

# (仮称) 仙台MTビル

大成建設 小倉桂治



同 川端一三



同 原 孝文



同 小室 努



## 1. はじめに

本建物は、仙台市に建設中の地下2階、地上18階、塔屋2階、高さ約85mの事務所ビルである(図-1)。

高強度コンクリート、高強度鉄筋および混合構造梁の使用により、15m程度の長スパンを有する高層事務所ビルを、鉄筋コンクリート(RC)造で実現している。また、「高い耐震安全性を確保し、大地震直後にビル機能を維持する」目的で免震構法を適用している。高層建物の免震化は本建物が国内で最初である。ここでは、主に高層免震建物としての構造計画と耐震性能について述べる。



図-1 建物外観パース

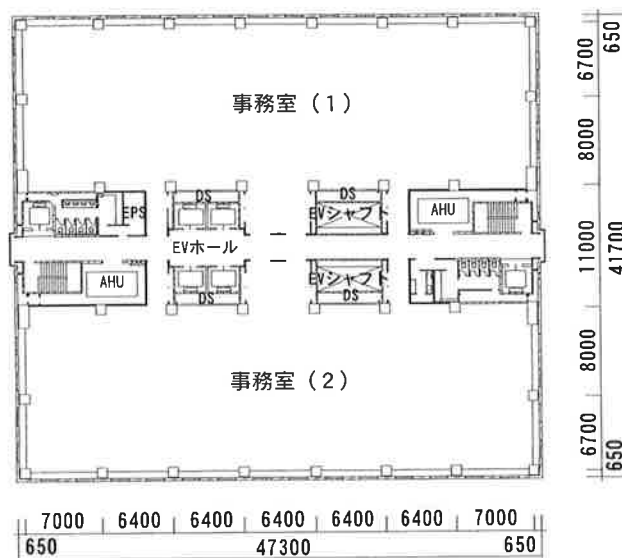


図-2 基準階平面図

## 2. 建物概要

- 建設地：宮城県仙台市
- 建築主：森ビル産業株式会社、森ビル開発株式会社
- 主用途：事務所、店舗
- 建築面積：2,013m<sup>2</sup>
- 延床面積：43,193m<sup>2</sup>
- 階数：地下2階、地上18階、塔屋2階
- 軒高：74.9m
- 最高高さ：84.9m
- 基準階：階高 3.95m 床面積 1,940m<sup>2</sup>

## 3. 構造計画

### 1) 計画概要

基準階平面を図-2に、軸組を図-3に、基準階伏図を図-4に示す。

地上階は、柱および梁に高強度材料(コンクリートFc 360~600kg/cm<sup>2</sup>、鉄筋 SD490)を使用し、長スパン部に混合構造梁(端部RC造、中央部S造の梁)を使用したRC造の純ラーメン構造である。小梁はS造、床は鋼製デッキ使用のRC造とし、柱および梁をプレキャスト化して鉄骨造と同等の工期を可能とする構法としている。

免震装置は1階床下と地下駐車場との間に設けた免震層に設置している。免震支承の配置を図-5に示す。本建物の地上部の弾性固有周期は2秒程度である。このような長周期建物を免震化した例はまだない。しかし、高層建物でも免震層で地震の入力エネルギーを消費すれば、中低層の免震建物と同じように耐震性能を飛躍的に向上できると考えられる。そこで、上部構造の固有周期および復元力特性と免震層の復元力特性との組み合わせで、高層免震建物の免震効果を検討し

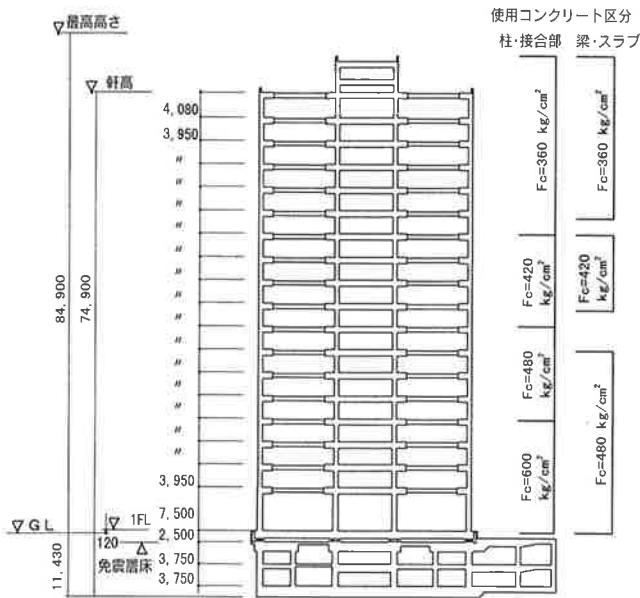
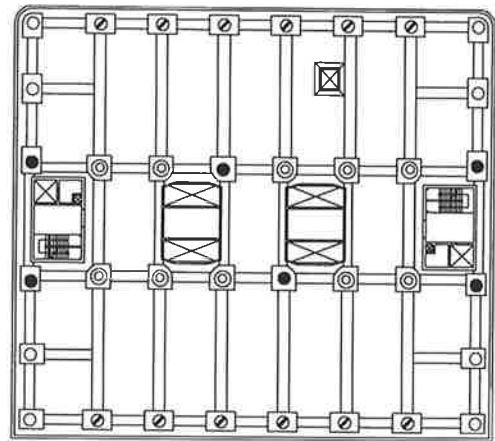


図-3 軸組図



	記号	支承径 (mm)	台数
積層ゴム支承	○	1100	8
	⊙	1100	12
弾性すべり支承	●	1200	6
	◎	1300	10

図-5 免震装置配置図

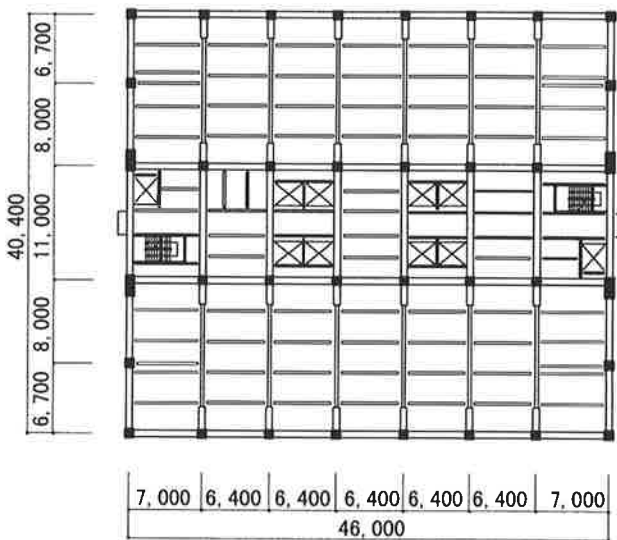


図-4 基準階伏図

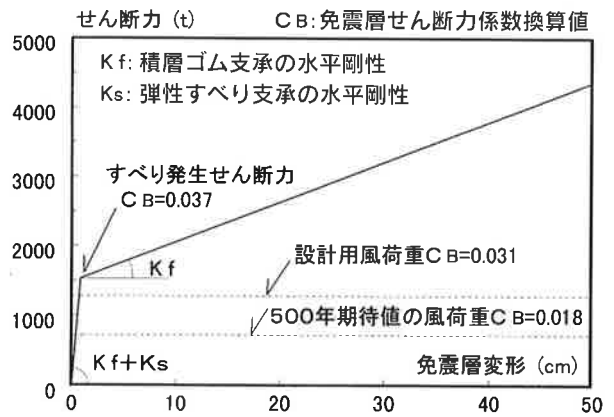


図-6 免震層の復元特性

た。その結果、免震層の復元力特性を適切に定めれば高層建物でも十分な免震効果を得ることができることを確認した(検討概要を5節に示す)。免震構法は、「弾性すべり支承」と「積層ゴム支承」を併用した。免震層の復元力特性と風荷重との関係を図-6に示す。設計用風荷重ではすべりが発生せず、強地震時ですべりが発生するようにすべり支承の割合を定め、強風時には揺れの少ない鉄筋コンクリート造の特徴が、地震時には上部構造の応答力・変形の小さい免震建物の特徴がそれぞれ発揮できるように計画している。

地下階は、強度抵抗型の耐力壁付きラーメン構造とした。基礎は堅固な凝灰質砂岩(N値50以上)を支持地盤とする直接基礎(ベタ基礎)である。

## 2) 耐震設計

### ① 設計用地震動

設計用地震動一覧を表-1に示す。記録地震波4波と模擬波2波を用い、建物の使用期間中の地震発生確率を考慮して、入力レベルを1~3まで定めた。記録地震波に関しては、最大速度を25cm/sec、50cm/secおよび75cm/secに規準化した地震波をそれぞれレベル1、2および3とした。模擬地震波に関しては、日本建築センター「設計用入力地震動研究委員会平成3年度成果報告書」によるBCJ-L2波をレベル3とした。また、仙台市で観測された記録波SENDAI TH-038 1978EWに、地震規模の増大(M7.4からM8.0に増大)と長周期域の評価を加えて作成した模擬地震波「仙台」をレベル3とした。

表一 設計用地震動一覧

入力地震波		レベル1	レベル2	レベル3
記録地震波	EL CENTRO 1940 NS	25.0 cm/s 255.4 cm/s <sup>2</sup>	50.0 cm/s 510.8 cm/s <sup>2</sup>	75.0 cm/s 766.1 cm/s <sup>2</sup>
	TAFT 1952 EW	25.0 cm/s 248.3 cm/s <sup>2</sup>	50.0 cm/s 496.6 cm/s <sup>2</sup>	75.0 cm/s 744.9 cm/s <sup>2</sup>
	HACHINOHE 1968 NS	25.0 cm/s 165.1 cm/s <sup>2</sup>	50.0 cm/s 330.1 cm/s <sup>2</sup>	75.0 cm/s 495.2 cm/s <sup>2</sup>
	SENDAI TH-038 1978 EW	25.0 cm/s 154.8 cm/s <sup>2</sup>	50.0 cm/s 309.6 cm/s <sup>2</sup>	75.0 cm/s 464.5 cm/s <sup>2</sup>
模擬波	BCJ-L2	—	—	57.4 cm/s 355.7 cm/s <sup>2</sup>
	仙台	—	—	81.0 cm/s 480.3 cm/s <sup>2</sup>

上段の数値は入力最大速度、下段は入力最大加速度を示す。

②目標耐震性能

建物各部位の目標耐震性能を表一2に示す。表中の弾性限耐力①および弾性限耐力②の定義は以下による。

弾性限耐力①:柱が未降伏で、ある梁が最初に降伏したときの層せん断力。

弾性限耐力②:柱が未降伏で、降伏した梁の数が1/2程度のときの層せん断力。

弾性限耐力②は、層せん断力-層間変形角関係で層全体が降伏状態になる層せん断力の90%程度に相当する。

表一2 目標耐震性能

入力地震波	レベル1	レベル2	レベル3
免震装置	安定変形限(25cm)以内 ゴムせん断歪率: 125%	安定変形限(25cm)以内 ゴムせん断歪率: 125%	性能保証変形(50cm)以内 ゴムせん断歪率: 250%
地上階	許容応力度以下	弾性限耐力①以下	弾性限耐力②以下
地下・基礎	許容応力度以下	許容応力度以下	弾性限耐力①以下

③設計方法および耐震性能を確認する方法

a) 地上階

設計用地震力は、レベル1の応答層せん断力を包絡するように定めた。1階の層せん断力係数は0.08である。高さ方向の層せん断力係数の分布は、Ai分布の上部を補正した形状とした。漸増載荷非線形解析を用い、以下に示す1次設計および2次設計を行う。

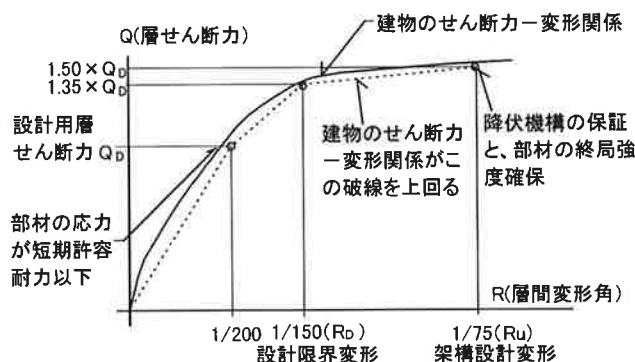
1次設計:設計用地震力に対し許容応力度設計を行う。

1階の梁には免震装置に作用する鉛直力・水平力による付加応力を考慮する。

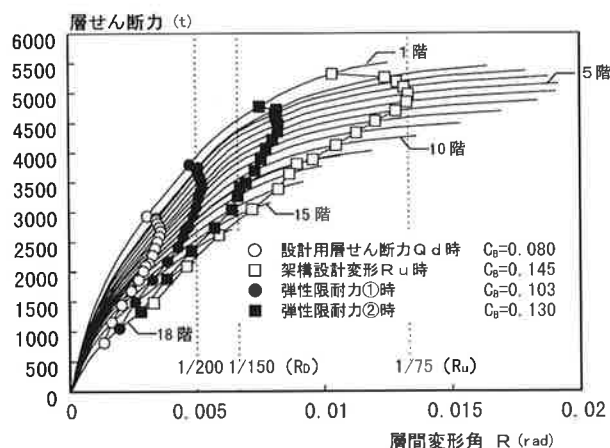
2次設計:レベル3の地震動で生じ得ると想定される変形より更に大きな変形に対し、骨組の崩壊機構と降伏部位の塑性変形能力を保証し、脆性破壊を防止して骨組全体の強度と変形能力を確保する。1階の梁には免震装置に作用する鉛直力・水平力による付加応力を考慮する。

地上階の耐震設計概念を図一7に示す。また、漸増載荷非線形解析による層せん断力-層間変形角関係(短辺方向)を図一8に示す。

保有耐震性能が目標耐震性能を満たすことの確認は、それぞれのレベルの地震応答解析による。



図一7 耐震設計概念



図一8 せん断力-層間変形角関数(短辺方向)

b) 地下階

予備応答解析をもとに、1次設計および2次設計の設計用地震力を層せん断力係数でそれぞれ0.2および0.3とした。1次設計の設計用地震力に対し許容応力度設計を行い、2次設計の設計用地震力に対しては、終局強度設計を行う。免震装置が取り付け部分には、各次設計時に作用する鉛直力・水平力による付加応力を考慮して設計する。保有耐震性能が目標耐震性能を満たすことの確認は、それぞれのレベルの地震応答解析による。

c) 免震装置

使用する免震装置の変形能力から、安定変形限を25cm(ゴムのせん断歪み率125%)、性能保証変形を50cm(ゴムのせん断歪み率250%)とした。地震応答解析を行い、レベル1およびレベル2の応答が安定変形限以内であること、レベル3の応答が性能保証変形以内であることを確認する。

4. 耐震性能

1) 地震応答解析モデル

解析モデルは、地下2階床位置を固定とし、地下1階床、免震層床、1階床～R階床にそれぞれ質量を集約した21質点の等価せん断型である。上部構造の復元力骨格曲線は、漸増載荷非線形解析による層せん断力-層間変形関係をトリリニアに置換したものを用い、履歴特性はTAKEDAモデルとする。免震層は弾性すべり支承と積層ゴム支承を並列に配置したモデルとし、弾性すべり支承のバネはゴムを表す弾性バネとすべりを表す剛塑性バネを直列配置して表す。積層ゴム支承は弾性バネとする。また、地下構造は弾性バネとする。減衰は内部粘性型の瞬間剛性比例とし、減衰定数は地上階および地下階とも、それぞれの部位の1次固有振動数に対し3%とする。免震装置の粘性減衰は0とする。

2) 解析結果

各部位の最大応答層せん断力および地上階の最大応答層間変形を建物短辺方向について図-9に示す。地上階の最大応答層せん断力は、レベル2で弾性限耐力①に相当する層せん断力を、レベル3で弾性限耐力②に相当する層せん断力をそれぞれ下回っている。このことは、各レベルの目標耐震性能を満足することを示している。地上階の最大応答層間変形は、レベル2で1/330以下、レベル3で1/230以下である。

図中に上部構造の復元力特性を同一とした非免震の場合の応答を示す。免震効果は層せん断力で1/2程度、層間変形角で1/3程度であり、十分な免震効果が見られる。

免震層の最大応答を短辺方向について図-10に示す。免震層の最大応答変形は、レベル1で10cm以下、レベル2で20cm以下で免震装置の安定変形限(25cm)以内である。また、レベル3の最大応答変形は40cm以下で、免震装置の性能保証変形(50cm)以内である。

3) 免震装置の引抜に関する検討

水平地震動の転倒モーメントによる柱軸力変動と、鉛直地震動による柱軸力変動を考慮して免震装置の引抜を検討した。引抜力の生じる可能性の最も大きい隅柱の積層ゴム支承の検討結果を示す。水平地震動に対しては、地震応答解析モデルでの支承位置の応答転倒モーメントから軸力変動を時刻歴で求めた。鉛直地震動に対しては、各柱を弾性鉛直バネに置換した上下動モデルの応答から軸力変動を時刻歴で求めた。水平地震動と鉛直地震動による軸力変動を時刻歴で加算した値と常時の軸力とを比較して図-11に示す。レベル2

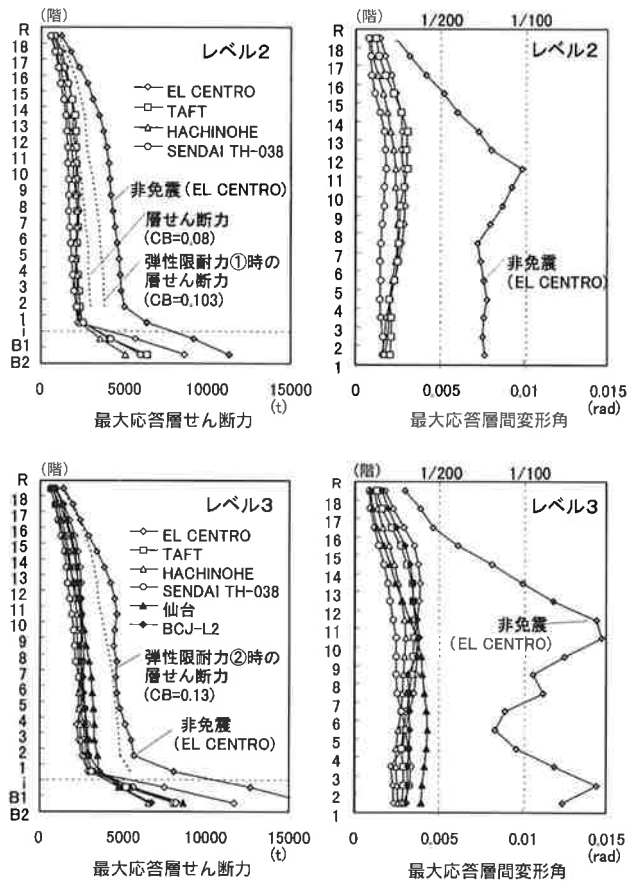


図-9 最大応答層せん断力・層間変形(短辺方向)

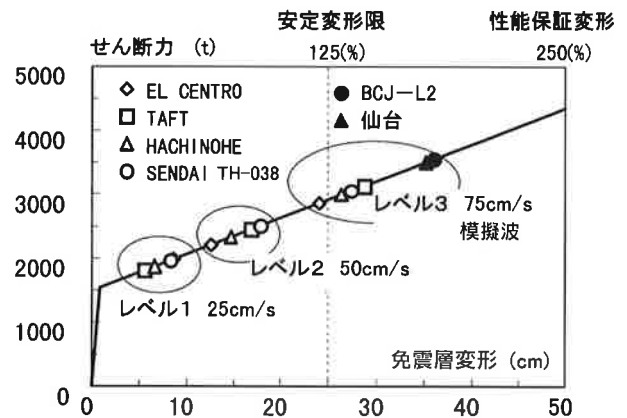


図-10 免震層の最大応答(短辺方向)

の応答では、短辺方向、長辺方向および45度方向とも引抜力は生じていない。レベル3では、引抜力は生じるが、引張面圧に換算して45度方向で最大3kg/cm<sup>2</sup>程度であり、小さい。

積層ゴム支承の引抜に関する構造計画上の対処としては、以下の2方法が考えられる。

- ①積層ゴム支承が引張降伏しないように、上部構造のフレームや積層ゴム支承の取り付け方法を工夫する。

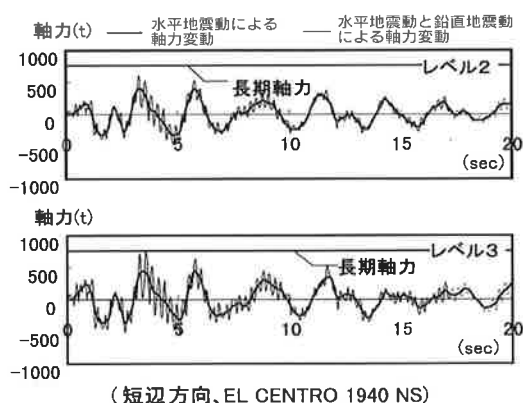


図-11 隅柱積層ゴム支承の時刻歴応答軸力

②積層ゴム支承の引張降伏を許容し、降伏による積層ゴム支承の性状を実験等により把握し、地震時およびその後も免震建物としての性能を維持するように対処する。

本建物では、隅柱に接続する梁の剛性・耐力を調整し、転倒モーメントによる柱の変動軸力を小さくして、設計地震動による積層ゴム支承の引抜力を許容範囲に抑えている。

一般に、スパンが2以上の高層建物では、引抜力の生じる柱は建物の隅部および辺部のみであり、建物全体の転倒は問題とならない。免震建物は、非免震建物に比較して応答転倒モーメントが大幅に減少するので柱の引抜力は非免震の場合より大幅に減少する。このことから、積層ゴム支承の引抜に関しては、①の方法で計画可能な高層建物は多いと考える。また、②の方法が確立すれば、免震建物の設計の自由度が大幅に拡がると考えられる。

### 5. 高層免震建物の地震応答特性

3節「構造計画」で述べたように、免震構法を本建物のような長周期建物に適用するためには、上部構造の固有周期や復元力特性が免震層の応答や上部構造への免震効果に及ぼす影響を包括的に把握しておく必要がある。そこで上部構造の固有周期および復元力特性と免震層の復元力特性との組み合わせで、高層免震建物の地震応答特性を検討した。ここでは、上部構造がRC造の場合の検討概要を示す。

#### 1) 検討モデル

上部構造を1質点、免震層を1質点とした2質点のモデルで検討した。検討モデルを図-12に示す。上部構造の復元力特性は、RC造を対象とし、骨格曲線がトリリニア型で履歴特性をTAKEDAモデル( $\gamma = 0.4$ )

とし、降伏せん断力はせん断力係数で $C_B = 0.2$ とした。積層ゴム支承と履歴型ダンパーを用いた免震構法を対象とし、免震層の復元力特性は積層ゴム支承を弾性、履歴型ダンパーを完全弾塑性とし並列配置して合成したものととした。上部構造および免震層の復元力特性を図-13に示す。



上部構造の弾性固有周期

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{W_s/g}{K_o}}$$

$K_o$ : 上部構造の初期剛性

免震層の降伏以前の弾性周期

$$T_{i0} = 2\pi \sqrt{\frac{(W_s+W_i)/g}{K_{i0}}}$$

$K_{i0}$ : 免震層の降伏以前の剛性

免震層の降伏以降の弾性周期

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{(W_s+W_i)/g}{K_i}}$$

$K_i$ : 免震層の降伏以降の剛性

図-12 検討モデル

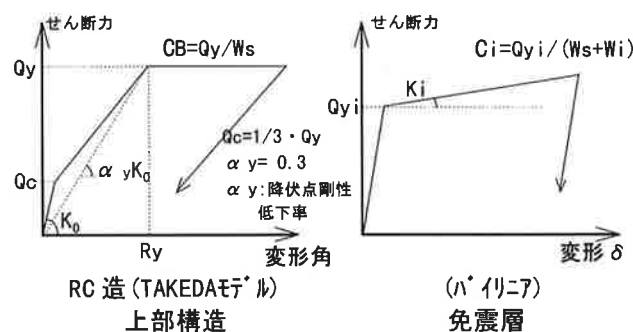


図-13 上部構造および免震層の復元力特性

#### 2) 解析における変数

上部構造の変数は弾性固有周期 ( $T_s$ ) とする。免震層の変数は、降伏せん断力係数 ( $C_i$ ) とダンパー降伏以降の剛性に対する周期 ( $T_i$ ) とする。変数の定義は図-12に示す。また、変数の範囲を表-3に示す。なお、免震層の弾性周期 ( $T_{i0}$ ) は0.5秒と設定した。

表-3 上部構造および免震層の変数

上部構造	弾性固有周期	$T_s = 0.1 \sim 5.0$ (sec)
免震層	降伏せん断力係数	$C_i = 0.05, 0.03$
	降伏以降の周期	$T_i = 4.0, 5.0, 6.0$ (sec)

#### 3) 解析条件

①上部構造の減衰は内部粘性型の瞬間剛性比例とし、減衰定数は上部構造のみのモードに対し2%とする。免震層の粘性減衰は0とする。

②地震波は最大速度を50cm/sおよび100cm/sに標準化したEL CENTRO'40NS波およびBCJ-L2波(最大速度57.4cm/s)とする。応答時間はEL CENTRO'40NS波は53.76秒、BCJ-L2波は120秒とする。

4) 応答結果概要

上部構造の応答変形低減効果を図-14に示す。縦軸は上部構造の応答変形を非免震構造の場合の応答変形で除した低減率である。横軸は上部構造の弾性固有周期(Ts)を示す。低減効果は、(1-応答変形低減率)で定義する。また、免震層の応答変形を図-15に示す。縦軸に免震層の応答変形を示し、横軸に上部構造の弾性固有周期(Ts)を示す。

図-14、図-15から以下のことがいえる。

- ①上部構造の応答変形低減効果(免震効果)は、上部構造の弾性固有周期(Ts)が長くなるに従い減少するが、免震層の復元力特性を適切に定めれば固有周期が3秒程度でも十分な免震効果が期待できる。
- ②免震層の応答変形は、上部構造の固有周期が長くなっても、上部構造を剛とした場合(Ts=0)と同程度以下である。

本建物の設計では、弾性固有周期Ts=2秒、免震層の復元力特性Ti=5秒、Ci=4%を目標とした。図-14および図-15は、本建物に十分な免震効果が期待でき、かつ、免震層や上部構造の復元力特性が構造体や免震装置のばらつき等で変動しても、免震建物としての性能を十分維持できることを示している。

6. まとめ

高さ約85mの高層免震建物について、主に免震建物としての構造計画および耐震性能を示した。本建物は1997年3月に着工し、1999年3月竣工予定である。5節に示したように、免震層の復元力特性を適切に定めれば、さらに高層の免震建物も可能である。免震構造による飛躍的な耐震性能の向上と設計自由度の拡大を高層建物に活用できると考える。

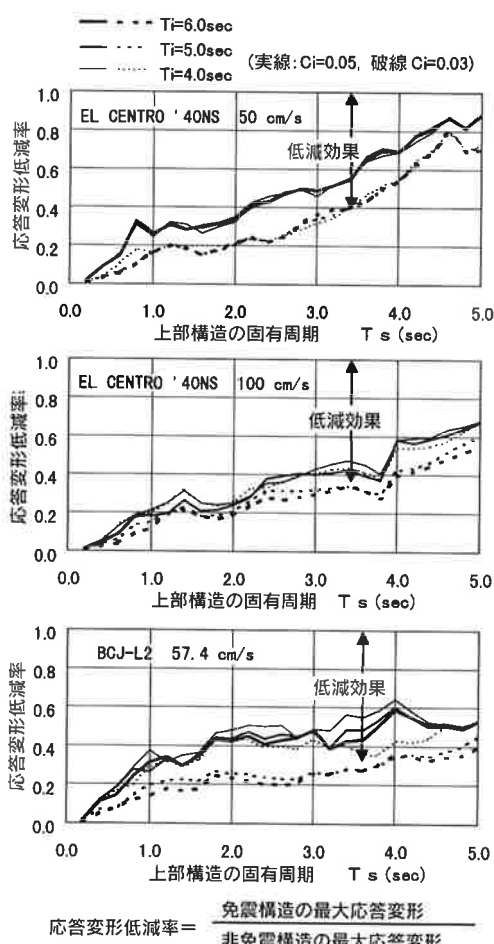


図-14 上部構造の応答変形低減効果

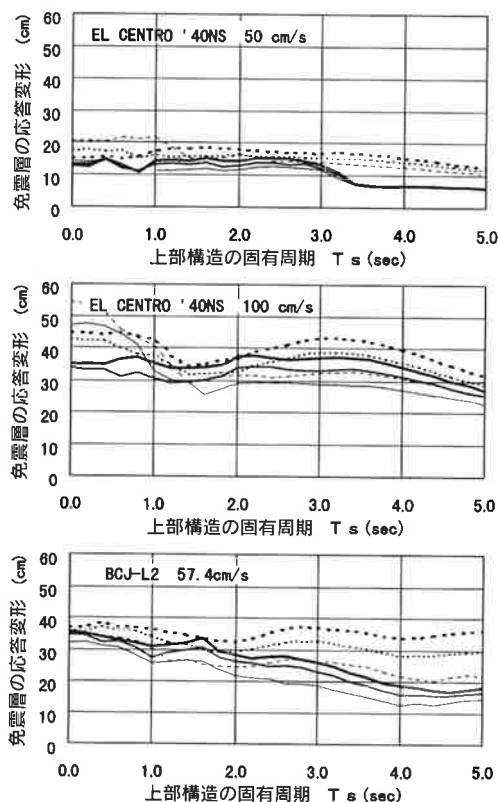


図-15 免震層の応答変形