

I-B355

扁平箱桁長大吊橋フラッター発現時の構造検討

三井造船(株) 正会員 吉住文太 本州四国連絡橋公団 正会員 鳥海隆一
三井造船(株) 正会員 酒井正和 三井造船(株) 正会員 井上浩男

1. まえがき 本州四国連絡橋西瀬戸自動車道の来島第二大橋は、2径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋である(一般図を図1に示す)。来島第二大橋については、3次元弾性模型(縮尺1/150、完成系)を用いて、一様流中でのフラッター発現試験が行われた¹⁾。今回、このフラッター発現試験結果を基にフラッター発現モードを無風時固有振動モードの重ね合わせとして表現し、さらに設計風速時にフラッターが発現すると仮定して、変形または応力的に厳しい箇所について検討を行った²⁾ので報告する。

2. フラッター発現モード推定 フラッター発現試験では、補剛桁上4点+主塔2点×2塔柱=8点のそれぞれ上下流位置の計16カ所の変位計測が行われた。各測定点の振幅比、位相差を表1に示す。フラッター発現モードを桁中心線3方向変位(①桁部鉛直たわみ②桁部ねじれ③桁部水平たわみ)及び塔中心線(塔柱間の中心線)3方向変位(④塔部橋軸方向たわみ⑤塔部鉛直軸周りねじれ⑥塔部橋軸直角方向たわみ)で表し、これを固有振動モードの重ね合わせとして表現することでフラッター発現モードを推定した。③⑥の変位は他に比べ小さいので①②④⑤の変位を検討対象とし、このうち①④は桁鉛直たわみ卓越、②⑤は桁ねじれ卓越の各固有振動モードの重ね合わせとしてそれぞれまとめて推定した。推定にあたっては、以下の最小二乗法を用いた。

固有振動モードの重ね合わせにより、各測定点の複素振幅は(1)のようになる。試験における各測定点の複素振幅を(3)のようにおく。(1)、(3)で表される測定点の複素振幅の絶対差の二乗和を評価関数Jとする。

$$\Phi(x_j) = \left\{ \sum_{k=1}^n a_k \phi_k(x_j) \right\} \dots (1) \quad a_k = a_{rk} + i a_{ik} \dots (2) \quad A_j = A_{rj} + i A_{ij} \dots (3) \quad J = \sum_{j=1}^m |\Phi(x_j) - A_j|^2 \dots (4)$$

ここで、 $\Phi(x)$: フラッター発現モード、 $\phi_k(x)$: 固有振動モードkのモード、 a_k : 固有振動モードkのモード座標複素振幅、k: 重ね合わせる固有振動モードの番号、n: 重ね合わせる固有振動モードの個数(<m)、 x_j : 測定点jの座標、 A_j : 測定点jの複素振幅(試験値)、j: 測定点番号、m: 測定点個数(=8)

(4)のJを最小化する条件より、 a_{rk} 、 a_{ik} (k=1, 2, ..., n) について互いに独立した以下の連立一次方程式を得る。

$$\frac{\partial J}{\partial a_{rk}} = 2 \left[\sum_{j=1}^m a_{ri} \left\{ \sum_{k=1}^n \phi_k(x_j) \phi_i(x_j) \right\} - \sum_{k=1}^n A_{rk} \phi_k(x_j) \right] = 0 \dots (5.1) \quad \frac{\partial J}{\partial a_{ik}} = 2 \left[\sum_{j=1}^m a_{ri} \left\{ \sum_{k=1}^n \phi_k(x_j) \phi_i(x_j) \right\} - \sum_{k=1}^n A_{ik} \phi_k(x_j) \right] = 0 \dots (5.2)$$

(5)より各固有振動モードの複素振幅 a_k が求められ、これを(4)に代入すれば残差平方和が求められる。

推定手順としては、桁振動が卓越した固有振動モードを低次から順に拾って組み合わせで推定した後、試験を撮影した映像とのフラッター発現モード形状比較と残差平方和の変化に基づいて不要な固有振動モードを排除した。最終的に得られた固有振動モードの重ね合わせ状況を表2に、フラッター発現モードを図2に示す。

3. 構造損傷限界の検討 図3に検討フローを示す。ここでは、損傷限界の照査にもちいる断面力や移動量が、設計基準風速による値にフラッター振動による値を線形加算することで求まると仮定している。この2つの値のなかで、フラッター振動による値のみを許容値と等しくなるまで増加させることで、損傷限界を求めた。また、この増加率を「K」なる係数と定義し、損傷のしやすさを示す指標とした。図4に検討結果を示す。検討箇所は4カ所とした(補剛桁、タワーリンク、ウインドタンク、大伸縮装置)。「K」が小さい部位は、タワーリンク、補剛桁であり、最も大きい部位はウインドタンクであった。それぞれの損傷状態は、補剛桁が下側フランジナックル点の座屈、タワーリンクが軸部材の降伏である。また、ウインドタンクの増加率「K」が大きくなった理由は、フラッター振動による補剛桁の橋軸直角方向断面力が他の断面力と比べて小さいためである。

4. まとめ (1) 来島第二大橋フラッター発現試験におけるフラッター発現モードを固有振動モードの重ね合わせで表現すると、3つの鉛直たわみモードと1つのねじれモードの重ね合わせで表現される。(2) フラッター振動による損傷限界を検討した。損傷の発生しやすさの順に部位を並べると、「タワーリンク<補剛桁<大伸縮装置<ウインドタンク」となった。(3) 設計風速時にフラッターが発現するという仮定のもとではあるが、損傷開始場所の推定を試みており、本報告が今後吊橋システム全体としての設計レベルを考察する上で参考となれば幸いである。

参考文献 1) 大型風洞試験作業班検討報告書、平成10年3月、本州四国連絡橋公団

2) 箱桁橋梁のフラッター影響解析、平成10年3月、本州四国連絡橋公団、三井造船株式会社

キーワード: 3次元全橋模型、フラッター発現試験、フラッター発現モード、設計風速、損傷限界

連絡先: 〒196-0012 東京都昭島市つつじが丘1-1-50 TEL. 042-545-3114 FAX. 042-545-3113 (三井造船)

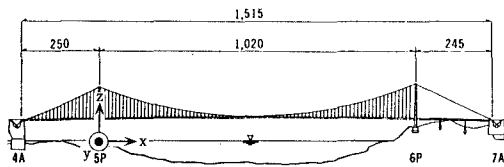


図1 来島第二大橋一般図

振動方向	固有振動モード重ね合わせ組	モード座標複素振幅	実部	虚部
鉛直たわみ	鉛直たわみ対称1次		-0.9798	-0.2808
モード①④	鉛直たわみ対称2次		-0.5913	-0.3115
	側径間鉛直たわみ対称1次		-0.4797	0.3111
ねじれモード②⑤	ねじれ対称1次		-0.6864	-0.0066

注)表中のモード座標複素振幅は、固有振動モードのモード縦面について並進方向(x,y,z)の最大値を1に基準化した場合の値

表2 フラッター発現モードを表す固有振動モードの重ね合わせ

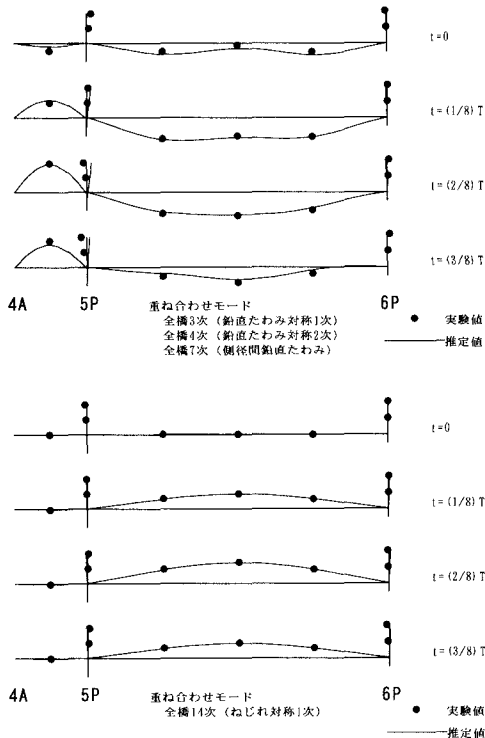


図2 フラッター発現モードの試験値と推定値の比較

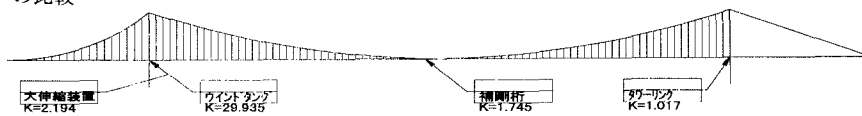


図4 構造損傷限界の検討結果

風洞風速9.14m/s、実橋換算風速111.9m/s

計測位置	変位方向	縦距A	位相差ψ[deg.]
5P側径間L/2点	鉛直成分	1.0000	7.723
	ねじれ成分	0.0355	161.625
	水平成分	0.0080	3.978
中央径間L/4点	鉛直成分	0.7735	150.893
	ねじれ成分	0.4734	-0.342
	水平成分	0.1155	-163.826
中央径間L/2点	鉛直成分	0.8026	167.073
	ねじれ成分	0.7006	0.000
	水平成分	0.0511	-177.102
中央径間3L/4点	鉛直成分	0.6763	146.262
	ねじれ成分	0.4638	0.827
	水平成分	0.0326	-138.710
5P塔頂	橋軸成分	0.1878	-127.480
	ねじれ成分	0.0727	60.557
	水平(橋直)成分	0.0489	-132.649
5P中間水平材位置	橋軸成分	0.0922	-121.187
	ねじれ成分	0.0333	52.636
	水平(橋直)成分	0.0385	-127.233
6P塔頂	橋軸成分	0.0863	26.427
	ねじれ成分	0.0729	-118.885
	水平(橋直)成分	0.0430	-130.051
6P中間水平材位置	橋軸成分	0.0313	19.730
	ねじれ成分	0.0407	-119.825
	水平(橋直)成分	0.0205	-145.237

注1)周期T=0.2709sec.(実橋換算T=3.318sec.)

振動数f=3.691Hz.(実橋換算f=0.3014Hz)

注2)主桁ねじれ成分は、ケーブル定着点における鉛直変位に変換

注3)主塔ねじれ成分は塔柱の橋軸方向変位に変換

注4)縦距は5P側径間L/2点の鉛直成分で正規化

注5)位相差は、中央径間L/2点のねじれ成分を基準に位相遅れを正

注6)各成分の正方向

桁鉛直成分:Z方向 桁ねじれ成分:4Aから7A方向をみて時計回り

桁水平成分:Y方向

塔橋軸成分:X方向 塔ねじれ成分:上から見て時計回り

塔水平(橋直)成分:Y方向

表1 フラッター発現試験における各測定点の振幅比、位相差（参考文献1）による）

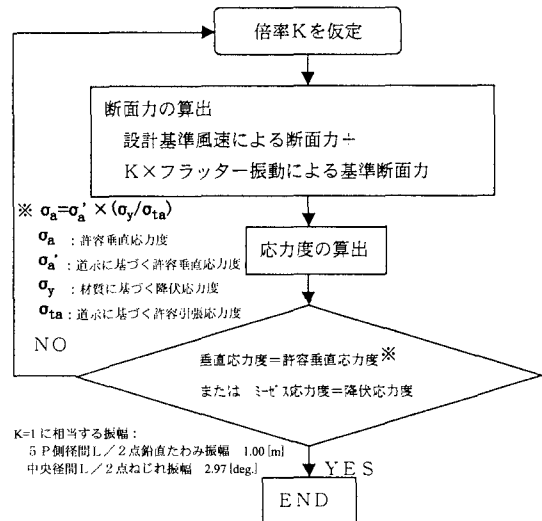


図3 構造損傷限界検討フロー