

通天閣免震レトロフィット



西崎 隆氏
竹中工務店



松原 由典
同



山田 晃平
同



鴨下 直登
同

1 はじめに

大阪市の浪速区、新世界に位置する通天閣は現在2代目である。初代通天閣（写真1）が戦時中に火災焼失した後、戦後復興のシンボルとして1956年に再建された。登録有形文化財にも指定され、景気の変動を受けながらも、現在では年間入場者数100万人を超える、名実ともに大阪のシンボルとして地域に深く根ざしている。

耐震改修の契機となったのは、「通天閣は1995年の阪神大震災では大きな損傷は発生しなかったが、今後発生が予想される南海・東南海地震レベルのものに対しては、塔頂部を中心に大きな損傷を受ける可能性がある」とする、大阪大学宮本裕司教授の指摘によるものであった。

改修工事は最先端の技術を駆使しながら、今あるものを次の世代に継承すると同時に、集客施設としての更なる魅力向上も目的として、以下の目標を設定した。

- ①外観を変えずに耐震性能を確保
- ②通常営業しながらの工事の実施
- ③初代通天閣の天井画復刻

これらの課題を解決するため、世界初の試みとなる、鉄塔建造物の中間層免震構造による耐震改修工事を行った。次節以降に免震構造を採用した経緯および設計概要について報告する。

2 建築概要

通天閣は図1に示すとおり高さ100mの鉄骨造のタワーであり、タワー塔・EV塔とそれらをつなぐ渡り廊下により構成される。タワー塔の中央部には、エレベーターシャフトと階段室を有する。建築概要を示す。



(a) 初代



(b) 2代目(改修前)

写真1 歴代通天閣外観

【建築概要】

所在地：大阪市浪速区恵美須1丁目-18-6
設計：内藤多伸・株式会社竹中工務店
(1955年)

施工：株式会社奥村組 (1956年)

建築／延床面積：881m²／3,063m²

階数：地下1階、地上6階

構造種別：地下RC・地上S造

(基壇部RC被覆あり)

改修工事設計・施工：株式会社竹中工務店

構造形式：中間層免震構造

免震材料：天然ゴム系積層ゴム支承

(□-900×4基)

弾性すべり支承 (□-300×2基)

速度比例型ダンパー (1,000kN×4基)

3 改修計画概要

耐震改修工法を決定する際に、耐震・制震・免震の3つの工法を比較した(図2)。耐震補強や制震改修では、既存部材の入れ替えによる大断面化や制震ダンパーの追加により外観が変化してしまうのと同時に、高所作業が必要となる。これらの課題に対し、免震改修では基壇部のみでの改修工事となり、タワー棟には手を加える必要がなくなる。地震時もタワー全体がゆっくりと揺れるため、来館者に対して3つの構法の中では最も安心感を与えられられる。これらのことから、高さ100mの鉄塔建造物に対する免震改修に挑戦することとなった。

4 構造計画概要

4.1 免震層レベルの設定

免震層のレベルを決定する上で重要となったのは来観者動線をいかに避けるかという点である。来観者は図1の矢印に示すとおり、地階からEV塔でH4層まで上り、渡り廊下を通過して下部展望室に進入し、展望EVにより上部展望室までを往復する。工事中における地下店舗および展望室の通常営業に与える影響が小さくなるよう、来観者動線との交錯が最も少ないH2層にエキスパンション・ジョイント(以下、「Exp. J.」)を設ける中間層免震構造を採用した。Exp. J.ラインを図1に破線で示す。

4.2 免震構造概要

免震改修概要を図3に示す。基壇部にコンクリート基礎および鉄骨梁を新設し、免震層の上下それぞれで応力が閉じるように補強することで架構の安定化を図っている。免震デバイスは、天然ゴム系積層ゴム□-900×900(写真2)および速度比例型のオイルダンパー(最大減衰力1,000kN)を基壇部の4隅のトラス柱に設置した。オイルダンパーには電磁ロック機構およびジャッキ機構を有した「ジャッキ&ロックダンパー®」(写真3)を採用している。地震時に通常のオイルダンパーとして機能するだけでなく、平常時はダンパーにロックが掛かっているため、強風による変形を抑えることが出来る。また、地下室に設置した加速度センサーにより、地震発生時には瞬時にロックが解放される仕組みとなっている。これにより、通天閣のように高い塔状の建物においても風に対しては耐震構造と同等に揺れを抑えつつ、地震に対しては免震構造として、地震力を効果的に低減させることを可能とした。

渡り廊下部分のExp. J.には、地上約18m地点での最大水平変位540mmに安全に追従させるために、鉄道の

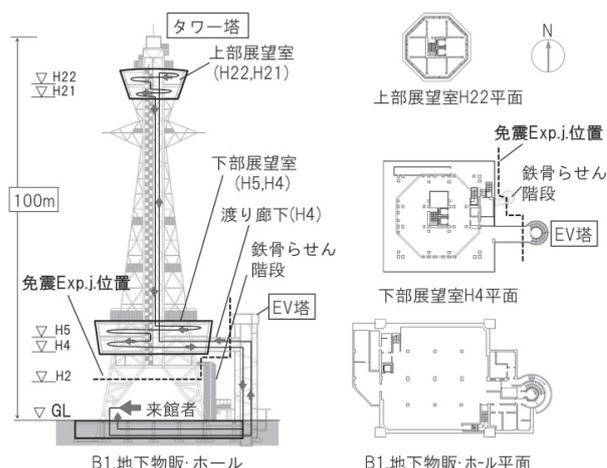


図1 建物構成(改修前)および来場者動線

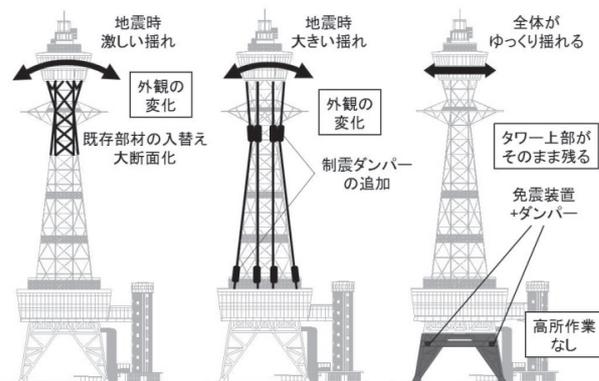


図2 耐震改修工法の選定

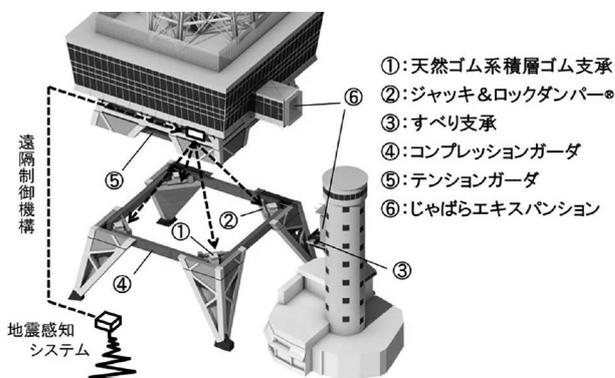


図3 免震改修概要



写真2 積層ゴム



写真3 ジャッキ&ロックダンパー®

車輛連結部に使用されている「じゃばら」を採用した(写真4)。このじゃばらエキスパンションは路面電車をイメージした渡り廊下の内装から着想を得ている(写真5)。

5 施工手順

通天閣は公園や港湾施設用のように広い敷地に建つ他のタワーとは異なり、公道を跨いで建っている。隣地には住宅や商店が密集し、常に多くの観光客が集まって来る。免震化工事では建物の重量を支えている柱を切断して、免震ゴムで置き換えることになる。100mの鉄塔をいかに安全に免震構造に切り換えるかが最大の課題であった。この解決方法として、図4に示す施工手順を採用した。ポイントは既存躯体を存置したまま免震構造用新設躯体の構築を先行して完了させた後に、既存柱の切断を行うこととした点である。工事は来館者、一般市民との接触がないように、公道上空約8mの位置に全面構台を設けた(写真6)。これにより、工事期間中も平常通りの営業を行うことができた。また、同時に天井画復刻のための足場としても利用可能となった。



写真4 ジャバラエキスパンション



写真5 渡り廊下内装



写真6 全面構台

6 設計目標値と応答結果

地震応答解析に対する設計目標値および結果を表1に示す。目標値はレベル1(稀に発生する地震動レベル)およびレベル2(極めて稀に発生する地震動レベル)の2つに対して設定した。部材応力はレベル1・レベル2地震動共に、短期許容応力度以内としている。免震層の水平変位はレベル1地震時が300mm未満に、レベル2地震時には積層ゴムのせん断ひずみ270%に相当する540mm未満に設定した。地震応答解析の結果は各設計目標値を満足している。なお、建物の固有周期は免震改修により、1.58

秒から4.68秒となった。また、レベル3の参考波として、(社)日本建築構造技術者協会関西支部「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会」により提示された上町断層帯地震に対する建築設計用地震動から、レベル3A¹⁾の地震動の検討を行った。その結果、免震層最大水平変位は523mmとなり、レベル2地震動の設計目標値540mm以下に収まる結果となっている。これらのことより今回の免震改修で必要な免震性能が得られていることを確認した。

施工手順

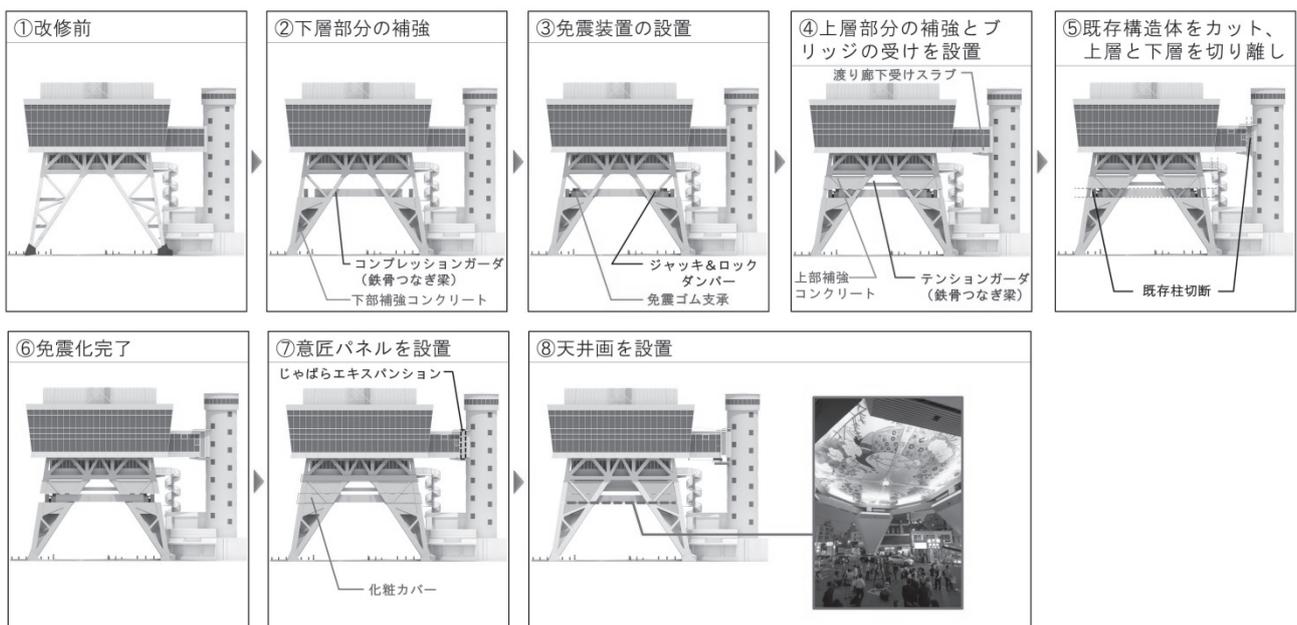


図4 施工手順

表1 耐震性能の目標値および検証結果（告示波位相）

地震動の概要	レベル1： 稀に発生する地震動		レベル2： 極めて稀に発生する地震動		
	目標値	結果	目標値	結果	
最大層間変形角	—	0.74×10 ⁻³ rad	—	4.75×10 ⁻³ rad	
部材応力	層せん断力によって生じる斜材の軸力が短期許容応力以下	目標値を満足	層せん断力によって生じる斜材の軸力が短期許容応力以下	目標値を満足	
	転倒モーメントによって生じる軸材の軸力が座屈を考慮した短期許容応力以下		転倒モーメントによって生じる軸材の軸力が座屈を考慮した短期許容応力以下		
水平移動量	300mm 以下	60.9mm	レベル2 に対して 540mm 以下	456.9mm	
積層ゴム 支承	圧縮 面圧	積層ゴム支承ひずみに対応する 圧縮限界強度×0.9×2/3 以下	目標値を満足 最大 12.36N/mm ²	積層ゴム支承ひずみに対応する 圧縮限界強度×0.9 以下	目標値を満足 最大 17.72N/mm ²
	引張 面圧	生じない	(圧縮) 最小 11.32N/mm ²	1N/mm ² 以下	(圧縮) 4.95N/mm ²

7 初代天井画の復刻

1912年に建設された初代通天閣のエントランスには写真7のように天井画が飾られていた。改修前の2代目通天閣にその天井画が引き継がれることはなかったが、今回の免震改修工事に併せて72年ぶりの復刻となった。復刻工事そのものは全面構台の上空で行われた。構台の解体と共に姿を現した色鮮やかな天井画は（写真8）、近隣住民を含め、多くの人に驚きと共に暖かく迎え入れられた。今では新たな撮影スポットとして、連日通天閣を訪れる多くの観光客の目を楽しませている。



写真7 初代通天閣天井画

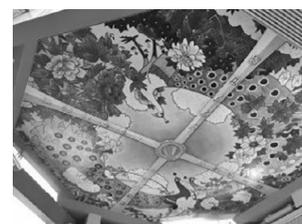


写真8 復刻天井画

8 おわりに

歴史的な外観の維持、工事中の営業継続という課題を克服しつつ、これまでは制振が良いと考えられていた鉄塔建築物に対して、免震構造を採用することの可能性を示すことができた。基壇部に設けた免震デバイスは、通天閣をくぐる公道上からも容易に見ることができ、免震構造であることをアピールしている（写真10）。復刻された天井画と相まって、観光客の撮影スポットとなっており、国内外を問わず多くの人々の記憶と記録に残るものとなった。

大阪ランドマーク 通天閣は、免震構造の可能性、そして日本の免震技術を広く世界中の人々に示し続けるであろう。



(a) 改修前



(b) 改修後

写真9 通天閣の外観



写真10 天井画と免震デバイス

- 1) 「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015」より、上町断層帯地震の発生シナリオ35ケース、および生駒断層帯地震の発生シナリオ16ケースの平均的なレベルに相当する設計用入力地震動として想定する基準のレベル