

トラス構造における形状パターンに着目した損傷箇所推定の検討

横浜国立大学 学生会員 ○石関 圭太
横浜国立大学 正会員 勝地 弘

横浜国立大学 正会員 西尾 真由子
横浜国立大学 フェロー 山田 均

1. 概要

現在我が国では、1970年代に建設された多くの橋梁が老朽化を迎えており、それらの適切な維持管理は重要な課題となっている。特に鋼トラス橋においては、構造的に荷重分散のリダンダンシーが低いため、斜材損傷が橋全体の崩壊につながる可能性がある。目視点検を補うような健全度評価として、吉岡ら¹⁾はトラス橋の局部損傷がモード減衰に与える影響を評価することで、損傷検知の有効性を示した。しかしながら、特に損傷箇所の推定については課題が残っている。本研究では、減衰を指標としてエネルギー逸散をともなう局所的な損傷の有無と損傷箇所の推定を目的とした。本研究では、局所的損傷としてトラス橋部材に生じた亀裂先端付近の塑性変形によるエネルギー逸散効果に着目した。トラス橋中の斜材を模した斜材単一モデルおよびトラスモデルを作成し、部材損傷の減衰効果から損傷箇所とモード減衰のパターン分布を抽出し、実橋梁のモード減衰の変化から損傷箇所の推定手法の検討を行った。

2. 斜材単一モデルにおけるエネルギー逸散評価

損傷が部材の減衰に与える影響について検討を行うため、構造解析ソフトABAQUS6.10-2を用いてシェル要素にてH型断面の斜材単一モデルを作成した。作成したモデルを図1示す。部材長は10m、H型断面は外寸0.3m×0.3m、厚さ0.015mとした。損傷は、ガセット付近のフランジ部で生じる亀裂を想定し、部材端部から0.2mの位置に、長さ0.1mとして作成した。作成したモデルを0.01mの振幅の振動を0.5秒間与え続けることにより時刻歴応答解析を行った。部材の変形形状は既往研究²⁾により軸力が逸散エネルギーに与える影響は小さいことからトラス構造中の斜材振動を考慮しウェブ面外方向に曲げ変形を与えた。減衰は、式(1)によって評価を行う。式(1)は亀裂先端部で逸散する塑

性エネルギー ΔW_D^* に対する斜材全体に生じるエネルギー W_D^* を求めることで等価粘性減衰定数 h の評価を行う。 ω_0 は固有角振動数、 ω は加振力の角振動数である。

$$h = \frac{1}{4\pi} * \frac{\omega_0}{\omega} * \frac{\Delta W_D^*}{W_D^*} \tag{1}$$

図2は曲げ一次の変形を想定し時刻歴解析した結果である。塑性ひずみエネルギー ΔW_D^* が1サイクルごとに蓄積されていることが示された。表1に、同様に曲げ二次、曲げ三次について解析を行った結果を示す。曲げ変形の次数が上がるにつれ変形の曲率が大きくなり、 W_D^* や ΔW_D^* が増加し、減衰定数も高くなることが示された。仮に一般鋼部材の減衰定数 h_g を1%とし h/h_g を評価すると、亀裂損傷によって部材の減衰が8.5%増加したと示された。

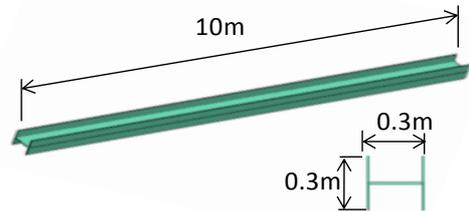


図1 斜材単一モデル

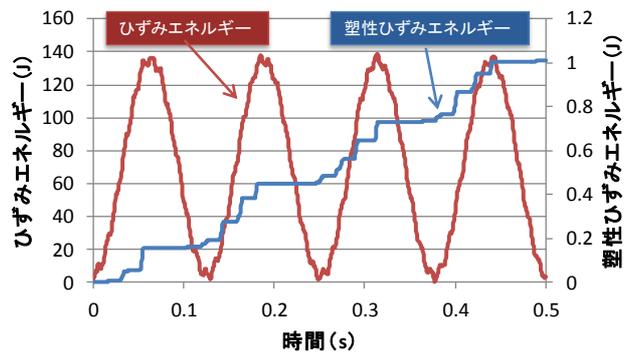


図2 曲げ一次エネルギー評価結果

表1 斜材単一モデルエネルギー逸散評価結果

変形形状	ΔW (J)	W (J)	$\Delta W/W$ (%)	h (%)	h/h_g (%)
曲げ1次	0.5	138.3	0.33	0.09	8.5
曲げ2次	11.7	1181.1	0.99	0.67	67.1
曲げ3次	43.4	4046.1	1.11	1.46	146.3

キーワード 構造モニタリング トラス構造 エネルギー逸散 亀裂 損傷箇所推定
連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 TEL045-339-4243 FAX045-348-4565

3. トラスモデルにおけるエネルギー逸散評価

斜材損傷によるエネルギー逸散評価を行うため、図2に示す二次元平面はり要素トラスモデルを同様に作成した。部材間の境界条件は剛結、支持条件は単純支持とした。部材断面は上下弦材を箱断面、斜材を矩形断面とした。固有値解析を行い、固有ベクトル ϕ_{oj} 、角振動数 ω_j を求め、式(2)により運動エネルギー W_j^* を評価を行った。ここで m は質量、 v は速度、 A は振幅である。

$$W_j^* = \sum_i \frac{1}{2} m_{ij} v_{ij}^2 = \frac{1}{2} \frac{A_{0j}^2}{\phi_{0j}^2} \omega_j^2 \quad (2)$$

j 次のトラス構造に生じる運動エネルギー W^* は各点の質量 m と速度 v の積の足し合わせから求められるが、モードベクトルと一般化質量の性質から変換すると、代表点 o における振幅・固有ベクトルから求めることができる。代表振幅の設定位置を損傷が生じた部材とし、斜材が示すモード形を斜材単一モデルで再現することにより、代表振幅と逸散エネルギーとの振幅レベルを合わせ、式(1)よりモード減衰を求めた。ここで、トラス構造のモード形状のなかで着目する斜材の振動がどれだけ寄与しているか照査を行った。式(3)に示すように、着目斜材 k において斜材に生じる運動エネルギー W_{Dkj}^* に対する構造全体に生じる運動エネルギー W_j^* を斜材の振動卓越度 E と定義する²⁾。

$$E_{kj}(\%) = \frac{W_{Dkj}^*}{W_j^*} * 100 \quad (3)$$

図3は、D1斜材を例に求めたモード減衰と振動卓越度との比較を行った結果である。横軸にモード次数、縦軸に斜材卓越度、減衰定数を示した。減衰定数と斜材の卓越度の推移がおおむね一致していることからモード形状の中で着目する部材の振動が卓越するモード次数において減衰効果が高まること示された。このことから部材ごとに卓越するモード次数が異なることでモード減衰の変化から損傷部材を推定することができると考えた。

4. 損傷箇所推定の検討

D1斜材と同様に、全ての部材に損傷を仮定しモードごとに減衰を同様に求めた。その中でも比較的大きい値を抽出するため便宜的に図3中に示す基準値線として示す0.004%の基準値を設けた。表2は、損傷部材をD1斜材からD14斜材それぞれとしたときの、モードごとに減衰定数を求めた結果を示したものである。図3における表中の基準値以上の値を赤く示すパター

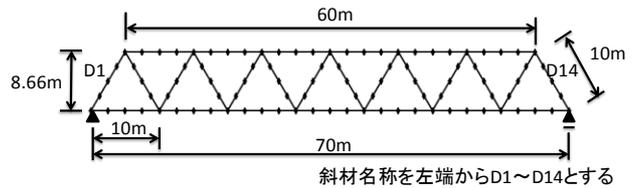


図2 二次元平面トラスモデル

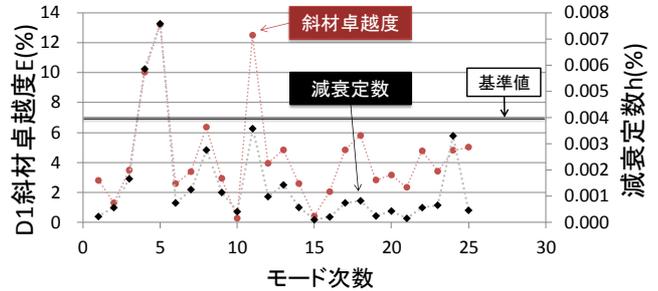


図3 D1斜材の振動卓越度とモード減衰の比較

表2 損傷箇所の推定

モード次数	減衰定数 (%)													
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14
1	0.005	0.001	0.001	0.002	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.003	0.001	0.001	0.001	0.000
2	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.004	0.001	0.002	0.004	0.006
3	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001
4	0.006	0.000	0.005	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.005	0.003	0.005
5	0.005	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005	0.005
6	0.001	0.005	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.006	0.000	0.004	0.001
7	0.001	0.007	0.001	0.000	0.000	0.003	0.001	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.006	0.001
8	0.003	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.005	0.005	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.003
9	0.001	0.003	0.001	0.002	0.000	0.005	0.003	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.003	0.001
10	0.000	0.001	0.000	0.001	0.008	0.001	0.000	0.000	0.003	0.004	0.004	0.000	0.002	0.001
11	0.004	0.001	0.004	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000
12	0.001	0.001	0.007	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.004	0.000	0.000
13	0.001	0.001	0.002	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.000	0.002	0.002	0.001
14	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.001
15	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000

ン分布表を作成した。この分布表を用いて、例えば実橋梁において4次モードと11次モードのモード減衰が高まったとする。パターン分布表より、4次モードと11次モードの基準値以上を示す値に着目することで、基準値以上を示すモード減衰が現れる損傷想定部材を抽出することで、損傷部材をD1, D3, D11, D12斜材と絞りこめることができる。また、4次モード11次モードともに該当している、D3斜材が損傷の可能性が高いことが推定できた。

5. 結論

損傷部材の推定には、対象橋梁に対してモデルを作成し、部材損傷の仮定からエネルギー比によるモード減衰をあらかじめ算出し、モード減衰のパターン分布表を作成する。分布表を常時振動のモニタリングから求めたモード減衰との比較を行うことで、トラス構造中の損傷部材を推定できる可能性を示すことができた。

参考文献

1)吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価; 土木学会論文集, 66A, pp516-534, 2010
 2)糸数青剛: トラス橋の振動特性変化に着目した損傷同定解析; 土木学会年次学術講演会, 2012