

連続斜張橋の耐風安定性に及ぼすモード減衰評価の精緻化

大日本コンサルタント 正会員 ○吉岡 勉 松浦雅史 中村正人
阪神高速道路 正会員 杉山裕樹 川田歩美

1. はじめに

長大橋の風洞試験における主桁・主塔のモード減衰は、一般的に対数減衰率 $\delta=0.02$ を用いる場合が多い¹⁾。風洞試験により渦励振等の限定振動が発生する場合、断面の工夫により振動を抑制する空力対策が基本であるが、減衰を付加して制振させることも一案である。

本検討で対象とした連続斜張橋(図-1)では、風洞試験により最適な断面を検討しているが、主桁・主塔ともに渦励振の発生が懸念され、フラップ等の耐風付加物を使わずに許容振幅以下に抑制する方法の一つとして、減衰によって振動を制御すると仮定した場合、目標減衰は主桁鉛直モード 0.050、主桁ねじれモード 0.020、主塔面外曲げモード 0.022 となる。

ここで、橋梁のモード減衰は支間長や上下部接続構造に依存することが知られるが¹⁾、連続斜張橋のモード減衰を実測したデータは見つからず、風洞試験で仮定したモード減衰 0.02 の妥当性及び減衰付加策の必要性を判断しがたい。そこで、本検討ではモード減衰に寄与する各構造要素の減衰定数を設定し、複素固有値解析によりモード減衰の精緻な評価を試みたので報告する。

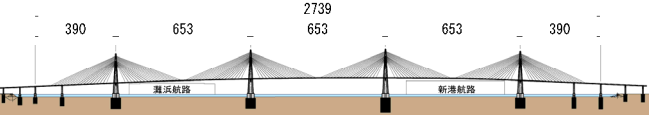


図-1 検討対象とした連続斜張橋 (単位: m)

2. 他橋の減衰実測事例

斜張橋の主桁卓越モードの減衰実測値を図-2に示す。同図より主桁のモード減衰はばらつきが大きいものの、支間長の増加によって減衰が低下する傾向が見て取れる。しかし、減衰 0.02 程度となる多々羅大橋(最大支間長 890m)がある一方で、鶴見つばさ橋のように支間長 500m 以上であっても減衰が 0.05 以上となる橋梁がある。これは上下部接続条件の違いに起因し、鶴見つばさ橋²⁾や気仙沼湾横断橋³⁾のように鋼製の鉛直すべり支承を有する橋梁はモード減衰が大きく、多々羅大橋や新湊大橋のように鋼製支承がなく、ゴム支承や支承部ダンパーの橋梁ではモード減衰が小さい傾向がある。

本検討で対象とする連続斜張橋の上下部接続条件は機能分離型の「鋼製すべり支承+免震ゴムバンプ」を想定すると、モード減衰は 0.02 より大きくなる可能性が考えられる。

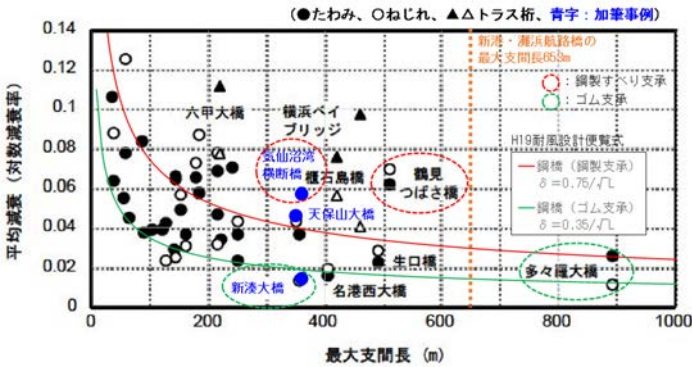


図-2 斜張橋主桁のモード減衰実測値 (文献1の図に加筆)

3. 検討方法

粘性ダンパーを含む多自由度減衰系の振動は、複素固有値解析により減衰系の固有円振動数 ω_i と減衰定数 h_i を直接求めることができる。動的耐風設計におけるモード減衰は同解析で評価されることが多いことから、本検討では複素固有値解析を使用する。

解析モデルは、梁-バネ-質点系の立体骨組みモデルとし、表-1に示す各構造要素の減衰定数 h をモデルに与える。主桁の材料減衰は $\delta=0.02$ とし、主塔は橋軸A型主塔より橋軸直角方向の曲げモードが耐風設計の主の対象となり、主塔面外曲げモードにはケーブルの寄与が小さいと考えられることから、独立1本柱・溶接継手の場合の他橋の実測事例より $\delta=0.01$ と設定した。ケーブルは単体の材料減衰 $\delta=0.003$ としたケースと、ケーブルダンパーを設置した場合を想定して $\delta=0.02$ としたケースを解析した。

表-1 各構造要素の減衰定数

部材	材料	対数減衰率 δ	減衰定数 h	備考
主桁	鋼	0.02	0.00318	本四の耐風設計基準より設定
主塔	鋼	0.01	0.00159	1本柱・溶接継手扱いより設定
ケーブル	鋼	0.003	0.00048	ケーブル単体の材料減衰
		0.02	0.00318	ケーブルダンパーより想定
すべり支承	鋼	別途設定		クーロン摩擦の等価粘性係数 C_e
免震バンプ	ゴム	0	0	ケース2のみ： $h=0.10$ と設定
台座ブロック	RC	0	0	上部工のモード着目より無視
基礎バネ	鋼管	0	0	上部工のモード着目より無視
空力減衰	空気	別途設定		主桁鉛直モードのみ加算

※減衰定数 h は $h=\delta/2\pi$ より算定

表-2 複素固有値解析ケース

ケース	各部材の材料減衰	桁鉛直空力減衰	すべり支承	免震バンプ	ケーブル減衰	解析実施モード
ケース0	○	○	—	—	—	着目全モード
ケース1	○	○	○	—	—	着目全モード
ケース2	○	○	○	○	—	支承卓越モード
ケース3	○	○	○	—	○	着目全モード

キーワード 連続斜張橋, 耐風安定性評価, モード減衰, 構造減衰, 複素固有値解析, すべり支承

連絡先 〒330-6011 さいたま市中央区新都心 11-2 大日本コンサルタント(株)構造耐震技術センター TEL048-600-6692

鋼製すべり支承は、すべり面のクーロン摩擦を仮定して対象モード毎の固有円振動数より等価粘性係数 C_e を設定した。免震バッファは微小振幅域の実験データより減衰定数 $h=0.10$ とした場合を実施した。また、主桁鉛直モードには、揚力勾配に伴う準定常理論を仮定して空力減衰力を別途算定し、モード減衰に加算した。なお、本検討は、上部構造のモード着目より下部構造・基礎の減衰定数は無視した。

解析ケースを表-2 に、着目モードの代表を図-3 にそれぞれ示す。着目モードは、交通規制風速 20m/s 未満で渦励振が発生する主桁鉛直対称 1~13 次、主桁鉛直逆対称 1~12 次、主桁ねじれ 1~3 次、主塔面外曲げ 1~4 次 (1P~4P 主塔) とし、各モード減衰を評価した。なお、複素固有値解析により算出される固有振動数は実固有値解析とほぼ一致することを確認している。

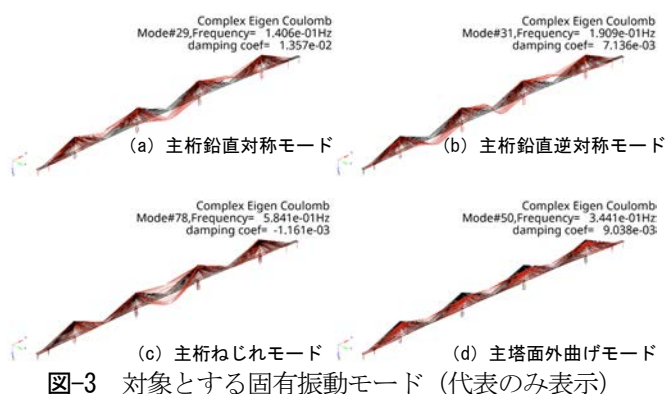


図-3 対象とする固有振動モード (代表のみ表示)

4. モード減衰評価結果

複素固有値解析 (ケース 0, 1, 3) による着目モードの減衰を図-4 に、代表的なモード減衰における各減衰要素の寄与を図-5 にそれぞれ示す。なお、免震バッファの微小振幅域の減衰を考慮したケース 2 も実施したが、その影響はごく小さいため (モード減衰の小数点第 4 位の値が少し変わる程度)、同図には示していない。

主桁鉛直対称・逆対称モードでは、材料減衰 (空力減衰含む) のみのケース 0 では $\delta=0.02$ 未満となり、すべり支承の摩擦減衰を考慮したケース 1 ではモード減衰が増加するものの、図-5 より減衰寄与のモード依存性が強く (なぜ強いかは今後の分析課題)、目標減衰 0.05 を上回るモードは 3 モードにとどまる。ケーブルダンパーによる減衰付加を想定したケース 3 では 0.01 程度の減衰が付加されると想定されるが、今回はケーブル振動を無視した解析のため、参考値である。

一方、主桁ねじれと主塔面外曲げのモード減衰はすべり支承摩擦減衰を考慮することで概ね目標減衰に達し、TMD などの減衰装置を用いずとも耐風安定性を満足できる可能性がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準 (2001)・同解説, 2001.8
- 2) 山口, 高野, 小笠原, 下里ほか：斜張橋振動減衰のエネルギー評価法と鶴見つばさ橋への適用, 土木学会論文集 No.543/ I-36, pp.217-227, 1996. 7
- 3) 平井, 野口, 新地, 渡邊：長大斜張橋における減衰特性の実験的アプローチによる評価計画と実施内容, 土木学会年講 I-55, 2021.9

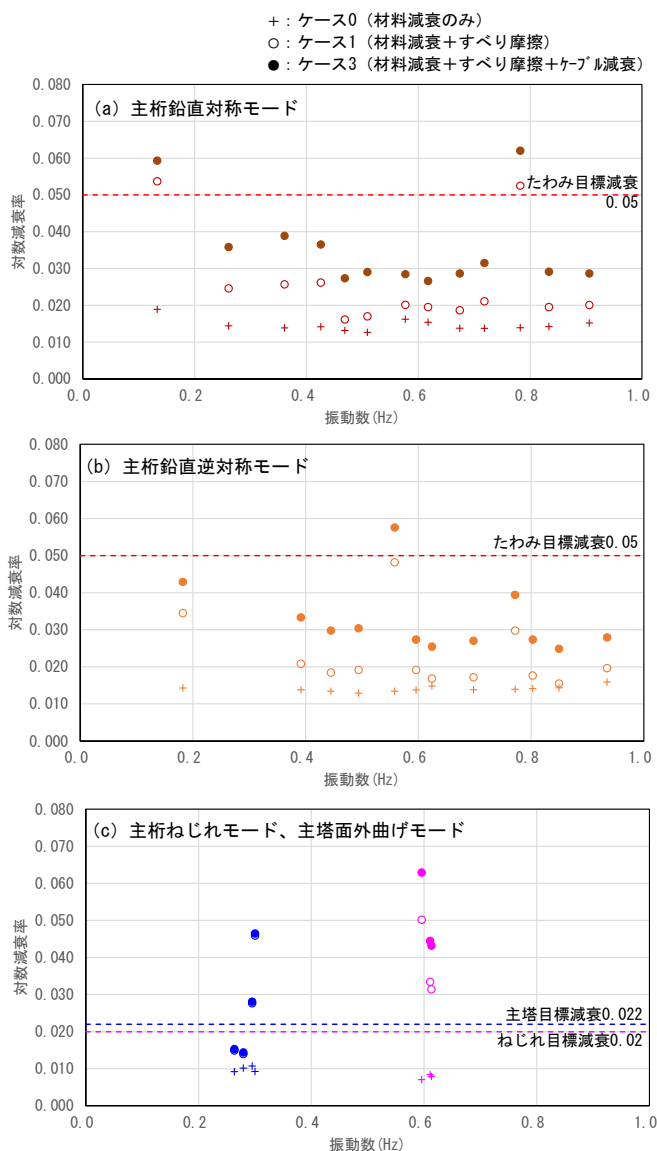


図-4 着目モードの固有振動数とモード減衰の関係

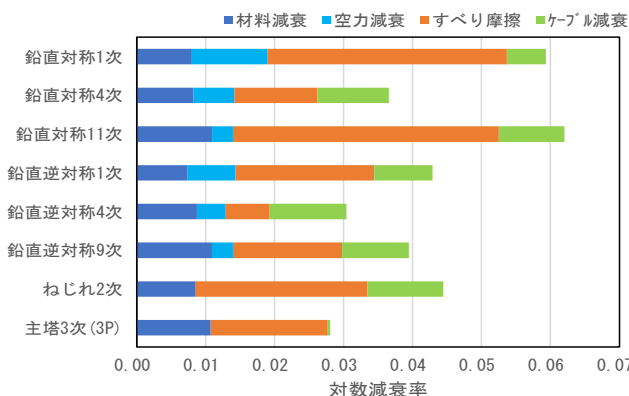


図-5 各減衰要素のモード減衰への寄与 (代表モード)

5. おわりに

今後は、すべり支承摩擦減衰の寄与のばらつきについて分析するとともに、ケーブルを多質点モデルとしてケーブル振動と主桁・主塔モードとの連成を考慮することでケーブルダンパーのモード減衰への寄与について検討する予定である。