地形による風の歪み

Effect of Topography on Natural Wind

斎藤 通*

Thoru SAITO

When discussing the aerodynamic stability of a structure, in-depth knowledge of characteristics of wind prevailing at the site where the structure is to be erected constitutes an engineering input of vital importance to adding substance to the discussion.

In other words, the construction site wind condition varies with locations from the effects of surrounding topographical features. Therefore, even the structures of identical design, when constructed in different locations, demand different engineering considerations as regards the wind resistance capability or vibration control measures. In addition, take one structure and the exposure to wind is not necessarily uniform over its entire surfaces. Also, the wind effects can totally differ depending on the wind direction.

This paper reviews a series of studies conducted by the authors on the effect of topography on natural wind and consequent structure responses to wind excitation focusing on some particular types of structure chosen as typical examples. The characteristics of winds of winds blowing over the hill top, small islands, or through the channel or strait, were examined and the effects of natural winds deflected by these topographical features on the structures analyzed by such wind effects prediction technique as the observational survey, relief map wind tunnel testing, computerized technique of computational fluid dynamics(CFD), etc.

1. まえがき

構造物の耐風性を論ずるとき、構造物が建設される地点の風の状況（風環境又は風況）を把握しておくことはきわめて重要なことである。すなわち建設地点の風の状況は、周りの地形の影響を受けて場所ごとに違うため、同じ構造物でも耐風設計の考え方や制振対策の必要性は当然異なってくる。現実には、長年特にトラブルもなく使ってきた石油精製のプラントタワーを、オイルショックで工場が閉鎖されたため、他の場所に移設したところ、急に風で揺れ始めたという例もある⁽¹⁾。この原因の一つとしては、建設地点の周りの地形の違い、すなわち現地の風環境の違いが考えられる。さらに、橋梁のように横に長い構造物や超高層のビルやタワーなどの様に縦に長い構造物の場合、一つの構造物でも周りの地形の影響により、構造物全体にわたって一様な特性を持った風が作用するとは限らないし、また、風の吹く方向によっても、全く異なった特性の風が作用することは容易に想像できる。

本論分では、実風観測、地形因子解析、コンピュータによる数値流動解析(CFD)や地形模型風洞試験などの風環境予測技術を用いて、海峡部や谷間、小島や山上の風の特性(歪み)を調べると共に、これら風の歪みが構造物の耐風性にどのような影響を及ぼすかについて、いくつかの具体的な構造物を対象に検討した結果について述べるものである。

2. 風環境の予測手法

構造物の建設予定地点にどのような風が吹くかを予測する手法としては、下表に示すような方法が考えられる。

表1. 風環境の予測手法

No	予 測 手 法	対 象					
		設計風速	風速風向頻度分布	風速空間分布	乱れ強さ	スケール	空間相関
1	実風観測						
	定時長期	◎	△	△	△	—	—
	強風時短期	×	◎	○	◎	○	○
2	地形因子解析	○	—	—	○	×	×
3	数値流動解析(CFD)	—	—	◎	△	×	×
4	地形模型風洞試験	—	—	◎	○	△	△

<記号説明>◎:比較的容易で精度が良い, ○:精度がやや劣る又は計測・解析が大がかりである, △:予測は可能と考えられるが精度が劣る, ×:予測は可能と考えられるが実績がない, —:特に関係のない項目

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

表1より分かるように、風環境の予測と一口に行っても、建設地点に吹く最大風速の予測、風速・風向の頻度分布の予測、乱れの特性予測と目的に合わせて予測する風環境の項目は多岐にわたり、それぞれの予測項目に適した予測手法が有ると考えられる。本項では、表1中 で示す項目について、手法の概要を述べる。

2. 1. 地形因子解析を用いた最少乱れ強さの予測

地形因子解析は、風観測が行われていない架設地点の基本風速の推定に用いられることは周知のことである。しかしながら最近では、上記のみでなく風観測が行われていない地点の乱れ度の予測にも適用が試みられている⁽²⁾⁽³⁾。一般に橋梁の桁断面に発生する空力振動（特に渦励振）については、乱れの成分が振動を安定化する効果があるといわれており、架橋地点に吹く風の最少乱れの強さを予測することは、橋梁の動的な耐風設計の安全性の余裕しるを把握するとともに、ひいては制振対策の必要性を判断する上でもきわめて重要な情報を提供できることになる。図1は開けた平野部の中央を流れる川にかかる橋梁に作用する風の風向別最少乱れ強さを示したものである⁽⁴⁾。図1より分かるように、実風観測結果と地形因子解析結果とは比較的良く一致し、川の軸方向の風の乱れが小さく、川に直角方向の風の乱れが大きくなっている様子が分かる。本手法は、地表面の粗度の違いを評価するのに有効な手法であるが、最近では地形の起伏も因子解析に組み込み、適用範囲を広げる試みがなされている⁽⁵⁾。

図1 平野の中央部を流れる川にかかる橋梁

に作用する風の風向別最小乱れ強さの推定

2. 2. 数値流動解析(CFD)を用いた風速の空間分布の予測

数値流動解析(CFD)は、既に構造物周りの流れの解析などに一部実用化が図られているが、最近では地形の周りの流れの解析にも適用され、風環境の推定への適用化が試みられている。図2及び図3はその一例で、差分法のうち有限体積法の一つである「SIMPLE法」をベースとした数値流動解析手法(乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを使用)を、基本地形および実地形周りの流れの解析に適用して得られた風速の増速率分布の推定計算結果を示したものである⁽⁶⁾。図2及び図3より分かるように、計算値と実験値は比較的良い対応を示しており、崖や丘の上、また谷間における風速の増速が数値流動解析でも再現できている事が分かる。更に最近では、推定精度向上の為、地表面粗度モデルの導入など、地形周りの流れ解析特有のモデルについても検討が進められている⁽⁷⁾。

図2 基本地形(崖状地形)周りの風の増速率の推定⁽⁶⁾

(1) 丘状地形

(2) 谷状地形

図3. 実地形(丘状、谷状地形)周りの風の増速率の推定⁽⁶⁾

2. 3. 地形模型風洞試験を用いた風速及び乱れ強さの空間分布の予測

建設地点周りの地形の縮尺模型を用いて、風洞において気流計測を行うことにより、現地に吹く風の空間分布特性を調べる事は、古くから実施されてきた。しかしながら、風洞の大きさに制約があり模型を十分大きくすることが出来なかったこと、また地形模型の表面粗度の取り扱いが不十分であったため、現地における実測結果との対応で、整合性がしばしば問題となることがあった。最近では、大型の風洞が建設され、また地形模型の表面

図4 縮尺1/200の粗度要素模型例

図5 粗度要素と上空風速鉛直風速分布の関係

図6 地形模型風洞試験例(縮尺1/2000)

粗度の再現方法に定量的な検討が試みられるようになったため⁽⁸⁾、現地の風特性(平均風速だけでなく乱れ強さについても)を比較的精度良く推定できるようになってきた。図4及び図5には地形模型表面に取り付ける粗度要素の形状と上空の風速鉛直分布の一例を、また図6には粗度要素を取り付けた地形模型風洞試験の一例を示す。

3. 実構造物への適用

本項では、前項で述べた予測手法のうち、地形模型風洞試験を用いた風環境の予測結果と耐風設計への適用について、具体的な実構造物を対象にいくつかの例を述べる。

3. 1. 海峡・谷状地形の風

1) 多々羅大橋(本州四国連絡橋公団)⁽⁹⁾

多々羅大橋は、生口島と大三島の間に挟まれた海峡に建設される超大型の斜張橋である。本橋の場合、海峡に斜めに風が吹き込む時、両側の島の影響を受け、橋の両端の島の近くでは、流れが減速又は加速されると共に、島から発生する渦により乱れが大きくなることが予測された。図7には、縮尺1/2000の地形模型を用いた気流風洞試験の結果を示す。

図7より分かるように北よりの風が作用したとき、生口島の影となる側径間と中央径間の一部に作用する風は、減速されるとともに大きく乱され、大三島側の側径間と中央径間の大部分に作用する風とは特性が異なる。すなわち、架設途上などで桁を張り出している状態では、全体に一樣な強い風が作用する場合よりもかえって危険な場合も考えられ注意が必要である。本橋では、上記を踏まえ、解析的に設計の安全性を確認すると共に、大型の風洞を用いて周辺地形の一部を再現した全径間模型試験を実施し、地形による風の歪みを考慮した耐風設計がなされた⁽⁸⁾。

図7 多々羅海峡の風

(桁位置における風速と乱れ強さの分布)

2) 女神大橋(長崎県)⁽¹⁰⁾

女神大橋は長崎湾口に架かる大型の斜張橋で、架設地点は両側を山で囲まれた谷状地形になっている。そのため、橋の両端部の陸に近いところでは地形の影響を受け、加速又は減速された風が作用すると共に、大きく乱れた風が作用することになる。図8には縮尺1/2000の地形模型の風洞試験状況を、また図9には風観測点における風向別の風速及び乱れ強さについて、実風観測結果と風洞試験結果を重ねて示す。図9よりわかるように実風観測結果と風洞試験結果は比較的良く一致し、両結果から風向別の地形の影響による風の歪みを明らかにする事が出来た。

図10には南よりの風が作用したときの橋に作用する風の風速

図8 女神大橋地形模型風洞試験(縮尺1/2000)

図9 風観測地点における風向別風速及び乱れ強さ

(実風観測結果と風洞試験結果の比較)

空間分布を示す。図10より分かるように、観測点と同じ側の側径間では、図9にも見られた様に、近傍の尾根状地形により増速した流れが作用しており、多々羅大橋同様橋軸方向に風荷重が変化する事が予測された。数値解析結果によると、本橋の場合、図11に示すように、風の歪みにより完成系の場合は本四公団の耐風設計基準⁽¹¹⁾よりやや小さめの変形量を与えるが、架設時には主塔を鉛直軸周りにねじる力が発生するなど注意を要する事が分かった。本橋についてもこれらの成果を踏まえ、耐風設計に地形による風の歪みの影響を取り入れて行く予定である。

3. 2. 小島・山上の風

1) 来島大橋(本州四国連絡橋)⁽¹²⁾

来島大橋の場合は多々羅大橋と同じ海峡部の海上橋梁ではあるが、幅の広い海峡上に小島が点在する多島海の地形の影響を受け、歪んだ風が橋梁の一部に部分的に作用する事が考えられる。図12には縮尺1/15000の来島海峡の地形模型風洞試験の状況を、また図13は試験結果の一例を示す。

図13より、来島大橋の場合、南東より海峡沿いの風が吹いた時、前流側の館山(半島)並びに周りに点在中渡島などの小島の影響を受けて、平均風速、傾斜角、乱れ強さが橋軸方向で変化する、部分的に風が歪んでいる様子が良く分かる。本橋の場合、上記を受けて、全径間模型を用いて、部分的に歪んだ風を作用させた風洞試験を実施し、動的な耐風設計に反映させている。

図10 女神大橋に作用する風の空間分布(風速比 U/U_0)

図11 ガスト応答計算結果(風の歪みの影響)

図12 来島大橋地形模型風洞試験状況(縮尺1/15000)

図13 来島大橋に作用する風の空間分布(南東よりの海峡沿いの風)

2) 日仏友好のモニュメント（兵庫県）⁽¹³⁾

日仏友好のモニュメントは淡路島の北部の山上に建設される大型の門型の構造物（図14参照）である。本構造物は山上の風環境の非常に厳しい

図14 日仏友好のモニュメント概略図

所に建設される上、さらに南東の方向にほぼ同程度の高さの山（篝場山）があるため、周囲の地形の影響を受けることが予測され、地形模型を用いた風洞試験が実施された。その結果、図15、図16に示す様に、建設地点では、地上（岩屋観測所）の約2倍の強さの風が吹くと共に、南東の風では、前流側にある篝場山の影響を受けて、大きく乱れた風が作用する事が判明した。また、図17に示す様に、篝場山の影響は、モニュメントの碑盤軸方向の風の空間分布特性にも現れていることが分かった。本構造物については、上記の地形による風の歪みの影響を考慮する為、モニュメント周辺の一部の地形も再現した境界層乱流中の全体模型風洞試験（図18参照）を実施し、動的並びに静的な耐風設計に反映させた。

図15 建設地点周辺の地形及び地形模型再現範囲

試験風速: 8m/s (境界層外の風速)

図16 モニュメント碑盤中央における気流特性

図17 モニュメント脚部及び碑盤設置位置における風の空間分布

4. あとがき

以上に示すように、建設地点の風の特徴（地形による風の歪み）を調べることは、構造物の耐風設計上非常に重要なことである。地形による風の歪みとしては、増速効果や風速分布の不均一から生ずる風荷重やモーメントの増大効果だけでなく、風向別の設計風速の低減や、乱れによる応答の低減効果も期待でき、これら地形による風の歪みを耐風設計に反映させることにより、過不足の無いより合理的な耐風設計が可能となるものと考えられる。建設地点の風の歪みを予測するには、比較的容易でパラメータを変化させることが出来る「地形因子解析」や「数値流動解析（CFD）」、「地形模型を用いた風洞試験」などのシミュレーション技術が有効と考えられるが、これらの手法にはそれぞれ特徴があり、設計段階や目的に応じて使い分けると共に、今後も引き続き実測結果の積み重ねを行い、これらの予測手法の信頼性向上を図ることが重要と考えられる。

図18 周辺地形を再現した境界層乱流中の
全体模型風洞試験(縮尺1/250)

参考文献

- 1) 安浪金蔵, 斎藤通, 「橋は風で揺れるのか」, 虹橋37号, 1985. 8
- 2) 平井滋登, 斎藤通, 本田明弘, 「周辺地形を考慮した架橋地点における自然風の乱れ特性推定の試み」, 土木学会年次学術講演会概要集, 1992
- 3) 平井滋登, 斎藤通, 本田明弘, 「自然風の乱れ特性の推定に関して」, 日本風工学会誌, 1993. 5
- 4) 三菱重工業(株), 「耐風」, パンフレット, 1994
- 5) 平井滋登, 中村明道, 斎藤通, 本田明弘, 「地形の起伏の影響を受けた気流の乱れ特性」, 土木学会年次学術講演会概要集, 1993
- 6) 串岡清則, 斎藤通, 本田明弘, 「複雑地形周り流れへの流動解析の適用」, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994
- 7) 串岡清則, 斎藤通, 本田明弘, 「流動解析を使った局所地形による風速のひずみの推定」, 日本風工学会誌, 1995. 4
- 8) T. MIYATA, H. SATO, M. KITAGAWA, S. SUZUKI, T. SAITO, "FULL MODEL WIND TUNNEL TESTS FOR A VERY LONG-SPAN CABLE-STAYED BRIDGE:TATARA BRIDGE", PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON CABLE-STAYED AND SUSPENSION BRIDGE, DEAUVILLE, 1995
- 9) 平井滋登, 北川信, 勝地弘, 佐藤弘史, 斎藤通, 「多々羅大橋大型風洞試験における地形模型再現方法の検討」, 土木学会年次学術講演会概要集, 1994
- 10) 本田明弘, 宮崎純夫, 石岡太, 坂庭泰夫, 「複雑地形における風環境と耐風設計に関する研究—女神大橋の静的耐風設計—」, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994
- 11) 本州四国連絡橋公団, 「本州四国連絡橋耐風設計基準・同解説(1976)」, 1976
- 12) 平井滋登, 大橋治一, 楠原栄樹, 本田明弘, 「多島海における風の特徴について—米島海峡に関する実験的研究—」, 第12回風工学シンポジウム論文集, 1992
- 13) 斎藤通, 白石成人, 大熊武司, 齋藤博, 前田昌利, 「「日仏友好のモニュメント」の耐風性調査—周辺地形の影響を考慮した耐風検討—」, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994