

論文

[2150] 梁降伏型 RC フレーム構造と縮約 1 自由度系の非線形地震応答

正会員○前田匡樹 (東京大学大学院)  
 正会員 小谷俊介 (東京大学建築学科)  
 正会員 青山博之 (東京大学建築学科)

1. 研究の目的

本研究では、日本建築学会刊行の「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」[1] (以下、指針と略す) に従い試設計された、梁降伏型の降伏機構を形成する RC フレーム構造について、梁の履歴特性が構造物全体の地震応答に及ぼす影響、および RC フレームを 1 自由度系に縮約する方法について検討を行った。

2. 試設計フレーム

解析の対象とするフレームは、鉄筋コンクリート造の整形な無限均等純フレームから柱 1 本分を切出したものとした。スパン 6.0×6.0m とし、階高は、1 階を 3.5m、2 階以上は 3.0m で均等とした (図 1)。層数は、6、9、12、15 層の 4 種とした (表 1)。各フレームの断面寸法、主筋の配筋およびコンクリート強度を表 2 (a)~2 (d) に示す。鉄筋の材料強度を表 3 に示す。スラブは全フレーム共通で、厚さ 15cm (D10@200mm ダブル) とした。単位重量は、簡単のため 1.2tonf/m<sup>2</sup> (躯体重量と地震荷重算定用積載荷重) とした。地盤は第 2 種地盤とした。

フレームの設計は、鉛直荷重と地震荷重によった。鉛直荷重に対する設計は学会 RC 規準[2]に従った。また、地震力に対する設計は、指針[1]によった。

降伏機構設計では、標準ベースシア係数を 0.25 とした。降伏機構形成時の部材の剛性は、略算的に、梁では初期剛性の 0.5 倍、1 階柱では 0.7 倍とし、線形応力解析により地震力の重心高さ位置での変形角が 1/300 以下となるように断面寸法を定めた。梁及び 1 階柱脚ヒンジ部分の設計用応力は鉛直荷重時と水平荷重時の応力の和とし、応力再配分を行って、余剰の耐力がなるべく少なくなるようにヒンジ部分の配筋を定めた。

降伏機構保証設計では、ヒンジ部に曲げ上限強度を用いて、静的非線形解析を行って設計用応力を求めた。静的非線形解析は部材モデルを材端バネモデルとした平面解析プログラム「DANDY」[3]を使用した。材端バネモデルの復元力特性には、武田モデル[4]を使用し、降伏点剛性低下率は菅野式[5]によった。降伏後剛性は初期剛性の 0.001 倍とした。

震度逆三角形分布の水平外力による静的漸増载荷を行い、降伏機構形成時の応力を非線形応力とした。この結果に、動的増幅による割増率、地震力の 2 方向同時性による割増率を乗じて機構保証設計用応力とし、非ヒンジ部材の保証設計を行った。

3. フレームの弾塑性地震応答解析

梁部材の履歴特性がフレーム全体の地震応答に及ぼす影響を検討する目

表 1 建物一覽

| 名称  | 層数 | 固有周期    |
|-----|----|---------|
| A06 | 6  | 0.37sec |
| A09 | 9  | 0.55sec |
| A12 | 12 | 0.73sec |
| A15 | 15 | 0.91sec |

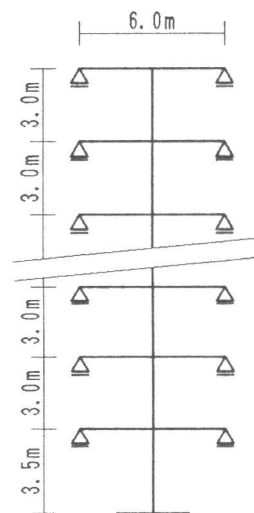


図 1 解析対称のフレーム

的で、4例のフレーム (A06, A09, A12, A15) の弾塑性地震応答解析を行った。使用した地震波は、Tohoku Univ. NS波(1978年、記号"TOH")、El Centro NS波(1940年、記号"ELC")およびHachinohe E W波(1968年、記号"HAC")である。地震動の強さは、梁を充分降伏させるように、地動最大速度を 80kineに増幅した(表4)。

解析には、平面解析プログラム「DANDY」[3]を使用し、柱の履歴モデルは武田モデル[4]とした。梁の履歴モデルには、武田モデル(図2)(建物名の後に "T")あるいは武田スリップモデル[6](図3)(建物名の後に "S")とし解析を行った。曲げひび割れ強度 $M_c$ 、剛性低下率 $\alpha$ は学会RC規準8条解説[2]によった。曲げ降伏強度は、信頼強度とした。降伏後剛性は、初期剛性の 0.001

倍とした。履歴モデルの除荷時剛性低下指数 $\alpha$ は 0.4とし、武田スリップモデルのスリップ剛性低下指数 $\beta$ は 1.2、スリップ硬化係数 $\gamma$ は 1.1とした。減衰は、弾性時を 5%とし、瞬間剛性比例型とした。

梁の最大応答塑性率を図4に示す。梁の部材モデルが武田モデル(T)と武田スリップモデル(S)の場合を比較すると、同一の地震波に対して武田スリップモデルの場合が最大応答塑性率はやや大きくなった。しかし、フレーム A12と A15では、地震波 HACに対してスリップモデルの場合の方が上層階では最大応答塑性率が小さくなった。フレーム A06および A09では、いずれの地震波に対しても最大応答塑性率が 2 を上回った。一方、フレーム A12および A15では、地震波 ELCおよび HACに対しては最大応答塑性率が 2 以下の範囲に収まり、上層階では梁端に降伏ヒンジは発生しなかった。また、地震波 HACに対して、フレーム A06, A09, A12では 1 階柱脚の最大応答塑性率はそれぞれ 2.6, 1.3, 1.3程度であったが、フレーム A15では降伏ヒンジを生じなかった。地震波 TOHに対しては、フレーム A06, A09, A12, A15で 1 階柱脚の最大応答塑性率はそれぞれ 4.0, 3.6, 3.5, 1.0程度であった。地震波 ELCに対しては、フレーム A06では 1 階柱脚の最大応答塑性率は 1.8であったが、フレーム A09, A12, A15では降伏ヒンジを生じなかった。

表2 (a) 断面寸法および配筋リスト (A15)

| 階  | $\sigma_B$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 柱           |        | 梁           |             |
|----|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
|    |                                     | B×D<br>(cm) | 主筋     | B×D<br>(cm) | 主筋<br>上端 下端 |
| R  | 240                                 |             |        | 45x75       | 4-D22 4-D22 |
| 15 | "                                   | 80x80       | 24-D25 | "           | 6-D22 6-D22 |
| 14 | "                                   | "           | "      | 50x80       | 5-D25 5-D25 |
| 13 | 300                                 | 85x85       | 24-D29 | "           | 6-D25 6-D25 |
| 12 | "                                   | "           | "      | "           | 7-D25 7-D25 |
| 11 | "                                   | "           | "      | 55x85       | 7-D29 6-D29 |
| 10 | "                                   | 90x90       | "      | "           | 7-D29 7-D29 |
| 9  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 8  | "                                   | "           | "      | 60x90       | 7-D32 6-D32 |
| 7  | 360                                 | 95x95       | 24-D32 | "           | "           |
| 6  | "                                   | "           | "      | "           | 7-D32 7-D32 |
| 5  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 4  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 3  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 2  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 1  | 柱頭<br>柱脚                            | "           | "      | "           | "           |

表2 (b) 断面寸法および配筋リスト (A12)

| 階  | $\sigma_B$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 柱           |        | 梁           |             |
|----|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
|    |                                     | B×D<br>(cm) | 主筋     | B×D<br>(cm) | 主筋<br>上端 下端 |
| R  | 240                                 |             |        | 40x70       | 4-D22 3-D22 |
| 12 | "                                   | 75x75       | 24-D22 | "           | 6-D22 5-D22 |
| 11 | "                                   | "           | "      | 45x75       | 5-D25 5-D25 |
| 10 | "                                   | 80x80       | "      | "           | 6-D25 6-D25 |
| 9  | "                                   | "           | 24-D25 | 50x80       | 7-D25 7-D25 |
| 8  | 300                                 | 85x85       | "      | "           | 8-D25 7-D25 |
| 7  | "                                   | "           | "      | 55x85       | 7-D29 7-D29 |
| 6  | "                                   | 90x90       | 24-D29 | "           | "           |
| 5  | "                                   | "           | "      | "           | 8-D29 7-D29 |
| 4  | "                                   | "           | "      | 60x85       | 8-D29 8-D29 |
| 3  | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 2  | "                                   | "           | "      | "           | 8-D29 7-D29 |
| 1  | 柱頭<br>柱脚                            | "           | "      | "           | "           |

表3 鉄筋一覧

| 名称  | 種類    |
|-----|-------|
| D10 | SD30A |
| D22 | SD30A |
| D25 | SD40  |
| D29 | SD40  |
| D30 | SD40  |

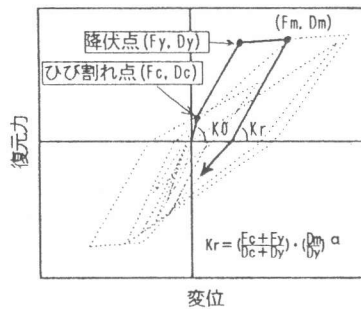


図2 武田モデル

表2 (c) 断面寸法および配筋リスト (A09)

| 階 | $\sigma_B$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 柱           |        | 梁           |             |
|---|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
|   |                                     | B×D<br>(cm) | 主筋     | B×D<br>(cm) | 主筋<br>上端 下端 |
| R | 240                                 |             |        | 40x70       | 3-D22 3-D22 |
| 9 | "                                   | 75x75       | 24-D22 | "           | 5-D22 5-D22 |
| 8 | "                                   | "           | "      | 45x75       | 5-D25 4-D25 |
| 7 | 300                                 | 80x80       | 24-D25 | "           | 6-D25 5-D25 |
| 6 | "                                   | "           | "      | "           | 7-D25 6-D25 |
| 5 | "                                   | "           | "      | 50x80       | 6-D29 6-D29 |
| 4 | "                                   | 85x85       | 24-D29 | "           | "           |
| 3 | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 2 | "                                   | "           | "      | "           | "           |
| 1 | 柱頭<br>柱脚                            | "           | "      | 20-D29      | "           |

表2 (d) 断面寸法および配筋リスト (A06)

| 階 | $\sigma_B$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 柱           |        | 梁           |             |
|---|-------------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|
|   |                                     | B×D<br>(cm) | 主筋     | B×D<br>(cm) | 主筋<br>上端 下端 |
| R | 240                                 |             |        | 35x65       | 4-D22 4-D22 |
| 6 | "                                   | 70x70       | 24-D22 | "           | 6-D22 5-D22 |
| 5 | "                                   | "           | "      | "           | 6-D22 6-D22 |
| 4 | "                                   | 75x75       | 24-D25 | 40x70       | 6-D25 5-D25 |
| 3 | "                                   | "           | "      | "           | 6-D25 6-D25 |
| 2 | "                                   | "           | "      | "           | 6-D25 5-D25 |
| 1 | 柱頭<br>柱脚                            | "           | "      | 20-D25      | "           |

表4 使用地震波

| 地震名            | 倍率   | 最大速度<br>(KINE) | 最大加速度<br>(GAL) | 継続時間<br>(S) |
|----------------|------|----------------|----------------|-------------|
| El Centro NS   | 2.37 | 80             | 811            | 0~8.0       |
| Tohoku Uni. NS | 2.21 | 80             | 571            | 0~13.0      |
| Hachinohe EW   | 2.24 | 80             | 408            | 0~10.0      |

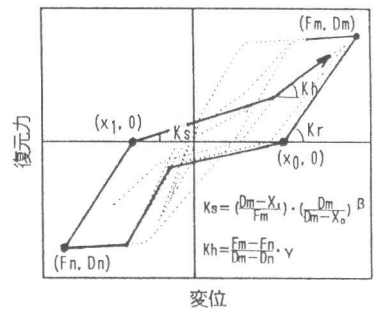


図3 武田スリップモデル

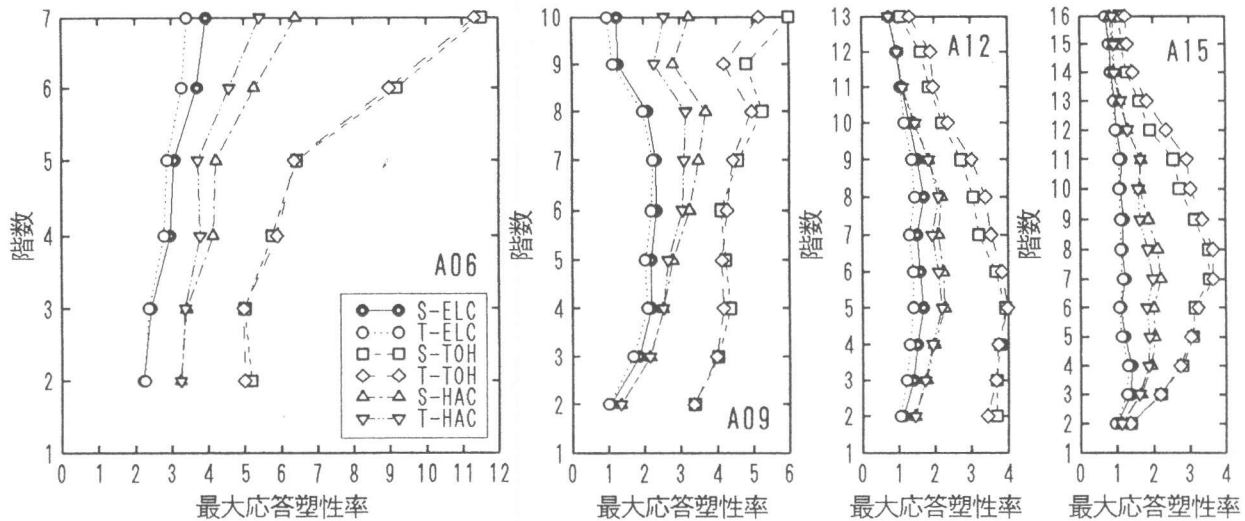


図4 梁の最大応答塑性率

#### 4. 1自由度系による地震応答の予測

1自由度系への縮約: RCフレーム構造の弾塑性地震応答解析の手法は確立されており、広く行われている。ここでは、一自由度系に縮約した解析からフレームの地震応答量を予測する方法を検討する。多自由度系の運動方程式は、減衰を無視すると式(1)と表せる。

$$[m]\{\ddot{x}\} + \{R(x)\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_0 \quad (1)$$

ここに、 $[m]$ : 質量マトリクス、 $\{x\}$ : 各層の基礎に対する相対変位ベクトル、 $\{R(x)\}$ : 各層の復元力ベクトル、 $\{1\}$ : すべての成分が1のベクトル、 $\ddot{x}_0$ : 地動加速度

ここで、構造物の応答に対して、固有1次モードが支配的であると仮定し、1次モード形ベクトル $\{1 u\}^T$ を左から掛けて、1自由度系に置換すると式(2)となる。

$$\{1 u\}^T [m] \{\ddot{x}\} + \{1 u\}^T \{R(x)\} = -\{1 u\}^T [m] \{1\} \ddot{x}_0 \quad (2)$$

$\{1 u\}^T [m] \{1\}$  で基準化すると、

$$\frac{\{1 u\}^T [m] \{\ddot{x}\}}{\{1 u\}^T [m] \{1\}} + \frac{\{1 u\}^T \{R(x)\}}{\{1 u\}^T [m] \{1\}} = -\ddot{x}_0 \quad (3)$$

等価復元力(加速度次元) および等価変位を次の様に定義する。

$$\bar{x} = \frac{\{1 u\}^T [m] \{x\}}{\{1 u\}^T [m] \{1\}} \quad \bar{p} = \frac{\{1 u\}^T \{R(x)\}}{\{1 u\}^T [m] \{1\}} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{x}$ : 等価変位、 $\bar{p}$ : 等価復元力(加速度次元)

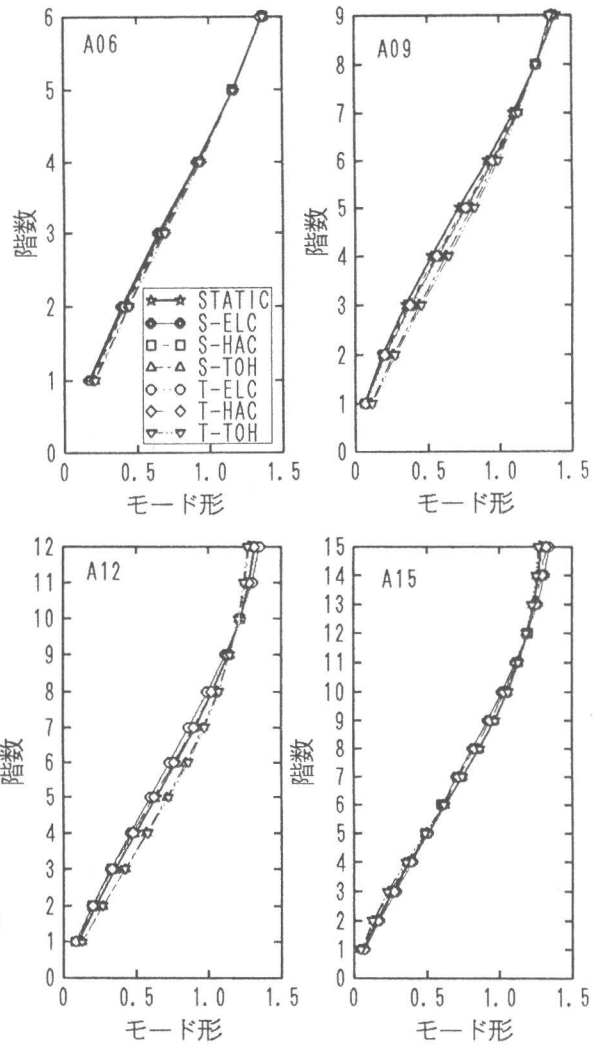


図5 抽出した定モード(1次モード)

式(3)、(4)より、質量1 (tonf·sec<sup>2</sup>/m)の1自由度系の運動方程式に縮約された。

$$\ddot{x} + \bar{p} = \ddot{y}_0 \quad (5)$$

**1次モード形の選定：**非線形応答では、1次モード形  $\{1u\}$  がフレームの損傷により刻々と変化し、一定ではない。しかし、略算的に構造物の地震応答を予測するためには、1次モード形  $\{1u\}$  を一定の形状とし、1自由度系に縮約する手法が現在まで用いられている。既往の研究では、それぞれの研究者の判断により、1次モード形  $\{1u\}$  とし

て、降伏時の変形形状[6]、逆三角形分布[7]や弾性時の1次モード[8]を用いた方法などがある。また、芳村等[9]、滝沢[10]は水平変位の時刻歴から、平均的なモードである定モードを抽出する方法を提案している。

ここでは、滝沢の方法により地震応答解析の水平変位から定モードの抽出を試みた；水平変位の時刻歴ベクトル  $\{x(t)\}$  ( $t_0 \leq t \leq t_1$ ) の最適の1次モード形  $\{1u\}$  は、式(6)の最大固有値に対応する固有ベクトルである。

$$([m][R][m]) \{1u\} = \lambda_1 [m] \{1u\} \quad (6)$$

ここに、 $[R] = \int_{t_0}^{t_1} \{x(t)\} \{x(t)\}^T dt$

抽出した定モード(1次モード)を各フレーム毎に図5に示す。抽出した1次モードは、梁の履歴特性の影響は比較的小さく、入力地震動の波形による影響も少なく安定した形状となっている。

**等価復元力-等価変位関係：**フレームの地震応答から、式(6)より得られた定モードを1次モード形  $\{1u\}$  とし、等価復元力および等価変位を求めた。得られた等価復元力-等価変位関係のうち例として、フレーム A06と A15の地震波 HACの場合を図6に示す。

**1自由度系の履歴特性のモデル化：**ここでは、4例のフレームについて、等価な1自由度系を設定し、フレームの地震応答性状の予測を試みる。履歴特性には、武田モデルあるいは武田スリップモデルを使用した。

滝沢は[10]、地震応答解析と静的漸増載荷解析の最大等価変位を等しくした場合、それぞれの結果から抽出した定モードは極めて類似しており、静的漸増載荷解析により地震応答解析の定モードの近似モードが得られると指摘している。そこで、外力分布形を弾性1次モード形に比例させた静的漸増載荷解析を行った。解析は、外力重心位置の変形角 1/67となるまでの範囲とした。これは、地震波を 80kine に増幅したため、フレームの応答変形が保証変形程度に達するからである。静的漸増載荷解析から定モードを抽出した。得られた定モードを、先に示した図5中に "STATIC" として示した。静的漸増載荷解

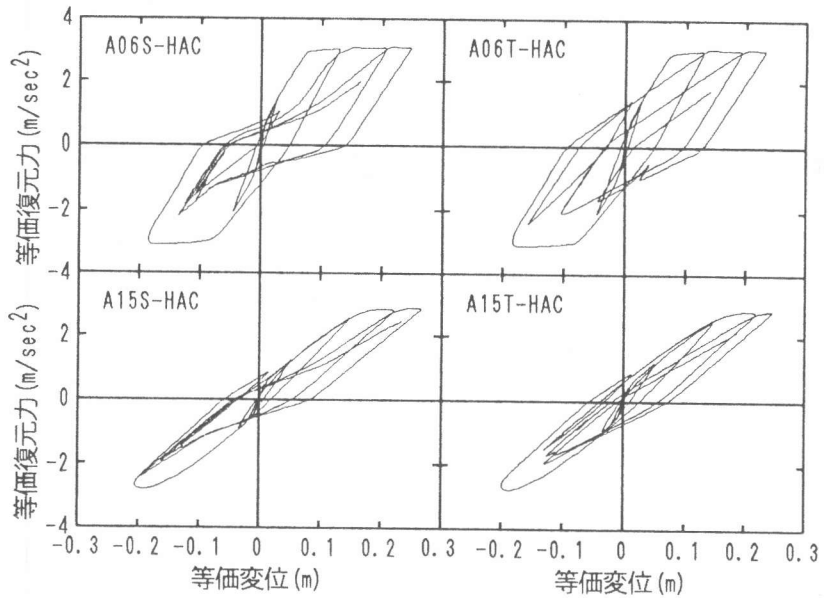


図6 等価復元力-等価変位関係

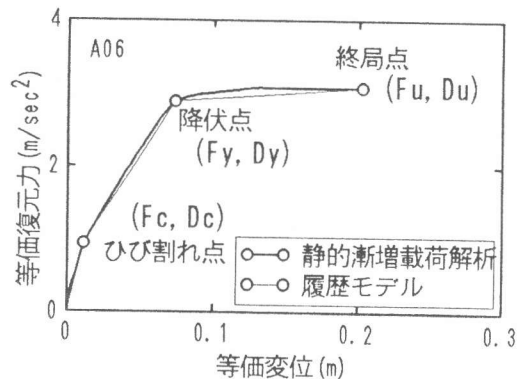


図7 復元力-変位関係のモデル化

析による定モードは、地震応答解析による定モードとよく近似した形状を示している。静的漸増载荷解析から求めた等価復元力-等価変位関係の例を図7に示す。静的漸増载荷解析の等価復元力-等価変位関係から、1自由度系の履歴特性のスケルトンカーブを設定した。ひび割れ点は部材にひび割れが始めて発生した点とし、降伏点は、部材に降伏がはじめて発生した点とした。また、除荷時剛性 $\alpha$ 、スリップ剛性低下指数 $\beta$ およびスリップ硬化指数 $\gamma$ は、簡単のためフレームの解析と同じ値を用いることにした。

フレームの解析に使用した地震波を用いて、設定した1自由度系の地震応答解析を行った。解析には、応答解析プログラム「SDF」[11]を使用した。質量を1 (tonf·sec<sup>2</sup>/m)とすれば、1自由度系の復元力-変位関係と、フレームの等価復元力-等価変位関係が対応することになる。1自由度系の復元力-変位関係について、図6に示した例に対応する結果を図8に示す。A15では、1自由度系の復元力-変位関係は等価復元力-等価変位関係と比較的よく一致している。A06では、1自由度系の方が変位が大きくなっている。

**解析結果の検討：** フレームと1自由度系の復元力および応答変位を比較し、それぞれの例を図9、図10に示す。A06T-HACでは、フレームと1自由度系の間位相差が生じており、ピークに達する時間にずれが起っている。一方、A15T-HACでは、1自由度系によりフレームの応答性状がよく再現されている。

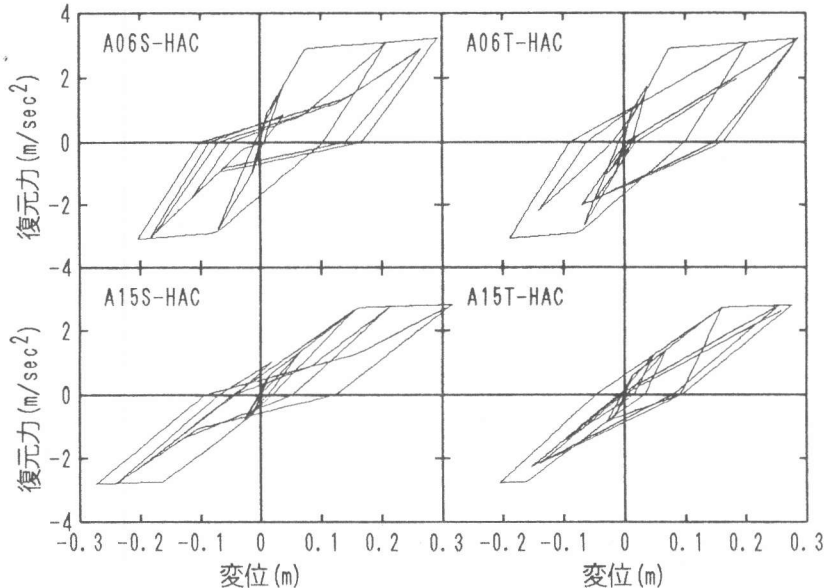


図8 縮約1自由度系の復元力-変位関係

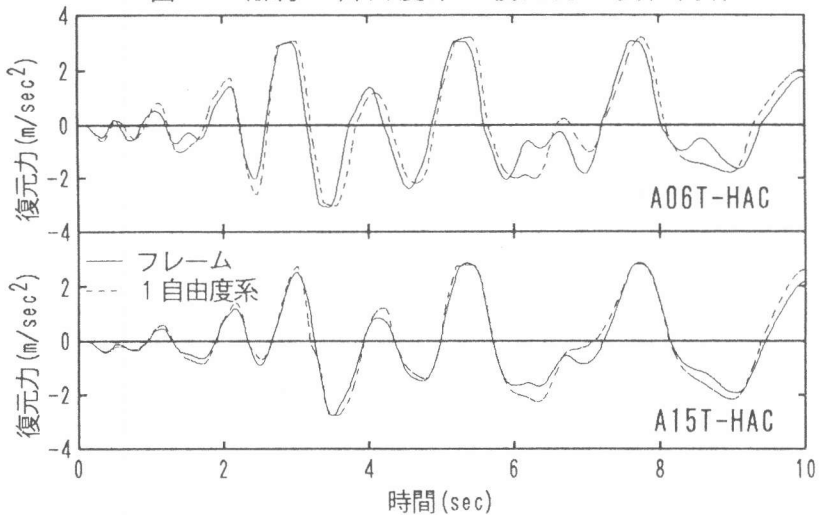


図9 復元力の時刻歴

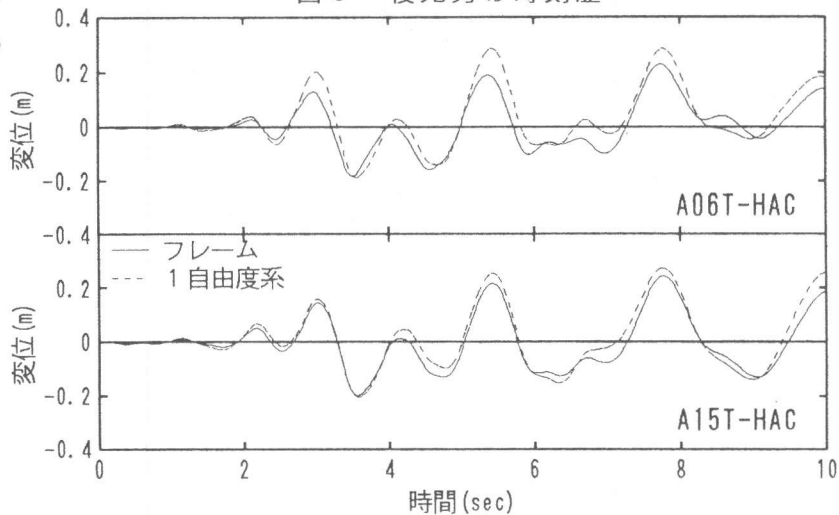


図10 変位の時刻歴

フレームと1自由度系の最大応答変位の比較を図11に示す。1自由度系の最大応答変位は、フレームの最大等価変位を概ね上回る結果となり、平均で1.08倍となったが、本研究で行った方法による縮約1自由度系の弾塑性地震応答解析によりフレームの最大応答変位をある程度予測することが可能である。ただし、1自由度系の応答性状には使用した履歴特性が影響する。従って、1自由度系の地震応答解析により、フレームの最大等価変位をより良く評価するためには、縮約1自由度系の履歴モデルのスケルトンカーブの最適なモデル化の方法、モデルで使用するパラメータ ( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ) の選定等については、今後検討する必要がある。

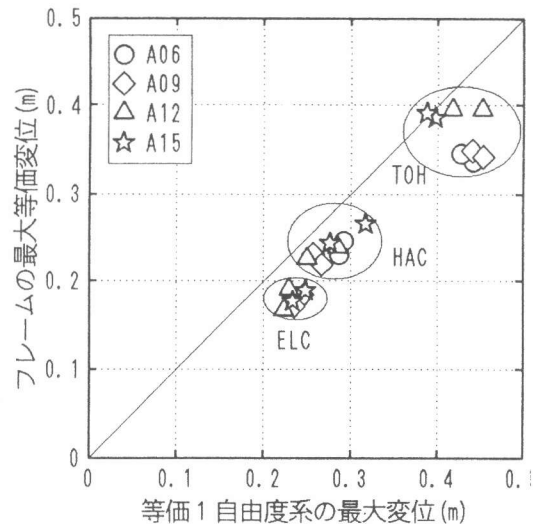


図11 フレームと1自由度系の最大応答変

## 5. 結論

梁降伏型の降伏機構を形成するRCフレーム構造について、梁の材端バネの履歴特性をパラメータとした地震応答解析を行い、1自由度系に縮約してフレームの応答性状を予測する方法を検討した結果、

- (1) 梁部材モデルの履歴特性として武田モデルを用いた場合と武田スリップモデルを用いた場合、梁の最大塑性率およびフレームの最大応答変形に大きな影響はなかった。
- (2) 外力分布形を弾性1次モード形に比例させた静的漸増载荷解析から設定した1自由度系の地震応答解析により、フレームの地震応答解析の最大応答変位をある程度予測することが出来た。
- (3) 縮約1自由度系の履歴特性のモデル化の方法については、さらに検討する必要がある。

## 謝辞

本研究で、地震応答解析プログラム「DANDY」を使用した。また、建設省建築研究所塩原等博士に、計算機SUNワークステーションの使用法に関して適切な助言を頂いた。本研究は、文部省科学研究費・総合研究A（代表者：望月重武蔵工業大学教授）によるものである。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会；「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」、1990年。
- 2) 日本建築学会；「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、1990年。
- 3) 壁谷沢寿海、他；「一日米共同研究-鉄筋コンクリート造実大7層試験体の耐震性に関する研究(その3) 擬似動的解析」、第6回日本地震工学シンポジウム講演集、1982年、pp.1161-1168。
- 4) Takeda, T., M. A. Sozen, and N. N. Nielsen; Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings, ASCE, Vol. 96, No. ST12, 1970, pp. 2557-2573.
- 5) 菅野俊介、鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究、コンクリートジャーナル、Vol. 11、No. 2、1973年、pp. 1-9。
- 6) 塩原等、小谷俊介、青山博之；「縮約モデルによる構造物の弾塑性応答解析」、第28回構造工学シンポジウム講演梗概集、pp. 101-111。
- 7) 境有紀、小谷俊介、青山博之；「中高層RC純フレームの終局強度型耐震設計」、構造工学論文集、pp. 133-146、1989年。
- 8) 片山和行、佐藤和彦、藤原薫、後藤定己；「高層鉄筋コンクリート造建物の弾塑性動特性の検討(その1) 荷重増分解析に運動した1質点系による応答予測」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp. 137-138、1985年。
- 9) 星野麗子、芳村学；「壁量の異なる耐震壁フレーム構造の地震応答変形性状(その1) 定モードの抽出とモード分解の手法」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp. 545-546、1991年。
- 10) 滝沢春男；「梁崩壊型靱性架構の動的機構形成における定モード成分の抽出」、構造工学論文集、Vol. 36B、1990年。
- 11) Otani, S.;「Hysteresis Models of Reinforced Concrete for Earthquake Response Analysis」、東京大学工学部紀要、Vol 136、No. 2、pp. 125-159、1981。