

数値流体解析による付加物を有した二箱桁断面橋梁のフラッター特性の検討

○中央大学 学生員 栗林 伶二 中央大学 正会員 平野 廣和
 八戸高専 正会員 丸岡 晃 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

中央軽間 2,000m を超える規模の超長大橋の検討において、経済性・耐風性に優れる桁断面として二箱桁断面が提案されている。このような橋梁断面の形状や付加物の決定には、風洞実験や数値流体解析(CFD)による検討が行われており、一箱桁断面の静的空気力係数や非定常空気力係数は、概ね実験値と整合した CFD 結果が報告されている。しかし、二箱桁断面においては、流れの干渉により複雑な流れ場となることから、風洞実験結果と CFD が一致しない場合が報告されている。このため、空力特性に与える影響に関しては、十分な検討と現象の解明が必要であると指摘されている。

そこで、本研究では二箱桁断面を対象とし、高欄や検査車レールなどを付加した実橋梁に近いモデルにおいて、3 次元数値流体解析を行う。具体的には、付加物の設置位置を変化させた断面において動的解析、フラッター解析を行い、振動の発生原因の特定や耐風性能の向上要因を明らかにするとともに、二箱桁断面橋梁での付加物の違いによる流れ場を把握することを目的とする。

2. 解析手法

(1)支配方程式

流れ場の支配方程式は、非圧縮 Navier-Stokes 方程式で表され、数値流体解析には、著者ら¹⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用する。また、乱流モデルには LES の Smagorinsky モデルを採用する。

(2)対象断面

図-1 に本研究で用いる 5 種類の断面を示す。各断面は、 $B/D=4$ (B :桁幅, D :桁高)と開口部幅 $4D$ を組合せた箱桁断面にフェアリング、センターバリアを付加した断面である。これを基本断面とする。断面①は基本断面に加えて検査車レールを断面外側から $1D$ の位置に付加した断面。断面②は検査車レールを断面外側から $2D$ の位置付加した断面。断面③は検査車レールを断面外側から $3D$ の位置に付加した断面である。断面④、断面⑤は検査車レールを断面①と同様に断面外側から $1D$ の位置に設置した断面である。

また高欄は断面①、断面②、断面③に高欄 a を、断面④、断面⑤に高欄 b を設置し、断面⑤は内側も高欄を設置した。高欄の高さは $0.38D$ とし、高欄 a は上下方向に 3 本の矩形柱で構成、高欄 b は上下後方に 2 本の矩形柱で構成する。高欄の充実率はそれぞれ高欄 a を 58%、高欄 b を 53%程度確保するように組み合わせで再現している。これにより、高欄の形状及び充実率によって断面の空力特性が変化することも同時に確認する。検査車レールの寸法は前述の風洞実験²⁾と同様の矩形柱でモデル化を行なう。解析領域は、四節点四角形要素を用いてモデル化を行い、高欄や検査車レール

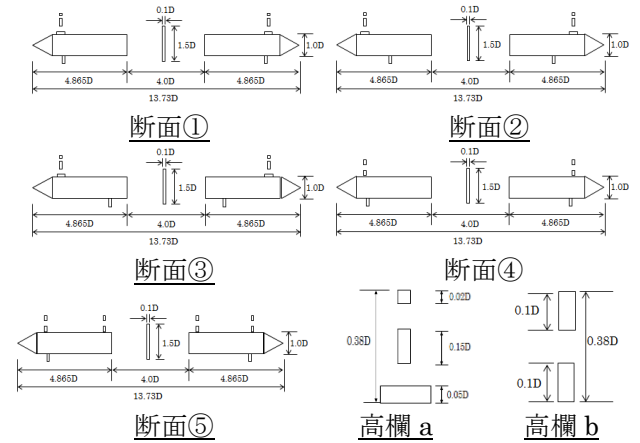


図-1 対象断面と高欄形状

表-1 解析諸元

断面形状	断面①	断面②	断面③	断面④	断面⑤
時間増分 Δt	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U	0.02D/U
最小要素幅	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D	0.0005D
総接点数	32330×33	30722×33	32330×33	48661×33	58709×33
総要素数	31752×32	30168×32	31752×32	48000×32	57900×32
Reynolds数 Re	3.0×10^4				
軸方向長さ	3.2D				
軸方向分割	32				
軸方向幅	0.1D				
モデル定数 C_s	0.1				

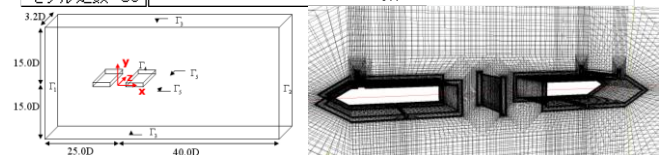


図-2 解析領域と要素分割図

ルで流れを正確に再現するために、物体近傍で最小要素幅は $0.0005D$ としている。

(3)解析条件

表-1 に解析条件を、図-2 に解析領域と断面近傍の要素分割図を示す。境界条件は、流入境界で無次元流速である一様流速 1.0 、流出境界は移流境界条件とする。また、側方で slip、物体周りで no-slip 条件である。要素分割は断面に近くなるほど細くなっている。

3. 解析結果

3. 1 非定常空気力動的解析

振動状態に関する流れ場を把握するために、1 自由度たわみ・ねじれ強制加振の非定常空気力動的解析を行う。強制加振はたわみ片振幅 $\eta = 0.1D$ 、ねじれ片振幅 $\theta = 1.0\text{deg}$ とし、風洞実験値²⁾と同様の値に設定する。

図-3 にフラッター性能に影響を及ぼすと言われている係数³⁾に着目した非定常空気力係数の解析結果を示す。各係数を比較すると無次元風速 $U/(fB) = 15.0$ 以上でそれぞれの断面特性が異なっている。これは高風速時においては高欄や検査車レールの付加物の設置位置により流れの状態が変化することを表している。

キーワード： 数値流体解析 動的解析 フラッター解析 検査車レール 高欄

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816 fax. 03-3817-1803

たわみ振動解析結果である $C_{M\eta I}$ では、断面①、②において $U/(fB)=15.0$ を超えるあたりで正の勾配を示しており、断面③と特性が異なっている。ここから検査車レールを内側に付加することでたわみ振動に関して安定すると考えられる。次に、ねじれ振動解析結果である C_{L0R} , C_{M0R} , C_{M0I} では、各断面において理論値とほぼ同様の傾向を示している。その中で高欄の形状が異なる断面④では、他の断面に比べて C_{M0I} は負で絶対値が大きく、 C_{M0R} は値が小さい値を示している。ここから高欄の形状を変化させることでフラッターに対し影響が出ると考えられる。

次に図-4に流れ場の状態の状態として、非定常空気力係数に変化が表れ始める $U/(fB)=15.0$ 時の瞬間圧力分布と瞬間流線図を示す。まず、瞬間圧力分布図に着目すると、高欄の形状が異なる断面④、断面⑤では断面近傍の圧力が高くなっている。これは高欄 b では剥離した流れが断面に再付着していることから圧力が上がったと思われる。瞬間流線図に着目すると、センターバリアの存在により下流断面の再付着位置が断面側面となっており、その後検査車レール付近で再剥離している様子が確認出来る。また、断面①と断面⑤では開口部に gap flow の存在が確認できる。一方、断面④では断面上面からの風と下面からの風が相殺し、開口部に入り込む風を抑制していると考えられ、それが非定常空気力の低減に作用したと思われる。

3.2 フラッター解析結果

非定常空気力係数を用いたたわみ・ねじれ2自由度フラッター解析を行う。その際の構造諸元を表-2に示す。図-5にフラッター解析より算出された風速 U と対数減衰率 δ の関係を示すフラッター解析の結果を示す。これによると図-5のたわみ減衰率はどの断面においても常に正の値を示した。このことからギャロッピング現象のような鉛直曲げの発散振動は起こらないと考えられる。一方、図-5のねじれ減衰率は正から負へと移行している。この時の風速でねじれフラッターの発現が危惧されるため、本解析断面ではねじれフラッターのみが問題となる。

次に、表-3に断面形状の違いによるフラッター発現風速を示す。各断面を比較すると、断面①を除くすべての断面が Theodorsen 理論よりも高い結果となり、開口部を有する橋梁断面の耐風性の高さがうかがえる。特に、断面②と断面③のフラッター発現風速は断面①と比較して約 1.5 倍程度大きく、検査車レールを内側に設置することで高い耐風安定性を有することが確認できる。一方、高欄形状による比較では断面④、断面⑤は断面①よりも耐風安定性に優れている。これは高欄の開口率が高いことが理由にあると考えられる。このように付加物の違いによりフラッター性能に大きく影響が出ると確認できた。

4. おわりに

本研究では、高欄や検査車レールなどの付加物の設置位置の異なる二箱桁断面に着目し、動的解析、フラッター解析を行うことで耐風安定性性能を定量的、可

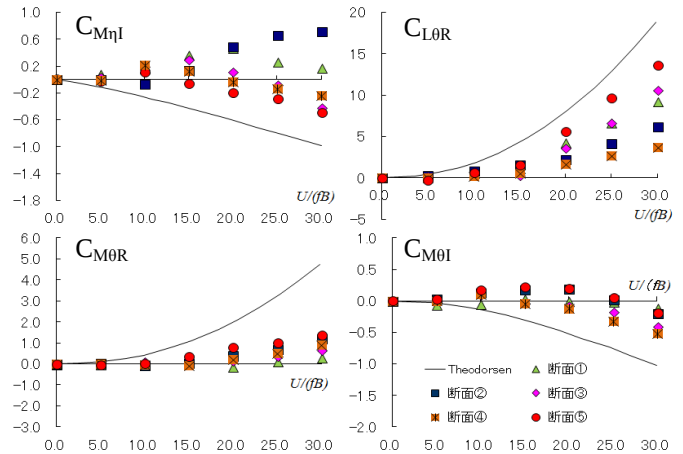


図-3 非定常空気力係数の解析結果

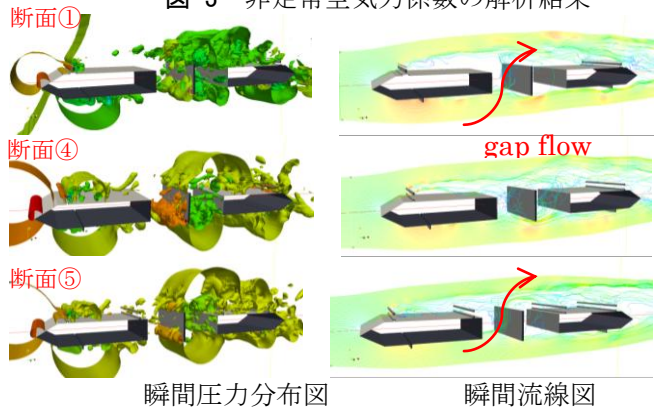


図-4 強制加振時の流れ場（たわみ加振 $U/fB=15.0$ ）

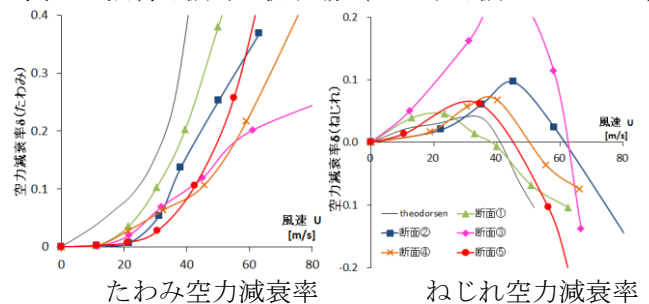


図-5 フラッター解析結果

表-2 構造諸元

桁幅 B	36 [m]
単位長さ重量 m	3000[kg f/s ² m ²]
単位長さ極慣性 I	402100[kg f/s ²]
鉛直たわみ振動数 f_{vm}	0.062[Hz]
ねじれ振動数 f_{no}	0.126[Hz]
たわみ構造減衰率 $\delta_{\eta\theta}$	0.02
ねじれ構造減衰率 $\delta_{\theta\theta}$	0.02

表-3 フラッター発現風速

	フラッター発現風速 U_{cr}
断面①	40 m/s
断面②	61.1 m/s
断面③	62.4 m/s
断面④	51 m/s
断面⑤	45 m/s
Theodorsen	41.0 m/s

視的に検討した。それによると、各種空気力係数、フラッター発現風速を算出することができ、本解析断面では付加物の設置位置により断面毎の空気力に変化が生じることが確認できた。

<参考文献>

- 1)丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性流れの解析, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 383-394, 1997. 4.
- 2)出野真由子, 吉住文太, 曾我明, 井上浩男: 付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 634-641. 2007
- 3)川崎貴之: 数値流体解析による付加物を有する二箱桁断面橋梁のフラッター特性の検討, 構造工学論文集 Vol. 57A