

(140) 風観測に基づく新猪名川大橋張出し施工時の動的特性について

阪神高速道路公団 榎本清治

同 上 奥田英晶

鹿島建設(株) 技術研究所 正会員 新原雄二

鹿島建設(株) 土木設計本部 正会員 山内丈樹

1. はじめに

新猪名川大橋は、阪神高速大阪池田線（延伸部）が一級河川猪名川を渡河する橋長 400m の2径間連続PC斜張橋で、この形式の橋梁としては国内最長のものである¹⁾（図-1）。本橋では、張出し施工時の主桁最大張出し長が 190m 以上にもなること、最大ケーブル長も 210m に及ぶことなどから、張出し施工時の主桁のガスト応答とケーブルのレインバイブレーションの観測を目的とした風観測を実施した。

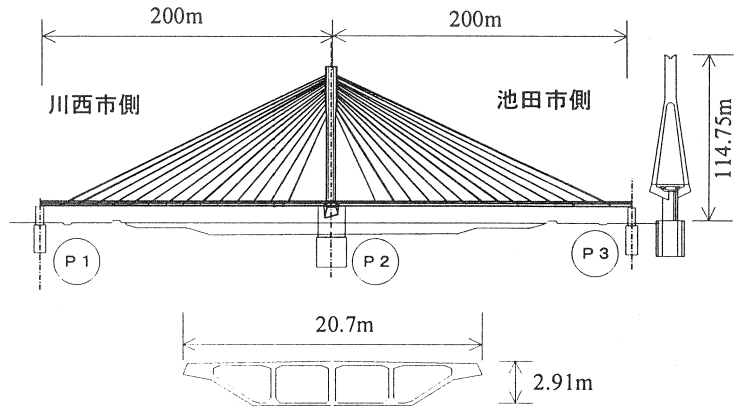


図-1 新猪名川大橋の一般図

主桁のガスト応答とは風の乱れによって発生する振動のことであるが、本橋では各施工ステップにおいて固有振動特性やガスト応答を把握しながら施工を行った。また、最大張出し時において加振実験を行い、張出し状態における減衰定数を測定した。一方、降雨を伴う強風時にケーブルが激しく振動するレインバイブレーションは、本橋のような長大斜張橋では多く報告されているものの、その発生は自然風の乱れ特性の影響を受け、一般には風の乱れの少ない海上橋で発生しやすく、風の乱れの大きい内陸部では発生しにくいといわれている。本橋は内陸部の斜張橋ではあるが、ケーブル長が長いことから、レインバイブレーションの発生が懸念された。そこで、風観測によりケーブルの動態挙動を把握するとともに、現地の自然風の乱れ特性などを調査し、制振対策について検討を行った。

本報告は、風観測結果を基に、施工時における固有振動特性と減衰特性、ならびに主桁、ケーブルの風応答特性について述べるものである。

2. 施工時風観測について

新猪名川大橋の建設地点周辺の地形、市街地状況を図-2に示す。本橋は南北に流れる猪名川と 24.5° の角度で交差しており、河道に対



図-2 建設地点周辺の地形状況

して平行に近い。東側には標高 200m の五月山、西側には市街地が広がっているが、南北方向(河道方向)には比較的障害物は少ない。

風観測では、風速、風向、雨量、主桁とケーブルの上下・水平振動を観測した。風速は橋面上に設置したプロペラ式風速計で、また、主桁お

よびケーブルの振動は速度計で観測したものを積分して変位波形として収録した。データの収録は、毎正時の統計値(平均値や最大値など)を収録する定時観測と、風速があらかじめ設定したトリガー値を越えた場合に 10 分間の時刻歴波形を収録する強風観測とを同時に行った。サンプリング周波数は 20Hz である。主桁とケーブルの速度計は、施工の進捗に伴い移設しながら測定した。観測機器の設置位置を図-3に示す。

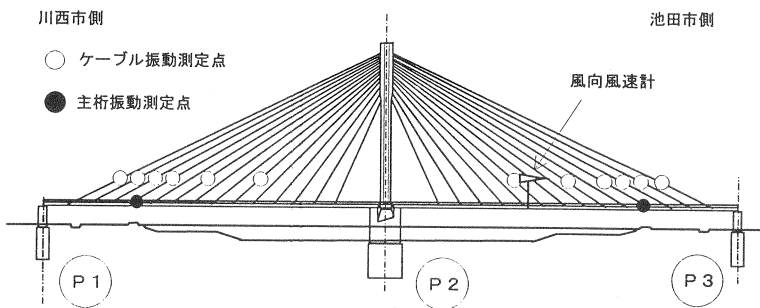


図-3 風観測機器の設置位置

3. 張出し施工時の固有振動特性と減衰特性

3.1 固有振動特性

張り出し施工時の振動特性は、完成系とは大きく異なり、施工ステップ、すなわち張り出し長によって振動特性が刻々と変化していく。図-4は、風観測で得られた主桁の上下振動波形のパワースペクトルの一例を示したものである。1次モードと2次モードのピークが見られるが、縦軸が対数になっているため、1次モードの方が圧倒的に大きいというのが張り出し施工時の振動の特徴である。ここでは、各施工ステップでの固有値解析結果と、実際に観測された固有振動特性とを比較する。

固有値解析から得られた張り出し施工時、主桁連結後および完成後の固有振動モードのうち、代表的なものを図-5に示す。完成後の解析モデルは耐震検討用のモデルであり²⁾、地震時に支承がスライドすることを考慮して、主桁と端橋脚の結合条件は橋軸方向の変位、回転をフリーとしたものである。張り出し施工時および主桁連結後のモデルは、完成系解析モデルから橋面工重量を除き、ワーゲン等の施工時荷重を付加したものである。また、主桁連結後のモデルでは、施工時において主桁が端橋脚に連結された状態を考慮して、主桁端部と端橋脚の結合条件を固定としている。これは、常時において支承部は摩擦により固着しており、主桁と端橋脚には相対変位が生じないためである。

完成系では、主桁と端橋脚の相対変位を伴う面内逆対称1次モードが1次モードとして現れるのに対して、張り出し施工時では橋全体がヤジロベエのように振動する面内逆対称1次モードが1次モードとなり、その固有振動数は極めて低く、構造系がフレキシブルであることがわかる。張り出し架設時には、図-5に示した面内逆対称1次(1次モード)、面内対称1次(4次モード)、面外逆対称1次モード(2次モード)が、風応答波形のスペクトル解析結果から観測された。主桁連結後の振動モードについても、面内逆対称1次モードが最低次モードとして現れるが、その振動数は 0.407Hz と高く、主桁の閉合により構造系全体の剛性が上がり、安定することがわかる。

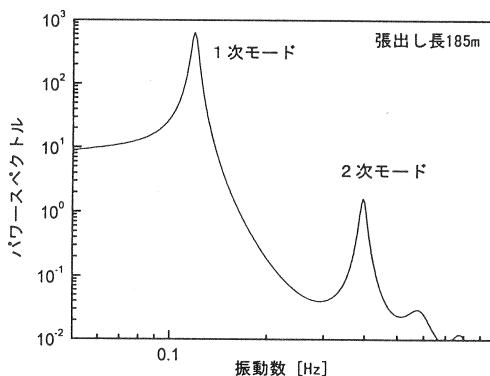


図-4 張り出し架設時の主桁上下振動のスペクトル

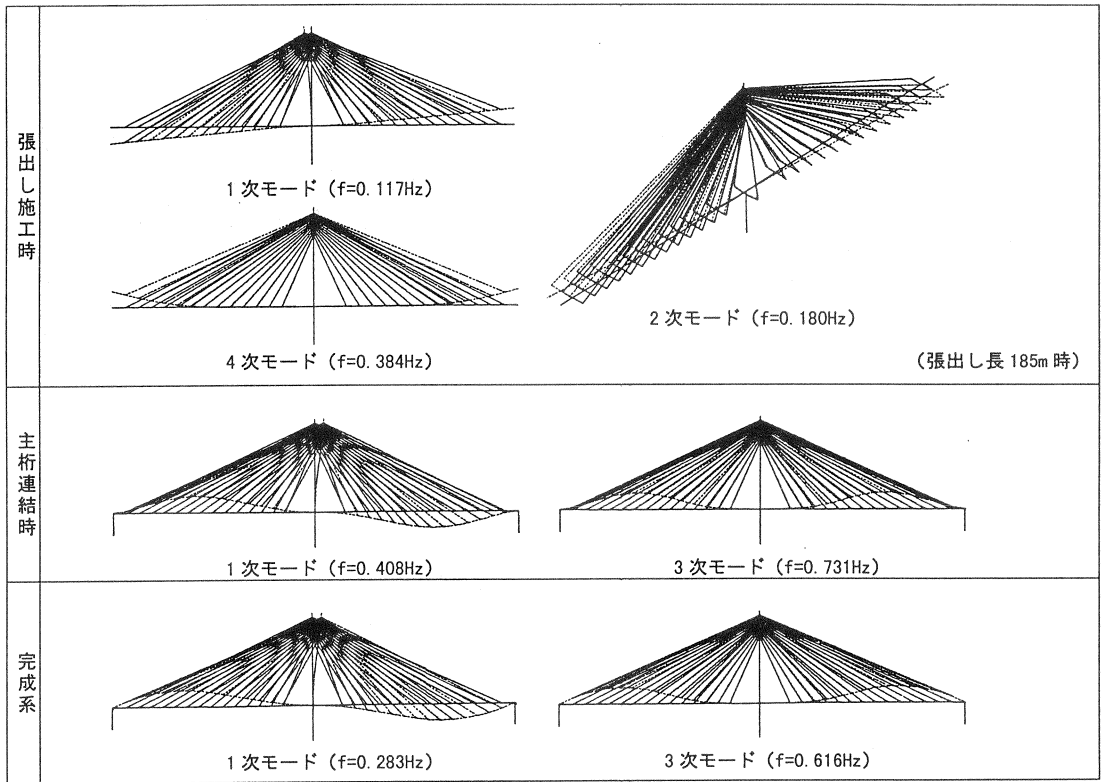


図-5 固有振動モード

風観測から得られた各施工ステップにおける主桁の振動波形をスペクトル解析し、各張出し長ごとに固有振動数を算出した。横軸に張出し長をとり、固有振動数の実測値と解析値とを比較したものが図-6である。張出しの進捗にともない固有振動数が低下し、最大張出し時には面内逆1次モードが0.1Hz程度にまで達しているものの、主桁連結後には振動数が高くなり剛性が上がっていることがわかる。張出し施工時、主桁連結後とも、面内振動モードの固有振動数の実測値と解析値にはよい一致が見られる。面外逆対称1次モードについても、実測値の方が解析値よりもわずかに大きいものの、概ね一致しているといえる。本橋では完成後の振動実験が行われなかったため完成系の振動特性を把握することはできなかったが、上記の観測結果から解析モデルの妥当性が示されていると判断できることから、完成系についても図-5の地震時解析モデルは妥当であるといえる。

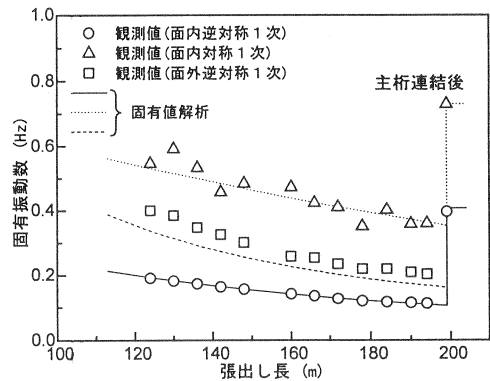


図-6 固有振動数と張出し長の関係

3.2 張出し施工時の減衰特性

張出し施工時のガスト応答の検討においては、構造減衰の評価が重要である。完成系では支承摩擦などにより減衰が付加されると考えられるが、張出し施工時では主たる減衰の要因がコンクリート部材の内部減衰に起因するものがほとんどと考えられるため、減衰がかなり小さくなることが予想される。そこで、本橋最大張出し時において自由振動実験を実施し、構造減衰の測定を行った。

実験方法は、図-7に示すように、主桁先端に4tonの重錘を載せ、アプローチ部の高架橋上に固定したクレーンで、この4tonの重錘を橋の1次固有周期に合わせて上げ下ろしさせて強制加振を行った。加振終了後に主桁を自由振動させ、その波形を主桁の速度計で計測した。実験は3回実施したが、その一例を図-8に示す。図からわかるように、良好な減衰波形を得ることができ、再現性もよかった。この時の主桁先端の最大変位は倍振幅で約28cmであり、大きな加振振幅のデータであることから信頼性も高い。10波毎に減衰定数を算出すると、若干のばらつきはあるものの減衰の振幅依存性は少なく、40波を平均して求めた減衰定数は $h=0.0084$ (対数減衰率 $\delta=0.053$) であった。張出し施工時のPC斜張橋の減衰に関しては、同様の振動実験が伊唐大橋(鹿児島県、中央径間260m)でも行われており³⁾、その時の減衰定数は $h=0.0076$ (対数減衰率 $\delta=0.048$) であった。これらの結果から、張出し施工時の減衰定数は非常に小さいことがわかる。

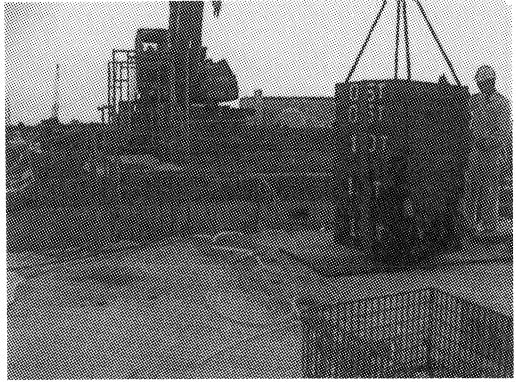


図-7 実験状況

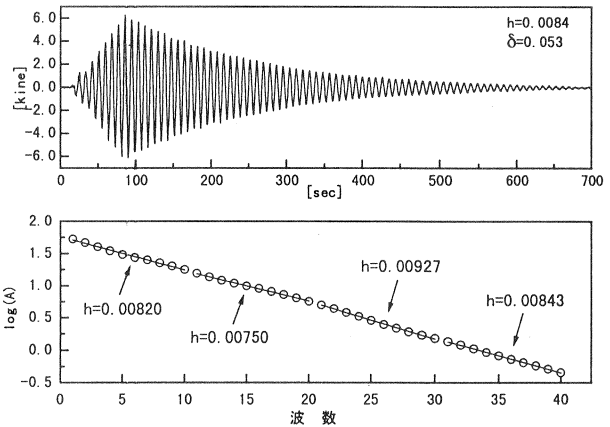


図-8 減衰波形

道路橋示方書V耐震設計編では、コンクリート橋の地震時の減衰定数の参考値として0.03(厳密には部材別に異なる)が与えられているが、本橋の張出し施工時における減衰定数の測定値はこれよりもかなり小さい。張出し施工時における減衰はコンクリート部材

の内部減衰に起因するものがほとんどであり、本実験における加振振幅は線形範囲内であったことから、減衰定数が小さな値になったものと考えられる。一方、地震時には振幅が大きくなること、また支承の変位に伴う摩擦減衰が付加されることなどから、減衰定数は今回の測定値よりも大きくなり、道路橋示方書の値に近づくと推測される。本橋の張出し施工時における減衰定数測定結果は、コンクリート部材の内部減衰に関する貴重なデータと考えられるが、PC斜張橋の地震時の減衰については、支承部の摩擦減衰など含めて、今後の研究課題と考えている。

4. 風観測から得られた主桁のガスト応答とケーブル振動

4.1 風の特性

主桁のガスト応答やケーブル振動の観測結果を報告するにあたり、まず観測から得られた現地の風特性について述べる。

毎正時の定時観測から得られた1月、7月、10月の風向頻度図を図-9に示す。本橋は南北方向に流れる猪名川と24.5°の角度をなしており、橋軸方向は概ねNNE-SSWの方向である。秋から春にかけては、NNW~N~NNE方向の風向が卓越し、逆に、夏にはS方向の風の頻度が多くなるのがわかる。したがって、年間を通して、風向の頻度としては橋軸方向の風が多い。次に、強風観測データから得られた1月、7月、10月における主流風速の乱れ強さを風向に対してプロットしたものを図-10に示す。乱れ強さは、

風速の標準偏差を平均風速で無次元化したもので、風の乱れ具合を表すパラメータである。風速が低いため乱れ強さはやや大きめの値になっているが、障害物の少ない河道方向、すなわちN方向やS方向からの風の場合には概ね20%前後、W方向からの場合には市街地の影響を受けて40%程度という大きな値になっている。このような乱れ強さの値は、海上橋で観測される値(15%程度)よりもかなり大きいことがわかる。

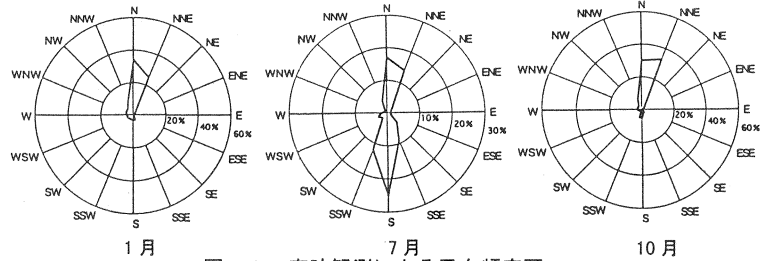


図-9 定時観測による風向頻度図

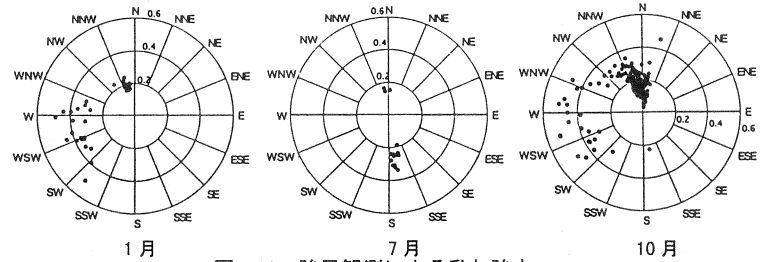


図-10 強風観測による乱れ強さ

4.2 主桁のガスト応答観測結果

ガスト応答とは、自然風の風速変動によって構造物が強制的に揺らされる振動のことである。張出し架設時は構造系がフレキシブルで不安定なため、ガスト応答によって大きな振動が発生することがある。

張出し長 185m 時における主桁のガスト応答の観測例を図-11 に示す。ガスト応答振幅は上下方向で最大 40mm 程度であり、施工上問題となるような大振幅のガスト応答は発生しなかった。これは、本橋の主塔の剛性が高いことに加え、張出し施工時に巨大台風の直撃を受けることがなかったことや、現地の風特性は北風の頻度が高く、本橋に対して橋軸方向の風が多かったためと考えられる。また、主桁の水平振動は、上下振動の1割程度の振幅であった。

4.3 ケーブル振動

一般に、ケーブルのレインバイブレーションに関しては、①ケーブル表面が滑らかな場合に発生する、②風速が 6~18m/s の範囲で発生する、③ケーブルの振動数は 3Hz 以下で、ケーブル長は 60m 以上のものが多い、④風の乱れ強さが 15%程度以上になれば発生しにくくなる、⑤風向は橋軸に対して 30°~80° の範囲で発生することが多い、などの特徴が報告されている⁴⁾。本橋はケーブル表面の滑らかな工場製作ケーブルで、全てのケーブルで長さ 60m 以上、1次固有振動数 3Hz 以下となつて

おり、レインバイブレーションの発生が懸念された。上から2段目のケーブルにおける風速-応答振幅図を図-12 に示す。風速 5m/s 付近と 7m/s 付近で最大振幅 6mm~8mm (振動計取付位置) の振動が観測され

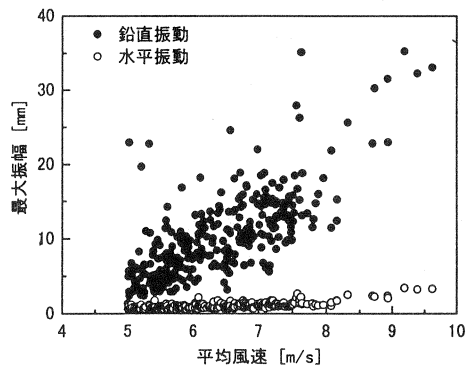


図-11 主桁のガスト応答観測結果の一例

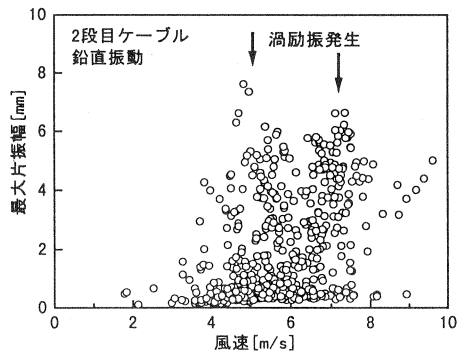


図-12 2段目ケーブルの風速-応答振幅図

たが、これは風速と振動数の関係から高次モードの渦励振と判断された。この渦励振が発生した際の、風速、風向、乱れ強さ、ケーブル振幅の時間変化の一例を図-13に示す。風速が低く、風向、乱れ強さの時間変動が大きい時間帯(10時~15時)にはケーブル振動は発生していないが、風の状況が定常になると渦励振が発生していることがわかる(16時以降)。渦励振はケーブル長の長い上から数段のケーブルで観測されたが、その振幅は通常のレインバイブレーションに比べ非常に小さいものであった。全てのケーブルにおいて、観測期間内にレインバイブレーションの発生は観測されなかった。本橋のケーブル諸元としてはレインバイブレーション発生の可能性はあるものの、年間を通して橋軸方向の風が卓越することや、橋軸直角方向からの風の場合には市街地の影響で乱れ強さが大きくなることなどの架橋地点特有の風環境を考慮すると、レインバイブレーション発生の可能性は低いと考えられた。ただし、長いケーブルでは微小振幅の渦励振が発生したことを考慮して、上側3段のケーブルに対して、制振対策として高減衰ゴムダンパーを設置した。

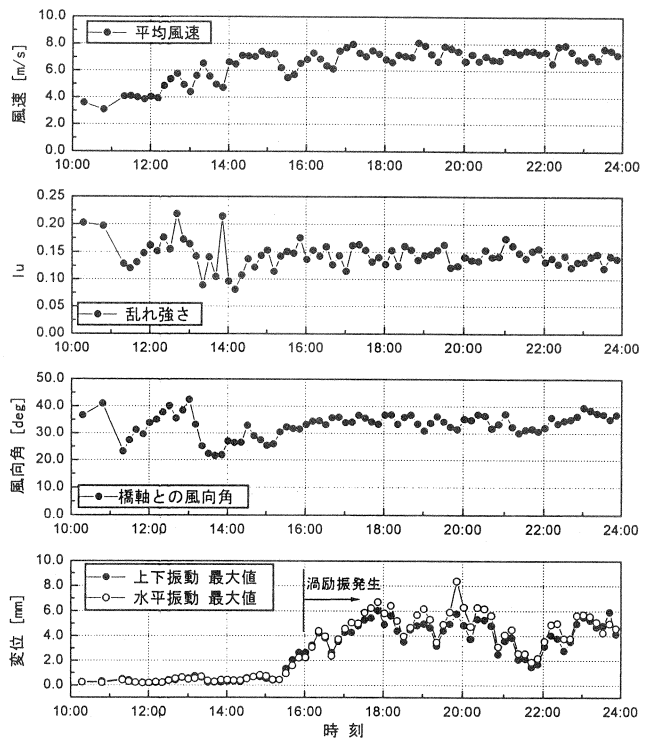


図-13 2段目ケーブル渦励振発生時の経時変化
(1997年9月14日観測)

5. おわりに

新猪名川大橋施工時における風観測結果をもとに、張出し時の固有振動特性、減衰特性ならびに主桁、ケーブル振動について報告した。その結果、実測された固有振動特性と解析結果にはよい一致が見られ、解析の妥当性が示された。また、張出し施工時の減衰定数として0.0084という値を得た。風観測の結果から、施工上有害となるような大振幅のガスト応答は発生しなかった。ケーブル振動に関しても、渦励振の発生は見られたものの、レインバイブレーションは観測されず、現地の風の乱れ特性によるものと考えられた。

本橋風観測ならびにケーブル制振対策においては、京都大学松本教授にご助言をいただいた。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 鳥谷越壮二, 横山雅臣, 奥田英晶, 山内丈樹: 新猪名川大橋の設計と施工, 橋梁と基礎, pp. 2~7, 1997年10月。
- 2) 坂梨利男, 古池正宏, 横山雅臣, 宇津木一弘: 長大P C斜張橋のファイバーモデルによる3次元複合非線形動的解析, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, I-B144, pp. 288~289, 平成9年9月。
- 3) 新原雄二, 竹田哲夫, 大塩 真, 中野龍児: 主桁制振装置による張出し施工中のP C斜張橋の制振, 第5回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 75~78, 平成7年10月。
- 4) 土木学会構造工学委員会振動制御小委員会: 構造物の振動制御(2), 第2回振動制御コロキウム, 1993年8月。