

自然風中で建物に作用する表面圧と内圧の関係

玉井宏樹*・桂 順治・奥田泰雄

*京都大学大学院工学研究科

要旨

180 点の同時計測が可能な野外模型を用いて、自然風中で建物表面にはたらく静圧も含めた絶対圧を測定し、これが建物内部の圧力を決定する機構を定式化した。建物の外側の表面圧が、室内圧と空気の流入に伴う摩擦力に釣り合うことをもとに、表面圧を入力、内圧を出力とする線形関係を導いた。その応答関数は建物の隙間の度合いと、容積に反比例する建物に固有の定数を用いて表すことができる。

キーワード：自然風、表面圧、内圧、風圧、静圧

1. はじめに

現在のところ、自然風中の静圧の検出には確定した方法はなく、過去に行われた自然風中の風圧計測例について見ると、(1) 建物内の部屋のうち直接風の影響を受けないと思われる部屋の静圧を用いること (Newberry et al., 1967), (2) マンホール状の穴を地中に穿ってその静圧を用いること (Eaton and Mayne, 1975), (3) 密閉した空間内の圧を用いること, (4) 建物に加わる圧力と速度圧の対応を見る (桂, 1989, 1993), の3点であると思われる。(1) と (2) の方法は隙間からの空気の出入りによって生じる圧が存在しないという証拠はなく, (3) の方法は温度変化の影響が激しい。また (4) は短時間でしか適用できないなど, どれも純粋な静圧を検出できているわけではない。しかし決定的な静圧検出方法がない現段階では, (1) や (2) の方法のように多かれ少なかれ風の影響を受けたの何らかの圧を基準圧に用いることが通例である。このため自然風中で, その内部空間を持つ物体の表面全体

の圧力が, どのようにして内部空間に伝達するかを調べることは重要である。つまり, (1) の場合には建物内部の圧力を基準圧にとるわけで, 建物の表面圧がどのように室内の圧を決定するかが問題になり, (2) の場合でも本質的には同じことだが, マンホールのふたの表面に分布する圧力とその内部の圧力との関係を明らかにできれば, これらの内部圧を静圧つまりは基準圧として用いる際の検証に一助になるであろう。この問題に対し, 筆者らは京都大学防災研究所潮岬風力実験所の観測フィールドに, 壁内外の差圧によって空気が移動するに十分な程度の小さい孔を壁面に一様にあけた角柱模型設置し, その壁面に加わる圧力と模型内部の圧を絶対圧計測することで実験した。ここで, 以後本論で用いる「表面圧」と「内圧」という用語を定義しておく。風圧係数, 室内圧係数というふつう無限遠点での絶対圧を基準にした差圧と速度圧の比で定義されている。しかしいま無限遠点は問題にならないし, その代用になると考えられる静圧が分離できないので, 本論では便宜的に「表面圧」を建物表面での, 「内圧」を

建物内部での、静圧（大気圧）も含めた絶対圧で定義する。

本論の目的は、建物壁面に一様に隙間があると仮定して、静圧も含めて絶対圧計測された「表面圧」と「内圧」の関係を定式化することである。

2. 実験方法

実験は京都大学防災研究所潮岬風力実験所の平坦な芝生の敷地内で行った。潮岬は高さ約 50m から 70m、東西約 4km、南北約 3km の高台で、風力実験所は潮岬の南西端に位置する。風力実験所の観測フィールドは東西約 30m、南北約 60m の広さがある。実験に用いた角柱模型は高さ 8m 幅 2m の正方形断面を有する 3 次元角柱である。その外観を Photo 1 に示す。また Fig.1 に示すように角柱模型の各壁面に 45 点、合計 180 点の圧力測定点を設けて測定孔をあけてある。これらの各孔から内径 4mm ビニールチューブを通して差圧型圧力変換器（半導体型圧力変換器：Copal P3000S-501D × 60 台、大和設備 DPM-0.025 × 120 台）に繋がれており、その他端は角柱模型内に開放されている。こうして、模型壁面に加わる表面圧と角柱模型の内圧の差圧を計測する。また角柱模型の内圧も模型に加わる風圧と大気圧（静圧）の変動とによって刻々と変化する。これを魔法瓶を利用した恒圧空気だめを利用して絶対圧計測をしている（桂，1988，1989）。

壁面には圧力計測孔とは別に、それらの近傍に 180 個の小さな通気孔があいており、角柱模型壁面の表面圧と内圧の差によって空気の出入りがある（Fig.1 参照）。

そして風向と風速の測定には角柱模型の屋根面より約 2m 高いところに水平に設置した 2 成分の超音波風向風速計（Kaijo-WA-200,TR-51）を用いている（Fig.1 参照）。

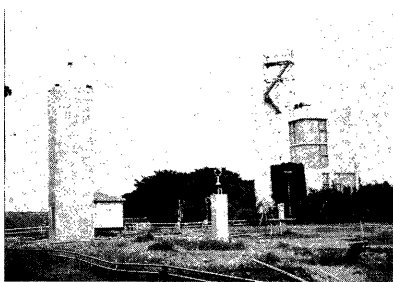


Photo1 Prism model in observation field

なおこのデータ収録システムはパーソナルコンピュータ（NEC PC-9801DA）を用いて長時間の自動計測ができるようにしてある。収録サンプリング間隔は 0.05 秒である。

今回解析するデータは 1997 年 6 月 19 日から 20 日にかけて台風 7 号が潮岬沖を通過した時に得られたものである。

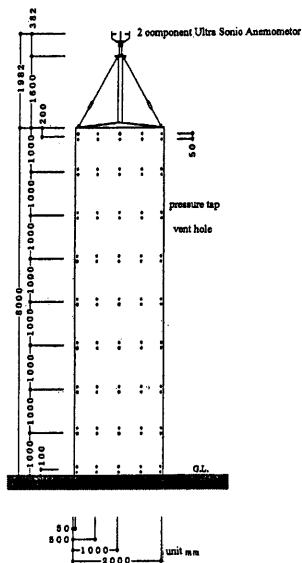


Fig.1 Elevation of prism model and pressure taps and vent holes

3. 実験結果

今回の実験では瞬間風速 15m/sec をしきい値とした自動計測によって約 15 時間分のデータを得た。Fig.2 はそのうちの一例で 128 秒分の時系列データである。上から内圧、差圧（No.1-180）、風向、風速である。180 点の差圧は 45 点毎に北面、東面、南面、西面の順で、各測定点の番号は左上から右下に順にならんでいる。風向はほぼ真西なので、模型の西面が正面、南北面が側面、東面が背面に相当する。圧力データの 1 目盛りは 10mmAq である。この一連のデータから、すでに報告したように角柱の 4 つの壁面で風圧力の発生条件が異なっていることがわかる（奥田，1996）。

模型壁面に加わる表面圧と模型内部の内圧の

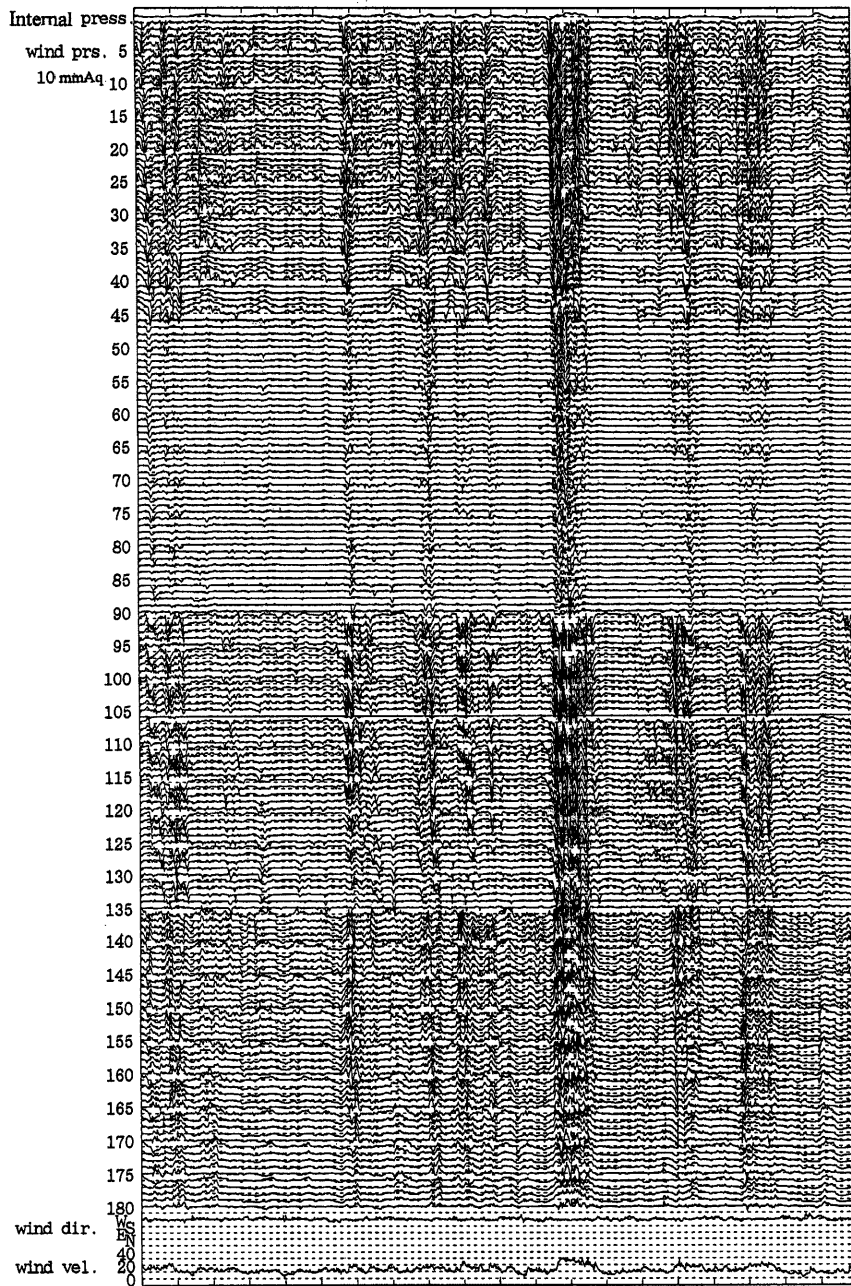


Fig 2 An example of data in time variable which includes a gust

関係を導くために、まずこれら各点の差圧データに内圧データを加えることで、各点の表面圧を得ようとした。しかしながら、各点の差圧データ、内圧データともに以下に述べる理由で0点の信頼度はかなり低いものである。原因としては、(1) 長期間の計測待ち状態が続くため、いくら温度特性がよくなったとはいえ、温度の影響などで差圧変換器の0点は移動し、随時180点に対して、個別に0点調節を繰り返すことは不可能であった。(2) 自動計測というのは常に計測状態を保っておかなければならず、その間に静圧は気象の気圧スケールの変化をするので、魔法瓶と室内圧との差が過大になり変換器が壊れてしまう。それを避けるために変換器の出力で動作する弁を設けて、自動に調整できるようにしたが、これがヒートポンプとなってしまった。その結果、弁開放時の魔法瓶内の温度変化が大きく、その後ならかな温度ドリフトが生じた。

まず(1)の問題に対して、本論では180点の差圧すべての計測点数平均を考慮することで回避できた。こうして得た、壁面全体の差圧を表す時系列データを「総差圧」と呼ぶことにする。詳細は4節で述べるが、総差圧の時間平均値は原理的に0である。だから個々の差圧の0点がずれていても、全点を加えて得られる時系列データからは、時間平均値を除いて、これを0にすればよい。

(2)の問題に対しては、弁が開放される部分のデータは避け、温度ドリフトはほぼ直線的であると仮定した。そして、総差圧と内圧を加えて「総表面圧」を定義し、模型壁面に加わる圧力と内圧の関係を、総表面圧と内圧の関係に置き換えた。

Fig.3, Fig.4 はこうして得られた a) 総表面圧, b) 総差圧, c) 内圧で、Fig.3 は強風区間(区間平均風速 18.9m/s)の1例を、Fig.4 は突風を含む区間(区間平均風速 13.8m/s)の1例を示している。総表面圧と内圧の相互相関の最大値とそのときの内圧の遅れ時間は Fig.3 では遅れ時間 0.65 秒で相互相関 0.732, Fig.4 では遅れ時間 0.90 秒で相互相関 0.545 である。時間ずれは異なるが、どちらも表面圧が内圧に関係することを示している。ちなみに個々の計測点における表面圧と内圧の相関が、これ程よくないことは、Fig.2 から明らかである。

個々の表面圧ではなく、総表面圧を考慮することで内圧との良い相関関係が得られたことで、角柱模型表面全体の圧力分布によって内圧は決定され、しかも総表面圧と内圧の間には線形入出力関係が成立すると考えられる。

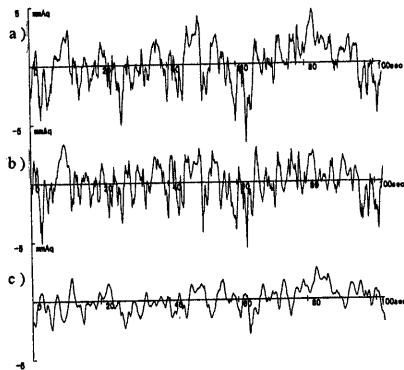


Fig.3 A section with strong velocity

- a) Total surface pressure
- b) Total differential pressure
- c) Internal pressure

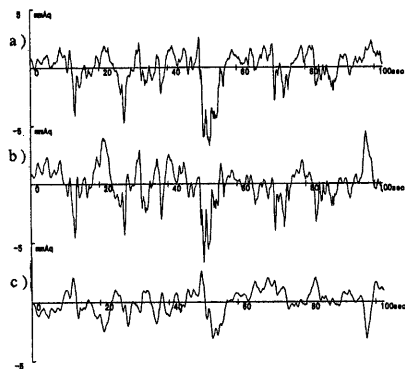


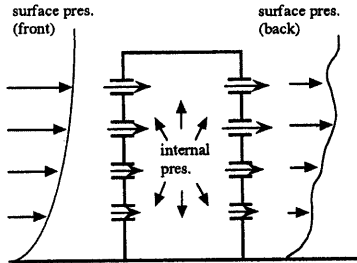
Fig.4 A section with strong velocity

- a) Total surface pressure
- b) Total differential pressure
- c) Internal pressure

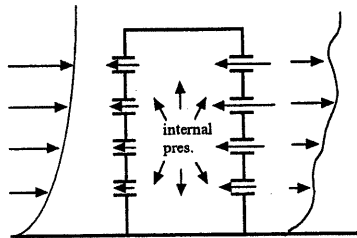
従来の研究では表面圧から速度圧変動にはない低周波を静圧変動として除くことで、風圧を得られるものとしてきた。ところが、風速変動と同程度の変動周期の静圧変動らしいものも見出されており(奥田, 1998), 速度圧変動にはない低周波を静圧変動として除くだけでは、静圧すべてを除いたとはいえない。これが風圧と静圧の分離を困難にしている。

4. 定式化

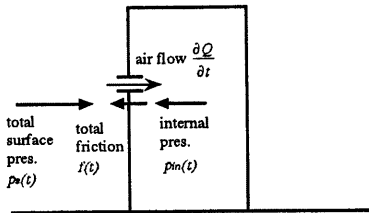
3 節での考察より、総表面圧と内圧の相関は明らかである。物理現象としては建物外部の圧が内部よりも大きいところでは隙間から内部に空気が



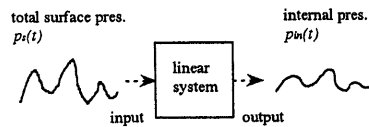
a) Air flow generated by difference of pressure



b) Friction caused by air flow



c) Representation by total surface pressure and total friction



d) Building operating as linear system

流れ込んで内圧を増し、内部より小さいところでは隙間から空気が流出して内圧を減じるであろう (Fig. 5 a) 参照)。そして上に定義した総表面圧を用いて、内外の圧力差による空気的全流入出を記述できると考えるのは自然な推論である (Fig. 5 c) 参照)。

入出力関係については、「内圧は建物全体の表面圧力分布から線形的に決定される。」と定式化できる。つまり、建物は一種の線形フィルターとみなせ、内圧は建物の総表面圧を入力とする線形システムの出力である (Fig. 5 d) 参照)。 $h(t)$ を単位インパルス応答関数として、

$$p_{in}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) p_s(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

$p_{in}(t)$: 内圧

$p_s(t)$: 総表面圧

あるいは力学的には以下のように記述できる。建物の内外の圧力差によって壁面上の穴を通して空気の流入出が起こり摩擦が生じる (Fig. 5 b) 参照)。これについても総表面圧と同様に単位面積あたりの「総摩擦力」を考えると、「建物に加わる総表面圧は、常に内圧と総摩擦力の和に釣り合う。」と定式化できる。すなわち建物内外での圧力の釣り合式、

$$p_s(t) = f(t) + p_{in}(t) \quad (2)$$

$f(t)$: 総摩擦力

が常に成立する。

ここに総摩擦力は単位時間あたりの建物内への空気の流入量に比例すると考える。つまり、 B を比例定数として、

$$f(t) = B \frac{dQ(t)}{dt} \quad (3)$$

$Q(t)$: 建物内の空気の質量

比例定数 B は建物に隙間が少ないなど、空気が流れにくいほど大きな値を取る。

ところで、気体の状態方程式より建物内の空気の質量は内圧と建物の容積に比例し、絶対温度に反比例するが、建物の容積は一定で、しかも温度変化は内圧の変動に比べ周期が長いので一定と見なせるので、比例定数 C として、

$$Q(t) = C p_{in}(t) \quad (4)$$

の、関係式が成立する。この定数 C が建物の容積に比例することは自明である。式 (4) の両辺を時間微分して、

$$\frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dp_{in}(t)}{dt} \quad (5)$$

式 (3) に式 (4) を代入して、

Fig. 5 Image of formulating

$$f(t) = BC \frac{dp_{in}(t)}{dt} \quad (5)$$

を得る。

B も C ともに建物に固有の定数だから、 $\alpha = 1/BC$ としてまとめると、

$$p_s(t) = \frac{1}{\alpha} \frac{dp_{in}(t)}{dt} + p_{in}(t) \quad (7)$$

$p_{in}(t)$, $p_s(t)$ がフーリエ積分で表せると考えて、

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_s(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{i\omega}{\alpha} + 1 \right\} P_{in}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$P_s(\omega)$: $p_s(t)$ のフーリエ変換

$P_{in}(\omega)$: $p_{in}(t)$ のフーリエ変換

から、

$$P_{in}(\omega) = \frac{\alpha}{\alpha + i\omega} P_s(\omega) \quad (8)$$

と表せるから周波数応答倍率 $H(\omega)$ は、

$$H(\omega) = \frac{\alpha}{\alpha + i\omega} \quad (9)$$

これを逆フーリエ変換することで応答関数、

$$h(t) = \alpha e^{-\alpha t} \quad (10)$$

が求まり、総表面圧を入力とし内圧を出力とする線形関係を得る。

$$p_{in}(t) = \int_0^{\infty} \alpha e^{-\alpha \tau} p_s(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

この応答関数 $h(t)$ の α は正の値を取り、積分値は α によらず 1 である。密閉度が小さいか、容積が小さくて、 α が大きくなると $h(t)$ はデルタ関数的になり、密閉度が大きい、容積が大きくて、 α が小さくなると $h(t)$ はステップ関数的になる。応答関数がデルタ関数的になるということは建物に加わる圧力がそのまま内部に伝わることを意味し、ステップ関数的になると、低周波のみが伝わることになる。これは実現象を適切に説明している。

式 (7) は内圧と総差圧の関係に置き換えることができ、そこから導かれる関係を示す。

まず、式 (7) は次のように書き換えられる。

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dp_{in}(t)}{dt} = p_s(t) - p_{in}(t) = p_d(t) \quad (12)$$

$p_d(t)$: 総差圧

これは、空気の流れによる摩擦圧力損失は計測している差圧に等しいことを表している。

(12) 式から式 (8) ~ (11) と同様にして、

$$P_{in}(\omega) = \frac{\alpha}{i\omega} P_d(\omega) \quad (13)$$

$P_d(\omega)$: $p_d(t)$ のフーリエ変換

単位インパルス応答 $h^*(t)$ は $u(t)$ とステップ関数として

$$h^*(t) = \alpha u(t) \quad (14)$$

であり、次の線形関係で表せる。

$$p_{in}(t) = \int_0^{\infty} \alpha u(\tau) p_d(t - \tau) d\tau \quad (15)$$

これは次の不定積分で表せる。

$$p_{in}(t) = \alpha \int p_d(t) dt \quad (16)$$

また式 (13) を変形して

$$\frac{i\omega}{\alpha} P_{in}(\omega) = P_d(\omega) \quad (17)$$

だから、 $\omega \rightarrow 0$ では P_{in} が有限な限り $P_d \rightarrow 0$ となる。総差圧の低周波成分は小さく、周波数 0 の成分はない。よって、十分長い区間での総差圧の時間平均値は 0 として良いことが導かれた。

5. 解析例

4 章で考察した定式化を計測データ (Fig.3, Fig.4) をもとに検証する。

5.1 総表面圧と内圧の関係について

応答関数は線形フィルターであり、この重心位置がフィルターの遅れ時間と考えられる。式 (10) の遅れ時間は $1/\alpha$ である。3 章で示したとおり、相互相関が極大値をとる時間ずれは解析区間によって必ずしも一致せず、0.5 秒ほどの幅があり、平均で 0.73 秒であった。このことは相互相関が極大値を取る時間ずれは、必ずしもフィルター特性の遅れ時間を表さないことを示しているが、 α は建物に固有のものであるから、平均値である 0.73 秒を建物に固有の遅れ時間 $1/\alpha$ とし、 $\alpha = 1.37$ と決定した。Fig.6 の実線と点線はそれぞれ Fig.3 に示した強風区間の総表面圧と内圧のパワースペクトルである。横軸は周波数、あるいは周期を対数表示してある。縦軸は各周波数におけるスペクトル成分を比較しやすいようにパワーに周波数をかけてある。Fig.7 は $\alpha = 1.37$ として式 (11) より得た出力波形であり、Fig.3.c) とは 0.25 秒早い相関は 0.767 である。Fig.6 の鎖線はそのパワースペクトルである。計測された内圧のパワースペクトル (点線) とは 0.2Hz 以上で

良い対応がみられ、0.4Hz 以上の高周波域では特に良く一致していることがわかる。Fig.8, Fig.9 は Fig.4 に示した突風を含む区間で同様に $\alpha = 1.37$ で計算したものである。Fig.9 と Fig.4 c) との相関は 0.588。時間ずれは 0.50 秒。これも Fig.6 同様に計測された内圧と式 (11) より得た出力波形が 0.2Hz 以上の高周波域では良く一致していることが分かる。

0.2Hz 以下の低周波領域ではどちらの区間でも計測された内圧と式 (11) より得た出力波形のパワースペクトルは大きく異なる。この現象について速度圧をもとに検証する。Fig.10 a) は Fig.3 区間の速度圧の時系列データであり、b) はパワ

ースペクトル図である。これを見ると速度圧も、Fig.6 で計測した内圧と式 (11) から計算した内圧とが不一致であった成分、特に周波数 0.02~0.03 にピークにもっている。Fig.6 の表面圧スペクトルも同じ周波数域にピークがあることから、速度圧は表面圧に伝わっているが、表面圧から内圧には伝わっていないことがわかる。この原因として、流形の破壊に関係するとも考えられるが、この場合本論の定式化からは説明できず、定かではない。あるいは、各点の通気孔が、全て厳密には同じ条件とはいえないことが原因で、総差圧に生じたノイズとも考えられる。

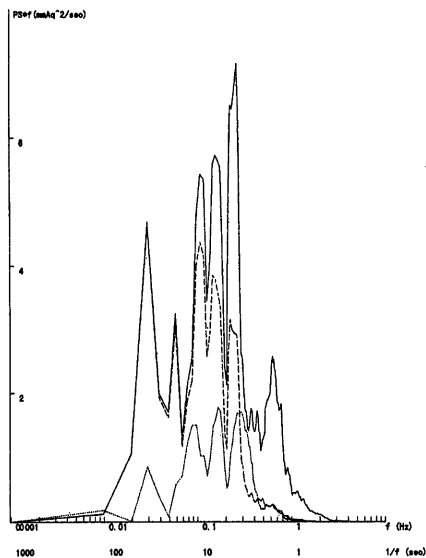


Fig.6 Power spectrums in case of Fig.3

— total surface pressure, ---- internal pressure,
-- calculated internal pressure

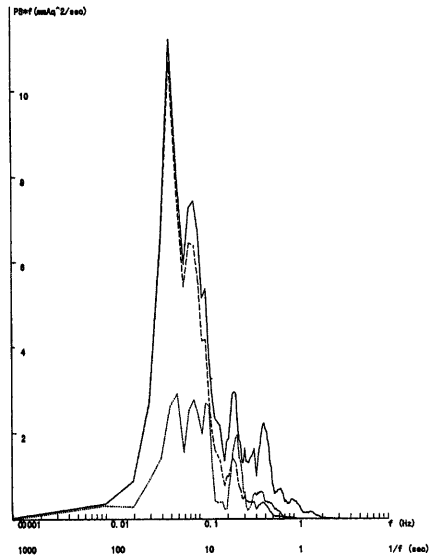


Fig.8 Power spectrums in case of Fig.4

— total surface pressure, ---- internal pressure,
-- calculated internal pressure

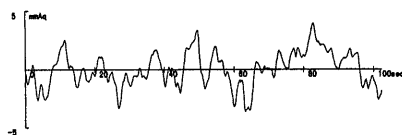


Fig.7 Internal pressure calculated from Fig.3a)

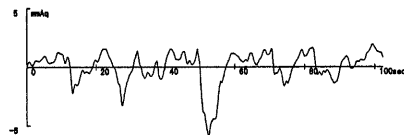


Fig.9 Internal pressure calculated from Fig.4a)

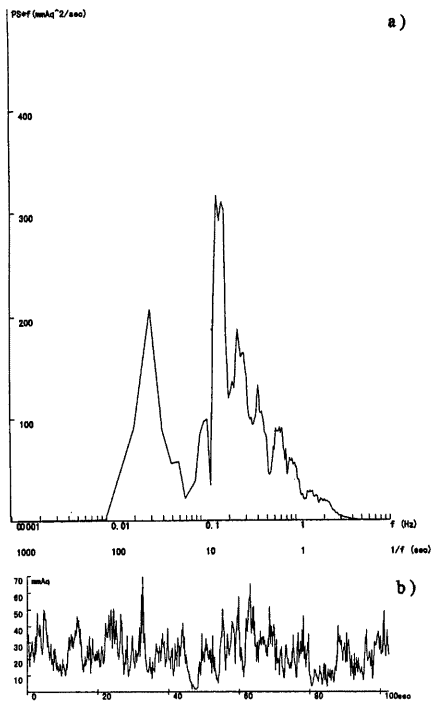


Fig. 10

- a) Data of dynamic pressure in case of Fig. 3
b) Power spectrum of dynamic pressure in case of Fig. 3

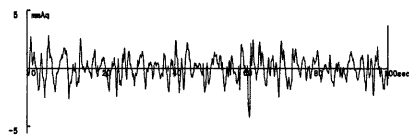


Fig. 11 Differential pressure calculated from Fig. 3c)

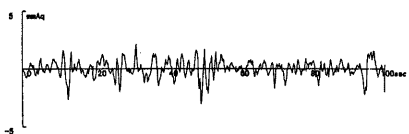


Fig. 12 Differential pressure calculated from Fig. 4c)

5.2 総差圧と内圧の関係について

Fig. 11 は Fig. 3c) を, Fig. 12 は Fig. 4c) を時間微分して $1/\alpha$ 倍したものである。5.1 と本質的に変わるところはないので, パワースペクトル図等の詳細は示さないが, 0.02~0.03 の低周波を除いて, それぞれ十分に Fig. 3b), Fig. 4b) と似ている。相互相関はそれぞれ, 0.57 と 0.55 である。こうして式 (12), (16) が確かに成立することも示された。

6. まとめ

180 点の圧力同時計測が可能な野外実験模型を用いて自然風中で建物に働く総表面圧と, 建物内部の圧力 (室内圧) を測定し, 180 点を平均したデータを建物表面全体に加わる圧力として記述することで, 内圧が, 建物表面の圧力分布から決定される機構の定式化を試みた。その結果として低周波成分で不明な点を残しつつも 0.2 Hz 以上では概ね定式化に成功した。まとめると,

- (1) この定式化は, 建物の外側の表面圧が, 内圧とその差圧によって空気が流入する際の摩擦力和との和と釣り合うことを意味している。
- (2) これは内圧を出力とする線形システムで表せ, 応答関数は, $a \exp(-at)$ で表せる。
- (3) α は建物の密閉度合いと, 容積に反比例する建物に固有の定数である。複数区間で総表面圧と内圧の時間ずれを求め, これらの平均値をこの線形システムの遅れ時間 $1/\alpha$ とすることで定数 α を決定できた。

(4) この α によって容積が小さく密閉度が弱いほど外部の圧はそのまま内部に伝わり, 容積が大きくて密閉度が強いほど圧が内部に伝わりにくい現象が定量的に評価できる。

(5) この定式化を書き換えることで, 建物の壁内外での差圧と内圧の関係に書き直すことができる。その関係は総差圧を時間積分して α 倍すると内圧を得るというもので, これによって総差圧データから内圧の変動波形が推定されることを示した。

(6) この定式化は 0.2 Hz 未満の低周波成分には適用できなかった。総差圧が内圧と同程度の低周波変動を含んでいるため, この現象を説明するのは今後の課題である。

参考文献

加藤 信男・大熊 武司・新堀 喜則・栗田 剛

- (1996) : 高層建築物の外装材を対象とした風力に対する研究 (その1) 平均室内圧の性状について, 日本建築学会構造系論文集, 第498号, pp.25-32
- 桂 順治 (1988) : 室内圧計測用擬似恒圧空気溜の試作, 京都大学防災研究所年報第31号, B-1, pp.393-398
- 桂 順治 (1989) : 低層構造物に作用する風圧の計測, 京都大学防災研究所年報第32号, B-1, pp.415-422
- 桂 順治 (1993) : 突風によって生じる流形の形成について, 日本建築学会構造系論文集, 第451号, pp.65-78
- 奥田泰雄・桂 順治・塚原康平 (1996) : 自然風中に置かれた角柱模型に加わる風圧力の計測, 京都大学防災研究所年報, 第39号, B-1, pp.95-105
- 奥田泰雄・桂 順治・河井宏充 (1998) : 自然風中での模型内圧と大気静圧について, 京都大学防災研究所年報, (印刷中)
- Newberry, C. W., K. J. Eaton, and J. R. Mayne (1967): The Nature of Gust Loading on Tall Building, Proc. 2nd International Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, pp.399-428
- Eaton, K. J. and J. R. Mayne (1975): The Measurement of Wind Pressure on Two-Story Houses at Aylesbury, J.Ind.Aerodyn., Vol.1, pp.67-109.

Relationship between Surface Pressure on a Building and its Internal Pressure in Natural Wind

Hiroki TAMAI*, Junji KATURA, Yasuo OKUDA

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The paper proposes a formula of the mechanism in which the external pressure on a building generates the internal pressure. Wind pressures and internal pressure both of which include atmospheric pressure were measured on a prism model in natural wind, using 180 channels multi-simultaneous data acquisition system. The proposed model is based on the balance among external pressure, internal pressure and friction caused by the air flow through vents in the wall. That results in a linear system that outputs internal pressure from external pressure. Its impulse response function is expressed using the constant which is in inverse proportion to tightness and volume of the building.

Keywords: natural wind, surface pressure, internal pressure, wind pressure, atmospheric pressure