ガストによって偏平な橋桁に作用する空気力の特性について On the characteristics of the aerodynamic forces caused by gusts on flat bridge decks

木村吉郎^{*1} 藤野陽三^{*2}
Kichiro KIMURA Yozo FUJINO

The strip theory approximation that assumes 2-dimensionally fluctuating wind velocity field to obtain the buffeting forces on a bridge cross-section has been used in the conventional buffeting analysis. Because the actual wind velocity varies along the bridge span and the flow over the neighbour sections has effects on the aerodynamic forces, the strip theory approximation does not strictly hold. In this study, the actual buffeting force distribution on a model with flat hexagonal cross-section was measured and compared with the analytical result by the strip theory approximation. There were some differences and the effects of these differences on the prediction of the bridge buffeting responses are discussed.

1. はじめに

自然風の風速変動(ガスト)にともなって作用する不規則に変動する空気力により生じる、橋梁の不規則な応答をガスト応答という。ガスト応答は、断面形状の工夫によってその発現を抑えることは困難であり、超長大橋の疲労や使用性の問題において重要となる。また橋梁の架設時においては設計風速はあまり高くないために、フラッターなどの発散振動は生じないが、構造はきわめて柔軟なのでガスト応答がクリティカルとなるといったケースが起こることも考えられる。

ガスト応答は、自然風を模擬して生成した境界層乱流中での全橋模型などを用いた風洞実験により予測されることもあるが、このような実験は施設・費用・時間がかかるので、対風応答が特に重要となる場合についてのみ最終的な確認として行われている。より一般的には、ガスト応答の予測はガスト応答解析を用いて行われている。

既往のガスト応答解析においては、ガスト応答を生じさせる不規則空気力(以下「ガスト空気力」とする)を2次元空気力で近似して求める、(狭い意味での)ストリップ理論の仮定が用いられている。しかし、この仮定は成り立たないとする実験結果もいくつか示されてきた¹⁻⁴⁾。そこでここでは、まず(狭い意味での)ストリップ理論の仮定の定義を明らかにし、次に偏平六角形断面をもつ模型を対象としたガスト空気力の測定結果を示し、ストリップ理論の仮定を用いた解析結果との違いを示す。またその違いが橋梁のガスト応答を予測する上でどのような影響をおよぼすか、実橋の単純なモデルに対する応答解析を通じて検討する。

2. ストリップ理論の仮定

長大橋梁は、スパン方向(橋軸方向)の長さが橋軸直角方向の長さに対して1オーダー以上大きく、線状構造物とみなせる。したがって、橋桁の形状がスパン

方向に変化せず、また風速もスパン方向に一樣であれば、作用する空気力の定常成分もスパン方向にはほとんど変化しないと考えられる。つまり橋軸に直角な平面内における気流の状況はその平面のスパン方向位置にかかわらずほぼ等しく、すなわち2次元空気力を用いて橋桁に作用する空気力が表される。

一方ガスト応答を生じさせる自然風は乱流であり、ある1点における風速が不規則に変動するだけではなく、橋梁スパン方向の風速分布も不規則に変動する。しかし既往のガスト応答解析においては、ガスト空気力を次のようなストリップ理論の仮定を用いて求めている。すなわち、橋桁の一断面に作用するガスト空気力は、その断面を含み橋軸に直角な平面内における流れが橋梁スパン方向に一樣な2次元変動風速場として作用した場合に生じる変動空気力と等しいとして求められている。この仮定によると、ガスト空気力のスパン方向の分布は変動風速のスパン方向の分布と相似形となる。

実際には、断面に作用するガスト空気力は他の断面における流れ場の影響も受けるため、ガスト空気力のスパン方向の分布は、変動風速の分布に重みをつけて移動平均をとったような形となり、変動風速の分布よりもなだらかなものとなるはずである^{1,4)}。この、「なだらかなになる」程度は、乱れのスケールや断面形に依存すると考えられる。そこで橋梁においてはその程度がどのくらいであるか明らかにすることを目的に、基本的な橋桁断面として偏平六角形断面を対象とし、模型に作用するガスト空気力の測定結果を示し、それがストリップ理論の仮定を用いた解析結果とどの程度異なるか次に示す。

3. 風洞実験の概要

測定部の大きさが1.08 m(幅)×1.8 m(高さ)のエッフェル型の風洞を用いて実験を行った。模型は図1に

*1 東京大学工学部土木工学科 講師
Assistant Professor, Univ. of Tokyo

*2 東京大学工学部土木工学科 教授
Professor, Univ. of Tokyo

示すような偏平六角形断面を持つ部分模型である。同時多点圧力計を用いて、2つの断面において各24点ずつ、計48点において変動圧力を同時に測定し、それを各断面について積分することで、断面に作用するガスト空気力の揚力成分（以下「ガスト揚力」とする）ならび2つの断面に作用するガスト揚力の相関を求めた。2つの断面間の距離 Δy については、10～200mmの8ケースとした。なおデータ処理は、同時多点圧力計からの出力を700Hzのローパスフィルタで処理した後、サンプリング間隔0.5msecでAD変換したものを用いて行った。

ガスト揚力に支配的な影響をおよぼす変動風速の鉛直成分に関する気流の特性を表1に示す。3種類の乱流格子を模型設置位置との距離をそれぞれ変えて設置することにより、乱れの強さはほぼ等しく、乱れのスケールが異なる気流を3種類生成した。しかし、最も大きい場合でも乱れのスケールは高々模型幅程度であり、比較的小さな乱れのスケールのもとでの測定しか行うことが出来なかった。ここで乱れのスケールは、カルマン型のスペクトルおよび主流直角方向に離れた2点におけるクロススペクトルの表式において、測定値を最も良く近似する場合の乱れのスケールに対応するパラメータとして求めた⁴⁾。

表1 気流の特性（変動風速の鉛直成分について）

	wind speed (m/s)	turbulence intensity (%)	turbulence scales (cm)	
			mean flow direction	normal to the mean flow direction
Grid A	4	8.8	14	13
	8	8.7	14	14
	12	8.6	14	14
Grid B	4	8.6	8	9
	8	8.3	8	9
	12	8.2	8	9
Grid C	4	8.3	5	5
	8	8.1	5	5.5
	12	7.9	5	6

(a) 全体図 (b) 断面図（矢印は圧力孔の位置）
図1 模型の諸元（単位mm）

4. ガスト揚力の測定結果およびストリップ理論の仮定に基づく解析値との比較

4.1 断面に作用するガスト揚力のパワースペクトル

断面に作用するガスト揚力のパワースペクトルの測定値をストリップ理論の仮定に基づく解析値とともに図2に示す。図には異なる乱れのスケールをもつ3種類の気流中でのパワースペクトルを示してあるが、いずれの場合にも解析値に比べて測定値は小さくなっている。また、風速が12m/sの場合には、測定値のパワースペクトルはピークを低周波数領域でもつが、解析値ではパワースペクトルは周波数とともに単調に減少するといった傾向の違いがみられる。

測定されたガスト揚力をもとにして、実橋の諸元を単純化したモデルの応答計算を後に行うが、そのためには、空気力を無次元振動数の関数として表わしておく必要がある。そこで、断面に作用するガスト揚力のパワースペクトル $S_L(f)$ を無次元化した $S_L(fb/U)^*$ を、無次元振動数の関数として図3に示す。ただし $S_L(fb/U)^*$ は、変動風速の主流方向成分の寄与を無視した既往の

図2 断面に作用するガスト揚力のパワースペクトル

図3 断面に作用するガスト揚力の無次元化パワースペクトル (Grid A)

ガスト応答解析における定式化に基づいて以下のように求めた。

$$S_L^*(fb/U) = f \times S_L(f) / (0.5 \rho U b C_{L\alpha} \sigma_w)^2 \quad (1)$$

ただし、 f : 振動数、 b : 模型幅、 U : 風速、 ρ : 空気密度、 $C_{L\alpha}$: 揚力係数の勾配、 σ_w^2 : 鉛直変動風速の分散である。図3にはストリップ理論の仮定に基づく既往の解析法(空力アドミタンスとしてSears関数を使用)による解析値も示す。ガスト揚力の無次元化パワースペクトルの解析値は当然無次元振動数の関数となるが、測定値の方は測定を行った風速によって異なった値をとっている。理由としては、無次元化の際に用いている一様流中での揚力係数の勾配の値が風速によって異なっていることなどが考えられるが、詳細はさらに検討する必要がある。

4.2 二断面に作用するガスト揚力間のコヒーレンス

2つの断面に作用するガスト揚力間のルート・コヒーレンス(以下単に「コヒーレンス」とする)の測定結果を図4に示す。横軸は無次元振動数としたが、異なる風速におけるコヒーレンスの測定値はほぼ重なっており、コヒーレンスは無次元振動数の関数として表されることが考えられる。

図にはストリップ理論の仮定を用いた場合のコヒーレンス、すなわち2つの断面位置における鉛直変動風速のコヒーレンス(ただしカルマン型のスペクトルに基づく表示式⁴⁾で近似している)も太実線で示している。ガスト揚力のコヒーレンスの測定値は、変動風速のコヒーレンスよりもかなり大きな値をとっている。

後の応答計算に用いることを考えて、測定されたガスト揚力のコヒーレンスの近似式を、カルマン型のスペクトルに基づく鉛直変動風速の表示式を以下のように修正することで求めた。すなわち、低振動数部分の値が大きくなるように乱れのスケールに対応する項を4.5倍し、振動数の増加に伴う減少率を少なくするた

(a) $\Delta y = 30 \text{ mm}$

(b) $\Delta y = 100 \text{ mm}$

図4 ガスト揚力のルート・コヒーレンス (Grid A)

めに振動数 f を $f^{0.74}$ と修正して近似式とした。近似式により求められるコヒーレンスは、図4において太破線で示してあるが、少なくとも無次元振動数が1程度以下では測定値をよく近似している。同じ近似式は、乱れのスケールの異なる気流中においても測定値をよく再現しており、少なくともこの模型断面に対しては一般的に用いることができると考えられる。

4.3 ガスト揚力の測定値と解析値の比較のまとめ

以上の実験結果をまとめると、1) 断面に作用するガスト揚力の大きさに関しては、測定値がストリップ理論の仮定に基づく解析値よりも小さい、2) 異なる断面に作用するガスト揚力間の相関に関しては、測定値がストリップ理論の仮定に基づく解析値よりも大きい、こととなる。これらは、既往の測定結果^{1~4)}と整合しており、また、先に述べた「ガスト空気力のスパン方向の分布は、変動風速の分布よりもなだらかなものとなる」という現象を考察した結果とも矛盾しない。

しかし上記の2つの傾向は、橋梁のガスト応答の大きさに関しては相反する影響をおよぼすため、空気力の定式化の違いによって橋梁のガスト応答の予測結果がどのように異なってくるかは明らかでない。そこで、

測定されたガスト空気力を用いる場合と、ストリップ理論の仮定に基づく空気力を用いる場合の、両方について以下のように実橋を単純化したモデルを対象としたガスト応答を計算して比較した。

5. 空気力の定式化が橋梁のガスト応答に及ぼす影響

中央スパン890mの斜張橋の諸元をもとに、中央スパンおよび橋桁に作用する空気力のみを考慮して鉛直ガスト応答を計算した。橋桁は偏平な箱桁で、桁幅は30.8m、揚力係数の勾配は 5.64rad^{-1} とした。スパン中央での応答を対象とし、鉛直1次および3次モードを考慮した。各モードごとの構造の特性は、固有振動数が0.216および0.337Hz、モード質量が4068および6054t、モード減衰定数はどちらも1%とした。なお振動モードは、1次および3次モードをそれぞれサイン波の0.5および1.5周期に対応するものとして単純化した。

自然風の鉛直変動風速に関する特性は、乱れの強さを10%、乱れのスケールは測定におけるGridAと相似させるために29.1mとした。なお、空力減衰は準定常の仮定に基づくものを用いた。またストリップ理論の仮定に基づく解析においては、Sears関数を空力アドミッタンスとして用いた。

ガスト揚力の測定値を用いてスパン中央でのr.m.s.

図5 異なるガスト空気力の定式化を用いた場合のガスト応答予測結果の比較

図6 異なるガスト空気力の定式化を用いた場合のガスト応答のパワースペクトルの比較

応答を計算した結果を、ストリップ理論の仮定を用いた結果とともに図5に示す。ガスト揚力の測定値を用いた解析は、ガスト揚力の測定値の無次元化パワースペクトルが風速によって異なるので、どの風速における測定値を用いるかによって結果も異なる。したがって応答の大きさについてはストリップ理論の仮定に基づく結果との厳密な比較はできないが、両者の大きさはほぼ等しいといえる。これは、ストリップ理論の仮定によるガスト空気力に比べ、実際に断面に作用する空気力の大きさは小さいが、異なる断面における空気力の相関は大きいために、2つの影響が打ち消し合っているためと考えられる。しかし風速に伴う応答の増加の割合は、測定値に基づく結果の方が、ストリップ理論の仮定に基づく場合と比べて高風速側で大きくなっており、両者の傾向には差がある。

次に図6には風速30m/sにおけるスパン中央での応答のパワースペクトルを示す。ガスト揚力の測定値に基づく結果は、応答の振動数成分が低振動数域に集中しており非共振成分が大きいのに対し、ストリップ理論の仮定に基づく結果では共振点付近での振動数成分が大きい。このように応答の特性についてみれば、ガスト空気力の定式化はかなり影響があるといえる。

5. おわりに

ガスト空気力の特性については、抗力ならびに空力モーメント成分や他の断面形についてなど、まだ明らかにすべき課題は多いが、本研究で対象とした断面に作用するガスト揚力の特性やストリップ理論との違いはある程度定量的に示せたと考えている。また一つの単純な例については、実際測定されたガスト揚力に基づくか、ストリップ理論の仮定を用いるかによって、ガスト応答の計算値の大きさはあまり影響を受けないが、応答の特性はかなり異なる結果となった。このような傾向が一般的なものであるのか、または違う傾向となるケースもあるのかなど、検討を加えていく必要がある。なお、より大きな乱れのスケールをもつ気流のもとでの測定も行っていく必要もあると考えられる。

参考文献

- 1) Lamson, P. : Measurements of lift fluctuations due to turbulence, NACA TN 3880, 1957.
- 2) Sancar, R. and Jancauskas, E.D. : Measurements of cross-correlation in separated flows around bluff cylinders, J. Wind Eng. Indust. Aero., vol. 49, pp.279-288, 1993.
- 3) Larose, G.L., Davenport, A.G., and King, J.P.C. : On the unsteady aerodynamic forces on a bridge deck in turbulent boundary layer flow, Proc. 7th US National Conf. on Wind Eng., UCLA, USA, 1993.
- 4) 木村吉郎、藤野陽三 : パフェティング応答解析におけるストリップ理論の仮定について、構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1049-1058, 1994.