

鋼製煙突の耐風設計について

横 尾 義 貫*
石 崎 潑 雄**

1. ま え が き

煙突が風を受けたとき、主として風向に直角な方向に振動することは古くから知られていたが、この問題について本格的な研究が行なわれるようになったのは、近々十数年以前からのことである。これは最近になって数多くの大規模な溶接鋼製煙突がつくられるようになり、これら一部のものは大振動を起して、人々に不安感を与え、また部分的に破損を生じたりしたものが出たためである。

従来の煉瓦造や鉄筋コンクリート造の煙突は重量が大きいから、単純に考えても振動の生じにくいことは明らかであり鋼製煙突、しかも全溶接のものが、数多くつくられるようになった戦後において、問題が大きくなってきたわけである。もちろん、鋼製煙突のつくられた歴史は古く、米国においてはすでに19世紀の終り頃、高さ60mに及ぶものがあった。しかし、当時のものは、鋸打ちを用い煉瓦のライニングを施していたから、その振動も問題にするほどの大きさに達しなかったであろう。

わが国では、すでに昭和14年頃全溶接の鋼製煙突がつくられていたことは特筆すべきことと考えられるが、戦後、米国において全溶接の煙突に振動障害を生じたものが現われ、これの調査、研究が行なわれるようになった。従って、この問題に関する研究の歴史は、なお日まだ浅く、その振動発生機構等については不明の点も多い。振動発生の原因が明らかでなければ、その耐風設計も困難なものとなるが、以下には、米国における研究を参照し、また筆者らの見解をも含めて、わが国における研究にもとずき、現在ほぼ妥当と考えられる耐風設計の方針を独立の溶接鋼製煙突について述べることにする。

2. 鋼製煙突の風による振動

(1) 振動性状の概要

鋼製煙突の合理的な耐風設計方法を見出すためには、風によって煙突がどのような振動を生じるか、また振動を生じさせる機構はどのようなものであるかを明らかにしなければならない。そのためには、煙突の振動性状、風力の性質、およびこれらの間の関係を究明する必要がある。一般に煙突の振動測定はさほど困難でないから、比較的数多く行なわれ、その性状もほぼ明らかになっている。

* 京大教授 ** 京大教授

表 - 1

煙 突	高 さ m	直 径 m		固有周期 $T \text{ sec}$	減 衰 率 δ
		頂 部	底 部		
A	76	4.5	7.0	1.01	0.04
B	76	5.0	7.5	0.86	0.05~0.07
C	〃	〃	〃	0.94	0.03~0.05
D	90	4.37	6.86	1.47	0.02~0.04
E	〃	〃	〃	1.39	—
F	69	5.2	7.2	0.82	—
G	〃	〃	〃	0.81	0.03~0.05
H	76	4.61	6.24	1.02	0.03~0.04

曲げ振動による一次振動周期の若干例を表示すると表-1の通りである。¹⁰⁾ 独立煙突の場合、高さを H 、直径を D とすると、一次周期は H^2/D に比例する。これを図示したものが図-1である。ただし建物の上に立つ煙突の周期は、ここに示した地上に独立する煙突の周期にくらべ、若干長くなるのが普通である。

振動減衰率は振幅の大きさ、ライニングの有無、またライニングのあるときにはその材料や厚さ等によって、いちじるしく変化するけれども、適当な自由振動を生じさせて得られた結果の一部を引用すれば表-1の右端のようになる。これによると減衰率は一般の建物などにくらべ、はるかに小さいことがわかる。

自由振動による撓みの形は、変断面をもつ片持梁の振動による形状を示し、一次、二次振動とも実物の測定結果と計算によって得られる曲線とがよく一致する。

以上のほか、煙突にはその水平断面の変形によって生じるOvallingと呼ばれる振動がある。これの固有周期や減衰率の測定例はきわめて少ないが、その一二の例では1.0~2.0 sec位である。^{3),10)}

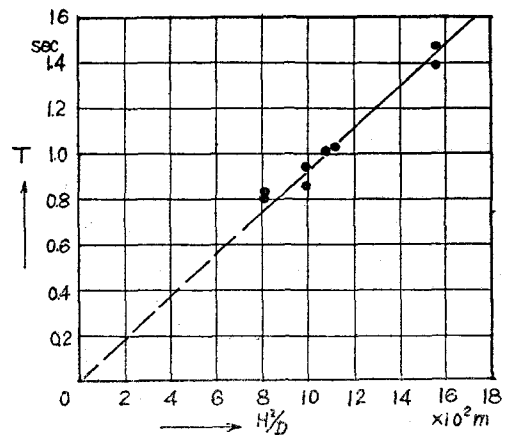


図 - 1

(2) 風力の性状

煙突が風によって振動する場合、風向方向の振動も、もちろん生じるけれども、鋼製煙突の多くは風向に直角な方向の振幅がはるかに大きい。風向方向の振動であるならば、風速や風向の時間的変動、すなわち風の乱れによる影響が大きいかも知れないが、ここで問題とするような風向直角方向の振動に対しては、その影響はむしろ少ないと考えられる。ここでは、風の乱れに関する性質はあまり重要でない。風を単なる空気の一様な流れとみなして考察を進めることができる。このように考えると煙突の受ける風力というものは、一様な流れの中にある円筒の受ける力の問題ということになつてしまう。これに関しては、古くから多くの研究があり、円筒はいわゆるカルマン渦の発生により交番的な力を受けることは知られているが、現在なおくわしいことはわかっていない。その問題点を二、三取り上げてみることにする。

実物の煙突に風があたった場合に、模型実験でみられるような規則正しいカルマン渦が発生するものであるかどうか、カルマン渦の最も生じやすいのはレイノルズ数が40から1,000位までといわれているのに、実際の煙突のレイノルズ数は 10^7 であり、しかも自然の風は乱れているから、規則正しい渦が発生するとは考えられない。また実物煙突が大振動を生じているときの振動数とそのときの風速から、ストローハル数 S を求めてみると、多くのものについて0.2位になる。上記のようにレイノルズ数が比較的小さい場合にはストローハル数の値も確かに0.2前後であるが、レイノルズ数が 10^6 位になるとストローハル数は、はるかに大きくなると推定され、最近のRoshkoの風洞実験⁷⁾によれば、レイノルズ数が約 10^7 のとき0.27である。すなわち、もし実物煙突の振動がカルマン渦によるものであるとするならば、これによって求めたストローハル数と風洞実験によって得られている値との相違は説明されない。

このような矛盾点は現在いまだ究明されていないが、筆者らは円筒が流体中に静止している場合と、振動している場合とを区別することにより、一応説明できるように考える。

すなわち、同一のレイノルズ数の下においても、円筒が振動している場合にはストローハル数が低下するということである。風洞中において、円筒模型を振動させ、その共振時の風速と振動数から、ストローハル数を求めてみると、確かにそれが見出される。たとえばレイノルズ数が 10^5 程度のとき、静止している円筒のストローハル数は0.2前後となるが、共振時のストローハル数は0.13~0.15位になる。¹¹⁾ このような事実があるとすれば、実物の煙突が大きく振動を生じているときのストローハル数の値が比較的小さいことも不思議ではない。また、通常はストローハル数 S というのは、渦の発生数を N 、円筒の直径を D 、風速を V とす

れば $S = ND/V$ の式で定義される。しかし、このように S を定義するとレイノルズ数によって、その値が変化するので、Roshko は、直径 D の代りに、wake の幅 D_w をとることを提案し、そうすれば、 S はほとんど一定値となり、その値は 0.16 になると述べている。⁷⁾ ストローハル数が wake の幅によって変るであろうことは、当然考えられるところであり、振動している円筒の背後に生ずる wake 幅は、静止する円筒による wake の幅より大きくなると考えられるからストローハル数も低下することになる。

また実物の煙突の場合のようにレイノルズ数が大きくなれば、その後流中に規則正しい渦の配列は見られなくなるかも知れないが、渦が煙突に力を及ぼすのは、渦の発生時または剝離するときであって、ただ単にいわゆるカルマン渦が生じにくいから、渦の作用が煙突に影響しないとはいえない。さらに煙突が運動すれば、煙突の背後に発生する渦を交替的に剝離しやすい状態にすると考えられる。

これが自励振動であるということもよう。

つぎに流体中にある円筒がどのような力を受けるかを明らかにしなければならない。

静止している円筒の抗力係数 C_D については、一般によく知られているから、ここには省略する。揚力係数 C_L の値は、実験者により、やや違った値が出されているが、^{3), 13)} $C_L = 0.6 \sim 1.1$ 程度の値である。揚力の大きさ、そのものは周期的に変動するから、ここに示したのはその最大値である。さて、円筒が振動しているときにはストローハル数が変化するのであるから、抗力係数や揚力係数も静止した円筒の場合とは異なると考えざるを得ない。一般にストローハル数が低下すると抗力係数は増加する。従って振動している円筒の抗力係数は、静止している円筒の抗力係数より大きくなるに違いない。しかし、ここでは煙突が風向直角方向に振動する問題を考えているのであるから、抗力係数の値は重要でない。揚力係数の値が問題である。

運動する円柱に作用する揚力係数として実験で得られた値はきわめて少ない。筆者らが円筒後方の wake の角度の変動値から推定したところでは、円筒が共振状態にあるときの揚力係数は、円筒が静止しているときの $\frac{1}{2}$ 位である。¹¹⁾ Fung は風洞中で円筒を強制的に他の外力で振動させたときの揚力係数を求めているが、その値はばらつきが多く一定値にならない。その Peak Value の平均は 0.3 位である。⁸⁾ 中川憲治氏らも円筒が振動しているときの揚力係数は小さくなると述べている。¹²⁾

このように運動する円筒の揚力係数の値は現在いまだ不明確であるが、おそらく、レイノルズ数によるばかりでなく、振動の周期や振幅によっても変化するものであろう。しかし、いづれにしても、この場合の揚力係数は、静止した円筒の揚力係数よりもはるかに小さい。

(3) 実物煙突の風による振動現象

つぎに実物の煙突が風を受けたとき、どのようにして振動を生じるかということが問題になる。これについては、すでにいくつかの報告書に記載されているから、以下には、その要点のみをあげておく。

前記の考えにもとづけば、煙突が大振動を生じた状態は、自励振動であって、強制振動ではないから、普通の意味の共振現象ではない。しかし結果として現われる状態は共振時とまったく変わらないから、これを一応共振と呼ぶことにする。

さて、煙突の振動状態は風速とともにどのように変化するか。

多くの鋼製煙突において曲げ振動による頂部の振幅は、風速の増大とともに次第に増すが、ある風速で共振状態となり、急激に振幅が大きくなって極値に達するようになる。

ただ一二の報告においては、振幅が風速とともに一様に増加すると述べられている。⁴⁾ しかし、このような場合は煙突の剛性や減衰性が大きい、あるいはライニングの重量が大きい場合に限られているようである。

模型実験においては、2つ以上の風速の値において共振状態になる。すなわち、風速に対する振幅の極値が二つ以上存在する例もあるが、実物については、このような事実が観測されたことはない。⁶⁾

実物煙突が風による共振状態になったときのストローハル数を正確に求めることは難かしい。というのは、周知のように風速は地上から高くなるにしたがって増しているのが普通であり、煙突の頂部と下部では相当に風速の差がある。また、わが国の煙突の多くにはテーパーがあるから、その直径も一定でない。しかし、風速としては煙突の頂部近くの値と思われるものを取り、直径も頂部近くの値で代表させて、共振時のストローハル数を求めてみると、その大部分は0.2位になる。⁹⁾ また、そのときの煙突の振動数は固有振動数にほぼ一致する。最大半振幅は高さ60~100 m程度の煙突で1 m近くに及んだものがあるが、若干の煙突ではその一部に破損を生じているから、さらに大きな振幅となったかも知れない。^{2), 5), 10)}

以上のほか、煙突によっては、Ovalling による大きな振動を生じた例がいくつかある。

Ovalling に限らず煙突にライニングを施してない場合には、大振動を生じた例が多い。煙突の構造計算上、ライニングの強度は考慮に入れないのが通例であるが、実際にはライニングの剛性、重量、減衰性等が煙突の振動発生防止に寄与していることは確かである。さらに当然のことながら、煙突の振動が問題になるのは煙突が、比較的細長い場合である。E. Durand は高さに対する直径の比が20以上のものは避けるべきであると述べている。³⁾

3. 鋼製煙突に対する設計用風力

鋼製煙突に対する設計用の風力の算出に、以前は強風時の速度圧と、円筒に対する抵抗係数を用いてきた。しかし、鋼製煙突が風による振動障害を生じるようになってからは、この方法が改められ、抵抗係数の代りに揚力係数が使われ、これに倍率係数 (Magnification factor) , あるいは共振倍率と呼ばれる係数を乗じ、共振時の風速にもとづく速度圧による風力の計算も行なわれるようになった。このような風力の評価のし方は正しいと思われるが、揚力係数や倍率係数の値をいかにとるかという点に問題がある。従来、これらの値は各設計者の判断にもとづいて定められたことが多いようであるが、1955年、Stankiewicz は揚力係数 C_L を0.66と仮定し、空気の密度 ρ を $0.125 \text{ Kg-sec}^2/\text{m}^4$ として、煙突の単位見付面積に加わる力 P を次式で求めることを提案した。¹⁾

$$P = \frac{42 m V_r^2}{10^3} * \quad (\text{Kg}/\text{m}^2)$$

ここに V_r は共振時の風速、 m は倍率係数でライニングがあって単独の場合には1.0、ライニングがあって2本以上並列している場合か、ライニングがなくて単独の場合には1.5、ライニングがなく buffetting の影響を考えねばならないときには2.0をとるべきであるとしている。

しかしながら、ここに仮定された C_L の値は、前述のような理由によって大きすぎるようである。減衰率を δ 、煙突を単純に一質点系と見なすと、倍率係数は $m = \pi / \delta$ となるから、表-1に記した減衰率の値から判断すると、たとえ振幅が大きくなるにつれて減衰性が増すにせよ、上記の m の値は逆に小さすぎるように思われる。いまかりに C_L の値を0.1~0.2と仮定し、実物煙突の振動実験から得られた減衰率より倍率係数を上式により算出し、 $m C_L$ の値を求めてみると、大体において Stankiewicz の提案した P の計算式にほぼ一致する。従って、結果においては、Stankiewicz の提案式はほぼ妥当なものと考えられる。よって筆者らは揚力係数の値が明確でない現在、揚力係数、倍率係数を区別せず $m C_L$ を設計用共振時風力係数とし、一つの値として表せばよいと考える。実用上は、設計用の風力の値が算出できればよいのであるから、これで充分である。

さて、共振時風力係数 $m C_L$ の値をいかに定めるかが、問題であるが、これを模型実験から求めることは困難であり、むしろ現在までにつくられている実物煙突に関する経験から定めるのが、最も合理的であるように考えられる。

* Stankiewicz の示した原式は $P_r = \frac{8.0 m V_r^2}{10^4}$ (Lb. per sq. ft) であるが、ここではメートル法に換算しておいた。

最近わが国につくられている大型独立鋼製煙突はほとんど全溶接で、ガンナイトライニングを用いている。これらは前述のように Stankiewicz の考え方に従って設計せられたものが多いがそれらの中、大振動を起したりして問題を生じているのは比較的細長いものである。いま煙突の直径を高さの $\frac{1}{10}$ の点におけるもので代表させて、これを D とし、煙突の高さを H とすると $\frac{H}{D}$ の値が $15 \sim 16$ 程度までのものについては問題がない。よって、これらの煙突に対しては Stankiewicz の値を用いればよいと考えられる。次に $\frac{H}{D}$ がこの値より大きいときには $m C_L$ の値を増すべきと思われるが、どのような割合で増すかということになる。最も単純に考えられるのは H/D に比例して、 $m C_L$ の値を増すことである。これに対しては次のように考えることもできる。

煙突を等断面の片持梁と仮定し、材料のヤング係数を E 、断面 2 次モーメントを I 、断面係数を Z とすれば、頂部の撓み y 、底部の曲げモーメント M による最大応力 δ は次式で表わせる。

$$y = \frac{PDH^4}{8EI} \quad \delta = \frac{M}{Z} = \frac{PDH^2}{2Z}$$

ここに

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot m C_L \cdot V_r^2$$

鋼製煙突の肉厚 t は直径 D に比して非常に小さいのが普通であるから、

$$Z = \frac{\pi}{4} D^2 t, \quad I = \frac{\pi}{8} D^3 t$$

よって

$$y = \frac{\frac{1}{2} P m C_L V_r H^4}{\pi E D^2 t} \quad \delta = \frac{\frac{1}{2} P m C_L V_r^2 H^2}{\pi D t}$$

鋼製煙突の設計上 δ の値は許容応力度以下におさめるわけであるから、いづれの煙突についても δ はほぼ一定値に近いものとなる。

よって

$$y = \frac{H^2}{2 E D} \delta \quad \text{すなわち} \quad y \propto \frac{H^2}{D}$$

かりに煙突の形状、大きさに無関係に P をとると、頂部における撓みは H^2/D に比例することになる。よって、逆に頂部の撓みを一定とするためには、 P を H^2/D に比例して大きくとらねばならない。また、頂部における撓みが高さに比例するようにするならば、 P は H/D に比例させればよい。すなわち $m C_L$ の値を H/D に比例させて増せばよいことになる。

この考察では揚力係数や、倍率係数が煙突の形状に無関係であると仮定している。実際には、これらの値も変化するであろうから、上記のように単純にはいえないかもしれないが $H/D = 1.6$ のとき、 $m C_L = 1.0$ とし、 $m C_L$ が H/D に比例するようにとった場合を図-2に示した。

$m C_L = 1.0$ というのは、Stankiewicz の考え方に従えば $m = 1.5$ のときに相当する。

$m C_L$ の最下限は、静止円筒に対する揚力係数の最大値が1位であるところから、 $m C_L = 1$ とする。従って H/D が7以下では $m C_L$ の値が一定値となる。

若干の実物煙突の実験による減衰率から、 m の値を求め、 C_L の値を仮定すれば $m C_L$ の値を求めることができる。その場合、 m の値、 C_L の値ともに疑問があるので正確ではないが、 $m C_L$ がおおむね H/D に比例する傾向が得られる。

よって筆者らは、現在つくられているような独立の全溶接鋼製煙突に対する設計用の風力係数としては、図-2に示したものが、ほぼ妥当なものであると考える。ただし、煙突の形状が通常のものとなっていたり、ライニングとして違った材料を用いていた、その厚さが非常に異なるというような場合には、また別の風力係数をとらねばならないことは当然である。

次に共振風速を求めるためにストローハル数を定めておかねばならない。これも、実物煙突の観測結果によれば、多くの煙突について前述のように0.2位であるが、これより、やや小さい値の得られているものもあるので、これを安全側にとって0.18とすればよいであろうと考えている。

模型実験では2つ以上の共振風速が存在することも確かめられているが、実物については、このような現象のみられた例はないから、目下のところ、設計用には1つのストローハル数を考慮しておけばよいであろう。

1. む す び

本論では、単独の独立鋼製煙突に対する設計用風力をいかにとるべきかについて考察した。実際の煙突は並列している場合が多く、buffetingの問題がある。また、Ovallingによる振動

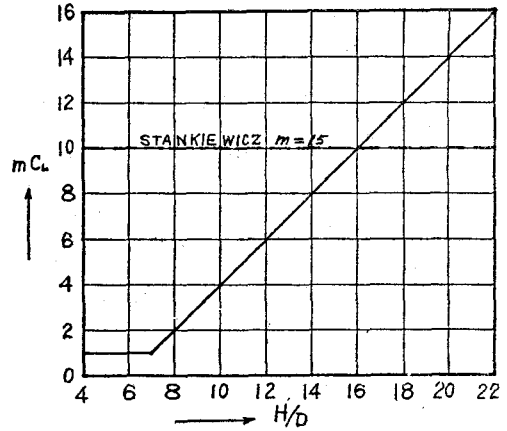


図 - 2

問題、その他があるが、不明の事がらが多いので、その対策については、ここでは省略した。また最近煙突に加わる風力を低減させるための種々な附加装置を施したものや、数本の煙突を組み合わせたもの、あるいは鉄塔の型式に近づいたもの等、構造的な発展がある反面、問題点も多い。これらについても今後、多くの研究にまたねばならないと思われる。

参 考 文 献

- 1) "The Design and Comparative Costs for High Stacks",
E.J. Stankiewicz, Combustion, Feb. 1955, PP. 51~56.
- 2) "The Vibration Of Steel Stacks", W.L. Dickey and G.B.
Woodruff, Proceedings of A.S.C.E., Vol. 80, No. 540, Nov.
1954.
- 3) "Resonant Vibration of Steel Stacks", E.A. Dockstader,
W.F. Swiger and E. Ireland, Proceedings of A.S.C.E.,
Vol. 80, No. 541, Nov. 1954.
- 4) "Factors Influencing the Dynamic Behavior of Tall
Stacks under the Action of Wind", M.S. Ozker and J.
Smith, Transactions of A.S.M.E. Vol. 78, No. 6, Aug. 1956
- 5) "On the Wake and Drag of Bluff Bodies", A. Roshko, Jour.
Aero. Sciences, Vol. 22, No. 2, Feb. 1955, PP. 124~132.
- 6) "Wind Induced Vibration of Cylindrical Structures",
J. Penzien, Proceedings of A.S.C.E., E.M. Div., Paper 1141,
Jan. 1957.
- 7) "Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at
Very High Reynolds Number", A. Roshko, Jour. Fluid
Mechanics, 1961.

- 8) "Fluctuating Lift and Drag Acting on a Cylinder in a Flow at Supercritical Reynolds Numbers", Y.C. FUNG, Jour Aero. Sciences, Vol. 27, No. 11, Nov. 1960, PP. 801~814.
- 9) "風による煙突の振動についての考察", 石崎潑雄, 川村純夫, 日本建築学会論文報告集, 才69号, 昭和36年10月, 421~424頁。
- 10) "振動測定からみた鋼製煙突設計上の諸問題" 石崎潑雄, 川村純夫。京都大学防災研究所年報, 才5号A, 昭和37年3月, 129~134頁。
- 11) "運動する円筒の後流に関する実験", 石崎潑雄, 川村純夫, 桂順治。日本建築学会大会学術講演要旨集, 昭和37年9月, 54頁。
- 12) "大きなレイノルズ数において円筒にかかる空気力について", 中川憲治, 政本和三, 藤野 勉, 有田行雄, 尾形洋右次, 応用力学連合講演会。
- 13) "On the Vibration of Steel Stack", M. Kinoshita, K. Ono and T. Hirowatari, Proceedings of the 5th Japan National Congress for App. Mech., 1955, PP. 415~417.
- 14) "独立鋼製煙突の設計について", "東京電力株式会社建設部, 三菱造船株式会社橋梁設計課, 建築雑誌。昭和34年4月, PP. 7~11。