

I-493

明石海峡大橋フラッター特性に関する解析的検討

本四公団 正員 勝地 弘 横浜国大 正員 宮田 利雄
 建設省土研 正員 佐藤 弘史 本四公団 正員 北川 信
 IHI 正員 樋上 秀一 IHI 正員 松田 一俊

1. まえがき

明石海峡大橋大型風洞試験で観測された複雑なフラッター現象を解析的に説明するために、フラッター解析を実施した。解析に際しては、さまざまな角度から検討を重ね、試験結果をほぼ完全に説明できるまでに至った。また、解析検討の過程でいくつかの新たな知見を得ることができた。以下に、フラッター解析の検討結果を述べる。

2. 解析条件

フラッター解析は、明石海峡大橋の全橋立体骨組みモデルに非定常空気力を適用して運動方程式(1)を作り、複素固有値解析を行うことによってフラッター特性を表す諸量を求めた。解析は、複数の固有振動モードを用いたモード解析とし、桁に適用する非定常空気力は部分模型によって測定したものをを用いた。また、全橋模型はフラッター発生付近の風速で最大 -6° 程度のねじれ変形が生じ、これが橋軸方向に変化するため、静的及び動的空気特性が橋軸方向に大きく変化する(図-1)。さらにメインケーブルの干渉によって耐風性が悪化するなど、橋軸方向に非常に三次元性の強い構造となっている。このため、解析では全橋模型条件を再現した三次元モデルを用い、静的三分力係数、非定常空気力係数は、メインケーブルの干渉の有無を考慮し、加えてねじれ変形を考慮した迎角での値を用いた。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [F_I]\{\dot{u}\} + [F_R]\{u\} \quad (1)$$

ここで、 $\{u\}$: 変位ベクトル $=\{Z, \theta, Y\}^T$ 、 $[M]$: 質量マトリクス、 $[C]$: 減衰マトリクス、 $[K]$: 剛性マトリクス、 $[F_R]$ 、 $[F_I]$: 非定常空気力係数マトリクス
 Z, θ, Y : 鉛直変位、ねじれ変位、水平変位

$$[F]\{u\} = \begin{bmatrix} Lg \\ Mg \\ Dg \\ Lc \\ Dc \\ Dh \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{CLg(z)}{CMg(z)} & \frac{CLg(\theta)}{CMg(\theta)} & \frac{CLg(y)}{CMg(y)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{CMg(z)}{CDg(z)} & \frac{CMg(\theta)}{CDg(\theta)} & \frac{CMg(y)}{CDg(y)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{CDg(z)}{CDg(\theta)} & \frac{CDg(\theta)}{CDg(y)} & \frac{CDg(y)}{CDg(y)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{CLc(z)}{CDc(y)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{CDc(y)}{CDh(y)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{CDh(y)}{CDh(y)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Zg \\ \theta g \\ Yg \\ Zc \\ Yc \\ Yh \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 L, M, D : 非定常空気力(揚力、空力モーメント、抗力)
 g : 桁、 c : ケーブル、 h : ハンガー、 CL, CM, CD : 非定常空気力係数

3. 解析結果

全橋模型のフラッターが曲げねじれフラッターであったことから、非定常空気力として、補剛桁には式(2)に示す θ の成分と主塔、ケーブル、ハンガーの空気力を準定常的に考慮して、解析を行った(一次解析)。結果を図-2に示すが、途中まではよい一致を示しているが、フラッター発生付近から大きな隔たりが見られる。次に、補剛桁の非定常空気力に式(2)に示す θ の成分を加えて、二次解析を行った。結果を同図に示すが、フラッター発生付近での一致がよく、ほぼ測定値と一致する結果が得られた。

4. 考察

1) 解析モード数: 最初にたわみとねじれの最低次の2モードを用いた解析を行ったが、模型で観測された複雑なフラッターモードが再現できなかった。結局、本橋の場合、フラッター発生に密接に関連していると

考えられるたわみ対称1～3次、ねじれ対称1次、水平対称2次の5モード（図-3参照）を使えば、フラッターモード、限界風速などの諸量がほぼ再現できることが判った。さらに、解析次数を無条件に増やせば（例えば、30次まで）、ある値に収束するとともにモード解析法によらないいわゆる直接法の結果に一致することが判った。（図-4参照）

2) 非定常抗力の影響：本橋のフラッターに与える非定常空気力の抗力成分の影響度を解析的に検討した。図-5にフラッター発生に及ぼす非定常抗力、揚力、空力モーメントの寄与度を示すが、これより抗力成分の寄与度が大きくなっていることがわかる。また、図-6には、この非定常抗力がどの運動成分に伴って発生するのかを調べたものであるが、ねじれ運動に伴って発生するものが卓越していることが判る。

5. まとめ及びあとがき

検討の結果、本橋の場合は風荷重によるねじれ変形によって三次元性が大きくなり、これに伴ってフラッターに及ぼす非定常抗力の寄与度が大きいことが判明した。なお、一連の大型風洞試験は建設省土木研究所と共同研究を行っており、本検討は本四公団耐風委員会及び同風洞試験作業班での審議をもとにとりまとめたものである。

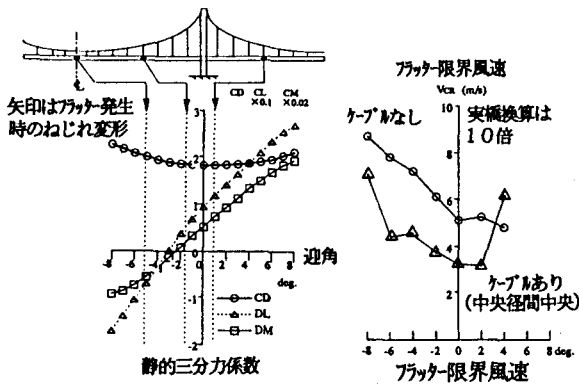


図-1 補剛桁の静的・動的空気特性

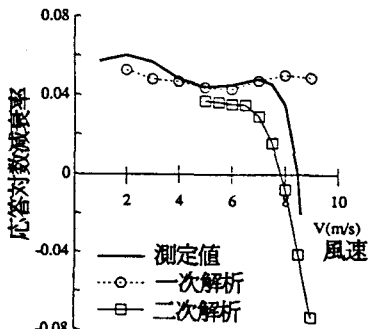


図-2 風速と応答減衰率の関係

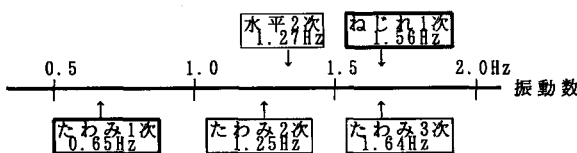


図-3 明石海峡大橋の固有振動数

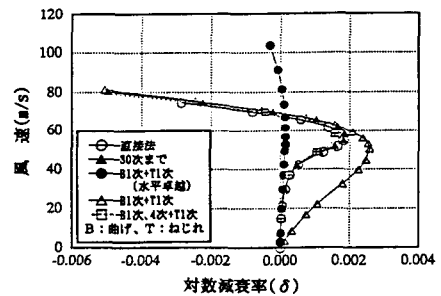


図-4 フラッター解析におけるモード次数の影響

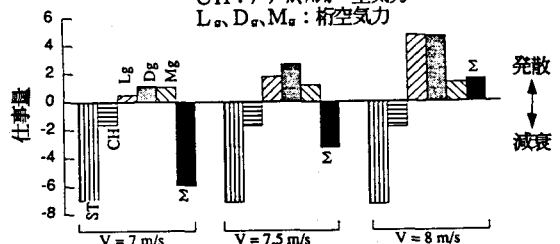


図-5 フラッターに与える桁空気力の寄与割合

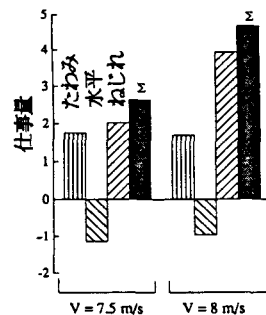


図-6 非定常抗力の発生要因