

灰色関連度係数を用いた損傷検知手法に関する解析的検討

金沢大学大学院 学生会員 ○小野 凌平

金沢大学 正会員 深田 幸史 非会員 Ha Minh Tuan

1. はじめに

道路橋の損傷を定量的に評価する手法として、構造ヘルスマニタリングが注目されており、動的、静的を問わず様々な損傷検知手法が提案されている。しかしながら、振動特性、桁部材の変位や曲率に着目した手法が多く、床版の変位形状に焦点を当てた損傷検知手法は少ない。

そこで、本研究では、道路橋床版の変位影響線の形状変化に着目した損傷検知手法として、データ間の類似度を調べる灰色関連度係数(以下、GRC)を用いた手法を提案し、その適用性を数値解析的に検討した。

2. 損傷検知手法

Deng によって提唱された灰色理論に含まれる灰色関連度分析は、基準数列と比較数列のデータ間の類似度を調べる分析手法である。既往の灰色理論による損傷検知手法では、健全時と劣化時の曲率から灰色関連度分析に用いられる GRC を算出することで損傷を発見している<sup>1)</sup>。しかし、曲率の計算には、適切な区間長の設定が必要なことに加えて、その区間長次第では端部の劣化を検出できない。そこで、GRC を変位影響線から算出することで、曲率を用いた手法より容易に損傷検知できないか検討する。

いま、基準数列を健全時の変位影響線  $u_0$ 、比較数列を部材損傷時の変位影響線  $u_{di}$  とすると GRC は以下のように表せる。

$$u_0 = \{u_0(1), \dots, u_0(j), \dots, u_0(k)\} \quad (1)$$

$$u_{di} = \{u_{di}(1), \dots, u_{di}(j), \dots, u_{di}(k)\}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$GRC_i(j) = \frac{\min_{\forall i} \cdot \min_{\forall j} \cdot \{\Delta u_i(j)\} + \alpha \max_{\forall i} \cdot \max_{\forall j} \cdot \{\Delta u_i(j)\}}{\Delta u_i(j) + \alpha \max_{\forall i} \cdot \max_{\forall j} \cdot \{\Delta u_i(j)\}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta u_i$  は基準数列と  $i$  組目の比較数列との絶対差、 $\alpha \in [0, 1]$  は環境調整係数で 0.5 とする。 $GRC_i(j)$  は 0 から 1 の範囲内で  $j$  番目の点における点関連度を評価している(表-1 参照)。本研究では、 $j$  点で GRC が極小値のとき、その地点の部材は損傷していると考える。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

前章で提案した損傷検知手法の適用性を検討するた

キーワード 床版、変位影響線、損傷検知、劣化

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 TEL 076-234-4605

表-1 灰色関連度係数の評価

灰色関連度係数 GRC	点関連度の強さ	
$GRC_i(j) > 0.9$	非常に強い	健全
$0.8 < GRC_i(j) < 0.9$	関連がある	↕
$0.6 < GRC_i(j) < 0.8$	弱い関連がある	
$GRC_i(j) < 0.6$	ほとんどない	劣化

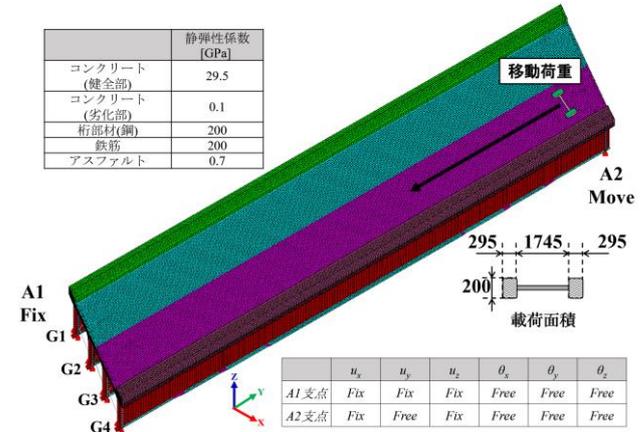


図-1 解析モデル

めに、汎用系構造解析ソフト DIANA10.2 を用いて実橋をモデル化し、有限要素解析を実施した。解析モデルは、橋長 36.0m、主桁間隔 2.5m、標準床版厚 180mm の 4 主桁鋼単純合成桁橋である(図-1 参照)。載荷荷重は、過去に対象橋梁で車両走行試験<sup>2)</sup>を実施した際に使用した 3 軸トラックの前軸をモデル化し、200mm 間隔で逐次載荷させた(A2-A1 方向)。なお、各材料の物性値および境界条件は図-1 に示す通りである。

3.2 解析シナリオ

損傷位置、損傷レベルおよび境界条件などが提案した手法に与える影響を調査するために、表-2 に示すシナリオで解析を実施した。損傷位置は図-2 に示すように、各路線の対傾構間をパネルと定義し、そのパネルの上面かぶり部分の静弾性係数をシナリオごとに同表に示す値に低減させた。Scenario6 のみ局所的な劣化に対する応答性を調べるために、パネルの 1/4 領域のみ劣化させた。なお、床版変位の計測位置は、車両走行試験<sup>2)</sup>と同様の地点(D1, D3)を基本とした。

4. 解析結果

単一損傷の位置を変化させた Scenario1-4 のデータ

表-2 解析シナリオ(✓は損傷位置を示す)

	Damage location																Static elastic modulus(Gpa)																		
	Panel1				Panel2				Panel3				Panel4				Panel5				Panel6				Panel7				Panel8				Intact area	Damage area	
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4			
Scenario0																																		29.5	-
Scenario1	✓																																	29.5	0.1
Scenario2								✓																										29.5	0.1
Scenario3																																		29.5	0.1
Scenario4																																		29.5	0.1
Scenario5																																		29.5	0.1
Scenario6					✓																													29.5	0.1
Scenario7																																		29.5	14.8
Scenario8																																		29.5	7.4

を用いて、提案した手法で損傷検知した結果を図-3に示す。図から計測点 D1 においていずれのシナリオでも損傷検知できているため、1つの変位計で比較的広範囲の損傷を捉えられることが判明した。加えて、単一損傷において GRC の極小値は、損傷位置に関係なく概ね同じ値となっていることから、GRC はある劣化が床版の変位影響線の形状に及ぼす影響を正規化して表していると考えられる。

複数損傷においても損傷を検出できるか検討するために、複数箇所を損傷させたシナリオで解析した結果を図-4に示す。同図から損傷がパネル全体に及ぼしている Scenario5 では、1つの変位計から複数箇所の損傷を検知できていない。しかし、変位計測点を損傷していない地点に変更すると全ての損傷を捉えることができているため、比較的健全な箇所に変位を計測することで複数箇所の損傷を捉えられると推察される。そして、局所的な劣化(Scenario6)では、計測点 D1 において、4か所全ての損傷を発見できている(図-4参照)。しかし、計測位置から離れている損傷に対する応答は鈍感であるため、1つの影響線ですべての損傷を検出するのではなく、複数の変位計から得られる影響線を用いて損傷検知を行うことが望まれる。

損傷レベルの影響を検討するために、パネル 3 の床版上面の静弾性係数を 0.1, 7.4, 14.8GPa の3段階に変化させた場合の結果を図-5に示す。ここで、GRC の定義に従い、3組の比較数列全体から必要なパラメータを計算し、各 GRC を算出している。同図から損傷レベルに応じて GRC の値が変化していることがわかる。そのため、床版変位を定期的に取り得し、GRC を計算することで劣化箇所の追跡調査ができると考えられる。

謝辞

本研究は科学的研究費助成事業(課題番号: 16K06463)の助成を受けて研究を行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Chen XZ, Zhu HP, Chen CY : Structural damage identification using test static data based on grey system theory, Journal of Zhejiang University SCIENCE, 6A(8), pp.790-796, 2005.
- 2) Y. Maki, T. M. Ha, S. Fukada, K. Torii, R. Ono : Stiffness

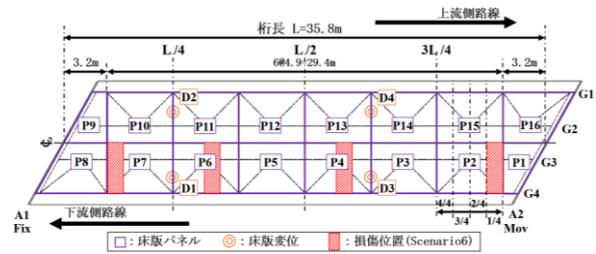


図-2 損傷位置図

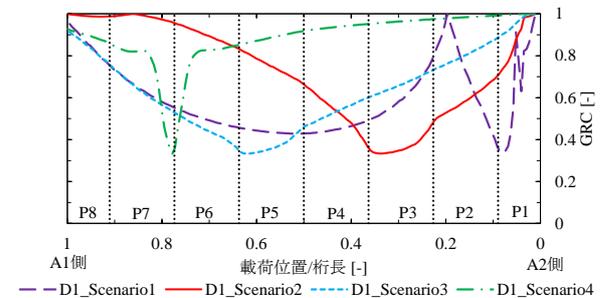


図-3 単一損傷

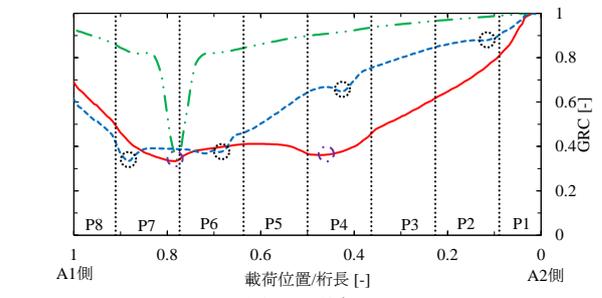


図-4 複数損傷

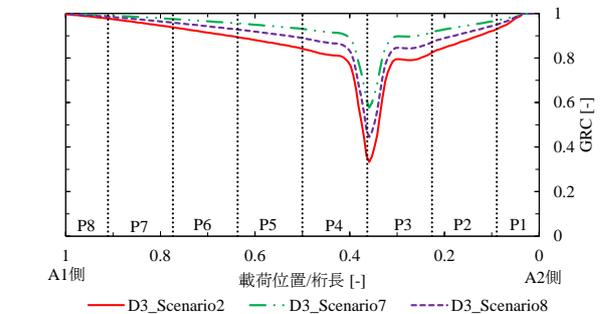


図-5 損傷レベルの影響

evaluation and current status of a degraded road bridge slab located in a mountainous area, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.17, pp.62-78, 2019.1.