

## 正弦パルス波をうける20層鋼構造骨組の倒壊挙動

正会員 ○若月雄大<sup>※1</sup> 同 吹田啓一郎<sup>※2</sup> 同 聲高裕治<sup>※3</sup>

### 2. 構造 - 10. 鉄骨構造

倒壊挙動, 地震応答解析, 正弦パルス波, 柱梁耐力比, 耐力劣化

#### 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く含まれる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り、条件によっては倒壊に至る可能性が指摘されている。文献1)では部材の復元力特性に耐力劣化を考慮し、柱梁耐力比(以下COFと呼ぶ)をパラメータとした解析を行うことにより、入力地震波に上町断層帯の予測地震波を用いた場合の倒壊挙動について検討した。文献1)の検討範囲内では、COFが1.0～3.5の範囲で全て部分崩壊型で倒壊に至り、COFが大きいほど多層にわたって部分崩壊することがわかった。しかし、ランダムな地震動による応答は倒壊挙動の分析には複雑であるため、本報では正弦パルス波を入力波として用い、倒壊挙動の詳細な解析を行うこととする。また正弦パルス波の周期、波数をパラメータとした解析を行うことで、入力波の特性が倒壊挙動に与える影響を調べる。

### 2. 解析方法

#### 2.1 解析モデルの設計

解析モデルは超高層建物の一例として20層の魚骨形骨組<sup>2)</sup>とし、階高3.5m、スパン長さ3.5m、各層の重量を800kNとする。柱、梁の降伏応力度は325N/mm<sup>2</sup>、COFは1.5、幅厚比はFAランクの限界値、柱の軸力比は0.2、柱梁剛比は1となるように設定した。また、設計用地震荷重にはTaft EW入力時の層せん断力分布を用いた。柱は弾性棒と剛塑性回転バネ、梁は剛棒と弾塑性回転バネで構成し、部材端バネに文献3)、4)のTri-Linear型の復元力特性を用いることで劣化挙動を考慮する。また履歴特性には文献5)の手法を用いる。

設計用の入力波としてEl Centro NS, Hachinohe EW, Taft EWの3観測波を用いて応答解析を行い、設計クライテリア(レベル1で層間変形角1/200以下、レベル2で層間変形角1/100程度以下)を満足するCOF1.5となる部材断面を選定した(図1)。以上の手順で設計した解析モデルを基準とし、梁の耐力は一定のまま柱の耐力を変えることでCOFが異なるモデルを作成し、COFによる挙動の違いを調べた。

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>6)</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。

#### 2.2 解析パラメータ

解析パラメータは以下の3種類とした。

- ・COF(1.0, 1.3, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5)
- ・正弦波の波数(半波, 1波, 1.5波, 2波)
- ・正弦波の周期(1秒, 2秒, 3秒, 4秒)

### 3. 解析結果

#### 3.1 各パラメータの影響

正弦波の周期を、骨組の1次固有周期2.06秒に近い2秒で一定として、波数、COFをパラメータとしたときの結果を示す。図2に倒壊限界の最大入力加速度を、図3に倒壊に寄与する地震入力エネルギー

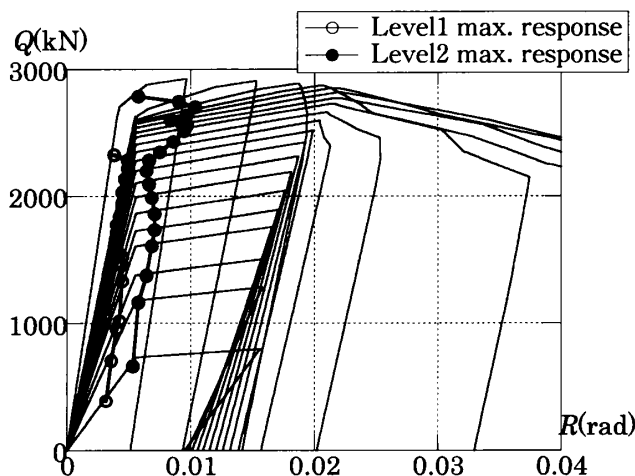


図1 解析骨組の復元力特性 (COF1.5)

Collapse Behavior of 20 Story Steel Frames Subjected to Pulsed Sine Wave

WAKATSUKI Takehiro, SUITA Keiichiro, and KOETAKA Yuji

$E_{dm}^{(7)}$  の速度換算値  $V_{dm}$  を、図4に倒壊時のメカニズムを示す。倒壊時の定義は、P $\Delta$  効果を考慮した層せん断力が0となる時点とする。

図2より、COFが大きくなるほど倒壊限界の最大入力加速度も大きくなるのがわかる。また半波と1.5波、1波と2波が概ね同様の傾向を示しており、これらの違いは骨組が倒壊する方向によって生じる差だと考えられる。図3より、COF1.5以下ではCOFが大きくなるにつれて  $V_{dm}$  の値も大きくなるが、COF1.5以上になると  $V_{dm}$  はほぼ一定の値となり正弦波の波数による差も小さくなる。また図4より、COFが大きくなるほど部分崩壊層が上層に向かって移動することがわかる。また、COF2.5以上や波数が1波、1.5波のときには梁が耐力を喪失してから倒壊に至っている。

次にCOF1.5で一定として、正弦波の周期と波数をパラメータとしたときの結果を示す。図5に倒壊限界の最大入力加速度を、図6に  $V_{dm}$  を示す。倒壊メカニズムは図4に合わせて示している。図5より、

周期が長くなるほど最大入力加速度の値が減少し、特に周期1秒から2秒になると最大入力加速度は半分程度の値になる。また周期の違いから生じる差と比較すると、波数による差はかなり小さい。これに対して  $V_{dm}$  の値は、図6より周期2秒でやや大きめとなるものの周期による差は小さく、波数が増えるほど大きくなる。

最後に、倒壊時までには損傷を受けた範囲と、履歴ループの面積より得られた各層の塑性化による消費エネルギーを図7にまとめて示す。COFが大きくなるほど部分崩壊層が上層に向かって移動する様子が図4からもわかるが、図7の損傷範囲をみてもCOFが大きくなると上層まで塑性化、劣化範囲が広がっていることがわかる。また波数が増えるほど  $V_{dm}$  の値が増える傾向が図6より読み取れたが、波数が増えると塑性化によりエネルギー吸収する層が上層へ拡大することを反映した結果であると考えられる。

### 3.2 倒壊挙動の詳細な分析

全ての解析ケースにおいて部分崩壊型で倒壊に

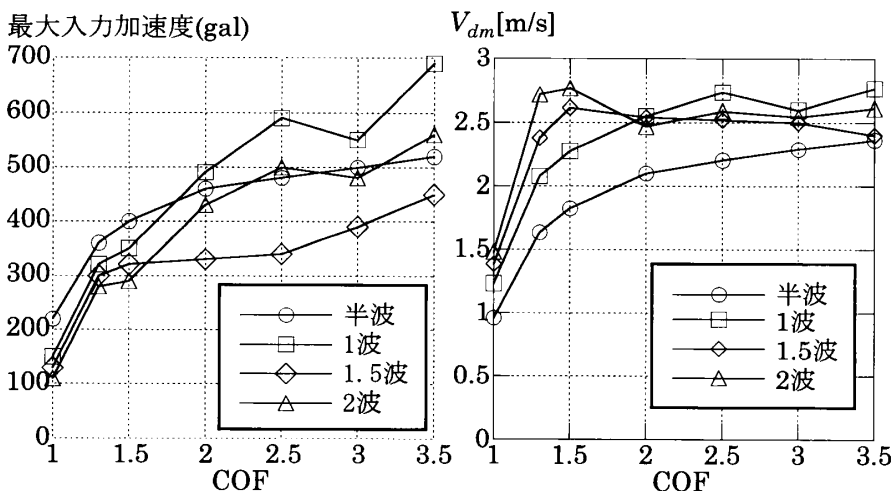


図2 最大入力加速度 (周期 2 秒)

図3  $V_{dm}$  (周期 2 秒)

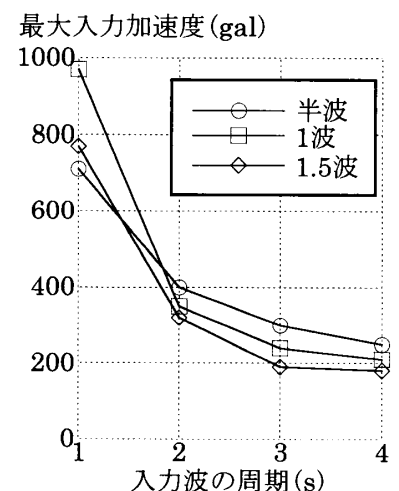


図5 最大入力加速度 (COF1.5)

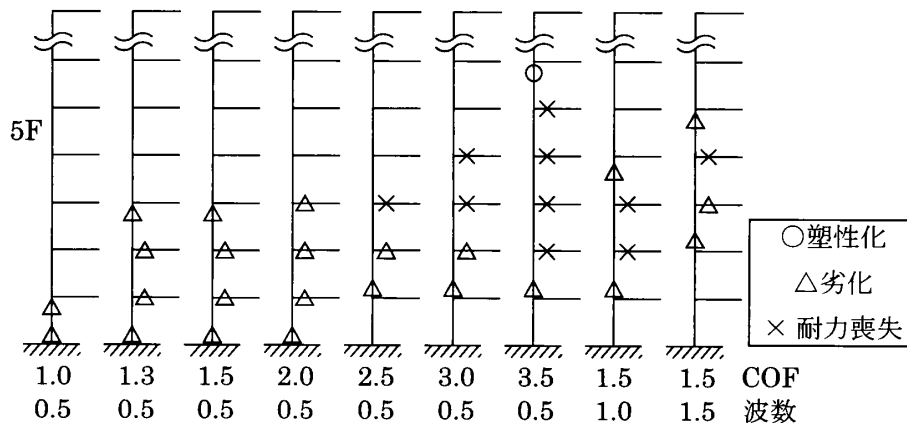


図4 倒壊時のメカニズム (周期 2 秒)

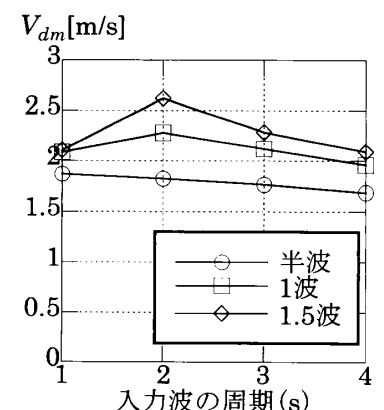


図6  $V_{dm}$  (COF1.5)

至った。本節では部分崩壊型に至る原因を検討するため、倒壊メカニズムに至る過程について詳細な分析を行う。基準となる COF1.5 のモデルに周期 2 秒の正弦波半波を最大加速度 400gal に調整して入力したケースを対象とする。半波を選択したのは、繰返し変形が起こらないため応答が単純になり分析に適していると考えたためである。なお、このケースは 1～3 層の部分崩壊型で倒壊に至ったので、1～5 層の応答に着目することとする。

図 8 に層せん断力  $Q$ -層間変形角  $R$  関係を、図 9 に各時刻の曲げモーメント分布と部材端のヒンジ状態、全塑性耐力  $M_p$  に対する部材端モーメント  $M$  の比率、反曲点高さ比  $\alpha$  の時刻歴をそれぞれ示している。部材端のヒンジ状態を示すマーカーが太線になっているものはその時刻で変化があったことを表している。反曲点高さ比  $\alpha$  は (1) 式により求められる。

$$\alpha = M_{bi} / (M_{bi} + M_{ti}) \quad (1)$$

$M_{ti}$ : 第  $i$  層柱頭曲げモーメント

$M_{bi}$ : 第  $i$  層柱脚曲げモーメント

まず 0.4 秒あたりから下層から順に梁が塑性化する。最下層柱脚では 0.49 秒で塑性化、0.73 秒で劣化が起こる。0.75 秒からは梁が下層から順に劣化する。その後 0.89 秒で 4 層柱頭が塑性化して部分崩壊型に移行し、1.04 秒で 5 層柱頭が塑性化する。ここまで

は部分崩壊層の層数が増える傾向がある (図 9 ①)。次に、1.19～1.49 秒で 4 層柱頭が劣化、3 層柱頭が塑性化、2 層柱頭が塑性化することから、この段階では部分崩壊層の層数が減少している (図 9 ②)。最終的には 1.70 秒で 3 層柱頭が劣化して 1～3 層の部分崩壊型となり、その後劣化部材が耐力喪失することで倒壊に至る。

COF1.5 で梁に対して柱の耐力が高いにも関わらず柱が塑性化するのは、梁が下層から順に塑性化、劣化することから柱の反曲点が下がることが原因であると考えられる。その後も地動が続く間は、下層部の応答が上層部に伝わるため部分崩壊層の層数が増加し、地動が停止すると、その時点で損傷を受けている下層部で  $P\Delta$  効果の影響が増大することにより変形が集中し、部分崩壊層の層数が減少すると考えられる。COF の違いによって部分崩壊層が変わるのは、部分崩壊層の層数が増加した後に減少に転じるまでの間に、柱耐力の余裕度が大きいほど部分崩壊層の増加が多くなる傾向がみられることによると考えられる。

#### 4. まとめ

本報では正弦パルス波をうける超高層建物の倒壊挙動を地震応答解析により検討した。解析の結果、本報で用いた部材の断面・幅厚比や鋼材の材料特性から決まる劣化を含めた履歴特性が一定の場合には、倒壊メカニズムを決定するのは主に骨組の COF であり、正弦波の特性の影響をほとんど受けないことがわかる。ただし波数が増えるほど消費エネルギーは増えることから、繰返し変形が起こると、一定方向に変形するときよりも倒壊に要するエネルギーが大きくなる。また、倒壊メカニズムを形成する過程に

20									○ 2		
19									○ 5	2	
18		1	1	1	1	1	1	1	○ 10	○ 8	
17		2	2	○ 3	○ 3	○ 3	○ 3	○ 3	○ 18	○ 23	
16		○ 4	○ 4	○ 5	○ 5	○ 6	○ 6	○ 6	○ 32	○ 53	
15		○ 6	○ 6	○ 6	○ 6	○ 6	○ 6	○ 6	○ 47	○ 91	
14	○	○ 6	○ 5	○ 4	○ 5	○ 5	○ 4	○ 5	○ 55	○ 114	
13	○ 1	○ 5	○ 3	○ 3	○ 3	○ 3	○ 2	○ 2	○ 53	○ 117	
12	○ 2	○ 3	○ 2	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 47	○ 110	
11	○ 3	○ 2	○ 1	○ 80	○ 1	○	○	○	○ 39	○ 107	
10	○ 3	○ 2	○ 4	○ 66	3	1	1	○ 30	○ 30	○ 110	
9	○ 2	12	○ 17	○ 21	○ 15	○ 12	12	○ 33	○ 129		
8	2	31	○ 40	○ 47	○ 52	○ 66	○ 87	○ 57	○ 178		
7	2	○ 52	○ 68	○ 106	○ 158	△ 227	△ 286	○ 101	△ 250		
6	2	○ 75	○ 108	△ 243	△ 424	△ 543	△ 589	○ 181	△ 360		
5	○ 5	○ 102	○ 181	△ 474	△ 681	△ 806	× 859	△ 383	△ 939		
4	○ 32	○ 177	△ 402	△ 647	△ 860	× 955	× 1010	△ 831	△ 1060		
3	○ 79	△ 506	△ 565	△ 754	× 886	× 914	× 956	× 1000	△ 957		
2	△ 136	△ 593	△ 668	△ 746	△ 720	△ 657	× 675	× 932	△ 679		
1	△ 414	△ 624	△ 682	△ 592	△ 226	△ 177	△ 212	△ 364	△ 326		
層/COF	1	1.3	1.5	2	2.5	3	3.5	1.5			
波数	0.5						1	1.5			

○塑性化 △劣化 ×耐力喪失 単位 [kN・m]

(図中の縦線は最終的な部分崩壊層の分布)

図 7 倒壊時までの消費エネルギーと損傷分布

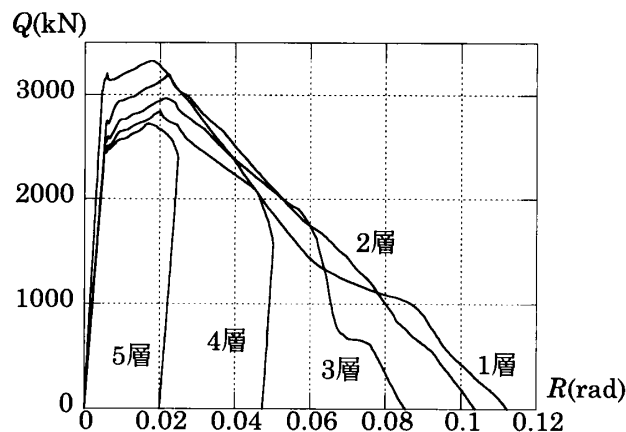


図 8 層せん断力  $Q$ -層間変形角  $R$  関係

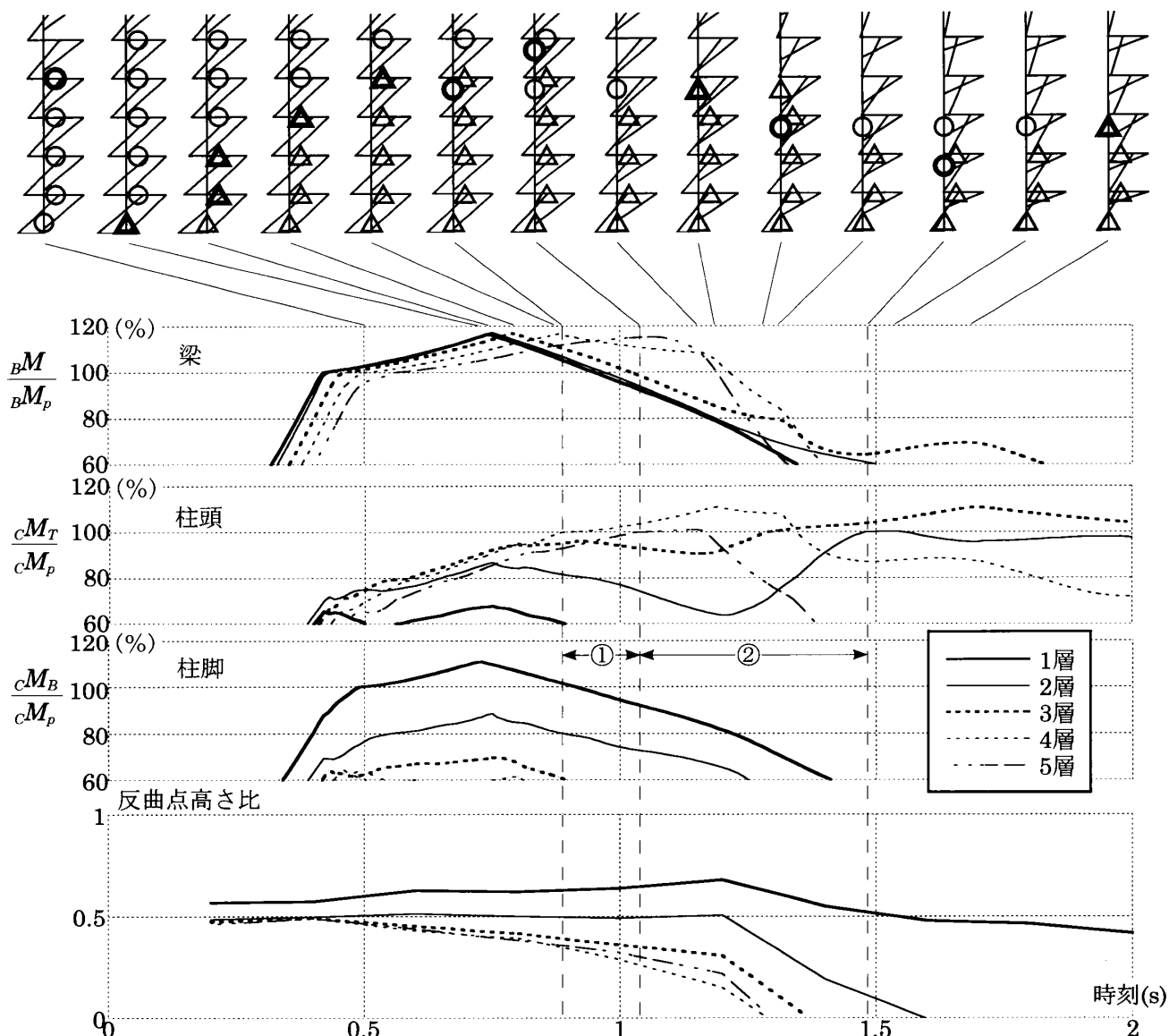


図9 周期2秒の正弦波半波入力時の各応答の時刻歴

おいては、下層から順に応答が増大し塑性化することで反曲点位置が下がり、中間層の柱頭が損傷を受け部分崩壊層に至っている。COFによって部分崩壊層に差がみられるのは、部材耐力の余裕度の差により、部分崩壊層が決定されるタイミングが異なるためだと考えられる。

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 を提供いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

1) 若月雄大, 吹田啓一郎: 20層鋼構造骨組の倒壊挙動に柱梁耐

力比が及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1構造Ⅲ, pp.807-808, 2011.8  
 2) 小川厚治, 加村久哉, 井上一朗: 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, 1999.7  
 3) 加藤勉, 秋山宏, 帯洋一: 局部座屈を伴うH形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集, 第257号, pp49-57, 1977.7  
 4) 加藤勉, 秋山宏, 北沢進: 局部座屈を伴う箱形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp71-76, 1978.6  
 5) 加藤勉, 秋山宏: 鋼構造部材の耐力(その4), 日本建築学会論文報告集, 第151号, pp15-20, 1968.9  
 6) 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, 1994.12  
 7) 小川厚治, 井上一朗, 中島正愛: 損傷に寄与する地震入力エネルギーに関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, pp177-184, 2000.4

※1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程 Graduated Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.  
 ※2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工) Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr.Eng.  
 ※3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工) Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr.Eng.