

架橋地点の風環境に即した橋梁の耐風設計法に関する研究

Aerodynamic Design of Bridge Considering Wind Environment Due to Surrounding Topography or Terrain

技 術 本 部 斎 藤 通^{*1} 本 田 明 弘^{*2}
平 井 滋 登^{*2} 所 伸 介^{*2}
長 崎 造 船 所 今 金 真 一^{*3}

近年都市域の橋梁においては、幅の狭い橋梁の建設・遮音壁の設置等が行われ、断面形状による空力特性は劣化する傾向にあり、現実的な耐風性評価に際して都市域での風環境を考慮することが必要になってきている。また、空力特性に配慮した橋梁でも起伏に富んだ地形に架橋される場合には、複雑な特性の風が作用することが指摘され、従来の海上に建設される長大橋を対象に策定された橋梁の耐風設計法に対して、風環境に即した合理化が求められている。本報は、都市域橋梁の耐風設計において建築物容積率の平面分布を用いた設計風速・風荷重の設定法、また複雑な地形状況に架橋される橋梁に関しては、地形模型による風洞実験結果を用いた設計風速・風荷重の設定方法を提案するものである。

Bridges in urban or hilly topography require aerodynamic design considering wind conditions. Previous aerodynamic design rules of long-span bridges in Japan depended on the environment at the site. This paper emphasizes the importance of aerodynamic design depending on wind direction. Urban bridges must take into account the density of surrounding housing. Bridges surrounded by complicated topography require wind tunnel tests using topographical models.

1. ま え が き

橋梁と風の関係については、風の作用を受ける橋の設計に関するものと、橋梁が建設されることによる周辺の風環境の変化に関するものが考えられるが、本報は前者に関するものである。

従来の国内における橋梁耐風設計法としては、全国で一律の風荷重を定めた道路橋示方書⁽¹⁾のほか、橋梁ごとに周辺のデータを用いて設計風速を定めた本州四国連絡橋耐風設計基準⁽²⁾、後述する動的耐風設計についてのみ全国を対象とした風速マップを用いる道路橋耐風設計便覧⁽³⁾がある。

都市域に建設される橋梁に関しては、周辺環境への配慮から遮音壁が設置されるケースが増大し、その場合の風荷重はときとして極めて大きくなる。これに対して道路橋示方書⁽¹⁾では“風荷重を0.8倍に低減することができる”としており、都市域での風荷重評価が重要となりつつある。

また長大橋においても、周辺地形の起伏が激しい場合には従来の耐風設計法では対処できない事例が生じており、“架橋地点の風環境に即した橋梁の耐風設計法”が必要となってきている。

2. 従来の耐風設計手法

従来の耐風設計の考え方について、以下に簡単に要約する。

2.1 静的耐風設計

いわゆる風荷重 P として知られているのは、式(1)から求められる水平荷重である。

$$P = \frac{1}{2} \rho V_0^2 C_d G \cdot A \quad (1)$$

ここで、

ρ : 空気密度
 V_0 : 設計風速
 C_d : 抗力係数
 A : 面積

G : 風の乱れに起因する振動(ガスト応答)を考慮するための、ガスト応答係数

ここで、設計風速に関しては、道路橋示方書⁽¹⁾では全国一律・高度によらず平均風速 40 m/s、瞬間風速 55 m/s が与えられているが、現実には架橋地点の地域特性、周辺の地形・地物、高度によって変化することはいうまでもない。また橋梁形式によっては、鉛直方向の風荷重を想定することが必要な場合もある。

2.2 動的耐風設計

一方で吊橋や斜張橋のような比較的柔らかな橋梁に関しては、上記の風荷重の評価に加えて、風による空力振動を想定した動的な耐風設計が実施される。また近年では、上記形式の橋梁のほかにも、桁(けた)橋・アーチ橋等でも動的な耐風設計が実施される場合もあり、その理由としては以下の要素が挙げられる。

(1) 長支間化

支間長を長くすると必然的に構造が柔らかくなり、風による振動が発生する風速が低風速となる。

(2) 狭幅員の採用

支間長が従来規模であって、幅員が小さな新交通橋梁・ランプ橋・小車線数等の橋梁では、風による振動が発生する風速が低風速となる。

(3) 遮音壁・遮風壁の設置

周辺への環境配慮のための遮音壁や、路面を走行する車両の強風下走行性能を向上するための遮風壁が、橋梁に設置され、桁の空力特性が劣化する。

これらの原因で動的な耐風設計が必要となった場合、現地の風環境に即して空力振動に対する照査風速・气流傾斜角・乱流特性を設定する必要がある。

場合によっては、10 m 高度において道路橋示方書⁽¹⁾の平均風速 40 m/s を用い、高度補正等を本州四国連絡橋耐風設計基準⁽²⁾により行い、上記の静的及び動的な耐風設計が行われる例があるが、これらの基準は海上における風の特性をモデル化したものである。

*1 長崎研究所次長 工博

*2 長崎研究所流体研究室

*3 造船設計部新製品計画課

ため、現実の周辺環境との差異が大きい場合には、適宜修正が必要であるものと考えられる。

この修正作業には専門知識を必要とし、設計的にも煩雑と考えられるかもしれないが、風荷重の影響が大きい構造物を合理的に設計するには必要な手順であり、これを簡単に行う方法を追求すべきである。

3. 都市域における耐風設計

都市域の内陸部に建設される橋梁は、周辺には人家が存在する場合が多い。このことを考慮して耐風設計を実施する場合、いわゆる“粗度区分”の概念を適用して風条件を設定することが行われる。しかしながら、都市内の河道上に架けられる橋梁や、方位によって周辺の建屋の状況が異なる場合など、どのように適用すべきか判断に迷う場合も少なくない。

3.1 都市域の気流特性

一般に都市域の気流特性は、湾岸部の気流に比べると地表面の建物などによって平均風速は低下して、乱れ強さは大きい。

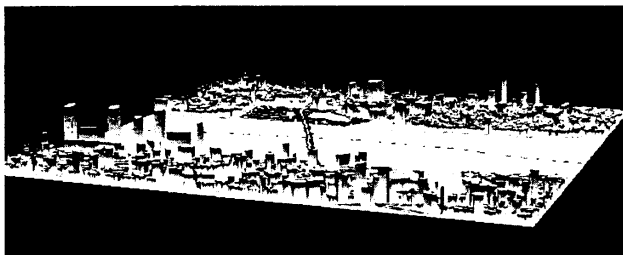
図1には大阪市内の淀川に架橋された橋梁上に設けられた観測地点の周辺の状況及び観測された乱れ強さの風向特性を示す⁽⁴⁾。特に淀川の河道方向において、乱れの強さは水平方向・鉛直方向共に他の風向よりも減少しており、都市域の風といえども周囲の影響を大きく受け、風向依存性が顕著であることが分かる。

3.2 周辺環境と気流特性の関係

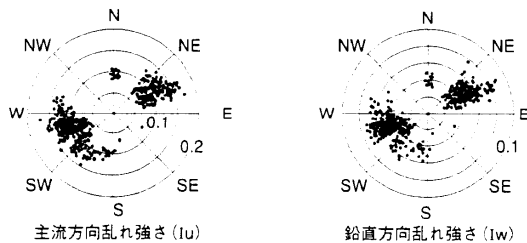
ここで周辺の粗度の状況を、地方官公庁が所有する都市計画データの中からグロス容積率(図2参照)に着目し、風の特性を示す基本量としての粗度長 z_0 との対応を検討してみる。

図3には、図1の乱れ強さから推定式⁽⁵⁾を用いて方位分布に換算した粗度長 z_0 と、観測地点の周辺のグロス容積率を測定高度の50倍に相当する半径約1 kmの扇形で16方位に分割し平均化したグロス容積率から亀井・丸田の式⁽⁶⁾を修正した式(2)で推定した粗度長 z_0 を、風向ごとに比較して示す。

$$\gamma = 379.1 \left[\ln \left\{ \frac{z_{10}}{z_0} + \frac{7}{\exp \left[0.75 \frac{z_0}{z_{10}} \right]} - 2.5 \right\} \right]^{-3.37} \quad (2)$$



(a) 観測地点周辺の状況



(b) 乱れ強さ観測結果

図1 市街地における風観測点及び観測結果 周辺の建築物の状況に応じて乱れ強さが風向特性を有する。
Wind observation in urban area

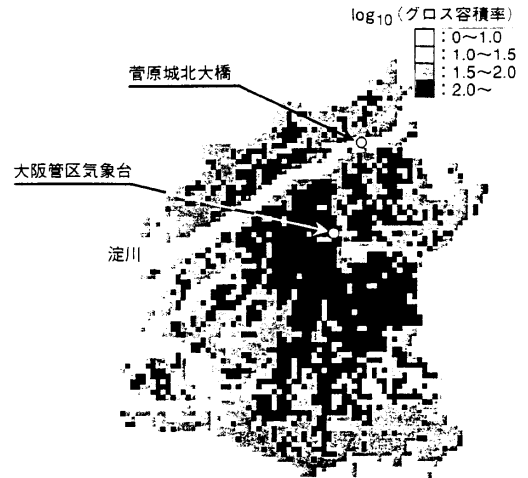


図2 大阪市域におけるグロス容積率の分布 市街地でも建築物の密度は複雑に分布している。
Volume of buildings in Osaka area

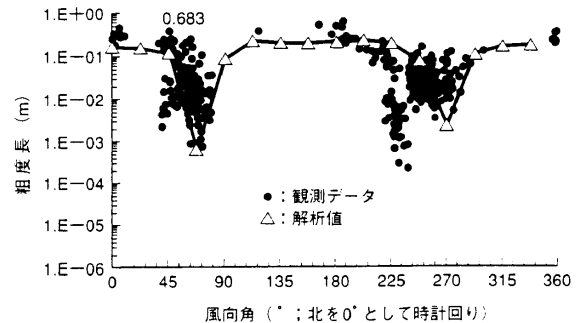


図3 乱れ強さから換算した粗度長及びグロス容積率から求めた粗度長 観測点周辺の粗度が減少する河道方向で減少する傾向にある。
Roughness length from turbulent intensity and volume of buildings

ここに、

γ : 前述の定義によるグロス容積率

z_0 : 粗度長

z_{10} : 標準高度 (ここでは 10 m)

大阪湾からの淀川筋に当る 225°付近で若干差異が認められるが、両者は比較的良好な相関を示し、比較的平坦な都市域においては、周辺建物のグロス容積率を用いて粗度長 z_0 を求めることができる。

3.3 耐風設計への反映

これらの風特性と設計条件を結び付けるには、風の特性のみならず設計風速の評価が必要であり、比較的長期の観測が実施されている気象官署のデータを用いることとなる。気象官署の風観測記録も周辺の粗度の影響を受けているものと考えられるため、上記手法を用いて粗度長 z_0 を求めれば、気象官署の風速と架橋地点との風速の相関関係を風向ごとに求めることが可能である。

図4には、大阪管区気象台での観測記録及び周辺の粗度から推定した上空風速の100年期待値の方位特性を示す。図から、大阪地区では瀬戸内海から吹付けるWNW、紀淡海峡から吹付けるSSW及び淀川筋に吹降すENEの風で期待値が高く、風向依存性を有することが分かる。

この特性と架橋地点周辺の粗度から、両地点における地形による風向のひずみが大きくないことを仮定すれば、耐風設計条件を

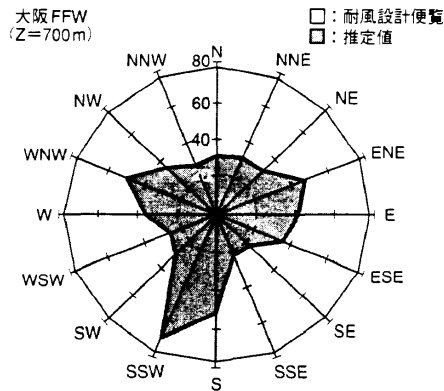


図4 大阪管区気象台の観測記録と周辺の粗度分布から求めた上空風速の100年期待値
紀淡海峡・瀬戸内海・淀川筋での期待値が大きい。
Estimated extreme wind speed for 100 year return period above Osaka area

求めることができる。

4. 複雑地形における耐風設計

日本の地形は起伏に富み、架橋地点の周辺での風の状況を把握することも容易ではない。

ここでは、特に地形の起伏の影響が大きかった長崎県に建設中の斜張橋に対する検討例⁽⁸⁾⁽⁹⁾を紹介し、設計上の注意点を示す。

4.1 複雑地形の気流特性

図5には、橋梁周辺の地形起伏及び架橋地点近傍で観測された風の特性を示す。風の観測点はいずれも観測点近傍の地形の影響を大きく受け、乱れ強さ・平均傾斜角・両地点の平均風速比は風向によって大きく変化している。

特に南(S)から南南西(SSW)の間で大きく変化していることが分かり、縮尺 1/2 000 の地形模型を用いた風洞実験にて橋梁に作用する風の平均風速・乱れの強さ・傾斜角の分布特性を調査した。

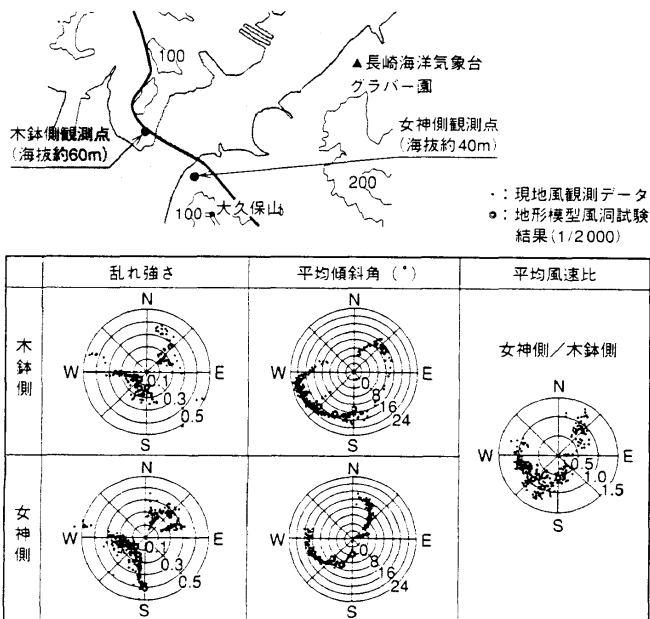


図5 複雑地形における風観測点及び観測結果 風の乱れ強さ・傾斜角・両地点での平均風速比が、風向によって大きく異なる。
Wind observation in complicated topography

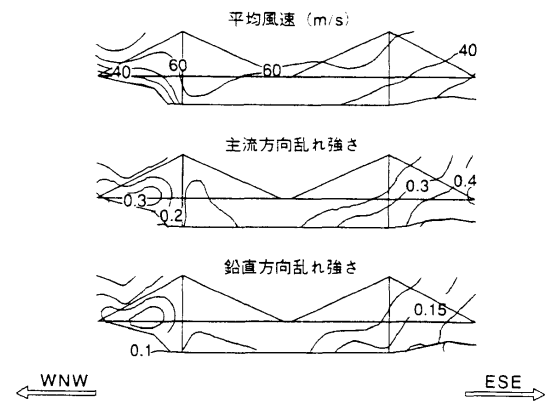


図6 複雑地形に架橋される橋梁に作用する風の特
性 周辺地形の影響を受けて、気流特性が大きく分布する。
Wind characteristics acting on bridge in complicated topography

その結果、南(S)風向において、架橋位置の南側に存在する山の後流が橋梁付近に作用して、平均風速が大幅に減速し、乱れが増大した気流が橋梁に対して部分的に作用することが判明した(図6参照)。

これらは通常の耐風設計にてモデル化されている風の特性と大幅に異なり、これに応じた耐風設計法を検討する必要がある。

他の長大橋においても、周辺の地形の後流域に橋梁が位置する風向において、同様な現象が報告⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾されており、周辺の地形起伏が激しい場合には特に注意が必要である。

このような複雑地形における風の特性を、前章の都市域におけるグロス容積率のような諸量(地形因子)から求める試みや、CFDを用いた検討も行われているが、現時点では地形模型による風洞実験のデータが最も信頼できるものと考えられる。

4.2 耐風設計への反映

このときの設計風速に関しては、周辺地形の影響が風向に大きく依存していることを考えると、さらに方位特性を考慮する必要性は高い。特に、周辺の気象官署も地形の影響を受けていることが考えられる場合には、橋梁近傍に適切な観測点を設けて気象官署との相関関係を調査し、既述のような地形模型による風洞実験などによって、橋梁位置への換算を行う必要がある。

複雑地形における気流特性の特徴は、線状構造物である橋梁に対して、平均風速・乱流特性が複雑に分布して作用することである。これらの特徴を耐風設計に盛込むために、設計の比較的初期段階に用いることができる簡易的な設計手法について以下に述べる。

まず橋梁の各点における平均風速・平均傾斜角・変動風速を用いて平均風荷重・変動風荷重を求める。

$$P_i = \bar{P}_i + \bar{P}_i \quad (3)$$

ここで、

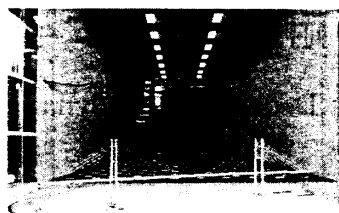
$\bar{P}_i$: i 点に作用する時間平均風荷重

$\bar{P}_i$: i 点に作用する変動風荷重

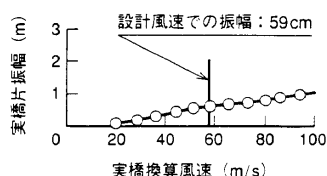
時間平均風荷重は分布荷重として載荷して評価し、次に各点の変動風荷重を橋梁の着目する振動モードに関して積分し、一般化された変動風荷重(ガスト応答)を評価することとなる。

またガスト応答に関して、上記の風外力に対する補正のほか、平均風速の変化に伴い空力減衰が変化して、振動に及ぼす影響が大きく、合せて補正を加える必要がある。

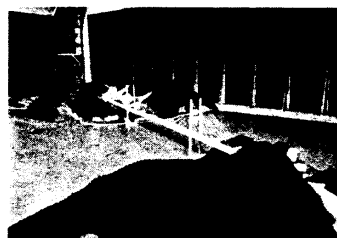
既存の設計基準でモデル化された風特性を用いて橋梁の断面力



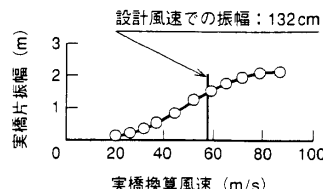
○：中央径間中央鉛直たわみ変位
べき指数：0.12
桁高さにおける乱れ強さ： $lu=10\%$ （主流方向）
 $lw=6\%$ （鉛直方向）



(a) 境界層乱流中



○：中央径間中央鉛直たわみ変位



(b) 地形乱流中

図7 橋梁の鉛直方向振動に対する気流特性の影響 地形乱流における鉛直方向の振動振幅が、境界層乱流中での振幅の2倍程度に増幅されている。
Vertical gust response of bridge due to turbulence

の算定がなされておれば、上記の平均風荷重及び変動荷重に対する補正係数を別個に求めて全体の風荷重を補正することができる。

気流の平均風速・乱れ強さ・傾斜角の分布を考慮して前記の解析を実施したところ、本州四国連絡橋公団耐風設計基準⁽²⁾においてモデル化された風による応答に対しては、鉛直方向の不規則振動が54%増幅することが予測された。

照査の段階で実施された周辺地形と橋梁を再現した模型実験の結果を図7に示す。地形による気流特性を考慮した場合の鉛直方向のガスト応答が変位にして約2倍程度の増幅が生じることが判明した。これらの実験値と解析値の差異については、乱流の風速変動における周波数特性・空間的な相関特性の地形によるひずみが原因と考えられるが、定性的には前記の簡易手法を用いることができる。

また動的耐風設計における照査風速・傾斜角の範囲についても、風速方向及び鉛直方向の乱れを準定常的に評価する従来の方法を用いれば、同様な計算で従来の設計法で求められた値を補正することができる。しかしながら、特に乱れ強さが大きい場合には上記手法が過大な評価につながることもあり、流体力そのものが変化する場合もある。

さらに、特に海面を有する地形において、空力振動が比較的低風速で生じる可能性のある場合には、海・陸の熱交換によって発生する気流特性が大きくなるため、気流特性は幅を持って評価する必要がある。

5. ま と め

都市域・複雑地形に囲まれた橋梁に作用する耐風設計法に関して述べたが、まとめると以下ようになる。

(1) 橋梁に作用する気流特性

比較的地形起伏の少ない都市域に関しては、グロス容積率から粗度長を推定することで、気流特性を概略推定することができることを示した。複雑地形の気流特性は特に地形起伏から生じる渦が橋梁に作用する場合に、平均風速・乱れ強さなどが激しく分布し、従来の耐風設計でモデル化された気流特性と大きく異なることを示した。

(2) 静的耐風設計法

風荷重の設定に関しては、上記の気流特性・設計風速を考慮し、従来の耐風設計手法に対して補正を加えることができる。また、特に複雑地形における気流が作用した場合、従来の設計法による風荷重を超過する場合もあり、設計初期段階からの注意が必要であることを示した。

(3) 動的耐風設計法

風による振動現象を照査するための、照査風速・乱れ強さに関しては、“気流の乱れを、風速及び傾斜角の幅として評価する、準定常的な考え方”に立つと、気流特性を考慮して補正することが可能であることを示した。

ただし、風による振動現象が比較的低風速で生じる場合には、大気安定条件によって気流特性が大きくなることを示すため、設計的に考慮すべき気流特性は幅を持って評価する必要がある。

参 考 文 献

- (1) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 (1994)
- (2) 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)
- (3) (社)日本道路協会, 道路橋耐風設計便覧・同解説 (1994)
- (4) 本田ほか, 菅原城北大橋の風環境に関する考察, 土木学会第49回年次学術講演会, I-498 (1994)
- (5) Engineering Sciences Data Unit Ltd., Wind Engineering
- (6) 亀井ほか, 風速の垂直分布における粗度パラメータに対する3次元粗度密度の適応について, 構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム (1971)
- (7) 斎藤, 地形による風の歪み, 日本風工学会誌第67号 (1996)
- (8) 本田ほか, 複雑地形における風環境と耐風設計に関する研究, 第13回風工学シンポジウム (1994)
- (9) 本田ほか, 地形乱流中における斜張橋のガスト応答に関する研究, 第15回風工学シンポジウム (1998)
- (10) 平井ほか, 多島海における風の特性について, 第12回風工学シンポジウム (1992)
- (11) 木村, 円錐形の山の後流中の平板片持ちばり橋梁模型の鉛直応答特性, 第15回風工学シンポジウム (1998)