

# 平成 25 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：強風防災

研究期間：H25 [平成 25 年度で終了]

課題番号：

研究課題名（和文）：カンボジア・アンコール遺跡バイヨン中央塔の強風による倒壊危険性評価とその対策のための風洞試験

研究課題名（英文）：Wind tunnel test for the Bayon Temple of Angkor in Cambodia to evaluate the collapse risk caused by the strong wind and its reinforcement measures.

研究代表者：新谷真人

交付決定額（当該年度）： 円

## 1. 研究の目的

カンボジア・アンコール遺跡バイヨン寺院中央塔は 11 世紀に建立されたとされ、砂岩の空積みによる地上からの高さ約 40m の塔状の建造物である。これまでの度重なる局所的な石材の崩落から非対称な形状となっており、今後更なる崩落が危惧されている。石材崩落の原因としては様々挙げられるが、そのひとつとして強風の影響が挙げられ、今後の強風に対する保存対策も必要となる。

本研究では、3D レーザースキャニングデータから 3D プリンタを用いて風洞試験用模型を製作する手法を提案し実践した。そうした手法は、図面化並びに模型製作が非常に困難である建造物において、非常に有用かつ汎用的な手法となり得ると考える。本研究では、そうした流れでアンコール遺跡バイヨン寺院を対象とした風洞試験の実施と風圧力の評価を示す。

## 2. 研究の方法

### 2. 1 模型製作手法

東京大学池内・大石研究室により過去にデジタルアーカイブ化と保存修復への利用などを目的として 3 次元レーザースキャニングが実施された。本手法では、その計測データ（図 1）から、風圧模型を製作する流れを以下に示す。①計測データに厚みを与え、模型データを作成する。→②模型データに風圧測定孔を設ける。→③3D プリンタで出力する。→④チューブ・銅パイプを取り付ける。これらの手順のうち、①、②に関して本研究で提案する手法を以下に示す。

計測データは中央塔の外表面を厚みのない面の三角形メッシュデータで構成されている。風圧模型は、模型の表面に銅パイプを固定するために、均等な厚みである必要があるため、そのアルゴリズムを以下に提案する。

図 2 に示すように、計測データを各高さで水平に切断し、外周線及び厚みの基準となる内側の節点を設け（式 1~2）、最後に外周線と内部の 3 節点で囲まれた領域を三角形面要素で充填し、図 5 のような一定の厚さをもった平面を得る。以上の過程をアルゴリズム化し、微小高さ間隔の切断面の積層を図 6 のように繰り返すことで風洞模型用データを作成した。

$$\begin{cases} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{cases} = \frac{z_a - z_s}{z_a - z_b} \begin{cases} x_b - x_a \\ y_b - x_a \\ z_b - z_a \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_x \\ C_y \end{cases} = \begin{cases} A_{1x} \\ A_{1y} \end{cases} + \frac{S1}{S1 + S2} \cdot \begin{cases} A_{2x} - A_{1x} \\ A_{2y} - A_{1y} \end{cases} \quad (2)$$

本研究では中央塔の頂部を縮尺 1/50 として模型を製作した。積層における微小高さを 2mm として作成した模型データには計測データに比較して積層による若干の凹凸があるが、風圧模型として十分な精度であると言える。

模型データの作成を行った後、CAD で風圧測定孔を必要な位置に設け、3D プリンタで出力

し導圧チューブの取り付けを行った模型を図 7 に示す。

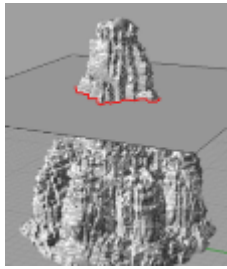


図 1 スキャニングデータの  
の切断による外周線

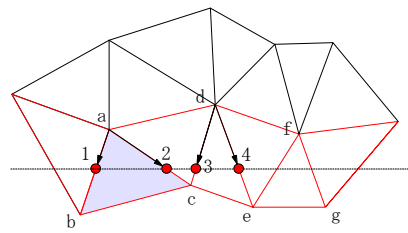


図 2 切断と外周線

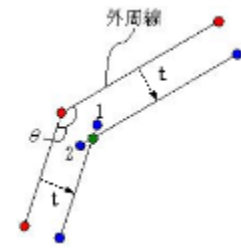


図 3 内側の節点の作成

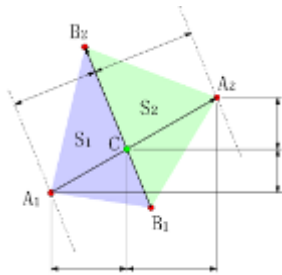


図 4 交点の算定

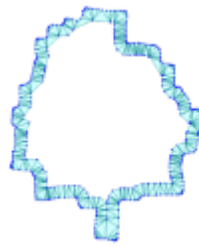


図 5 面の充填

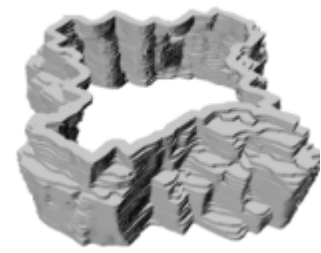


図 6 積層



図 7 風圧模型

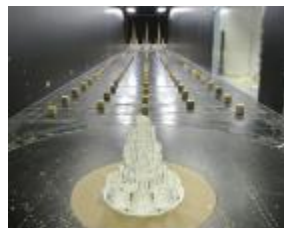


図 8 風洞実験

## 2. 2 風洞実験概要

風圧実験の諸条件を以下に述べる。風向角は風向の上流側にバイヨン寺院中央塔の北面が正対する時を  $0^\circ$  とし、 $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで  $5^\circ$  ピッチで 73 風向の測定を行った。また実験気流は、模型頂部における平均風速を  $10\text{m/s}$  とし、接近流は地表面粗度区分Ⅲ<sup>1)</sup>となるように模擬した。相似則は幾何学的縮尺  $1/50$ 、風速縮尺  $1/4$ 、時間縮尺  $1/12.5$  として、実時間 10 分間のデータを 10 サンプルずつ各風向で測定した。サンプリング周波数は  $1/800\text{Hz}$  とし、風圧係数の算定には塔頂部の速度圧で基準化を行った。

## 3. 研究成果

### 3. 1 バイヨン中央塔の風圧力評価

現在の中央塔は度重なる崩落から、図 9 に示す 4 種の平面形状のように、その高さ方向に異なる平面形状を有する。そこで、それぞれ 4 つの平面について風向角の違いによる風圧係数の変化を比較すると、表 1 に示すように風向角  $0^\circ$  と風向角  $45^\circ$  (G.L.+33.3m のみ  $80^\circ$ ) の場合において、最大値は風向角による違いは小さく、最小値は大きいという傾向が伺える。

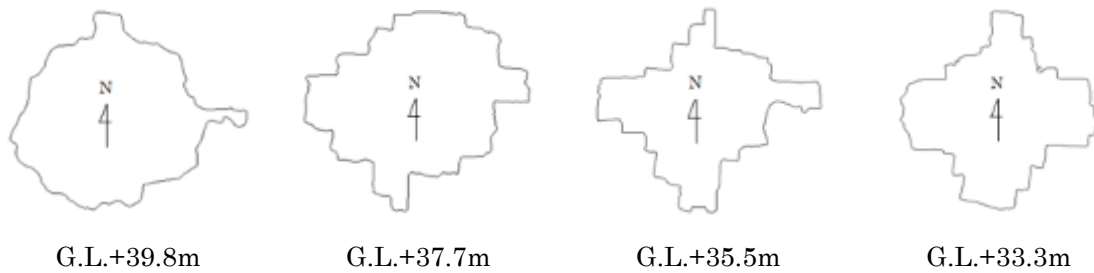


図9 取り出した平面形状

表1 各平面形状での風圧係数値

地表からの高さ	平均風圧係数			
	風向角0°		風向角45° (G.L.+33.3mのみ80°)	
	最大値	最小値	最大値	最小値
G.L.+39.8m	0.58	-0.52	0.73	-0.91
G.L.+37.7m	0.86	-0.46	0.77	-0.78
G.L.+35.5m	0.74	-0.55	0.83	-0.78
G.L.+33.3m	0.73	-0.83	0.75	-1.04

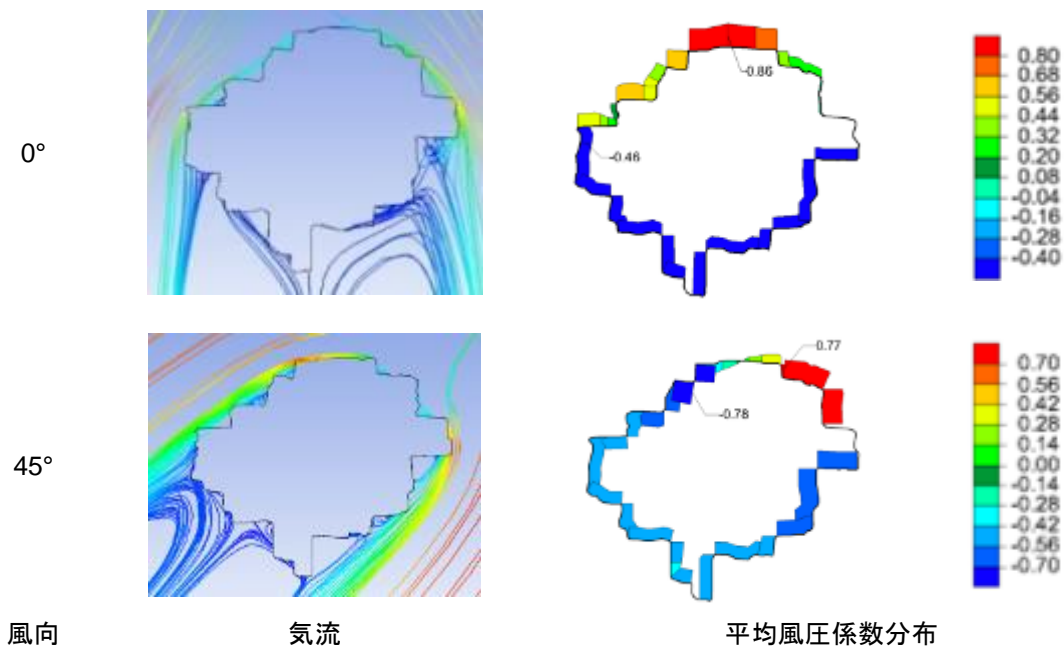


図10 G.L.+37.7mにおける気流と平均風圧係数分布

前述の現象について、解析による気流図と照合して確認した。解析には汎用解析ソフト ANSYS を用いて、乱流モデルを RANS とした定常計算により結果を算出した。検討例として G.L.+37.7m における風向角 0° と 45° の場合についての解析図を図 10 に示す。風向角 0° の場合では、隅角部での剥離後に面と平行に風が流れているため、負圧はそれほど大きくはない。一方、風向角 45° においては、剥離した後に窪んだ凹部で渦が発生しているため、比較的大きな負圧が生じたものと考えられる。

次に、各高さにおける風圧の最大値と最小値を、「建築物荷重指針・同解説(2004)」に基づい

て円形や矩形平面と仮定して算定した風圧値と比較する。なお風速は、バイヨン寺院近辺での過去の観測結果を基に、中央塔頂部での風速値を 40m/s とした。図 11 に示すように、正圧のピーク値に関しては、風洞実験結果から得られる数値と、円形及び矩形平面と想定して算定された数値とは概ね等しい結果となる。一方負圧のピーク値に関しては、円形及び矩形平面と想定して算定された数値に比べ風洞実験結果から得られる数値の方が、絶対値がやや小さな結果となった。これは、円形や矩形に比べると中央塔の形状は凹凸が多いため、風圧の低減が生じているものと想定される。

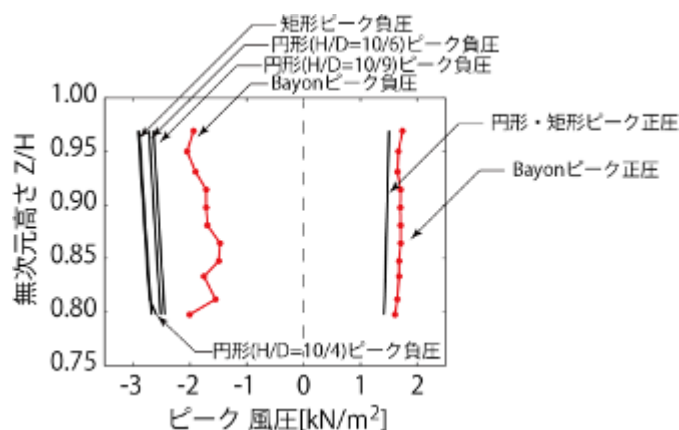


図 11 鉛直方向の風圧力の比較図

#### 4. 主な発表論文等

・ Evaluation of the wind pressure by wind tunnel test using the 3D laser scanning data in Bayon temple, Cambodia, Y.HONDA, S.YAMADA, M.ARAYA, T.OHISHI, A.YOSHIDA, 9th International conference of structural analysis of historical construction 投稿中

・ アンコール遺跡バイヨン寺院における 3次元スキャニングデータの使用による風洞実験の実施と風圧力評価 本多裕作、山田俊亮、新谷真人、大石岳史、吉田昭仁、日本建築学会学術講演梗概集 2014 投稿中

[雑誌論文] (計 0 件)  
 [学会発表] (計 2 件)  
 [図書] (計 0 件)

#### 5. 研究組織

##### (1) 研究代表者

新谷真人(早稲田大学 理工学術院 特任教授)

##### (2) 研究分担者

田村幸雄(東京工芸大学 工学部 教授)  
 吉田昭仁(東京工芸大学 工学部 准教授)  
 中川武(早稲田大学 理工学術院 教授)  
 岩崎好規(地域地盤環境研究所 専務理事)  
 大石岳史(東京大学 生産技術研究所 准教授)  
 山田俊亮(早稲田大学 理工学研究所 招聘研究員)  
 本多裕作(早稲田大学 創造理工学研究科 大学院生)