

画像計測を利用したせん断型ダンパーのひずみ分布特性の把握

Strain distribution properties of shear panel damper by image processing technique

劉 陽*, 水野千里**, 青木徹彦***

Yang Liu, Tisato Mizuno, Tetsuhiko Aoki

*工修 愛知工業大学大学院工学研究科博士後期課程 生産・建設工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町)

**愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町)

***工博 愛知工業大学教授 工学部都市環境学科 (〒470-0392 豊田市八草町)

Recent demand of cost reduction for infrastructure in this country searches more economical devices in every aspect. In the seismic field, shear plate damper using low yield steel is considered as one of installations to meet such needs. In order to investigate higher seismic performance for the shear damper, strain distribution properties of the shear panels are investigated based on image processing technique under cyclic loading test. The high precision of the measurement by the image processing system was confirmed by comparing with the measured value by strain gauges. Various shapes of shear panel are served in the test and their strain distributions are obtained as well as load - displacement relationship.

Keywords: shear panel damper, image processing technique, strain distribution, repeated loading test, seismic performance

キーワード: せん断型ダンパー, 画像計測, ひずみ分布, 繰り返し載荷実験, 耐震性能

1. はじめに

地震多発国であるわが国では、1995 年の兵庫県南部地震以降も能登半島、新潟中越地方などに大きなレベルの地震が発生している。構造物の耐震安全性を高めるために、特に橋梁構造物では免震ゴム支承が多く用いられるようになってきたが、近年の公共投資削減に伴うコスト縮減の要求から、より経済的な免震、制震デバイスが求められている。最近では大型構造物にはダンパーを設けることが有効と考えられている。

わが国の建築分野では従来から低降伏点鋼のせん断形ダンパーに関して多くの研究^{1),2),3)}がなされ、既に実用的に高層ビル等に用いられている。この場合、せん断変形角は大きくても 5% (5/100)程度であり、橋梁構造で用いられている免震ゴム支承の 250%に比べると非常に小さなものである。橋梁構造物に低降伏点鋼のせん断形ダンパーを設置した事例はまだ見あたらないが、既設橋梁の耐震化では、遊間不足等により免震化工事に困難さがあり、免震ゴム支承に代わる変位の少ないダンパーが望まれている。

これに対し、谷、佐倉ら⁴⁾は橋梁構造を対象とし、低降伏点鋼を用いたせん断パネル型制震ストッパーを提案している。また著者ら⁵⁾もやや厚肉の正方形を基本とし、様々な形状、板厚変化を持たせた低降伏点鋼のせん断パネルダンパーを提案し、

繰り返し載荷のもとでも 30%を超える大きなせん断変形能力を満たす耐震性能を実験的に明らかにしている。

橋梁構造物のように制約された空間内に設置できるよう、小型で経済的かつ、より高性能、すなわち、大きな累積塑性ひずみが加えられても破壊しないようなダンパーが開発されれば、地震後にも取り替えることなく、ライフサイクルコストの観点から合理的制震デバイスを供給することができると考えられる。

せん断形ダンパーに繰り返し載荷を行うと、ほとんどの場合パネルの 4 隅にクラックが発生してその終局状態に達している。すなわちパネル内のひずみ分布状態は一樣ではなく、複雑な様相を呈していると考えられる。もしこれが把握できれば次の段階としてより効果的なダンパーの開発ができる可能性がある。

そこで本研究では画像計測技術を用いて、せん断パネル内のひずみ分布状態を 2 次的に把握することを主な目的とする。従来のひずみゲージではパネル内のひずみの 2 次的な広がり把握するには大量のゲージが必要となり、現実的ではない。またダンパーのような大ひずみ領域で、しかも繰り返し変形を生じる場合は、もはやひずみゲージや接着剤が機能しない。これに対し、画像計測を用いればこのような問題は生じない。

画像計測を用いた大変形域ひずみの計測に関する研究には古くは高温、クリープ、熱衝撃などを対象とした矢川ら⁶⁾の研究があり、土木構造分野では、鉛プラグ入り免震ゴム支承内の鉛

材料を対象とした吉田ら⁷⁾の研究、LNG地下タンクを対象とした酒井ら⁸⁾の研究、突き合わせ溶接継ぎ手の低サイクル疲労強度を調べた舘石ら⁹⁾の研究がある。近年はデジタルカメラの高性能化と低価格化により、この分野の研究が一層発展すると考えられる。

本研究では前回の実験⁵⁾で用いたものと基本的に同じ極低降伏点鋼せん断ダンパーを用い、パネル形状および支持条件を若干変えたせん断繰り返し载荷実験を行い、パネル面内のひずみ分布の変化を画像処理技術を用いて調べたものである。

2. 画像処理による計測手法

画像計測の一般的な方法や基礎知識に関しては、最近多くの出版物^{10),11),12)}が出されており、本研究でもそれらを参考にして Visual Basic により計測処理プログラムを作製した。

2.1 画像計測の流れ

本研究では、試験体の表面に取り付けたマークの動きを高精度デジタルカメラで撮影し、画像処理により位置および変位を測定し、得られたマークの座標位置を節点とする定ひずみ三角形要素を用いた有限要素法モデルによりひずみを算出する。デジタルカメラにより獲得した画像データから、ひずみの算出までの処理の流れを図-1に示す。

本研究でせん断パネル試験体に付けたマークは、写真-1に示すように、試験体下半分に予め白ペイントを薄く噴霧し、上下、左右 5mm ピッチで赤色の点を付けたものである。マーク

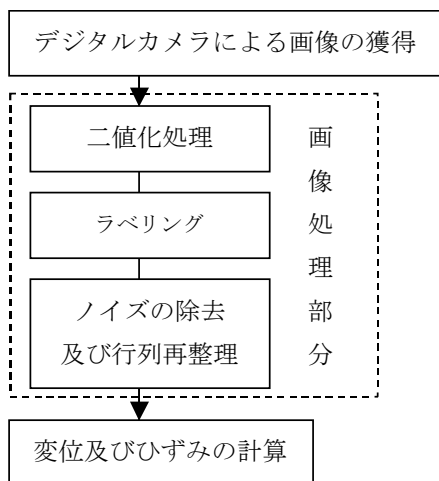


図-1 画像計測の流れ

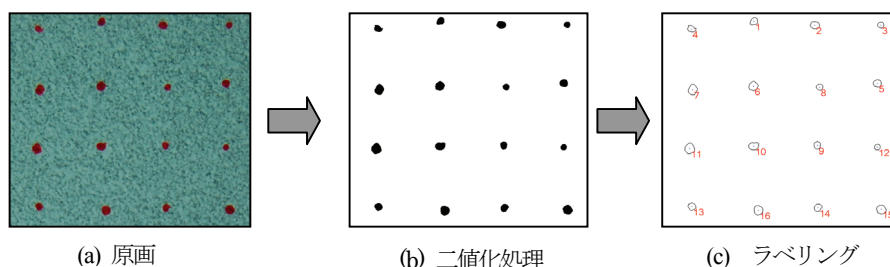


図-2 画像処理の流れ

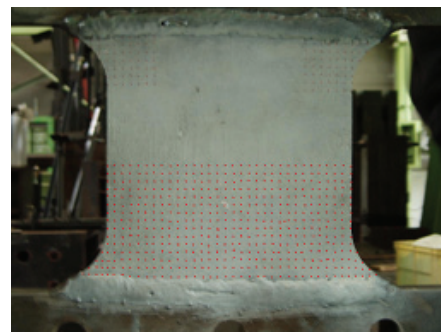


写真-1 試験体のマーク位置

は図-2 (a)に示すようにほぼ円形で、直径は約 0.2~0.3mm である。

図-1 の画像処理内容は以下のようである。

(1) 二値化処理

画像の色彩情報に適当なしきい値を選んで、マークの各要素、背景を 0 または 1 に二値化することによって、マーク画像を背景から抜き出す(図-2(a), (b)参照)。

(2) ラベリング

背景領域から抽出されたマークに番号付けを行うことをラベリングという。ラベリングと同時にそれぞれマークの重心点の座標、面積(画像数)を求める(図-2(c)参照)。

(3) ノイズの除去及び行列再整理

マークの面積が他よりかなり小さい場合、マークではなく、ノイズ成分と見なし、画像内から除去する。各マークがラベリングによって番号を付けられても、実験試験体が大変形する場合、測定時間の異なる二枚の写真の番号とマークが一致しなくなる場合がある。そのため、マークの番号を規則正しく並べなおし、不明の番号が生じたとき前後の番号から推定する。

2.2 変位およびひずみの計算

ここでは平面定ひずみ三角形要素を用いた有限要素法の基礎式¹³⁾を利用する。いま画像計測によって得られた任意の 3 点を図-3に示すように i, j, k とし、各計測変位ステップ間の x, y 方向の変位増分を du, dv とおくと、変位増分ベクトル $\{d\delta\}$ は

$$\{d\delta\} = \{du_i \quad dv_i \quad du_j \quad dv_j \quad du_k \quad dv_k\}^T \quad (1)$$

となり、ひずみ増分は次の式で得られる。

$$\{d\varepsilon\} = \langle d\varepsilon_x \quad d\varepsilon_y \quad d\gamma_{xy} \rangle = \left\langle \frac{\partial du}{\partial x} \quad \frac{\partial dv}{\partial y} \quad \frac{\partial du}{\partial x} + \frac{\partial dv}{\partial y} \right\rangle \quad (2)$$

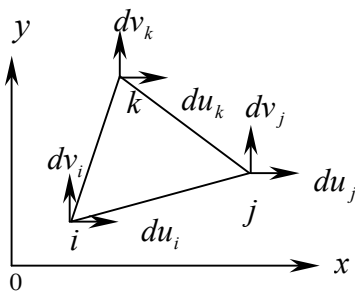


図-3 三角形要素の節点

$$\{d\epsilon\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_j - y_k & 0 & y_k - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ 0 & x_k - x_j & 0 & x_i - x_k & 0 & x_j - x_i \\ x_k - x_j & y_j - y_k & x_i - x_k & y_k - y_i & x_j - x_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \{d\delta\} \quad (3)$$

ここに、 A は三角形要素の面積であり、 x_i, y_i は i 点の節点座標である。

式(2)によるひずみは微小変形下でのひずみであり、今回の実験のような大変形には直接適用できないが、小さな変位ステップごとに画像計測を行って得られた微小増分間では線形とみなし、同式を用いることができる。

2.3 3軸ひずみゲージ計測結果との比較

試験体における画像計測と図-4に示す位置に貼付けた2つの3軸ひずみゲージにより計測されたせん断ひずみの比較を図-5に示す。3軸ひずみゲージのせん断ひずみは次式(4)によって計算した。

$$\gamma = \sqrt{2\{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2\}} \quad (4)$$

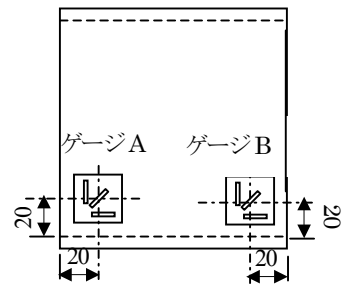


図-4 3軸ひずみゲージ貼付け位置

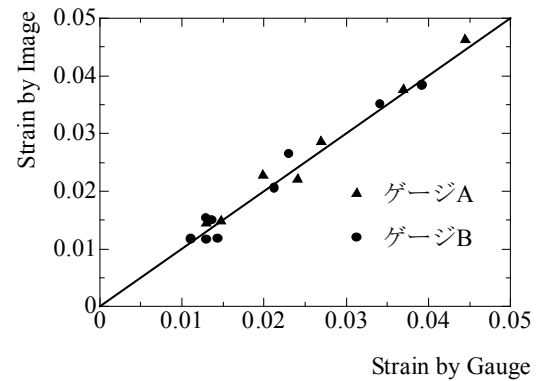


図-5 3軸ひずみゲージと画像計測によるひずみの比較

ここに $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ はそれぞれ3軸ひずみゲージにより得られた横、縦、斜め方向のひずみである。

繰り返し大変形を与えた試験体ではゲージの接着剤が機能しなくなるため、3軸ひずみゲージは0.05までしか計測できなかった。この計測範囲では、画像計測と3軸ひずみゲージの計測値は図-5に示すようにほぼ一致した結果となった。画像処理

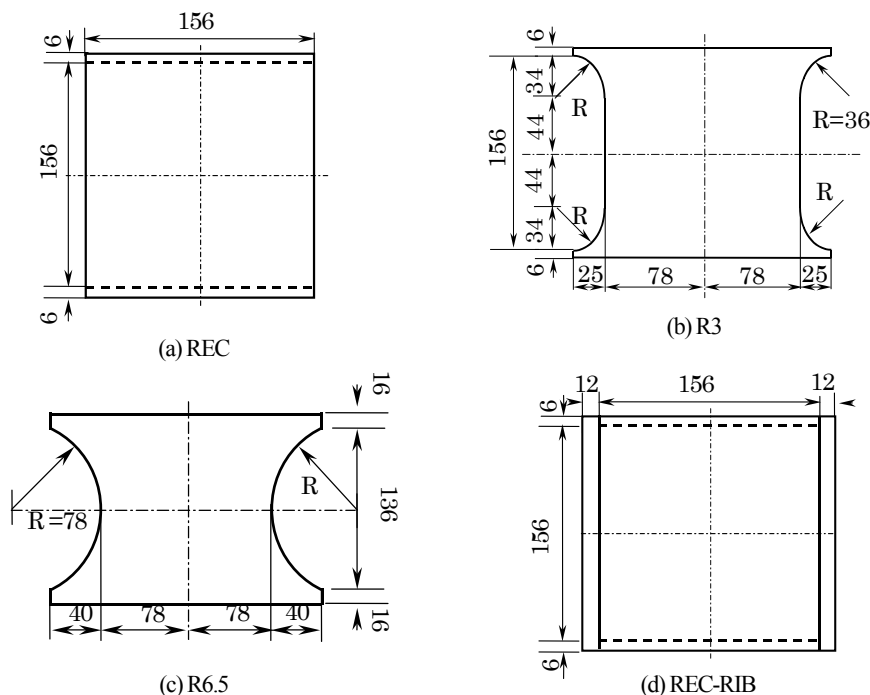


図-6 試験体の形状寸法および記号 (寸法の単位 mm)

によるひずみ計測の適用範囲は、ひずみゲージのように物理的に限定されるものではなく、撮影可能であればどのような大きなひずみでも原理的には計測可能となる。ただし、今回の計測では2点間の距離約2.5mmに対応するピクセル数は50であり、分解度は約0.001(0.1%ひずみ相当)である。よって、画像計測の場合に大きなひずみの方が相対誤差は小さくなると言える。そこで、画像計測ではひずみゲージでの計測範囲0.05を超える大ひずみ領域でも十分な精度でひずみが計測できるものと考えられる。

3 せん断形ダンパーの繰り返し载荷実験

3.1 試験体

本研究で用いたせん断パネル低降伏点鋼は前回の実験⁵⁾で用いた同じもので、材質 LYP-100 (公称降伏点 100N/mm²)、板厚はすべて $t=12\text{mm}$ (実測平均値 11.8mm) である。基準とする試験体寸法はパネル幅 D および正味の高さ H が板厚 t_w の 13 倍 ($D/t_w=13$) の 156mm となる正方形とし、溶接前の試験体高さは溶接開先、溶接盛り代等を上下に 6mm 考慮して 168mm としている。本研究は前回の実験⁵⁾で用いた試験体のひずみ分布状態を画像計測によって明らかにするのが主な目的である。そこで、前回の試験体の代表的形状として、正方形、R 付、リブ付を各 1 体選んだ。ただし、側辺全 R 付を 1 本加えた。試験体形状を図-6 に示す。

各試験体の特徴は以下のようである。()内は呼び名。

No.1 正方形板 (REC) : 基準正方形板としたもの。

No.2 R3 付き板(R3) : REC の 4 隅に $R=3t_w$ の円弧フレアーをつけたもの。

No.3 全 R 付き板(R6.5) : REC の 4 隅に直径が試験体高さに相当する $R=6.5t_w$ の円弧フレアーをつけたもの。

No.4 リブ付き正方形板(REC-RIB) : REC の両側面に縦リブ (寸法 : 50mm×156mm , 材質:LYP-100)を溶接したもの。

3.2 実験方法

境界条件について前回の実験⁵⁾ではすべて上下辺固定であったが、今回は図-7 に示すように試験体の上下部に板厚 16mm の鋼板 (100mm×560mm) を溶接し、この鋼板の左右にリンク (厚さ 16mm、幅 50mm、長さ 340mm) を設け、上辺が下辺に平行移動できるようにしてある。これは前回の実験⁵⁾で、上辺が上下移動できない場合、せん断パネルにせん断力のみならず、大きな引張り力が発生し、図-10 の破線に示すように大きなせん断抵抗力が現れたため、今回は上下辺の移動を可能にし、引張り力の発生しない構造としている。せん断パネル上端の鋼板は水平にのみ移動する上部载荷はり (300mm×90mm の溝型鋼 2 本) に固定した载荷ブロックで挟み、水平力を与えた。下端の鋼板は山形鋼 (130×130mm、 $t=10\text{mm}$) 2 本に M20mm ボルト 7 本で挟んで結合し、载荷実験装置の下部固定のり (400mm×400mm の H 形鋼 2 段重ね) にボルトにより固定した。水平力は 200tf 静的アクチュエータにより与えた。繰り返し载荷

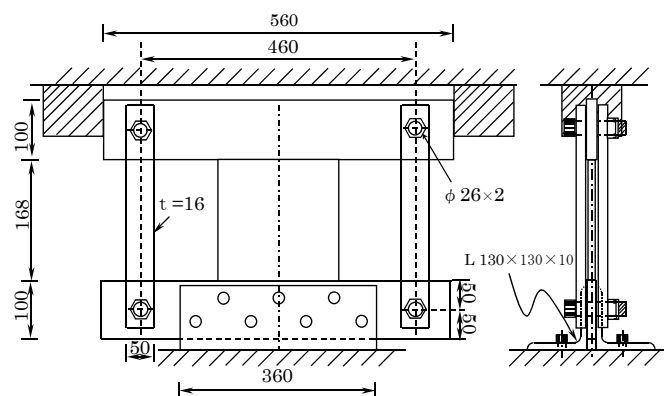


図-7 試験体固定の様子 (寸法の単位 mm)

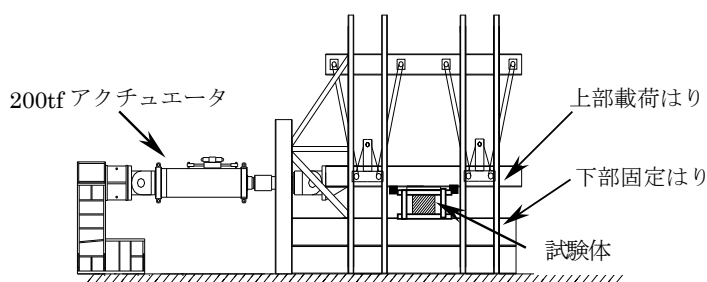


図-8 载荷装置

装置を図-8 に示す。繰り返し载荷プログラムは基準変位として、前回の実験⁵⁾で求めた降伏変位 5mm を用い、この値を正負整数倍する変位を 1 往復ずつ漸増して与えた。荷重はアクチュエータに付属のロードセルにより、また水平方向変位は、計測値の信頼性を上げるため、棒状変位計 (計測範囲 200mm) およびレーザー変位計 (計測範囲 500mm) の 2 つにより計測した。両者の変位計測結果に差は見られなかった。よって、どちらを用いても問題ないと言える。

3.3 計測システム及びカメラの設置

計測システムは、デジタルカメラ、画像処理プログラム、実験载荷装置で構成されている。表-1 にデジタルカメラの性能をしめす。

表-1 画像解析に用いたカメラの性能

画像記録デバイス	NIKON DIGITAL CAMERA D40X
レンズ型式	AF-S DX ZOOM Nikkor ED 18~55mm F3.5~5.6G
フィルタサイズ	52mm
画素	3872×2592 (1000 万画素)

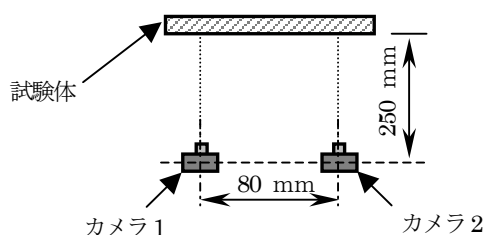


図-9 カメラと試験体の位置関係

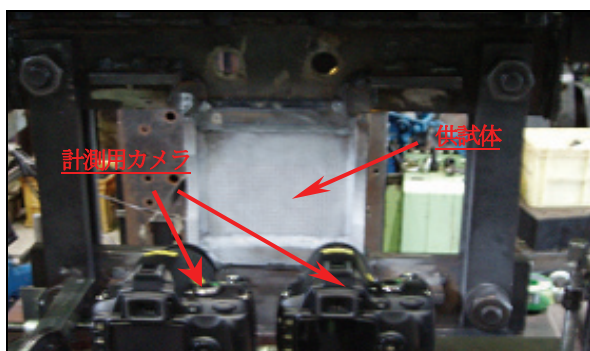


写真-2 計測用カメラの設置

2つの計測用カメラ設置の様子を写真-2に示す。試験体の下の半分を計測領域とし、カメラは画像平面となる試験体と平行するように設置した。図-9にカメラと試験体の位置関係を示している。

4 実験結果と考察

4.1 荷重－変形履歴曲線

4体の試験体に対して行ったせん断繰返し荷重実験による荷重－変形履歴曲線を図-10に示す。今回実験での使用材料、パネル基本形は前回の実験⁵⁾と同じであるため、すべての図の縦軸は前回の実験⁵⁾で求めた降伏せん断力 $1Q_y = 86.5\text{kN}$ で無次元化した。横軸は平均せん断ひずみ(変位と試験体の高さの比)、またはせん断変形である。1サイクルの変位は平均せん断ひずみ3.2%に相当する。各試験体の変形と破壊の様子を写真-3に示

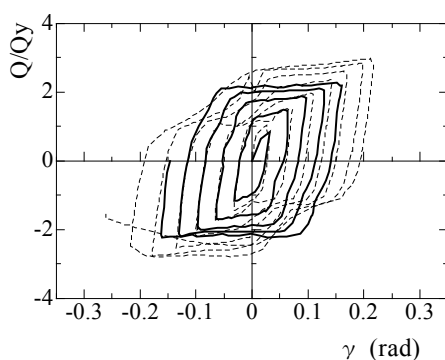
す。以下試験体のグループごとに荷重－変形履歴曲線の考察を述べる。

(1) 正方形板 (REC)

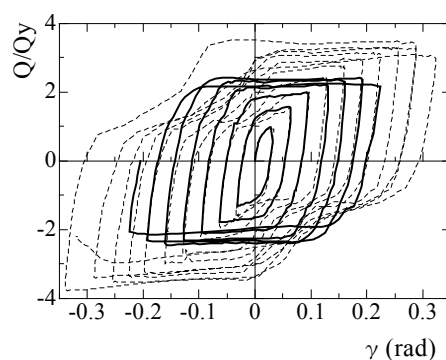
正方形板(REC)の荷重履歴曲線を図-10(a)に示す。最大荷重が $2.2Q_y$ のとき、最大平均せん断ひずみは16%にとどまり、4体の試験体の中で最も小さい。ひずみが隅角部に集中することによって、4サイクル時に基部にクラックが生じ、強度が低下したためである。画像計測によるひずみ分布は後述する。クラックにより破壊した様子を写真-3(a)に示す。図中の破線は前回の実験⁵⁾の結果で、試験体の上辺が左右のみ移動でき、上下に変位できない条件下での実験結果であるため、斜引張り力場が形成され、荷重、変形とも今回より大きい。その結果、左上、右下部が欠けているように見える。

(2) R3 付き板 (R3)

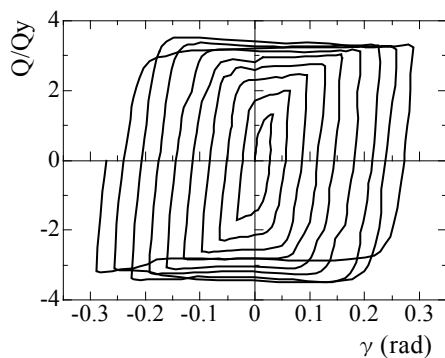
R3 付き板(R3)の荷重履歴曲線を図-10(b)に示す。図-10(a)と比較して分かるように、R3の最大荷重はRECとほぼ同じ $2.25Q_y$ になったが、せん断変形は平均せん断ひずみ23%まで大きく向上し、RECより約44%大きくなっている。これはフレアーを付けることによって、ひずみ集中が緩和され、変形能力が向上したためと思われる。写真-3(b)に見られるように7サイクル時に円弧フレアーと垂直線部の交点付近にクラックを生じ、荷重を終了した。図-10(b)中の破線は前回の実験⁵⁾の実験結果で試験体の上辺が左右のみ移動でき、上下に変位しない試験体である。この場合も、荷重、変形とも大きくなっている。前と同様、1ループの形状が長方形ではなく、左上、右下部が欠けた形状となっている。



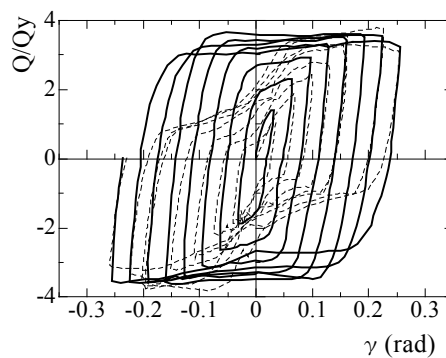
(a) REC



(b) R3

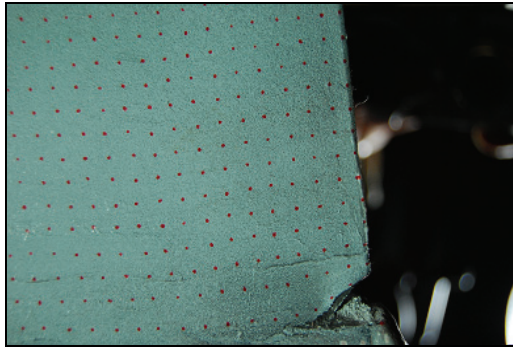


(c) R6.5

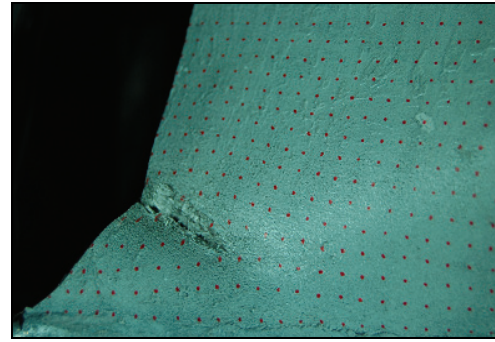


(d) REC-RIB

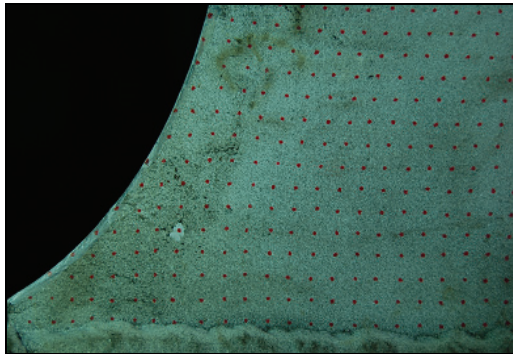
図-10 せん断繰返し荷重－変形履歴曲線



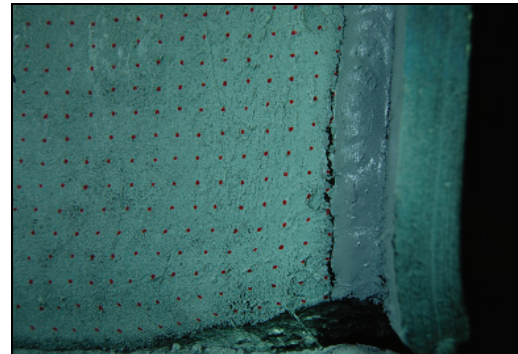
(a) REC



(b) R3



(c) R6.5



(d) REC-RIB

写真-3 各試験体の変形と破壊の様子

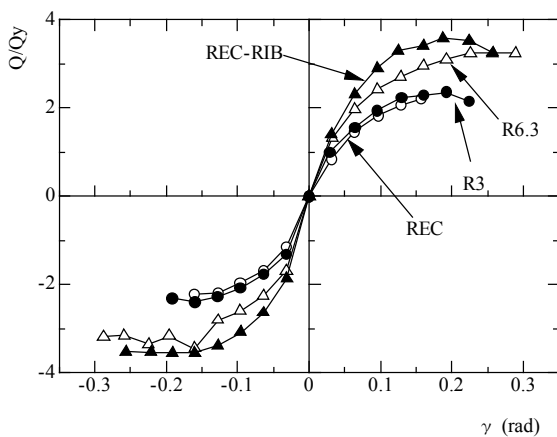


図-11 各試験体の包絡線

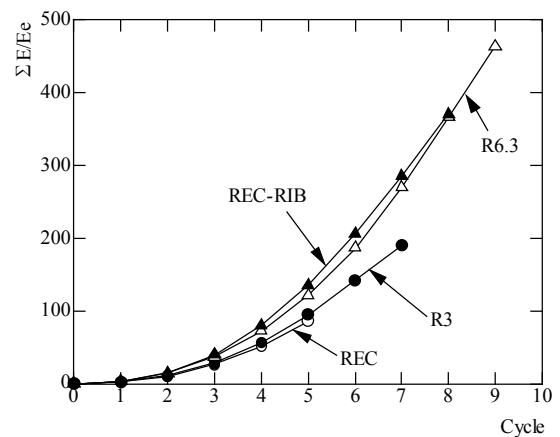


図-12 エネルギー吸収性能

(3) 全R付き板 (R6.5)

全R付き板(R6.5)の荷重-変位曲線は図-10(c)に示すように、せん断変形が4体の試験体の中では最も高くなり、平均せん断ひずみ28.5%まで達した。これはR3よりさらに24%大きくなっている。最大強度は約 $3.2Q_y$ となり、R3より44%大きい。R6.5の終局状態は9サイクル時に円弧コーナー部に亀裂を生じて終了した。試験体R6.5は今回新たに製作した形状である。

(4) リブ付き正方形板 (REC-RIB)

図-10(d)にリブ付き正方形板(REC-RIB)の繰り返し荷重履歴曲線を示す。最大強度はR6.5とほぼ同じ $3.3Q_y$ であったが、7サイクル時にリブの基部の溶接部分にクラックが生じたため、

せん断変形は平均せん断ひずみ25%にとどまった。破壊の様子を写真-3(d)に示す。図中の破線は前回の実験⁵⁾の実験結果である。両者の比較から、最大荷重およびせん断変形は変わらないが、荷重-変形履歴曲線のループ形状は今回の方が長方形に近く、安定している。したがって両側面に縦リブを付けた場合、せん断パネルの上辺は上下移動ができる方がよいと思われる。

4.2 包絡線およびエネルギー吸収性能の比較

前述までの各試験体の荷重-変位履歴曲線より、各履歴ループの最大変位点における点を結んで包絡線を描くと図-11のようになった。

同図から、最も低い荷重を示したものは基準とする正方形板(REC)で、性能向上のためにはコーナーにフレアーを付けるか、側辺のリブが必要である。最大荷重の最も大きなものはリブ付き正方形板(REC-RIB)のケースであった。変形量の最も大きいものは全R付き板(R6.5)で、試験体高さの半分(6.5t=78mm)を半径とする円弧フレアーをつけた試験体である。一定荷重のもとで著しく大きな変位量(平均せん断ひずみ 28%超)を示した。したがってリブを付けないタイプではコーナー部円弧半径を最大にした方がよいと思われる。

図-12 は各試験体の繰り返し载荷による履歴ループの面積から累積エネルギー吸収量を求め、弾性エネルギー $E_e = Q_y \cdot \delta y /$ で除したもので、各試験体の累積エネルギーを示している。図からエネルギー吸収量の最も大きかったものは全R付き板(R6.5)で、最も小さなものは、正方形板(REC)であった。

4.3 試験体のひずみ分布

4 体の試験体に対して行ったせん断繰返し载荷実験に画像計測により得られた3 サイクル時のひずみ分布図を図-13 に示す。これらの図はすべて試験体の約1/4部分の計測結果であり、同図の上側が試験体の下辺、左側が試験体の左側を示す。図-3 に示す三角形要素の平面ひずみ状態($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$)を一つのスカラー($\bar{\varepsilon}$)で表わせるように、式(5)を用いて Mises 相当ひずみ¹⁴⁾に変換する。図-13 の縦軸は式(5)で求めた Mises 相当ひずみ増

分を累積した Mises 等価累積ひずみを表わし、平面の縦、横線の交点は要素の重心点位置を示している。

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}((d\varepsilon_x)^2 + (d\varepsilon_y)^2 + d\varepsilon_x d\varepsilon_y) + \frac{1}{3}(d\gamma_{xy})^2} \quad (5)$$

ここに $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\gamma_{xy}$ はそれぞれ x 方向のひずみ増分, y 方向のひずみ増分およびせん断ひずみ増分である。

以下試験体ごとにひずみ分布と考察を述べる。

(1) 正方形板 (REC)

標準形である正方形板の 3 サイクル時のひずみ分布を図-13(a)に示す。正方形板では隅角部で式(5)によって求めた等価累積ひずみが0.17 に達し、中心部の等価累積ひずみの平均値の5 倍以上になった。他の試験体と比較して、ひずみが著しく隅角部に集中したことがわかる。これにより、4 サイクル時に基部にクラックが生じはじめ、それが水平载荷と共に進展し、大きなせん断変位を生じることなく破壊した(写真-3(a)参照)。

(2) R3 付き板 (R3)

R3 付き板は、正方形板の4 隅に半径 $R = 3t_w$ (t_w =パネル厚さ)の円弧フレアーをつけたもので、他の条件は同じである。3 サイクル時の R3 付き板のひずみ分布を図-13(b)に示す。同図(a)と比較して分かるように、最大等価累積ひずみの発生部分は隅

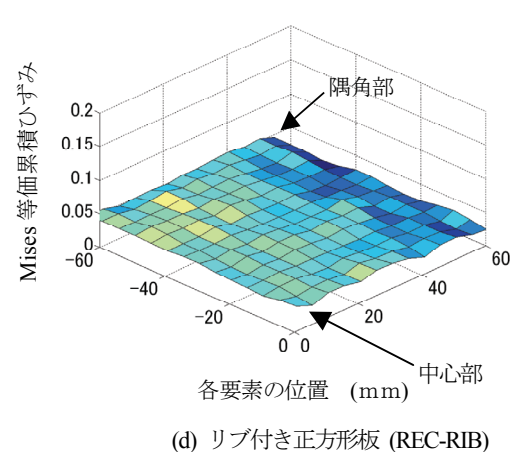
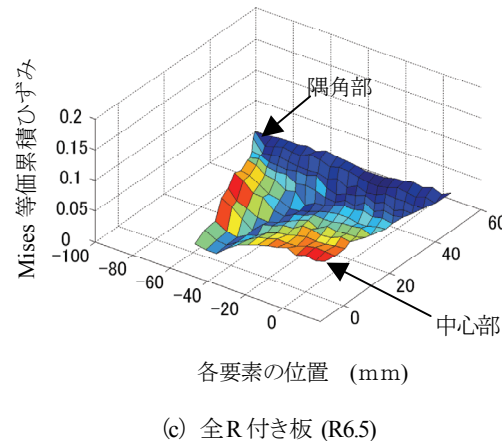
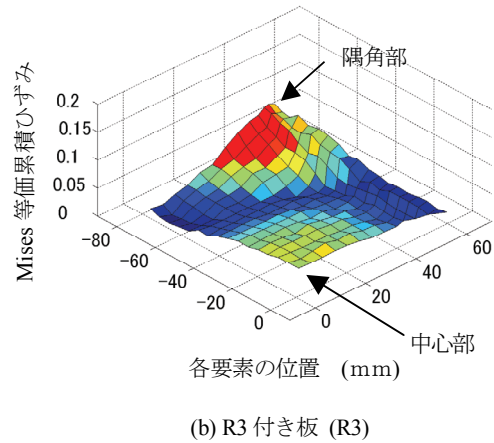
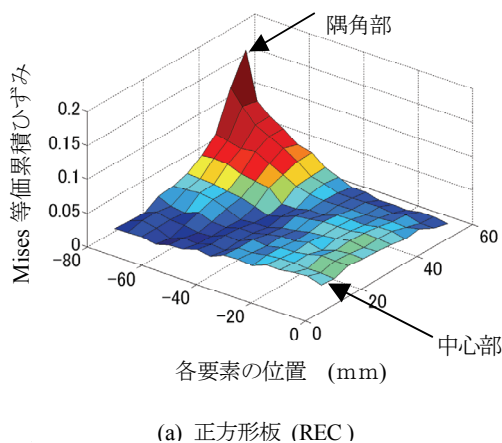


図-13 3 サイクル時の各試験体の等価累積ひずみ分布

角部から円弧の部分に移り、等価累積ひずみは 0.085 となり、正方形板の約半分まで減少した。興味あることはパネル中心部のひずみが正方形板より広い範囲で高くなっていることである。また前述のせん断変形(平均せん断ひずみ)は正方形板より 44% 増大している。このように、隅角部に円弧フレアーを付けることによって、4隅へのひずみの集中が避けられ、ひずみ集中が緩和された効果がよくわかる。

(3) 全R付き板 (R6.5)

全R付き板は、正方形板 PL の左右両端に試験体高さの半分の長さ(6.5t=78mm)を半径とする円弧フレアーをつけたものである(図-6(c)参照)。図-13(c)に3サイクル時の等価累積ひずみ分布を示す。試験体高さの 1/3 の円弧部に最大等価累積ひずみ 0.073 が生じたが、円弧周辺の等価累積ひずみは R3 付き板と比べて約 15%下がった。一方、中心部の等価累積ひずみはさらに大きくなって、R3 に比べて全体の等価累積ひずみが均一化されたことが分かる。これが変形能力、ひいてはエネルギー吸収能力の一層の向上につながったと考えられる。

(4) リブ付き正方形板 (REC-RIB)

図-13(d)はパネル両側面に縦リブをつけた正方形板の等価累積ひずみ分布である。同図からわかるように、計測された等価累積ひずみが板全体に均等に分布している、等価累積ひずみの最大値は 0.45、平均値は約 0.04 であった。最終破壊は写真-3(d)に示すように、7 サイクル時にリブの基部の溶接部分にクラックが生じ、破壊に至った。

本研究の目的はせん断パネルの変形性能を向上させるためにパネル内のひずみ分布を知ることであった。上述の各パネルのひずみ分布結果から、正方形板では隅角部に非常に大きなひずみ集中があることが分かり、早期破断は当然と思われる。よって、ひずみ集中を避けなければならない。この目的で、隅角部に R を付けた場合、R3 付き板ではひずみ集中が約半減した。両側をすべて円弧にした全R付き板ではさらに集中が低減した。このようにRを付けることによる効果が視覚的に明らかにされ、荷重-変形状との関係を明白となった。

さらに、リブを付けた場合、理想的な均等ひずみ分布となったが、荷重-変形状は、リブ上下端の溶接部の破断により、せん断変形は R6.5 より低下した。しかしながら、今回計測されたひずみ分布から分かるように、リブ付き正方形板の均等なひずみ分布特性が最も優れていると思われる。したがって、リブ上下端の溶接部の改良を行えば、さらに高性能の変形特性が得られるものと考えられる。

5. 結論

本研究は、極低降伏点鋼を用いたせん断形ダンパーのパネル形状を変えて、繰り返し載荷実験を行い、大ひずみを含む2次元ひずみ分布を画像計測により調べ、また変形性能への影響を調べることを目的としたものである。研究により得られた結論は以下のようにまとめられる。

1) 試験体の表面に取り付けた多数の点をデジタルカメラで撮影し、画像処理により変位を測定し、得られた点の座標位置を節点とする定ひずみ三角形要素を用いた有限要素法モデルによりひずみを算出した。画像計測と3軸ひずみゲージにより得られたせん断ひずみの比較によって、本研究で開発した画像計測システムは十分な精度でひずみが計測できていることを確認した。

2) 画像計測手法により繰り返し載荷実験における多種形状を有するせん断形パネルダンパーの2次元ひずみ分布を明らかにした。このようなパネル全体領域にわたるひずみ分布の把握は従来のようなひずみゲージでは得ることが困難である。

3) せん断繰り返し載荷したとき、正方形板の隅角部には形状に伴う応力集中によりひずみが著しく集中し、中心部の平均ひずみの5倍に達した。これにより、基部に4サイクルの時にクラックが生じはじめ、せん断変形が16%にとどまった。

4) 正方形板の4隅に $R=3t_w$ の円弧状フレアーを設けると、ひずみの最大発生部分は隅角部から円弧の部分に移り、最大等価累積ひずみは正方形板の半分まで減小した。またパネル中心部のひずみは正方形板より高くなり、全体的にひずみは平均化した。せん断変形は正方形板より44%増大している。

5) 正方形板の左右両端に試験体高さの半分(6.5t=78mm)を半径とする円弧フレアーをつけると、R3付き板に比べて全体の等価累積ひずみがさらに均一化された。せん断変形は4体の試験体の中では最も高くなり、R3付き板よりさらに24%大きくなっており、平均せん断変形が28.5%まで達した。

6) リブ付き正方形板では等価累積ひずみが板全体に均等に分布し、理想的なひずみ分布となった。しかし、7サイクル時にリブの基部の溶接部分にクラックが生じ、せん断変形はせん断変形25%でリブのない全R付き板を超えることができなかった。今後はリブのひずみ分布を調べ、リブ取付け方法の検討を行う必要がある。

謝辞

本実験は愛知工業大学耐震実験センターで行われた。実験の実施に当たり、センターの技術員鈴木博氏、卒研の学生諸君の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 泉 満, 可児長英他: 極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制震部材の低サイクル疲労実験(その1, その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1333-1334, 1992.8.
- 2) 竹中啓之, 国末晃寛他: 低降伏応力度鋼板を用いたK型ブレース制震装置に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集,

pp.1339-1340,1992.8.

- 3) Nakashima,M., et al : Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel, Int. J. Earthquake Engrg., and Struct. Dynamics, Vol.23, pp.1299-1313, 1994.1.
- 4) 谷 一成, 佐合 大, 谷中聡久, 小池洋平, 鶴野禎史, 姫野岳彦: 低降伏点鋼板を用いたせん断パネル型制震ストッパーの研究, 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, PP.1-6, 2006.2.
- 5) 劉 陽, 青木徹彦, 高久達将, 福本秀士: 低降伏点鋼せん断パネルダンパーの繰返し載荷実験, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp.560-567, 2007.3.
- 6) 矢川元基, 松浦真一, 安藤良夫: 点認識画像処理を用いた非接触ひずみ解析法, 機械学会論文集(A 編), 49 巻, 447 号, 昭和 58 年 11 月.
- 7) 吉田純司, 阿部雅人, Beghini.Alessandro, 藤野陽三, 横川

英彰: 画像計測を利用した鉛の力学特性の把握, 土木学会論文誌 No. 724/I-62, 127-139, 2003. 1.

- 8) 酒井理哉, 松尾豊史, 鬼束俊一, 原田光男: コンクリート工学年次論文集, Vol 23, No.3, 2001.
- 9) 舘石和雄, 判治 剛: 画像計測を用いた実験システムによる突合わせ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討, 土木学会論文集, No. 752/I-66, pp. 277-287, 2004. 1.
- 10) 酒井幸市: デジタル画像処理の基礎と応用, 一基本概念から顔画像認識まで, CQ出版, 2004 年 2 月.
- 11) 井上誠喜, 八木伸行, 林 正樹他, C 言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 平成 18 年 6 月.
- 12) 谷口慶治: 画像処理工学, 基礎編, 共立出版, 2005 年 2 月
- 13) 鷲津久一朗他: 有限要素法ハンドブック, 培風館, 昭和 58 年 12 月.
- 14) 吉田総仁: 弾塑性力学の基礎, 共立出版, 1998 年, pp155.

(2007 年 9 月 18 日受付)