

力センサを用いたコンクリート構造物の変状検出

○湊真司（東京大学） ルイ笠原純ユネス（東京大学） 禹ハンウル（東京大学）
藤井浩光（千葉工業大学） 山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）

1. 序論

近年国内におけるトンネルや橋梁を始めとした社会インフラの老朽化が進み、膨大な件数の保守・メンテナンスが必要となっている。また現状インフラの点検は人手で行われているが、高齢化により熟練点検員は減少傾向にある [1]。今後、点検不備による事故を防ぐためにも、ロボットや自動化技術により点検作業を効率化することが強く望まれる。

現在、実際の点検現場で用いられる一般的な手法は、点検員による目視検査と打音検査が挙げられる。打音検査は、検査対象物表面をハンマなどを用いて打叩し、音の違いから異常状態（変状）の有無を判断する方法である。打音検査はその簡便性から広く用いられているが、変状検出の精度については点検員の技術による。そのため、自動化を行い熟練度合いに依存しない、信頼性の高いシステムを構築することが重要である。

打音検査を自動化する研究 [2,3] に関しては、例えば Louhi Kasahara らが打音を機械学習を用いて分類し、変状を検出する手法 [2] を提案している。しかしこれらの研究では、音を入力信号としているため、大きな騒音がある環境下では検出精度が低下することが問題となる。今後橋梁やトンネルなどの検査では騒音を出す飛行ロボットの使用も見込まれるため [4]、騒音に頑強な点検システムが望まれる。

騒音に強い点検の自動化の研究としては、インパクトエコー法を用いた手法 [5,6] が挙げられる。インパクトエコー法は、検査対象物表面に加速度センサを取り付け、ハンマなどによる打叩で発生した弾性波の応答を解析することで、変状を検出する手法である。しかし打音検査と比較すると、インパクトエコー法はセンサを取り付ける必要があるため簡便性に欠け、センサの取り付け方が点検精度に影響を与える点が問題となる。

そこで本研究では、騒音に影響されず、かつ簡便な検査システムを実現するため、従来の点検手法で用いられてきたマイクや加速度センサを必要としない、インパクトハンマの力センサを用いた検査手法を提案する。検査手順としては、検査対象物表面をインパクトハンマで打叩し、インパクトハンマの先端部に取り付けられた力センサの応答を機械学習により分類することで、変状の検出を行う。

2. 提案手法

本研究では、インパクトハンマを用いたコンクリート材料の変状検出手法の提案を行う。提案手法の処理フローをまとめ、図1に示す。まず、検査対象物のコンクリート表面の複数箇所をインパクトハンマで打叩し、ハンマの力センサの応答を計測する。次に高速フーリエ変換（FFT）を用いて、力センサの応答からフーリ

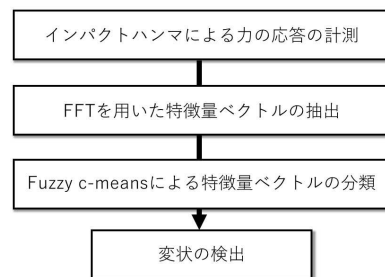


図1 提案手法の処理フロー



図2 一般的なインパクトハンマ

エスペクトルを計算し、これを特徴量ベクトルとする。最後に Fuzzy c-means を用いて各サンプルの特徴量ベクトルを2つにクラスタリングすることで、変状部と非変状部を分類する。なお本手法においては、クラスタリングの結果は2種類の分類であり、どちらが変状部であるかは特定できない。しかし実際の点検現場では、変状部に比べ非変状部の分布する面積は広いいため、サンプル数が多い方を非変状部、サンプル数が少ない方を変状部とみなす。

2.1 インパクトハンマと力センサの応答

インパクトハンマを図2に示す。インパクトハンマは試験構造物に撃力を加え、その力の信号を得るための装置で、先端部に取り付けるチップを変更することで、加振力と周波数範囲を調整することができる。ハンマのヘッド部分には水晶もしくはセラミックを素材とする圧電素子の力センサが内蔵されている。この力センサは、圧力がかかると分極するという圧電素子の性質を利用することで、外力を電圧に変換する。そのため力センサの応答から、インパクトハンマでコンクリート材料を打叩した際の接触力の時間変化を観測できる。

2.2 高速フーリエ変換と特徴量ベクトルの取得

インパクトハンマの力センサの応答のサンプル ($\mathbf{x} = [x_m]_{m \in [0, \dots, N-1]}$) から、特徴量ベクトルであるフーリエスペクトル ($\mathbf{a} = [a_k]_{k \in [0, \dots, N-1]}$) は高速フーリエ変換 (FFT) を用いて、式 (1) のように求められる。

$$a_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \exp(-2\pi i k m / N) \quad (1)$$

2.3 Fuzzy c-means によるクラスタリング

本研究では、特徴量ベクトルのクラスタリングに、代表的なクラスタリングアルゴリズムである Fuzzy c-means を用いる。Fuzzy c-means は Dunn [7] によって提案され、Bezdek [8] により体系化されたアルゴリズムである。サンプルが 1 つのクラスにしか属することのできない k-means を拡張し、帰属度の概念の導入により、サンプルが複数のクラスに確率的に所属するのが Fuzzy c-means の特徴である。Fuzzy c-means のアルゴリズムを Algorithm 1 に示す。本研究ではクラスタ数 K を 2 に設定することで、高速フーリエ変換で得られた特徴量ベクトルから変状部と非変状部を分類する。

Algorithm 1: Fuzzy c-means クラスタリング アルゴリズムの擬似コード

Data: N 個の特徴量ベクトル $\mathbf{a}_n$ で構成されたデータセット D , クラスタ数 K

Result: D を K 個のクラスに分類

Initialization:

クラスタ中心 $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_K$ をランダムに初期化

while 終了条件を満たさない場合 **do**

 特徴量ベクトルの割り当て:

 各特徴量ベクトル $\mathbf{a}_n$ のクラス k への
 帰属度 u_{nk} について

$$u_{nk} = \frac{1}{\sum_{n=1}^K \left(\frac{\|\mathbf{a}_n - \mathbf{c}_k\|}{\|\mathbf{a}_n - \mathbf{c}_n\|} \right)^{2/(m-1)}}$$

 クラスタ中心を更新:

 各クラスタ中心 $\mathbf{c}_k$ について

$$\mathbf{c}_k = \frac{\sum_{n=1}^N u_{nk}^m \mathbf{a}_n}{\sum_{n=1}^N u_{nk}^m}$$

 ここで $m = 2$ とする

end

Defuzzification:

各特徴量ベクトル $\mathbf{a}_n$ のクラスラベル p_n は

$$p_n = \arg \max_k u_{nk}$$

3. 実験

提案手法を用いてコンクリート材料の変状を検出できることを検証するために、クラックのあるコンクリート試験体を用いて実験を行った。

3.1 実験設定

コンクリート構造物の代表的な変状がクラックであるため、本研究ではクラックのある試験体を用いて実

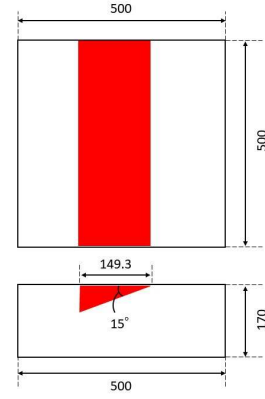


図3 実験に用いたコンクリート試験体寸法
(上図: 平面図, 下図: 断面図, 赤で示された箇所
が変状部, 単位: mm)

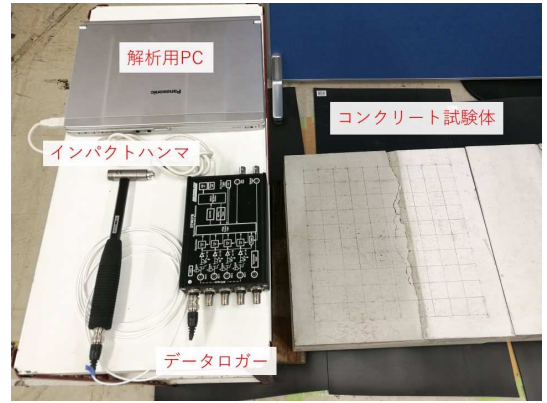


図4 実験装置

験を行った。使用したコンクリート試験体の寸法を、図3に示す。図3の上図は試験体の平面図であり、下図は断面図を表す。試験体には 15° の角度の人工的なクラックがあり、赤色部分が変状部となる。実験では、コンクリート試験体全体を覆う 11 行 10 列のグリッドに沿って、計 110 点 (変状: 44 点, 非変状 66 点) をインパクトハンマで毎回同じ力になるように打叩し、インパクトハンマの力センサの応答を計測した。

実験環境を図4に示す。インパクトハンマはPCB社製の 086C03 (ハンマ重量 160 g, ハンマ長 216 mm, ハンマヘッド径 15.7 mm) を使用した。データロガーはMC社製の DT9837B を使用し、サンプリング周波数はデータロガー最大値の 105,469 Hz とした。

3.2 実験結果

計 110 回の打叩時において、インパクトハンマとコンクリート試験体の接触開始時からの力センサの応答の 512 点のサンプルから、高速フーリエ変換を用い 256 個のフーリエスペクトルを計算し、特徴量ベクトルを導出した。実験に用いたコンクリート試験体を図5に、クラスタリングの正解ラベルを図6に示す。図6中の円形のマークは、いずれもコンクリート試験体上のハンマの打叩位置を示しており、赤丸が変状部を、白抜きの青丸が非変状部を表す。図6の変状部と右側の非変状部の間の 1 列の空白は、コンクリート試験体平面

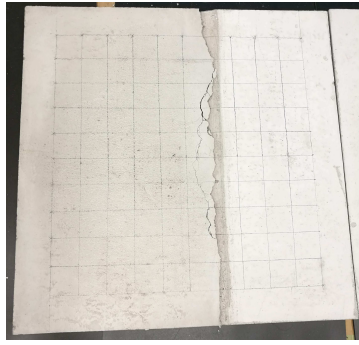


図5 コンクリート試験体

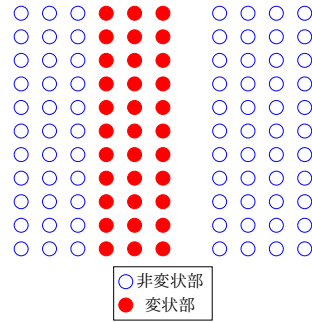


図6 正解ラベル

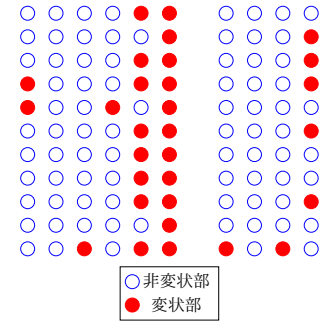


図7 提案手法による結果

表1 提案手法と従来手法 [2] の検出精度比較

項目	提案手法	従来手法 [2]
正解率 [%]	79.1	99.6
適合率 [%]	66.7	100
再現率 [%]	60.6	98.7

のクラック上に相当し、ハンマで打叩できない位置である。110個の特徴量ベクトルを、提案手法によりクラスタリングした結果を図7に示す。提案手法と従来手法 [2] の正解率 (accuracy), 適合率 (precision) および再現率 (recall) を表1に示す。

3.3 考察

実験結果において、まず図6と図7より左から4列目の変状の検出率の低さが確認できるが、これは最も平面から深い位置における変状部であることが原因であると考えられる。そのため提案手法では、30 mm以上の深さのクラックの検出は困難である。また図7で変状部として誤検出された点は、全てコンクリート試験体の端部に位置しており、コンクリート試験体の境界付近であったことがハンマの力センサの応答に影響を与えたと考えられる。

表1から、従来手法に比べ提案手法の検出精度が低いことがわかる。この理由の1つとしては、打音検査に基づく研究 [2] では、人間の周波数知覚特性を考慮した特徴量処理を行っていることが挙げられる。そのため、提案手法に人間の力の知覚特性を考慮した特徴量処理を付加することで、変状識別器を改良できると考えられる。以上より、検出精度では改善の余地があるものの、本手法によりインパクトハンマの力センサの応答の情報から、変状を検出できることが確認できた。

4. 結論

本研究では、騒音に影響を受けず、かつ簡便に使用できる検査システムの構築を目的として、インパクトハンマの力センサを用いた検査手法を提案した。

実験の結果から、検出精度では改善が必要であるものの、インパクトハンマの力センサの応答情報からコンクリート建造物の変状を検出できることが確認できた。

今後の課題としては、まず変状の検出精度を改善することが挙げられる。これは変状識別器の改良に加え、カメラから得られた画像情報からクラックの位置情報

を付加することで実現可能であると考えられる。また、どのようなメカニズムで、変状部と非変状部においてインパクトハンマの力センサの応答に違いが出るのかを検証するために、ハンマ打叩時の物理モデルを明らかにするアプローチも有効である。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」 (管理法人: 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) によって実施され、公益財団法人栢森情報科学振興財団、および東急建設株式会社 技術研究所の支援を受けた。

参考文献

- [1] 内閣府: 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術研究開発計画, 2018.
- [2] J. Y. Louhi Kasahara, H. Fujii, A. Yamashita and H. Asama: "Fuzzy Clustering of Spatially Relevant Acoustic Data for Defect Detection," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 3, pp. 2616–2623, 2018.
- [3] 園田佳巨, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気: "打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察", 構造工学論文集 A, vol. 57, pp. 802–811, 2011.
- [4] S. Mizutani, Y. Okada, C. J. Salaan, T. Ishii, K. Ohno and S. Tadokoro: "Proposal and Experimental Validation of a Design Strategy for a UAV with a Passive Rotating Spherical Shell," Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1271–1278, 2015.
- [5] J. Igual, A. Salazar, G. Safont and L. Vergara: "Semi-Supervised Bayesian Classification of Materials with Impact-Echo Signals," Sensors, vol. 15, pp. 11528–11550, 2015.
- [6] M. Ohtsu and T. Watanabe: "Stack Imaging of Spectral Amplitudes Based on Impact-echo for Flaw Detection," NDT + E International, vol. 35, no. 3, pp. 189–196, 2002.
- [7] J. C. Dunn: "A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters," Journal of Cybernetics, vol. 3, no. 3, pp. 32–57, 1973.
- [8] J. C. Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Springer Science+Business Media New York, 1981.