

経済性・耐風性に優れた超長大橋の上部構造に関する調査

独立行政法人 土木研究所 正会員 村越 潤
同 上 正会員 麓 興一郎
同 上 正会員 ○ 徳橋 亮治
本州四国連絡橋公団 正会員 秦 健作

川崎重工業(株) 正会員 下土居秀樹
川田工業(株) 正会員 内海 靖
住友重機械工業(株) 正会員 宮崎 正男
日立造船(株) 正会員 植田 利夫

1. はじめに

現在、我が国では各地で海峡を横断する道路が構想されており、これらの計画では従来の実績を上回る規模の超長大橋が必要となる可能性がある。

本研究で対象とした橋梁は、二箱桁と一箱桁を併用する補剛桁構造と、吊橋と斜張橋を融合させたケーブルシステムを併せ持つ中央径間 2800m の超長大橋である。後に行う三次元全橋大型風洞模型実験に先立ち、ばね支持試験、三分力試験、非定常空気力試験、ならびに補剛桁の静的載荷試験を実施したので報告する。

2. 想定した新形式超長大橋

対象とした橋梁は、橋長 5,000m、中央径間 2,800m、サグ比 1/10 の超長大橋である。図-1 に全体一般図を示す。本橋は中央径間中央部分の空力特性が橋梁全体系のフラッター特性に支配的である点に着目し、図-2 に示す耐風安定性に優れた開口部を有する二箱桁を中央径間中央付近に配置する一方で、主塔付近に一箱桁を配置することにより主塔柱間隔を狭小化し、より一層の経済性が期待できる併用構造とした。また、ケーブルシステムは超長大化に伴う張力増大の回避と、アンカレイジの小規模化を目的として二箱桁部を鉛直吊区間、一箱桁部を斜張区間とした(以下、本形式の橋梁を「斜張吊橋」と呼ぶ)。

3. 構造特性

構造特性を把握するために、立体骨組モデルを用いた弾性有限変位解析、及び実固有値解析を行った。活荷重強度の組合せ、許容応力の割増率、ならびに設計基準風速は本四基準¹⁾に準拠している。斜張ケーブルの弾性係数はサグ効果の影響を考慮して H.J.Ernst の等価換算係数により低減した。

図-4 に補剛桁の暴風時静的変形図、及び断面力図を示す。回転角に着目すると、斜張吊橋のねじれ変形においては、中央径間中央部で風下側桁端が下向き(頭上げ)となることがわかる。斜張区間の桁の水平変形による鉛直軸回りの回転により、風上側の斜張索に引張力が生じ、風下側の斜張索に緩み(張力の抜け)が生じることに起因するものと考えられる。また、連続桁化による鉛直軸回りの拘束効果により、主塔付近の補剛桁に大きな軸力と面外曲げモーメントが発生している。表-2 に曲げとねじれが卓越する対称 1 次モードの固有振動数と等価慣性値を、図-5 に固有モード図を示す。

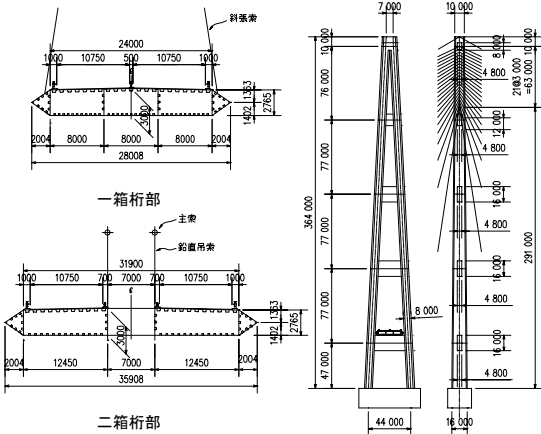


図-2 補剛桁断面図

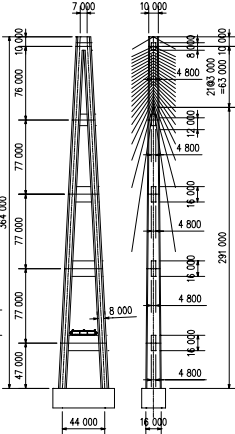


図-3 主塔形状図

表-1 構造諸元

基本諸元	形式	3径間連続斜張吊橋		
	支間長	中央径間	2800 m	
		側径間	1100 m	
	サグ比	1/10		
	縦断勾配 横断勾配 平面線形	中央径間1.5%放物線、側径間3.0%直線 2%山形勾配 直線+S字反方向曲線+直線		
主桁	桁高		3 m	
	桁幅（総幅）		28.008 ～ 35.908 m	
	二箱部	剛性	断面積	0.596 ～ 0.750 m ² /BOX
			鉛直曲げ剛度	0.883 ～ 1.202 m ⁴ /BOX
		慣性	水平曲げ剛度	11.222 ～ 14.367 m ⁴ /BOX
			純ねじり剛度	1.902 ～ 2.850 m ⁴ /BOX
	一箱部	剛性	質量	140.925 ～ 326.832 t/m/BOX
			極慣性	2716.782 ～ 6449.867 t・m ² /m/BOX
		慣性	断面積	1.397 ～ 2.476 m ² /BOX
			鉛直曲げ剛度	2.149 ～ 3.135 m ⁴ /BOX
	開口部橋梁	剛性	水平曲げ剛度	96.616 ～ 237.160 m ⁴ /BOX
			純ねじり剛度	5.610 ～ 7.955 m ⁴ /BOX
		慣性	質量	163.416 ～ 1159.474 t・sec ² /m ² /BOX
			極慣性	3224.933 ～ 96970.130 t・sec ² /m ² /BOX
索類	主索	剛性	断面積	0.861 ～ 1.907 m ²
			鉛直曲げ剛度	3.586 ～ 9.173 m ⁴
		慣性	水平曲げ剛度	7.642 ～ 55.028 m ⁴
			純ねじり剛度	5.760 ～ 22.686 m ⁴
		ダイヤフラム間隔（斜張部）2.5 ～（吊部）6.0 m		
		本数	2 本	
			構成索線数	127 本/St.
			1ストランド断面積	2534 mm ²
			構成ストランド数	169 本/条
		吊索	構成索線数	21463 本/条
	一般部直径		0.826 mm	
	断面積		0.483 m ²	
	最大張力		39641 tf/本	
	吊索径		0.119 m	
断面積	0.072 m ²			
斜張索	取付間隔	30 m		
	斜張索径	0.048 ～ 0.081 mm		
	断面積	0.007 ～ 0.020 m ²		
	最大張力	4822 ～ 14271 tf/本		
主塔	剛性	塔柱	断面積	2.722 ～ 6.044 m ²
			面内曲げ剛度	31.093 ～ 154.388 m ⁴
			面外曲げ剛度	22.309 ～ 54.861 m ⁴
		水平材	純ねじり剛度	26.146 ～ 88.571 m ⁴
			断面積	0.861 ～ 1.393 m ²
			面内曲げ剛度	7.642 ～ 37.676 m ⁴
	慣性	面外曲げ剛度	3.586 ～ 6.582 m ⁴	
		純ねじり剛度	5.760 ～ 14.179 m ⁴	

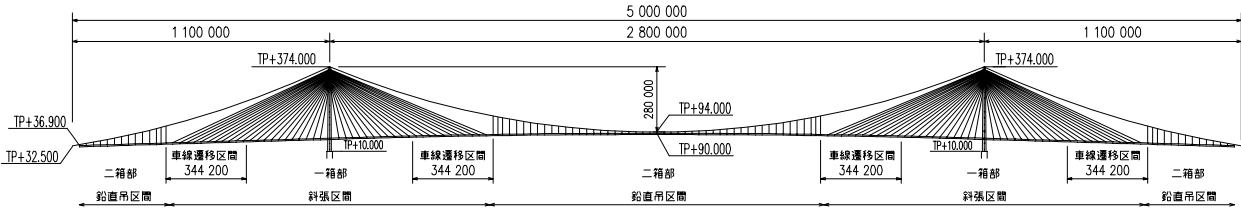


図-1 全体図

キーワード 超長大橋, 斜張吊橋, 模型載荷試験, パネ支持試験, 空気力試験, フラッター

土木研究所構造物研究グループ(橋梁構造) 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 TEL 0298-79-6793 FAX 0298-79-6739

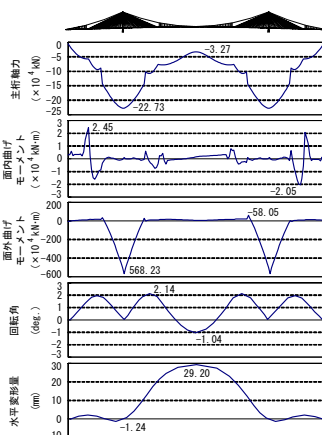


図-4 静的構造特性

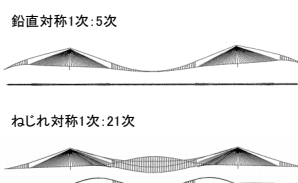


図-5 主要モード形状

表-2 固有値解析結果

モード次数	5
曲げ卓越	固有振動数 0.0688 Hz
	等価質量 263.62 kN/m
モード次数	21
ねじれ卓越	固有振動数 0.1641 Hz
	等価剛性 282470.1 kN・m/m

表-3 所要値と模型値

断面番号	種別	A	I_y	I_H	J
1	所要値	2.9	268.1	15091.3	704.4
	模型値	34.6	243.9	243.9	349.9
	比率	69.2	487.8	14936.3	699.7
	比率	23.5	1.8	1.0	1.0
2	所要値	2.9	268.1	15091.3	704.4
	模型値	34.6	243.9	243.9	349.9
	比率	69.2	487.8	13665.7	699.7
	比率	23.5	1.8	0.9	1.0
3	所要値	2.5	242.5	11562.8	657.5
	模型値	33.1	228.9	228.9	329.1
	比率	66.1	457.7	11892.9	658.2
	比率	26.5	1.9	1.0	1.0
4	所要値	2.4	229.1	10861.9	612.4
	模型値	31.3	211.6	211.6	305.2
	比率	62.5	423.2	10743.3	610.4
	比率	26.5	1.8	1.0	1.0

※模型値上段は角管当たり断面値、下段は一断面換算

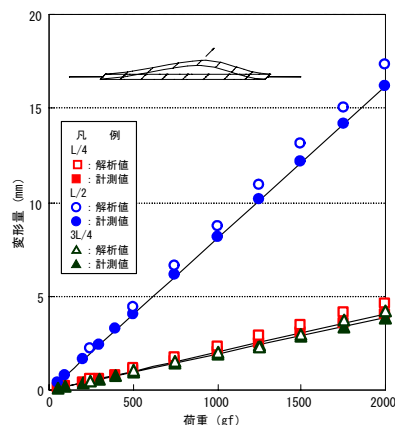


図-7 模型計測と解析結果

4. 補剛桁剛性棒の予備試験

後に行う全橋風洞模型実験に先立ち、設計及び模型の製作精度の把握を目的に、補剛桁剛性棒の予備試験を実施した。図-8, 9に示すように、模型は中央径間部分の補剛桁を対象として、一箱桁部は一本の剛性棒、二箱桁部は梯子形状に組み立てたものである。表-3に実橋と相似させた模型所要値と、実際の模型モデルとなる実現値との比較を示す。全橋模型における二箱桁の剛性棒（以下、箱桁という）は薄肉閉断面としたため、断面定数のうち断面積 A 、水平曲げ I_H 、ならびに純ねじり剛度 J が実橋に相似する長方形の薄肉閉断面を求めると、板厚が極薄となり製作不可能となる。今回対象とする模型は、箱桁が横材で連結される構造としたため、箱桁の断面積 A が相似できないと水平曲げ剛性 EI_H 及び全体ねじり剛性 GJ が相似できない構造となる。

そこで、模型では断面積 A が所要値の数十倍になることを許容し、水平曲げ剛性を整合させるために、箱桁は純ねじり剛度 J が所要値に整合するような等辺角管のアルミ合金形材とし、横材は水平曲げ剛度 I_H を低減しやすい燐青銅板バネとした。図-7に代表的な結果を示す。解析と計測はほぼ整合しており、設計ならびに模型精度に問題がないことを確認できた。

5. 風洞試験

暴風時の静的変形、及び振動特性を把握するため、バネ支持試験、3分力試験、非定常空気力試験を実施した。想定した補剛桁断面は維持管理に不利となるガイドベーンを取り外し、桁先端のフェアリング形状と桁間隔を数種変化させて試験を行い、最も特性の優れる断面を採用した。図-10に3分力試験結果を、図-11にフラッター限界風速を示す。迎角 $+3^\circ$ の空力特性が特に優れるため、斜張吊橋特有の補剛桁の頭上げに極めて有効である結果が得られた。

6. あとがき

斜張吊橋は、超長大化に伴うケーブル張力増大への低減化、補剛桁の効率化、基礎構造の小規模化を可能とすることから、将来の海峡架橋構想への適用可能性を十分示唆し得る構造である。今後は、本検討で行った試設計ならびに各種試験結果に基づき、全橋風洞模型試験、3次元マルチモード連成フラッター解析などを実施する予定である。なお、本研究は（独）土木研究所、本州四国連絡橋公団、（財）土木研究センター、及び民間9社（著者5社、IHI(株)、清水(株)、JFE(株)、三井(株)、三菱(株)）からなる共同研究「経済性・耐風性に優れた超長大橋の上部構造に関する調査」の一環として実施したものである。

【参考文献】

- 1) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1989.4 / 本州四国連絡橋耐風設計基準，2001

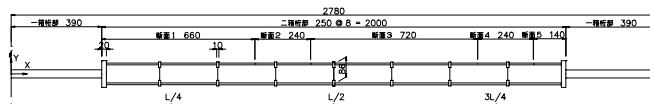


図-8 補剛桁模型図



図-9 試験状況

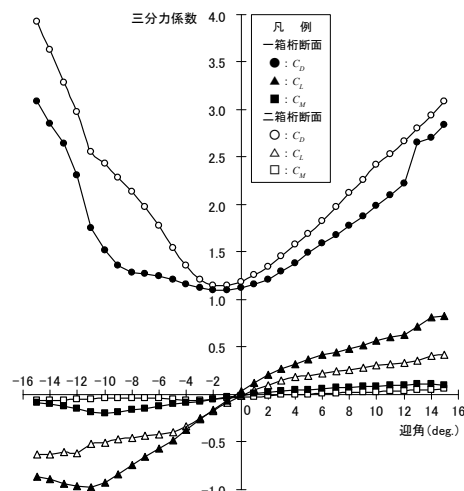


図-10 3分力曲線

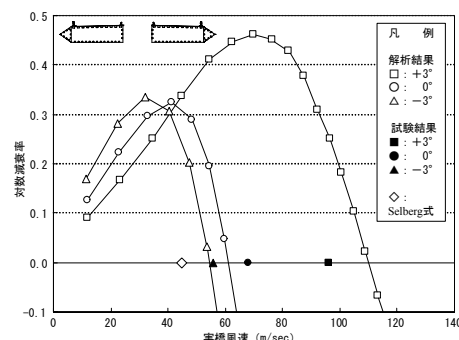


図-11 フラッター限界風速