

平城宮跡歴史公園第一次大極殿院東面回廊の「版築」の復原について

山村 真行¹・山田 洋次²

¹近畿地方整備局 営繕部 整備課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

²近畿地方整備局 営繕部 整備課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44)

国営平城宮跡歴史公園第一次大極殿院建造物復原整備計画（以下「復原整備計画」という）は、奈良時代前期に現存していた第一次大極殿院の建築物等を復原整備するにあたっての基本的な考え方を示しているものです。当計画においては、「建築物の形態や工法などを、厳正に復原する」とともに、「利用者の安全を図るために各種措置を講ずる」ことが基本方針とされているため築地回廊の版築は耐久性はもとより、耐震安全性を確保する必要があります。

キーワード 復原、安全性の検証、版築

1. はじめに

版築とは、土壁や建築の基礎部分を堅固に構築するために古代から用いられてきた構造物です。土を搗き固め、層を重ねた構造は、非常に頑丈で城壁などの大規模な建造物をはじめ、道路や家屋などにも用いられてきました。

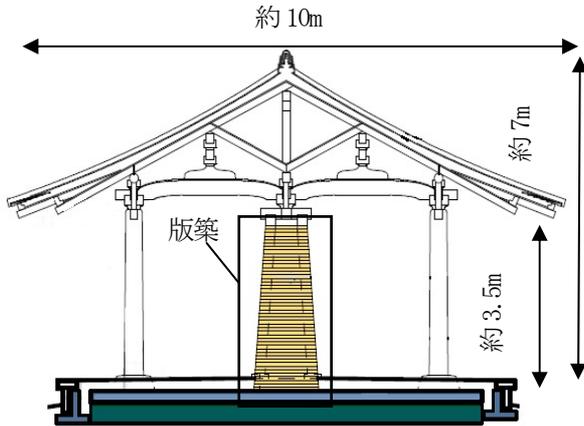


図1-1 築地回廊の断面図



写真1-1 版築

復原整備計画は、奈良時代前期に現存していた第一次大極殿院の建築物等を復原整備するにあたっての基本方針を示しているものです。

平城宮跡には、2010年に第一次大極殿、1998年に朱雀門、2000年に東院庭園など文化庁により往時の建築物が数棟すでに復原整備されています。これらに引き続き、第一次大極殿院の建築物群を復原整備することで、正殿を中心に回廊で取り囲まれた空間が実大で再現され、見学者に古代宮城空間を体感してもらうことで、その理解をより深めてもらうことが可能になります。これらの復原整備に向け、国営飛鳥歴史公園事務所が復原整備計画の方針、枠組など全体を総括し、営繕部は建築に関わる技術的な確認を行いました。

本論では、築地回廊の版築について、建築基準法に適合させるため、地盤耐力を加味した復原可能範囲を設定し、また現在の技術も導入しながらできるだけ奈良時代の材料・工法を用いた復原設計の経緯と補強方法について報告します。

2. 復原整備計画の概要

第一次大極殿院復原建造物に関する建築意匠の設計は、独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所の調査、研究成果に基づいた復原原案が元となっています。表2-1、表2-2に各復原建築物の規模、写真2-1に復原整備計画の全体完成図（予定）を記します。

表2-1 南門、東樓の概要

	南門	東樓 (東面回廊含む)
建築物の構造	木造	木造一部版築
階数	1階	2階
延べ面積	約200m ²	約530m ²

表2-2 西樓の概要

	西樓 (西面回廊含む)
建築物の構造	木造一部鉄骨造
階数	2階
延べ面積	約880m ²



写真2-1：復原整備計画の全体完成図（予定）

3. 築地回廊の版築の復原可能範囲の設定

第一次大極殿院の敷地は平城宮跡の北寄りにありますが、その北西には奈良時代からの池が広がっています。そのため、院内の西側は地盤が比較的弱く、現行の建築基準法に照らすと、荷重の関係で版築を用いた厳正な復原を行うには困難であるため、第一次大極殿院の地盤を図3-1の4つのゾーンに設定しました。それぞれの地耐力は、

ゾーンⅠ：31kN/m²

ゾーンⅡ-1：38kN/m²

ゾーンⅡ-2：50kN/m²

ゾーンⅢ：82kN/m²

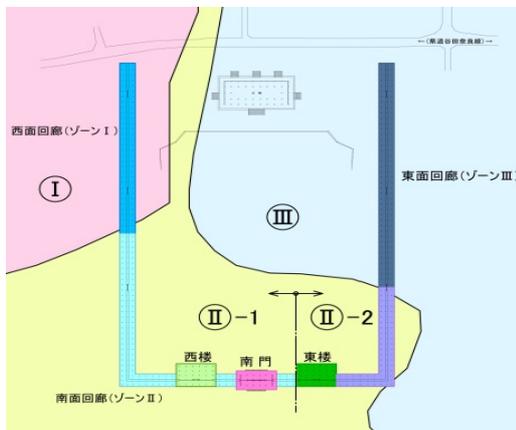


図3-1：地盤特性のゾーン区分

版築は36kN/m²の地盤耐力が必要です。ゾーンⅡ-1は、必要地耐力に対する地耐力の余裕率は1.05と、1.0を上回っていますが余裕度が少ない数値であり、遺構保護の観点からも、ゾーンⅠ、ゾーンⅡ-1は鉄骨造とし軽量化を図ることとしました。その結果、ゾーンⅡ-2及びゾーンⅢが版築の復原可能な範囲として確認されました。

4. 版築の配合について

調査の違いにより強度や耐久性を評価し、版築土の配合を選択するため、既往調査資料などを基に復原設計の前に版築の配合についての事前調査を行いました。

昭和59年(1984年)～平成15年にかけて、復原施工実験が行われた版築土塀が現在も存在しています。雨ざらしの状況で経年劣化が進んでいますが、版築土の配合や施工方法によって劣化度に違いが出てきています。目視による劣化度の評価や、版築の材料強度試験などを実施し、配合と劣化度の関係を調査したところ、消石灰の量が施工完了後の耐久性には大きな影響を与えることが分かりました。しかし、消石灰の強度への影響は不明でした。

よって、仕上げを損なわない範囲で消石灰の配合量を決める必要があるため、各種実験毎に、複数のサンプルを作成し配合を決定しました。

5. 各種実験の概要とその結果

5-1. 築地回廊の版築の復原における問題点とその対応

第一次大極殿院を囲む築地回廊は、版築の上に木架構が載っている複廊として復原されます。しかし、現代において土は建築用資材として認められていないため、版築を構造体とみなせず木架構のみで耐震性能を確保することは不可能です。版築を構造体とみなすため建築基準法の規程に適合させる必要があります。建築基準法を満たすためには、定量的なデータを集める必要がありますが、版築の研究成果がほとんどありません。版築の構造性能や、地震時の安全性に関して、実験的な検証を行えば、定量的な評価が得られ、その結果を構造設計に反映できます。復原整備検討委員会において整備局、復原整備計画検討委員会の協力委員、設計者の3者間の協議で3つの実験(材料実験、耐力実験、施工実験)を計画し

ました。それぞれの実験の目的は、次のとおりです。

① 材料実験

材料強度の確認

② 耐力実験

版築の耐力データを集め、補強の有無、補強方法の検討

③ 施工実験

内部補強を想定した施工効率、機械化施工検討

5-2. 材料実験

実施工の体積約1/5倍の試験体を作成し、築地回廊の版築の配合は事前調査の結果を基に調査しました。作成した試験体を抽出し、物理特性試験（粒度試験、土粒子の密度試験、締め固め試験、液性・塑性限界試験、含水比試験、収縮限界試験）と強度試験（一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、一軸引張り試験、割裂引張り試験、曲げ試験、せん断試験、層間の引張り試験）を行いました。留意すべき実験結果として、築地回廊の版築の層間部の引張り強さがほぼ、ゼロと考えるのが妥当であることが挙げられます。理由として、試験後供試体を観察すると、層間の面が斜め方向にズレが生じているケースや層間の面と破断面にズレが生じているケースがほとんどであり、層間の面をみの引張り強さを反映していません。よって、今回得られた引張り強さは「層間部近傍の引張り強さ」と推察され、層間そのものの引張り強さに対しては過大と考えられるからです。

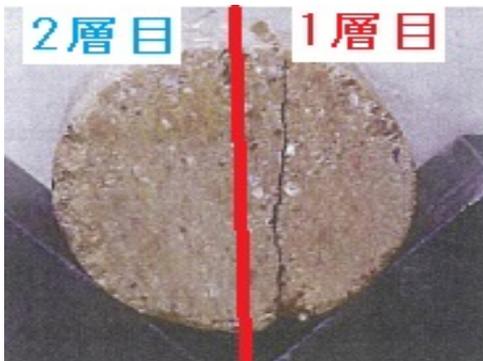


写真5-2-1 各層間の引張り試験の破壊状況

5-3. 耐力試験

耐力実験は、アンカー実験、震動台実験を行い、耐力のデータを集めました。

5-3-1アンカー実験

築地回廊の版築に打設したあと施工アンカーの引抜き試験およびせん断実験を、あと施工アンカーの埋込み深さおよびへりあき寸法（せん断実験のみ）を変化させて、2回に分けて実験を行いました。

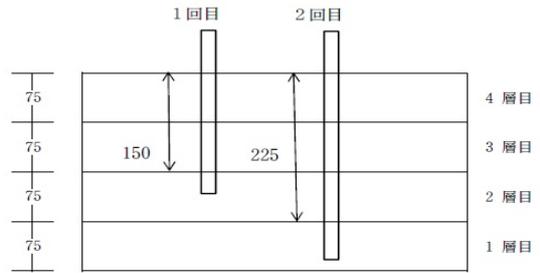


図5-3-1-1 あと施工アンカーの埋込深さの詳細

結果として、引抜き強度は、埋込み深さが大きくなるほど引抜き強度は大きくなりますが、埋込み深さに比例して大きくなっていませんでした。せん断強度は、試験体によるバラツキが大きく埋込み深さおよびへりあき寸法を大きくしてもせん断強度の増大は見られませんでした。最大強度に達した後の急激な強度低下を防止することができました。引抜き試験、せん断試験結果の共通点としては版築に打設したあと施工アンカーの引抜き強度およびせん断強度に与える影響は、各層間の一体性がないことが最も大きいと思われます。すなわち、引抜き試験では、大きい引抜き変位を与えると、最上層の1層のみが曲げ破壊モードが見られました。せん断実験では、大きなずれ変位を与えると、1層のみがずれてくる破壊モードが見られました。このような破壊モードを防ぐ対策を施すことができれば、より大きな引抜き強度およびせん断強度が得られます。

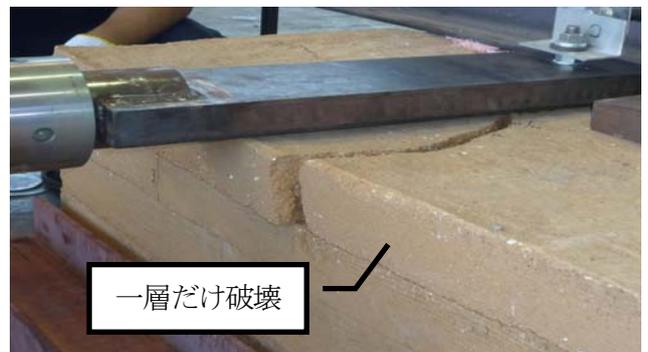


写真5-3-1-1 せん断実験の破壊状況

5-3-2 震動台実験

試験体の形状は、現物の1/3試験体を用い、補強を行わない基本試験体と補強を行った補強試験体合わせて6体（A）無補強（B）内部鉄筋補強（C）炭素繊維シート補強（2重×2本）（D）内部鉄筋補強（上部に1.3tの錘設置）（E）炭素繊維シート補強（1重×2本）目地部を目荒し（F）柱脚部のみ内部補強、目地部は鉄筋の上層のみ接着剤、目荒しを計画し、補強方法、目地部補強の効果を検証しました。

試験体の概要については表5-3-2-1に示します。地震波の加速度を350galと818gal~1950galまで段階的に増加させて、試験体の挙動を確認しました。

実験の結果として、無補強の版築塀（A）は、中地震程度の地震において、打継ぎ目地部において曲げ引張応力により、肌別れが発生し、地震力の大きさによってはそのまま転倒モーメントを超えて転倒してしまうことが分かりました。



写真5-3-2-1 (A) 試験体の浮き上がり破壊形式

内部補強の版築塀（B）は、竹筋及び鉄筋が入っている層では層どうしが一体化されるため、浮き上がりが抑制され転倒防止効果が認められました。（D）は補強材内部に設置した全ネジの引張応力は、降伏強度を超える応力が働き、頂部の圧壊が生じました。外部補強を行った版築塀（C）は、底面剥離し、ロッキング現象を生じ、また内部にひびが生じるなどの破壊挙動が見られました。しかし、転倒などの危険な破壊にはつながりませんでした。（E）は、転倒などの危険な破壊にはつながらず、炭素繊維と版築塀の拘束を改善したことにより、ロッキング効果は抑えられる結果となりました。部分的な補強を行った（F）は、鉄筋補強の無い7層目で浮き上がりが確認されました。考察として、築地回廊の版築部には、耐震性能向上のために、壁脚部から頂部に渡っての内部補強または、外部補強が必要であり、目地部補強の効果は低いことが分かりました。

表5-3-2-1 震動台実験概要

試験体名	A (補強無し)	B (鉄筋+竹補強)	C (炭素繊維シート補強)
試験体図			
補強概要	すべり拘束	基礎に固定	外で基礎に固定
固定材	—	全ネジボルト	100mm幅、2重×2本 シート緩み大
目地部	処理無	処理無	処理無
試験体名	D (錘)	E (炭素繊維シート補強)	F (柱脚部のみ内部補強)
試験体図			
補強概要	基礎に固定	基礎に固定	鉄筋定着板柱脚部補強のみ
固定材	全ネジボルト	100mm幅、1重×2本 シート緩み少	全ネジボルト 定着板PL4.5
目地部	処理無	目荒らし	上層のみ接着剤 目荒らし



写真5-3-2-2 (D) 試験体頂部破壊状況

5-4. 施工実験

12層の土層の版築を作成する計画を立て、施工手順は下記によります。

【1層目】全面搗き棒施工（従来工法）

施工全面に渡って、①整地②タコ搗き③搗き棒搗き④周辺部仕上げ搗き⑤全面仕上げ搗きの手順で一様に突き固める方法としました。



写真5-4-1 版築搗き作業状況

【2.3層目】鉄筋邪魔棒（内部鉄筋補強）有り、全面搗き棒施工

施工面に内部鉄筋補強案を想定して2-D16@300の鉄筋が立っている状況で、従来工法による搗き固め施工を実施して、作業効率を観察しました。縦に立った鉄筋は長さが比較的短かったためか、搗き作業に大きな影響はなく、施工時間が大幅に長くなることはありませんでした。



写真5-4-2 内部鉄筋補強を想定した施工状況

【4-9層目】内部中央部簡素化施工（外周部：従来工法、内部：機械化施工）

機械による施工範囲は、手搗き施工と同様に、内側中央部の簡易施工部分を機械化により合理化できないかを検討し、用いた機械の種類やその評価を検討しました。結果として、手持ち式サンドランマーが中央部の作業を機械搗きに置き換えることが可能であることが分かりました。高齢の作業員でも作業が容易、ランマーを動かす時間により搗き回数の管理が可能で、強度についても、搗き棒と同等の性能が出ることを確認されました。



写真5-4-3 手持ちサンドランマー施工状況

【10-最上層目】全面搗き棒施工（従来工法）（1層目同様）

6. 実験結果を踏まえた版築の構造設計

これまでの実験の過程から消石灰の量は、版築土 1m^3 (1.88t) 当たり、消石灰80kgの調合が、施工のし易さ、安定性や強度のばらつきが少ないことが分かりました。実験結果を踏まえた構造補強として、炭素繊維による補強が妥当と考えられますが、その場合仕上げに影響が出る可能性が高くなります。鉄筋による補強は、炭素繊維で補強する場合よりも仕上げの当初性を保つことができ、施工性についても、補強鉄筋があつたとしても施工に大きな支障が無いことが確認されています。よって、内部鉄筋補強が選択されました。各層間が一体となり強度が大きくなる実験結果が得られたため、壁脚部から木部の接合部まで補強筋を組み込んだ設計にしました。

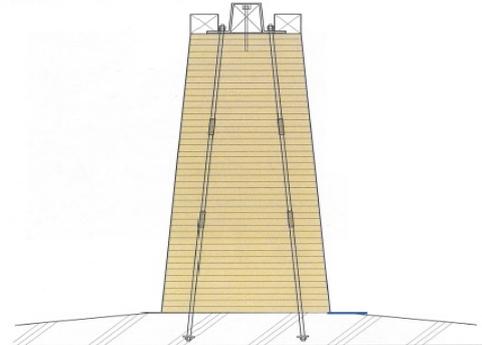


写真6-1 実験結果を踏まえた版築の断面図

そして、この設計資料を用いて、一般財団法人日本建築センターの評価を受け建築基準法で求められた性能を有していると大臣認定を取得しました。

7. 考察

以上を踏まえて2つの知見が得られました。
1点目は各層を一体的になるよう適切な補強を行えば、

版築を構造体としてみなせることです。2点目は、今後の復原設計の先進事例として実験内容が汎用的である点です。

版築の研究成果はほとんどないため、本実験の資料が今後の復原設計において、活用されることが期待できます。

今回、整備局、復原整備計画検討委員会の協力委員、設計者の3者により意見を交わすことで適切な判断が円滑に行えたことも大きな成果と言えます。