

制振(震)構造の地震応答解析法

一部材モデルによる解析および質点系と静的解析を併用した解析一

井上隆一：構造計画研究所 品川 亙：ユニオンシステム
山崎久雄：ユニオンシステム 山下忠道：構造計画研究所

1. はじめに

我が国は常に大地震発生の危惧が叫ばれており、とりわけ大都市での災害は未曾有のものと言われている^{例え}ば^り。このような中、国民の生命と財産はもちろん都市機能や社会基盤を地震被害から守る、あるいはそれを維持するためには建物への高い耐震安全性が要求され、最近ではパッシブ型制振(震)ダンパー(以下、ダンパーと記す)を設置する建物(以下、制振構造と記す)が増えてきている²⁾。

制振構造の地震に対する安全性検証は、その要求性能値と地震応答解析結果から求まる応答予測値との対比が基となるが、この場合、地震応答解析結果の信頼性が極めて重要となることは明白である。言うまでもなく制振構造の地震応答解析にはコンピュータプログラム(以下、プログラムと記す)が利用され、近年では部材モデルによる高度な解析も可能になってきている。部材モデルによる解析の最大の利点は、ダンパーの設置方法や設置箇所によって変動するダンパー実効変形や実効速度が直接評価でき、また周辺部材の応力も直接得られることである。一方、質点系による解析においてもその適用範囲のもと、適切な条件を与えることで同程度の応答値を得る³⁾ことができ、最大の利点は簡便かつ高速に計算が行えることである。ただし、当然ながら質点系による解析では部材応力を得ることができないため、最終的には静的な応力解析または荷重増分解析を実行してそれを得る必要がある。

本報では、まず制振構造の実大実験での測定値とその試験体を部材モデルによるプログラムで解析した結果の検証事例を示し、地震応答解析により十分精度の高い応答予測値が得られることを示す。次に10階建て鉄骨造モデル建物にオイルダンパーを設置した場合を想定し、部材モデルによる解析結果および質点モデルと静的解析を併用した解析結果を比較し、後者による結果(特に部材応力値)の妥当性を検証する。ただしダンパーにオイルダンパーを用いているため、静的解析(荷重増分解析)ではそれを直接考慮することができない。そこで市販の設計プログラムで簡便に対応できる方法として、オイルダンパーの最大減衰力を節点荷重として与える場合と、最大減衰力と最大層間変位から求まる等価剛性を有するような弾性ブレースとして与える場合を用い、これらの部材応力結果を部材モデルによる応答結果と比較する。

また本報の前提条件であるが、多種多様な建物形状やダンパーとその設置方法がある中で、当内容は10階建て鉄骨造建物にオイルダンパーをブレース型に設置した場合(設置箇所は後述のとおり)を対象としたものであり、この条件以外の場合を含む一般的言及は今後の研究に拠らざるを得ないことをお断りしておく。

2. 部材モデルによる解析精度の検証事例

本章では、独立行政法人防災科学技術研究所が実施した E-ディフェンス振動台による実大鉄骨造建物を対象としたブラインド解析コンテストの結果を紹介する。(株)構造計画研究所では、自社開発の RESP-F3T (3次元汎用ソフト) を用いて4つのカテゴリー全てにエントリーした。その結果、鉄骨フレームに粘性ダンパーが設置された 3-D と 2-D の2部門において優勝した⁴⁾。

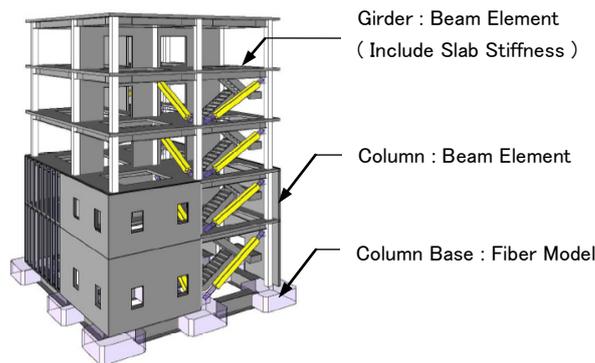


図 2.1.1 実大鉄骨造建物略図

2.1 鉄骨フレームのモデル化

ブラインド解析コンテストの解析モデルを構築する上で、主に3点、鉄骨フレーム建物のモデル化、ブレース材を含む粘性ダンパーのモデル化、建物本体に与える粘性減衰のモデル化について、それぞれ留意して作成した。図 2.1.1 に実大鉄骨造建物略図、図 2.1.2 に平面図、および軸組図を示す。

鉄骨フレームモデルは防災科学技術研究所より配布された設計資料を基に構築した。重量は同研究所より公表された値を参考に算定した。

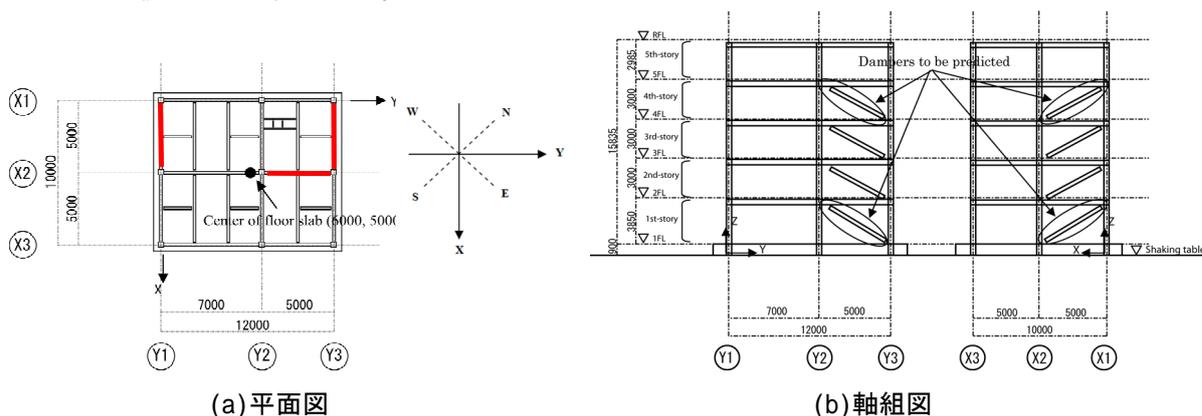


図 2.1.2 粘性ダンパー付きの鉄骨5層建物

2.2 粘性ダンパーのモデル化

今回のブラインドコンテストに使用するダンパーは非線形 Maxwell モデル(図 2.2.1 参照)と呼ばれ、速度のべき乗に比例する減衰力を発揮する。各ダンパーの諸元を表 2.2.1 に示す。粘性ダンパーの剛性 k_d は配布されたダンパーの単体試験の値を採用したが、減衰係数 $C_d=49\text{kN}(\text{mm}/\text{s})^{0.38}$ のダンパーに関しては推測した値を用いている。

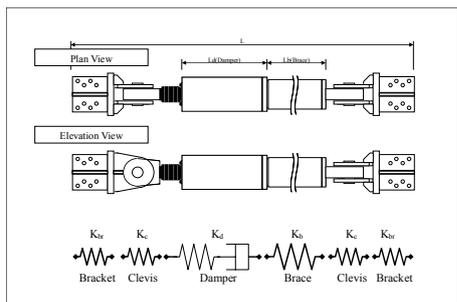


図 2.2.1 粘性ダンパーのモデル化

表 2.2.1 粘性ダンパーの諸元

Frame	Story	Damper No.	C_d ($\text{kN}(\text{mm}/\text{s})^{0.38}$)	K_d (kN/mm)
X2 (Y2-3)	4th	3	98	193
	3rd	3	98	193
	2nd	2	196	438
	1st	1	196	438
Y1,Y3 (X1-2)	4th	5	49	Conjecture
	3rd	5	49	Conjecture
	2nd	3	98	193
	1st	4	98	193

2.3 減衰の設定

3次元の解析モデルの固有周期を表 2.3.1 に示す。通常の剛性比例型減衰では高次モードである上下方向の1次モードにおいて減衰が大きくなってしまふ。今回はレーリー減衰とし、X方向、Y方向、Z方向の減衰定数が3%、3%、1%となるようにした。水平方向の減衰定数は外装材の割合が比較的多く、その減衰効果を見込めると判断して3%とした。

表 2.3.1 解析モデルの固有周期

Mode	Period (sec)	Participation factor				Note
		X-direction	Y-direction	Z-direction	XY-direction	
1	0.747	-0.058	1.230	0.003	-82.700	1stmode(Y-dir)
2	0.724	1.230	0.073	0.000	50.000	1stmode(X-dir)
3	0.649	-1.170	0.664	0.003	1.240	1stmode(XY-dir)
4	0.234	-0.011	0.463	-0.008	-140.000	
5	0.228	0.465	0.013	0.001	14.500	
6	0.206	0.444	-0.069	0.004	-0.496	
7	0.120	0.029	0.240	0.006	14.700	
8	0.119	0.234	-0.035	-0.001	5.150	
9	0.106	0.242	0.033	0.001	-0.389	
10	0.079	-0.081	-0.105	0.507	-2.160	
11	0.079	0.136	0.016	0.835	3.700	1stmode(Z-dir)
12	0.078	-0.061	0.096	0.246	-9.180	

2.4 応答結果

入力地震動は JR 鷹取波の水平 (X,Y)、上下の3成分の同時加振とし、地震動の大きさは0.4倍、1.0倍について解析を行った。図 2.4.1 に最大応答加速度と最大応答変位を示す。X方向の加速度は実験結果とよく一致しているが、Y方向では分布形状は似ているものの、建物頂部で実験値の方が大きくなっている。加速度応答スペクトルを見ると、Y方向では試験体の1次固有周期が短いため、応答が大きくなるものと推測される。最大応答変位はX方向で解析モデルの結果の方が大きくなっている。これも、1次固有周期の違いが応答結果に影響したものと推測される。

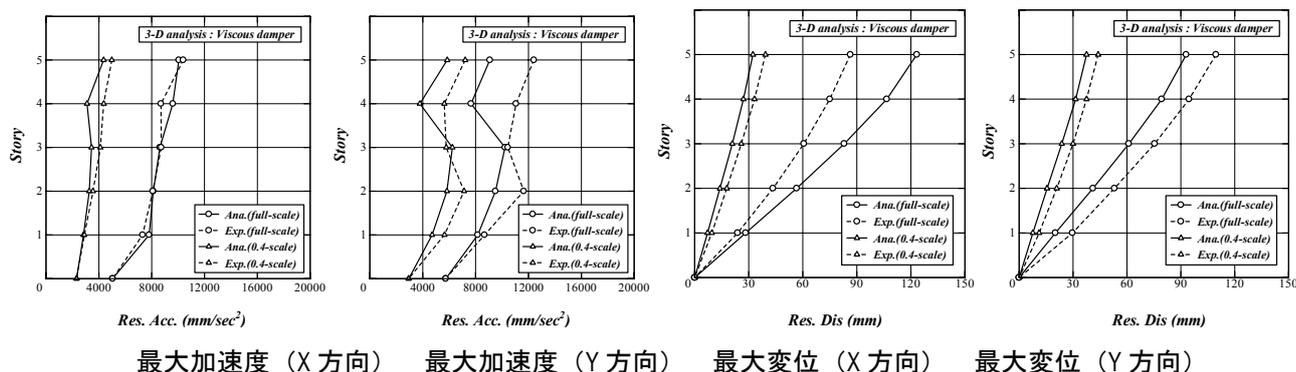


図 2.4.1 応答結果と実験結果の比較

2.5 まとめ

今回の検証では解析精度の向上に役立つ技術情報について以下の知見を得た。

- 1) 実建物（試験体）と解析モデルの1次固有周期を比較した場合、実建物の弾性1次固有周期は、解析モデルよりやや短くなる。
- 2) ブレース材を含む粘性ダンパーのモデル化については、Maxwellモデルは精度よく再現できる。しかしながら、ダンパーの減衰力を効果的に発揮させ、解析精度を向上させるためには、ダンパー接合部などのガタツキの影響を極力減らす必要がある。

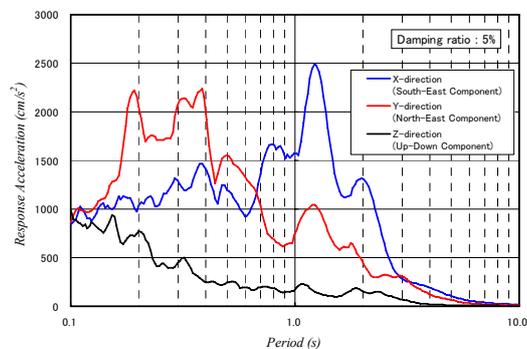


図 2.4.2 加速度応答スペクトル

3. モデル建物の地震応答解析

本章では、モデル建物にオイルダンパーを付加した制振構造の部材モデルおよび質点モデルによる地震応答解析を行い、さらに質点モデルによる場合はそこで得られた最大応答層せん断力を用いた荷重増分解析より部材応力を求め、部材モデルによる応答結果と比較する。モデル建物には文献²⁾に示されている制振構造テーマストラクチャー（10 階建て鉄骨造建物のトリムモデル）を用い、プログラムは、部材モデルによる応答解析に RESP-F3T（構造計画研究所）を、質点モデルによる応答解析に DynamicPRO（ユニオンシステム）、静的荷重増分解析に SS3（同）を用いた。

まずダンパーを付加しない主架構のみによる地震応答解析を行い、応答値および部材応力を比較する。次にオイルダンパーを付加した制振構造による解析を行い同様に比較する。ただし荷重増分解析ではオイルダンパーを扱うことができないため、オイルダンパーの最大減衰力をその接続節点への追加荷重として与える方法と、オイルダンパーを弾性ブレースに置換して与える 2 通りの方法によった。

3.1. モデル建物と解析条件

モデル建物の形状、部材データおよび重量等は文献²⁾のとおりとし、X 方向併進の（捩れを無視した）解析を行う。モデル建物の伏図および X 方向軸組図を図 3.1.1 に示す。オイルダンパーは、X 方向フレームの X2-X3 軸間および X5-X6 軸間に、1～9 階は各階計 6 基、10 階のみ Y2 フレームに 2 基を設置することとし、その諸元を表 3.1.1 に示す。表 3.1.2 に固有周期を示す。

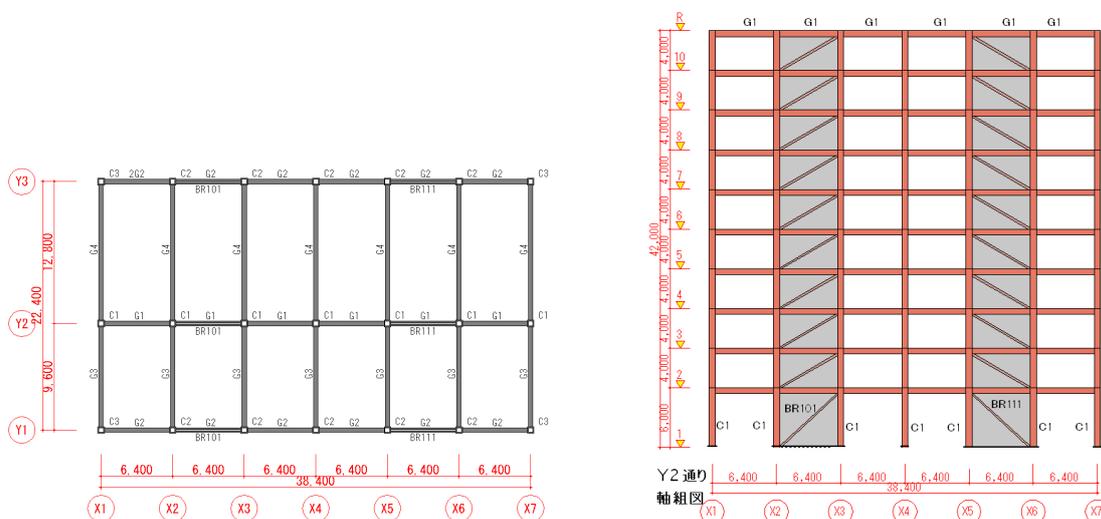


図 3.1.1 モデル建物の伏図と軸組図

表 3.1.1 オイルダンパーの諸元

1 次減衰係数 C_1	250 kNs/cm	左記オイルダンパーに支持ブレースを設けて節点間に設置した。
リリース速度 V_r	3.2 cm/s	
2 次減衰係数 C_2	16.9 kNs/cm	
ダンパー剛性 K	2800 kN/cm	
ダンパー長さ	1100 mm	
支持(鋼管)ブレース	$\phi 185, t=15$ mm	

表 3.1.2 固有周期(秒)

次数	部材モデル	質点モデル
1 次	2.031	2.019
2 次	0.790	0.761
3 次	0.458	0.463

部材モデルの値は X 方向に関するモードを抽出したものの

表 3.1.3 トリリニア型復元力特性

階	K_1	Q_1	β_1	Q_2	β_2	階	K_1	Q_1	β_1	Q_2	β_2
10	1575.6	3984.7	0.986	5099.9	0.803	5	3043.8	7714.8	0.931	13477	0.051
9	1789.1	4531.7	0.987	7285.4	0.687	4	3261.0	8239.3	0.939	14392	0.041
8	2188.2	5534.1	0.965	9306.9	0.341	3	3803.2	9623.5	0.891	15160	0.028
7	2432.9	6163.4	0.955	11052	0.101	2	3805.7	9652.9	0.894	15533	0.038
6	2899.2	7328.0	0.924	12458	0.042	1	2781.9	10573	0.872	16280	0.012

$K_1=1$ 次剛性(kN/cm), Q_1 =第1折れ点荷重(kN), $\beta_1=Q_1$ 以降の剛性低下率
 Q_2 =第2折れ点荷重(kN), $\beta_2=Q_2$ 以降の剛性低下率

内部粘性減衰は固有周期2秒に対する減衰定数を2%とする初期剛性比例型減衰とし、入力地震波はBCJL2の元波とした。質点モデルに対する振動系は等価せん断型モデルとし、各階の復元力特性は荷重増分解析で得られた荷重-変形関係からトリリニア型にモデル化し、履歴則は標準型モデルとした。表3.1.3に質点モデルで用いた復元力特性を示す。

3.2. 主架構（非制振）の地震応答解析

図3.2.1に、RESP-F3TおよびSS3で得られた各階のスケルトンカーブと部材モデル(RESP-F3T)および質点モデル(DynamicPRO)で求めた最大応答値(層せん断力-層間変位)を示す。スケルトンカーブは固有周期を2秒としたAi分布での荷重増分解析結果で、両プログラムの結果にほとんど差異はない。図3.2.2に部材モデルと質点モデルによる最大応答値を示す。最大層間変位においてやや両者に差異が見られた。同図(b)(c)には参考として、質点モデルによる最大応答層せん断力の分布形で荷重増分解析を行ったときの最終ステップにおける層間変位と層せん断力も示している。静的解析による変形が他より大きいのは、各階の最大層せん断力が同時に発生した状態になっているためと判断できる。

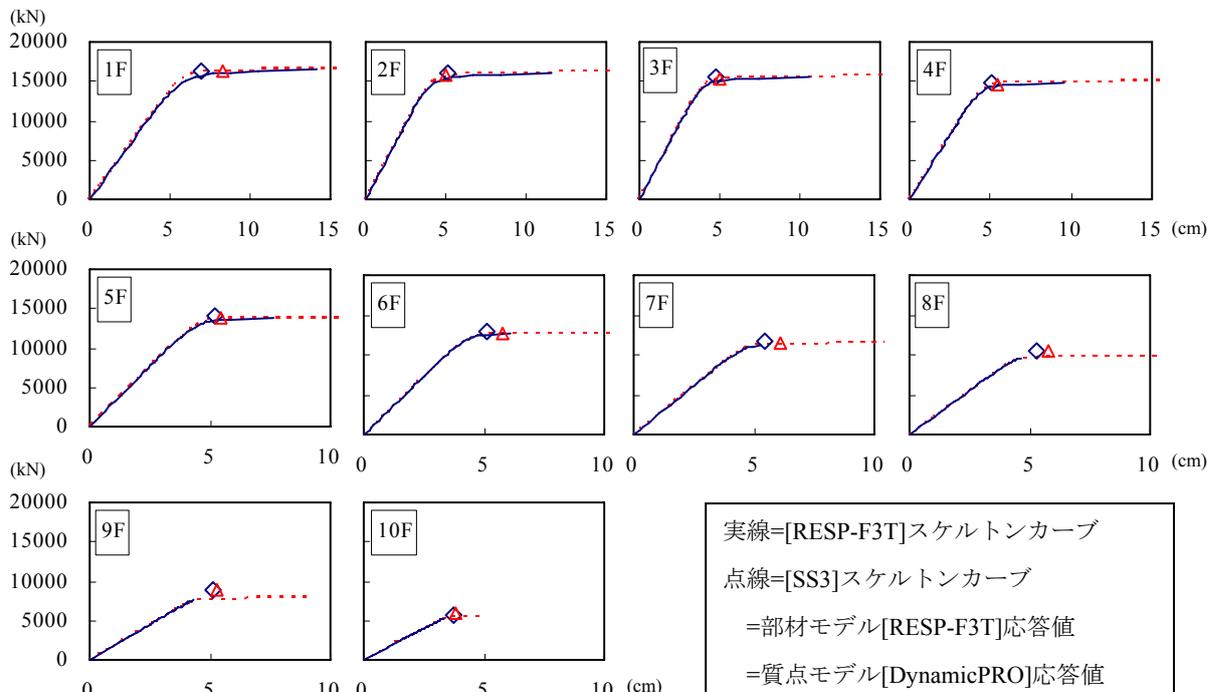
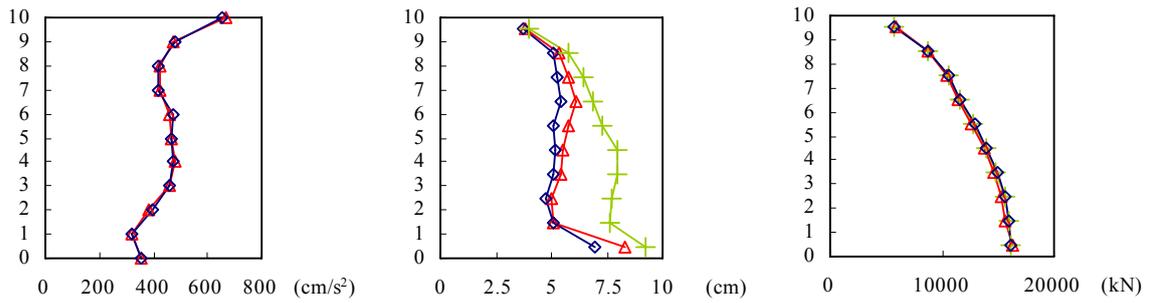
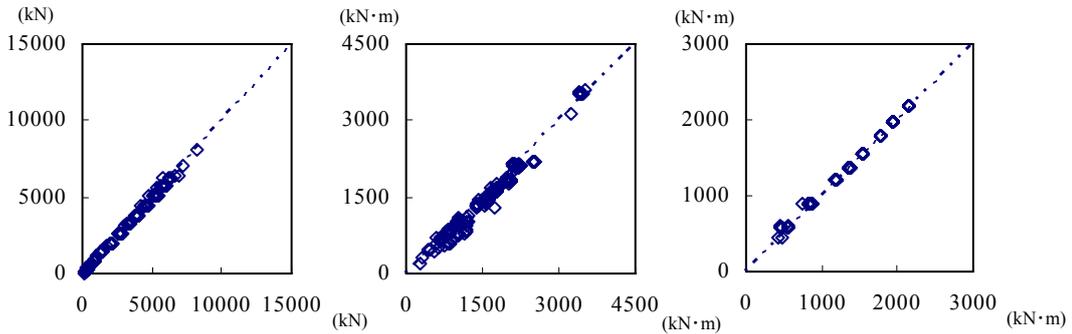


図 3.2.1 スケルトンカーブと最大応答値(層せん断力-層間変位) (非制振)



(a) 最大加速度 (b) 最大層間変位 (c) 最大層せん断力
 図 3.2.2 階の応答値 (非制振) (◇=部材モデル, △=質点モデル, +=静的解析結果)



(a) 柱軸力 (b) 柱曲げモーメント (c) 梁曲げモーメント
 (横軸=動的部材モデル[RESP-F3T], 縦軸=静的部材モデル[SS3])

図 3.2.3 Y2 フレームの部材応力値の比較 (非制振)

図 3.2.3 は Y2 フレームにおける部材応力値の対比である。同一箇所、柱軸力、柱の曲げモーメント、梁の曲げモーメントについて、部材モデル(RESP-F3T)による値を横軸に、静的解析(SS3)による値を縦軸に示している。非制振では 9 階以下で梁が曲げ降伏しているため、ほとんどの梁の曲げモーメントは全塑性モーメントで一致している。それにより柱の曲げモーメントや軸力に大きな差異がない。

3.3. オイルダンパーを付加した場合 (制振構造) の地震応答解析

次に、オイルダンパーを付加した制振構造の地震応答解析結果を示す。部材モデルと質点モデルによる階の応答値の差異は、図 3.3.1 および図 3.3.2 に示すようにわずかである。オイルダンパーを付加することで主架構は弾性範囲内とすることができた。非制振の場合と同様に、質点モデルで得られた最大応答層せん断力 (オイルダンパーの減衰力を含む) の分布形を用いた荷重増分解析より部材の応力を求めた。ここで、荷重増分解析におけるオイルダンパーの考慮方法として、オイルダンパーの最大減衰力をその接続節点への追加荷重として与える方法と、オイルダンパーの最大減衰力と最大層間変位から求まる等価剛性を有する弾性ブレースに置換して与える方法を用いた。ただし前者の節点荷重で与える場合、オイルダンパーの軸方向力は水平力と鉛直力に分けられるが、剛床仮定としているため追加される水平力はすべて荷重増分量に含め、節点には鉛直力のみを追加した。

図 3.3.2(b)(c)には、上記方法による静的解析結果の値も図示している。当然ながら、層せん断力分布およびその値はいずれも質点モデルの結果に一致しているが、節点荷重を与えた静的解析では変形が大きくなる。

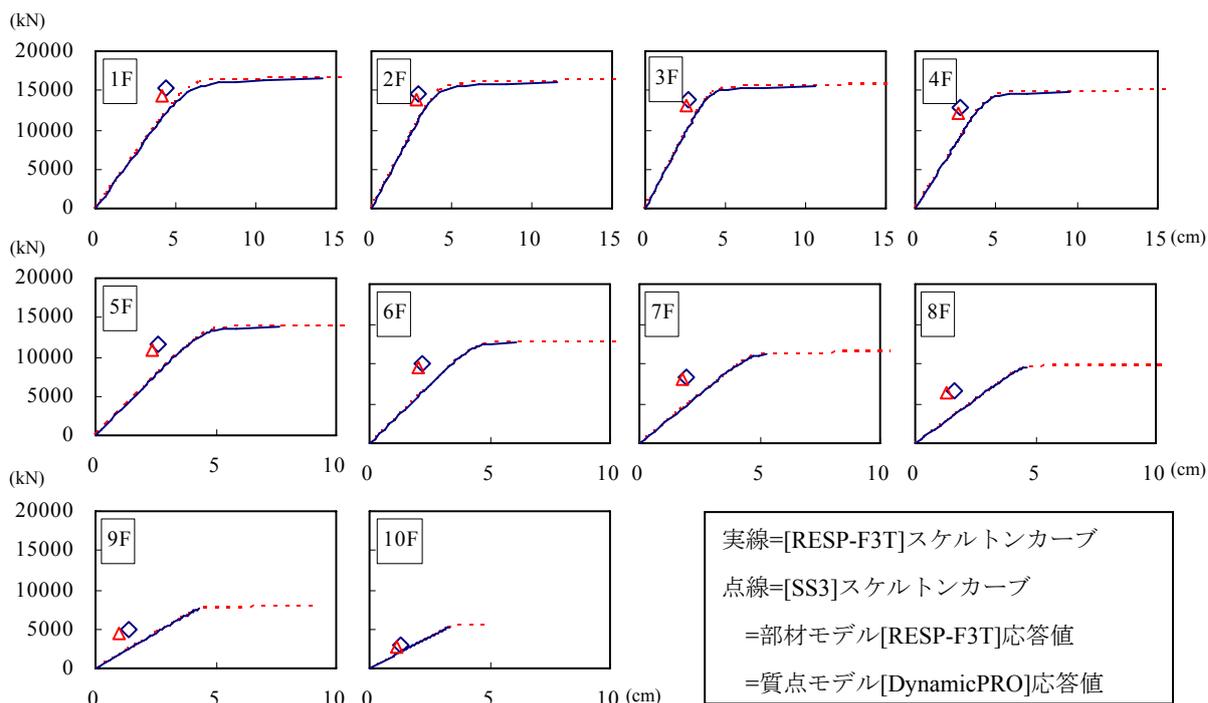


図 3.3.1 スケルトンカーブと最大応答値(層せん断力-層間変位) (制振構造)

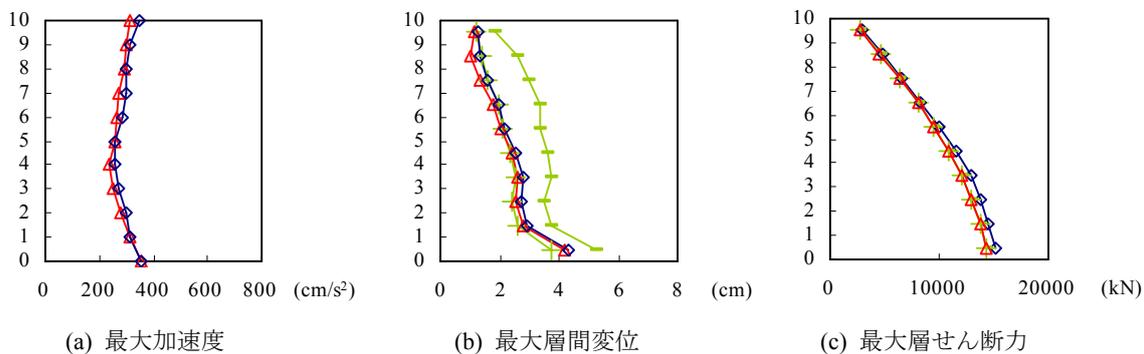


図 3.3.2 階の応答値 (制振構造)

(◇=部材モデル, △=質点モデル, —=静的解析[節点荷重入力], +=静的解析[等価ブレース入力])

図 3.3.3, 3.3.4 は Y2 フレームにおける, 静的解析と部材モデルによる応答解析で得られた部材応力値の対比である (見方は非制振の場合と同じ)。

図 3.3.3 は最大減衰力 (軸力) を等価節点荷重として与えて静的解析を行った場合で, この部材応力値は, 部材モデルによる応答解析結果より全体的に大きくなる傾向になった。また梁の一部に降伏の発生が確認され, 地震応答解析では弾性範囲内であった架構の特性が変化したことになった。

図 3.3.4 は等価剛性を有する弾性ブレースとして与えて静的解析を行った場合で, この部材応力値は, ややばらつきが確認できるものの, 部材モデルによる応答解析結果と対応傾向を示している。また荷重増分解析においても梁の降伏が発生せず, 地震応答解析結果の状態と整合している。

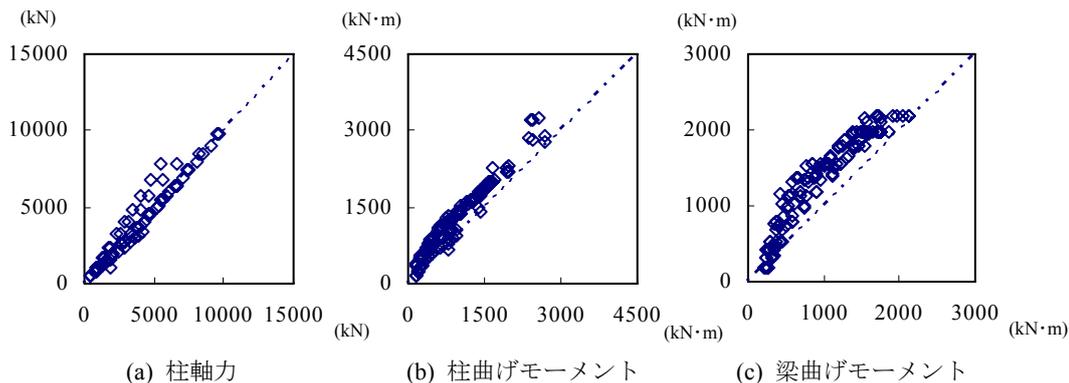


図 3.3.3 部材応力値の比較 (静的解析ではオイルダンパーの最大減衰力(軸力)を節点荷重で入力)
(横軸=動的部材モデル[RESP-F3T], 縦軸=静的部材モデル[SS3])

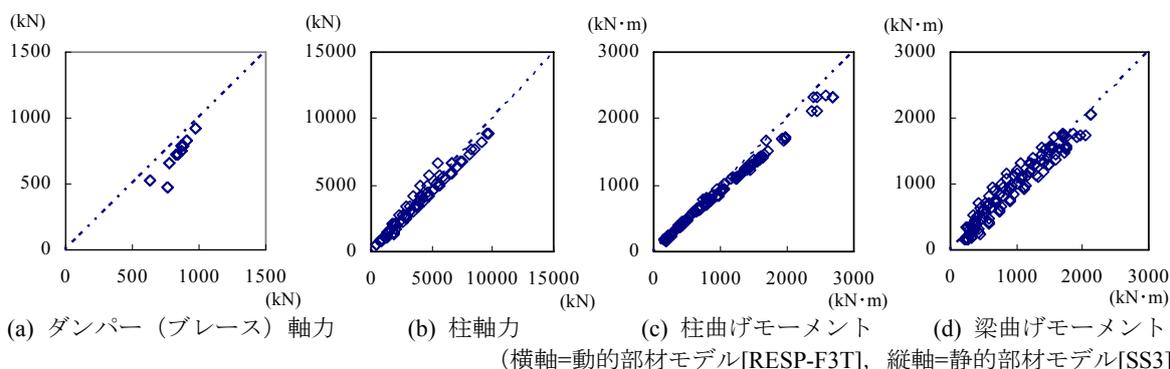


図 3.3.4 部材応力値の比較 (静的解析ではオイルダンパーの等価剛性を有するブレースに置換)
(横軸=動的部材モデル[RESP-F3T], 縦軸=静的部材モデル[SS3])

4. まとめ

制振構造の実大実験性状は骨組モデルによる応答解析で精度よく模擬できることを事例によって示した。実際の制振建物の応答予測において部材モデルによる地震応答解析は非常に有効である。一方、3 章のモデル建物のようにオイルダンパー設置後も建物の曲げ変形の励起が少ないような整形建物では質点モデルでも同程度の応答を予測できることを確認した。また部材の応力を静的解析によって確認するのに、オイルダンパーの減衰力を等価節点荷重とする方法と等価剛性を有する弾性ブレースとする方法の結果を検証したところ、弾性ブレースを設定した応力値の方が、部材モデルによる動的応答値によく対応するものとなった。ただし応力値にはややばらつきがあり、実際の設計で適用する場合には安全係数を乗じるなど余裕をもった設計が必要であると言える。

参考文献

- 1) 内閣府：首都直下地震の被害想定（概要），http://www.bousai.go.jp/syuto_higaisoutei/pdf/higai_gaiyou.pdf
- 2) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 2 版，日本免震構造協会編，2007.7
- 3) 竹内百合，原博，石井正人，斎藤芳人，有馬史子，森裕重，大淵敏行，吉江慶祐，笠井和彦：制振構造テーマストラクチャーの提案と解析モデル化の検討 その 2：せん断棒・曲げせん断棒へのモデル化と時刻歴解析精度，パッシブ制振構造シンポジウム 2002，2002.12
- 4) Tadamichi Yamashita, Jun Kawabata, Masayuki Ninomiya, Norikazu Sakaba and Yukimori Yanagawa : JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE) : 2- AND 3-D BLIND ANALYSES OF FULL-SCALE 5-STORY BUILDING WITH VISCOUS DAMPERS