構造設計のための
メモランダム
2

ラーメンにも生じる逆せん断力

前回，耐震壁やブレースなどの耐震要素に生じる逆せん断力について，実例とその発生理由を示したが，地震時の逆せん断力は，耐震要素だけに発生するわけではない。実は，ラーメン（柱）にも逆せん断力が生じることがあるのである。今回は，そのいくつかの実例を示し，若干の問題点を明らかにしてみたい。

■ 地下階の柱に生じる逆せん断力

説明を分りやすくするために，**図1**に示すような建物を例としてとりあげてみよう。この建物はすべて純ラーメン構造であるが，地下部分の外周にだけ山留壁を兼ねた耐震壁が配されている。実際の建物はこのように単純ではないが，この例のように剛性の高い地下部分に地上のラーメン構造がそのまま降りてきている建物はごく一般的に存在し，特別なものではない。

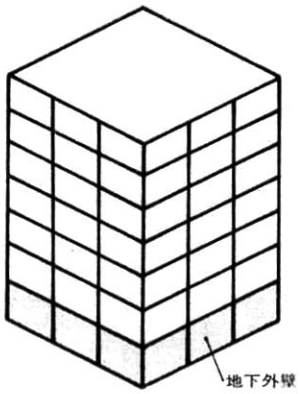
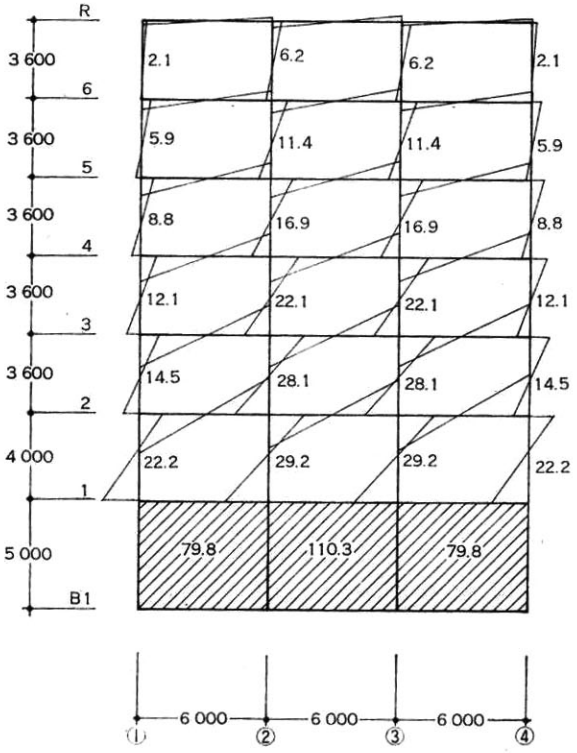
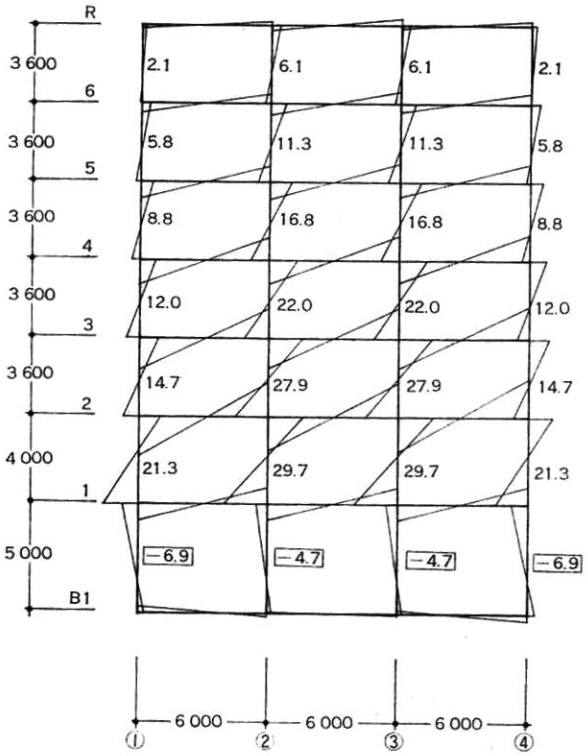


図1　地下の外周にだけ耐震壁がある純ラーメンの骨組



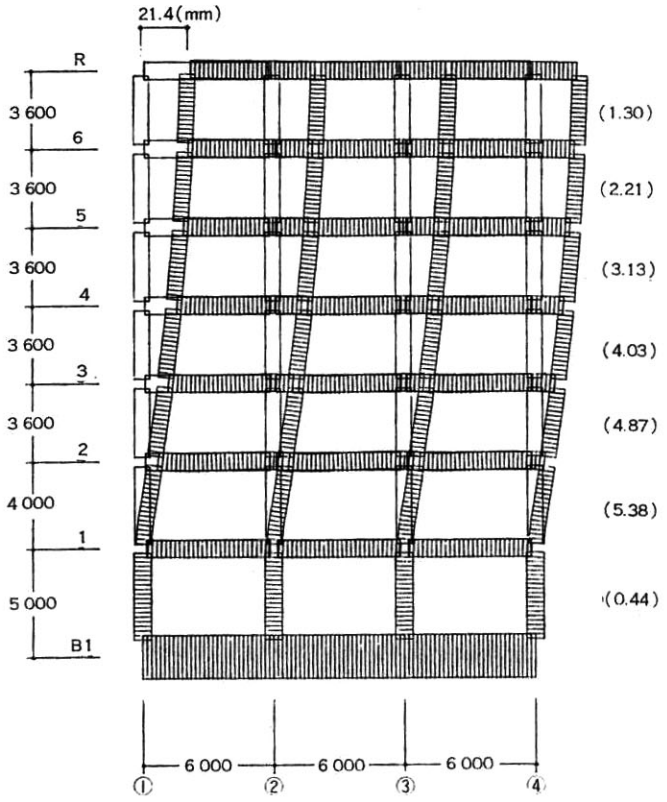
<外周架構の応力>



<内側架構の応力>（□は逆せん断力を示す）

図2　図1に示した建物の応力　　注）図中の数値はせん断力を示す

図2は，この建物の水平荷重時の応力を示しており，内側架構の地下階の柱に逆せん断力が発生している。**図3**に変形の様子を示す。



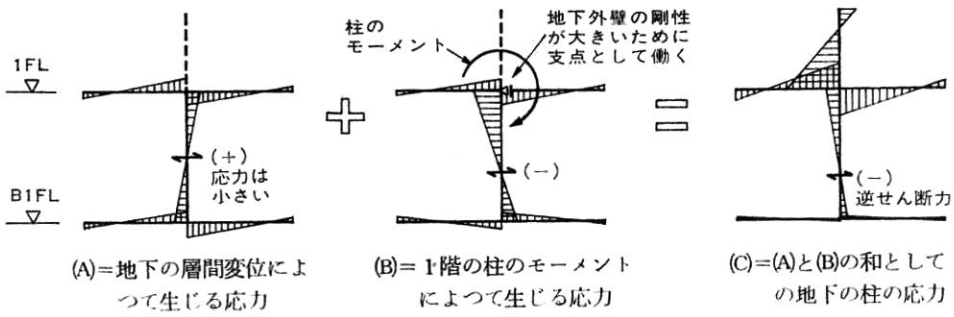
注）カッコ内は層間変位を示す（mm）
B 1階の層間変位は地下外壁があるため小さい

図 3　図1に示した建物の内側架構の変形図

なぜ逆せん断力が生じるのだろうか？　**図4**は，逆せん断力の発生理由を説明するための概念図である。（A）は，地下階の層間変位によつて発生する応力で，地上階と同符号である。しかしながら，地下階には耐震壁があるため，地下階の層間変位は地上階に比べて非常に小さくなり，これに伴つて，柱・はりの応力も小さくなつている。（B）は1階の水平変位が止まつているとして，1階の柱脚の曲げモーメントが節点モーメントとして働き，これに釣り合うための逆向きの曲げモーメントが1階のはりと地下の柱に発生している様子を示している。（C）は，（A）と（B）を加えたもので，このような場合の地下の柱の応力である。（B）の応力が（A）に比べて大きいので，図2に示したように地下の柱に逆せん断力が発生することになる。この地下部分に発生する逆せん断力は，節点モーメントとしての1階の柱脚の曲げモーメントに支配されるため，1階の階高が大きいときには，それに伴つて増加する。この応力は逆に働いていても，絶対値としては小さくないので，耐震壁が多いからといつて，地下部分の柱の設計をおろそかにはできない。一般的には問題とならないが，地下部分の耐震壁はラーメン柱に逆せん断力が生じている分だけ大きな水平力を負担していることにも注意すべきであろう。

■　耐震壁が中間階にある場合の柱の逆せん断力

この例題は，3スパン5階建の建物で，3階の③～④通り間にだけ耐震壁がある。この建物に地震力を作用させたときの

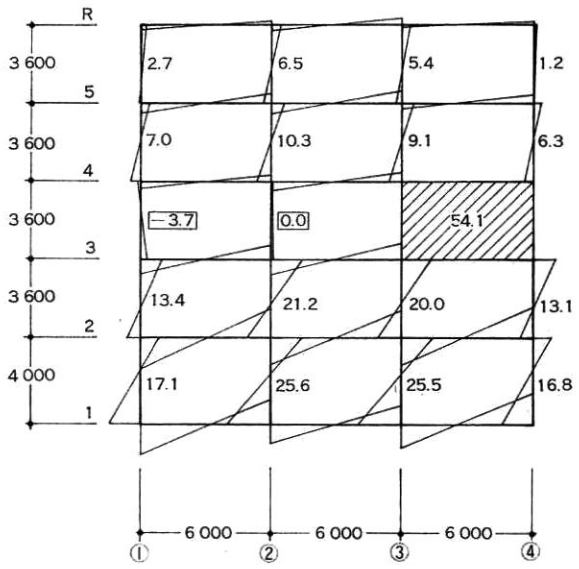


(A)＝地下の層間変位によつて生じる応力　(B)＝1階の柱のモーメントによつて生じる応力　(C)＝(A)と(B)の和としての地下の柱の応力

図 4　地下の柱に逆せん断力が生じるメカニズム

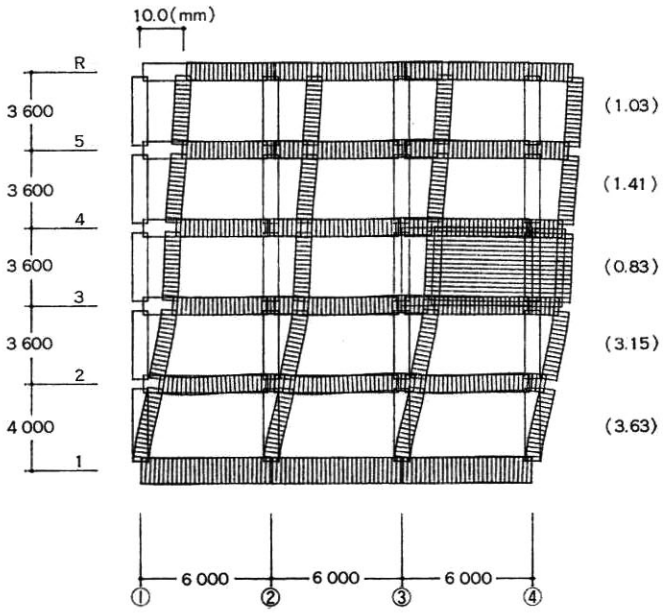
応力を**図5**に，変形の様子を**図6**に示す。3階の柱の応力がほとんどゼロになつていることが分る。この理由はさきの例と同じであるが，**図7**に示すように3階の層間変位が耐震壁によつて拘束されてしまい（このように中間層に単独で配置された耐震壁は連層耐震壁のように低層部で曲げ変形しないため，直接耐震壁のせん断剛性が発揮されて，意外によく効くものである），層間変位によつて生じる応力と，上階の柱脚と下階の柱頭の曲げモーメントに釣り合うために働く逆向きの応力（この応力は3，4階の大ばりと同符号の応力である）が相殺されたためである。図6に示した変形の様子を見れば，この原因はさらに明らかであろう。

この例のように，中間階に耐震壁がある場合が一般的であることを考えると，この例題はきわめて重大な意味を持つているといえる。例えば，自動設計は可能かという議論を行なおうとする場合である。工学的判断のできる設計者は，このゼロの応力を信じて断面の設計をするであろうか。まず，そんなことはないだろう。たまたまゼロになつたのであつて，少なくとも上階の柱より小さな断面にしたり，配筋を減らしたりすることはない。しかし，コンピュータを用いた自動設計を行なおうとしている場合には，非常に恐ろしいことにな



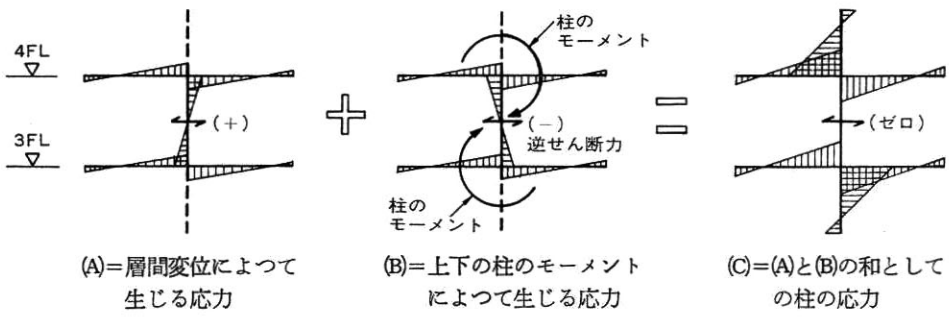
（□は逆せん断力を示す）
注）図中の数値はせん断力を示す

図 5　耐震壁が中間階にある建物の応力図



注）カツコ内は層間変位を示す（mm）

図 6　耐震壁が中間階にある建物の変形図



(A)＝層間変位によつて生じる応力　(B)＝上下の柱のモーメントによつて生じる応力　(C)＝(A)と(B)の和としての柱の応力

図 7　中間階に耐震壁があるときに柱のせん断力がゼロとなるメカニズム（柱に生じた逆せん断力に起因する）

る。というのは，解として得られた応力の持つ意味を，工学的に考察することなしに柱の太さや配筋をプログラムが勝手に決めてしまうからである。

実際の建物では，この例のように，耐震壁が1枚だけ中間階に配置されることは多く，計算上は耐震壁として扱つていなくても地震時には剛性や耐力という意味で効いてしまう壁はいくらでもあるし，それが不規則に配置されることも多い。このように複雑な建物の応力を，できるだけ正しく求めようとする努力は必要であるが，その結果は，設定した外力分布やいろいろな仮定条件のもとで得られた特殊解であると認識し，ディテールや施工性などを含めた工学的判断を優先すべきであろう。

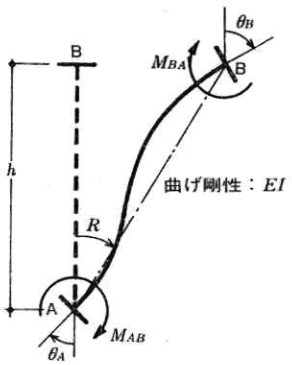


図 8　柱の変形角と曲げモーメント

■ 変形を見て，力の流れを知る

以上の2例は，いずれも上下の層に関して剛性が急変していたために生じた現象である。ここで，撓角法の基本式を参考にしながら，層間変位と節点回転角がどのようになつた場合に逆せん断力が発生するかを考えてみよう（図8参照）。

$$\left.\begin{aligned} M_{AB} &= \frac{2EI}{h}(2\theta_A+\theta_B-3R) \\ M_{BA} &= \frac{2EI}{h}(2\theta_B+\theta_A-3R) \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(1)$$

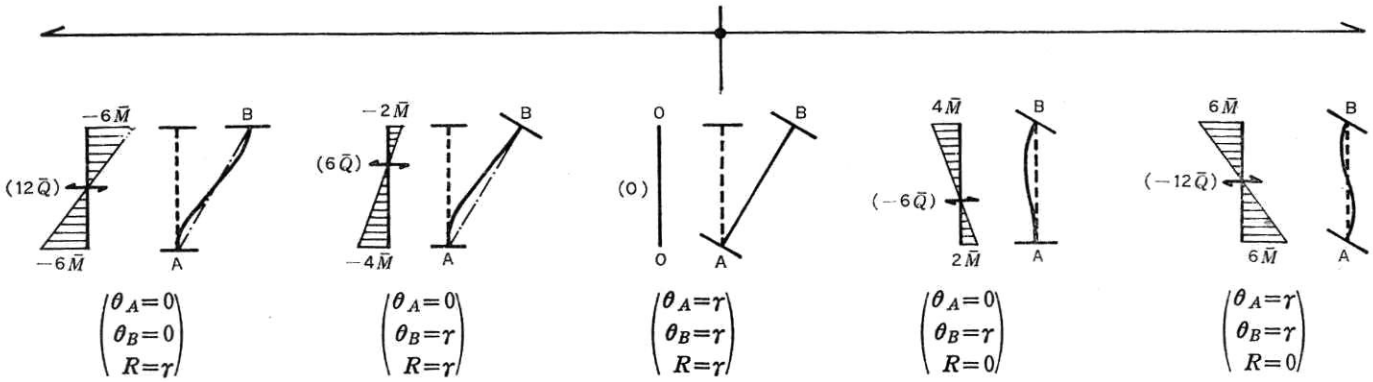
部材の変形が曲げによるものだけで，せん断変形や剛域を考慮しなくてよい場合の撓角法の基本式は，（1）式によつて表わせる。柱に働くせん断力（Q_{AB}）は

$$Q_{AB} = -\frac{M_{AB}+M_{BA}}{h} \quad \cdots\cdots(2)$$

であるから，Q_{AB} は（3）式によつて求められる。

$$Q_{AB} = \frac{12EI}{h^2}\left(R-\frac{\theta_A+\theta_B}{2}\right) \quad \cdots\cdots(3)$$

（3）式によれば，柱頭と柱脚の節点回転角の平均値が層間変位角より大きくなつたときに逆せん断力が働くことが分る。（3）式の R，θ_A，θ_B を種々変化させた場合の変形と応力の状態を図9に示す。



$\theta_A=0$, $\theta_B=0$, $R=\gamma$　　$\theta_A=0$, $\theta_B=\gamma$, $R=\gamma$　　$\theta_A=\gamma$, $\theta_B=\gamma$, $R=\gamma$　　$\theta_A=0$, $\theta_B=\gamma$, $R=0$　　$\theta_A=\gamma$, $\theta_B=\gamma$, $R=0$

注）応力図における $\bar{M}$，$\bar{Q}$ はそれぞれ，$\bar{M}=\frac{EI}{h}\gamma$，$\bar{Q}=\frac{EI}{h^2}\gamma$ とする

図 9　柱に逆せん断力が生じるための条件：$(\theta_A+\theta_B)/2>R$
（柱のせん断変形を無視し，曲げ変形だけを考慮した場合）

このように，ラーメンの応力の流れを知るためには，さきに変形の様子を考え，それに部材の剛性を掛けるという考え方が有効である。なぜなら，応力は直接目には見えないが，変形は目に見えるからであつて，応力は節点では釣り合つているものの，曲げモーメント図等は非常に不連続な感じしか与えないのに比べ，変形の様子は非常に連続性が高く，実感として理解しやすいからでもある。いずれにしても，剛性が急変する層，つまり層間変位の高さ方向の分布が乱れている層では応力も乱れてしまうということを，常に念頭に置いておくことが大切であろう。

■ ペントハウスのある純ラーメン構造

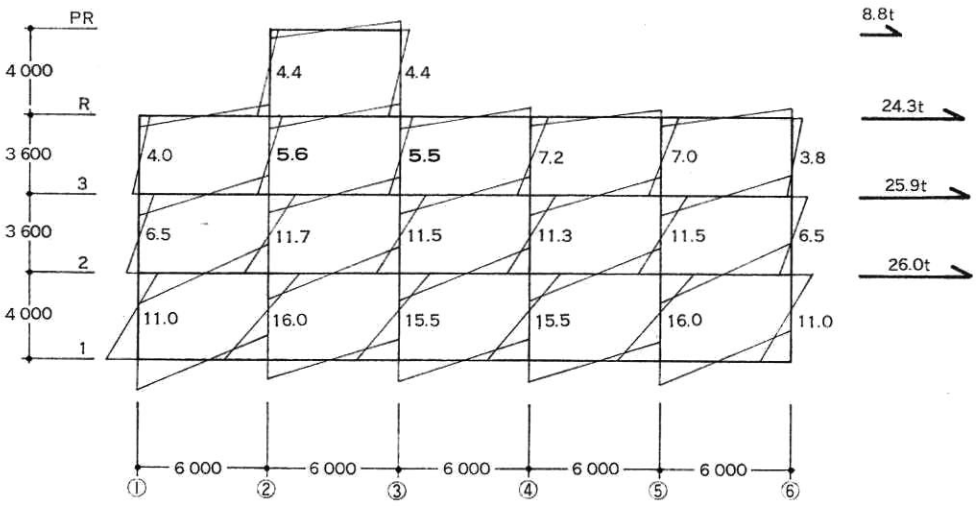
図10は，７スパン３階建の均質なラーメン構造をマトリックス変位法によつて解いた地震時の応力図である。一般には，このような建物を設計するときの柱のせん断力の分担は，①，⑥通り柱は外柱であるから，0.5～0.8程度の値を武藤式の略算法によつて求め，②～⑤通り柱は，中柱としてすべて1.0の分担率と考えるであろう。

しかし，さきに示した応力図によると，②，③通り柱の３階のせん断力が他の３階の中柱より若干少なくなつている。常識的考えによれば，この２本の柱は，ペントハウスの下部の柱であるから，他の部分より大きな力を受けるか，少なくとも他の中柱と等しいせん断力を受け持つように感じられる。常識と違う結果になつた理由は，基本的にはさきの２例と同様であるが，図11を参考にして，次のように考えられる。ペントハウスの柱脚の曲げモーメントによつて，R階の②，③通りの節点が右まわりに回転させられ，その他の部分の柱に比べ分担せん断力が減少したためである。この減少の傾向は，ＰR階に与える水平力が大きいほど強くなり，現実性はないが，この水平力を大きくすることにより問題の２本の柱の分担率をゼロにすることもできるわけである。

しかし，ここで注意しなければならないのは，もともとこれらの水平力は建物の耐震性を確かめるために仮定した値であるということである。もし，地震時の或る瞬間をとらえれば，１階からR階までが右方向へ変形していて，ペントハウスだけが左方向の力を受ける場合も充分ありうるはずであつて，このときには，②，③通りの柱は，初めに述べた常識どおり，他の中柱より大きなせん断力を受けることになる。特に，ペントハウスがホイツピング現象を起こすときには，この柱の応力はさらに大きくなると考えられる。

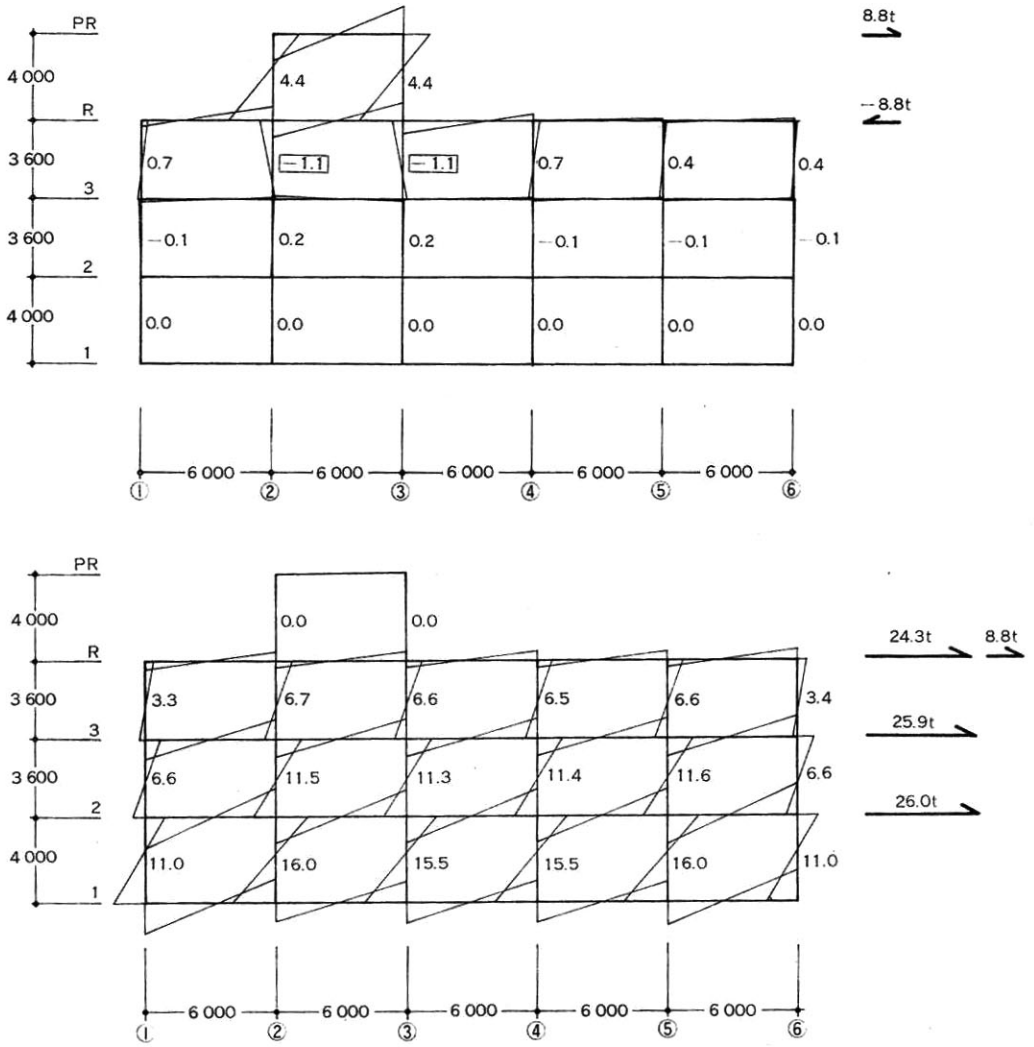
■ 解法の選択について

以上の３つの例と前回の耐震壁の逆せん断力の例で示したように，一般に行なわれているせん断力の分担率を適当に仮定



注）図中の右側の矢印は各階の水平力を示す
図中の数値はせん断力を示す

図 10　ペントハウスのある純ラーメン構造の応力図



（□は逆せん断力を示す）

注）図中の右側の矢印は各階の水平力を示し，2つの図の水平力の和も図10と一致する。図中の数値はせん断力を示す

図 11　ペントハウスのある純ラーメン構造の応力図（ペントハウスによる応力を分離して示す。図10はこの2つの応力を加えたものである。）

する方法によつて得られる応力と，かなりかけ離れた応力が，マトリックス法等の弾性解によつて得られることがある。この事実から，解法の選択について，次のようなことが考えられる。

最近では，コンピュータが手軽に使えるようになつてきたので，より現実に近い応力を求めるために，ほとんどの人がマトリックス変位法等の弾性理論による応力解析を，一度は経験しているのではないだろうか。そのような場合に，予期しなかつた応力が生じても，その結果を盲目的に信じて設計する人もいるだろうが，その応力の発生理由を理解できないために，不安を感じて従来の解法による設計に立ち戻る人もいるだろう。

コンピュータを用いて解かれた弾性応力そのもので設計ができるとは思えないが，せつかく現実に近い応力を求めようとしてコンピュータを使つたのに，また従来の方法へと戻つてしまうのは惜しいことである。

（筆者の方々・㈱日建設計構造設計主管　堀井昌博，同コンピューター部　和田　章）

■「建築技術」の発売日は毎月17日（地方により18日）です。