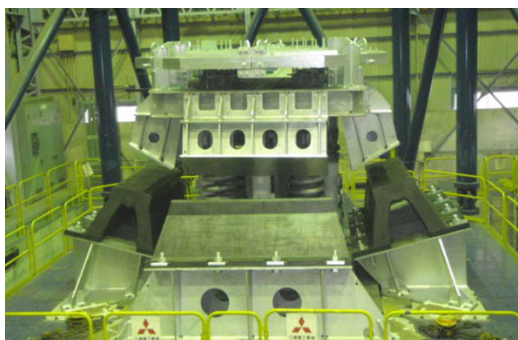


# 東京スカイツリー用制振装置の開発

## Development of Wind Vibration Control Device for Tokyo Sky Tree



森下 邦宏\*<sup>1</sup>      笹島 圭輔\*<sup>2</sup>  
 Kunihiro Morishita      Keisuke Sasajima

富谷 祐史\*<sup>3</sup>      田阪 良治\*<sup>4</sup>  
 Yuji Tomitani      Ryoji Tasaka

久保 充司\*<sup>5</sup>  
 Atsushi Kubo

近年、東京スカイツリー（事業主体：東武鉄道(株)・東武タワースカイツリー(株)／設計・監理：(株)日建設計／施工：(株)大林組）に代表されるように、建築物、タワーなどが高層化している。構造物の風揺れ抑制用の制振装置の設置は必須技術であるが、近年特に大地震（長周期時震動含む）に対する制振性能並びに装置安全性の確保が求められている。今回、東京スカイツリー向けに開発した風揺れ抑制用の制振装置に対し、地震時の過大な振幅が発生した場合でも装置の安全性を確保するためのストップ機構を導入した。また、風揺れ制振性能に関しては大型振動台を用いた加振試験により性能検証を実施したので、これを紹介する。

### 1. はじめに

超高層構造物の風揺れ用制振装置として、これまでに横浜ランドマークタワー、上海環球金融中心、各種塔状構造物などを中心にアクティブタイプ、パッシブタイプの制振装置を多数、開発してきた。今回、自立式電波塔として世界最高となる東京スカイツリー（634m）のデジタル放送用アンテナなどを支える塔（ゲイン塔）風揺れ用制振装置として、従来のパッシブタイプ制振装置以上の長周期に対応し、かつ、地震時の過大な振幅が発生した場合でも装置の安全性を確保できる機構を有する制振装置を開発し、40t、25t タイプの2基をゲイン塔頂部に設置完了した。風揺れ制振性能に関しては、大型振動台を用いた実機加振試験を実施し、要求される所定の性能が得られることを検証した。

### 2. 制振装置の構造概要

開発した制振装置は、[図1](#)に示す東京スカイツリーの上部に設置されるゲイン塔の頂部 625m（25t 用）、620m（40t 用）に2段に設置されている。今回の開発においては、構造的な設置環境制約として設置高さ制限（高さ5m 以下）があるためコンパクトな構造とする必要があったこと、さらに、従来のパッシブタイプ制振装置以上の長周期（約5秒）に対応する必要があったことから、[図2](#)に示す倒立振り子型のパッシブタイプを選定し、従来構造に改良を加えることにより、これらの制限、特性を達成可能な構造として開発を行った。

構造としては、ウェイトとウェイトフレームから成る振動体の基部をユニバーサルジョイントが支える構造であり、押し引きバネ、オイルダンパなどで構成されている。また、施工された実構造物の振動特性に合わせて制振装置の振動特性をチューニングする必要があることから、現場で振動特性を調整可能な機構を組み込んだ構造としている。さらに、地震のような想定以上の外力が作

\*1 技術統括本部広島研究所 首席研究員 工博

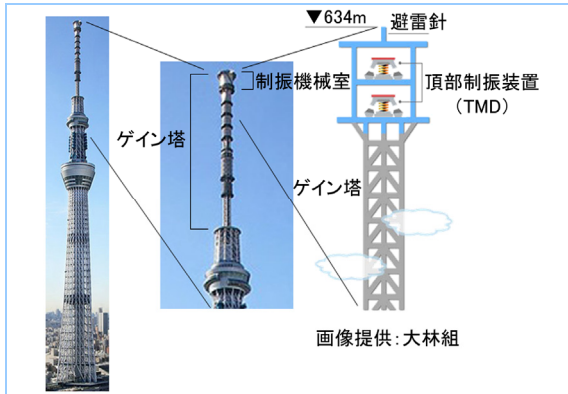
\*2 技術統括本部高砂研究所 首席研究員 技術士

\*3 技術統括本部広島研究所

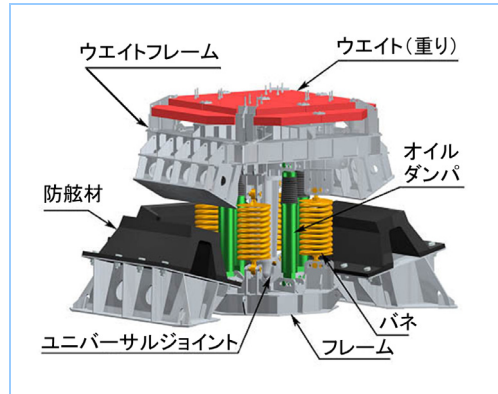
\*4 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)建築事業本部技術部グループ長

\*5 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)建築事業本部技術部主事

用し、装置に過大な振幅が発生した場合でも、装置の損傷につながる衝撃的な力を作用させるような急激なブレーキをかけず、ある程度の変位を吸収しながら変位制限をかける防舷材構造を開発し、ストップ機構として装置に適用した。



**図1 制振装置設置箇所**  
東京スカイツリー上部のゲイン塔を風から守るために、その頂部に制振装置が設置される。

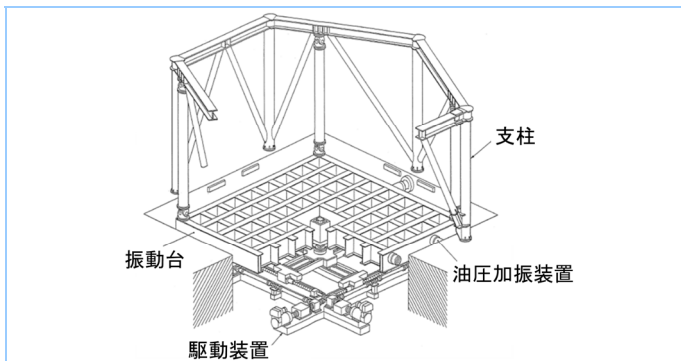


**図2 制振装置の構造概要**  
主にウエイト、バネ、オイルダンパで構成。過大な変位が発生した場合の安全装置として、防舷材を用いたストップ機構を設置。

### 3. 性能検証試験

#### 3.1 大型振動台概要

図3に示す大型振動台上に制振装置実機を設置し、性能検証試験を実施した。本振動台は、最大積載重量 1000kN、試験体最大寸法7m×7m×6mH、最大加振力±300kN、最大ストローク±1000mm、2方向同時加振可能な振動台である。



**図3 大型振動台**  
最大積載重量 1000kN、最大ストローク±1000mm の性能を有する。

#### 3.2 試験概要

性能検証試験については、以下の2点に関する振動特性を確認することを目的とした。また、目標とする性能範囲は括弧内に示すとおりである。検証試験では、振動特性調整機構を用いて、バネ、オイルダンパなどの位置を変更したケースで正弦波加振を行い、振動数、減衰定数を計測した。なお、固有振動数は、制振装置のウエイト振動が揺動台の振動に対し90°位相遅れとなった場合の振動数として求め、減衰定数については、位相曲線の勾配と固有振動数の関係より求めた。

- (1) 対応可能な振動数範囲の確認 (ターゲット振動数±15%以上の範囲で調整可能)
- (2) 上記範囲内での減衰定数の確認 (ターゲット減衰定数±15%以下の範囲であること)

#### 3.3 試験結果

性能検証試験結果のうち、横軸に振動数のターゲット値に対する比率を、縦軸に位相差をとったグラフの一例を図4に、制振装置の振動状況写真を図5に示す。また、図6に横軸に振動数、縦軸に減衰定数のターゲット値に対する比率をとったグラフを示す。図6でハッチングをした範囲が、本検証試験での目標性能範囲を示しており、○印が試験結果を示している。さらに、図7に正

弦波ではなく、ランダム波を入力した場合の試験結果と、制振装置モデルを用いた解析結果の挙動の比較例を示す。なお、図7の縦軸は各時刻歴波形の最大値に対する比率を示す。これらの結果より、以下のことがわかった。

- (1) 図6の結果より、振動数については目標性能としたターゲット振動数±15%以上の範囲で調整可能であることが確認できた。減衰定数については、一部振動数比率の高い部分で範囲外となっている箇所があるが、現地チューニングで範囲内となる組合せ(ばね取付け位置とオイルダンパ取付け位置)に調整可能であることが確認できており、本制振装置が所定の性能を有していることが試験的に検証できた。
- (2) 図7の比較より、ランダムな揺れに対しても、制振装置の有する固有振動数で揺れが継続し、解析モデルでも同様な挙動を示すことが確認できた。
- (3) 上記解析モデルを用いて想定外の外乱(東京スカイツリー設計用に設定された伏在断層波で、建築基準法の想定外外乱と定義されている)に対する解析的検討を実施した結果、防舷材にウェイトが接触する挙動を示すが、防舷材の許容耐力以下におさまること、これにより装置の安全性が確保できることを確認した。

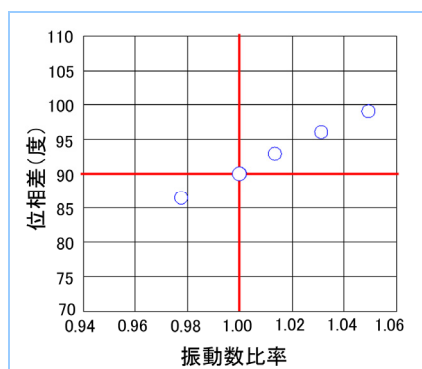


図4 振動数と位相差の関係

加振振動数を変化させながら、位相差との関係より共振点を試験的に求める。

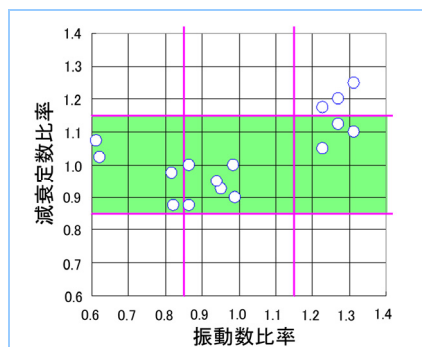


図6 目標性能と試験結果の関係

ハッチング箇所が目標性能範囲、○印が試験結果である。

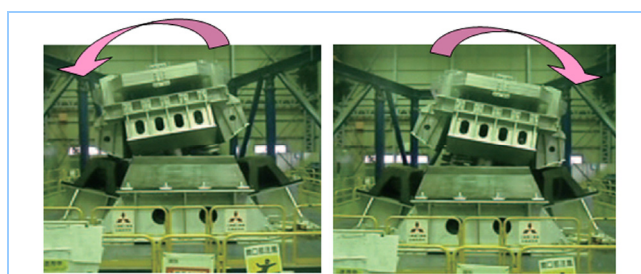


図5 制振装置の振動状況

倒立振り子型の装置であり、上部のウェイトが基部のユニバーサルジョイントを支点として左右に揺れて減衰効果を発揮する。

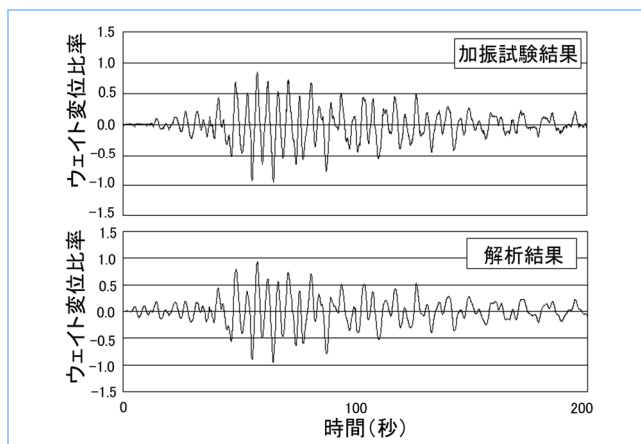


図7 ランダム波加振試験結果と解析結果の比較

ランダム波に対する加振試験結果と制振装置モデルを用いた解析結果はほぼ一致。

## 4. まとめ

設置高さ制限、従来の装置を超える長周期に対応させた東京スカイツリー®のゲイン塔風揺れ対策用の制振装置を開発し、実機を用いた大型振動台による性能検証試験を実施した。その結果、現地でのチューニングを想定した調整機構を用いることにより、振動数、減衰定数共に、目標とした性能調整範囲を満足することが検証できた。

今後、構造物の超高層化、超々高層化が進んでいくことが予想される中、要求される性能を満足させるのみでなく、想定外の外乱に対しても装置の安全性を確保できる構造開発を継続し、構造物を風揺れから守り続けていく所存である。