

技術ノート

幸魂橋の主塔およびケーブルの 制振対策について

キーワード

 幸魂橋
 制振対策
 T.L.D.
 ケーブルダンパー

Countermeasures for Wind-Induced Vibrations of Tower and Stay Cables of the SAKITAMA Bridge

 宮本 義雄*
 Yoshio MIYAMOTO

 安藤 修**
 Osamu ANDO

 前田 研一***
 Ken-ichi MAEDA

 米田 昌弘****
 Masahiro YONEDA

 片山 哲夫*****
 Tetsuo KATAYAMA

 内海 靖*****
 Yasushi UCHIUMI

1. まえがき

幸魂橋は、東京外かく環状道路(一般国道298号)の荒川横断部(埼玉県戸田市)に現在架設中の1本柱1面吊り形式の2径間連続鋼斜張橋(190 m+190 m)であり、最終的には上り線および下り線の2橋が並列して架橋される予定になっている。本研究で対象とするのは下り線側橋梁である。参考までに、本橋完成系の一般図を図-1に示す。

本橋は1本柱1面吊り形式であることから、構造対数減衰率が小さい場合、風の作用で、架設時には主塔が橋軸および橋軸直角方向に、また、完成後においても橋軸直角方向に、それぞれ振動する可能性が予想された。従来、主塔の制振対策方法としてT.M.D.方式が一般に採用されてきたが、本橋では制振装置の製作工期・製作費用・設置の容易さ、主塔の製作・架設へのフィードバック性に着目して検討した結果、最近注目を浴びている同調液体ダンパー(T.L.D.)¹⁾を土木構造物としては初めて採用することになった。

一方、斜張橋の長径間化に伴うケーブルの長大化およびポリエチレン管被覆の太径ケーブルの一般化を契機に、Wake galloping²⁾やRain vibration³⁾などの風によるケーブル自身の振動が大きな問題として取り上げられている。本橋でも140 mm~175 mm径のポリエチレン管被覆ケーブルをダブルで使用していることから、上述したような風によるケーブルの振動に対して、その発現可能性および制振対策について十分な検討を実施する必要がある。

本論文は、幸魂橋で発現が予想された主塔およびケーブルの風による振動に着目し、その制振対策方法について検討した結果を報告するものである。なお、本論文の

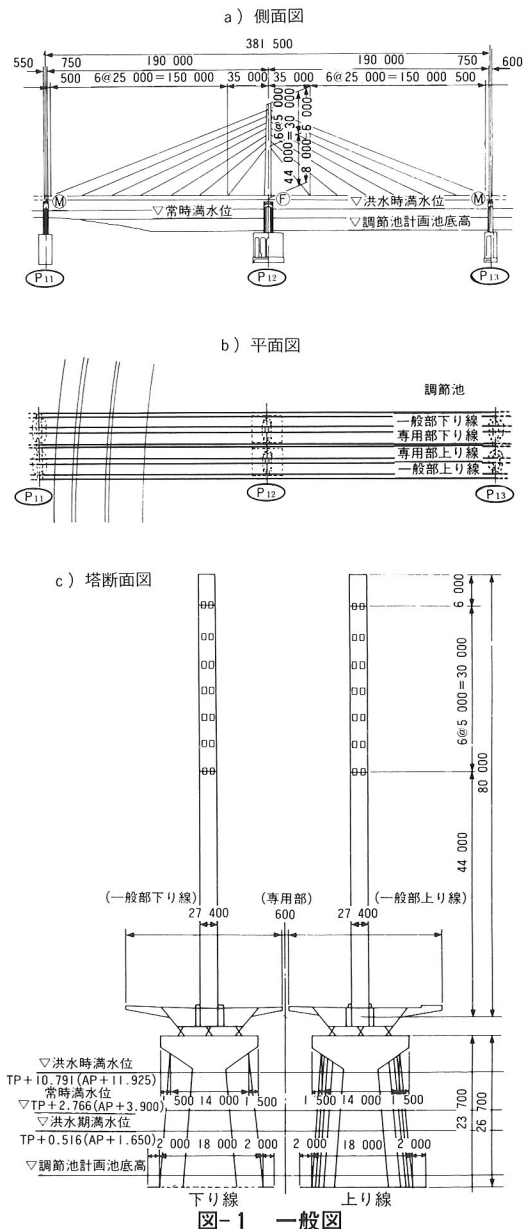


図-1 一般図

*川田工業(株)富山本社工部部工課課長 **川田工業(株)橋梁事業部工部部工課一課係長 ***川田工業(株)技術本部中央研究室室長
 ****川田工業(株)技術本部振動研究室室長 *****川田工業(株)技術本部技術部長大橋課課長 *****川田工業(株)技術本部技術部長大橋課

一部はすでに報告済み^{4),5)}である。

2. 主塔に対する制振対策

(1) 主塔の耐風安定性

既往の1本柱1面吊り形式斜張橋の風洞模型実験結果⁶⁾を考慮し、本橋主塔の耐風安定性について検討した。その結果、構造対数減衰率 δ が $\delta=0.01$ の場合、橋軸直角方向については7.4 m/sで渦励振、8.8 m/sでギャロッピングが、橋軸方向については12.2 m/sで渦励振、14.5 m/sでギャロッピングが、それぞれ発現すると予想されるものの、 $\delta=0.03$ では非常に小さい渦励振しか発現せず、制振装置を設置することにより構造対数減衰率を $\delta \geq 0.05$ まで高めれば、主塔の耐風安定性は十分であると推定できた。

(2) 同調液体ダンパー(T.L.D.)とは

T.L.D.はTuned Liquid Damperの略語であり、適当な大きさの水槽を構造物内に設け、構造物の振動に伴う水槽内の水の碎波を含む水の動揺によって振動エネルギーを消散させ、減衰を高める方法である。参考までにT.L.D.の概念図を図-2に示す。T.L.D.内の液体には水道水が利用できるため、T.L.D.は非常に安価な減衰付加方法である。なお、T.L.D.の所要水深は、液体の振動(スロッシング)が対象とした構造物の固有振動数とほぼ一致するように設定しなければならない。

T.L.D.は、ゴールドタワー(香川県宇多津町)、横浜マリナタワー(横浜市)のような建築用高層タワーの制振に適用例が見られるが、実在の斜張橋主塔の制振対策として採用された事例はない。このため、幸魂橋主塔の制振対策としてT.L.D.を適用するに当たり、せん断振り子タイプの1自由度系モデルによる実験を実施した。

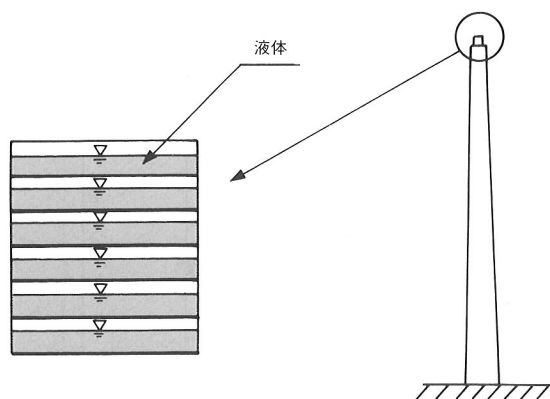


図-2 T.L.D.の概念図

(3) 対象とした架設系

実験で対象とした架設系は、当初、振動発生の可能性が高いと見なされていた主塔独立時状態である。この状態の橋軸および橋軸直角方向の固有振動数は、それぞれ

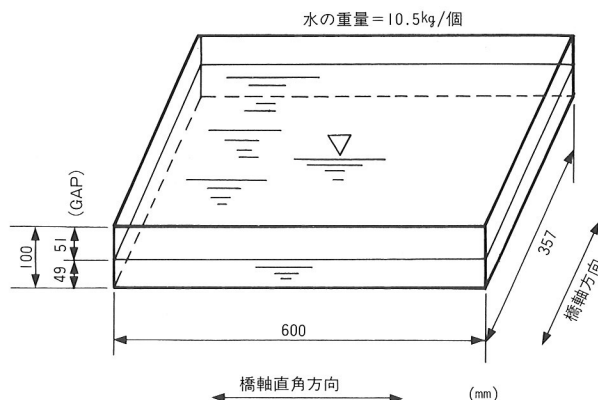


図-3 T.L.D.の容器寸法(主塔独立時状態)

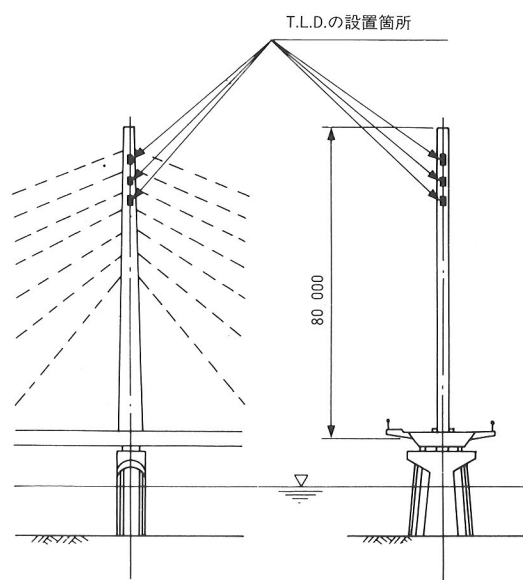


図-4 T.L.D.の設置位置

0.9424 Hz, 0.5713 Hzである。これら2方向の風による振動に対処するため、水槽内の揺れ(スロッシング)の振動数を主塔の固有振動数に一致させるという条件の下で算出した容器寸法は図-3に示すとおりである。また、T.L.D.の設置位置を図-4に示す。等価質量比を1%に設定した場合の所要個数は1カ所当たり96個(合計288個)である。

(4) 実験概要と実験結果

主塔を1自由度系にモデル化したせん断振動系にT.L.D.を設置した場合としない場合について、それぞれ自由振動試験および小型加振機を用いたスイープ試験を実施し、両者の比較からT.L.D.設置による有効性を把握することにした。なお、実験に当たっては、波の進行方向に平行な仕切り板を入れて等価質量比1%が確保できるようにした。せん断振り子型タイプの実験装置を図-5に示す。

実験では、水の注入量誤差の影響を見るために、水深を所要値の4.90 cmとした場合に加え、水深を4.70 cm,

4.50 cmとした場合も併せて実施した。実験で得られた自由振動波形の一例を図-6に、T.L.D.設置により付加される構造対数減衰率をそれぞれ図-7, 8に示す。これらの図より、振幅の非常に小さい範囲を除き、0.40cm程度の注入量誤差があっても付加される構造減衰はほとんど変化しないことがわかる。また、(1)で述べたように、構造対数減衰率の付加量 $\Delta\delta$ が $\Delta\delta \geq 0.05$ であれば本橋主塔の耐風性は十分であると予想していたが、図-7, 8より、橋軸および橋軸直角方向振動とも振幅が大きくなるとともに減衰付加効果は小さくなっているものの、所要値を十分満足していることがわかる。このようなT.L.D.による制振効果は、図-9に示したスイープ試験結果からも理解されよう。

せん断振り子タイプの1自由度系モデルを用いた実験結果より、幸魂橋主塔の橋軸および橋軸直角方向の風による振動は、T.L.D.で十分対処できることがわかった。ただし、本橋では最終的に他の架設工法が採用されるに至った。主塔架設完了時における架設状態を図-10に、この場合の容器寸法を図-11に示す。なお、等価質量比を1%に設定した場合の所要個数は1カ所当たり192個(合計576個)である。この場合のT.L.D.容器は、図-3の寸法に比べ、水深/容器寸法が相対的に小さくなっており、等価質量比が同じであればより大きな減衰付加効果が得られるものと考えられたが、最終的には同様の実験を補足的に実施し、減衰付加効果を確認した後、実橋に適用することにした。その結果については、次の機会に報告する。

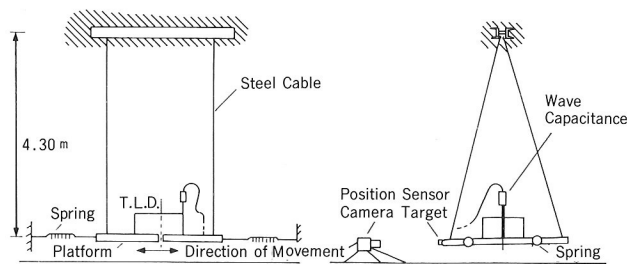


図-5 せん断型振り子タイプの実験装置

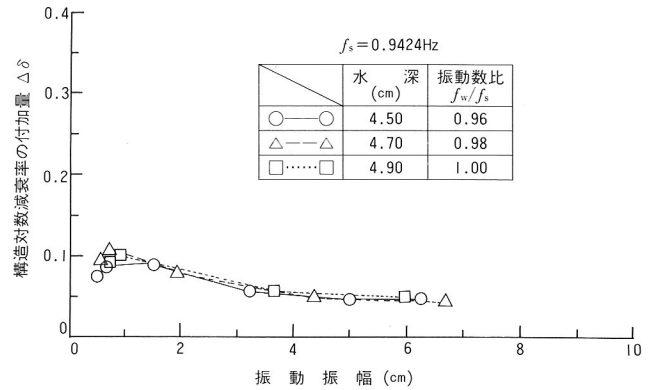


図-7 構造対数減衰率の付加量(橋軸方向)

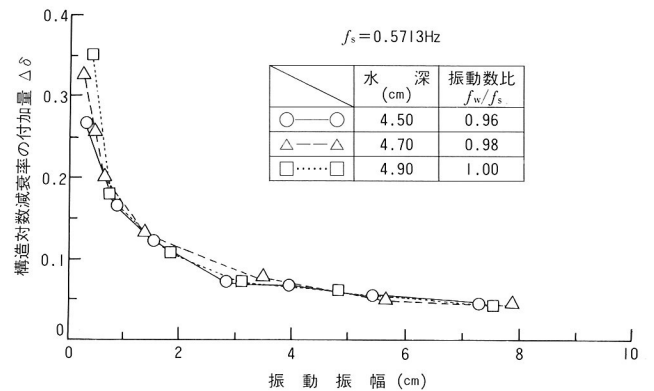


図-8 構造対数減衰率の付加量(橋軸直角方向)

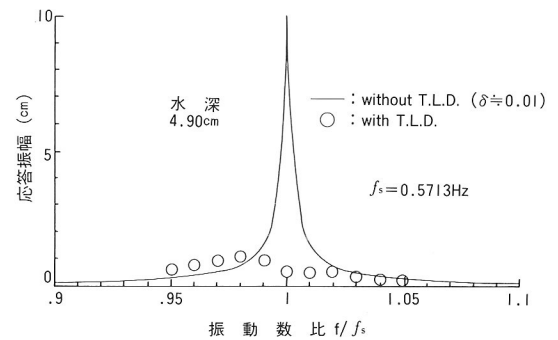


図-9 スイープ試験で得られた共振曲線(橋軸直角方向)

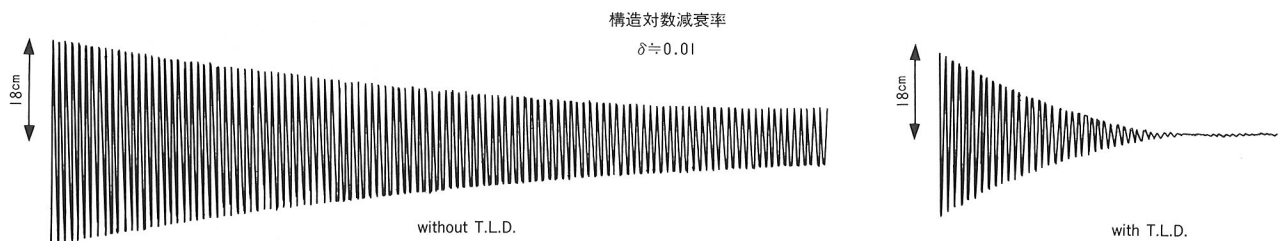


図-6 自由振動波形(橋軸直角方向)

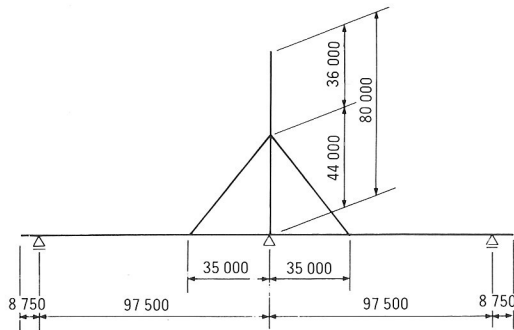


図-10 主塔の架設完了状態

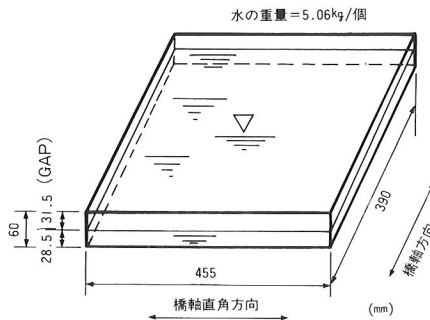


図-11 T.L.D.の容器寸法

3. ケーブルに対する制振対策

(1) 風によるケーブルの振動

斜張橋ケーブルの風による振動は、その発生メカニズムから以下のように分類できる。

① 渦励振

ケーブルの後流域に形成されるカルマン渦によって発生する振動。

② Wake galloping

ダブルケーブルで、上流側ケーブルの後流域に下流側ケーブルが位置することによって発生する振動。

③ Rain vibration

最近、特に注目を浴びているケーブルの空力不安定振動であり、降雨を伴う強風時に発生するのが特徴である。

これら三つのケーブル振動のうち、励振力が比較的に強いWake gallopingとRain vibrationに着目し、本橋ケーブルに対する発現風速をそれぞれ推定した。1次モードに対する推定結果を、それぞれ表-1, 2に示す。

なお、Wake gallopingの発現可能性は、ケーブル間隔 S とケーブル径 D の比 S/D の大きさによって決まることが知られている。本橋の S/D は、4.3~5.4の間にあり、Wake gallopingの発現可能性について検討した結果、迎角が 4° 未満ではWake gallopingは発現しないものの、迎角が 4° 以上になるとWake gallopingの発現する可能性が十分にあることがわかった。

以上の検討結果より、幸魂橋ケーブルにおいても、Wake gallopingやRain vibrationに対する制振対策方法の検討が必要であると考えられた。

表-1 Wake gallopingの発現予想風速

ケーブル名	固有振動数 f_1 (Hz)	ケーブル径 D (m)	発現予想風速 V_{cr}^* (m/s)
C 1	0.52	0.175	2.3 ~ 4.6
C 2	0.63	0.170	2.7 ~ 5.4
C 3	0.72	0.165	3.0 ~ 5.9
C 4	0.83	0.160	3.3 ~ 6.6
C 5	1.02	0.155	4.0 ~ 7.9
C 6	1.31	0.140	4.6 ~ 9.2
C 7	1.89	0.140	6.6 ~ 13.2

* $V_{cr} = 25 \times f_1 \times D \sim 50 \times f_1 \times D$ で算定した。

表-2 Rain vibrationの発現予想風速

ケーブル名	固有振動数 f_1 (Hz)	ケーブル径 D (m)	発現予想風速 V_{cr}^* (m/s)
C 1	0.52	0.175	3.37
C 2	0.63	0.170	3.96
C 3	0.72	0.165	4.40
C 4	0.83	0.160	4.91
C 5	1.02	0.155	5.85
C 6	1.31	0.140	6.79
C 7	1.89	0.140	9.79

* $V_{cr} = 37 \times f_1 \times D$ で算定した。

(2) ケーブル制振の実施例

ケーブルの制振方法は、一般に、ワイヤロープや特殊な治具でケーブル同士を結合する方法とケーブルにダンパーを挿入する方法とに大別できる。

わが国では、尾道大橋、名港西大橋、檀石島橋、岩黒島橋をはじめとして、ワイヤロープや特殊な治具でケーブル同士を結合する方法が採用されてきた。しかしながら、この方法は必ずしも美観的に優れているとは言えず、また、制振効果についても完全には解明されていない。

一方、諸外国では、風によって斜張橋のケーブルが振

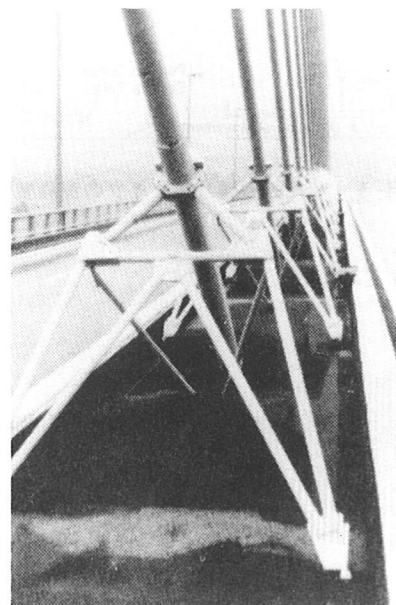
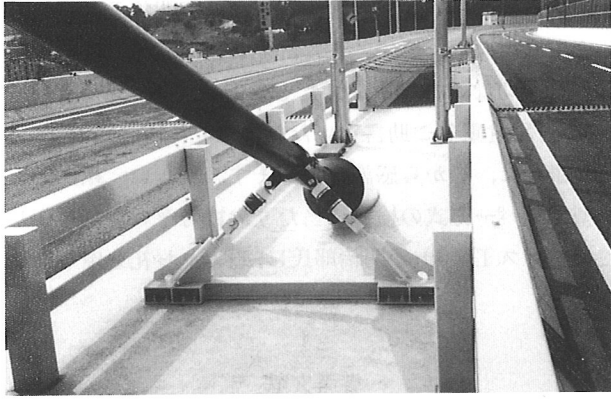


写真-1 プロトヌ橋の制振対策



(写真提供：九州産業大学・吉村 健 助教授)

写真-2 荒津大橋の制振対策(その1)

動した場合の制振対策として、ケーブルにダンパーを挿入する方法が一般に採用されている。代表的な適用例として、プロトンス橋(フランス)、キュールブラント橋(西ドイツ)、サンシャインスカイウェイ橋(アメリカ)を挙げることができるが、ここでは参考までにプロトンス橋での実施例を写真-1に示す。この写真からもわかるように、従来のダンパー方式は、ダンパー取り付け位置が高く、確実な制振効果は得られるものの、美観的には改良の余地が残されていた。

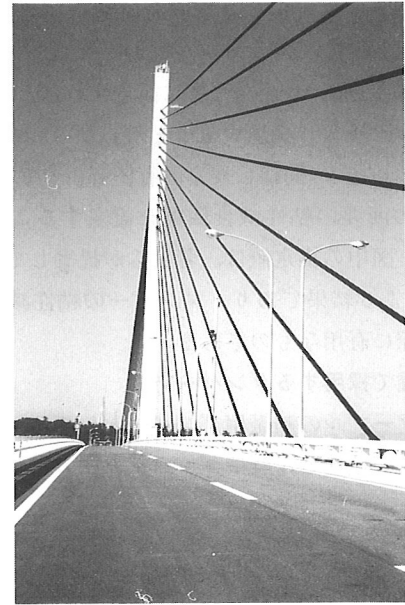
わが国で初めてダンパー方式を採用した荒津大橋⁷⁾では、この点が改良されている。写真-2, 3からわかるように、ダンパーは自動車防護柵より低い位置に設置されており、美観上の問題はほとんどないと考えてよい。

以上より、幸魂橋ケーブルの制振方法については、確実な制振効果が得られ、自動車防護柵より低い位置に設置すれば美観上の問題はほとんどないダンパー方式を選択することにした。

(3) ダンパー方式を採用した場合の所要粘性減衰係数

既往の風洞模型実験結果⁸⁾を詳細に検討した結果、ダンパー設置後の構造対数減衰率が $\delta \geq 0.05$ 以上となれば、風によるケーブル振動をほぼ制振できるものと考えられた。そこで、複素固有値解析を実施して、ダンパー方式を採用した場合の所要粘性減衰係数を設定することにした。ここでは、図-12および表-3に示すケーブルのうち、4段目ケーブル(以下、C4ケーブルと記す)に対する結果を例示する。

なお、ダンパーは、景観上の配慮から設置高さが中央分離帯の自動車防護柵と同程度になるように考え、上フランジから0.9 mの高さ(ケーブル定着点からの高さは2.5 m)のケーブル法線方向に取り付けるものと仮定した。また、ダンパー設置による制振効果を確実に期待するため、桁側のケーブル緩衝装置を除去するものとした。このため、C4ケーブルに対する x_1/l 値(ダンパー取り付け位置/ケーブル長さ)は0.0438となる。



(写真提供：九州産業大学・吉村 健 助教授)

写真-3 荒津大橋の制振対策(その2)

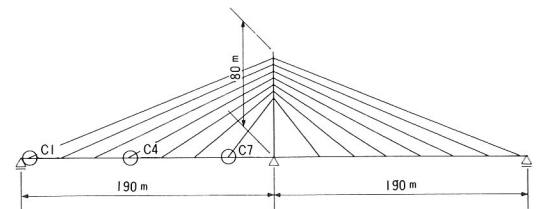


図-12 対象とするケーブル

表-3 対象としたケーブルの構造諸元

ケーブル名称	ケーブル長 l (m)	断面積 A_c (m ²)	重量 w (t/m)	張力 T (t)
C1	198.46	0.0153	0.1278	561.0
C4	123.93	0.0130	0.1082	476.0
C7	54.99	0.0097	0.0815	351.5

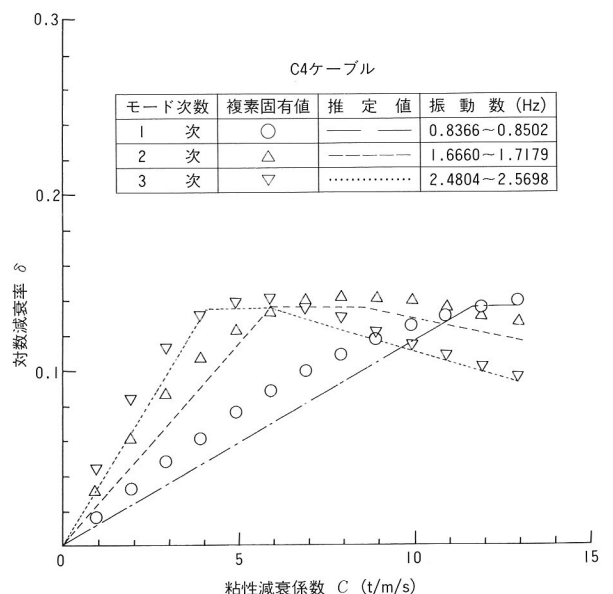


図-13 複素固有値解析結果の一例(C4ケーブル)

C4 ケーブルに対する複素固有値解析結果を図-13に示す。図-13より、C4 ケーブルに対しては、ダンパーの粘性減衰係数を6.0 t/m/s程度に設定すれば、所要の構造対数減衰率を十分に満足することがわかる。その他のケーブルについても、同様に複素固有値解析を実施すれば、ダンパーの所要の粘性減衰係数を設定することができる。なお、図中の推定値は、著者らが提案している実用算定式⁹⁾による結果であり、ダンパーの粘性減衰係数を設定する際に有用なものである。

(4) 本橋で採用するダンパー方式

斜張橋ケーブルの制振用ダンパーとしては、オイルダンパー方式と粘性せん断型ダンパー方式の二つが考えられる。

オイルダンパー方式には、荒津大橋のほか、国外では今までに数多くの使用実績がある。オイルダンパー方式は、ケーブル1カ所当たり2個のオイルダンパーが必要であることから、ダブルケーブルを有する本橋の所要個数は、28本×2個/本=56個となる。

粘性せん断型ダンパー方式は、一つのダンパーで面内と面外の2方向に対処できるという利点を有する。したがって、粘性せん断型ダンパー方式を本橋ケーブルに適用した場合の所要個数は28個となる。粘性せん断型を利用したダンパーは既に橋梁の耐震用ストッパーとして利用されているが、ケーブル制振用に適用された実績はない。しかしながら、粘性せん断型ダンパー方式はオイルダンパー方式と同等の性能を有し、かつ維持管理上も極めて優れている。このため、現在、粘性せん断型ダンパー方式を採用する方向で、室内実験と実橋ケーブルに対する性能実験を計画、実施している。

4. あとがき

本論文は、幸魂橋で発現が予想された主塔およびケーブルの風による振動に着目し、その制振対策方法について検討した結果を報告したものである。

近年における斜張橋の使用実績と、この形式の長スパン化傾向には目を見張るものがある。それに伴い、従来一般に実施されていた桁部の耐風検討に加え、主塔やケーブルの制振対策方法の検討が重要視され、比較的規模の大きい斜張橋では、何らかの制振対策を施す場合が多くなっている。ここで報告した主塔に対するT.L.D.方式、ケーブルに対する粘性せん断型ダンパー方式が、今後の斜張橋における制振対策を検討する際に参考となれば幸いである。なお、T.L.D.方式および粘性せん断型ダンパー方式による制振効果は、既に実橋試験を実施して確認している。その結果については、次の機会に報告する予定である。

最後に、本研究の実施に当たり終始適切なご指導を賜

りました建設省北首都国道工事事務所の関係者各位に、心より感謝いたします。また、T.L.D.方式の検討に当たり常に適切なご指導をいただきました東京大学・藤野陽三助教授、貴重なご助言をいただきました清水建設(株)・藤井邦雄氏に、心から感謝いたします。さらに、粘性せん断型ダンパー方式の検討に当たりご協力をいただきましたオイレス工業(株)・伊関治郎氏に、心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 藤野陽三・B. パチェコ・チャイセリ, P.・藤井邦雄: 同調液体ダンパー(TLD)の基本特性に関する実験的検討—円筒容器の場合—, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.603~616, 1988年3月.
- 2) 横山功一・佐藤弘史・神寄一夫: 近接した2本ケーブルの対風応答特性について, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, I-217, pp.433~434, 1985年9月.
- 3) 樋上琇一: 斜張橋ケーブルのRain Vibration, 日本風工学会誌, 第27号, pp.17~28, 1986年3月.
- 4) 米田昌弘・チャイセリ, ピヤワット・藤野陽三・河田寛行・前田研一・片山哲夫: 斜張橋主塔に対するT.L.D.の制振効果について—せん断振り子タイプの1自由度系モデルを用いた実験的検討—, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, I-309, pp.670~671, 1989年10月.
- 5) 米田昌弘・藤野陽三・河田寛行・山本暢人・宮本義雄・安藤 修・前田研一・片山哲夫: 幸魂橋主塔に対するT.L.D.の減衰付加効果について, 日本風工学会誌, 第41号, pp.105~106, 1989年10月.
- 6) 白石成人・藤沢政夫・石田 貢・斎藤 通: 斜張橋の塔(1本柱)の耐風性の改善法について, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, I-322, pp.678~679, 1987年9月.
- 7) Yoshimura, T., Tanaka, T., Sasaki, N., Nakaya, S. and Higa, S.: Rain-Wind Induced Vibration of the Cables of the Aratsu Bridges, Proc. of 10th National Symposium on Wind Engineering, pp.127~132, December, 1988.
- 8) 例えば, 宮崎正男: 斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制振対策, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.145~150, 1988年12年.
- 9) 米田昌弘・前田研一: ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察, 土木学会論文集, No. 410/ I-12, pp.455~458, 1989年10月.