

高さ180mのタワー建造物を対象とした柱脚免震化工法の開発

名古屋支店

生産統括部 技術部門 下野耕一

1. 序論

1.1 開発の背景

名古屋テレビ塔は、日本初の集約電波塔として1954年に当社が施工した最高高さ180mのタワー建造物である。名古屋市栄地区の中心を南北に縦断する久屋大通公園内に立地し、古くから名古屋のシンボルとして親しまれている。東京タワーの設計で知られる内藤多仲博士が手掛けた最初のタワー建造物であり、2005年に国の登録有形文化財にも指定されている。2011年アナログ放送終了により電波塔の役割を終え、展望台やレストラン等の観光施設として活用されてきた。この度、久屋大通り一帯の整備化の中心を担う観光タワーとしてリニューアルするにあたり、来る南海トラフ地震の想定震度6強にも耐えるよう、現状の耐震性能5弱から大幅に構造安全性を高めるべく免震改修を実施することになった。(図-1)

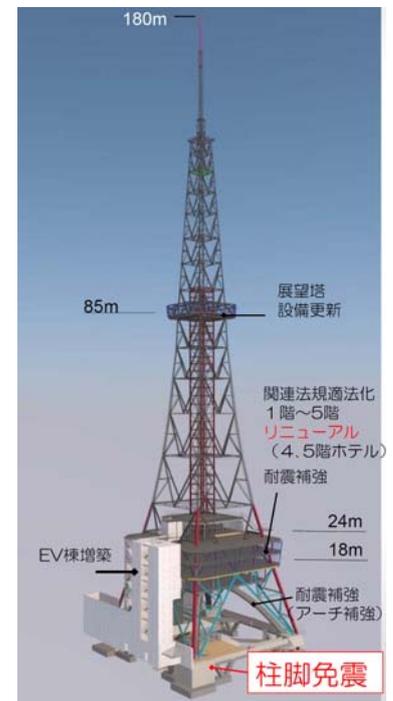


図-1 本改修工事の概要

1.2 本報告の概要

本免震改修では2014年に大阪の通天閣で採用の中間階免震(図-2)が構造的な制約により採用不可となったため、基礎免震を採用することになった。但し、部分的に地下が存在するため、可動部を最小限とするよう柱脚基礎の中段を免震化する。通常の基礎免震化と区別するために本工法を「柱脚免震化工法」と称する。尚、塔体下部のトラス柱が傾斜するタワー構造の柱脚部には常時外側へ広がろうとする力(以下、スラスト)が生じる。よって、本工法では通常の間階免震改修と異なりスラストを考慮した施工計画が重要なポイントとなる。(図-3) その難易度の高い課題を解決するために、他社(株式会社)による原設計に対し、約1年半以上にわたり粘り強く合理化提案と協議を重ね世界初となるタワー建造物の柱脚免震化工法を確立するに至った。本開発の要となる安全なスラスト移行を検証するための施工時解析手法の工夫、ならびに生産性向上やコスト低減に大きな効果を発揮した構造部材や納まりの合理化を以下に報告する。

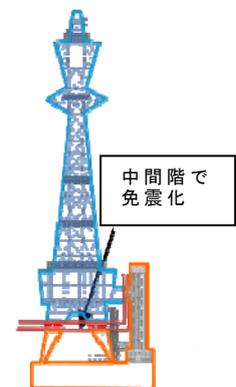


図-2 通天閣中間階免震

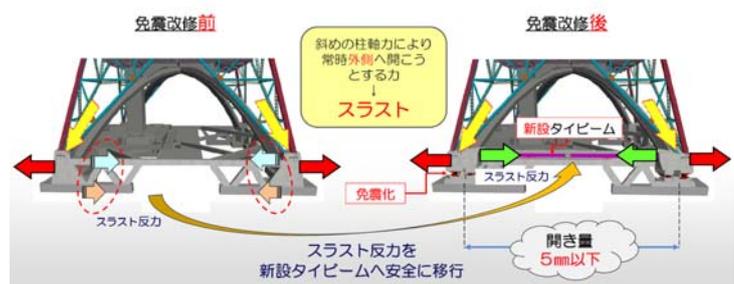


図-3 スラスト反力の移行と開き量の制約

2. 本論

2.1 免震改修工事の概要

工事名称：名古屋テレビ塔全体改修工事
 建築地：名古屋市中区錦3丁目
 建築主：名古屋テレビ塔株式会社
 設計：(株)日建設計
 施工：(株)竹中工務店
 建物用途：旧電波塔、観光塔、宿泊
 構造：S造、SRC造
 規模：最高高さ180m 延面積約3,600m²
 改修工期：2019.2.1～2020.6.30

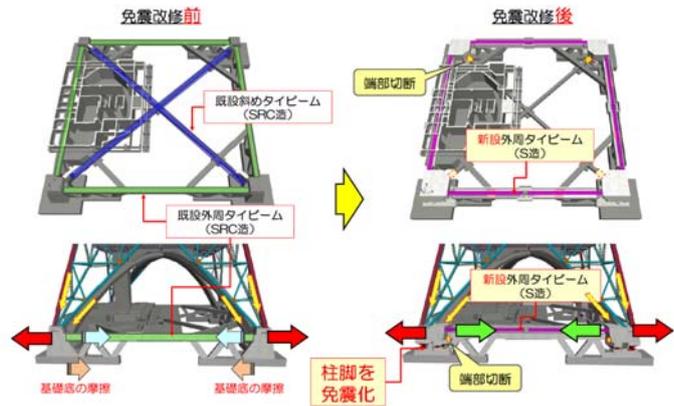


図-4 柱脚免震化の概要

柱脚免震化の概要を図-4に示す。改修前は外周と斜めの既設タイビームと地盤摩擦がスラストに抵抗する。一方、改修後は柱脚部の中段部を免震化するため地盤側の既設タイビームと縁を切り、新たなスラスト抵抗部材として、既設外周タイビーム直上にS造タイビームを新設する必要がある。

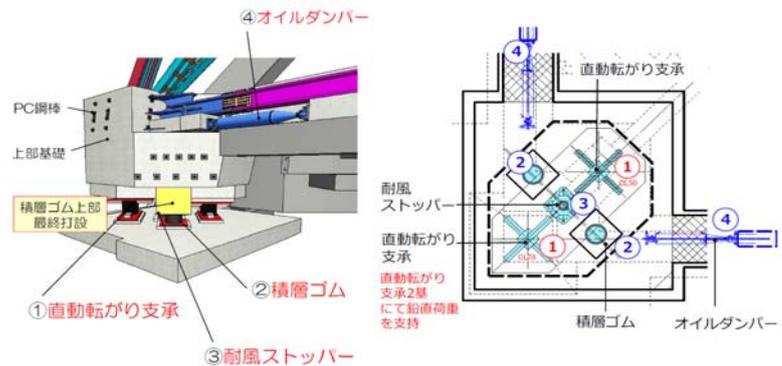


図-5 柱脚免震部の装置レイアウト

本免震仕様は、柱脚一か所に主に鉛直荷重を支持する直動転がり支承に加え、復元力用の積層ゴムや減衰用オイルダンパーをそれぞれ2基配置し、中央には暴風時の動きを拘束する耐風ストッパーも1基設置する。(図-5)これは他に類を見ない特徴的な免震システムであり、設置手順にも制約が与えられた。

2.2 解決すべき課題と方策および目標水準

タワー構造に特有なスラストは既設の解体プロセスによりその釣合い状態が変化する。その変化に追従しながら開きを増大させることなく、いかに安全にスラスト移行できるかが最大の課題である。それらを含む課題と基本方策および目標水準を表-1にまとめる。

表-1 課題抽出と基本方策および目標水準

解決すべき課題	基本方策と目標水準
1) スラスト移行を伴う既設解体時の安全性担保と柱脚開き量5mm以下*1の遵守 *1 アーチのせん断破壊防止 設計上の絶対条件	既設の不明確な応力状態を考慮した施工手法の考案 →既設解体時の存在応力は短期許容応力度比10%以下外側へ開かないように管理
2) 新設タイビームと緊張装置の仕様決定	厳密な張力管理が可能となる緊張装置の検討 実験により張力導入の実現性を検証 →新設タイビーム鋼材重量を原設計比30%以上減
3) 既設塔体への新設タイビーム接合方法の合理化	高い構造安全性と施工誤差吸収機構をもつ合理的接合方法の考案 →溶接品質のみに頼らない冗長性に富む接合部の考案 全強突合せ部の目違いが生じない

2.3 解決の方策と実施内容

それぞれ互いに関連する3項目の課題を解決するための方策と具体的な実施内容を示す。

2.3.1 スラスト移行性状を把握する解析手法の確立と既設解体時の安全検証

既設解体時の安全検証には、スラストの釣合い変化に着目した解析が重要となる。解析条件は、既設タイビーム等の施工前の応力状態をどのように設定するかがポイントとなる。実際には既設基礎底面の地盤摩擦がどの程度スラスト抵抗に寄与しているかは建設当時の施工手順等も複雑に影響するため不明である。しかし、その程度によって、各種既設タイビームの存在張力や脚部開き量は変化するはずである。以上より、基礎の水平拘束度に幅を持たせたパラメトリックスタディを行い、間接的に実現象を検証する独自の解析手法を考案した。以下にその手法と検討結果を示す。

a) 基礎拘束度の仮定による解析手法

汎用解析プログラムを用いたフルモデル立体解析により図-6に示す拘束力①や張力②, ③と変位④の相関を把握するため、基礎の固定度をローラーからほぼ拘束とみなせる範囲(0~1,000kN/mm)で検討した。解析結果から基礎の水平拘束度増加に伴い、外周と斜めタイビームの張力および脚部開き量は低減し、一定値に漸近する傾向がつかめた。(図-6) によって、上記の範囲内に実際の拘束度は含まれるものとみなし、以降の施工ステップ解析に展開することで、張力移行時の既設解体時の安全性や柱脚の開き量を検証した。(図-7)

b) 解析に基づく解体時の安全性担保と柱脚開き量

本解析により、既設解体時には当該部位の応力度比が1%未満(安全率は100倍以上)と目標値10%を十分満足することが確認できたため、当初、斜めタイビーム端部の解体時に張力の抜けを緩やかにする目的で計画された張力解放装置(図-8)を不要と判断し、施工手間と原価の大幅な低減(約1,000万)に繋がった。→課題1)

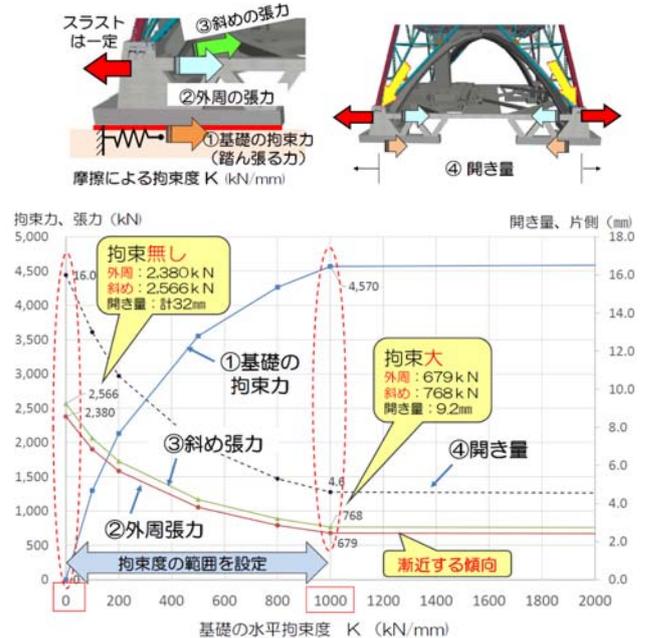


図-6 基礎の拘束度と各種張力、変位の関係

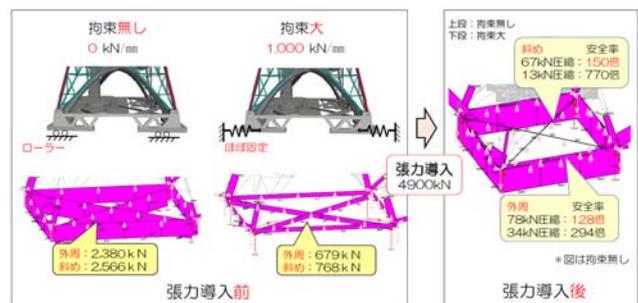


図-7 基礎の拘束度を考慮したステップ解析

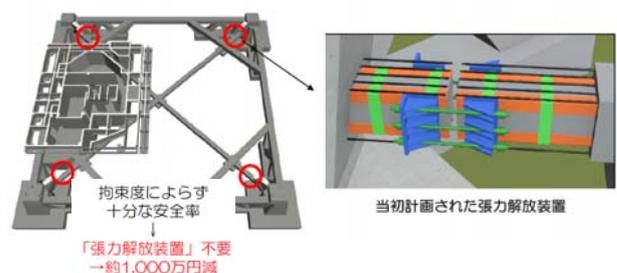


図-8 基礎の拘束度を考慮したステップ解析

一方、端部切断後の開き量は内側に12~31mmとなり「外側に開かない」とする目標水準をクリアし、制限値の外側5mmの限界スパンに対しては計17mm以上の十分な余裕度が確保されることを設計事務所に示し承認を得た。(図-9)→課題1) 尚、外側5mmの制限値はアーチのせん断破壊防止の為の絶対条件として与えられた。

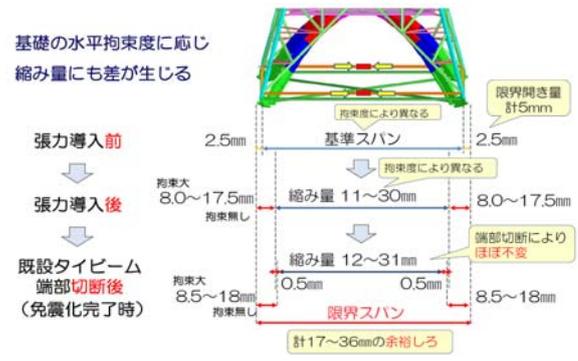


図-9 解析結果に基づく施工計画の余裕度

2.3.2 緊張装置と新設タイビームの合理化

表-2に新設タイビーム仕様における原設計と竹中提案による実施の比較を示す。原設計は2FB-150 x 500(1.2t/m)という重厚な部材を櫛歯加工のうえピン支圧接合とする計画であり、ハンドリングや精度確保が非常に困難と言えた。さらに、設置時には軸部を何等かの方法で加熱し、接合後に冷却して所定の緊張力を導入するという品質管理上も極めて困難な要求だった。そこで、まずは原設計の断面は伸びに対し高い軸剛性を確保する必要から決定している点に着目し、接合部のみ1/3厚としてHTB接合とする合理化提案を行った。さらに西日本機材センター考案のPC鋼棒による緊張装置にも改良を加え、免震完了時の設計張力4,900kNを初期導入し、端部解体時の柱脚の開きを抑制する本開発の肝となる提案を行ったところ、設計事務所の賛同を得られ、ローコストな既成極厚H形鋼H-458x437x50x50(480kg/m)へ設計変更がなされた。尚、鋼材重量の低減量は目標の30%を大きく上回る約60%減となり、約2,000万円以上の原価低減だけでなく軽量化による施工性向上や施工安全性にも大きく寄与した。→課題2)

表-2 新設タイビーム仕様における原設計と実施の比較

	原設計	竹中案による実施
部材形状など		<p>導入張力増大により鋼材重量を約60%低減 約2,000万円減</p>
施工性	<ul style="list-style-type: none"> 重い(1200kg/m) ピン接合(孔径+0.5mm)の精度確保 	<ul style="list-style-type: none"> 軽い(480kg/m) 超高力ボルト摩擦接合
品質	<ul style="list-style-type: none"> 実質不可能な熱による張力管理 	<ul style="list-style-type: none"> PC鋼棒とジャッキによる厳密な張力管理
経済性	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材重量大、単価高い 櫛歯やピン孔の機械加工費高い 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材重量小(約60%減)、安価な既成極厚H鋼 通常加工でOK

2.3.3 緊張装置の張力導入手法の確立

新設タイビーム中央に設けた緊張装置のPC鋼棒(10-32φ)それぞれに張力導入することで4,900kNを載荷する。張力導入後にスプライスPLを実測制作し、SHTB(G12,M24)にて本接合し導入張力を保持する。

今回、PC鋼棒の納まり上、2台のジャッキをローテーションして緊張作業を行うが、隣接のPC鋼棒の軸力抜けが発生し、想定通りに張力導入できない可能性があった。そこで、西日本機材センターと張力導入手法を検討し、2/3モデルの実験を行った。(写真-1) その結果、実際の緊張導入時には初期のバネ定数を以降の導入張力配分



写真-1 張力導入実験全景

等に反映させることで想定張力が導入できること、また施工性も問題無いことも合わせて確認した。この試験施工による検証の効果により実施工時には、99%以上の精度にて目標の緊張力を効率的に導入することが可能となった。→課題2)

2.3.4 既設柱と新設タイビーム接合方法の合理化

表-3に既設柱と新設タイビーム接合方法における原設計と竹中提案による実施の比較を示す。既設柱とタイビーム組立部材に現場溶接した鋼板（PL-12）を介して接合する原設計に対し、構造的にも接合部の品質を確保しやすい案として既設トラス柱を直接抱え込む「外ダイア接合」を提案し採用された。これは既設鉄骨の精度誤差を吸収可能とし、溶接品質の信頼性が高い下向き現場溶接を主とする変更であり、新設タイビームの水平化と合わせ施工性向上に大きく寄与した。→課題3)

表-3 既設柱と新設タイビーム接合の原設計と実施比較

	原設計	竹中案による実施
部材形状など	<p>既設部材の誤差等により板厚12mmのGPLの現場溶接は極めて困難</p> <p>1.2t/m</p> <p>PL-12</p>	<p>アジャストPLにて施工誤差を吸収</p> <p>外ダイア形式</p> <p>水平となり施工性向上</p>
施工性	<ul style="list-style-type: none"> 既設柱の誤差吸収が極めて困難 新設タイビームは10度傾斜 	<ul style="list-style-type: none"> 既設柱の誤差吸収が可能な納まりと溶接仕様 新設タイビームは水平
品質	<ul style="list-style-type: none"> 誤差等により溶接部の品質確保が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 既設柱を抱え込み、溶接品質のみに頼らない
構造安全性	<ul style="list-style-type: none"> 張力に対する必要耐力確保が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 張力に対する必要耐力を十分確保可能

2.4 主な成果と水平展開

本開発の主な成果と水平展開について以下に示す。

- ・ 不明確な既設応力を考慮した独自の解析手法により、張力移行を伴う各種解体時の安全性を担保するとともに社内外関係者の合意形成を得ることができ実施工に繋がった。
- ・ 施工難易度が極めて高い原設計仕様に対し、緊張装置や各種納まりの合理化提案を重ね、大幅な施工性向上や原価低減（鋼材費等で約3,000万円以上）を実現した。
- ・ 記者会見（NHK、民放4社、新聞各紙）や各種の現場見学会等により当社技術力を同業他社だけでなく広く一般にもアピールできた。
- ・ 2件の特許「免震構造及びその構築方法」「免震改修方法」を共同出願した。
- ・ 免震化以外の張力移行を要する工事にも水平展開し、受注等の優位性に繋げる。

3. 結論

要求水準が高い他社設計による世界初のタワー免震化計画に対し、生産技術に裏付けされた合理化提案を粘り強く重ねることにより、前例の無い柱脚免震化工法を確立できた。

【開発実施者】

名古屋支店 生産統括部：岡田秀明 吉村秀男 作業所：徳野亨 林康生 櫻井陽平
 技術研究所：松原拓平 木下拓也 エンジニアリング本部：大畑勝人