

鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化に基づく構造健全度評価

JR 東日本 正会員 ○伊藤 信
 埼玉大学 (大日本コンサルタント) 正会員 吉岡 勉
 埼玉大学 正会員 山口宏樹, 正会員 松本泰尚

1. はじめに

近年、我が国で橋梁の高齢化が着実に進行していることに加え、米ミネアポリスでの橋梁崩落事故や、木曾川大橋での斜材破断事故等の鋼トラス橋での橋梁事故が生じていることから、有効な維持管理技術の確立は急務である。現在、維持管理の基本である近接目視点検は、有効な方法の一つではあるが、目視困難な場所を有するトラス橋のような構造物での有効性に問題がある。そこで、このような問題を有する点検・診断を補う手法の一つとして、振動計測に基づく構造健全度評価法が研究されている。以上のことを背景とした中で、本研究では、トラス橋の基本的な振動特性について、理論・実験の両方から斜材振動の影響を含めて検討した後、斜材に損傷を有する鋼トラス橋の振動計測データから、モード減衰に基づく斜材損傷同定法について検討した。

2. 鋼トラス橋の斜材振動連成特性

(1) トラス橋の固有振動解析

対象橋梁は、支間長 70.77m の単径間鋼下路式ワーレントラス橋 5 連である。斜材は、引張斜材が H 形断面、圧縮斜材が箱形断面であって、**図-1** に各斜材の番号を示している。まず、解析モデルを用いた固有値解析を行うことによってトラス橋の振動特性について検討した。トラスの一般的な振動特性については、上下弦材をはり要素、斜材を軸剛性のみを有するロッド要素でモデル化した解析モデル（一般モデル）を用いた結果、**図-2(a)**のように、上下弦材の振動が支配的な全体モード：トラスモードが得られた。斜材振動のトラスモードへの影響については、斜材をはり要素でモデル化した解析モデル（斜材振動考慮モデル）を用い、2つの解析モデルを比較した結果、斜材振動考慮モデルでは、**図-2(b)**のトラスモードの他に、**図-2(c)**の斜材の振動が支配的になる斜材卓越モードと、**図-2(d)**のトラスモードと斜材卓越モードが連成する斜材連成モードが新たに存在することが分かった。**図-3** に、斜材振動考慮モデルの振動数・モード分布を示す。図より、斜材卓越モードが各斜材で 4 つ、ほぼ振動数を同じくして存在し、その振動数の近くでトラスモードがその斜材と連成することが分かる。さらに**図-3** には、実験モード解析との対応を目的として、実橋で施されている下流起点側 D5 引張斜材の当て板補強を考慮した解析モデル（当て板考慮モデル）の結果も併せて示した。D5 引張斜材の当て板補強により、D5 斜材卓越・連成モードに変化が見られ、局所的な構造特性の変化が、振動数・連成度の変化として斜材モードに顕著に表れることが分かる。

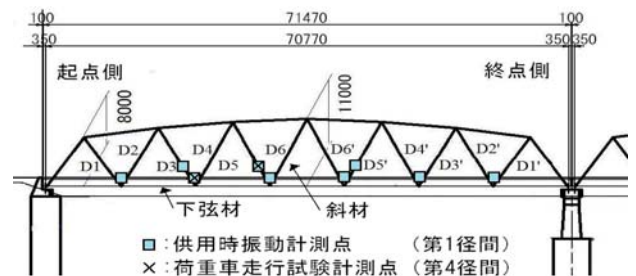


図-1 対象橋梁の側面図および計測点

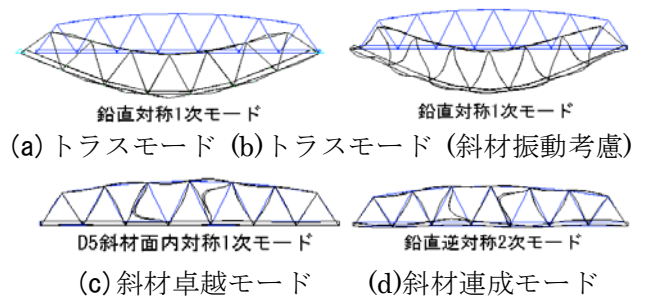


図-2 斜材振動の振動特性への影響

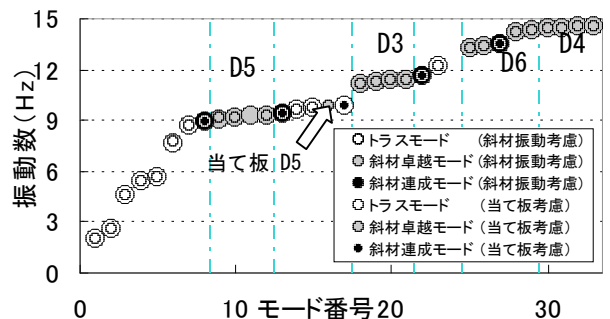


図-3 トラスモードと斜材卓越・連成モード分布

キーワード：トラス橋、振動計測、斜材振動連成、モード減衰、損傷同定

連絡先： 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院理工学研究科 Tel/Fax: 048-858-3552

(2) 供用時振動計測に基づくモード同定

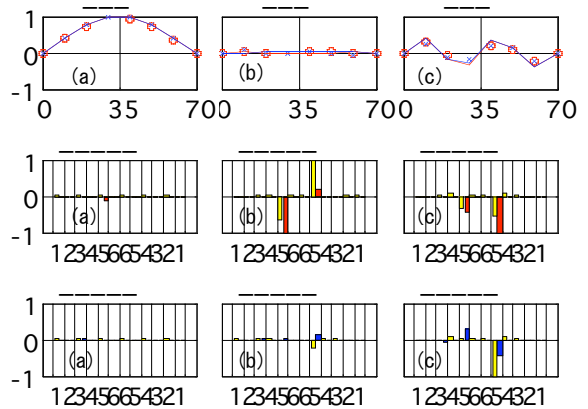
対象橋梁において供用時振動を多点計測し、その実測データから、高精度モード同定法とされる ERA 解析を行った結果と上述の理論モード解析結果を比較して、斜材振動連成について考察を加えた。振動計測は、サーボ型速度計と圧電式ピックアップを図-1 に示した位置に設置し、加速度を計測している。図-4 は斜材と下弦材のモード振幅の大きさの関係に着目し、トラスモード・斜材卓越モード・斜材連成モードと考えられるモードを示したものである。実験値および、それに最も対応すると考えられる当て板考慮モデルの理論モードを併せて示している。斜材のモード振幅の大きさに多少の違いは認められるものの、斜材卓越・連成モードの存在が、実験的にも確認される。以上の結果から、トラス橋の斜材モードの特性が明確になると共に、健全度評価におけるその有用性が示唆されたと考えられる。

3. モード減衰変化に基づく斜材損傷同定

対象橋梁では 2007 年に、第 4 径間の上流起点側 D5 引張斜材において亀裂損傷による半断面破断が発見され、その応急対策として当て板補強が行われたが、その補強前後において、荷重車走行試験による振動計測を行った。加速度計測点を、同じく図-1 に示している。表-1 に、D5 引張斜材の振動計測データを用いた ERA 解析を行った結果として、振動数、モード減衰比、評価振幅値を補強前後で比較して示した。なお、モード減衰比については () 内にその標準偏差も示している。表より、斜材卓越モードでは、破断によって振動数の顕著な減衰と併にモード減衰比について有意な増加が認められる。一方、下弦材の振動計測データを用いた ERA 解析結果を表-2 に示す。表には、同定されたトラスモード3つと斜材連成モード1つを示したが、いずれのモードにおいても、振動数の変化は極めて小さい。これに対し、モード減衰比では、鉛直対称1次モード以外は、トラスモードに対する減衰変化は有意でないものの、斜材連成モード(鉛直対称2次)では斜材破断により減衰が大きく増加している。このことは、トラス橋の斜材損傷同定を、斜材連成モードに対する減衰変化に基づいて行うことの可能性を示唆していると言える。なお、鉛直対称1次モード減衰変化については、補強前後の計測における可動支承の状態の変化に起因していると考えられる。つまり、鉛直対称1次モードは支点変位の大きいモードであること(図-2(a))、および供用時振動計測により同定した減衰の振幅依存性(図-5(a))に示されるように、鉛直対称1次モードでは振幅依存性が顕著であることから、モード減衰変化における支承の影響が大きいことが予想される。一方で、鉛直対称2次モードでは振幅依存性が小さく、表-2 の評価振幅レベルを考慮しても、モード減衰変化が損傷によるものである可能性が高いと考えられる。

4. 結論

トラス橋においてトラスモード・斜材卓越モード・斜材連成モードが存在し、斜材の局所的な構造特性の変化が斜材卓越・連成モードに比較的顕著に表れることが分かった。特に、下弦材の振動データから同定された斜材連成モードでは、モード減衰に着目することで、変化を捉えられる可能性を示した。これらの知見は、トラス橋の構造健全度評価において振動を利用することの有効性を示唆していると考えられる。



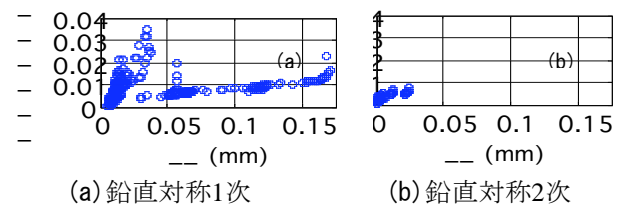
(a) トラスモード (b) 斜材卓越 (c) 斜材連成
 図-4 モード振幅における実験値・理論値の比較 (○・×・■:実験値、—・■:理論値)

表-1 補強前後のERA解析結果の比較 (斜材)

モード推	振動数 (Hz)			モード減衰比			振幅 (mm)	
	補強	補後	前後 (%)	補強	補後	前後 (%)	補強	補後
面対称次 (斜材モード)	7.146	9.847	-27	0.0055 (0.0008)	0.0039 (0.0017)	41	0.549	0.497

表-2 補強前後のERA解析結果の比較 (下弦材)

モード推	振動数 (Hz)			モード減衰比			振幅 (mm)	
	補強	補後	前後 (%)	補強	補後	前後 (%)	補強	補後
鉛直対称 1次 (対称)	2.572	2.554	1	0.0089 (0.0007)	0.0038 (0.0004)	134	0.165	0.185
ねじ対称 1次 (対称)	4.602	4.605	0	0.0027 (0.0005)	0.0042 (0.0004)	-36	0.041	0.023
鉛直対称 1次 (非対称)	5.252	5.295	-1	0.0057 (0.0003)	0.0071 (0.0003)	-20	0.020	0.026
鉛直対称 2次 (斜材モード)	7.130	7.250	-2	0.0106 (0.0005)	0.0059 (0.0003)	80	0.008	0.004



(a) 鉛直対称1次 (b) 鉛直対称2次
 図-5 減衰振幅依存性

斜材卓越モードでは、破断によって振動数の顕著な減衰と併にモード減衰比について有意な増加が認められる。一方、下弦材の振動計測データを用いた ERA 解析結果を表-2 に示す。表には、同定されたトラスモード3つと斜材連成モード1つを示したが、いずれのモードにおいても、振動数の変化は極めて小さい。これに対し、モード減衰比では、鉛直対称1次モード以外は、トラスモードに対する減衰変化は有意でないものの、斜材連成モード(鉛直対称2次)では斜材破断により減衰が大きく増加している。このことは、トラス橋の斜材損傷同定を、斜材連成モードに対する減衰変化に基づいて行うことの可能性を示唆していると言える。なお、鉛直対称1次モード減衰変化については、補強前後の計測における可動支承の状態の変化に起因していると考えられる。つまり、鉛直対称1次モードは支点変位の大きいモードであること(図-2(a))、および供用時振動計測により同定した減衰の振幅依存性(図-5(a))に示されるように、鉛直対称1次モードでは振幅依存性が顕著であることから、モード減衰変化における支承の影響が大きいことが予想される。一方で、鉛直対称2次モードでは振幅依存性が小さく、表-2 の評価振幅レベルを考慮しても、モード減衰変化が損傷によるものである可能性が高いと考えられる。