

既存事務所ビルと灯台レンズの免震レトロフィット

上 寛 樹

被害を伴う内陸地震が毎年のように発生し、また東海地震や東南海・南海地震に代表されるプレート境界型巨大地震の切迫性が高まってきている。このような状況の中、地震被害を完全に防ぐことは困難であるという認識から、被害を最小限に留めて社会の機能停止を回避しようとする「減災」の考えが重要視されるようになってきた。一方、建物への地震入力を低減する「免震」技術の被害抑制・機能維持に対する優れた効果が近年の実地震において証明され、重要施設や共同住宅を中心に普及してきている。

本稿ではこの「免震」技術を用いた耐震改修（免震レトロフィット）について、既存事務所ビルならびに灯台レンズへの適用事例を報告する。

キーワード：建築，耐震改修，免震，積層ゴム，灯台レンズ，金属ローラー，コサインレール

1. 既存事務所ビルの免震レトロフィット

(1) 建物概要

免震レトロフィットを実施した建物は昭和 62 年に村野・森建築事務所により設計され、平成元年に竣工した鉄骨鉄筋コンクリート造の事務所ビルである。原状で昭和 56 年施行の新耐震基準を満足しているが、首都圏での防災拠点として大地震時においても建物機能を維持することを目的に免震化を行った（写真—1）。

建物の地下部分で敷地境界との余裕が無いことから、基礎免震ではなく、1階の柱頭部に免震装置を配置する中間階免震方式を採用し、約 500 人が勤務するビルを供用しながら改修工事を行った。

(2) 構造設計概要

(a) 建物切断位置

免震装置を挿入するための建物切断位置は前述の理由から1階柱頭（1FL + 2750）とした。ただし、両妻面のピロティ柱は原設計の意匠性を損なわないよう配慮し、柱脚（1FL + 1270）に免震装置を配置している。2階外部屋上庭園部分は、梁・スラブを切断したうえで1階の柱（非免震部分）で支持する計画とし、上部免震部分から切り離れた（図—1）。

(b) 性能目標

設計にあたり、耐震性能目標を表—1のように設定した。建物については、レベル2地震時においても無

【建物概要】

建物名称：奥村組東京本社ビル

建築場所：東京都港区芝5-6-1

設計：村野・森建築事務所

竣工：平成元年11月

構造・階数：鉄骨鉄筋コンクリート造，地上9階，地下3階

基準階面積：966.9m²

延床面積：9738.6m²

軒高：GL+33.17m

改修工事工期：平成18年7月末～平成19年5月



写真—1 建物外観（改修後）



図—1 建物切断位置

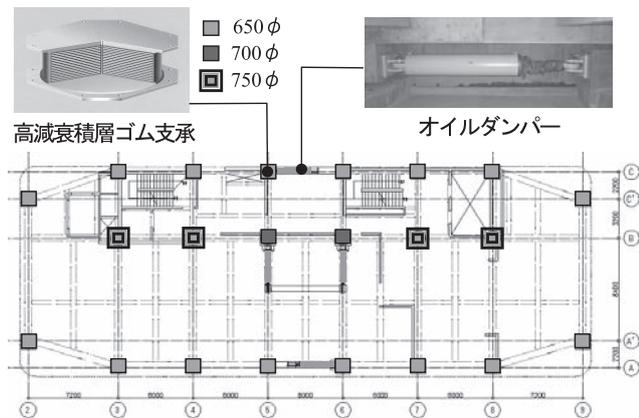
表一 耐震性能目標

入力レベル	レベル 1	レベル 2
	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
建物	短期許容応力度以下	短期許容応力度以下
	層間変形角 1/1000 以下	層間変形角 1/500 以下
積層ゴム	水平変位 16.5 cm 以下	水平変位 33.0 cm 以下

損傷を目標とした。また、免震層の地震時水平変位は、免震対応型エレベーターのレールと1階柱とのクリアランスが35 cm、積層ゴム支承の周囲に配置される耐火被覆材とのクリアランスが34 cmであることから、33 cm以内に抑えることを目標とした。

(c) 免震装置

免震装置の配置を図一2に示す。上部構造を22基の高減衰ゴム系積層ゴム支承により支持することとした。支承のゴム総厚は160 mm、ゴム径はΦ650 mm～Φ750 mmを用い、すべての支承に耐火被覆を施した。また、地震時水平変位を目標値以内に抑えるため、最大減衰力500 kNのオイルダンパーを長辺および短辺方向それぞれ2基ずつ、計4基設置した。



図一2 免震装置の配置

(d) 設計用入力地震動

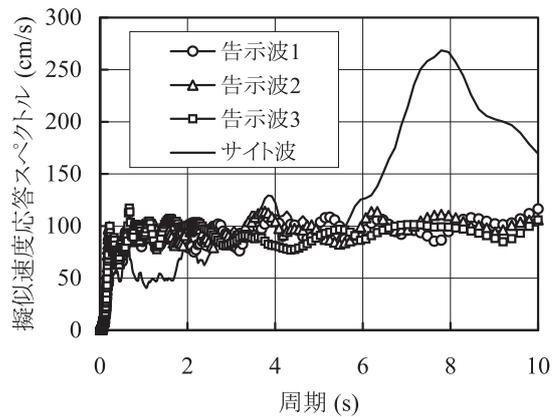
設計用入力地震動は、告示に定められた加速度応答スペクトルに適合し表層地盤による増幅を考慮して作成した告示波を3波、関東地震を想定し経験的グリーン関数法を用いて作成したサイト波、および代表的な観測地震波を3波とした。各入力地震動の最大加速度と最大速度を表一2に示す。

設計用入力地震動の擬似速度応答スペクトル (h = 5%) を図一3に示す。告示波はいずれも速度レベルがほぼ一定で $p_s S_v = 100 \text{ cm/s}$ 程度である。一方、サイト波は8秒付近に $p_s S_v = 250 \text{ cm/s}$ を超える大きなピークを有する長周期地震動である。敷地での常時微

動測定結果や、地震基盤までを対象とした地盤増幅解析においても7～8秒付近にピークが見られるが、この8秒近傍の長周期成分は、関東平野の深い地層構造に起因する特性と考えられる。

表一2 設計用入力地震波と入力レベル

地震波	A: 最大加速度 (cm/s ²)		レベル 1	レベル 2
	V: 最大速度 (cm/s)			
告示波 1 (EL CENTRO NS位相)	A	150	150	674
	V	11.1	11.1	61.4
告示波 2 (HACHINOHE NS位相)	A	135	135	628
	V	12.3	12.3	59.4
告示波 3 (乱數位相)	A	161	161	605
	V	10.4	10.4	54.2
サイト波	A	-	-	412
	V	-	-	60.8
EL CENTRO 1940 NS	A	255	255	511
	V	25	25	50
TAFT 1952 EW	A	248	248	497
	V	25	25	50
HACHINOHE 1968 NS	A	167	167	333
	V	25	25	50



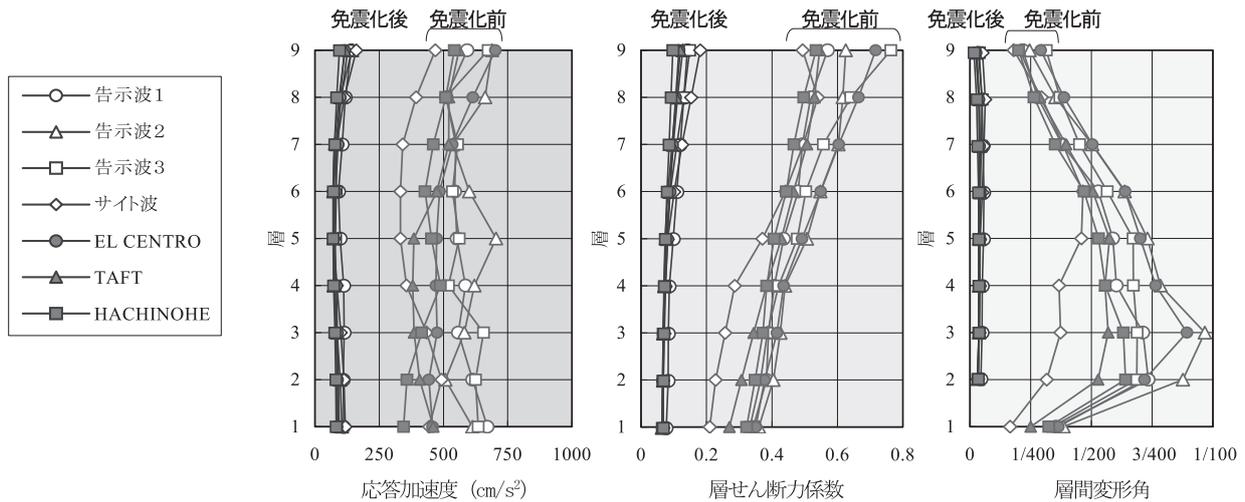
図一3 入力地震動のスペクトル特性

(e) 地震応答解析

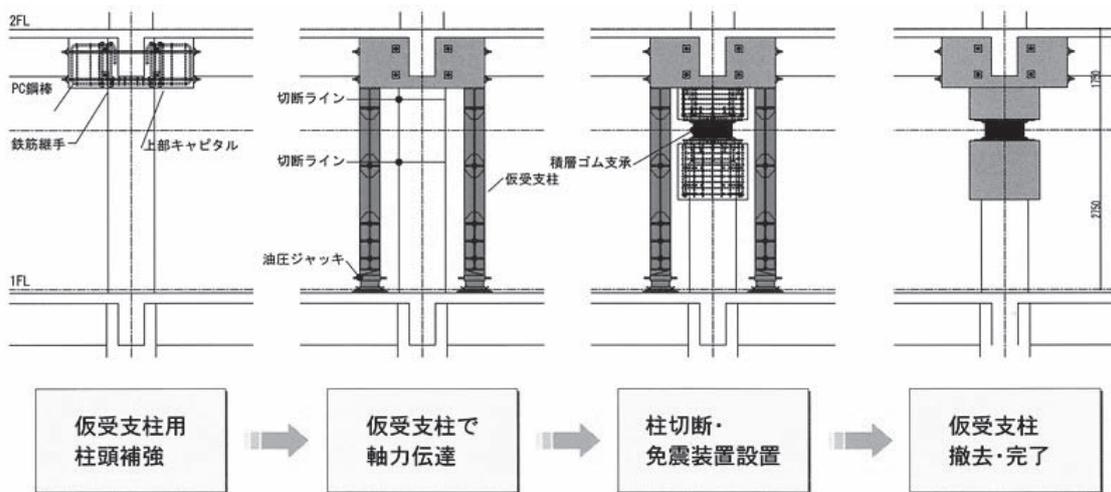
免震化後の建物について設計用入力地震動を用いた応答解析を行った。

解析モデルは、地下に壁が多いため地階を剛体とし、1階の積層ゴム支承に上部構造が支持される基礎固定の9質点等価せん断ばねモデルとした。

レベル2地震時の応答結果を免震化前後で比較したものを図一4に示す。免震化後の最大応答加速度は免震化前の1/5程度、層せん断力係数は1/3程度以下、また最大層間変形角は1/919 (免震装置の最大変位32.6 cm)であり、目標とした1/500 (同33 cm)を下回っている。いずれも性能目標を満たし、大地震時にも建物は損傷せず機能維持可能なことを確認した。



図一四 レベル2地震に対する応答結果



図一五 積層ゴム支承の設置手順

(3) 施工概要

(a) 免震化工事

免震化工事は、1階の施工部分を除いた建物全館を供用しながら実施された。そのため、全工程を2期に分け、来客、在勤者の出入口、使用するエレベーター、および資材の搬入口を確保した。

柱の切断にはワイヤーソーを、壁についてはウォールソーを併用する方式とした。両装置とも一般的に用いられる水冷式ではなく空冷式を採用し、地下階への漏水や漏電事故を防止すると同時に、粉塵や振動・騒音を抑えることで在勤者の執務環境保全に努めた。

積層ゴム支承の設置手順を図一五に示す。まず2階の梁との接合部に仮設柱および積層ゴム支承の架台となるキャピタルを製作する。次に、柱の両脇に仮設柱を配置し、油圧ジャッキにより軸力を作用させた後に柱を切断する。積層ゴム支承を設置し、補強筋を配した後、コンクリートの打設および無収縮モルタルのグ

ラウトを行う。強度発現後に仮設柱を撤去し、積層ゴム支承の周囲に施工期間中の耐震要素となる水平拘束鋼板を取り付ける。この一連の作業を、短辺方向の柱3本を1セットとして順次実施した。

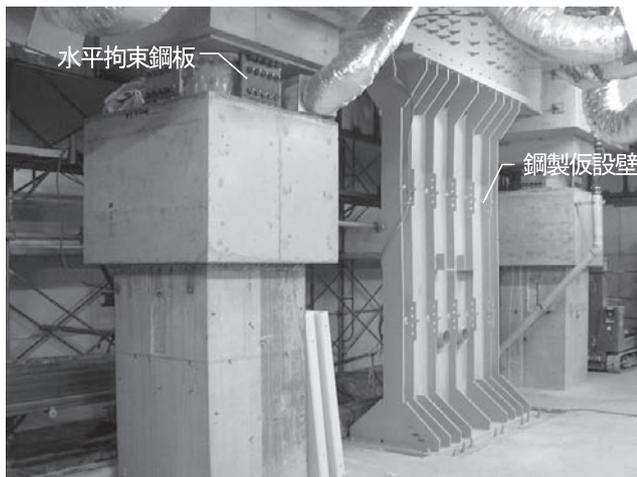
(b) 施工中の耐震安全性

建物を供用しながらの施工のため、施工中も施工前と同等の耐震性を確保するように補強計画を定めた。

施工中の耐震要素としては、切断前の柱と耐震壁、施工を完了した柱、および鋼製仮設壁である。写真一2に示す鋼製仮設壁は、せん断降伏により振動エネルギーを吸収する機能を有している。

レベル2地震動の時刻歴応答解析をもとに、1階に生じる水平力および補強材の必要数量を求めた。施工の進捗に伴うステップ毎に応力解析を行い、どの状態においても、柱が脆性破壊することなく支持力を失わないことを確認した。

本改修工事は約10ヶ月の工期で平成19年5月に完



写真一2 積層ゴムの水平拘束鋼板と鋼製仮設壁



写真一3 積層ゴムが設置された柱

了した。免震レトロフィットの実施例として、建物各部において免震化によるディテールが視認できるよう配慮されている（写真一3）。

2. 灯台レンズの免震レトロフィット

(1) 灯台レンズについて

我が国の灯台の多くは明治・大正期に建設され、現在も航路標識として海の安全を守る重要施設であると同時に、歴史的建造物としての価値も高い。灯塔本体はRC造もしくは石造で、その頂部に水銀の浮力を利用した回転機器で支持された灯台レンズが設置されている（写真一4、5）。レンズ径の大きいものから順に1等～6等に分類されるが、このレンズは現代の技術でも製作が難しく、それ自体が高度な工芸品ともいえる価値がある。しかし、現状では耐震性に問題があるうえ、老朽化が進んでいることから、早急な地震対策が必要となった。地震対策として、灯塔本体は耐震補強を施し、レンズと回転機器を免震化することが計画された。

(2) 灯台レンズ免震レトロフィットの概要（図一6）

(a) 要求性能

レンズと回転機器は大重量かつ高重心（1等レンズでは重量9tf、高さ6m）であり、灯塔の頂部に設置されるために地震動が増幅される上、設置スペースも狭く、免震化において技術的難易度が非常に高い。要求性能として、震度6程度の大地震に対して以下の条件が課せられた。

- ・レンズおよび回転機器の損傷防止と機能維持、および回転機器内水銀の飛散防止

（レンズの揺れの加速度が 200 cm/s^2 以下）

- ・作動時の最大水平変位 $\pm 30 \text{ cm}$ 以内

これらを達成するため、金属ローラーと粘性ダンパーを組み合わせた「コサイン・レール支承」を開発した。

(b) コサイン・レール支承の機構

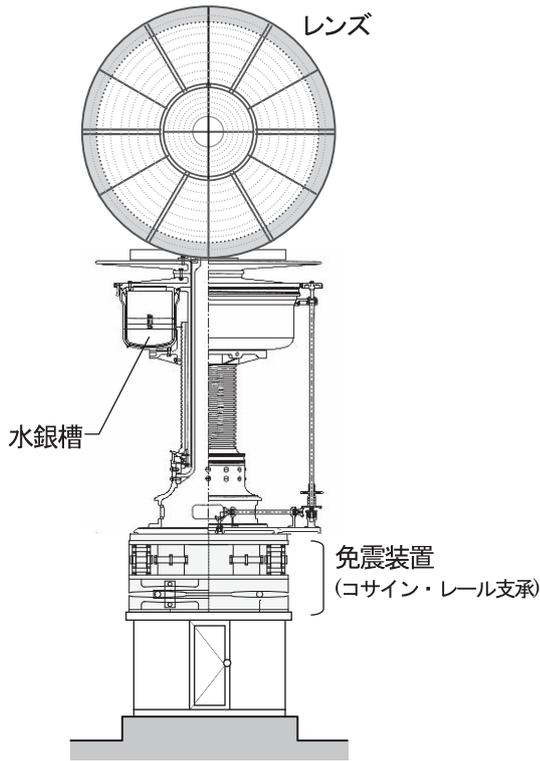
図一7にコサイン・レール支承の機構模式図を示す。「ころ」の役割をする金属ローラーをレールの上に乗せ、これを直交方向に2段重ねとすることで、どの方向に対しても作動する構造となっている。またレール



写真一4 灯台（金華山：2等）



写真一5 灯台レンズ（3等）



図一六 灯台レンズの免震レトロフィット

の形状をコサインカーブとすることにより特定の周期を持たないため、どのような地震の揺れに対しても共振することがなく、優れた免震効果を発揮する。ローラーの上下にコサイン・レールを配することによりレール長さが免震装置変位の1/2で済むため、装置のコンパクト化が可能となっている。

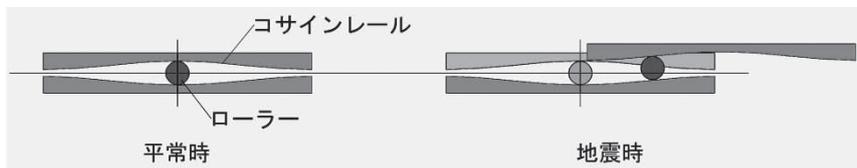
(c) 振動台試験による性能確認

コサイン・レール支承の性能を確認する目的で振動台試験を行った。振動台への入力地震波は、設計時の地震応答解析で得られた灯台レンズ設置位置床（灯室床）での応答加速度波形としている。

図一八は、犬吠埼灯台（1等レンズ）用免震装置に、実際のレンズ・機器と同じ9tfの錘を載せて実施した振動台試験結果の一例である。錘の重心位置は実情に合わせた高さに設定している。地震の揺れによる加速度は灯室床で1440 cm/s²であるのに対し、レンズ上では112 cm/s²と約1/13に低減されている。また最大変位は14 cmであり、要求性能を十分満足している。

(d) 灯台レンズ免震レトロフィットの状況

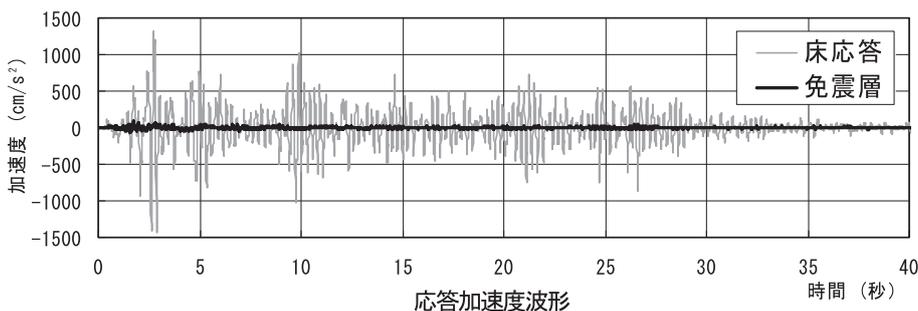
大型レンズを有する灯台は全国に250基あるが、現在主に1～4等レンズの改修が進められており、37ヶ所の灯台レンズの免震化が完了している(図一九)。



図一七 コサイン・レール支承の機構模式図

最大値一覧

入力地震動名	EL CENTRO 1940 NS
入力地震動 最大加速度	511 cm/s ²
灯室床応答 (振動台入力)	1440 cm/s ²
免震装置上 最大応答加速度	112 cm/s ²
免震装置 最大応答変位	14.0 cm



図一八 犬吠埼灯台用免震装置の振動台試験結果の一例



振動台試験実施状況



防震装置設置状況 (水の子島：3等)



図一 9 防震化が完了した灯台 (○囲み数字はレンズの等級を示す)

3. おわりに

ストック活用や建物長寿命化への取り組みが叫ばれ、建物の長期供用が推進されている。すなわち供用期間中に大地震に遭遇する確率も増すことになる。防震技術は、その優れた耐震安全性と共に、ライフサイクルコストの観点からも有効な構法であり、今後の更なる普及が望まれる。



[筆者紹介]
 上 寛樹 (うえ ひろき)
 ㈱奥村組
 建設本部建築事業部建築部
 技術支援グループ
 課長代理