

局所外れ値因子法を用いたRC梁のせん断損傷の検知手法に関する基礎的研究

防衛大学校 学生会員○高橋 春臣, 福井 智大, 正会員 黒田 一郎,
九検 正会員 西 敏臣

1. はじめに

我が国の将来においては社会資本の老朽化とそれらを維持管理する人員の不足が予測され、構造物の効率的な診断手法が求められている。その解決法の一つとしてAI技術の応用が試みられており、多くの研究が積み重ねられつつある。本研究はAI技術の一種であり異常検知手法の一つである局所外れ値因子法をRC梁部材の損傷検知に応用することを試みた基礎的研究でありその適用性を実験を通して検証するものである。

2. 局所外れ値因子法

本研究で扱う局所外れ値因子法(以下, LOF)は, テストデータである観察された特徴量が, 教師データである正常値と乖離しているかどうかで異常の検知を判定する。テストデータ, 教師データ(以下, 合わせて入力データと総称)は複数(n 個)の数値の組み合わせであり, 図-1に示すように n 次の超空間上の1つの点として表わすことができる。図-1は平面である紙上で表現する都合上2つの座標軸のみを描いているが, 1つの入力データが持つ n 個の特徴量は図中の点の n 個の座標値である。検知を行なう前に収集された教師データは全て正常の状態の物であり, n 次超空間上に群れとして存在している。ここで検知を行ないたいテストデータ T を同じ超空間上にプロットした際に, それが教師データの群れに所属していると認められるなら正常, 認められないなら異常と判定される。その所属の判断には, テストデータ T から群れまでの距離を代表する値 num を, 群れ内の教師データが隣接する距離の代表値 $denom$ で除することによって得られるLOF値を用い, LOF値が閾値を下回っているなら群れに属して正常, そうでないなら群れには属さずに異常と判断される。ここで, num としてはテストデータ T からいくつか選抜した近傍の教師データ N までの距離の平均を, $denom$ としては教師データ N から近傍の他の教師データ N_N までの距離の平均を用いた(図-1)。

以降の検討では入力データとしては実験で収録した加速度時刻歴波形の振幅スペクトル(以下, スペクトル)を採用し, 各周波数における振幅を特徴量とした。

加えて, LOFは教師データとして正常値のみを必要とし, 異常が発生した場合の教師データを必要としないという特長を持つ。

3. RC梁のせん断載荷実験

LOFで使用する入力データを収集するためにRC梁供試体のせん断載荷実験を行なった。供試体の諸元を図-2に示す。コンクリートの水セメント比は60%であり, 1箇月の水中養生の後に気乾状態で乾燥させてから載荷実験に供した。載荷実験は図-3に概略を示すような大野式せん断載荷によって行なった。これは, 非対称の支承 S_1, S_2 の上に梁供試体を設置し, 梁の上に静置した剛な載荷治具の点 P に与えた鉛直荷重を荷重作用点 Q_1, Q_2 を介して梁に伝達し, S_1-Q_1 間のスパンに荷重の0.6倍のせん断力を生じせしめる方式である。

図-4は荷重-変位関係である。荷重20kN毎に一旦除荷し, 終局に至るまで荷重を増加させている。この供試体では最大荷重115kNであり, S_1 と Q_1 を結ぶ直線状のせん断ひび割れが生じて終局に至ったが, 荷重80kNまでは梁表面にせん断ひび割れはアセトン塗布した観察でも発見できず, 目視による梁の変状は確認できなかった。

入力データの収録は, 載荷前と, 荷重20kN毎の除荷時に行ない, 荷重 P の直下に当たる梁上面を手動ハンマーで打撃し, 同位置でのコンクリート表面の振動を加速度計によって長さ40msの時刻歴として収録した。加速度時刻歴は離散フーリエ変換によって周波数間隔25Hzの振幅スペクトルへと変換し, そのスペクトルの500Hzから5000Hzの帯域の合計181個の振幅をLOFで使用する特徴量とした。即ち, 前節で説明した超空間の次数 n は181次元である。以下, 載荷前に収録した入力データを荷重条件 P_0 での入力データと呼ぶこととし, 荷重20kN, 40kN, 60kN, 80kN

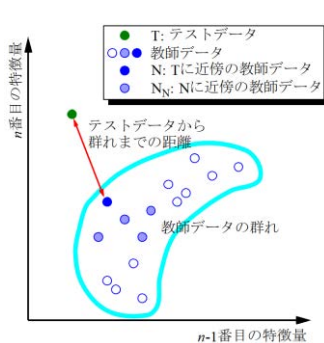


図-1 LOFの概念

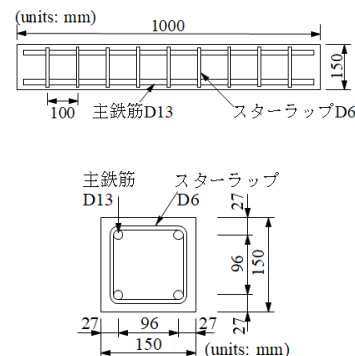


図-2 供試体の諸元

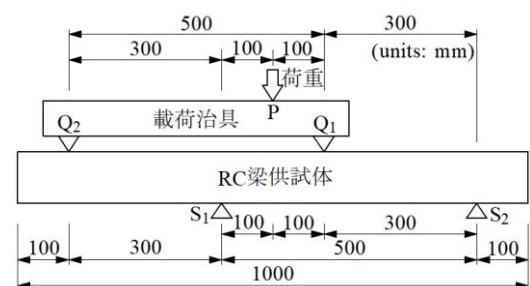


図-3 載荷方法

キーワード 非破壊検査, 局所外れ値因子法, コンクリート梁, せん断載荷, 振動スペクトル

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校システム工学群建設環境工学科 E-mail: ikuroda@nda.ac.jp

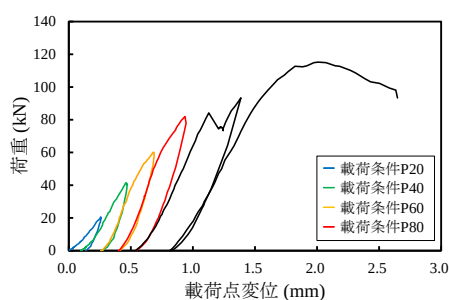


図-4 荷重-変位関係

表-1 判定ケース

グループ	判定ケース	荷重条件		テストデータ の実際 クラス
		教師データ	テストデータ	
t0	t0-0	P0	P0	陰性
	t0-20	P0	P20	陽性
	t0-40	P0	P40	陽性
	t0-60	P0	P60	陽性
	t0-80	P0	P80	陽性
t20	t20-20	P20	P20	陰性
	t20-40	P20	P40	陽性
	t20-60	P20	P60	陽性
	t20-80	P20	P80	陽性

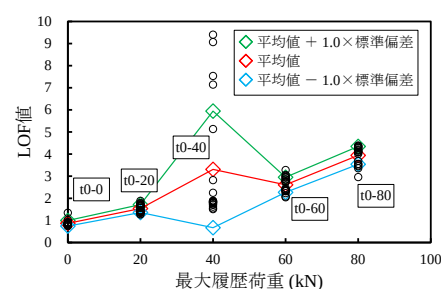


図-5 判定結果

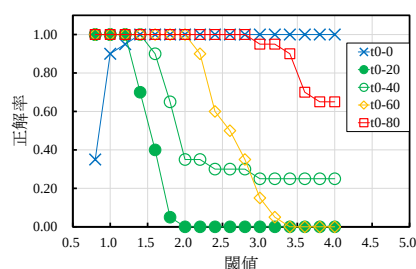


図-6 正解率と閾値の関係

判定ケース:グループt0, 供試体:1体目

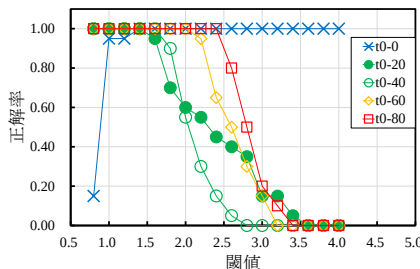


図-7 正解率と閾値の関係

判定ケース:グループt0, 供試体:2体目

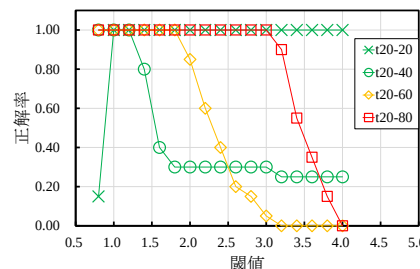


図-8 正解率と閾値の関係

判定ケース:グループt20, 供試体1体目

載荷後に収録した入力データを、記号Pに最大履歴荷重の数値を附加して載荷条件P20, P40, P60, P80と呼ぶ。

4. 判定結果

表-1にLOFを用いて判定を行なった際の判定ケース全9個の一覧を示す。グループt0に属する判定ケースは、載荷前の荷重条件P0を教師データとして、荷重条件P0, P20, P40, P60, P80のいずれかをテストデータとした判定である。グループt20は教師データを20kN載荷後のP20としている。これらの中で判定ケースt0-0とt20-20は教師データとテストデータの荷重条件が同一であるため、テストデータの実際クラスは異常検知無しの陰性であり、判定結果がそれに一致する陰性であれば正解である。それ以外の7つの判定ケースでは教師データとテストデータの荷重条件が食い違うのでテストデータの実際クラスは陽性となり、教師データとテストデータの荷重条件の違いを異常として検知できた陽性の判定が正解である。いずれの判定ケースにおいても、入力データは同一の荷重条件で収集された複数のスペクトルの中から20個を選抜し、教師データとテストデータの荷重条件が一致する場合には両者のために別個の20個ずつを選抜している。

図-5にグループt0の判定結果を整理して示す。いずれも教師データの荷重条件はP0であり、載荷の影響を異常として検知することを目標とする。t0-40においていくつかの極端なLOF値が認められるものの、最大履歴荷重が大きくなるにつれてLOF値が徐々に大きくなっていることが判る。そこで、LOF値の閾値を0.8から4.0まで変化させて、LOF値が閾値を下回った場合を陰性、上回った場合を陽性と判定した場合の正解率を図-6に示す。図-7は同一の条件で実験に供した2体目の供試体の結果である。ここで正解率はテストデータの個数(20個)を分母とし、実際クラス(陰性または陽性)と同じ判定結果を得たテストデータ

の個数を分子とした値であり、これが1.0の場合、すべてのテストデータの実際クラスと一致する判定結果を得たことを表わしている。テストデータの実際クラスが陰性であったt0-0では、閾値が概ね1.0以上に定められた場合に1.0に近い正解率となっており、閾値が大きいほど正解率が向上しているが、実際クラスが陽性であった他の判定ケースでは反対に閾値が小さいほど正解率が高く、最大履歴荷重が小さいほどより小さな閾値でなければ正解率が1.0近くに到達しない傾向が明らかである(図-6および7)。現場の構造物に本手法を適用する際には、陽性と陰性の実際クラスが混在したテストデータを扱って両者を正しく判別することが求められる。本実験の結果では、P0とP80のテストデータを判別するためには閾値を1.2~2.5の広い範囲のどこかに設定すれば良いことが明らかであるが、最大履歴荷重の差が小さなP0とP20を判別するために許される閾値の範囲は狭くほぼ1.2程度に設定する必要がある。

次に図-8にグループt20の正解率を示す。実際クラスが陰性であったテストデータを正しく陰性と判定するための閾値は1.0以上が必要であり、陽性であったテストデータを陽性と判定するための閾値の上限値は最大履歴荷重が小さいほど小さくなっており、グループt0と同じ傾向を示している。

5. まとめ

本研究では、せん断載荷によるRC梁の変状を、ハンマ打撃時のコンクリート表面振動スペクトルを入力としたLOFによって判定することを試みた。その結果、目視による変状が確認できなくても本手法によって最大履歴荷重の違いを判別できることを明らかにした。また、最大履歴荷重の差が小さいテストデータを判別するためには許容される閾値の範囲が狭くなることが明らかとなった。