

種々の空力現象を同時に考慮した橋梁の耐風安全性評価について

京都大学工学部 正 員 松本 勝 京都大学工学部 正 員 白石成人
 京都大学工学部 正 員 白土博通 (株)三菱銀行 正 員 三澤 彰
 京都大学大学院 学生員○村上琢哉 京都大学大学院 学生員 八木知己

1. まえがき 構造物の耐風安全性を検討する場合には、種々の空力特性を対象にしなければならない。その場合には空力現象毎に対象風速域が異なるため、低・中・高風速全域にわたって風速母集団分布が正しく評価されている必要がある。しかしながら、定時自然風観測記録より求められた風速頻度分布を、一般に Weibull 分布でモデル化する場合には台風による強風推定の精度は悪いものになっている。このことから、安全性の検討のためには破壊の対象となる対象風速域に適合した風の確率モデルを各空力現象ごとに使い分けることが必要であろう。また、複数の空力現象を考慮する場合、破壊確率を個々の現象ごとに算定するのではなく、個々の現象を重ね合わせた統合的現象として議論すべきである。本研究では、以上の事を念頭におき、初通過破壊に対する破壊確率を算定する方法を通常風速域（低風速域と呼ぶ）と高風速域（台風などの強風）に分けて検討する方法について説明を加える。さらに、長大吊橋を例にとりその破壊確率を算定し、安全性評価を試みた。

2. 低風速域における破壊確率の算定方法 耐用年数 R 年の破壊確率の算定方法について、図 1 に概略の手順を示し、以下各項目について簡単に説明する。

① 現地における通常風観測記録から、橋軸直角近辺風向の風速母集団分布（Weibull 分布）、風向生起頻度、乱れの特性、傾斜角分布を推定する。

② 自然風観測記録や橋梁の設計案を参考にして風洞実験を行い、基本的な空力特性を得る。

③ ②の結果を参考にして、実橋の空力特性の予測を行う。

④ 橋梁の振動モード解析を行い、モード形状を算定し、その形状の単位変位に応じた発生応力を算定する。

⑤ 風による静的あるいは動的な変形に対応する応力を算定し、対象風向、対象振動モードによる発生応力の分布を求める。発生応力に関しては、現象別に以下のように仮定する。つまり、死荷重による応力は確定的とし、活荷重による応力是对数正規分布に（ある風速値を超えると交通規制が行われることを考慮して、ある限界風速（仮に風速 25 m/s）まで検討を行うものとする）、渦励振、静的風荷重、フラッタによる応力是对数正規分布に、パフエッティングによる応力は Rayleigh 分布に従うものとそれぞれ仮定する。

⑥ 得られた各空力現象による応力の確率分布をモンテカルロ・シミュレーションを用いて重ね合わせることにより、ある風速域 $u_j \sim (u_j + du)$ で発生する応力分布 $f_j(\sigma)$ が求まる。

⑦ 通常風のように耐用期間 R 年内で n_j 回発生する事象を対象とする場合では、発生頻度を考慮した極値分布 $f(\sigma)$ とするの必要があり、⑥で得られた応力分布（確率分布関数 $F_j(\sigma)$ 、確率密度関数 $f_j(\sigma)$ とする）を用いて、次式により算定される。但し、 n_j が 1 回未満の場合は、これらの現象が起こるものとして発生応力の確率分布を与え、後に求められた破壊確率に生起する確率をかけて最終的な破壊確率としている。

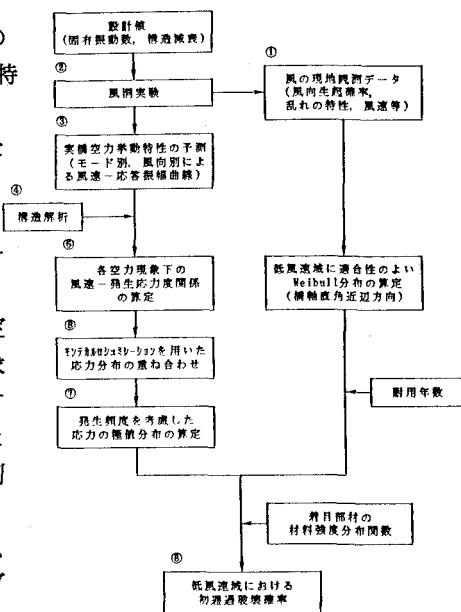


図 1 低風速域における破壊確率の算定方法

$$f(\sigma) = n_j \cdot \{F_j(\sigma)\}^{n_j-1} \cdot f_j(\sigma) \quad (n_j \geq 1)$$

$$f(\sigma) = f_j(\sigma) \quad (n_j < 1)$$

但し、k 風向のある風速域 $u_j \sim (u_j + du)$ の風が R 年の間に観測される回数 n_j は、その風速の風が他の 10 分間における風とは統計的に独立して 10 分間継続して吹くものと仮定すれば、k 風向 Weibull 分布 $f_w(u)$ 、風向生起確率 f_D を用いて

$$n_j = R \cdot 365 \cdot 24 \cdot 6 \cdot f_w(u_j) \cdot du \cdot f_D$$

⑧材料強度の分布関数 $F_{mt}(\sigma)$ と⑦で算定した応力の確率分布を用いて、渦励振及びパフエッティング r 次モードのもとで k 風向のある対象風速域における破壊確率 $Pf_{j,kr}$ は、以下のように求められる。

$$Pf_{j,kr} = \int_0^\infty f(\sigma) \cdot F_{mt}(\sigma) d\sigma \quad (n_j \geq 1)$$

$n_j < 1$ の時は、これに n_j を乗じて破壊確率としている。

さらに、他の風速域、他の風向、他のモードについても同様に破壊確率を計算し、全体の破壊確率を導く。全体の破壊確率「耐用期間 R 年の内でいろんな風向、モード、風速のもとで少なくともどれかの組合せ条件で壊れる確率」は、

$$Pf = 1 - \prod_{\text{風向}} \{1 - \prod_{\text{モード}} \{1 - \prod_{\text{風速}} (1 - Pf_{j,kr})\}\}$$

3. 中高風速域における破壊確率の算定方法

算定の手順を図 2 に示し、2. と比較しながら簡単に説明する。

①得られた母集団分布から文献 1) により I 年極値分布 $f_{Ej,I}$ を推定する。(I = 1 ~ R 年)

⑦風が R 年間に生起する回数 n_j は、風向生起確率 f_D を用いて

$$n_j = (R/I) \cdot f_D \cdot f_{Ej,I}(u_j) du$$

②~⑥および⑦以後は、2. と同じである。

4. 適用例 数値計算例として、長大吊橋のメインスパン中央部の上限材を考えた。この橋梁には渦励振が発生しないと、3. の方法を中心に計算を行った。計算に必要な応力解析等は別途実施し、極値分布算定に必要な台風係数は、1.4 と仮定した。

橋軸直角近辺風向を SE, SSE, NW, NNW とし、それぞれにある風速の分布を仮定して得られた破壊確率の計算結果を図 3 に示す。この図より SSE 風向における破壊確率が卓越していることがわかる。これは、ここで用いたこの風向の風速分布が、他風向に比べ高風速側にあるためと思われる。またフラッタ発現風速が高くなるにつれて、その程度は余り大きくないものの、破壊確率は減少している。このことから、フラッタ発現風速を高めるような設計改良を行うことは、安全性評価を議論する上で重要であると思われる。

5. 結論 橋梁の耐風安全性評価を行う手法として種々の空力現象を同時に考慮した破壊確率を算定する方法を検討した。特に本研究では、風速モデルの適合性という観点から、低風速域、中・高風速域に分けて検討した。またモンテカルロ・シミュレーションを導入し、種々の空力現象下で発生する応力の分布を重ね合わせることで、一出力として容易に取り扱うことが可能になった。今後は、橋梁全体としての（例えば吊橋の場合には桁部の他にケーブル、塔なども含めた）破壊確率を算定する方法の確立が望まれる。（参考文献）1) 松本 勝、白石成人、三澤 彰、村上琢哉 “日本各地の風向別強風確率特性”

日本風工学会誌第 4 1 号、平成元年 10 月、PP. 3-4

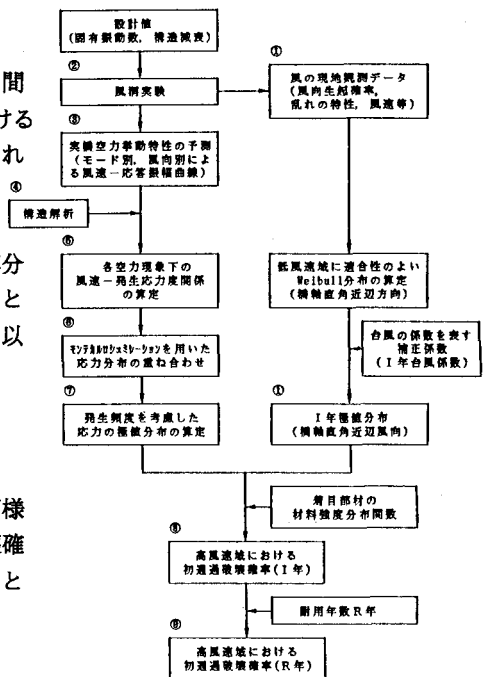


図 2 中高風速域における破壊確率の算定方法

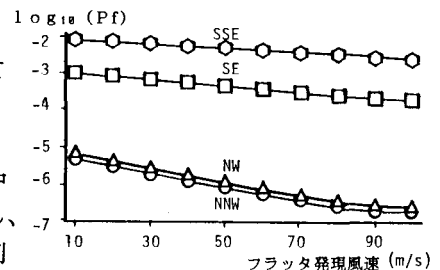


図 3 フラッタ発現風速と破壊確率