

瞬間的な開口発生時の室内圧変化に及ぼす開口面積と風速の影響

東北大学大学院工学研究科 今野 大輔, 植松 康
 大阪市立大学大学院工学研究科 ガヴァンスキ 江梨

1. はじめに

台風や竜巻等の強風災害においては、飛来物により窓ガラス・ドアといった開口部被害が多く見られる。強風時における開口部の破壊は、内部への風の吹込みによる室内圧上昇の原因となり、屋根葺き材など外装材の飛散や、構造骨組の破壊といった甚大な二次被害をもたらす恐れがある。

建物の開口部が瞬間的に開放された場合の室内圧変化の性状については、開口部分の空気塊の運動による Helmholtz 共鳴によって内圧変動が説明できるとした Holmes¹⁾の研究が最も有名である。近年では、松井ら²⁾や染川ら³⁾は、風洞実験や理論解析により、区切られた室内空間内の開口部破壊による圧力変化や、開口発生直後のオーバーシュート現象に関する検討を行った。しかし、それらは限定的な開口寸法や風速を対象としたものであり、開口面積や風速を変化させて実験的な検討を行った例は見られない。そこで、本研究においては、開口面積や風速が内圧変動に及ぼす影響を検討することを目的として、様々な大きさの開口を持ち、さらにはその開口を瞬間的に開放させることのできる模型を用いた風洞実験を行った。

2. 実験概要

風洞実験模型は、外法で 100mm(B)×100mm(D)×50mm(H)の陸屋根模型であり、厚さ 2mm のアクリル板で作製されている。幾何学的縮尺率 λ_L は 1/100 と仮定する。その場合、対象建物は実寸で 10m×10m×5m となる。Holmes¹⁾によれば、風洞実験により内圧変動を適切にシミュレートするためには内部空間の容積に対して以下に示す相似条件を満たす必要がある。

$$V_m = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_v^2} V_f \quad (1)$$

ここで、 V_m は模型容積、 V_f は実建物の容積、 λ_L は模型の幾何学的縮尺率、 λ_v は風速のスケールである。すなわち、室内容積を $(\lambda_L^3/\lambda_v^2)$ 倍する必要がある。そこで、本研究では図1に示すように本来の建物の下にダミー空間を有する模型を用いる。空気層を取り付けた模型写真を図1に示す。この模型を風洞内の測定部に設置すると、図2に示すように測定対象とする部分のみが現れる。

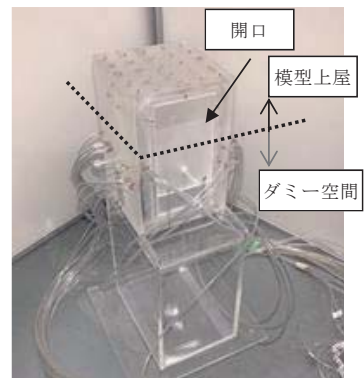


図1 実験模型(全体)



図2 実験模型(風洞設置)

模型の側面には大きさの異なる開口部を設けており、それぞれの開口は瞬間的に開放することが可能である。開口時間は約 0.03 秒で、実スケールに換算すると約 1 秒である。それぞれの開口の寸法および壁面に対する開口率は表 1 に示すとおりである。1 つの開口を対象として測定を行う際には、他の 3 つの開口は粘着テープで塞ぎ、他の開口による影響が出ないようにする。また、風圧測定点位置と開口位置の詳細を図 3 に示す。測定点は、外圧測定用が屋根面に 25 点、開口に 3 点(4 面で 12 点)、内圧測定用が 4 点の、計 41 点である。

実験には、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た。実験に用いた気流の平均風速 U_z および乱れ強さ I_u の鉛直プロファイルを図 4 に示す。ここで、平均風速 U_z は基準高さ 600 (mm)における平均風速 U_{600} によって無次元化されている。平均風速の鉛直プロファイルを表すべき指数 α は 0.21 であり、日本建築学会建築物荷重指針⁴⁾の定める地表面粗度区分Ⅲに概ね相当する。また、本実験では異なる風速の影響も把握するために、設計風速 U_H を実スケールで $U_H = 25.4$ (m/s) および 10 (m/s) の 2 種類に設定した。実験では、使用した風洞の性能より、 $U_{H,model} = 9$ (m/s) (高風速) および 3.5 (m/s) (低風速) と設定した。従って、風速の縮尺率 λ_v は 1/2.82 となり、幾何学的縮尺率 $\lambda_L = 1/100$ より、時間の縮尺率は $\lambda_T \approx 1/35.5$ となる。

実験ケースの詳細を表 2 に示す。「開口瞬間開放」は測定開始時には開口が閉じている状態で、測定途中で開口を開放させるケースであり、「開口常時開放」では測定開始時から開口を開放させている。測定はサンプリング周波数を 500Hz とし、実時間で 20 分相当のデータを取得し、統計値は同条件で 5 回ずつ測定した結果のアンサンブル平均で評価する。風向角は窓面に正対する方向($\theta=0^\circ$)から 90° まで 13 風向である。

表 1 各開口面積と開口率

開口	開口面積	開口率
A	20mm×25mm	10%
B	30mm×25mm	15%
C	40mm×25mm	20%
D	60mm×25mm	30%

※本報においては、開口 A-C の結果を用いて、検討を行う

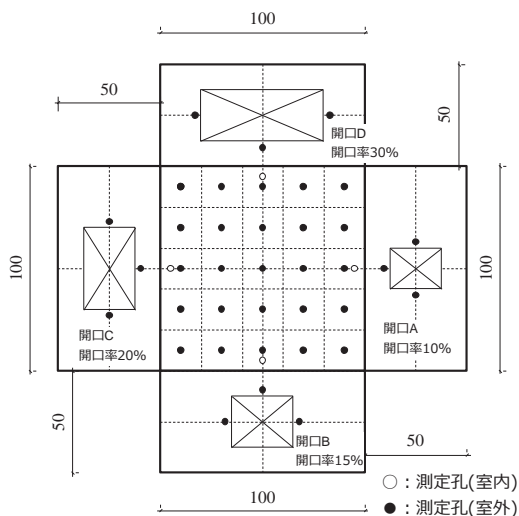


図 3 測定点と開口の位置

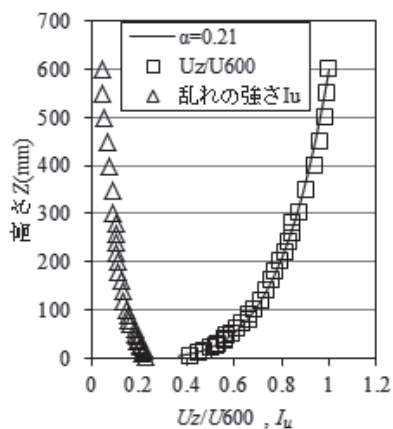


図 4 気流のプロファイル

表 2 実験ケース、風向角

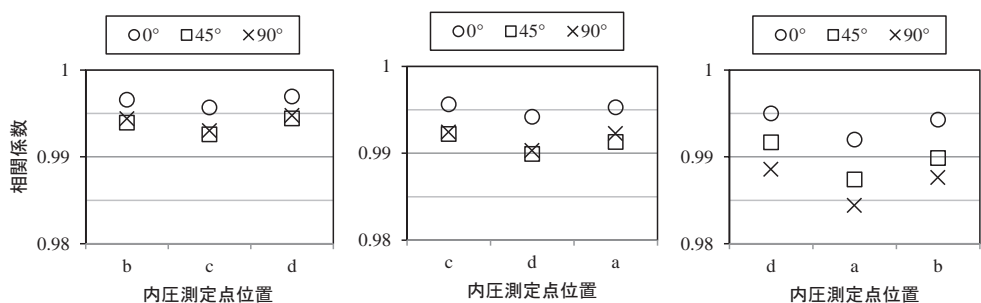
実験ケース	開口	目標風洞風速(m/s)	風向角(°)
1	開口瞬間開放	低風速 : 3.5	0,5,10,15,20,30,40,45, 50,60,70,80,90
2		高風速 : 9.0	
3	開口常時開放		

3. 実験結果

3.1 内圧の相関

内圧の空間分布を検討する為、各内圧測定点で得られた風圧係数時刻歴を用いて相関係数を計算した。図3に示す各開口A~Dに最も近い内圧測定点をそれぞれa~dとして、各測定点での内圧を基準とし、他の測定点での内圧との相関係数を計算した。

図5に計算された相関係数を代表風向ごとに示す。風向角が大きい場合や、基準とした測定点の反対側の測定点との相関係数は、他の場合よりも若干小さいが、概ね1に近い値を示しており、内圧は測定点位置にほとんど依存せず、一体として同時に変動しているといえる。

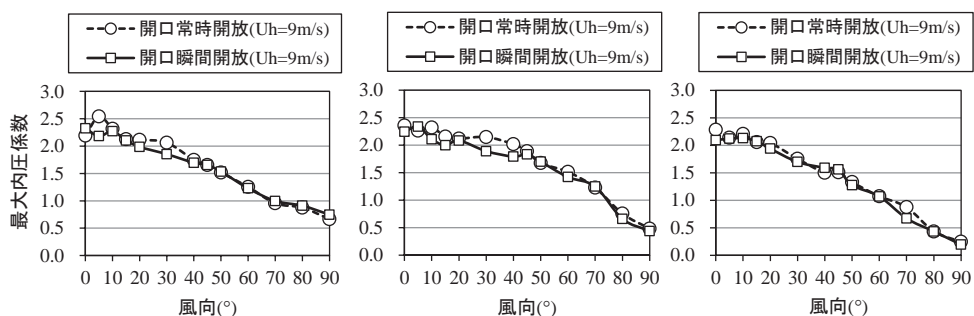


(1)開口 A (基準測定点 a) (2)開口 B (基準測定点 b) (3)開口 C (基準測定点 c)

図5 内圧の測定点位置毎の相関係数(開口常時開放)

3.2 開口瞬間開放の影響

開口が瞬間的に開放された場合の影響を把握するために、「開口瞬間開放」、「開口常時開放」のそれぞれのケースにおける最大内圧係数を図6に示す。これより、各ケース間に最大内圧係数の大きさに差はほとんど見られない。差が見られない原因としては、最大内圧係数の評価時間として実スケールで20分相当の時刻歴を用いたため、開口開放直後とは異なる時刻で最大内圧係数が取得されたことで、開口開放の影響が反映されなかったものと考えられる。そこで、開口開放前後の時刻歴に着目することで、開口瞬間開放の影響の検討を行った。



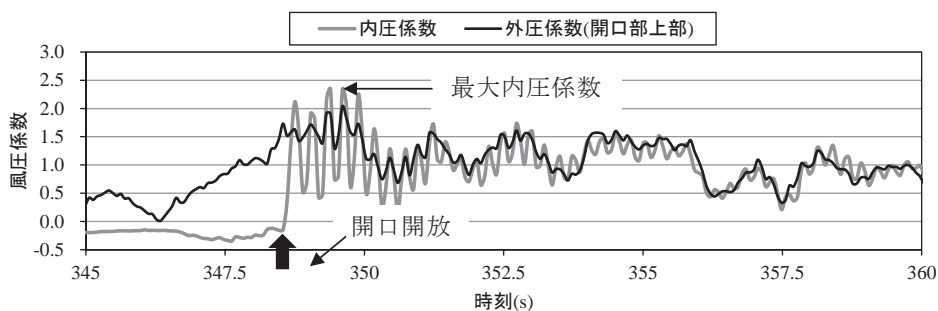
(a)開口 A (開口率 10%) (b)開口 B (開口率 15%) (c)開口 C (開口率 20%)

図6 実験ケース別の最大内圧係数の風向による変化

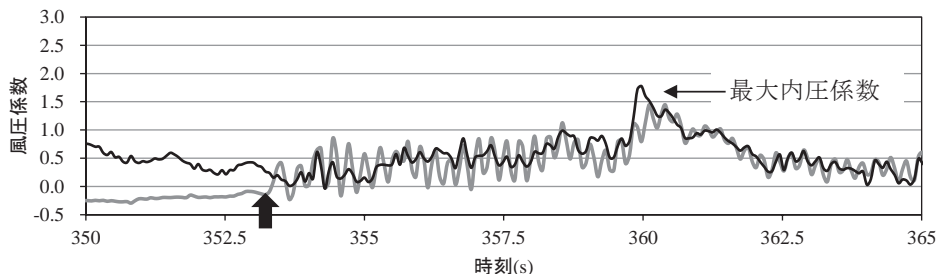
図 7 に、開口開放前後の 15 秒間における内圧係数の時刻歴、及び開口部上部の測定点で計測された外圧係数の時刻歴の比較を示す。実験ケースは、低風速 ($U_H=3.5$ (m/s)) の開口瞬間開放であり、矢印で示した点で開口を開放している。風向角は 0° 、対象とした開口は開口 C (開口率 20%) である。図 7(a), (b) はそれぞれ同一条件のもと測定された 5 回の結果のうちの 2 つであるが、開口開放直後の内圧の変動性状に差異が見られる 2 つの例を抽出したものである。

(a), (b) に共通してみられる傾向としては、開口開放直後に内圧の過渡振動が見られる。これは、既往の研究にも示される Helmholtz 振動によるものと考えられる。その後、内圧の過渡振動が減衰し、外圧変動と同様の変動となっていることが分かる。

一方で、両者の間に見られる差異としては、最大内圧係数の発生点が異なることが挙げられる。図に示した 15 秒間の区間において (a) の最大内圧係数は開口開放直後に生じており、その際には外圧を上回るオーバーシュート現象を確認できる。一方 (b) においては、開口開放直後に内圧が外圧を上回っているものの、最大内圧係数は開口開放直後よりも後に生じている。これは、開口開放とは関係なく、外圧のピークが生じた際に、内圧が外圧に追従してピークを生じたものと考えられる。つまり、開口発生により内圧が外圧を上回る現象は確認できるが、その時点の外圧の大きさが小さければ、対象とする評価時間内における最大内圧係数は開口開放とは関係のない時刻で発生する。よって、図 6 において開口瞬間開放と開口常時開放の最大内圧係数に差異が見られなかった原因としては、今回の各条件 5 回の測定において開口開放時の外圧が必ずしも大きくなかったためであると考えられる。



(a) 開口開放直後に大きな内圧が見られるケース



(b) 開口開放直後に大きな内圧が見られないケース

図 7 開口開放前後の内圧係数時刻歴と開口部上部の外圧係数時刻歴の比較

(開口 C (開口率 20%), 低風速, 風向角 0°)

3.3 開口開放後の内圧変動性状に及ぼす開口面積と風速の影響

(1)時刻歴に基づく検討

開口開放後の内圧変動に、開口面積と風速がどのような影響を及ぼすか検討する為に、風速と開口面積を変化させたケース毎に、前節と同様、開口開放前後の内圧係数時刻歴と開口部上部の外圧係数時刻歴の比較を行った。図8に風速と開口率を変えたときの時刻歴の比較を示す。風速に関しては、低風速の場合には開口開放直後に顕著な過渡振動が見られたが、高風速の場合には見られない。開口面積に関しては、開口率が15%、20%と大きい場合には顕著な過渡振動が見られる。

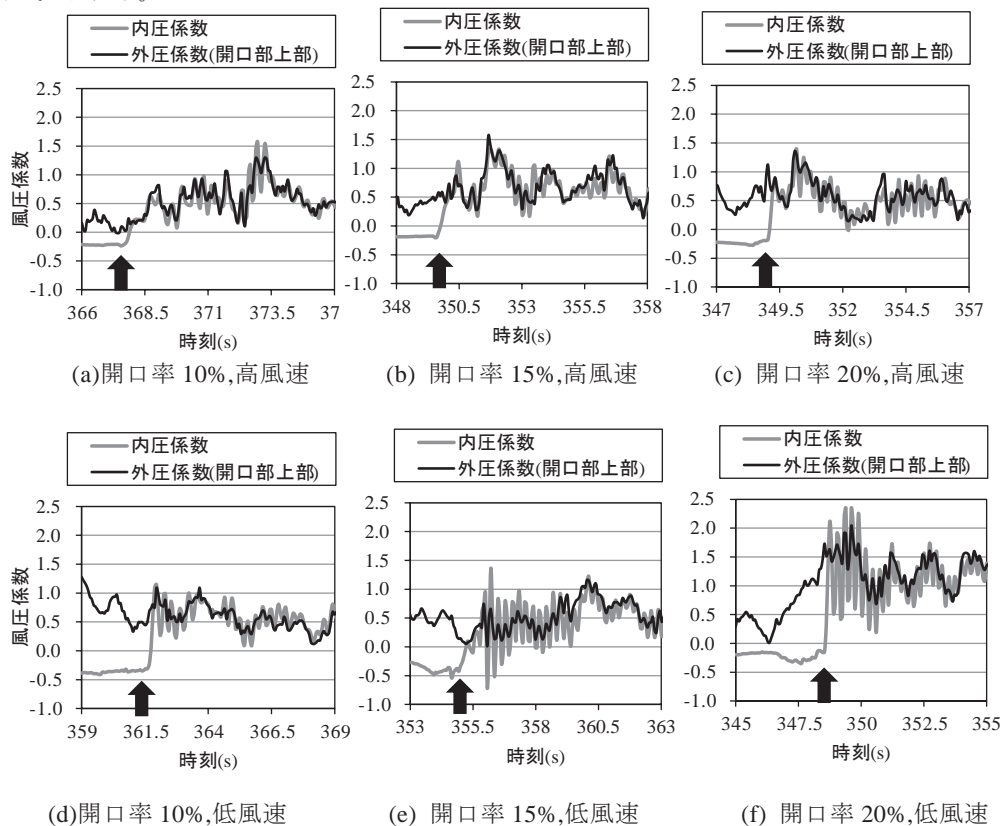


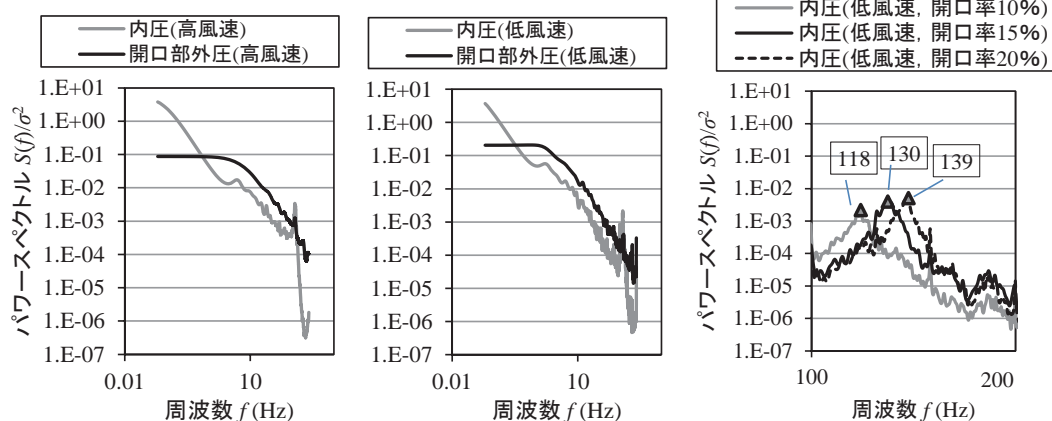
図8 風速と開口率別の開口開放前後の内圧係数時刻歴と外圧係数時刻歴の比較

(2)パワースペクトルに基づく検討

次に、開口面積や風速の影響を定量的に評価する為、風圧係数時刻歴のパワースペクトルを用いて周波数領域での比較を行った。まず、風速の影響を検討する為に、高風速、低風速における測定結果を用いた内外圧のパワースペクトルの比較を図9に示す。内圧のパワースペクトルに着目すると、高風速、低風速いずれにおいても120Hz付近にピークが見られる。このピーク周波数は模型寸法から計算されるHelmholtz振動数の理論値と概ね一致しており、内圧の過渡振動がHelmholtz振動により発生していることが確認できる。一方で、前節の時刻歴の比較においては、低風速時にのみ顕著な過渡振動が見られたが、パワースペクトルのピークは高風

速においても見られる。それにも関わらず、高風速時に時刻歴として内圧の過渡振動が見られなかった原因としては、風速が速くなることで、外圧変動の大きさが内圧変動の大きさに対してより大きくなったことや、減衰効果の増大によって内圧変動の共振現象が抑制されたものと考えられる。

さらに、開口面積の大きさの影響を検討する為に、開口率別の内圧変動のパワースペクトルを図 10 に示す。図 10 はピーク付近の周波数帯 (100~200Hz) に着目して描画している。これより、開口面積が大きくなるほどピーク周波数の値は大きくなり、さらにはパワースペクトルの大きさも増加していることが分かる。以上のような風速、開口面積に関する傾向は既往研究の理論解析結果とも一致しており、瞬間的な開口開放が内圧変動性状に及ぼす影響を実験的に確認することが出来た。



(a)高風速 (9(m/s)の場合) (b)低風速 (3(m/s)の場合)

図 9 内圧，開口部外圧のパワースペクトルの比較
(開口率 10%，風向角 0°)

図 10 開口率別の内圧変動の
ピーク周波数の比較

4. まとめ

開口を瞬間的に発生させることのできる模型を用いた風洞実験を行い、瞬間的な開口開放や、その時の開口面積、風速が内圧の変動性状に及ぼす影響について検討した。

- ・瞬間的に開放されることで、内圧は過渡振動を生じ、外圧変動を上回る大きさの内圧が生じることが確認できた。また、生じる内圧の大きさは、開口を開放させる瞬間の外圧の大きさに強く影響を受けることが確認できた。

- ・開口開放後の過渡振動は Helmholtz 振動によるものであり、風速が遅く、開口が大きいほど、振動の周波数は大きく、減衰は小さくなり、より大きなオーバーシュート現象が生じる可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) Holmes, J. D. (1978). Mean and fluctuating internal pressures induced by wind (pp. 435-450). Department of Civil and Systems Engineering, James Cook University of North Queensland.
- 2) 松井正宏, 田村幸雄, 吉田昭仁. (2005). 強風時の建物内圧の非定常性に関する風洞実験. 理論応用力学講演会 講演論文集, 54(0), 199-199.
- 3) 染川大輔, 川口彰久, 谷口徹郎, 谷池義人. (2008). 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, 73(628), 867-873.
- 4) 日本建築学会 建築物荷重指針・同解説 (2015)