

## 論文

## [2217] ピロティ式 RC 造建物の地震時立体弾塑性挙動

傅 金華\*<sup>1</sup>・柴田 明德\*<sup>2</sup>・井上 範夫\*<sup>3</sup>・斉藤 大樹\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

近年、駐車場不足を解消するため、住棟1階に駐車場を設置し、1階の耐震壁を取り除いた建物、いわゆるピロティ式建物(混用構造とよぶケースもある)が数多く建てられている。本研究の対象となる中・高層混用構造では、桁行き方向を純ラーメン構造、張り間方向を1階ピロティのある連層耐震壁構造としている。試設計における崩壊機構は、桁行き方向では梁崩壊型の全体降伏機構を想定し、張り間方向では2層耐震壁部のせん断降伏機構を想定している。桁行きと張り間方向の構造形式や期待する耐震性能が異なることから、地震時には両方向の架構が連成する複雑な弾塑性挙動を示すものと予想される。本解析では、1方向静的及び2方向動的地震入力を受ける立体骨組モデルを解析することにより、1階にある耐震壁及び柱のせん断力の負担率、スラブのせん断応力度及び柱の軸力変動を検討した。

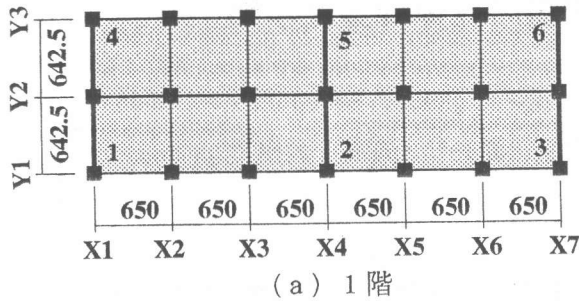
## 2. 解析モデル

本解析は中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説に基づいて設計した8階建の鉄筋コンクリート造(RC造)の試設計建物を解析対象とする。図1に建物の1階及び2～8階の平面図を示す。建物の1、2階の階高は4.65mと3.00mで、3階以上は2.75mである。建物の弾塑性挙動をできるだけ忠実に捉らえるため、本研究では、建物全体を立体骨組としてモデル化した。骨組の解析には、立体弾塑性骨組解析プログラムSTERAを用いた[1]。ここで、剛床仮定を用い、すべての部材はその端部に剛域を持った線材に置換し、剛域の位置は部材の接合部の面までとした。表1に建物の各部材の断面寸法と配筋を示す。建物の各部材の主筋の降伏強度は $\sigma_y=4400\text{kg/cm}^2$ 、せん断補強筋の降伏強度は $\sigma_y=4000\text{kg/cm}^2$ 、1～6階のコンクリート強度は $F_c=240\text{kg/cm}^2$ 、7～8階のコンクリート強度は $F_c=210\text{kg/cm}^2$ である。また、建物の各層単位あたりの重量は $1.26\text{t/m}^2$ である。

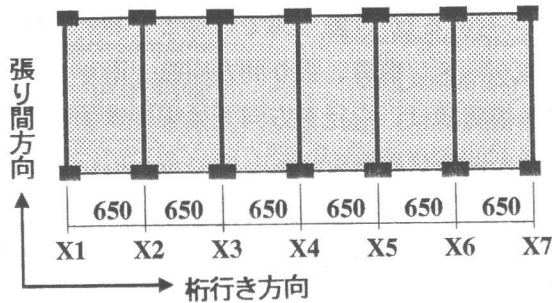
建物を構成する各部材の塑性域に及ぶ挙動を捉らえるため、梁・柱・壁のそれぞれの部材に弾塑性部材モデルを用いている。梁には1方向曲げに対する材端弾塑性曲げバネモデルを、また、柱には、2方向曲げと軸力の相互作用を考慮できる材端多バネモデル(MSモデル)を用いている。耐震壁については、耐震壁方向および両側柱の壁直交方向の曲げ・軸力相互作用を考慮できる材端多バネモデルを用いている。また、全ての部材中央には、弾塑性せん断特性を表すせん断バネを付けている(図2)。図3の(a)、(b)は、柱及び耐震壁の材端弾塑性バネに用いられた鉄筋及びコンクリート要素の力-変形関係を、(c)は梁端要素の曲げモーメント-回転角関係、(d)は各部材のせん断要素バネに用いたせん断力-せん断変形角の関係を示す。

解析対象とする建物の支持条件は杭支持とした。杭長は20m、杭径は1.5mである。本研究では、この基礎杭が上部構造に及ぼす影響をシミュレーションするため、すべての基礎杭を弾性鉛直バネにモデル化した。文献[2]に従い、基礎バネの軸方向の剛性を $1465\text{t/cm}$ とする。

\*1 ピー・エス技術部、工博(正会員) \*2 東北大学教授 工学部建築学科(正会員) \*3 東北大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員) \*4 東北大学助手 工学部建築学科、工博(正会員)



(a) 1階



(b) 2～8階

図1. 建物の平面図(単位:cm)

3. 張り間方向の弾塑性静的増分解析  
 水平地震力に対する建物の耐力と変形性能及び各部材の負担せん断力の割合などを調べるため、建物モデルの弾塑性静的増分解析を行った。解析において、 $A_i$ 分布による水平力を外力として与え、その分布形を常に一定に保ちながら漸増載荷を行い、ある層の層間変形角が $1/30$ を超えた時点で、解析を打ち切った。

### 3.1 層せん断力一層間変形角の関係

建物の張り間方向の層せん断力一層間変形角の関係を図4に示す。図中の●は2階耐震壁のせん断降伏点で、4本の破線はそれぞれベースシア係数 $C_B$ が0.25、0.50、0.75及び2階の耐震壁にせん断降

伏を生じた時点( $C_B=0.90$ )である。2階の耐震壁にせん断降伏が起こったことにより、2階に大きな変形が集中し、その他の層の変形の増加は小さくなった。

### 3.2 各フレームの負担せん断力

図5に層ごとの各フレームの負担せん断力を示す(建物の平面配置が対称であるため、ここでは左半分のフレームX1～X4の結果のみを示す)。図(a)(b)(c)(d)はそれぞれベースシア係数が0.25、0.50、0.75及び2階の耐震壁にせん断降伏を生じた時点である。この建物の張り間方向では、2階以上は全て耐震壁であるが、1層には3構面の耐震壁フレームと4構面の純ラーメンフレームがあるため、1階では応力再配分を生じる。つまり、フレームX2、X3(純ラー

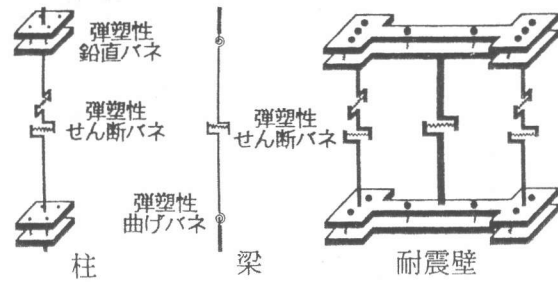
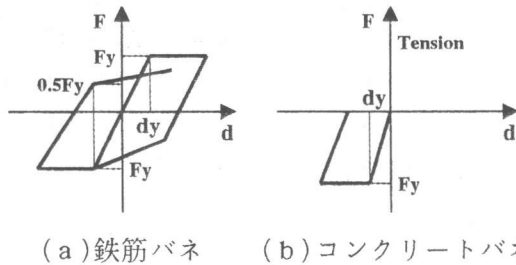
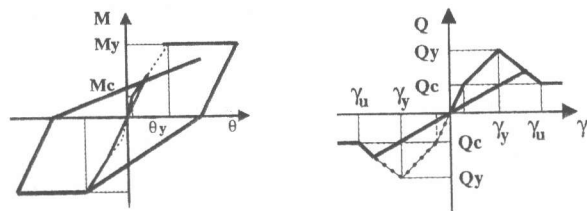


図2. 部材モデル



(a) 鉄筋バネ

(b) コンクリートバネ



(c) 曲げバネ

(d) せん断バネ

図3. 復元力モデル

表1(a) 柱、梁の断面寸法及び配筋(単位:cm)

階数	1		2		3~5		6		7		8~R	
	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋
柱	80×100	22-D29	60×120	12-D29	60×70	11-D29	55×70	9-D29	55×70	7-D29	50×70	4-D29
梁												

表1(b) 耐震壁の断面寸法及び配筋(単位:cm)

階数	1		2		3~4		5		6		7~8	
	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋	断面	主筋
耐震壁柱	80×100	10-D29	60×180	10-D29	60×180	10-D29	55×180	10-D29	55×180	8-D29	55×180	8-D29
耐震壁壁板	壁厚 35		20		18		18		18		18	
	縦筋	D10@25	D10@25		D10@25		D10@25		D10@25		D10@25	

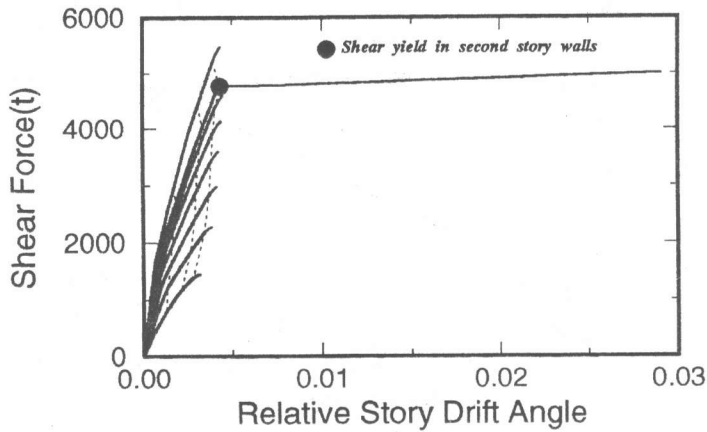
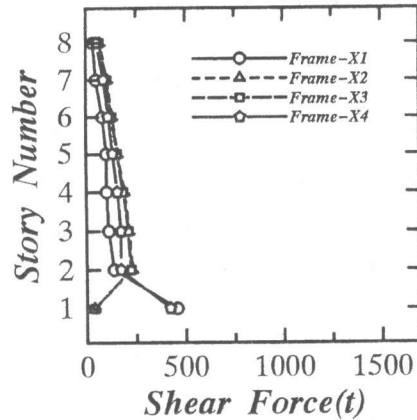
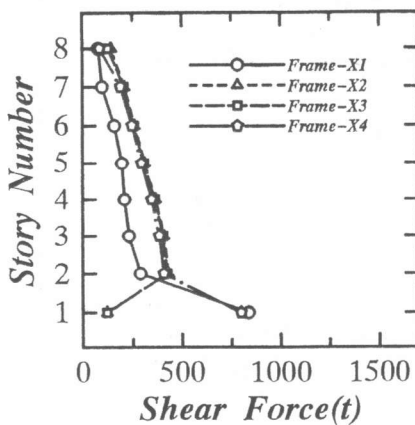


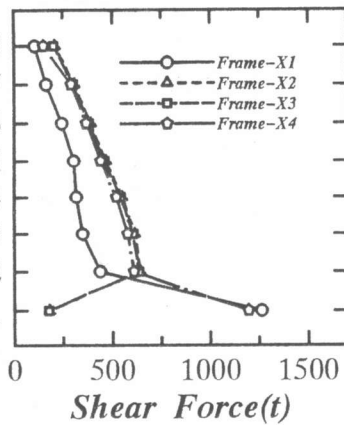
図4. 層せん断力-層間変形角の関係



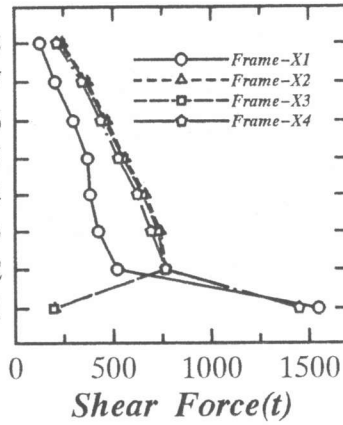
(a) CB=0.25



(b) CB=0.50



(c) CB=0.75



(d) CB=0.90

図5. 各フレームの負担せん断力

ンフレーム)における柱のせん断力は急激に減り、その代わりに、フレームX1、X4(壁フレーム)にある耐震壁のせん断力は急に増えている。

### 3.3 1階の耐震壁及び柱のせん断力

図6に1階の妻壁と中央壁のせん断力を示す。図中の実線は妻壁、点線は中央壁のせん断力であり、●は2階耐震壁にせん断降伏を生じた時点である。この図から、1階にある3構面の耐震壁はおおよそ同じ大きさのせん断力を負担していることが分かった。また、図7に1階の全部材層せん断力の総和、耐震壁及び柱の負担せん断力を示す。図中の太い実線は全部材の層せん断力の総和、細い実線は3構面耐震壁のせん断力和、そして点線は12本柱のせん断力の和である。この図から、1層の大部分のせん断力は耐震壁により負担していることが分かった。図8に1階の耐震壁及び柱のせん断力負担率を示す。実線は3構面の耐震壁せん断力の負担率で、点線は12本の柱のせん断力の負担率である。この図を見ると、1層にある3構面の耐震壁が約80~85%の層せん断力を負担していることが分かった。

### 3.4 2階床スラブのせん断力

以上に示した解析結果により、大きなせん断力が1階に純ラーメンのあるフレーム構面から2階の床スラブを通じて、壁フレームの構面に流れ込んだことが分かった。ここで、2階床スラブのせん断応力度を次式で求めた。

$$\tau = (Q_B - Q_T - F_L) / (bt)$$

ここで、 $Q_B$ : 1階壁フレームあるいは純ラーメンフレームのせん断力；  $Q_T$ :  $Q_B$ と同じフレームにある2階耐震壁のせん断力；  $F_L$ : 同じフレームの負担する外力（2階床スラブに作用する外力を張り間方向のフレームの数で割った結果）；  $b$ : 2階スラブの長さ（ここで、 $b=1285\text{cm}$ ）；  $t$ : 2階スラブの厚さ（ここで、 $t=18.5\text{cm}$ ）

図9はその計算結果である。フレームX1～X2の間にある床スラブにはその他の場所の3倍ぐらいのせん断応力度を生じる。また、そのせん断応力度は外力の増加につれてほぼ線形的に大きくなっていく。

#### 4. 弾塑性地震応答解析

地震動に対する試設計建物の応答性状をとらえるため、弾塑性地震応答解析を行った。本解析では、EL-CENTROと八戸港湾の2種類の地震波を用いた。EL-CENTRO波のNSと八戸港湾波のEW成分を50kineに規準化し、建物の張り間方向に入力した。また、地震動の同時性を考慮し、他方向成分に同倍率を掛けた。入力ケースは次に示すように4種類とする：

(1) 張り間方向のみに50kineのEL-CENTRO波のNS成分或いは八戸港湾波のEW成分を入力する；

(2) 45°方向のみに50kineのEL-CENTRO波のNS成分或いは八戸港湾波のEW成分を入力する；

(3) 桁行き方向のみに同倍率のEL-CENTRO波のEW成分或いは八戸港

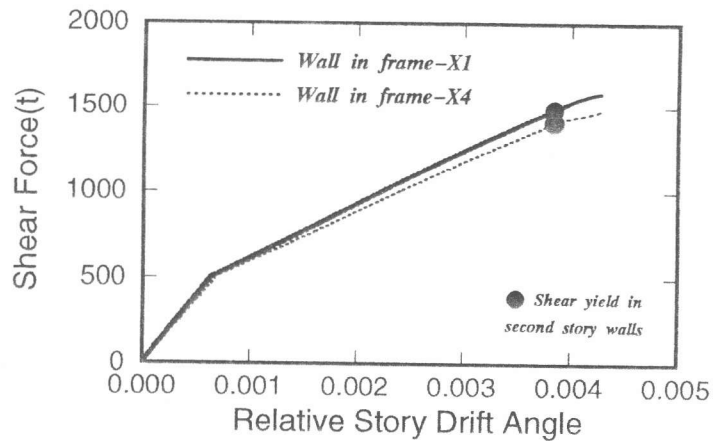


図6. 妻壁と中央壁のせん断力

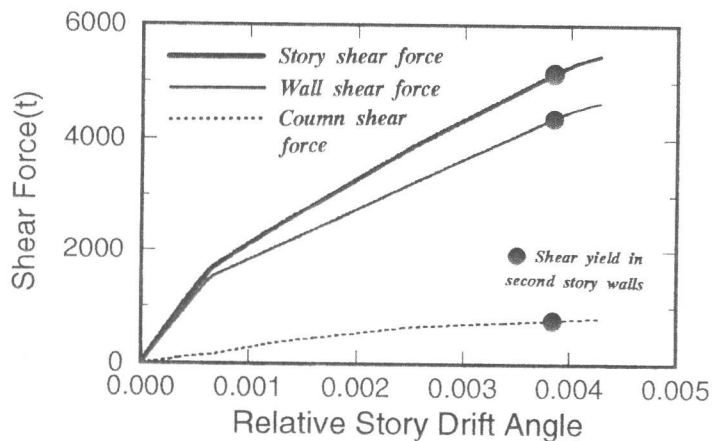


図7. 耐震壁、柱の負担せん断力

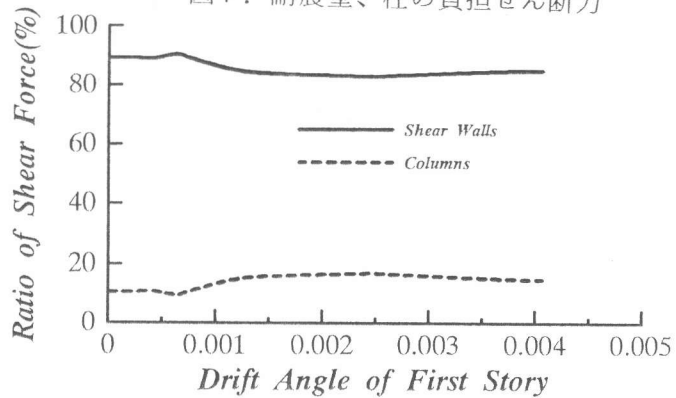


図8. 耐震壁、柱せん断力の負担率

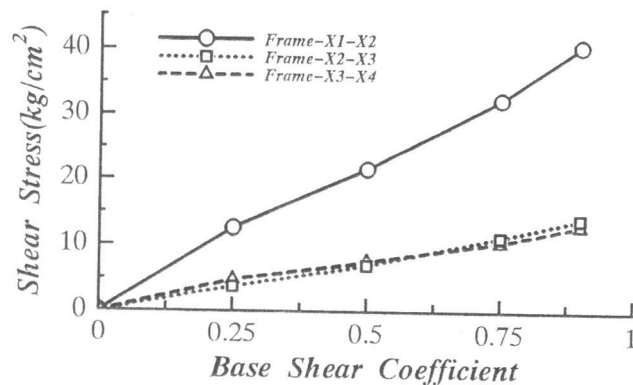


図9. 2階床スラブのせん断応力度

湾波のNS成分を入力する；

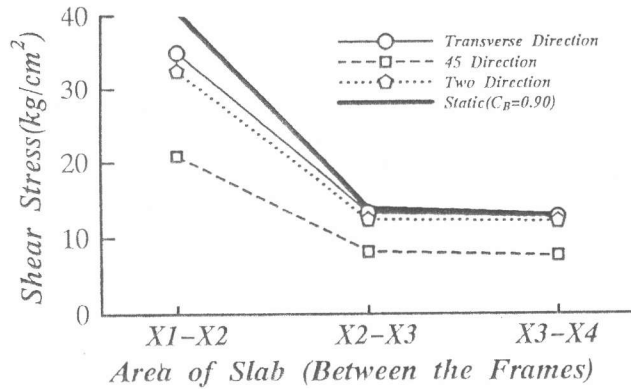
(4) 張り間方向に50kineのEL-CENTRO波のNS成分或いは八戸港湾波のEW成分を入力すると同時に、桁行き方向に同倍率の他方向成分を入力する。

#### 4.1 2階床スラブのせん断応力度

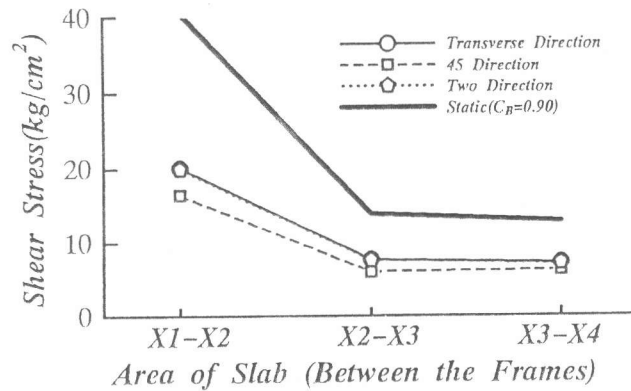
静的弾塑性増分解析と同じように、地震応答解析により、2階床スラブのせん断応力度を求めた。図10(a)(b)はそれぞれEL-CENTRO波入力と八戸港湾波入力の解析結果である。EL-CENTRO波の張り間方向及び2方向同時入力の場合、静的解析と近い結果を得た。また、どの場合でも地震応答解析の結果は静的解析と同じ傾向を示している。つまり、X2~X4の間にある床スラブのせん断応力度の分布は均一であり、フレームX1~X2の間にある床スラブのせん断応力度は最も大きく、その他のフレーム間の約3倍になっている。

#### 4.2 1階柱の軸力変動

次に、建物の1階にある3構面の耐震壁の壁柱の最大軸力を検討する。図11、12にY1及びY3フレームにある壁柱の最大軸力を示す。図11、12の(a)及び図(b)はそれぞれEL-CENTRO波及び八戸港湾波の解析結果である。図の中の柱1、3、4、6は隅柱で、柱2、5は中央耐震壁の壁柱である(図1を参照)。EL-CENTRO波の場合、張り間1方向入力と2方向同時入力を比較すると、軸力は大差がない。しかし、八戸港湾波の場合、全体的に軸力が小さいが、2方向入力の場合、隅柱1の軸力の最大値は張り間1方向入力の1.2

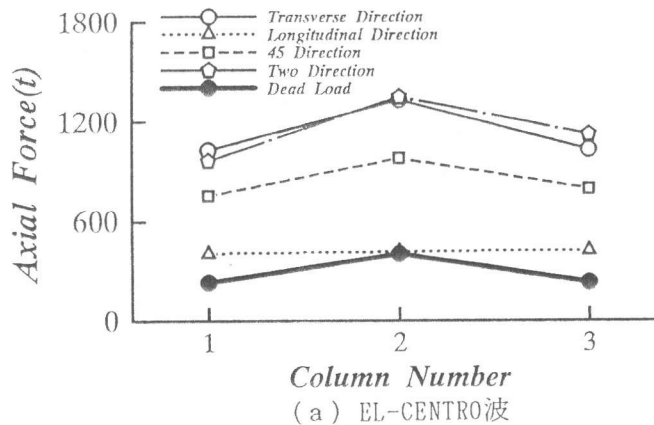


(a) EL-CENTRO波

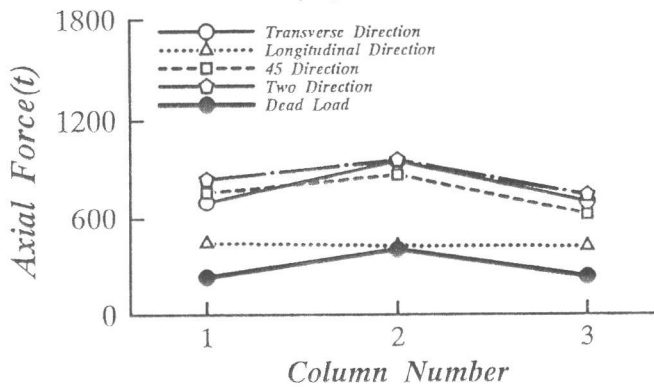


(b) 八戸港湾波

図10. 2階床スラブのせん断応力度



(a) EL-CENTRO波



(b) 八戸港湾波

図11. Y1フレームの壁柱の最大軸力

倍になっている。

## 5. 結論

本研究では、ピロティ式8階建の鉄筋コンクリート造建物を立体骨組にモデル化し、張り間方向の弾塑性静的増分解析及び地震応答解析を行った。その結果、以下の結論が得られた。

① 1階に適量の耐震壁を配置することは必要である。耐震壁により、1階層せん断力の大部分を分担し、純ラーメンフレームのピロティ部における柱の負担を軽減することができる。

② 1階の壁フレームと純ラーメンフレームの間で、上層部から伝わってきたせん断力が再配分される。2階以上の各壁フレームに作用するせん断力の差は小さいが、1階では、純ラーメンフレームのピロティ部のせん断力が激減し、大きなせん断力が壁フレームのほうに移動した。

③ 本解析では妻壁に近いスラブは中央部スラブの3倍ぐらいのせん断力を負担していることが分かった。1階でのせん断力の再配分を保証するには、この部分の剛性確保が必要である。

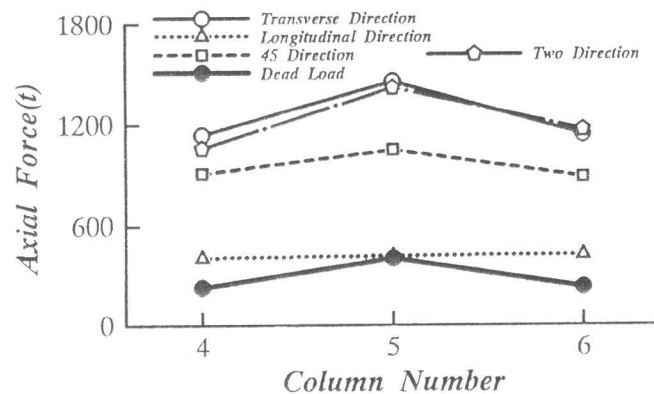
④ 本解析例では、1階の隅柱の軸力変動は主に張り間方向の地震動入力によるものであり、2方向地震動の同時入力によって、建物の隅部にある壁柱の軸力は張り間方向の1方向入力に対して増加する割合は最大1.2倍程度であった。

### 【謝辞】

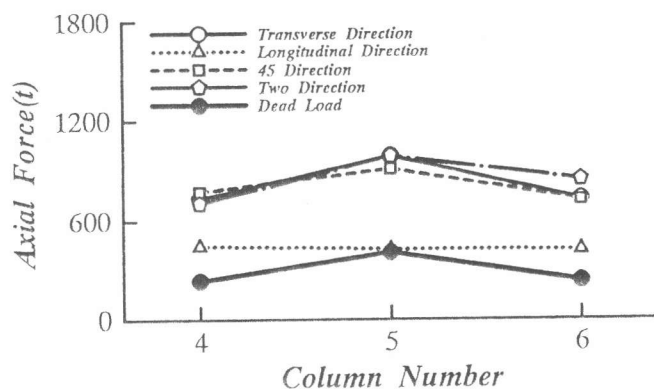
本研究は『中・高層混用構造に関する研究委員会』（委員長：山崎裕・建設省建築研究所第四研究部長）の研究内容の一部です。本研究を行うあたり終始適切な助言をいただいた研究委員会の方々に謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 傳、柴田、斉藤：耐震壁の浮き上がりを考慮した立体フレーム構造物の弾塑性挙動解析、コンクリート工学年次論文報告集、No. 2、1992、pp. 879-884
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、下部構造編



(a) EL-CENTRO波



(b) 八戸港湾波

図12. Y3フレームの壁柱の最大軸力