

三菱重工長崎研究所

正員

○坂田 弘

三菱重工長崎研究所

田中 博喜

1) はしがき

桁梁の風によるフラッターには曲げ振リフラッターと剥離流フラッターがある。曲げ振リフラッターは個々の空気力は安定に作用するにもかかわらず、曲げと振れが連成して起るフラッターで2自由度フラッターといわれる。一方剥離流フラッターは空気力の負減衰力が構造減衰を上回り発生するフラッターで1自由度フラッターといわれている。桁橋、箱桁等の橋梁はトラス型の橋梁と異なり周りの流体は剥離しており、多くは剥離流フラッターを起す。ここでは桁橋を有する橋梁の剥離流フラッターについてその特性を空気力の面から研究を進めた。

2) 静的空気力

静的空気力は橋梁が静止状態にある時に生ずる空気力で風向 α によってその値が異なるため、各風向について試験を行った。模型形状及び力の方向を図1に示す。尚試験は桁高さを3種類かえて高さによる影響も調べた。

試験結果は床板面積と動圧により無次元化を行った。その結果を図2に示す。揚力(C_L)は $\alpha = -4 \sim 0^\circ$ の間にピークがあり、正の揚力勾配と負の揚力勾配がある。負揚力勾配の領域は床板上の流体剥離に起因しており、負揚力勾配理論(Negative Slope Theory)による不安定現象がある事を示している。モーメントは揚力に比べ値は小さいが揚力と同様に負のモーメント勾配になっている。

3) 非定常空気力

非定常空気力は振動状態の橋梁に作用する空気力でフラッターに重要な影響を及ぼすものである。振動には曲げと振リがあるので、各振動状態において各振動数互に非定常空気力を計測した。振動の変位及び力の正方向を図3の矢印で示す。

試験結果は次の様にして無次元化を行った。

$$C_L h = L / \pi \rho v^2 h l \quad C_{Mh} = M / \pi \rho v^2 b h l$$

$$C_{L\alpha} = L / \pi \rho v^2 b l \quad C_{M\alpha} = M / \pi \rho v^2 b^2 l$$

$$h = b\omega / v \text{ (換算振動数)}$$

2b; 巾目 l ; 橋長 ρ ; 空気密度 v ; 風速

ω ; 円振動数

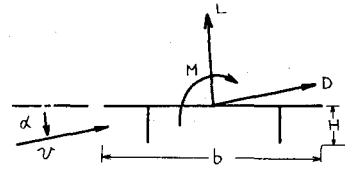


図1 模型及び符号

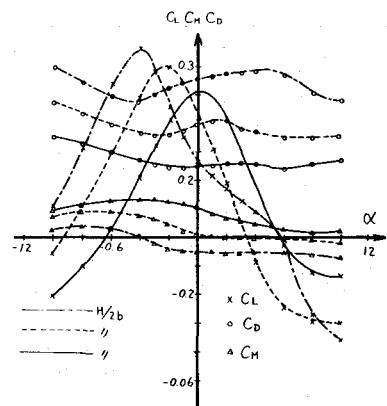


図2 静的試験結果

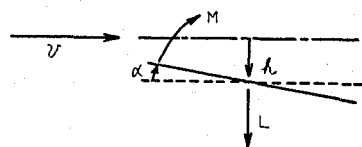


図3 非定常空気力符号

試験結果代表例として桁高 $H/2b = 0.273$ の場合の非定常空気を図4, 5に示す。桁橋の非定常空気力は平板に比べ換算振動数(ℓ)に対する変化が激しく、特に $\ell=0.2\sim0.3$ 付近では不連続点と思われる所もある。非定常空気力の波形を見ると換算振動数の高い所では調和振動に近いが、振動数の遅い所では各山互に再現性はあるが波形は調和振動が崩れている。振動数が高い場合は小さな渦が連続的に放出されるのに対し、振動数が遅い場合は渦が成長した後放出されるのが原因であろう。この様に桁橋周りの流れは変曲点($\ell=0.2\sim0.3$)を境にしてその状態が変化している様に見える。

4) フラッター

構造系と空気力がその振巾に対し共に線形である場合はフラッター方程式は次の様に表わされる。

$$m(-\omega^2 + i g \omega \omega_h + \omega_h^2) h/b = \pi \rho v^2 b l \{ (C_{LAR} + i C_{LRI}) h/b + (C_{LAR} + i C_{LAI}) \alpha \}$$

$$I(-\omega^2 + i g \alpha \omega \omega_\alpha + \omega_\alpha^2) \alpha = \pi \rho v^2 b^2 l \{ (C_{MAR} + i C_{MAI}) h/b + (C_{MAR} + i C_{MAI}) \alpha \}$$

m : 橋梁質量 I : 慣性能率 ρ : 空気密度 g : 減衰係数 i : 虚数部

h : 曲げ振動 α : 捩り振動 ω_h, ω_α : 固有円振動数

これらを無次元化すれば次の様になる。

$$(-\ell^2 + i g \ell k_h + k_h^2) h/b = \{ (C_{LAR} + i C_{LRI}) h/b + (C_{LAR} + i C_{LAI}) \alpha \} / \mu \quad \text{--- (1)}$$

$$(-\ell_\alpha^2 + i g \alpha k_\alpha + k_\alpha^2) \alpha = \{ (C_{MAR} + i C_{MAI}) h/b + (C_{MAR} + i C_{MAI}) \alpha \} / \nu \quad \text{--- (2)}$$

$$\ell = b\omega/v \quad k_h = b\omega_h/v \quad k_\alpha = b\omega_\alpha/v \quad \mu = m/\pi \rho b^2 l \quad \nu = I/\pi \rho b^4 l$$

(1), (2) 式を連立させる事により曲げ捩れフラッター、剝離流フラッターの限界風速を求める事が出来る。しかし剝離流フラッターは前述の通りに1自由度フラッターで曲げと捩りの振動が連成しないので近似的に空気力の達成項を省略する。曲げ振動について書けば次の様になる。

$$(-\ell^2 + i g \ell k_h + k_h^2) h/b = (C_{LRI} + i C_{LAI}) / \mu$$

上記の式で実数部は主に振動数を決定する項であるから、振動振巾に大きな影響を及ぼす虚数部を取り出せば、下記の様になる。同様に捩りの場合も記す。

$$D_h = g \ell k_h - C_{LAI} / \mu \quad \text{--- (3)} \quad D_\alpha = g \alpha k_\alpha - C_{MAI} / \nu \quad \text{--- (4)}$$

上記の D_h 及び D_α が負の値になると負の減衰となりフラッターが起こる。この様に剝離流フラッターにおいては曲げ振動中に作用する揚力の虚数部と捩り振動中に生ずるモーメントの虚数部が重要な影響を及ぼす事が判る。

5) 構造量とフラッターの関係

剝離流フラッターの場合はフラッター振動数は殆んど固有振動数に一致しているの、フラッター振動数は固有振動数に同じと考えて良い。この事を考慮し、3式、4式を書き直すと次の様になる。

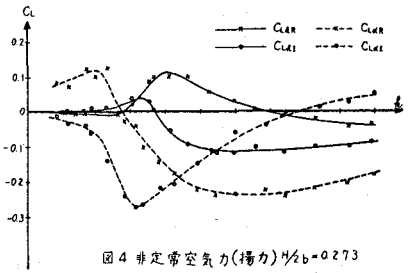


図4 非定常空気力(揚力) $H/2b=0.273$

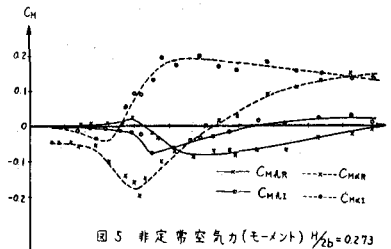


図5 非定常空気力(モーメント) $H/2b=0.273$

$$D_h = \mu g_h k h^2 - C_{Lh} I \quad \text{--- (5)}$$

$$D_h = 2 g_h k h^2 - C_{Mh} I \quad \text{--- (6)}$$

5式, 6式の右辺第1項は構造特性より得られる項で, オ2項が空気力の項である。もし空気力が正の値でしかも構造量を上回れば負減衰となりフラッターが起る。

桁高 $H/2b = 0.273$ の場合の構造量と空気力の関係を図6図7に示す。図において構造量と空気力と一致した点がフラッターの限界点であり, 構造量が空気力より大きい部分は安定領域であるが, 空気力が大きい部分は不安定の領域である。この図よりフラッター限界風速と構造量の関係を見い出せば図8に示す様になる。尚縦軸には風速の無次数である換算風速 ($v/b\omega$) で表示した。

曲げ振動のフラッター限界風速は構造量にあまり影響を受けないが, しかし構造量 (μg_h) が0.86より大きくなるとフラッターは全々起らない様になる。捩りの場合は構造量 ($2g_h$) の増加と共に限界風速が増加し, 1.23を越えようとフラッターは起らなくなる。

6) 負揚力勾配理論との比較

非定常空気力の C_{Lh} が正の値になるのは準静的に考慮すると静的な揚力勾配が負になる事を示している。以下元桁について負揚力理論の検討を進める。

振動方程式は次の様になる。

$$\{-k^2 + i g_h k h k + k h^2 + (C_{Lh} + C_D) i k / \pi \mu\} h / b = 0$$

これより減衰項を取り出すと次の様になる。

$$D_h = \mu g_h k h + (C_{Lh} + C_D) / \pi \quad \text{--- (7)}$$

桁高 $H/2b = 0.273$ の静的空気力を導入すると7式のオニ

項の値は -1.88 になる。構造量 $\mu g_h = 1.0$ の場合について考えると, 7式が零になる値は $k h = 1.88$ で, 風速の無次元値である換算風速にすると $v_R = 0.54$ になる。

一方非定常空気力より得られた値は $\mu g_h = 1.0$ で換算風速は無限大となるが, 図7の線を少し伸ばすと $v_R = 3.0$ 程度になり, 両者にはかなり開きがある。

7) まとめ

1 元桁の橋梁は曲げ及び捩りの剝離流フラッターが起る要素を持っているが, フラッター限界風速は構造量に強く支配される。

2 静的な空気力は負揚力勾配による不安定現象がある事を示しているが, その限界風速は非定常空気力で求めた値より大巾に小さい。

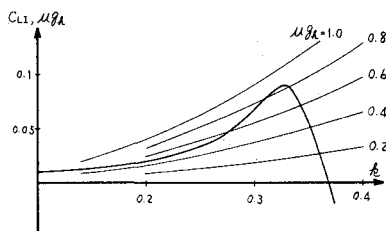


図6 非定常空気力と構造量(曲げ)
 $H/2b = 0.273$

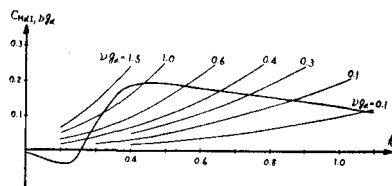


図7 非定常空気力と構造量(捩り)
 $H/2b = 0.273$

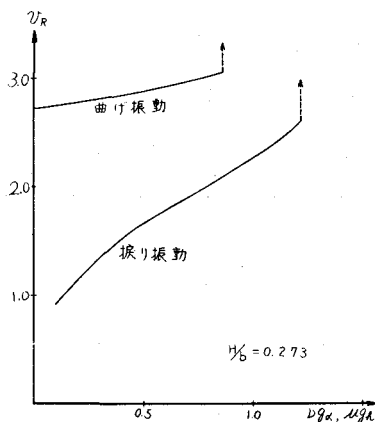


図8 構造量とフラッター風速