算は，各部材の応力がすでに求められているものとし，その応力を用いて行なうので，ひずみエネルギーの計算式は各部材の応力の関数として表わす必要がある。また，各部材の応力は，柱・はり・耐震壁をすべて線材として扱つたマトリックス変位法による架構の応力解析から求めるので，ひずみエネルギーの計算式としては，線材に関する式を導けばよく，柱・はり・耐震壁について共通の式になる。なお，ここで検討する架構は，水平力だけを受け，各部材には中間荷重が作用しないものとし，かつ弾性範囲にあるものとする。

さて，各部材に蓄えられるひずみエネルギーの計算式を導びくことにしよう。各部材のひずみエネルギーは，軸方向力・せん断力・曲げモーメントによる3つの成分の和で表わされる。

柱に軸方向力が作用して，柱の内部の体積 ΔV の微小部分に応力度 σ とひずみ度 ε が生じたとすると，その微小部分に蓄えられる弾性ひずみエネルギー ΔU は，(1)式で表わされる。

$$\Delta U=\frac{1}{2}\sigma\varepsilon\Delta V \quad \cdots\cdots(1)$$

(1)式の右辺に 1/2 がついているのは，弾性体では応力度 σ とひずみ度 ε が独立には存在せず，図1に示すように，応力度 σ とひずみ度 ε との間につねに(2)式の比例関係が成立するためである。(2)式の E は弾性体のヤング係数である。

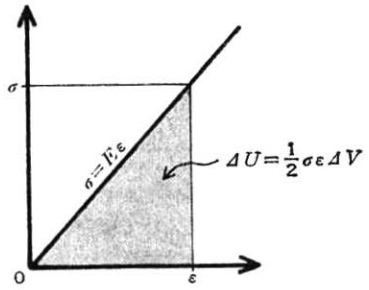


図1　弾性体に生じる応力度-ひずみ度関係と単位体積当りのひずみエネルギー

$\sigma=E\varepsilon$　または　$\varepsilon=\sigma/E$ ……(2)

1の三角形の面積 $\Delta U/\Delta V$ は単位体積に蓄えられる弾性ひずみエネルギーを表わしている。

式の ε を(1)式に代入すれば，微小部分に蓄えられる軸方向力による弾性ひずみエネルギー ΔU を応力度 σ で表わした(3)式が得られる。

$$\Delta U=\frac{\sigma^2}{2E}\Delta V \quad \cdots\cdots(3)$$

の(3)式の右辺を各柱の全体積について積分すれば，各柱に蓄えられる軸方向力による弾性ひずみエネルギー U_N を求めることができる。

$$U_N=\int_0^V \frac{\sigma^2}{2E}dv \quad \cdots\cdots(4)$$

式は応力度 σ が柱の内部で変化する場合の一般式であるが，柱の軸方向力 N と断面積 A が一定の場合は，$\sigma=N/A$（一定）であるから，(4)式は(5)式に変換できる。(5)式の L は柱の長さで，剛域を除いた変形可能な部分の長さである。

$$U_N=\int_0^L \frac{N^2}{2EA}dl \quad \cdots\cdots(5)$$

以上で，柱に蓄えられる弾性ひずみエネルギーのうち，軸方向力による成分の計算式を誘導したことになる。(5)式において注目したいのは，分母の (EA) が柱の軸方向剛性を表わしていることである。ここでは，せん断力と曲げモーメントによる弾性ひずみエネルギーの計算式の誘導は省略し，専門書を参照して頂くことにするが，どの場合も(5)式と類似の式が得られ，分母の軸方向剛性（EA）がせん断剛性（GA）や曲げ剛性（EI）に変化する。

各部材に蓄えられるせん断力と曲げモーメントによる弾性ひずみエネルギーの計算式を，それぞれ(6)式と(7)式に示す。式中の記号の説明は省略するが，お分り頂けると思う。

$$U_S=\int_0^L \frac{\bar{\kappa}Q^2}{2GA}dl \quad \cdots\cdots(6)$$

$$U_B=\int_0^L \frac{M^2}{2EI}dl \quad \cdots\cdots(7)$$

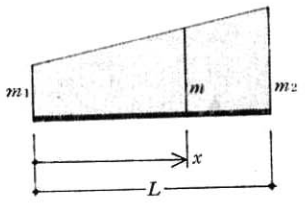
各部材に蓄えられる弾性ひずみエネルギー U は，軸方向力・せん断力・曲げモーメントによるエネルギーの和であるから，(8)式で表わされる。

$$U=\int_0^L \frac{N^2}{2EA}dl+\int_0^L \frac{\bar{\kappa}Q^2}{2GA}dl+\int_0^L \frac{M^2}{2EI}dl \quad \cdots\cdots(8)$$

すでに述べたように，ここでは水平力を受ける架構を対象にしており，軸方向力 N とせん断力 Q は各部材ごとに全長にわたつて一定であるから，あらかじめ(8)式の積分をすませて

端部に曲げモーメントを受ける部材のひずみエネルギー U_B

上端引張りの曲げモーメントを正として，左端の曲げモーメントを m_1，右端を m_2 とすると，x の位置の曲げモーメント m は(a)式で表わせる。



$$m=m_1+\frac{m_2-m_1}{L}x \quad \cdots\cdots(a)$$

曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B は(b)式によつて表わせるから，これに(a)式を代入して積分することによつて U_B を(c)式のように求めることができる。

$$U_B=\int_0^L \frac{1}{2}\frac{m^2}{EI}dx \quad \cdots\cdots(b)$$

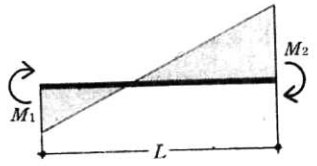
$$=\frac{1}{2EI}\int_0^L \left(m_1+\frac{m_2-m_1}{L}x\right)^2 dx$$

$$=\frac{1}{2EI}\int_0^L \left\{m_1^2+2\frac{m_1(m_2-m_1)}{L}x+\frac{(m_2-m_1)^2}{L^2}x^2\right\}dx$$

$$=\frac{1}{2EI}\left\{m_1^2L+\frac{m_1(m_2-m_1)}{L}L^2+\frac{(m_2-m_1)^2}{3L^2}L^3\right\}$$

$$=\frac{L}{6EI}(m_1^2+m_1m_2+m_2^2) \quad \cdots\cdots(c)$$

節点モーメントの符号の表わし方は右回りを正としているから，端部における節点モーメントを M_1, M_2 とすると m_1, m_2 は(d)式によつて表わせる。



$$m_1=-M_1,\quad m_2=M_2 \quad \cdots\cdots(d)$$

(d)式を(c)式に代入することにより，端部に M_1, M_2 なる曲げモーメントを受ける部材のひずみエネルギー U_B が(e)式のように求められる。

$$U_B=\frac{L}{6EI}(M_1^2-M_1M_2+M_2^2) \quad \cdots\cdots(e)$$

おいたほうが便利である。また，曲げモーメント M についても，各部材の両端の値を M_1, M_2 とすれば，中間の値は M_1 と M_2 を結ぶ直線で表わされるから，この M_1 と M_2 を用いた式に変換しておくことができる。

軸方向力 N とせん断力 Q については，(8)式を単純に積分すればよい。曲げモーメント M の積分については，別掲の説明文に式の展開を示したが，比較的単純な式が得られる。以上をまとめて(9)式に示す。

$$U=\frac{N^2L}{2EA}+\frac{\bar{\kappa}Q^2L}{2GA}+\frac{L}{6EI}(M_1^2-M_1M_2+M_2^2)\cdots\cdots(9)$$

水平力を受ける架構の応力がすでに求められているならば，その応力を(9)式に代入することにより，各部材に蓄えられる弾性ひずみエネルギーを計算することができる。全部材についてそれらを合計すれば，架構全体に蓄積される弾性ひずみエネルギーが得られることになる。

■ ひずみエネルギーについての検討

そろそろ例題にはいりたいが，例題を検討するための準備として，ひずみエネルギーの性質についての検討をすませておくことにしたい。

まず，外力とひずみエネルギーとの関係を調べよう。クラペイロンの定理によれば，「構造物全体に蓄えられるひずみエネルギーは，その構造物に作用する外力が，その作用点の変位によつて構造物になす仕事に等しい」から，外力を P（または M），外力の作用点の変位を δ（または θ）とすれば，(10)式が成立する。

$$\Sigma\frac{1}{2}P\delta+\Sigma\frac{1}{2}M\theta=\Sigma U_N+\Sigma U_S+\Sigma U_B=\Sigma U\ \cdots\cdots(10)$$

(10)式の左辺の 1/2 は，(1)式の場合と同様に，弾性体では P と δ（または M と θ）の間に比例関係があるためについたもので（厳密には線型関係が成立する場合に限られ，線型関係が成立しない座屈問題などにはあてはまらない），$P\delta/2$ は P-δ のグラフ上の三角形の面積を表わしている。(10)式は，架構の応力と変形がすでに求められている場合には，ひずみエネルギーの計算が正しかつたか否かの検算に有効である。また，架構の 1 点にだけ外力 P（または M）が作用するような場合には，各部材の応力が既知であれば，外力の作用点の変位 δ（または θ）を求められることを(10)式は示している。さらにこの場合，P を一定とすれば，δ と ΣU の間に比例関係が成立する。すなわち，各部材のひずみエネルギーを求めるさいに，例えばせん断力によるひずみエネルギーを無視すれば（これはせん断変形を無視することと同義である），その分だけ変位 δ が減少することを意味しており，結局，各部材および各成分のひずみエネルギーの比率は変位 δ に及ぼす比率そのものを表わしていることになる。

次に，(9)式の右辺の第 3 項について調べておこう。これは曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B であつて，(11)式のように表わすこともできる。

$$U_B=\frac{LM_2^2}{6EI}\left\{\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2-\left(\frac{M_1}{M_2}\right)+1\right\}\cdots\cdots(11)$$

図 2 は(11)式をグラフ化したもので，この図から，M_1/M_2 の変化，すなわち反曲点の位置によつて，曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B が大幅に変動することが分る。一様モーメントの場合の U_B は反曲点が中央にある場合の 3 倍になつている。

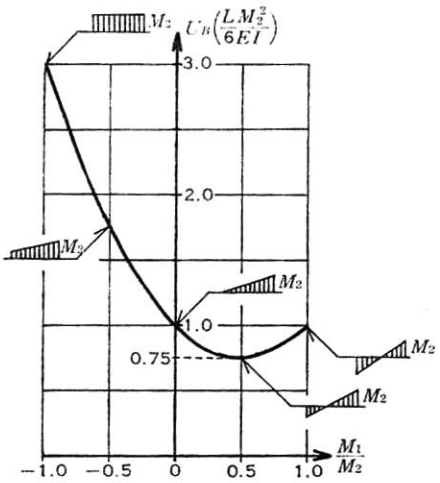


図2　反曲点の位置による曲げひずみエネルギー U_B の変化

最後に，せん断力によるひずみエネルギー U_S と曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B の比（U_S/U_B）が部材のプロポーション（長さと成の比）によつてどのように変るかを調べておきたい。この場合，問題を簡単にする意味で，反曲点が部材の中央にあるものと仮定すると，(12)式が成立する。

$$M_1=M_2=QL/2 \quad \cdots\cdots(12)$$

(9)式の第2項が U_S であるから，(11)式と(12)式を参照すれば(13)式が得られる。

$$\frac{U_S}{U_B}=\frac{\bar{\kappa}Q^2L}{2GA}\cdot\frac{6EI}{LM_2^2}=\frac{12\bar{\kappa}EI}{GAL^2}=12\bar{\kappa}\cdot\left(\frac{I}{A}\right)\cdot\left(\frac{E}{G}\right)\cdot\left(\frac{1}{L^2}\right) \quad \cdots\cdots(13)$$

(13)式によれば，E/G は材料によつて一定であり，長さ L が一定であれば，(U_S/U_B) は (I/A) に比例する。断面2次モーメントが断面積に比べて大きい。すなわち部材の成が大きくなるほど，せん断力によるひずみエネルギーの比率が大きくなることになる。

(13)式をさらに分りやすくするために，部材がRC造の長方形断面 $(B\times D)$ の場合を考えると，$I=BD^3/12=AD^2/12$，$E/G=2.33$，$\bar{\kappa}=1.2$ であるから，(13)式から(14)式が得られる。

$$\frac{U_S}{U_B}=12\bar{\kappa}\cdot\left(\frac{D^2}{12}\right)\cdot\left(\frac{E}{G}\right)\cdot\frac{1}{L^2}\fallingdotseq 2.8\left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad \cdots\cdots(14)$$

(14)式によれば，せん断力によるひずみエネルギーと曲げモーメントによるひずみエネルギーの比 (U_S/U_B) は，部材のプロポーション (L/D) の自乗に反比例することが分る。このことから，一般の柱に比べて耐震壁ではせん断力によるひずみエネルギーが非常に大きな割合をしめることが予想される。

(13)式と(14)式から求められたひずみエネルギーの比 (U_S/U_B) の特性は，反曲点が部材の中央にあるものとして得られたものであるが，反曲点が変化すると，曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B が図2のように変動し，これに伴つて (U_S/U_B) の値も変動する。このことは，断面寸法と長さが等しい部材がなん本かある場合，どの部材も反曲点が同じであれば，せん断力によるひずみエネルギー U_S と曲げモーメントによるひずみエネルギー U_B の比 (U_S/U_B) が，せん断力の大きさに関係なく，どの部材についても同一の値になることを示している。

以上で例題の結果を検討するのに必要な予備知識がほぼ得られたので，曲げ系の架構とせん断系の架構で，ひずみエネルギーの分布がどのように変化するかを，例題によつて調べてみよう。

■ 例題によるひずみエネルギー分布の検討

図3は例題に用いる架構を示しており，前々回の例題とまつたく同じ架構である。前々回と同様に，すべての柱が同一寸法(80cm角)の純ラーメン架構を標準として，中央柱の幅を2倍，4倍，8倍と大きくしてゆく。中央柱の幅が最大（$B=6.4$m）の架構は一般的な耐震壁付き架構に相当しており，

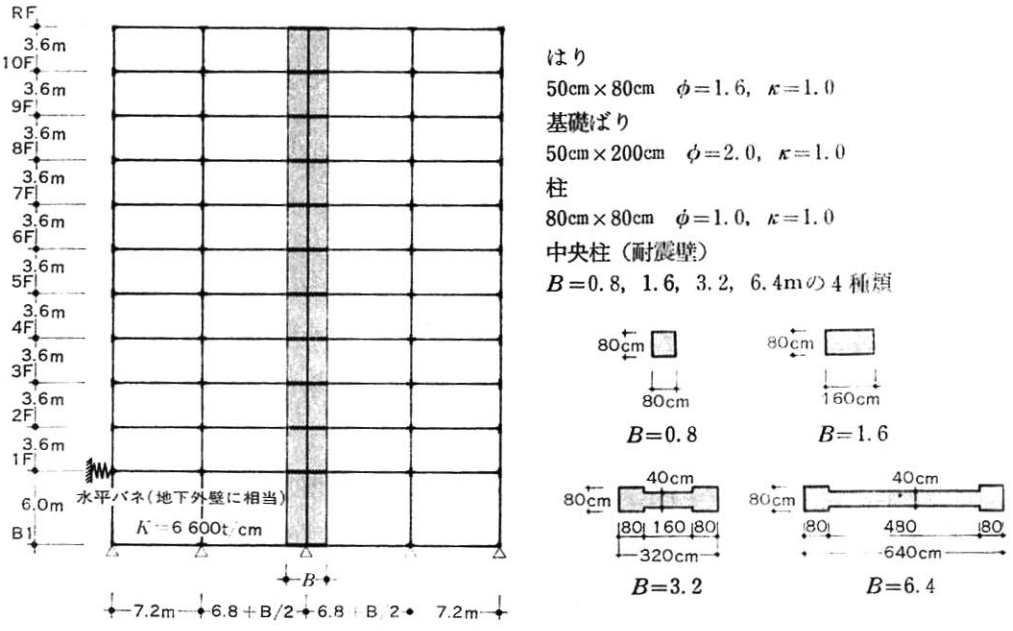


図3

典型的な曲げ系の架構である。これに対して，中央柱の幅が最小（$B=0.8$m）の純ラーメン架構は，ウオールガーダー形式ではないので典型的とはいえないが，一般にせん断系の架構と扱われている架構である。

これらの架構の7階と6階の床レベルに，それぞれ＋230 tと－230 tの水平力を作用させる――すなわち，6階だけに層せん断力を与えて，そのときのひずみエネルギーの分布がどのように変化するかを調べることにしたい。これと同じ荷重状態での応力図を，参考資料として図4に再録する。後に示すひずみエネルギー分布との比較に利用して頂きたい。

図5は，図4の応力図と(9)式により求められた各部材に蓄えられる弾性ひずみエネルギーの分布を，円の面積で表わした図である。各円はさらに，軸方向力・せん断力・曲げモーメントによるひずみエネルギーの成分によつて扇状に分割されている。また，各部材のひずみエネルギーの絶対量を，図の右側の表に示した。単位は 0.98 J（kg・m²/sec²）である。

まず，ひずみエネルギーの絶対量から眺めてゆこう。さきほどのクラペイロンの定理によれば，「ひずみエネルギーの総和は，外力が架構になす仕事に等しい」ことになり，(10)式が成立するはずである。ひずみエネルギーの計算の検算の意味も含めて，(10)式が成立していることを確認しておこう。図5の表によれば，ひずみエネルギーの総和は，中央柱の幅が$B=0.8$m のときの約4 000 J を最大に，幅Bの増大とともに減少していることが分る。

この例題の場合，架構に作用する外力は，7階と6階の床レベルに作用する水平力と，基礎の支点反力であるが，基礎は変位しないと仮定しているので，基礎の支点反力が架構になす仕事はゼロとなり，結局，7階と6階の水平力だけが架構に対して仕事を行なう。ここで，7階と6階の床レベルの水平力を P_7, P_6（$=-P_7$），同じく水平変位を δ_7, δ_6 とし，6階の層間変位を $\Delta_6(=\delta_7-\delta_6)$ とすれば，(10)式より，外力が架構になす仕事 $\Sigma U_{外}$ は(15)式で与えられる。

$$\Sigma U_{外}=\frac{1}{2}P_7\delta_7+\frac{1}{2}P_6\delta_6=\frac{1}{2}P_7(\delta_7-\delta_6)=\frac{1}{2}P_7\Delta_6 \quad \cdots\cdots(15)$$

(15)式によれば，右向きの水平力（$P_7=230$t）と6階の層間変位 Δ_6 の積の 1/2 が，架構に蓄えられるひずみエネルギーの総和に等しいことになる。

6階の層間変位 Δ_6 は，図4にも示したように，応力解析の結果としてすでに求められており，中央柱の幅Bが大きくなるほど減少している。この減少の度合は，ひずみエネルギーの減少の度合とまつたく一致している。そこで，外力が架構になす仕事 $\Sigma U_{外}$ の絶対量を(15)式により計算してみよう。計算は中央柱の幅が $B=0.8$m の場合（$\Delta_6=3.553$mm）について行なう。

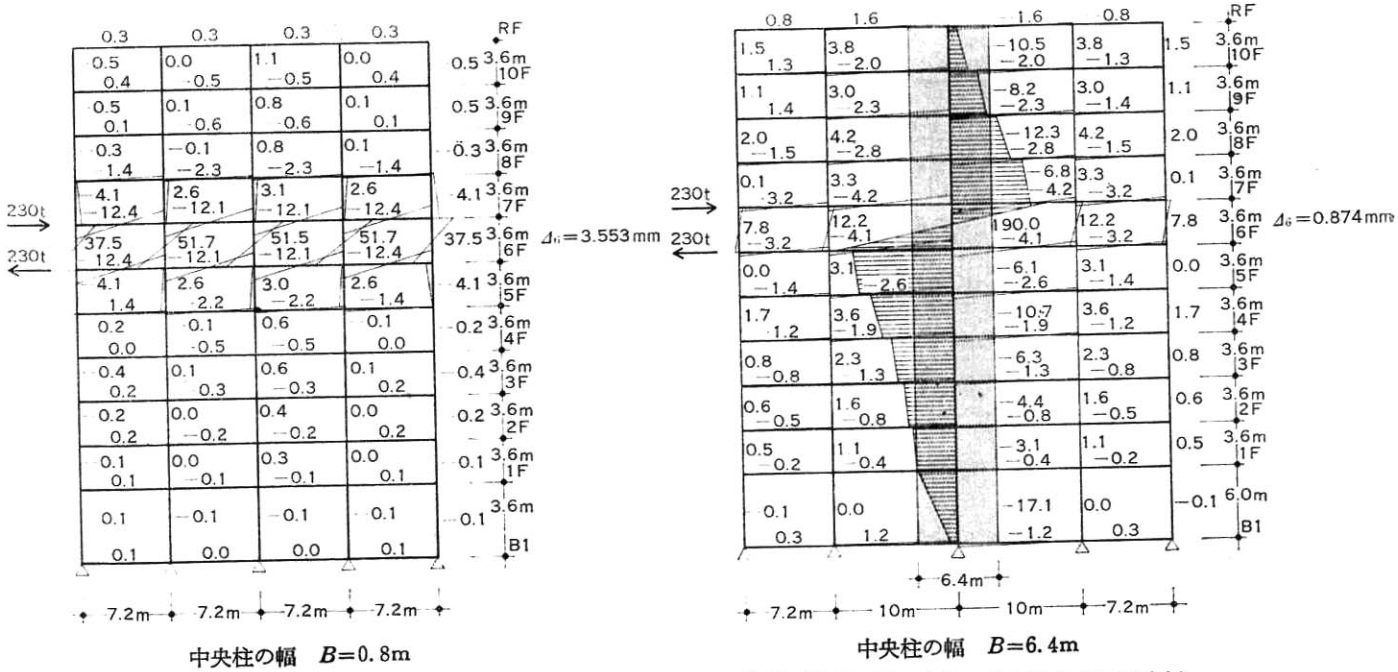
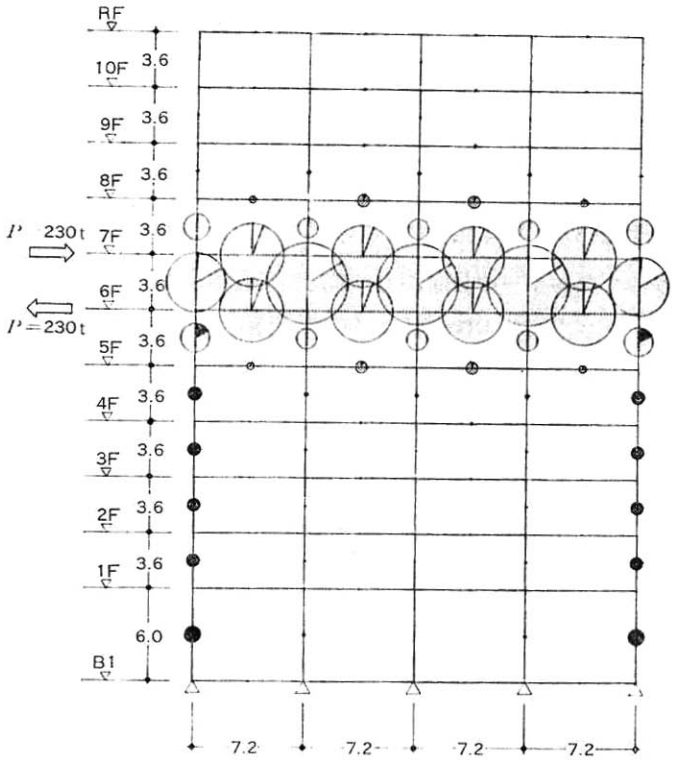


図4 中央柱の幅を変化させたときの上下層への応力の伝達（数値は柱・はりのせん断力（t）を示す）

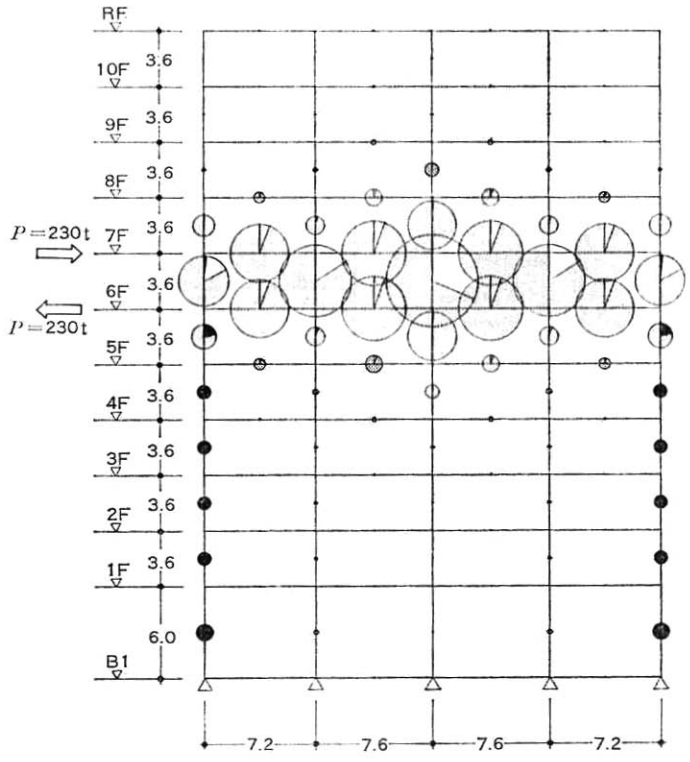
ひずみエネルギーの分担

注）各部材上に画かれた円の面積は各部材のひずみエネルギーを示す
各円の黒・白・アミの部分は，それぞれ軸方向力・せん断力・曲げモーメントによるひずみエネルギーを示す



はり	柱	
cU	$cU_{曲}$(曲げ成分)	$cU_{他}$
0.7	0.1(0.1)	0.1
1.1	0.0(0.0)	0.2
1.4	0.7(0.7)	2.5
23.3	26.4(26.1)	134.2
964.4	403.5(338.9)	1244.6
964.5	26.7(26.5)	153.6
22.9	0.7(0.7)	22.1
0.8	0.0(0.0)	19.6
0.3	0.0(0.0)	19.3
0.1	0.0(0.0)	19.2
0.0	0.0(0.0)	31.7
0.0		
1980	459 (394)	1648
総計 4087 (×0.98 J)		

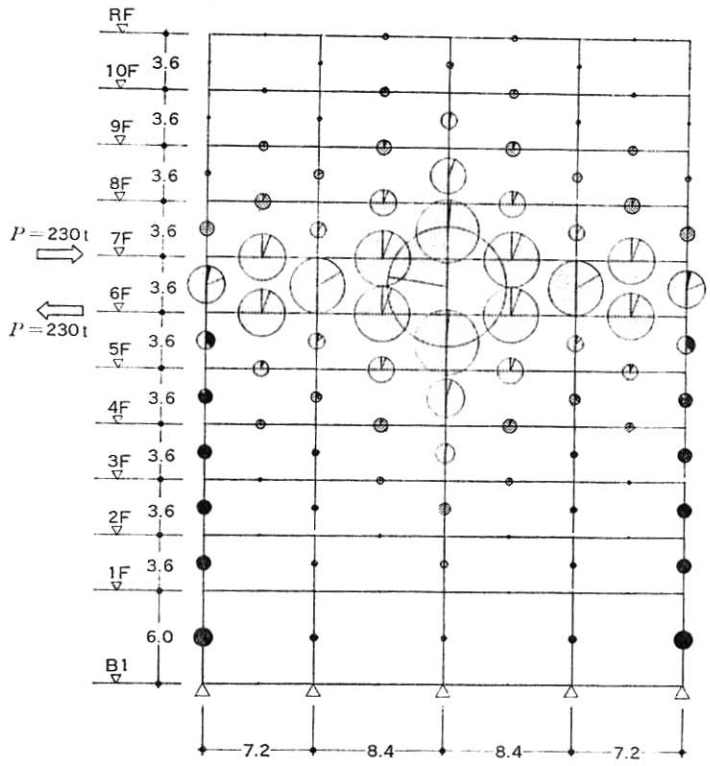
(1) 中央柱の幅 B=0.8m の場合（Δ_6=3.553㎜）



はり	柱	
cU	$cU_{曲}$(曲げ成分)	$cU_{他}$
0.3	0.0(0.0)	0.0
0.6	0.3(0.3)	0.3
2.9	8.8(8.7)	3.2
41.5	115.0(114.2)	78.8
737.6	416.3(285.0)	754.7
737.5	117.5(116.7)	93.9
41.2	9.6(9.4)	19.9
2.6	0.5(0.5)	17.4
0.3	0.0(0.0)	17.2
0.0	0.0(0.0)	17.1
0.0	0.0(0.0)	28.4
0.0		
1565	699 (535)	1031
総計 3265 (×0.98 J)		

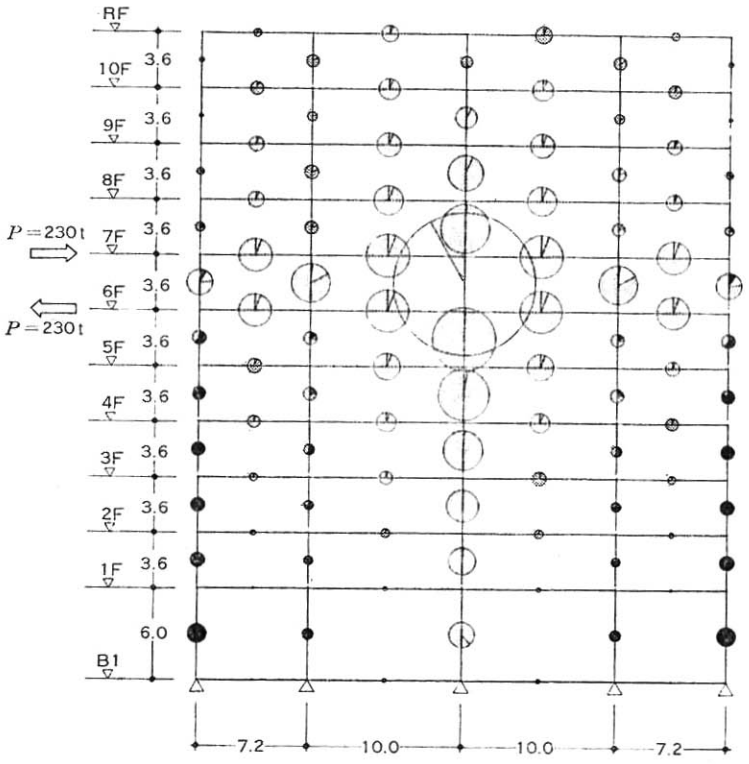
(2) 中央柱の幅 B=1.6m の場合（Δ_6=2.839㎜）

図5 中央柱の幅が変化するときの各部材に蓄えられるひずみエネルギーの分布



はり	柱	
cU	$cU_{中}$(曲げ成分)	$cU_{他}$
2.3		
	1.3(1.0)	0.9
5.9		
	8.3(7.9)	1.6
18.1		
	39.6(37.4)	7.2
58.0		
	123.4(121.8)	28.0
322.8		
	439.3(98.6)	271.2
321.9		
	131.7(130.1)	36.8
56.5		
	45.1(42.9)	18.3
16.4		
	11.8(11.5)	14.6
3.9		
	3.9(3.8)	14.1
0.8		
	1.6(1.6)	14.2
0.0		
	0.8(0.6)	23.6
0.0		
807	807 (458)	431
総計	2045 (×0.98 J)	

(3) 中央柱の幅 $B=3.2$m の場合 ($\Delta_6=1.779$mm)



はり	柱	
cU	$cU_{中}$(曲げ成分)	$cU_{他}$
10.4		
	1.9(1.0)	5.3
18.6		
	6.9(6.3)	3.2
24.4		
	18.9(17.7)	7.0
34.0		
	36.3(35.9)	7.2
90.9		
	307.2(25.0)	65.8
86.9		
	61.4(61.1)	10.6
27.9		
	39.5(38.6)	10.6
16.1		
	23.6(23.3)	8.8
7.3		
	15.5(15.4)	8.5
3.1		
	11.1(11.0)	8.6
0.7		
	9.9(6.0)	14.0
0.6		
320	533 (242)	150
総計	1005 (×0.98 J)	

(4) 中央柱の幅 $B=6.4$m の場合 ($\Delta_6=0.874$mm)

図5 中央柱の幅が変化するときの各部材に蓄えられるひずみエネルギーの分布

$$\Sigma U_{外}=\frac{1}{2}P_7\Delta_6=\frac{1}{2}\times(230\times10^3)\ \mathrm{kg}\times(9.8)\mathrm{m/s^2}$$
$$\times(3.553\times10^{-3})\ \mathrm{m}$$
$$=4\,086\times0.98\ \mathrm{kg\cdot m^2/s^2}$$
$$=4\,086\ (\times0.98\ \mathrm{J})\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

(16)式の計算結果は図5の表のひずみエネルギーの総和と一致しており，さきに調べたように，中央柱の幅が増加するときの層間変位とひずみエネルギーの減少率が一致することを合せ考えれば，各部材のひずみエネルギーの計算とその集計が正しいことは確認されたことになる。

図6は，架構に蓄えられるひずみエネルギーの総和と部材別のひずみエネルギーの絶対量の変化をグラフにまとめたものであるが，中央柱の幅が増すにつれて，ひずみエネルギーの総和が急激に減少してゆく様子がよく分る。この場合，ひずみエネルギーが急激に減少しているのは，中央柱以外の柱とはりのひずみエネルギーであり，ほぼ6階の層間変位に比例していることに注目したい。また，中央柱の幅が広くなつても，中央柱に蓄えられるひずみエネルギーの絶対量はそれほど変化せず，全体のひずみエネルギーに対する割合だけが増加している。

外力が架構になす仕事が(15)式で表わされることから考えると，中央柱の幅が増せば層間変位 Δ_6 が減少するのであるから，外力による仕事が減り，同時にひずみエネルギーも減少するのは当然ともいえようが，外力が一定であることを考えれば，このひずみエネルギーの減少はきわめて急激であるといえる。この理由は，中央柱が耐震壁に近ずくと，心棒としての働きが強くなり，応力や変形が上下層にわたつて滑らかになるためである（図4参照）。ひずみエネルギーは，応力と変形の積，或いは応力（または変形）の自乗の関数になるので，架構の1部に応力（または変形）が集中すれば，その部分に蓄えられるひずみエネルギーが非常に大きくなり，他の部分のひずみエネルギーが減少しても，全体としてのひずみエネルギーは増大することになる。反対に，応力や変形が滑らかに分布すれば全体としてのひずみエネルギーは減少し，ひずみエネルギーの分布も滑らかなものになる。

この様子は図5のひずみエネルギーの分布を一見すれば分るだろう。なお，図5はひずみエネルギーの分布を分りやすくするために，ひずみエネルギー（円の面積）の総和が各ケースで等しくなるように画いてある。したがつて，B=6.4 mの場合の円の総面積は B=0.8m の場合の約4倍に画かれている。

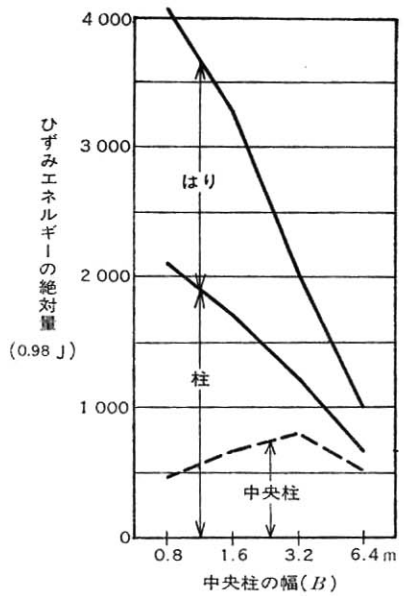


図6　各部材に蓄えられるひずみエネルギー

図5の各部材に画かれた円は扇形に分割されており，黒・白・アミの部分は，それぞれ軸方向力・せん断力・曲げモーメントによるひずみエネルギーを示している。したがつて，扇の開く角度はそれぞれのひずみエネルギーの割合を意味している。

はりについてせん断力によるひずみエネルギーの割合をみると，中央柱の幅に関係なく，どのはりについても白い扇の角度は同じである。すでに前項で検討したように，はりの反曲点が，剛域を除く変形しうる部分のほぼ中央にあるためである。

柱の場合も，6階の中央柱以外の柱については，せん断力によるひずみエネルギーの割合はどれも同じになつており，この場合も反曲点が中央にあることがその理由である。5階以下の外柱の場合は，（水平力×階高）の転倒モーメントによる軸方向力の存在により，黒い円が支配的になつている。

6階の中央柱の扇の角度は，中央柱の幅の変化とともに大幅に変動している。この理由は，柱のプロポーションの変化によるものであり，柱が耐震壁に置きかわると，せん断力によるひずみエネルギーの割合が急激に増大するという，前項での予想と一致している。

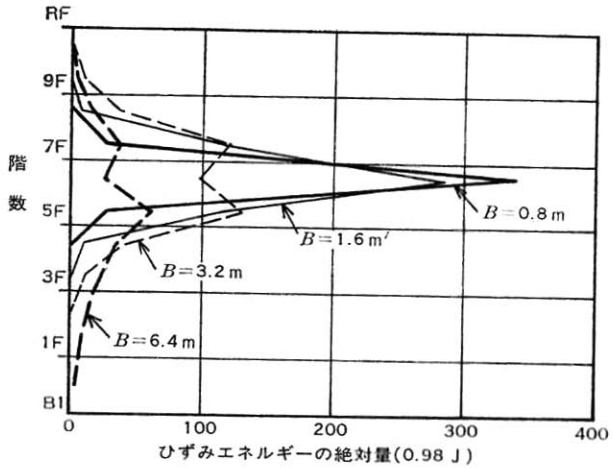


図7　曲げモーメントによる中央柱のひずみエネルギーの分布

ここで，少々こまかすぎるきらいはあるが，図7に中央柱の曲げモーメントによるひずみエネルギーの分布を示す。その分布が中央柱の幅によつて大幅に変化することは一目で分るが，中央柱の幅がB=3.2m，B=6.4mのときに，6階よりもその上下の柱のひずみエネルギーのほうが大きくなつていることは注目すべき点である。この理由は，曲げモーメントの絶対値がそれほど変らないのに，6階の柱の反曲点が中央にあり，その上下の柱が一様曲げに近いモーメントを受けるためで，図2のように反曲点の位置によつてひずみエネルギーが大きく変動する現象によるものである。

前項のはじめに検討したように，各部材および各成分のひずみエネルギーの比率は，外力の作用点の変位（この例題では6階の層間変位Δ_6）の比率を意味している。そこで，図8に部材別のひずみエネルギーの割合を，図9に成分別のひずみエネルギーの割合を示した。図9によれば，各部材の軸伸縮とせん断変形を無視し，曲げ変形と剛域を考慮した場合の6階の層間変位は，すべての変形を考慮した場合の88%～63%になることが分る。せん断変形による影響は9%～32%であり無視できないことも読みとれる。

架構に作用する水平力によつて，その架構の各部材に蓄えられる弾性ひずみエネルギーの分布が，曲げ系の架構とせん断系の架構とでどのように変化するかを調べてみた。その結果，せん断系の架構では層せん断力が生じている層の近傍の部材にひずみエネルギーが集中し，ひずみエネルギーの総和も大きくなるが，耐震壁付き架構のような曲げ系の架構では，耐

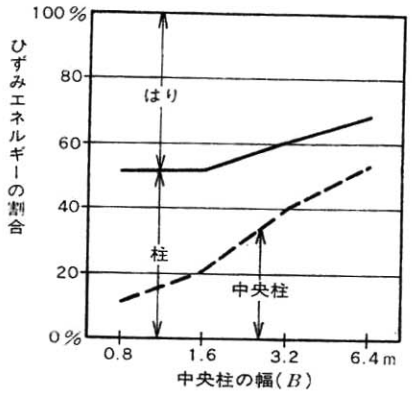


図8　部材別のひずみエネルギーの割合

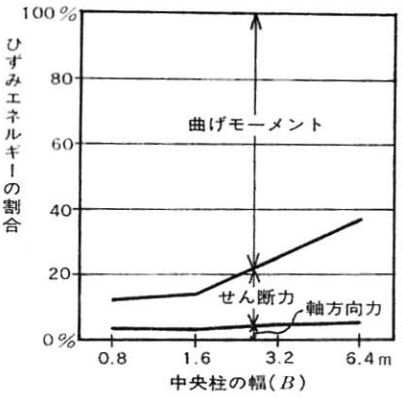


図9　成分別のひずみエネルギーの割合

震壁が心棒として働くために，応力と変形が滑らかになつて，ひずみエネルギーが上下に分散され，その総和も減少することが明らかになつた。同じ水平力が建物に作用する場合を想定すれば，建物に蓄えられるひずみエネルギーが，全体として減少し分散される耐震壁付き架構は，局部的な破壊を起こしにくいことを示唆しているとも考えられ，文字どおり耐震的であると考えられる。耐震壁の有効性がひずみエネルギーの点からも説明されたとみてよいだろう。

今回は，応力や変形でなく，構造物の耐震性に直接かかわるひずみエネルギーという尺度で架構の性質を考察してみたが，予想以上に明快な結果が得られたと感じている。エネルギーはつねに正の値をとるスカラー量であり，すぐれた尺度となりうる性格を基本的にそなえている。架構の性質を調べる尺度としてひずみエネルギーを用いるのも，有効な方法の1つといえよう。

（筆者の方々・㈱日建設計構造設計主管　堀井昌博，同技術主査　和田　章）