

## 20 層鋼構造平面骨組の倒壊挙動に柱梁耐力比が及ぼす影響

正会員 ○若月雄大<sup>\*1</sup> 同 吹田啓一郎<sup>\*2</sup>

## 2. 構造 -10. 鉄骨構造

柱梁耐力比 魚骨形モデル 劣化挙動 倒壊挙動 地震応答解析

## 1. はじめに

近年の地震学の発展により現行の建築基準法の想定よりもはるかに大きな地震動が起こる可能性が指摘されている。特に上町断層帯地震において予測されている地震動は卓越周期が 2 秒程度以上のものが多い長周期パルス波の特性を有し、高層建築物の応答が大きくなることが予測される。現在の構造設計では部材の復元力特性を完全弾塑性と仮定して構造計算を行っているが、吹田ら<sup>1)</sup>による実大倒壊実験によれば、想定以上の地震波を受けたときには部材に局部座屈や破断が生じ耐力劣化を起こすことが確認されている。よって部材の履歴特性には耐力劣化も考慮する必要があると言える。さらに、この実験では 2 次設計レベルの入力地震波では全体崩壊型を形成していたが、入力レベルが大きくなると部材の耐力劣化が原因で部分崩壊型へ移行し倒壊に至っている。部分崩壊型に移行するのは柱に塑性ヒンジが生じることが原因であり、2 次設計レベルで全体崩壊型メカニズムを形成するための条件として用いられている柱梁耐力比（以下 COF と呼ぶ）1.5 が、倒壊時の挙動にどのような影響を及ぼすのかについて有用な情報は得られていない。そこで本研究では COF をパラメータとし、高層骨組の倒壊挙動に COF がどのような影響を及ぼすのかを調べることにする。

## 2. 解析方法

解析モデルは超高層建物の一例として 20 層の魚骨形モデル<sup>2)</sup>とする。階高 3.5m, スパン長さ 3.5m, 各層の重量を 800kN とする。条件として COF は 1.5,

幅厚比は FA ランクを満たす限界値、軸力比は 0.2, 水平変位の弾性成分比は柱：梁=1:1 となるように設定した。また、解析モデルは剛棒と部材端弾塑性バネで構成し、部材端バネに加藤・秋山モデル<sup>3)</sup>を用いることで劣化挙動を考慮する。

設計クライテリアとしては、1 次レベルで層間変形角 1/200 以下かつ弾性範囲内、2 次レベルで層間変形角 1/100 以下を用いた。設計用の入力波として ElCentro NS, Hachinohe EW, Taft EW の 3 つの観測波を用いて、最も応答が大きくなる Taft EW 入力時においても設計クライテリアを満足することを確認した（図 1）。

解析プログラムには材料非線形と幾何非線形を考慮できる CLAP.f<sup>4)</sup>を用いた。ただし、合成梁効果や立体挙動に関しては考慮していない。

COF1.5 のモデルを基準とし、梁の耐力は一定のまま柱の耐力を変えることで COF が 1.0, 1.3, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 の各モデルを作成し、COF による挙動の違いを調べた。

## 3. 増分解析

柱の節点に一定の鉛直荷重を作用させ、 $A_i$  分布に比例した水平力による増分解析を行った。得られた層せん断力  $Q$ -層間変形角  $R$  関係を図 2 に、崩壊メカニズムの移行の様子を図 3 にそれぞれ示す。①は最初にいずれかの部材が劣化域に入った時点、②は最初にいずれかの部材が除荷された時点、③は倒壊時のメカニズムを形成した時点をそれぞれ示している。ここで、倒壊の定義は耐力劣化して層せん断力  $Q$  が 0 となり鉛直荷重支持能力を喪失した時点とする。

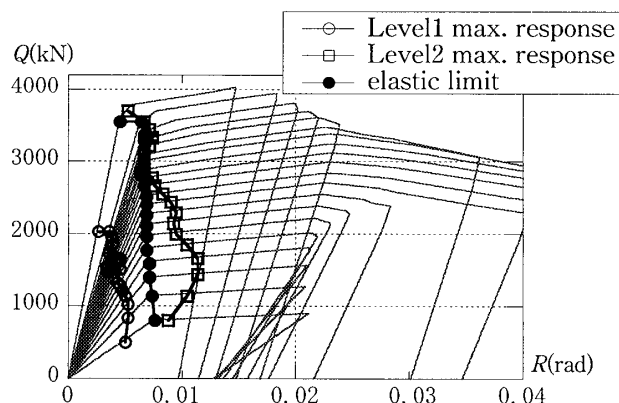
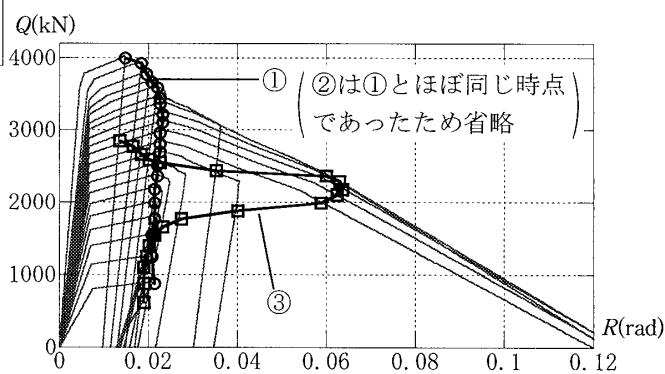


図 1 増分解析結果と設計用地震応答解析結果

図 2 増分解析結果による倒壊までの  $Q$ - $R$  関係

Influence of Column Overdesign Factor on Collapse Behavior of 20 Story Steel Plane Frames

WAKATSUKI Takehiro and SUITA Keiichiro

はじめは全体崩壊型を形成していたが、その後2層柱脚に塑性ヒンジが生じ、10層梁が劣化域に入り①の崩壊メカニズムを形成する。そこから劣化域に入る梁が上下層に拡がり、上層が除荷されて②のメカニズムとなる。さらに変形が進行すると最終的には7～11層の部分崩壊型となり倒壊に至った。

COFが異なる各モデルの倒壊メカニズムを図4に並べて示す。全てのモデルにおいて、はじめは全体崩壊型を形成していたが、倒壊時のメカニズムは部分崩壊型となった。図4より、COF1.0～2.0ではCOFが大きくなるにつれて部分崩壊する層が下層から上層に移る様子がわかる。COF2.5以上はCOF2.0とほぼ同じ層での部分崩壊メカニズムを形成し、COFの影響はない。

また、図5に劣化域に入った時点、倒壊メカニズムを形成した時点、倒壊した時点の層間変形角の最大値 $R_{max}$ をまとめて示す。劣化域に入る時点はCOFによらずほぼ一定であるが、倒壊メカニズム形成時と倒壊時はCOFが大きくなるにつれて $R_{max}$ の値も大きくなることわかる。また、倒壊メカニズムを形成してから倒壊に至るまでの $R_{max}$ の差はCOFによらず概ね0.1程度で一定であると言える。

4. 地震応答解析

検討地震波には川辺、釜江<sup>5)</sup>による上町断層帯の予測地震波のうち、卓越周期が固有値解析により得られた解析モデルの1次固有周期2.06sに近いFKS, JMAEBCの2地点のEW成分を用いた。これらの地震波はパルス性が強く、本研究で考える倒壊に結びつくものとして適切であるといえる。図6に加速

度波形を、図7に速度応答スペクトルをそれぞれ示す。

各地震波の原波を入力し、原波で倒壊したモデルには入力倍率を0.1ずつ減少させ、原波で倒壊しなかったモデルには入力倍率を0.1ずつ増加させて解析を行った。

応答解析結果の一例を示す。COF1.5のモデルにFKS原波を入力したときの倒壊した層と倒壊しなかった層について、図8に層間変形角 $R$ の時刻歴応答を、図9に層せん断力 $Q$ -層間変形角 $R$ 関係をそれぞれ示す。倒壊した9層ではある時点から層間変形角の値が一方方向に増大し始め、層せん断力 $Q=0$ となり鉛直荷重支持能力を喪失し、倒壊に至ることがわかる。倒壊しない10層では、振動中心は移動するがそのまま振動を続ける様子が確認された。

また、全ての地震応答解析結果より、COF, 入力地震動の倍率の値と、倒壊の有無について表1にまとめて示す。COFが大きくなるほど倒壊に至る入力レベルが大きくなっており、COFが倒壊防止のための指標の1つと考えられることを示唆している。

倒壊時のメカニズムをFKSに関して図10に、JMAEBCに関して図11にそれぞれ示す。地震波やCOFによらず、全ての解析ケースで倒壊時には部分崩壊型のメカニズムを形成した。FKSの場合は、COF1.0で最下層での部分崩壊となったが、COF1.3以上では中間層での部分崩壊となりCOFの値が大きくなるほど部分崩壊する層の範囲が上下層に拡がることわかる。JMAEBCの場合は、COF1.0～2.0ではCOFが大きくなるほど部分崩壊する層が少しずつ上層に向けて移動しており、COF2.5以上になると

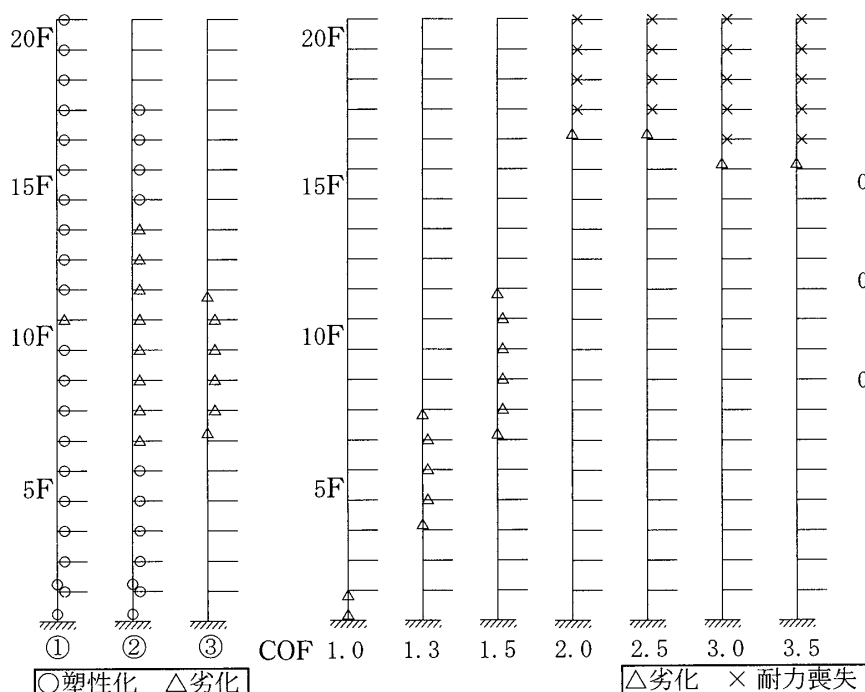


図3 崩壊メカニズムの移行 図4 増分解析による倒壊時のメカニズム

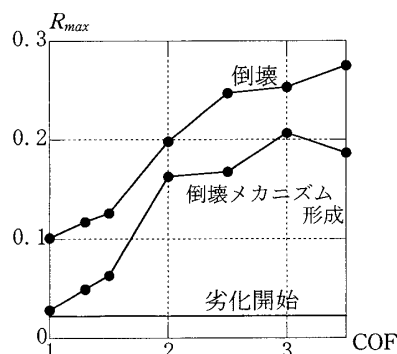


図5 増分解析によるCOFと $R_{max}$ の関係

FKS の場合と同様に COF が大きくなるほど部分崩壊する層が上下層に広がるのがわかる。

次に、入力レベルと最大層間変形角の関係を図 12 に示す。●は倒壊に至ったときの入力倍率の結果を、○はそれよりも入力倍率が 0.1 小さいときの結果をそれぞれ示しており、各 COF 毎にそれらを直線で結んでいる。倒壊●の結果はどちらの地震波も緩やかな右上がりの傾向を示しており、入力レベルが大きくなると最大層間変形角の値が大きくなる様子がわかる。

倒壊に至らない入力レベル○は、概ねひとつの線上に連なることがわかる。倒壊に至ったときの  $R_{max}$  をみると、FKS の COF1.0, COF3.5 のような例外も見られるが、概ね FKS では 0.09 ~ 0.11rad, JMAEBC では 0.07 ~ 0.1rad の値となる。また、倒壊直前の入力レベルでの  $R_{max}$  を倒壊時と比べると、FKS では多くの場合 0.05rad 程度の差になり、JMAEBC ではその差はかなり小さいことがわかる。

最後に、COF ごとの応答解析による倒壊時の  $R_{max}$  を増分解析と比較し、図 13 に示す。COF が大きくなるほど  $R_{max}$  も大きくなるが、地震応答解析より得られた  $R_{max}$  は増分解析よりもかなり小さい値となっている。これは、本研究で用いた耐力劣化モデルが塑性変形の累積によって劣化が進行するため、繰り返し変形を受ける地震応答解析では増分解析よりもその影響が現れたと考えられる。

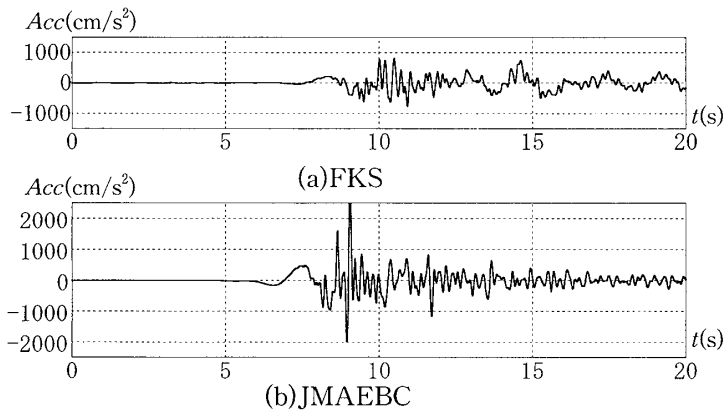


図 6 検討地震波の加速度波形

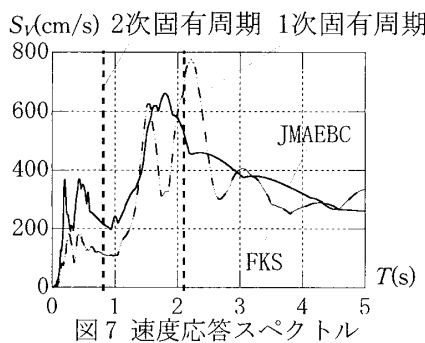


図 7 速度応答スペクトル

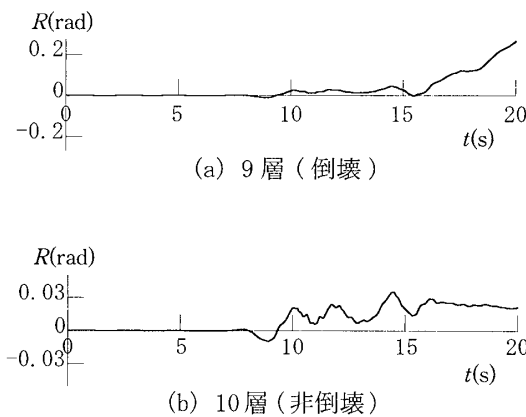


図 8 層間変形角の応答時刻歴の例

表 1 地震応答解析結果まとめ

(a)FKS

入力倍率	COF						
	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.2	○						
0.3	×						
0.4	×						
0.5	×						
0.6	×	○					
0.7	×	×	○				
0.8	×	×	×	○			
0.9	×	×	×	×			
1.0	×	×	×	×	○	○	○
1.1					×	○	○
1.2						○	○
1.3						×	○
1.4							○
1.5							○
1.6							○
1.7							○
1.8							○
1.9							○
2.0							×

(b)JMAEBC

入力倍率	COF						
	1.0	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
0.6	○						
0.7	×						
0.8	×						
0.9	×						
1.0	×	○	○	○	○	○	○
1.1		×	○	○	○	○	○
1.2			×	○	○	○	○
1.3				×	○	○	○
1.4					×	○	○
1.5						○	○
1.6						×	○
1.7							×

○ 倒壊に至らなかったケース  
 × 倒壊したケース

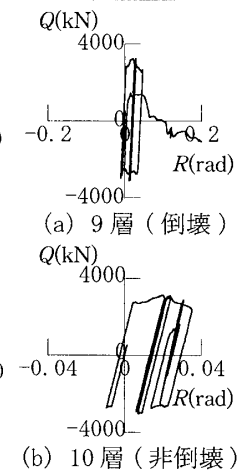


図 9 Q-R 関係の例

5. まとめ

1. 増分解析ではCOF1.0～3.5の範囲で変形が小さいときは全体崩壊型のメカニズムを形成し、さらに変形が大きくなると部分崩壊型へ移行した。
2. 地震応答解析による倒壊時のメカニズムはCOFによらず全て部分崩壊型となり、COFを大きくするほど部分崩壊する層の範囲が上下層に広がる。また、JMAEBCのCOF1.0～2.0の範囲では部分崩壊する層の中心が上方に移動する様子が確認された。
3. 本研究で得られた結果は、幅厚比による分類がFAランクの限界値の部材で構成される結果であり、幅厚比が異なる場合の影響は今後検討する必要がある。

謝辞

大阪大学、多田元英先生より部材の耐力劣化にともなう骨組の倒壊挙動を解析可能にした改造版CLAP.f

を提供いただき、また向出静司先生にはモデル化に関して助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 吹田啓一郎, 松岡祐一, 山田哲, 島田侑子, 多田元英, 笠井和彦, 大崎純, : 実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その1～その3-, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第635号, pp157-166, 2009年1月, 第74巻, 第644号, pp1851-1859, 2009年10月, 第75巻, 第653号, pp1351-1360, 2010年7月
- 2) 小川厚治, 加村久哉, 井上一郎: 鋼構造ラーメン骨組の魚骨形地震応答解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp119-126, 1999年7月
- 3) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計(第2版), 東京大学出版会, 1987年
- 4) 小川厚治, 多田元英: 柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第17回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp79-84, 1994年12月
- 5) 川辺秀憲, 釜江克宏: 上町断層帯の地震を想定した強震動予測, 上町断層帯による想定地震動に対する建物の耐震設計を考える, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究会シンポジウム資料, pp17-24, 2009年1月

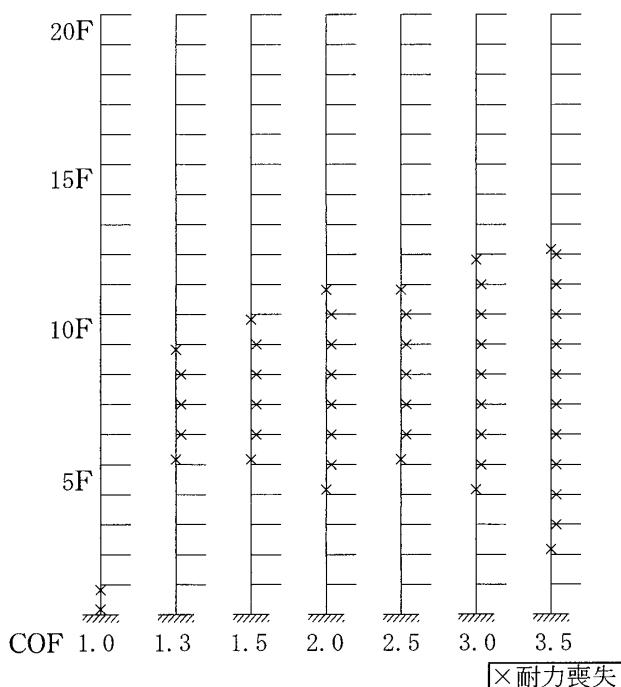


図10 FKS入力時の倒壊時のメカニズム

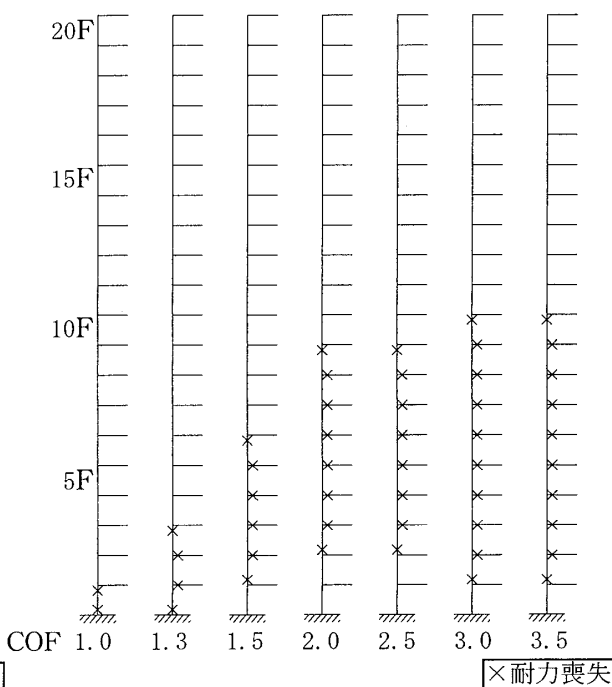


図11 JMAEBC入力時の倒壊時のメカニズム

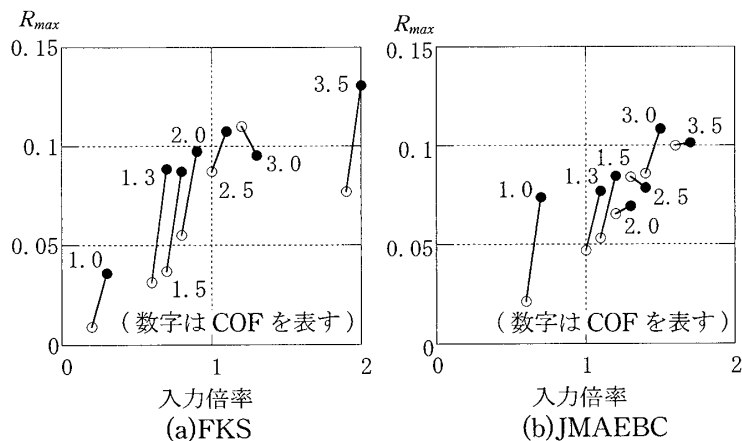


図12 地震応答解析における入力倍率と倒壊時のRmaxの関係

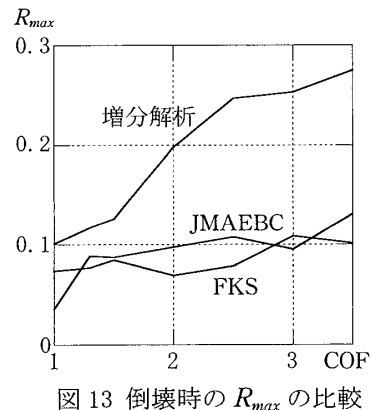


図13 倒壊時のRmaxの比較

\*1 京都大学工学部建築学科

\*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

Student, Undergraduate School of Architecture, Kyoto Univ.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.