# 斜張橋用2主鋼箱桁の床版位置が耐風性能に及ぼす影響

Influence of Position of Deck on Aerodynamic Instability of Steel Two-box Girder for Cable-stayed Bridge

野田 辰德\*, 久保 喜延\*\*, 木村 吉郎\*\*\*, 加藤 九州男\*\*\*\* Tatsunori NODA, Yoshinobu KUBO, Kichiro KIMURA, Kusuo KATO

\*九州工業大学 大学院 工学研究科建設社会工学専攻(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1番1号) \*\*九州工業大学 教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1番1号) \*\*\*九州工業大学 助教授 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1番1号) \*\*\*\*九州工業大学 助手 工学部建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1番1号)

In recent years, innovation of the bridge technology in Japan is remarkable. Especially, the number of bridge construction of the cable-stayed bridge is increasing every year from short span bridge less than 100m to long span bridge longer than 800m, because the cable-stayed bridge has both structural and aesthetic advantages. However, since the cable-stayed bridge has lower stiffness, the vibration problem easily occurs in the wind that induces vortex-excited vibration, galloping and flutter. Until now, in the girder cross section with open deck section and two-box girder, experimental investigations have been carried out about the influence of shape of fairing and shape of box girder on aerodynamic instability. But there are few examples of investigation about influence of cavity under deck of two-box girder bridge on aerodynamic instability.

Key Words: Aerodynamic vibration, Cavity, Cable-stayed bridge, Steel two-box girder キーワード:空力弾性振動,キャビティ,斜張橋, 2 主鋼箱桁

1.はじめに

近年,我が国の橋梁技術の進歩は著しく,中でも斜張 橋はその構造特性における有利性および景観の優美性を 併せ持つことから,支間長が100m以下の中小橋梁から 中央支間長が800mを超える長大橋梁まで,年々その架 橋数は増加している.しかしながら,斜張橋は吊橋に次 いで剛性の低い構造物であり、渦励振,ギャロッピング, フラッター等の風による振動現象が問題となる.<sup>1),2)</sup>

この空力弾性振動の制振手法のひとつに,著者の一人 である久保が長年開発してきている剥離干渉法がある. この方法は,構造物の1次剥離点から発生する剥離流を 1次剥離点背後に設けた2次剥離点で干渉させることで



流れを滑らかにし,非流線型の物体を流れから見た場合 に流線型となる状況を作り出し,振動の原因となる剥離 渦の生成を抑制するというもので,これまで多くの橋梁 において耐風性の向上が確認されている.これまでの研 究<sup>3)</sup>では,図-1に示すPC斜張橋開断面桁において,剥離 干渉法を用いてフェアリング形状を変化させることによ って,設計された構造形式をほとんど変化することなく, 斜線で示した小規模なフェアリングで耐風性を確保する ことができたという実例もある.

また,著者らはこれまでに,図-2に示す斜張橋用2主 鋼箱桁断面において,剥離干渉法の概念に基づき箱桁下 部に1次,2次,3次剥離点を設け,それぞれの剥離点か らの剥離流の干渉効果によって,耐風性を確保すること



を検討してきた<sup>4)</sup>.この手法を多段剥離干渉法と命名している.

図-1,2のような開断面桁や2 主鋼箱桁を有する桁断 面には主桁と床版により形成される空間が存在する.本 研究では,この空間をキャビティ(cavity)と呼ぶ.著者ら がこれまでに行ってきた研究<sup>3),4)</sup>のように,開断面桁や2 主鋼箱桁を有する桁断面において,フェアリングの形状 や箱桁形状が耐風性能に与える影響については検討され てきたが,キャビティ深さが耐風性能に与える影響につ いての検討例は少ない.そこで,本研究では,2 主鋼箱 桁の耐風特性におけるキャビティの影響について検討を 行った.

# 2. 応答実験

### 2.1 実験概要

実験には,九州工業大学建設社会工学科所属の回流式 空力弾性試験用風洞(測定断面:1780mm×910mm)を使用 した.

実験用模型として, 文献 4)で使用された実験用模型を 参考にして, 縮尺率 1/40 の2次元剛体模型を製作した. 図-3 にその模型断面の概略図を 表-1 に応答実験用模型



図-3 模型断面概略図

0660 .3500
.3500
2750
3.44
2.86
0.005
.3959
2.30
0.004

表-1 模型諸元

代表桁高さ:D=0.0660m



の諸元を示す、模型の橋軸方向の長さは860mmとした. また,流れの2次元性を確保するために模型の両端部に 端版を設置した.本実験では実験ケース毎の変更作業の 簡便性を考慮して,図-4に示す斜線部を脱着可能なもの とし,床版の位置Hや箱桁形状を変化させて,風洞実験 を行った.ここで,箱桁部分の脱着部材は非常に軽い材 料で製作しているため,模型諸元にケースの違いによる 影響はない.

文献 5)より,扁平 H 型断面柱における空力弾性振動としては,上下方向に振動するたわみ振動と回転振動としてのねじれ振動が現れる(図-5,6).低風速域では,限定振動であるたわみモードおよびねじれモードの渦励振が発生し,高風速域では,自励振動であるねじれフラッターのみが発生し,ギャロッピングは発生しない.このことより,本研究では図-7,8 に示すように,コイルバネを介し,模型を鉛直たわみ1自由度で支持したたわみ1



(レーザー変位計)

端版



自由度応答実験,および十字バネを介し,模型をねじれ 1自由度で支持したねじれ1自由度応答実験を一様流中 において行った.

実験ケースは,図-9に示すように,箱桁形状に多段剥 離干渉法を適用したもの(W=37.5mm)をCASE1,矩形 (W=12.5mm)のものをCASE2,矩形(W=37.5mm)のものを CASE3 とし,それぞれについて,図-10に示すように, キャビティ深さ比H/B'が0.096,0.121,0.145,0.193 の場 合の4パターンについて行った.ここで,床版が桁高の 中央に位置する場合,つまり上下対象となる断面の場合 のH/B'は0.096 であり,H/B'が大きくなるに従い断面上 部のキャビティは小さくなる.尚,CASE1の寸法につい ては,文献4)より,多段剥離干渉法の効果が最も高かっ た $p_d/D'=p_u/D'=0.36$ ,  $d_{11}=u_{1}=34^\circ$ ,  $d_{22}=u_{2}=26^\circ$ とした. また,キャビティ深さ比H/B'については,B'を275.0mm に固定しHを変化させ,風向はG1側を対象とし,迎角に ついては0°とした.

## 2.2 たわみ1自由度応答実験結果

本節では,箱桁形状が CASE1, CASE2, CASE3 のそ れぞれの場合において,キャビティ深さ比H/B'を0.096, 0.121,0.145,0.193 と変化させたときのたわみ1自由度 応答実験の実験結果について示す.



### (1) CASE1

CASE1について、キャビティ深さ比H/B'を0.096 0.121, 0.145, 0.193 と変化させたときのたわみ1自由度応答実 験結果を図-11 に応答図,図-12 に空力減衰率図として示 す.図-11の応答図においては,横軸に風洞風速を振動 数と代表桁高さで無次元化した換算風速 Vr=V/fD (V:風 洞風速,f:無風時の固有振動数,D:代表桁高さ)を,縦 軸に無次元倍振幅 2A/D(A:片振幅,D:代表桁高さ)を 示す.図-12の空力減衰率図においては,横軸に無次元 倍振幅 2A/D を,縦軸に渦励振時の最大振幅に対応する 風速での空力減衰率 aを示す.ここで,空力減衰率 a とは,振動が生じた風速域で模型を強制的に所定の振幅 になるまで加振して自由減衰させた場合の対数減衰率 や、模型の振動を強制的に静止させてから発散させた場 合の対数減衰率 を振幅ごとに計算した値から,模型の 構造対数減衰率 s を差し引いたものである.つまり, 空力減衰率 a は , a= - s より求めたものである . この測定法により,空力減衰率の値が不連続になる場合 がある.

図-11 より,全てのケースにおいて Vr=4 付近より渦励 振が発現し, Vr=5 付近で最大となっている.また,風速 が上昇すると Vr=8 付近より再び渦励振が発現し, Vr=10



図-14 Vr=10 付近での渦励振時最大振幅(CASE1)

付近で再び極大値となり,Vr=5付近の低風速域での渦励 振時の振幅よりも振幅は小さくなってはいるが,応答と しては無視できない.

ここで,Vr=5 付近での渦励振時の最大振幅を比較した ものを図-13 に示す.図-13 は横軸にキャビティ深さ比 H/B'を,縦軸には無次元倍振幅 2A/D を示す.これより, Vr=5 付近での渦励振時の最大振幅にはさほど大きな差 はない.また,Vr=5 付近での渦励振時の最大振幅に対応 する風速での空力減衰率を示した図-12 をみても,各キ ャビティ深さ比 H/B'の空力減衰率にさほど大きな差異 は見られない.尚,この場合の渦励振は,構造対数減衰 率が 0.02 程度あれば発生しないと考えられる.

また, Vr=10 付近での渦励振時の最大振幅を比較した ものを図-14 に示す.これより, Vr=10 付近での渦励振 時の最大振幅にもさほど大きな差はなく, Vr=10 付近で の渦励振時の最大振幅に対応する風速での空力減衰率は, Vr=5 付近のものより負の空力減衰率が小さいものとな っていた.

以上のことから,箱桁形状に多段剥離干渉法を適用させた CASE1(W=37.5mm)については,キャビティ深さが耐風性能に与える影響は小さいといえる.



# (2) CASE2

CASE2 について,キャビティ深さ比H/B'を0.096 0.121, 0.145,0.193 と変化させたときのたわみ1自由度応答実 験結果を図-15 に応答図 図-16 に空力減衰率図として示 す.(1)の場合と同様に,図-15 の応答図においては,横 軸に換算風速 Vr=V/fD を,縦軸には無次元倍振幅 2A/D を示す.図-16 の空力減衰率図においては,横軸に無次 元倍振幅 2A/D を,縦軸に Vr=10 付近での渦励振時の最 大振幅に対応する風速での空力減衰率 a を示す.

図-15の応答図より,全てのケースにおいて Vr=4 付近 より渦励振が発現し, Vr=5 付近で極大となっている.ま た,風速が上昇すると Vr=8 付近から再び渦励振が発現 し, Vr=10 付近で最大となり, Vr=5 付近の低風速域での 渦励振時の振幅よりも大きな振幅となっている.そこで, Vr=10 付近での渦励振時の最大振幅を比較したものを図 -17 に示す.これより, Vr=10 付近での渦励振時の最大 振幅は,キャビティ深さ比 H/B'が小さくなるに従って大 きくなっている.これは,床版の位置が桁高 D の中央に 近く,上下対称な断面に近づくにつれ振幅が大きくなっ ていることを意味する.

一方,図-16をみると,低振幅域ではH/B'が大きい方



が負の空力減衰率が大きいが,大きい振幅域では渦励振時の最大振幅に対応し,H/B'が小さい方が負の空力減衰率の値が大きくなっている.

以上のことから,箱桁形状が矩形(W=12.5mm)である CASE2 の場合,キャビティ深さ比 H/B'が小さくなるに 従い,渦励振時の最大振幅は大きくなっており,キャビ ティ深さの違いで耐風特性が変わるといえる.

(3) CASE3

CASE3 について,キャビティ深さ比H/B'を0.096 0.121, 0.145,0.193 と変化させたときのたわみ1自由度応答実 験結果を図-18 に応答図,図-19 に空力減衰率図として示 す.(1),(2)の場合と同様に,図-18の応答図において は,横軸に換算風速 Vr=V/fDを,縦軸には無次元倍振幅 2A/Dを示す.図-19の空力減衰率図においては,横軸に 無次元倍振幅2A/Dを,縦軸にVr=10付近での渦励振時 の最大振幅に対応する風速での空力減衰率 aを示す.

図-18の応答図に着目すると CASE2の場合と同様に, 全てのケースにおいて Vr=4 付近より渦励振が発現し, Vr=5 付近で極大となっている.また,風速が上昇すると



Vr=8 付近より再び渦励振が発現し, Vr=10 付近で最大と なり, Vr=5 付近の低風速域での渦励振時の振幅よりも大 きな振幅となっている.そこで, Vr=10 付近での渦励振 時の最大振幅を比較したものを図-20 に示す.これより, Vr=10 付近での渦励振時の最大振幅は,キャビティ深さ 比 H/B'が小さくなるに従って大きくなっており, CASE2 とほぼ同様の傾向が見られた.

また,図-19をみると,図-16と同様の傾向であった. 以上のことから,箱桁形状が矩形(W=37.5mm)である CASE3 の場合,キャビティ深さ比 H/B'が小さくなるに 従い,渦励振時の最大振幅は大きくなっており,キャビ ティ深さの違いで耐風特性が変わるといえる.

以上の(1)~(3)の実験結果をまとめると,箱桁形状が 矩形である CASE2(W=12.5mm), CASE 3 (W=37.5mm)の 場合は,床版の位置が桁高Dの中央に近く,上下対称な 断面に近づくにつれ渦励振時の最大振幅が大きくなると いう傾向が見られた.これは,上下対称な断面では断面 の上部と下部で同様な流れのパターンが交互に繰り返さ れるため,上下対称な断面に近づくほど渦励振時の最大



振幅が大きくなったと考えられる.以上より,箱桁形状 が矩形である CASE2(W=12.5mm), CASE 3 (W=37.5mm) の場合は,キャビティ深さの違いで耐風特性が変わると いえる.

一方,箱桁形状に多段剥離干渉法を適用した CASE1 の場合には,H/B'が変化しても渦励振時の最大振幅に大 きな差は見られず,キャビティ深さによる影響は小さい といえる.

#### 2.3 ねじれ1自由度応答実験

本節では,箱桁形状が CASE1, CASE3 の場合におい て,キャビティ深さ比 H/B'を 0.096,0.121,0.145,0.193 と変化させたときのねじれ 1 自由度応答実験の実験結果 について示す.ここでは,1節の結果より CASE2,CASE3 の傾向がほぼ同じであったため,桁幅 W が CASE1 と等 しい CASE3 のみを行うこととした.

## (1) CASE1

CASE1 について,キャビティ深さ比H/B'を0.096 0.121, 0.145,0.193 と変化させたときのねじれ1自由度応答実 験結果を図-21 に応答図として示す.応答図においては, 横軸に換算風速 Vr=V/fD を,縦軸にねじれ倍振幅2 (deg.)を示す.

図-21 より,全てのケースにおいて渦励振やねじれフ ラッターの発生はみられず,キャビティ深さの違いによ る耐風特性の違いはない.

# (2) CASE3

CASE3 について,キャビティ深さ比H/B'を0.096 0.121, 0.145,0.193 と変化させたときのねじれ1自由度応答実 験結果を図-22 に応答図として示す.(1)の場合と同様に, 応答図においては,横軸に換算風速 Vr=V/fD を,縦軸にね じれ倍振幅2 (deg.)を示す.

図-22 より,全てのケースにおいて低風速域での限定 振動である渦励振の発現は見られず,換算風速 Vr=30 を



図-23 1gU11ノノクター光況風速(UA3E3)

超える高風速域で,自励振動であるねじれフラッターが 発現した.ここで,図-23 に縦軸にフラッター発現風速 を,横軸にキャビティ深さ比H/B'をとり,これらの関係 を示す.図-23を見ると,キャビティ深さ比H/B'が小さ いほどねじれフラッターの発現風速は低くなっており, 耐風性が悪くなるといえる.つまり,床版の位置が桁高 Dの中央に近く,上下対称な断面に近づくにつれ耐風性 が悪くなると考えられる.

以上をまとめると,箱桁形状に多段剥離干渉法を適用 した CASE1 の場合には,全てのケースにおいて渦励振 やねじれフラッターの発現は見られず,キャビティ深さ による影響はないといえる.

一方,箱桁形状が矩形である CASE 3 の場合,床版の 位置が桁高 D の中央に近く,上下対称な断面に近づくに つれ,ねじれフラッターの発現風速がより低風速となり, 耐風性が悪くなった.これは,たわみ振動の場合と同様 のメカニズムであると考えられる.すなわち,耐風性に キャビティ深さによる影響があるといえる.



図-24 可視化写真(CASE1, H/B =0.096)



#### 3. 可視化実験

#### 3.1 実験概要

実験には,九州工業大学建設社会工学科所属の可視化 実験用小型風洞(測定断面:400mm×400mm)を使用した.

本実験では可視化手法の1つであり,二クロム線に流動パラフィンにアルミ粉末を混合した液体を塗布し,その細線に電流を流し,白煙を発生させて風洞気流を可視化するスモークワイヤー法を用いた.スモークワイヤー法には使用可能風速に制限があるので,可視化映像が良好であった風速 V=0.6m/s に固定し,静止時について実験を行った.

実験用模型は,縮尺率1/89の透過性のあるアクリル製 模型を用いた.模型断面の形状は応答実験用模型と同様 で概略図は図-3に示す通りである.

実験ケースは応答実験の結果より,箱桁形状が矩形で ある CASE2(W=12.5mm),CASE3(W=37.5mm)の傾向がほ ぼ同じであったため,箱桁形状に多段剥離干渉法を適用 した CASE1(W=37.5mm)および桁幅 W が CASE1 と等し い CASE3 について行うこととした.また,キャビティ 深さ比については,最も顕著な違いが現れると考えられ るため,CASE1,CASE3 のそれぞれにおいて H/B'=0.096



図-26 可視化写真(CASE3, H/B =0.096)



図-27 可視化写真(CASE3, H/B =0.193)

の場合および H/B'=0.193 の場合を行うこととした.ここで, H/B'=0.096 の場合は,床版が桁高の中央に位置する場合,つまり上下対象となる断面であり,H/B'=0.193 の場合は床版が桁高の最上部に位置し,断面上部のキャビティはなくなる.尚,各ケースの箱桁形状については図-9に示す通りである.

## 3.2 実験結果

箱桁形状に多段剥離干渉法を適用した CASE1 におい て H/B'=0.096,0.193 の場合の静止時の可視化写真を図 -24,25 に,箱桁形状が矩形である CASE3 において H/B'=0.096,0.193 の場合の静止時の可視化写真を図-26, 27 にそれぞれ示す.

図-24 と図-26 を比較すると、それぞれ桁断面上流側で 剥離した流れが、剥離後、剥離渦を生成する位置はほぼ 同位置となっていた.しかし、箱桁形状に多段剥離干渉 法を適用した CASE1 では CASE3 と比較して流れの剥離 が小さくなっている.また、図-25 と図-27 を比較すると、 桁断面下部での剥離渦の生成位置に違いはないが、断面 上部では、CASE1 では剥離渦の生成がほとんど見られな かった.これは、多段剥離干渉法により流れの剥離が小 さくなっているためであると考えられる. 以上より2主鋼箱桁断面において,キャビティ深さが 耐風性に及ぼす影響には流れの剥離の大きさが要因となっていると考えられる.

## 4.まとめ

本論文では,斜張橋用2主鋼箱桁におけるキャビティ が耐風性能に与える影響について検討した.以下に,一 連の実験結果をまとめる.

(1) 箱桁形状に多段剥離干渉法を適用した場合は,たわ み振動,ねじれ振動のどちらにおいてもキャビティ深さ 比H/B'の変化による耐風性能の変化はなかった.すなわ ち,キャビティ深さが耐風性に及ぼす影響はないといえ る.

(2) 箱桁形状が矩形の場合,たわみ振動,ねじれ振動と もに,キャビティ深さ比 H/B'が小さいほど耐風性は悪く なる傾向が確認された.つまり,床版の位置が桁高 Dの 中央に近く,上下対称な断面に近づくにつれ上下面で同 様の流れのパターンが繰り返されるため,耐風性が悪く なり,キャビティ深さの対照性が耐風性に影響を及ぼす と考えられる.

(3) 可視化実験より,箱桁形状の違いによる剥離渦の生 成位置に違いは見られず,流れの剥離の大きさに大きな 違いが見られた.よって,キャビティ深さが耐風性に影 響を及ぼす主な要因として,流れの剥離の大きさが考え られる. 以上の実験結果より,今後,迎角を変化させた応答の 測定や,今回は静止時のみについて可視化実験を行った ので強制振動時の桁断面周辺の流れの可視化を行い,床 版位置と耐風性の関連をより明確にしていく予定である.

参考文献

- 1) 皆田龍一,久保喜延,加藤九州男,山口栄輝,岡利 文:剥離干渉法による実橋梁桁断面の耐風特性に及 ぼす高欄の影響,構造工学論文集,Vol.43A,pp.939 ~944,1997年3月
- ※田昌弘,宮地真一,瀬戸内秀規,枝元勝哉:地覆・ 高欄を設置した偏平箱桁断面に対する水平プレートの空力制振効果について,構造工学論文集.Vol.43A, pp.929~938,1997年3月
- 3) 久保喜延,本田健二,田崎賢治:剥離干渉効果による PC 斜張橋開断面桁の耐風性能改善法,第12回風 工学シンポジウム論文集,pp.399-404,1992.
- 4) 鈴木泰之,久保喜延,佐野啓介,加藤九州男,木村 吉郎:剥離干渉法を用いた鋼2主桁斜張橋の耐風安 定性に関する検討,日本風工学会論文集,第31巻第 2号(通号第107号),2006.4.
- 4) Y.Kubo, K.Hirata and K.Mikawa : Mechanism of aerodynamic vibrations of shallow bridge girder section, Jour. of Wind Eng. and Induct. Aero. Vol.41-44, pp.1297 ~ 1308, 1992