

長大橋ガスト応答評価のための平均化時間

Averaging Time for Buffeting Evaluation of Long-Span Bridge

勝地 弘*, 宮田利雄**, 山田均***, 田中裕明****, 楠原栄樹*****

Hiroshi Katsuchi, Toshio Miyata, Hitoshi Yamada, Hiroaki Tanaka and Shigeki Kusuhara

*博 (工), 横浜国立大学助教授, 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

**工博, 横浜国立大学教授, 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

***工博, 横浜国立大学教授, 大学院環境情報研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

****修 (工), NKK 橋梁建設部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)

*****工修, 本四公団長大橋技術センター課長代理 (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

Buffeting response of long-span bridges is influenced by not only wind-speed fluctuations but also time-trend of wind speed. The influence of averaging time for buffeting evaluation of a long-span bridge was investigated using monitoring data of the Akashi-Kaikyo Bridge at a typhoon. Mean and maximum dynamic values of measured lateral response at several averaging times (30, 60, 120, 200, 300 and 600 sec.) were compared with those of corresponding buffeting analysis. The study showed that mean value was not strongly influenced by the duration of averaging time. It also showed that measurement and analysis of dynamic value were in good agreement at the averaging time of 200 – 600 sec.

Key Words: Long-span bridge, buffeting, averaging time

キーワード: 長大橋, ガスト応答, 平均化時間

1. はじめに

長大橋のガスト応答は, 風の風速変動に基づく不規則振動と定義されるが, ガスト応答の平均値, 最大値などの統計値を評価するの時間の規定が必要となる. 現在, 長大橋の耐風設計の拠り所となる本州四国連絡橋公団の耐風設計基準等^{1) - 3)}では, その時間として10分を規定している. これは, 平均風速の平均化時間と同じであり, 考え方の整合を取るために採用されたと考えられる. また, 平均風速算出のための10分は, 風速の長期変動スペクトルにおけるエネルギーギャップが5分から5時間あたりに存在することに根拠が置かれているようである⁴⁾. ただし, 海外では, イギリス, カナダで1時間, アメリカで5分を採用しており⁴⁾, 日本の10分が絶対的なものではない.

ところで, 自然の強風の観測記録を見ると, 10分間の中でも徐々に風速が増大(低下)する場合(以下, トレンドという)や, 数10秒~1分程度の期間, 風速が急変する場合など, 長大橋の耐風設計で前提としている定常過程が成立しない場合がある. また, 10分間のうちに徐々に風向が変化することも多々あり, これも設計基

準での前提からはずれることとなる.

長大橋のガスト応答は, 基本的に線形システムと見なせるので, 上述のように入力である風速変動が定常でなければ, 出力であるガスト応答も定常ではなくなる. このような場合, 1つの解決策として, 10分よりも短い時間で現象を評価することで, 近似的に定常過程を成立させることが考えられる. もちろん, 風速の平均化時間が先の風速変動スペクトルの強度が大きい領域に入ると, 平均流成分と変動成分の物理的意味合いや, 統計処理の正当性など, 別の問題も発生すると考えられる.

以上のような議論を踏まえ, ここでは風速が10分間のうちにトレンドしたり, 急変することによる応答解析値への影響に着目し, このような状況下でよりの確にガスト応答値を評価するための平均化時間の取り方について, おもに10分間と対比することで検討を行う. 具体的には, 台風9918号(1999年9月24日)の際に明石海峡大橋で観測された風速, 補剛桁水平変位を分析⁵⁾することで検討を行う.

なお, ここでいう平均化時間とは, 長大橋のガスト応答を評価する際の, 入力となる風速変動特性を表すための評価時間として定義する. したがって, 平均化時間60

秒でのガスト応答とは、60秒で平均化された風速変動特性で得られるガスト応答を意味するものである。

2. 長大橋のガスト応答評価

ここでは、現行の耐風設計におけるガスト応答評価法について述べる。長大橋のガスト応答が、先に述べたように入力となる風速変動による強制不規則振動と捉え、不規則振動理論によって説明が可能となる。地震と異なり、風の場合は定常確率過程の成立を仮定し、風速変動のパワースペクトル密度 (PSD), $S_u(f)$ を定義し、構造物の振動特性などの伝達関数を介して、応答値の PSD, $S_r(f)$ を求める振動数領域での解析が一般的である。

$$S_r(f, x) = \frac{4P^2}{U^2} |X_D(f)|^2 S_u(f) \sum_i \frac{\Phi_i^2(x)}{\omega_i^4 M_i^2} |H_i(f)|^2 |J_i(f)|^2$$

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A \quad (1a, 1b)$$

ここで、 ρ , U , C_D , A はそれぞれ空気密度、平均風速、抗力係数、投影面積であり、 $\Phi_i(x)$, ω_i , M_i はそれぞれ i 次の着目点 x のモード、角振動数、一般化質量であり、また $|X_D(f)|^2$, $|H(f)|^2$, $|J_i(f)|^2$ は伝達関数であり、それぞれ空力アドミッタンス、メカニカルアドミッタンス、ジョイントモードアクセプタンスである。

次に、式 (1) をもとに応答値の PSD を全振動数領域で積分することで着目点の応答値の分散 σ_r^2 が次のように得られる。

$$\sigma_r^2(x) = \int_0^\infty S_r(f, x) df \quad (2)$$

さらに、評価時間内での最大値を推定するために、いわゆるレベルクロッシングの理論を適用するとともに、別途算出した平均応答値 R_{mean} を用いることで、最終的に最大応答値の期待値が得られる。

$$R_{max} = R_{mean} + g\sigma_r \quad (3)$$

ここで、

$$g = \sqrt{2 \ln \tilde{f} T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \tilde{f} T}} \quad (4a)$$

$$\tilde{f} = \left[\frac{\int_0^\infty f^2 S_r(f) df}{\int_0^\infty S_r(f) df} \right]^{1/2} \quad (4b)$$

g : ピークファクター, $\tilde{f}$: 等価振動数, T : 評価時間。

3. 動態観測データに基づく平均化時間の検討

3.1 動態観測システムと観測データ

明石海峡大橋では、強風時などの橋体対応を自動的に

観測、記録する動態観測システムが作動している。測定チャンネル数は、全体で 77 に及ぶが、そのうち強風時に関係するものとしては、補剛桁上、塔頂のプロペラ型風向風速計、補剛桁を含む橋体各部の加速度計、速度計、補剛桁中央部の GPS による水平、鉛直変位計などがある。

今回は、このうち図-1に示す補剛桁中央部付近の4台の風向、風速データと補剛桁中央部の GPS 水平変位データを用いた。なお、風向・風速計は、海面から約 108m の高さに設置されている。観測は、風速がある設定値を超えると、自動的に収録が開始され、10 分間のデータをサンプリング間隔 50msec で記録する。

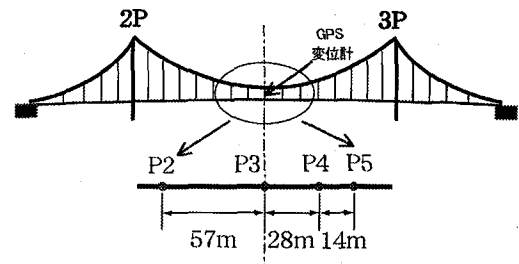
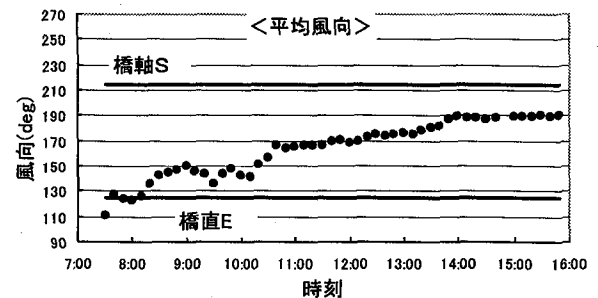
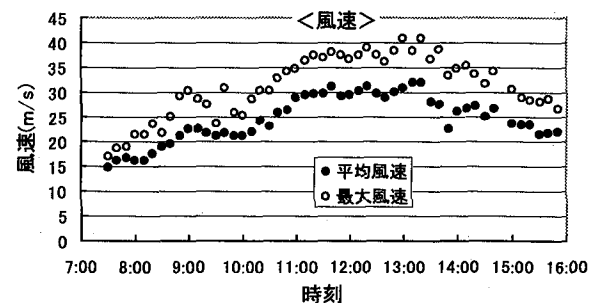


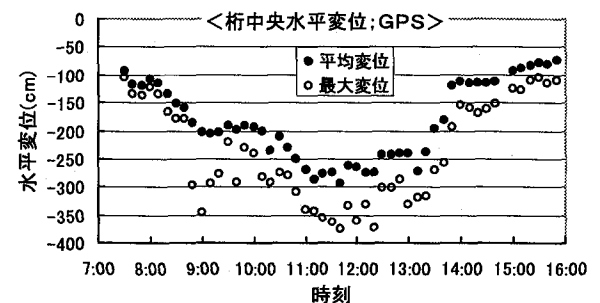
図-1 風向風速計と GPS 変位計の配置



(1) 平均風向の変化



(2) 風速の変化



(3) 桁水平変位の変化

図-2 平均風向、風速、桁水平変位の時間変化

次に、図-2に9918台風が通過した際に観測された風向、風速、桁水平変位の時間変化を示す。今回の検討では、風向の違いによる影響を極力避けるため、橋軸直角東方向とその近くからの7:40~9:00の8ケース（1ケースは10分間）のデータを用いた。

3. 2 静的変位解析

ここでは、静的変位の解析的推定の際に、入力となる風速の平均化時間が与える影響に関して検討を行う。そのために、観測された風速時系列に対して、30秒、60秒、120秒、200秒、300秒、600秒（10分）での平均風速を算出し、算出された平均風速を入力として明石海峡大橋の構造モデルに作用させて応答値を算出して、実測の応答値と比較することとした。すなわち、それぞれの10分間データをもとに、先の6つの時間での平均風速を算出し、それをもとに明石海峡大橋の平均応答値の解析を行った。例えば、平均化時間30秒では10分間データを用いると20区間の30秒平均風速が算出されるが、それを用いてそれぞれの区間に対応する平均応答値を解析するという意味である。

図-3~5に風速と補剛桁水平変位の時系列データのうち、代表的なケース3つを示す。これは、(1)風速がトレンドするとともに応答値も同様にトレンドするケース(7:40~7:50)(図-3)、(2)風速はさほどトレンドしないものの応答値に部分的に大きなトレンドが見られるケース(7:50~8:00)(図-4)、(3)風速のトレンドは見られないものの短時間の変動が大きいケース(8:10~8:20)(図-5)である。

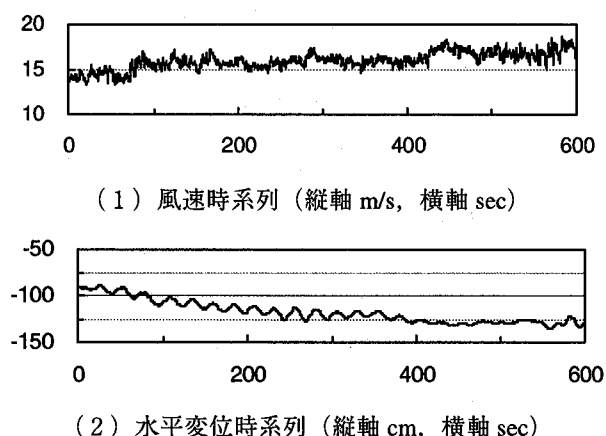


図-3 風速と桁水平変位の時系列 (7:40~7:50)

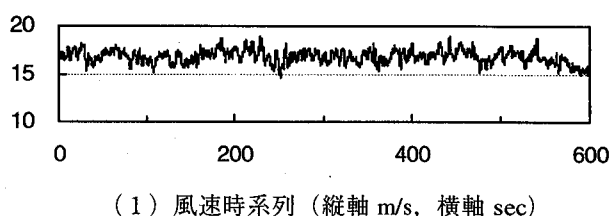


図-4 風速と桁水平変位の時系列 (7:50~8:00)

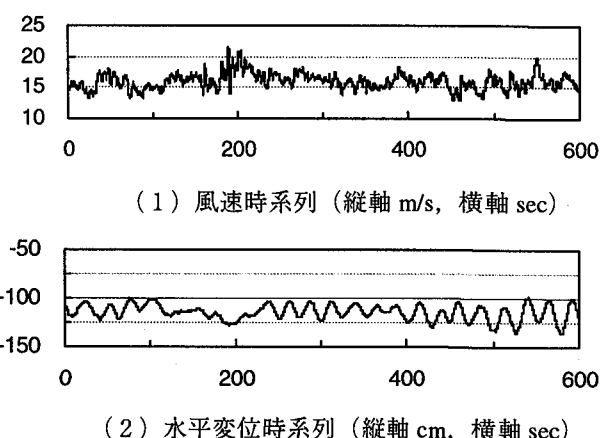


図-5 風速と桁水平変位の時系列 (8:10~8:20)

3. 3 ガスト応答解析

ここでは、動的応答値、いわゆるガスト応答値の解析的推定の際に、入力となる風速変動特性の評価時間が与える影響に関して検討を行う。具体的には、先の6つの平均化時間ごとに観測風速データを区切り、それぞれの区間ごとに平均風速、乱れ強さ、PSDを算出する。次に、算出した諸量をもとに時刻歴でのガスト応答解析を行い、得られた応答値もまた同じ時間で評価を行う。なお、ガスト応答解析は、統計的に平均化を行う目的で、同じケースを10回解析を行って、得られた結果を単純平均することで、その時間での評価値とした。

図-6に平均化時間による乱れ強さの変化を示す。橋直東方向からの開けた海上を吹送してきたために、比較的乱れが小さいものと考えられる。また、短い平均化時間で乱れが低下する理由としては、風速のトレンドが考えられる。

また、図-7に各平均化時間に対応した風速変動PSDの一例(7:50~8:00)を示す。なお、高振動数領域でパワーが低下するのは、プロペラ型風速計による観測記

録のためである。ガスト応答解析においては、図-7に得られたPSDをカルマンスペクトルを参考に式(5)のように近似し、係数 $a-e$ を変化させて用いた。

$$\frac{fS_u}{\sigma^2} = \left[\frac{b\left(\frac{fz}{U}\right)}{\left\{c + d\left(\frac{fz}{U}\right)\right\}^e} \right]^a \tag{5}$$

ここで、 f, σ^2, z, U は、それぞれ振動数、風速変動の分散、高度、平均風速である。

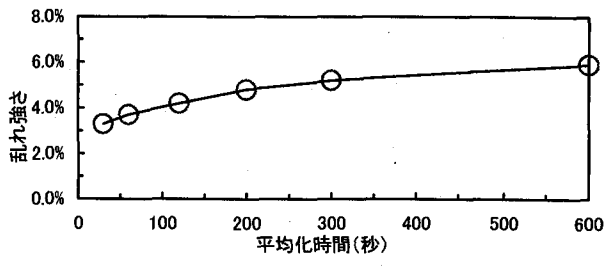


図-6 平均化時間と乱れ強さの関係

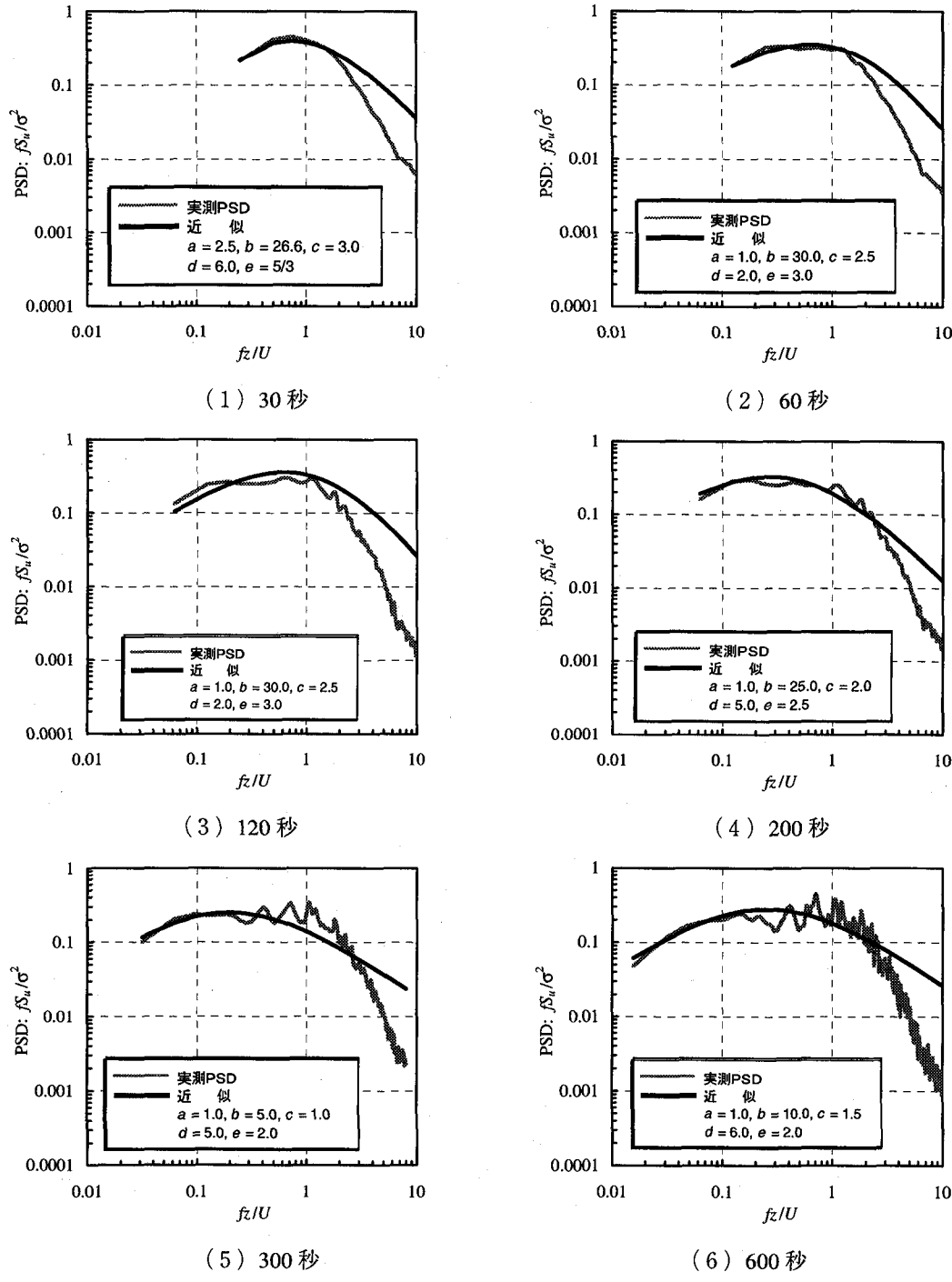


図-7 各平均化時間に対応した風速変動PSD

また、風速変動の空間相関については、特に短い平均化時間での低振動数領域での空間相関評価が困難であるため、ここでは指数関数（ディケイファクター 8）を用いた。後に述べるように、ガスト応答解析値は平均化時間 600 秒での解析値で規準化するため、指数関数を用いることによる誤差は問題とならない。

3. 4 静的変位評価に与える平均化時間の影響

図－8～10に代表3ケースの実測桁水平変位と、3. 2で述べた方法による静的解析値、及び3. 3で述べた方法によるガスト応答解析での最大応答値（平均化時間内で一定として表示している）を示す。なお、ここでは平均化時間 30 秒、120 秒、600 秒の3つの図を示す。

まず、風速がトレンドするとともに応答値も同様にトレンドする 7:40～7:50 のケースを見ると、応答値がトレンドするため、平均化時間が短くなるに従って、静的解析値が実測応答値をよく捉えている。

次に、風速はさほどトレンドしないものの応答値に部分的に大きなトレンドが見られる 7:50～8:00 のケースでは、静的解析値と実測応答値の一致度は平均化時間による影響はあまり見られない。後半の応答値の低減は風速のトレンドが最後の 50 秒ほどを除いてほとんど見られないため（図－4(2)参照）、平均化時間による差はあまり見られない。また、この期間中に風向の急変もないため、応答のトレンドについては別途の検討を要する（例えば、スパン方向の風の非一様性など）。

最後に、風速のトレンドは見られないものの短時間の

風速変動が大きい 8:10～8:20 のケースについて見ると、200 秒前後の風速の急変には応答が追従していないことがわかる。従って、この時間では、静的解析値と実測応答値の一致が悪い。全般的には、平均化時間 600 秒での結果が最もよいように見える。このような風速が短時間のみ急変するようなケースでは、最初のケースと異なり、短い平均化時間はあまり適さないと言える。

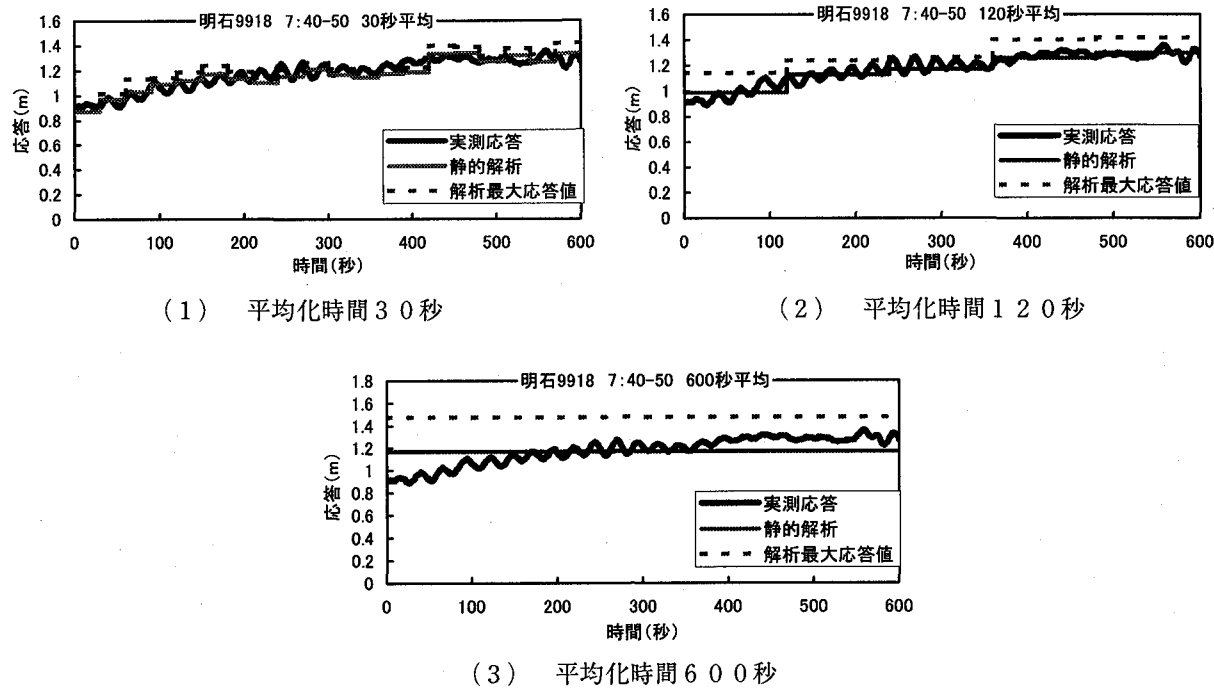
ここで、静的解析値 $D_a(t)$ と実測応答値 $D_m(t)$ の一致度を表す指標として、各平均化時間 T 内での静的解析値と実測応答平均値の差

$$R(T) = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^T (D_m(t) - D_a(t))^2}{T}}$$

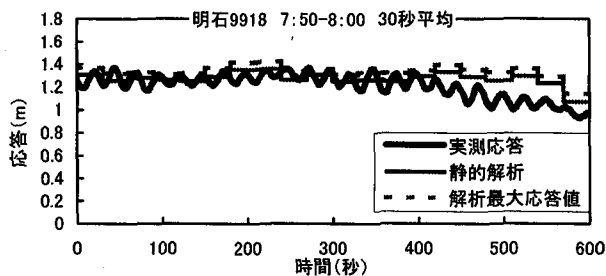
を用いることとした。

そして、各平均化時間での一致度を比較するために、平均化時間ごとの $R(T)$ を平均化時間 600 秒での $R(600)$ で基準化して表したものが図－11である。

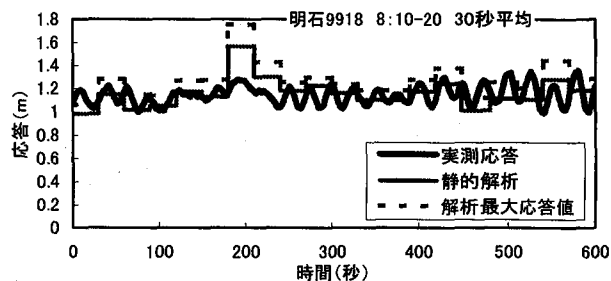
最初に説明したように、ケース（1）では平均化時間が短くなるに従って一致度がよくなり、ケース（3）では逆に平均化時間が短くなると一致度が悪くなる。いずれも 120 秒あたりで傾向が変化している。全体の平均値では、平均化時間による顕著な差は見られないが、極端に短い 30 秒平均では、600 秒平均に対して一致度が悪くなる傾向が見られる。従って、静的応答値に関しては、現行の設計基準での 600 秒を含んで、120 秒あたりまでのより短い平均化時間で評価を行ってもあまり精度は悪くならないと言える。ただし、ここでの結果は、7:40～9:00 までの 8 ケースでのものであり、一般的な結論にするにはさらに多くのケースでの検討が必要である。



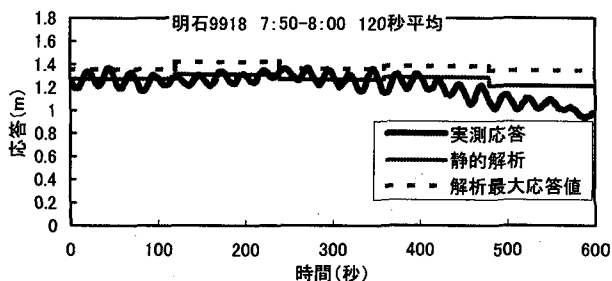
図－8 実測応答値と静的・ガスト応答解析値との比較（水平変位：7:40～7:50）



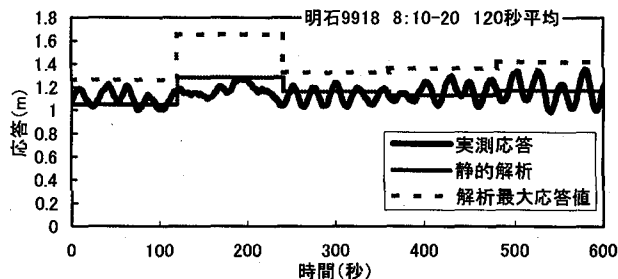
(1) 平均化時間 30 秒



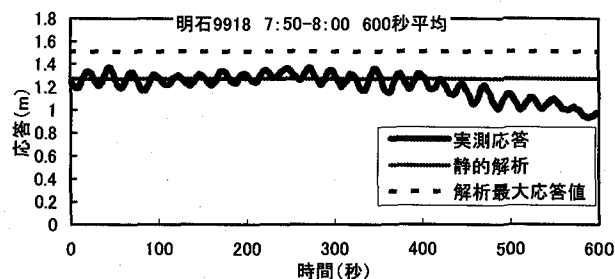
(1) 平均化時間 30 秒



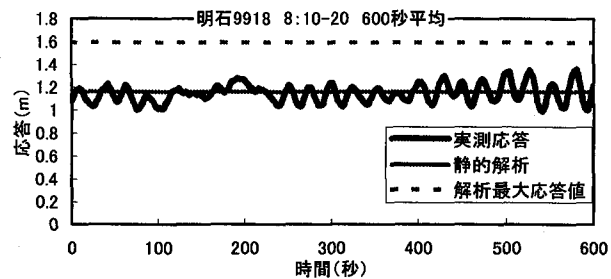
(2) 平均化時間 120 秒



(2) 平均化時間 120 秒



(3) 平均化時間 600 秒



(3) 平均化時間 600 秒

図-9 実測応答値と静的・ガスト応答解析値との比較
(水平変位: 7:50-8:00)

図-10 実測応答値と静的・ガスト応答解析値との
比較 (水平変位: 8:10-8:20)

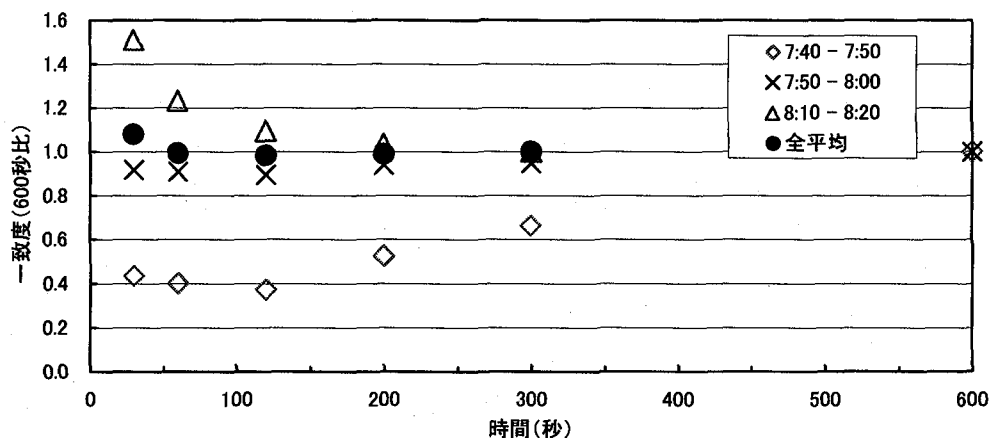
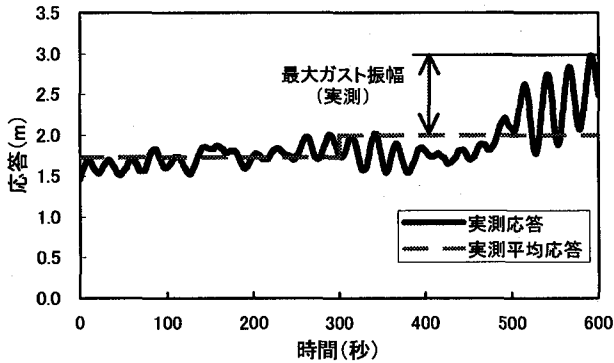


図-11 平均化時間に対する静的解析値の一致度

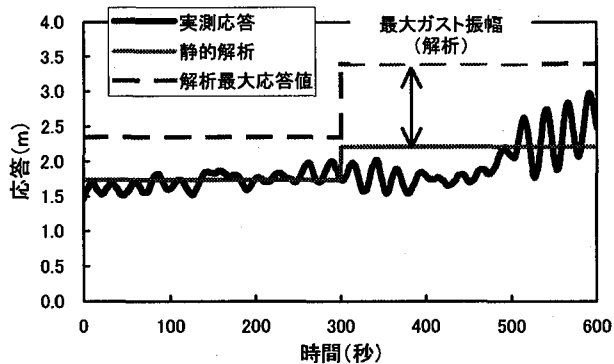
3. 5 ガスト応答評価に与える平均化時間の影響

ここでは、ガスト応答（動的成分）評価における平均化時間の影響に関して検討を行う。具体的には、まず図-12に示すようにそれぞれの平均化時間内で、(1) 平均実測応答値と実測の最大ガスト応答値の差を最大ガスト振幅（実測）とし、また(2) 静的解析値とガスト応答解析値の最大値との差を最大ガスト振幅（解析）とする。次に、実測と解析、それぞれの平均化時間 600 秒での値を 1.0 として規準化し、無次元最大ガスト振幅の平均化時間との関係調べる。

このように整理した結果を図-13に示すが、基本的には平均化時間が短くなるにつれて無次元最大ガスト振幅は実測、解析とも小さくなる。これは、平均化時間（ガストの評価時間）が短くなるにつれて、極値の出現頻度が低下することが第一の理由と考えられる。しかしながら、ケース（3）の 8:10-8:20 のケースでは、実測値のそれは平均化時間が短くなってもほとんど低下していない。この理由としては、図-5からも判るが短時間の比較的大きな風速変動によって、平均化時間が短くても大きなガスト応答値が観測されたことが原因と考えられる。

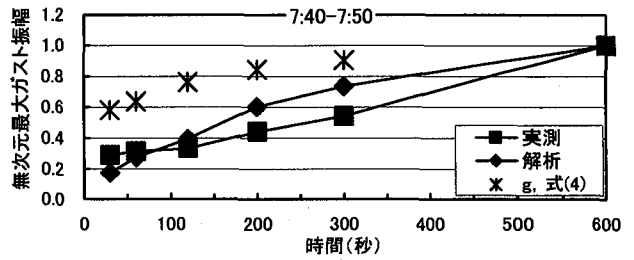


(1) 最大ガスト振幅（実測）

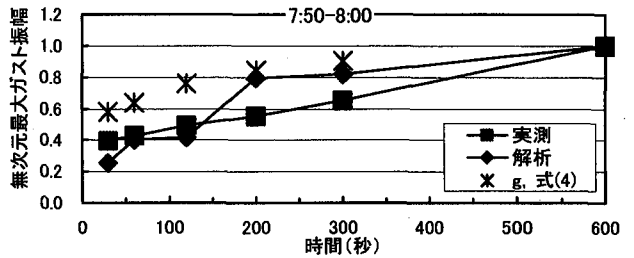


(2) 最大ガスト振幅（解析）

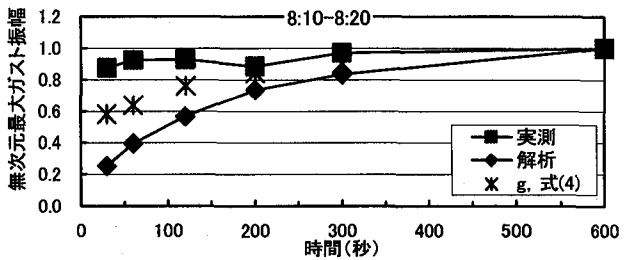
図-12 最大ガスト振幅の定義



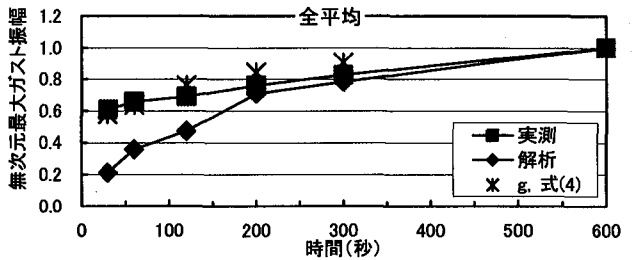
(1) 7:40 - 7:50



(2) 7:50 - 8:00



(3) 8:10 - 8:20



(4) 全平均

図-13 平均化時間に対する無次元最大ガスト振幅

また、図-13には、式（4）で算出されるピークファクター(*)をプロットしているが、こちらは平均化時間とともに低下するものの相対的に緩やかである。これは、ここに示した式（4）でのピークファクターは、評価時間の違いによる極値の出現頻度の違いのみを考慮しているためであり、一方、特に解析値では平均化時間の違いによる風速変動の乱れ強さの低減も考慮しているため、無次元最大ガスト振幅が短い平均化時間で小さくなっているものと考えられる。

ここで着目すべきことは、代表的な3ケースと全ケー

スの平均においても、実測の無次元最大ガスト振幅と解析のそれとが平均化時間が200秒程度よりも長ければ、概ね一致していることである。このことは、風速のトレンドや短時間の風速の急変があっても、平均化時間を200秒から600秒程度とすれば、解析において実測のガスト応答（動的最大値）を的確に捉え得ることを示している。ただし、3.4でも述べたように、ここでの結果は7:40～9:00までの8ケースでのものであり、一般的な結論にするにはさらに多くのケースでの検討が必要であることは言うまでもない。

4. まとめ

本研究では、長大橋のガスト応答評価を行う際に、風速が10分間のうちにトレンドしたり、急変することによる応答解析値への影響に着目し、このような状況下でよりの確にガスト応答値を評価するための平均化時間について、明石海峡大橋での台風時の実測データを用いて検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 静的解析値について、実測応答値との一致度を30秒、60秒、120秒、200秒、300秒、600秒の6つの平均化時間毎に評価した。風速にトレンドがある場合は短い平均化時間での評価ほど一致度は高くなるが、短時間で風速の急変がある場合には、極端に短い平均化時間で逆に一致度が悪くなる。平均的には、現行の設計基準での600秒を含んで、120秒あたり

までのより短い平均化時間で評価を行ってもあまり精度は悪くならない。

- (2) ガスト応答（動的成分）の実測値と解析値との一致度について、平均化時間の影響を先の6つの時間について検討を行った。その結果、風速のトレンドや短時間の風速の急変があっても、平均化時間を200秒から600秒程度とすれば、解析において実測のガスト応答（動的最大値）を的確に捉え得ることを示した。

なお、以上の結果は、明石海峡大橋を対象とした、1つの台風時の限られたデータに基づくものであり、一般的な結論を導くにはさらに多くのケースでの検討が必要である。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団，耐風設計基準・同解説（1976），1976.
- 2) 本州四国連絡橋公団，明石海峡大橋耐風設計要領・同解説，1990.
- 3) 本州四国連絡橋公団，尾道・今治ルート耐風設計基準・同解説，1994.
- 4) 岡内功，伊藤学，宮田利雄，耐風構造，丸善，1977.
- 5) 田中裕明，長大橋ガスト応答解析における評価時間の設定に関する研究，横浜国立大学修士論文，2001.
(2001年9月14日受付)