

急激な気圧変化に対する室内圧の応答

石崎 潑雄・林 泰一・谷池 義人

THE RESPONSE OF THE INDOOR PRESSURE TO THE SUDDEN CHANGE OF THE OUTDOOR PRESSURE

By *Hatsuo ISHIZAKI, Taiichi HAYASHI and Yoshihito TANIKE*

Synopsis

The response of the indoor pressure to the sudden change of the outdoor pressure was investigated. The differential equation of the response was derived assuming the Poiseuille flow for the airflow between the inside and outside of a house. The coefficient for the ventilation was determined by the simple experiments and presented as a function of the volume of a house. The maximum of the pressure difference was obtained by solving the equation in the passage of a Tatsumaki. The occurrence of the damage in the Tatsumaki was able to be explained by such a pressure difference between the inside and outside of a house.

1. は じ め に

竜巻による建物の被害の主な原因としては、竜巻に伴う強風による風圧力と、急激な気圧の変化によって生じる建物の内外の気圧差が考えられる。風圧力による被害はこれまでも数多く報告されているが、急激な気圧変化によって生じる気圧差は、風圧力に比べて小さいものとして考えられてきた。しかし、竜巻通過時に、家屋の戸やふすまが倒れたり、屋根瓦が持ち上がったことや、窓が家の外へ飛び出した例など、建物の内外に生じた気圧差のために、家の外向きに力が作用したと考えられる被害も報告されている¹⁾。現在、アメリカでは、原子力発電所の設計に際しても、基準となるようなトルネードのモデルを作成し、風圧力、気圧差による力について検討を加えている。そこでは、トルネード内の気圧の最大降下量を 3.0 psi (=207 mb)、最大風速を 360 mph (=160 m/s) と設定している²⁾。このモデルを基にして、急激な気圧変化の際の建物内外に生じる気圧差によって作用する力を推定した例としては、Minor ら及び Yeh によるものがある^{3),4)}。Minor らによれば、建物の体積 1000 m³ に対して、3.0 m² 程度の空気の流出口があれば、気圧差による建物の被害は避けられるとし、通常の建物には、この程度の隙間は十分備わっていると結論している。これに対して、Yeh の解析結果では、同程度の隙間の場合にも、最大約 50 mb (=5.0×10³ pa) の気圧差が生じることが示され、構造物によっては、被害が発生する可能性がある。このように、建物の内外に気圧差が生じることによって被害が発生するかどうかは、はっきりと結論づけられているわけではない。

ここでは、外気圧の変化に対する室内圧の応答の方程式を作り、簡単な実験から、建物の気密に関する係数を決定して、竜巻通過時に建物に作用する気圧差による力を評価した。さらに、この結果を実際の被害例に応用してみた。

2. 外気圧の変化に対する室内圧の応答の方程式

建物内外の気圧差のために、建物のすきまから空気の流出があると考える。建物の体積を V 、単位時間当たりの流出量を Q (建物から外へ流出するとき $Q>0$ 、外から流入するとき $Q<0$ とする) とし、微小時間 Δt に $Q\Delta t$ の空気の流出があったとする。そのとき、室内の気圧が P_1 が、 ΔP_1 だけ変化して、 $P_1+\Delta P_1$ に

なったとすると, Boyle の法則から, 次の式が成立する。ここでは等温過程を仮定する。

$$P_1 V = (P_1 + \Delta P_1) (V + Q \Delta t) \dots\dots\dots (1)$$

2 次の微小項を無視して, $\Delta t \rightarrow 0$ の極限をとると,

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{P_1}{V} Q \dots\dots\dots (2)$$

建物からの空気の流出は, 建物内外の気圧差によって起こされと考え, その流出口の面積は小さいときには, 空気の流れは, Poiseuille 流と仮定することができる。建物外の気圧を P_0 とすると, 空気の流出速度 v は, 建物の内外の気圧差 $P_1 - P_0$ に比例して, 次のように表現できる。

$$v = \frac{a}{\mu} (P_1 - P_0) \dots\dots\dots (3)$$

ここで, μ は空気の粘性係数, a は空気の流出に関する係数である。

単位時間当りの流出量 Q は, 流出口の面積を S として

$$Q = vS = \frac{a}{\mu} (P_1 - P_0) S \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(2)(4)から

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{aS}{\mu V} P_1 (P_1 - P_0) \dots\dots\dots (5)$$

建物の体積に対する, 空気の流出口の面積の割合を α として,

$$\alpha = \frac{S}{V} \dots\dots\dots (6)$$

とおき, $a\alpha$ を改めて無次元の係数 A とおいて, (5)を書直すと,

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{A}{\mu} P_1 (P_1 - P_0) \dots\dots\dots (7)$$

となる。これが, 外気圧の変化に対する室内圧の応答の微分方程式であり, 係数 A は, 各々の建物によって決まる係数である。

実際の竜巻では, 各々の竜巻によって, 最大気圧降下量や移動速度, 竜巻の規模などは異なっている。そこで(7)を, 最大気圧降下量 ΔP_{max} , 移動速度 u , 竜巻の規模 (最大風速半径) R によって無次元化し, $P_1^* = P_1 / \Delta P_{max}$, $P_0^* = P_0 / \Delta P_{max}$, $t^* = t / (R/u)$ とすると,

$$\frac{dP_1^*}{dt^*} = -K P_1^* (P_1^* - P_0^*) \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここで

$$K = \frac{A}{\mu} \frac{R}{u} \Delta P_{max} \dots\dots\dots (9)$$

であり, 建物の気密度, 竜巻の性質によって決定される無次元の係数である。

竜巻の通過に伴う大気圧の時間変化を考える。竜巻の通過以前には, 建物の内外ともに, ある一定の気圧 P_{ref} であったとする。竜巻の通過によって気圧が降下するが, その降下量を Δp とする。それは, 竜巻の渦の構造が, Bjerknes の提案した渦で近似できるとすれば⁹⁾,

$$\Delta p = \frac{\Delta P_{max}}{1 + (r/R)^2} \dots\dots\dots (10)$$

と表わすことができる。 r は竜巻の中心からの距離, R は最大風速半径である。ここで, $r = ut$ と置いて、距離を時間に置換え、さらに ΔP_{max} で無次元化すると、

$$\Delta p^* = \frac{\Delta P}{\Delta P_{max}} = \frac{1}{1 + t^{*2}} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここでは, $t^* = 0$ のときに竜巻の中心が通過したと考えている。竜巻の渦の外の気圧は P_{rf} であるので、竜巻通過に伴う気圧の時間変化は、次のように表現できる。

$$P_o^* = P_{rf}^* - \frac{1}{1 + t^{*2}} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, $P_{rf}^* = P_{rf} / \Delta P_{max}$ である。

(12)を(8)に代入し、係数 K の値がわかれば, P_i^* が計算できる。この P_i^* と外気圧 P_o^* の差 $p^* = P_i^* - P_o^*$ が建物に加わる力になる。

3. 竜巻通過時の建物内の気圧の応答の数値解

竜巻通過の際の建物内の気圧の応答の式(8)を数值的に解いてみた。気密度の係数 K として, 0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 の7つの場合について、建物内外の気圧差 $p^* = P_i^* - P_o^*$ の時間変化のようすを Fig.1 に示す。 $K=0$ のときは、建物の気密が完全に保たれ、空気の流出が全くない場合に相当する。建物内の気圧が時間的に一定に保たれているとすれば、竜巻通過時の気圧の降下がそのまま建物の内から外へ加わる力となる。すなわち、図中の $K=0$ のときには、建物に加わる力の時間変化が竜巻内の気圧の降下を示す。建物の内外の気圧差のために建物に作用する力は、竜巻の中心の接近につれて ($t^*=0$ が竜巻の中心の通過を示す) 増加する。その力が最大になるのは, $K \neq 0$ のときには、竜巻の中心が通過するときである、大気圧が最低になるときではなく、それよりも、やや以前である。また、中心の通過後は、建物内の気圧が、外気圧より低い状態になり、このときには、力は建物の外から内へ作用することになる。Fig.2 には、建物に加わる力の最大値が、 K の値によって、どのように変化するかを示したものである。建物の内から外

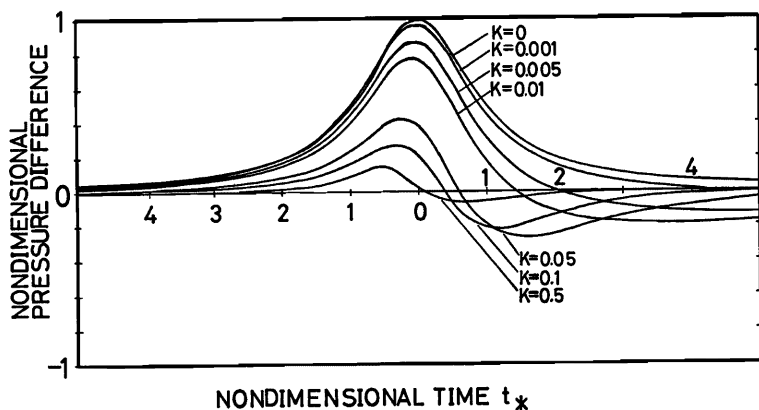


Fig. 1 Time variation of indoor and outdoor pressure difference of a house.

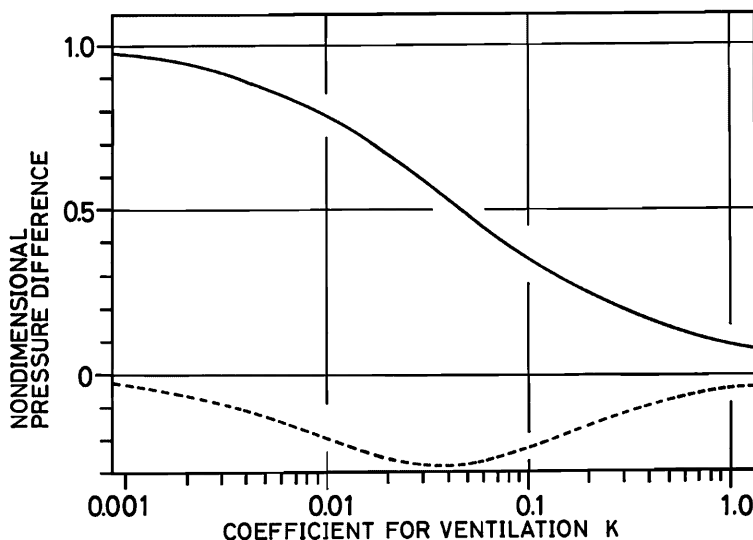


Fig. 2 Maximum of indoor and outdoor pressure difference of a house in a Tatsumaki as a function of a ventilation coefficient K .

への力を正とした。図中の実線は、建物内から外向きの場合であり、破線は、竜巻通過後の外から内向きの場合の最大値を示す。外向きの力は、 K の増加につれて、単調に減少していく。これは、 K が大きくなることは、それだけ建物の気密が悪くなることに相当することから、当然予想されたことである。外から内向きの場合は、 $K=4.0 \times 10^{-2}$ 程度のところで最大になり、それより K が大きくなると、再び緩やかに減少する。

4. 建物の気密に関する定数の決定

建物内の気圧の応答を支配する微分方程式の中の、建物内の気密に関する係数 A を実験的に決定してみた。ここでは、簡単な爆発実験を行ない、そのときの気圧の変化を調べることで係数を求めた。

2. で導いた方程式は非線型であり、一般には解くことはできない。しかし、外気圧 P_0 が時間的に一定と見なしうる場合には、解析的に解くことができる。建物内外の気圧差 $p = P_1 - P_0$ について解くと、

$$p = P_1 - P_0 = \frac{P_0}{\frac{P_0 + p_m}{p_m} \exp\left[\frac{AP_0}{\mu} t\right] - 1} \quad (13)$$

となる。 $p_m = p_{t=0}$ である。(13)は、外気圧 P_0 が時間的に一定の場合に、建物内外に気圧差 p_m を与えたとき、それ以後の建物内外の気圧差 p の時間変化を示す。 $t=0$ のときの気圧差 p_m が外気圧 P_0 に比べて十分に小さいとすれば、(13)は近似的に、

$$p = p_m \exp\left[-\frac{AP_0}{\mu} t\right] \quad (14)$$

となり、 p は指数的に減少する。その時定数は

$$T = \frac{\mu}{AP_0} \dots\dots\dots (15)$$

である。

以上から、対象とする建物や模型の内外に強制的に気圧差を作り、それ以後の気圧差の時間変化を調べ、時定数が求まれば、 A が決定できることになる。ここでは、実際の建物や模型内で、LP ガスを爆発させて、建物内の気圧を上げ、その降下状態を調べた。対象として、ベニヤ板で作成した木箱 (0.6 m×0.6 m×0.9 m)、木造のドーム型の模型 (半径 6.35 m、高さ 2.35 m)、鉄筋コンクリートの大小 2 つの部屋 (大部屋が 6.1 m×6.1 m×2.3 m、小部屋が 1.5 m×1.5 m×2.3 m) の 4 例である。気圧の測定には、拡散型半導体小型圧力変換器 (豊田工機 PD 106 K) で測定した。気圧の降下の一例を Fig. 3 に示す。これは木造のドーム型模型である。爆発による気圧の上昇は、18 mb であり、このときの外気圧 1010 mb の約 2% で、0.4 は十分成立すると考えられる。模型内の気圧の降下は、指数関数によって十分近似することができる。この例の時定数は、 $T=0.605$ 秒であった。空気の粘性係数 $\mu=1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (気温 15°C)、大気圧 1010 mb ($=1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) から、このときの $A=2.96 \times 10^{-10}$ となる。他の 3 例についても、同様にして A を決定した。Table 1 に、4 例の各体積、時定数、 A の値を示す。

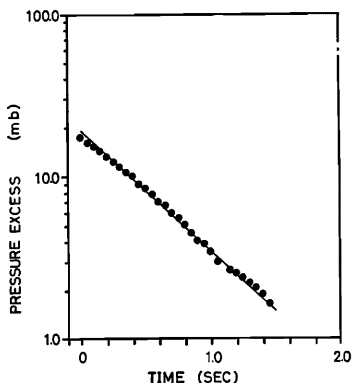


Fig. 3 Time variation of pressure excess in a wooden dome model.

係数 A を実際の建物に応用するには、 A がどのような要因で変化するかを調べ、どのような式で表現されるかがわかれば都合がよい。この実験例では、1 m³ 以下から 200 m³ に至る広い範囲の体積について A の値が得られたので、体積の変化に対して、 A がどのような変化をするかを調べた。Fig. 4 に体積と A の関係を示す。 A は、体積 V の $-\frac{1}{4}$ 乗に比例し、次のような実験式で表現できる。

$$A = 2.13 \times 10^{-9} V^{-\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (16)$$

K の値は、建物の気密に関する係数 A だけでなく、各々の竜巻に固有の、最大気圧降下量 ΔP_{max} 、移動速度 u 、竜巻の規模 R を含んでいる。ここでは、1978年2月28日に関東地方を通過した竜巻を例にとって、 $\Delta P_{max}=60 \text{ mb}$ ($=6.0 \times 10^3 \text{ Pa}$)、 $u=30 \text{ m/s}$ 、 $R=150 \text{ m}$ として⁶⁾、先きの 4 例について、 K を決定した。結果は、Table 1 に示すとおりである。最大気圧降下量の 60 mb は、竜巻の最大回転風速 50 m/s から旋衡風近似を仮定して求めた。

(9)に(16)を代入すると、 K に対する実験式が求まり、

Table 1 Volumes, time constants for the pressure change and coefficients for ventilation A and K .

	Volume (m ³)	Time Constant (sec)	Coefficient A	Coefficient K
Wooden Box	3.42×10^{-1}	9.43×10^{-2}	1.90×10^{-9}	3.15
RC Room (small)	5.29	7.02×10^{-2}	2.55×10^{-9}	4.23
RC Room (large)	8.50×10	1.69×10^{-1}	1.06×10^{-9}	1.75
Wooden Dome Model	2.15×10^2	6.05×10^{-1}	2.96×10^{-10}	0.49

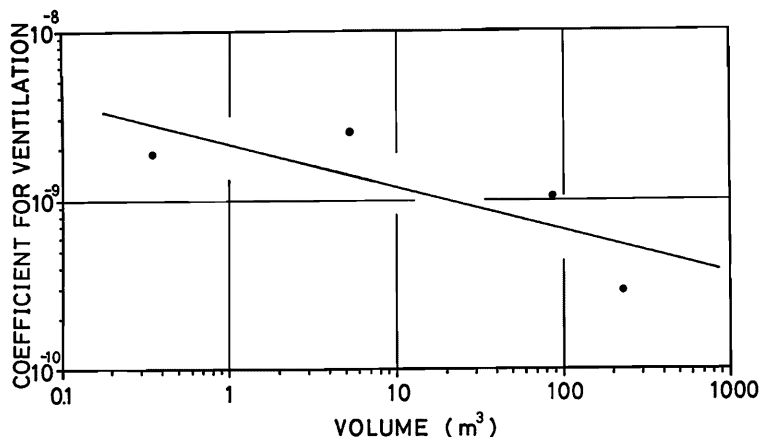


Fig. 4 Coefficient for ventilation K as a function of a volume of a house.

$$K = 3.52 V^{-0.4} \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

となる。

5. 実際の被害への適用

実際に、竜巻によって起こされた被害に対して、今までに得られた結果を適用し、その被害が気圧差による力によって発生するかどうかを検討してみた。前述の関東地方を通過した竜巻の際に、丁度、竜巻の進路上に位置していたと推定される市川市の市川高校のプレハブ校舎一棟が持ち上げられ、隣接した同型の校舎を飛び越えて、一つおいて隣りの建物の上へ落下し破壊した⁷⁾。この校舎は、平屋建てで5教室からなり、隣の校舎との間隔は約19m、隣の校舎の高さは、6mであった。飛ばされた校舎の床と教室内の机等は、そのまま飛ばされずに残っていた。校舎の側壁と床面とは、細いカスガイ（直径6mm）で床面の周囲40ヶ所に各2本の計80本で固定されていた。この被害では、このカスガイ80本が引伸ばされてしまっていたことから、校舎を床から引き離したのは、竜巻の通過の際に、校舎の内外に生じた気圧差による力ではないかと推定される。校舎を床から引き離すためには、飛ばされてしまった側壁より上の部分の重量を支え、さらに側壁と床とを固定したカスガイを引伸ばすだけの上向きの力が作用しなければならない。このカスガイ一本を引伸ばすのに必要な力は約75kgfであり⁸⁾、側壁と床を固定した80本のカスガイを引伸ばすには、約6000kgfの力が必要である。この力が、校舎の内と外との気圧差によるものとすれば、この校舎の床面積が約535m² (=54.9m×9.0m) であるので、天井に約11kgf/m²の圧力が上向きに作用すればよい。一方、この校舎の側壁より上の部分の重量は、平均85kgf/m²であり、合計約96kgf/m²の圧力差が生じればよい。この校舎の体積は、約3200m³であるので、(7)から K の値は、0.46になる。竜巻が通過した時に、この校舎に作用する力は、Fig.2 から、竜巻の中心の気圧の降下の17%である。この被害で発生させた竜巻の中心の気圧の降下は、約60mbと推定されるので、校舎には、約10mb (=102kgf/m²) の力が外向きに作用したと推定される。このように、この竜巻の通過によって生じる校舎内外の気圧差は、校舎を床から引離してしまうのに十分な力であったことがわかる。

6. ま と め

竜巻の通過の際に、気圧の急激な変化に対する建物内の気圧の応答に対する方程式を作り、建物内の気圧の時間的な変化を調べた。建物の気密度に関する係数は、簡単な実験から決定し、建物の体積の関数として表現した。それらの結果から、竜巻通過の際に、建物内外に生じる気圧差を評価してみた。実際の竜巻の通過時の被害の実例に応用してみると、建物の破壊が、この気圧差によって発生しうることが示された。しかし、竜巻の被害は、単に、この気圧差のみによって発生するわけではなく、風圧力や吸上げによる力なども加わって複雑な機構で発生するものと考えられる。

本研究は、文部省科学研究費自然災害特別研究 (No. 00502017, 研究代表者 光田寧) の補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 石崎潑雄, 河井宏允, 成仁煥, 森武雄: 龍巻による建物の被害について——1973年5月1日石川県押水町を襲った龍巻の被害調査——京都大学防災研究所年報, 第17号 B, 昭49. 4, pp. 209-217.
- 2) US Nuclear Regulatory Commission, Regulatory guide 1. 76., 1974.
- 3) Minor, J. E., J. R. McDonald and K. C. Metha: The Tornado: An Engineering oriented perspective., NOAA Tech. Memo. ERL., NSSL-82, NSS1, Norman, OK., 1977, 196p.
- 4) Yeh, Y. K.: Differential Pressures on Building Wall during Tornado., Nucl. Eng. Des., 41, pp. 53-57.
- 5) Bjerknes, V.: On the Dynamics of the Circular Vortex with Application to the Atmosphere and Atmospheric Vortex and Wave Motions., Geophysicke Publikationer, Vol. 2, 1921, pp. 1-81.
- 6) 光田 寧, 文字信貴, 岩谷祥美, 西岡淳一: 1978年2月28日に東京地方を襲った竜巻について, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-1, 昭54. 4, pp. 385-406.
- 7) Ishizaki, H. and Y. Taniike: Structural Damages Caused by Tatsumaki., Bul. Disas. Pre. Res. Insti., Vol. 29, Part 3, 1980, pp. 129-141.
- 8) 日本建築学会: 木構造設計規準, 同解説, 1961, 292p.