

Stochastic Damage Locating Vector 法を用いたプレートの損傷同定

東京大学 学生会員 ○白石 琢真
 東京大学 正会員 長山 智則
 東京大学 フェロー 藤野 陽三

1. 研究目的と背景

近年、先進国では高齢化、老朽化しつつある土木構造物の効率的な点検維持管理体系が求められている。このような中で、構造物の状態を反映する振動特性から構造物の健全性を推定する研究がなされている。技術的にも光ファイバセンサや無線センサなどのセンシング技術の向上により、構造物の振動を高精度かつ多点計測することが可能になりつつある。このような多点振動計測を利用した損傷同定の理論として Stochastic Damage Locating Vector 法(SDLV 法)がある。この手法は損傷の可能性を有する部材を損傷前後の構造物の振動特性の差から求めるものである。既往の研究では、自由度が少なく、計測や解析が容易であるトラス構造物においてのみ理論の適用がなされている。本研究では、SDLV 法のプレートに対する適用性をシミュレーションにて検証し、さらには高精度かつ多点振動計測が可能なレーザードップラー速度計¹⁾を用いてプレートへの SDLV 法の適用性を実験的に検証することを目的とした。

2. SDLV と正規化応力指標 nsi の定義²⁾

線形システムの状態方程式は

$$\dot{x} = A_c x + B_c u \quad (1)$$

$$y = C_c x + D_c u \quad (2)$$

として表される。SDLV は

$$\Delta Q^T = [U] \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^T \\ L^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

を特異値分解した時の L の列ベクトルとして定義される。ただし、 Q は

$$Q = -C_c A_c^{-(p+1)} H_p^+ J \quad (4)$$

$$H_p = \begin{bmatrix} C_c A_c^{1-p} \\ C_c A_c^{-p} \end{bmatrix} \text{ の擬似逆行列、} J \text{ は } J = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \text{ である。}$$

ここで I は単位行列を表し、 $p=0,1,2$ は計測される出力がそれぞれ、変位、速度、加速度である。SDLV を有限要素モデルの計測点に静的荷重として載荷した時に応力が 0 となる。

正規化応力指標 nsi (normalized stress index)は

$$nsi_j = \frac{|\sigma_j|}{|\sigma_j|_{\max}} \quad (5)$$

として定義される。ここで σ は j 番目の列ベクトルである。SDLV を載荷したときの有限要素ごとのひずみエネルギーの平方根であり、 nsi は σ の最大値で正規化される。なお、ノイズなどにより nsi の値は必ずしも 0 とはならない。SDLV による nsi を複数足し合わせて正規化し、 nsi の値が 0.1 以下となる要素を損傷の可能性を有する要素として判断する。

3. 振動シミュレーションによるプレートの損傷同定

細かいメッシュのモデル(図 1)の図中の矢印の先にある 1 節点に瞬間的に集中荷重を作用させて、その後の自由振動データを 20 点にて得た。20 点の位置は図 2 に示されている。次に損傷を想定して図 1 の実線で囲まれた要素の弾性係数を 50%低下させて同様に自由振動データを得た。ERA(Eigensystem Realization Algorithm)を用いてモード特性を求め、SDLV を計算した。求めた SDLV を粗いメッシュのモデル(図 2)に作用させ、 nsi を求めた。その結果、損傷想定箇所が最も低い nsi を示し、プレートにおいても損傷同定が可能であることが示された(図 3)。表 1 は nsi の値を小さい順に 5 つ示したものである。また、振動計測用モデルの境界条件の節点を部分的に固定せず、SDLV 載荷用モデルの境界条件と異なる条件としたモデル化誤差を有する場合でも損傷同定性能を有することが示された(図 4, 図 5)。

4. 振動実験によるプレートの損傷同定

アルミ板とレーザードップラー速度計(LDV)を用いて振動計測を行った(写真 1)。2 枚の 45cm × 30cm

キーワード SDLV, 損傷同定, プレート

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-5841-6097

のアルミ板を用意し、1 つは非損傷時のものとし、他方は模擬損傷を有するプレートとして、直径 3cm の穴を開けた。振動はハンマーによるランダム応答を入力し、154 点にて計測した。計測データした速度データから ERA を用いてモード形、SDLV を算出し、損傷同定を試みたが、2 枚の板を用いたことによる境界条件などの実験条件の変化などのために損傷箇所の nsi の値が局所的に低くはならず、損傷箇所を正しく同定するには至らなかった(図 6)。

5.まとめ

シミュレーションを利用して、プレートにおいても SDLV 法を用いて損傷を同定することが可能であることを示した。SDLV 法を用いて損傷同定実験を試みた。今後は観測ノイズに対するロバスト性の解明と、損傷前後で境界条件が変化した場合の本手法の損傷同定性能の解明が必要である。

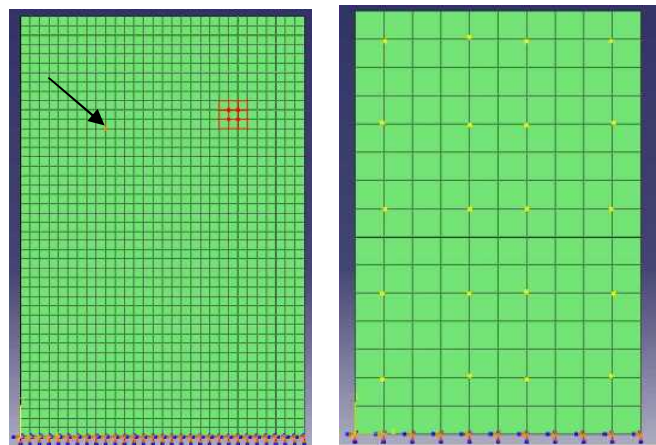


図 1.細かいメッシュモデル 図 2.粗いメッシュモデル

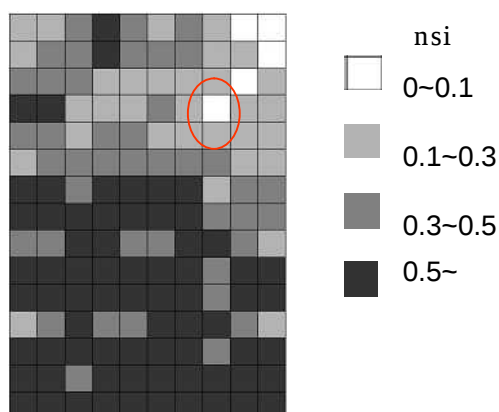


図 3 .20 点データの nsi

表1.nsi の値(20 点)

nsi	0.04505	0.08361	0.9253	0.9428
要素 No.	118()	140	149	150
sort	1	2	3	4

は 損 傷 を 想 定 し た 要 素 を 表 す

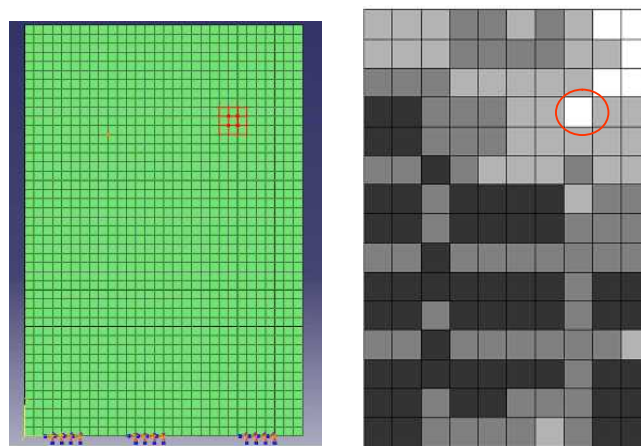


図 4 境界条件に変化を加えたモデルと同定された nsi

表 2. nsi の値(モデル化誤差を有する場合)

nsi	0.032	0.069	0.076	0.078
要素 No.	118()	140	150	129
sort	1	2	3	4

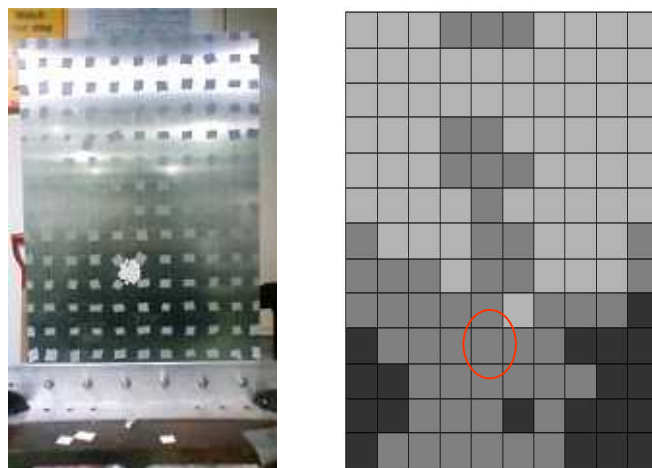


写真 1 損傷用プレート 図 6.実験データによる nsi

表 3 nsi の値(実験)

nsi	0.1356	0.1393	0.1641	...	0.3545
要素 No.	10	9	8	...	95()
sort	1	2	3	...	88

参考文献

- 宮下 剛, 藤野 陽三; “レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発”, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp.561-575 (2007)
- Dionisio Bernal: Flexibility-Based Damage Localization from Stochastic Realization Results , *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 6, June 2006, pp. 651-65