

雄士信史二弘康島川藤伯勝美北佐佐地

1. まえがき

多々羅大橋は本州四国連絡橋尾道－今治ルートの生口島と大三島を結ぶ、中央径間 890m の長大斜張橋である。斜張橋はケーブルの振動により橋梁全体の振動特性が複雑になることから、対風挙動に関して十分に検討を行う必要がある。本四公団では本橋の耐風安定性を照査するため、建設省土木研究所構内に設置された大型風洞において、全橋模型風洞試験を実施している。本報告は、この風洞試験によって得られた結果のうち、特に一様流中の渦励振に着目し、全橋模型試験の結果、および別途実施された部分模型試験の結果との比較検討について報告するものである。なお、一連の試験は建設省土木研究所と本四公団とによる共同研究の一環として行われたものである。

2. 試験概要

大型風洞試験に用いた全橋模型は縮尺 1/70 の 3 次元弾性模型（3D 模型）であり（図 1）、主桁断面には図 2 に示す暫定供用系と完成供用系の 2 種類の断面を用いた。また、別途実施された部分模型試験は縮尺 1/45 の 2 次元剛体模型（2D 模型）を用いており、全橋模型試験と同様、2 種類の主桁断面を対象にして行われた。表 1 に、3D 模型および 2D 模型の主要諸元を示す。全橋模型風洞試験は一様流中ににおいて、気流傾斜角 α を 0° より $+3^\circ$ に設定した 2 ケースを行った。なお、本試験に用いた大型風洞の測定期寸法は幅 41m × 高さ 4m × 長さ 30m である。

3. 試験結果および考察

(1) 風速と振幅の関係

図3～4に3D模型の風速-応答曲線を示す。図の横軸は風洞風速 V_m (m/s)、縦軸は無次元振幅 η/B (η :応答振幅, B :幅員) を表す。図より暫定供用系では、 $\alpha = 0^\circ$ および $+3^\circ$ で鉛直曲げ対称1次と逆対称1次の渦励振が発現しており、完成供用系においては、 $\alpha = +3^\circ$ で鉛直曲げ対称1次と、暫定供用系では見られな

Wind Speed V_m (m/s)	η/B (Temporary, $\alpha = 0^\circ$)	η/B (Temporary, $\alpha = +3^\circ$)	η/B (Completed, $\alpha = +3^\circ$)
0.0	0.000	0.000	0.000
0.5	0.000	0.000	0.000
1.0	0.000	0.000	0.000
1.5	0.000	0.000	0.000
2.0	0.000	0.000	0.000
2.5	0.000	0.000	0.000
3.0	0.000	0.000	0.000
3.5	0.000	0.000	0.000
4.0	0.000	0.000	0.000
4.5	0.000	0.000	0.000
5.0	0.000	0.000	0.000
5.5	0.000	0.000	0.000
6.0	0.000	0.000	0.000
6.5	0.000	0.000	0.000
7.0	0.000	0.000	0.000
7.5	0.000	0.000	0.000
8.0	0.000	0.000	0.000
8.5	0.000	0.000	0.000
9.0	0.000	0.000	0.000
9.5	0.000	0.000	0.000
10.0	0.000	0.000	0.000
10.5	0.000	0.000	0.000
11.0	0.000	0.000	0.000
11.5	0.000	0.000	0.000
12.0	0.000	0.000	0.000
12.5	0.000	0.000	0.000
13.0	0.000	0.000	0.000
13.5	0.000	0.000	0.000
14.0	0.000	0.000	0.000
14.5	0.000	0.000	0.000
15.0	0.000	0.000	0.000
15.5	0.000	0.000	0.000
16.0	0.000	0.000	0.000
16.5	0.000	0.000	0.000
17.0	0.000	0.000	0.000
17.5	0.000	0.000	0.000
18.0	0.000	0.000	0.000
18.5	0.000	0.000	0.000
19.0	0.000	0.000	0.000
19.5	0.000	0.000	0.000
20.0	0.000	0.000	0.000
20.5	0.000	0.000	0.000
21.0	0.000	0.000	0.000
21.5	0.000	0.000	0.000
22.0	0.000	0.000	0.000
22.5	0.000	0.000	0.000
23.0	0.000	0.000	0.000
23.5	0.000	0.000	0.000
24.0	0.000	0.000	0.000
24.5	0.000	0.000	0.000
25.0	0.000	0.000	0.000
25.5	0.000	0.000	0.000
26.0	0.000	0.000	0.000
26.5	0.000	0.000	0.000
27.0	0.000	0.000	0.000
27.5	0.000	0.000	0.000
28.0	0.000	0.000	0.000
28.5	0.000	0.000	0.000
29.0	0.000	0.000	0.000
29.5	0.000	0.000	0.000
30.0	0.000	0.000	0.000
30.5	0.000	0.000	0.000
31.0	0.000	0.000	0.000
31.5	0.000	0.000	0.000
32.0	0.000	0.000	0.000
32.5	0.000	0.000	0.000
33.0	0.000	0.000	0.000
33.5	0.000	0.000	0.000
34.0	0.000	0.000	0.000
34.5	0.000	0.000	0.000
35.0	0.000	0.000	0.000
35.5	0.000	0.000	0.000
36.0	0.000	0.000	0.000
36.5	0.000	0.000	0.000
37.0	0.000	0.000	0.000
37.5	0.000	0.000	0.000
38.0	0.000	0.000	0.000
38.5	0.000	0.000	0.000
39.0	0.000	0.000	0.000
39.5	0.000	0.000	0.000
40.0	0.000	0.000	0.000
40.5	0.000	0.000	0.000
41.0	0.000	0.000	0.000
41.5	0.000	0.000	0.000
42.0	0.000	0.000	0.000
42.5	0.000	0.000	0.000
43.0	0.000	0.000	0.000
43.5	0.000	0.000	0.000
44.0	0.000	0.000	0.000
44.5	0.000	0.000	0.000
45.0	0.000	0.000	0.000
45.5	0.000	0.000	0.000
46.0	0.000	0.000	0.000
46.5	0.000	0.000	0.000
47.0	0.000	0.000	0.000
47.5	0.000	0.000	0.000
48.0	0.000	0.000	0.000
48.5	0.000	0.000	0.000
49.0	0.000	0.000	0.000
49.5	0.000	0.000	0.000
50.0	0.000	0.000	0.000
50.5	0.000	0.000	0.000
51.0	0.000	0.000	0.000
51.5	0.000	0.000	0.000
52.0	0.000	0.000	0.000
52.5	0.000	0.000	0.000
53.0	0.000	0.000	0.000
53.5	0.000	0.000	0.000
54.0	0.000	0.000	0.000
54.5	0.000	0.000	0.000
55.0	0.000	0.000	0.000
55.5	0.000	0.000	0.000
56.0	0.000	0.000	0.000
56.5	0.000	0.000	0.000
57.0	0.000	0.000	0.000
57.5	0.000	0.000	0.000
58.0	0.000	0.000	0.000
58.5	0.000	0.000	0.000
59.0	0.000	0.000	0.000
59.5	0.000	0.000	0.000
60.0	0.000	0.000	0.000
60.5	0.000	0.000	0.000
61.0	0.000	0.000	0.000
61.5	0.000	0.000	0.000
62.0	0.000	0.000	0.000
62.5	0.000	0.000	0.000
63.0	0.000	0.000	0.000
63.5	0.000	0.000	0.000
64.0	0.000	0.000	0.000
64.5	0.000	0.000	0.000
65.0	0.000	0.000	0.000
65.5	0.000	0.000	0.000
66.0	0.000	0.000	0.000
66.5	0.000	0.000	0.000
67.0	0.000	0.000	0.000
67.5	0.000	0.000	0.000
68.0	0.000	0.000	0.000
68.5	0.000	0.000	0.000
69.0	0.000	0.000	0.000
69.5	0.000	0.000	0.000
70.0	0.000	0.000	0.000
70.5	0.000	0.000	0.000
71.0	0.000	0.000	0.000
71.5	0.000	0.000	0.000
72.0	0.000	0.000	0.000
72.5	0.000	0.000	0.000
73.0	0.000	0.000	0.000
73.5	0.000	0.000	0.000
74.0	0.000	0.000	0.000
74.5	0.000	0.000	0.000
75.0	0.000	0.000	0.000
75.5	0.000	0.000	0.000
76.0	0.000	0.000	0.000
76.5	0.000	0.000	0.000
77.0	0.000	0.000	0.000
77.5	0.000	0.000	0.000
78.0	0.000	0.000	0.000
78.5	0.000	0.000	0.000
79.0	0.000	0.000	0.000
79.5	0.000	0.000	0.000
80.0	0.000	0.000	0.000
80.5	0.000	0.000	0.000
81.0	0.000	0.000	0.000
81.5	0.000	0.000	0.000
82.0	0.000	0.000	0.000
82.5	0.000	0.000	0.000
83.0	0.000	0.000	0.000
83.5	0.000	0.000	0.000
84.0	0.000	0.000	0.000
84.5	0.000	0.000	0.000
85.0	0.000	0.000	0.000
85.5	0.000	0.000	0.000
86.0	0.000	0.000	0.000
86.5	0.000	0.000	0.000
87.0	0.000	0.000	0.000
87.5	0.000	0.000	0.000
88.0	0.000	0.000	0.000
88.5	0.000	0.000	0.000
89.0	0.000	0.000	0.000
89.5	0.000	0.000	0.000
90.0	0.000	0.000	0.000
90.5	0.000	0.000	0.000
91.0	0.000	0.000	0.000
91.5	0.000	0.000	0.000
92.0	0.000	0.000	0.000
92.5	0.000	0.000	0.000
93.0	0.000	0.000	0.000
93.5	0.000	0.000	0.000
94.0	0.000	0.000	0.000
94.5	0.000	0.000	0.000
95.0	0.000	0.000	0.000
95.5	0.000	0.000	0.000
96.0	0.000	0.000	0.000
96.5	0.000	0.000	0.000
97.0	0.000	0.000	0.000
97.5	0.000	0.000	0.000
98.0	0.000	0.000	0.000
98.5	0.000	0.000	0.000
99.0	0.000	0.000	0.000
99.5	0.000	0.000	0.000
100.0	0.000	0.000	0.000

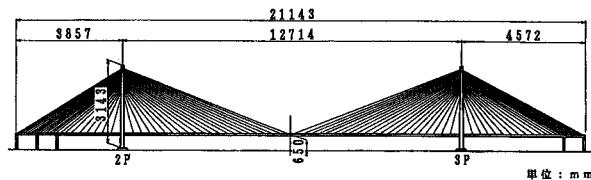
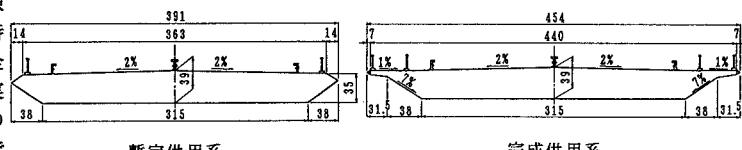


図1 多々羅大橋全橋模型一般図（縮尺1/70）



暂定供用系

完成供用系

図2 模型主軸断面

表 1 模型主要諸元

	項 目	実 構 成	全 構 成	模 型	部 分 模 型
暫 定 供 用 系 統	総 尺	—	1/70	1/45	
	幅 員	27.4m	391.4mm	9.9mm	
	桁 高	2.7m	38.6mm	60.0mm	
	重 量	20.24tf/m	4.46kgf/m	9.89kgf/m	
	慣性モーメント	13197fm ² /m	0.052kgf·m ² /m	0.325kgf·m ² /m	
振 動 数 れじれい 減 衰 率	振 動 数 れじれい 減 衰 率	鉛直曲げ対称1次 鉛直曲げ逆対称1次 鉛直曲げ対称1次 鉛直曲げ逆対称1次 ねじれ対称1次	0.235Hz 0.282Hz 0.546Hz — —	2.000Hz 2.329Hz 4.504Hz 0.025 0.017	2.25Hz — 5.34Hz 0.020 0.020
	総 尺	—	1/70	1/45	
	幅 員	31.8m	454.3mm	706.7mm	
	桁 高	2.7m	38.6mm	60.0mm	
	重 量	21.25tf/m	4.47kgf/m	10.39kgf/m	
完 成 供 用 系 統	慣性モーメント	15547fm ² /m	0.064kgf·m ² /m	0.383kgf·m ² /m	
	振 動 数 れじれい 減 衰 率	鉛直曲げ対称1次 鉛直曲げ逆対称1次 ねじれ対称1次 ねじれ対称2次 鉛直曲げ対称1次 鉛直曲げ逆対称1次 ねじれ対称1次	0.216Hz 0.262Hz 0.501Hz 0.953Hz — — —	1.963Hz 2.256Hz 4.255Hz 8.628Hz 0.031 0.020 0.018	2.17Hz — 4.93Hz — 0.020 — 0.020
	総 尺	—	1/70	1/45	
	幅 員	31.8m	454.3mm	706.7mm	
	桁 高	2.7m	38.6mm	60.0mm	



図3 風速-応答曲線(暫定供用系)

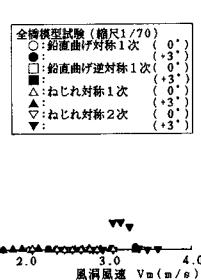


図4 風速-応答曲線(完成供用系)

かった高次のねじれ対称2次の渦励振が発現している。

(2) 2D模型との比較

気流傾斜角 $\alpha=0^\circ$ における暫定供用系について、2D模型試験との比較を図5に示す。なお、完成供用系では $\alpha=0^\circ$ で3Dおよび2Dとともに渦励振は発現しなかった。図の横軸は無次元風速 $V_r=V_m/(f_0 \cdot B)$ (f_0 :固有振動数)を表す。図中には2Dと3Dの比較を行うため、2D模型の振幅を空気力の振幅依存性を無視し、振動モードの影響のみで補正した値(振幅 $\times 4/\pi$)を併記した。表2には3Dと2D模型のスクルートン数比および渦励振のピーク振幅比を示した。一般的に、応答振幅はスクルートン数に反比例することや、3次元性の影響等を考慮に入れ、渦励振の発現している暫定供用系のたわみに着目すると、図表より、渦励振のピーク振幅比およびその発現風速は、3Dと2Dにおいてほぼ同程度の値となっていると考えられる。しかし、ここで問題なのはねじれの渦励振についてである。2D模型では $V_r=0.8$ で $\theta=0.32^\circ$ の振幅が生じているにもかかわらず、3D模型では全く認められない。振幅値自体は問題にならない程度の加速度となるが、この3Dと2Dの現象の差違は、斜張橋の特性であるシステム「ビソグリ」や、ねじれと水平たわみ振動の連成の影響等に起因するものと考えられる。本試験の場合は、後者のねじれと水平たわみの連成の影響が強いのではないかと推測された。これは、2D模型の等価慣性の所要値が、水平たわみの連成を考慮していない固有値解析によるものであるため、このような3Dと2Dの差異が生じたものと考えられた。そこで再度、水平たわみの連成を考慮した固有値解析を行い、その等価慣性を用いた2次元風洞試験を行った。(表3参照)

(3) ねじれと水平たわみの連成

表3より、連成を考慮した場合の等価慣性が、考慮しない場合の1.35倍になっており、このため渦励振振幅は0.81倍と小さくなっている。次に、3D模型についてこの連成の影響を調べた結果が図6である。図の横軸には中央径間をとり、縦軸には、各風速毎のねじれの振動振幅に含まれる水平たわみ成分を中央径間L/2点のねじれ振幅で除した値の絶対値を比率 r (mm/deg)として示した。また、この図中の実線は固有値計算による解析値である。図より、L/2点の水平たわみの比率 r は無風時には解析値とほぼ一致しているのに対し、有風時には無風時よりも大きな値を示しており、特に2D模型においてねじれ渦励振が生じた $V_r=0.9$ 付近では、かなり水平たわみ成分の割合が大きくなっている。これらの結果より、3D模型においてねじれ渦励振が発現しなかったのは、有風時においてねじれと水平たわみの連成が模型の振動特性に大きな影響を与えていたからではないかと考えられる。

4.まとめ

本試験の結果、以下のことことが明らかとなり全橋模型試験の有効性が再確認された。

- 全橋模型試験では、部分模型試験で確認できない高次の渦励振が発現した。
- 全橋模型の渦励振ピーク振幅は、部分模型に振動モードのみを考慮して補正を行った値とほぼ同程度となった。

(3) 全橋模型では、ねじれと水平たわみの連成が主な要因となり、ねじれの渦励振が発現しなかった。

(参考文献) 山田 均, 田中 宏「部分模型実験の質量相似則とそれに基づく応答予測」, 土木学会論文集, 第380号, 1987.4

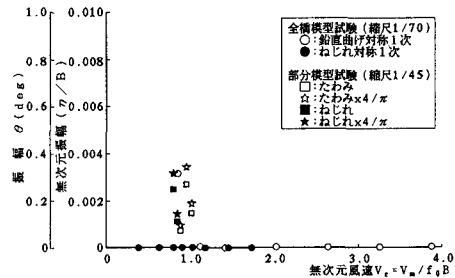


図5 2D模型との比較(暫定供用系)

表2 3Dと2Dの渦励振振幅比

断面	スクルートン数比		渦励振振幅比	
	$S_{e^{3D}}/S_{e^{2D}}$	$\eta^{3D}/\eta^{2D}, \theta^{3D}/\theta^{2D}$	たわみ	ねじれ
暫定供用	1.36	0.98	1.09	—
完成供用	1.61	0.88	発現なし	発現なし

*は補正值を示す。

表3 2D模型試験結果(水平連成考慮, $\alpha=+5^\circ$)

項目	水平連成無視	水平連成考慮	考慮/無視
振動数 たわみ	0.235Hz	0.235Hz	1.00
ねじれ	0.546Hz	0.568Hz	1.04
等価質量	20.24tf/m	20.24tf/m	1.00
等価慣性	1319tfm ² /m	1775tfm ² /m	1.35
渦励振 たわみ(+5°) (Vr=1.65)	$\eta/B=0.0041$	$\eta/B=0.0059$	1.44
ねじれ(+5°) (Vr=1.17)	$\theta=0.86^\circ$	$\theta=0.70^\circ$	0.81

表中の値は実機値を示す。

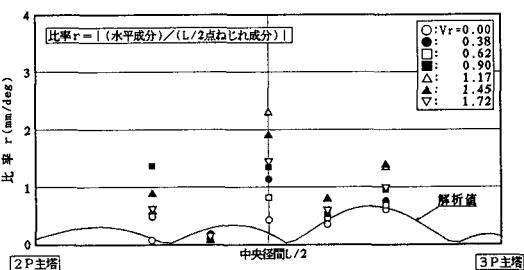


図6 3D模型における水平たわみ連成の比率