

陸屋根に水平に設置される太陽光発電パネルの風荷重低減効果を利用した環境調和型防水システムの提案

東北大学 佐藤 公亮*1
秋田工業高等専門学校 植松 康*2

陸屋根 機械的固定工法防水システム 太陽光発電パネル
等圧効果 風洞実験 シミュレーション

1. 研究の目的

本研究では、機械的固定工法防水システムを用いた陸屋根の上に、太陽光発電(PV)パネルを屋根に平行に、しかもパネル間に隙間を設けて設置することで「等圧効果」を利用し、PV パネルだけでなく防水層に作用する風力を低減するシステムを提案する。

2. 研究の内容

2.1 はじめに

2.1.1 PV システムと防水システムの概要

対象とする PV システム、及び防水システムを図 1 に示す。PV パネル表面の圧力を外圧、PV パネルと防水層の間の圧力を層内圧と定義すると、PV パネルに作用する風力は外圧と層内圧の差で与えられる。同様に、防水層に作用する風力は層内圧と防水層裏面圧の差で与えられる。PV パネルと防水層を組み合わせる事で、防水層に作用する風力の一部を PV パネルが負担し、防水層の風荷重を低減する。

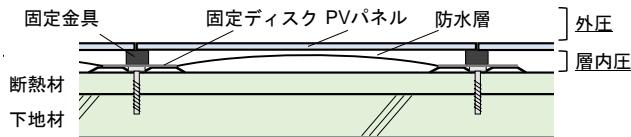


図1 対象とするPVシステムの概要図

2.1.2 研究の流れ

変動外圧から裏面圧を算出する手法として、Oh et al.¹⁾が提案した非定常ベルヌーイ方程式を用いる。はじめに、風洞実験によって、PV パネルが設置された際の隙間位置における屋根面の外圧時刻歴を求める。ここで、1/100 や 1/200 といった縮尺率の風洞模型では架台高さ等の隙間を再現できないため、模型屋根面で計測される圧力を PV パネル上面の圧力とする。対象とする建物は一般住宅想定陸屋根モデルとし、パラペット高さ 15 cm と 30 cm の 2 種類について実験を行う。次に、実物大システムの隙間のモデルを用いた試験を実施し、得られた結果を再現できるような隙間の特性値を設定する。最後に、風洞実験で得られた外圧を入力値としてベルヌーイ方程式を解くことで、PV パネルと防水層の間の圧力である層内圧を計算する。以上の手法で算出した層内圧を用いて、PV パネルが無い場合の防水層の風力係数と PV パネルがある場合の防水層の風力係数を比較することで、防水層の風荷重

低減効果についての考察を行う。

2.2 風洞実験

本研究では東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻所有のエッフェル型境界層風洞を使用し、乱れ強さが地表面粗度区分Ⅲに相当する境界層乱流を用いた。屋根平均高さにおける平均風速を 8 m/s と設定し、800 Hz のサンプリング周波数で 10 分間相当のデータを 10 組取得した。風洞モデルの圧力測定孔の位置及び寸法等は以下の図 2 に示す。

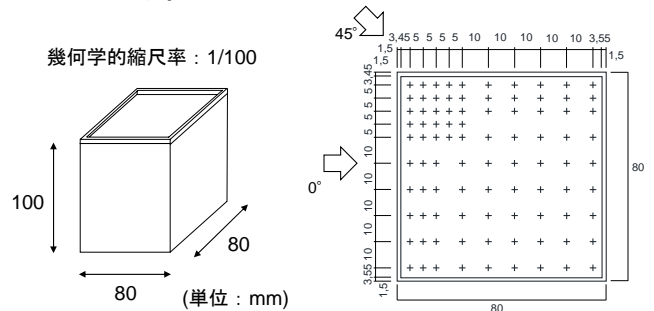


図 2 風洞モデルの寸法及び圧力測定孔位置

2.3 隙間特性値同定実験

2.3.1 形状抵抗係数及び等価な隙間幅の求め方

PV パネル間の隙間の形状は複雑であり、流量係数や隙間幅、形状抵抗係数といった隙間の特性値を一様に決めることができない。そこで、実物大システムの隙間のモデルに圧力をかけ、それに伴って変動する裏面圧を測定し、得られた結果を再現できるような特性値を定める。入力荷重は時々刻々と変化する実変動風圧とし、実時間で 10 分の载荷を行った。载荷には、2010 年に Kopp ら²⁾により発案され、その原理を基に高橋ら³⁾が製作した動風圧载荷装置 Pressure Loading Actuator(以下、PLA)と圧力箱を用いる。PLA を用いて载荷実験を行うことで高い追従性を持って入力荷重を与える。シミュレーション式は、非定常ベルヌーイ方程式において、摩擦と形状変化による圧力損失を考慮した以下の式(1)を用いる。

$$[\dot{U}_e] = \frac{q}{\rho l_e} [C_e] - \frac{q}{\rho l_e} [C_i] - \frac{C_L}{2l_e} [U_e |U_e|] - \frac{\Delta p_l}{\rho l_e} \quad (1)$$

ここで、 U_e は流速[m/s]、 q は速度圧[Pa]、 ρ は空気密度[kg/m³]、 l_e は隙間の深さ[m]、 C_e は外圧係数[-]、 C_i は内圧係数[-]、 C_L は形状抵抗係数[-]、 Δp_l は摩擦による圧力損失[Pa]を表す。実験で得られた裏面内圧係数とシミュ

レーションで求めた裏面内圧係数は形状抵抗係数 $C_L = 1.42$, 隙間幅 $D_0 = 3$ とした場合に良い対応を示したため, 本研究ではこれらの隙間の特性値を使用する。

2.3.2 流量係数の求め方

2.3.1 項と同様に PLA で実物大システムの部材を用いた試験体に圧力をかけ, 隙間前後の圧力差と隙間を通る空気の流速を測定する(図 3)。実験結果を使って得られる流量と, 連続の式を使って計算される流量の値が一致するような流量係数を求める。実験で得られた流量と連続の式を用いて得られた流量は流量係数を 0.55 とした場合に概ね一致した。

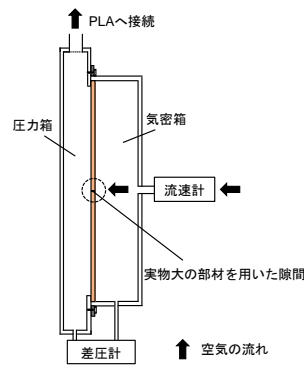


図3 試験体断面図

2.4 層内圧シミュレーション

PV パネル裏面の空間をいくつかの仮想室に分割し, 2.3 節で用いたベルヌーイ方程式を x, y, z 軸について立て, 陽解法の Runge-Kutta 法で層内圧を算出する。入力荷重は風洞実験で得られた外圧の時刻歴を実物大の圧力に変換したものをを用いる。風洞模型の圧力測定孔の数に限りがあるため, 測定孔が無い箇所の圧力はスプライン補間により算出する。

PV パネルを図 4 左図に示すように配置し, 仮想室を振り分ける。本研究では各仮想室の中心点を Room 番号と定義し, 陸屋根(パラペット高さ 15 cm)の結果のみを載せる。図 4 右図は PV パネルが無い場合の防水層の風力係数 C_{pe} のピーク値と PV パネルが有る場合の防水層の風力係数 C_{pi} のピーク値の比較を示している。図 4 より全ての仮想室において, PV パネル有りのモデルのピーク風力係数の絶対値の方がパネル無しのモデルより小さくなっていることが分かり, PV パネルを設置することによる防水層の風力低減効果が期待されることが分かった。また, ピーク外圧係数の絶対値が大きい隅角部ほど, C_{pe} と C_{pi} のピーク値の差が大きく, その低減率が大きいことも分かった。

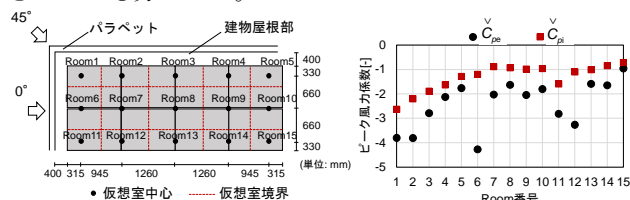


図4 パネルの設置配置及び防水層のピーク風力係数の比較

次に, パネル間に隙間を設けて設置することによる PV パネルの風力係数の低減効果の考察を行う。図 4 と同様に仮想室を分割し, PV パネルのピーク風力係数を面平均

により算出した。パネルの設置位置は図 4 左図と同様とし, 各パネル番号の定義及び, ピーク風力係数の結果を図 5 に示す。図 5 右図は全風向中でピーク外圧係数を示した風向 35° における陸屋根モデルのピーク風力係数を表している。図 5 より風力係数の絶対値が最大となるパネルでピーク値が約-1.2 となることが分かる。

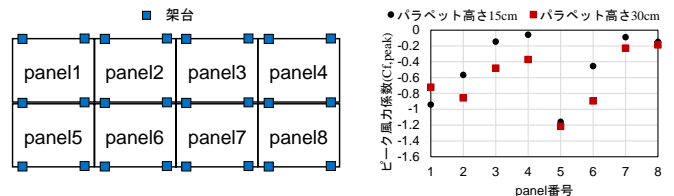


図5 パネル番号の定義及びPVパネルのピーク風力係数

JIS C 8955⁴⁾では陸屋根に平行に設置される PV パネルの風力係数は-0.6 とされており, ガスト影響係数を 2.5 とすると, PV パネルのピーク風力係数は-1.5 となる。JIS C 8955 で示されている風力係数は PV パネルを隙間の間隔を 0 mm で設置した場合の風力係数を表しており, 図 5 右図で示した PV パネルのピーク風力係数の絶対値の方が小さいことが分かり, PV パネルに隙間を設けることによる風力低減効果が見込める。

3. 研究の成果、新発見

本研究では, PV パネルを陸屋根に平行に, しかもパネル間に隙間を設けて設置することを提案し, その有効性を風洞実験(多点風圧測定)並びにその結果を利用した層内圧のシミュレーションに基づき検証した。パネル間に隙間を設けることで, 「等圧効果」によって PV パネルに作用するピーク風力が低減すると同時に, 屋根の防水層に作用するピーク外圧が大幅に低減する(特に, 斜め方向の風に対して大きなピーク外圧が発生する屋根隅角部領域に設置した場合)。

4. 今後の予定

本研究では固定ディスクのピッチ間隔との関連については述べていないため, 数値のみでの検証である。そこで提案した方法を耐風性が課題となる機械的固定工法防水システムに応用することで, より一層のメリットが生まれるものと期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり山家哲生(東北大学大学院生)の協力を得た。

参考文献

- 1) Oh et al.: The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: Part3. Internal pressures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.755-779, 2007
- 2) Gregory A. Kopp, Murray J. Morrison, Eri Gavanski, David J. Henderson, Han Ping Hong: "Three Little Pigs" Project: Hurricane Risk Mitigation by Integrated Wind Tunnel and Full-Scale Laboratory Tests; NATURAL HAZARDS REVIEW, pp.151-161, 2010
- 3) ガヴァンスキ江梨, 高橋麻衣, 植松康, モリソン・マリー: 実変動風荷重装置の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 49 号, pp.1075-1080, 2015
- 4) JIS C 8955: 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法, 2018

*1 東北大学大学院工学研究科
都市・建築学専攻 助教・博士(工学)

*2 秋田工業高等専門学校 校長・工博

Assist. Prof., Dept. of Arch. and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr.Eng.

President, National Institute of Technology (KOSEN), Akita College, Dr.Eng.