

タイ王国アユタヤの仏塔傾斜に関する研究

2018年1月20日(土)

立命館大学 総合科学技術研究機構 専門研究員
石田優子

研究概要と経緯

研究概要

研究の背景: 仏塔が傾斜している。保存状態が良くない。

研究の目的: 傾斜の原因を調査する。対策を考える。

▶ 原因推定: 地盤の不同沈下が、仏塔の傾斜を引き起こしているのではないかと推定されている。

研究の方法: 不同沈下の原因として考えられる、

① 支持地盤の強度

② 地下水位の変動

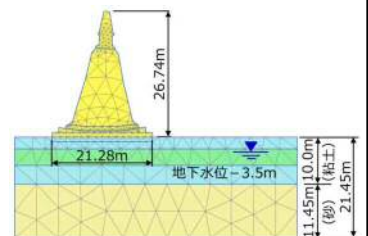
③ 降雨

④ 洪水

をモデル化し、数値解析で原因を解明する。



これまでの成果(1)



<2014年度>

目的: 今後発生する洪水が仏塔の傾斜に及ぼす影響を検討

方法: 二次元FEMの圧密沈下解析により、

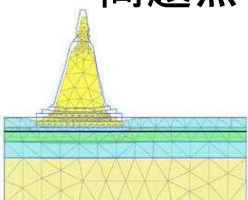
- ・圧密過程(初期状態は不明)
- ・2011年の洪水が今後100年の間に2回発生する場合と発生しない場合を比較することで洪水の影響を検討

結果: 現地盤に仏塔を載荷すると圧密は55年で収束。

洪水が発生した場合、約2~4cm沈下増。

問題点: 仏塔内部の空洞を考慮せず、上載荷重を過大評価。

研究対象地の地盤データがないので、同じアユタヤ県の別の場所のデータを入手し、シミュレーション。



これまでの成果(2)

<2015年度>

- ・研究対象地(Wat Krasai)の地盤調査許可を得た。
- ・既存の調査データ(地盤、仏塔、修復時写真等)を入手。
- ・地盤調査業者が、2転、3転した後決定し、対象地の2地点でボーリング調査を実施。
- ・ボーリング孔(1孔)にて地下水位を、また雨量の計測を開始した。



▶ タイでの人事異動のサイクル、仕事のやり方、コネクションの作り方が、分かって来た。信頼関係がないと依頼した事項は、次に催促するまでほぼ実行されない。こまめにもお願いしても、レスポンスがない場合もあるので、実際に会いに行き、その場でやってもらえる状況づくりに努めた。研究体制の基盤が、年度末にようやく整った。

現地の協力体制

①芸術庁アユタヤ第3事務所:現地調査許可

②アユタヤ歴史公園事務所:現地調査許可、計測支援

③タマサート大学:コーディネート、調査支援

④カセサート大学:調査、試験実施

→大学間もしくは大学の部局間等でMoUを締結し、共同研究を継続させたい意思を双方で確認。

⑤SEAMEO-SPAFA: 情報提供、研究支援

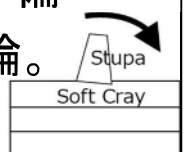
これまでの成果(3)

<2016年度>

- ・大気圧計測を開始、地下水位データの回収とメンテナンス
(約5ヶ月でロガー用の電池交換が必要)
- ・地盤調査報告書の入手、支払い
- ・室内土質試験の依頼



◇仏塔建設中の不具合により、偏心荷重がかかった場合の傾斜を感度分析。→解析結果と実際の状況を比較し、偏心荷重だけでは、仏塔傾斜の原因になり得ないと結論。



解析: 0.614°
現状: 約2°

▶ 地盤調査方法は非常にアナログであった。

サンプリング方法、コアの大きさも日本で一般的なものとは異なっていた。
しかし、調査業者はアユタヤの他の箇所でも実績があるとのことなので、タイではこの精度が一般的と思われる。

これまでの成果(4)

<2017年度>

- ・室内土質試験の実施、報告書の入手。
(抜けている部分は、現地でサンプリングし、実験施設を借りて自分たちで試験をした)2017年11月。
- ・最下層(No Sampling)のパラメータ推定の根拠資料収集。
- ・地下水位と雨量データを回収し、メンテナンスを実施。バックアップの雨量計を増設したが、洪水の影響?で故障し撤収。
- ・仏塔の傾斜をモニタリングするための許可と協力を取り付けた。



▶ ①地盤の状況と仏塔傾斜

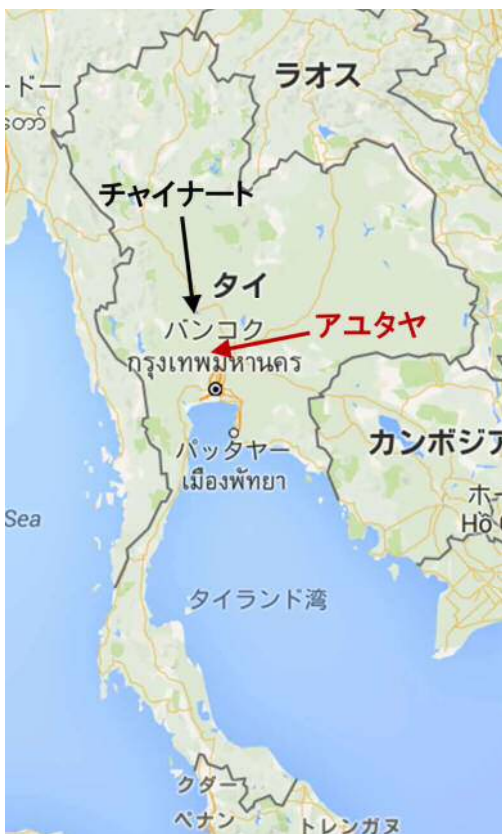
②降雨と地下水位の変動

③圧密再現解析のための、地盤の初期パラメータ推定

本日の報告

本日の報告

1. アユタヤ遺跡



google map に加筆

- ・アユタヤは首都バンコクから北に約86km
- ・ウートン王によって1350年に建都されたアユタヤ王朝の都
- ・1767年ビルマ軍に陥落されるまでの417年の間、周辺のチャオプラヤー川等の水運に恵まれたインドシナ最大の国際貿易都市として繁栄
- ・3つの宮殿と約400の寺院
- ・1991年にUNESCOによって世界文化遺産に登録
- ・年間300万人以上が国内外から訪れるタイの主要観光都市

2.Wat Krasai

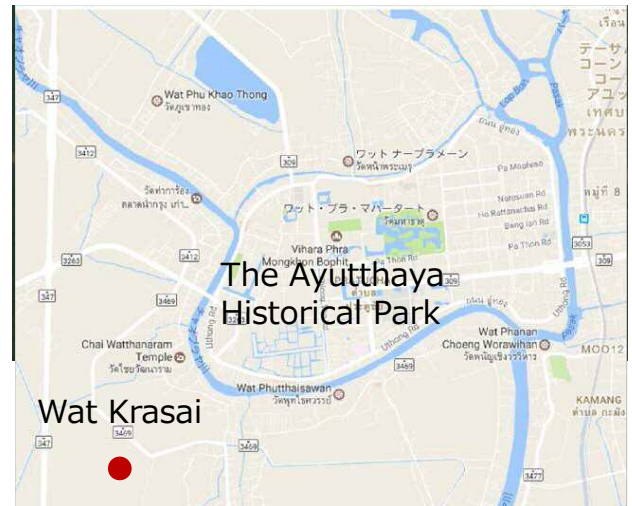
- 世界遺産指定区域の外側にある
- 世界遺産拡張申請エリア内にある
- 2013年に仏塔の基壇と釣鐘部以下、周囲の塀と神殿の修復



Before repair (Google earth 2010.3.20 shooting)



After repair (Google earth 2013.2.20 shooting)



Google map

修復時の状況



内部は中空になっており、入口があるが、修復時に塞がれてしまった。

基壇部は沈下し、埋没している？



地中には、壊れたレンガブロックも多く埋まっている。

3.地盤調査

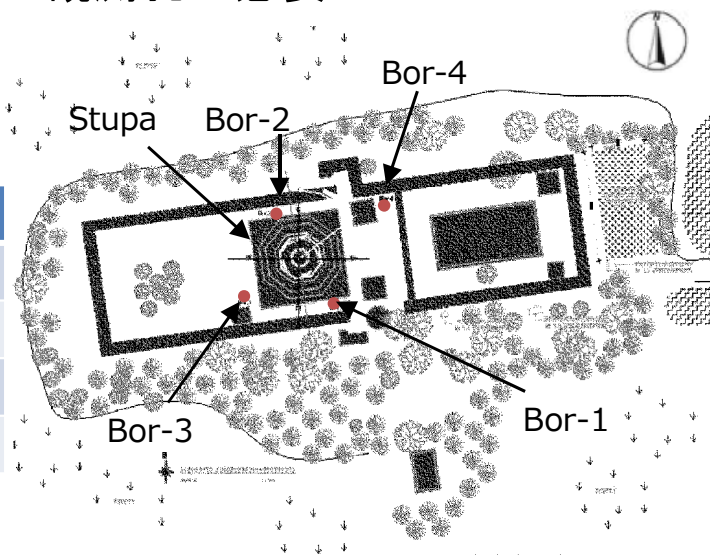
- Bor.1、Bor.2は、アユタヤ歴史公園事務所が実施。
- Bor.3、Bor.4で、追加で実施。
→室内土質試験のための、サンプリングが必要。
→地下水位を計測するための観測孔が必要



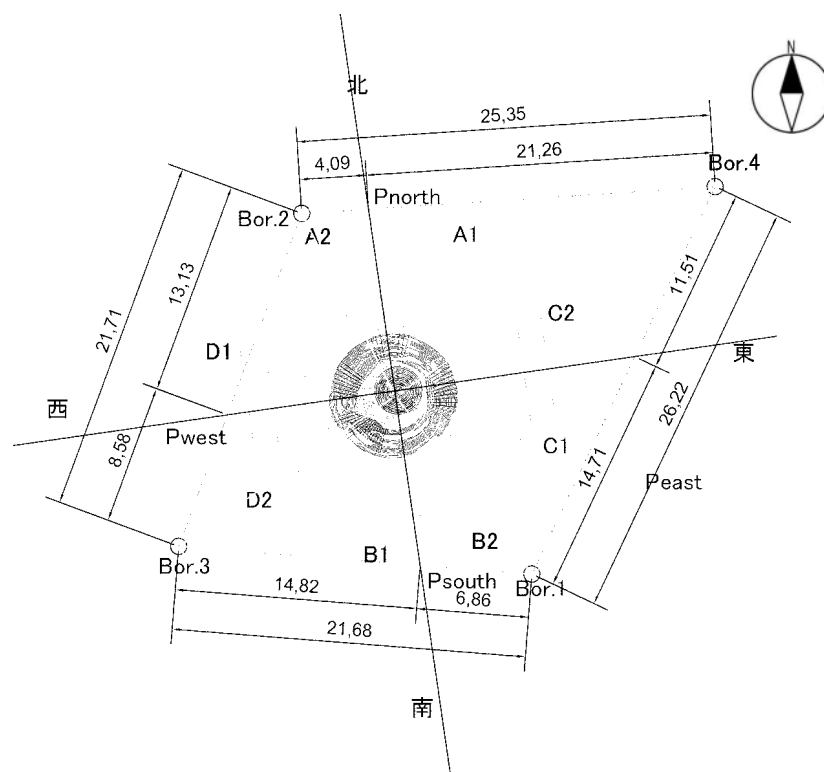
- Bor.3にて地下水位を計測。

	調査深度(m)	地下水位(GL-m)
Bor.1	25.95	3.20
Bor.2	27.45	3.20
Bor.3	21.45	2.00
Bor.4	30.45	2.10

※調査時期は、いずれも3月。雨期、乾期の別は変わらないはずだが、地下水位が異なる。

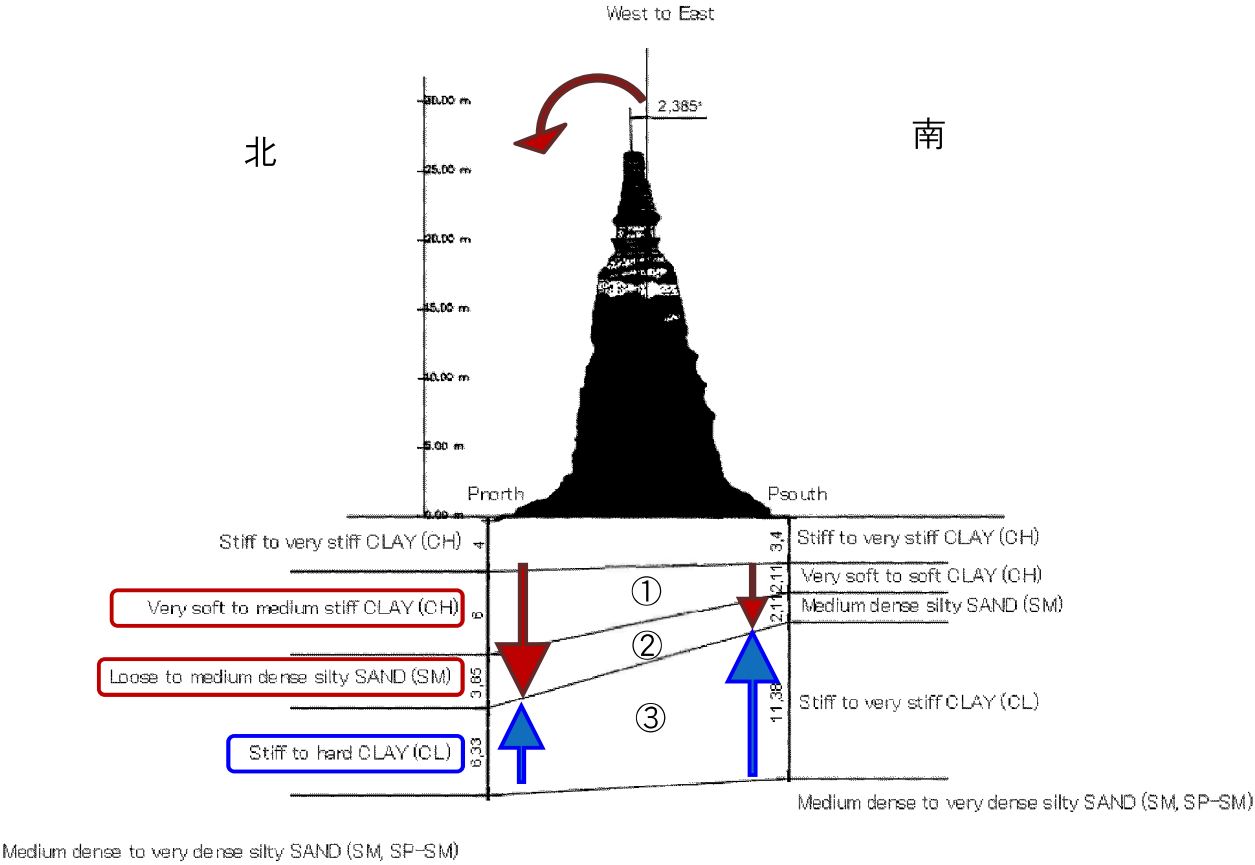


推定横断図の作成

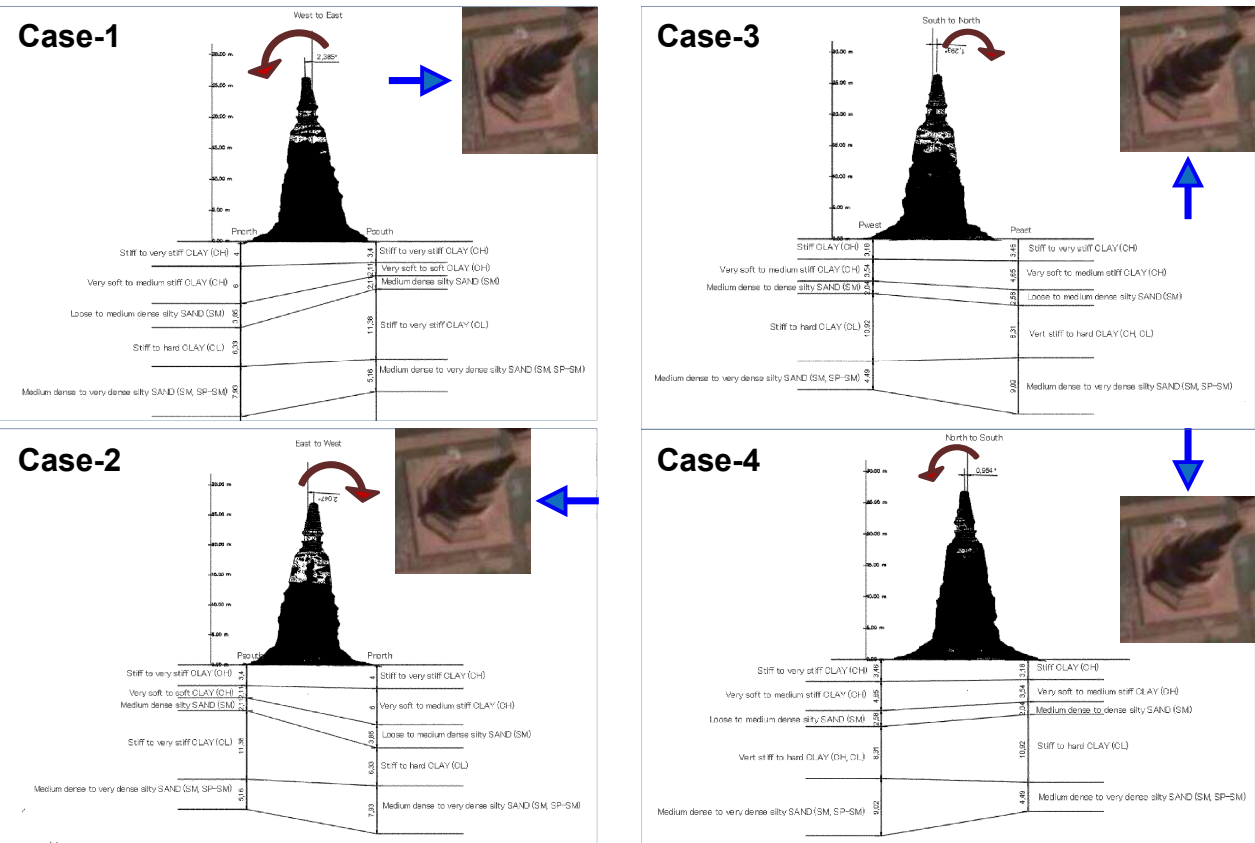


交差する地盤調査データを結んで、地盤の推定横断図を作成

仏塔基壇直下の層厚を算出



4方向で検討

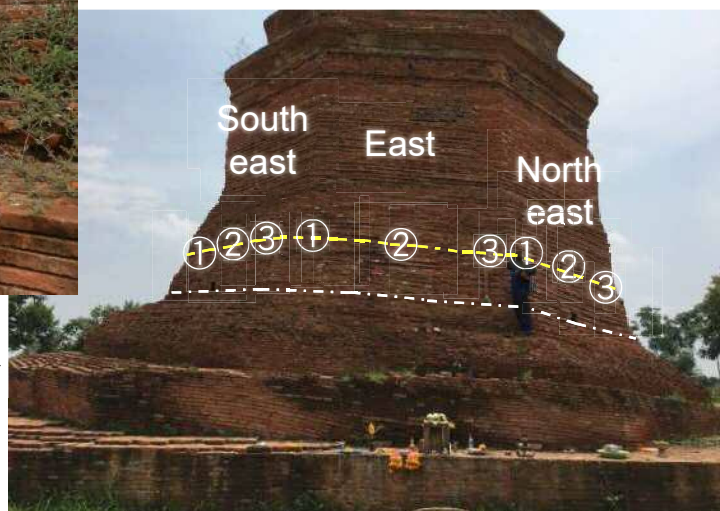


仏塔傾斜の計測



- ・仏塔の基壇部は後から付け足されている。
- ・仏塔下端と上部では、傾きが異なる。
- ・仏塔に開いた四角い小さい窓（幅約15cm、高さ約20cm弱）から、内部の状態を目視。修復前のレンガと修復後のレンガの傾斜が整合することを確認。

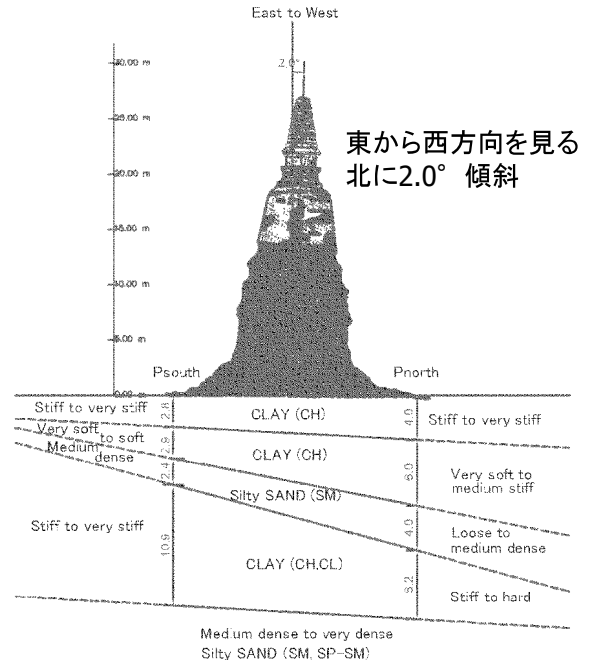
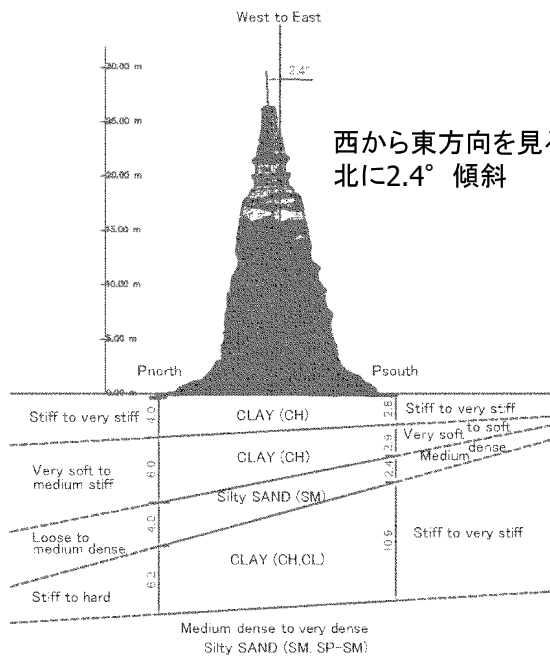
デジタルクリノメーターで計測



8角形のボディの8方面において、
両端と中央部で、傾斜を計測。

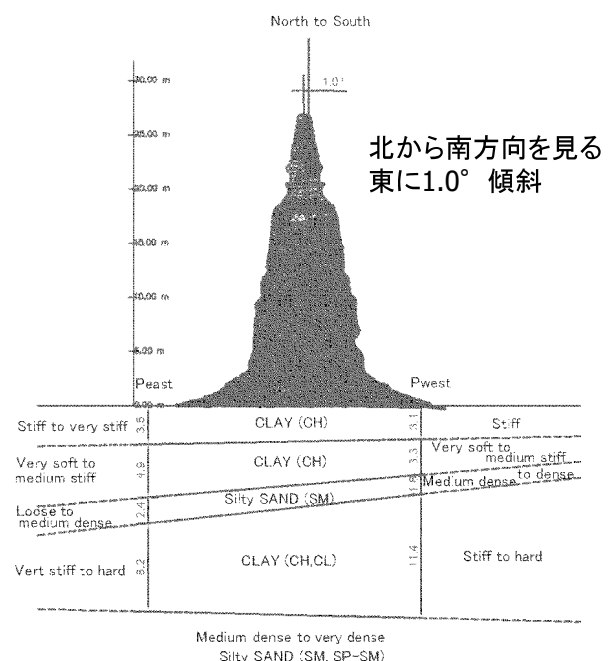
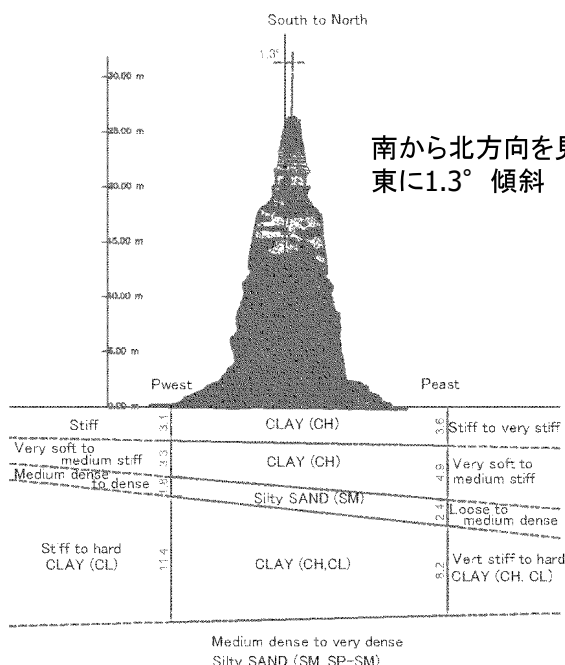
4.地盤の状況と仏塔傾斜(1)

- 第2、第3の軟らかい層が厚い方に傾斜している。
- 第4の固い層が薄い方に傾斜している。



4.地盤の状況と仏塔傾斜(2)

- 第2、第3の軟らかい層が厚い方に傾斜している。
- 第4の固い層が薄い方に傾斜している。



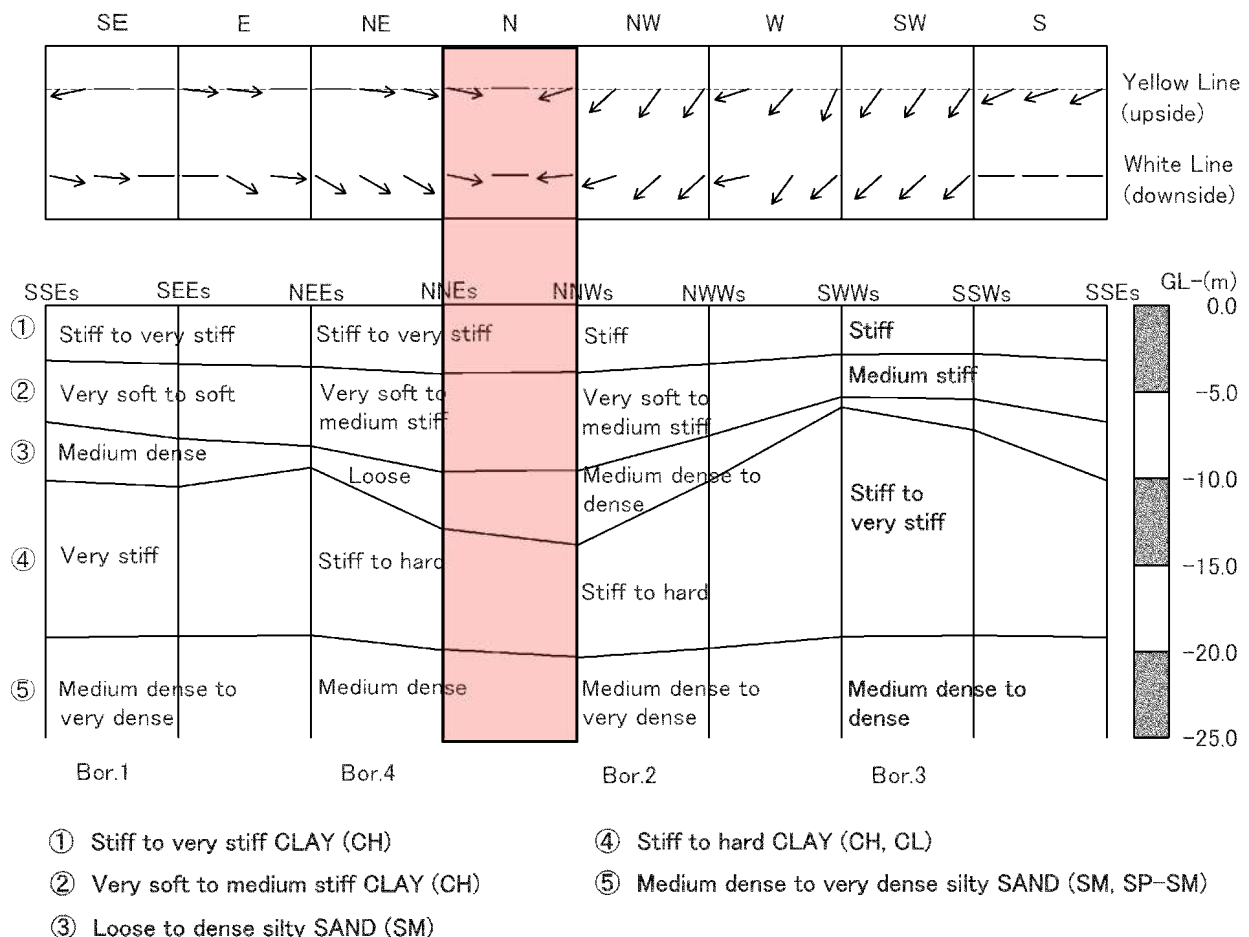
4.地盤の状況と仏塔傾斜(3)

- 4方位で層厚差と傾斜度を整理したところ、層厚差が大きい方が、傾斜度が大きくなっていた。

→仏塔の不同沈下の原因として、軟弱層の厚さの違いが影響していると推察される。

	傾斜度(°)	層厚差(m)		
		第2層(軟)	第3層(軟)	第4層(硬)
西から東 (北傾斜)	2.4	3.1	1.6	4.7
東から西 (北傾斜)	2.0	3.1	1.6	4.7
南から北 (東傾斜)	1.3	1.6	0.6	3.2
北から南 (東傾斜)	1.0	1.6	0.6	3.2

8方位の傾斜と土層厚の展開図



5.降雨と地下水位変動(1)



地下水位: Wat Krasaiの
Bor.3孔に穴あきストレ-
ナーを設置して、2016.7か
ら計測。

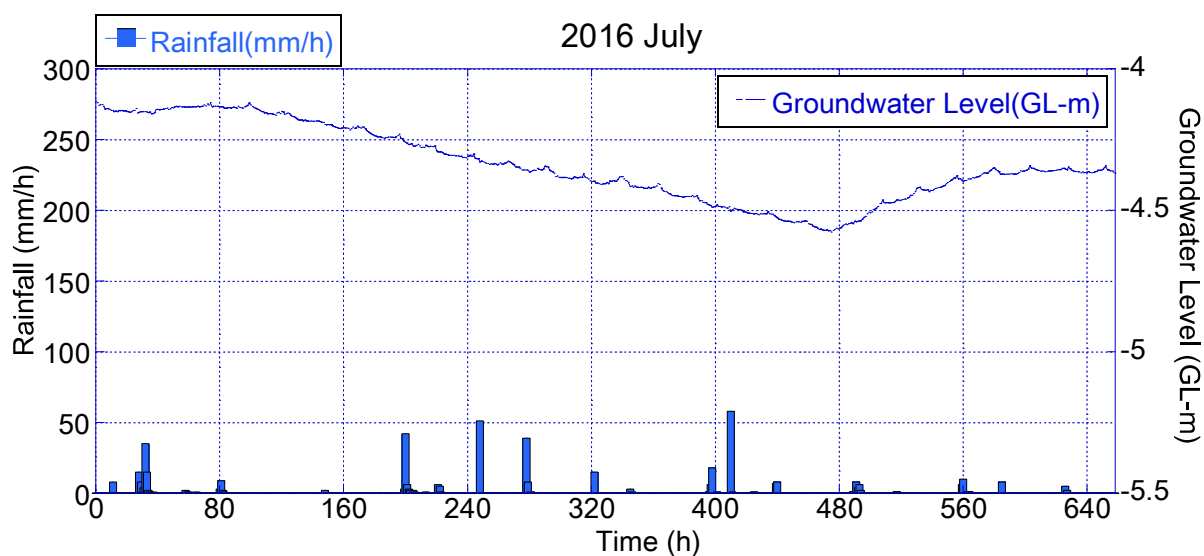


雨量計: アユタヤ歴史公
園事務所の屋上に設置

・地下水位観測地点とアユタヤ歴史
公園事務所は、約3km離れている。

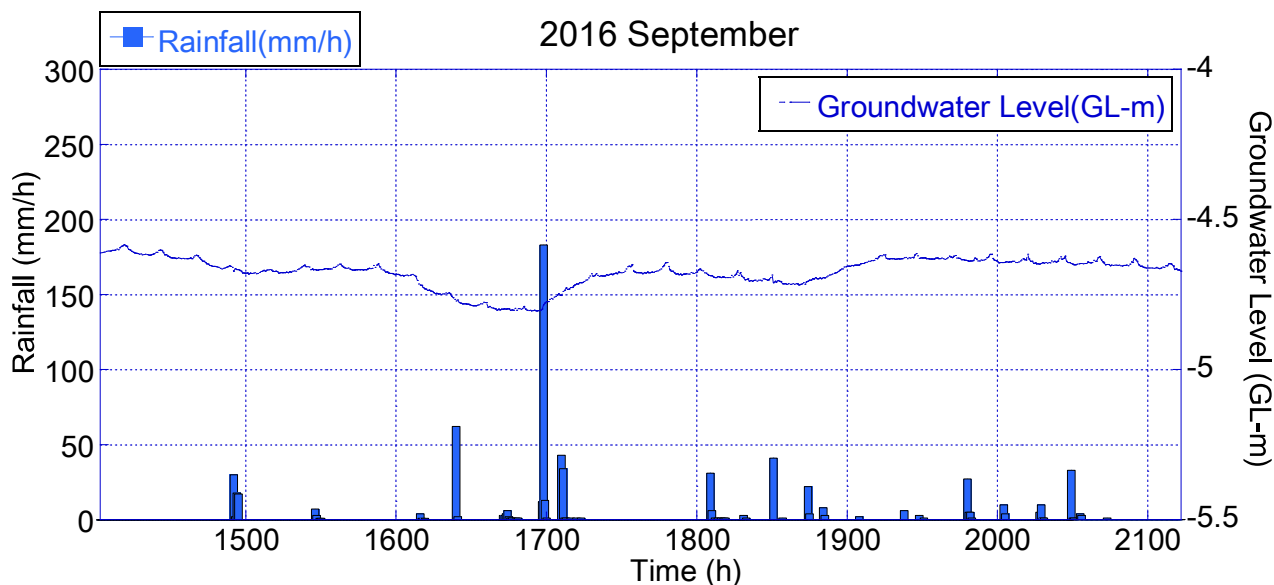
スコールのような通
り雨は、タイムラグ
が発生するか？

5.降雨と地下水位変動(2)



○50mm/h程度の雨: 降雨によって、急激に地下水位が上昇することがなく、緩やかに変動している。

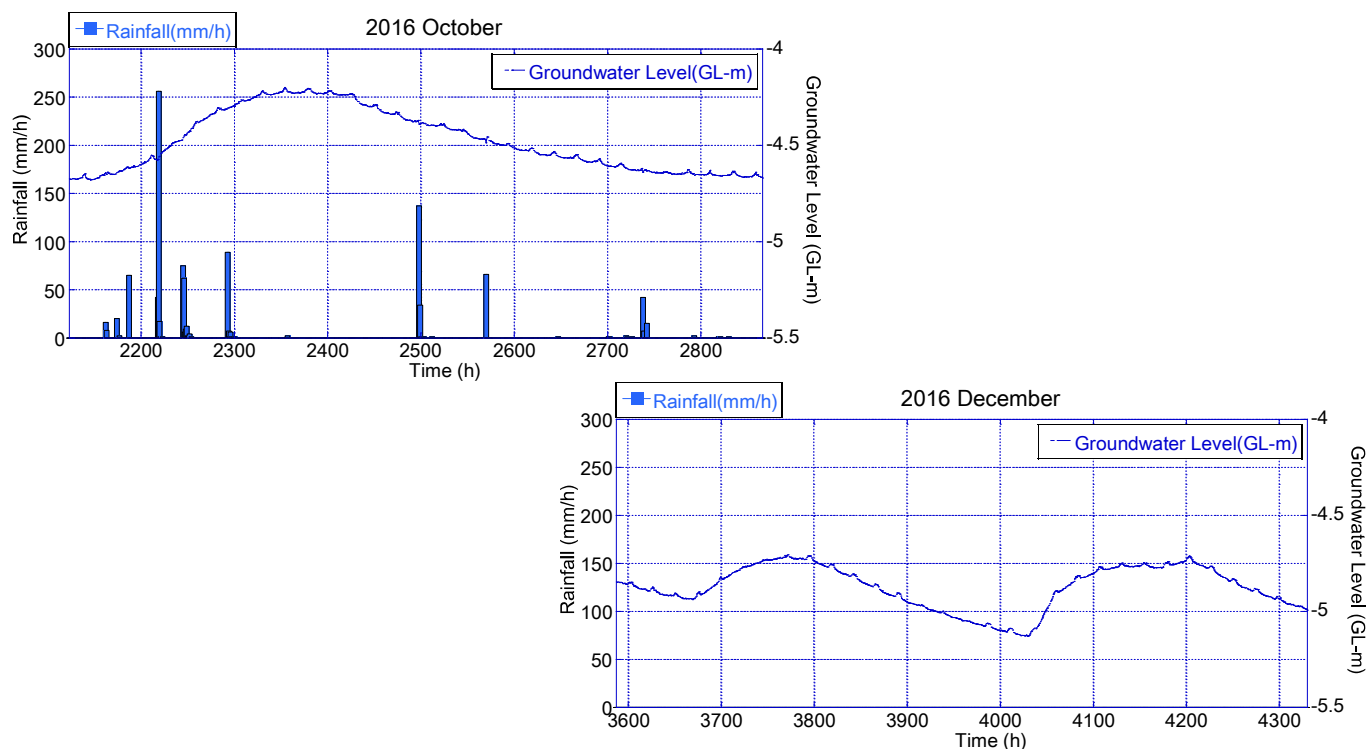
5.降雨と地下水位変動(3)



○40mm/h程度の雨： 影響せず

○180mm/h程度の雨： 60cm程度の地下水位上昇をもたらす

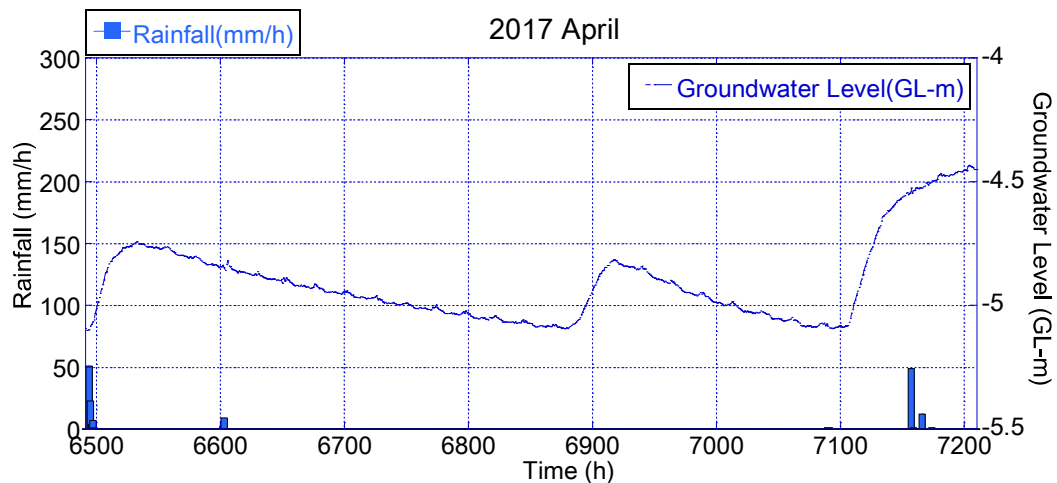
5.降雨と地下水位変動(4)



○250mm/hの雨： 急激な地下水上昇が見られない

○降雨がなくても、地下水位が30cm程度変動している

5.降雨と地下水位変動(5)



(考察)

降雨が地下水位上昇に寄与しているように見える場合はあるが、必ずしもそうではない可能性もある。

○降雨以外の要因が地下水位の変動に影響している可能性が高い。

→周辺河川の推移変動？、周囲の水田の水張？

○概ね、GL-4.2～5.25mの間で推移。

6.初期間隙比の推定(1)

1次元圧密理論により、初期(建立時)の間隙比推定を試みる。

＜仮定条件＞

- ・第2層のみが圧密したと仮定
- ・地下水位は第2層より上位にあったと仮定
- ・第2層では、層厚に応じて均一に圧密が進行したと仮定

○一次元圧密理論

間隙が水で飽和された粘土地盤に、鉛直方向の圧力が加わると、過剰間隙水圧が発生し、時間経過とともに、間隙水を排水しながら体積が減少する。

排水された水量と、体積の変化量は等しいとする。

間隙比 $e = V_v$ (間隙体積: 水 + 空気) / V_s (土粒子体積)

6.初期間隙比の推定(2)

<仮定条件>

層厚の差により生じた沈下量の差
＝仏塔傾斜角度

$$S = H \frac{\Delta e}{1+e_0} = H \frac{e_0 - e}{1+e_0} \Rightarrow e_0 = \frac{S_1 + H_1 e}{H_1 - S_1}, e_0 = \frac{S_2 + H_2 e}{H_2 - S_2}$$

$$\frac{S_1 + H_1 e}{H_1 - S_1} = \frac{S_2 + H_2 e}{H_2 - S_2}$$

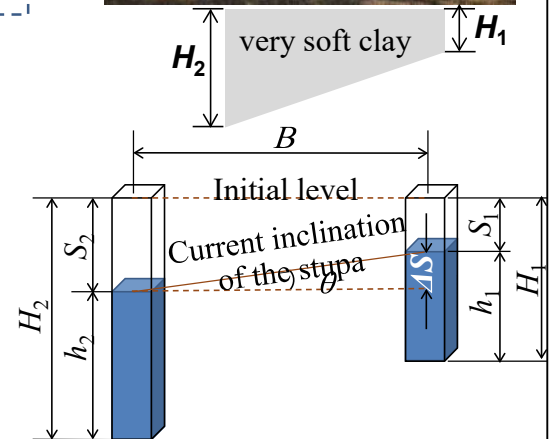
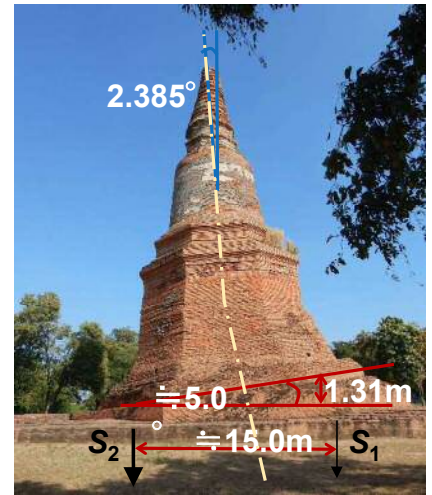
$$S_2 = S_1 + \Delta s, \Delta s = S_2 - S_1$$

S : Amount of settlement (m)

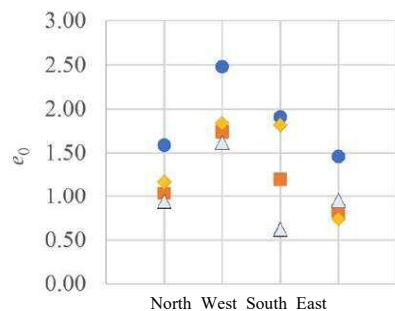
H : The initial thickness of the soft clay layer (m)

e : Void ratio (0.62)

e_0 : Initial void ratio



6.初期間隙比の推定(3)



● Maximum angle ◆ Yellow Line average angle
■ Average angle △ White Line average angle

	North	West	South	East
h_1 (m)	3.28	2.87	3.28	2.87
h_2 (m)	4.90	6.00	4.90	6.00
θ (°)	3.0	11.0	4.0	5.0
B (m)	18.50	18.50	18.50	18.50
ΔS (m)	0.97	3.60	1.29	1.62
S_1 (m)	1.96	3.30	2.62	1.48
S_2 (m)	2.93	6.90	3.91	3.10
H_1 (m)	5.24	6.17	5.90	4.35
H_2 (m)	7.83	12.90	8.81	9.10
e	0.62	0.62	0.62	0.62
e_0	1.59	2.48	1.91	1.46

(結果) ・最大傾斜角に基づく各方位の初期空隙比は、1.46～2.48の範囲内であった。

・結果にばらつきが見られるが、算出された値は一般的な柔らかい粘土の範囲にある。

(バラツキの原因) ・地盤の不確定な要素(基礎直下の推定層厚)

・第2層以外(第3層等)の沈下や、上載荷重(第1層や傾斜仏塔による不等分布荷重)による不均一な沈下

2018年度の予定

＜2018年度＞

- ・仏塔の傾斜モニタリングを開始
- ・仏塔直下の地盤情報について物理探査の可能性を協議
→カセサート大学と協定を結ぶ
- ・地下水位、大気圧データの回収、(雨量計の撤収?)

(不明点)

- ・仏塔基礎の状態(木材? 栗石? レンガ? 無基礎?)
- ・仏塔両側で異なる地盤の層状(第3砂層の分布状況)

◇実施予定シミュレーション

- ・地下水位変動が仏塔傾斜に及ぼす影響解析
- ・洪水が仏塔傾斜に及ぼす影響解析

(参考資料)

アユタヤに見られる仏塔

・Prang : **サボテン型**のオベリスク。**クメール王朝**の影響を受ける。

※クメール王朝(アンコール王朝): 9-15世紀の王国で現在のカンボジアのもととなった国。クメール人の王国。

・Stupa : **釣鐘スタイルの仏塔**。**スコータイ王朝**の影響を受ける。

※スコータイ王朝: 13世紀-1438年。タイ族最初の王朝。アンコール王朝の支配下からクメール人を追い出して建国。



撮影: WatChaiwatthabaram

サーンチー

-

傘蓋(さんがい): 釈迦をインドの暑い気候から守るためとも、貴人の頭上にかざして歩いたことから尊貴のシンボルとも言われる。



(参考資料)

仏塔の伝来ルート



タイの仏塔は、南方仏塔ルートの流れを汲んでいる。

長谷川周:「インド仏塔紀行」, 東方出版, p.7, 2006. ISBN4-88591-984-3

(参考資料)

南方仏塔ルート



ルワンワリサーヤ仏塔 wikipedia

スリランカの仏塔

- 傘蓋が円錐柱に変化
- 玉垣や彫刻を施した塔門は省略
- 塔自体が大型化

<参考>長谷川周:インド仏塔紀行, 東方出版(株), 2006.

(参考資料)

南方仏塔ルート



ワット・プラ・マハタート
(2017.11..12撮影)

釣鐘スタイル（セイロン様式）

- 基壇は雛段状に
- 肩がなだらかな伏鉢
- 平頭と円錐柱を一体化



ワット・プラ・マハタート
(2017.11..12撮影)

クメール仏塔

- トウモロコシに例えられる
- 段層を持つピラミッド型の基壇の上に、背の高い塔形

＜参考＞斎藤忠：仏塔の研究ーアジア仏教文化の系譜をたどるー，(株)第一書房，2002.

(参考資料)

北方仏塔ルート



Bai Dinh Pagoda (2016.3.12撮影)

- 基壇を方形平面に垂直に高く、上部に伏鉢を載せた形
- 伏鉢退化、小型化し、高い所に神が宿る楼閣建築と融合

基壇→露盤
墳丘→伏鉢
平頭→請花
傘蓋→九輪，水煙，
竜車，宝珠



長命寺 (2017.8.19撮影)

仏舍利→仏像
相輪へと形を変える