

ある一箱桁橋の耐風挙動に関する研究

STUDY ON AERODYNAMIC BEHAVIOUR OF A ONE BOX GIRDER BRIDGE

宮田 利雄*、山田 均**、半野 久光***、葛西 俊二****

By Toshio MIYATA, Hitoshi YAMADA, Hisamitsu HANNO and Shunji KASAI

Recently continuous girder bridges with very long spans, more than 200m, come to be planned and constructed. As longer spans they have, these bridges become to be more vulnerable against wind actions, because their section shapes are sometimes appropriate in aerodynamics. Usually their shapes are similar and effective counter measures are almost identical. Therefore database in their aerodynamic behavior and countermeasures will be very useful to improve structure design process of future similar bridges. In this paper it will be presented how a curved continuous girder bridge with sound insulation walls behaved in our wind tunnel and how countermeasures to suppress aerodynamic vibrations worked.

1. まえがき

最近最大径間長が200mを越える連続桁橋が計画あるいは施工されるようになってきた。計画例の増加にともない、従来この種の橋梁には不要とされていた動的な耐風設計、風洞試験の実施例も急激に増えてきているように見受けられる。空気力の形成と空力挙動に視点を置くと、これら連続桁橋の特徴は次のようにまとめられる。

- ① 吊り形式の橋梁では偏平な桁形状が多い一方、桁幅に対して比較的桁高が高くずんぐりしている。
- ② 桁高は中間支点付近が大きくスパン中央で小さく橋梁軸方向に変化する。
- ③ 長方形を基本とする箱桁が用いられ、カバーリング等構造設計段階で空力的に有利な断面形状が考慮される例は少ない。
- ④ 遮音壁が取り付けられる例が多い。
- ⑤ 曲線の平面線形を持つ場合が多く、ラーメン形式のものもある。
- ⑥ 一箱桁、二箱桁の違い、幅員の違いはあるが、基本的には径間割りにより桁の断面構成は類似である。

吊り形式橋梁の風洞試験で実績を持つ部分模型試験法は基本的な考え方として、等断面の桁の空気力学的な現象の検証を想定している部分がかなりある。この設定から吊り形式橋梁の場合でも逸脱することもある。

* 横浜国立大学教授	工学部建設学科	(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)
** 横浜国立大学助教授	工学部建設学科	(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)
*** 首都高速道路公団	海岸線建設局設計課	(〒105 東京都港区芝1-11-11)
**** (株)オリエンタルコンサルタンツ	東京事業部技術第二部	(〒213 川崎市高津区久本87-1)

たが、それはわずかであり特に問題とするものではなかった。①や②の特徴で示したように連続桁橋の場合、空力的な特性を考えると重要なパラメータとなる桁高が橋軸方向に変化し、それにつれ空力特性も大きく変化することになる。従って、基本的に等断面の桁に対する風洞試験方法をそのまま当てはめるには問題が少なからずあることになる。一方、③と⑥の性格により基本的な空力的な安定化対策は多くの場合類似の結果となるようであり、発生が予測される渦励振、ギャロッピングについて実績的にも類似の対策が施されている〔1〕〔2〕。

さて、風洞試験が必要と考えられる程度の規模の連続一箱桁では従来実施されてきた吊り形式橋梁の場合に比べ、多くの場合同様な手順をとり同様な検討過程が当てはまり、実際にも機能しているように見える。従って、実橋梁の現象の再現性や実験実施上の手法に問題点や批判がないこともないが、耐風対策検討過程を整理蓄積することは非常に有用である。本例は典型的な箱桁の例とは必ずしも言いがたいが、ある一箱桁橋について耐風挙動を検討し、その検討経過を本研究では報告する。

2. 耐風対策の考え方

研究対象とした連続箱桁橋は、首都高速道路12号線の東京港連絡橋に隣接する4径間連続の曲線箱けた橋であり、最大支間長は230mのものである。平面的な線形と標準的な桁断面形状は図1に示す通りであり、曲線橋のために桁には片勾配がついている。架設地点の周辺の状況により道路面より3m高さの遮音壁の設置が計画されている。

動的な特性の顕著な特性は、平面線形の曲率がかかなり大きくかつ高ラーメン橋脚の構造であることにより、捩れをとまなう曲げ振動はもちろん水平曲げと鉛直曲げの連成した固有振動も低い次数の固有振動モード系として顕著かつ複雑に現れることである。

1) 構造特性の風洞試験への反映

本橋のように固有振動モードとして横たわみと鉛直たわみが顕著に連成する場合には、相似すべき質量パラメータは連成の状況を考慮した等価質量、等価極慣性モーメントの方がより適切といえる。しかしながら、低次のいくつかの固有振動モード系を調べると連成の状況は少なからず変化し、複数の固有振動モード系での空力振動の発生を考慮しようとするときかなり煩雑ともいえる。この理由で本試験では場合によってはかなり安全側のものとなるが、橋梁の構造軸方向に平均化した質量と極慣性モーメントを相似した直線状の2次元部分模型(表1)を用いた。

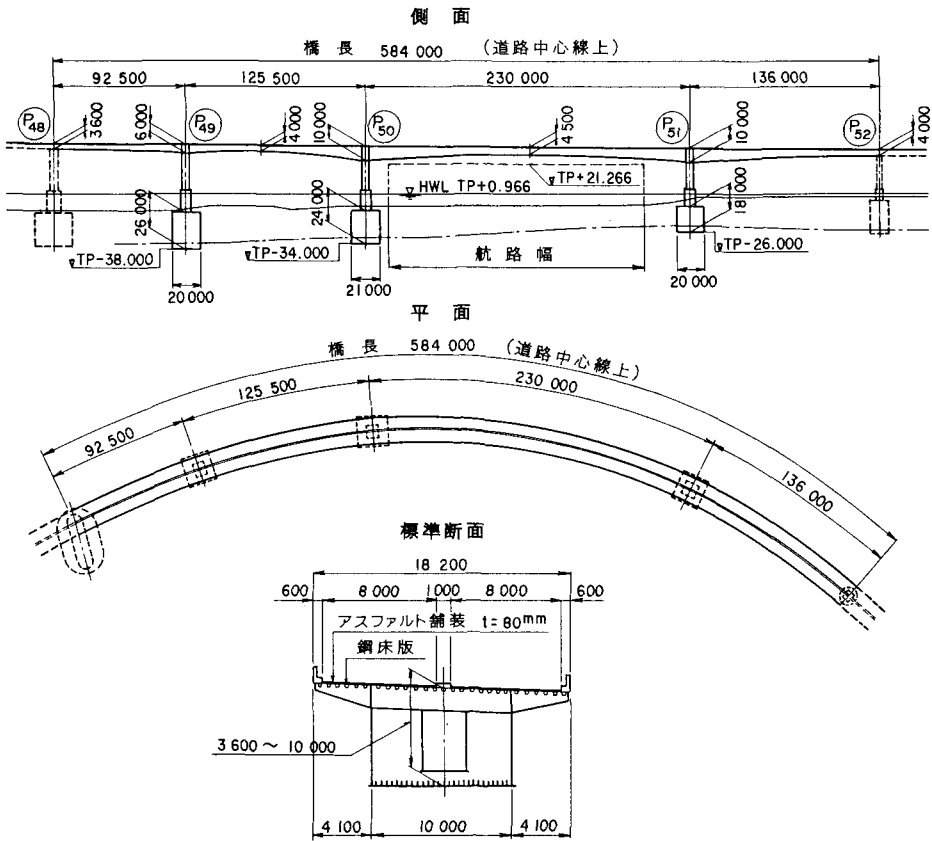
桁に作用する空気力特性は桁形状が異なれば当然の結果として異なるものとなる。したがって、橋梁軸方向に空気力特性は場所により異なることになる。桁断面形状が同一の場合でも振動状況によっては、桁の作用空気力が3次元的に変化するとしてストリップ理論の適用の可否についての議論もある〔3〕。しかし、この影響は少ないとすれば、橋梁軸方向にそれぞれの場所の断面形状により定められる空気力を積分することにより一般化空気力が求められて、はじめて橋梁全体系の応答が判明することになる。これには構造軸に沿った複数の位置での断面での模型を空気力測定のために用意する必要があり、一般には煩雑である。簡易的には、空気力をほぼ桁高に関し一次式で変化し、桁高が支点間で正弦半波のように変化すると近似的にスパン1/3点の断面形状で全体の空気力を代表でき、風洞試験でえられた応答振幅を模型縮尺で拡大したものが実橋梁の応答になることがしれる。本研究では表-1のように桁高の変化に応じ複数の模型を用い空気力変化をも調べることにした。

2) 発生する空力振動の予測と制振対策

矩形を基本形状とする一箱桁で比較的背の高いものの場合、渦励振とギャロッピングが有意な風速で発生

		実橋値	模型値
桁高		4断面で4.5m, 5.5m, 6.5m, 7.5m	縮尺1／80
桁幅		18.2m	縮尺1／80
重量		18.9t／m	所要値に対し＋2％以内
極慣性モーメント		545t m ² ／m	所要値に対し－0.8％
振動数	たわみ	0.46Hz	2.98～2.99Hz
	ねじれ	0.996Hz	6.51～6.53Hz
振動数比		2.17	2.17～2.19
構造対数	たわみ	0.02	0.02～0.021
	ねじれ	0.02	0.02～0.024

表－1 実橋及び模型諸元



図－1 高架橋全体図

することが知られている〔１〕〔２〕〔４〕〔５〕。また、空気力の形成について桁周りの状況を見ると渦励振発生に関わる空気力は床版上で形成され、ギャロッピングについては下面で空気力形成がされているとされており〔４〕〔５〕、実績のある安定化対策も床版上の流れを制御することを目的とした床版耳桁付近のフラップあるいはダブルフラップは渦励振制振用、下面に沿った流れを整流する事を目的としたボトムフランジ両端のスカートや整流プレートはギャロッピング対策用と役割が分化している〔１〕〔２〕。したがって、本箱桁の場合もこれらの空力対策の準じた空力対策を施せば良いことになるが、遮音壁のついた場合の耐風安定化対策の効果については不明の部分が多い。

３． 風洞試験

本橋は曲線橋であるために片勾配がついており、耳桁の海面からの高さはカーブの外側で高くなっている。カーブのついている外側から風が当たる場合と内側から風が当たる場合とでは応答が異なることが予測された。以下便宜的にカーブの外側から風が当たる場合に陸風、内側の場合を海風と称することにする。なお、風洞試験に使用した気流は一樣流のみである。図－２に本研究で検討した耐風安定化対策案を示す。

図－４以下に風洞試験結果を $1/200$ 弦長の応答で定義したギャロッピングの限界風速と渦励振最大振幅で示す。

１）原断面の耐風性状（図－３）

海風の場合では吹き上げの迎角がついた場合にギャロッピングの発生がみられる。桁高が高いほど限界風速は低風速側になる傾向がある。両側に遮音壁がある場合にはギャロッピング限界風速はさらに低下する。陸風の場合も海風の場合と同様であるが、ギャロッピングの限界風速はさらに低く、かつ渦励振の最大振幅も大きい。風向及び迎角の検討により、よりきびしい耐風性状をもたらすのは陸風かつ吹き上げの場合であることが判明した。以下、この場合を中心に種々の対策の効果を検討することとする。

２）ギャロッピング空力対策の効果

図－２に示した耐風対策①～⑥の効果を示したものが図－４である。この結果、制振効果があったのは対策①～④であった。しかし、遮音壁をとりつけた場合には対策①および②は効果が小さく最適化が必要である一方で、③の下部スカートは有効に作用した。下部スカート長については最適化を行ったが、ギャロッピングの制振には有効でも渦励振については、おおきく残る場合が多かった。一方、遮音壁をとりつけた場合では一部ギャロッピングの限界風速を下げる効果を持つが、渦励振の最大振幅についても少なからぬ影響がある。

３）渦励振空力対策の効果

本橋は遮音壁の付加を想定しているために、高欄上端付近の設置を想定し最適化されたダブルフラップは他の長大連続桁橋で実績があるとはいうものの、本橋にこの方法をとるとすれば遮音壁との組み合わせで別途の空力対策として最適化を行う必要がある。これを考慮し、遮音壁形状を工夫したものが図－５である。本橋のような桁断面形状の場合に発生する渦励振はいわゆる前縁剥離型の渦励振であり、前縁からの剥離流を効果に制御することにより有効な効果が得られると考えられた。図－６に風洞試験結果を示すが、下部スカートをとりつけないケースに限ると図－６の実験番号１の３ｍ高さの遮音壁のついた原型に対し、ほとんど効果がみられない。図－６後半に迎角－３度の下部スカート付きの原型とＡ～Ｆの応答を示すが、この場合では下部スカートをとりつけたことにより下部スカートのない基本形（図－１）に比べギャロッピングの改善はみられるが渦励振についてはむしろ悪化している。これらの対策を組み合わせた場合では、より最適

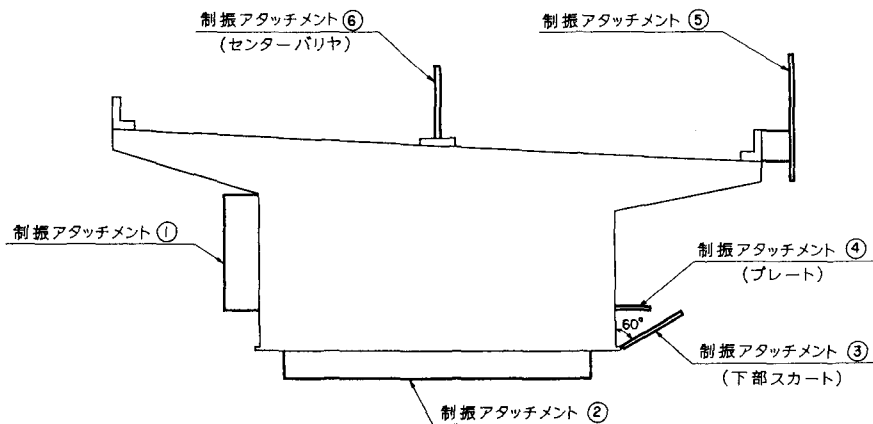


図-2 耐風安定化対策

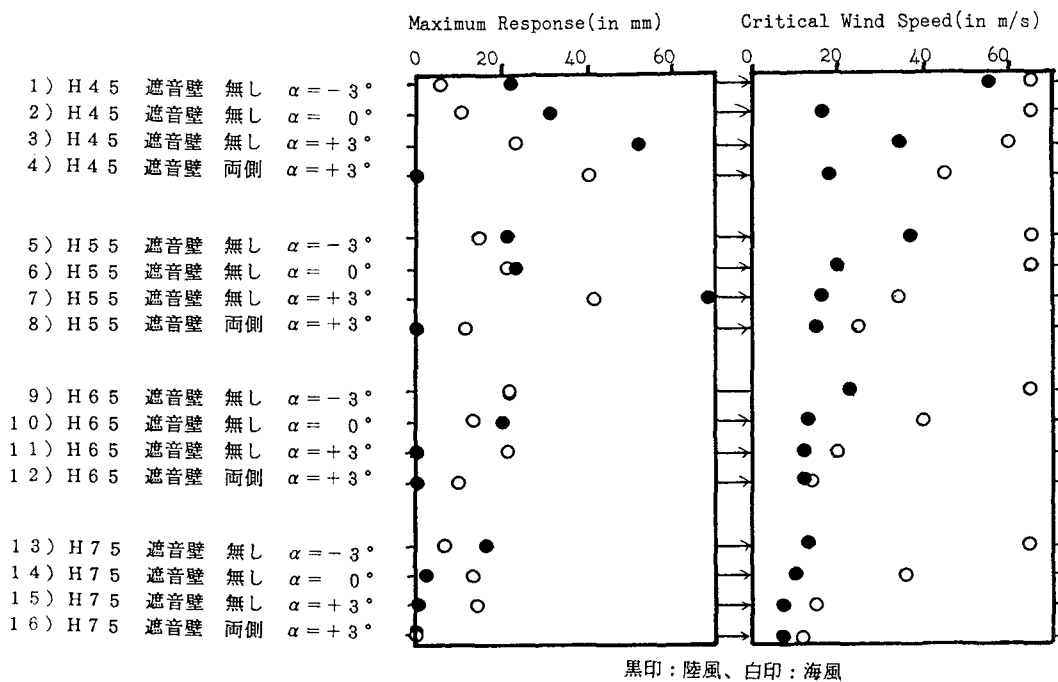
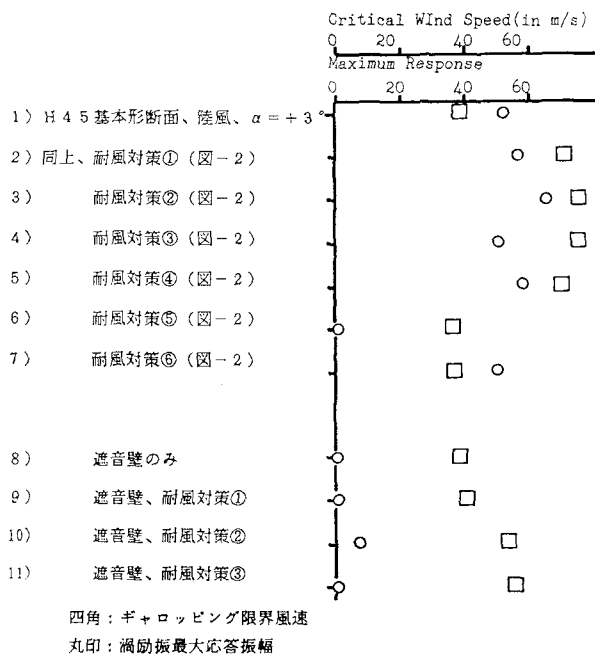
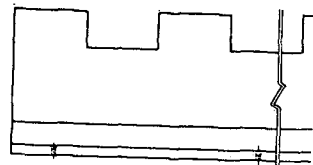


図-3 原断面の耐風性状-渦励振最大振幅とギャロッピング限界風速



Aタイプ



Bタイプ

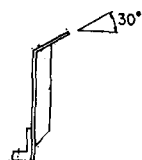
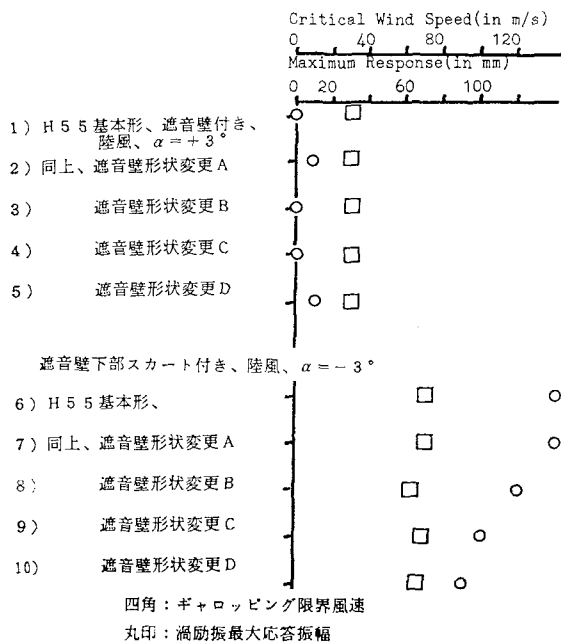
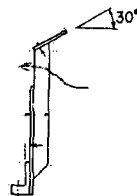


図-4 空力対策の効果

ギャロッピング限界風速 (m/s) と渦励振最大応答振幅 (mm)



Cタイプ



Dタイプ

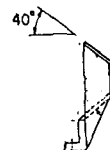


図-5 遮音壁の形状変更対策

図-6 渦励振対策の効果—ギャロッピング限界風速 (m/s) と渦励振最大応答振幅 (mm)

化が必要であるようでいずれの場合でも好ましい効果は得られなかった。

4) 対策の方針

既往の研究報告例にあるように本橋のような桁断面をとる場合、ギャロッピング発生に有意な空気力はボトムフランジ下側で形成され、渦励振に対し有意な空気力は桁上面で形成されていることを裏付けるような、各耐風対策と振動応答変化の関係であった。ただし、各耐風対策案の有効性は組み合わせと迎角によって異なり、まとめると次のようになる。

- ①ギャロッピングについては設定した迎角を問わず下部スカートが非常に有効に作用し安定化する。一方で、下部スカートは渦励振については安定化の効果は少なく、場合によっては不安定化する事もある。
- ②風に吹き上げの傾斜角がある場合、遮音壁がとりつけられた場合には渦励振に対し安定化する効果がある。ただし、風に吹きおろしの傾斜角がある場合には渦励振は安定化はしない。一方、ギャロッピングの発現風速は遮音壁の設置により若干低下する。
- ③遮音壁を設置した場合で遮音壁自体の形状の変更やフラップを遮音壁上端に付与したものは渦励振制振に効果はあるが、本橋の場合では十分な制振効果を期待するには至らなかった。ただし、遮音壁が設置された場合の渦励振に対する空力安定化対策としては、桁上方で発生する非定常な渦発達を妨げることを目的とした遮音壁上端の工夫や図-2の安定化対策案⑤のような遮音壁内側に風抜きをもうける方法は、対策案最適化の有力な候補になる。

以上のような特性により、遮音壁をとりつけた場合ギャロッピングと渦励振を同時に制振する事は容易ではない。具体的には、ギャロッピングに対し空力的な制振対策を施し十分に安定化する一方で、渦励振についてはある程度制振する比較的弱い空力対策を施し、その空力制振効果が不十分であれば、あるいは架設後有害な振動が観測されれば別途の制振方法を設定するという手順が現実的な選択となる。

4. 結論

ある一箱桁橋について風洞試験を実施し、種々の空力対策についてその効果を確認した。その結果次のようなことが明らかになった。

- 1) ボトムフランジ付近に設置して桁下部の流れを整流する目的で付与する空力対策はギャロッピングに有効で、中でも下部スカートは有効に作用する。ただし、下部スカートの設置は渦励振を助長する方向に働く場合があり、その効果にも配慮する必要がある。
- 2) 床版上の流れの制御が渦励振対策に重要であるが、遮音壁を付与した場合には渦励振応答振幅は増加する。また、このときわずかの遮音壁形状の変更程度では渦励振の制振はむずかしい。
- 3) 基本的には下部スカートはギャロッピング特性を大きく改善するが、遮音壁をとりつけた場合には渦励振が大きく発達する場合もある。流れ場としての相互の影響が少なからずあるようで、詳細な検討が今後必要である。

連続桁橋の場合住居地域のごく近接して架設される例も今後少なくないと想像される。その際、遮音壁の設置は必須の事項となろうが、遮音壁を設置した場合に空力付加装置のみで空力振動をすべて安定化する事は容易ではない。風洞試験を積み重ね制振対策を模索するか、構造設計当初の段階から空力的な特性の改善を考慮するかは、連続桁橋が長大化する傾向にあって事前に検討すべき重要なこととなろう。なお、本橋は部分模型風洞試験による本研究の成果を受けて、空力的制振対策および構造的制振対策の検討のため全橋模型試験が実施された。

参考文献

- 1) 宮下、大橋、樋上、藤沢、宇野「門崎高架橋の耐風安定性」橋梁と基礎、vol. 18、No. 2、1984. 2.
- 2) 斎藤、本田「長大箱桁橋の耐風性及び制振対策法について」構造工学論文集、vol. 36A、pp. 889-894、1990. 3.
- 3) 長尾、宇都宮、高島、寺岡「渦励振における部分模型による風洞試験法に関する考察」土木学会第42回年次学術講演会概要集I-306／pp646-647、1987. 9.
- 4) 宮崎、古高、伊藤「耐風性を考慮した長大箱桁橋梁の桁形状選定に関する研究」第8回風工学シンポジウム論文集、pp305-312、1984. 12.
- 5) 宮田、山田、風間、藤沢「非定常圧力特性からみた箱桁橋の渦励振対策の安定化効果」第8回風工学シンポジウム論文集、pp319-326、1984. 12.

(1990年10月12日受付)