

転倒防止機構を備えた塔状建物対応型トラベリング工法の開発

技術部 機械・電気グループ 小野 孝一

1. 序論

薬師寺は西暦 680 年、天武天皇の発願により、飛鳥の藤原京の地に造営が開始され、平城遷都後の 8 世紀初めに現在地の西ノ京に移転したものである。伽藍の一つである東塔（とうとう）は、薬師寺で唯一約 1300 年前の創建当時から現存する伽藍である（写真-1）。奈良県文化財保存事務所の調査の結果、内部を貫く心柱が空洞化するなど劣化が確認され、110 年ぶりに 7 年間に及ぶ大規模解体修理が始まろうとしている。

本工事は、大規模解体修理のために東塔を覆う素屋根を建設する工事である。奈良県発注の総合評価落札方式による入札物件で、国宝である東塔の保護、周辺環境からトラベリング工事が指定されていた。これまでに類のない高さ 42.5m の塔状建物のトラベリング工事に對し、新たに考案した転倒防止機構の提案が受注の決め手となった。工事を終え、安全施工を実現したのでここに報告する。



写真-1 薬師寺 東塔



写真-2 素屋根西立面
(初回トラベリング前)

2. 本論

2. 1 適用プロジェクト概要

工事名	国宝薬師寺東塔素屋根建設工事
発注者	奈良県
設計	株式会社 東畑建築事務所
監理	株式会社 京成設計
施工	竹中・中村・大倭特定建設工事共同企業体
工期	2011年7月13日～2012年3月3日
(実施工程)	2011年9月1日～2012年3月30日
構造・階数	S造、地上7階
建物高さ	軒高 38.3m、棟高さ 42.5m
素屋根平面積	920 m ² (東西 30m×南北 28.5m)

組立用構台

2. 2 トラベリング工事概要

総移動距離・回数	22.5m 4回 (4.5m×3回+9m×1回)
移動体重量	最大 470 t (素屋根総重量 約 1000 t)
牽引装置	50 t センターホールジャッキ×4台

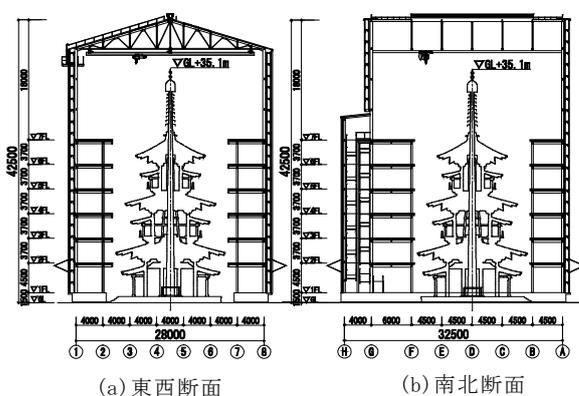


図-1 素屋根断面

2.3 施工条件

国宝である東塔の周囲は伽藍に囲まれており、多数訪れる参拝客の安全性を確保しながら工事を進めなければならない。また境内は全域史跡指定されており、遺構保護の観点から掘削等の禁止及び短期地耐力 16 t/m^2 に制限され、入札時点からトラベリング工事が指定されていた。更に類の無い高さの塔状の素屋根をトラベリング施工することから入札時の技術提案要件の一つとして、建方から移動に至る全ての段階において、大地震にも対応し得る高い安定性が求められた。加えて、他社設計であり、素屋根の設計上トラベリング工事を考慮したものになっていない中、落札後、即着工という短期間での対応を要求されていた。

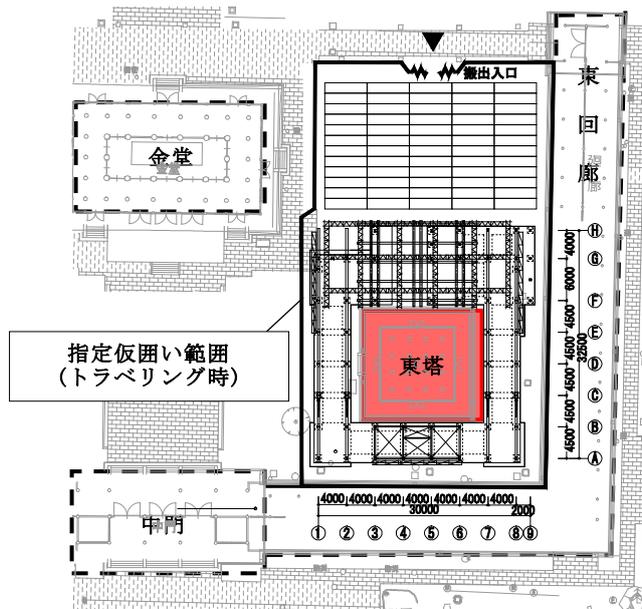


図-2 敷地平面図

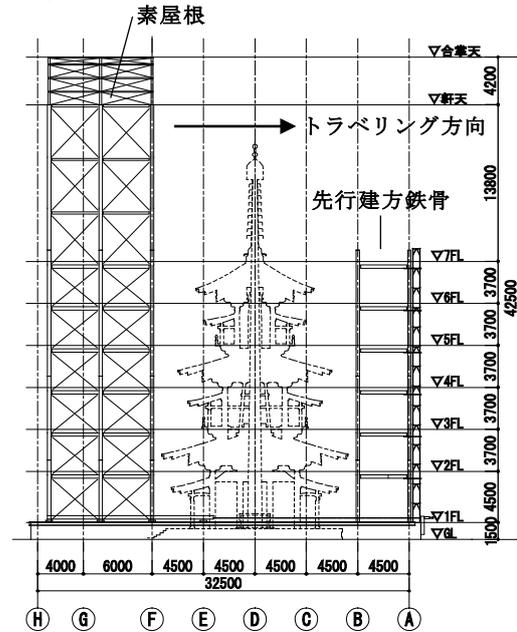


図-3 初回トラベリング時 南北方向断面図

2.4 トラベリング実現に向けた課題

上述した施工条件の中で安全にトラベリング工事を実施するために解決すべき課題は以下の通りである。

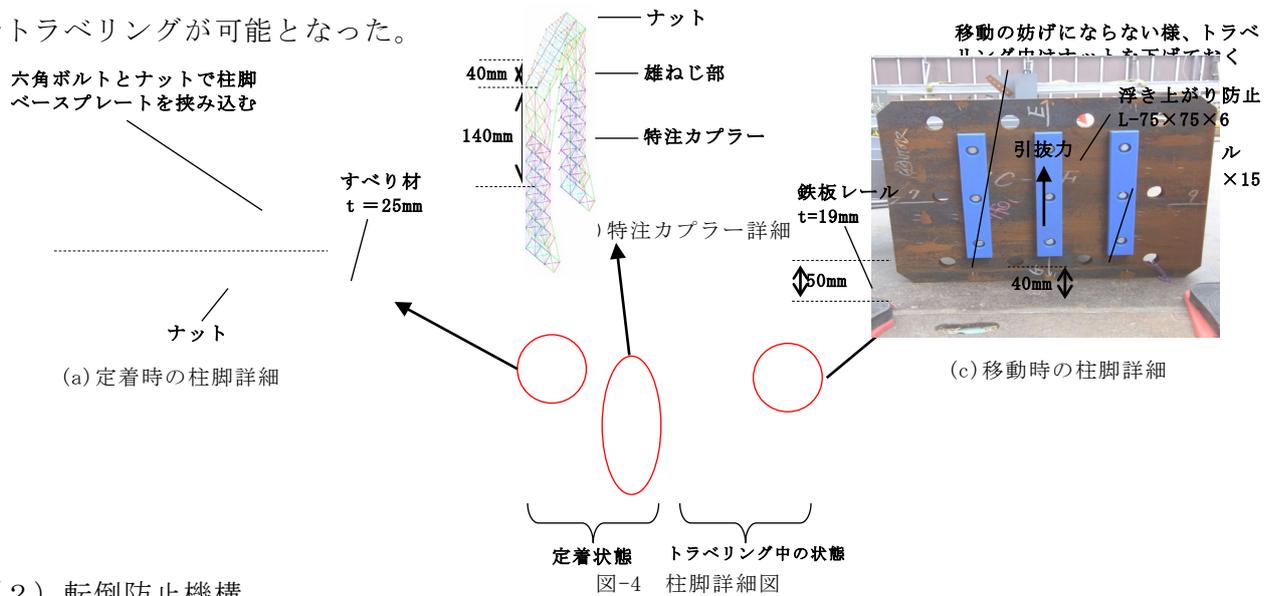
- ① トラベリング工事対応となっていない原設計に対し、如何に設計変更を少なく牽引機構やレール、補強等を盛り込むか
- ② 高さ 42.5m の素屋根をトラベリングする中で、もっとも不安定となる初期トラベリング時の安定性を如何に確保するか
- ③ 7年後の受注に向け、素屋根解体時にも利用できるトラベリング機構を如何にローコストで実現するか

2.5 対策

上記課題を克服するべく、下記対策をとった。

(1) 通常、トラベリング機構を採用する上で最も大きく変更を要するのはレールと取り合う柱脚部である。多くのトラベリング工法では、平滑度や強度確保、施工性から H 型鋼をレールに採用する機会が多いが、柱や斜材との接合部、柱脚アンカー部などで設計変更が必要であり、調整に時間を要していた。そこで今回、柱脚部の形状をほとんど変えることなく、かつ、レベル調整モルタル代 50mm の中で対応できるトラベリング機構として、以下を考案、採用することとした。

- ①ベースプレート上部まで突出しているアンカーボルトを上部 40mm を雄ねじとした長さ 180mm の特注カップラー(長ナット)を基礎コンクリートに埋め込む納まりに変更 (図-4)。
 - ②レベル調整用モルタル代 50mm の高さに納めるため、厚さ 19mm の鉄板をレールに、厚さ 25mm の低摩擦ナイロン樹脂 (商名: MC ナイロン) をすべり材に採用 (写真-3)
- これらにより、移動の妨げにならず、移動完了後は柱脚ベースプレートを六角ボルトとナットで挟み込み、強固に支持する機構を柱脚形状、アンカーボルト配置等をほとんど変えることなく実現できた。この結果、通常の H 鋼レール採用時と比べ、設計調整期間が約 1 ヶ月短縮できた。また 7 年後の素屋根解体時においても、補強ブレースの再設置と六角ボルトとナットを緩めるだけでトラベリングが可能となった。

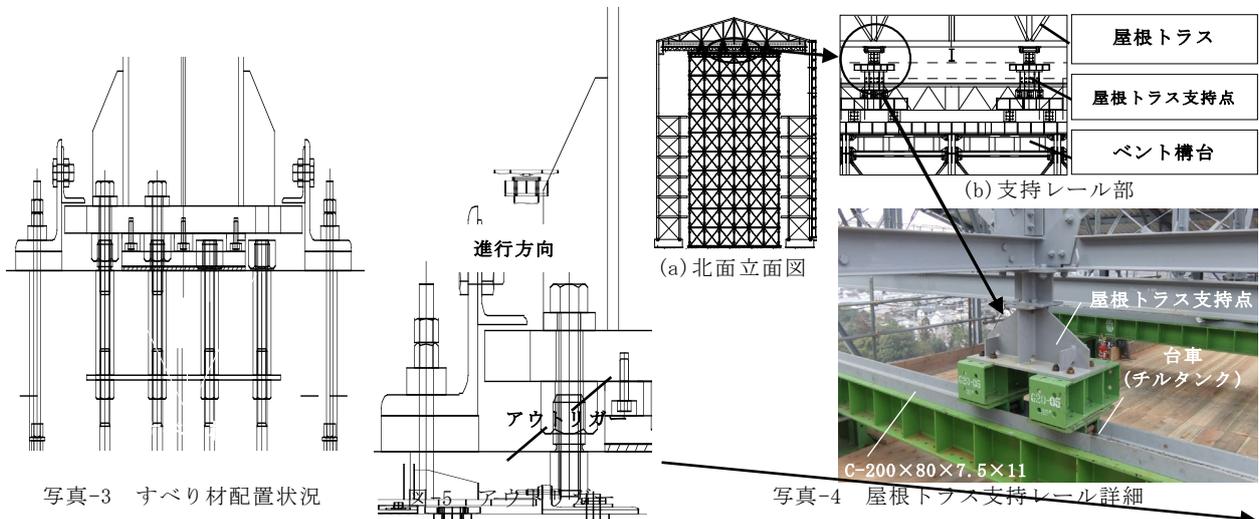


(2) 転倒防止機構

トラベリング初期段階は、素屋根高さが 42.5m に対し、幅 9m の非常に細長い形状となっている。移動中は地面と縁が切れているとはいえ、すべり材の静止摩擦係数 ($\mu = 0.2$) に加え、レール面に不陸、段差等があると大きな抵抗となるため、この状態で大地震が発生すると素屋根が転倒する恐れがある。そこで以下の対策を講じることとした。

- ①横方向への滑動と柱脚部の浮き上がりを防止するためのガイドレール設置 (図-4)
- ②移動方向前方の安定度を高め、柱脚引抜力を低減するためのアウトリガー (図-5)
- ③後方への転倒防止用にペント構台上部に設けた屋根トラス支持レール (写真-4)

これらを計画するに当たっては、移動中でも震度 5 強の地震に耐え得ることを目標とした。



(3) 素屋根構造補強と牽引設備

本工事の素屋根は梁接合部がピン支持となっており、妻面の鉄骨と一体化されて成立する構造であった。このため、トラベリングステップ毎のフレーム解析を行ない、必要なブレース補強を行なった(図-6)。同時に解析で得た柱脚部の反力から、滑り材の摩擦係数やレール継目の段差抵抗等を考慮して、油圧ジャッキ等の牽引設備を選定した。採用した牽引設備は、素屋根前方4ヶ所から伸ばした呼び径φ32mmの総ネジPC鋼棒(写真-5)を前方のコンクリート基礎端部に設置した50t油圧センターホールジャッキ(写真-6)で牽引する構成とした。牽引中、過大な負荷や偏差が生じないように、ジャッキ荷重を圧力計で、移動量をレーザー距離計(写真-7)で計測し、リアルタイムで監視できるシステムとした。

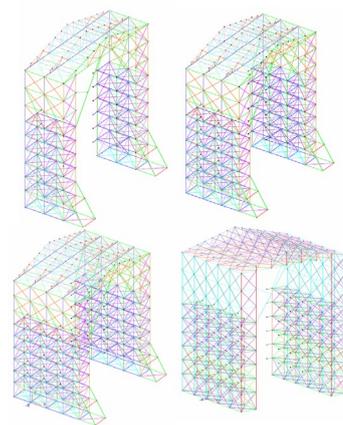


図-6 マルチフレームを用いた解析

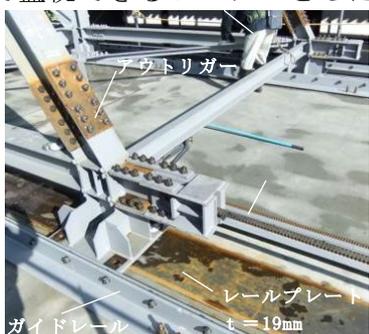


写真-5 PC鋼棒設置状況



写真-6 ジャッキ設置状況



写真-7 レーザー距離計設置状況

2.6 実施結果

トラベリングに先行して南側の鉄骨のみ西エリアから25tラフタークレーンを用いて建方を行なった。その後F-H通り間に素屋根組立用のベント構台を設置し(図-7)、まず2スパン分の鉄骨建方と仕上げ工事を行ない、1スパン分トラベリングを行なった。以降、1スパンずつ、建方とトラベリングを繰り返した後、ベント構台の解体、残鉄骨建方を実施した。(図-8)

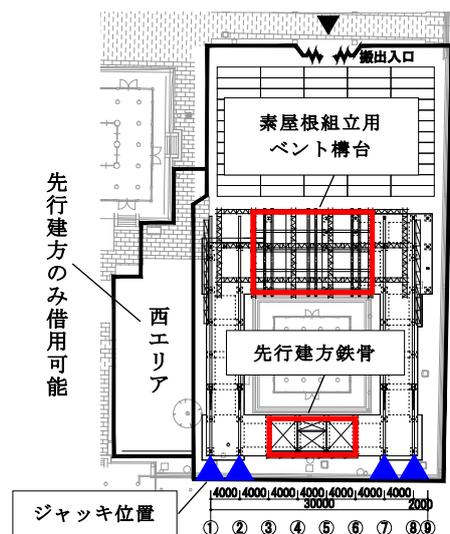


図-7 基本配置図

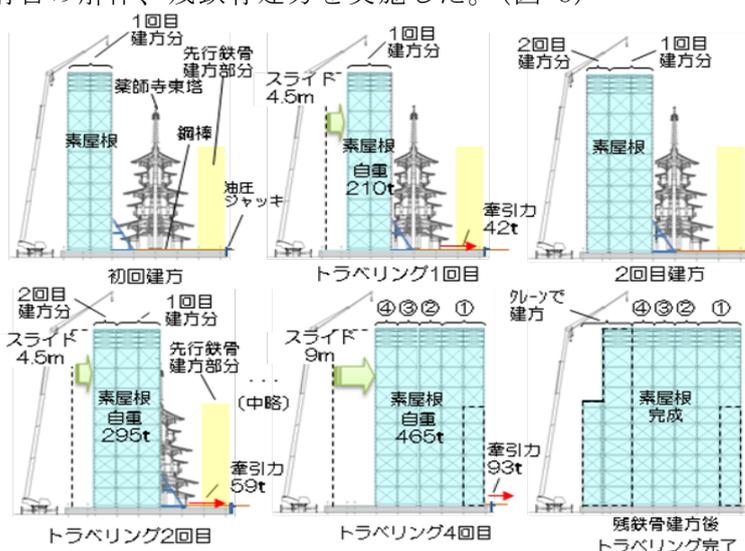


図-8 トラベリングステップ概要

トラベリング当日は、KYミーティング後、仮固定ボルトの撤去とレール面への界面活性剤塗布を行ない、9:00より牽引を開始した。移動開始直後は、ナイロン樹脂製すべり材のスティックスリップ現象(すべり面での静・動摩擦係数差による振動)に起因する素屋根仕上げ材の振動音

が発生したが、事前塗布した界面活性剤により納まった。

トラベリング中の牽引荷重は移動体計算重量の20%程度（摩擦係数 0.2）とほぼ計画通りの値であった。移動量の偏差に関しては、隣接するジャッキ間では5mm程度、20m離れた②-⑦間では、20mm程度で制御でき、それぞれの目標管理値である10mm、100mmを満足できた。準備0.5時間、1スパン4.5mの移動時間1.5時間、定着1時間を加え、全3時間で1回のトラベリングを完了した。建方8日、屋根折板・換気扇取り付け1日、トラベリング1日の10日タクトで工事を進めることができた（図-12）。全体工程は図-14の通りであり、基礎工事から素屋根完成まで7か月で安全に工事を終えた。

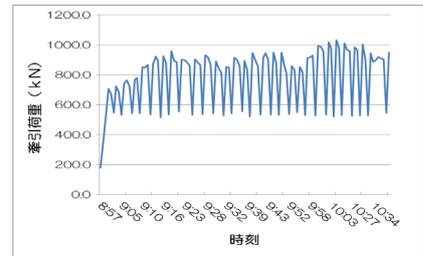


図-9 移動量の推移

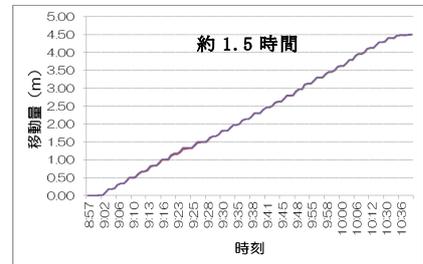


図-10 牽引荷重の推移

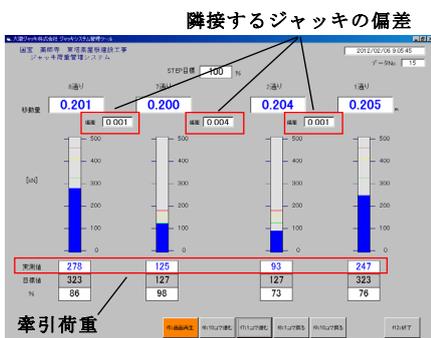


図-11 移動量・牽引荷重管理画面

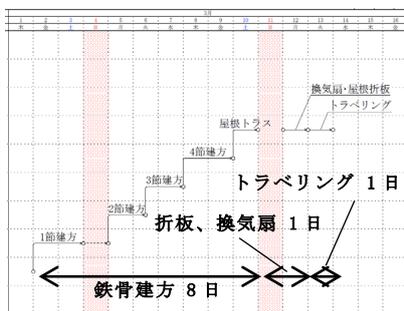


図-12 タクト工程

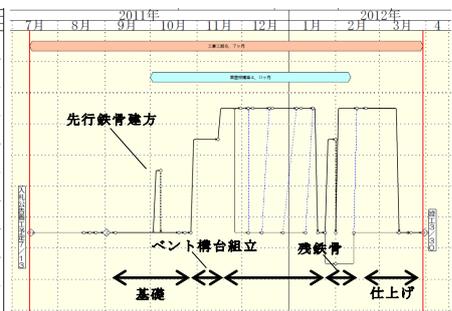


図-13 総合工程

3. 結論

本開発で得られた成果を以下に示す。

- (1) これまでに類の無い高さ42.5mの塔状の素屋根トラベリング工事に對し、考案した転倒防止機構の提案により、受注の決め手となったと共に安全に工事を完遂できた。
- (2) 他社設計・監理、落札後即着工という条件下で、設計変更を極力少なくできるトラベリング対応の柱脚納まりを新たに開発し、工期遵守と安全性向上を図れた(特許出願1件)。
- (3) 世界遺産を対象にした高い注目を集めた工事として、テレビ、新聞等メディアに掲載され、当社の技術力をアピールすることができた。



(a) 1回目



(b) 2回目



(c) 3回目



(d) 4回目

写真-8 トラベリング実施状況

開発実施者

- (作業所) 河野茂善、藤原勇、杉田達也
 (西日本機材センター) 三幸謙一、春川久郎、内藤陽
 (技術部) 森田将史、濱田幸