

1) - 2 竜巻発生装置を活用した突風荷重モデルの展開と大規模屋根の被災機構の解明

Development of Tornado-induced Load Model Using a Tornado-like Wind Simulator and Clarification of Damage Mechanism of Low-rise Building with Large Span Roof

(研究期間 平成 25～27 年度)

構造研究グループ
Dept. of Structural Engineering

喜々津 仁密
KIKITSU Hitomitsu

This study aims to develop tornado-induced load model and to clarify the mechanism of structural damage generation in a low-rise building with large span roof. First, the author carried out wind pressure experiments considering different size combinations of building model and vortex core using a tornado-like wind simulator. It was confirmed that peak wind force coefficients calculated by the proposed model can be consistent with experimental values. Next, by using Finite Element (FE) method, the presented methodology predicted successive stages of structural damage by a translating tornado. The results of FE analysis showed that the model case with a dominant opening is more vulnerable than the model case without it. The methodology described here enables accurate prediction of tornado-induced damage to cladding of low-rise buildings.

【研究目的及び経過】

2012 年 5 月に北関東で同時発生した 3 つの竜巻によって茨城県つくば市などで甚大な人的・物的被害が発生し、社会的にも大きなインパクトを与えたが、最近ではこれ以外にも宮崎県延岡市や北海道佐呂間町(2006 年)などの竜巻によって甚大な被害が顕在化する傾向にある。このような状況を背景にして、内閣府中央防災会議が定める災害基本計画でも風水害の一事象として竜巻が明確に位置づけられ、企業の事業継続計画等の減災対策に資する技術的な知見の整備が求められている。以上の竜巻被害の実態や減災対策の動向を踏まえ、本研究では竜巻状気流発生装置を活用した風圧実験を実施し、竜巻による突風荷重モデルの展開を図る。ここで突風荷重モデルには、竜巻と建築物との間の相対的な関係等を考慮し、構造計算にも反映できる定式化を行う。また、竜巻の作用を受ける脆弱な部位として大規模な屋根に着目し、折板屋根の有限要素解析モデルを構築する。屋根上を竜巻が通過する状況を想定した時刻歴応答解析を行って竜巻による被災機構を解明し、当該手法が損傷範囲の検証及び可視化、並びに損傷軽減策の検討に資することを目的とする。

【研究内容】

本研究は 2 つの研究項目を掲げて実施した。以下に各項目での成果の概要をまとめる。

1. 建築物に作用する竜巻の突風荷重モデルの展開¹⁾

1) 突風荷重モデルの概要

竜巻が屋根の真上を通過する際に鉛直方向に作用する突風荷重 F_z は、急激な気圧降下による力 F_a と旋回流の直

接作用による風力 F_w との和の(1)式で表される。そして、最大接線風速 V_m で速度圧を定義すれば、風力係数 C_{Fz} は各風力に対応する風圧係数を用いて(2)式で表される。

$$F_z(x) = F_a(x) + F_w(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 C_{Fz}(x) \quad (1)$$

$$C_{Fz}(x) = [C_{ae}(x) - C_{ai}(x)] + C_{we}(x) \quad (2)$$

ここで、 C_{ae} 、 C_{ai} ：急激な気圧降下の作用による外圧係数と内圧係数、 C_{we} ：旋回流の直接作用による外圧係数であり、それぞれ(3)～(5)式で表される。式中において、 x は建築物中心に対する屋根付近での旋回流中心の座標、 R_m は旋回流の最大風速半径である。

$$C_{ae} = \begin{cases} C_{ae}^* \left[2 - \left(\frac{x}{R_m} \right)^2 \right] & \left| \frac{x}{R_m} \right| \leq 1.0 \\ C_{ae}^* \left(\frac{R_m}{x} \right)^2 & 1.0 < \left| \frac{x}{R_m} \right| \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{ai} = \varepsilon_r C_{ae} = \begin{cases} \varepsilon_r C_{ae}^* \left[2 - \left(\frac{x}{R_m} \right)^2 \right] & \left| \frac{x}{R_m} \right| \leq 1.0 \\ \varepsilon_r C_{ae}^* \left(\frac{R_m}{x} \right)^2 & 1.0 < \left| \frac{x}{R_m} \right| \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{we} = \begin{cases} C_{we}^* \left(\frac{x}{R_m} \right)^2 & \left| \frac{x}{R_m} \right| \leq 1.0 \\ C_{we}^* \left(\frac{R_m}{x} \right)^2 & 1.0 < \left| \frac{x}{R_m} \right| \end{cases} \quad (5)$$

本研究では、旋回流の最大風速半径に対する模型の代表長さの比をパラメータとした係数 C_{ae}^* 、 C_{we}^* 、 ε_r の傾向を次節に示す風圧実験の結果から考察する。

2) 風圧実験

風圧実験は建築研究所所有の竜巻状気流発生装置にて行った。ランキン渦モデルに適合する実験気流下での圧力分布例を図 1 に示す。ここでは装置上部に設けたベーン角度を調整し、 R_m が 113, 86, 68, 55mm の 4 通りの

気流を対象にした。また、相似な形状の 4 通りの大きさ (XL, L, M, S サイズ) の風圧模型を作成した。

装置が模型の真上を 0.2m/s で移動する状況下でサンプリング周波数 100Hz の風圧実験を行った。図 2 に $R_m=113\text{mm}$ での XL サイズと S サイズの模型の実験例を示す。それぞれ上段が外圧係数 $C_{ae} + C_{we}$ 、中段が内圧係数 C_{ai} 、下段が風力係数 C_{Fz} である。横軸は模型中心(原点)に対する装置中心の座標 x_s を R_m で規準化した数値であり、図中には(3)~(5)式のモデルによる結果も併記した。この結果から、同一の気流下であっても、模型の大きさが異なれば風力特性が異なることが確認でき、他の最大風速半径の場合でも以上と同様の傾向が確認された。

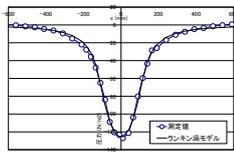
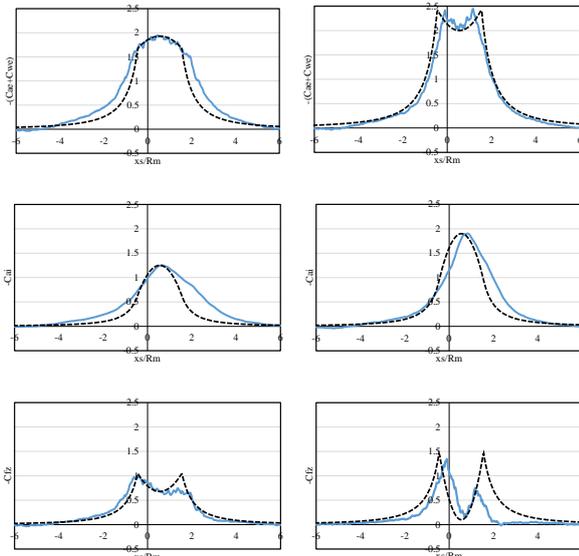


図 1 実験気流の圧力分布の例



(a) XL サイズ (b) S サイズ

図 2 風圧・風力係数の例 ($R_m=113\text{mm}$)
(実線が測定値, 点線がモデル値)

3) 鉛直方向の風力係数 C_{Fz} の精緻化

竜巻状の旋回流の最大風速半径に対する模型の代表長さの比をパラメータ R_r と定義し、これと風力係数 C_{Fz} を構成する諸係数 C_{ae}^* , C_{we}^* , ϵ_r との関係を検討する。図 3 ~ 5 に示すように、いずれの係数も R_r に依存することがわかった。また、風力係数 C_{Fz} は $x=0$ 又は $\pm R_m$ となる際にピーク値となるので、両者での係数値を図 6 に示した。また、実験結果でのピーク値も ●印 ($x=0$ 近傍), ○印 ($x=-R_m$ 近傍) で併記した。荷重モデルによれば, R_r が約 1.0 未満では $x=\pm R_m$ で, 約 1.0 を超えると $x=0$ でそれぞれ

ピーク値をとるが、この算定結果は実験で得られた傾向に概ね対応していることがわかる。

2. 竜巻作用を受ける大規模屋根の被災機構の解明²⁾

本研究では、低層施設の鋼板製外装材を対象に、風圧実験で得られた竜巻状の風力データを用いた 3 次元有限要素解析を行い、竜巻等突風に対する外装材のぜい弱性を可視化することを試みた (図 7)。具体的には、屋根・外壁材をシェル要素、支持部材への接合部をばね要素としてモデル化し、その構造特性に既往の耐力試験結果を反映させた解析モデルを設定した。

最大接線風速の増加とともに外壁・屋根各部での応力が増加する結果が解析的に得られた。また、卓越開口を考慮する場合のほうが考慮しない場合よりも、屋根・外壁面及び接合部の損傷割合が大きくなる結果が得られ、竜巻通過時に被災する可能性がより高くなることを示した。ここで提示した解析と評価は、竜巻等突風を想定した外装材の設計検証の際に、被災リスクを軽減する事前対策を検討する手法として有用であると考えられる。

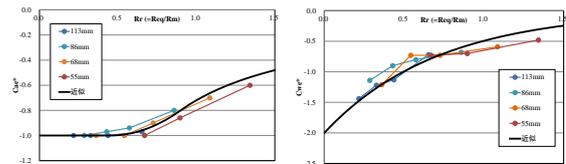


図 3 R_r と係数 C_{ae}^* の関係

図 4 R_r と係数 C_{we}^* と関係

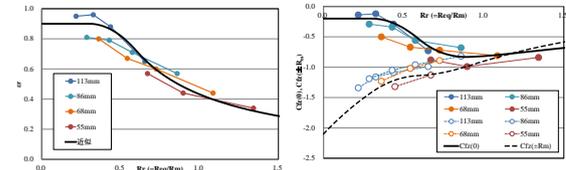


図 5 R_r と係数 ϵ_r の関係

図 6 風力係数 C_{Fz} のピーク値

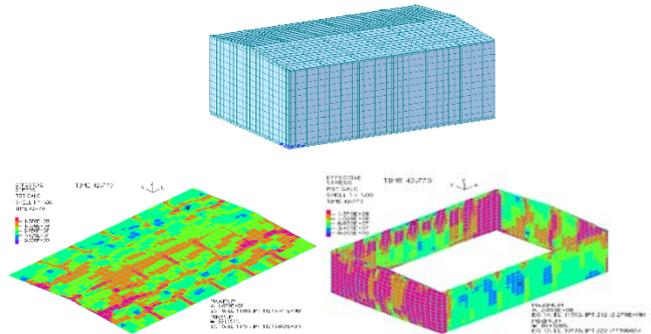


図 7 生産施設を想定した FEM 解析モデルと解析結果

【参考文献】 1) 喜々津ほか：竜巻状の旋回流による突風荷重モデルに関する研究その 1 建築物との相対的な大小関係を考慮した鉛直方向の風力係数, 日本建築学会大会講演梗概集(九州), 2016 掲載予定. 2) 喜々津ほか：竜巻状気流による風力と部材耐力を考慮した建築物外装材の有限要素解析, 日本建築学会技術報告集, 第 49 号, pp.943-948, 2015.