

応答曲面法による DIC 計測の最適撮影条件の探索

A method for searching an optimal shooting condition of DIC measurement based on response surface methodology

芦田 拓海 (茨城大・工) 升井 尋斗 (茨城大・理工) 車谷 麻緒 (茨城大・工)

TAKUMI ASHIDA, Ibaraki University
HIROTO MASUI, Ibaraki University
MAO KURUMATANI, Ibaraki University
E-mail: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp

This study proposes a method for determining an optimal shooting condition of the digital image correlation (DIC). The method is formulated based on the response surface methodology. The explanatory variables in the response surface take the F-number, the shutter speed and ISO speed which strongly affect the shooting accuracy. The response surface is defined according to Box-Behnken design. The DIC with the proposed method allows high accurate measurement.

1. はじめに

近年, コンクリートに発生するひび割れを計測する手法として, デジタル画像相関法 (DIC) が用いられる. 車谷ら^{1,2)}は, 検査領域 (サブセット) の大きさおよび配置方法が DIC の計測精度に与える影響を検討し, 高解像度でひび割れを可視化した. しかし, 検討内容は解析条件に留まっており, その撮影条件は経験的に設定され, 検討が十分とはいえない. DIC は画像解析による計測手法であるため, 撮影条件は計測精度に影響を与えると考えられる. 画質を決める大きな要因は, カメラに取り込む光の量 (露出) であり, 露出を調節するカメラのパラメータに, F 値, シャッタースピード (SS), ISO 感度がある. これらの膨大な数の組み合わせで計測し, DIC 計測に最適な撮影条件を求めることは難しい.

そこで, 応答曲面法を用いて DIC 計測の最適撮影条件を効率的に探索する方法を提案する. 応答曲面法は, 実験結果とパラメータの関係について応答曲面を推定し, 最も望ましい応答が得られる条件を探索する数学的手法である. 実験計画に従って条件を設定し実験を行うことで, 少ない実験数で応答曲面の推定に必要なデータを収集する. 本研究では, DIC 計測の最適撮影条件の探索を, 応答曲面法を用いることで効率的に行えることを示す.

2. デジタル画像相関法 (DIC)

本研究で用いるデジタル画像相関法は, 画像の輝度値パターン類似度を相互相関で評価し, 変位量を算出する方法である. Fig. 1 に示すように, 画像を検査領域と呼ばれる小領域ごとに分割し, 変形前画像の検査領域の輝度値パターンが変形後画像のどの位置に移動したかを, 式(1)に示す相互相関関数を用いて算出する.

$$R(\Delta X, \Delta Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j)\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j)\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)\}^2}} \quad (1)$$

ここで, N は検査領域の一辺の長さ (pixel), $(\Delta X, \Delta Y)$ は元の検査領域の位置からの移動量 (pixel) を表す. $f(X_i, Y_j)$ は変形前画像の輝度値分布, $g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y)$ は変形後画像の輝度値分布であり, 検査領域の周辺の取りうる移動

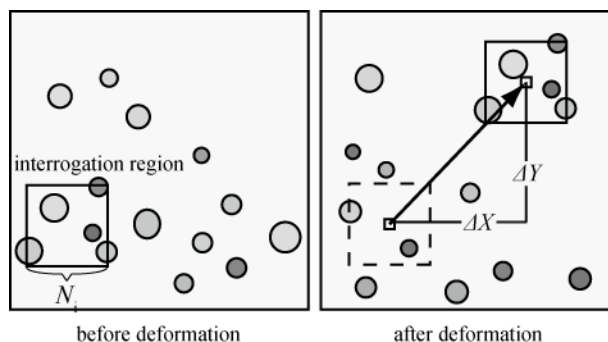


Fig. 1 Overview of DIC

量のすべてで計算を行い, それぞれの移動量における相関値 $R(\Delta X, \Delta Y)$ を算出する. これにより得られた相関値は $0 \leq R \leq 1$ の範囲をとり, R が 1 に近いほど画像の輝度値パターンが類似していることを示す. 式(1)で得られた R のうち, 最も高い値を示すときの $(\Delta X, \Delta Y)$ をその検査領域の変位量とする.

3. 最適撮影条件の探索

3.1 応答曲面法の適用

露出を調節する 3 つのパラメータ (ISO 感度, F 値, シャッタースピード (SS)) には多数の設定値があり, これらの組み合わせから決まる撮影条件を網羅的に調べるには膨大な時間を要する. そこで効率的に最適撮影条件を求める手法として応答曲面法を適用した. 応答曲面法とは, 実験の結果を表す応答 y と実験に取り上げるパラメータ $x_1, \dots, x_n$ の関係について, 実験計画に従ってデータを収集し, 応答曲面と呼ばれる近似関数を求め, 最適条件を求める手法である. 3 変数に 2 次多項式を採用した場合, 応答曲面は式(2)で表される.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (2)$$

ここで, β は回帰係数であり, 最小二乗法によって求める. 関数に 2 次項をもつことで曲面を表現できることが応答曲面法の特徴である. 求めた応答曲面において微分が 0 となる点が最大または最小の応答を得る点となる.

応答曲面法で用いた実験計画を Table 1 に示す. 実験計画には, Box-Behnken 計画を用いている. ここで, Table 1

Table 1 Experimental design

No.	ISO	F	SS	No.	ISO	F	SS
1	400	18	1/10	9	250	18	1/6
2	400	10	1/10	10	250	18	1/30
3	100	18	1/10	11	250	10	1/6
4	100	10	1/10	12	250	10	1/30
5	400	14	1/6	13	250	14	1/10
6	400	14	1/30	14	250	14	1/10
7	100	14	1/6	15	250	14	1/10
8	100	14	1/30	16	250	14	1/10

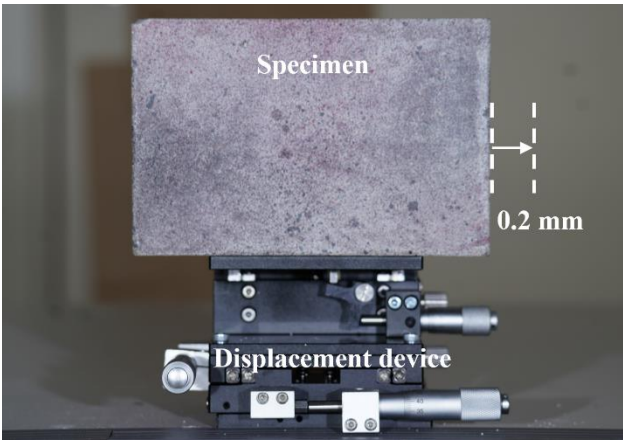


Fig. 2 Measurement

で設定したパラメータの範囲にはそれぞれ7水準,6水準,8水準あり,組み合わせは全336通りあるが,実験計画によって16回の実験で応答曲面を求められ,大幅に実験数を減らすことができる。

3.2 計測精度の比較方法

撮影条件の違いによる変位量の計測精度を比較するため, Fig. 2 のようにコンクリートの計測対象 (100×150 mm²) を変位装置に載せて水平方向に 0.2 mm 変位させ,理論上,計測範囲で水平変位の分散が 0 となる設定の下で,水平変位の分散を応答曲面における応答とした。つまり,分散が最小となる条件を応答曲面から求める。

デジタルカメラは SONY a7R4 (9504×6336 pixel) を使用し,撮影面の明度を一定にするため,LED 投光器をデジタルカメラの左右に設置した。計測対象の表面には,輝度値パターンランダム性を上げるため,黒と赤のアクリルスプレーを塗布した。

3.3 最適条件と計測精度の確認

応答曲面法により求めた最適撮影条件は,ISO 感度 250, F 値 18, シャッタースピード 1/8 であった。最適撮影条件で 4 回計測を行った平均分散と実験計画の 16 回の分散を比較した結果を Fig. 3 に示す。最適撮影条件での計測精度は実験計画での計測精度よりも良くなることが示された。

加えて,計測範囲内に有する約 5 万点の測定点で計測された変位量の分布をヒストグラムで比較した。実験計画の No.4, 5, 11 および最適撮影条件のヒストグラムを Fig. 4 に

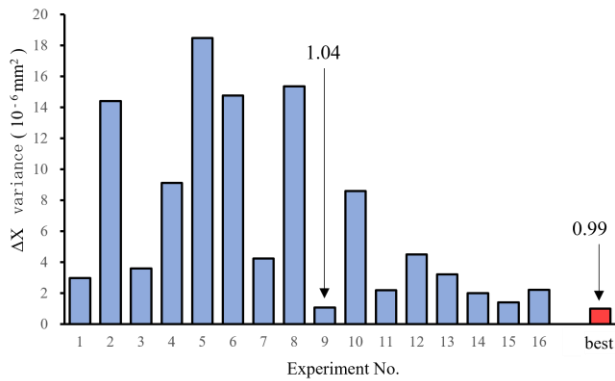


Fig. 3 Comparison of ΔX variance

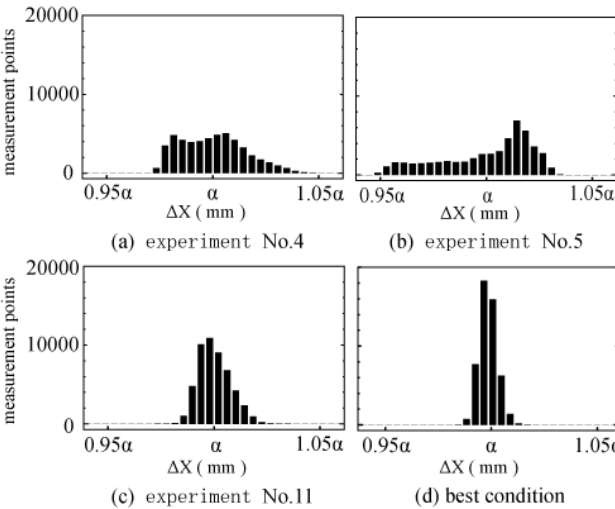


Fig. 4 Comparison of histogram

示す。ヒストグラムは,それぞれの変位量の平均値 α を中央にとり, $\pm 5\%$ の幅をとった。ヒストグラムを比較すると,最適撮影条件で計測された変位量は,他の撮影条件と比較してばらつきが小さく精度が良いことを確認できた。

4. まとめ

応答曲面法を用いて DIC 計測の最適撮影条件を少ない実験数で探索できることを示した。336 通りある撮影条件の中から,16 回の実験で応答曲面を求めることで最適撮影条件を求められた。

今後の課題として,計測対象を水平移動させたときの,水平変位の計測精度から求めた最適撮影条件が,載荷試験で計測対象に変形が生じる場合にも適用されることを検証する必要がある。

参考文献

1) 車谷麻緒, 松浦遵, 根本忍, 呉智深: コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 17), I_135-I_144, 2014

2) 車谷麻緒, 邊見哲一, 小坪祐輔, 橋口和哉: コンクリート供試体の圧縮試験に対するデジタル画像相関法の計測精度に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.I 447-I 454, 2017.