

アユタヤ地域における洪水が 仏塔の不同沈下を与える影響に関する研究

The effect of flood on the differential settlement of the pagoda in Ayutthaya

千々和詩織¹・大矢綾香²・石田優子³・豊田祐輔⁴・藤本将光⁵・深川良一⁶

Shiori Chijiwa, Ayaka Oya, Yuko Ishida, Yusuke Toyoda, Masamitsu Fujimoto
and Ryoichi Fukagawa

¹京都大学大学院 情報学研究科 修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町36-1)

Master's Student, Graduate School of Informatics, Kyoto University

²立命館大学大学院 理工学研究科 博士課程後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Doctoral Student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

³立命館大学専門研究員 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Senior Researcher, Kinugasa Research Organization, Ritsumeikan University

⁴立命館大学准教授 政策科学部 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町2-150)

Associate Professor, College of Policy Science, Ritsumeikan University

⁵立命館大学助教 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University

⁶立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University

Ayutthaya, registered by UNESCO as a World Heritage Site in 1991, is one of the most popular tourist areas in Thailand. Ayutthaya, which is surrounded by three rivers, was flooded for more than a month in 2011. Many of the ancient pagodas are leaning and there's a possibility that previous damage will be worsened by the damage from this recent flood. In this study, we analyzed one of the differential settlement of the pagodas as well as the simulations on the extent of future ground subsidence. According to the results of our analysis, the pagoda will not subside rapidly from the effects of secular changes of the ground and flooding will have a small effect on the pagoda.

Keywords : *Ayutthaya, differential settlement, foundation strength, settlement analysis*

1. はじめに

世界では大規模な自然災害が頻発しており、人的被害だけでなく、文化遺産にも被害を及ぼしている。近年、文化遺産に災害が及んだ世界の事例として、2011年のタイ・アユタヤの洪水が挙げられる。タイの首都バンコクから約76km北に位置するアユタヤは、チャオプラヤ川、パーサク川、ロップリー川の3つの川に囲まれた、中洲内ならびに周辺地域である(図1)。アユタヤは、1350年の建都から417年間、33代の国王が統治したアユタヤ王朝の首都であった。チャオプラヤ川沿いの水路に恵まれたことから、17世紀初頭には、近隣アジア諸国をはじめ、中国やヨーロッパとも交易を行う最大の国際貿易都市として繁栄した。1767年に隣国ビルマ軍の攻撃により、アユタヤ王朝は滅びたが、現在でもアユタヤ王朝時代に建設された多くの仏教寺院や遺跡が残っている。これらの遺跡群は、1991年12月13日にUNESCOの世界文化遺産に指定された。

大洪水の起きた 2011 年は、まず 5 月に、過去 30 年の月雨量と比較すると 1.5 倍以上の月雨量を記録し、6 月下旬には台風 4 号 HAIMA、続いて 7 月下旬には台風 8 号 NOCK-TEN の影響で、7 月の月雨量は過去 30 年間で最高値を記録した¹⁾。アユタヤの河道には、流下能力を超える水量が上流から押し寄せ、大量の水が堤防を超え周辺への土地へと浸水した。アユタヤの中洲内に流入した水は、浸水深 0.5~2m に達し、住宅地域だけでなくアユタヤの世界遺産も、1 ヶ月以上に渡り浸水する被害となった。タイの洪水は日本の鉄砲水とは違い、非常にゆっくりと水位が上昇し、水が引くまでも長期間を要する。構造物が流されるような被害は少ないものの、長期間にわたり浸水することでの地盤や遺跡への影響が考えられる。

これまでアユタヤの洪水被害の実態調査が、壇上らにより計 3 回にわたって報告されている^{2), 3)}。壇上らの報告のなかでは、煉瓦の劣化や腐食の進行によって構造物の傾きが進行する可能性が高いことに言及しており、また、地盤沈下の原因の追究および対策を講じる必要性を提示している。アユタヤにある遺跡では、洪水発生以前より、レンガで構築された仏塔の不同沈下や、レンガそのものの劣化や破損が報告されていたが、経年の不同沈下に加え、近年の多発する洪水の影響により、不同沈下の進行や倒壊の危険性が高まることが考えられる。特に、仏塔など構造物が倒壊した場合は、文化的価値の損失はもちろん、周囲への影響や負傷者を出す可能性も危惧されるため、構造物の傾斜を予測し、今後何らかの対策をとる必要があると考えられる。そこで本研究では、現地調査と解析によってアユタヤ地域の仏塔の将来的な傾斜や沈下の予測を行い、洪水が地盤の圧密沈下に与える影響の検討を行った。



図1 アユタヤの位置 (Google map に加筆)



図2 アユタヤ地域とグラッサーイ寺 (Google map に加筆)

2. アユタヤ地域の仏塔の地質調査

(1) アユタヤ現地視察

著者らは、2014 年 2 月に実際にアユタヤを訪れた。本研究の解析対象とするグラッサーイ寺の仏塔は、アユタヤ中洲の外に位置しており、現在世界遺産には登録されていない寺である(図 2)。グラッサーイ寺周囲の地形は、勾配のない平坦な地形となっている。グラッサーイ寺の仏塔は、アユタヤ王朝時代に建設されたと報告されているため、他の世界遺産の遺跡と構造的や物質的に近いものであると考えられる。仏塔は、約 1~2 度傾いた状態で、レンガで造られた仏塔の表面は風化や変色、ひび割れが見られた(図 3, 図 4)。仏塔の周りは、仏塔が建設された後に、侵食を防ぐ目的で作られた建設年代不明の土台で囲まれている。また、仏塔の土台と上の塔の部分で、傾斜角や傾斜方向が大きく違ったことから、仏塔の建設段階から徐々に傾いていたと考えられる。過去に行われたアユタヤ芸術庁でのヒアリングでは、構造物自体の変形を抑えるための鉄筋とセメントによる補修工事やセメントで傾きを止めるための工事が数カ所で行われたという報告がなされている。また、世界遺産に登録されているアユタヤ歴史公園内には、レンガ造りの仏塔が多数現存しているが、仏塔や構造物の多くがグラッサーイ寺の仏塔と同様、傾いた状態であった。世界遺産ローカヤスタラム寺院には、2011 年洪水時のものと思われる水位跡が残っていた。また、片側に荷重がかかったこと

により発生したと推測される、構造物の亀裂もみられた。多くの構造物のレンガに著しい破損や風化が確認されたことから、アユタヤの遺跡は高温多湿の環境で、厳しい保存環境におかれているといえる⁴⁾。

(2) 表層中の地質調査

2015年1月に再びグラッサイ寺を訪れ、仏塔及び周囲の構造物の幅や高さの測定とレンガの単位体積重量計測と地表面の地質調査を行った。仏塔から約1.5m外の位置において手作業で地面を掘った。地表から深さ10cmまでは、土とともに5～15cmほどの砕けたレンガが掘り起こされた(図5, 図6)。深さ約10cmからは、レンガの含有量は減少し、大きさも小さくなっていった。約20cmまで掘ると粒子は細くなり、5cm～10cmほどの茶褐色の塊りが混じっていた(図7, 図8)。この塊りはスコップで簡単に割ることができたことから、固結した粘土であると考えられる。地表にはレンガを含む層があり、粘土層であることが確認された。調査時に行った芸術庁アユタヤ事務所のディレクターへのヒアリングでは、地中の砕けたレンガは仏塔の建設、修復時に捨てられたものであるということであった。



図3 グラッサイ寺の仏塔



図4 グラッサイ寺仏塔の周囲



図5 地表付近の層に含まれるレンガ



図6 地表付近の層に含まれるレンガの大きさ



図7 掘り起こしたレンガ



図8 深さ約20cmに含まれていた粘土の塊り

3. 圧密沈下解析

(1) 解析の概要

本研究では、PLAXIS 社が開発した市販の地盤解析ソフトウェア PLAXIS を用いて、グラッサーイ寺における圧密沈下を再現する。PLAXIS では、有限要素法 FEM (Finite Element Method) が使用されている。FEM とは、方程式が定義された領域を小領域（要素）に分割し、各小領域における方程式を比較的単純で共通な補間関数で近似する方法である。本研究では、軟弱な粘土地盤に仏塔を構築した場合を考えて、関口・太田による弾粘塑性モデルを適用する。

(2) 降伏関数と計算条件

a) 関口・太田モデル^{5),6)}

本研究で適用する関口・太田モデルは、カムクレイモデルを土台にしており、異方圧密された土の挙動を説明することができる弾粘塑性構成式である。図 9、図 10⁶⁾に弾塑性構成モデルと弾粘塑性構成モデルの有効応力経路を示す。時間依存性（粘性）を考慮した構成モデルは、Sekiguchi and Toriihara (1976)⁷⁾による一次元圧密中の二次圧密挙動のモデルが基礎となっている。

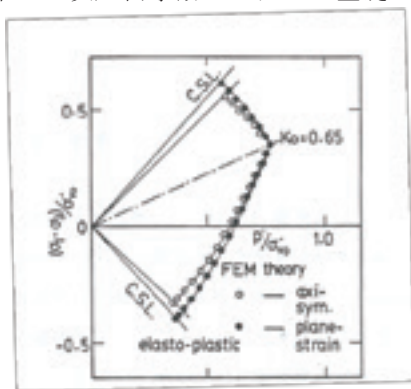


図 9 弾塑性構成モデルの有効応力経路⁶⁾

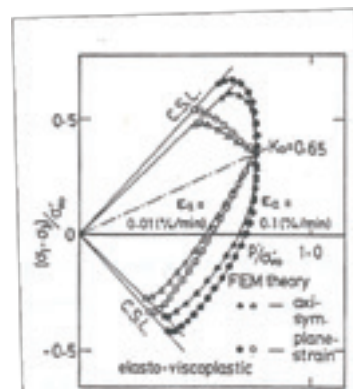


図 10 弾粘塑性構成モデルの有効応力経路⁶⁾

関口・太田モデルの降伏関数 f は、次式で定義される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* \quad (1)$$

$$\eta^* = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right) \left(\frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right)} \quad (2)$$

ここで、 λ : 圧縮指数、 κ : 膨潤指数、 e_0 : 初期間隙比、 p' : 平均有効応力、 p'_0 : 初期平均有効応力、 D : ダイレイタンスー係数、 s_{ij} : 偏差応力テンソルを示す。 η^* は、せん断応力の増加に伴い大きくなるスカラー量である。添字の 0 は圧密終了時の基準状態を示している。

また、粘塑性ひずみ速度テンソル ε_v^{vp} は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_v^{vp} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{v_p}{\alpha}\right) \right\} \left(\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* \right) + v_0 \exp\left(\frac{f - v_p}{\alpha}\right) \quad (4)$$

ここに、 v_p : 塑性体積ひずみ、 v_0 : 初期体積ひずみ速度、 α : 二次圧縮係数である。

関口・太田モデルは、三軸圧密試験、三軸せん断試験による実験結果を基に理論が組み立てられているが、有限要素法による解析結果と実測値の対比から、塑性指数を中心とした入力パラメーター決定チャートが飯塚・太田⁶⁾により提案された。本研究では、圧縮指数、膨潤指数、ダイレイタンスー係数、静止土圧係数、2次圧密係数、非可逆比を、塑性指数を中心とした入力パラメーター決定チャートに従って決定した。

b) 地盤モデル

本研究で使用する地盤のモデルやパラメーターは、タイ・タマサート大学より提供された、アユタヤ近隣地盤のボーリングデータを基に決定している。

図 11 に解析モデル地盤を示す。層厚 21.45m の地層は、4 つの層に分割した。層厚 10.0m を境に、粘土層と砂層で上下に大別できるが、物理的特性を考慮して、粘土層をさらに 3 層に細分割した。地表からの深さ 0~2.5m の 1 層目は締め固められた粘土層、深さ 2.5~6.0m の 2 層目は比較的固いシルト層、深さ 6~10m も 1 層目と同様の粘土層である。本解析では 1 層目と 3 層目は、同じ層であると考え、地盤のパラメーターは同一のものを入力した。入力パラメーターの一覧を表 1 に示す。

解析モデル地盤の変位境界条件は、側面について水平変位を拘束せず、底面について水平、鉛直変位とも固定した。水理境界条件は、砂層では排水、粘土層では非排水の条件としている。また初期の地下水位面は、ボーリングデータより -3.5m とする。レンガの単位体積重量は、グラッサイ寺を訪れた際に現場にて計測することにより得た値である。

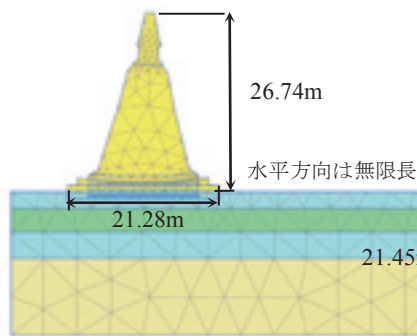


図 11 解析モデル地盤

表 2 レンガのパラメータ⁸⁾

レンガ	
材料モデル	線形弾性
体積	1196.321cm ³
密度	1.546 g/cm ³
ヤング率 E	5.0 × 10 ⁵ kN/m ²
ポアソン比 μ	0.07
単位体積重量	15.15kN/m ³

表 1 入力パラメータ

	0~2.5m	2.5~6.0m	6.0~10.0m	10.0~21.45m
飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	19.83	19.47	19.83	22.66
不飽和単位体積重量 γ_{unsat} (kN/m ³)	18.83	18.47	18.83	20.66
液性限界 LL (%)	40.76	48.42	40.76	-
液塑性限界 PI (%)	18.61	17.87	18.61	-
圧縮指数 C_c	0.28	0.35	0.28	-
膨潤指数 C_s	0.07	0.09	0.07	-
圧縮指数 λ^*	0.12	0.15	0.12	-
膨潤指数 κ^*	0.03	0.04	0.03	-
内部摩擦角 ϕ'	30.94	31.21	30.94	30.00
クリティカルステートパラメーター M	1.24	1.25	1.24	1.20
二次圧縮係数 α	0.0037	0.0044	0.0037	-
非可逆比 A	0.71	0.72	0.71	0.69
ダイヤタンスー係数 D	0.04	0.05	0.04	-
土粒子タイプ	Clay	Clay	Clay	Sand
>2μm (%)	70.00	70.00	70.00	4.00
2μm~50μm (%)	13.00	13.00	13.00	4.00
50μm~2mm (%)	17.00	17.00	17.00	92.00
透水係数 k (m/day)	0.048	0.048	0.048	7.130

c) 解析手順

洪水なしの場合と洪水が起きた場合の 2 ケースについて、100 年後の将来圧密沈下解析を行った。まず、現在までの状態を再現するため、先行圧密を再現した。グラッサイ寺の正確な建設年代は不明であるが、アユタヤ王朝時代 (1351 年~1767 年) に建設されたと報告されているため、建設は 550 年前と仮定した。仏塔モデルを載荷し、550 年間圧密することで、先行圧密の地盤とした。次に、洪水なしの場合では、仏塔モデルを先行圧密後の地盤に載せたまま、100 年を 10 フェーズ 10 年ずつに分け、100 年間の圧密を再現した。

洪水が起きた場合、2011 年の大洪水と同規模の洪水が 2 回発生すると仮定した。



図 12 洪水が起きた場合の解析フローチャート

現在の状態までは経年変化のみの場合と同様の手順である。先行圧密を再現した後、50年に1度洪水を2回再現した。図12に洪水が起きた場合の解析手順を示す。

(3) 解析結果と考察

a) 洪水がない場合の圧密沈下解析

解析手順に従って、圧密沈下解析を行った結果、初期状態から先行圧密終了時（現在）の状態までの 550 年間では、地盤が最大 37.39cm 沈下する結果となった。その後、現在から将来 100 年後の圧密では、最大 37.39cm の沈下量のままで変わらなかった。各地点の沈下量は A 点で最小となり、C 点で最大となった。また、仏塔の傾斜角については、先行圧密終了後（現在）の時点で最大で傾斜 2.8°であり、近年の実測値は北方向に 2.3°と報告されているため、解析結果は実現象に比して若干過大評価となっている。圧密は初期状態から約 55 年間で収束しているため、初期状態に傾いた仏塔を载荷した影響により、圧密と傾斜が発生したと考えられる。圧密が終わると、圧密の進行はほとんどない状態となるため、現在から 100 年後までの間、経年変化のみでの圧密は進行しないと考えられる。変形図と変位図を図 13～16 に示す。

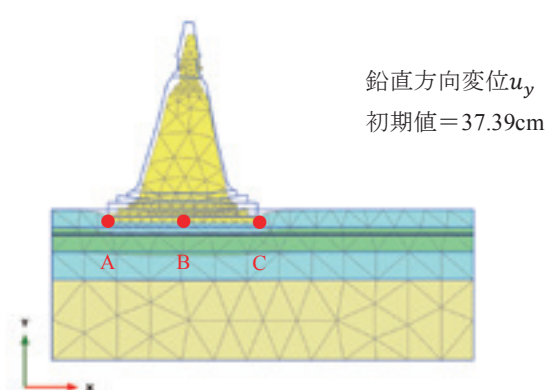


図 13 先行圧密終了時（現在）の変形図

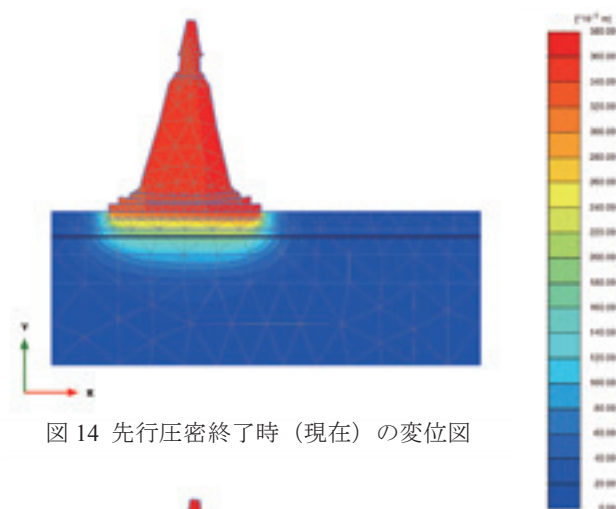


図 14 先行圧密終了時（現在）の変位図

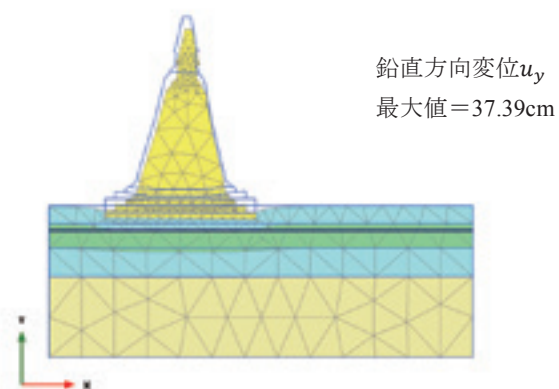


図 15 現在から 100 年後の変形図

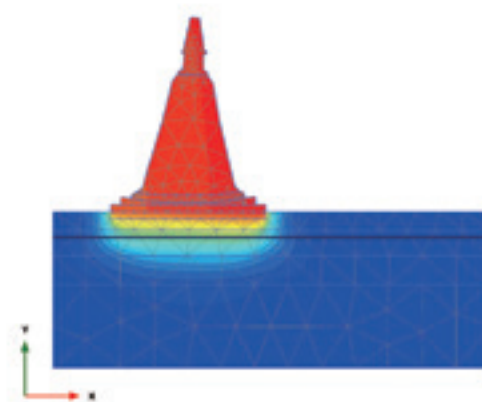


図 16 現在から 100 年後の変位図

b) 洪水が起こった場合の圧密沈下解析

先行圧密後（現在）と1回目の洪水後と比較すると、洪水後に最大約2.8mmの沈下が発生する結果となった。また、その後2回目の洪水後では、1mm増えて3.8mm先行圧密時より沈下するという結果となった。これは水位の下降過程で、地盤の浮力が変化し、地盤内のせん断応力が増加したことにより、圧密沈下が生じたと考えられる。結果からは、洪水が圧密沈下に与える影響はあるが、その程度は小さいといえる。仏塔の傾斜角については、先行圧密後の最大値2.80°、洪水後の最大値2.81°となっており、洪水による傾斜への影響はほぼないといえる。2回目洪水後の変形図を図17、変位図を図18に示す。

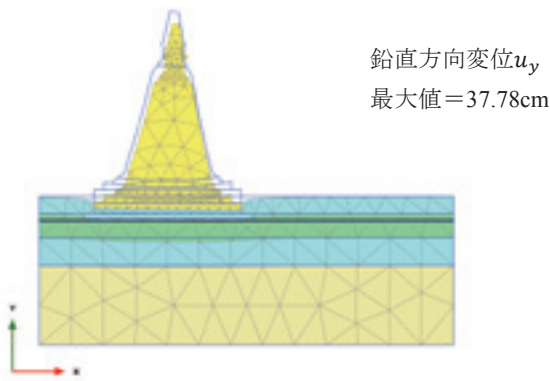


図 17 2 回目洪水後の変形図
(現在から約 50 年後)

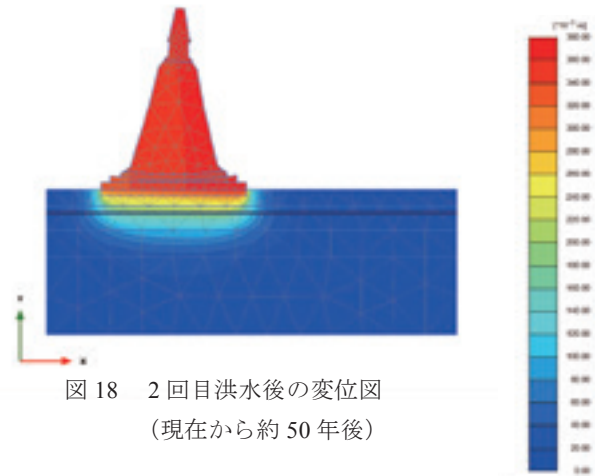


図 18 2 回目洪水後の変位図
(現在から約 50 年後)

c) 洪水がない場合と洪水が起こった場合の比較

将来的に洪水が発生しない場合（経年変化のみの場合）と洪水が発生する場合の比較を行い、表 18 にまとめた。各節点での、(圧密差) = (洪水ありの変位) - (洪水なしの変位) を示す。各地点での y 方向の沈下量の最大値は A 地点 3.1mm、B 地点では 3.3mm、C 地点では 3.8mm であり、C 地点の方向につれて沈下量が大きくなっており、不同沈下が少しずつ進行していると推定される。また、いずれの点でも洪水ありの場合のほうが変位が大きいことから、仏塔の沈下に対する洪水の影響があるといえる。数値としては小さいが、洪水 1 回目、2 回目ともに圧密が進行していることから、今後洪水が頻発すれば、圧密は少しずつではあるが、進行していくと考えられる。

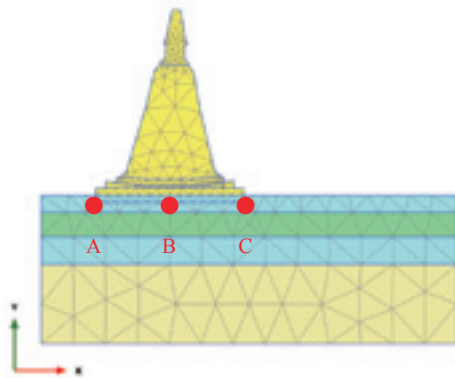


図 19 洪水時の各節点での変位と変位差

表 3 経年変化のみと洪水時の比較

A 地点	変位 u_x (cm)			変位 u_y (cm)		
	洪水あり	洪水なし	差	洪水あり	洪水なし	差
50 年後(洪水 1 回)	0.39	0.48	0.094	-32.72	-32.5131	0.211
100 年後(洪水 2 回)	0.385	0.479	0.094	-32.8243	-32.5131	0.311
B 地点	変位 u_x (cm)			変位 u_y (cm)		
	洪水あり	洪水なし	差	洪水あり	洪水なし	差
50 年後(洪水 1 回)	0.51	0.59	0.082	-35.6584	-35.42	0.241
100 年後(洪水 2 回)	0.511	0.62	0.109	-35.754	-35.42	0.337
C 地点	変位差 u_x (cm)			変位 u_y (cm)		
	洪水あり	洪水なし	差	洪水あり	洪水なし	差
50 年後(洪水 1 回)	0.639	0.71	0.074	-37.6669	-37.38	0.283
100 年後(洪水 2 回)	0.639	0.74	0.100	-37.7662	-37.38	0.383

4. おわりに

本研究では、洪水が頻発しているアユタヤ地域の仏塔の将来的な傾斜や沈下の予測と、洪水による影響を明らかにするため、現地調査とアユタヤ近隣のボーリングデータを基に圧密沈下解析を行った。解析では、洪水の有無による2ケースについて行い、結果の比較を行った。本論文の成果を、以下に順番に示す。

- (1) 1回目の現地調査では、アユタヤ地域の仏塔や構造物が傾斜、ひび割れなどの状態にあることを確認した。
- (2) 2回目の現地調査では、地表付近には砕けたレンガが含まれていることを確認した。また、芸術庁アユタヤ事務所のディレクターへのヒアリングで、地中の砕けたレンガは仏塔の建設、修復時に捨てられたものであることがわかった。
- (3) グラッサイ寺周辺の地表面付近の土は、水を含むと軟弱になる粘土であることが確認された。
- (4) アユタヤ近隣のボーリングデータを基に、関口・太田モデルを用いて圧密沈下解析を行った。その結果、現在から100年後の圧密では、ほぼ圧密・傾斜の進行は見られず、経年のみの圧密では倒壊の危険性は低いと考えられる。
- (5) 洪水が起きた場合の圧密沈下解析では、水位の下降過程でせん断応力が増加することにより、圧密沈下が生じたと考えられる。
- (6) 洪水が起きた場合の結果から、多少洪水による不同沈下への影響があることがわかったが、仏塔が倒壊するほどの大きな影響はないと考えられる。

今回解析で使用した地盤データは、アユタヤ近隣のボーリングデータであるため、グラッサイ寺の仏塔周囲の地盤とは異なる可能性がある。また、仏塔は建設の途中段階で傾いたと推定され、仏塔下の地盤の状態が水平等厚でない可能性も考えられるため、今後、標準貫入試験を行い、より正確な仏塔周囲の地盤データを得ることが望ましい。そして、現地で得た地盤データを基に圧密沈下解析を再度行うことにより、より正確な傾斜や沈下の予測を行うことができると考えられる。

謝辞：本研究の調査は、歴史都市防災研究所の2014年度私立大学等経常費補助金特別補助の支援を頂き実施いたしました。関係者の各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 沖大幹：チャオプラヤ川における2011年の大洪水とタイの水害
http://www.sonpo.or.jp/archive/publish/bousai/jiho/pdf/no_250/yj25018.pdf (2014年2月5日現在)。
- 2) 檀上徹, 上野祐生, 谷口仁士, 深川良一, 里深好文: 世界遺産アユタヤの洪水調査ならびに文化遺産防災へ向けた提案, 歴史都市防災論文集, Vol.6, pp.329-334, 2012.
- 3) 檀上徹, 赤澤史顕, 田中七裕, 藤本将光, 豊田祐輔, 谷口仁士, 深川良一, 里深好文: タイ・アユタヤの文化遺産防災に向けた現地調査と洪水解析, 歴史都市防災論文集, Vol.7, pp.73-80, 2013.
- 4) 長谷川哲也, 畑中重光, PRINYA Chindapasirt, THANUDKIJ Chareerat: 1746 タイ国アユタヤ遺跡の劣化調査と修復方法の提案(調査・計画), 日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集, Vol.2006, pp.191-194, 2006.
- 5) 飯塚敦: 表題軟弱地盤の変形安定解析に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1988.
- 6) 飯塚敦, 太田秀樹: 弾・粘塑性有限要素解析における入力パラメーターの決定手順, 土と基礎, Vol.35, No.9, p.101, 1987.
- 7) Sekiguchi H. and Torihara: Theory of one-dimensional consolidation of their rheological properties, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp27-44, 1976.
- 8) 渡辺 和明, 永尾 拓洋, 花里 利一, 江草 弘章: 石・レンガ積み橋脚の耐震性に関する研究, 大成建設技術センター報, Vol.39, No.10, p.5, 2006.