

## 資 料

## 画像相関法を用いたI形梁のせん断性能の測定とその評価

河村 進\*・大畑 敬\*\*・大橋 義徳\*\*\*・松本 和茂\*\*\*

## 1. 目 的

画像相関法とは材料表面の変形挙動を解析する手法の一つであり、デジタルカメラ等を用いて撮影された表面画像より変形量やひずみを定量的に計測する。具体的な手法としては、変形前の画像において解析したい座標点周囲の輝度分布形を座標同定のテンプレート画像として利用することにより、変形後の画像中にテンプレート画像が最も一致する座標を探索して、変形後の座標点の同定作業を行う方法が一般的である。

動体認識や画像計測の分野において、この手法はパターン（またはテンプレート）マッチング法として急速に実用化が進められている。しかし動体認識への実用化においては精度よりも高速動作が求められることから専用の画像解析装置が用いられることが多い。一方画像計測を目的に販売されている製品についても汎用的な撮影装置やソフトウェアでは精度保証が難しいことから専用の撮影装置と画像処理装置の組み合わせで販売されており、低コストで利用できる製品は存在しないのが現状である。

汎用的な撮影装置を用いた画像計測では撮影精度が問題とされているが、計測物にひずみゲージやスケール等を貼り付けて撮影し比較校正を行えば、撮影精度は十分確保できると考えられる。そこで我々は市販のデジタルカメラで撮影した画像をパーソナルコンピュータ上で処理することにより、ローコストでひずみ計測を行う方法を提案してきた。比較的小さな材料単体レベルでのせん断挙動の解析に画像相関法を適用した事例<sup>1)</sup>はすでに報告されており、また当センターにおいても耐力壁面材のせん断挙動の解析に適用した事例<sup>2)</sup>がある。今回画像相関法を構造物のひずみや変位測定の手法として活用することが可能かどうか探るため、実大の木質I形梁の曲げ（せん断）試験への適用を試みた。

木質I形梁とは表1の断面図に示すように、合板やOSBなどの板材をウェブとし、製材品やLVLをフランジとして接着接合することで生産される木質軸材料の一つである。アメリカではLVLの生産量のうち1/3がI形梁に利用されるほど広く普及した部材であり、また住宅部材だけでなく\*

大規模建築物の梁材やトラス梁材の代替としても使われている。

I形梁ではフランジが引張/圧縮力を担い、一方ウェブにはせん断力が生じる。近年日本で国産材を用いたI形梁を実用化するにあたってウェブのせん断性能の向上が課題となっている。国産I形梁ではウェブに合板を利用する事例が多く、合板は輸入I形梁で使われるOSBよりも面内せん断弾性率、強度ともに小さく、実用スパンでの荷重条件によるI形梁のたわみ設計を行うとせん断たわみが大きくなる<sup>3)</sup>。ただし合板の面内せん断性能は角度依存性を持っており、繊維方向が周辺に対して45°とすれば、一般的な合板である0°・90°の場合（以下、通常合板と記す）と比較するとせん断性能が高くなることが知られている<sup>4)</sup>。そこで筆者らは合板のせん断弾性率を改善するため、繊維方向が周辺に対して45度をなす合板（以下、斜行型合板と記す）を試作し<sup>5)~11)</sup>、I形梁のウェブとしての利用開発に取り組んできた。

これまで曲げ試験によるI形梁の性能評価を行う場合、計測機器類にかかるコストや作業性を勘案して、フランジ中央部または荷重点たわみを変位計を用いて計測した値のみを用いた性能評価が行われてきた。ウェブのせん断ひずみやフランジの引張/圧縮変形の解析を行うために試験体表面に使い捨てのひずみゲージセンサを貼り付けて計測されることもあるが、ひずみゲージによる計測では貼り付けた部位のみしか計測できず、ウェブ全体の変形挙動やひずみを計測するには困難があった。しかし実際のI形梁ではフランジとウェブ、およびウェブとウェブの接合部で破壊が生ずることが多く、接合性能を含めた評価を行う必要がある。そこで、画像相関法を用いれば接合部を含め試験体全体の挙動を測定できるのではないかと考え、I形梁の曲げおよびせん断試験と画像相関法によるひずみ、変位の解析を行い、両者の結果からせん断性能を総合的に検討した。

## 2. 方 法

試験体の一覧と断面形状を表1に示す。試験体の曲げ剛性およびせん断剛性を確認するため、フランジとウェブ材質の組み合わせを8種類、断面形状（梁せい）を2種類とした試験体それぞれについて、スパン3640mm、3等分点2点荷重による曲げ試験、およびスパン1280mm、中央集中荷

重によるせん断試験を行った。本報告書では1種類あたり1検体、すなわち合計32試験体のデータ解析を行った。

試験方法の概要を図1に示す。試験は北海道立林産試験場の200kN油圧式強度試験機（(株)東京衡機製造所製）および100kN電動式強度試験機（(株)エー・アンド・デイ製）で行った。試験体の作成、および試験方法の詳細については既報<sup>(2), (3)</sup>によった。試験を行う前に、試験体表面にはあらかじめ希釈した墨汁をスプレーし、ランダムドットパターンを付与した。撮影には焦点距離18~70mmのレンズ（Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor ED18-70mm）を装着したデジタルスチルカメラ（Nikon D50）2台を用いた。うち1台は試験体全体が撮影範囲に入るよう設置し（以後全体撮影と記す）、残り1台については最大せん断力を負担すると考えられる荷重区間のみを拡大撮影される位置に設置し、2台のカメラの方向に向けて5秒毎に赤外線リモコンを自動操作してインターバル撮影を行った。5kN, 10kN, および各試験体の最大荷重（12.7~46.6kN）に対して20, 40, 60, 80, 100%荷重に最も近い時刻に撮影された画像よりせん断ひずみを計算した。撮影画像からせん断ひずみを計算する方法については既往文献<sup>(1), (2)</sup>によった。なお、画像相関法による変位量やひずみの解析にあたっては、表

2に示す寸法領域を画面上に設定して解析を行った。また、画像相関によって得られる変位量および下側フランジに取り付けたひずみゲージ式変位計（(株)共和電業製、DT-100A、容量100mm、分解能1/100mm）によるたわみの値との比較を行うとともに、画像相関によるひずみ量および撮影した面の裏側に貼り付けたひずみゲージ（(株)東京測器研究所製PL-90-11-3L）の値とを比較した。なお、DO以外の試験体では図1に例示するようにウェブ材の原板サイズの制約から、スパン方向に810mm毎にウェブ継ぎ手を有しており、撮影範囲にウェブ継ぎ手が含まれる試験体については継ぎ手の接合状態についての観察もあわせて行った。

### 3. 結果

#### 3.1 画像相関による変位量測定

画像閲覧ソフトで目視で確認したI形梁高さの画素数より、1画素あたりの長さを算出した結果を図2~3に示す。なお、異なる倍率で撮影した試験結果相互を比較するため平均長さを1とした相対値により図示している。スパンについても、スパン長さ（曲げ試験においては3640mm、せん断試験においては1280mm）を1とした相対値により図示している。

表1 試験体の一覧と断面形状

フランジ	ウェブ	略号	断面図
トドまつたて継ぎ材	カラマツ合板	TK	
	カラマツ斜行型合板	TK45	
	国産PB	TP	
	北米産OSB	TO	
スギLVL	スギ合板	SS	
	スギ斜行型合板	SS45	
	北米産OSB	SO	
北洋カラマツLVL	北米産OSB	DO	

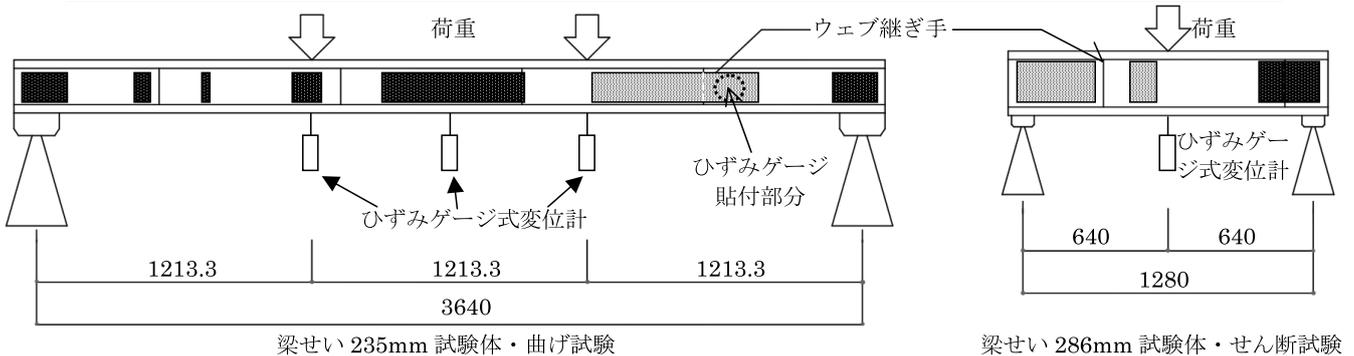


図1 試験方法の概要

試験体中に示す は、画像相関法を適用した範囲を示し、うち は拡大撮影を行った部分である。

表2 画像解析の解析単位の一覧

		設定画素数(pixel)	1画素あたり平均長さ(mm)	単位解析エリアの長さ(mm)
曲げ試験	全体撮影	25	1.26	31.5
	拡大撮影	50	0.30	15.1
せん断試験	全体撮影	50	0.62	31.0
	拡大撮影	50	0.24	12.0

1画素あたりの長さが撮影範囲の中央と周辺部で異なった原因はレンズの歪曲収差によると考えられるが、特にスパン3640mmの曲げ試験においては試験体全体を広角側で撮影したことから±2.5%の差が生じた。そこで、スパン3640mmの曲げ試験について、画像相関法によって求められたウェブ表面のY方向の移動距離を、図2をもとにレンズの歪曲収差に応じて補正したものを、画像相関法によって求められる試験体のたわみとした。

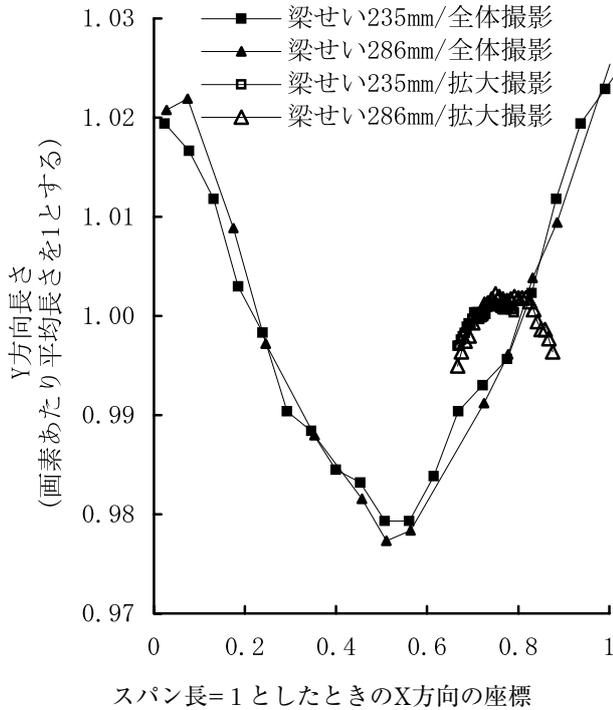


図2 Y方向の画素数あたり長さ  
(曲げ試験体)

この方法により、ひずみゲージ式変位計によって求められた試験体のたわみと比較した結果を図4に示す。歪曲収差を補正しない場合には変位計の計測値と画像相関によるたわみの絶対値には4%以上の差が生じていたが、歪曲収差補正によって1%程度の差に収まりほぼ同等の値となった。また、上側荷重点に対する変位(赤■)については、歪曲収差が小さい撮影範囲中央の画像範囲から求められた値であることから、非常に高い相関を示した。

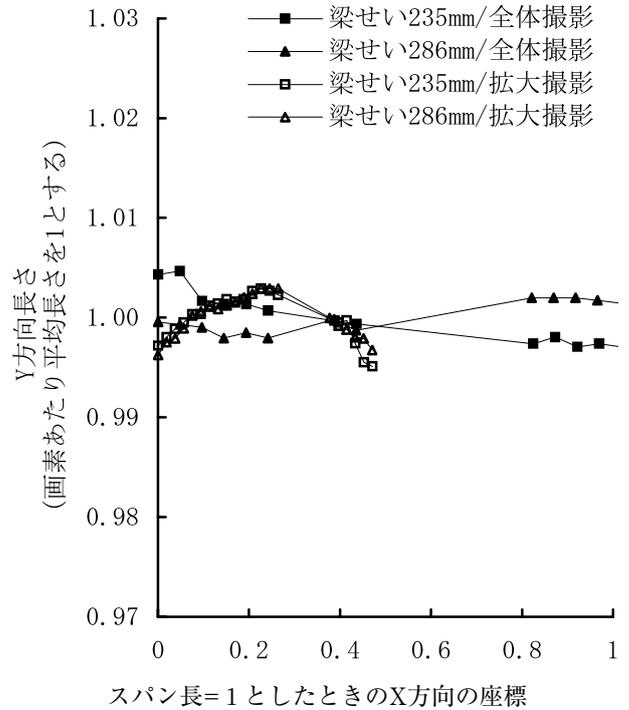


図3 Y方向の画素数あたり長さ  
(せん断試験体)

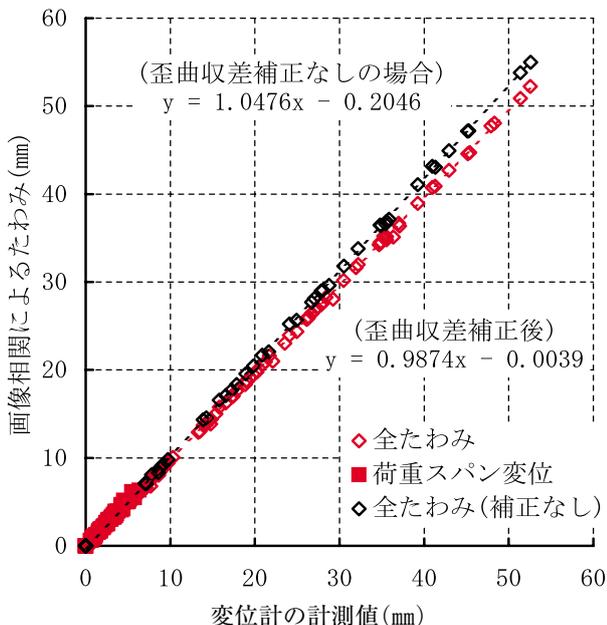


図4 変位計と画像相関によるたわみの比較  
(曲げ試験体/全体撮影)

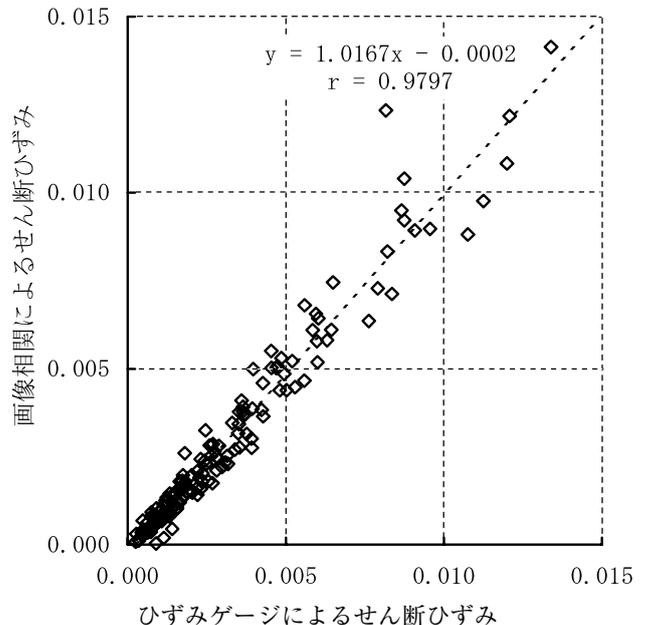


図5 ひずみゲージと画像相関によるせん断ひずみの比較  
(曲げ試験体/拡大撮影)

なお、図1にも示すように、ひずみゲージ式変位計によって求められた試験体のたわみは試験体下部、すなわち下側フランジ表面での測定結果であるのに対して、画像相関法によって求めた変位量はウェブのY方向移動距離であるので、ウェブの座屈やフランジへのウェブのめりこみの影響を考慮すると等価のものとはいえない。しかしこの比較結果からは両者がほぼ一致する値を示す傾向を示したことから、一般的な変位計による寸法測定と同様に画像相関を用

いてもI形梁の形状変化を測定可能であると考えられる。

### 3.2 画像相関によるひずみ測定

ひずみゲージの値と拡大撮影を用いた画像相関によるせん断ひずみの関係を図5に示す。この図に示すようにひずみゲージによる値と画像相関による値はおおむね一致していた。ただし、図6～8に示すように、低い解像度で撮影された全体写真には概してノイズが多く十分な精度が得られない事例も見られることから、寸法が大きく縦横の比率

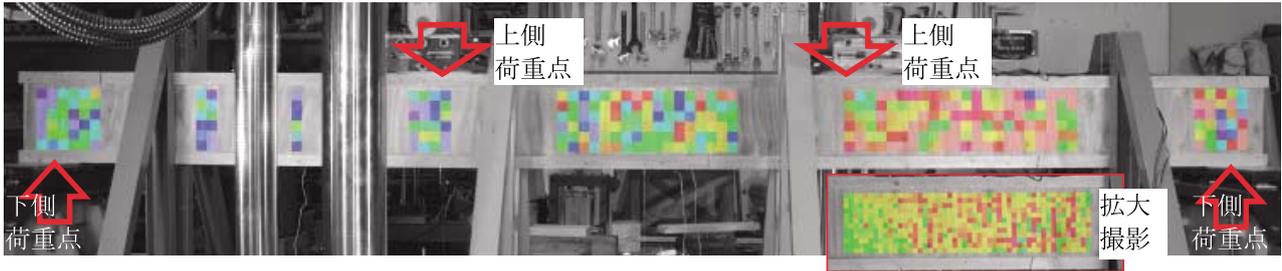


図6 全体写真と拡大写真を用いた画像相関解析結果の比較（梁せい286mm曲げ試験体, TK, 5.0kN時）

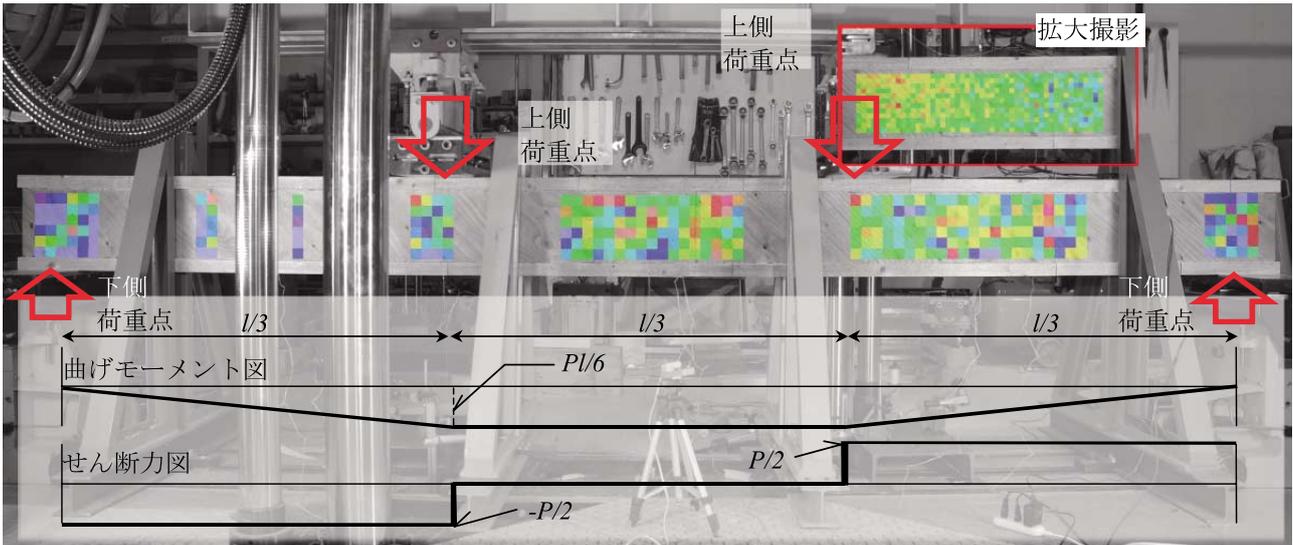


図7 全体写真と拡大写真を用いた画像相関解析結果の比較（梁せい286mm曲げ試験体, TK45, 5.0kN時）

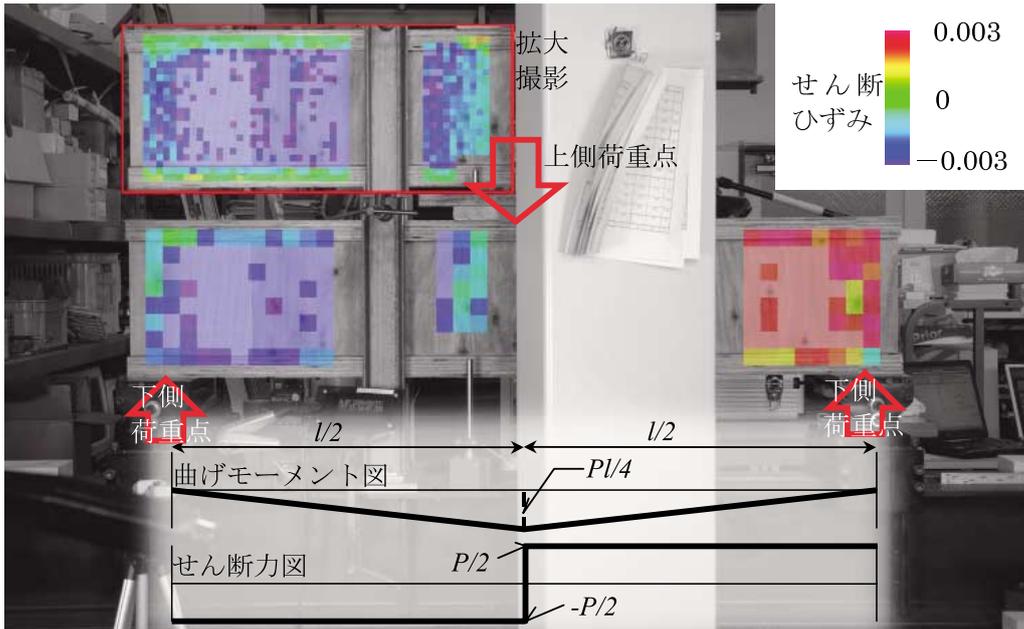


図8 全体写真と拡大写真を用いた画像相関解析結果の比較（梁せい286mmせん断試験体, SS, 9.8kN時）

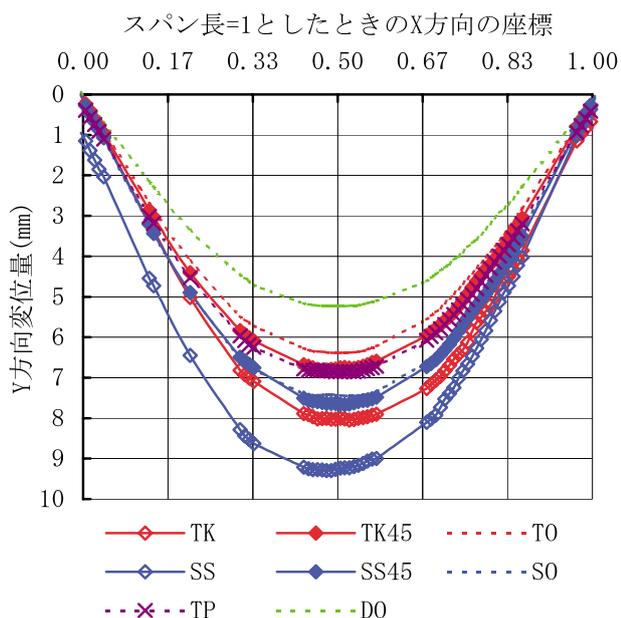


図9 曲げ試験体の変形状態  
(梁せい286mm, 5kN時)

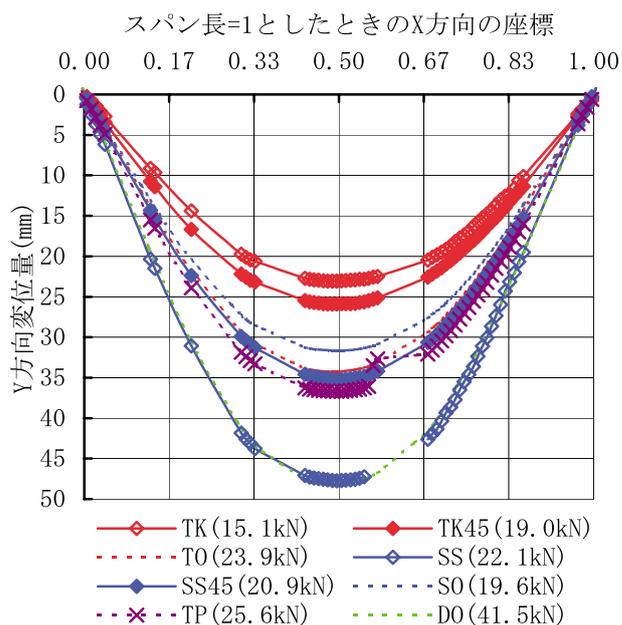


図10 曲げ試験体の変形状態  
(梁せい286mm, Pmax時)

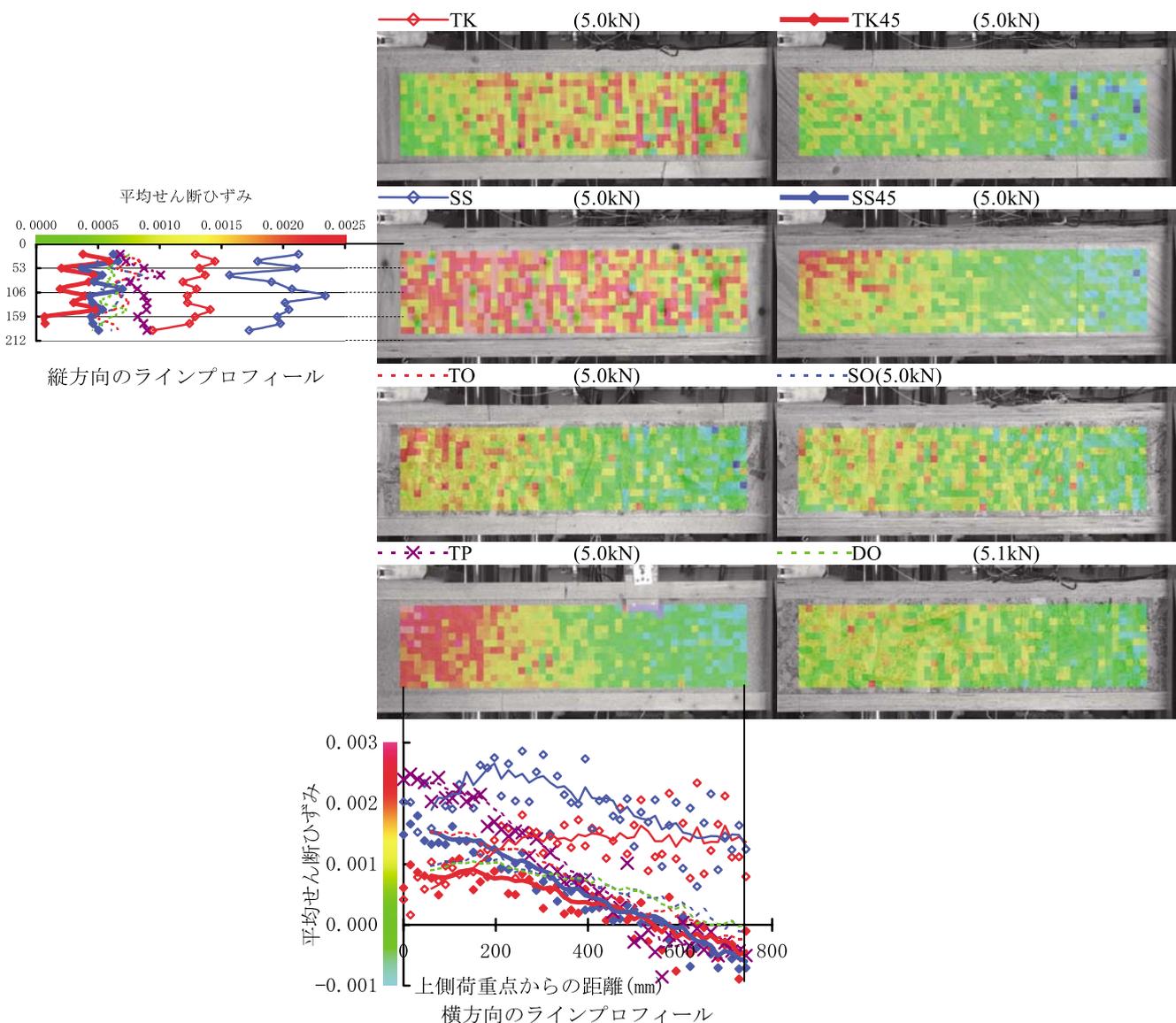


図11 試験体のひずみ分布 (梁せい286mm曲げ試験体, 5kN付近, 拡大撮影)

が大きく異なる I 形梁に画像相関法を適用する場合、試験体全体を低い解像度で撮影するより、複数のデジタルカメラを同期させて撮影を行い、解像度の高い拡大写真をつなぎ合わせて解析するのが望ましいといえる。このように十分な解像度を持った撮影画像を用いるなどの留意を行えば、画像相関によって得られたせん断ひずみの値もひずみゲージによる値と同等に扱えるといえる。

### 3.3 画像相関を用いた各試験体の比較

曲げ試験体を撮影した画像から 5 kN 時（荷重レベルは  $P_{max}$  の 12~37%）、および  $P_{max}$  時のスパン全体のたわみ形状を求めた結果を図 9~10 に示す。これらの試験体には図 1 に示すように X 座標 0~1 の間に 3 箇所（0.33, 0.58, 0.83 付近）にウェブ継ぎ手が配置されたものであるが、いずれの荷重レベルにおいてもウェブ継ぎ手付近における Y 方向変位量の段差、すなわちウェブ継ぎ手のずれは読みとれず、試験体の変形状態の観察のみから判断するとウェブ継ぎ手の接合強度は十分確保されていると考えられる。また 5 kN 時（図 9）で比較すると、通常合板をウェブに用いた試験体（SS, TK）は最もたわみが大きく、斜行型合板をウェブに用いた試験体（TK45, SS45）は DO よりは

たわみが大きいものの、OSBやPBを用いた試験体（TO, SO, TP）と同等のたわみ性能であることが画像相関法からも確認された。

5 kN 付近における梁せい 286mm 曲げ試験体におけるせん断ひずみ分布を図 6~7 および 11 に示す。図 6, 7 に示すように曲げ試験体の左側荷重スパンはその大部分が治具や装置で遮られており、また先にも述べたように全体写真については解像度の関係から十分な精度が得られているとはいえないが、おおむね理論通り左側荷重スパンで負のせん断ひずみ、右側荷重スパンでは正のせん断ひずみが働いている状態が観察される。

図 11 では右側荷重スパンでの拡大写真およびひずみ分布を重ねて示した。また、上側荷重点からの横方向の距離が等しい解析ブロック（縦列毎）について、ウェブ上端から下端までの全平均値を求め、横方向の距離と平均せん断ひずみの値を写真の下に示した。縦方向の距離と平均せん断ひずみの値についても同様の方法により写真の左側に示した。図 7 のせん断力図に示すように、梁の曲げ理論によると 3 等分点 2 点載荷においては左側または右側の荷重スパンの外側全域に渡って均一なせん断力が働くことが示され

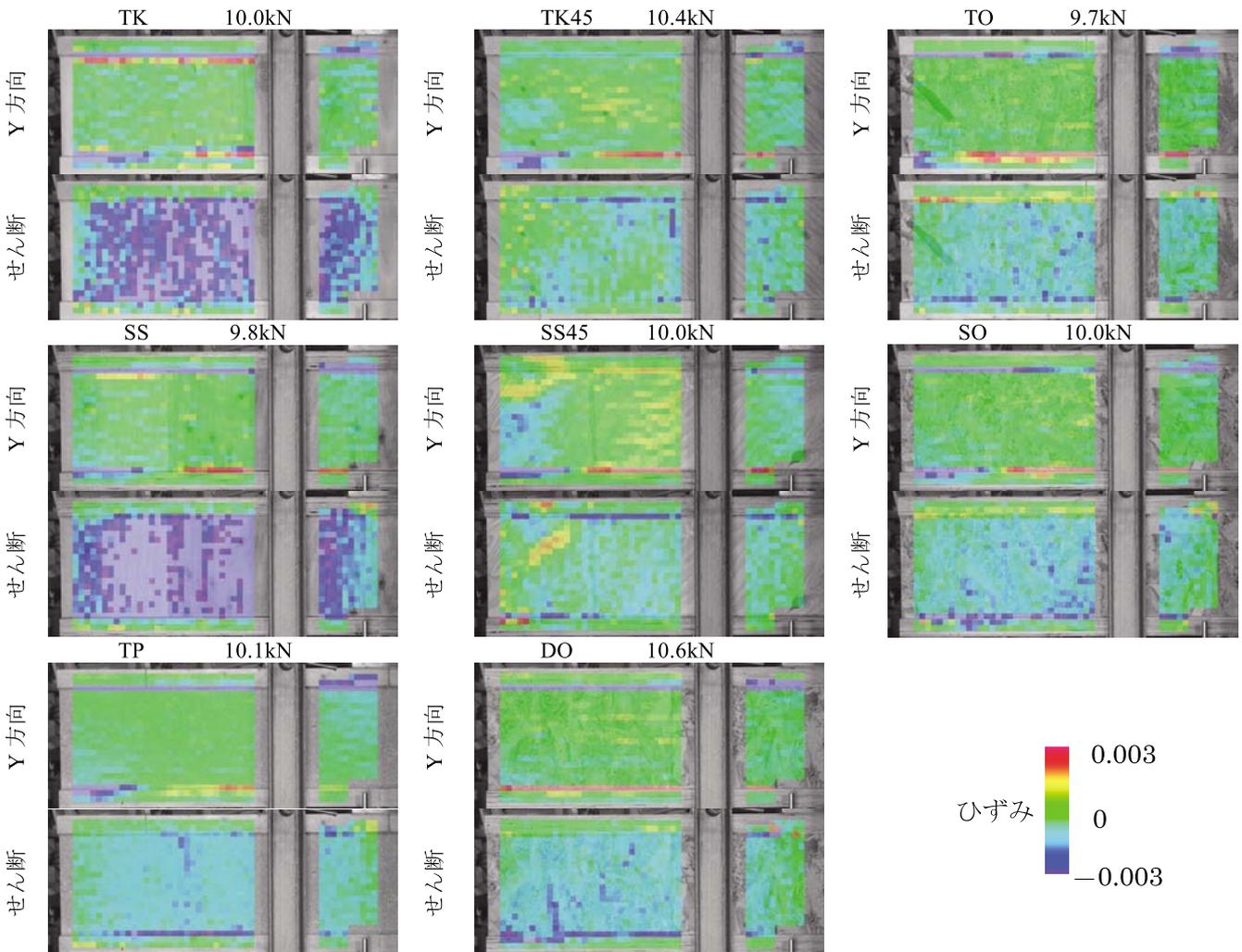


図12 試験体のひずみ分布（梁せい286mmせん断試験体、10kN付近、拡大写真）

ている。また、縦方向のせん断力分布については、長方形断面の部材の場合ウェブ上下で小さく、中央部では平均せん断力の1.5倍とされている。しかし今回計測した右側荷重スパンにおける横方向のせん断ひずみ分布は、平均せん断ひずみが大きいTKおよびSS試験体を除いて、上側荷重点付近でのせん断ひずみが大きく、上側荷重点から離れるほどせん断ひずみが小さくなる結果となった。縦方向のせん断ひずみ分布についても長方形断面の部材における理論値とは異なる結果となっていた。

10kN付近における梁せい286mmせん断試験体でのY方向ひずみ、およびせん断ひずみ分布を図12に示す。10kNでの荷重レベルはPmaxの23~48%であり、荷重レベルがPmaxの40%を越えたのはTK45試験体のみであった。せん断試験体ではスパン中央部を試験機本体によって遮られており荷重点付近の状態を十分確認できないものの、平均せん断ひずみが大きなTKおよびSS試験体については上側荷重点と下側荷重点の中間付近でせん断ひずみが大きい。それ以外の試験体については下側荷重点から上側荷重点に向かって斜めにせん断ひずみの比較的大きな部分が分布する傾向があるが、ウェブとフランジの接合部において最もせん断ひずみが大きいことが確認できる。また、Y方向のひずみ分布図で示すように、ほとんどの試験体ではウェブとフランジの接合部において大きなY方向ひずみが発生しており、フランジがウェブにめりこみ（紫色で着色された部分）、またはフランジがウェブから引き抜け（黄色~赤色で着色された部分）の変形を生じていると考えられる。このように比較的低い荷重レベルにおいても、ウェブとフランジの接合部あるいはウェブ相互の接合部には圧縮、引張、またはせん断ひずみが集中しているといえる。

斜行型合板をウェブに用いた試験体（TK45, SS45）では通常合板を用いた試験体（TK, SS）よりもせん断ひずみが小さく、その結果試験体のたわみも小さくなると考えられる。TKおよびSS試験体については大きなせん断ひずみが生じて、ウェブがせん断変形することから理論図と近いせん断ひずみ分布が得られるのに対し、せん断ひずみが生じにくい試験体においては上側荷重点付近での圧縮変形が支配的となり、荷重点から離れると応力集中が起こりにくくなってせん断ひずみが小さくなると考えられる。これらの試験体ではひずみゲージを貼った点（上側荷重点より横方向に450mm付近）でのせん断ひずみの値も比較的小さかった。

すなわち、斜行型合板、OSB、またはPBなどのせん断性能が大きな材料をI形梁のウェブに用いると通常合板を用いるよりたわみは減少するものの、一方でウェブとフランジ、あるいはウェブ相互の接合部の引張、圧縮、せん断ひずみが支配的となることから、継ぎ手の接合強度を増加させればさらに強度性能を向上させることが可能であると考えられる。

#### 4. ま と め

I形梁の曲げ試験およびせん断試験に際して、試験体の挙動を画像相関法によって観察した結果、試験体に大量の変位計を装着したり、ひずみゲージを貼り付けることなく試験体表面全体の変位量やひずみ量分布が計測可能であることを確認できた。また、低い荷重レベルにおいても接合部のせん断ひずみは発生するが、その変位量（ずれ）自体は梁全体のたわみ量と比較して非常に小さいことが示された。

今回は市販のデジタルスチルカメラやレンズを用いてI形梁のせん断変形挙動の観察を行ったが、I形梁試験体は長大であることから試験体全体を十分な精度で撮影して解析するには困難があった。また画像相関法に用いたソフトウェアは文献<sup>3)</sup>に用いられているプログラムを参考に島根県産業技術センターにおいてDelphi 5で作成しなおし、画像入出力機能を付加したものであるが、計算速度の最適化については十分でない。Core i3-550, 3.2GHzのPCにおいても1画像の解析に数分~数十分要することから、さまざまな荷重レベルにおける画像を解析するには時間的な制約が最大の課題となっている。

撮影作業についても、試験体が試験機本体に遮られる部分が多いと観察可能な面が限られることや、一般的な万能強度試験機では試験機の駆動とカメラの撮影を同期させるのが難しく、試験と撮影の開始を手作業で行ったり、撮影された画像から荷重レベルを判定するのが手作業になることも課題であった。これらの問題については、試験機の開口部を広く設計してカメラを導入しやすくすること、撮影画像に荷重値を写し込める可搬型の表示器を付属すること、試験機とカメラの動作を同期できる機能を付属させること等により解消することが可能である。

カメラの解像度や台数を増加させ、また現在パターンマッチング法の分野でよく使われている高速な画像処理ライブラリを用いれば、今後変位計やひずみゲージを使用せずに試験体の変形挙動を解析することも十分可能になると考えられた。

また、I形梁の材質による比較を行った結果、ウェブに通常合板を用いたI形梁ではせん断ひずみが大きく、またせん断区間全体においてせん断ひずみはほとんど均一であったが、斜行型合板やOSB、PBを用いた試験体では荷重点付近やフランジとウェブの継ぎ手に引張、圧縮、およびせん断ひずみが集中する状態が観察された。ウェブに斜行型合板やOSB、PBを用いたI形梁のせん断性能をさらに向上させるには、フランジやウェブの継ぎ手の接合方法を改良することが有効であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は平成20年度 JST シーズ発掘試験（課題番号01-107）により実施した。

文 献

- 1) M. Ikeda, M. Masuda, K. Murata, S. Ukyo. Analysis of In-Plane Shear Behavior of Wood Based Panels by Digital Image Correlation. Journal of the Society of Materials Science, Japan. 2006, Vol. 55, No.6, p.569-576.
- 2) 河村進, 大畑敬, 村田功二. 斜行型合板を用いた耐力壁の面内せん断性能. 材料. 2006, Vol. 58, No. 4, p.280-285.
- 3) 大橋義徳. 北海道産人工林材を用いた木質 I 形梁の材料特性と構造設計に関する研究. 北海道大学農学部学位論文, 2009.
- 4) 高見勇. 合板の剪断性能に関する基礎的研究. 林試研報. 1969, No.225, p.42-132.
- 5) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材の製造方法. 特許第3729410号. 2005-10-14.
- 6) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材. 特許3858177号. 2006-09-29.
- 7) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材の製造方法. 特許第859013号. 2006-09-29.
- 8) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材及びその製造方法. アメリカ特許7384675. 2008-06-10.
- 9) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材及びその製造方法. 中国特許ZL200380105698.3. 2008-07-30.
- 10) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材及びその製造方法. カナダ特許2509623. 2008-08-19.
- 11) 島根県. 大畑敬. 斜行型単板積層材及びその製造方法. ヨーロッパ (フィンランド・イタリア) 特許1616679. 2008-09-17.
- 12) 大橋義徳, 松本和茂, 河村進, 大畑敬. “種々の国産材料を用いた木質 I 形梁の力学特性”. 加工技術協会第27回年次大会講演要旨集. 熊本, 2009-10-8/10. 社団法人日本木材加工技術協会, 2009, p.85-86.
- 13) 大橋義徳, 松本和茂, 河村進, 大畑敬. “45 度合板をウェブに用いた木質 I 形梁の曲げ変形挙動”. 日本材料学会第59期学術講演会講演論文集. 札幌, 2010-5-21/23. 公益社団法人日本材料学会, 2010, p.41-42.