

# ビルをぶら下げる「塔頂免震構造」の開発

中 村 豊

塔頂免震構造は、吊り構造による「やじろべえ型」の免震構造であり、建物中央コアシャフト上部に積層ゴムを傾斜2段配置し、居室部分を吊り下げる仕組みの構造である。鋼材とコンクリートの持つ材料特性を活かしながら、自由度のある建築空間を実現すると共に、長周期の免震構造を可能にする。当社技術研究所・安全安震館（以下「本免震構造館」という）は、塔頂免震構造を初めて採用した地上4階の建物である。リフトアップ工法を利用して施工され、2011年東北地方太平洋沖地震における観測結果からその免震効果を実証している。

キーワード：免震、吊り構造、積層ゴム、やじろべえ、リフトアップ、2011年東北地方太平洋沖地震

## 1. はじめに

塔頂免震構造は、高橋駮一（第一工房代表）、和田章（東京工業大学教授・現名誉教授）、竹内徹（東京工業大学教授）、彦根茂（Arup Japan 代表）との共同研究グループにより開発された「吊り構造による『やじろべえ型』の免震構造」である。建物中央のコアシャフト部には圧縮に強いコンクリートを用い、頂部から吊り下げられる居室には引張りに強い鋼材を用いて、それぞれの材料特性を最大限に活かしつつ、長周期の免震構造を実現可能にしている。

ここでは、塔頂免震構造のしくみとその特長について述べた後、塔頂免震構造により建てられた地上4階の建物を紹介する。また、2011年東北地方太平洋沖地震における観測結果を示す。

## 2. 塔頂免震構造のしくみ

塔頂免震構造は、「吊り構造による『やじろべえ型』の免震構造」により、高い耐震安全性を確保しながら、広く自由度のある建築空間を実現することを可能にする。建物中央のコンクリートのコアシャフトの上部に免震装置を設置して、その上に組まれたハットトラス等から居室部分を吊り下げる構造である（図-1）。塔頂免震構造を、高さ100m、21階建のセンターコア形式オフィスビルに適用した場合の断面・平面を図-2に示す。塔頂免震構造の最大の特徴は、コアシャフトの上部に設置される免震装置にある。

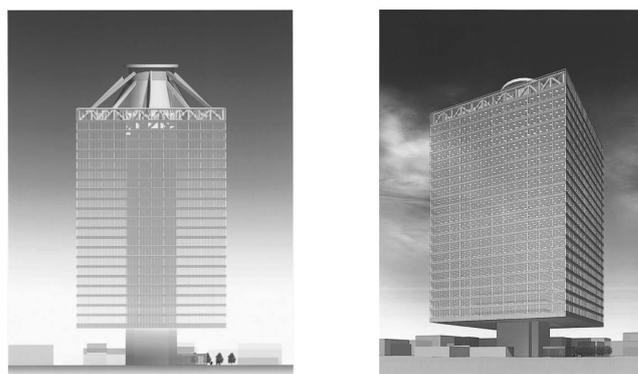


図-1 塔頂免震構造の構想

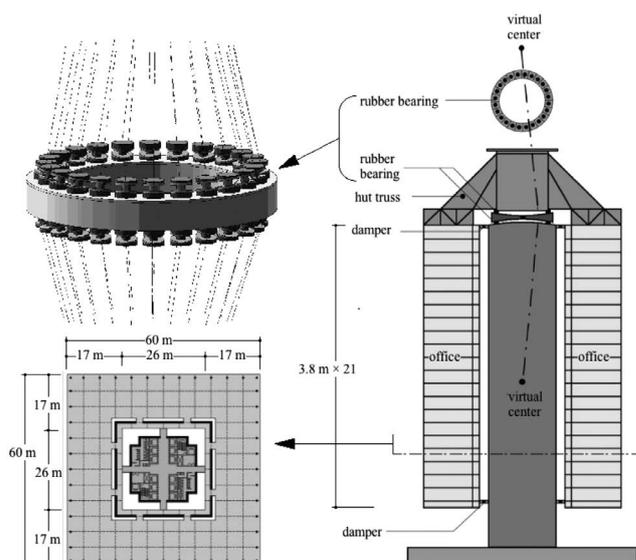
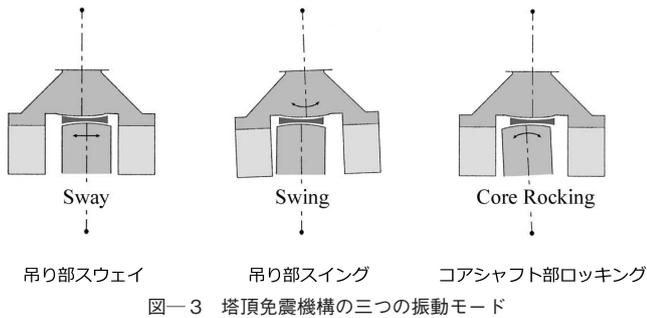


図-2 塔頂免震構造による高層事務所ビルの概要



免震装置部の積層ゴムは、仮想中心に向けて傾斜を持たせて球面状に2段に配置される。上段に傾斜配置される積層ゴムは上部に仮想の回転中心を持ち、下段の積層ゴムは下部に仮想の回転中心を有する（図一2）。この免震機構によって、オフィス吊り部のスウェイとスイング、コアシャフト部のロックキングの3つの振動モードの相対変位を絶縁することが可能になる（図一3）。また、積層ゴムの傾斜角を変えることで、回転半径が変わり、容易に免震周期を調整することができる。図一2に示すビルの場合、周期を10秒以上に伸ばすことができる。

### 3. 塔頂免震構造の特長

塔頂免震構造は、以下の特長を有している。

- 1) 地上面の開放：地上面に接するのはコアシャフトのみで、設置面積を建築面積の1/10程度にできるため、残りの地上面を公共空地や交通などの用途に利用できる。
- 2) 居室部分のフレキシビリティ：建物外周はケー

ブルによる吊り構造であるため、広い無柱空間が確保される。

- 3) 多機能なエコシャフト：コアシャフトと居室部分の間の吹抜部を通風、採光、メンテナンス等に活用できる。
- 4) 建物群への適用：周期の異なる建物同士を連結することで、地震時の揺れを更に小さく抑えられることから、建物群としてより安全性の高い都市区域を創出できる。

### 4. 安全安震館の設計と施工

本免震構造館（写真一1）は、塔頂免震構造を初め



写真一1 本免震構造館

表一1 本免震構造館の建物概要

所在地、建築主	東京都江東区越中島3-4-17、建築主：清水建設
設計・管理	高橋航一（第一工房）／SFS・21 + 清水建設
施工者、施工期間	清水建設、2006年3月～2006年12月
主要用途、階数	事務所・電算室、地上4階・塔屋1階
建築面積、構造	75.60 m <sup>2</sup> 、塔頂免震構造：鉄筋コンクリート造 + 鉄骨造、杭基礎
床面積	延床面積 213.65 m <sup>2</sup> 、1階：9.05 m <sup>2</sup> 、2階～4階：66.15 m <sup>2</sup> 、屋上階：6.15 m <sup>2</sup>
軒高、階高	13.95 m、1階：4.15 m、2階～4階：3.0 m（最高高さ：18.75 m）
コアシャフト部	鉄筋コンクリート造（壁厚 200 mm）、吊り部とのクリアランス：400 mm
オフィス吊り部	鉄骨造（総重量 180 ton）、吊材：高張力ロッド（直径 42 mm）
積層ゴム	4台×2段傾斜配置（計8台） 直径 30 cm、鋼板厚 1.2 mm × 45層、ゴム厚 2.1 mm × 46層、 形状係数 S1 = 35.7、S2 = 3.11、性能保証変形 16.15 cm（ $\gamma = 1.672$ ）、 せん断弾性率 G = 0.294 N/mm <sup>2</sup> 、水平剛性 215 kN/m、 傾斜角：下段 9.9度（回転半径 9.5 m）、上段 6.6度（回転半径 14.25 m）
オイルダンパー	ロック機構付き、屋上階：X・Y方向 各4台、2階：X・Y方向 各2台 減衰係数 50 kN・sec/m、最大減衰力 50 kN、ストローク ± 36 cm
1次固有周期	X方向：5.08 sec、Y方向：5.14 sec

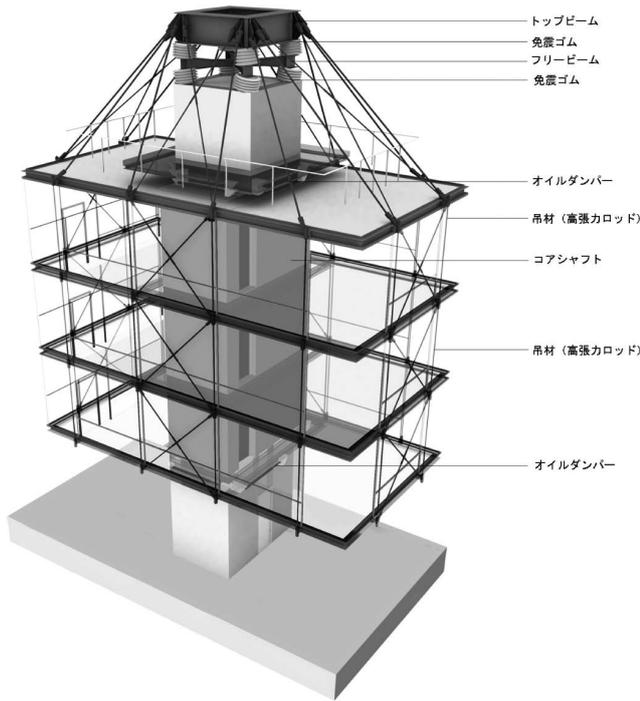


図-4 構造パース

て採用した鉄筋コンクリート造のコアシャフト部と鉄骨造のオフィス吊り部からなる地上4階の建物である。表-1に建物概要、図-4に構造パースを示す。構造計画上の留意点は、吊り構造となるシンプルな架構をそのままデザインとして見せ、架構全体が力学的な合理性と優れた意匠を有し、鋼材とコンクリートの持つ材料特性を最大限に活かすことであった。

建物中央のコアシャフト部の頂部に積層ゴムによる免震装置部を設置し、その上段（トップビーム）から鋼製ロッドにより3層のオフィス部を吊り下げている。吊り材・ブレース材には引張強度  $690 \text{ N/mm}^2$ 、 $740 \text{ N/mm}^2$  の高張力鋼ロッドを使用し、スリムな断面を実現している。免震装置部は、天然系積層ゴムをコアシャフト頂部の四隅に傾斜2段配置している（写真-2、図-5）。コアシャフト部とオフィス吊り部の間には、減衰付加機構としてロック機構付きオイル



写真-2 コアシャフト頂部の免震装置（積層ゴム4台×2段）

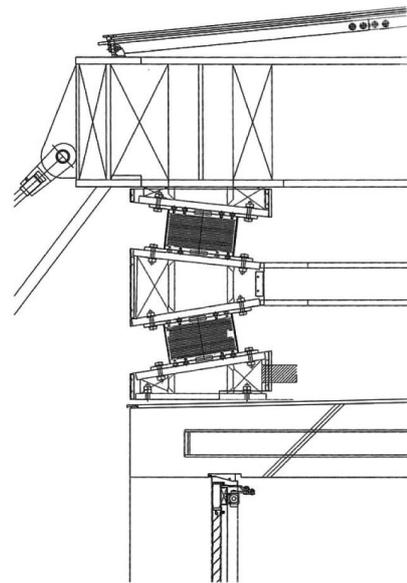


図-5 積層ゴムの2段傾斜配置

ダンパーが配置されている（図-4）。

施工法についてはより大規模な建物に適用する場合を考慮して、リフトアップ工法を採用した。トップビームから斜材ロッドにて吊られる屋上階床スラブを第1ステップとしてリフトアップを行い（写真-3、図-6）、第2ステップとして4階から2階までの床スラブ3層のリフトアップを行った（写真-4）。

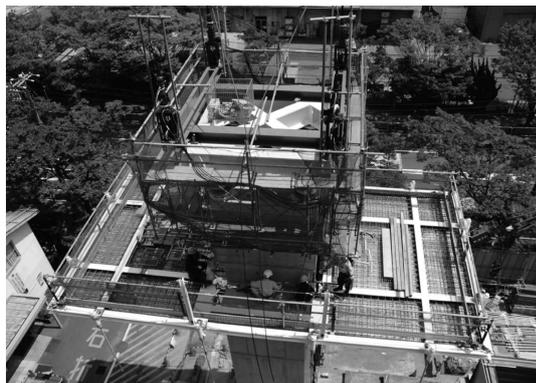


写真-3 リフトアップ工法による屋上階床スラブの施工



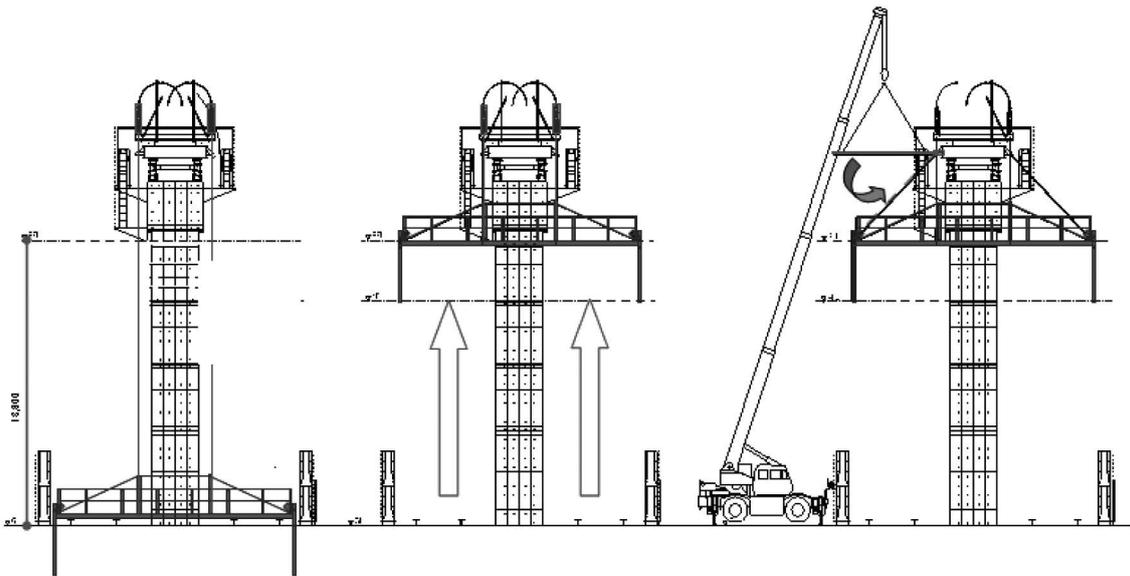


図-6 リフトアップ工法の手順



写真-4 リフトアップ工法による2階～4階床スラブの施工

### 5. 2011年東北地方太平洋沖地震の観測結果

地震観測は1階（基礎）、コアシャフト頂部、免震層の中段（フリービーム）と上段（トップビーム）、オフィス屋上階、オフィス2階に地震計を、2階のオフィスとコアシャフト部の間に変位計を設置して行っている。2011年東北地方太平洋沖地震における最大加速度値を図-7に示す。地表に比べ、オフィス2階の加速度はX方向で53%、Y方向で32%に低減されている。変位計から得られた2階のオフィスとコアシャフト部の相対変位の最大振幅は約8cmであった。

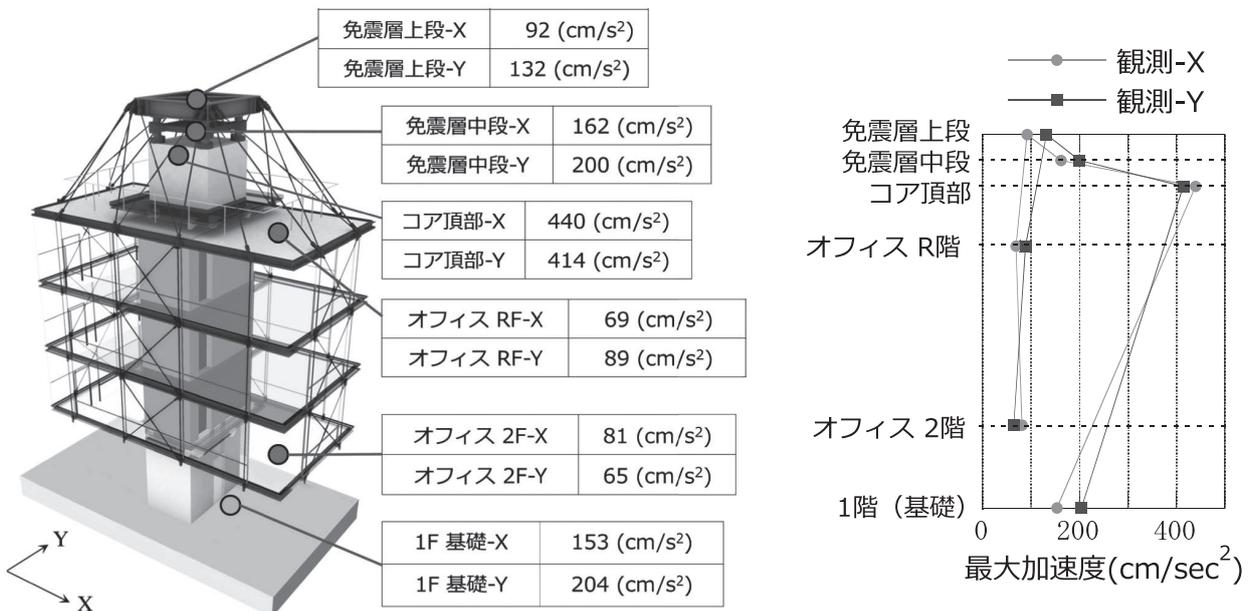


図-7 2011年東北太平洋沖地震における地震観測結果

## 6. おわりに

塔頂免震構造は、「吊り構造による『やじろべえ型』の免震構造」により、広く自由度のある建築空間と免震構造による高い耐震性能を実現している。コアシャフト頂部に設置する免震機構は、傾斜2段配置された積層ゴムから成り、吊り部とコアシャフト部の相対変形を絶縁する。この積層ゴムの傾斜角を変えることで長周期の免震構造を可能にする。本免震構造館、清水建設技術研究所・安全安震館は、塔頂免震構造を初めて採用した地上4階の建物である。2006年にリフトアップ工法を利用して施工され、2011年東北地方太平洋沖地震における観測結果から、吊り部において地表加速度が半分以下に低減されていることが実証された。

塔頂免震構造では、地上面に接するのはコアシャフトのみで、設置面積を建築面積の1/10程度にできるため、残りの地上面を公園、緑地、公共空地などの用途に利用できる。塔頂免震構造による建物同士を連結し、建物群としてより安全性の高い都市区域の創出も可能にしている（図—8）。



図—8 塔頂免震構造を用いた建物群

### 《参考文献》

- 1) 高橋他, 「やじろべえ型免震構造 (SFS21) の研究 (その1~4)」, 日本建築学会大会梗概集, 599-606 ページ, 2000年9月
- 2) 猿田他, 「やじろべえ型免震構造 (SFS21) の研究 (その5~7)」, 日本建築学会大会梗概集, 585-590 ページ, 2002年8月
- 3) 堀他, 「やじろべえ型免震構造 (SFS21) の開発」, 日本建築学会技術報告集, 第17号, 107-112 ページ, 2003年6月
- 4) 「清水建設技術研究会安全安震館」, GA JAPAN 85, 2007年3月, 132-139 ページ, ADA エディタトーキョー
- 5) 「やじろべえ免震の実現 清水建設技術研究所 安全安震館」, 建築技術, 2007年5月号, 74-83 ページ, 建築技術
- 6) 「やじろべえ」に関わる四つのディテール 清水建設技術研究所 安全安震館」, ディテール 173号, 2007年7月, 10-15 ページ, 彰国社
- 7) 「清水建設技術研究所 安全安震館」, 新建築, 2007年3月号, 102-109 ページ, 新建築社
- 8) 「テクノロジーの眼 震動を制御する振り子」, 建築雑誌 JABS, 2008年2月号, Vol. 123, No. 1571, 42-43 ページ, 日本建築学会
- 9) Y. Nakamura et al. "Development of the core-suspended isolation system", Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- 10) Y. Nakamura, M. Saruta, A. Wada, T. Takeuchi, S. Hikone and T. Takahashi, "Development of the core-suspended isolation system", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 40, No. 4, pp.429-447, 2011.
- 11) Y. Nakamura, T. Hanzawa, M. Hasebe, K. Okada, M. Kaneko and M. Saruta, "Report on the effects of seismic isolation methods from the 2011 Tohoku-Pacific Earthquake", Seismic Isolation and Protection Systems, Vol. 2, No. 1, pp.57-74, 2011.
- 12) 猿田正明, 岡田敬一, 中村豊, 長谷部雅伸, 「2011年東北地方太平洋沖地震における免震建物の応答」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 629-630 ページ, 2011年8月

### 【筆者紹介】

中村 豊 (なかむら ゆたか)  
清水建設技術研究所  
上席研究員

