テーパーつき円柱の渦励振 Vortex induced vibration of tapered cylinders

河井宏允 *1
Hiromasa Kawai

This paper describes an experimental study of the vortex induced vibration of tapered cylinders which is being used for the tower. In the experiment, effects of turbulence, structural damping and taper were investigated. From the investigation, the following results were obtained.

1. The vortex induced vibration occurs for any types of cylinders from a straight cylinder and a full tapered cylinder when the structural damping is small enough both in smooth and turbulent boundary layer flows.
2. The tapered part does not effect so much on the vortex induced vibration when the tapered part is less than a half of the cylinder height, but the onset velocity of the vibration shifts to the higher velocity and the velocity rage of the vibration becomes wider when the tapered part is beyond 3/4 of the height.
3. The response is much larger at the higher wind velocity in the turbulent flow than in the smooth flow when the tapered part is beyond 3/4 of the height.

1. 序

本研究は、最近通信用の鉄塔に使用されるようになってきたテーパー付きの独立円柱に関して、渦励振に及ぼすテーパーの影響、構造減衰の影響、流れの性状の影響を境界層風洞実験によって検討したものである。実験の結果、テーパーをつけることによって渦励振がおさまるとは限らないこと、また気流の乱れが大きい程渦励振が小さくなるとは限らないことなどの事実が明らかになった。また、実験したすべての場合で、構造減衰が1%以上では、渦励振はほとんど生じないことが分かった。

2. 実験概要

実験は東京電機大学理工学部の境界層風洞を用いて行った。この風洞は、全長19m、測定部長10m、測定部断面 1.2m × 1.2m の単回路水平循環型の木製風洞である。実験には、Fig.1 に示した、高さ50cmのアルミ材製の剛模型5体を使用した。Fig.1 に、模型の有効一般化質量と固有振動数もあわせて示した。有効一般化質量 m^* は、

$$m^* = \int_0^1 m f(\xi)^2 d\xi / \int_0^1 D^2 f(\xi) d\xi$$

で定義され、一般化質量と一般化風力の比を表している。有効一般化質量は、高さ方向に形の違う構造物の一般化変位を相互比較する際に極めて重要な量であり、これが同じ場合には、模型の形が違っていても空力的にみて同じ特性を有していると考えてよい。今回の模型では、有効一般化質量の違いは最大でも9%であり、実

m^*	196	178	188	186	188
n_0 [Hz]	26.4	26.7	24.7	21.8	19.2

Fig.1 Models of parallel and tapered cylinders

験結果は定量的に相互比較が可能であると考えて良い。

円柱は風方向及び風直角方向にロッキング振動する振動天秤上に設置した。実験時の減衰定数は0.2%~2%である。実験気流は、乱れのない一様流中及びべき指数約0.3の乱流境界層流の2種類である。

3. 実験結果

3.1 一様中での風直角方向振動

Fig.2 は、一様流中における風直角方向の応答特性がテーパーの度合いによってどのように変化するかを調べたものである。図の縦軸は模型頂部の変動変位の

*1 東京電機大学理工学部、教授

Professor, Tokyo Denki University, College of Science and Engineering

RMS値（標準偏差）を模型高さで割った無次元変位（回転角），図の横軸は風速を模型の固有振動数と模型頂部断面の直径との積で割った換算風速を示している。

減衰定数が0.3 %程度の場合，Fig.2 より分かるように，どの断面においても，無次元風速5から10の間の風速で渦励振が生じ，円柱は風直角方向に激しく振動する。渦励振の発振風速は，Fig.3 に示したように，テーパの無い円柱（模型A）から高さの半分までテーパがついた円柱（模型C）までは換算風速5付近であるが，底部から3/4の位置までテーパのついた円柱（模型D）では換算風速7付近，全テーパ円柱では換算風速8と増大する。

渦励振が生じる風速の範囲はテーパ部分が大きくなるにつれて拡大し，全テーパ円柱においては，換算風速8から換算風速19まで極めて広い風速域で渦励振が生じる。また，テーパ部分が1/2 までは換算風速5付近から発振する渦励振のほかに，換算風速15～16付近で高次の渦励振と見られる振幅が小さい共振振動が生じる。

換算風速5から生じる渦励振は，減衰定数を0.6 ～ 0.8 %にすると，テーパのある無しにかかわらず収まる。しかし，換算風速15付近の共振振動は振幅は小

Fig.2 Across wind response of tapered cylinders in smooth flow

Fig.3 Onset velocity of vortex induced vibration

さくなるものの、共振現象自体は相変わらず起こり続ける。減衰定数が2パーセント近くになると、どの風速においても共振現象は認められなくなる。

3. 2 乱流境界層流中での風直角方向振動

Fig. 4 は乱流境界層流中でのテーパーつき円柱の風直角方向の応答性状を、減衰定数0.3 %程度の場合について、一様流中と比較して示したものである。テーパー部分が1/2 までは、気流の性状の違いによって応答性状はあまり大きな影響を受けないが、3/4 テーパー円柱及び全テーパー円柱では、乱流境界層流の方が、高風速域において振動振幅が大きくなる。特に、3/4 テーパー円柱においては換算風速18近傍の広範囲な風速域において、振幅の大きな振動が観察された。なおテーパー部分が1/2 以内の場合には、乱流境界層流の場合、一様流中で観察された換算風速15～16付近の共振現象は認められなかった。なお、Fig. 3 に示したように、乱流中における渦励振の発振風速は、一様流中とほとんど変わらなかった。

3. 3 渦励振中のパワースペクトル密度の変化

Fig. 5 は一様流中におけるテーパー無し及び1/2 , 全テーパーつき円柱の風向直角方向振動のパワースペクトルを示したものである。渦励振が始まる風速より

Fig.4 Across wind response of tapered cylinders in smooth and turbulent flows

も風速が小さい場合には、パワースペクトルには3つのピークが認められる。最も高周波数域にあるピークは、円柱の固有振動に起因するものであり、低周波数域にある2つのピークは円柱から後流に放出されるカルマン渦に起因するものであると考えられる。これら2つのピークに対応する換算振動数 nD/U はそれぞれ0.063と0.16であり、その比は約2.5となっている。風速が増大するにつれ、カルマン渦に起因するピークは高周波数側へと移動する。やがて換算風速5付近において渦励振が生じ振幅が急速に増大し始めるが、かなり振幅が大きくなって高周波数側のスペクトルピークは円柱の固有振動数に一致することはない。即ちカルマン渦放出が円柱の振動にロックされる状態に至る

Fig.5 Power spectra of across wind responses of parallel and tapered cylinders in smooth flow

ことはな。振幅がさらに増大すると、カルマン渦による高周波数側のピークは円柱の固有振動数と一致しロックイン状態にいたる。ロックイン状態では、低周波数側のピークの位置も変わらず、ほぼ円柱の固有振動数の半分の周波数になる。さらに風速が増大し渦励振が収まるにつれ、低周波数側のピークが再び風速の増大とともに高周波数側へと移動する。このピークが円柱の固有振動数と一致する時、第2の渦励振が生じる。このように、高周波数側の第2の渦励振を生じさせる周期的な変動風力は、振幅が非常に小さい時にすでに存在し、その周波数は通常のカルマン渦の周波数の1/2.5である。

4. 結論

一様流中及び乱流境界層流中において、テーパつき円柱の渦励振に関する風洞実験を行い、その性状に及ぼすテーパの度合いの影響、減衰の影響、気流性状の違いの影響を検討した。その結果以下の事実が明らかとなった。

- ① 減衰定数が0.3 %程度の場合、テーパつき円柱はどのような場合においても、渦励振が生じる。

- ② テーパー部分が大きくなる程、渦励振が生じる風速は高風速域へと移動し、また振動の生じる風速範囲が大きくなる。即ち、より高風速域においてより広範囲な風速で渦励振が生じる。
- ③ 一様中よりも乱流境界層中の方が、円柱は大きく振動する。特に、3/4 テーパー円柱および全テーパ円柱では、共振風速以上の高風速域における振動が激しくなる。
- ④ 減衰定数が0.6 ~0.8 %程度になると、渦励振はほとんど生じない。したがって、この種の構造物の渦励振の制止には、TMD などの付加的な減衰装置の設置によって構造減衰を増加させることが極めて有効である。

なお、本研究は㈱日本鋼管の援助のもとに行われたものである。

参考文献

1. L.R.Wotton and C.Scruton: Aerodynamic stability, The modern design of wind-sensitive structures, 1971, pp 65-81.