

2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状

正 会 員 和 田 章*

正 会 員 広 瀬 景 一**

§1. 序 論

建築骨組の耐震設計において強震時にはりのみが塑性化するより降伏型架構を目指して設計されることが多い。それは柱降伏型架構の場合、各層の損傷分布が強度分布に敏感であり相対的に弱い層に損傷が集中しやすいが、はり降伏型架構の場合は、はりのみが全層にわたって塑性化し、骨組の塑性エネルギー吸収能力が有効に発揮され、耐震的に優れた構造形態と言われているためである。

はり降伏型架構が成立するために必要な柱部材とはり部材の曲げ耐力比に関する研究には次のようなものがある。小堀ら¹⁾は3層等高等スパン架構モデルを用いて弾塑性応答解析を行い、はり強度和を柱強度和より小さく、柱・はり強度比を0.5~0.7程度にとることにより、柱の応答ははりの応答に比べ十分に制御することができるとしている。秋山²⁾は5層1スパンの骨組モデルを用いて弾塑性応答解析を行った結果、第一層柱脚固定の場合の第一層を除いて柱で吸収されるエネルギーがその層で吸収されるエネルギーの0.1以下となることをはり降伏がほぼ成立する条件として設定した場合、柱強度のはり強度に対する比率が1.3以上あればよいと述べている。久保^{3)~5)}は4層1フレームのRC無限均等ラーメンを対象とし、はり崩壊を確保するための柱/はり耐力比は1次振動モードが支配的な場合は1.3以上、2次振動モードが極端に支配的な場合は1.5以上必要であるとしている。寺本ら^{6),7)}は10階建て鋼構造無限均等ラーメンを対象に弾塑性応答解析を行った結果、柱/はり耐力比が1.5の場合は完全なはり降伏型架構となり、1.2の場合一部の柱頭、柱脚を除いてはりに塑性ヒンジが生じはり降伏型の性状を示すと述べている。また、はり降伏型架構において柱に生ずる最大応答モーメントの立場から、青山、小谷ら⁸⁾は4層のRC無限均等ラーメンの地震応答解析を行い、塑性率が4.0~5.0に達する時の地震動レベルで、 A_1 分布荷重を受ける骨組の柱モーメントに対する柱の最大応答モーメントから柱耐力の割増し率を

検討し、1.6程度必要であるとしている。滝沢⁹⁾は、はり崩壊型RC架構の動的機構が形成された時の柱や耐震壁と言う非降伏部材の応力ピーク値を塑性履歴応答に対するモード分解の手法¹⁰⁾に従い、基本振動成分相当の“基準成分”と高次振動成分相当の“残余成分”とに分離し、後者の絶対量は地動加速度振幅に対する増幅比の問題に還元されるとしている。

しかしこれらの研究は一方向地震力のみが作用した場合の動的性状を検討したものである。耐震壁などの一方向性の強い耐震要素が x, y 方向に均等に配置されている場合は、構造物の x 方向、 y 方向の2方向が力学的に独立な応答性状を示しやすいため、一方向のみの応答解析で構造的評価が可能である。しかし純ラーメン構造の場合は、地震動が水平2方向に同時に作用した場合の柱の塑性化には2方向インターアクションの影響が強いこと、及び構造物の x 軸または y 軸と45°をなす方向では、柱耐力がすべての方向で等しいとした時の柱頭、柱脚の曲げ耐力の和は $2 \cdot cM_y$ (cM_y は柱の曲げ耐力)であるのに対し、柱に取り付く x, y 構面の4本のはりの曲げ耐力の和は $2\sqrt{2} \cdot cM_y$ (cM_y は1本のはりの曲げ耐力)となり、柱に対するはりの曲げ耐力和は $\sqrt{2}$ 倍となること等を考慮しなければならない。

柱耐力の2方向インターアクションに関する研究は部材レベルでは大略的にファイバーモデル¹¹⁾によるものと1軸の復元力モデルを金属塑性論に基づいて2軸に拡張した2軸モデル^{12)~14)}の2つの方法があり、骨組の応答解析に適用したものは梅村、芳村^{15),16)}、滝口ら¹⁷⁾、若林ら¹⁸⁾の研究がある。芳村らは滝沢¹³⁾による2軸D-triモデルを用い、3層無限均等ラーメンを対象として応答解析を行った。その結果、2方向地震動を考慮した場合は柱をはりに対して30%~40%強くしなければはり降伏を確保できないことを示している。滝口らは地震被害を受けた給水塔の応答解析を行い柱降伏型架構に対する2軸モデルの妥当性を示している。

先に述べたように、建物の軸に対して45°方向に地震動の勢力が強い場合は、柱に比べ相対的にはりの曲げ耐力が $\sqrt{2}$ 倍となるため、はり部材が塑性化しにくくなり柱部材にとって最も不利な地震動入力となることから、

* 東京工業大学 助教授・工博

** 東京工業大学 大学院生 (現在:清水建設)

(1988年10月10日原稿受理, 1989年2月17日採用決定)

2方向地震動を考慮した骨組の崩壊性状を考察するためには地震動の方向性を考慮すべきと考える。

従来から、構造物の各構成部材の復元力特性を総合化することにより、各層の特性をせん断バネに理想化した簡便なせん断系モデルは柱降伏型架構の場合に良好な応答結果を与えてきた。しかし、これをより降伏型架構に適用した場合は、はり崩壊の時に生ずる層間連成作用、及び高次モードにおける層耐力の上昇を評価できず、地震応答解析結果の信頼性が問題となることが梅村、滝沢ら^{19),20)}により指摘されている。本論文は骨組を柱、はりの構成部材に分割し、個々の部材の弾塑性応答性状を考慮でき、なおかつせん断系モデルと同程度の簡易性を有する骨組モデルを提案し、これを用いて2方向地震動入力による10階建て2方向無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状を検討するものであり、柱/はり耐力比(α)を変化させ、はり降伏型を実現させるのに必要な柱耐力の動的割増し率、およびエネルギー入力の総量とその配分を検討する。この時、崩壊性状に与える地震動の方向性および2方向入力の影響を同時に考察する。

§2. 解析に用いる地震動

2-1 2方向地震動の方向性

弾性1質点系の振子に2方向地震動を入力した場合の変位軌跡の一例を図-1に示す。地震動はEl Centro(1940)を用い系の固有周期は1.37 sec, 減衰定数は2.0%である。ここで、最大応答変位ベクトルが生起する方向 θ_{main} を主軸、それに直交する方向を副軸と定義する。図-2A, B, CにEl Centro, Taft, 八戸の3種類の観測地震動に対して、減衰定数(h)として、2.0%, 10.0%, 20.0%を与えた場合の応答結果から θ_{main} の周期特性を示す。さらに、各観測地震動に対して各減衰定数に対応した主軸、副軸方向の最大応答変位(D_M, D_S)の比率 $R_D(D_S/D_M)$ の周期特性を合わせて示す。 θ_{main} の周期特性より主軸は周期に依存するものであることが分かる。また $h=2.0\%$ の場合は周期 T に敏感に主軸方向が変動するが、 $h=10.0\%$, 20.0% と減衰定数が大きくなるに従い主軸方向の T への依存度が減り T に関する θ_{main} の変化が緩慢になることが分かる。さらに、地震動の方向性の強さを主軸、副軸方向の最大応答変位の比率(R_D)で評価した場合、 R_D は $h=2.0\%$ の場合に0.2~0.9と最も変動的である。すなわち主軸方向の勢力が極めて強い周期、または主軸、副軸2方向の勢力がほぼ同等である周期が存在し、地震動の方向性の周期への依存度は高いと言える。また減衰定数が大きくなるに従い周期への依存度が減ることが分かる。本論文では、部材の塑性化において柱は2方向インターアクションが強く、はりは2方向独立であるため、水平面内任意方向に対して柱/はり耐力比は一定とならず、上述の地震動が有する勢力の方向性およびその方向性の強さは、構造

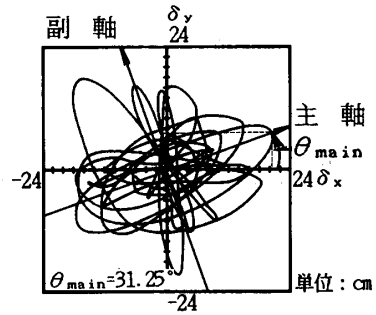


図-1 変位軌跡の一例

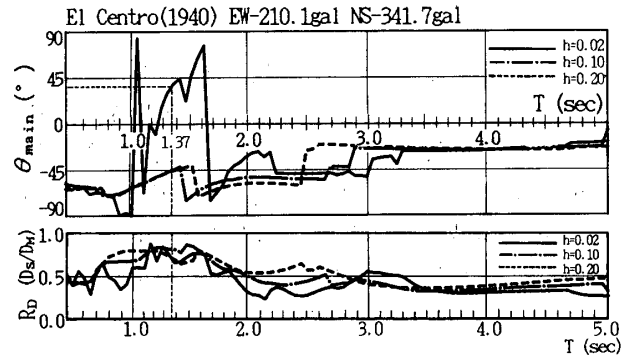


図-2A El Centro地震動に対する主軸方向

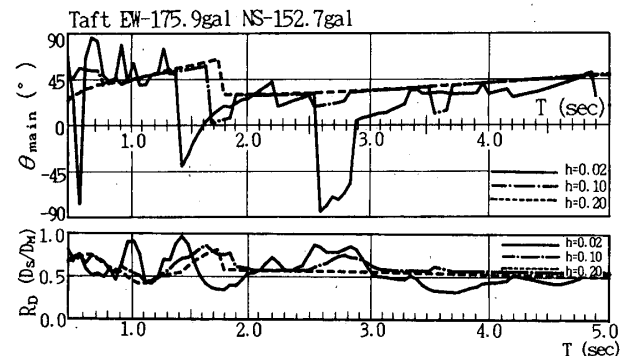


図-2B Taft地震動に対する主軸方向

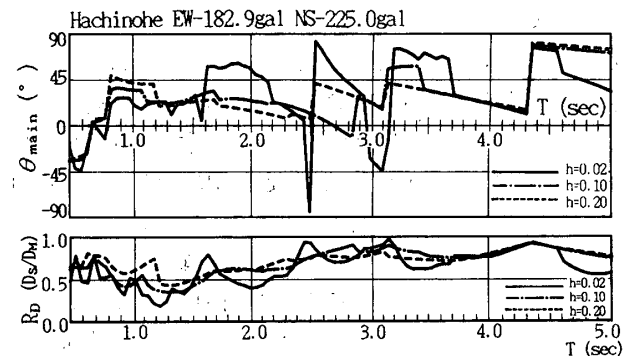


図-2C Hachinohe地震動に対する主軸方向

物の崩壊形を左右する要因になると言う立場からこれらを解析パラメータに加える。このとき地震動の方向性の強さを副軸入力倍率として変化させる。

2-2 入力地震動

本解析では、2-1で述べた方法により構造物の一次固有周期に対応する主軸方向を求め、主軸、副軸方向の地

震動を El Centro の EW, NS 成分から座標変換により作成し、これらを構造物の x, y 方向に同時入力した場合（以下、主軸入力）とこれらを $45^\circ, 135^\circ$ 方向に同時入力した場合（以下、 45° 入力）の 2 ケースを設定して弾塑性応答解析を行う。この時、主軸の入力倍率は 1.0 で一律とし、2 方向入力の影響および方向性の強さによる影響を調べるため各々のケースにつき副軸入力倍率 β を 0.0, 0.5, 1.0 の 3 ケース設定する。 $\beta=0.0$ の場合は x 軸方向または 45° 方向への一方向入力を表す。下式 (1), (2) に各入力ケースの x, y 各方向の入力加速度を示す。

$$\begin{Bmatrix} {}_M A_x \\ {}_M A_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{\text{main}} \\ A_{\text{sub}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{main}} & \sin \theta_{\text{main}} \\ -\sin \theta_{\text{main}} & \cos \theta_{\text{main}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_{\text{ew}} \\ A_{\text{ns}} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{Bmatrix} {}_D A_x \\ {}_D A_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_{\text{main}} \\ A_{\text{sub}} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 $\begin{Bmatrix} A_{\text{ew}} \\ A_{\text{ns}} \end{Bmatrix}$: EW, NS 方向の入力加速度
 $\begin{Bmatrix} A_{\text{main}} \\ A_{\text{sub}} \end{Bmatrix}$: 主軸方向および副軸方向の地震動の加速度
 β : 副軸入力倍率
 $\begin{Bmatrix} {}_M A_x \\ {}_M A_y \end{Bmatrix}$: 主軸入力の場合の x, y 方向への入力加速度
 $\begin{Bmatrix} {}_D A_x \\ {}_D A_y \end{Bmatrix}$: 45° 入力の場合の x, y 方向への入力加速度

§3. 骨組のモデル化と解析方法

3-1 骨組のモデル化

1) 2 方向無限均等ラーメンを対象とし、1 本の柱について、 x, y 構面各スパンの 1/2 のはりが各階 4 本取り付く架構を作る。このとき前後、左右のはりのせん断力がつり合うため柱の軸力変動は考慮しない。

2) 各階の質量 (m_i) は床面位置に分布するものとする。

3) 骨組は曲げ系の多質点モデルとして扱い、各質点での自由度は各床の重心位置の x, y 方向の水平並進 2 成分 (u, v) と直交 2 軸回りの回転成分 (θ_x, θ_y) の合計 4 自由度とし、慣性力は u, v 方向の加速度に対して作用するものとする。

3-2 部材のモデル化

本解析モデルは節点に直交 2 軸回りの回転の自由度を付加することによりせん断系モデルを簡便な骨組モデルに改良したものである。以下、はり・柱部材のモデル化

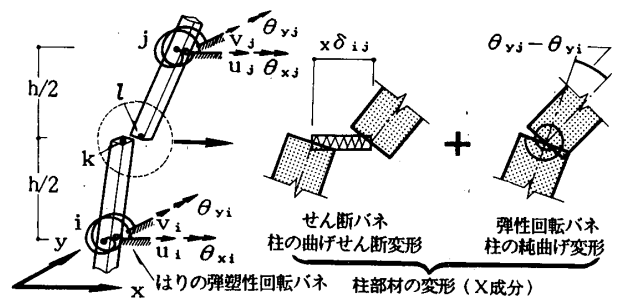


図-3 部材のモデル化

の手法を示す。なお、図-3 の左図に示すように床面位置の i, j 節点に対して柱部材の中央位置 ($h/2$) の i 側を k 節点、 j 側を l 節点とする。

a) はり部材

はり部材の反曲点は材軸上の中央に生じるものと仮定し、部材の曲げ変形を材端回転角で代表させる。さらにこの材端回転角を図-3 の左図に示すように床面位置の各節点の回転成分 $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{xj}, \theta_{yj}$ として x, y 各構面の材端部に設置した初期剛性 ($6EI/l$; l はスパン長) の弾塑性回転バネで代表する。

b) 柱部材

図-3 の右図には x 成分のみについて示すが、柱部材の力と変形の関係を純曲げ成分と曲げせん断成分に分離して考える、純曲げ成分は式 (3) に示す i, j 節点の回転角差と、それに対して発生する曲げモーメントとして考える。具体的には柱部材の中央位置 ($h/2$) まで柱頭、柱脚からそれぞれ $h/2$ の長さの剛体を出し、その 2 本の剛体間に x, y 構面につき 1 本ずつの回転バネを設置することによりモデル化する。

$$\left. \begin{aligned} y\delta_{ij} &= (\theta_{yj} - \theta_{yi}) \\ x\delta_{ij} &= (\theta_{xj} - \theta_{xi}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

純曲げ成分は常に弾性とし、次に述べる曲げせん断成分との間に連成はないと仮定する。

曲げせん断成分は、柱頭、柱脚を回転拘束して水平変位を与えたときのせん断力と変位の関係を柱頭及び柱脚から出した長さ $h/2$ の剛体の中央の位置にせん断バネの性質として挿入して表す。このせん断バネ位置の水平変位 $x\delta_{ij}, y\delta_{ij}$ は i, j 節点の水平変位差 ($u_j - u_i, v_j - v_i$) に i, j 節点の回転成分を考慮して式 (4) により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} x\delta_{ij} &= (u_j - h \cdot \theta_{yj}/2) - (u_i + h \cdot \theta_{xi}/2) \\ y\delta_{ij} &= (v_j + h \cdot \theta_{xi}/2) - (v_i - h \cdot \theta_{yi}/2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

部材を弾性状態と考え、回転バネとして (EI/h ; EI は柱の曲げ剛性、 h は階高)、せん断バネとして ($12EI/h^3$) を用い、式 (3), (4) の座標変換を考慮すると、ここで考えたモデル化は通常に用いられている曲げ理論に基づいた剛性マトリックスと一致する。

柱部材のせん断バネおよびはり部材の弾塑性回転バネ

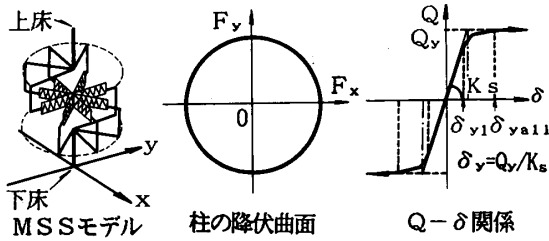


図-4 2方向外力を受ける柱部材のモデル化

に各々対応した復元力モデルを設定することにより弾塑性応答解析が可能となる。本解析モデルは柱の曲げせん断変形成分に対してせん断バネを直接設定しているため、せん断バネの特性として従来から数多く行われて来た柱頭、柱脚を回転拘束した曲げせん断実験から得られた復元力モデルが適用できると言う利点がある。

3-3 2方向外力を受ける柱部材のモデル化

柱は2方向からせん断力を同時に受け、その弾塑性の力学的性質は2方向でインターアクションを生じるため、図-4の左図に示すMSS (Multiple Shear Spring) モデル²¹⁾によりモデル化する。これは等価せん断バネを柱部材の中央位置の x, y 面内に等角度に配し柱耐力の2方向インターアクションを考慮できるようにした弾塑性モデルである。一本の柱に作用するせん断力と柱の層間変位の関係を n 本のせん断バネでモデル化した場合の柱耐力の降伏曲面は $2n$ 角形となり、構成するせん断バネの本数を多くすれば降伏曲面は円形に近づき図-4の中図のようになる。式(5)に一本の柱を n 本のせん断バネでモデル化した場合の増分層間変位とせん断力の関係を示す。

$$\begin{Bmatrix} xQ_{ij} \\ yQ_{ij} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n k_{sk} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_k & \cos \theta_k \cdot \sin \theta_k \\ \cos \theta_k \cdot \sin \theta_k & \sin^2 \theta_k \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{matrix} \Delta_x \delta_{ij} \\ \Delta_y \delta_{ij} \end{matrix} \right\} + \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \cos \theta_k \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} \cdot q_k \dots \dots (5)$$

- ここに、 k_{sk} : k 番目のせん断バネの接線剛性
- q_k : 1ステップ前に k 番目のせん断バネが受け持っている力
- θ_k : k 番目のせん断バネの x 軸に対する角度

- $\begin{Bmatrix} xQ_{ij} \\ yQ_{ij} \end{Bmatrix}$: 柱に作用するせん断力ベクトル
- $\begin{Bmatrix} \Delta_x \delta_{ij} \\ \Delta_y \delta_{ij} \end{Bmatrix}$: Δt の間に生じる増分層間変位ベクトル

柱が一方方向にせん断力を受けるとしたときのバネ定数を K_s 、降伏耐力を Q_y とした場合、MSSモデルの1本のせん断バネ定数 k_s 、降伏耐力 q_y は式(6)で表せる。

$$\left. \begin{aligned} k_s &= K_s / \sum_{k=1}^n \cos^2 \theta_k \\ q_y &= Q_y / \sum_{k=1}^n |\cos \theta_k| \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

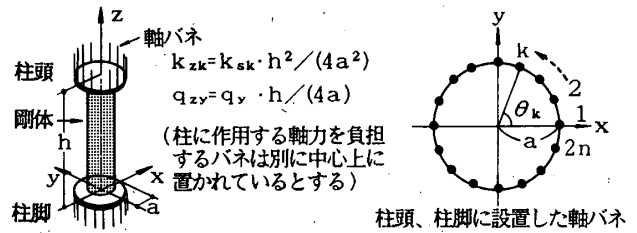


図-5 MSSモデルと等価なファイバーモデル

本解析では8本のせん断バネを 22.5° 間隔で配置する。この場合、 $\sum \cos^2 \theta_k = 4.00$ であり、 $\sum |\cos \theta_k| = 5.03$ である。個々のせん断バネの特性が完全弾塑性のとき、あるせん断バネの方向と同じ方向 ($\theta_k = (k-1) \times 22.5^\circ$) に変位を与えた場合の変位-力関係の合成特性は図-4の右図のように5個の線形区間から成り、それ以外の方向に変位を与えた場合の合成特性は9個の線形区間から成る。ここで δ_{y1} は1本のせん断バネが降伏する変位であり、 δ_{yall} は変位を与える方向と直角方向をなすせん断バネを除くすべてのせん断バネが降伏する変位である。

MSSモデルを柱頭、柱脚が回転拘束され、2方向水平力を受け曲げ降伏する柱に適応した場合について、従来から用いられているモデル¹¹⁾との対応を説明する。図-5に示すようにこの場合、柱の中間部分を剛体とし、柱頭、柱脚が同時に降伏すると仮定し、その位置に軸バネを $2n$ 本円形状に分布させて作られるモデルとの間で幾何学的に線形な変換が可能である。このときMSSモデルの1本のせん断バネとの対応から、1本の軸バネのバネ定数は $k_{zk} = k_{sk} \cdot h^2 / (4a^2)$ 、バネの降伏耐力は $q_{zy} = q_y \cdot h / (4a)$ である。文献²¹⁾で述べてあるようにMSSモデルは、水平面内に変位履歴を与えた場合の復元力の位相が変形よりも先行するなど、既往の2軸曲げ実験結果^{11), 12)}を極めて良く表すことができ、曲げ降伏する柱の塑性化に伴う2方向インターアクションを表現し得るのであると考える。

上述のようにMSSモデルは柱耐力の2方向インターアクションに対して、塑性理論を数学的に用いるのではなく、実際現象を直接、物理的にモデル化する手法を取っているため、数値計算の簡便さがあり、なおかつ現象を説明しやすいと言う利点があると考えられる。

3-4 動的解析法

数値積分法として線形加速度法を用いる。各時間刻みごとにバネの弾塑性状態を判定し、その結果に応じて剛性マトリックスを更新する方法により部材の弾塑性を考慮した応答解析を行う。この際、塑性化に伴う不釣り合い力は次のステップで処理する。入力加速度記録の時間刻みは 0.02 sec であるが、数値積分の際の時間刻み Δt は塑性化判別の際の誤差を少なくするように細分し 0.002 sec とし、減衰力は粘性減衰力とし弾性時に各モー

ドに対して 2.0% ずつ与え、塑性化後も不変とした。

§4. 弾塑性応答解析

4-1 部材の剛性、耐力の算定

解析対象は 10 階建て 2 方向無限均等ラーメン構造とし、寺本ら⁷⁾の方法を準用し以下に示す手順により部材の剛性、耐力を設定する。表一に部材の剛性、設計耐力を示す。以下、設計手順を示す。

1) 架構は均等スパン ($l=600$ cm)、均等階高 ($h=360$ cm) とし、質量分布 m_i は均等に 13.5 ton とする。

2) ベースシア係数 $C_0=0.2$ として建築基準法施行令の A_i 分布に従い一次設計用層せん断力 $Q_i=C_0 \cdot A_i \cdot \sum m_i$ を求める。

3) 架構の層剛性 K_i は一次設計層せん断力が作用した時の層間変形角が $1/200$ となる様に $K_i=Q_i/(h/200)$ として求める。

4) 柱・はり部材の断面 2 次モーメントを等しく置き K_i を与える部材の曲げ剛性 I_c, I_g を求める。

5) 4) で求めた部材剛性の下に弾性応答解析を行いその最大応答せん断力ベクトルに比例させて補正した設計耐力分布 Q'_i を定める。ベースシア係数 C_0 は 0.2 で不変とする。

6) はりの端部設計降伏モーメント (cM_{yi}) は、柱の反曲点を階高中央として設計曲げモーメントを求めこれら上下柱の端部モーメントの平均値として決める。

7) Q'_i に従い変形計算を再度行い、各層の層間変形角が $1/200$ となるように補正層剛性 K'_i を求め、補正部材剛性 I'_c, I'_g を求める。

8) 設計耐力分布 Q'_i を基準値として柱/はり耐力比 (α) に応じて柱耐力 cQ_{yi} を式 (7) のように定める。

$$cQ_{yi} = \alpha \cdot Q'_i \dots \dots \dots (7)$$

α は 1.0, 1.3, 1.5 の 3 ケースを設定し柱耐力の割増しによる崩壊性状の違いを検討する。表二に検討パラメーターに従い解析モデルを示す。

4-2 部材の復元力モデルの設定

本解析において、はり部材の弾塑性回転パネのモーメント-回転角関係、および MSS モデル個々のせん断パネのせん断力-変位関係には図一六に示すように bilinear 型の復元力特性を設定し、降伏後の第二次勾配は第一次勾配の $1/100$ とする。

4-3 固有値解析と主軸地震動

図一七に固有周期と振動モードを示す。1 次固有周期 (T_1) は 1.37 sec である。減衰定数 2.0%, 周期 1.37 sec における El Centro 地震動の主軸方向 (θ_{main}) は図一2A に示すように 31.25° でありこれより式 (1) に従い座標変換を施し主軸方向および副軸方向の地震動を作成する。この時、El Centro 地震動の EW, NS 方向の最大加速度は弾性応答解析による最大せん断力ベクトル分布が降伏せん断力分布 cQ_{yi} の 2.0 倍の値を示すように

表一 部材の剛性と設計耐力

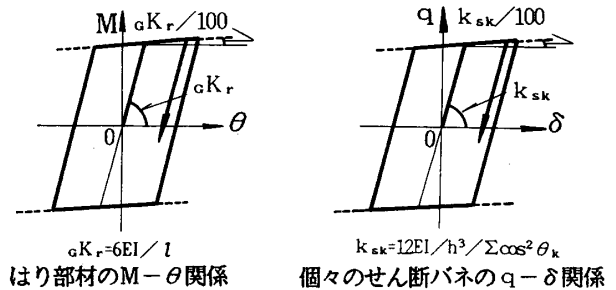
階	A_i	Q_i (ton)	eQ_{max} (ton)	Q'_i (ton)	K'_i (t/cm)	$I'_c/2$ (cm^4) $\times 10^4$	I'_g (cm^4) $\times 10^4$	cM_{yi} ($t \cdot cm$)	
R	2.10	6.91	17.69	8.85	4.92	2.43	4.86	797	
10	2.04	6.81	17.69	8.85	4.92	2.43	4.86	1976	
9	1.78	11.02	26.21	13.10	7.28	3.59	7.18	2701	
8	1.60	14.42	33.83	16.91	9.39	4.64	9.28	3118	
7	1.47	17.28	35.47	17.73	9.85	4.86	10.48	3317	
6	1.35	19.85	38.24	19.12	10.62	5.24	11.64	3632	
5	1.25	21.87	42.24	21.23	11.79	5.82	13.06	4052	
4	1.16	23.63	47.58	23.79	13.22	6.53	13.94	4429	
3	1.08	25.06	50.83	25.42	14.12	6.97	14.38	4649	
2	1.00	26.26	52.50	26.23	14.57	7.19	14.46	4791	
			27.00	54.00	27.00	15.00	5.23	10.46	4791

eQ_{max} は弾性応答解析に於ける最大せん断力ベクトル分布

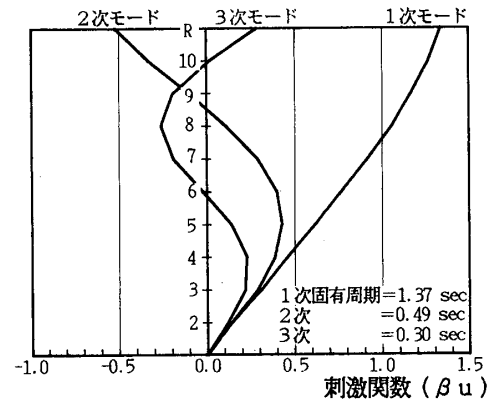
表二 解析モデル

解析モデル	主軸地震動 入力方向	副軸入力倍率 β	柱/はり耐力比 α
M-1.0 series	主軸入力	1.0	各々のシリーズ に付 α を 1.0 1.3 1.5 の 3 ケース設定する
M-0.5 series		0.5	
M-0.0 series		0.0	
D-1.0 series	45° 入力	1.0	1.0 1.3 1.5 の 3 ケース設定する
D-0.5 series		0.5	
D-0.0 series		0.0	

解析モデル名 例) M-1.0
主軸地震動入力方向 → 副軸入力倍率 (β)



図一六 各部材の復元力特性



図一七 固有周期と振動モード

表三 主軸地震動の概要

		EW 方向	NS 方向
最大加速度 A_{max}		263.3 (gal)	428.2 (gal)
		主軸方向	副軸方向
主軸地震動	A_{max} $\beta=1.0$	254.8 (gal)	393.5 (gal)
	$\beta=0.5$	254.8 (gal)	196.8 (gal)
	$\beta=0.0$	254.8 (gal)	0.0 (gal)
	$V_E (T=1.37)$	152.3 (cm/sec)	59.8 (cm/sec)

El Centro (1940) の地震動を 1.25 倍した後、主軸地震動を作成する V_E は周期 1.37 sec, $h=0.02$, 弾性振動としたときの主軸、副軸方向の値

1.25 倍に増幅し, $max A_{ew} = 263.3$ gal, $max A_{ns} = 428.2$ gal とする。表一三にここで用いる主軸方向および副軸方向の地震動の概要を示す。

4-4 部材の最大塑性率による評価

図一八に各 α (柱/はり耐力比) における柱部材の最大塑性率分布 ($c\mu_{maxi}$) を示す。 $c\mu_{maxi}$ は MSS モデルの

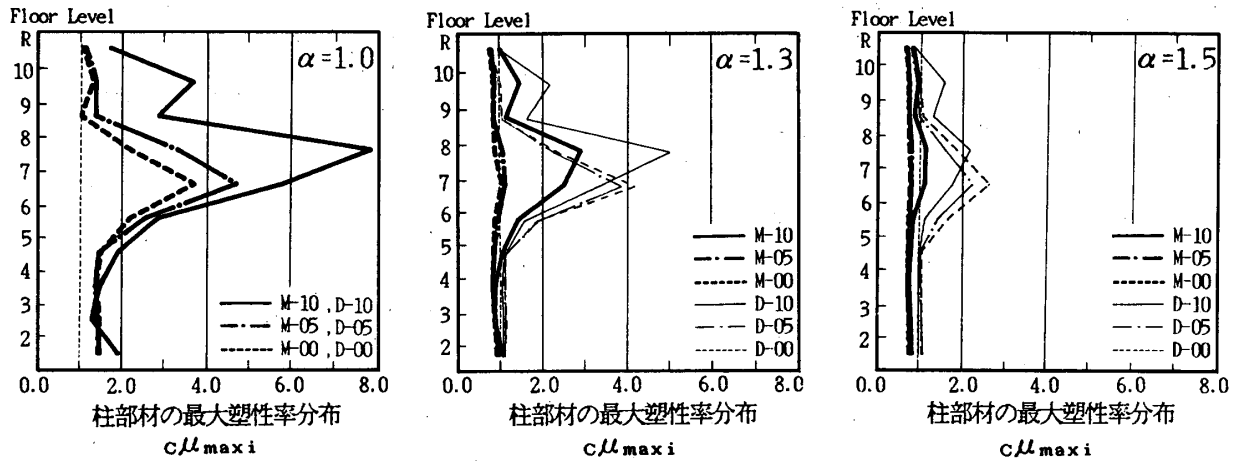


図-8 柱部材の最大塑性率分布 ($c\mu_{maxi}$)

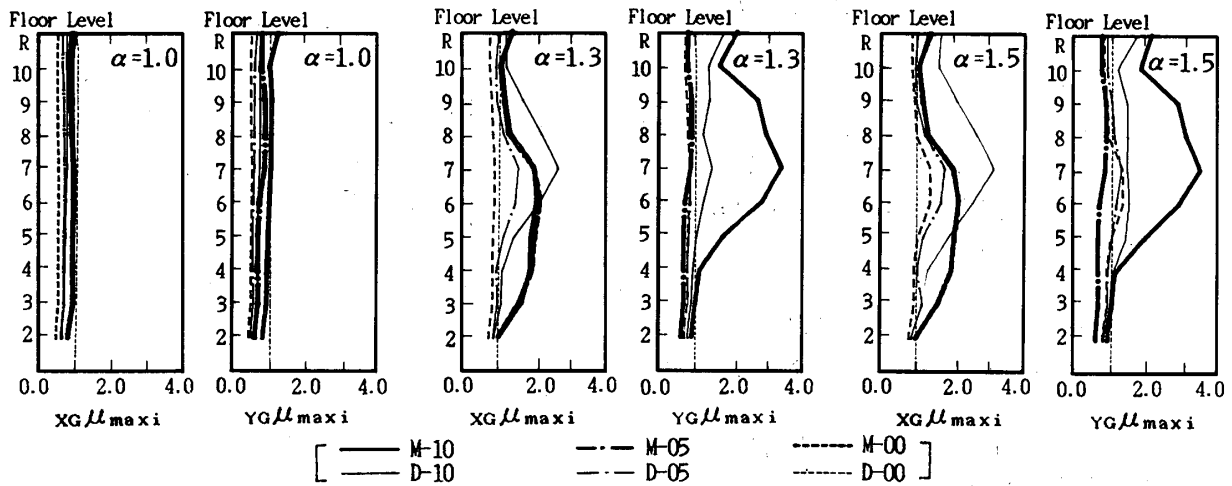


図-9 はり部材の最大塑性率分布 ($xg\mu_{maxi}$, $yg\mu_{maxi}$)

一方の復元力特性を bi-linear 型に置換した場合の柱部材の降伏変位を δ_y とし、最大変位ベクトル $r\delta_{max}$ を δ_y で除した値の最大値である。太線が主軸入力、細線が 45° 入力の結果を表す。また実線は $\beta=1.0$ 、一点鎖線は $\beta=0.5$ 、点線は $\beta=0.0$ を表す。図-9 に同じ各 α (柱/はり耐力比) における各層 x , y 各構面のはり部材端の最大塑性率分布 ($xg\mu_{maxi}$, $yg\mu_{maxi}$) を示す。

a) $\alpha=1.0$ の場合

いずれの入力ケースにおいても柱の塑性化が激しく完全に柱降伏型の性状を示し、副軸入力倍率 β を大きくするに従い 2 軸効果により柱部材の曲げせん断変形は増大している。これは構造物の耐力は柱の降伏曲面の形状に支配され、2 方向入力を受けるとある方向への耐力が低減されることにより一方入力よりも大きい変位が生じることによる。この構造の場合には全体的に変位が増大するのではなく、6, 7 層に損傷が集中し層崩壊に至る。はりに注目すると主軸入力の場合の x 構面のはりがわずかに塑性化することを出いていずれのシリーズも x , y 構面のはりは弾性にとどまっているものが多い。

b) $\alpha=1.3$ の場合

主軸入力における応答性状は副軸入力倍率に敏感に変

化し、 $\beta=0.0, 0.5$ の場合は柱はほとんど弾性にとどまっており、 x 構面のはりのみが塑性化するのに対して、 $\beta=1.0$ の場合は副軸方向の外力による 2 軸効果により柱の塑性化が進行する。 $c\mu_{maxi}$ は 6, 7 層で 2.5~2.8 と損傷が集中し柱降伏型の性状を帯びる。これは一方のみの応答解析では降伏を確保する場合でも 2 方向を考慮した場合は構造物の崩壊形が変化する可能性を示している。45° 入力の場合は β のいかにかわらず、さらに柱の塑性化が進行し、はりは β を上げるに従い徐々に塑性化を始める。

c) $\alpha=1.5$ の場合

主軸入力するとき β のいかにかわらず x 構面のはりの塑性化が著しくはり降伏型の性状を示す。はり部材端の最大塑性率分布 ($xg\mu_{maxi}$) は柱降伏型とは対照的であり全層が均等に塑性化する。柱の最大塑性率は主軸入力では $c\mu_{max}=0.8\sim1.2$ であるのに対して、45° 入力では $c\mu_{max}=2.2\sim2.8$ と 2 倍程度に上昇し、はりに対する柱耐力の余裕度が減少したことによる影響が現われている。

d) α による影響

図-10 に各 α に対する $c\mu_{maxi}$ の最大値を $c\mu_{max}$ とし

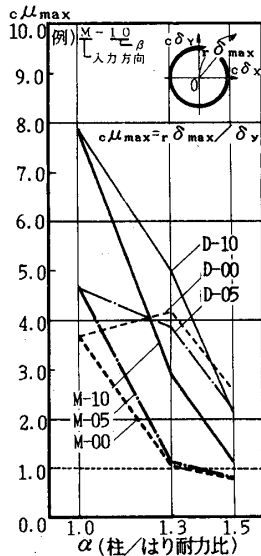


図-10 柱部材の最大塑性率 ($c\mu_{max}$)

て示す。 $\beta=1.0$ の場合は $c\mu_{max}$ の生ずる層は7階であり、 $\beta=0.5, 0.0$ の場合は6階であった。柱が完全に降伏する $\alpha=1.0$ の場合は入力方向による差異はなく、 β を0.0から1.0とすることで $c\mu_{max}$ は2倍程度上昇する。 $\alpha=1.3$ の場合は 45° 入力および主軸入力で $\beta=1.0$ のとき柱の塑性化が進行する。 $\alpha=1.5$ の場合ははり降伏が進行するが、主軸入力の場合に比べ、はりに対する柱の耐力余裕の少ない 45° 入力の場合、 $c\mu_{max}$ は2倍程度上昇する。

4-5 柱部材の変位軌跡とせん断力軌跡

前節では部材の最大塑性率によって骨組の応答性状の差異を比較した。本節では特に地震動入力方向および β による応答性状の差異が著しかった $\alpha=1.3$ について、各入力ケースに対する柱部材の変位軌跡とせん断力軌跡に注目して応答性状の差異を検討する。図-11に柱部材の最大塑性率が生じた層の変位軌跡とせん断力軌跡を示す。

a) 主軸入力の場合

$\beta=0.5$ の場合はせん断力軌跡ははりの降伏モーメントに制限され弾性にとどまっている。 $\beta=1.0$ と2方向性を強くした場合は副軸である y 方向の変位 ($c\delta_y$) とともに x 方向の変位 ($c\delta_x$) が2倍程度増大していることが認められ、柱の耐力はすべての方向で同じとしているため、斜め方向に降伏している場合、見かけ上 x 軸方向の耐力が低減するという柱耐力のインターアクションの影響が顕著に現われている。

b) 45° 入力の場合

柱の耐力は方向によって変化しないのに対し、はりの耐力は建物の x 軸または y 軸に対して 45° 方向入力を受けると $\sqrt{2}$ 倍となることにより、 $\beta=0.5$ の場合な 45° 方向に変位が増大し、塑性率が3倍程度になる。また主軸入力程顕著でないが β を大きくした場合、 x, y 各方

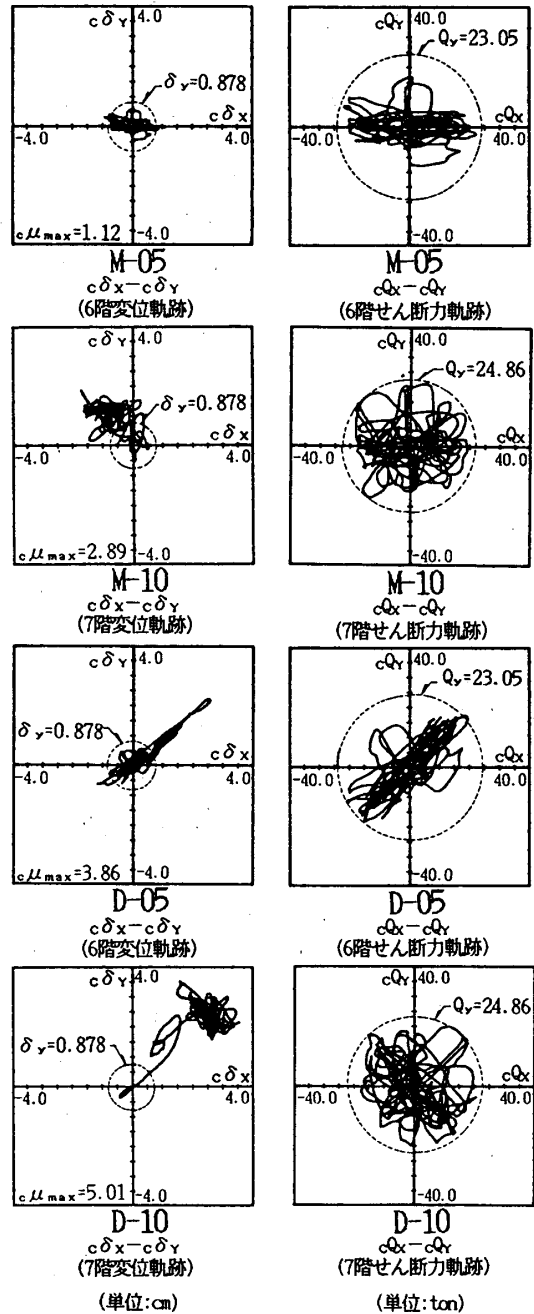


図-11 柱部材の変位軌跡とせん断力軌跡 ($\alpha=1.3$)

向の変位がともに増大する。

β に対して入力方向による差異を比較した場合、 $\beta=0.5$ と地震動の方向性が強いほど、降伏型がはりから柱へと移行し柱部材の変位の増大が顕著に現われる。

4-6 内力仕事による評価

2方向地震動を与えた多質点系の振動方程式は式(8)のように表せる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{F(x)\} = -[M] \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{cx} \\ \ddot{x}_{cy} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、 $[M]$: 質点の質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$\{F(x)\}$: 復元力ベクトル

$\{x\}$: 質点の相対水平変位ベクトル

$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_{cx} \\ \ddot{x}_{cy} \end{Bmatrix}$: 入力地震動の加速度ベクトル

式(8)の両辺に左から $\{\dot{x}\}^T dt$ を乗じ地震の全断続時間 t^{end} にわたって積分することにより地震終了時のエネルギーのつり合を示す式が式(9)で与えられる。

$$\frac{1}{2} \{\dot{x}\}^T [M] \{\dot{x}\} + \int_0^{t^{end}} \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt$$

$$+ \int_0^{t^{end}} \{\dot{x}\}^T \{F(x)\} dt = - \int_0^{t^{end}} \{\dot{x}\}^T [M] \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{cx} \\ \ddot{x}_{cy} \end{Bmatrix} dt \dots (9)$$

左辺第一項は地震終了時の運動エネルギー (W_k) を表す。第二項は粘性減衰機構により消費されたエネルギー (W_d)、第三項は地震終了時までの内力仕事 (W_h) を表す。ここで内力仕事は i 層が吸収する内力仕事の総和を W_{hi} と表し、この W_{hi} の総和 $\sum W_{hi}$ を W_h と表す。 W_{hi} は i 層の柱の個々のせん断バネによる吸収エネルギーと回転バネによる弾性ひずみエネルギーの和 (cW_{hi}) に $i+1$ 層のはりの弾塑性回転バネによる吸収エネルギー (cW_{hi}) を加えたものとする。右辺は地震外力による構造物への総エネルギー入力 (E) を表している。図-12 は各 α に対してはりの内力仕事の分担率 cW_{hi}/W_{hi} の分布を示したものであり、右側から計った値は柱の分担率を示す。

a) $\alpha=1.0$ の場合

いずれの入力ケースにおいても8層を除いてはりの内力仕事分担は0.2以下と柱降伏型の性状を示しており β による差異は少ない。

b) $\alpha=1.3$ の場合

主軸入力で $\beta=0.0, 0.5$ の場合は1層を除いてはりの分担率が0.5~0.9でありはり降伏型の性状を示している。 $\beta=1.0$ と地震動の2方向性が強くなるに従い、7層、9層で逆に柱の分担率が0.5~0.7となり柱降伏型の性状を帯びる。45° 入力の $\beta=0.0, 0.5$ の場合は柱の分担率が0.8とさらに上昇する。 $\beta=1.0$ の場合は1層、7層、9層で柱の分担率が0.5~0.7と柱降伏型の性状を帯びる。

c) $\alpha=1.5$ の場合

主軸入力の場合は β にかかわらず1層、9層を除きは

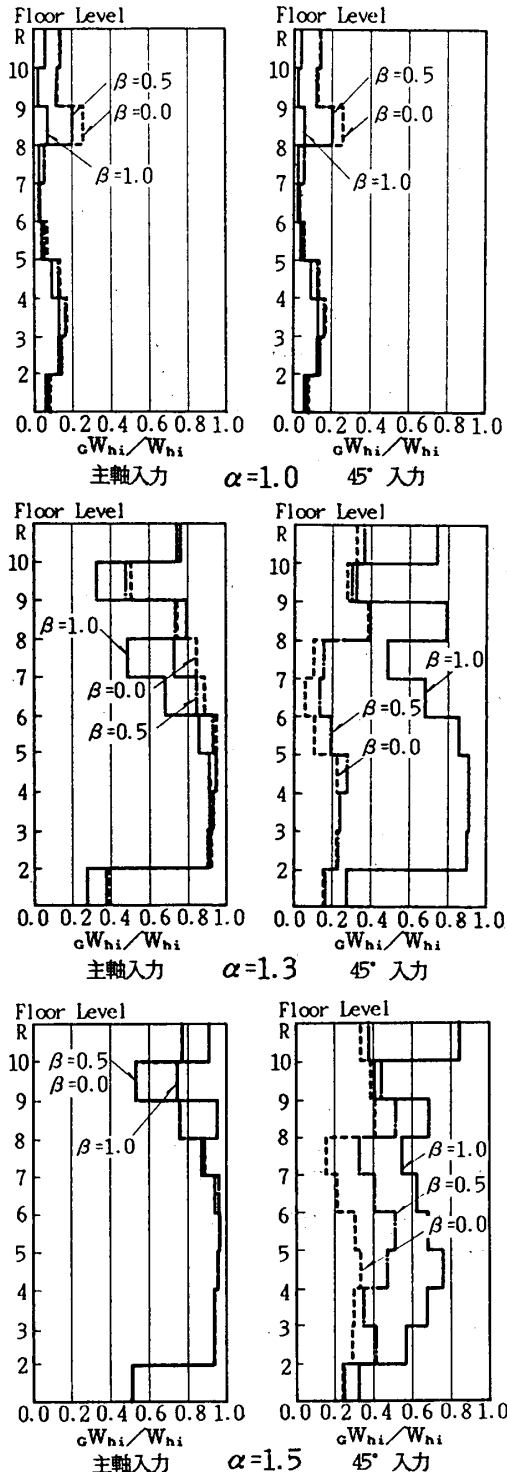


図-12 はり部材の内力仕事分担率分布 (cW_{hi}/W_{hi})

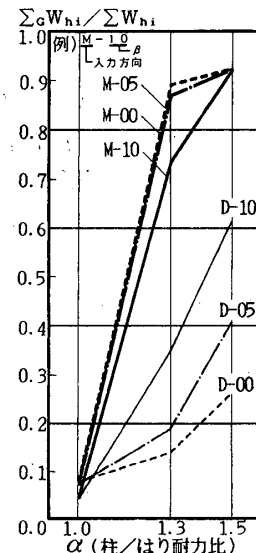


図-13 はり部材の内力仕事分担率 ($\sum cW_{hi}/\sum W_{hi}$)

りの分担率を0.8以上であるのに対し45°入力の場合は地震動の方向性が強くなるに従い柱の分担率が0.4~0.7と上昇する。

d) α による影響

図-13は各 α の内力仕事の総和 $\sum W_{hi}$ の内、はりの内力仕事の負担分 $\sum cW_{hi}$ の比率($\sum cW_{hi}/\sum W_{hi}$)を示したものである。 $\alpha=1.0$ の場合はいずれの入力ケースにおいてもはりの内力仕事分担率は0.1以下であり柱降伏型の性状を示していると言えるが、 $\alpha=1.3$ の場合は入力方向、副軸入力倍率(β)の違いにより、はりの内力仕事分担率は0.15~0.9と変動的であり地震動入力の不確定性を考慮に入れた場合十分に柱崩壊の可能性がある。このことは $\alpha=1.5$ の場合にも言えることであり、主軸入力でははりの内力仕事分担率は0.9以上とはり降伏型となるが、45°入力では0.25~0.6と柱降伏型の性状を帯びる。

4-7 総エネルギー入力による評価

図-14 A, B に地震動の入力条件を主軸入力で $\beta=1.0$ と一律とした場合の各 α に対する x, y 各方向、各エネルギーの時刻歴を示す。図中下より粘性減衰による消費エネルギー W_d 、柱の内力仕事 cW_h 、はりの内力仕事 cW_h 、運動エネルギー W_k を示し全体の包絡線として総エネルギー入力 E を示す。なお、陰影部分は W_k の内、柱の内力

仕事 cW_h を表す。 x, y 各方向の総エネルギー入力を比較した場合 α による差異はほとんど見られず内力仕事の内、柱・はりの分担率が α を増すに従い柱からはりに移行しているのみである。一般に構造物へのエネルギー入力は系の一次固有周期、総質量が等しい場合は一定値とみなせ、降伏せん断力係数に影響されるもののその影響度は無視できると言われているが²²⁾、本解析でも固有周期および総質量の等しい構造物において α に応じて柱耐力 cQ_{yi} のみを1.0倍、1.3倍、1.5倍と変化させても構造物へのエネルギー入力は x, y 各方向ほぼ一定値となることが認められた。

図-15に各 α の各入力ケースにおける総エネルギー入力の速度換算値の x 成分 V_{EX} を横軸に、 y 成分 V_{EY} を縦軸にとりプロットしたものを示す。 V_{EX}, V_{EY} は秋山ら²²⁾の方法に従い総エネルギー入力の x 成分 E_x, y 成分 E_y を式(10)により速度に換算した値である。

$$\left. \begin{aligned} V_{EX} &= \sqrt{2 \cdot E_x / \sum_{i=1}^{10} m_i} \\ V_{EY} &= \sqrt{2 \cdot E_y / \sum_{i=1}^{10} m_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 E_x : x 方向の総エネルギー入力
 E_y : y 方向の総エネルギー入力
 $\sum_{i=1}^{10} m_i$: 構造物の質量の総和

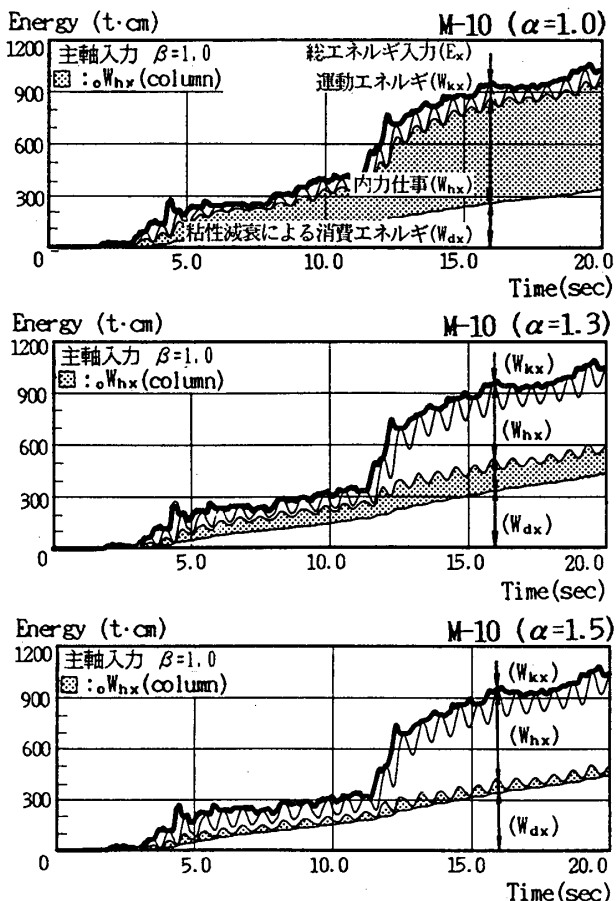


図-14A X方向の各エネルギーの時刻歴 (M-10)

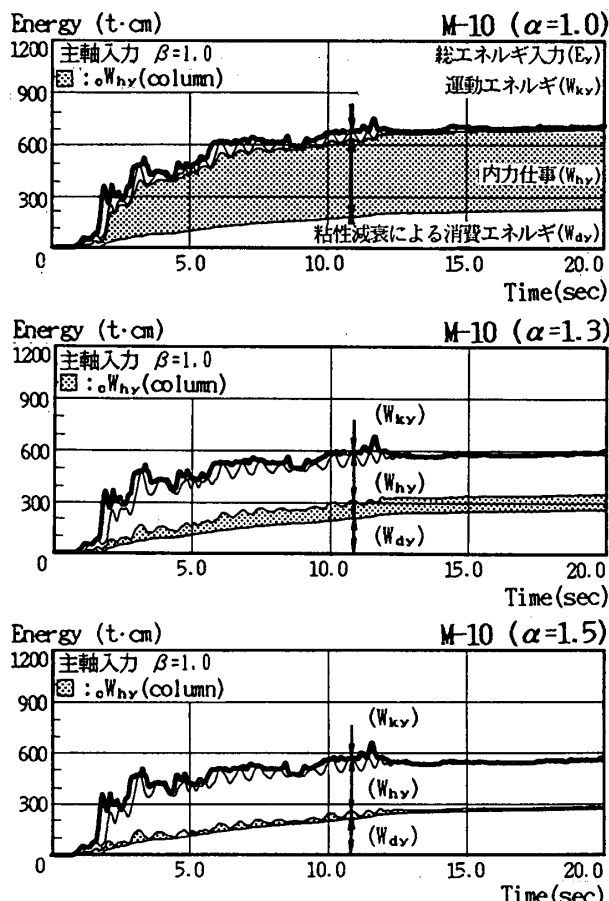
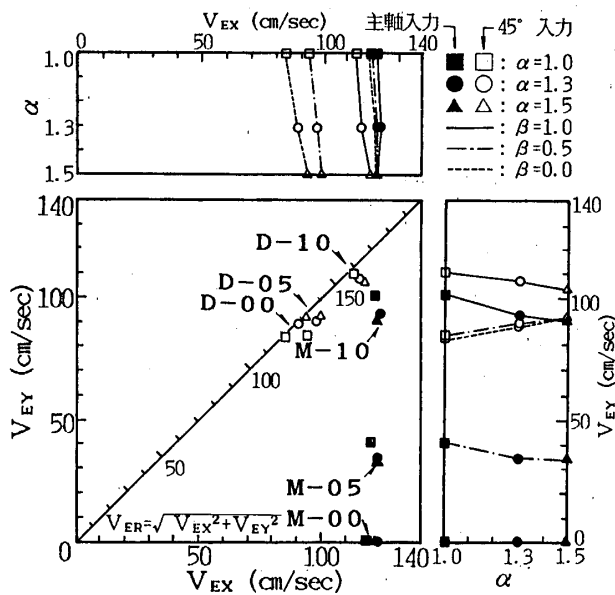


図-14B Y方向の各エネルギーの時刻歴 (M-10)


 図-15 V_{EX} - V_{EY} 関係

図において■印は $\alpha=1.0$, ●印は $\alpha=1.3$, ▲印は $\alpha=1.5$ の場合の結果を示す。白抜きは 45° 入力を表す。総エネルギー入力の時刻歴で示されたように V_{EX} , V_{EY} の α に対する依存度は小さく、いずれの入力ケースに対してもほぼ一定の値を保っていることが分かる。これより α および入力方向による崩壊性状の差異は柱・はりの内力仕事の授受により行われると言える。主軸入力では β にかかわらず V_{EX} は一定値である。4-5 節で言及した $\alpha=1.3$ のときの変位軌跡において、 β を 0.5, 1.0 と大きくし、地震動の 2 方向性を強くした場合、見かけ上 x 方向の柱の耐力が減少することにより x 方向の変位が増大する現象はエネルギー入力が β にかかわらずほぼ変化しないということにより説明できる。本解析の結果によると構造物への総エネルギー入力は x , y 各方向独立に一義的に決まると言える。

§5. 結論

柱/はり耐力比 (α) を変化させ地震動入力の入力方向および副軸入力倍率 (β) による骨組の崩壊性状の差異を検討した結果、以下のことが確かめられた。

1) $\alpha=1.0$ の場合、完全に柱降伏型となり β を大きくするに従い 2 軸効果により柱の変形が増大する。 $\alpha=1.3$ の場合、地震動の入力方向および β により応答性状は敏感に変化し主軸入力では $\beta=1.0$ の場合と 45° 入力の場合は柱降伏型となり、2 方向地震動および地震動の方向性を考慮に入れる必要があると言える。 $\alpha=1.5$ の場合にもこのことは言え、主軸入力では完全に柱降伏型となり、 45° 入力では柱降伏型の性状を帯びる。

2) $\alpha=1.3$ の場合に注目しその柱部材の変位軌跡を比較したところ、 β を大きくするに従い柱耐力の 2 方向インターアクションの影響により骨組の x , y 両方向の変形が増大し、その影響は主軸入力の方が顕著である。

また $\beta=0, 0.5$ のように地震動の方向性が強いほど、入力方向による応答性状の差異が著しく、 45° 入力とすることで応答性状がはり降伏型から柱降伏型へと移行する。

3) $\alpha=1.0$ の場合ははりの内力仕事分担率 ($\sum cW_{hi}/\sum W_{hi}$) は 0.1 以下であり、 $\alpha=1.3$ の場合は入力方向および β により 0.15~0.9 と変動的である。 $\alpha=1.5$ の場合は主軸入力では 0.9 以上、 45° 入力では 0.25~0.60 であり地震動入力方向によりはりの内力仕事分担率は著しく変化する。

4) 総エネルギー入力 (E) の α による依存度は小さく、 α を増すに従い内力仕事の柱・はり分担率が柱からはりへ移行し、崩壊性状が変化する。主軸入力の場合、 β にかかわらず主軸方向の E は一定値であり E は各軸一義的に決まると言える。

参考文献

- 1) 小堀鐸二, 南井良一郎, 藤原悌三: 弾塑性ジョイントを含む架構の地震応答(梁柱の強度分布と応答分布の関係), 京都大学防災研究所年報, 第 12 号 A, pp. 321~338, 昭和 44 年 3 月
- 2) 秋山 宏: 地震時における鋼構造ラーメン骨組の損傷分布則, 日本建築学会論文報告集, 第 309 号, pp. 53~59, 昭和 56 年 11 月
- 3) 久保哲夫, 中瀬知幸: 梁崩壊制御の靱性 RC 構造物の柱・梁耐力比に関する基礎研究 (その 1: モデルの設定と動的応答結果), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和 61 年 8 月
- 4) 久保哲夫, 中瀬知幸: 梁崩壊制御の靱性 RC 構造物の柱・梁耐力比に関する基礎研究 (その 2: 動的割増しと高次モードの影響), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和 61 年 8 月
- 5) 久保哲夫, 小原 明: 梁崩壊制御の靱性 RC 構造物の柱・梁耐力比に関する基礎研究 (その 3: 8 層建物の必要柱はり強度比), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和 63 年 10 月
- 6) 寺本隆幸, 北村春幸: 鋼構造ラーメン架構の強震時弾塑性応答性状—柱/はり耐力比と高さ方向耐力分布が応答に与える影響—, 日本建築学会論文報告集, 第 363 号, pp. 57~66, 昭和 61 年 5 月
- 7) 寺本隆幸, 北村春幸: 鋼構造ラーメン架構の強震時弾塑性応答性状—はり降伏型架構と柱降伏型架構が混在する場合—, 日本建築学会論文報告集, 第 371 号, pp. 52~60, 昭和 62 年 1 月
- 8) 青山博之, 小谷俊介: 鉄筋コンクリート建物の耐力設計法による耐震設計法 (その 2: 柱の割増し率), 日本建築学会関東支部研究報告書, 第 55 号, pp. 173~176, 昭和 59 年
- 9) 滝沢春男: 梁崩壊型 RC 架構の動的機構形成時に生じる非降伏部位での応力ピーク値の特定, 日本建築学会論文報告集, 第 389 号, pp. 66~77, 昭和 63 年 7 月
- 10) 滝沢春男: 架構の塑性履歴応答結果に対するモード分解手法とその意義, 構造工学論文報告集, Vol. 33 B, pp. 103~110; 1987. 3

- 11) 芳村 学, 青山博之, 川村 満: 2方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析, 日本建築学会論文報告集, 第298号, pp.31~41, 昭和55年12月
- 12) 滝口克己, 岡本哲美, 小林克巳: 水平2方向変位に対するRC柱の復元力に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第315号, pp.29~36, 昭和57年5月
- 13) H. Takizawa: Bi-axial Effect of flexure Members on the Strong-Motion Response of R/C Structures, 4th J. E. E. S., 1975
- 14) 滝沢春男: Tri-Linear Modelの二軸曲げ問題への拡張及びその強震応答性状, 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和48年10月
- 15) 梅村 魁著: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編), 技報堂出版, pp.406~421
- 16) 芳村 学: RC骨組の立体的地震応答解析(その1), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和53年9月
- 17) K. Takiguchi, T. Kubo, T. Ichinose, T. Iwasita: ANALYSIS OF R/C STRUCTURES DAMAGED BY THE 1980 SOUTH ITALY EARTHQUAKE, 8WCEE, Vol. 4, pp.791~798, 1984.7
- 18) 若林 實, 藤原悌三, 北原昭男: 2方向地動の作用する立体架構の弾塑性挙動(その2, 3), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和58年9月
- 19) 滝沢春男: 鉄筋コンクリート造骨組の強震応答解析, コンクリートジャーナル11巻2号, pp.10~21, 1973.2
- 20) 梅村 魁, 滝沢春男, 他: 鉄筋コンクリート造骨組の強震応答解析1, 2, 5, 6, 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和47年10月, 昭和48年10月
- 21) 和田 章, 木下雅彦: MSSモデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析(その1, 2), 日本建築学会学術講演梗概集, 昭和60年10月
- 22) 加藤 勉, 秋山 宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9~18, 昭和50年9月

SYNOPSIS

UDC : 624. 014. 2 : 624. 072. 33

ELASTO-PLASTIC DYNAMIC BEHAVIORS OF THE BUILDING FRAMES SUBJECTED TO BI-DIRECTIONAL EARTHQUAKE MOTION

by Dr. **AKIRA WADA**, Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, and **KEIICHI HIROSE**, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, Members of A. I. J.

In building frames designed to resist earthquakes, the girders usually have a lower yield moment than the columns. This arrangement distributes the inelastic action among many frame members, leading to good overall energy dissipation. By contrast, the damage in a weak-column structure is concentrated in particular story, with potentially disastrous results.

Studies on the column/girder strength ratio required for creating a weak-girder frame subjected to one-directional seismic motion have been carried out by many researchers. But there are few studies of the behavior of frames subjected to bi-directional ground motion.

In this paper, a simplified frame model is used to study the inelastic dynamic behavior of a 10-story frame subjected to bi-directional horizontal ground seismic motion. By changing the column/girder bending strength ratio, the column strength required to create a weak-girder frame and the energy input to the structure are examined. The effects of bi-directionality and orientation of the input motions on the behavior are also examined.

The girder flexibilities are represented by elasto-plastic rotational springs. The columns are modeled as rigid members, joined by springs at mid story height. The force-deflection relationships governing relative rotation and relative horizontal displacement of two contiguous column segments were derived independently. The story drift, which includes the displacements caused by both reversed curvature bending and shear, is modeled by a multiple shear spring (MSS) system. The purpose of the MSS model is to simulate a bi-directional inelastic spring, including interaction between the two directions. It consists of N displacement springs arranged radially around a circle.