

ベイズ的最適化に基づく表面ひび割れに起因する剛性低下の評価に関する基礎研究

立命館大学 正会員 ○野村 泰稔
立命館大学 非会員 楠亀 礼佳
鹿島建設 正会員 今井 道男
鹿島建設 正会員 露木 健一郎

1. 緒言

構造物の健全性を評価する上で、き裂・ひび割れの検出は重要であり、開口量や長さを評価する方法が数多く提案されている。ただし、構造表面に顕在するき裂・ひび割れの深さや内部進展性について把握することは容易ではない。本研究では、表面ひび割れが剛性にどのような影響を与えるか調査することを目的として、近年、注目されているベイズ的最適化を用いて、表面ひび割れ周辺の変形場から剛性低下を評価できるか検討した。また、ベイズ的最適化と Particle Swarm Optimization (以下、PSO) を比較することで、ベイズ的最適化の有用性を調査した。

2. ベイズ的最適化

近年、少ない探索回数で最適解を求めることが可能なベイズ的最適化¹⁾が注目されている。ベイズ的最適化は多峰性を有し、目的関数の計算そのものが高負荷であるような場合に威力を発揮する。入力から出力を予測する回帰関数の確率モデルであるガウス過程²⁾を用いて、目的関数の応答曲面を確率分布で表現し、観測が得られる毎に、応答曲面の事後分布を更新する。ガウス過程は平均値関数とカーネル関数によって決定されるが、ベイズ的最適化ではマターンカーネル関数がよく用いられることから、本研究でもカーネル関数には、マターン $5/2$ カーネル関数を利用した。そして、事後分布によって周辺化された予測分布の情報を元に、次の候補を決定する。決定する際に使われているのが獲得関数で、未評価点における予測分布とこれまでの最良解の差の期待値が最も高い点を次の解候補として評価する EI (Expected Improvement) 戦略があり、本研究ではそれを採用した。以下にベイズ的最適化の探索手順をまとめる。

Step1: 変数の範囲内で無作為に選択した点 $\mathbf{x}_i$ について $y_i = f(\mathbf{x}_i)$ の評価を行う。

Step2: 目的関数 $f(\mathbf{x})$ のガウス過程モデルを更新して、事後分布を取得する。

Step3: 獲得関数 $a(\mathbf{x})$ を最大化する新しい点 $\mathbf{x}$ を求める。

Step4: 終了判定→停止条件を満たすまで Step2 に戻り繰り返す。

3. 実証試験

RC 梁の 4 点曲げ試験によりコンクリート表面にひび割れを生じさせ、その際の下面応答から剛性に関する情報を評価した。表-1 と図-1 に試験概要と供試体をそれぞれ示す。また、試験後の供試体下面の状況を図-2 に示す。本研究では、試験後の状況から図-1,2 中の位置 3W から 3E の間でひび割れが生じたと考えた。なお、変位計は図-2 のような位置に配置されており、この位置関係を保持した一次元梁モデルを構築した。そして、最適化対象は RC 梁にひび割れが生じた領域のヤング率とし、目的関数は実測されたコンクリート下面の変位応答と数値モデルの固有値解析から得られる振動モード形状の誤差関数とした。ここでは、一部観測しかできないような状況を想定し、図 1 中のセンサ位置の 3W から 4E までの 8 点の振動モードの振幅と供試体の変位の誤差をベイズ的最適化により最小化した。また、ひび割れが生じていない領域のヤング率は同一とし、損傷箇所はそれぞれ異なるヤング率を保持すると仮定した。本研究では、コンクリート表面にひび割れが生じたのちに、荷重を 41.7kN, 50.1kN と段階的に与え、その際の変位計の出力値を実測値とした。なお、ここでは、ベイズ的最適化の比較のため、PSO も同時に実行した。

キーワード ベイズ的最適化, 表面ひび割れ, 剛性低下推定

連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学理工学部環境都市工学科

表-1 供試体概要

供試体寸法：	2,200×200×300 mm ³
荷重条件：	支間長 2,000 mm, 等曲げ区間 600 mm で段階的荷重を上げながら載荷～除荷を繰り返す
コンクリート：	普通コンクリート（呼び強度 27MPa 程度）
鉄筋種類：	主筋 4-D13, 帯筋 2-D6@75

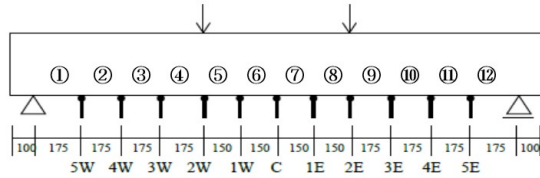


図-1 供試体の概略と変位形の位置

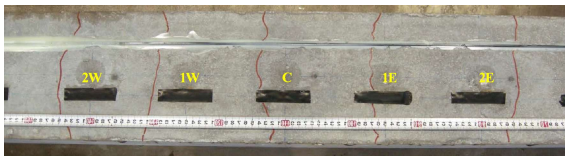


図-2 試験後の供試体中央部下面

図-3, 4 に供試体の変位応答とベイズ的最適化および PSO により得られた梁モデルの一次モードを示す。図中の 1 点のみ（センサ 4W）の変位応答が突出しているものの、他は概ね実測応答とモード形状が一致していることが分かる。このことは異なる荷重を与えた場合でも同様であった。図-5, 6 にひび割れ周辺のヤング率の比（ひび割れあり／なし）を示す。ひび割れの無い領域を 1 とした場合に、ひび割れが生じていた領域（要素④から要素⑨）に該当する要素⑦以外のヤング率比は概ね 1 より小さいことが分かる。そして、荷重を 41.7kN から 50.1kN に増加させた場合、要素⑥のヤング率比の低下が大きいことから、損傷が進行していると判断できる。以上のことから、ひび割れ周辺領域の変位応答を適切に獲得できれば、剛性に関する情報が推定できる可能性があると言える。一方で、ベイズ的最適化と PSO を比較すると、最適化する際の固有値解析の回数は、PSO が 6 万回、ベイズ的最適化は 300 回であり、大幅にベイズ的最適化が短縮できた。ただし、既報の通り、本研究のような小規模の構造モデルの固有値解析では、時間コストに関してベイズ的最適化の優位性は認められなかった。

4. 結言

本研究では、表面ひび割れが剛性にどのような影響を与えるか調査することを目的として、表面ひび割れ周辺の変形場からベイズ的最適化を用いて剛性低下を評価できるか検討した。4 点曲げ載荷試験片から表面ひび割れが顕在する領域の剛性に関する情報を評価することに成功し、ベイズ的最適化の有効性が確認できた。一方で、PSO と比較した場合、時間コストに関して優位性は認められなかった。今後は、診断対象として車両走行下にある床版下面などを想定し、振動下にある試験片に対する基礎実験を行う予定である。

参考文献：佐藤一誠，ベイズ的最適化入門，シミュレーション，Vol.34(4)，pp.228-233，2015。

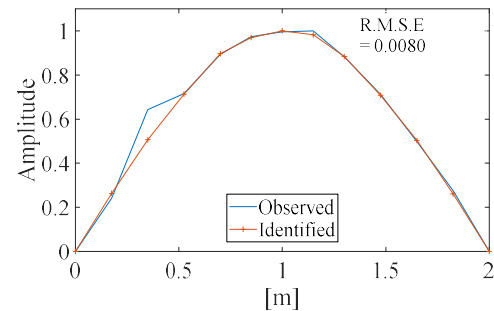


図-3 実測変位応答と推定モード形状（ベイズ）

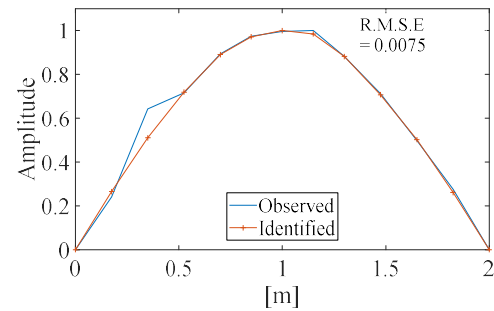


図-4 実測変位応答と推定モード形状（PSO）

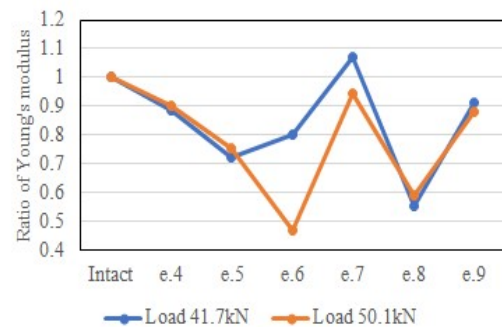


図-5 ヤング率比の変化（ベイズ的最適化）

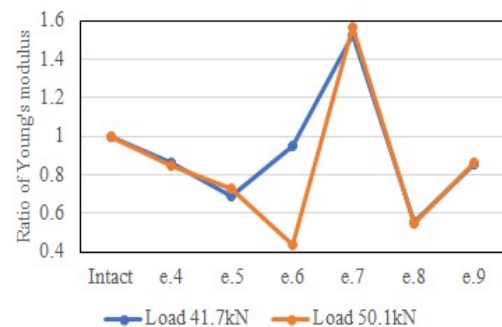


図-6 ヤング率比の変化（PSO）