網状構造物の抗力係数に関する研究

— 2次元網状板の抗力係数 —

A STUDY ON DRAG COEFFICIENT OF RETICULATED STRUCTURES

— Drag coefficient of 2-D reticulated plates —

上田 宏*, 丸田 栄蔵**, 本郷 剛***

Hiroshi UEDA, Eizo MARUTA and Takeshi HONGO

Reticulated structures are often used for buildings. However, such structures are very sensitive to effects of wind, and accordingly they have been subjected to considerable damage caused by wind. This paper elucidates the relationship between resistant coefficients and solidity ratios of screens actually used for buildings, and also describes the characteristics of the drag coefficient of two-dimensional reticulate plates that were made from the screens employed for the study. Resistant coefficients of the test screens were measured by using a vertically-placed water tube. It was proved that the resistant coefficient K of the screen can be estimated by an equation, $K = 1.2S/(1 - S)^2$, which is based on the solidity ratio S . Wind-tunnel tests were performed to measure the drag force acting on the two-dimensional reticulate plates in a uniform airflow. The drag coefficient C_D of the two-dimensional reticulate plates in a case of $S > 0.3$ can be estimated by substituting $K = 1.2S/(1 - S)^2$ into an empirical equation that expresses the relationship between C_D and K .

Keywords: reticulated structure, drag coefficient, reticulated plate, solidity ratio

網状構造物、抗力係数、網状板、充実率

1. はじめに

網状構造物には、養生ネットを張った外部仮設足場や防風柵、防雪柵、防砂柵、ゴルフや野球の防球柵など多種多様なものがある。このような軽量の網状構造物は風の影響を受けやすく、暴風災害に見舞われることが少なくない。そして、この被害原因の多くは、耐風設計を行う際に見積もる必要のあるネットまたはスクリーン等の網状物、更にはそれらの網状物を張った場合の網状構造物全体の抗力係数などについての性状がまだ十分に把握されていない点にあると考えられる。

流れが網状物を通過する際には圧力損失を生じる。このため網状物には流体力(抵抗)が作用する。Collar(1939)¹⁾は、金網と多孔板の抵抗係数と開口率との関係を調べ、Collar定数と呼ばれる係数を含む関係式を導いている。Collar自身はCollar定数として $\gamma = 0.9$ を、Simmons & Cowdrey(1945)²⁾らは $\gamma = 0.95$ を、Wieghardt(1953)³⁾は $\gamma = 0.65 \sim 1.0$ を示している。このようにCollar定数は、網の形状や厚さ、素材の寸法、流速などによって異なるが、このことを言い換えるならば、抵抗係数と開口率との関係が等しい網状物は、素材や製作方法等の如何に関わらず、流体力学的には同じ種類であると言える。

Taylor & Davies(1944)⁴⁾は、多孔板および金網の抗力係数と抵抗係数との関係を風洞実験並びに水槽実験によって測定し、Taylor(1944)⁵⁾が理論的に導いた式との比較を行い、Taylorの式が抵抗係数 $K = 0 \sim 4$

程度まで適用できることを明らかにしている。Cook(1985)⁶⁾は、風向に正対する防風フェンスの抗力係数(風力係数)を推定するためにこのTaylorの式を用いている。Murota(1976)⁷⁾は、充実率が非常に小さい0.25以下の数種類の建築用ネットの抗力係数を風洞実験で測定し、抗力係数と充実率との関係式を導くと共に、抗力係数と流速との関係を考察し、抗力係数が流速に依存しない最小のレイノルズ数は、円形断面の素材のスクリーンを除いて、120～150であることを見出している。

独立フェンスのような網状構造物の抗力係数は、たとえ同種の網状物を用いた場合でも、立面形状やその設置の仕方によって異なることが、オーストラリアの風荷重規程であるAS1770.2(1989)⁸⁾やヨーロッパの風荷重規程であるENV1991-2-4(1994)⁹⁾の中に示されている。即ち、Taylorの理論⁵⁾からも理解できるように、充実率が非常に小さい網状物の抗力係数と抵抗係数は、網状物を通過する流れの流速と上流の一般流の流速とがほぼ等しくなるために概ね等しくなる。しかし、充実率が増加していき、その網状物の抵抗係数が $K > 4$ になるとその網状物を張った網状構造物の周りの流れが歪められ、網状物を通過する流速と一般流の流速は等しくなくなる。このため網状構造物の抗力係数は、網状物を通過する流れと網状構造物の周りの流れの性状に大きく支配されることになる。このようなことから網状構造物の抗力係数は、網状物の充実率とそれを張った網状構造物の形状および設置の仕方等を考慮して評

* 千葉工業大学工学部建築学科 助教授・工博

** 日本大学生産工学部建築工学科 教授・工博

*** 鹿島建設(株)技術研究所 上席研究員・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, College of Industrial Technology, Nihon University, Dr. Eng.

Supervisory Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

価する必要がある。

従来、建築用の網状物としては、充実率が0.7以下のものが多用されて来たが、最近では、充実率が0.8を上回るような網状物の使用が外部仮設足場の養生用などを中心に増える傾向にある。しかし、このように大きな充実率の網状物を張った網状構造物の抗力係数については研究例が少ない。よって、大小様々な充実率の網状物を張った網状構造物の抗力係数の性状を明らかにすることは、網状構造物の耐風設計のための資料として重要であると考え。

本論文は、上述の点を踏まえ、建築用の網状物の抵抗係数と充実率との関係を明らかにすると共に、それらを2次元の網状板にした場合の抗力係数を推定する式を提案するものである。

ここでは、先ず始めに、鉛直型水槽装置を用いた水槽実験によって網状物の抵抗係数と充実率との関係を把握する。次に、風洞実験によって一様流中における2次元の網状板の抵抗係数と抗力係数との関係および抗力係数と充実率との関係を把握し、2次元の網状板の抗力係数を推定する経験的な推定式を導く。

2. 実験装置および方法

I) 水槽実験

本研究では、充実率が $S \leq 0.9$ の網状物の抵抗係数を測定するため、大きな総圧を得ることのできる水槽装置を製作した。この水槽装置は、図1に示すように、透明アクリル樹脂パイプ製の鉛直型の重力式水槽装置である。水面から供試網を設置する測定部までの水柱の高さは $H = 1100\text{mm}$ 、内径は $\phi = 100\text{mm}$ である。水槽装置の上部に設けた水槽には、最大供給流量 $Q = 1\text{m}^3/\text{min}$ の給水ポンプを使って貯水タンクに貯めた水道水を供給した。そして、水柱の水面から供試網までの高さ、即ち、水頭を常時一定に保つようにするために、供給した余分な水量は、上水面と同じ高さに設けたドレン孔にドレンパイプを接

図1 水槽装置

続し排水した。測定部の流量は排水口に取り付けた流量調整バルブで調節した。測定部の平均流速 u は、低速になることを考慮して、排水口より排水される10秒間の排水流量をメスシリンダーで5回計測し、その平均排水流量を測定部の断面積で除して求めた。供試網前後の壁面差圧は、管路の周上4個所に $\phi 6\text{mm}$ の壁面圧力測定孔を設けてマンオメータで測定した。この差圧の測定は、上述の排水流量の測定と平行して行い5回の平均値として求めた。供試網の抵抗係数 K は次式で求めた。

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (1)$$

ここに、 P_1 ：供試網の上流側の壁面圧力、 P_2 ：供試網の下流側の壁面圧力、 ρ ：水の密度、 u ：測定部の平均流速である。

供試網の寸法(図2)および充実率を表1に示す。ここに示した供試網は建築用として一般に広く用いられている網状物である。供試網の網目は、製作方法などの理由から、完全に均一な状況とは言いがたい。よって、この供試網の寸法は、網の数箇所を選んで実測して求めた平均寸法である。本来、網状物の充実率は、素材幅と素材間隔より計算で求めることが出来るが、ここでは上述の理由から、画像処理を応用した方法で評価した。この方法は、先ず、大きい供試網から $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の供試網を採取し、その供試網をスキャナーでスキャンして画像として計算機に取り込んだ後、素材部分のドット数を素材部分と開口部分の全ドット数で除して充実率を求める方法である。ここではそれぞれの供試網の異なった部位から採取した3枚の供試網に上述の法を適用してそれぞれの充実率を求め、平均値をその供試網の充実率とした。

図2 供試網の寸法

表1 供試網の寸法および充実率

試験体 No.	素材幅: d (cm)	素材間隔: l (cm)	充実率: S
PS.1	0.17	0.25	0.89
PS.2	0.17	0.40	0.67
PS.3	0.15	0.50	0.50
PS.4	0.07	0.18	0.65
PS.5	0.09	0.19	0.73
PS.6	0.16	0.24	0.90
PS.7	0.06	0.11	0.77
PS.8	0.06	0.15	0.63
PS.9	0.19	0.35	0.79
PS.10	0.19	0.32	0.84
PS.11	0.17	0.25	0.90
PS.12	0.10	0.65	0.28

II) 風洞実験

上述の供試網を用いた2次元網状板の抗力は、回流式開放型風洞装置(幅 $2\text{m} \times$ 高さ $2\text{m} \times$ 長さ 5m)を用いて測定し、抗力係数を求めた。流速は $0 \sim 60\text{m/s}$ まで連続的に可変出来る。気流は乱れの強さが0.5%以下の一様流とし、流れの2次元性を確保するために、測定部に図3に示

すような端板(高さ1.2m×長さ1.5m×厚さ3.9cm)を97cm幅で設置した。供試網は図4に示すようなフレームに取り付けた。端板上に発達する境界層の影響を最小限にするためにフレームの両端に直径φ68cm、厚さ4mmのアルミ製の円盤を取り付けた。供試網を張り付けるフレームはステンレス製で外形寸法が幅90cm、高さ20cmである。フレーム部材の寸法は、図4に示すように、幅15mm、奥行約3.2mm、フレーム風下に取り付けたリブの高さは20mmである。網状板に作用する抗力は、実験時の速度圧を $245.2Pa$ とし、フレーム自体の抗力を予め測定しておき、供試網を張った状態で測定した抗力からフレーム自体の抗力を差し引いて求めた。抗力は、フレームの両端にストラットを取り付けてロードセルにセットして測定した。また、抗力は、表1に示した12種類の供試網の他に充実率1の平板(厚さ2mm)についても測定した。速度圧並びに風速は、網状板の前方へ65cm、中心より上に10cmの位置に設置したピトー管で測定した。抗力係数 C_D は次式で求めた。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2)$$

ここに、 F_D ：抗力、 ρ ：空気密度、 U ：基準風速、 A ：網状板の外郭面積である。ここでは閉塞効果の補正はしていない。

図3 2次元網状板の設置状況

図4 網状板の寸法

3. 供試網の抵抗係数

1) レイノルズ数の影響

供試網に対する実験時の平均流速 u 、レイノルズ数 R' 、抵抗係数 K を表2に示す。ここでのレイノルズ数は、Taylor & Davies(1944)⁴⁾の結果と比較するために次式で定義する。

$$R' = \frac{ud}{\nu(1-d/l)} \quad (3)$$

ここに、 u ：測定部の平均流速、 d ：素材幅、 l ：素材間隔、 ν ：動粘性係数である。

表2 実験時の流速、レイノルズ数、抵抗係数

試験体 No.	流速: u (cm/s)	レイノルズ数: R'	抵抗係数: K
PS.1	14.9	1023.1	146.32
PS.2	14.6	922.3	7.42
PS.3	15.2	975.8	1.62
PS.4	15.0	414.9	6.09
PS.5	15.5	516.6	11.54
PS.6	15.2	1048.7	138.6
PS.7	14.6	305.3	16.88
PS.8	14.6	327.5	4.59
PS.9	15.0	1039.4	18.77
PS.10	15.0	1091.6	30.61
PS.11	14.4	1037.8	130.19
PS.12	14.8	1033.4	0.80

表2から判るように、実験時の平均流速は15cm/s前後である。網状物の抵抗係数は、低いレイノルズ数域で増加する傾向がある¹⁰⁾。Taylor & Davies(1944)⁴⁾が充実率の異なる4種類の金網に対して測定した抵抗係数と(3)式で定義したレイノルズ数との関係を図5に示す。この図からレイノルズ数 $R' = 300$ 以上の抵抗係数は変化が小さいことが見て取れる。図中の+印は表2の結果であるが、供試網の実験時のレイノルズ数は全て $R' > 300$ であり、本実験で得られた供試網の抵抗係数に対するレイノルズ数の影響は小さいと判断できる。

図5 抵抗係数とレイノルズ数との関係
(Taylor & Davies : ○, □, ◇, △)

II) 充実率との関係

網状物を通して生じる総圧の減少量(圧力損失量)が充実率または開口率の違いで変化することは、断面積が急激に拡大する管の中を流れる流体における運動量保存則からも理解できる。しかし、前述のように、抵抗係数と充実率の関係は、網状物の素材の種類などにも影響されることが判っている。図6は抵抗係数と充実率の関係を示す。図中の○, □, △, ◇印は、プレートスクリーン(Plate Screen)並びにワイヤスクリーン(Wire Screen)によるCollar(1939)¹⁾, Taylor & Davies(1944)

⁴⁾ Simmons & Cowdrey(1949)²⁾, Cornell(1958)¹¹⁾らによる結果である。建築用として一般に多用されているこでの供試網の抵抗係数と充実率の関係は、プレートスクリーンやワイヤスクリーンと良く一致しており、これらは流体力学的に同じ種類の網状物であると見なすことができる。

ここで、供試網の抵抗係数と充実率との関係を最も良く近似する関係式を Collar の式¹⁾を参考に作成してみると、次式が得られる。

$$K = 1.2 \frac{S}{(1-S)^2} \quad (4)$$

ここに、 K ：抵抗係数、 S ：充実率である。

(4) 式は図7に示すように、実験値と良く一致している。

図6 既往の実験結果との比較

図7 実験式との比較

図8 既往の実験結果および提案式との比較

一方、抵抗係数と充実率の関係式は、Baines & Peterson(1951)¹²⁾, Annand(1953)¹⁰⁾, Richards & Robinson(1997)¹³⁾らによってすでに提案されているが、これらの提案式と Plate screen や Wire screen に対する既往の実験結果、更に今回の供試網の結果と(4)式とをまとめて図8に示す。これを見てみると、本実験値と既往の実験値は、各提案式の中に収まっている。Annandの式は充実率が $S < 0.4$ の範囲で、また、Baines & Petersonらの式は $S > 0.6$ の範囲でそれぞれ本実験式に近接している。これに対して Richards & Robinsonらの式は、全充実率域で実験値よりやや小さめである。よって、これらのことから、ここで対象としているような網状物の抵抗係数と充実率との関係を(4)式で推定することはほぼ妥当であると言える。

4. 2次元網状板の抗力係数

網自体の抗力係数の特性は、網の抵抗特性に大きく支配されることが Taylor の理論⁵⁾や Taylor and Davies⁴⁾等による実験結果から理解できる。しかし、前述のように、網状物を張った網状構造物の抗力係数を定めるには、網状物自体の抵抗特性のみでは定まらず、網状構造物全体の周りの流れの状況をも考慮する必要がある。

表3 網状板および平板の抗力係数

試験体 No.	抗力係数 : C_D	試験体 No.	抗力係数 : C_D
PS.1	1.87	PS.7	1.71
PS.2	1.54	PS.8	1.39
PS.3	1.18	PS.9	1.74
PS.4	1.53	PS.10	1.79
PS.5	1.70	PS.11	1.87
PS.6	1.89	PS.12	0.47

(2次元平板の抗力係数 : $C_D = 1.95$)

よって、ここでは、表1に示した供試網を用いた網状構造物の内、最も基本形であると考えられるところの2次元網状板の抗力係数を一様

流中で測定した。また、同時に2次元平板 ($S = 1$) の抗力係数についても測定を行った。これらの測定結果を表3に示す。2次元平板の抗力係数は、表3の下端に示したように、 $C_D = 1.95$ であり、この値は Flachsbart(1934)¹⁴⁾ が報告している抗力係数 $C_D = 1.96$ とほぼ一致している。よって、このことからここでの測定方法等は妥当なものと判断できる。

I) 抗力係数と抵抗係数の関係

2次元網状板の抗力係数と抵抗係数の関係を図9に示す。網状板の場合は気流が網を通過するため平板に比べて背面圧が回復する。このため抗力係数は平板よりも小さくなる。そして、この減少する割合は、図9に見られるように、網状物の抵抗係数の低下と密接に関係している。ここで Taylor が理論的に導いた充実率の極めて小さい網状板 (flat plate of very porous material) の抗力係数と抵抗係数の関係式⁵⁾

$$C_D = \frac{K}{(1 + \frac{1}{4}K)^2} \quad (5)$$

並びに Taylor and Davies⁴⁾ が実施した円形の Plate screen と Wire screen の実験結果と本結果とを抵抗係数 $K \leq 5$ の範囲で比較した結果を図10に示す。

図9 抗力係数と抵抗係数との関係

図10 抗力係数と抵抗係数の関係式

最も抵抗係数の小さい供試網 ($K = 0.8$) の抗力係数は、Taylor の式並びに Taylor & Davies の実験結果とほぼ一致している。しかし、抵抗係数が $K = 1$ を越えた付近からの抗力係数は2次元網状板の方が大きくなる傾向が認められる。このことから $K = 0.7$ を越えたあたりから2次元網状板としての形状効果が現れると考えることができる。すなわち、2次元網状板周りの気流状況は、網状物の抵抗係数が0.7を越えたあたりから大きく歪み始めると判断できる。よって、このような結果を踏まえて2次元網状板の抗力係数と抵抗係数の関係は次式で与えられる。

$$C_D = 2.8 \log (K + 0.6 - \sqrt{1.2K + 0.36}) - 2.8 \log K + 2.0 \quad (6)$$

この式は図9と図10に実線で示した。ただし、ここでの抵抗係数 K の範囲は、下限値は上述の理由から、また上限値は平板の抗力係数 $C_D \approx 2$ を考慮し $0.73 < K \leq \infty$ と決めた。一方、抵抗係数が $K \leq 0.73$ の2次元網状板の抗力係数については(5)式で与えられるものとする。

II) 抗力係数と充実率の関係

ここで用いた供試網の抵抗係数 K と充実率 S との関係が(4)式で与えられることから、抗力係数 C_D と充実率 S との関係は、(4)式を(5)式および(6)式に代入することによって求めることができる。図11中の細い実線が(6)式に(4)式を代入して、一点鎖線が(5)式に(4)式を代入して求めた抗力係数である。充実率 $S = 0.3$ の網状物の抵抗係数は(4)式よりほぼ $K = 0.73$ に相当する。一方、オーストラリア規準の AS1170.2 では、独立壁に空隙がある場合の抗力係数 (net pressure coefficient) を空隙の無い独立壁の抗力係数に空隙率 β の関数であるところの Reduction factor $(1 - \beta^2)$ を乗じて求めることを推奨している。

図11 抗力係数と充実率の関係式

ここで、この Reduction factor を充実率 S の関数、すなわち、

$$(1 - \beta^2) = [1 - (1 - S)^2] \quad (7)$$

に置き換え、本実験で求めた2次元平板の抗力係数 $C_D = 1.95$ に乗じて2次元網状板に対する抗力係数と充実率との関係を探った結果が図11中の点線である。この Reduction factor を乗じて求められる2次元網状板の抗力係数は実験値よりも大きくなる傾向を示している。特に、充実率の小さい網状板ほど実験値との相違が大きくなっている。

以上の結果から、ここで用いた網状物と同種類の網状物 (抵抗係数と充実率の関係がほぼ (4) 式で表されるもの) を用いた場合の 2 次元網状板の抗力係数 C_D は、近似的にはあるが、充実率が $0 \leq S \leq 0.3$ の範囲では、Taylor が導いた (5) 式に (4) 式を代入して、また、充実率が $S > 0.3$ の場合には、(6) 式に (4) 式を代入して求めることが可能である。よって、これらの式並びに実験値を図に示すと図 1 2 のように表される。

図 1 2 2 次元網状板の抗力係数

5. まとめ

本論では、網状構造物の耐風性に関する網状物の抵抗係数と充実率の関係並びにその網状物を用いた 2 次元の網状板の抗力係数の性状について考察した。ここで考察した建築用の網状物の抵抗係数と充実率の関係は、既往のプレート状スクリーンや金網状スクリーンの場合とほぼ同様であることを見出した。そして、その関係を近似式で近似した。更にこの網状物を用いた網状構造物の基本形状と考えられる 2 次元網状板の抗力係数と抵抗係数並びに充実率との関係を一様流中で考察した。そして、充実率が $S > 0.3$ の 2 次元網状板の抗力係数は、抗力係数 (C_D) と抵抗係数 (K) の関係式および網状物の抵抗係数と充実率 (S) の関係式を用いて推定できる。

謝辞

本研究は社団法人仮設工業会主催の風荷重に対する鋼管足場等の安全技術指針見直し検討委員会での研究活動の一部として実施したものである。ここに記して関係各委員に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Collar, A.R., The effect of a gauze on the velocity distribution in a uniform duct, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No.1867. London, HMSO, pp.1-9, 1939
- 2) Simmons, L.F.G. and Cowdrey, C.F., Measurements of the aerodynamics forces acting on porous screens, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No.2276. London, HMSO, pp.1-20, 1945
- 3) Wieghardt, K.E.G., On the resistance of screens, Aeronautical Quarterly, Vol.IV, part II, Frb., pp.186-192, 1953
- 4) Taylor, G.I. and Davies, R.N., The aerodynamics of porous sheets, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No.2237. London, HMSO, pp.163-176, 1944
- 5) Taylor, G.I., Air resistance of a flat plate of very porous material, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda, No.2236. London, HMSO, pp.159-162, 1944

- 6) Cook, N.J., The designer's guide to wind loading of building structures, Part 2, 1985
- 7) Murota, T., An experimental study on the drag coefficient of screens for building use, WIND EFFECTS ON STRUCTURES, Proceedings of the Second U.S.A.-Japan Research Seminar on Wind Effects on Structures, Edited by Hatsuo Ishizaki and Arthur N.L.Chui, University of Tokyo Press, pp.105-111, 1976
- 8) Standards Australia. Minimum design loads on structures. Part 2: Wind loads. Standards Australia, North Sydney, 1989
- 9) European Committee for Standardization (C.E.N.). Eurocode 1: basis of design and actions on structures. Part 2-4: Wind actions. ENV-1991-2-4, C.E.N., Brussels, 1994
- 10) Annand, W.J.D., The resistance to air flow of wire gauzes, Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol.57. pp.141-146, March 1953
- 11) Cornell, W.G., Losses in flow normal to plane screens, Transactions of the ASME, pp.791-799, May 1958
- 12) Baines, W.D. and Peterson, E.G., An investigation of flow through screens, Transactions of the ASME, pp.467-480, July 1951
- 13) Richards, P.J. and Robinson, M., Wind loads on porous structures, The Fourth Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, Volume of Abstracts, Gold Coast, Australia, pp.155-158, 14-16 July, 1997
- 14) Flanchsart, O., Modellversuche über die Belastung von Gitterfachwerken durch Windkräfte. 1. Teil: Einzelne ebene Gitterträger. Der Stahlbau, 7, April 1934, pp.65-69.

(1998年12月24日原稿受理, 1999年5月24日採用決定)