長大橋の風荷重静的変形およびフラッター特性に及ぼすレイノルズ数効果

石川島播磨重工　正会員 ○松田 一俊
National Research Council　Kevin R. Cooper
オタワ大学　正会員　田中 宏

１．はじめに

実橋の耐風安定性を風洞試験で照査する場合，検討対象橋梁に作用する空気力のレイノルズ数（以下，Re 数と略す.）依存性を正確に把握することは耐風設計上重要である.

著者らは，３種類の風洞および桁部分模型を用いて，1.1×10^4～1.5×10^6（代表長：桁高Ｄ）の Re 数範囲で，定常および非定常空気力係数の Re 数効果について調査した[1)]．その結果，図１に示す桁断面は，Re 数効果を有すること，現行の低 Re 数領域における検討対象桁の部分模型風洞試験結果は，耐風設計上安全側の評価となることが分かった.

ここでは，上述の研究成果を踏まえて，中央支間長2500mの長大吊橋解析モデルを用いて，静的風荷重変形とフラッター風速に及ぼす Re 数効果を解析的に検討した結果について報告する.

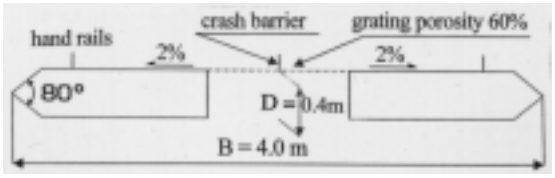


図１　縮尺 1/10 の部分模型断面形状

２．風洞試験

図２に，使用した風洞の中で最大の Re 数における風洞試験を行ったカナダＮＲＣの大型風洞（高さ 9.1m×幅 9.1m，最大風速 55m/s）を示す．風洞気流は，すべて一様流である.

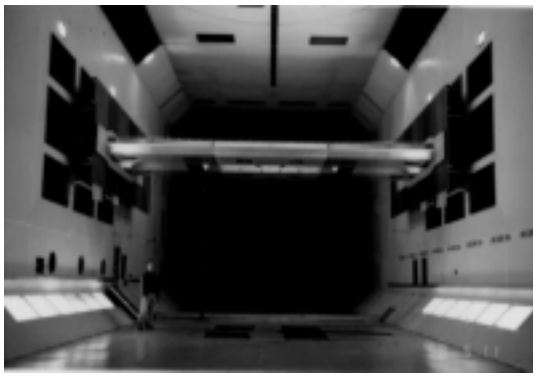


図２　ＮＲＣ風洞内における模型設置状況

３．風荷重静的変形

図３に揚力係数，空力モーメント係数を，図４に Re 数の異なる定常空気力係数を用いた気流傾斜角０度，風速 70m/s における静的風荷重変形の橋軸方向分布を示す．なお，静的水平変形量は，Re 数による差が比較的小さいため省略した．低 Re 数における空気力係数は，負の大きい迎角範囲において変化するため，静的変形量も大きく異なる傾向にある．したがって，フラッター解析において使用する非定常空気力係数の特性が，迎角によ

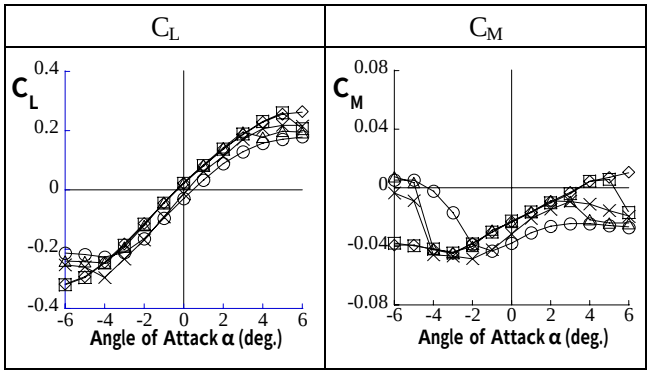
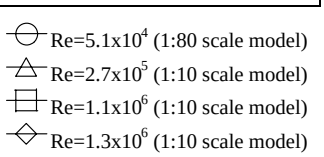
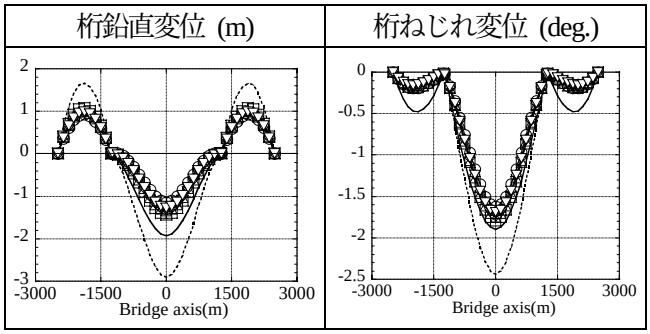


図３　揚力係数，空力モーメント係数





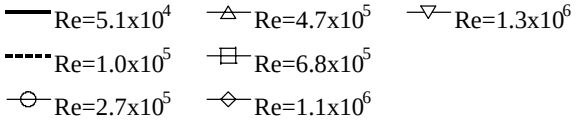


図４　風荷重静的変形の橋軸方向分布（気流傾斜角０度，風速 70m/s）

キーワード：レイノルズ数，橋梁，定常空気力，非定常空気力，風荷重静的変形，フラッター解析
連絡先：〒235-8501 横浜市磯子区新中原町１番地　石川島播磨重工業株式会社技術開発本部総合開発センター
機械システム開発部大型構造グループ　　TEL(045)759-2825　FAX(045)759-2208

大きく変化する場合，その解析結果の評価に注意する必要がある．

4．非定常空気力係数

図５に非定常空気力係数の計測値の一部をTheodorsen関数と比較して示す．本試験では，加振振動数を一定にして，風洞風速を変化させた強制加振法を採用した．換算振動数 k＝ｆB／V（ｆ：振動数，B：桁幅，V：風速）におけるｆとVは比例関係にあることから，同じkでも加振振動数を大きくして，Vを高くすることにより計測Re数を高くできる．なお，非定常空気力係数の定義は，次式のとおりである．

$$L_D = \pi\rho B^3\omega^2\left\{\left(C_{L\eta R} + iC_{L\eta i}\right)\frac{\eta}{B} + \left(C_{L\theta R} + iC_{L\theta i}\right)\theta\right\} \quad (1)$$

$$M_D = \pi\rho B^4\omega^2\left\{\left(C_{M\eta R} + iC_{M\eta i}\right)\frac{\eta}{B} + \left(C_{M\theta R} + iC_{M\theta i}\right)\theta\right\} \quad (2)$$

ここで，L_D, M_D ：単位長あたり非定常揚力，単位長非定常空力モーメント，ρ：空気密度，B：桁幅，ω：円振動数，$C_{L\eta R}$ ～ $C_{M\theta i}$：非定常空気力係数，η ：鉛直たわみ振幅，θ：ねじれ振幅，である．

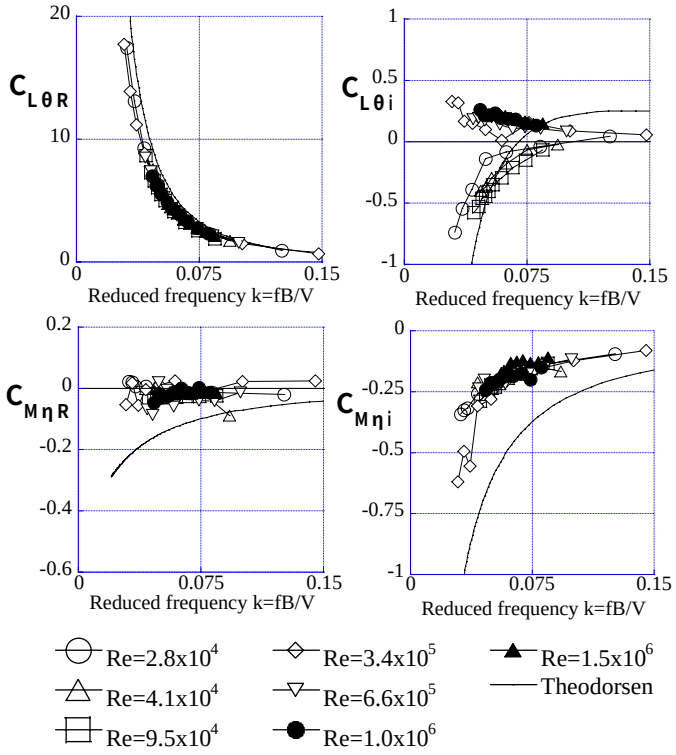


図５　非定常空気力係数（迎角 0 deg.）

図５は，迎角０度の場合であるが，連成フラッターにおいて，その発現に大きな影響力[2]をもつ$C_{M\eta i}(A_1^*)$と$C_{L\theta R}(H_3^*)$は，Re数の影響が小さく，発現への影響力が小さい$C_{L\theta i}(H_2^*)$のみRe数の影響を受けた．一方，迎角+3度[1]では$C_{M\eta i}(A_1^*)$, $C_{M\theta R}$および$C_{M\theta i}$はRe数の影響が大きく，$C_{L\theta R}(H_3^*)$と$C_{L\theta i}(H_2^*)$は小さいことから，Re数依存性は迎角によっても異なる．

5．フラッター風速

図６に中央支間長 2500m の長大吊橋解析モデルに，Re 数範囲の異なる迎角 0 度の非定常空気力係数を用いたモード重ね合わせ法（低次から 50 次まで）によるフラッター解析[3]結果を示す．図中，V_F(3D), V_F(2D)は，それぞれ全橋解析モデルのフラッター風速，桁部分模型解析モデルによるフラッター風速を示す．低 Re 数領域ではフラッター風速の Re 数依存性は，ほとんど認められないが，Re＝1.0×10⁶付近で，Re 数の増加とともにフラッター風速が高くなる．このことは，迎角+3 度における桁部分模型解析モデルのフラッター解析結果と同じ傾向にある[1]．

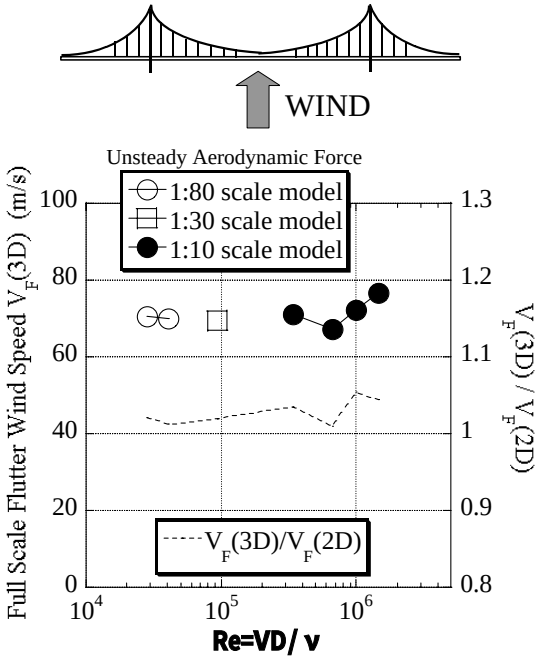


図６　フラッター解析結果（中央支間長 2500m，気流傾斜角 0 度）

6．まとめ

実橋のフラッター特性を解析によって推定する場合，非定常空気力係数の Re 数依存性だけでなく，その係数を決定する桁ねじれ変形に影響を与える静的空気力の Re 数依存性にも留意することが必要である．

参考文献

1) K. Matsuda, K.R. Cooper, H. Tanaka, M. Tokushige, T. Iwasaki, An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bridge deck section model, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 89, 2001, pp.619-632.
2) 松本　勝，浜崎　博，吉住文太：構造基本断面の非定常空力特性とフラッター発生機構，構造工学論文集 Vol.42A, 1996 年, p.819-824.
3) Y. Hikami, K. Matsuda, T. Suzuki, Nonlinear geometric and aerodynamic analysis for a long-span cable-stayed bridge during construction, Wind Engineering, Proc. 1st IAWE European and African Regional Conf., Guernsey, 1993, pp.431-440.