

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32704

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760368

研究課題名(和文) 橋梁付加物による橋桁の風荷重および空力振動の低減手法についての研究

研究課題名(英文) Study on reduction of the wind load and the aerodynamics vibration of the bridge girder by the bridge appendages

研究代表者

中藤 誠二(Nakato, Seiji)

関東学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：90339789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：橋桁に対して付加物を軸方向に不連続に取り付けることで、後流渦の軸方向の位相をずらし、変動揚力および空力振動を抑える手法について風洞実験により検討した。スパン方向に付加物を不連続に取り付けた場合、辺長比によっては大きく変動揚力が減少した。効果の見られない断面に対しては、開口を非一様に設けることで変動空気が低減した。

また、渦の軸方向の相関長さの評価を行うために2点間の変動風速のスペクトル解析を行った。ピーク周波数のコヒーレンスの値はガウス関数でよく近似され、その積分距離として相関長さを求める手法を示した。また、自己相関関数を用いた流れ方向の相関長さの評価手法も示した。

研究成果の概要(英文)：Study on reduction of the wind loads and the aerodynamics vibrations of bridge girder by appendages with spanwise inhomogeneous section was conducted using wind tunnel. The appendages with spanwise inhomogeneous section were effective on reduction of fluctuating lift acting on the models with some side ratio. For the models with other side ratio, openings with spanwise inhomogeneous section were effective.

Spectral analysis of the hot-wire data was conducted for evaluation of spanwise correlation length. Coherence values at vortex shedding frequency were plotted as function of distance. It could be represented well by Gaussian function, and correlation length was derived as integral scale. Evaluation method of windward correlation length was also proposed with employing auto-correlation function.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：相関長さ 矩形断面柱 変動揚力係数 ストローハル成分 コヒーレンス

1. 研究開始当初の背景

長大橋では、空力対策の一つとして、フェアリングやフラップなどの付加物を取り付けて、空力振動を抑えることが行われる。このような、断面形状を変えることで剥離流れを制御する手法については、部分模型試験や流れの可視化実験、また数値流体解析によって詳細な検討が行われてきた。しかしながら、橋軸方向に断面変化させて、後流渦(カルマン渦)の周期や位相を変化させて、空力振動を抑える手法については、実橋に適用された例もあるが、十分な検討がなされたとはいえない。

軸方向の断面変化による空力対策のメカニズムは、橋軸方向に断面を変化させることによって軸方向のカルマン渦の位相にずれが生じ、風圧力がお互いに打ち消し合う方向に作用することになり、橋桁全体に対しては風荷重を低減させる効果が生じるというものである。軸方向の位相の一様性は相関長さで表すことができるが、相関長さは物理的指標としてのイメージのしやすさに反して、定量的な評価手法はさまざま、また同じ手法でも実験によって値のばらつきが大きく、円柱、角柱といった基本的形状においても定量的に定まっていない。

なお、同様の現象として、柱状構造物から生じる空力音であるエオルス音があり、軸方向の渦放出の位相が変化することで音圧レベルの大きさが変化する。新幹線のパンタグラフの空力騒音低減の工学的な検討が代表的なものとして挙げられるが、その他にも、本研究が対象とする現象は流体工学の幅広い分野に関連するものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、主に矩形断面柱に対して、付加物を設置した場合の空力特性の変化について、特に2断面間の流れ場の相関特性に着目して明らかにし、相関長さの評価手法を確立する。さらに風荷重の低減手法、渦励振やフラッターの発振の抑制手法を検討する。

3. 研究の方法

円柱や角柱などの基本断面、さらに橋梁の代表的断面に対して、種々の形状の付加構造物を設置したものを対象に、風洞実験によって変動風速、変動空気力などの測定を行い、構造物に作用する風荷重の変化や、それに関連する流れ場の空間相関の特性について明らかにする。得られた種々の測定データについて周波数分析を行い、空間相関特性を指標として、軸方向に変化する断面形状による風荷重への影響の変化とそのメカニズムについて検討する。

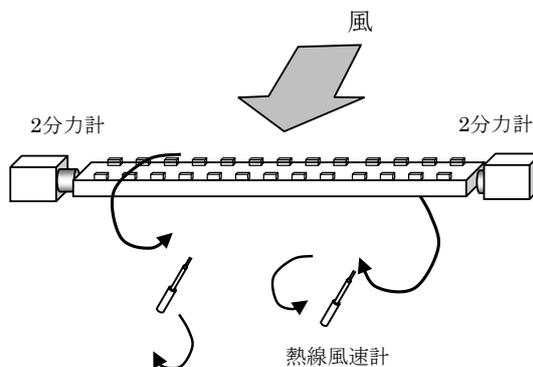


図1 実験装置の概略

4. 研究成果

(1) 相関長さの評価手法

変動風速のストローハル成分に着目して、軸方向相関長さとして流れ方向相関長さの評価手法を提示した。

軸方向の相関長さの評価手法として、ガウス分布型の近似式を用い、全体に作用する変動揚力と、断面に作用する変動揚力の関係を考慮して、積分範囲を両側とした。

$$L_c = \int_{-\infty}^{\infty} coh(r)dr = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-k'r^2)dr = \sqrt{\frac{\pi}{k'}}$$

流れ方向相関長さの評価手法として、ストローハル成分の不規則な振動をインパルス応答の重ね合わせととらえて、自己相関関数より減衰定数を求め、移流速度を考慮して以下の式で求めた。

$$L_{c,x} = \int_0^{\infty} e^{-h(2\pi f_p)t} dt \times 0.75U = \frac{0.75U}{h(2\pi f_p)}$$

また、両者を掛け合わせたものを相関面積とした。

(2) 矩形断面の相関長さ

矩形断面柱模型(B:幅, D:高さ)を対象に、変動風速による相関長さの評価を行った。熱線による測定を行う2点間の間隔を1mm刻みで変化させることで、高い空間分解能でもって評価した。辺長比B/D=1の軸方向の相関を図2に示す。また、図3に変動風速の自己相関関数を示す。軸方向相関長さは $L_c=5.8D$ 、流れ方向相関長さは $L_c, x=17.2D$ となった。

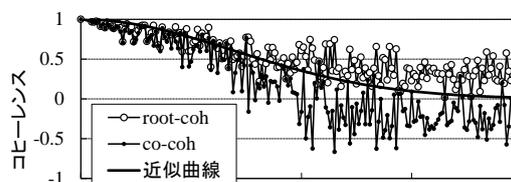


図2 コヒーレンス, B/D=1, 16Hz

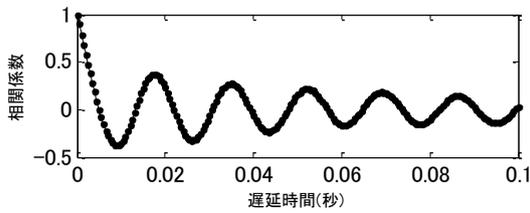


図3 変動風速の自由減衰波形

相関面積を模型図に模式的に表示したのが図4である。カルマン渦によって形成されるコヒーレントな流れ場の大きさが視覚的に見て取れる。

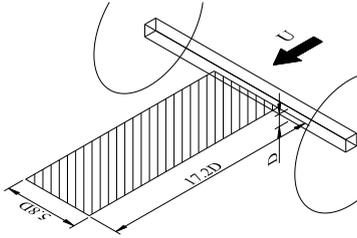


図4 相関面積

辺長比 $B/D=3$ の模型については $L_c=18D$, $L_c, x=13.8D$ となり, $B/D=1$ に比べて軸方向の相関は高くなるが, 流れ方向の相関は小さくなった。

(3) 付加物による変動揚力抑制効果

辺長比3の矩形断面について, 図5のように付加物を軸方向に不連続に取り付けた。抗力係数は流れ方向の見つけ面積の増加率よりも大きい増加率となったが, 変動揚力係数は約20%まで低減する結果となった(表1)。辺長比の大きい断面では, 鉛直方向の断面2次モーメントは小さく, 変動揚力を低減させられることは対風対策上のメリットが大きいといえる。変動風速のスペクトルは広帯域となり, ストローハル成分に着目した相関長さでは有意な結果が得られなかった。本断面は再付着から周期的再付着に移行する辺長比であり, 付加物を取り付けることで, カルマン渦の放出そのものが抑制されたと考えられる。

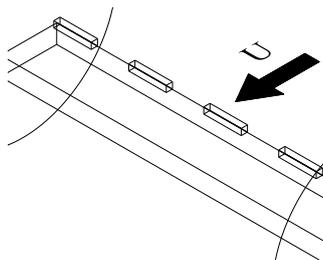


図5 付加物を取り付けた模型

表1 空気力係数の比較 ($B/D=3$)

付加物	なし	あり
抗力係数	1.59	2.15
変動抗力係数	0.55	0.54
揚力係数	0.67	-0.62
変動揚力係数	2.37	0.47

一方で $B/D=1$ の模型では, 付加物による変動揚力の大きな減少は見られず, 付加物を取り付けた断面と元の断面との中間的な特性を示すにとどまった。これは, 物体近傍の軸方向の断面変化が, 物体後流の渦の軸方向の変化においては平準化されていることが考えられる。

(4) 開口による変動揚力抑制効果

開口を設けることによる変動揚力の低減効果について検討した。上流からの風が開口部を通過して後流に抜けることで, 渦の一様性を乱す効果が期待できる。付属物を取り付ける方法では, 辺長比 B/D が小さくなる方向に変化し, 軸方向の空間相関が小さくなる効果を, 断面あたりの変動揚力係数の増加が打ち消してしまう。一方, 開口を設ける方法では, B/D は変わらないため, もともとの流れ場の特性を大きく変えることがない。

なお, これまで 6m/s までの風速域で実験を行っていたが, 以下の実験結果より, 風洞に新たに縮流ノズルを設けて風速約 11m/s までのより高い風速域まで実験を行っている。

実験結果の一例として変動揚力のパワースペクトルの風速による変化を図6に示す。

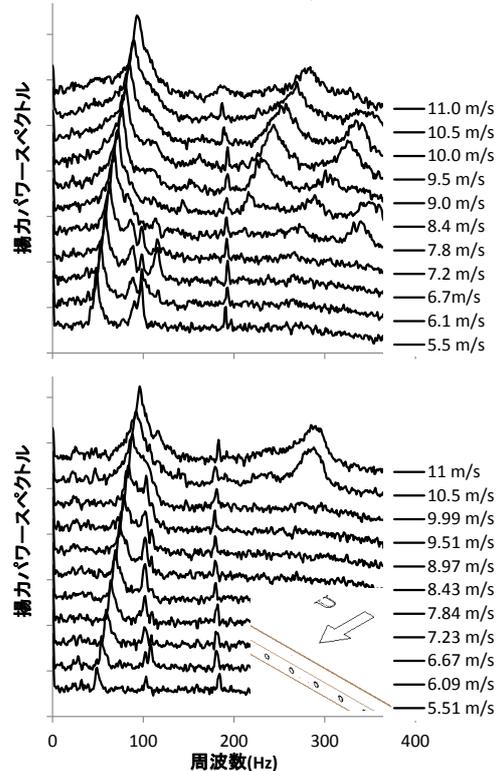


図6 変動揚力のパワースペクトル
(上:角柱, 下:円形の開口)

上図は開口のない 15mm 角の角柱模型の結果で、下図は直径 5mm の開口を 3cm 間隔で 13 個設けたものの結果である。開口を設けた場合に、高風速域での高周波数成分が抑えられていることが分かる。

図 7 は抗力係数、変動揚力係数の風速による変化を、先の 2 つの模型の結果に加えて、円柱、上面に付加物を取り付けた角柱、5mm × 10mm の長方形の開口を 3cm 間隔で設けた角柱についても合わせて示したものである。抗力係数は風速 5m/s (Re 数 4700) 以上で、いずれもほぼ一定であり、付加物、角柱、円開口、長方形の開口、円柱の順に小さくなっている。円柱は直径を、その他は角柱の高さを代表長さとしている。円形の開口ありでは、角柱に比べて約 12%、抗力係数が低下しているが、見付け面積の開口による減少の割合 4% よりも大きく、これは後流域が縮小し背圧が減少したことによると考えられる。

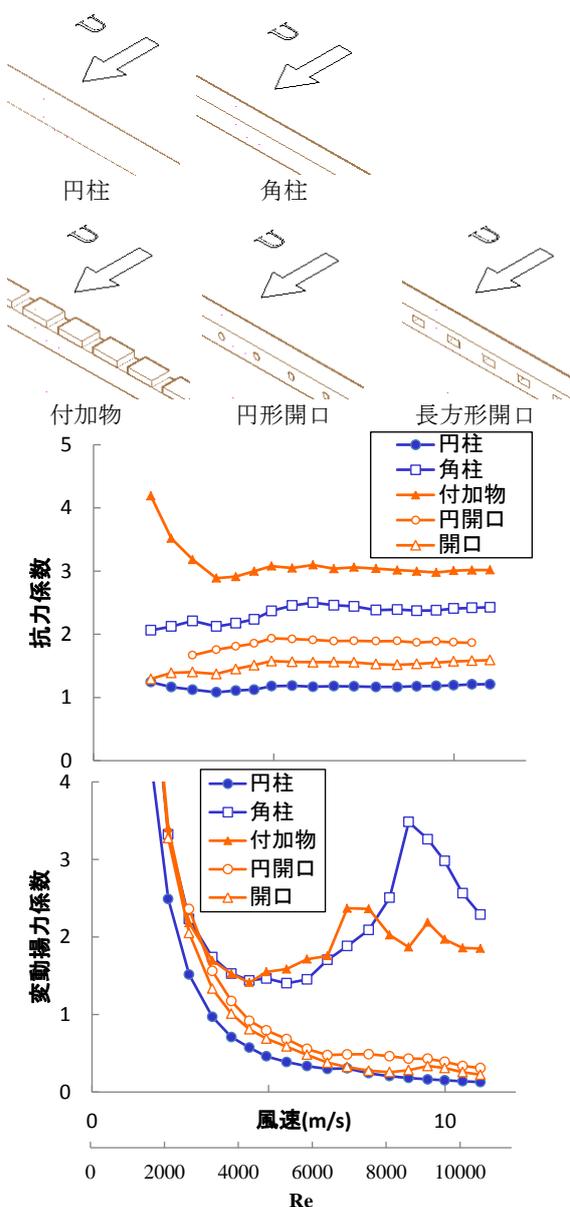


図 7 抗力係数、変動揚力係数の風速による変化

変動揚力係数は風速 5m/s 以上において、円柱および開口ありの模型は、風速が大きくなるにつれて小さくなっている。開口を設けた場合は円柱と似たような傾向を示し、変動揚力低減の効果が大きいことが分かる。角柱

および付加物では変動揚力が大きくなっており、風速によるばらつきも大きい。角柱の変動揚力は既往の研究でもばらつきあり、実験条件の影響を受けやすいと考えられる。付加物を取り付けた場合、変動揚力の最大値は角柱と比べて小さくなるが、風速によってばらついており、効果は限定的であるといえる。

図 8 に後流の変動風速 (スパン方向の 2 点間の間隔 y) のコヒーレンスの一例を示す。開口を設けることで、コヒーレンスが低下していることが分かる。近似曲線では大きな差は表れていないが、開口ありの場合、2 点間の間隔が狭いときに、コヒーレンスが大きく低下する場合があります。開口によって渦が乱されていると考えられる。なお、円柱ではコヒーレンスの値は安定しており、近似曲線ともよい一致を示しており、角柱においてコヒーレンスがばらつく要因についてはさらに検討していく必要がある。

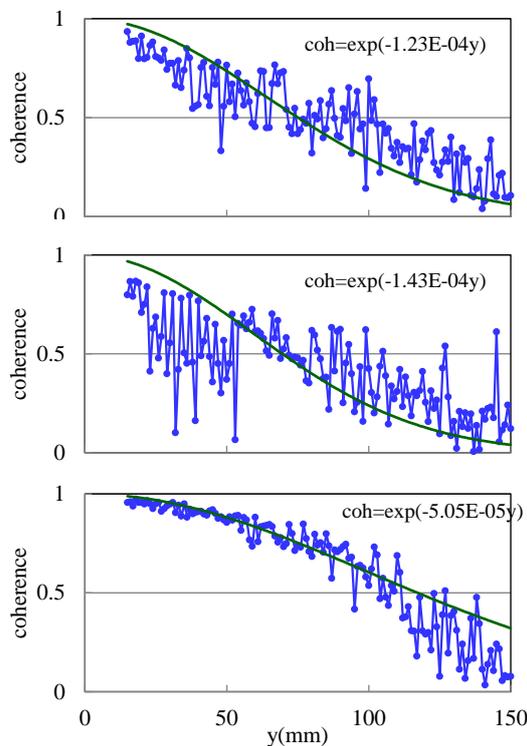


図 8 コヒーレンスと近似曲線

(上：角柱，中：長方形の開口，下：円柱)

このように開口による変動揚力の低減手法は効果が高いといえる。実際の構造では内部が中空である場合が多いが、中空断面に開口を設けた実験を行ったところ、笛吹き音の発生が確認された。後に述べるパンチングメタルから生じる空力音の実験よりその対策を検討した。

また構造的な観点から、開口のある無しについて有限要素法解析を行ったが、鉛直曲げに対して応力の小さい領域をくり抜いた形状となるため、強度の低下は限定的であり、また、重量が小さくなるため固有振動数はほとんど変化しなかった。固有振動数は、渦励振やフラッターの発現風速に影響し、付加物を取り付ける方法では重量が増加し、固有振動数が低下し、発現風速も低下する懸念がある。この点においても、開口を設ける方法は有効であるといえる。

(5) 変動揚力に起因する遠方場の音圧

種々のセンサーで総合的に変動流れ場を把握する観点からマイクロホンを用いて、矩形断面柱を対象に空気力と遠方場の音圧を同時測定しその相関特性について調べた。音圧のスペクトルからは、暗騒音のレベルが高いためピークを判別できないが、変動揚力との相互相関を求めることで、変動揚力に起因する音圧の成分を確認した。低騒音風洞などで音圧を精度よく測ることができれば、音圧から変動揚力の大きさを推定することが可能であると考えられる。

(6) 開口から発生する空力音対策

板に規則的に円形の開口があげられたパンチングメタルは防風や防雪板、目隠し板として用いられることがあるが、風速や風向などの条件が揃うと、高周波数域の純音に近い空力音が生じる。これは、開口を設けた際にも懸念される事柄である。図9に音圧レベルのパワースペクトル、ピーク音圧レベル、ストローハル数の風速による変化を示す。孔が風向方向に並んだものは、風向方向に千鳥配置となるものに比べて、音圧レベルが高く、高調波成分のピークも確認された。孔配置が不規則なものでは、空力音の発生がさらに抑えられた。このことより、開口による対策の際にも、不規則な間隔で開口を設けることが有効であるといえる。

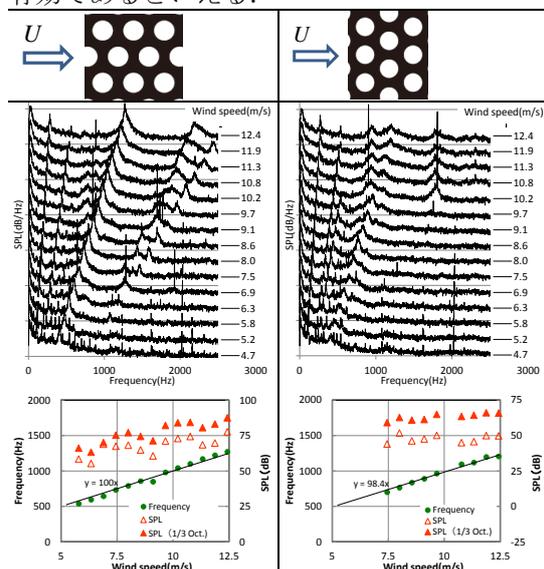


図9 パンチングメタルから生じる空力音

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

1. 中藤誠二：矩形柱周りの変動風速のストローハル成分の空間相関特性，風工学シンポジウム論文集，22巻 pp. 139-144，査読有 2012

[学会発表] (計 4件)

1. 中藤誠二：正方形柱に作用する変動空気力の開口による抑制手法，土木学会年次学術講演会，2014. 9，大阪

2. 中藤誠二，金子洋樹：正方形断面柱の後流および発生する空力音の迎角による変化，土木学会年次学術講演会，2013.9月5日，習志野

3. 中藤誠二：パンチングメタルから発生する空力音についての風洞実験，日本風工学会年次研究発表会，2013.5月30日，仙台

4. 中藤誠二：辺長比 0.6 の矩形断面柱に作用する空気力と遠方場の音圧の同時計測，土木学会年次学術講演会，2012.9月6日，名古屋

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中藤 誠二 (NAKATO, Seiji)

研究者番号：90339789