報 告

長大橋の対風動態観測記録のヘルスマニタリング研究への活用

Utilization of wind response records of long span bridges for structural health monitoring research

藤野陽三*¹ 楠原栄樹*² 阿部雅人*³

Yozo FUJINO, Shigeki KUSUHARA, Masato ABE

1. はじめに

我国では数多くの長大橋が建設され、その多くでは、何らかの形で動態観測がなされてきた。それらの動態観測記録は、耐風設計の発展に大きく寄与してきている。とりわけ、本州四国連絡高速道路の長大橋では、各種の観測が、しかも長期にわたって行われており、国際的に見ても極めて貴重な記録となっている¹⁾。長期にわたる観測としては、他に、地震観測が代表的²⁾であるが、頻度や情報量としては、耐風応答記録が際立っている。図-1に、明石海峡大橋における強風時の動態観測に関連するセンサ配置の概要^{1), 3)}を掲げた。

一方、近年、構造物のメンテナンスやリスク評価の観点から、構造ヘルスマニタリングの研究が活発である⁴⁾。構造ヘルスマニタリング分野では、理論や室内実験での研究例は数多いものの、実構造物における再現や検証が困難であることが、実用化に向けた一つのボトルネックとなっている。そこで、長大橋における豊富な対風応答記録を活用して、ヘルスマニタリングの基礎理論を実測記録に基づいて検証しようとする試みがなされている。構造ヘルスマニタリングでは一般に損傷検知が問題となるが、通常の耐風応答では構造物が損傷するわけではない。そこで、風速による耐

図-1 明石海峡大橋における動態観測

- ◆ : 風向風速計, ★ : GPS, ○ : 速度計 (橋軸方向), ◎ : 速度計 (橋軸直角方向)
- : 補剛桁中央 (格点138) 速度計 (東側 : 橋軸・橋軸直角・鉛直 ; 西側 : 鉛直)
- : 補剛桁 3L/4 点 (格点173) 速度計 (東側 : 橋軸・鉛直 ; 西側 : 鉛直)

*1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
Department of Civil Engineering, The University of Tokyo
*2 本州四国連絡高速道路株式会社 長大橋技術センター
Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited.
*3 株式会社ビーエムシー
Masato Abe, BMC Corporation

風・構造特性の変化や、支承部等における部分的な振幅依存性の同定を行うことで、間接的に構造系の変化の検知の可能性の検証を行うというアプローチでの研究が、我国の研究者を中心として行われている^{5,6,7)}。間接的とはいえ、実構造物の応答から、構造系の変化の検知に成功している研究例は極めて稀少であることから、これらの研究は国際的にも高い評価を得ている。

本稿では、動態観測の幅広い活用の可能性を示すものとして、これらの研究とは別のアプローチで耐風応答記録によってヘルスマonitoring研究における理論検証を行った事例²⁾を紹介する。

2. 構造物の性能評価

性能規定型の設計・維持管理への移行は進行しつつあるが、構造物の性能評価法は必ずしも確立されていないのが現状であろう。特に、既存構造物の性能を評価することは、現在においても技術的に難易度が高い研究課題である。その中で、活荷重たわみや地震応答変位などの変位に関する情報は、性能評価にあたって重要な指標であると考えられる⁸⁾。しかしながら、変位の測定は固定点を必要とすることから、土木構造物のスケールで継続的にモニタリングを実施することは事実上不可能に近い。GPS 計測は、有望ではあるが、電波の受信状況等の制約があるため適用可能な箇所が限られ、また、現状では、解像度も構造系の応答を検知するのには十分ではない。

そこで、容易に計測可能な加速度波形から、変位を得ようとする研究が活発に行われてきた。既存研究は、加速度の2階積分から変位を求めることを基本原理としている。そのため、基線ずれの問題や低振動数領域でのノイズによって結果が大きく影響を受けることから、加振振動数成分が予め限定されているような特殊な状況を除いてはほとんど実用化されていない。それに対して、著者らは、不規則振動理論を用いて、応答統計量間の関係に着目することで、直接積分によらずに、加速度記録から代数的に最大変位を推定する簡易手法を構築した^{3),9)}。統計量の代数的関係のみに基づいていることから、アルゴリズムは簡素であり、センサへの組み込みが容易に可能であって、センサネットワーク技術¹⁰⁾の伸展と相俟って、広い応用が期待される。

しかし、前述したとおり、変位計測は困難であることから、加速度と変位を同位置で同時計測した結果はほとんど存在しない。それに対して、明石海峡大橋では、GPS で変位が観測されているが、強風時には大きな応

答が発生することから、GPS でも十分な精度で変位が計測されていると考えられる。そこで、構築した理論の検証に明石海峡大橋での台風時の観測結果を活用することとした。

3. 観測記録による検証

検証では、表-1に示した、1998年9月22日の台風7号による強風時の時系列5波形（それぞれ600秒）を使用した。強風時に大変位が観測され、GPS 計測でも、十分な解像度、精度が得られていると考えられる2P天端橋軸方向、ならびに中央径間中央鉛直方向の変位記録を利用した。なお、以下の検討では、計測された変位から静的変形分を差し引いた動的変位を用いている。また、速度計が、GPS が設置されている2P、中央径間中央それぞれに設置されている。そこで、GPS に最近接の速度計の記録を利用して検証を行った。加速度は、直接計測されていないため、計測されている速度の1次差分から求めている。時系列波形の一例を図-2に、それらの全パワーで正規化したパワースペクトル密度を図-3の実線で示した。

本最大変位推定法では、1自由度系として構造系を近似して、累積パワースペクトルの4分位点から等価固有周期と等価減衰比を同定している。その同定結果と変位推定結果を図-4,5に示した。等価固有周期は安定的な値が得られているが、等価減衰は極めて大きく見積もられている。その理由は、本研究の理論は1自由度系を前提としたものであることから、複数モードが存在する場合、スペクトルの幅が広がり、スペクトル分布の四分位点が広がるために見かけ上減衰が大きくなったものである。それに対して、最大変位については概ね良好な結果が得られている。したがって、本方法は、多モード構造物に対しては等価な1自由度系に置き換えて変位推定を行う手法であることが示唆される。図-4で得られたパラメータ値を用いた理論スペクトルを、図-3に点線で示したが、その結果からもこの傾向が見て取れる。また、図-5の2P塔頂の結果では、推定値が実測値を過大評価しているが、RMS 応答値は高精度で推定されている。同図に示したとおり、GPS 計測の結果が解像度の問題で、ピーク付近で切り落とされた形状となっていることがこの差異の原因であると考えられる。

なお、本理論は速度記録から変位を得ることに拡張可能であることから、あわせて理論の構築と検証を行っている。速度記録を利用した場合、加速度に比べて、精度は同等であるか多少改善される傾向が見られた。

表-1 計測記録の概要

記録番号	測定時間	中央径間中央		2P 塔頂	
		平均風速 [m/sec]	最大風速 [m/sec]	平均風速 [m/sec]	最大風速 [m/sec]
1	14:03:14～14:13:14	26.15	34.67	25.95	44.17
2	14:13:14～14:23:14	31.97	39.03	26.09	41.46
3	14:23:14～14:33:14	33.09	39.34	15.42	38.10
4	14:33:14～14:43:14	32.20	36.89	17.25	23.23
5	14:43:14～14:53:14	28.36	34.07	15.58	30.85

(a) 変位応答 (GPS)

(b) 速度応答 (速度計)

(c) 加速度応答 (速度応答の差分による)

図-2 時系列の例：中央径間中央，記録 3

(a) 変位応答

(b) 速度応答

(c) 加速度応答

図-3 全パワーで正規化したパワースペクトル密度：中央径間中央，記録 3

実線：観測値，破線：推定パラメータによる理論値

(a) パラメータ同定結果

(b) 最大変位推定結果

図-4 加速度からの推定結果：中央径間中央

(a) パラメータ同定結果

(b) 最大変位推定結果

(c) 変位応答RMS値

(d) GPSによる変位波形

図-5 加速度からの推定結果：2P 塔頂

4. まとめ

これまで蓄積されてきた長大橋の動態観測記録を、構造ヘルスモニタリング研究に活用した事例を報告した。ここで紹介した事例は、加速度記録から最大変位を推定する理論を、明石海峡大橋における台風時の観測記録を用いて検証したものである。その結果、多モードの影響によって等価減衰は過大な値となったものの、最大変位については良好な結果を得た。また、本方法は、1自由度系を前提とした理論に立脚しているが、多自由度系に対しては等価な1自由度系に置き換えた推定となっていることがわかった。このように、実橋のデータでの検証を行うことで、手法の有効性を検証するとともに、多モードや実荷重などの実際の条件の影響を検討することが可能となった。これらの条件は、解析や実験では何らかの形で制御したり制限したりせざるを得ないため、ヘルスモニタリング技術として実用化するには、実橋での検証が必須となる。

我国の長大橋の動態観測は、長期にわたって実施されて、強風記録も豊富に存在することから、国際的に見ても極めて貴重な記録となっている。耐風設計のみならず、ここで報告したようなヘルスモニタリングなどの別の視点からも活用することで、技術の発展に大きく資する新たな価値を付加することが可能である。これらの記録は、技術開発上極めて大きな価値を有する資源であるとも言えよう。競争力強化の観点からも、その共有化や活用に取り組む必要があると考える。

謝辞：本研究は、一部、科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業 CREST における研究領域「先進的統合センシング技術」の研究課題「都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント」（代表 藤野陽三）によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 阿部和智, 天野耕一: 明石海峡大橋動態観測システム, 本四技報, Vol.22, No.86, pp.29-34, 1998.
- 2) Siringoringo, D.M., Fujino, Y.: System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.37, No.3, pp.361-386, 2008.
- 3) 阿部雅人, 藤野陽三: 不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定, 土木学会論文集 (投稿中).
- 4) Boller, C., Chang, F.-K. and Fujino Y.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, 2009.
- 5) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定とその実橋への適用, 土木学会論文集, No.689/I-57, 261-274, 2001
- 6) 勝地弘, 宮田利雄, 山田均, 秦健作, 楠原栄樹: 常時微動データによる明石海峡大橋の固有振動特性, 構造工学論文集, Vol.50A, 土木学会, pp.637-646, 2004. .
- 7) T. Nagayama, M. Abe, Yozo Fujino and K. Ikeda : Structural Identification of a Non-proportionally Damped System and Its Application to a Full-Scale Suspension Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.131, No.10, pp.1536-1545, 2005.
- 8) 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会: 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 土木学会, 2000.
- 9) 阿部 雅人, 藤野 陽三: 不規則振動理論を援用した加速度記録からの地震時最大応答変位のリアルタイム推定, 土木学会論文集A, Vol. 65, No. 1, pp.136-150, 2009.
- 10) 安藤繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南正輝編著: センサネットワーク技術, 東京電機大学出版局, 2005.