

(13) 伊唐大橋(PC斜張橋)主桁・主塔の風による振動特性

鹿兒島県出水耕地事務所 折田 秀三
 同上 福田 博文
 鹿島技術研究所 正会員○上野 健治
 鹿島・小牧・桑木共同企業体 正会員 上迫田和人

1. はじめに

伊唐大橋は、鹿兒島県北西部の長島半島と伊唐島を結ぶ5径間連続PC(プレストレストコンクリート)斜張橋であり、その中央スパン 260mは、コンクリート橋として我が国最長である。この様な長大PC橋の風による振動特性について検討された例は少なく、さらに、本橋架設地域は台風の通過頻度が高いことから、耐風特性の把握が重要視された。そこで、本橋では、上部工施工当初から風応答観測を行い、主桁、主塔及び斜材の耐風安全性を確認しながら施工を進めた。本論文では、前段として、この風応答観測データを用いて、風速、風向、乱れ強さなどの風の特性と主桁、主塔の振動形状、卓越振動数及び応答変位と風速との関係について整理した結果を報告する。さらに後段で、施工初期の観測データから、施工が進んだ段階での主桁の応答変位を予測する手法について検討した結果を報告する。

2. 風応答観測の概要

図-1に、観測機器の設置位置を示す。本橋は同図に示す様にほぼ左右対称形であるため、風応答観測は、2ヵ月程先に施工を開始したP3側でのみ実施した。また、本橋は、主桁と主塔を同時に張出しながら施工を進めたため、この進捗にあわせて観測位置をS、M、L観測点に盛り替えた。

風向風速計、雨量計、及び速度計から出力される信号は、主塔位置の主桁内に設置したコンピュータにデジタル値に変換して取り込み、それぞれの計測値の10分間の平均値、最大値、最小値及び標準偏差値を1時間ごとに記録した。さらに、風速と主桁、主塔の振動については、10分間の風速の平均値が、ある設定値(6~8m/s程度)よりも大きくなった時に、その10分間の計測値を時系列波形として記録した。

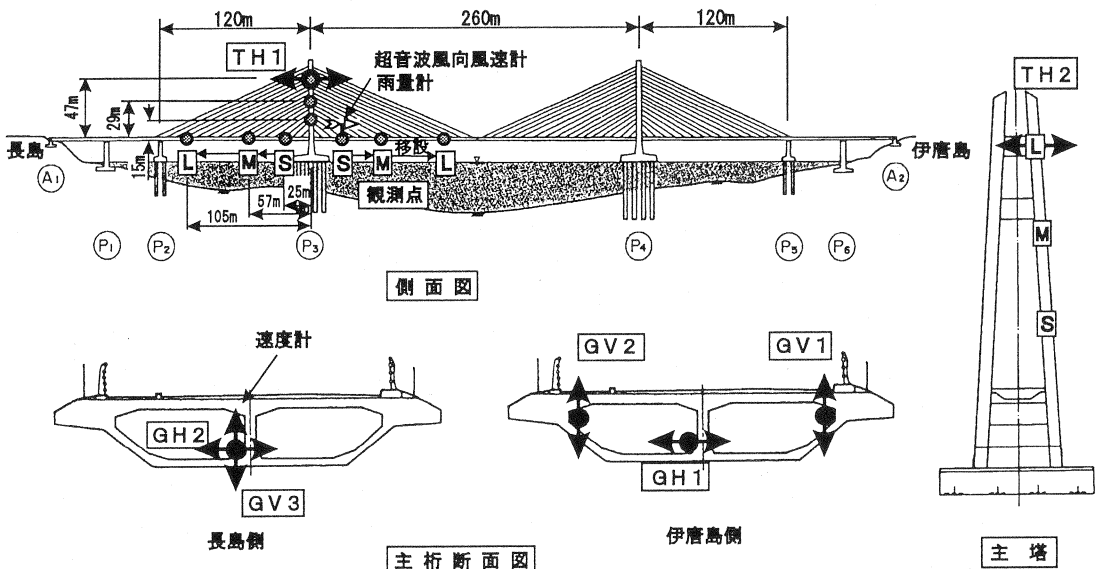


図-1 風応答観測機器設置位置

3. 風の諸特性

平成6年3月から平成7年2月までの期間に観測されたデータを、以下の風の実特性値について月別に整理したものを図-2に示す。ただし、これらの値は、特異値として台風データを除いており、別途●印で台風の実値を示した。

- ①10分間の平均風速の最大値
- ②平均風速8m/s以上の風速の頻度
- ③強風時の乱れ強さ
- ④卓越風向(頻度30%以上の風向)

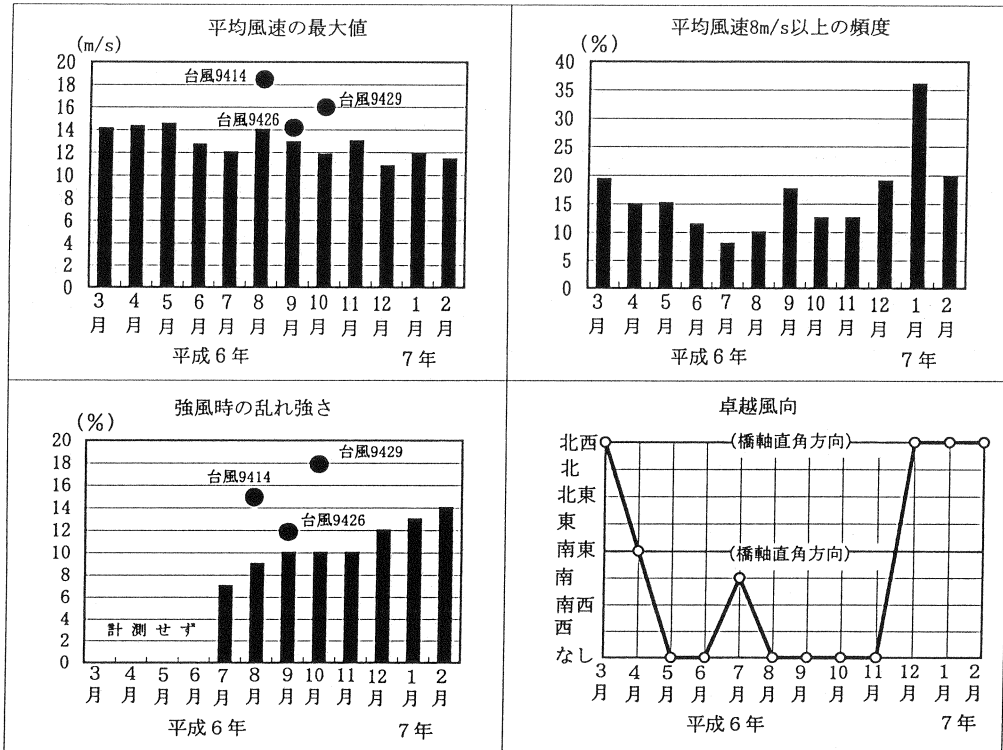


図-2 月別の風の実特性値

図-2から、12~3月の冬季は、それ以外の期間と比較して、平均風速8m/s以上の頻度と乱れ強さが大きく北西(橋軸直角方向)の風が卓越していることが分かる。ここで、乱れ強さとは、以下の式で算定され、地形などによる風の乱れの程度を表す指標である。参考として、道路橋耐風設計便覧¹⁾で定義されている値を表-1に示す。本橋の地表状況は「海上、海岸」に相当し、観測された冬季の季節風の乱れ強さは12~14%であり、表の値13%とほぼ等しく、標準的な乱れ強さであるといえる。

表-1 季節風の乱れ強さの標準値(高度20~30m)

$$\text{乱れ強さ} = \frac{\text{風速の標準偏差}}{\text{平均風速}} \times 100(\%)$$

----- (1)

地表状況	海上、海岸	農地、田園	建築物散在	建築物密集
乱れ強さ(%)	13	16	23	29

また、平成6年には、8月13日に台風9414号、9月29日に台風9426号及び10月11日に台風9429号が九州地方に接近した。図-2を見ると、台風時には乱れ強さが大きくなっており、特に、台風9429号の乱れ強さが大きく、台風以外の期間と比較して、同等の風速でも主桁の鉛直変位が大きくなる傾向が見られた。これは、主桁の鉛直振動が、主に、ガスト応答と呼ばれる、風の乱れに起因する振動であるためと考えられる。

4. 主桁・主塔の振動形状と卓越振動数

主桁、主塔の変位波形の一例として、主桁張出し長が129mの時にL観測点(図-1参照)で観測された波形を図-3に示す。主塔の橋軸方向水平変位(TH1)と主桁の鉛直変位(GV1)を比較すると、若干位相がずれているが波形の形状はよく似ている。さらに、GV1とGV3の位相が逆転(GV1の波形が+側の時にGV3の波形が-側)していることから、橋軸方向(面内)には、主桁、主塔は図-4(a)に示す様な振動形状をしていると考えられる。これは、固有値解析結果の主桁逆対称1次モードに相当する。次に、主桁の水平変位であるGH1、GH2の波形を比較してみると、波形はよく似ており、さらに位相も等しいことから、橋軸直角方向(面外)には、主桁、主塔は図-4(b)に示す様な振動形状をしていると考えられる。

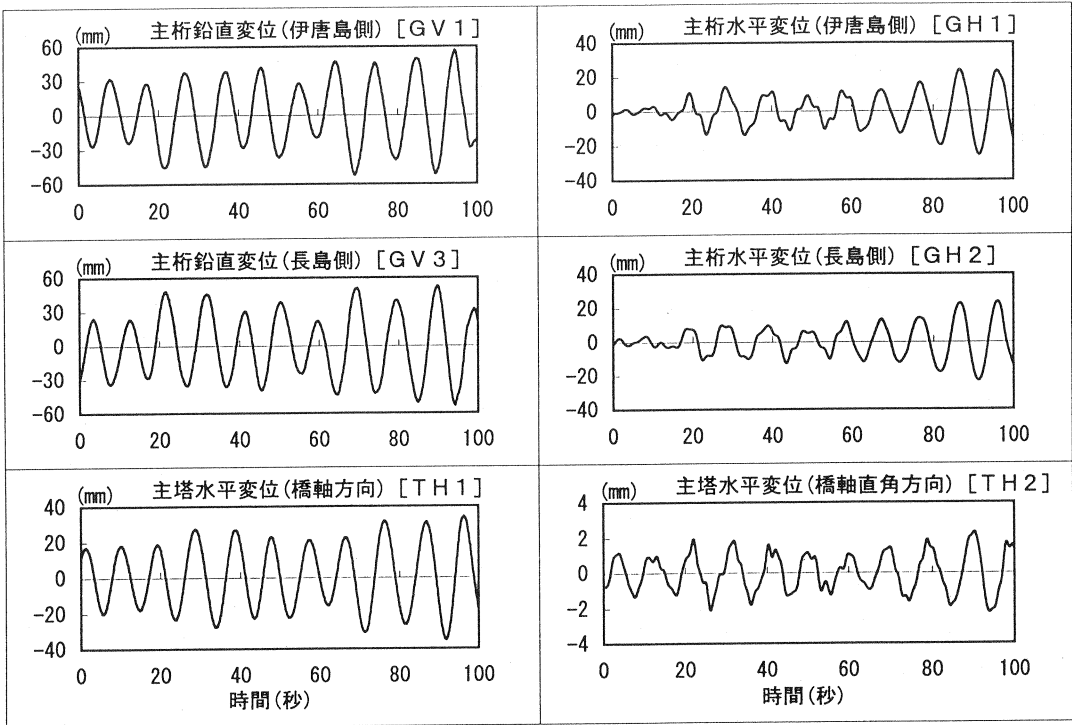


図-3 主桁・主塔の変位波形

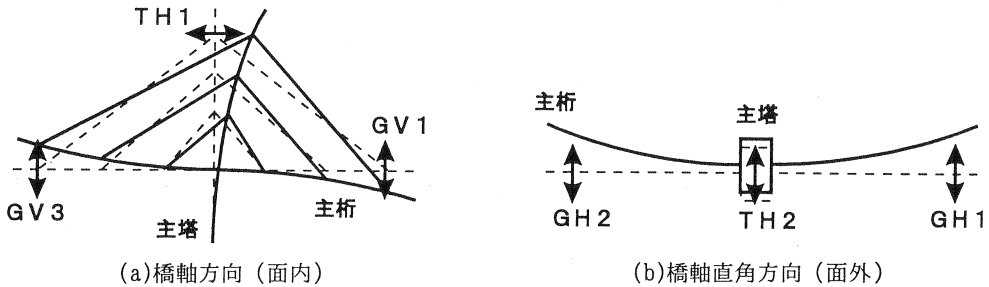


図-4 主桁・主塔の変位形状

次に、図-3に示した波形のフーリエスペクトルを図-5に示す。図-3で波形のよく似ていたTH1、GV1とGV3及びGH1、GH2の卓越振動数は等しく、これらは図-4に示した様に一体となって振動していることが分

かる。これらに対し、TH2 は波形の形状が異なり、さらに他の測点では見られない高振動数成分を含んでいることから独自の振動をしていると考えられる。

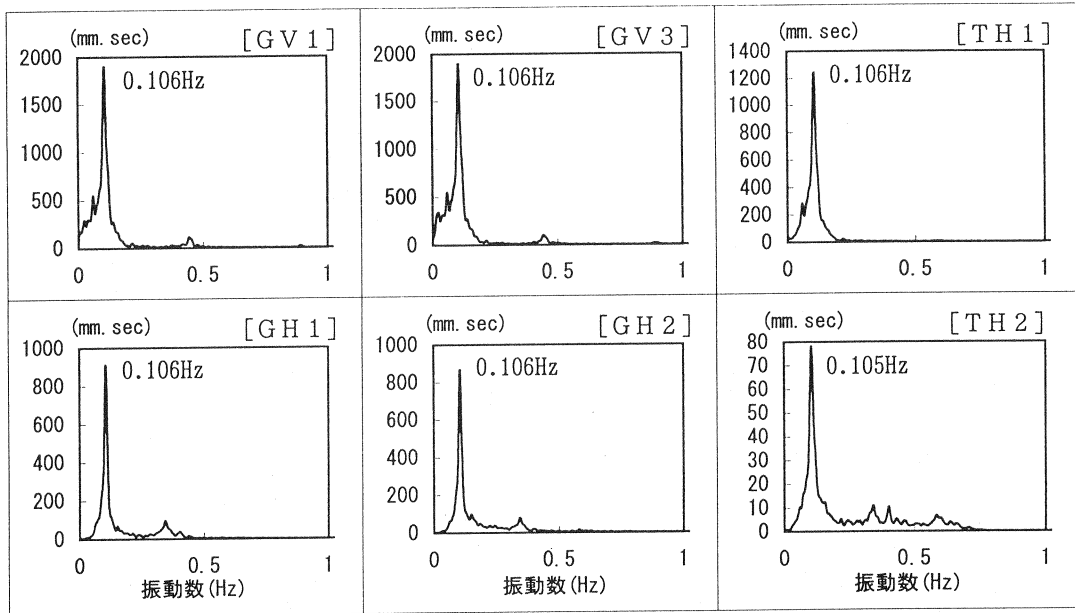


図-5 主桁・主塔の変位波形のフーリエスペクトル

これらの卓越振動数は、主桁・主塔の張出しに伴い変化する。図-6に、卓越振動数と主桁張出し長との関係を示す。主桁の張出しに伴い卓越振動数は低くなるのが分かる。また、同図には、固有値解析による主桁逆対称1次モード(面内)の振動数を実線で示したが、観測値とよく一致しており、設計での動的解析の解析条件は妥当であることが確認できた。

5. 主桁鉛直変位と風速の関係

図-7に、張出し長129mの主桁先端での鉛直変位の10分間の最大値と瞬間最大風速との関係を示す。ただし、この図は、以下の手順によってデータを抽出、補正して求めたものである。

- ①作業などによる人工的に発生した振動を除外するため、夜19時から翌朝7時までのデータを抽出する。
- ②橋軸直角(北西, 南東)に近い風向のみ対象とするため、西~北, 東~南の風向のデータを抽出する。
- ③固有値解析により、主桁逆対称1次のモード形状を各施工段階ごとに算出し、観測位置と主桁先端の鉛直変位の比率を求める。

④①及び②で抽出した観測位置でのデータに③で求めた比率を乗じて、主桁先端での変位を求める。

この図から、主桁変位はほぼ風速の二乗(の定数倍)に比例して大きくなっているのが分かる。同図に

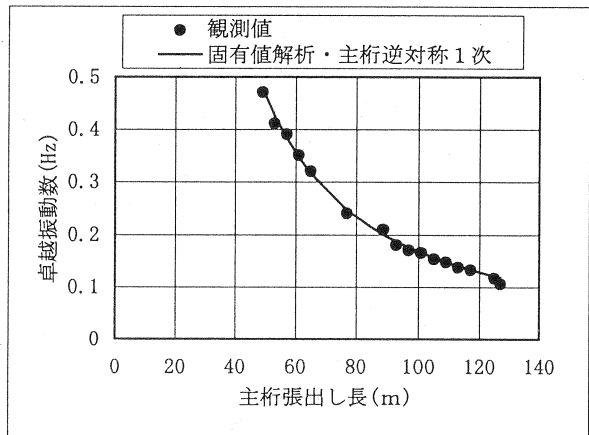


図-6 卓越振動数と主桁張出し長の関係

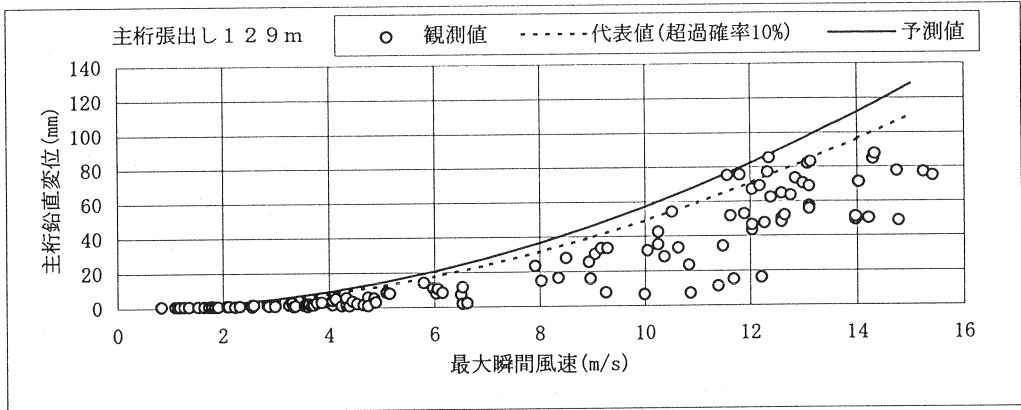


図-7 主桁鉛直変位と最大瞬間風速の関係

示した破線は、ばらつきのある観測値から代表値を求めるために以下の基準で定めた曲線である。

- ⑤主桁変位は風速の二乗（の定数倍）に比例するものとする。（主桁変位 = $a \cdot \text{風速}^2$ ）
- ⑥計算値よりも観測値の方が大きくなる割合（超過確率）を全体の10%となる様に定数； a を定める。

6. 各施工段階での主桁変位と風速の関係の予測

前節で示した主桁変位と風速との関係は、主桁張出し長に伴って変化すると考えられる。ここでは、施工初期の観測結果から求めた主桁変位と風速の関係から、施工が進んだ段階での主桁変位と風速の関係を予測する手法について検討する。

PC斜張橋施工時の各主桁張出し長での主桁鉛直変位と風速との関係について、呼子大橋（佐賀県）施工時に久我、竹田らが関係式を提案しており²⁾、本橋でもこの提案式を適用して、最大張出し長の60%程度の張出し長での観測データから、最大張出し長での主桁変位と風速の関係が予測できることを確認している³⁾。

今回、前節の①～④の様にしてデータを抽出、補正することにより、呼子大橋での提案式を簡略化した式で、各張出し長での主桁変位と風速との関係を求めることができた。さらに特筆すべきは、この手法により、さらに短い張出し段階（40%程度）での観測データからの予測が可能になったことである。その関係式を以下に示す。

$$\delta_L(V) = a_0 \cdot \frac{D_L}{D_0} \cdot \frac{S_u(f_L)}{S_u(f_0)} \cdot V^2 \quad \text{----- (2)}$$

ここに、

δ_L : 張出し長 L (m)での主桁鉛直変位の予測値

V : 最大瞬間風速 (m/s)

a_0 : 基準となる張出し長での観測データから、前節の⑤⑥の手法で求めた定数； a

D_L/D_0 : 張出し長 L (m)の段階での固有値解析で求めた主桁逆対称1次モードの変位形状における、主桁先端と基準となる張出し長位置での鉛直変位の比率

$S_u(f_L)/S_u(f_0)$: 張出し長 L (m)及び基準となる張出し長での変動風速のパワースペクトル（日野の式）の比率

f_L, f_0 : 張出し長 L (m)及び基準となる張出し長での主桁逆対称1次モード（面内）の振動数

本関係式を用いて予測した主桁鉛直変位と主桁張出し長との関係を図-8に示す。この図は、基準となる張出し長 L を53m、最大瞬間風速 V を10m/sとして主桁変位を算出したものである。同図に示した観測値にばらつきがあるが、予測値はほぼその中間値をとっている。同様に、基準となる張出し長 L を53mとして予

測した、張出し長 129mでの主桁鉛直変位と最大瞬間風速との関係を図-7に実線で示したが、予測値と観測値（○印）は、よい対応を示している。

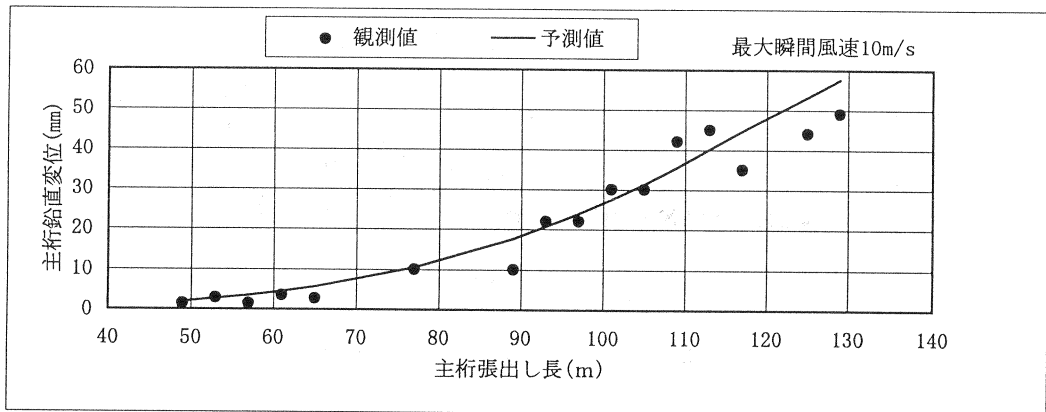


図-8 主桁鉛直変位と主桁張出し長の関係

7. まとめ

最大スパン260mを誇る長大PC斜張橋：伊唐大橋の風による振動特性を把握し、耐風安全性を確認する目的で、施工時風応答観測を行った。この観測データを整理した結果、以下の様な知見が得られた。

- ①他の期間と比較して、12～3月の冬季は、高風速の頻度が高く、乱れ強さも比較的大きい。
- ②振動波形とそのフーリエスペクトルから、施工時の主桁、主塔は橋軸方向（面内）には、主桁逆対称一次モードで、一体となって振動している。また、橋軸直角方向（面外）には、主塔を中心とした左右の主桁は同位相で振動しており、主塔がねじれる様な振動は発生していない。
- ③主桁逆対称1次モードの振動数の観測値と固有値解析結果はよく一致し、設計での動的解析の解析条件は実構造物を適切に評価していたと確認された。
- ④観測データの抽出、補正方法を工夫することにより、比較的簡単な関係式で、施工初期（最大張出し長の40%程度）の観測データから、最大張出し長での主桁鉛直変位と風速との関係を予測できた。

本橋では、風応答観測によるデータを活用して台風対策などの検討を行い、耐風安全性を確認しながら、施工を進めることができた。なお、本論文で用いた主桁変位と風速との関係式が、現在施工中、あるいは今後架設するPC斜張橋の耐風安全性を検討する上での一助となれば幸いである。

謝辞：最後に、今回の風応答観測及び観測データの整理方法に関してご指導頂いた、伊唐島架橋技術検討委員会の渡辺明委員長（九州共立大学教授）、久保喜延委員（九州工業大学教授）をはじめ、委員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，p.9，1991.7
- 2) 久我，竹田，徳山，日紫喜：呼子大橋（PC斜張橋）における施工中の風応答と主桁閉合時の耐風対策，構造工学論文集Vol35A，土木学会，pp.1171～1183，1989.3
- 3) 田口，福田，上野，竹田，上迫田，佐野：風応答観測データを用いたPC斜張橋施工時の主桁振動の予測，土木学会第50回年次学術講演会（投稿中），1995.9