

# 論文 柱梁接合部マクロエレメントを用いた RC 造骨組の地震応答解析 —主要動の継続時間をパラメータとした解析結果

金 秀禧<sup>\*1</sup>・楠原 文雄<sup>\*2</sup>・塩原 等<sup>\*3</sup>

**要旨:** 柱梁接合部マクロエレメントを用いて接合部の非線形特性を考慮した鉄筋コンクリート造骨組の非線形地震応答解析を行い、地震動の主要動の継続時間をパラメータとして応答性状の比較を行った。解析結果より、主要動の継続時間が骨組の崩壊形式と損傷の程度に影響することを示した。接合部の非線形性を考慮すると地震動の入力レベルが大きくなるにつれてスリップ形状の履歴特性が顕著となり、建物の剛性低下や周期の伸びが大きくなったが、柱梁接合部を剛域としたモデルは、地震動の入力レベルに伴う周期の伸びが小さかった。

**キーワード:** 柱梁接合部, 非線形地震応答解析, 主要動の継続時間

## 1. はじめに

従来の鉄筋コンクリート造骨組の耐震設計では、梁曲げ降伏型の破壊形式を目標とすることが一般的であり、柱梁接合部については、せん断強度が入力せん断力を上回るようにして接合部の破壊は起こさせないこととしている。しかし、既往の柱梁接合部の実験結果<sup>1)</sup>より、柱梁接合部のせん断余裕度に関係なく、柱梁曲げ強度比が1に近いと曲げ理論で推定される梁の曲げ強度にも柱の曲げ強度にも達することがなく、コンクリートの圧壊や主筋の降伏などの損傷が柱梁接合部に集中し、エネルギー吸収能力が乏しいスリップ形状を示す履歴性状となることが分かってきた。このような柱梁接合部が多く含まれる骨組全体の耐震性を一般的に明らかにするとともに応答性状に及ぼす影響因子を把握するために、様々な因子と地震動の組合せの動的応答結果を蓄積する必要がある。そこで、筆者らは、柱梁接合部のマクロエレメントを用いて骨組をモデル化し、その応答性状について検討を進めている<sup>2)</sup>。

本研究では、ケーススタディとして柱梁曲げ強度比 1.0, 1.4 の 8 層鉄筋コンクリート造無均等ラーメンを取り上げ、地震動の主要動の継続時間をパラメータとし、柱梁接合部の非線形性を考慮する場合と柱梁接合部を剛域とする場合の地震応答を IDA (Incremental Dynamic Analysis) 解析<sup>3)</sup>で比較するとともに、倒壊余裕度に着目して影響因子の検討を行った。

## 2. 解析モデルの概要<sup>2)</sup>

### 2.1 柱梁接合部のマクロエレメントモデル

図-1 に本論で使用使用する十字形およびト形の柱梁接合

部のマクロエレメントを示す。このモデルは、朴<sup>4)</sup>や田尻<sup>5)</sup>のマクロエレメントを若干簡略化したものであり、柱梁接合部フェースにおける平面保持仮定を表す剛板と、コンクリート、鉄筋、主筋とコンクリートの付着を表す一軸ばねから構成されている。斜め方向に配置されたコンクリート一軸ばねには水平力により生ずる応力を負担させ、鉛直および水平方向のコンクリートばねには軸力および長期応力により生ずる鉛直・水平なコンクリート応力を負担させる。また、柱梁接合部の変形において柱および梁からの主筋の抜け出しの影響を考慮するため、柱・梁主筋を表す一軸ばねの剛性を図-1 中に示すように低減させる。主筋が柱梁接合部内に定着される場合(図-1(b))、水平荷重に抵抗するコンクリートの斜め方向の一軸ばねは、ト形柱梁接合部の実験で見られた接合部パネル中央の斜めひび割れの向きに対応させ、梁と柱の入隅から主筋の定着端を結ぶ向きとする。

コンクリート、鉄筋、付着の各ばねの構成則は朴<sup>4)</sup>のモデルと同様に一軸材料特性に基づいて定める。

### 2.2 部分架構の解析と実験結果の比較

図-2 に十字形およびト形の部分架構の代表的な試験体の水平加力実験結果を解析結果と比較して示す。十字形の B02 は接合部破壊となり、H01 は梁曲げ破壊となったもので、ト形の試験体はいずれも接合部破壊となったものである。十字形の解析結果は、耐力、剛性、履歴性状ともに実験結果と良い対応を示している。ト形については、耐力は解析結果の方がやや小さくなったが、スリップ形の履歴性状については実験結果をよく表せている。

### 2.3 骨組モデル

解析モデルは図-3 に示すような無限均等ラーメンで

\*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻大学院生 修(工) (学生会員)

\*2 東京大学 工学系研究科建築学専攻助教 修(工) (正会員)

\*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

ある。梁の右端の節点（図中 A'）の変位は柱梁接合部パネルの左辺上の節点（図中 A）の変位に従属させ、同一とする。また、最下階柱梁接合部の下端をピン支持とする。柱梁接合部にはマクロエレメントを用い、最上階および最下階の柱梁接合部はト形のモデルを 90 度回転して適用する。梁および柱は線材とし、材軸方向に複数の

積分点を有する Force-Based Element を用い、各積分点には断面解析より求めたひび割れ点と降伏点で表される 3 折れ線のモーメント—曲率関係を与える。また、繰り返しの履歴則は Takeda Model とする。梁部材には長期荷重を考慮し、部材内のモーメント分布を 2 次曲線とし、柱では力の釣り合いマトリックスと幾何剛性マトリックスにより、P— $\Delta$  効果を考慮する。ただし、変動軸力の影響は考慮しない。また、柱梁接合部上下パネルの水平変位の平均、柱梁接合部左右パネルの鉛直変位の平均を各層の水平および鉛直の代表変位とし、質量はこの代表変位の自由度に対して集中質量として与える。

柱梁接合部を剛域とした場合について、剛域端は接合部フェースから柱と梁せいの 1/4 入った点とする。また、柱・梁の降伏時の剛性低下率は菅野式<sup>6)</sup>を用いる。

### 3. 解析対象建物および入力地震動

#### 3.1 解析対象物

解析対象は 8 層の骨組で、梁スパンは 7m、奥行きスパンは 6m、各層の高さは 3.5m とする。梁・柱の断面寸法と各階の建築学会の設計指針<sup>7)</sup>に基づく接合部のせん断余裕度を表-1 に示す。設計用外力分布は  $A_i$  分布に基づき、梁主筋量は全体崩壊系の機構形成時の 1 階の層せん断力係数が 0.3 程度となるように定め、柱梁曲げ強度比が 1.0、または 1.4 となるように柱の主筋量を調節する。

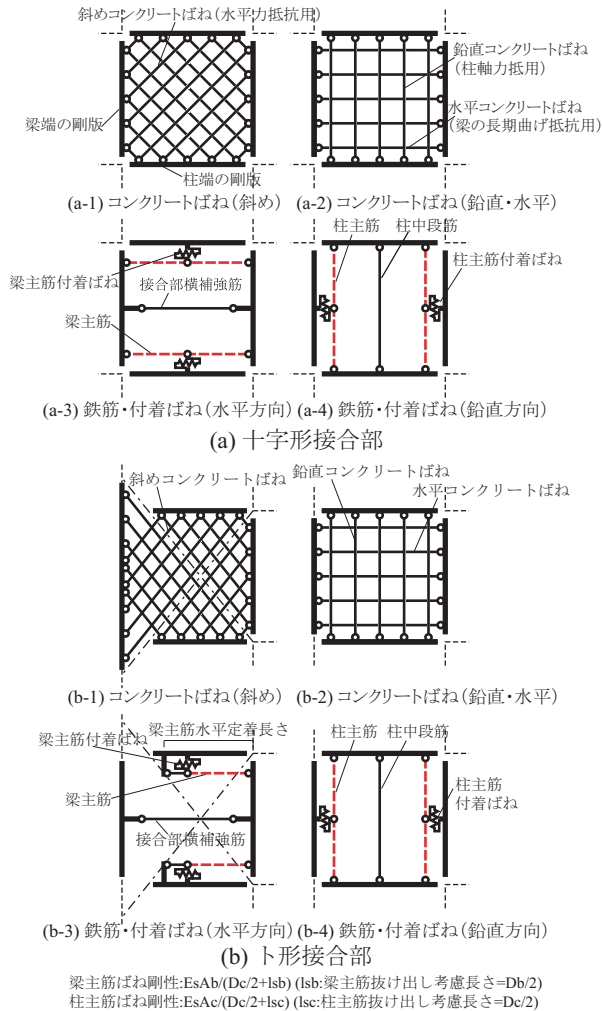


図-1 柱梁接合部マクロエレメント

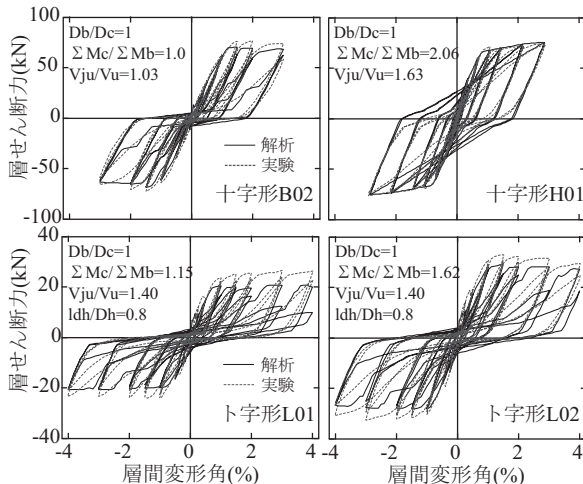


図-2 解析と実験結果の比較

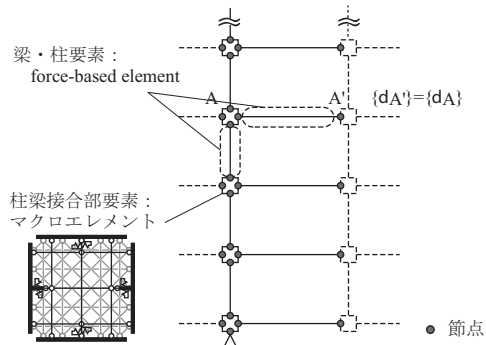


表-1 構造物の概要

	梁(幅 x せい) mm	柱(幅 x せい) mm	接合部せん断 余裕度
R	400x800	—	—
8	400x800	720x720	1.3
7	400x800	720x720	1.3
6	400x800	720x720	1.2
5	450x800	720x720	1.1
4	450x800	720x720	1.0
3	450x800	720x720	1.0
2	450x800	720x720	1.0
1	600x1800	720x720	—

柱梁接合部の横補強筋量は補強筋比 0.3%とする。コンクリートの圧縮強度は 39MPa, 主筋の降伏強度は 420MPaとする。各層の質量は, 単位面積あたりの重量を最上階では 1.1kN/m<sup>2</sup>, 基礎階では 2.0kN/m<sup>2</sup>, その以外では 1.0kN/m<sup>2</sup>とする。

本解析では, 接合部の非線形を考慮するケースと, 比較のため, 柱梁接合部を剛域としたモデルによる解析を行った。建物の弾性 1 次固有周期は, 接合部非線形モデルは 0.73 秒, 接合部剛域モデルは 0.71 秒であった。地震応答解析では減衰定数を 3%とする瞬間剛性比例型減衰を用いた。

### 3.2 入力地震動

継続時間が短く瞬間的な入力を受ける場合と継続時間が長く繰り返し入力を受ける場合とは, 地震動による建物への破壊力が異なることが考えられる。本解析では, 地震波の主要動の継続時間が建物の崩壊形状, 剛性, 履歴に与える影響について検討を行う。入力地震動は, 図-4 に示す正規分布の標準偏差をパラメータとする 3 種の位相差分スペクトルを用い<sup>8)</sup>, 主要動の継続時間が異なる模擬地震動を作成した。地震動の作成時の目標スペクトルは告示に示されている第 2 種地盤上の応答加速度スペクトルとした。図-5 に作成した地震動の加速度応答スペクトルを, 図-6 に模擬地震動の波形を示す。

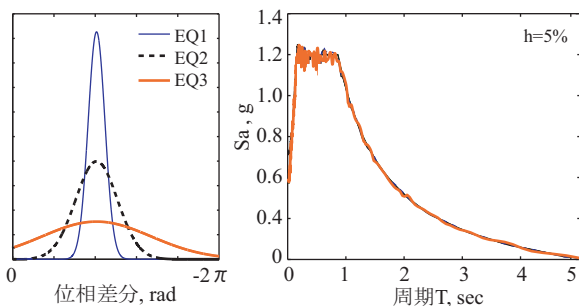


図-4 位相差分布 図-5 加速度応答スペクトル

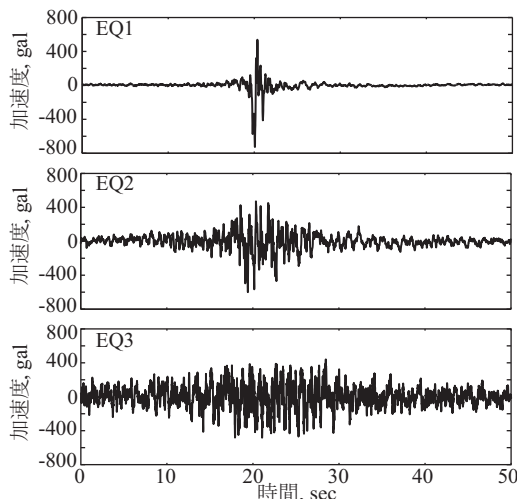


図-6 入力地震動

## 4. 解析結果

### 4.1 主要動の継続時間による最大層間変形角

本解析は, IDA 手法<sup>3)</sup>を用いて, 解析対象の建物の 1 次固有周期における弾性スペクトル加速度が徐々に大きくなるように入力倍率を変えて, 建物が崩壊するまで解析を行った。ここでは, 地震動に対する応答により建物の層間変形角が著しく増大し, 柱が水平になり層間の鉛直方向の距離がゼロとなる状態を崩壊と定義する。

図-7 には接合部非線形モデルについて, 柱梁曲げ強度比が 1.0 と 1.4 の場合の主要動の継続時間による地震動の弾性スペクトル加速度と最大層間変形角の関係を示す。また, 図-7 右列には同一のスペクトル加速度において EQ1 に対する最大層間変形角と EQ3 に対する最大層間変形角の比をプロットした。主要動の継続時間が短い EQ1 では, 2.0g の入力レベルまで建物の崩壊は起こらず, 入力レベルに伴い変形が増え続けた。一方, 継続時間が長い EQ3 では, 1.3g~1.4g の入力レベルで建物が崩壊した。主要動の継続時間がやや長い EQ2 においては, 同一のスペクトル加速度に対して, EQ3 による変位応答より小さくなったが, EQ1 による応答変位とはその差が小さ

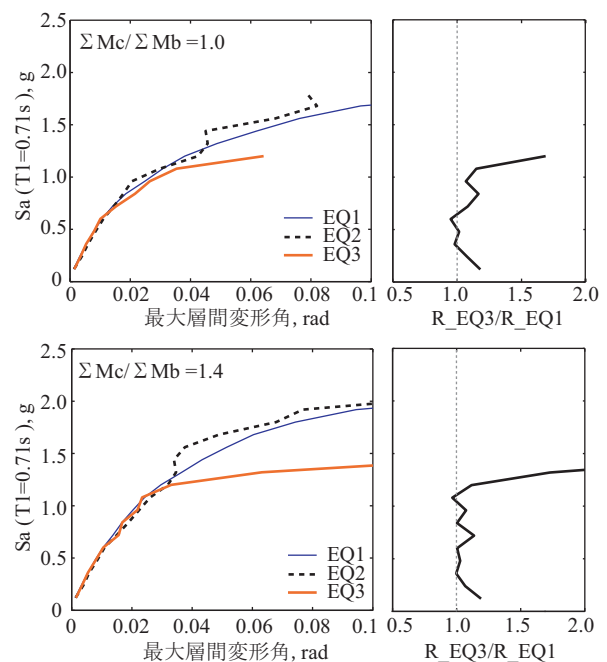


図-7 スペクトル加速度と最大層間変形角の関係

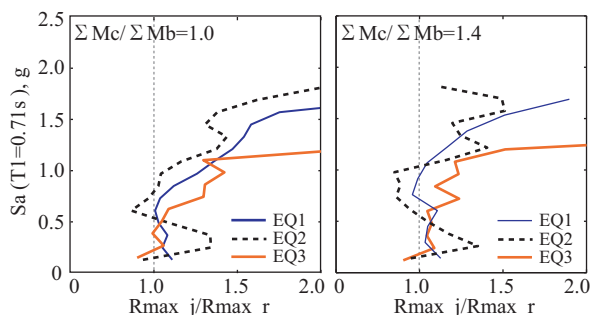


図-8 接合部モデルによる最大層間変形角の差

くその大小もばらつく結果が見られた。ただし、建物が崩壊した時の入力レベルはEQ1より小さく、EQ3より大きかった。

EQ1とEQ3の変形角を比較すると、柱梁曲げ強度比1.0については、0.6g入力レベルまではその変形角の差が小さいが、0.6gより大きい入力レベルでは変形角の差が増大した。また、柱梁曲げ強度比が1.4については、1.1gより大きい入力レベルでEQ3のIDAカーブの形状の傾きが著しく小さくEQ1とEQ3における変形角の差も著しく増大した。

よって、何度も繰り返し入力される地震動の方が急激なエネルギー入力される地震動より構造物の損傷を進行させ、とくに建物の大破および崩壊に至るような大変形領域において、地震動の継続時間が建物の剛性や耐力に大きく影響を与えることが言える。

#### 4.2 モデルの違いによる最大層間変形角

図-8には柱梁接合部を非線形とした解析による最大層間変形角 ( $R_{max-j}$ ) と接合部を剛域とした解析による最大層間変形角 ( $R_{max-r}$ ) の比を示す。

主要動の継続時間や柱梁曲げ強度比によらず、地震動の入力レベルが大きくなるにつれて接合部のモデルによる応答差も大きくなる傾向が見られた。また、柱梁曲げ強度比1.0の方が柱梁曲げ強度比1.4に比べて接合部モデルによる応答差が大きくなった。3種の地震動のうち、継続時間が長いEQ3において、接合部モデルによる応答差が最も大きくなり、建物の初降伏が見られた約0.6gの入力レベルから接合部のモデルによる応答差も大きく増大した。

#### 4.3 柱・梁の塑性率と接合部内主筋のひずみ

図-9は接合部非線形モデルについて、継続時間が異なる3種の地震動に対する地震動のスペクトル加速度と柱・梁の最大塑性率、また、接合部内の柱と梁主筋の最大ひずみの関係を示す。

同一のスペクトル加速度に対して、入力波の継続時間が長いほど、梁の塑性率は大きくなり、柱の塑性率は小さくなる傾向が見られた。また、接合部内の梁主筋のひずみに対しては地震動の継続時間による影響が小さいが、接合部内の柱主筋のひずみは継続時間が長いほど大きくなった。よって、継続時間が短いパルス的な地震波は、柱への損傷を進行させ、継続時間が長く繰り返し数が多くなるほど梁と接合部への損傷を進行させる可能性がある。

#### 4.4 柱・梁・接合部の履歴吸収エネルギー

図-10は柱梁曲げ強度比1.0について、総履歴吸収エネルギーに対する梁・柱・接合部それぞれの履歴吸収エネルギーの内訳を示す。図-11には柱梁曲げ強度比1.4について履歴吸収エネルギーの内訳を示す。また、図-10と図-11の右列には接合部を剛域とした解析につい

て柱と梁の履歴吸収エネルギーの内訳を比較して示す。上から地震波の継続時間が短い波形から長い波形に対する内訳を順番に表す。図中には構造物の初降伏が見られた地震動の入力レベルを縦線で表わしている。

柱梁曲げ強度比1.0の場合、接合部非線形モデルにおける梁の吸収エネルギーは総吸収エネルギーに対して20%~30%を占め、接合部の吸収エネルギーは総吸収エネルギーの50%以上を占める。一方、接合部剛域モデルでは梁の吸収エネルギーが全体の60%~80%を占める。柱梁曲げ強度比が1.4の場合、接合部非線形モデルにおいては、柱梁曲げ強度比1.0に比べて梁の吸収エネルギーが占める割合が増え、接合部の吸収エネルギーが占める割合の変化は小さい。また、接合部剛域モデルにおいては、梁の吸収エネルギーが90%程度まで増大した。

地震波の継続時間による履歴吸収エネルギーの割合の変化を比較すると、柱梁曲げ強度比によらず継続時間が短い波形ほど柱が占める吸収エネルギーの割合が大きくなる傾向が見られた。また、継続時間が長い波形ほど接合部の吸収エネルギーが占める割合がやや大きくなる傾向が見られた。

これらの結果より、接合部剛域モデルでは、梁へ損傷が集中する梁降伏型の破壊形式となることを示し、地震動のレベルが大きくなっても構造物の層間変形角が急増し、柱がほぼ水平になる倒壊現象は生じにくいことは予想できる。一方、接合部非線形を考慮した解析結果より、入力波の継続時間が長くなるほど、繰り返し効果による損傷が接合部に累積される可能性が考えられる。また、接合部への損傷が大きく進行した場合、図-12に示すように柱の上下にヒンジが生じることと同様な層崩壊型の破壊形式となり、骨組が不安定となりやすい。

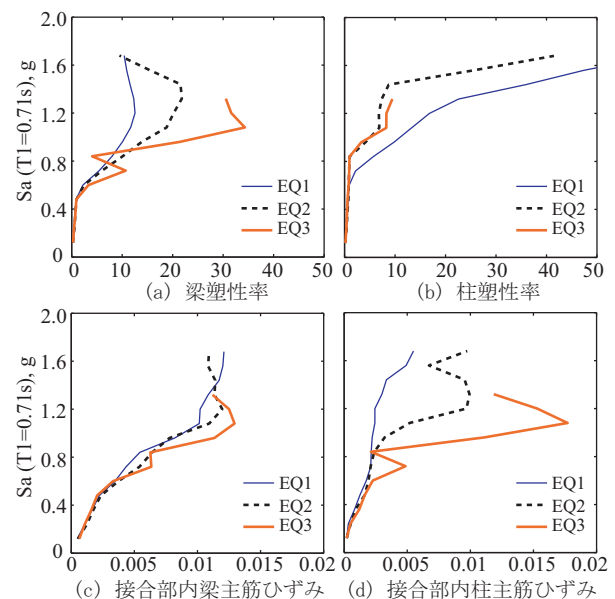


図-9 梁・柱の塑性率および接合部内主筋のひずみ (柱梁曲げ強度比=1.0)

#### 4.5 履歴吸収エネルギーの層分布

図-13には3種の入力波に対する総履歴吸収エネルギーに対する各層の履歴吸収エネルギーの分布を示す。図の上段には柱梁接合部非線形モデルによる結果を、下段には接合部剛域モデルによる結果を比較して示す。

接合部非線形モデルについては、継続時間が短いEQ1を入力した場合、地震動の入力レベルによらず構造物の低層での吸収エネルギーが大きくなった。一方、継続時間が長いEQ2とEQ3を入力した場合、比較的構造物の中層での吸収エネルギーが大きくなる傾向が見られた。また、継続時間が長いほど、入力レベルが大きくなるにつれて特定の層への吸収エネルギーが集中する傾向が見られた。よって、特定の層に損傷が集中したことが、構造物の倒壊時の地震動の入力レベルが小さくなった原因の一つであると思われる。

接合部剛域モデルにおいては、地震動の種類によらず構造物の低層へのエネルギー吸収が大きくなり、継続時間が長いほど、吸収エネルギーがより多くの層に分散された。その理由は、継続時間が短いEQ1の場合、1層の柱脚での損傷が大きく、継続時間が長いEQ3の場合、柱

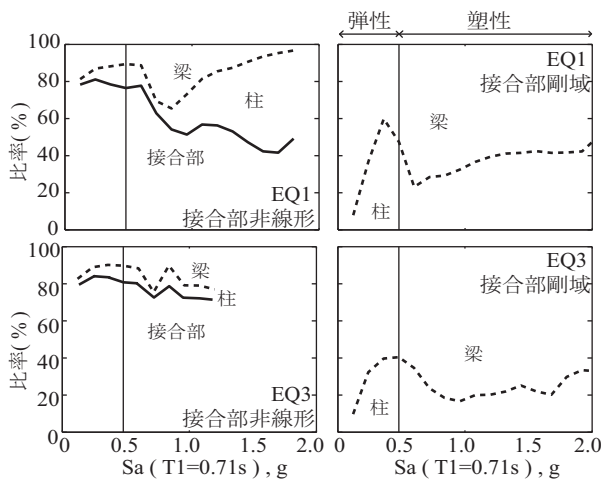


図-10 履歴吸収エネルギーの内訳 (曲げ強度比=1.0)

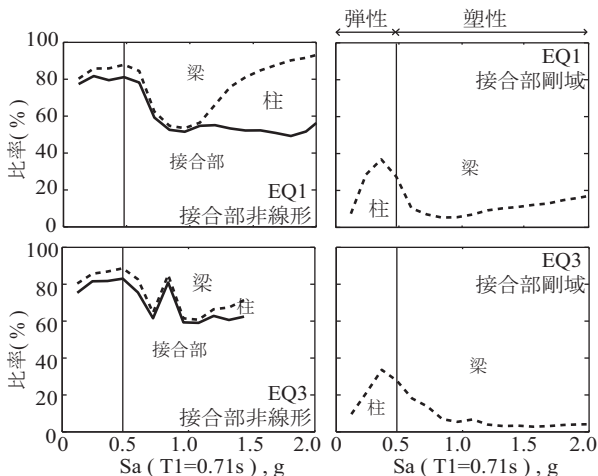


図-11 履歴吸収エネルギーの内訳 (曲げ強度比=1.4)

より上層の梁へ損傷が大きくなったためである。

#### 4.6 柱梁接合部モデルによる履歴形状

図-14には接合部非線形モデルについて、EQ3を入力した場合の各入力レベルにおける3層での層間変形角と層せん断力の関係および層間変形角の時刻歴を示す。また、図-15には接合部剛域モデルについての層間変形角と層せん断力の関係および層間変形角の時刻歴を示す。

図-14より、接合部非線形モデルによる解析結果より、層間変形角と層せん断力の履歴特性にスリップ性状が見られ、地震動の入力レベルが大きくなるにつれて、スリップ型の履歴特性がより顕著となることが分かる。また、このスリップ性状が著しくなることにより、最大変形時点を超えてから大きく周期が伸びている。一方、接合部剛域モデルによる結果では、接合部の履歴特性が反映されないため、Takeda Modelに近い比較的安定した履歴性状が見られた。また、入力レベルが大きくなるにつれて、周期はやや伸びるが、接合部非線形モデルによる結果と比べて、周期の伸びが顕著ではない。

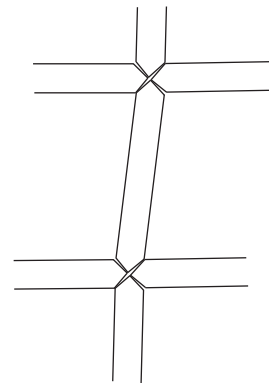


図-12 接合部変形による層崩機構形成

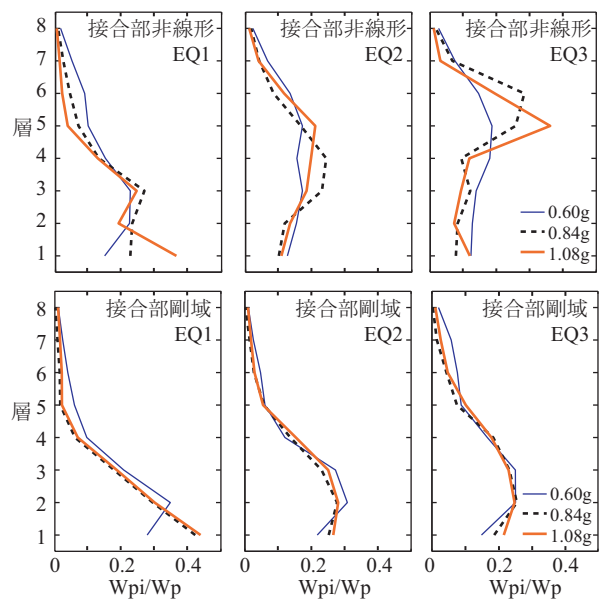


図-13 履歴吸収エネルギーの層分布 (柱梁曲げ強度比=1.0)



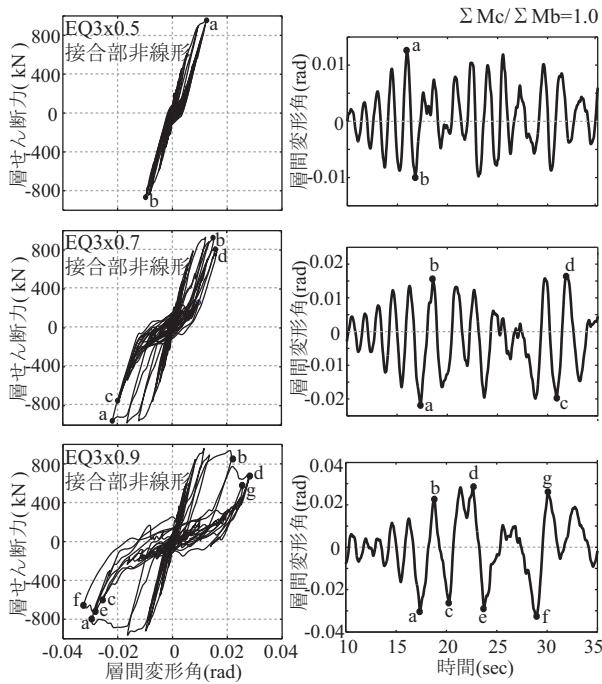


図-14 接合部非線形モデルによる履歴

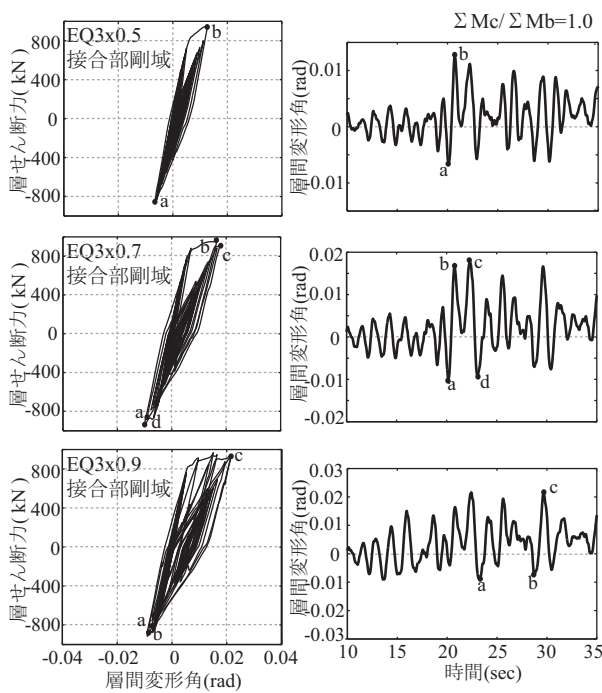


図-15 接合部剛域モデルによる履歴

## 5. まとめ

本論では、柱梁接合部マクロエレメントを用いた非線形骨組解析を行い、接合部剛域モデルによる応答性状との比較を行った。さらに、主要動の継続時間が異なる地震動による応答性状を比較し、以下の知見を得た。

(1) 地震動の継続時間が建物の剛性や耐力に大きく影響を与え、何度も繰り返し入力される継続時間の長い地震動が急激なエネルギーを入力される地震動より構造物の損傷を進行させ、建物が崩壊する時の

入力レベルが小さかった。

- (2) 主要動の継続時間が短いほど、総履歴吸収エネルギーに占める柱の吸収エネルギーの比率は大きくなる傾向が、総履歴吸収エネルギーに占める梁の吸収エネルギーの比率は小さくなる傾向が見られた。
- (3) 主要動の継続時間が長くなるほど、総履歴吸収エネルギーに対する接合部での履歴吸収エネルギーが占める割合が増えるとともに、特定の層に集中する傾向が見られ、構造物の倒壊を早く進行させた。
- (4) 接合部剛域モデルでは、総履歴吸収エネルギーに対して梁の履歴エネルギーが占める割合が80%以上となり、梁降伏型の崩壊形式を示すことにより、建物の崩壊が生じにくい。
- (5) 接合部非線形モデルでは、地震動の入力レベルが大きくなるにつれてスリップ形状の履歴特性が顕著になり、構造物の剛性も顕著に低下し、周期の伸びが大きくなった。一方、接合部剛域モデルでは、接合部の履歴性状を反映しないため、安定した履歴形状となり、地震動の入力レベルが大きくなっても周期の伸びは小さかった。

## 参考文献

- 1) 塩原等, 楠原文雄, 他: 鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の耐震性能におよぼす設計因子の影響に関する実験 (その1~5), 日本建築学会大会, 2010
- 2) 楠原文雄, 金秀禧, 塩原等: 接合部降伏する鉄筋コンクリート造骨組の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第686号, pp847-855, 2013.4
- 3) Dimitrios Vamvatsikos and C. Allin Cornell: Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, No.3, pp.491-514, 2002.3
- 4) 朴哲敏, 塩原等: 鉄筋コンクリート造平面十字型柱梁接合部の破壊条件に関するパラメトリック解析, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 429-435, 2008.4
- 5) 田尻清太郎, 塩原等, 楠原文雄: RC 柱梁接合部マクロエレメントによる十字型柱梁接合部の履歴特性の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.331-336, 2006.1
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 8) 桑村仁, 竹田拓也, 佐藤義也: 地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率, 日本建築学会構造工学論文集, 第491号, pp. 29-36, 1997.1