

論文 制震装置としてのRC造2次壁を用いた建物モデルの地震応答性状

田口 孝*¹・田才 晃*²

要旨：近年，多くの制震工法が実用化に至っている。その中で，非構造壁のRC造2次壁を利用した制震工法を提案してきた。これまでの研究では，その性状等を実大構造実験により確認し，耐震設計上の有効性をある一例の既存建築物を用いた地震応答解析により検討をしてきた。本論文では，これらの研究を進展させ，階数のことなる建物モデルを作成して，本工法を採用した場合の地震応答解析を行った。これにより，本工法の高さの異なる建築物への影響について確認し，今後の制震建築物の設計等に関する基礎的データの蓄積を行った。

キーワード：制震装置，RC造2次壁，地震応答解析，建物モデル

1. はじめに

制震工法の中には制震装置を設置するために，架構面が塞がれてしまう等，計画上の制約が発生する工法が存在する。

そこで筆者らは，図-1に示すような非耐力壁としてのRC造2次壁（以下，2次壁と称す）を利用した制震工法を提案している。これは図に示すように，躯体と縁を切った2次壁内にコンクリートとの付着を絶縁した，断面欠損部を有する鋼板をX型に配置する工法である。そして，この鋼板の軸応力による2次壁の復元力特性によって，振動エネルギーを吸収し，建物の揺れを制御しようとする工法である。

これまで，この2次壁がどのような性状等を示すかを実大構造実験によって確認し，簡単なモデル化によって，その初期剛性，降伏層せん断力の算出を試みてきた^{1), 2)}。さらに，その耐震設計上の有効性を確認するために，一例として8階建ての既存建築物を用いて地震応答解析による検討を行ってきた³⁾。

しかし，これまでの解析による研究では，実際に許容応力度設計された8階建ての既存建築物モデルに対して，実験結果を基本として2次壁の特性を変化させる検討を行ったのみであり，

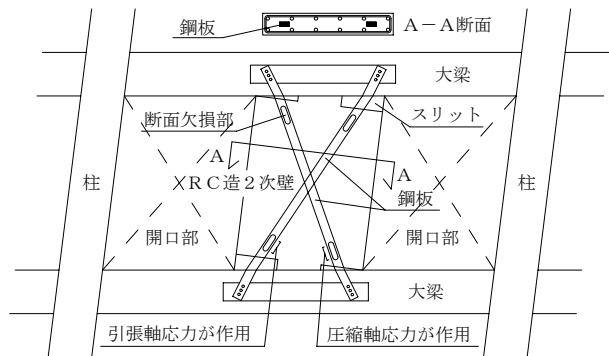


図-1 工法の概要

その検討結果のみで全てを考察することは難しい。また，解析対象モデルの高さ方向への変化に関しても未検討のままである。そこで，本研究では，階数の異なる建物モデルを作成し，このモデルに対して本2次壁を採用した際の特性の変化を確認する。この際，本工法は文献1，2)で示したように，鋼板の厚さと断面欠損の大きさによって初期剛性と降伏層せん断力をそれぞれ，ある程度自由に变化させることが可能であるという特徴を有しているため，それらを独立に変化させて検討を行う。これにより，本工法を有効に作用させることが可能な関係を調べ，今後の制震建築物の設計等に関する基礎的データの蓄積を行う。

* 1：矢作建設工業(株)建築技術部主任 工修 (正会員)

* 2：横浜国立大学大学院助教授 工学研究院・建築学 工博 (正会員)

2. 地震応答解析

2.1 解析概要

地震応答解析は質点モデルで行うこととし、解析プログラムには「RESP-M/2」⁴⁾を使用した。地震波は、観測波として El Centro(1940)NS, Taft(1952)EW, Hachinohe(1968)NS [(財)日本建築センター] と JMA Kobe(1995)NS [気象庁] を速度 25cm/sec, 50cm/sec に基準化して採用し、模擬波としては BCJ-L1, BCJ-L2 [(財)日本建築センター] を原波のまま用いた。採用した地震波の諸元を表-1に示す。

2.2 躯体モデル

2次壁を考慮しない柱・梁からなる解析モデル(以下、躯体モデル)の高さ変化として、階数を4, 8, 12階に設定した。躯体モデルでは、階高を全層とも $h=3000\text{mm}$, 各階の重量は 4900kN に設定した。減衰特性としては、瞬間剛性比例型で1次の固有振動数に対して3%とした。

躯体モデルの復元力特性には Tri Linear 型 Takeda モデル ($\gamma=0.4$) を採用し、各層のスケルトンカーブは以下のように設定した⁵⁾。

- ・荷重分布: A_i 分布に従う
- ・設計用層せん断力: $C_0=0.2, Z=1, R_t=1$

$$Q_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0 \cdot W_i \quad (1)$$
- ・降伏層せん断力: Q_i の 1.5 倍

$$Q_{yi} = Q_i \times 1.5 \quad (2)$$
- ・ひび割れ層せん断力: Q_{yi} の 1/3 倍

$$Q_{ci} = Q_{yi} \times 1/3 = Q_i \times 0.5 \quad (3)$$
- ・降伏変形: 階高の 1/100

$$\delta_y = h/100 \quad (4)$$
- ・初期剛性: 降伏点までの割線剛性の 3 倍

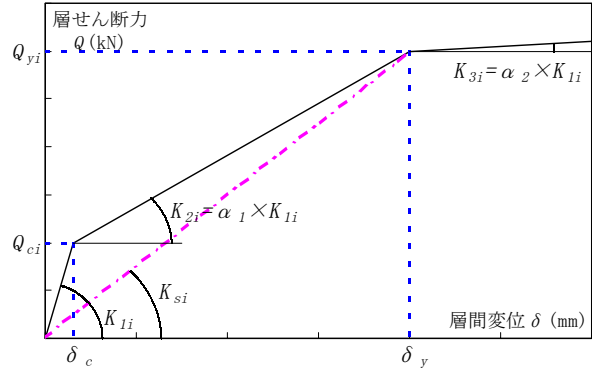
$$K_{Ii} = K_{si} \times 3 \quad (5)$$

式中記号説明

- A_i : i 層の層せん断力係数の分布を示す係数
- C_0 : 標準せん断力係数 (=0.2)
- Z : 地域係数 (=1)
- R_t : 振動特性係数 (=1)
- W_i : i 層より上部の建物重量 (kN)
- Q_i : i 層の設計用層せん断力 (kN)
- Q_{yi} : i 層の降伏層せん断力 (kN)
- Q_{ci} : i 層のひび割れ層せん断力 (kN)
- h : 階高 (=3000mm)
- δ_y : 降伏変形 (=30mm)
- K_{Ii} : i 層の初期剛性 (kN/mm)
- K_{si} : i 層の降伏点までの割線剛性 (kN/mm)

表-1 採用地震波諸元

地震波	解析時間 (sec)	最大速度 (cm/sec)	最大加速度 (cm/sec ²)
El Centro (1940) NS	50	25.0	255.4
		50.0	510.8
Taft (1952) EW	50	25.0	248.4
		50.0	496.8
Hachinohe (1968) NS	36	25.0	165.1
		50.0	330.1
JMA Kobe (1995) NS	50	25.0	225.4
		50.0	450.8
BCJ-L1	60	30.5	207.3
BCJ-L2	120	57.4	355.7



図中記号説明

- Q_{yi} : i 層の降伏層せん断力 (kN)
- Q_{ci} : i 層のひび割れ層せん断力 (kN)
- K_{si} : i 層の降伏点までの割線剛性 (kN/mm)
- K_{Ii} : i 層の初期剛性 (kN/mm)
- K_{2i} : i 層の第2剛性 (kN/mm)
- K_{3i} : i 層の第3剛性 (kN/mm)
- δ_y : 降伏変形 (=30mm)
- δ_c : ひび割れ変形 (mm)
- α_1 : K_{2i} の K_{Ii} に対する比
- α_2 : K_{3i} の K_{Ii} に対する比 (=0.01)

図-2 躯体モデルのスケルトンカーブ

表-2 各躯体モデル諸元

モデル	固有周期 (sec)	層	Q_{yi} (kN)	Q_{ci} (kN)	K_{si} (kN/mm)	K_{Ii} (kN/mm)
4階モデル (M4-)	0.597	4	2189.4	729.8	73.0	218.9
		3	3692.6	1230.9	123.1	369.3
		2	4911.4	1637.1	163.7	491.1
		1	5884.0	1961.3	196.1	588.4
8階モデル (M8-)	0.789	8	3035.6	1011.9	101.2	303.6
		7	4967.6	1655.9	165.6	496.8
		6	6597.2	2199.1	219.9	659.7
		5	8000.4	2666.8	266.7	800.0
		4	9206.7	3068.9	306.9	920.7
		3	10231.3	3410.4	341.0	1023.1
		2	11083.1	3694.4	369.4	1108.3
		1	11768.0	3922.7	392.3	1176.8
12階モデル (M12-)	0.938	12	3737.2	1245.7	124.6	373.7
		11	6002.5	2000.8	200.1	600.2
		10	7932.2	2644.1	264.4	793.2
		9	9634.4	3211.5	321.1	963.4
		8	11150.8	3716.9	371.7	1115.1
		7	12502.9	4167.6	416.8	1250.3
		6	13703.5	4567.8	456.8	1370.3
		5	14760.7	4920.2	492.0	1476.1
		4	15680.5	5226.8	522.7	1568.1
		3	16467.0	5489.0	548.9	1646.7
		2	17123.3	5707.8	570.8	1712.3
		1	17652.0	5884.0	588.4	1765.2

スケルトンカーブの概形を図-2に、各躯体モデルの諸元を表-2に示す。ここで、解析モデル名のM4-, M8-, M12-といったMの直後の数字は階数を表している。

2.3 2次壁モデル

本2次壁の設置量としては、躯体モデルの各層の初期剛性 K_{ji} ・降伏層せん断力 Q_{yji} に対する2次壁の初期剛性 ${}_2K_i$ ・降伏層せん断力 ${}_2Q_{yji}$ の割合で決定した。これは、本2次壁の初期剛性や降伏層せん断力が、2次壁内の鋼板の厚さと断面欠損の大きさによって、ある程度独立に変化させることが可能という特徴を有しているためである^{1), 2)}。解析モデル名とそれに付加される2次壁の割合を表-3に示す。ここでM-00モデルとは、2次壁を採用していない躯体モデルを表し、「-」の後の数字は2次壁の初期剛性と降伏層せん断力の割合を表している。また、Mの直後に数字が無いのは、全ての階数モデルに対しての表現である。今回の2次壁設置量の割合は、文献3)において、最も有効に作用すると考察された「2次壁の鋼板断面積変化モデル」での割合を参考として設定した。文献3)での割合を表-4に示す。

地震応答解析においては、作成された2次壁モデルを、躯体モデルの各層間に付加バネとして設置するものとした³⁾。解析モデルを図-3に示す。なお、2次壁に関する減衰としては、履歴減衰のみを考慮した。

3. 地震応答解析結果

3.1 4階モデルの解析結果

4階(M4-)モデルの1次固有周期および、最大層間変形角Rを表-5、図-4に示す。

1次固有周期は、本2次壁を採用することによって、0.09秒程度短くなる結果となった。

最大層間変形角は、2次壁の初期剛性、降伏層せん断力ともにM4-21モデルの2倍に増加させたM4-42モデルが、最も効果的に応答変形を減少させる結果となった。また、全体的な傾向

表-3 解析モデル

解析モデル名	初期剛性の割合 ${}_2K_i/K_{ji}$	降伏層せん断力の割合 ${}_2Q_{yji}/Q_{yji}$
M-00	0.	0.
M-21	0.2	0.1
M-22	0.2	0.2
M-41	0.4	0.1
M-42	0.4	0.2

表中記号説明

${}_2K_i$: i層の2次壁の初期剛性(kN/mm)

${}_2Q_{yji}$: i層の2次壁の降伏層せん断力(kN)

表-4 参考文献3)での2次壁の割合

層	初期剛性の割合 ${}_2K_i/K_{ji}$	降伏層せん断力の割合 ${}_2Q_{yji}/Q_{yji}$
8	0.17	0.19
7	0.17	0.16
6	0.19	0.15
5	0.19	0.14
4	0.20	0.14
3	0.20	0.15
2	0.20	0.15
1	0.15	0.13

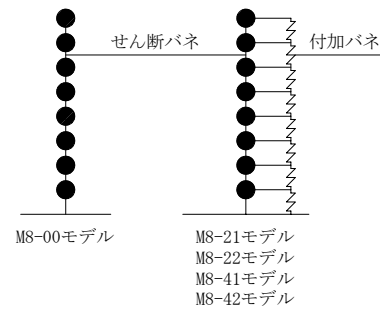


図-3 解析モデル(8階モデル)

表-5 最大層間変形角(4階モデル)

地震波	モデル	M4-00	M4-21	M4-22	M4-41	M4-42
	固有周期(sec)	0.597	0.545	0.545	0.504	0.504
El Centro (1940)NS	25cm/sec	1/99(4)	1/112(4)	1/113(4)	1/119(4)	1/126(3)
	50cm/sec	1/32(4)	1/45(4)	1/47(4)	1/47(4)	1/53(4)
Taft (1952)EW	25cm/sec	1/110(4)	1/192(4)	1/174(4)	1/239(4)	1/293(4)
	50cm/sec	1/40(4)	1/50(4)	1/58(3)	1/56(4)	1/75(4)
Hachinohe (1968)NS	25cm/sec	1/199(2)	1/257(4)	1/263(4)	1/335(4)	1/354(4)
	50cm/sec	1/68(2)	1/86(2)	1/96(2)	1/99(1)	1/108(1)
JMA Kobe (1995)NS	25cm/sec	1/83(4)	1/132(2)	1/154(2)	1/158(2)	1/191(4)
	50cm/sec	1/37(3)	1/39(3)	1/42(2,3)	1/41(3)	1/46(3)
BCJ	L1	1/103(4)	1/155(4)	1/137(4)	1/187(4)	1/177(2)
	L2	1/13(4)	1/50(4)	1/44(4)	1/54(4)	1/85(4)

としては、初期剛性を2倍に増加させるM4-41モデルの方が、降伏層せん断力を2倍に増加させるM4-22モデルより、応答変形を小さくする結果となった。しかし、部分的にはM4-22モデルの方が小さな応答変形となっている箇所も確認された。

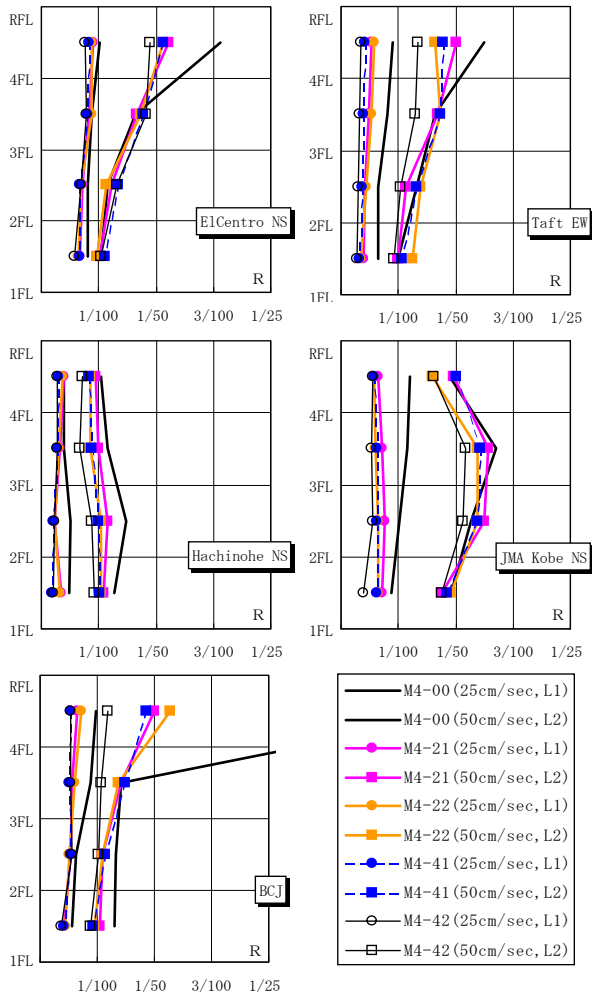


図-4 最大層間変形角 (4階モデル)

3. 2 8階モデルの解析結果

8階 (M8-) モデルの1次固有周期および、最大層間変形角Rを表-6, 図-5に示す。

今回の解析モデルは、2.2節の仮定により作成された建物モデルであり、文献3)における8階モデルは実設計による既存建築物モデルであるといった違いがある。そのため、今回の解析モデルは、文献3)の8階モデルに比べて固有周期も0.2秒程度長く、最大層間変形角の分布形状も異なるものとなった。

今回の解析モデルでは、1次固有周期は本2次壁を採用することによって、0.12秒程度短くなる結果となった。

最大層間変形角では、Taft波による解析を除いては4階モデルと同じように、2次壁の初期剛性、降伏層せん断力ともにM8-21モデルの2倍に増加させたM8-42モデルが、最も効果的に

表-6 最大層間変形角 (8階モデル)

地震波	モデル	M8-00	M8-21	M8-22	M8-41	M8-42
	固有周期 (sec)	0.789	0.720	0.720	0.667	0.667
El Centro (1940) NS	25cm/sec	1/186 (7)	1/205 (8)	1/188 (7)	1/219 (6)	1/208 (6)
	50cm/sec	1/87 (8)	1/104 (8)	1/99 (7)	1/112 (7)	1/115 (7)
Taft (1952) EW	25cm/sec	1/228 (7)	1/201 (6)	1/187 (6)	1/238 (5)	1/237 (5)
	50cm/sec	1/67 (7)	1/102 (7)	1/98 (7)	1/113 (7)	1/107 (6)
Hachinohe (1968) NS	25cm/sec	1/244 (2)	1/285 (1)	1/312 (2)	1/357 (1)	1/368 (1)
	50cm/sec	1/111 (4)	1/126 (3)	1/122 (3)	1/142 (3)	1/152 (2)
JMA Kobe (1995) NS	25cm/sec	1/139 (6)	1/159 (4)	1/154 (4)	1/175 (4)	1/184 (3)
	50cm/sec	1/45 (7)	1/61 (6)	1/62 (6)	1/65 (8)	1/74 (6)
BCJ	L1	1/213 (4)	1/183 (7)	1/172 (7)	1/234 (7)	1/247 (4)
	L2	1/79 (3)	1/113 (7)	1/99 (7)	1/123 (7)	1/145 (6)

斜線はM8-00モデルの最大値より大きいことを表す

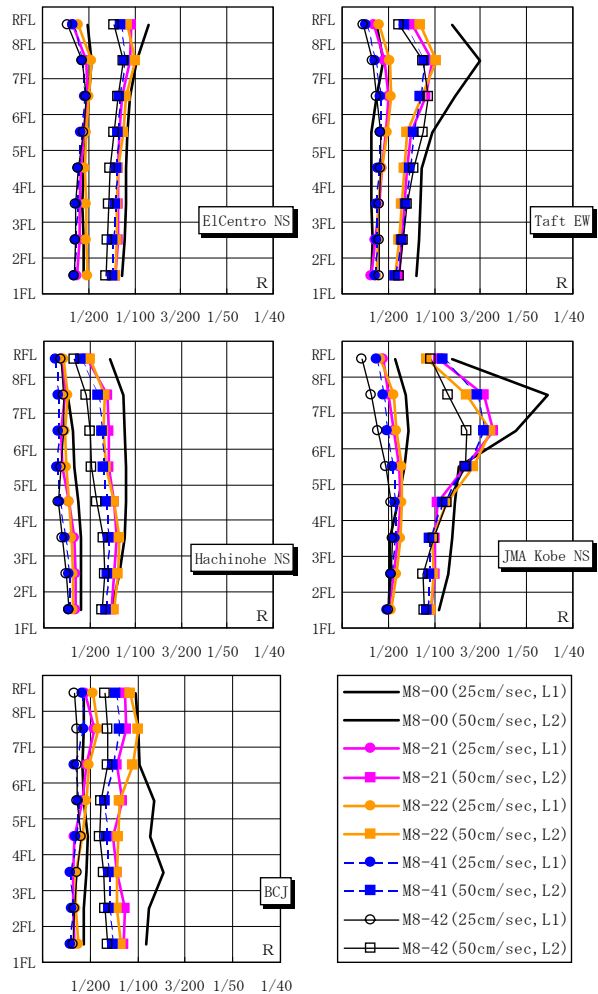


図-5 最大層間変形角 (8階モデル)

応答変形を減少させる結果となった。また、初期剛性を2倍に増加させたM8-41モデルにおいても、応答変形を減少させるように作用した。しかし、降伏層せん断力を2倍に増加させたM8-22モデルでは、M8-21モデルより、応答変形を増加させてしまう可能性が確認された。これはTaft波, JMA Kobe波以外の50cm/sec時の結

果では、最大層間変形角は $R=1/100$ 程度であったことから、M8-22モデルは、M8-21モデルの倍の応答変形が発生しないと塑性化しないモデルであるため、塑性領域でのエネルギー吸収効果が明確に現れなかったものと考えられる。しかし、Taft波、JMA Kobe波の50cm/sec時には、大きな応答変形となるため、全ての解析モデルにおいてM8-00より有効に作用することとなった。

また、今回の8階モデルでは、M8-21モデルで設定した割合程度の本2次壁を採用することによって、50cm/sec時の最大層間変形角がJMA Kobe波を除いては $R=1/100$ 程度に抑制することが可能であることも確認された。

3.3 12階モデルの解析結果

12階(M12-)モデルの1次固有周期および、最大層間変形角 R を表-7、図-6に示す。

1次固有周期は、本2次壁を採用することによって、0.15秒程度短くなる結果となった。

最大層間変形角では、それぞれの地震波によって、2次壁の採用による効果の表われ方が異なっており、4,8階モデルのように、初期剛性、降伏層せん断力ともにM12-21モデルの2倍に増加させたM12-42モデルが、必ずしも有効に作用する結果とはならなかった。ただし50cm/sec時に限定すれば、全体的な傾向としてM12-42モデルが最も有効に作用する結果となった。25cm/sec時には、初期剛性のみを2倍に増加させたM12-41モデルが、最も有効に作用する結果となった。しかし、多く場合において2次壁を採用した方が、躯体(M12-00)モデルより大きな変形となってしまうことも確認された。特にM12-21, M12-22モデルにおいては、ほとんどの場合でM12-00モデルよりも大きな応答変形を示す結果となった。これは、8階モデルと同じように、JMA Kobe波以外の50cm/sec時の結果では、最大層間変形角は $R=1/100$ 程度であったことから、塑性領域でのエネルギー吸収効果が明確に現れなかったためと考えられる。

表-7 最大層間変形角(12階モデル)

地震波	モデル	M12-00	M12-21	M12-22	M12-41	M12-42
	固有周期(sec)	0.938	0.857	0.857	0.793	0.793
El Centro (1940) NS	25cm/sec	1/250(10)	1/219(9,10)	1/206(9,10)	1/266(9)	1/249(9)
	50cm/sec	1/124(11)	1/105(11)	1/100(12)	1/120(12)	1/128(11)
Taft (1952) EW	25cm/sec	1/261(9)	1/210(12)	1/232(12)	1/280(9)	1/243(9)
	50cm/sec	1/97(10)	1/92(10)	1/81(12)	1/117(10,11)	1/127(10)
Hachinohe (1968) NS	25cm/sec	1/313(5)	1/256(5)	1/267(5)	1/313(2)	1/306(1,2)
	50cm/sec	1/161(7)	1/146(6)	1/135(6)	1/156(5,6)	1/155(5)
JMA Kobe (1995) NS	25cm/sec	1/204(9)	1/172(9)	1/157(9)	1/196(7,8)	1/184(7)
	50cm/sec	1/98(10)	1/71(10)	1/68(10)	1/79(10)	1/92(10)
BCJ	L1	1/265(3)	1/201(12)	1/170(11)	1/268(11)	1/190(11)
	L2	1/104(6)	1/117(10)	1/97(12)	1/136(7)	1/150(10)

斜線はM12-00モデルの最大値より大きいことを表す

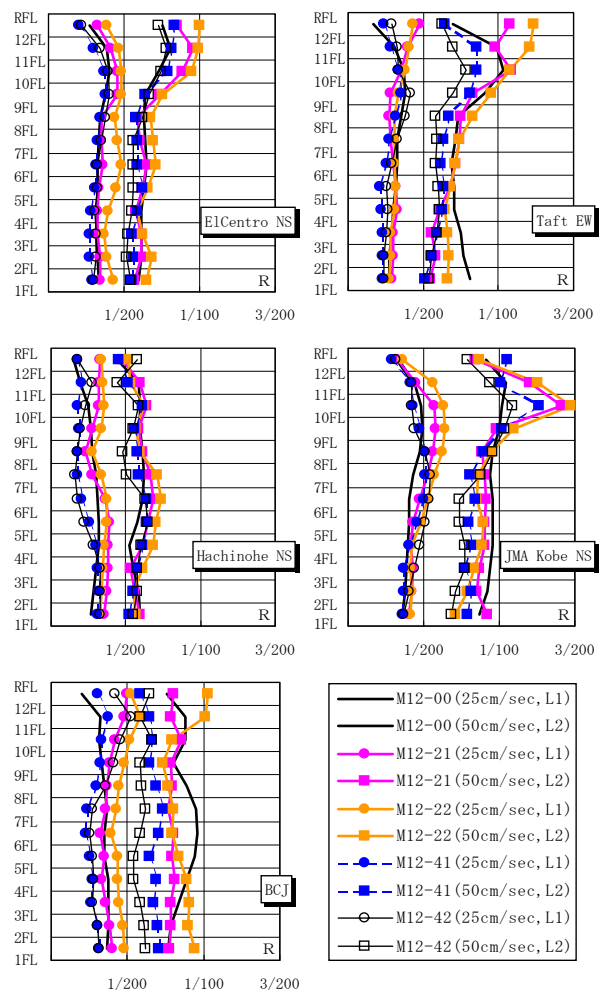


図-6 解析結果(12階モデル)

3.4 解析結果に関する考察

本工法を採用した場合の全体的な傾向としては、2次壁の初期剛性、降伏層せん断力を、と大きく設定した方が、より効果を有効な方向に作用させる可能性が確認された。しかし、建物の階数が増加し、速度が25cm/sec程度の地震波が入力された場合は、2次壁の初期剛性を増

加させ、降伏層せん断力は低いモデルの方が、有効に作用することも確認された。これは、階数が増加するほど応答変形としての層間変形角が小さくなる傾向があるので、降伏層せん断力が高いと、2次壁の塑性領域での挙動が少なくなり、それにより振動エネルギーの吸収効果も減少するためと考察される。

従って、応答変形が小さい場合は、2次壁の初期剛性が高く、降伏層せん断力が低く設定した方が、より多くの振動エネルギーを吸収すると考えられる。逆に応答変形が大きくなるような場合は、初期剛性、降伏層せん断力の両者を高く設定しても振動エネルギーは十分吸収されることとなるため、M-42モデルにおいて効果が十分に現れたものと考えられる。

次に、採用した地震波の応答スペクトルを図-7に示す。図中の縦線は、表-5~7における各階数の解析モデルの固有周期を表示したものである。加速度応答スペクトルによると、今回の解析は、4階モデルのEl Centro波、JMA Kobe波を除いて、塑性化による固有周期の伸びを考慮したとしても、大きな変化が見られない範囲

であった。変位応答スペクトルでは、12階モデルのTaft波を除いて、塑性化により固有周期が伸びると、応答変位は増加する傾向のあることが確認された。

4. まとめ

本研究では、制震装置としてのRC造2次壁を採用した建物モデルに関して、地震応答解析による比較・検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

今回検討を行った解析モデルは、ある仮定により作成したモデルであるため、同じ階数のモデルであっても、これまで検討してきた既存建築物モデルとは、固有周期等の振動性状が異なる。

本工法は、ある程度大きな初期剛性、降伏層せん断力を持つ2次壁を採用した方が、地震時の応答変形を有効に減少させる効果がある。ただし、ある程度建物高さが高いモデルで、2次壁を採用していない躯体モデルの最大層間変形角が小さい場合には、降伏層せん断力はあまり高く設定しない方が、より応答変形を減少させる効果がある。従って、対象とする建築物に応じてではあるが、2次壁内の鋼板には、なるべく大きな断面の部材を用い、大きな断面欠損を有するように設定した方が、本工法が有効に作用することとなる。

参考文献

- 1) 田口孝, 田才晃, 川勝康志郎, 伴幸雄: エネルギー吸収能力を有するRC造2次壁の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 469-474, 2000. 6
- 2) 田口孝, 田才晃: RC造2次壁に制震機能を持たせる工法の実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 47B, pp. 105-115, 2001. 3
- 3) 田口孝, 田才晃: エネルギー吸収能力を有するRC造2次壁を用いた建築物の地震応答性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 1207-1212, 2001. 7
- 4) (株)構造計画研究所: 建築構造物の振動解析プログラム RESP-M/2, 第8版, 2001. 8
- 5) 梅村恒, 市ノ瀬敏勝, 神林宏之: 層降伏型RC建物の形状指標について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 1213-1218, 2001. 7

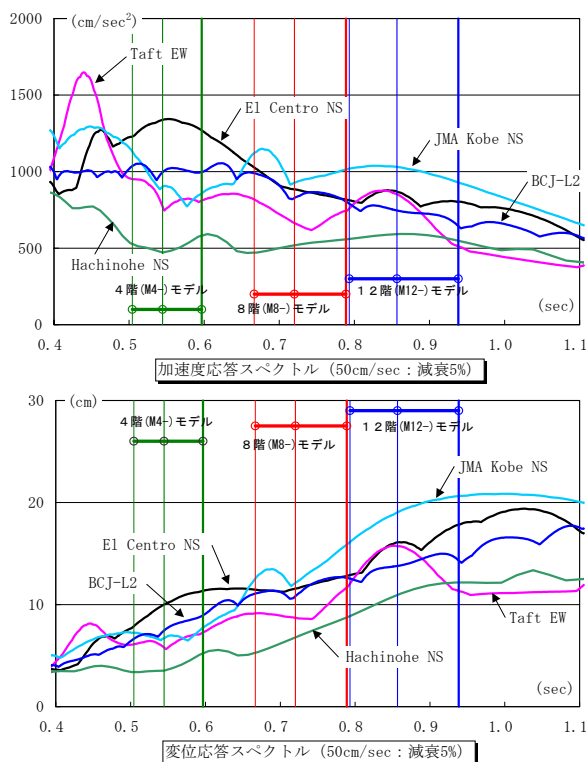


図-7 採用地震波の応答スペクトル