CMI 報告

構造実験におけるデジタル画像相関法（DIC）を用いた変形挙動計測の取り組み

井上　一磨

近年，3D スキャナーや画像処理・解析によって対象物全体の変形挙動を把握するための計測技術の開発が進んでおり，これらのいくつかは実用化され，様々な実験や計測に適用されてきている。施工技術総合研究所においても，構造実験や実橋梁のモニタリング等でこれら計測技術を用いた計測を実施してきている。本稿では，このような計測技術のひとつとして，対象構造物の変形やひずみ量を画像解析によって面的に計測することができるデジタル画像相関法（DIC）を適用した計測事例を紹介する。
キーワード：デジタル画像相関法，画像計測，変位計測，ひずみ計測，3 次元計測

1. はじめに

橋梁分野において構造物の老朽化を背景に維持管理に着目した検討が進められてきている。施工技術総合研究所においても，維持管理に関する新たな補修・補強技術に着目した構造実験や材料試験，実際に損傷が発生しているような橋梁の状態モニタリングなどの業務を多く実施してきている。これら業務では，対象とする試験体や構造物の構造的挙動を的確かつ正確に把握することが求められており，多種多様な計測技術を用いて，応力や変形などの各種データの取得が行われる。

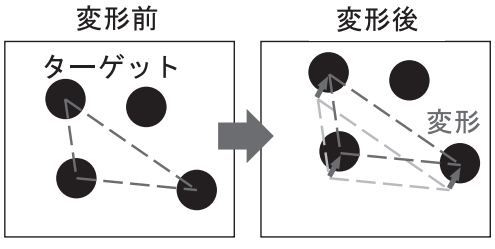
応力挙動を把握する手法として従来から，ひずみゲージを用いるひずみ測定方法が一般的である。しかし，この方法では，ひずみゲージを設置した位置の局所的なデータしか取得できないため，広範な計測を行うためには多数のひずみゲージを貼付する必要がある。ゴムのように弾性係数が極めて小さい材料については，ひずみゲージが変形に追従できず計測できないこと，コンクリート部材ではひずみゲージ貼付位置にひび割れが発生した後にはひずみゲージが破断して計測ができないことなどの課題がある。

他方，変形挙動を把握する手法としては，接触式もしくは非接触式（レーザー）の変形計を用いることが一般的であるが，この手法についても変位計を設置した位置でのデータしか取得できず，多点でのデータ取得には多くの変位計を設置しなければならず，多くの手間とコストがかかる課題がある。

近年，3D スキャナーや画像処理・解析によって対象物全体の変形挙動を把握するための計測技術の開発が進んでおり，様々な実験や計測に適用されてきている。本稿では，このような計測技術のひとつとして，対象構造物の変形やひずみ量を画像解析によって面的に計測することができるデジタル画像相関法（DIC；Digital Image Correlation method）[1] を適用した計測事例を紹介する。

2. デジタル画像相関法（DIC）の概要

DIC とは，あらかじめランダムな模様（ドット）を塗布した対象物を変形前後に画像を撮影し，それらの画像を解析することで対象物の変位およびひずみを算出する計測方法である（**図―1** 参照）。DIC を用いることで，1 度の計測で広範囲の変位・ひずみデータの取得ができ，また，ひずみ分布を見ることで複雑なひび割れの発生・進展を把握することができる。カメラを 2 台使い，ステレオで撮影することで，3 次元の挙動（奥行き方向の変形）を計測することも可能である。このように，画像によって広範囲の変形挙動が把握可能なことの他に，材料特性の影響を受け難く，大変形



図―1　DIC 計測の原理

が生じる場合にも対応できることも大きな特徴である。施工技術総合研究所が所有する DIC システムの仕様を**表―1**に示す。

3. 計測事例

ここでは，DIC システムを適用した，施工技術総合研究所で実施したゴム支承，コンクリート梁，鋼部材を対象とした載荷試験での計測事例を紹介する。

(1) ゴム支承のせん断載荷試験[2)]

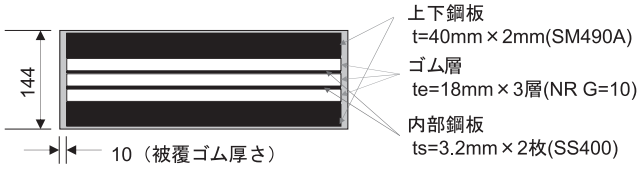
ゴム支承に鉛直力とせん断力が同時に載荷された場合の，ゴム支承の変形に伴う表面のひずみ分布を把握することを目的として実施した載荷試験の事例である。

試験体概要図を**図―2**に示す。3 層の積層ゴム支承を対象とし，被覆ゴムありとなしの試験体を対象とした。載荷方法としては，鉛直方向に最大鉛直荷重 1,920 kN まで載荷し，鉛直荷重を作用させたまません断方向に ± 37.8 mm 変形させた（**図―3**参照）。DIC の計測は，ゴム支承の側面を対象とした。

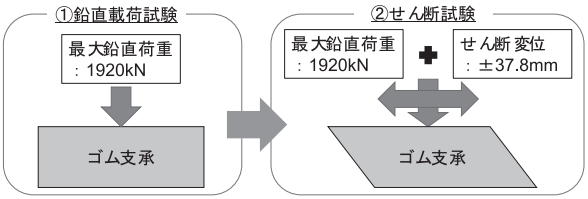
DIC による計測結果の一例として，**図―4**に面外変形のコンターを示す。これらのコンター図は奥行き方向の変位量を示しており，鉛直荷重の最大値作用時と鉛直荷重を作用させながらせん断方向に変位させた際の結果を示している。これらの図より，面外方向の変形を分布として取得することができていることがわかる。また，被覆ゴムありよりも被覆ゴムなしのほうが面外変形は大きい結果となっており，被覆ゴムによってゴム支承表面の面外方向の変形が緩和されていたことがわかった。

DIC と型取りゲージの面外変形の計測結果の比較を**図―5**に示す。これは，被覆ゴムなしの試験体中央位置の結果である。この結果から，面外変形については，DIC でも精度よく計測できていることがわかった。

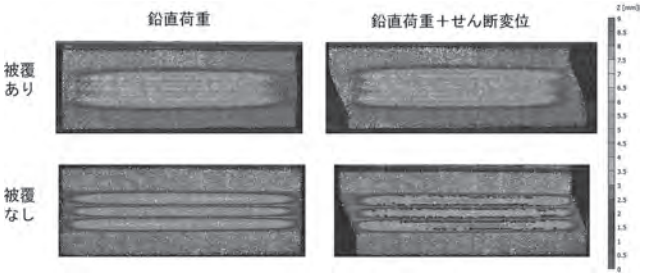
以上のように，DIC では，ゴム材料の変形を計測する手法として適用可能であることが示された。また，ひずみゲージでは計測できないゴム材料のひずみについても，本計測結果からひずみ値を求めることができる。



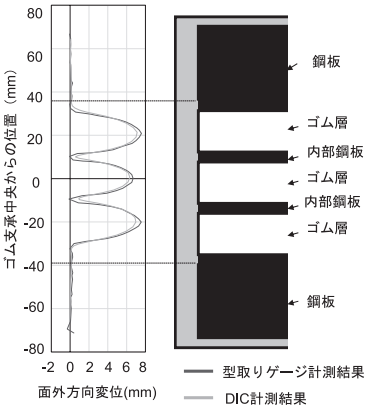
図―2 ゴム支承試験体概要



図―3 載荷方法



図―4 被覆の有無による面外変形量の比較



図―5 面外変形の DIC と型取りゲージの計測結果の比較（被覆ゴムなし）

表―1 DIC システムの仕様

計測機器	型式	仕様
計測ソフト	VicSnap-9（correlated SOLUTIONS）	アナログデータと同期可能 サンプリング速度：1 Hz 程度
解析ソフト	Vic-3D 7（correlated SOLUTIONS）	カメラ 2 台を使用した 3 次元の解析が可能
高解像度カメラ	Grasshoper3 GS3-U3-123S6M（FLIR）	1,200 万画素（4,096 × 3,000 pixel）
高解像度カメラ	CSI-5MP（correlated SOLUTIONS）	500 万画素（2,448 × 2,048 pixel）
ノート PC	Dell precision 7510（Dell）	プロセッサ：Intel（R）Core（TM）i7-6920HQ 実装メモリ：16.0 GB システムの種類：64 ビット

(2) コンクリート梁の 4 点曲げ載荷試験

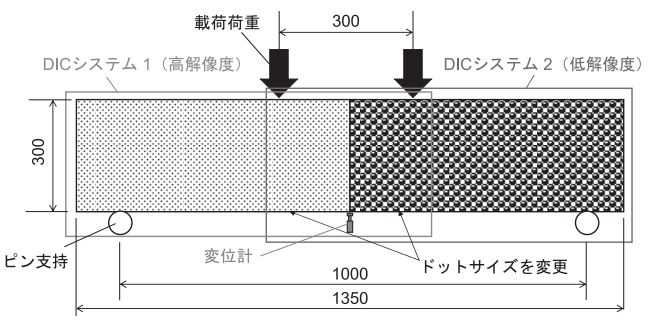
コンクリート梁の 4 点曲げ載荷を実施し，DIC による計測において，コンクリート材料に着目して各パラメータが計測精度に与える影響について検証したものである。

試験状況を**写真**―1 に，試験概要を**図**―6 に示す。この実験では，長さ 1,350 mm，幅 225 mm，高さ 300 mm のコンクリート梁を用いた。支持点にはピンを設置し，支間長は 1,000 mm，等曲げ区間は 300 mm とした。DIC の計測では，ドットの大きさやカメラの解像度をパラメータとした。試験体左側はドットを細かくし（径 0.5 ～ 1.0 mm 程度），右側はドットを粗くしている（径 2.0 ～ 3.0 mm 程度）。また，左側の計測では解像度の高いカメラ（1,200 万画素）を使用し，右側の計測では比較的解像度の低いカメラ（500 万画素）を使用した。左右のカメラの画角は試験体中央で重なるように設定した。

試験機荷重 150 kN 時の DIC によるひずみ分布（Von Mises）を**図**―7 に示す。試験機荷重 150 kN 時では目視でひび割れを判断できていなかったが，DIC の結果から等曲げ区間でひび割れが発生していると推定される。また，カメラの解像度が高いほうがひび割れの発生状況がより鮮明に把握できることがわかる。

DIC と変位計による試験体中央位置の鉛直方向変位の計測結果を**図**―8 に示す。この図より，DIC の計測結果が変位計の計測結果と同程度であることがわかる。また，ドットの大きさやカメラの解像度によって変位の計測結果には大きな差が生じていないことがわかる。

写真―1　試験状況

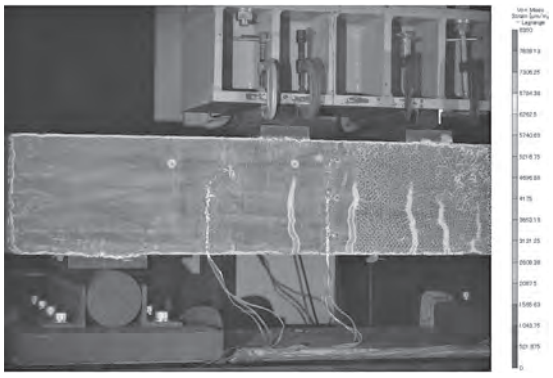


図―6　コンクリート梁載荷試験概要

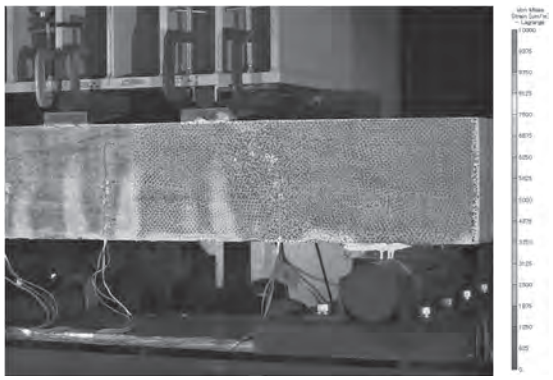
(3) 異種金属の突合せ溶接継手試験体の引張試験 [3)]

ステンレス鋼と炭素鋼の突合せ溶接継手を対象とした引張試験について紹介する。この実験は，異種金属の突合せ溶接部の引張強さや溶接部周辺の変形挙動について着目した実験である。

試験体概要を**図**―9 に，DIC 計測状況を**写真**―2

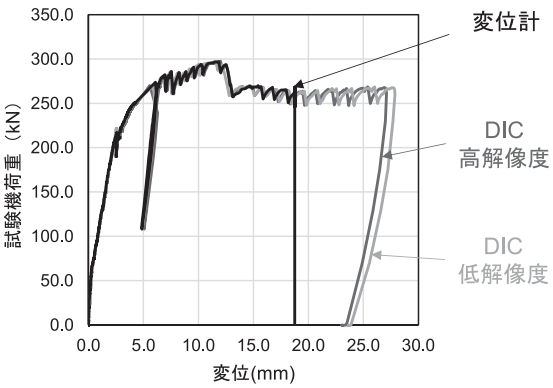


（1）高解像度カメラ



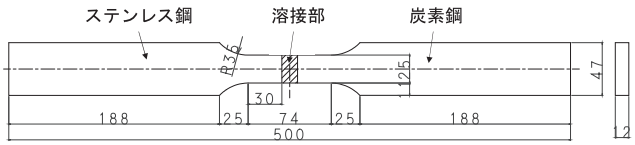
（2）低解像度カメラ

図―7　画素数の差によるひずみ分布の比較（Von Mises）

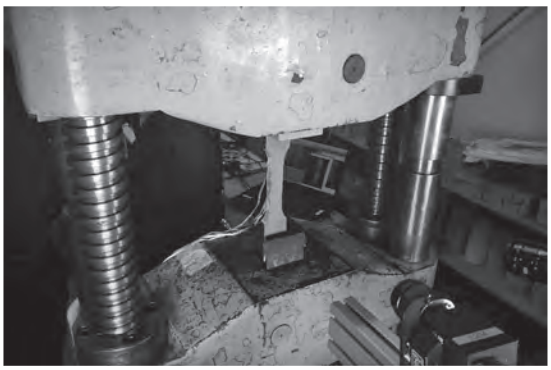


図―8　変位計と DIC の変位計測結果

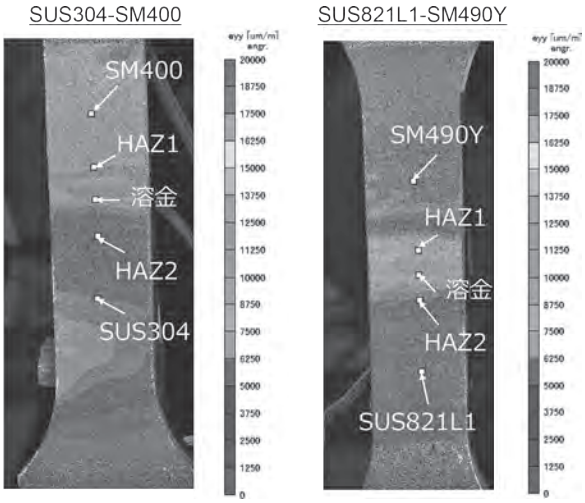
に示す。SUS304 と SM400，SUS821L1 と SM490Y の組み合わせのステンレス鋼と炭素鋼の組み合わせの試験体を用いた。引張試験時の DIC のひずみ計測結果として降伏時のひずみ分布を**図―10** に示す。これらの結果から，各鋼種や溶接部のひずみを降伏領域まで計測できていることがわかる。また，ひずみのコンター図を見ると，鋼種や溶接部で発生ひずみが異なっていることがわかり，異種金属の溶接部の変形性状を確認することができたと考えている。



図―9 試験体概要



写真―2 試験状況



図―10 DIC によるひずみ計測結果

4. おわりに

DIC を用いることで，今まで計測が困難であった材料や大変形領域の挙動の計測が可能となり，ひずみおよび変位を広範囲に把握することができる。ただし，DIC の計測には大量の画像の取得が必要となり，取得データが膨大になるにしたがって解析に時間を要するといった課題がある。しかしながら，AI やデータ処理技術が発展してきている昨今の背景から，ひずみゲージや変位計といった計測方法から DIC をはじめとした画像計測技術を用いた計測方法が今後主流となると思われる。また，ここでは説明を省略したが，実橋等の屋外での現場計測においては様々な課題もある。今後，計測精度が高く，広範囲かつ 3 次元の計測が可能な DIC が実際の橋梁等の現場で適用できれば，より高度な実橋モニタリングが可能となると思われる。

当研究所では，様々な大型実験を始めとする調査研究を行っており，より良い研究成果を得るために実験や試験技術を進歩させるとともに，新しい計測技術の適用にも注視しながら業務を進めて行きたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

1）出水享，松田浩，戸次翔，森崎雅俊，内野正和，伊藤幸広，森田千尋：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.68，No.2（応用力学論文集 Vol.15），I_683-I_690，2012.3.
2）井野裕輝，小野秀一，渡邉晋也，今井隆，原暢彦：デジタル画像相関法を用いたゴム支承の変形計測，土木学会第 73 回年次講演会，I-418，p.835-836，2018.8.
3）荒牧聡，下里哲弘，小野秀一，志村保美，松下裕明：3 次元画像相関法によるステンレス鋼と炭素鋼との溶接継手の引張特性，鋼構造論文報告集，28 巻，p.747-753，2020.11.

［筆者紹介］
井上 一磨（いのうえ かずま）
（一社）日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所 研究第二部
研究員