

円筒形塔状構造物の強風による振動

石 崎 潑 雄・桂 順 治

ON THE VIBRATION OF A CYLINDRICAL TOWER STRUCTURE INDUCED BY STRONG WINDS

By *Hatsuo* ISHIZAKI and *Junji* KATSURA

Synopsis

A lateral vibration of a cylindrical tower structure induced by strong wind is presented. We observed the amplitudes of displacement at the top of the Kyoto Tower, when the typhoon No. 24 in 1965 passed Kansai district. The typhoon was attended with maximum peak gust 51 m/sec at the top, and we discussed some problems below the mean wind speed 35 m/sec. Before the relationship between the amplitudes and the wind speed was made clear, the time duration of fluctuating wind velocity was dealt to fit the characteristics of the structure. In this range of wind speed the maximum amplitude arised at 28m/sec. Though the oscillatory movement of the tower was classified as "self-excited", its states are generally like "beat". These phenomena are thought that the movements of the tower induce the vortices in increasing its amplitude and contrariwise the vortices controll the movement in decreasing it.

1. ま え が き

この報告は台風6524号通過時に測定した京都タワーの振動をもとにして、風速と振巾との関係、塔状構造物の振動に対する平均風速の評価時間の問題、円筒塔状構造物の風による振動外力の機構等について考察したものである。京都タワーは昭和39年末に竣工した典型的な円筒断面の構造で、これまでこのような形をしたものについては鋼製煙突の実験がある。しかしながら煙突の実験は多くの場合実験期間に限られており、種々の気象条件に対する測定を行なうことは困難であった。このたびこの塔が完成して測定器の設置も好都合となり、今後新しい測定資料を得ることが出来るものと思う。この実験は昭和40年3月～4月に行なったものと、同年9月17日の台風24号について行なったものである。

このような円筒塔状構造物の風による振動についての過去の研究は、実物の実験や風洞による模型実験が数多く行なわれてきた。しかしこれらの研究結果から将来建設しようとする構造物の詳しい振動状況を予測することはむずかしく、それを明確に把握するためにはより新しい研究成果を待たなければならない。過去の研究を通じて明らかになったことを簡単に述べると、いずれの場合も構造物の固有振動数に近い振動数で振動すること、流れの方向に直角な方向に振動すること、模型実験ではたいていの場合 Reynolds 数を大きくすることが困難なので実物の場合とは様子が異なり、風速に対する振巾の大きさを求めるといくつかの極大値が生じて、その極大値の1つは Kármán の渦列の影響をうけていること^{1), 2)}、また実物の煙突に対して風速が増加すると振巾も単調増加するという結果³⁾等も出ている。

2. 実 験 方 法

この塔は Fig. 1 に示すようにビルの屋上に建設されており、ビルの屋上から頂部までの高さは 79.11m で、その上に標識用角柱とアンテナがある。振巾の測定はこの塔の頂部であるエレベータ機械室の上部とした。振巾の測定には動線輪型振動計を用い、記録には電磁オシログラフを用いた。振動計は東西方向と南北方向との2方向に設置し、それぞれの方向の変位の振巾を測定した。風速の観測は塔頂と、ビル屋上にある風車型風速計の出力を電磁オシログラフに導いた。Fig. 2 は測定器の配置を示す。

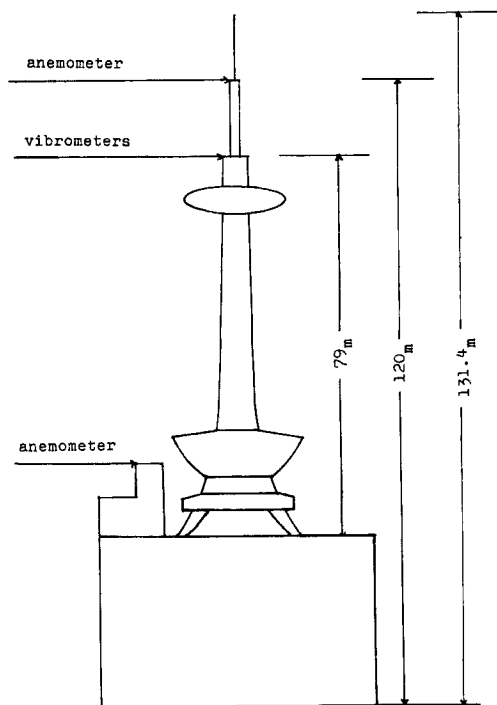


Fig. 1 The position of the instruments.

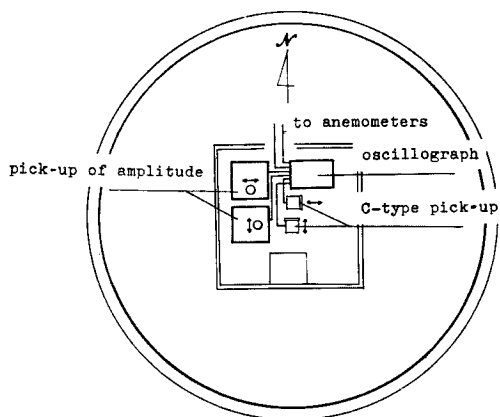


Fig. 2 Arrangements of the instruments.

3. 実験結果

1) 塔頂の運動

塔体の振動週期は振巾の大きさによって少し異なるが、東西方向、南北方向ともに1.2~1.4秒であり、基本モードの曲げ振動をしているものと思われる。この塔のように等方性に近い断面をもつ構造体でも、構造上の僅かな不均衡や風の乱れなどのために、純粋な平面内の振動が起ることはまれで、一般には塔頂は楕円に近い運動をする。Fig. 3 は塔頂における変位の時間的な推移を示している。このときの10分間平均風速は18 m/secで、風向は東からやや南寄りであった。

図中の数字は過程(a)の最初の点からその点の附近にもどる回数を示す。過程(a)においては交替的な空気が生じ、塔体の振動との位相がちょうど共振状態ようになって、空気の流れから振動系内にエネルギーが流入するので風向直角方向の振巾が増大する。過程(b)においては空気力と振動との位相がずれて、流れと振動系との間にエネルギーの収支は少くなり、構造減衰などによって系内のエネルギーを消失し始めるが、自由振動が起こりやすい方向に振動するので振巾はかえって大きくなることもある。過程(c)は空気力と振動との位相は過程(a)の場合と逆になり、振巾は減少し、やがて風向直角方向の振動は静止する。その後また同様の過程を繰り返すものと考えられる。

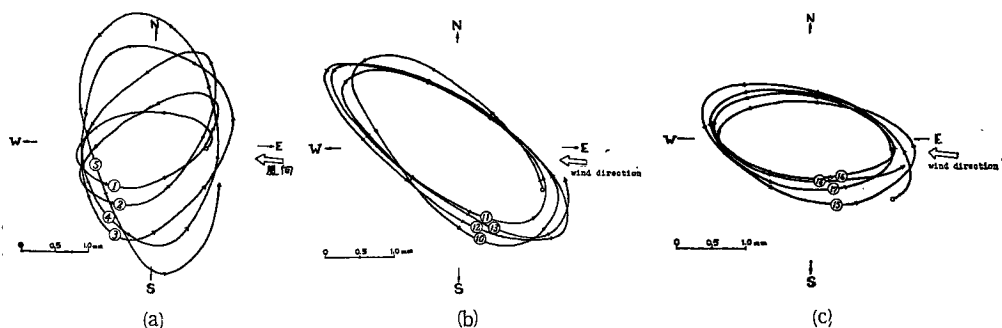


Fig. 3 Movement of the top of the tower.

2) 風速と振巾との関係

風速と振巾との関係はこのような構造物の設計上重要な意味をもつが、自然風の場合は風洞風の場合とちがって、風速や風向が変動するので、これを求める前にまず風速の取り扱い方から考えなければならない。過去の報告にも風速と振巾との関係を求めたものはあるが、風速の取り扱い方についてとくに示したものは見当たらない。

いまのところでは結局ある時間における平均風速を考えることになるが、どれだけの時間に対する平均風速をとればよいかが問題となる。Fig. 4 は1分間平均風速に対する振巾の大きさを示したものであるが、点が散らばっているために風速と振巾との関係をよく表わしているとはいえない。もし時間を極端に短くとれば、風速が大きくても構造物に作用する時間が短いためにその影響は小さいと考えられ、また長くとり過ぎるとその間における風の変動は各場合によって異なると考えられるから、それによる振巾の大きさもそれぞれ異なったものになる可能性がある。したがって風速や風向に変動がなく、気流が一定であると仮定した場合に、構造物が静止の状態からある一定の大きさの振巾に収束するまでの時間が存在すれば、その時間を考慮すればよいと思われる。しかし実物の構造物に一定の風速を当てるということは不可能であるから、自然風で行った測定結果から推測するほかはない。塔頂はいづれの場合も概して前項に示したような運動を繰り返しているから、この運動の風向に直角な方向の成分のみを考えると、その変位の振巾はビートしているかのように見える。ここに先に述べた静止の状態から一定の大きさの振巾までという過程に近い現象が見られる。しかしながらビートの週期は一定でなく、8秒から100秒以上のものまであり、長いものは

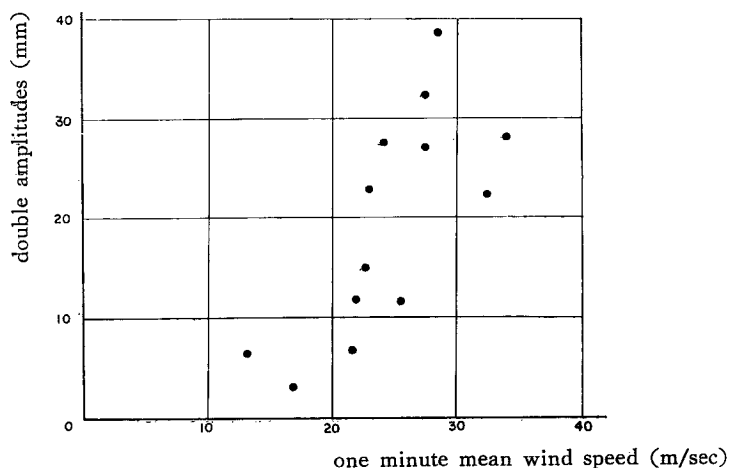


Fig. 4 The relation between amplitudes and wind speed averaged over one minute.

ど振幅が大きくなる傾向がある。このようにビートの長さが不規則で、ビートの時間内において最大振幅が生じる場所も必ずしもビートの胴の中央にはなっていないが、観測例中には40秒前後のものが最も多いこと、風速に急激な変化が起ることも少ないと考えて、ここでは最大振幅が生じる前の20秒間平均風速をもって示すことにした。すなわちこれは前項の Fig. 3 (a) の始めから (b) の過程になる時間に相当するものである。Fig. 5 は20秒平均風速と振幅との関係を示したものである。

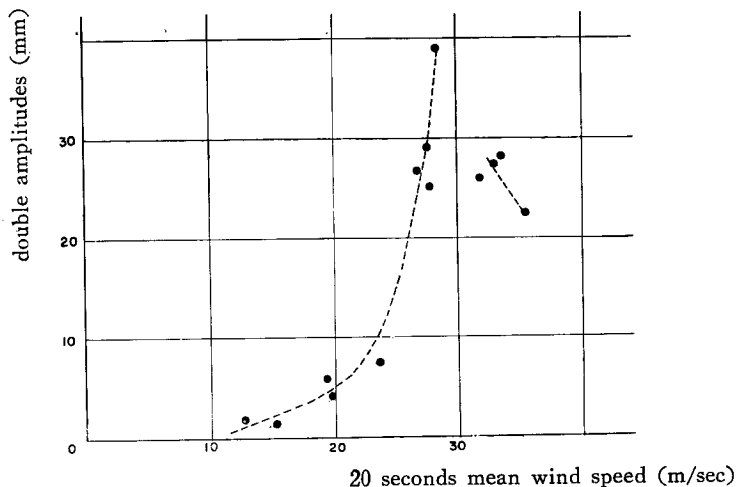


Fig. 5 The relation between the amplitudes of displacement and wind speed averaged over 20 seconds.

4. 考 察

Fig. 5 において風速に対する極大値ははっきりとはわからないけれども、28 m/sec 附近に存在することは明らかである。しかしこのような高い Reynolds 数 (約 10^7) の場合は Kármán 渦列が生じにくいものとされており、単に渦による共振とは考えられない。

M. Ozker と J. O. Smith は煙突による実験結果から一種の自励振動であると述べている⁸⁾。彼等は実

物の塔体の場合のように Reynolds 数が 10^6 程度の大きさになると Kármán 渦列は生じないから、塔体の微少な動きによって渦が剝離し、その渦によって塔体が振動するという説明をしている。この説によると風速が大きいほど後流に生じる渦の循環が大きくなり、風向直角方向の力も大きくなって、この方向の振巾は大きくなることになる。また塔体が固有振動数で振動するという事実をうまく説明できる。しかしこれだけではこの塔の場合のようにビートの現象や、風速に対する振巾の極大値についての説明がむづかしい。このビートのような現象は前述したように長さが一定しない複雑なものである。しかしながら風速変動の不規則さに比べれば規則的であり、連続した2～3のビートは類似性をもっている。したがってこの複雑さは自然風の風速変動のみが原因であるとはいえない。Ozker 等によれば塔体が振動し、そこに風が当れば塔体の振動数に一致した外力が働くことになるから、塔体が静止に近い状態になるためには風が極端に弱くならねばならない。しかしながら本実験の風速と振動との同時測定によれば、ビートの節に相当する時刻、あるいはその直前で風が弱まっている傾向はない。

このような場合ビートの現象を説明するためには塔体の固有振動数という定まった振動数以外にそれに近いもう一つの振動数をもった要素を考える必要がある。その原因としては渦自身にその発生後振動数をずらすような性質があるのか、あるいは構造体の振動系に固有振動数の近くで連続的に変化する振動数をもったモードが存在するかのどちらかが考えられる。この測定では塔体の固有週期は1.3秒ぐらいであると思われるが、振巾が大きくなるほど周期がやや長くなる傾向が見られた。しかしこれは渦の剝離が塔体の動きに従属するものと考えるかぎりでは、それほど大きな原因になるとは思われない。

以上のようにこの現象は複雑なものであるから、Fig. 5 において少しの状況の違いが点を散らばらせる原因になると思われる。平均風速の他に振巾の大きさを左右する要因としては種々のものが考えられるが、最も直接的なものとしてはビートの長さである。ビートの週期はその終端が不明瞭なものもあるので、その代りに振巾が大きくなり始めてから最大になるまでの時間を考え、それと平均風速との関係を示せば Fig. 6 のようになる。この図によれば風速が 27 m/sec 附近で振動の継続時間が最も長いということになる。すなわち塔体の固有振動数と渦の発生数とが風速 27 m/sec 附近で最も近づいていると考えられる。したがって本実験のような場合には Kármán 渦が明確には現れないかもしれないが、塔体が振動する場合には渦が発生し、その渦は独自の発生数をもつものと思われる。そのときの頂上の風速を基準にした Strouhal 数は 0.15 ぐらいである。Fig. 5 と Fig. 6 とを比較すると極大値を生じる風速がややずれているが、振巾が大きくなるためには風速が大きいこと、振動数が渦の発生数と一致して振動の継続時間が長いことという2つの要素がある。極大値の存在は後者が支配的であることを示しており、Fig. 5 には前者の影響が現われてい

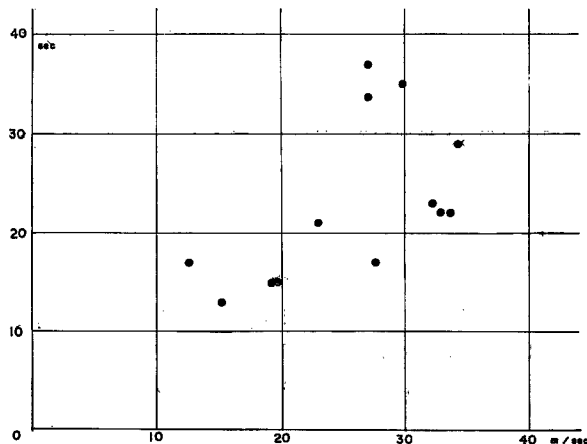


Fig. 6 The relation between time duration for maximum amplitudes and mean wind speeds.

ると解釈できる。

Reynolds 数が大きくなっても塔体が振動すると一定の発生数をもった渦が発生するという事は筆者等が直円筒を用いて行った風洞による模型実験²⁾の傾向と一致する。そのときはこの現象を Reynolds 数が低下するという表現を用いたが、結局後流に生じる乱れのエネルギーの一部が塔体の振巾増加に費されているということになる。この考え方をさらに進めると Strouhal 数を表わす式 $S=ND/V$ (V : 一般流の流速, N : 渦の発生数, D : 塔体の直径) において V は一般流の流速が渦列を含んだ後流に比例するという意味をもつが、円筒が振動した場合に一般流に比して後流の速度が小さくなっていることも考えられる。その結果前に求めた値 0.15 は V の値を大きくとったことになるため、通常の静止円筒の値よりも小さくなるであろう。またこのときの風速は頂上の風速を用いたが、塔体として最も力をうけやすい位置における値よりも大きくなっていることも考えられる。

5. 結 論

1) 振 動 の 状 態

塔頂における水平面内の運動の軌跡は橢円状であり、振巾の風向直角方向の成分は大きくなったり小さくなったりしている。振巾は概して風向直角方向に大きい、振巾が最大になる方向はこのような円筒状構造物でも風に直角な方向と一致するとはかぎらない。

2) 塔体の振動と平均風速の評価時間について

塔体に当る自然風の平均風速の評価時間については塔体の固有振動数、質量、減衰性などによって定まるべきものと考えられるが、この場合塔体の振動状態から判断して、この規模の構造物では20秒前後の平均風速を考えれば適当であると思われる。

3) 風速と振巾との関係

測定時の最大風速は20秒平均風速で 35.5 m/sec であった。28 m/sec ぐらいで振巾が最大になるが、これは一種の Kármán 渦による影響であると思われるので、Ozker 等の実験の場合のように風速の増加に対して振巾が放物線的に増加するとは考えられない。

4) 渦による振動外力の機構について

一般には Reynolds 数が 10^4 にもなると後流には渦列が生成しないから塔体には週期的な力は作用しないかもしれない。しかし後流の乱れその他によって塔体が微小振動すると、その動きによって塔体の固有振動数に近い発生数をもった渦が発生する。その渦によって塔体の振巾は増加するが、発生後の渦は独自の振動数をもっているため塔体の振動との間には位相のずれができ、やがて渦による力は塔体の振動を制御するように働く。そのために塔体の振巾は小さくなり、渦もまた消滅する。このような過程が繰り返されてビートのような現象が起るものと考えられる。

このように高い Reynolds 数においても物体の振動によって渦が生成しやすくなることは筆者らが Reynolds 数 10^5 ぐらいの領域で行った模型実験の結果と一致する。この塔の場合は風速が約 27 m/sec のところで渦の発生数と塔体の固有振動数とが最も接近していたと考えられ、そのときの Strouhal 数は 0.15 であった。

参 考 文 献

- 1) Joseph Penzien, "Wind Induced Vibration of Cylindrical Structure", Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. A.S.C.E., January 1957, Paper 1141.
- 2) 石崎, 川村, 桂, 「振動する円筒の周りの流れについて」, 京都大学防災研究所年報第6号, 昭和38年7月, p.100.
- 3) M. S. Ozker, J. O. Smith, "Factors Influencing the Dynamic Behavior of Tall Stacks Under the Action of Wind", Transaction of the A.S.M.E., August 1956, p.1381.