技術・研究ノート

複雑な形状を有する遺跡建造物の風洞試験実施のための 3D スキャニングデータと 3D プリンタの利用による風圧模型の製作手法の提案

New Manufacturing Method of Wind Pressure Model for Complicated-Shape Architectural Heritage Applying 3D Scanning Data and 3D Printer

本多裕作^{*1} 山田俊亮^{*2} 吉田昭仁^{*3} 大石岳史^{*4}
Yusaku HONDA, Shunsuke YAMADA, Akihito YOSHIDA, Takeshi OHISHI,
新谷真人^{*5} 田村幸雄^{*6}
Masato ARAYA, Yukio TAMURA

key words: architectural heritage, masonry, 3D scanning, 3D printer, wind pressure model

1. はじめに

歴史的建造物の中には、強風災害によってその価値を損なうことが危惧される建造物がある。カンボジアのアンコール遺跡バイヨン寺院もその1つであり、現在も強風被害による塔の石積みの局所的な崩落が危惧されている。カンボジア・アンコール遺跡バイヨン寺院は12世紀に建立され、東西に約160m、南北に約140mの方形の平面形状を有し、本稿で対象とした中央塔は、砂岩の空積みによる地上から約40mの高さを有する遺跡建造物であ

る。これまでの度重なる石材の崩落から非対称で複雑な形状となっており、更なる石材の崩落が危惧されている。その石材崩落の原因として今後最も危惧されるのが、強風の影響である¹²⁾。

強風に対する構造的な安定化を行う上で、風荷重の適切な評価が必要となる。複雑な形状を有する建物の風圧係数には、風洞試験によって得られる数値を用いることが一般的であると考えられる。一方で、バイヨン寺院のような非常に大規模かつ複雑な形状を有する歴史的建造

*1 梓設計 設計室 構造部
Azusa Sekkei Co.Ltd.

*2 安田女子大学生活デザイン学科 助教
Assistant Professor, Yasuda Women's University

*3 東京工芸大学工学部建築学科 教授
Professor, Tokyo Polytechnic University

*4 東京大学生産技術研究所 准教授
Associate Professor, The University of Tokyo

*5 早稲田大学 名誉教授
Professor Emeritus, Waseda University

*6 北京交通大学 教授, 東京工芸大学 名誉教授
Professor, Beijing Jiaotong Univ., Professor Emeritus, Tokyo Polytechnic University

(原稿受理年月日: 2015年2月20日, 採用決定年月日: 2015年9月8日)

物における風洞試験の実施は、風圧模型の作成に多大な労力を要するため難易度は高い。

バイヨン寺院においては、デジタルアーカイビングと形状データを保存修復に活用することを目的として、東京大学池内大石研究室により大規模 3D レーザースキャニングが過去に実施されている³⁾。その 3D レーザースキャニングでは、気球を用いた上空からのスキャニング技術や局所でのスキャニング技術、また大規模データの統合アルゴリズムなど遺跡建造物等のスキャニングのための各種技術が開発された³⁾。本研究では、上記の 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圧模型を製作する手法を提案し実践した。本手法は、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、有用かつ汎用的な手法となり得ると考える。

図1 バイヨン寺院
Fig.1 Bayon temple

図2 バイヨン寺院の 3D スキャニングデータ³⁾
Fig.2 3D scanning data of Bayon temple

2. 風圧模型の製作手法

2. 1 製作の手順

3D レーザースキャニングによって得られたデータを図 2 に示す。各種のレーザースキャニング技術を駆使して作成、統合された大規模な形状データであり、外表面の形状を厚みのない三角形メッシュで構成している。

風圧模型の出力には 3D プリンタを用いることとしたが、3D プリンタを用いて風圧模型を作成するためには、厚みを持たないスキャニングデータから風圧模型用の形状データを新たに作成する必要がある。そのため、以下の①～④の手順にて風圧模型を製作することとした。①スキャニングデータに銅パイプによる風圧測定孔を設置するための均一な厚みを与えるアルゴリズムを適用し、

模型出力用データを作成する。②汎用 3 次元 CAD ソフト上で、模型出力用データに風圧測定孔を設ける。③ 3D プリンタで風圧模型を出力する。④風圧測定用のチューブ・銅パイプを手作業にて取り付ける。上記の手順について、次節より記述する。

2. 2 スキャニングデータに均一な厚みを与える手法

昨今では、汎用 3DCAD ソフトで作成した複雑な曲面などにおいて、3D プリンタでの出力を目的として、厚みを与える機能などの事例もみられる。本稿では、汎用ソフトを用いず簡易に製作可能なアルゴリズムとして、高さ方向に切断した断面を積層することで、スキャニングデータに均一な厚みを与えることとした。本手法では、積層ピッチや風圧測定孔の大きさを解析精度に応じて設定し、簡易に風圧模型出力用データを生成することが可能である。そのアルゴリズムについて以下に記述する。

まず、図 3 に示すようにある高さで水平に切断し、その高さにおける外周線を得る方法を以下に記述する。スキャニングデータを構成するメッシュは図 4 に示されるような厚みのない三角形要素であるため、交差する 1 つの三角形を抽出すると以下の式(1)を用いて、節点 $a(x_a, y_a, z_a)$ と節点 $b(x_b, y_b, z_b)$ から成る辺 ab 上において切断高さ z_s の交点である節点 1 の座標 (x_1, y_1, z_1) を得る。

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

以上の過程を繰り返し、切断高さにおいて全ての交点を求めた後、最終的に得られた節点間を直線補間し、図 5 のように切断面の形状の閉曲線(外周線)を得る。

次に、図 6 のように外周線の閉曲線を構成する線分を厚さ t の幅に応じて、内側に複製移動する。複製移動された線分同士の間交点 C が新たな内側の節点となる。交点 C の座標 (C_x, C_y) は図 7 のように、 $\Delta A_1 B_1 B_2$ と $\Delta B_1 A_1 B_2$ の面積の比 $S1 : S2$ を用いた外積を利用した式(2)から算定される。

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

式(2)はその 2 直線の関係が入隅・出隅のどちらの場合においても適用可能である。以上の外周線を内側に複製移動し交点を求める過程を繰り返し、図 8 のように内周線を得る。最後に外周線と内周線が囲む領域を面要素で充填し、図 9 のような閉断面を得る。以上の過程をプログラム化し、スキャニングデータの頂部を始点として、設定した高さ方向の分割幅で繰り返す。

それらを高さ方向に各分割幅だけ立ち上げた形状を重ね合わせることで、図 10 のような積層した形状データが

得られる。以上が、本稿で用いたスキャニングデータに均一な厚みを与えるアルゴリズムである。

2. 3 風圧測定孔の製作

前節の過程を得て作成した形状データに汎用 3 次元

図3 スキャニングデータの
切断による外周線
Fig.3 Outline of outer line

図5 外周線の取得
Fig.5 Obtained outer line

図7 交点の座標関係
Fig.7 Positional relation of
the intersection point

図9 面の充填
Fig.9 Plane elements filled
between the lines

図11 測定孔の作成
Fig.11 View of the
measurement holes

図4 切断面における節点
の取得
Fig.4 Nodes from the section

図6 内周線の節点の取得
Fig.6 Inner nodes obtained
from the outer line

図8 内周線の取得
Fig.8 Obtained inner line

図10 層の重ね合わせ
Fig.10 Piled solid elements

図12 最終形状
Fig.12 Final data

CAD 上で風圧測定用の孔を設ける。その方法は、図 11 のように測定孔を設ける部位のみ取り出し、位置と角度の調整を行った上で孔を設ける方法とした。本稿で示す風圧模型では、測定孔の方向は3D プリンタでの出力において積層する方向に設けており、図 14 に示す試作品の孔のように若干の凹凸のある円形の形状が得られる。そのため、測定孔の径を確認する検証も行った。その試作品を図 14 に示す。試作品には 1.7mm から 2.05mm まで 0.05mm 刻みの 8 つの孔を設けた。結果として測定孔の形状は図 13 の銅パイプ(外径:1.7mm, 内径:1.0mm)の外径よりもわずかに大きな 1.8mm で設けるものとした。ただし、この孔の精度については、3D プリンタの積層ピッチに大きく依存する。実際に、風圧模型を出力する際には、出力時間の兼ね合いから、積層ピッチを 0.254mm とした。0.254mm の分解能の場合、積層ピッチ 2mm のモデルデータでは 1.778mm~2.032mm の範囲での積層となり誤差が生じるが、銅パイプの外径が 1.7mm のため、測定孔は 1 層内に納まる。また、それに伴い模型の孔の大きさと中心においてもモデルデータの設定から誤差を生じるが、手作業で孔の表面の凹凸をなくす作業の際に、その精度誤差は吸収されるため問題ないと判断された。最後に、孔と銅パイプの微かな隙間に接着剤を流し固定・充填した。

図13 銅パイプ
Fig.13 Copper pipe

図14 測定孔の精度確認用試作品(矢印: 積層方向)
Fig.14 Trial piece to confirm the precision of holes

2. 4 風圧模型の出力と風洞試験の実施

前節までの過程を経て、3D プリンタで出力し、チューブを取り付けて完成した風圧模型を図 15 に示す。模型の縮尺は 1/50 とし、模型の厚みは 2mm、測定孔の数は 430 点とした。なお、風圧模型出力の 3D プリンタは、東北大学未来科学技術共同研究センターの Stratasys 社 FORTUS400mc-L⁴⁾を用いた。本稿で用いた 3D プリンタの鉛直方向の最小分解能は 0.127mm であり、本模型においては、0.254mm の分解能にて製作した。出力では、下部と上部の 2 箇所に分けて出力し、総出力時間は 126 時

間であった。

本論においては、高さ方向の分割幅を実模型のスケールで2mmとして製作している。これは、初期のスタディにて分割幅及び積層ピッチをいくつか検討し、2mm程度の分割による僅かな凹凸であれば風圧模型として問題はないと判断したことによる。その結果、図16のようにスキャニングデータと比較して高さ方向の分割幅毎に不連続となる微小な凹凸が生じているものの、風洞試験を行う上で問題のない程度の凹凸であると考えられ、適切な風圧模型であると判断した。

前述の手法で作成したバイヨン中央塔上部の風圧模型を用いて、風洞試験を実施した⁹⁾。試験は、東京工芸大学・風工学研究センターのエッフェル型境界層風洞にて実施し、その際の様子を図17に示す。

図15 3Dプリンタで出力した風圧模型

Fig.15 Wind pressure model output by 3D printer

図16 風圧模型表面(上)とスキャニングデータ表面(下)

Fig.16 Surfaces of the model and scanning data

図17 風洞試験の様子

Fig.17 View of wind tunnel test

3. まとめ

本稿により、以下を示した。

- 1) 複雑な形状を有する遺跡建造物等の風圧模型製作に広く適用可能な、3D スキャニングデータと3D プリンタを用いた風圧模型の製作手法の提案を行い、バイヨン寺院中央塔を対象に風圧模型を製作した。
- 2) 製作された風圧模型を用いた風洞試験により、複雑な形状を有するバイヨン中央塔の風圧の傾向を検証することを実現した。

謝辞

本研究は、2013年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。本研究の風洞試験の模型製作及び実施にあたり、東京工芸大学岡田玲様、東京大学池内研究室佐藤啓宏様、東北大学未来科学技術共同研究センターの山邊茂之様をはじめとする皆様にご助言並びにご協力を頂きました。謝意申し上げます。

参考文献

- 1) Shunsuke YAMADA, Masato ARAYA, Mitsuharu FUKUDA, Yoshinori IWASAKI, “Statistical time series analysis of crack movements at Bayon main tower, Cambodia”, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 2, pp. 1399-1405, (2010)
- 2) Hayashi M., Yamada S., Araya M., Koyama T. and Iwasaki Y., “Study for Reinforcement Planning of Masonry Structure with Cracks at Bayon Main Tower, Angkor”, Advances in Discontinuous Numerical Methods and Applications in Geomechanics and Geoengineering, Taylor & Francis Group, London, pp. 247-252, (2012)
- 3) 東京大学池内大石研究室 Bayon Archive Project, <http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/research/bayon/>, (2015. 9)
- 4) Stratasys 社 FORTUS400mc-L, <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-360-400mc>, (2015. 9)
- 5) 本多 裕作, 山田 俊亮, 新谷 真人, 大石 岳史, 吉田 昭仁, 「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」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 897-898, (2014)
- 6) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説」, (2004)
- 7) 日本建築センター, 「建築物風洞実験ガイドブック」, (2008)
- 8) 大熊 武司, 神田 順, 田村 幸雄, 「建築物の耐風設計」, 鹿島出版会, (1996)