

長大箱桁橋の耐風性及び制振対策法について

ON AERODYNAMIC STABILITY OF LONG-SPAN BOX GIRDER BRIDGE AND ANTI-VIBRATION DESIGN CONSIDERATION

斎藤 通* 本田明弘**

By Toru SAITO and Akihiro HONDA

The increasingly larger long-span box girder bridges of recent years, measuring as long as 150m or even 250m at the maximum in span length, feature very deep girders stocky in cross sectional profile. It is caused that their girders, must be designed rigid enough for support the entire dead load unlike the case with the suspension or cable-stayed bridge. It results in decreasing aerodynamic stability which is even worse as compared with the suspension or cable stayed counterparts. The authours reviewed systematically the past anti-vibration problems generally associated with the longspan box girder bridges, and addressed some specifics to consider for successfull engineering design these bridges.

1. まえがき

近年、構造物の大型化に伴い、箱桁橋も長大化の一途をたどり最近では150mを越すものが次々出現し、最大では250mにおよぶものが、計画または建設されている。これらの長大箱桁橋は、吊橋や斜張橋などのケーブルで吊られた橋梁と異なり、全荷重を桁のみで支持するため、剛性を確保するには、必然的に桁高さが大きくなり、結果として桁断面がずんぐりした形状になる。そのため、箱桁橋の桁断面の空力特性は、吊橋や斜張橋の桁断面の空力特性より悪くなり、断面の改良や制振対策を行うのにかえって扱いにくいものとなっている。以上に示すように、箱桁橋についても、吊橋や斜張橋と同様、耐風性について十分検討することが必要になってきた。また、箱桁橋の場合、桁断面がずんぐりした形状をしているため、桁断面の空力特性を改善するには、添架物が大きかりになるので、試設計段階から耐風性に配慮することが肝要である。

本論文では、これら長大箱桁橋の一般的な耐風性及びその制振対策法について、過去に行われた風洞試験結果を系統的にまとめるとともに、長大箱桁橋及びその制振対策を設計する上で、注意を払うべき問題点について若干の考察を加える。

2. 長大箱桁橋の耐風性

2. 1 桁の空力特性に与える桁断面比の影響

* 三菱重工業(株) 長崎研究所 流体・伝熱研究室 主務(〒850-91 長崎市飽の浦町1番1号)

** 三菱重工業(株) 長崎研究所 流体・伝熱研究室 (〒850-91 長崎市飽の浦町1番1号)

図1及び図2には、それぞれ1箱桁橋及び2箱桁橋について、現在までに建設された（一部計画または建設中のものを含む）箱桁橋の最大径間長と最大径間中央桁断面の断面比との関係を示す。⁽¹⁾ また図中右方には、過去に行われた幾種かの断面比の桁の風洞試験結果をあわせて示す。

図1及び図2より、近年の支間長の増大により、全般的に桁断面比（ B/D ）が小さくなり、ずんぐりした断面形状の箱桁橋が多くなってきたことが分かる。1箱桁橋と2箱桁橋を比べると一般的に幅員の広い2箱桁橋の方が断面比（ B/D ）が大きい（偏平である）が、150mの径間長を越す長大箱桁橋では、特に1箱桁において断面比が4.0以下のずんぐりした形状のものが多くなる傾向にある。詳細にはブラケットの張り出し長等により応答特性は変わると考えられるが、全般的にはこの断面比が4.0なる値が、図1及び図2の右方に示す応答曲線及び静的揚力曲線より分かるように、断面の空力特性が大きく変化する境界値と考えられる。

即ち、一般に箱桁断面の場合、低風速でたわみの限定振動（渦励振振動）が発生し、それより高い風速で発散的な振動（ギャロッピング振動）が発生すると言われているが、この発散的な振動（ギャロッピング振動）が発生するか否かの境界値に相当

すると考えられる。図1、図2中に示す静的揚力曲線の勾配も、断面比4.0前後を境に、正勾配から負勾配に変わっていることから裏付けられる。上記箱桁橋に発生する空力振動のうち、渦励振振動は、発生しても限定的である上、図3に示すように、構造減衰が大きくなると振動振幅が小さくなるので、対処の仕方が比較的容易であり、致命的な問題にはならない。しかしながら、ギャロッピング振動は、発生すると発散的である上、図3に示すように構造減衰を増大させても、発振風速はほとんど変わらないので、空力的な改善対策を事前に講じておくことが不可欠である。なお、上述のギャロッピング振動の発振風速は、スクルートン数が小さく、風速の増大にともない、渦励振からギャロッピングへと連続して移行するタイプの応答特性を示す矩形断面のギャロッピング発振風速と同様、完全剥離型渦励振の開始風速（ストローハル数の逆数）にほぼ一致する⁽²⁾（図4参照）。文献（2）に示された矩形断面の完全剥離型渦励振の開始風速の推定式を参考に、箱桁橋のギャロッピング発振風速推定式を求めると下式の通りとなる。

$$\frac{V}{fD} = 0.845 \times \exp(B/D) + 3.255 \dots (1)$$

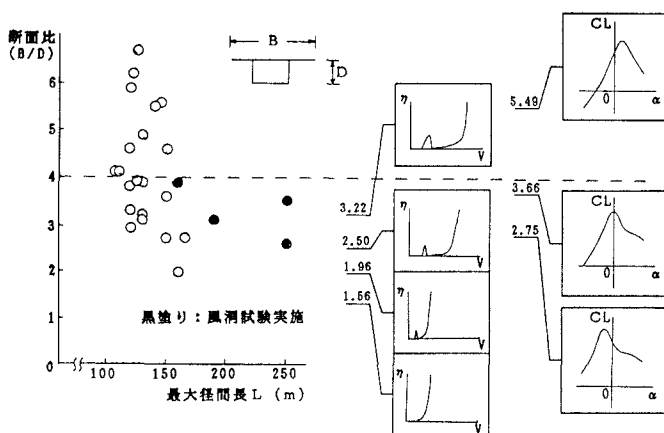


図 1. 径間中央断面形状と空力特性（1箱桁橋）

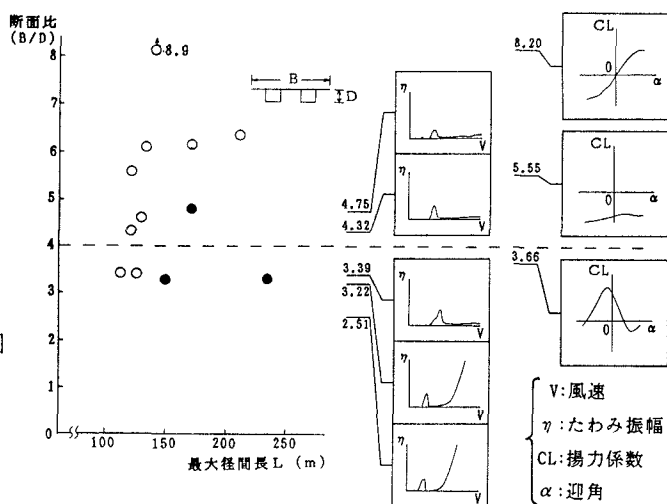


図 2. 径間中央断面形状と空力特性（2箱桁橋）

図4にも示すように、式(1)より断面比(B/D)が4.0の時のギャロッピング発振風速を求めると、無次元風速で約50と実際には起こり得ない高風速となり、本結果からも、断面比4.0が、ギャロッピング振動が起こり得るか否かの境界値になることが裏付けられる。なお、ねじれ振動については、箱桁橋の場合、一般にねじれ振動数が高く耐風性上問題とならないことが多い。

2. 2 1箱桁と2箱桁橋の空力特性の違い

2. 1に示す応答特性（水平風を対象）は、おおむね1箱桁橋でも2箱桁橋でも同様の傾向にある。ここでは、1箱桁橋と2箱桁橋の違いの一つとして、迎角特性について述べる。図5には、1箱桁と2箱桁断面の揚力傾斜の断面比に対する変化特性を示す。図5より分かるように、2箱桁の場合、迎角が0度の場合と3度の場合で、揚力傾斜の断面比に対する変化特性はほとんど変わらないが、1箱桁の場合は異なる。即ち、1箱桁橋の場合、迎角が0度の時（水平風が作用する時）には、断面比(B/D)が4.0以上でギャロッピング振動は発生しないが、迎角が3度の時（吹き上げの風が作用する時）には、断面比(B/D)が6.0以下のほとんどの場合でギャロッピング振動が発生すると考えられる。従って、2箱桁橋の場合、断面比(B/D)を大きくする（偏平にする）ことで耐風性を確保することが可能であるが、1箱桁の場合少々断面比(B/D)を大きくしても、吹き上げの風が作用したときの耐風性を確保することが難しい。2箱桁橋の方が1箱桁橋より耐風性が良いと言う印象を与える

るのは、上記の特性に加えて、図1、図2を比較して分かるように、一般に2箱桁橋の方が偏平な断面が多いことによるものと思われる。しかしながら、断面比が4.0以下のずんぐりした断面では、図5より分かるように、1箱桁でも2箱桁でも耐風性の優劣はほとんど無いと考えられる。

2. 3 三次元効果（橋軸方向の桁高さの変化の影響）

一般に箱桁橋は、橋軸方向に桁高が変化し、径間中央部では偏平な桁断面であっても支点上では桁高が高くなり、ずんぐりした断面であることが多い。

このように橋軸方向に断面が変化する橋梁全体の耐風性を推定する方法として、Strip理論がある。表1は部分模型試験結果（図6参照）から、Strip理論を用いて推定した全径間模型の応答特性と、全径間模型試験

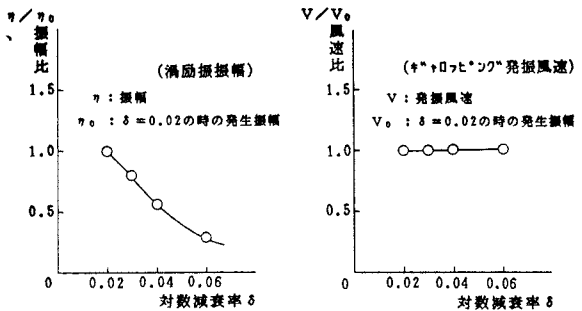


図 3. 箱桁橋の減衰特性

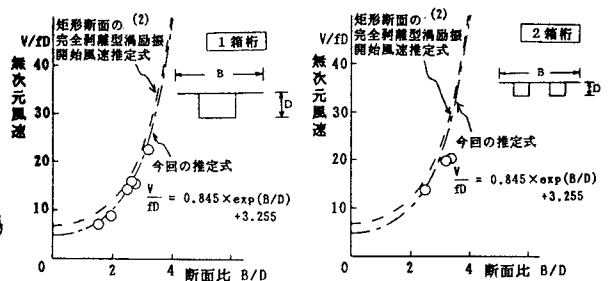


図 4. ギャロッピング発振風速と断面比の関係

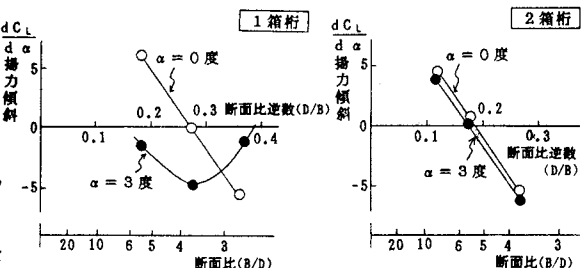


図 5. 箱桁橋の迎角特性

結果（図6参照）を比較したものである。図6及び表1より分かるように、橋全体の応答特性は、各断面の空力特性をStrip理論を用いて積分した結果の応答特性ではなく、むしろ中央径間のL/6点断面の応答特性に近いものとなっている。これは桁高さが橋軸方向に変化していることによる3次元効果（橋軸方向の流れの発生）に起因していると考えられる。従って橋軸方向に桁高が変化する箱桁橋の場合、径間中央断面が安定でも、支点より少し径間中央寄りの断面が不安定な場合には、十分注意を払う必要があると考えられる。

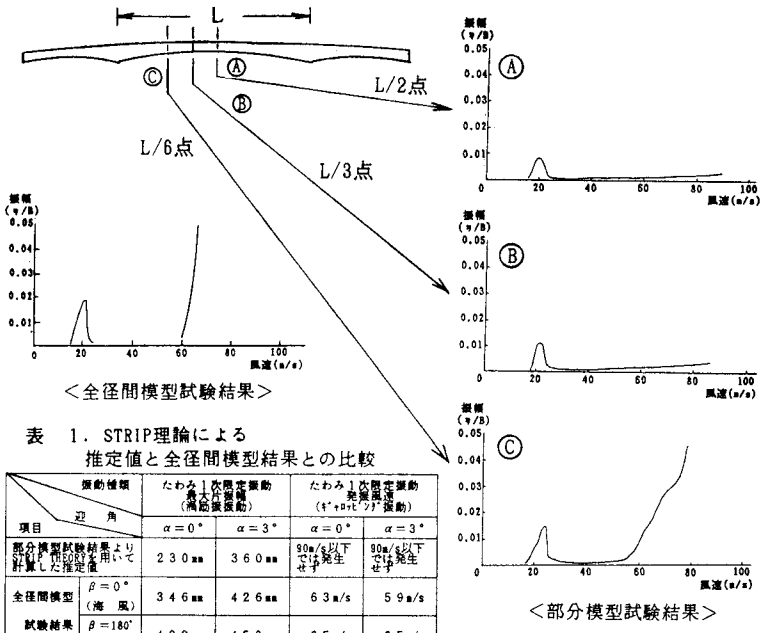


図 6. 三次元効果

2. 4 乱れ効果

図7には、過去に行われた風洞試験結果をもとに、乱れによる渦励振振幅の低減効果をグラフにして示す。図中実線は、プロットされた実験結果をもとに推定して引かれた乱れのスケール及び乱れ度と渦励振振幅の低減効果の関係を示したものである。図7より分かるように、全般的に乱れのスケールが大きいかつ乱れの強さが小さい程、試験結果は一樣流中の試験結果に近くなり、また乱れのスケールが小さく乱れの強さが大きい程渦励振振幅は発生しにくくなる傾向にあり、乱れのスケールが桁幅の10%以下では渦励振は、ほとんど発生しなくなる。従って、架設高さの低い橋梁（乱れスケールが小さい）や内陸部の橋梁（乱れ強さが大きい）では、渦励振振幅は発生しにくくなる。逆に、海上（乱れ強さが小さい）や架設高さの高い橋梁（乱れのスケールが大きい）では、一樣流中の試験結果と同程度の振幅の渦励振振幅が発生すると考えられる。

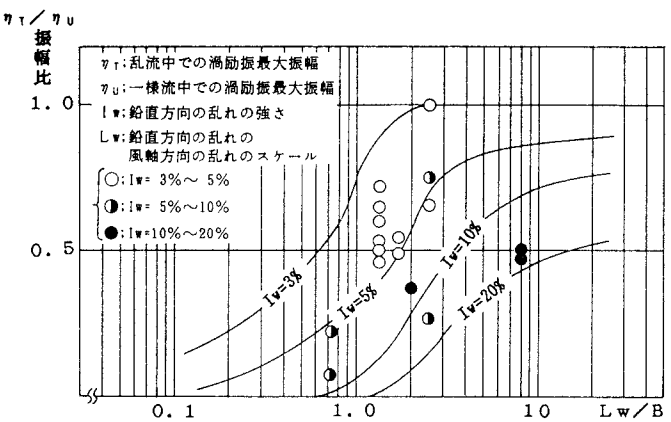


図 7. 乱れによる渦励振振幅低減効果

にくくなる傾向にあり、乱れのスケールが桁幅の10%以下では渦励振は、ほとんど発生しなくなる。従って、架設高さの低い橋梁（乱れスケールが小さい）や内陸部の橋梁（乱れ強さが大きい）では、渦励振振幅は発生しにくくなる。逆に、海上（乱れ強さが小さい）や架設高さの高い橋梁（乱れのスケールが大きい）では、一樣流中の試験結果と同程度の振幅の渦励振振幅が発生すると考えられる。

3. 箱桁橋のギャロッピング制振対策法（プレート）

3. 1 制振効果

2. 1項にて述べたように、箱桁橋に発生するギャロッピング振動は、構造的に減衰を増大しても、応答特性はほとんど改善できないと考えられる。従って、ここでは空力的に応答特性を改善する有効な対策として、プレート（桁下端の少し上部の両側に板を張り出す方法）について述べる。プレートを取り付けることによる応答特性の変化（制振効果）の例を図8に示す。図8より分かるように、プレートを取り付けると、発散的なギャロッピング振動は、1箱桁、2箱桁を問わず、完全に制振することが可能である。しかしながら低風速で発生する渦励振振動に対しては、ほとんど効果が無いが、逆に若干振幅が増す傾向にある。本対策は、最近架設された、または計画建設中の多くの箱桁橋に取り付け、または取り付けが検討されている非常に有効な制振対策である。

3. 2 制振メカニズム

上記の制振効果を調べるために、プレートを取り付けた時と取り付けない時の桁断面に作用する静的3分力特性を求めたものが図9である。図9より分かるように、プレートを取り付けることにより、桁断面に作用する揚力の迎角に対する変化特性が迎角が0度付近で負勾配から正勾配に変化している。これは図8に示す動的な応答特性の変化（プレートを取り付けるとギャロッピング振動が発生しなくなる）と、良く対応する。また後流側プレートに風荷重がほとんど作用しておらず、前流側プレートに大きな風荷重が作用し、

その変化特性は桁全体の3分力特性変化と良く対応していることを考慮すると、前述の揚力傾斜の変化（制振効果）は、おもに前流側プレートによるものと考えられる。上記の効果は、図10に示す桁断面回りの流れのパターンからもわかるように、プレートを取り付けることにより、プレート先端から発生した剥離流が桁下角部と干渉し、桁下角部から発生する剥離流を弱め、桁上下面の流れを内側に引き寄せ、桁上下面へ

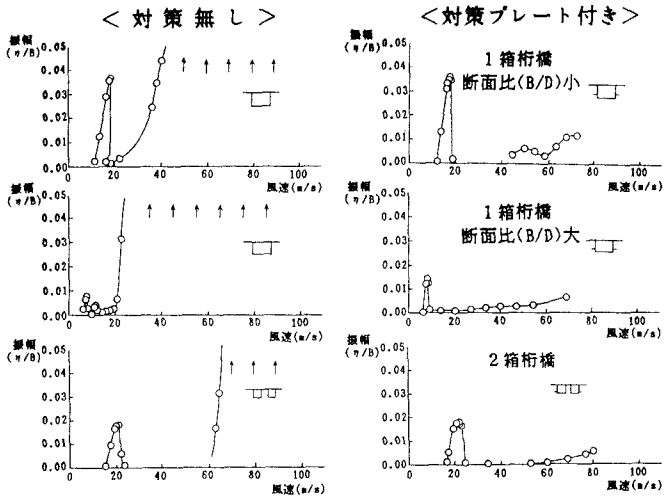


図 8. プレートのギャロッピング振動に対する制振効果

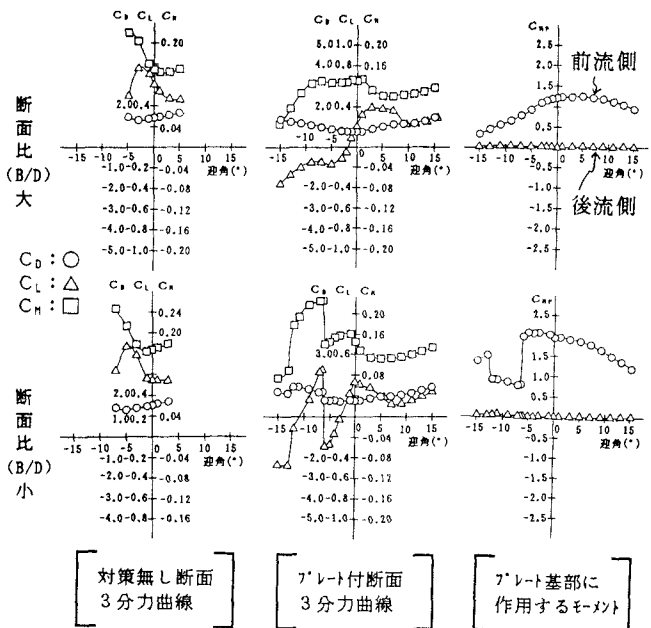


図 9. 三分力特性におけるプレートの効果

の流れの再付着を促したためと考えられる。従って、プレートを取り付けると揚力傾斜特性が改善されるだけでなく、桁背後のウェイクの幅がせばめられ結果として図9に示すように、抗力係数が半減する（約1.5から約0.8に低減される）こととなる。以上に示すように、プレートは動的な応答特性を改善するのみでなく、静的な空力特性を改善する非常に有効な空力対策と考えられる。

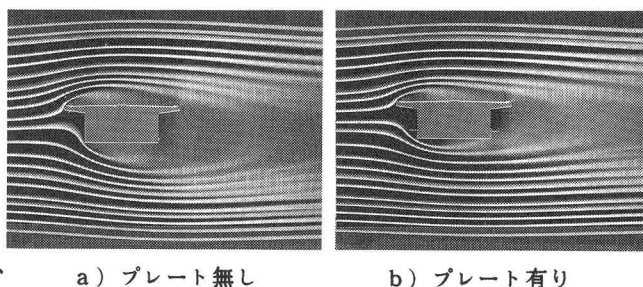


図 10. 断面周りの流れパターン（プレートの効果）

4. 箱桁橋の渦励振制振対策法（ダフ・ルフラップ、フラップ、スカート）

前述のように渦励振は、実橋の構造減衰や架橋地点の乱れ特性によっては発生しない可能性もある。また発生してもダンパー等構造的な対策を取り付けることにより制振が可能である。しかしながら、架橋地点が非常に様な風が吹くところで、また構造的にダンパー等の付加重量を取り付けることが困難な場合には、図11に示すような添架物を取り付け空力的に制振する方法がある。これらは、いずれも橋面上に加速流をあて、渦を流しさるとともに、対策材自ら発生する渦により橋面上を乱し、断面から乱流が剥がれにくくし、渦励振力を弱める効果があると考えられる。

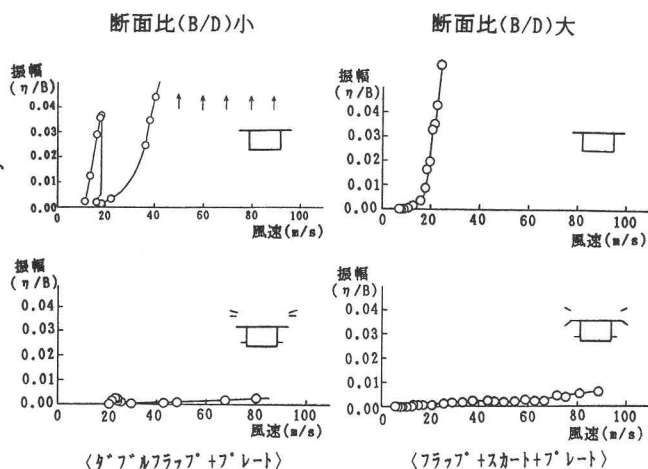


図 11. 渦励振対策例

5. あとがき

以上に示すように、本論文では箱桁橋の空力応答特性の概要（1箱桁橋と2箱桁橋の違い、桁高さの変化の影響、乱れの影響等）を明らかにした。しかしながら、ここで述べたのは桁断面の空力特性からみた箱桁橋の耐風性のみであり、さらに構造特性、架設地点の風環境を考慮した総合的な耐風性の評価を行うことが必要と考えられる。今後はこれらの箱桁橋の耐風性を支配する他の要因を明らかにすることにより、桁断面の空力特性からだけでは振動しても良いはずの箱桁橋が、何のトラブルもなく現存している事実の説明が可能となるとともに、箱桁橋について、過不足の無い合理的かつ安全な耐風設計も可能になるものと思われる。なお、本論文作成に当り、御指導御助言いただきました京都大学工学部松本助教に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、本州四国連絡橋公団、(財)海洋架橋調査会、世界の長大橋〈第三版〉、平成元年4月
- 2) 白石成人、松本勝、充復断面の渦励振限界風速と応答特性について、1981年10月

(1989年10月2日受付)