プラサート・スープラ N1 塔 基礎基壇修復方法の研究開発

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE RESTORATION METHODS FOR BASEMENT AND PLATFORM OF PRASAT SUOR PRAT TOWER N1

赤澤 泰 — * 1 中川 武 — * 2
溝口明則 — * 3 中澤重一 — * 4
岩崎好規 — * 5 福田光治 — * 6

Yasushi AKAZAWA — * 1 Takeshi NAKAGAWA — * 2
Akinori MIZOGUCHI — * 3 Juichi NAKAZAWA — * 4
Yoshinori IWASAKI — * 5 Mitsuharu FUKUDA — * 6

キーワード：
アンコール遺跡, 全解体再構築, 版築砂層, 消石灰,
ジオテキスタイル

Keywords:
Angkor, Total dismantles and reassembles, Compacted sand layers,
Slaked lime, Geo-textile

An independent laterite stone masonry tower at Prasat Suor Prat was found severely deteriorated with large inclination and selected as one of the conservation works by Japanese Government team for Safeguarding Angkor. The tower was dismantled not only for upper structure but also for foundation to study the character defining element of the masonry tower structure and mechanism of deformations and inclination. The authors describe the process of restoration work and application of new technologies including geo-textile used in compacted foundation soils with slaked lime under consideration of the principal of minimal intervention and yet to add basic safety requirement.

1. はじめに

アンコール遺跡群は、現在のカンボジア王国シェムリアップ市を中心とする多くの遺構が存在している。1992年にUNESCOの世界文化遺産に登録され、同時に「危機遺産」にも登録された^{注1)}。遺構は熱帯の過酷な自然環境や国内の混乱など様々な要因が複合的に影響し、崩壊や倒壊などの可能性のある非常に危険な状態にあった。また、保存のためのカンボジア国内の体制もきわめて不十分な状態であった。そのため、日本国政府はカンボジア政府の要求に応え、1994年にアンコール遺跡救済チーム（Japanese Government team for safeguarding Angkor, JSA 団長：中川武）を結成し遺構の保存修復を開始した。

アンコール・トム中心部にあるプラサート・スープラは、12基の塔とテラスで構成された遺構で、王宮から勝利の門に向かう道路を挟み北群と南群に分かれる（図1）。塔はラテライトブロックを主要建材とした組積造、外観は3層構成の構築物である。各塔は状態に違いはあるものの、いずれも傾斜や目地開きなどの異状が確認された。北群の最南に位置する塔（以下N1塔と呼称）は、背後に人造の沐浴池が配置されており、池側への傾斜と壁面の目地開きが12塔の中で最も大きく、倒壊が危惧された（図2）。そのためJSAはN1塔を保存修復工事の対象に選定した。本報告では、このN1塔の保存修復工事において必要とされた材料や工法の研究開発について報告する。

2. 基礎までを含めた全解体・再構築

JSAは創建時の「工法の保存」について真摯に検討する必要がある

図1 プラサート・スープラ配置図

¹⁾ 財文化財保存計画協会／早稲田大学理工学研究所 客員講師
(〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5 岩波書店一ツ橋ビル 13 階)

²⁾ 早稲田大学理工学術院 教授・工博

³⁾ 名城大学理工学部建築学科 教授・工博

⁴⁾ ㈱東京設計事務所 工博

⁵⁾ ㈱地域地盤環境研究所 工博

⁶⁾ 肥後地質調査㈱ 工博

¹⁾ Japan Cultural Heritage Consultancy / Lecturer,
Research Institute for Science and Engineering, Waseda Univ.

²⁾ Prof., Faculty of Science and Engineering, Waseda Univ., Dr. Eng.

³⁾ Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Tokyou Engineering Consultants Co., LTD., Dr. Eng.

⁵⁾ Geo-Research Institute, Dr. Eng.

⁶⁾ Higo Geo-Survey, Dr. Eng.

と考え、徹底した調査・劣化要因の解析に臨み、各種の試行と実験を経て実際の修復方法を策定することとした。

プラサート・スーブラ塔の修復はEFE0によるN3塔修復^{注2)}の先例がある。しかし解体修復工事が実施されたN3塔は、修復後50年ほど経過した現在、再度傾斜し、開口部材なども破断し危険な状態にある。このN3塔の傾斜は修復工事直後、もしくは修復工事中にも始まっていた可能性がある。基礎・基壇の修復を実施することなく上部構造を固化した結果、塔は再び傾斜してしまったものと考えられる。このような事例もあり、JSAでは基礎・基壇部の修復の必要性を認め、当初はハンドオーガーなどを使用した基礎基壇内部構造の調査を繰り返し実施した。また、全解体まではいかない部分的な解体での修復可否の検討やピサの斜塔における保存修復工事に用いられた手法など様々な可能性を検討した^{注3)}。しかし、基礎・基壇部の構成を理解し、塔の傾斜・損傷・崩壊要因を把握するためにはいずれも不十分な処方と考えられた。このため、将来解体修理工事が必要とされるであろう他の11の塔や、これに加えて、アンコール遺跡の保存修復における基礎・基壇の保存修復方法の新たな可能性を模索して、全解体という方法の採択に至った。基礎基壇部分解体時の調査の様子を写真1、2に示す。

写真1 基壇基礎断面状態（修復工事前東西断面）

写真1は東西断面の西側北面の様子。地山面まで基礎を掘り下げた状態で版築砂層断面が確認できる。また、西側基壇ブロックの組積状態も確認が可能。

写真2 基壇基礎断面状態（修復工事前南北断面）

写真2は南北断面の北側西面の状態。基壇内部の劣化状態や基壇ブロックの傾斜状態が確認できる。

図2 N1塔南北断面図（修復工事前）

3. 修復材料、修復方法

3.1 要求性能

多面的な各種調査・研究結果^{注4)}を受けて、基礎を含むすべてを解体の対象とし、塔の安定化のために独自に開発した消石灰改良土を使用し、オリジナル工法に近似する版築工法によって再構築を行った。基礎部の詳細調査および全解体・再構築は、これまでのアンコール地域での保存修復事業では先例をみないもので、今回の保存修復工事を通して得られた調査研究結果や経験は、今後のアンコール地域での遺構保存修復にとって大きな収穫であった。

この修復材料と方法の選定のための地盤工学的な調査や検討の詳細については別稿^{注5)}に譲る。本稿では、基礎基壇の修復材料である消石灰を混合した改良土、さらに創建時の工法を踏襲した版築構法とその補強にジオテキスタイルを用いた工法について述べる。

N1塔に関する修復計画のための条件として、以下の荷重条件が示された。

1. 上部構造体の総重量：約8,700kN.
2. 地中発生応力（地盤反力）は、各部位（高さ）で異なるが、
壁体直下：約430kN/m².
上部基壇直下：約270kN/m².
最下段ラテライトブロック直下：約170kN/m².
地山直上：約172kN/m².

この条件から、基礎基壇版築砂層の支持力は約270kN/m²以上が必要であることがわかる。

現状詳細調査の載荷試験（湿潤状態）では、降伏荷重として290

～340kN/m²（乾燥状態：460kN/m²以上）が得られている。この結果は、現状でも安全率が約1.1ということになるが、ラテライトブロックの劣化や風荷重、あるいは水浸・乾燥の繰り返し過程で応力集中が起こると、降伏荷重を超えて沈下が促進される懸念があるため、再構築用の版築砂層には安全率として設計条件の1.5～3.0倍以上確保するようにした。

3.2 配合

消石灰系改良土の開発にあたり、基材4配合（Mix.A～D）に対して消石灰の添加比率をそれぞれ3種類（5, 10, 15%）、合計12種類の配合にて検討している（表1に改良土の混合比率を示す）。

基材はいずれもN1塔の基礎基壇に創建時に用いられていた砂質土を基本材料とし、粘土、ラテライト質の赤土と細片を加えた混合土を用いている。ラテライト質の赤土は、FeやAlイオンの固化促進性能を期待したものである。これらの改良土に使用される各材料が、カンボジア国内で調達が可能であることも選定の重要な点である。図3は基礎基壇試料の粒度分布曲線である。表2および図4は添加材料の締め固め特性を示している。

各配合での試験結果の特徴を以下に列記する。

- 1. 養生期間が短期（7日）の場合、消石灰の添加率が10%（土材料湿潤重量を1としたときの比率）において最も強度が高く、最適添加率が存在する傾向が伺われるが、長期（90日）では、一軸圧縮強度は添加率の増加に伴い増加する。
- 2. 一軸圧縮強度と変形係数の関係では、材料条件によらず養生期間が増加すると、一軸圧縮強度や変形係数も増加する傾向を示す。また、一軸圧縮強度と変形係数には比例関係がみられる。図5にMix.Dの養生期間と強度増加の関係を示す。
- 3. 養生期間による乾燥密度の変化は少ないものの、短期養生（7日）では、含水比の低下と強度増加の関係が強く現れる。

表1 改良土混合比率

Specimens	Sand	Clay	Lateratic soil	S.L Content (%)
Mix. A	100	0	0	5, 10, 15
Mix. B	85	15	0	5, 10, 15
Mix. C	70	30	0	5, 10, 15
Mix. D	70	15	15	5, 10, 15

図3 基壇材料粒度分布曲線図

表2 各種材料土締め固め特性

	PSP N1 既存	Bayon NL 既存	改良 混合土	購入砂	粘土	ラテライト
最大乾燥 密度	1.882	1.898	1.882	1.642	1.743	1.669
最適 含水比	9.58	7.7	9.58	12.65	17.63	9.99

図4 基壇材料締め固め特性

図5 養生期間と強度増加 (Mix. D)

このような試験結果を踏まえ、今回修復工事ではN1塔の基壇内部の土砂と粒度分布が非常に近いD配合に消石灰10%を加えた改良土を用いることとした（図3に示すMix.Dの粒度分布曲線を管理曲線とした）。この改良土では、400kN/m² 載荷重時に約1cmの沈下条件に対応可能であることが確認された。既存版築砂層での載荷試験では、乾燥時で2cm、湿潤時では5cmの沈下量との結果が得られており、消石灰改良土によって変形係数が5倍以上（湿潤時）改善されている。

3.3 版築工法

N1塔の基礎基壇詳細調査により、創建時の工法として版築が用いられていることが確認された。修復工事においてもその工法を踏襲し、選定された消石灰改良土を版築の工法にて施工することとした。撤きだし時15cmほどの高さの改良土を、7.5cm程度（50%）まで突き固めることを繰り返す方法を採用した。

版築層は、各層の上部から圧力を加えて土砂を突き固める方法であるが、層の全厚を同一の密度にまで締め固めることは非常に困難である。そのため、層厚が大きくなりすぎないように留意して厚みを決定している。また、平滑な面に目荒らしを施し、層間のなじみを良くすることにも留意した。これは、室内試験時の試験体破壊状況の観察結果を参考にしている。一軸圧縮試験用の試験体も、高さ10cmの試験体を3層に分けて突き固めて作成したが、その際層間が

平滑なまま次の層を重ねた場合、製作不良のものでは、脱型時に層間部で分離してしまう。試験可能な状態でも、載荷後は層間部が滑るような破壊状況を示す。そのため、実施工では、突き固め後の表層を、熊手のような道具を用いてあえて目荒らしを施し、次の層を重ねるようにした。

写真3 消石灰改良土突き固め状況

突き固めは、3工程を踏む。撤きだし後、先端が棒状の道具で丹念に突き、次に、先端に金属板(15cm角程度)を取り付けた道具(現地では”像の足”と呼称されている)を用い、最後にエンジン式のランマーを使用した。最初から面積の広い道具を用いると、均一な密度が得られないため、3工程に分けて改良土の特性が十分発揮できるように施工している。

3.4 透水性

N1塔の基礎基壇部発掘調査では、基礎基壇内部に浸入した雨水排水処理の痕跡が確認されていない。屋根や窓開口に連子が存在した創建当時は雨水の室内への侵入もそれほど多量ではなかったと推察できる。したがって再構築に際しても、特別な排水方法は採らず、既存同様に自然浸透とすることとした。

創建時と同様の雨水処理方法を採用するために、基礎基壇内部に使用する消石灰改良土の透水性能が、既存版築砂層と比較して大きく異なることがなく、同時に浸水に対する安定性の確保に留意した。

まず既存版築砂層および再構築に用いた消石灰改良土のそれぞれの透水性を確認した。試験結果から得られた透水係数を以下に示す。

- ・ 既存版築砂層 1.0×10^{-3} cm/s
- ・ 消石灰改良土 (鉛直方向) 1.0×10^{-4} cm/s
- (水平方向) 2.0×10^{-4} cm/s

消石灰改良土による版築層では、既存版築砂層より1オーダー小さい透水係数となった。修復後も浸透流が均質で緩やかに基壇下方部に向かって流下することが推測できる。

消石灰改良土の一軸圧縮強度試験結果から得られた特徴などを前項にて示しているが、さらに上記排水機能と安定性に関する事項を以下に付け加える。

消石灰改良土は乾燥密度が増加するとやや強度も増加する傾向を示しているが、その増加率は明瞭ではない。これに対して、含水比と強度の関係では、7日間養生に対して28日間養生の強度は含水比の低下と強度増加が比例するような関係になる。一方、90日間養生強度は28日間強度に比べてかなり増加しているが、含水比には際立

った減少はみられないという結果が得られている(図6)。また圧縮強度のみでなく変形係数においても改善がみられるため、雨水浸透による強度低下や沈下に対する安定性は確保されるのである。

図6 含水比と一軸圧縮強度の関係

上記のとおり、雨水の浸透により基礎基壇内部は一時的に含水率が増加する状態となるが、今回採用した消石灰改良土による版築工法は、長期における乾湿の影響は少ないと考えられた。そのため創建時同様に特別な排水設備は設置せずとも、透水性と安定性を確保し雨水の自然循環が可能となる工法、材料であることを確認できた。

3.5 ジオテキスタイルの使用

版築工法による消石灰改良土の使用によって、塔安定のための要求性能には対応できることが予測できた。しかし、この消石灰改良土の短所として強度発現に時間を要することが懸念された。セメント系改良土などは、短期養生で相当の強度発現が確認されるが、消石灰系の改良土の場合、長期的にやや緩慢に強度が上昇する傾向がある。しかし強度発現を待つ余裕は工程的にあまりなく、施工直後に塔構造体の積み上げ工程を始めざるを得なかった今回の工事においては、この点が問題になるものと予想された。

さらにN1塔北側に隣接して池が存在するため、基礎周囲の支持力が不均等分布になることも懸念事項であった。そこで、偏心荷重によるN1塔の傾斜防止と荷重の均等分布、また斜面の安定に対する補強としてジオテキスタイルの採用が検討された。これにより基礎基壇内部に水平方向の引張力を付与し版築砂層の安定性向上が可能となる。今回の修復工事では、ジオテキスタイルを水平方向に3段設置している(図7,8,9)。

表3 ジオテキスタイルの仕様

種類	KJV-6000
基布素材	高強力ビニロン
幅	2,000 (mm)
重量	320.0 (g/m ²)
引張強度	59.0 (kN/m)
低減係数 (常時)	0.6 (耐アルカリ、施工時の破損、クリープ)

ジオテキスタイルの設計引張強さ $T_A = 59.0 \times 0.6 = 35.4$ (kN/m)

ジオテキスタイルの設置に際して特に以下の2点について検討した。一つは斜面の安定に対する検討である。アンコール遺構の特徴

図7 ジオテキスタイル検討断面図

図8 滑り面が地盤内にある場合の検討断面図

図9 基壇下面の滑りを含む場合の検討断面図

表4 安全率検討結果 (必要安全率は1.5以上)

検討ケース	無補強時 : F_{s0}	ジオテキスタイル による補強 : F_s	安全率の増加 : $F_s - F_{s0}$
滑り面が地盤内にある場合	1.545	1.650	0.105
基壇ブロック下面の滑りを含む場合	1.409	1.685	0.276

である迫り出し積みの工法による基壇ブロックは、下部基壇から上部基壇の上方に向かって平面積が小さくなり、断面的には斜面形状と考えることができる。さらに北側には池の護岸があり、やはり斜面形状をなしている。このため地盤の滑りを防ぐための方策を検討する必要があり、滑り面が地盤内にある場合（図8）と基壇ブロック下面の滑りを含む場合（図9）の両方での検討を行った（表4）。

いずれの場合においても安全率が増加している。特に基壇ブロック下面の滑りを含む場合で安全率の増加が大きい。

二つ目の検討項目である偏心荷重によるN1塔の傾斜についても、基壇ブロックの組積形状が問題となる。上部基壇が下部基壇との境界で内部に大きく迫り出しているため、上部からの荷重は版築砂層と下部基壇ブロックの両方に伝達される。しかし、この異種材料の支持力には差があり、版築砂層方向に転倒するモーメントが作用することになる。このため転倒モーメントに対する地盤の挙動およびジオテキスタイルの転倒防止効果について検討した。

検討は転倒モーメントをジオテキスタイルの引張りにより単独で分担する場合と、ジオテキスタイルと改良地盤で分担する場合について行った。この際、想定した奥行き1mあたりの転倒モーメントは $M=633\text{kN}\cdot\text{m/m}$ とした。

検討結果からは、消石灰改良土による版築砂層の強度が不安定な初期段階や局所的な地盤の不均一性のため、版築砂層とジオテキスタイルが一緒に挙動せず、ジオテキスタイル単独で転倒モーメントに抗する場合、強度的に全転倒モーメントの26%、沈下量にして40cm程度まではジオテキスタイルに分担させることができる。また、版築砂層とジオテキスタイルが一緒に挙動すると考えても、剛性に違いがありジオテキスタイルにはほとんど引張力が発生せず、版築砂層のみによって転倒モーメントを分担することが導かれた。

図10 N1塔南北断面図（修復工事完了後）

これらの検討結果は、創建時の工法である版築工法を極力踏襲するという、今回工事の方針におけるジオテキスタイルの使用目的に

合致する。ジオテキスタイルは、ビニロン製のため、その耐久性能は未確認である。したがって基本的には版築砂層のみの強度で遺構を安定状態に保持し、ジオテキスタイルはあくまで施工途中の短期的な補助的な手段と位置づけた。

以下写真 4, 5 にジオテキスタイル施工中の様子を、また図 10 に修復工事完了後の南北断面を示す。

写真 4

ジオテキスタイル敷込状況

写真 5

改良土の撒きだし突固め状況

4. まとめ

今回の保存修復工事ではこれまでのアンコール遺跡群での修復事例では実施されなかった材料、工法を採用したことを述べた。

文化財建造物の保存修復分野における材料や工法の進歩は著しいものがあり、その選択肢は EFEO によって地道な作業が開始された 100 年前とは大きく異なる状況にある。保存修復方法を取り巻く環境そのものの変化である。現代建築の手法や材料による修復工事もちろん可能であるが、文化財の価値を極力維持しながら、劣化部位を修復し、遺構を後世に伝えるべく保存するためには、現代の土木建築材料や工法をそのまま導入するのではなく、保存に適した材料や工法を慎重に選択する必要がある。今回の保存修復工事は、この理念を現実の問題として経験することになった。

具体的には、修復材料としてセメント系の材料に比べて初期強度発現は劣るものの、長期での耐久性や雨水の浸透性に期待が持てる消石灰系改良土の使用と、その短所を補うジオテキスタイルの導入である。工法的には創建時から施工されていた版築工法の継承、空積による再構築である。遺構を永く保存していくためには、周期的な修復が必須となるため、これらの材料や工法が繰り返して修復することを可能^{注6)}にすることも重要な点であった。

版築砂層用の消石灰系改良土は、既存土の分析、配合用材料の適合性確認や最適混合比などを実施前に算出した。ジオテキスタイルの導入は、背後に池が位置するという N1 塔配置条件の弱点を補強するためであり、また、消石灰系改良土の使用を前提として、その必要十分な強度発現までを補助する材料工法として考案された。決められた工期内の修復工事の完了にとってもジオテキスタイルの導入は必須の要件であった。

鉄筋コンクリートの採用に代表される近代、現代の保存修復方法に対し、採用した工法は素朴なもののようにみえるかもしれない。しかし、今回の工事で使用された材料と工法を選択し、実現するためには、先端の試験、分析技術が駆使されたことを付け加えておく。新たな材料や工法を使用する際には、周到な準備が必要であり、どれだけの研究成果をあげられるかが保存修復工事の成否に大きく係ることになる。

この一連の成果が、今後のアンコール遺構での保存修復工事において活用されることを、特に 12 基のほぼ同形式の塔が存在するプラサート・スーブラにおいては、今回の事例が参考となることを望む。また、今回のような全解体ではなく部分的な基礎基壇部位の保存修復にも対応可能な材料、工法の研究開発などは、今後の継続課題として必要であると考え。

最後に、今回の研究開発において多大なご協力を頂いた関係各位に謝意を表します。

注1) 各国の保存修復活動もあり、2004 年に危機遺産リストから除外された。

注2) フランス極東学院(EFFO:École française d'Extrême-Orient)によって、1950 年代に上部解体再構築工事が実施されている。

注3) 遺構の保存修復方法の選択肢として、上部構造体の現状を変更しない手法と解体再構築を伴う保存修復工事の両案を検討した。前者では上部構造を固めた上でのジャッキアップやアースアンカーの使用、大規模地盤改良などが検討されたが、遺構の基礎・基壇の研究が十分でなかった背景もあり、今回の保存修復工事で詳細な調査研究を実施すると共に、環境に適応しカンボジア人自身で継承される保存修復方法を選択した。

注4) 建築構造、土木設計、地質地盤工学、岩石学などの工学的な側面、さらに建築史、美術史、考古学も含めた調査研究が実施されている。

注5) 参考文献 4, 5, 6

注6) 遺構や建造物の劣化を完全に停止することは不可能である。そのため保存修復工事においては、継続して修復工事もしくは保存処置が実施できることが大切になる。母材の破壊や損傷ができるだけ少なく済み、周期的な点検および処置が可能な材料、工法を選択する必要がある。

参考文献

- 1) 中川武監修「アンコール遺跡調査報告書 1995～2004」 日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JSA). 日本国際協力センター. (1996-2005)
- 2) 中川武監修「バイヨン北経蔵保存修復工事報告書」 日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JSA). 日本国際協力センター, pp.405-414,445-450 (2000 年)
- 3) 中川武監修「プラサート・スーブラ塔保存修復工事報告書」 日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JSA). 日本国際協力センター, pp.127-196,269-298 (2005 年)
- 4) 岩崎好規・福田光治・中澤重一・赤澤泰・中川武「消石灰改良土によるアンコール遺跡基壇の再構築」地盤工学会, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.807-808 (2004)
- 5) 中澤重一・岩崎好規・福田光治・松原啓充・スレン・ソッキアン・赤澤泰・中川武「アンコール遺跡基壇の消石灰改良土による修復と土質特性」日本材料学会, 第 6 回地盤改良シンポジウム, pp.159-164 (2004)
- 6) 福田光治・中川武・赤澤泰・中澤重一・岩崎好規「カンボジアのアンコール遺跡の修復と地盤工学の役割」土と基礎, 53-3 pp.11-14 (2005.3)
- 7) 赤澤泰, 中川武, 溝口明則「プラサート・スーブラ塔の基礎・基壇の構成と技法 - アンコール遺跡」プラサート・スーブラ塔”の建築技法に関する研究(1)」(日本建築学会計画系論文集第 613 号 2007 年 3 月)

[2008 年 10 月 7 日原稿受理 2009 年 1 月 16 日採用決定]