

九段郵便局・九段宿舎の免震レトロフィット

東京郵政局施設部建築課 石津 均



住友建設免制震事業部 古橋 剛



1. はじめに

東京都千代田区に建つ九段郵便局・九段宿舎にて免震構法を用いた居ながら耐震改修工事を行っている。免震構法による耐震改修は我が国でもここ数年行われるようになってきているが当工事の構法はその中でも独特なものである。

2. 免震構法による耐震改修

当工事で採用したのは「中間階複合型免震構法による耐震改修」である。現在、我が国において耐震性能が不足で既存不適格となる非木造建築は数100万棟のオーダーになるそうである。これらの建物の安全の確保は重要な課題であるが、すべてを建て直すわけにもいかない。何らかの補強を行って、既存の建物を安全に使い続けることは経済性の面のみならず、省資源、省エネルギーといった環境保護の観点からも重要と考えられる。こうして「耐震改修」工事が必要となるが、もっとも一般的な方法は、耐力壁やブレースの設置である。この場合、全階での工事が発生する、改修後の建物の使い勝手が悪くなる、また、上部構造を補強しても基礎の強度が不足するなどの問題が生じがちである。そこで、「免震構法による耐震改修」という手法が登場する。一般的には基礎免震が考えられるが、建物下の全面掘削という大がかりな工事となる。また、建物外周には免震の変位に対するクリアランスが必要となり、適用が難しい建物も多い。次にこれを解決するために「中間階免震構法による耐震改修」がでてくる。この際、問題として残るのは、やはり免震階の変位である。普通の免震建物のように50~60cmの変位を許容すると、その偏心荷重による応力に対する柱、梁の補強や、変位をカバーするためのクリアランスが

必要となる。また設備配管類は変形追従のための大きなスペースを必要とする。これでは免震階は殆ど用途としては使えなくなる。そこで、粘性ダンパーにより大きな減衰を付加して地震時の変形を抑え、改修後の免震階の有効面積を確保する方法がでてくる。これが本工事で採用した「中間階複合型免震構法による耐震改修」という構法である。

3. 建物概要

改修を行う建物は1967年に建設された地上10階の建物である。1階は郵便局、2~10階は宿舎の用途に供されている。建物概要を表-1に示す。

表-1 建物概要

建物名称	九段郵便局庁舎・九段宿舎
所 在	東京都千代田区九段南1丁目4-6
面 積	延床 7,695.97㎡, 建築 777.25㎡
階 数	地上10階, 地下なし, 塔屋2階
建 物 高	軒高29.85m, 最高部高 39.40m
構造形式	SRC造(1F~5F梁) ラーメン構造 RC造(5F柱~PHF) ラーメン構造 (短辺方向は耐震壁併用)
基礎構造	場所打ちコンクリート杭基礎(L=14m)
建 築 年	1967年(昭和42年)

本建物の耐震設計は、上部構造は建設当時の耐震設計基準に従い、高さ16m以下で設計震度 $k=0.2$ とし、それ以上の階は1階につき設計震度を0.01ずつ増した水平力をもとに、許容応力度設計がなされている。基礎構造は、GL-15m以深の東京礫層を支持層とする場所打ちコンクリート杭基礎となっている。杭基礎は現行基準に照らし合わせても十分な鉛直支



図-1 建物全景（耐震改修工事中）

持力を有しているが、当時の設計では基礎構造の水平力に対する設計は行われていない。

4. 耐震点検結果

本建物における耐震点検結果を表-2に示す。耐震点検は「官庁施設の耐震点検・改修要領」（建設大臣官房官庁営繕部監修：昭和62年）に基づき、平成7年に行われている。また、同時に保有水平耐力の確認もされている。重要度係数は $I = 1.1$ （Ⅱ類）とされている。

表-2 耐震点検結果（ はNGを示す）

階	短辺方向			長辺方向		
	I_s/I_{s0} ≥1.10	$C_T S_D$ ≥0.30	Q_u/Q_{un} ≥1.00	I_s/I_{s0} ≥1.10	$C_T S_D$ ≥0.30	Q_u/Q_{un} ≥1.00
10	2.60	0.78	0.85	2.30	0.93	0.63
9	2.08	0.66	0.59	1.55	0.58	0.63
8	1.90	0.45	0.59	1.40	0.48	0.64
7	1.98	0.60	0.66	0.86	0.45	0.63
6	1.30	0.45	0.66	0.85	0.43	0.64
5	0.90	0.46	0.59	0.75	0.44	0.64
4	1.03	0.49	0.74	0.91	0.44	0.72
3	0.90	0.53	0.74	0.83	0.50	0.72
2	1.10	0.52	0.59	0.78	0.48	0.72
1	1.11	0.38	0.59	0.73	0.44	0.64

耐震点検の結果、主に7階より下の階で構造耐震指標 I_s 値による値が満足されていない。一方で、強度形状指標 $C_T S_D$ 値はすべての階で満足した値となっている。しかし、保有水平耐力の確認ではどちらの方向も全ての階で満足しない結果となっている。

5. 既存建物の状況

①コンクリートの圧縮強度試験

既存建物において、コア抜きコンクリートの圧縮強度試験を行った。試験体コアは、1、2、3および10階の壁面より各階3本を採取した。試験結果を表-3に示す。試験の結果、既存建物のコンクリート強度は、軽量コンクリート、普通コンクリートとも設計基準強度を満足した値となっている。

表-3 コンクリートコアの抜き取り試験結果

階	設計基準強度 F_c or L_c (kgf/cm ²)	試験強度 F (kgf/cm ²)	平均値 \bar{F} (kgf/cm ²)	推定最大 中性化深さ (mm)
10	210 軽量コンクリート	308	330	10 モルタル部のみ
		357		
3	210 軽量コンクリート	440	387	15 モルタル部のみ
		319		
2	210 軽量コンクリート	440	386	10 モルタル部のみ
		375		
1	210 普通コンクリート	285	268	0
		242		

②コンクリートの中性化試験

圧縮強度試験のコア抜きと同位置において、中性化試験用のコアを各階1本採取した。コアは直径方向に割裂し、割裂面にフェノールフタレインを塗布して中性化深度を測定した。試験結果を表-3に示す。試験の結果、推定最大中性化深さは最大15mmであったが、壁表面に存在するモルタル部分のみであり、コンクリートには中性化は進行していない。

③地盤調査

本建物敷地内において確認のため地盤調査を行った。調査の結果、当敷地では地表面よりローム層、粘性土層、東京層（礫質土、砂質土、粘性土）、東京礫層、江戸川層（粘性土、砂質土）の順で構成されていることを確認した。また、PS検層結果より算定すると、表層地盤の卓越周期は0.32秒であり、第2種地盤と想定できる。

6. 改修計画

本建物を耐震改修するに当たり、郵便局という公共性の高い建物であることを考えると、施工中に使用を休止することが出来ず、居ながらの改修が要求された。しかし、従来の耐震補強方法では、耐震壁が増えるなど建物の使用性に与える影響が大きく、かつ居ながらの改修は困難であった。この問題を解決する方法として、2階の柱中央位置に免震装置を設置する中間階免震改修を行うことを計画した。さらに、免震層となる2階部分は改修後も宿舍として使用されるため、地震時の変形を出来る限り小さくし、平面計画も出来る限り変更しないことが要求された。そこで、地震時の変形を抑える目的で、制震壁と呼ばれる粘性ダンパーを2階梁と3階梁の間に取付けることとし、柱中央に設置されるアイソレータには減衰性能のない天然ゴム系積層ゴムを用いて、柱に生じるせん断力を更に抑えた。

本免震構造の概念図を図-2に、改修設計目標を表-4に示す。免震層となる2階は改修後、有効面積は若干減少するが、用途、機能、部屋数等を変えずに居住階として復旧する。改修前の2階平面図を図-3に、改修後の平面図を図-4に示す。

制震壁は各方向の減衰能力を等しくするために、各方向の有効面積が等しくなるように設計し、平面計画に影響を与えないようにもともと間仕切り壁のある位置で、かつ減衰力中心が建物重心と一致する位置に設けている。免震装置と制震壁の概要図を図-5に示す。

免震層となる2階を貫通するエレベータシャフトは、3階から吊り下げることとし、2階床とはクリアランスを設け、変位に追従できる構造とした。階段は2階床上で切断し、スリットを設けることで対処した。なお、本建物の構造体でのクリアランスは300mmとしている。

設備配管は免震層において縦型のフレキシブル継手とし、拡幅したPS内で大地震時においても水平方向の相対変位に追従するようにした。

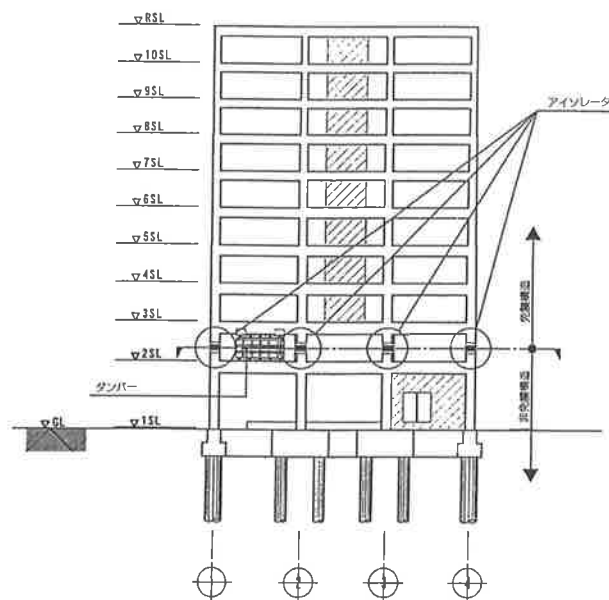


図-2 中間階免震改修方法の概要図

表-4 改修設計目標

レベル	改修設計目標	
	上部構造・基礎構造	免震装置
レベル1	部材レベルで弾性限以下	最大変形量 15cm 以下 浮き上がりを生じさせない
レベル2	架構レベルで弾性限以下 部材のせん断破壊を発生させない	最大変形量 25cm 以下 有害な浮き上がりを生じさせない

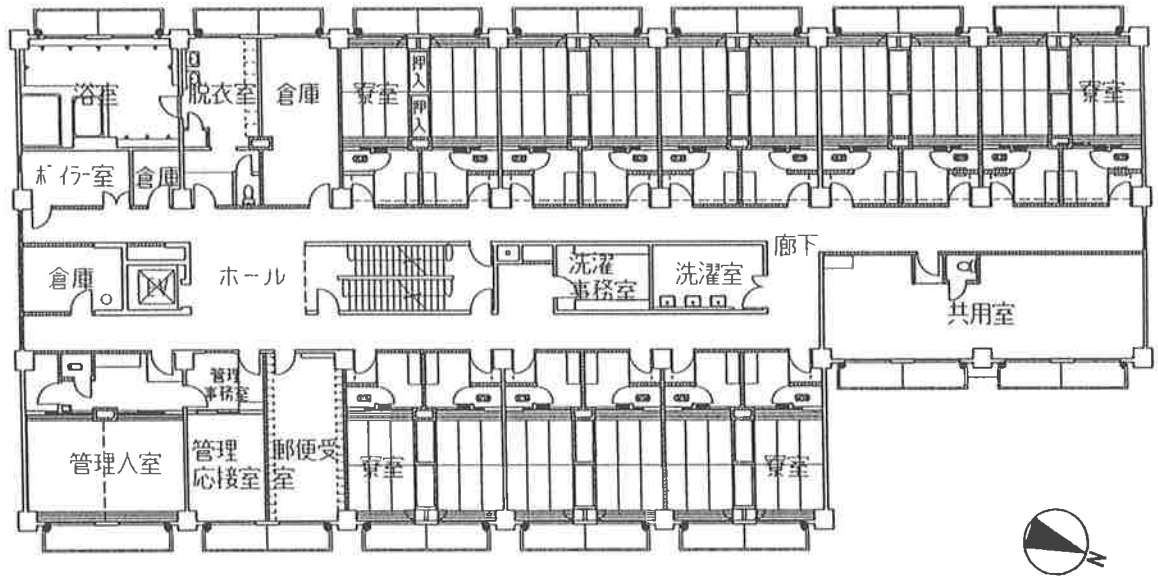


図-3 改修前の2階平面図

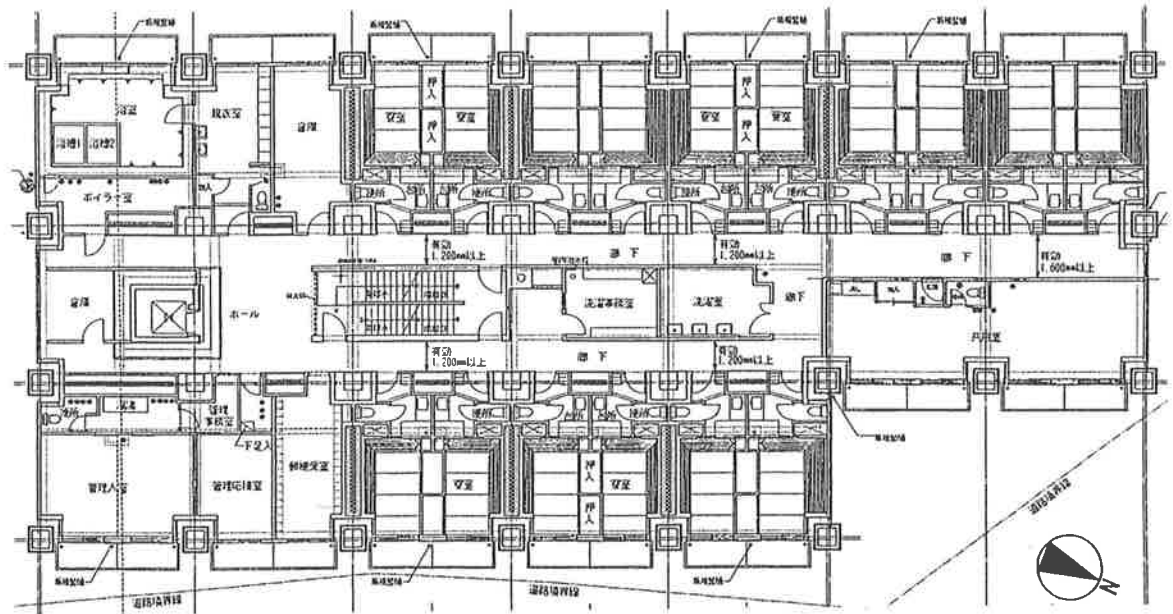


図-4 改修後の2階平面図

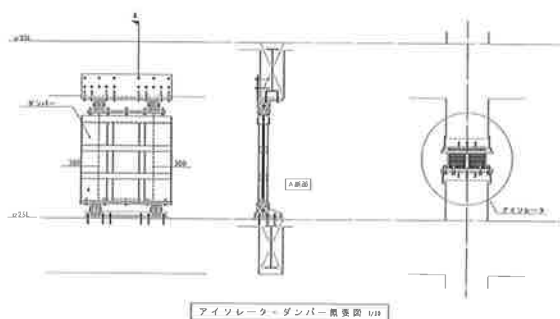


図-5 免震装置および制震壁の概要図

7. 免震装置と減衰装置の設計

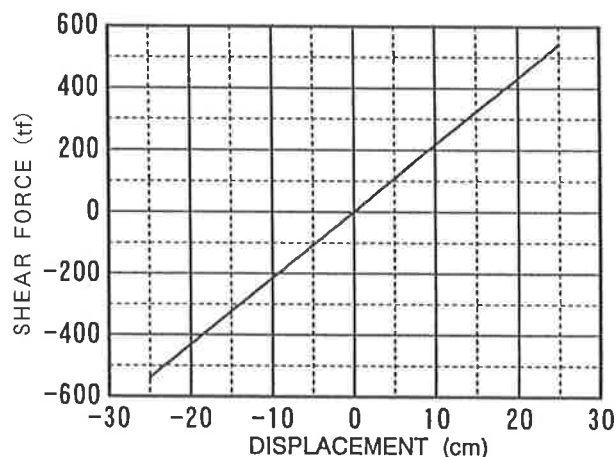
免震装置としては、積層ゴム免震装置を各柱中央に1基ずつ、600φを28基、700φを2基、合計30基を支持重量に応じて配置する。設計水平変位が小さいので一般の免震建物より小径の免震装置を使用している。

減衰装置は、2階と3階の梁間に桁行方向は12枚、張間方向は6枚、合計18枚を配置した。表-5にそれぞれの装置全数での諸元を示す。

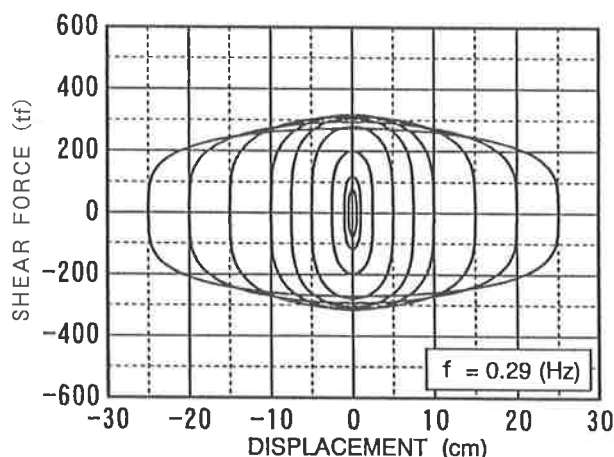
表-5 各装置の諸元

積層ゴム	せん断弾性係数 G_r	4.0 (kgf/cm ²)
	ゴム有効高さ T_r	16.8 (cm)
	水平剛性 K_h	21.6 (tf/cm)
	鉛直剛性 K_v	43904.2 (tf/cm)
制震壁	粘性体の基本粘度 μ_{30}	90000 (poise)
	有効面積 張間方向 A_{sx}	17.3 (m ²)
	桁行方向 A_{sy}	17.1 (m ²)
	初期減衰係数 張間方向 C_{1x}	80.6 (tf・s/cm)
	桁行方向 C_{1y}	79.5 (tf・s/cm)

制震壁は、従来は高層ビルの付加減衰装置として用いられてきたものであり、その分野では実績も多い。制震壁に使用する粘性体の粘度には温度依存性があり、その減衰性能は速度に対して非線形性を示す。設計においてはこれらを考慮する必要がある。本工事においてはこれを免震機構のダンパーとして用いている。実験によると制震壁をこのような大変形領域において使用する場合、過去に経験した最大変形量に応じて粘性減衰力が低減する。地震応答解析には、この低減も考慮に入れて解析することとした。図-6に本工事に用いた免震装置と減衰装置の復元力特性を示す。



積層ゴム免震装置の復元力特性



制震壁の復元力特性

図-6 各装置の復元力特性

8. 振動解析モデル

振動解析モデルは、12質点のせん断弾塑性単列マスーバネモデルとした。基礎を固定とし、地震動の入力位置とした。各階の復元力特性は、静的弾塑性解析より得られた層せん断力-層間変位曲線を基に、トリリニア型モデルに近似した。履歴特性は Degrading型のモデル (Takeda モデル) を採用し、除荷時剛性低下指数 $\gamma = 0.4$ とした。積層ゴム免震装置の復元力特性はLinear型とし、2階と3階の間に大変形領域での制震壁の減衰性能を表すダッシュポットを設定した。建物の減衰は内部粘性減衰を仮定し、上部構造体のみ1次振動に対して $h = 2\%$ の瞬間剛性比例型とした。制震壁は減衰係数を直接指定し、内部粘性減衰マトリクスを作成し考慮した。また、建物使用時に想定される室温度を考慮して、制震壁粘性体の設計基準温度を20℃とし、設計温度領域は15~30℃と設定した。

9. 固有値解析

解析モデルの減衰項を無視した固有値解析結果を表-6に示す。

表-6 固有値解析結果 (固有周期と刺激係数)

振動モード		1次	2次	3次
張間方向	T (sec)	3.41	0.40	0.21
	β	1.02	-0.03	0.01
桁行方向	T (sec)	3.42	0.45	0.23
	β	1.03	-0.03	-0.01

固有周期は通常の免震建物の大変形時と同程度の長周期化された免震周期となっている。

10. 地震応答解析結果

設計に使用した入力地震動を表-7に示す。従来波についてはレベル1は最大速度を25cm/s、レベル2は最大速度を50cm/sと設定した。模擬作成地震動は本敷地表層地盤の影響を考慮した地震動で、センター試作波BCJ-L2を工学的基盤より入力し、建物基礎位置で得られた応答波形を採用している。模擬地震動はレベル2とし、その最大速度は70cm/sであり、地震動のカテゴリーとしてはC3となる。

表-7 入力地震動一覧

地震波名	観測最大加速度 (cm/s ²)	入力最大加速度 (cm/s ²)		計算時間 (sec)
		レベル1	レベル2	
El Centro, 1940, NS	341.7	255.4	510.8	40
Taft, 1952, EW	176.0	248.4	496.8	40
Hachinohe, 1968, NS	225.0	165.1	330.1	35
Hachinohe, 1968, EW	182.9	127.7	255.4	35
模擬作成地震動	592.4	—	592.4	120

地震応答解析は設計基準温度(20℃)と設計温度領域の最低値(15℃)と最高値(30℃)で行っているが、ここでは張間方向の設計基準温度での応答結果を図-7に示す。免震層よりも上層階での応答加速度値がレベル2の入力に対しても300cm/s²以下と小さい。さらに免震層に制震壁を用いることで、免震層の応答層間変形を250mm以下に抑制することができ、免震装置の取り付け2階柱への層せん断力が低減できている。また、非免震構造の1階でも当初の設計地震力を下回る応答層せん断力である。レベル2相当地震動の解析においても十分に設計目

標を満足する結果となった。

11. 補強検討

この応答解析結果より、既存建物への補強の有無を検討した。上部構造に関しては、主にエレベーターシャフトと階段の鉛直荷重支持のため2、3階梁の一部に補強が必要となるが、それ以外の階の柱、梁および壁には補強はない。また、基礎構造に関しても、基礎梁・杭共に補強の必要はないという結果となった。

12. 工事について

改修工事は免震層となる2階以外をすべて使用しながら行っている。下は郵便局、上は宿舎であり建物は平日も休日も昼間・夜間ともどこかしら使われている。

2階に集中した工事階で構造体の免震化、設備配管類、仕上げ類の免震対応化工事を行う。本構法で採用した柱の切断及びアイソレータの設置手順を図-8に示す。鋼製の圧着治具で柱をつかんで軸力をジャッキに移行し、柱切断、免震装置設置後、フラットジャッキで軸力を柱に戻す方式であり、工事により構造体に生じる変位、応力を極力小さくすることができる。

13. まとめ

耐震改修に「中間階複合型免震レトロフィット構法」を用いた。本構法を採用することで、免震層よりも上部での層せん断力はもちろん、制震壁により免震階の柱も、非免震である下層階の層せん断力も低減することができた。建物構造体の補強、建物平面、外観の変更を最小限に抑える事が出来た。本建物の耐震改修に適用するには有効な構法であると考えられる。

謝辞

本建物の計画・設計・施工に当たり、東京郵政局施設部の方々に多大なご協力とご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

河井慶太他：複合型免震レトロフィット構法の開発(その1～5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1999

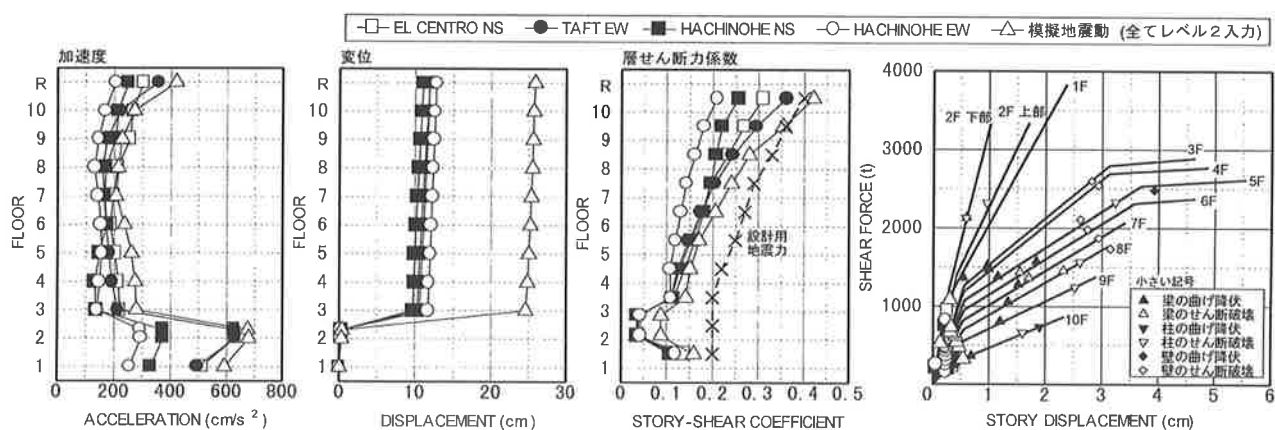
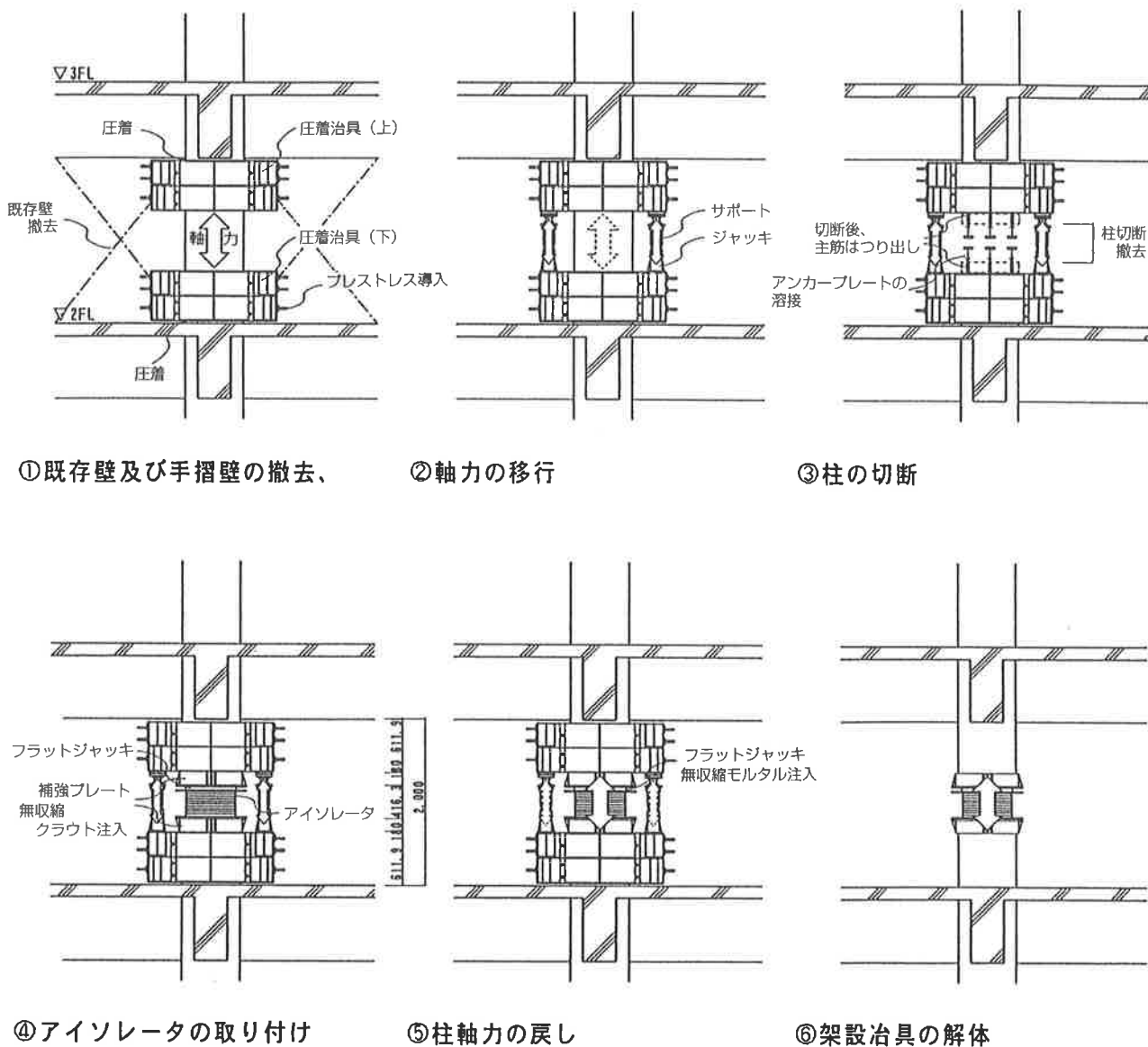


図-7 応答解析結果 (設計基準温度: 20°C)



免震装置の設置手順

図-8 柱の切断及びアイソレータの設置手順