九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

竜巻による急激な気圧低下が及ぼす建物室内外の非 定常な気圧差力

高橋, 駿介 九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻:修士課程

美並, 浩成 京都大学大学院工学研究科:修士課程

大坪,和広 九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 博士後期課程

鶴, 則生 九州大学大学院人間環境学府

他

https://doi.org/10.15017/1785464

出版情報:都市・建築学研究.28, pp.41-46, 2015-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築 学部門 バージョン: 権利関係:

竜巻による急激な気圧低下が及ぼす建物室内外の非定常な気圧差力

An Unsteady Pressure Differential between the Inside and Outside of a Building Caused by Tornado's Suddenly-dropped Atmospheric Pressure

高橋駿介*,美並浩成**,大坪和広***,鶴

Shunsuke TAKAHASHI, Kosei MINAMI, Kazuhiro OTSUBO, Norio TSURU and Junji MAEDA

When a tornado travels very fast, an unsteady pressure differential between the inside and outside of a building is generated by suddenly-dropped atmospheric pressure due to the tornado. However, there is little information about the characteristics of a force caused by the pressure differential. The authors developed an experimental system which generated a suddenly-dropping pressure around a building model in a calm condition using a gusty wind tunnel. The effects of an opening area of a building wall on the force generated by the pressure differential were studied using the system. We also performed some numerical simulations and compared with the experimental results. It was found that the bigger force of pressure differential was generated in a case of the smaller opening area.

Keywords: Tornado, Dropped External Pressure, Internal Pressure Change, Tunnel Test, Numerical Simulation **竜巻、気圧降下、内圧変動、風洞実験、数値計算**

序 1

竜巻被害では写真1のような建物の上屋全体が飛散、 転倒する被害が見られることがある. 竜巻の通過時に建 築物に作用する外力として、竜巻旋回流の接線風速によ る風圧力の他に, 短時間での急激な気圧降下による気圧 差力があげられる ¹⁾. 図1は実際にアメリカで観測され た竜巻通過時の気圧降下の例²⁾であるが,気密性の高い 構造物の内圧はこのような急激な気圧降下に追随できず, 結果として建物内外に大きな圧力差が発生すると考えら れる. 石崎ら 3)は建物内外の気圧差力のみで建物の上屋

が飛散する可能性を指摘しており、竜巻被害の解明には 突風風速とともに竜巻による急激な気圧降下を考慮する 必要がある.一方で竜巻被害風速の算定に気圧降下を考 慮した検討例⁴⁾は少なく,特に気圧差力に関する実験的 知見は十分には蓄積されていない. 急激な気圧降下に関 する研究が進められていない背景の一つに、急激な気圧 降下を実験的に発生させることの技術的困難さがあげら れる. 九州大学の突風風洞装置では, 短時間で立ち上が る突風を生成する際に風洞内に急激な静圧降下が生じる ⁵⁾.本研究ではこれを利用して,無風下で短時間での急

50

100

Time(sec)

150

200



写真1 竜巻によってべた基礎ごと転倒した住宅 (2012 年 つくば市)		図 1 2003 年アメリカで観測された 竜巻通過時の気圧変化		
*	都市共生デザイン専攻修士課程	****	人間環境学府	
**	京都大学大学院工学研究科 修士課程	****	都市・建築学部門	
***	都市共生デザイン専攻 博士後期課程			

激な気圧降下を再現する実験システムの構築を検討した. このシステムを用いて,建物模型の開口の大きさをパラ メータとし,急激な気圧降下のみを建物模型に作用させ た際の模型内圧を計測した.

また、風洞実験結果を実スケールの建物へ適用するに は数値計算による検証が不可欠である.数値計算を用い た竜巻の急激な気圧降下の際の内圧の挙動に関する研究 としては前述の石崎らの報告があげられ、 そこでは開口 部の空気の流量に着目した外気圧変化に対する室内圧応 答方程式による数値計算を行っているが、その応答方程 式で用いられる気密度と竜巻の性質をまとめた無次元係 数及びその無次元係数の算出に用いられる建物内の気密 度を示す係数に関する知見は十分に蓄積されておらず, 汎用性は十分ではない. 一方で, Holmes⁶は Helmholtz の 共振現象に基づき,外圧変動に対する内圧変動の関係を 開口部の空気塊の運動方程式で示しており、準定常な外 圧変化に対する内圧変化の検討 かや、定常的な強風下で 建物に突然開口が生じた場合の内圧の検討など %に広く 用いられている.本報告では実スケールでの急激な外圧 降下を受ける建物内圧の挙動の検証に資することを目標 として,風洞実験と同様の条件下を想定した空気塊の運 動方程式による数値計算を行い、模型内圧の実験値と計 算値の比較を行った.

2 突風風洞の概要及び突風下での風洞内静圧特性

2.1 風洞概要

実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル 型吸込式風洞を用いて行った.風洞断面内での各計測機 器の配置状況を図 2 に示す.計測部断面寸法は 1.5m× 1.5m, 計測部全長は 3m である. 本風洞は, 脈動流生成 装置の翼列駆動を利用することで、ステップ関数的な突 風を生成するもので,脈動流生成装置の翼列を閉じるこ とで風洞内を無風状態にし, 翼列を瞬時に開放すること で最短 0.2 秒の立ち上がりを持つ突風を生成することが 可能である.また本風洞は吸い込み式であるので,翼列 を閉鎖した状態での吸引部の圧力低下の影響を回避する ために吸引部の天井と床面に翼列を配置して、突風制御 の翼列開閉と反転同期させている. 圧力は小型デジタル 微差圧計(N計器 GC30)を用いて測定した. なお圧力を 計測する際, 突風時に発生する風洞内の静圧変動の影響 を受けない風洞外を基準圧とした.風洞内静圧,防風箱 内圧,模型内圧はそれぞれ図2のA, B, C点で測定し た.計測位置における風洞内の風速は熱線風速計と超音 波風速計を併用して測定した.測定のサンプリング周波 数は圧力,風速ともに 1000Hz である.

2.2 風洞内の静圧

図3に風洞内の静圧と,突風の風速及びその加速度の 時刻歴波形の一例を示す.無風時から立ち上がる所定の 風速を目標風速とし、目標風速までの立ち上がりに要し た時間を立ち上がり時間とし、目標風速4m/s,立ち上が り時間 0.4 秒のものを示す.突風の加速度は、風速の時 刻歴波形に 50Hz のローパスフィルターをかけた後に中 心差分法を用いて算出している.風洞内静圧は突風の加 速度とほぼ連動して変化していることがわかる.図4に 後述の検証実験によって得られた突風の加速度の最大値 と風洞内静圧降下のピーク値の関係を示す.なおピーク が複数みられる場合は、その中で絶対値の大きいものを 用いた.突風の加速度の最大値と風洞内静圧降下のピー ク値には線形関係が見られる.以上のことから突風加速 度を調整することで風洞内静圧を変化させることが可能 だとわかる.



3 急激な気圧降下を再現する実験システムの検証

3. 1 防風箱概要

本実験システムでは無風下の状況を作成するため,図 2 に示すように建物模型に風が直接作用しないように建 物模型を被う防風箱を設けた.防風箱は上面の後部に開 口を設けているが,内部への風が流入しないような構造 を目指した.防風箱内部への流入風が存在しないことは, 防風箱内部に糸を垂らし,突風を生成した際にその変動 が無いことで確認した.

3.2 検証実験概要

風洞内静圧の変化が防風箱内へ, すなわち建物模型ま わりにどのように伝達するか検証するため, 突風を生成 させた際のピーク値の比較と風速が定常状態となった際 の定常圧力の比較を行った.検証実験での実験パラメー タは,目標風速を4~8m/sの1m/s刻みの5ケース,立ち 上がり時間を0.2, 0.3, 0.4秒の3ケースとし,それぞれ のケースで3回ずつ測定した.

3.3 検証実験結果

図5は、目標風速8m/sで立ち上がり時間を変えて行 った風洞内静圧と防風箱内の圧力の時刻歴波形である. 図 5(a)に示す立ち上がり時間 0.2 秒の場合には、圧力降 下のピークが1回起こり、図1のような急激な圧力降下 を再現することができた.また立ち上がり時間 0.2 秒で あれば、どの目標風速においても圧力降下のピークは1 回であった.図 5(b)に示すような立ち上がり時間 0.3 秒 の場合には圧力降下のピークが複数回現れたものもあり, 目標風速,試行毎でピークの回数に違いが見られた.図 5(c)に示す立ち上がり時間 0.4 秒の場合には、いずれの目 標風速でも圧力降下のピークは複数回見られた. ピーク が複数回見られるのは、図3に示すような突風の立ち上 がり時、加速度のピークが複数回生じたことに対応して いる.また図4には各試行で算出した風速の加速度の最 大値と風洞内静圧と防風箱内圧のピーク値をまとめてい るが、ほぼ全てのパラメータで風洞内静圧と防風箱内圧 のピーク値はほぼ一致しており、防風箱は風洞内静圧の 降下量の大きさには影響を与えていないと言える.

一方で風速が定常状態となった際の防風箱内の圧力は 風洞内の静圧よりさらに低下した.これは防風箱の上面 に開口を設けた影響であるが⁹,圧力降下の定性的な変 化に影響を与えるものではない.

以上を考慮すると、竜巻通過時の急激な気圧降下の再 現には、立ち上がり時間 0.2 秒の場合では、竜巻通過時 と同様の大きなピークが1度起きるため、竜巻通過時の 定性的な気圧変化の再現が可能である.更に防風箱内で はこれを無風環境で再現できることを確認した.

4 実験概要

図6に実験に用いた計測模型のモデル図を示す. 模型 はアクリル製で、屋根面及び床面厚は 5mm、壁面厚は 20mm で十分な剛性を備えており、圧力変動による模型 の変形はほぼ無視できるものである.本計測模型は屋根 面を取り替えることで計測模型の開口の大きさを調整で きる. 壁面と屋根面の間にはゴムチューブを設けて、気 密性を確保している. 屋根面は開口を設けないもの(直径 $\varphi = 0$ mm)と直径 $\varphi = 2.4.6$ mmの卓越開口を中央に有 する場合の4ケースとした. 卓越開口直径のは住宅の気 密性能に関する既往の研究 10から,実住宅の単位床面積 当たりの隙間の相当開口面積を参考にして決定した. 今 回のパラメータでは文献 10)での気密性能グレード 0~4 程度に対応しており、実スケールでは高気密な木造住宅 に相当する. 卓越開口の直径, 開口率(卓越開口面積/屋根 面積)と気密性能グレード、後述する空気塊の有効長さの 関係を表1にまとめた.

図 7(a)に模型が卓越開口を有さない状態で実際に急激 な圧力降下を生じさせた際の時刻歴波形を示しているが,





卓越開口直径	φ0mm	φ 2mm	φ 4mm	φ 6mm
開口率	0.00	6.98×10^{-5}	2.79 × 10 ⁻⁴	6.28×10^{-4}
気密性能グレード ¹⁰⁾	グレード0	グレード0~1	グレード2	グレード4
空気塊の有効長さ(m)	-	6.58×10^{-3}	8.15 × 10 ⁻³	9.73×10^{-3}



模型内圧はその影響を受けず,ほぼ0の値を取り続ける. つまり壁面や床面に隙間は殆ど存在しておらず,開口と しては卓越開口のみを考慮すれば良い.

本実験では無風下で急激な圧力降下を受ける模型内圧 と模型外圧に相当する防風箱内圧を測定した.実験変数 を目標風速と模型屋根面の卓越開口直径φとして,目標 風速を4~10m/sの1m/s刻み7ケースで測定した.また 竜巻通過時のような急激な気圧降下の再現のため,3.3節 より翼列の回転時間は0.2秒とし,それぞれのケースで 3回ずつ測定した.今回の測定パラメータでは,防風箱 内圧の最大降下量は250~560Pa程度の範囲である.

5 数値計算概要

既往の報告 ^{6~8,11,12 など)}によると、開口以外の小さな隙 間の影響を無視できる場合, Helmholtz の共振現象に基づ いて、外圧変動と内圧変動の関係は以下の開口部の空気 塊の運動方程式によって表される.

$$\rho A L_e \ddot{x} + \frac{\rho A}{2K^2} |\dot{x}| \dot{x} + \frac{nA^2 P_0}{V_0} x = -(P_e - P_0)A \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度(=1.2kg/m³)、Aは開口面積(=3.14× 10⁻⁶m², 1.26×10⁻⁵m², 2.83×10⁻⁵m²)、 L_e は空気塊の有効長 さ(m)、Kは開口部での圧力損失に関するオリフィス係数 (=0.9)、nは polytropic 指数(=断熱空気の比熱比, 1.4)、 P_0 は大気静圧(=1.013×10⁵Pa)、 V_0 は容積(=6.75×10⁻³m³)、 P_e は外圧(Pa)である.xは開口部の空気塊の変位(m)であ り、左辺第3項をAで除した値(nAP_0x/V_0)が内圧(Pa)を表 す.計算を行うにあたり、風洞実験条件と既往の報告を 参考にして各パラメータを括弧内の値とした.なお、風 洞実験で計測した圧力は風洞外を基準圧とした差圧力で あるため、($P_e - P_0$) = P_e' として、 P_e' に4章の実験で得 られた防風箱内圧の時刻歴データを用いた.空気塊の有 効長さ L_e は以下の Vickery の近似式¹¹⁾によって開口面積 毎にそれぞれ求めた.

$$L_e = L + 0.89\sqrt{A} \tag{2}$$

ここで, *L*は開口部の奥行きであり, 屋根面厚(=5×10⁻³m) としている.これらの数式を用い, ルンゲ・クッタ・ギ ル法により,時間刻み 1/1000 (sec)で模型内圧を算出した.

6 実験結果及び数値計算結果

6.1 時刻歷波形

図 7 に目標風速 8m/s の突風を生成した際の模型内圧, 防風箱内圧の時刻歴波形を示す.実験値に着目すると, 図 7(b)~(d)に示す卓越開口を有する場合では,防風箱内 圧の降下に伴って模型内圧の降下が見られた.この降下 量は卓越開口が大きくなるのに伴って大きくなり,図 7(d)φ = 6mmの場合では防風箱内圧とほぼ同じ降下量と なる.防風箱内圧が急激な降下から定常状態へと移行す ると,模型内圧もそれに伴って定常状態となり,防風箱 内圧と同値を取る.開口は急激な変動の伝達には影響を 与えるが,定常時の微細な変動には影響を及ぼさない¹¹⁾. これらの傾向はいずれの目標風速においても見られた. 計算値に着目すると、実験値と同様に、防風箱内圧の



-44 -

短時間での急激な変動に追随して,模型内圧は降下した 後に定常値へと落ち着く.空気塊の運動方程式を用いる ことで,このような急激な外気圧の降下を受ける内圧変 動の再現が可能であることがわかるが,開口の大きさに よっては,実験値と計算値のピーク値に差が見られた.

6.2 データ整理

防風箱内圧のピーク値に対する模型内圧のピーク値の 比を防風箱内圧のピーク値でまとめたものを図8に示す. 実験値では防風箱内圧のピーク値に対する模型内圧のピ ーク値の比は卓越開口の大きさ毎に概ね一定で、卓越開 口が大きくなるにつれ大きくなっており、模型内圧のピ ーク値は建物模型の開口の大きさに強く依存している. このことから、開口の小さな模型ほど大きな気圧差力が 作用していることがわかる.計算値は概ね実験値よりも 若干値を小さく評価しており、 $\varphi = 2mm$ では、防風箱内 圧のピーク値の増大につれ若干の減少傾向を示す.この ような差が出た要因としては、実験で用いた模型の作成 精度等の実験の精度誤差や、数値計算でオリフィス係数 に与えた値が適していなかったこと等が考えられ、特に 後者についてはパラメータスタディ等を通した検証が必 要である.

6.3 差圧力波形

模型内圧から防風箱内圧を差し引いたものを模型壁面 に作用する差圧力とする.壁面外向きを正としており, この値に壁面面積を乗じたものが実際に模型壁面に作用 する力(気圧差力)となる.図9に目標風速 8m/s,翼列の 開放時間0.2秒の突風を生成した際の差圧力波形を示す. 図9(a) $\varphi = 0mm$ の場合では,模型内圧が0の値を取り続 けているため,防風箱内圧の力が直接模型に作用してお り,定常状態移行後も0の値を取らない.卓越開口を有 する場合,急激な壁面外向きの力が作用した直後に,壁 面内向きの力が生じ,その後急速に定常状態へと落ち着 く.卓越開口が大きくなるに伴い,壁面外向きの力は小 さくなり,壁面内向きの力が大きくなる. $\varphi = 6mm$ の場 合では、目標風速によっては壁面内向きの力の方が卓越



する例も見られた.壁面内向きの力が生じる理由として は、防風箱内圧がピーク値を取るのと、それが伝達して 模型内圧がピーク値を取るのに時間差が生じることが考 えられる.



7 まとめ

突風風洞を利用して, 竜巻通過時の急激な気圧降下を 再現する実験システムの構築を行い,以下の所見を得た.

- (1) 本実験システムによって, 突風風洞内とほぼ同じ圧 力降下のピーク値を防風箱内の無風環境で再現で きた.
- (2) 突風風速の立ち上がり時間によって、防風箱内圧の 変化を調整することができ、立ち上がり時間 0.2 秒 の場合、竜巻通過時のような短時間の急激な気圧降 下を再現することが可能である.

防風箱内の無風下での状態で陸屋根模型に急激な気圧 降下を作用させ、模型屋根面の卓越開口の大きさを変え ながら模型内圧の測定を行ったところ、以下の所見を得 た.

- (3) 卓越開口が大きくなる程,防風箱内圧の急激な降下 に伴う模型内圧の最大降下量は大きくなる.これは 防風箱内圧の最大降下量によらず,各卓越開口の大 きさで概ね一定の割合である.
- (4) 模型内圧から防風箱内圧を差し引いた差圧力波形 を見ると、急激な壁面外向きの力が発生した直後に 壁面内向きの力が生じ、定常状態へと落ち着く.卓 越開口が小さくなるほど壁面外向きの力が、卓越開 口が大きくなると、壁面内向きの力が卓越する.

また風洞実験と同様の条件を想定し、模型外圧に相当 する実測の防風箱内圧を用いて、数値計算によって模型 内圧を算出した.実験値と比較を行うことで、以下の所 見を得た.

(5) 空気塊の運動方程式から得られた波形は,実験値と 同様に,防風箱内圧の急激な降下から定常状態へ移 行する変動に追随する傾向を示した.一方で,開口 の大きさによっては実験値よりも圧力の降下量を 小さく評価しており,パラメータスタディ等を通し た検討が必要である.

岡田らの準定常変動風圧に関する報告^っでは,開口部 の変動圧伝達特性は,開口面積を容積で除した値で概ね 決定づけられることが指摘されている.今後は模型の容 積や開口奥行長さ等をパラメータとして着目しながら,

各パラメータの無次元化,実スケールでの検証など進め たい.また本実験と数値計算では室内容積が不変な状態 を前提にしているが,気圧差力による壁面の変形の影響 は重要な課題である.

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金「竜 巻通過時に急変する風速と気圧降下との相乗効果による 建物の破損プロセス」(H26年度基盤研究(B)26282112,代 表:前田潤滋)の助成を受けました.

参考文献

1) 日本風工学会 風災害研究会: 2012年5月6日に北

関東で発生した広域突風被害について、日本風工学 会誌第37巻3号, pp.210-222, 平成24年7月

- Julian J. Lee Timothy M. Samaras and Carl R. Young : PRESSURE MEASUREMENTS AT THE GROUND IN AN F-4 TORNADO, 15.3, 22nd Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, October 2004
- 石崎潑雄,林泰一,谷池義人:急激な気圧変化に対 する室内圧の応答,京都大学防災研究所年報 第26 号 B-1, pp.1-7,昭和58年4月
- 4) 奥田泰雄, 深井敦夫, 槌本敬大, 壁谷澤寿一, 喜々津 仁密, 石井儀光, 中井貴文, 荒木康弘, 永井渉: 基礎 ごと転倒した 2 階建て木造建築物の転倒開始風速に 関する考察, 平成 24 年度文部科学省科学研究費補助 金特別研究促進費 24900001 代表:前田潤滋, 平成 24 年 5 月 6 日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズ ムと被害実態の総合調査, pp.180-185, 2013
- 5) 竹内崇,前田潤滋:立ち上がり時間の短い突風を受ける物体に作用する非定常風圧力,日本建築学会構造系論文集,第79巻,第697号,pp.357-366,2014.3
- J.D. Holmes : Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Proceedings of 5th International Conference on Wind Engineering, pp.435-450, 1979.7
- 7) 岡田恒,茅野紀子:耐風設計における建築物の室内 圧に関する研究 その2 室内圧のガスト影響係数, 日本風工学会誌第58号, pp.43-53, 1994.1
- 28) 染川大輔、川口彰久、谷口徹郎、谷池義人:内圧の オーバーシュートを考慮した外装材設計用風荷重、 日本建築学会構造系論文集 第73巻 第628号、 pp.867-873、2008
- (9) 茅野紀子,岡田恒:耐風設計における建築物の室内 圧に関する研究 その1 平均室内圧係数,日本風 工学会誌第56号, pp.11-21, 1993.7
- 村上周三,吉野博:住宅の気密性能に関する調査研究,日本建築学会論文報告集第325号,pp.104-115, 1983.3
- B.J. Vickery : Gust-Factors for Internal-Pressures in Low Rise Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 23 pp.259-271, 1986
- 12) Henry Liu and K.H. Rhee : Helmholtz Oscillation in Building Models, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 24, pp.95-115, 1986

(受理:平成27年6月11日)