

## 多層構造物における架構面外の壁の力学的特性

岩 下 恒 雄

建 築 学 科

(1983年9月3日受理)

### Mechanical Properties of a Wall Built Between Two Frames in a Multi-Story Structure

Tsuneo IWASHITA

*Department of Architecture*

(Received September 3, 1983)

Here are presented the effects of a wall built between two frames on the behavior of a structure, and the shear forces carried by the wall, when the structure was subjected to lateral loads.

The kinds of structures calculated were of 24 types and 1, 2, 3, and 5 story structures, some with a wall in each story and some without.

The analyses of the frames were executed under various conditions, in which the positions of the wall, the number of the story and the rigidities of the foundation etc., were varied.

The technique of numerical analysis for the framed structures with walls and slabs is based on the displacement method using the stiffness matrix.

The wall is idealized as a single structural member which has four nodal points at the corners of the wall. Similarly, the slab is idealized as a member with six nodal points.

The results obtained were as follows;

When the structures were subjected to lateral loads the wall had considerable effect upon the behavior of the structure. Severe torsion occurred in each story when the wall was located eccentrically in the structure.

The shear forces carried by the wall in each story had values of over 80% of the total story shear. Moreover, cases often occurred in which the values were of more than 100%, and at such times reversed shear forces were caused in the columns of the story.

#### § 1 序

中低層鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計にとって耐震壁がきわめて重要であることは、論をまたない。このため、建築構造物の力学的な研究が始まって以来、耐震壁の研究は行われ、今までに多数の研究結果が蓄積されてきている。また、耐震壁を含む架構に対しても多くの研究がなされ、架構としての特性、耐震壁の効果が次第に解明されてきている。それと共に架構内の耐震壁の解析上の取扱法に対してもブレース置換や剛域をもつ線材置換等の提案がなされている。

一方、建築物内には、耐震壁の他に、耐震壁とは呼べないような壁、例えば開口の大きい壁や間仕切壁などが存在するのが常である。このうち、開口壁に対しては、袖壁、腰壁等も含めて研究が重ねられてきているが、その他の壁に対しては、通常、構造耐力は無いものとして、

耐震設計上は無視されることが多い。この無視することが構造物にとって安全側に働いてくれるならば別に問題はない。しかし、もしこの壁が架構と一体としてコンクリートを打設されたような場合は、その壁が単なる間仕切壁であってもその剛性は高く、地震時の建築物の挙動に影響を与えることが予想される。今回施行された新耐震設計法では、これらの壁を雑壁と呼び、その効果を考慮に入れて耐震設計を行うこととしているが、この雑壁に関しては、ほとんど不明のままである。

本報告は、雑壁の一つである図-1のごとき架構の中間に配置された鉄筋コンクリート造壁（以下、中間壁と呼称）を対象とし、既に開発してきた立体架構解析法をさらに改良し、これによって中間壁の力学的特性を明らかにしようとするものである。なお、1層の場合は報告済であり、本報告では多層の場合を主対象とし、層数、壁位置、基礎の固定度等の影響を検討した。また、解析はすべて弾性範囲を扱っている。

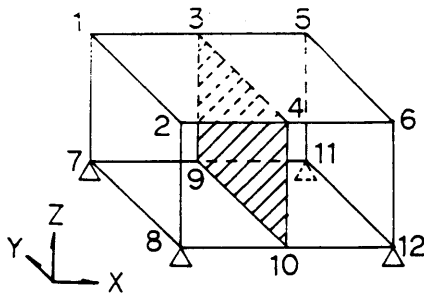


Fig. 1 The wall built between two frames

## § 2 解 析 法

解析法は変位法に基づいている。通常の柱，はりに対しては，一般の方法により 1 節点 6 自由度の剛性マトリックス (12×12) を作成する。一方，壁の取扱法は文献 1 に詳説してあるので概略のみを書けば，図-2(a)のごとく壁板および周辺のはり，柱を一体として評価することとし，はり，柱の接合部内に節点を考える。各節点

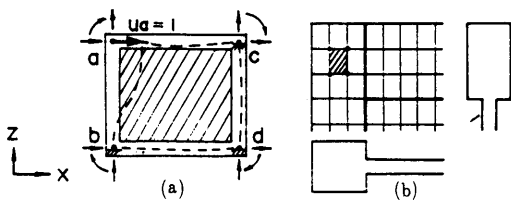


Fig. 2 Shear wall model

に対して 1 節点 3 自由度 (x, z 方向の変位および y 軸回りの回転角) を考えれば，4 節点で代表される壁の剛性方程式は，次式で表わされるはずである。

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \\ P_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{a1} & K_{a2} & \cdots & K_{a12} \\ K_{b1} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ K_{d1} & \cdots & \cdots & K_{d12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_a \\ \delta_b \\ \delta_c \\ \delta_d \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで

$$\begin{Bmatrix} P_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_i \\ Z_i \\ M_{yi} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \delta_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} K_{ij} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{xj} \\ K_{zj} \\ K_{Myj} \end{Bmatrix}$$

X, Z,  $M_y$ : 各々 x, z 方向の節点力および y 軸回りの節点モーメント

u, w,  $\theta_y$ : 各々 x, z 方向の節点変位および y 軸回りの節点回転角

ここで，上式の [K] の各列の要素  $[K_{ij}]$  は，ある節点で，ある一つ方向にのみ単位の強制変形を与えた場合に各節点に働くべき外力 (反力) を表すはずである。壁体のこのような変形に対する外力は，壁を弾性体として扱っている限り単純な強制変形問題であり，有限要素法により容易に求めることができる。実際には図-2(b)のごとく矩形要素に分割し，ハッチ部を一つの節点と考え，(12×12) の壁の面内用剛性マトリックスを求めている。

以上の概念は，壁の面に垂直に荷重が働く場合にも適用できる。この問題は通常スラブの問題であり，この場合の(1)式の節点力，節点変位の内容は

$$\begin{Bmatrix} P_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_i \\ M_{xi} \\ M_{zi} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \delta_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{zi} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Y,  $M_x$ ,  $M_z$ : 各々 y 方向の節点力，x, z 軸回りの節点モーメント

v,  $\theta_x$ ,  $\theta_z$ : 各々 y 方向の節点変位，x, z 軸回りの節点回転角

この面外用剛性マトリックス (12×12) も有限要素法により求めることができる。

以上の 2 種類の剛性マトリックスを重ね合わせることに，1 節点 6 自由度の壁の剛性マトリックス (24×24) を決定することができる。なお，面内力と面外力は互いに独立と仮定している。

立体架構内のスラブは，以上の壁が水平に置かれた場合と同様であり，同一手順により剛性マトリックスを作成することができる。

ここで，既報<sup>2),3)</sup>では，図-1 のスラブは中間壁の左右で別のスラブと考えたが，この方法では中間壁が片側に寄った場合に，計算精度の低下が心配される。このため，今回は全体を一枚のスラブとし，6 節点を持つ部材として扱うこととした。6 節点スラブの剛性マトリックスの作成手順は，(1)式を 6 節点用に拡張すれば良く，その結果，(36×36) のスラブの剛性マトリックスが得られる。

以上により得られた各部材の剛性マトリックスを重ね合わせれば，構造物全体としての剛性方程式を作ることができ，与えられた境界条件のもとに解けば，各節点変位，ついで各部材の応力を求めることができる。

### § 3 解析対象

多層構造物の中間壁の影響を検討するため、3層の場合を主な対象とした。架構の形状としては図-3に示した6 Typeを含め、表-1の19種類、この他に壁のない場合(記号R, 4種類)、1層で両側に壁のある場合(B')を扱った。また、各 Type に対して中間壁の位置は図-4、表-2の4種類とし、 $l_1 = 4 \sim 6$  mは左右対称性を利用している。

各部材の寸法等は表-3の通りとし、各階とも同一部材を使用している。中間壁は平板とし、 $l_1 = 0$  mの場合も他との比較のため、柱+平板としている\*。壁厚は15cmのものを基準とし以下の結果は特に断わらない限り15cmに対する結果である。

部材のヤング係数はすべて  $E = 21 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  とし\*\*

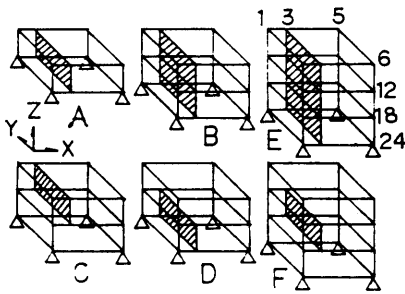


Fig. 3 Analyzed model types

Table 1 Types of analyzed structure

層数	記号	壁配置層	層数	記号	壁配置層
1	A	1	5	L	1, 2, 3, 4, 5
2	B	1, 2		M	5
	C	2		N	4
	D	1		O	3
3	E	1, 2, 3		P	2
	G	3		Q	1
	F	2		S	2, 3, 4, 5
	H	1		T	1, 3, 5
	I	2, 3			
	J	1, 2			
	K	1, 3			

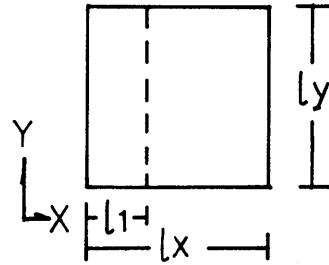


Fig. 4 Position of walls

Table 2 Position of the wall

記号	0	1	2	3
$l_1$ (m)	0	1	2	3

Table 3 Assumed values of member (cm)

$l_x, l_y$	Height	Column	Beam	Wall	Slab
600	350	60×60	30×60	15	15

解析はすべて弾性範囲内としている。柱脚の支持条件はピン支持および100, 500, 1000, 3000 (t/cm)の弾性バネ支持の5種類を扱った。

各層に与えた荷重は各階同一の静的な水平荷重(P)のみとし、かつ、柱頭、壁頭の各節点にそれぞれ負担面積に応じて配分した。

### § 4 解析結果

#### 4-1 y方向水平外力による変形

図-5は1層の Type A が中間壁と平行な y 方向の水平力を受けた場合の水平変形図である。図は中間壁の影響がきわめて強いことを示し、壁が偏在すればするほど、平面的な振れが顕著にあらわれている。なお、スラブは中間壁の上部でへ字形に変形するが、その差は少く、全体的にはほぼ剛体的な変形を示している。

図-6は、3層の Type E の左隅節点(1, 7, 13)および壁頭節点(3, 9, 15)の荷重方向の変形  $v$  と中間壁の位置  $l_1$  との関係を示す。前図でも明かなように、壁が左右どちらかのラーメンに近づくにつれ振れの影響が強くなり、剛心より遠い柱が大きく振り回されることを示している。

図の柱頭および壁頭それぞれの節点変位曲線の傾向は、他の Type、すべての階で共通している。ただ、壁

\*  $l_1 = 0$  m の場合は柱と壁は一体として働くはずであり、工形断面とすれば、変形は各層とも約 8% 減、負担せん断力は約 3% 増となる。

\*\* 以下の変形の諸図では E 単位に換算してある。

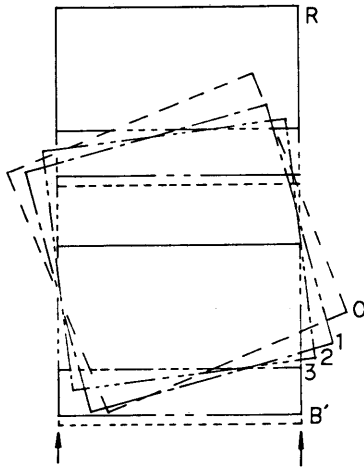
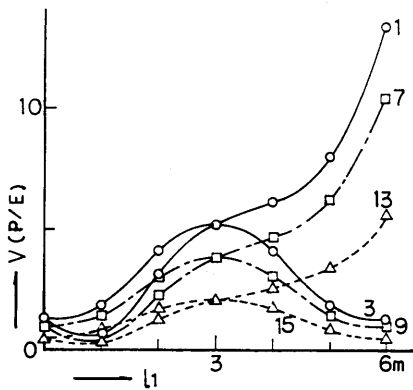


Fig. 5 Deformation of structures

Fig. 6 Nodal point displacements  $v$  in Y direction

が存在しない階、例えば、Type C の 1 階（以下記号として  $C_1$  などと表わす）、 $D_2$ 、 $F_3$ 、 $F_1$  などでは、右上りの柱頭節点の曲線がゆるやかな勾配を示している。

前図-5 の変形が剛体変形に近いことから、変形の概要を把握するため、平均水平変位  $v_0$ （四隅の水平変位平均値）および平均回転角  $\theta_0$  を図示したのが、図-7、図-8 である。図より  $v_0$  は上層ほど中間壁の位置の影響を受け、また、中央でなく、いくらか左右にずれた場合に变形量が減少し、極端に左右に寄ればまた变形が増大する。これに対し、下層では中間壁の位置にそれほど影響されず、ほぼ一定値を示している。

一方、 $\theta_0$  と  $l_1$  の関係は直線的であり、捩れ角  $\theta_0$  は壁の位置とほぼ比例関係にある。

中間壁の偏在により捩れが生ずることから、Type E の柱頭節点の荷重方向の変位  $v$  と、直交方向の変位  $u$  を比較して示したのが、図-9 である。図で、 $l_1 = 2$  m

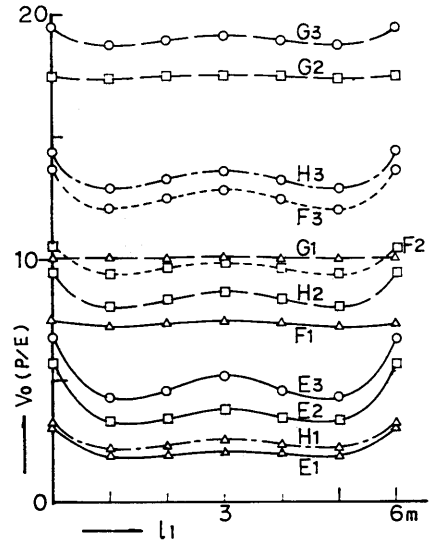


Fig. 7 Mean values of displacement

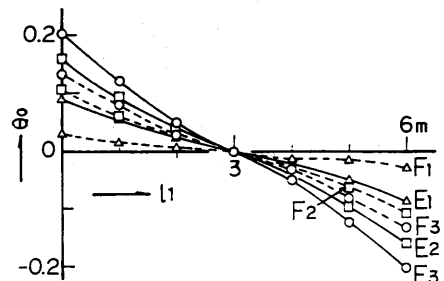


Fig. 8 Mean values of rotation angle

以上では荷重方向の変位の方が大きい、2 m 以下、すなわち壁が柱に近い場合は直交方向の変位（絶対値）のほうがかなり大きくなっており、捩れによる直交方向への影響が無視できないことを示している。（図-5 参照）

図-10 は高さ方向の变形状態を見るために、3 層の各 Type につき、中間壁が中央に位置する場合 ( $l_1 = 3$  m) の平均水平変位  $v_0$  を示したものである。図の直線の傾斜から壁の存在階が明瞭にわかるが、さらに各階の相対変位  $\Delta v$  を計算し、Type 別に図示したのが図-11 である。図の縦軸を階高（=350 cm）で割れば部材角であるが、図の他に 2 層、5 層の各 Type についての結果も参照して、次のことが言える。

壁のある階の部材角が小さいことは当然として、考えている階の直下階に壁が存在すれば、その階の部材角は減少する。これは下階の壁の立面的な回転角が上階の变形を拘束するためと思われる。これと同様に、直上階に壁がある場合もその階の部材角は若干減少する。また、

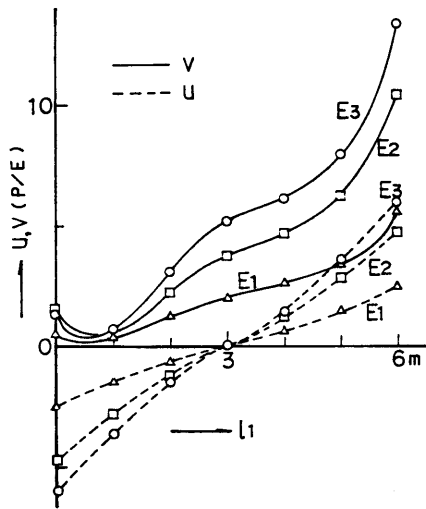


Fig. 9 Nodal point displacements in X and Y direction

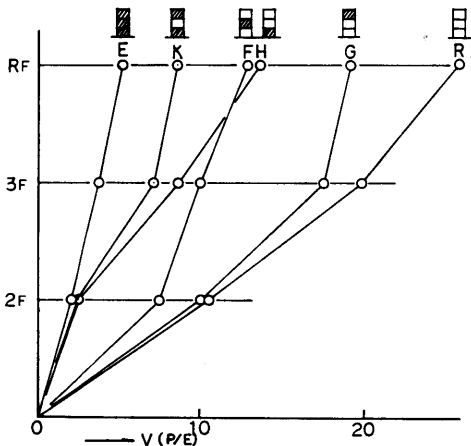


Fig. 10 Deformation of structure

この壁の影響は、直上、直下階までで、それ以上離れた階への影響は少ない。

これらのことは、壁が左右のラーメン内に一体として組み込まれていれば当然のことと思われるが、2つのラーメン間に位置する場合でも成立している。

#### 4-2 y 方向荷重による応力

中間壁が構造物の水平変形に強く影響を与えている以上、中間壁がかなりの水平力を負担していることが予想される。この中間壁および柱の負担せん断力を水平力分担率の形で表したのが以下の諸図である。なお、図中  $E_i$  とは Type E の  $i$  階の柱または中間壁の水平力負担率（他も同様）をあらわす。

図-12は1, 2層の場合、図-13は3層の場合を示す。両図とも傾向はきわめて良く似ており、一番下の曲線群

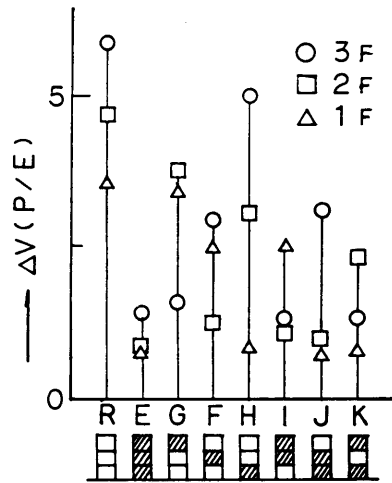


Fig. 11 Relative story displacement in each type ( $l_1=3m$ )

が中間壁の左側の柱1本当りの分担率、上部の2群が中間壁のせん断力負担率である。この2群のうち、中間の1群は最下層の壁およびそれより上階に連続する、いわゆる連層壁タイプの壁の負担率を表わし、最上部の一群はその壁の直下階に壁がない場合を示している。この3群に分れる傾向は、図は省略したが、5層の場合でも全く同様である。

この2図で明かなように、中間壁は何階にあらうと、また、架構間のどの位置にあらうと、言い換えれば振れが生ずると否とに拘らず、大凡80%以上の水平力を負担し、4本の柱はこの残りの水平力を分担することになる。

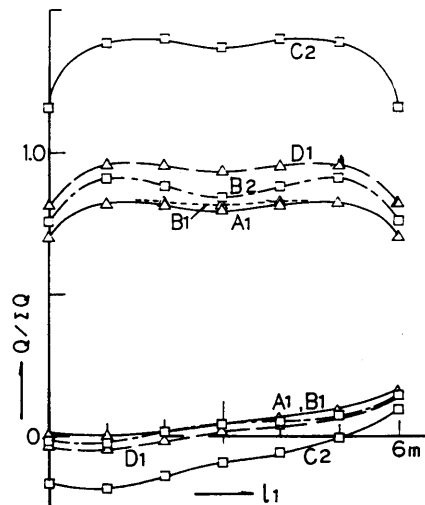


Fig. 12 Ratio of shear force carried by wall and column to total shear force in one and two story frames

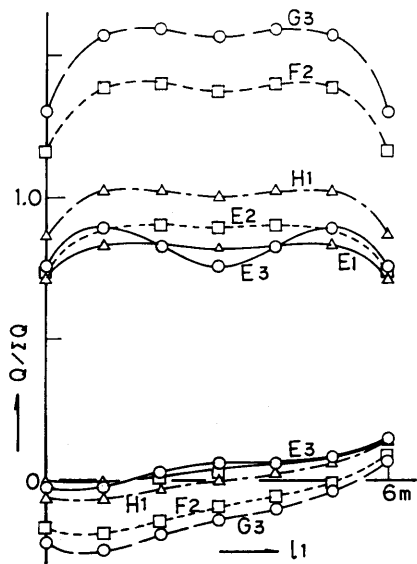


Fig. 13 Ratio of shear force carried by wall and column to total shear force in three story frames

この中で、とくに直下階に壁がない中間壁では、外力の1.3~1.5倍もの水平力を負担してしまい、そのため柱には逆向きの大きなせん断力が発生する。この逆向きのせん断力は、通常の連層耐震壁でも最上層近傍で発生する現象であるが、この中間壁では2層、3層といった低層の場合にも生じており、特異な現象といえる。いずれにしても、中間壁がこのような大きなせん断力を負担することは、その良否は別として、十分注意することが必要である。

つぎに、この2図で、中間壁の水平力負担率はそれほど壁の位置  $l_1$  の影響を受けていないので、各曲線を  $l_1 = 3\text{ m}$  の値で代表されるものとし、Type 別にこの値を比較したのが図-14である。上述のことを含めて、この図より以下のことが言い得る。

- 1) 直下階に壁がない場合の中間壁の水平力負担率は、130%~150%ときわめて高く、柱には大きな逆せん断力が生ずる。
- 2) 直上階に壁がない場合の負担率は中程度で、80~100%である。
- 3) 直下階に壁がある場合の中間壁の負担率は概して小さいが、それでも70~90%の水平力を負担する。

また、一般に、壁のせん断力負担能力を建物内の内柱1本に対する水平力分担係数の形で表わすことが多い。ここで取り上げた中間壁の場合は、内柱に相当する柱を決定しにくい、中間壁が中央に位置する場合 ( $l_1 = 3\text{ m}$ ) について

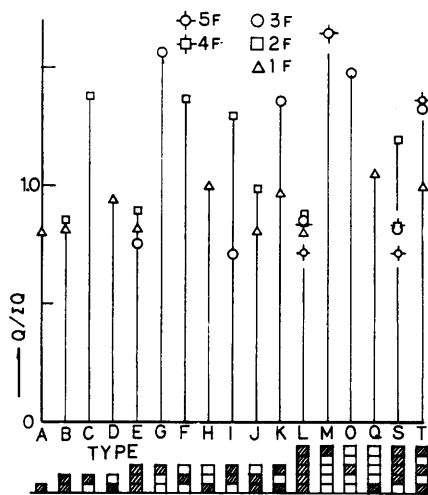


Fig. 14 Shear force ratio of wall ( $l_1 = 3\text{ m}$ )

$$\text{水平力分担係数 } n = \frac{\text{壁の負担せん断力}}{\text{柱1本の負担せん断力}}$$

と仮定すれば、図-14でもつとも壁の負担せん断力が少ない I Type 3 階壁の場合

$$n = 9.85$$

となる。この他の場合は、壁の負担せん断力が大きいので、 $n$  値はさらに大きい\*。

$l_1 \neq 3\text{ m}$  の場合の壁の負担せん断力は、前図-12, 13 で明らかなように、壁が両側のラーメンの極く近傍にある場合を除いて、 $l_1 = 3\text{ m}$  の負担せん断力より大きい。したがって、この場合の  $n$  値の定義はむづかしいが、一応、中間壁の水平力分担係数は約10以上と考えるのが適当と思われる。

以上の中間壁と協力して働く柱の水平力分担率を、一部の柱について拡大して画いたのが図-15である。図の縦軸の負領域が逆せん断力を表わすが、図で明らかなよ

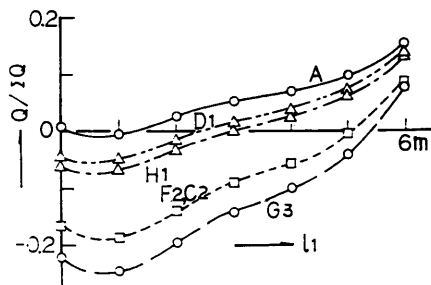


Fig. 15 Shear force ratio of column

\* 図の縦軸が1.0を超す場合、すなわち、柱に逆せん断力が生ずる場合は、別の解釈が必要である。

うに、かなりの範囲で負の値を示し、かつ、この値はかなり大きい、とくに G Type の 3 階では、正方向の 3 倍以上の逆せん断力が生じている。

図-16は振れの結果、柱に生ずる荷重と直角方向のせん断力を図示したものである。この場合は応力の符号はあまり問題にはならない。応力の大きさは、前図と比較してほとんど同程度となっており、変形の場合と同様、直交方向への注意が必要であることを示している。なお、図では  $E_2$ ,  $E_1$ ,  $F_2$  等の曲線を省略しているが、これらはすべて図の曲線群の間に入っている。

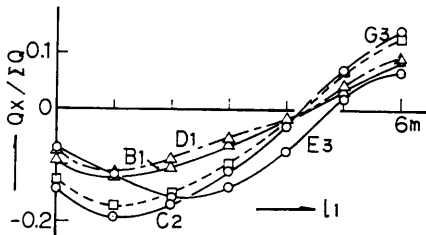


Fig. 16 Shear force ratio in X direction carried by column because of torsion

#### 4-3 地盤、壁厚の影響

以上の諸図は柱脚の支持条件をピンとした結果であるが、この支持条件の固定度の影響を検討したのが、以下の諸図である。

図-16は、図-7でとり上げた架構の平均水平変位  $w_0$  と地盤のバネ定数  $K_v$  の関係を、3層ラーメン (R), 3層 E Type について図示したものである。図で明かなように、 $K_v$  が極端に小さい場合、すなわち、とくに軟弱な地盤では、構造物の変形は非常に大きくなる。し

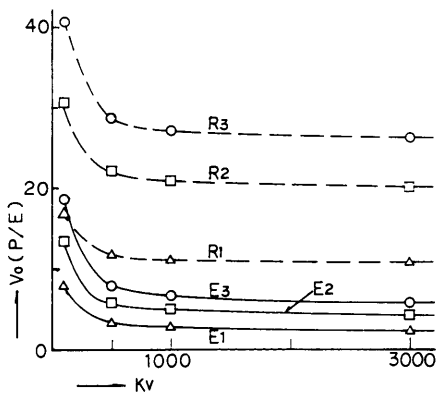


Fig. 17 Relationship between mean displacement and spring constant of foundation

かし、ある程度以上硬い地盤では、各階の変形はほぼ一定となり、ピン支持の値に近づく。

この傾向は他のすべての Type についても同様であるが、ここで、各曲線がピン支持の値に収束することから、ピン支持の値を基準値として比率で表わしてみると、 $K_v > 1000 \text{ t/cm}$  の範囲では  $1 \sim 1.4$ ,  $K_v = 500 \text{ t/cm}$  で  $1.1 \sim 1.7$  の値を示している。また、この比率は、地盤に対して相対的に硬い Type (B, E, L) ほど大きな値となっている。

図-18は、水平力分担率と  $K_v$  の関係である。図は  $l_1 = 3 \text{ m}$  のもので比較したが、分担率の場合は一定の荷重を柱と壁でどう分担するかという関係であり、変形の場合ほど顕著な変化は見られない。とくに軟弱な  $K_v = 100 \text{ t/cm}$  の場合を除いて、どの壁もほぼ一定の分担率を示し、この比較に関しては地盤の影響は少ないと言える。

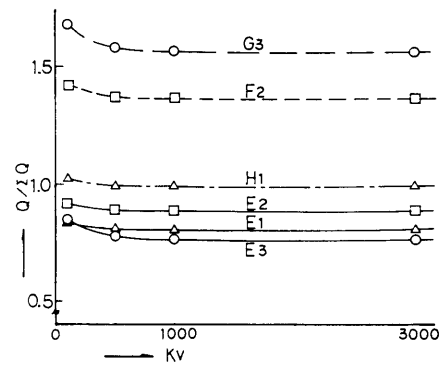


Fig. 18 Effects of spring constant on shear force ratio of wall

今までは中間壁の壁厚を  $15 \text{ cm}$  としたが、中間壁はそれほど重要な壁ではない場合が多いと思われる。したがって、壁厚としてはもっと薄いものが使用される場合があるはずであり、壁厚  $12 \text{ cm}$ ,  $10 \text{ cm}$  の場合を補足して検討を行った。

図-19(a)は3層壁の壁厚と変形の関係図である。図の縦軸は中間壁が中央にある場合の平均水平変位  $w_0$  であるが、図に見られるように、壁厚の影響はあまり表れない。Type E の 3 本の値から全階の平均的な比率を求めると、次の値となる。

$$w_{0.15} : w_{0.12} : w_{0.10} = 1 : 1.04 : 1.08$$

したがって、壁厚を 5 割増しても、架構の剛性は 8 % 程度しか増加しない。

図-19(b)は水平力分担率と壁厚の関係であるが、この場合もほとんど変化は見られず、この程度の壁厚の増減は水平力分担率とは無関係といえる。なお、壁厚が減

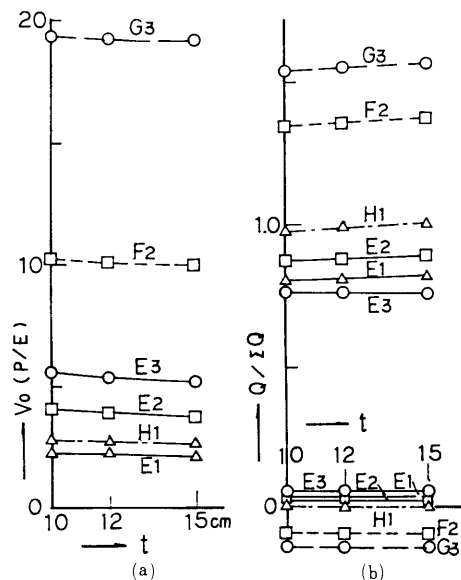


Fig. 19 Effects of wall thickness on displacement and shear force ratio

少すれば負担せん断力が僅かでも減少するのが普通であるが、図中の  $E_3$  曲線は、ほんの僅かながら逆の傾向を示している。

結局、壁厚のこの程度の増減は変形、部材応力に対して、ほとんど影響を与えないと言える。このことは逆に言って、壁厚を若干厚くしても架構の剛性は大きく、壁への応力集中もほとんど変わらない。それでいて、厚さを増加すれば壁としての耐力の上昇は期待できるので、中間壁の壁厚を変えることが有効になることもあり得るといえる。

#### 4-4 x方向水平外力の場合

中間壁の面に垂直な方向に外力が加わった場合の中間壁の効果を検討したのが、図-20である。図は E Type の柱、壁のせん断力分担率である。この場合は  $l_1$  の如何にかかわらず左右対称であり、建物に振れは生じない。図以外の場合も含めて、x 方向外力の場合は壁はほとん

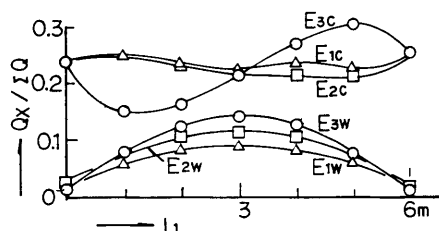


Fig. 20 Shear force of wall and column for lateral load in X direction

ど水平力を負担せず、壁がもっとも多く水平力を負担する図の  $E_3$  の場合でも、全体の約17%を負担するに過ぎない。この値は柱に換算すれば、柱0.8本分にしか相当せず、したがって、壁面に垂直方向の検討では、中間壁の効果は期待できないと考えるのが適当である。

## § 5 結 論

2つのラーメンの間に配置される壁は、今回の新耐震設計法では架構面外の雑壁の一種類として取り扱われている。しかし、この中間壁が架構と同等の剛性を持つ場合は、構造物の挙動にかなりの影響をもつと思われる。このため、3層の場合を中心として、中間壁が構造物の剛性、応力に及ぼす影響について検討を行った。結果として判明した主な事項は、次の通りである。

1. 中間壁は建物全体の变形に強く影響し、中間壁が偏在すると、かなり振れが生ずる。
2. 中間壁は、各層で一般に80%以上の水平力を負担する。とくに、考えている階の直下階に壁がない場合は、その中間壁には層せん断力以上のせん断応力が発生する。また、この結果、その階の柱には大きな逆向きのせん断力が生ずる。
3. とくに軟弱な地盤を除き、地盤の剛性の変化は、中間壁の効果にそれほど影響を与えない。また、中間壁の壁厚変化の影響も少ない。
4. 以上のことから、中間壁は雑壁とは呼ばれるが、構造物に及ぼす影響が強く、その取扱いには十分注意することが必要である。

謝辞 本研究を進めるに当たり、文部省科学研究費の援助を受けた、また、解析プログラムの作成、結果の整理は舟岡英明君（銭高組）および岩田浩英君の努力に負うところが多く、ともに厚くお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 岩下恒雄：壁とスラブを含む架構の解析（第1報）日本建築学会論文報告集第253号 昭52. 3
- 2) 岩下恒雄：中間に配置された耐震壁の力学的特性 日本建築学会東海支部研究報告14号 昭51. 1
- 3) 岩下恒雄：中間に配置された壁の力学的特性 日本建築学会学術講演梗概集 昭51. 10
- 4) 日本建築センター：構造計算指針・同解説（1981）