

橋梁用ゴム支承の材料・構造特性に関する 実験及び解析的研究

東哲平*・松田浩*・古賀掲維**

Experimental and analytical studies on material and structural properties of rubber bearings for bridges

by

Tepei AZUMA*, Hiroshi MATSUDA* and Aoi KOGA**

Laminated rubber bearings have large deformation properties. On the other hand, in fact, it is designed without considering its three dimensional characteristics. Therefore, we measured the three - dimensional properties of laminated rubber bearings using DICM to verify whether strain distribution can be obtained. FEM analysis was also performed to examine the validity of experiments.

Key Words : DICM, large deformation, laminated rubber bearing, FEM analysis

1. 背景

支承は従来、剛性の高い鋼製支承が主流であったが、平成7年の兵庫県南部地震により支承橋梁部に想定を超えた衝撃力の作用や、上部工との大きな相対変位が生じたため、多数の鋼製支承やそれらを採用した橋梁に大きな損傷が生じ、橋梁の被害拡大の一因となった。この地震の経験を踏まえて改訂された道路橋の耐震設計基準では橋梁支承への要求性能として「支承本体は大規模地震（レベル2）に対しても破損することなく、上部工慣性力を確実に下部工に伝達すること」となった。

鋼製支承と対比してゴム支承は、地震による被害が小さかったことや、鉛直と水平の双方に変形性能を有していることから、兵庫県南部地震以降は新設橋梁には積層ゴム支承が多く使用されるようになり、現在では全国的に普及し、支承の主流となっている。

さらに、ゴムと鋼板を交互に積み重ね、加硫密着した積層ゴム支承は、鉛直荷重載荷時にはらみ変形が拘束される。そのため、高い荷重支持機能を有し、水平力に対して柔軟なばねとして作用するため高い水平変形機能、復元機能を有する。以上の点から、反力分散支承には積層ゴム支承が一般的に用いられている。また、ゴム支承に一般的に使用されている天然ゴムは、酸素やオゾンの影響を受けやすいため、老化防止剤と被覆ゴムにより劣化を防ぐ設計がなされている。

積層ゴム支承のせん断ひずみは、ゴム積層部の厚さの70%（温度変化など桁の常時伸縮時）まで許容されている一方で、ゴム材料の変形特性は大きく上述のようにはらみ変形も生ずる材料である。

その一方、ゴム支承の3次元的材料特性は厳密には考慮されずに設計されているのが現状である。しかし、東日本大震災や熊本地震において、ゴム支承部に損傷（Fig.1）を受けた橋梁があったことから、ゴムの大変形特性の定量的評価が必要とされている。

以上に鑑み、本論では、実験的に橋梁用ゴム支承の大変形特性の定量的な評価法としてデジタル画像相関法（DICM）を提案している。



(a) 積層部破断



(b) 取付ボルト破断

Fig.1 地震によるゴム支承部の破断

2. DICM概要

2.1 原理

DICMは、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面を撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変位の大きさと方向を求めることができる手法である。

DICMの特長としては、2台のカメラを使用することで3次元変形・ひずみの計測が可能となる。さらに、レーザー干渉を利用した計測法と比べると測定空間の揺らぎに優位性があることが挙げられる。

重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。DICMの解析原理は、デジタル画像が一般的に256濃度階調で表現される画像から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして測定対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から測定対象物表面の変位量と方向を同時に求める方法である。

まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心としたN×N画素の任意領域(サブセット)を指定する(Fig. 2(a))。計測対象物に変形を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(Fig. 2(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変形データを得ることができる。

ひずみ分布は、以上の方法により得た変位量を利用して算出する。これは、Fig. 3に示すように、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の二点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜め方向ひずみの値を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる

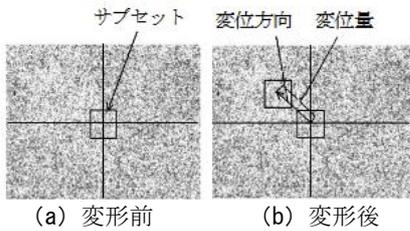
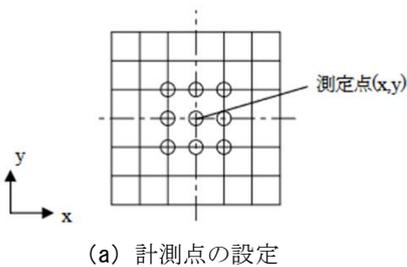


Fig. 2 変形前と変形後のデジタル画像



(a) 計測点の設定

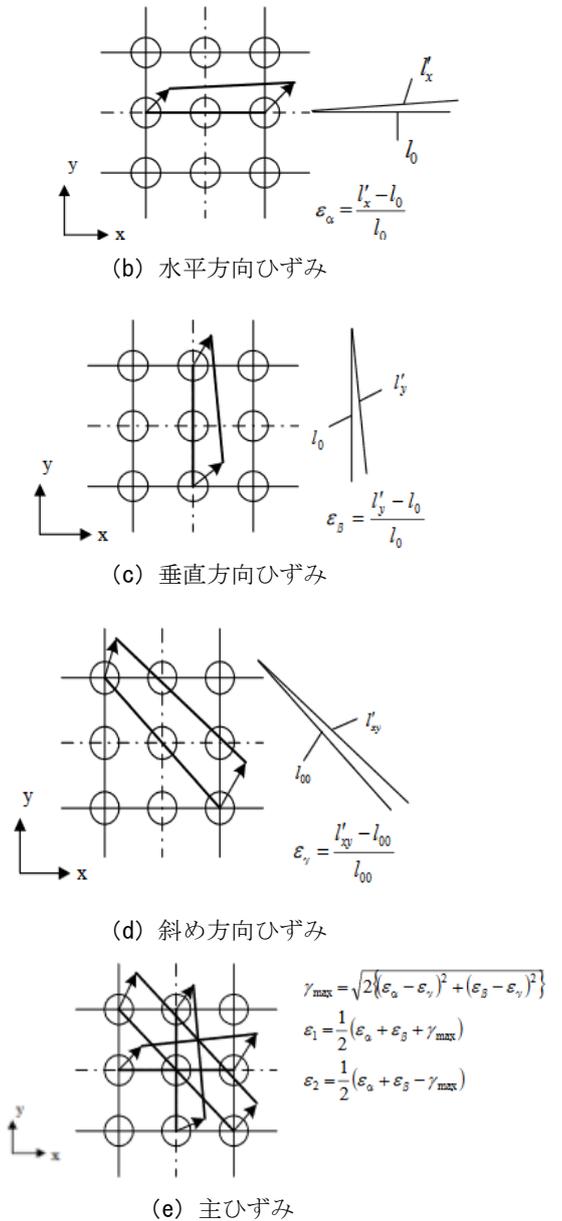


Fig. 3 ひずみ解析

2.2 計測システム

計測装置の写真をFig. 4に示す。本システムは、モノクロCCDカメラ、レンズ、ノートパソコン、接続ケーブルで構成される。簡易なシステムかつ軽量で持ち運びが容易である。カメラ自体にメモリ等が内蔵されていないため、撮影画像はノートパソコンに保存される。画像の撮影は、通常のデジタルカメラとほぼ同様のため、測定に際して特別な技法は必要としない。本研究では、2台のCCDカメラを用いたステレオ撮影による3次元計測を行い、ひずみを算出した。ステレオ撮影は、通常のカメラ1台の撮影と比較して、カメラと試験体を正確に正対させて撮影する必要がないことや試験中に試験体が面外方向に変形しても高精度に計測できることなどのメリットがある。一般に、レンズは曲面となっているため、撮影された画像はひずみを持っている。また、2台のカメ

ラでステレオ撮影する場合は、カメラ画像の位置合わせを行う必要がある。ここでは、計測前に2台のCCDカメラでFig. 5に示すキャリブレーションプレートを用いて、位置や角度を変えながら複数枚（20枚から30枚程度）撮影することで、画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う。

3. DICMの適用事例

現在DICMによる様々な対象物の計測が行われている。同研究室では過去にコンクリート、鋼、円筒シェル、膜構造の試験を行い、DICMでの計測を行っている。ここでいくつかの事例を示す。

3.1 PCT桁の載荷試験

試験体は2径間単純ポストテンションT桁橋の撤去部材（Fig. 6）を使用した。試験機は30MN大型構造部材万能試験機を用いて曲げ載荷試験を行った。Fig. 6に示す計測範囲に白色と黒色のランダムパターンを施しDICMでの計測を行った。

ひずみ分布をFig. 7に示し、実構造レベルにおいてもDICMでの計測は有効であり、ひずみの発生、進展過程を可視化できることを示せた。

3.2 薄肉円筒シェルの軸圧縮試験

試験は等方性、異方性の薄肉円筒シェルの終局挙動の把握のために座屈実験を行った。試験体寸法をFig. 8に示し、等方性材料としてアルミニウムを、異方性材料としてCFRP（Table 1）を用い、それぞれに白色と黒色のランダムパターンを施した。試験機は島津製の10kN万能試験機を用いた。

試験結果をFig. 9, Fig. 10に示し、それぞれの座屈形状の可視化できることを示せた。

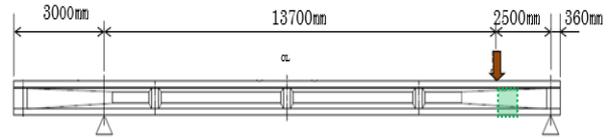


Fig. 6 T桁試験体寸法

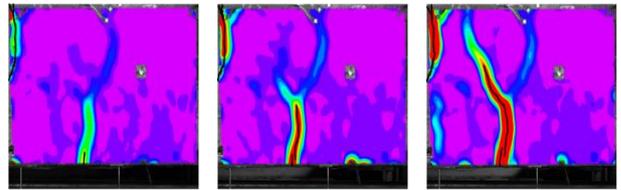


Fig. 7 RC ひずみ分布

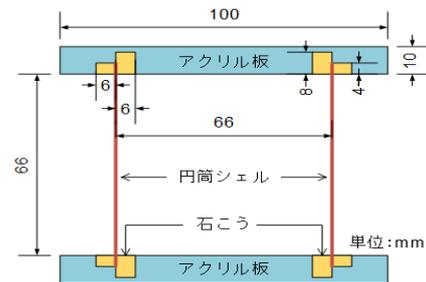


Fig. 8 試験体寸法

Table 1 CFRP 材料物性

材料物性	弾性係数(GPa)	ポアソン比	引張強度(MPa)
EL	140	ν_{12} 0.32	FL 2200
ET	9	ν_{21} 0.02	FT 50
Ez	9	ν_{23} 0.35	Fz 50
GLT	4.2	ν_{32} 0.35	FLT 110
GTZ	3.4	ν_{13} 0.32	FTZ 18.5
GzL	4.2	ν_{31} 0.02	FzL 110

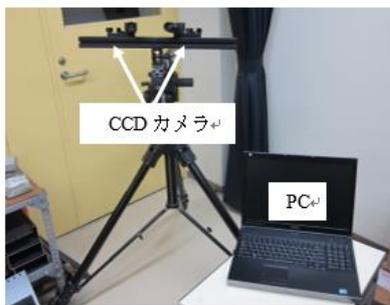


Fig. 4 計測装置

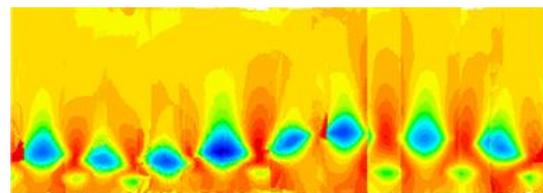


Fig. 9 等方性薄肉円筒シェルの座屈形状

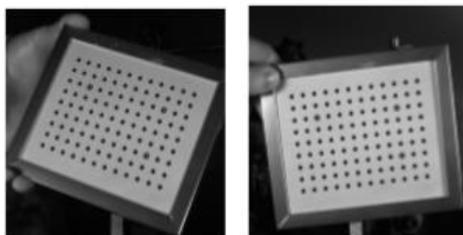
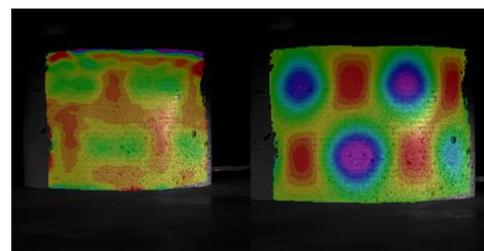


Fig. 5 キャリブレーション画像



(a) ひずみ (b) 変位

Fig. 10 異方性薄肉円筒シェル座屈形状

3.3 溶接中および冷却過程における鋼材の変形・ひずみ挙動の計測

溶接中および冷却過程における鋼板表面に生じる変形・ひずみの計測を目的に溶接中のSM400Aを計測した。試験片寸法、計測範囲をFig. 11に示す。試験片は、開先等を設けない一枚の試験片とし、ビードオン溶接とした。試験片には白色と黒色のランダムパターンをVHT社耐熱スプレーを用いて施してある。

試験結果をFig. 12に示す。Fig. 12より熱応力による鋼材のひずみ分布の可視化が可能であることが示せた。

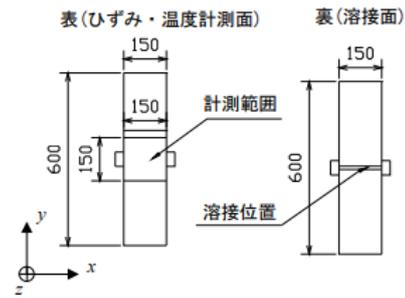


Fig. 11 試験片寸法

以上より、RCの大型の対象物だけでなく、円筒シェルの座屈形状の計測や溶接中の熱応力の影響など、ひずみゲージによる計測ができない対象物にもDICMによる計測の有効性が示せた。

4. 積層ゴム支承供試体の圧縮せん断試験

本章はDICMを用いて、積層ゴム支承供試体の圧縮せん断状況下のひずみ分布を得る試験方法を示す。

4.1 積層ゴム供試体概要

積層ゴム支承供試体の内部構造のイメージをFig. 13に示し、供試体緒言をTable 2に示す。それぞれ3層、6層の層数の違う供試体を使い、被覆ゴムに対してラッカーズプレーでランダムパターンを施している (Fig. 14)。

ここで1次形状係数 S_1 とは、従来防振ゴムの分野で単に形状係数として呼び用いられており、式(1)のように拘束面積と自由表面積の比で表される。

$$S_1 = \frac{\text{ゴムの拘束面積(受圧面積)}}{\text{ゴム1層の自由表面積(側面積)}} = \frac{\pi(D^2 - d_s^2)/4}{\pi(D + d_s)t_R} \quad (1)$$

ここに、 D はゴム直径、 t_R はゴム1層厚である。拘束面積とは中間鋼板とゴムが接着されているため、積層ゴムに鉛直荷重が作用した場合、この境界面ではゴムは動くことができない。一方、自由表面積は拘束されていないため、圧縮によるゴム変形が表面に凸状に膨らみ出すことができる。1次形状係数 S_1 は主に積層ゴムの鉛直剛性や曲げ剛性に大きく影響を及ぼし、値が大きいくほど変形拘束効果が大きい。2次形状係数 S_2 とは、積層ゴム用に新たに導入された係数であり、式(2)のようにゴムの直径とゴムの層厚さ(内部鋼板を除いたトータル厚さ)の比で表される。

$$S_2 = \frac{\text{ゴム直径}}{\text{全ゴム層厚}} = \frac{D}{nt_R} \quad (2)$$

ここに、 n はゴム層数である。

2次形状係数 S_2 は主に座屈荷重や水平剛性に関係し、値が大きくなると水平剛性の鉛直荷重依存性が小さく、大変形時にも相対的に安定した復元性能が得られる。

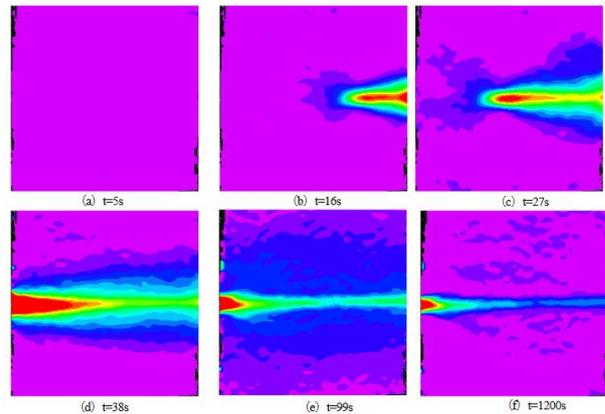


Fig. 12 熱応力によるひずみ分布

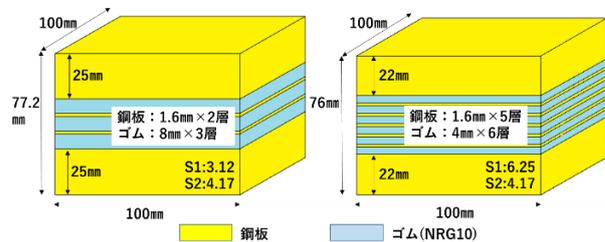


Fig. 13 供試体イメージ

Table 2 供試体緒言

供試体概要	3層	6層
形状	102mm × 102mm × 77.2mm (被覆ゴム1mm)	102mm × 102mm × 76mm (被覆ゴム1mm)
積層構造	8mm × 3層	4mm × 6層
ゴム材料	NRG=1.0N/mm ²	NRG=1.0N/mm ²
1次形状係数	3.12	6.25
2次形状係数	4.17	4.17

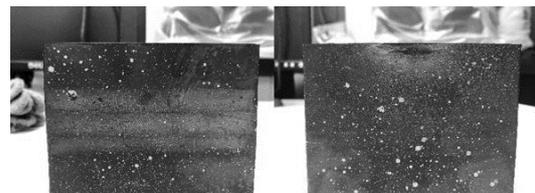


Fig. 14 供試体

4.2 試験機概要

本試験は、宝山工業製「圧縮せん断試験機」を使用した。試験機の写真をFig. 15, 仕様をFig. 16, に示す。構造は、下から鋼板→供試体→鋼板→鉛直ジャッキ→鋼板→ロードセル→球面座の順に積み重なっている。供試体と、供試体を挟む鋼板には同じ径の孔があり、その孔にせん断キーを入れて挟むことで鋼板と供試体を一体化している。

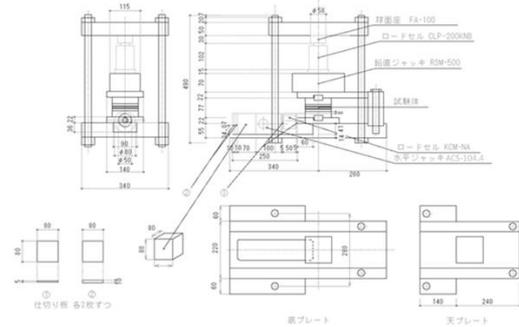


Fig. 16 試験機詳細

4.3 载荷条件

Table 3に面圧条件を、Table 4に加振する最大せん断変位条件をそれぞれ示し、この条件下で試験を行った。本試験に使用する試験機器をTable 5に示す。圧縮せん断変形をジャッキ、手動ポンプで与え、その様子をCCDカメラで撮影する。画像撮影は圧縮荷重10kN増加ごとに撮影し、せん断強制変位載荷後はせん断ひずみ率10% (2.4mm) 増加ごとに撮影する。荷重、変位の計測は鉛直方向、せん断方向それぞれにロードセル、変位計により計測し、試験状況として荷重変位曲線を得る。ここで、鉛直変位は、供試体上部の鋼板にある鉛直ジャッキの左右両側にそれぞれ変位計を設置させその沈下した変位を圧縮変位とし、それぞれの圧縮変位の平均値を採用して圧縮荷重変位曲線を描く。

Table 3 面圧条件

面圧(N/mm ²)	鉛直荷重(kN)	荷重条件
3	30	—
6	60	死荷重応力
8	80	—
12	120	最大圧縮応力

Table 4 せん断変位条件

せん断ひずみ率	せん断変位量
175%	42mm

ここで、大変形特性を有する積層ゴムのひずみの評価法として積層ゴムの全ゴム厚さに対するあせん断変位量をせん断ひずみ率 (%) として表するのが一般的である。ここで、本試験で用いる積層ゴム供試体の全ゴム厚は24mmであるため、与えるせん断強制変位は24mmの175%である42mmである。

Table 5 試験機器

計測機器	型番	会社
鉛直ジャッキ	RSM-500	オックスジャッキ株式会社
水平ジャッキ	ACS-104.4	オックスジャッキ株式会社
主働油圧ポンプ	HP-1	オックスジャッキ株式会社
ロードセル (鉛直方向)	CLP-200KNB	東京測器研究所
ロードセル (水平方向)	KCM-50KNA	東京測器研究所
変位計 (鉛直方向)	CDP-25	東京測器研究所
変位計 (水平方向)	CDP-50	東京測器研究所

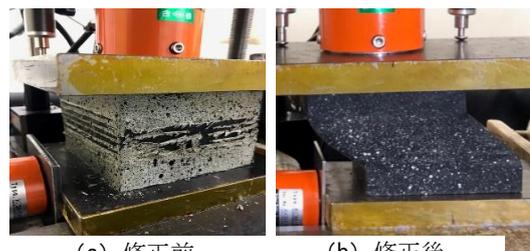
載荷手順は、「圧縮荷重載荷→圧縮完了→せん断変位載荷→せん断変位完了」を各面圧条件で繰り返す。

4.4 留意項目

本試験機、本試験方法での試験を行うにあたり修正すべき点がいくつか見受けられた。以下に問題点、修正方法について示す。

(1) ランダムパターンの施し方

3章のDICMの使用事例で述べたRC梁、円筒シェル等にランダムパターンを施す際には輝度差を明瞭にするために下地とするスプレーと点を施すためのスプレーの2色のスプレーを使用していた。しかし、積層ゴム支承供試体では変形が大きいため、下地であるスプレーの塗膜が表層剥離 (Fig. 17(a)) し、DICMによる計測ができなかった。そこで、本試験を行う際には被覆ゴムに直接ラッカースプレーで白色点 (Fig. 17(b)) を施すことでひずみ分布 (Fig. 18) を得た。



(a) 修正前 (b) 修正後
Fig. 17 ランダムパターン施し方



Fig. 15 圧縮せん断試験機

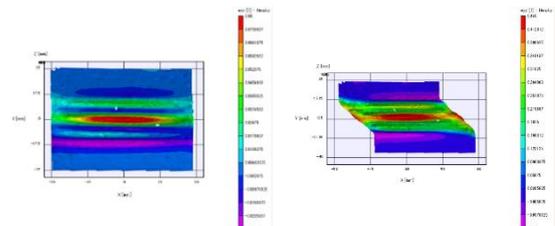


Fig. 18 ひずみ分布コンター図

(2) 圧縮荷重の維持

本試験機は天板と供試体上部鋼板の間に位置する油圧ジャッキで圧縮荷重の反力をとっている。しかし、せん断変形を施す際にせん断変位の増加に伴い供試体上部鋼板が下降する。そのため、天板と供試体上部鋼板の間の圧力が低下することで圧縮荷重が低下してしまう

(Fig. 19(a))。

それに対して、せん断変位増加に伴う圧縮荷重の低下をモニタリングしながら手動ポンプを用いて荷重を調整し、圧縮荷重の面圧条件である荷重を維持する必要がある (Fig. 19(b))。

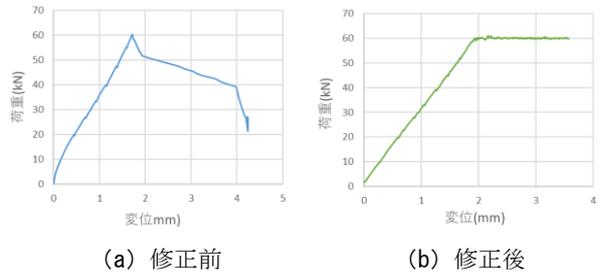


Fig. 19 圧縮荷重の維持

(3) 摩擦力の低減

3N/mm², 6N/mm², 8N/mm², 12N/mm²の各面圧条件のせん断荷重変位曲線をFig. 20に示す。せん断変形を与える際に、供試体下部鋼板と試験治具との間で摩擦力が生じる

(Fig. 20(a))。これに対して、摩擦面にテフロンスプレーを吹き付けて摩擦力を低減させた (Fig. 20(b))。

修正前では圧縮荷重の大きさに応じた静止摩擦力が生じていること、せん断変位が増加する際に引っ掛かりが起き、変位の飛び移りが生じていることが分かる。修正後では、圧縮荷重の大きさに関わらず同程度の静止摩擦力が生じていることから影響を最小限に抑えられていることが分かる。

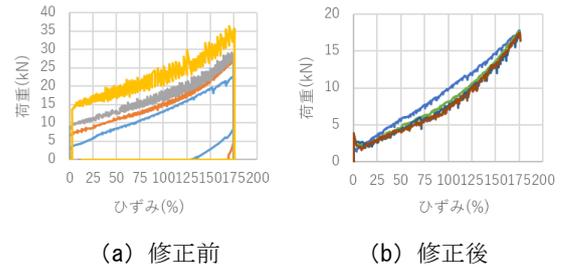


Fig. 20 摩擦力の低減

(4) 残留変形の低減

圧縮荷重変位曲線をFig. 21示す。連続して各面圧条件の試験を行うことで剛性が低下していることが分かる

(Fig. 21(a))。これは連続で試験を行うことで変形が残っていたことが考えられ、これに対して、面圧条件を変更する際に時間を空け、残留変形の回復をさせた。その結果、Fig. 21(b)のように剛性の低下を解消できている。よって、残留変形を取り除くために各面圧条件の間で時間を空け、残留変形を回復させる必要がある。

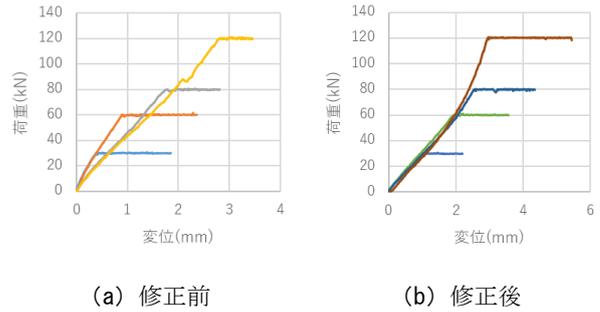


Fig. 21 残留変形の低減

(5) 偏心の影響

DICMでひずみ分布を可視化すると圧縮荷重の偏心による影響が見受けられた。これに対して、偏心を施した圧縮せん断試験を行い、偏心による積層ゴム支承供試体のひずみ分布への影響を検証した。

3層の供試体、面圧条件 3N/mm²のみに固定し、圧縮荷重の載荷位置を供試体上面の中心から5mm刻みで偏心させ、ひずみ分布への影響を比較した。

得たひずみ分布をFig. 22に、最大ひずみ最小ひずみの値をTable 6に示す。ここで偏心量は、供試体上面の中心を0mmとし、左を負、右を正で表している。Fig. 22より、せん断ひずみ0%、70%では圧縮荷重の偏心によるひずみ分布への影響が見受けられた。しかし、175%では偏心によるひずみ分布への影響は小さい。また、Table 6(a), (b)より、せん断ひずみが大きくなるに伴って、ひずみの値の最大値と最小値の差が小さくなっている。

以上より、せん断ひずみが大きくなるに伴って圧縮荷重の偏心によるひずみ分布への影響は小さくなる事が分かる。

よって本試験は圧縮荷重の載荷位置は中央に載荷させることは必要であるが、微小な偏心に対しては許容することとする。

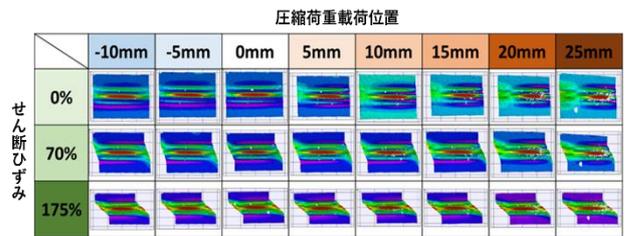


Fig. 22 ひずみ分布

Table 6 ひずみ数値比較

(a) 最大縦ひずみ比較

eyy MAX		載荷位置(mm)							
		-10	-5	0	5	10	15	20	25
せん断ひずみ(%)	0	0.157	0.0775	0.0825	0.098	0.0625	0.11	0.136	0.108
	70	0.08	0.157	0.195	0.165	0.162	0.177	0.19	0.228
	175	0.455	0.455	0.47	0.46	0.455	0.455	0.426	0.465

(b) 最小縦ひずみ比較

eyy min		載荷位置(mm)							
		-10	-5	0	5	10	15	20	25
せん断ひずみ(%)	0	-0.07	-0.028	-0.032	-0.043	-0.0395	-0.06	-0.074	-0.067
	70	-0.0305	-0.05	-0.048	-0.05	-0.05	-0.05	-0.072	-0.052
	175	-0.05	-0.075	-0.075	-0.07	-0.07	-0.07	-0.056	-0.055

5. FEM解析

5.1 解析概要

積層ゴム支承供試体の圧縮せん断試験より得られたひずみ分布の妥当性の検証, 積層ゴム支承の破壊領域のモデリングを目的として, Marc/mentat を用いた FEM 解析を行った. 解析モデルの寸法は Table 2 に, モデル概要を Fig. 23 に示す (紙面の都合により 3 層の供試体モデルのみ示す). ゴム要素には大ひずみ挙動に対応する 9 節点立体要素 (ハーマン/ムーニヤ材料) を適用し, 鉄板要素には 8 節点アイソパラメトリック立体要素を適用した. ゴムの材料定数は, 本試験で用いる天然ゴム (NR) は $G=1.0\text{N/mm}^2$ の NRG10 の材料定数 (Table 7) を用いる. 内部, 上下部鋼板の材料定数は $E=210000$, $\nu=0.3$ を用いた. 载荷条件として変位制御, 荷重制御での解析を行った.

5.2 変位制御

モデル上面に対して変位制御で Table 3 に示す面圧条件に相当する強制変位を施す. モデル下面に対しても変位制御でせん断ひずみ率 175% に相当する 42 mm の強制変位を施した. 結果を Fig. 24, Fig. 25 に示す. Fig. 25(a) よりせん断変形が始まるとモデル上面の圧縮変位が固定されている. これにより, せん断変位の増加に伴う圧縮変位の増加が追従できず圧縮荷重が低下してしていることが分かる.

5.3 荷重制御

変位制御での解析の改善案として圧縮荷重を面圧条件を与えることができるフェース荷重を適用し, モデル上面に施した. せん断ひずみは, 変位制御での解析と同様に 42 mm の強制変位をモデル下面に施した. 解析結果を Fig. 26, Fig. 27 に示す. Fig. 27(a) よりせん断変位に伴う圧縮変位の増加の追従ができ, 圧縮荷重曲線において精度よく再現できている. しかし, Fig. 26 よりせん断変形が進むとモデル上面が回転して, 傾きが生じている. また, Fig. 27(b) に示す通り, せん断ひずみ率が増加するにつれてせん断荷重が低下している. これは, モデル上面の回転により, せん断変形が進む方向に対してモデルが押し出されるためせん断荷重の低下が生じていることが考えられる.

5.4 解析結論

圧縮荷重の载荷条件の比較から, 変位制御では上面が水平に落ちるがせん断変位増加に伴う圧縮変位の増加は再現できない. 一方, フェース荷重での载荷は, 圧縮荷重曲線の再現は可能であるが, モデル上面の水平の維持ができないなどの長所および短所があった. よって, フェース荷重での圧縮変位をテーブルとして変位制御の圧縮強制変位に適用することを検討している. また, 接触による圧縮荷重の载荷や RBE2 の多点拘束の適用も検討している.

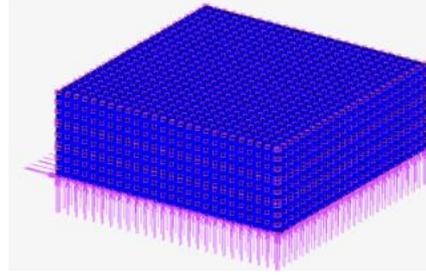


Fig. 23 解析モデル

Table 7 NRG10 材料定数

C10	0.263009
C01	0.0363394
C20	0.000541403
C11	-0.00103934
C30	0.000117418

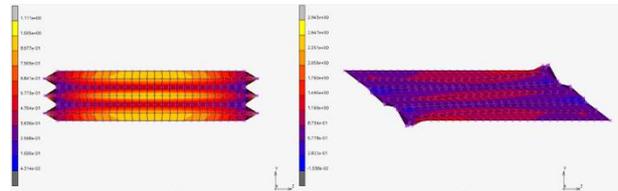
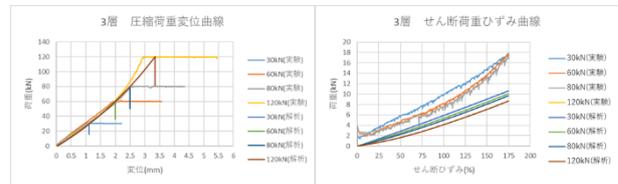


Fig. 24 変位制御ひずみコンター図



(a) 圧縮荷重変位曲線 (b) せん断荷重ひずみ率曲線

Fig. 25 変位制御解析結果

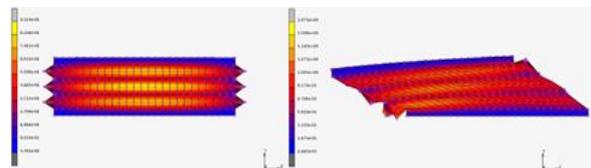
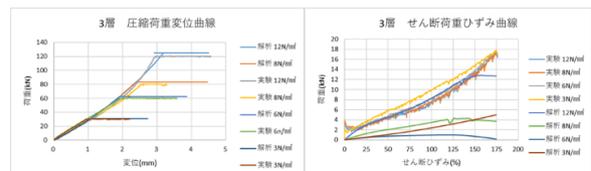


Fig. 26 フェース荷重制御解析結果



(a) 圧縮荷重変位曲線 (b) せん断荷重ひずみ率曲線

Fig. 27 フェース荷重制御解析結果

6. 結論

4章で述べた試験機，試験方法，計測方法で積層ゴム支承の圧縮せん断状況下での挙動を追従することは可能である。よって，大変形特性を有するゴム材料に対してもDICMでの計測は有効であることが示せた。ただし，大変形特性のために留意すべき項目がある。今後本試験方法により得た結果と，FEM解析結果とを比較，検証しひずみ分布，ひずみの値の再現を行う。そして，積層ゴム支承の破壊領域の三次元的特性の評価を行う。

参考文献

- 1) 飯塚博，山下義裕：ゴム材料の力学特性同定とFEM解析への利用，日本ゴム協会誌，第77巻，第9号，2004
- 2) 柚木和徳，吉田純次，塩畑英俊，今井隆，杉山俊幸：有限要素モデルを用いた積層ゴム支承の回転限界の把握と設計式の構築
- 3) 橋本学，棚橋隆彦：GSMAC 有限要素法による非圧縮超弾性体解析に関する実用化に向けた検討
- 4) 出水享，松田浩：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.
- 5) 内野正和，岡本卓慈，肥田研一，伊藤幸広，松田浩：デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法の検討，日本実験力学会講演論文集
- 6) 板井達志，出水享，伊藤幸広，松田浩，木村嘉富：光学的全視野計測を用いたPCT桁の載荷試験時における非接触変位・ひずみ分布計測，土木学会西部支部研究発表会 (2012.3)
- 7) 古賀掲維，東哲平，鬼塚友章，山口浩平，松田浩：複合材料からなる円筒シェルの終局挙動に関する実験及び解析的研究，長崎大学大学院工学研究科研究報告，48(91), pp.31-38; 2018
- 8) 出水享，松田浩，藤野義裕，伊藤幸広，趙程：溶接中および冷却過程における鋼材の変形・ひずみ挙動の光学的全視野計測と三次元熱弾塑性FE解析，構造工学論文集 Vol.58A(2012年3月)
- 9) http://www.tnst.org.tw/ezcatfiles/cust/img/img/20111121_jp15.pdf