

はりの損傷評価における曲率変化の感度特性について

大同工業大学 正 ○水澤富作

大同工業大学 学 高木信治

1. はじめに 既存構造物の損傷評価や健全度診断が、合理的な維持管理を行うために重要な課題となっている。構造物に生じるひび割れや局所変形などの損傷は、地震、衝突、交通量の増大や車両の大型化に伴う過酷な供用や疲労により発生し、その規模により構造システムを変化させたり、局部的に剛性を低下させる。このような損傷を持つ構造物では、一般に振動数が低下し、振動モードの形状が変化したり、また減衰係数が増大する傾向が明らかにされている¹⁻²⁾。しかしながら、構造物の損傷による力学的特性の変化を知ることと損傷位置や損傷幅を予測することは、本質的に異なった問題である。また、たわみや振動数は、構造システムの平均的な力学特性を表す物理量であるので、損傷に対する感度がさほど顕著に見られず、また損傷位置を特定することが困難のように思われる。

本研究では、損傷ばりのたわみや振動変位モードより求められる曲率変化に着目し、はりの損傷位置や損傷幅を予測するための一損傷評価法を提案する。特に、損傷を持つはりの曲率変化の感度特性について検討し、損傷位置やその大きさとの関係についても検討する。

2. 損傷解析法 ひび割れや局所変形などの損傷がはりに生じると、ひび割れ断面や損傷領域での曲げ剛性が低下し、その位置で局所的に曲率の大きさが増大する。したがって、この曲率の変化を調べることにより、はりの損傷の有無を予測することができる。ただし、はりの損傷モデルは、線形弾性を仮定し、曲げ剛性のみが局所的に低下するものとし、また振動解析においては、質量の欠損を考慮しない。

はりの曲げ曲率は、はりの曲げ理論より、次式で与えられる。

$$\phi = d^2 W / dx^2 = -M_x / EI_x \quad (1)$$

ここで、 ϕ は任意の点での曲率であり、 W はたわみ、 M_x は曲げモーメント、 EI_x ははりの曲げ剛性である。また、 i 点での曲率を ϕ_i とすると、中央差分公式を用いて、近似的に次式で表わせる。

$$\phi_i = (W_{i+1} - 2W_i + W_{i-1}) / \delta^2 \quad (2)$$

ただし、 δ は、たわみを与える格子点間の距離またはNewmarkの数値計算法での分割パネル長である。したがって、解析的にまたは実験的に任意の点でのたわみまたは振動の変位モードが求まれば、式(2)より、曲率曲線や振動曲率モード曲線が容易に求められる。式(2)より求められる曲率の精度は、離散点で与えられるたわみと差分公式の格子点間の長さ δ に依存する。ここで、精度の高い曲率を求めるために、Newmarkの数値計算法を用いる。この方法は、厳密な基礎方程式を近似的に解く解析法であり、弾性荷重(M_x/EI_x)より求められる等価集中荷重の概念とモールの定理を用いた数値積分法である。また、反復法のStodola法と組み合わせたStodola-Newmark法を用いれば、損傷ばりの固有値計算ができる³⁾。

3. 損傷解析例及び考察 局所的な損傷を有する単純ばりや片持ばりのたわみ、曲げ曲率、振動数や振動曲率モードに与える損傷位置、損傷幅や剛性低下率で表した損傷の大きさなどの影響について解析する。損傷を受けた部分は、その分割要素の曲げ剛性を低減させることにより評価している。数値計算では、損傷幅も考慮できるように、はりを200分割している。はじめに、損傷を受けた単純ばりの曲率変化の感度特性を調べるために、その曲率変化に与える損傷位置、損傷の大きさや損傷幅の影響について解析を行ってみた。Table 1には、Fig. 1に示すような等分布荷重を満載した単純ばりのたわみ、 W と曲率、 ϕ に与える損傷位置、 L_p 、損傷の大きさ、 I/I_0 や損傷幅、 L_c の影響が示されている。ただし、損傷の大きさは、断面二次モーメントの低減比、 I/I_0 で表わす。 I と I_0 はそれぞれ損傷がある場合と無い場合の断面二次モーメントである。また、Fig. 2には、損傷幅比、 $L_c/L=0.01$ の場合のたわみ曲線と曲率曲線に与える損傷の大きさの影響が示されてい

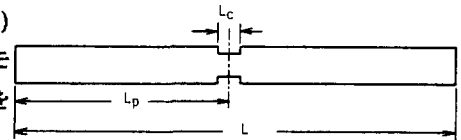


Fig. 1 Beam with a local damage

る。これより、はりの損傷に与える曲率変化の感度がたわみと比較して非常に大きいことがわかる。たわみ曲線を用いて損傷位置を特定することが困難であるが、曲率曲線を求めれば、損傷位置が的確に求められる。以上の計算結果より、はりの損傷に与える曲率変化の感度が非常に大きく見られる。一方、構造物の損傷評価法として、これまでに振動の変位モード形状や振動数の変化に着目して、その損傷の度合を判定する研究が行われてきている。しかしながら、損傷に与える変位モード形状の感度はさほど大きく見られず、また高次の変位モード形状も必要となる場合がある。ここでは、振動の変位モード形状と式(2)を用いて求めた曲率モード形状の変化に基づく損傷評価法について示す。ただし、この曲率モード形状の算定では、質量の欠損を無視し、また曲げ剛性の低下の大きさは、弾性係数の低減比、 E/E_0 で与えている。Fig. 3には、固定端近傍に損傷を持つ片持ばりの曲率モード形状が示されている。変位モードに与える損傷の大きさや損傷位置の影響はほとんど見られないが、曲率モード変化に与えるこれらの影響は顕著に示され、その損傷位置も明確に示されている。これより、はりの損傷に与える曲率モード変化の感度が非常に大きく、また損傷位置や損傷幅を推定することができる。

4. あとがき

本研究で得られ主な結果を示すと、次のようになる。

- (1) たわみの二階微分で定義される曲率は、断面剛性の低下で表される損傷に、非常に鋭敏である。
- (2) 曲率曲線または振動曲率モード形状を求めれば、損傷位置や損傷幅が予測できる。
- (3) したがって、損傷位置と損傷幅が推定できれば、その損傷の度合は、他のミクロ的な非破壊検査法などにより評価できる。

参考文献

1. 西村他：橋梁の損傷評価における力学挙動の有効性。土木学会論文集、第380/I-7, 355-363, 1987。
2. 構造工学委員会非破壊評価小委員会：土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ。土木学会論文集、委員会報告、No. 428/I-15, 1-18, 1991。
3. 水澤、中平：変断面ばりの振動解析におけるStodola-Newmark法の数値安定性について。H2年度中部支部講演概要集、I-9, 18-19, 1991。

Table 1. The effect of location of damage, L_p and stiffness deduction ratio, I/I_0 on the deflections and curvatures of a damaged beam with simple supports subjected to uniform load, q ; $L_0/L=0.01$

L_p	I/I_0	$W_{L/2}$	$\phi_{L/2}$	$W_{L/4}$	$\phi_{L/4}$
-	0.0	1.3021	-1.250	0.8277	-0.8377
L/2	0.05	1.305(0.23)	-1.318(5.28)	0.8290(0.14)	-0.8377
	0.1	1.307(0.38)	-1.389(11.1)	0.8303(0.28)	-0.8377
	0.3	1.322(1.54)	-1.786(42.9)	0.8378(1.09)	-0.8377
	0.5	1.349(3.81)	-2.500(100)	0.9512(2.53)	-0.8377
	0.7	1.411(8.37)	-4.188(233)	0.9824(5.90)	-0.8377
	0.8	1.488(14.3)	-6.250(400)	1.022(10.2)	-0.8377
L/4	0.05	1.303(0.08)	-1.250	0.8291(0.15)	-0.8868(5.24)
	0.1	1.304(0.15)	-1.250	0.8308(0.31)	-1.042(11.1)
	0.3	1.310(0.81)	-1.250	0.8389(1.21)	-1.339(42.8)
	0.5	1.320(1.38)	-1.250	0.9538(2.81)	-1.875(100)
	0.7	1.343(3.15)	-1.250	0.9890(6.81)	-3.125(233)
	0.8	1.372(5.38)	-1.250	1.032(11.2)	-4.688(400)
multipliers		$(10^{-2})qL^4/EI_0$	$(10^{-1})qL^3/EI_0$	$(10^{-2})qL^4/EI_0$	$(10^{-1})qL^3/EI_0$

() is the ratio(%) of the values of damaged beam to those of undamaged beam.

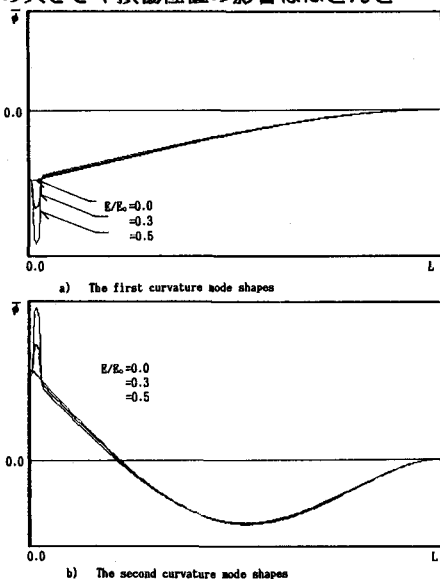


Fig. 3 The effect of a local damage at the position of $L_p=L/50$ on the curvature mode shapes of cantilever beams; $L_0/L=0.01$

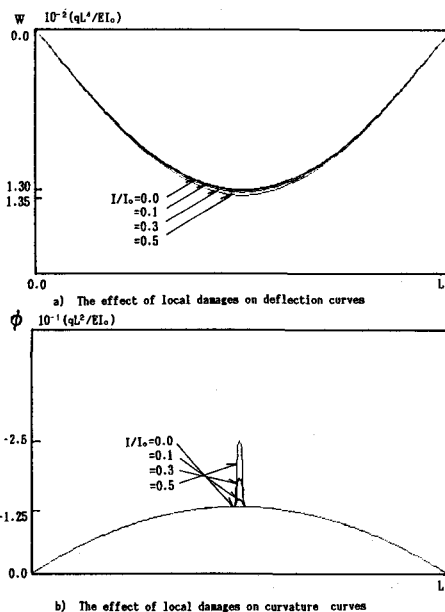


Fig. 2 Sensitivity of local damages on the deflection and curvature curves of simple beams subjected to uniform load; $L_0=L/2$ and $L_0/L=0.01$