

橋梁と気象

奥田 穰*

1. はしがき

いよいよ本講座も最後である。土木について門外漢の私がよくここまで漕ぎつけたのものである。これも編集部をはじめとする土木学会会員諸兄のご援助の賜と深く感謝している。

橋梁建設に当って考慮されるべき気象条件となると、風、降水、温度等の条件ということになろう。このうち雨の場合は、どんな豪雨が降ろうと、雨だけでは問題が起こるようなことはあり得ない。流水となって、はじめて橋に対する破壊力が生まれる。

気温変化や日射の影響は、幸にも橋梁は地表面に高い空中にあり、しかも大部分は河や海の上に架設してあるために、道路面ほど激しいことはないと思われる。そして、問題となる点は、気温の急激かつ大幅な変化や部分的に温度差が大きくなって応力が発生することだろう。気温変化の較差は、橋梁の位置では陸地表面上の百葉箱内で観測された値より大きくなることはないだろう。しかし、橋梁の日射のよくあたる部分と影の部分の温度差あるいは橋梁各部位の温度日変化は問題となるだろう。

風の場合は、強風の程度と風向および強風の乱流構造が問題になるだろう。特に、近年、海峡を越えて島を結ぶ長大橋の架設が始まったが、風は非常に大事な問題となってきている。

以上のほかに、積雪地帯では、積雪荷重や「なだれ」が問題となるだろう。

問題点は以上のように考えられるが、橋梁関係で一番問題になっているのは風と考えられるので、本稿でも風に重点を置いた検討を加えることにする。

2. 雨

いくら降雨強度が強くなろうと、雨滴の衝撃力によ

て橋梁が直接破壊されることはないと思われる。雨が表流水、伏流水等の流れとなった後に橋梁との関係が問題となる。それゆえ、架橋の場合の雨に対する配慮は河川計画で検討された資料を基にして、河川断面積と流量との関係、断面積内の流速分布、架橋による流水に対する影響、流木等の漂流物に対する配慮などの検討が、橋梁の強度を決定する立場からと、架橋が与える種々の影響を検討する立場の両面から行なわれなければならない。もちろん、これは現実に行われていることと思われるし、気象の範囲以外のことであるので、これ以上のことには触れない。

3. 気温その他の温度変化

温度変化の影響として検討の加えられる点を「土木工学ハンドブック」で見ると、「……………一般には架設時の温度を基準として温度上昇、降下を考えるわけであるが、架設時の温度はあらかじめ個々の場合に決定しがたいから、最高最低の温度と、温度の上昇・降下に対する標準との差を特に寒冷の地方などを除きそれぞれ鉄道橋で 40°C、道路橋で 30°C と規定している」。また「道路橋では日光直射部分と日陰部分の温度差として 15°C を標準にしている……………」とある。

温度の影響を考える場合には、橋梁全体を取りまく環境の温度変化と、橋梁各部位の温度変化およびその各部位間の差に分けて考える必要がある。

上記「土木工学ハンドブック」の最高最低の温度と標準値との差というのは、橋梁全体をとりまく環境の温度変化を問題にしていると思われる。最高気温と最低気温との1日における差を日較差、1年における差を年較差という。「土木工学ハンドブック」を見たかぎりでは、重要なのが日較差なのか年較差なのかははっきりしない。毎日最低の平均と毎日最高の平均を月ごとに求めた値は、あくまでも平均値であり、必ずしも要求に適した値とはいえないのである。日較差が重要であれば、月ごとに日較差の度数分布を求める必要があるし、年較差が重要であれば、これまた年々の年較差の度数分布を調べる必要があるだろう。

一般に、日較差や年較差は海や河川近傍の方が小さく、内陸部が大きい。また、地上 100 m くらいの高さの範囲では、上層に行くほど較差が小さい。それゆえ、架設位置の気温較差は、百葉箱で測定した値よりも小さいものと考えられる。気温較差を大きくする条件は、直達日射量が強いことと、夜間放射が激しいことであり、それには大気中の水蒸気量が少ない必要がある。日本国内では規定以上の温度差が現われるところはきわめて少ないだろう。

* 気象庁気象研究所 台風研究部第二研究室長

つぎの部分温度差 15°C という条件に移ろう。部分温度差が大きくなるのは、主として直達日射量の大きい場合と考えられる。鋼材上の測定値は知らないが、東京、大阪等の気象台露場で測定した地面温度では、7、8月は 50°C を越えることが多くなる。地面温度の 6 時と 14 時の差が 30°C を越すような大きい変化をすることも数少ないがある。道路面温度の日変化は、さらに大きい振幅で行なわれているものと思われる。

以上の考察から、国内の橋梁架設には、気温変化よりも部分温度差の方に対する配慮が重要なのではないかとと思われるが、どんなものであろうか。

4. 風

「土木工学ハンドブック」によれば、風荷重を計算するための基本式として、単位面積当りの風圧を

$$p = c \rho v^2 / 2 \dots \dots \dots (1)$$

で表わしている。ここで p は風圧 (kg/m^2)、 c は物体の形状・寸法などによって変化する風圧係数、 ρ は空気密度 (通常 $0.125 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}^4$)、 v は風速 (m/sec) である。そして、風圧を 300 kg とし、途中を省略すると、道路橋では風速として 55 m/sec 付近が考えられているし、鉄道橋では 51.6 m/sec 程度が考慮されていることである。

まず、風荷重の計算に用いる風速から問題にしよう。風荷重の計算に必要な風速は、(1) 橋梁全体に平均的に与える風圧との関連で平均風速、(2) 橋梁に振動現象を与える風速の瞬間的な変動 (乱流)、さらに、(3) 橋梁の各部位に対して異なった力を与える空間的な風速分布 (乱流構造も含めて) が問題となろう。特に海峡等に架設しようとしている長大橋には (2)、(3) が問題になるはずである。

(1) 平均風速

橋梁全体に与える風荷重を計算するに必要な平均風速とは、どんなものであろうか。現在の風速計は、ある一点あるいは橋梁に比してきわめて短い区間における風速の時間変動を測定するようになってきている。それゆえ、平均風速といっても、適当な時間平均を行なった値を用いているわけである。海峡等の長大橋の場合には、この時間平均を行なった平均風速でも、接岸部と海峡の中心とでは一般に大部違った値となる。それゆえ、一点の風速観測値で海峡全区間の平均風速をとることはまずいという結果を得る。橋梁全体にかかる平均風速は、全区間の空間平均風速を採用するのが理想的である。これまで、この目的に適した測器がないために、測定可能な地点の時間平均風速を求め、さらに各地点の時間平均風速を平

均して全区間の平均風速に代用するという方法を採用している。

最近、音響測器の発達によって、500 m 程度の距離区間の平均風速を直接測定することが可能になってきている。さらに、距離を延ばしたい場合には、途中に中継器 (transmitter) をつければ可能である。精度は距離が延びれば落ちるけれども、 m/sec 単位での測定は可能と思われる。まだ実際に使用した例を聞かないが、空間平均風速を実測で求めるのにはよい方法と考えられる。

気象庁で採用している平均風速は 10 分間平均であるが、この平均風速をそのまま橋梁対象として採用してよいかは疑問である。10 分間平均風速は高・低気圧や前線などの、相当広範囲に影響を与える気象現象を把握するのに適しているが、地形摩擦によって発生する渦乱流の影響を強く受ける局地の風を検討するには適しない。橋梁の場合に、どの程度の時間平均が適当であるかは、一つは風速変動を与える渦の大きさから、他の一つは橋梁の固有振動周期から決定されることだろう。

参考までに一般に使用されている風速計の風速に対する追従速度をあげると、三杯風速計は 0.4 (加速) ~ 1.5 秒 (減速)、エエロ ペインは 0.3 (加速) ~ 0.6 秒 (減速) で、ダインス風圧計は両者の中間にある。ただし、これは風速 50 m/sec の場合である。加速する場合と減速する場合とで相違が出てくるのは、inertia のためである。追従速度以下の微小変動はカットされる。橋梁を対象とする場合には、エエロ ペインを採用すれば、カットされた部分のエネルギーが小さいゆえ、問題にならない。

風速変動を与える渦の大きさから平均時間を求めるにはどうしたらよいか?

この問題は、気象学的にはむずかしい問題である。この問題に対して井上栄一が提案している方法を紹介しよう。橋梁の高さを $z(\text{cm})$ 、風速を $U(\text{cm/sec})$ とし、平均時間を $T(\text{sec})$ とすると、

$$T = \frac{z}{U} \times 10 \dots \dots \dots (2)$$

で T を決めればよい。渦の大きさは z によって決まる。それゆえ、 z によって決められる渦が 10 個通過する時間をもって平均すれば、効果的な平均風速が与えられるだろうというのである。たとえば、 $z=50 \text{ m}$ 、 $U=50 \text{ m}$ とした場合には、平均時間は 10 sec ということになる。

橋梁の固有振動周期は、橋梁の長さ、形状、材料などによって違うものと思われる。風の調査をする段階では個有周期がいくらかを推算することができるのかどうか、私にはわからない。推算が可能な場合には推算値、不明な場合には既存資料から考えられる値を基にして、それよりも短い時間を平均時間として平均風速を出す必要がある。

(2) 乱流構造

橋梁設計に当って、Tacoma Narrows 橋の落橋以来、風の乱流構造には神経質なまでに注意しておられるようである。気象学の分野における乱流の研究で強風の乱流構造を取り上げるようになったのは近年のことである。そして、取り上げられた契機は長大橋や高層建築物の耐風構造からの要請が主であり、それまでは、風速の弱い範囲の乱流が主として取り上げられてきた。それゆえ、長大橋の設計に対して「乱流構造をこのように与えよ」というようなことは、気象学的にはまだいえない段階にある。しかし、その中であって、日大の塩谷正雄、京大の光田 寧などによって、すぐれた研究がなされはじまったし、論文も出されつつある。また気象学会誌よりは橋梁関係の調査報告書の中に詳細な論文が出ている。それをご覧になっていただきたい。ここでは取り扱い上、基本的に重要と思われる点を指摘するにとどめておく。

a) 乱流構造を求める場合の時間スケール

平均風速を求める場合の平均時間について論じた場合に、高さ 50 m で風速 50 m/sec の場合には 10 sec となると述べた。その場合の渦は 1 sec 以下の時間スケールとなる。それゆえ、乱流構造を問題にするときには、風速計は追従速度が 1 sec 以下で、正確に変動を記録するものを使う必要がある。ということは、エエロ ベインがこの目的にかろうじて合格ということである。もし、渦のスケールからいって、さらに小さい変動を必要とするなら、強風に対しては超音波風速計が最適である。

b) 風の垂直成分

風の垂直成分を測定するものにパイ ベインと超音波風速計とある。パイ ベインはエエ ロベインとほぼ同じ程度の直段で、割合簡便である。しかし、垂直成分の風の変動を問題にするのであれば、追従速度からいって超音波風速計による測定が必要となるだろう。

c) 突風率 (ガスト ファクター)

突風率 G は、平均風速 \bar{V} とその観測時間内における最大瞬間風速 V との比で、 $G = V/\bar{V}$ と定義されている。 G が大きいということは、風の乱れ現象が大きいことを示す。突風率 G は、観測時間、瞬間の評価時間、高さによって変化するばかりでなく、地表の粗度や基準風速の影響を受けて変化する。

京大防災研の石崎と光田が、Sherlock と Deacon の観測した資料から、 G_s と評価時間 S_t および高度との関係を解析し、つぎの実験式を得ている。

$$G_s = \left(\frac{S_t}{D}\right)^{-r_g} \dots\dots\dots(3)$$

$$r_g = r_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{-0.42} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 D : 平均風速の平均時間 (一般には 600 秒)

r_g : 乱れの状態における指数

r_0 : 地上に z_0 おける値で、 $z_0 = 10$ m では $r_0 = 0.1$

r_g の算式は平坦な草地の場合についてであり、表面粗度の異なる場所については不明としている。

さらに、第 2 室戸台風時の明石海峡の舞子での実測値によって、神戸海洋気象台の川鍋安次は平均風速の評価時間を 1, 3, 5, 10, 30 分と変えた場合について式 (3) を吟味した結果、一般に観測値の方が平均時間の増大による増加が少ない。むしろ、次式で表現するのが適当であろうと提案している。

$$G_s = G_0 \left(\frac{S}{D}\right)^{-r_g} \dots\dots\dots(5)$$

G_0 : 瞬間 2 秒、平均 10 分の突風率

式 (5) の D は S を一定とし、 D を変化させたものであるのに対して、式 (3) は D を一定として S を変化させたものである。以上のような実験式は便利であるが、突風率を変化させる要因はまだその他にもあるので、注意して使用する必要がある。たとえば、平均風速が増大すれば突風率は小さくなるだろうということは理論的に推測されていることであるが、実験的にはまだ明確にされていない。

(3) 突風率とパワー スペクトル

まず、パワー スペクトルから説明しなければならぬ。自然風は一般に乱流状態で吹いている。いいかえれば、大小無数の渦が不規則に風の中を流されている。風速測定記録は、それゆえこの無数の渦の通過に対応して変動する時系列とみなすことができる。変動時系列 $u(t)$ は無限の周期の成分の和として表示しうるのであるが、自然風の乱流の場合には、ある周波数範囲の成分だけで、変動風速の実効値、すなわち Power の半分の $\bar{u}^2/2$ の大部分が占められ、他の周波数範囲のものはほとんど影響をもたない。各周波数の変動の $\bar{u}^2/2$ に対する寄与の割合を示すものをパワー スペクトル、またはエネルギー スペクトルと呼んでいる。

パワー スペクトル $F(n)$ は、自己相関関数を $C(\tau)$ とすると、次式で求められる。

$$F(n) = 2 \int_0^{\infty} C(\tau) \cos 2\pi n \tau d\tau \dots\dots\dots(6)$$

ただし、自己相関関数は、時刻 t の変動風速 $u(t)$ と、同じ場所の τ 時刻後の変動風速 $u(t+\tau)$ の積の時間平均である。すなわち、

$$C(\tau) = \overline{u(t) \cdot u(t+\tau)} \dots\dots\dots(7)$$

日野幹雄は Rice の理論を基にして、突風率をパワー スペクトルから求める式を導いた。すなわち、

\bar{U} : T 時間の平均風速

$$\bar{u}^2 = 2 \int_0^{\infty} F_u(n) dn,$$

$$\nu_u = \left[\int_0^{\infty} n^2 F_u(n) dn \int_0^{\infty} F_u(n) dn \right]^{1/2}$$

であるから、T 時間内の突風率 G_u は

$$G_u = 1 + \frac{\sqrt{\bar{u}^2}}{\bar{U}} \left(\sqrt{2 \ln \nu_u T} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln \nu_u T}} - \frac{0.99}{\sqrt{(2 \ln \nu_u T)^3}} \right) \dots\dots\dots(8)$$

パワー スペクトルは、乱れのスケールを把握するために重要なものであり、一般に使用される突風率との関係を吟味することも、乱流の性質を把握する上に意味があると思われるので取り上げた。

(4) 突風率の低減と増大

すでに述べたように、風速は時間的にも空間的にも変動している。それゆえ、風の中におかれた構造物に作用する風圧も時間的・空間的に変化しているはずである。

橋梁等の構造物のスケールが、風の中に含まれている乱れのスケールよりも小さい場合には、構造物の各点に同じ位相の風が当たっていると考えてよいが、構造物が乱れのスケールよりも大きくなると、各点にあたる瞬間風速の位相が違ってくる。この場合には、構造物全体に風の瞬間最大値は小さくなったように、すなわち、突風率が小さくなったように感ずる。これが長い構造物に対する突風率の低減である。

また、構造物がたわみ易いとか、振動し易い構造の場合には、風によって振動を起こす。構造物の最大の変位は風の乱れの性質と構造物の構造や力学的特性によって定まる量であろう。構造物の耐風設計では、この変位があたかも定常的な風速によって永久的で受けると考えて検討を加えているようである。この場合には、変位を生じされる風圧は静風圧の式で与えられることになる。そこでつぎのような問題が起こる。

- (1) 構造物の個有振動数が低いと、この個有振動数付近では、変動風速のパワー スペクトル密度がかなりの大きくなる。
- (2) さらに、構造物の減衰が小さい場合には、構造物は個有振動数付近の風速変動のエネルギーを吸収して共振現象を起こし、振動振幅がいちじるしく増大する。
- (3) 以上のことから、最大振幅を静的に発生するような風荷重を求めると、最大瞬間風速あるいは突風率がかなり増大したような結果となる。これが突風率の増大である。

一般に振動しやうい構造物で、振動の周期が数秒程度で減衰が小さい場合には、構造物の大小にかかわらず突

風率の増大が認められる。

a) 地形その他による乱流構造の違い

長大橋は海峡や幅の広い河川にかけられる。突風率の項でも触れたように、乱流構造は大気温度成層、地面摩擦などによって違ってくる。台風時のような強風時には、大気低層における攪拌現象が激しいため、温度成層については神経質になる必要がないと思われるが、地面摩擦の影響による乱流構造の違いには注意を要する。

海峡を考えよう。陸岸は固定された境界面を構成し、強風時の海面は流動する境界面を構成している。風速変動の測定は陸岸でだけ行なわれているが、陸岸で測定して得た乱流構造を、大部分が海面上にある全区間に対してあてはめることは原理的にはいけないことである。しかし、強風時に海面上で測定することはきわめて困難であり、陸上で観測した結果を適用しているわけである。流動する境界面を持った海面上の乱流構造では、 u 成分よりは w 成分、すなわち垂直成分に大きい特徴が出るのではないと思われる。最近、海上に建設したタワーによって乱流測定が開始されたが、この問題に対する新しい知見がその中に出て来るものと期待してよい。

陸上で測定した乱流構造の適用範囲がどこまでか、純粋海面上と見なされる部分の乱流構造と陸岸の乱流構造との間に急激な相違があるかどうか、風速の水平方向の分布にシャープが発生する恐れがあるのではないだろうかという疑問が生まれる。長大橋の設計にとって、最も大切な問題の一つであると思うが、わからないことが多すぎる状態である。なお、10 分間風速であるが、東京湾の第2海堡の風は横浜の風速の約1.5倍という結果がでている。

b) 風洞実験

強風時には、海峡上でも河谷上でも大気低層では乱流状態になっている。風洞実験を行なう場合には、この点を考慮して行なう必要がある。すなわち、普通、風洞実験というと、層流を吹かせて行なうことが多いが、この場合には、適当な乱れを与えた風を送り、実験をする必要がある。しかし、温度成層については考慮する必要はない。風洞実験を行なっている方々には、すべて承知のこととは思いますが、気付いたままに指摘しておく。

なお、風速期待値あるいは設計風速の推定については、斎藤鍊一の研究があり、すでに土木学会の方々もご承知のはずであるから省略する。河川と気象の章で述べたことと原理的に同じことである。

5. 雪 (なだれ)

積雪が交通障害を与える以外に、雪の橋梁に対する影響は「なだれ」の発生である。「なだれ」の破壊力は、

大規模なだれの場合には鉄橋やコンクリート橋まで破壊し去ることもある。この「なだれ」の破壊力がいかにして発生したかという問題はまだ明らかにされていない。この破壊力は、滑り落ちて行く積雪荷重と衝撃力によるだけでなく、「なだれ」の急速な滑降によって発生した渦運動が周囲の空気を巻き込み、強大な衝撃波をひき起こすのではないだろうか。積雪地帯山間部の橋梁建設に当っては、「なだれ」の衝撃力についての正当な評価と、「なだれ」発生 の地形条件、防止対策についての吟味もあわせて実施される必要がある。

6. そ の 他

風化現象についての注意を最後に指摘しておきたい。風化現象は非常に緩慢にはあるが、間断なく発生している。これに対する日常の監視、研究、観測体制が十分とられて、不連続的に発生する可能性のある崩壊に対処することができるように、ぜひお願いしたいところである。

<講座 終>

日 本 土 木 史 ——大正元年～昭和 15 年——

体 裁：B 5 判 3 ポ横一段組み 本文 1770 ページ 図 410 葉 表 500 点
写真 150 枚余 上製箱入革製豪華製本

定価 12000 円（個人会員に限り割引特価あり）

内 容：第 1 章 河川・運河・砂防・治山／第 2 章 港湾・漁港・航路標識／第 3 章 農業土木／第 4 章 都市計画・地方計画／第 5 章 道路／第 6 章 軍事土木／第 7 章 上水道・下水道および工業用水道／第 8 章 土木行政／第 9 章 建設機械／第 10 章 トンネル／第 11 章 発電水力およびダム／第 12 章 鉄道／第 13 章 水理学／第 14 章 応用力学／第 15 章 土性および土質力学／第 16 章 測量／第 17 章 土木材料／第 18 章 コンクリート／第 19 章 土木教育史／第 20 章 学・協会史／付・日本土木史年表

●新刊／コンクリートパンフレット

第 78 号 生コンの正しい使い方 亀田泰弘氏執筆

A 5 判 120 頁
価 200 円 千 70

本書は生コンに関する諸規定を紹介するとともに、工事現場での生コンの使用上の注意、また正しい使用方法などその要点を述べたもので、施工業者や工事監理者また生コン業者にとって好個の手引書。

第 77 号 東海道新幹線のコンクリート構造物 河野通之氏、松本嘉司氏 共同執筆

A 5 判 100 頁
価 150 円 千 70

最高時速 250 km に対して設計された東海道新幹線のコンクリート構造物、とくに橋りょう、高架橋の設計・施工につきわかりやすく解説したもの。

終局強度理論による

翻訳 6 鉄筋コンクリート設計施工基準 尾坂芳夫氏訳

A 5 判 207 頁
価 200 円 千 90

——ヨーロッパコンクリート委員会——

AASHO 道路試験

建設省道路局 B 5 判 246 頁
高橋国一郎氏 価 500 円 千 100
外 6 氏 共同抄訳

10 年の年月と 100 億円の巨費を投じて実施した AASHO 道路試験の結果をわかりやすくまとめたもので訳者各氏の徹底した討論による考察も最後につけ加えてありコンクリート舗装の長所を再認識する上の貴重な文献である。

月 刊 セメントコンクリート

セメント技術年報

B 5 判 572 頁
価 1300 円 千 150

1 部 50 円 予約 1 年 600 円・6 ヶ月 300 円 千 共

近日発売／昭和 41 年度

社 団 法 人 セメント協会 事業部

東京都港区赤坂 7 丁目 5 番 5 号 セメント協会研究所内
振替 東京 196803（加入者名セメント協会）・電話（583）8 5 4 1（代）