

# 橋梁用免振積層ゴム支承の大変形特性の 定量的評価法に関する研究

東 哲平\*・古賀 掲維\*\*・出水 享\*・

今井 隆\*\*\*・原 暢彦\*\*\*・宮本 拓海\*\*\*\*・松田 浩\*

## Study on quantitative evaluation method of large deformation characteristics of vibration-isolated laminated rubber bearing for bridge

by

Teppey AZUMA\*, Aoi KOGA\*\*, Akira DEMIZU\*, Takashi IMAI\*\*\*,

Nobuhiko HARA\*\*\*, Takumi MIYAMOTO\*\*\*\*, Hiroshi MATSUDA\*

*Key words : DICM, FEM analysis, Laminated rubber bearing*

Laminated rubber bearings are widely used as vibration isolation bearings for bridges. The purpose of this study is to quantitatively evaluate the large deformation characteristics of laminated rubber bearings experimentally and analytically. In the experiment, strain measurement and strain distribution were visualized using digital image correlation method, and simulation analysis by FEM was performed.

本研究では、橋梁用免振支承のひとつとして広く用いられている積層ゴム支承を対象として、実験的及び解析的に積層ゴム支承の大変形特性を定量的に評価することを目的としている。

### 1. 序論

橋梁用支承は従来、剛性の高い鋼製支承が主流であったが平成7年の兵庫南部地震により支承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。一方、ゴム支承を採用した橋梁は地震による被害が小さかったことから、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採用され、現在では橋梁用支承することを目的としている。計測方法としては、大変形

の主流となり地震時の安全性能において成果を出してきた。

しかし、東日本大震災や熊本地震という巨大地震によってゴム支承のゴム層部の破断や取付けボルトの破断などの損傷を受けた橋梁が確認された。こうした背景からゴム支承の定量的評価が必要とされている。

本研究では、橋梁用免振支承のひとつとして広く用いられている積層ゴム支承を対象として、実験的及び解析的に積層ゴム支承の大変形特性を定量的に評価す画像相関法（以下：DICM）を用いて表面ひずみの計測及びひずみ分布の可視化を行う。

令和2年06月24日受理

\* 長崎大学大学院工学研究科 (Department of Nagasaki University Graduate School of Engineering)

\*\* 長崎大学 ICT 基盤センター (Department of Nagasaki University ICT Infrastructure Center)

\*\*\* ゴム支承協会 (Department of Rubber Bearing Association)

\*\*\*\* 長崎大学工学部 (Department of Nagasaki University Faculty of Engineering)

## 2. 積層ゴム支承<sup>1)</sup>

### 2.1 積層ゴムの原理

積層ゴムの構造は、薄いゴムと鋼板が交互に積層されているものである。一般に、ゴムブロック単体のものは鉛直方向に圧縮した場合、ゴムは周方向へ膨出する。しかし、ゴムと鋼板を加硫密着させることにより、圧縮荷重によるゴムの膨出変形が鋼板の引張力によって抑制されるため、ゴム自体の膨らみが非常に小さくなり、高い鉛直剛性が得られる。それに対して、水平変形には、鋼板はゴムの変形を抑制しないため、ゴム本来の高い変形能力により柔な剛性が得られる。

### 2.2 限界状態

- 1) 限界状態 1: 橋としての荷重を支持する能力が損なわれていない限界の状態
- 2) 限界状態 2: 部分的に荷重を支持する能力の低下が生じているが、橋としての荷重を支持する能力に及ぼす影響は限定的であり、荷重を支持する能力があらかじめ想定する範囲にある限界の状態
- 3) 限界状態 3: 構造安全性が失われる限界の状態

### 2.3 積層ゴム支承の限界状態評価

積層ゴム支承の限界状態の評価項目として、内部鋼板に生じる引張応力度、積層ゴムに生じる圧縮応力度、積層ゴムに生じる水平せん断ひずみなどがある。ここで、水平せん断ひずみは式 (1) に示す。

$$\text{水平せん断ひずみ} = \frac{\text{せん断変位量}}{\text{ゴム層の総厚さ}} \quad (1)$$

限界状態 1 である温度変化や風荷重による変形などの常時許容せん断ひずみが 70%、限界状態 2, 3 である地震時の許容せん断ひずみが 175% である。ここで、本論では免振支承として使用される積層ゴム支承を対象としているため、限界状態 2, 3 の制限値は同値である。

### 2.4 性能検証

2.3 節で述べた限界状態をそれぞれ考慮した設計を行うが積層ゴム支承に生じる内部応力状態は複雑である。そのため免振支承として設置される前に、実験的に性能検証を行う必要がある。性能検証する項目及び試験方法について以下に示す。鉛直載荷試験において圧縮変位量を照査し、水平せん断試験において等価剛性、等価減衰定数を照査する。ここで、等価剛性および等価減衰定数は以下の式で表せる。各項に対して設計値との許容値が設定されている。

$$K_B(\text{等価剛性}) = \frac{F(+)-F(-)}{\delta(+)-\delta(-)} \quad (2)$$

$$h_B(\text{等価減衰定数}) = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (3)$$

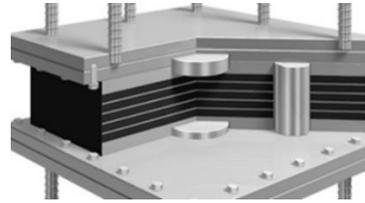


Fig. 1 積層ゴム支承



Fig. 2 等価剛性

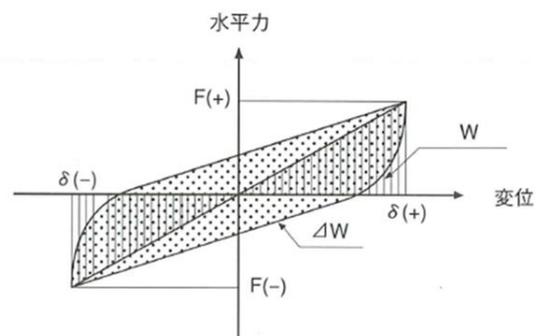


Fig. 3 等価減衰定数

## 3. DICM の概要<sup>2)</sup>

本研究で用いる全視野変位計測法であるデジタル画像相関法の概要を説明する。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 CCD カメラなどで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。従来のひずみゲージによるひずみ計測方法ではゲージの貼り付け作業や複雑な配線作業が必要となってくる。それに対して、DICM は CCD カメラで得た画像を解析するため作業の比較的容易な作業で計測を行える。さらに、ひずみゲージを貼り付けることができない環境や変形に対しての計測にも適用可能であることが DICM の特長である。よって、本研究において、ひずみゲージ法では計測不可能である大変形特性を有する積層ゴ

ム支承の表面ひずみを DICM により計測し、ひずみ分布の可視化を行う。計測に用いる機器を Photo1 に示す。

4. 積層ゴム供試体の圧縮せん断試験法

これまでゴムの表面伸び、つまり被覆ゴム部が実際にどの程度伸長されているのかは確認されておらず、直接計測する方法がなかった。今回の試験においては、各試験条件下でせん断変形させたゴム支承の表面伸びを、DICM を用いた 3 次元画像解析により導出する試験方法の開発を目的としている。

4.1 供試体概要

圧縮せん断試験に用いる 3 層と 6 層の積層ゴム供試体のイメージ図を Fig. 4、形状係数を Table1 に示す。イメージ図は供試体側面に施してある被覆ゴム（厚さ 1 mm）を取り除いた寸法である。用いるゴム材料は NRG10、鋼板は SM490 である。被覆ゴムによる表面ひずみへの影響を検証する目的で被覆ゴムを取り除いた供試体も作成する。なお、それぞれのゴム層の総厚さは 24mm である。さらに 3 層積層ゴム供試体の一層のゴム層の厚さである 8 mm のゴム単層供試体も作成し、圧縮せん断変形下のゴム層の挙動についても単純比較し検証する。供試体には DICM の計測のためランダムパターンを被覆ゴムもしくは、予め被覆ゴムの無い供試体には水性顔料マジック等で黒色に施した面に直接白のラッカーズプレーで施してある。

4.2 試験機

本試験は島津製「UH-300kNXR」と設計した圧縮せん断試験機を組み合わせで行う。試験機詳細を Fig. 5 に示す。圧縮荷重は圧縮試験機、せん断荷重は油圧ジャッキ (ACS-104.4) を手動ポンプ (HP-1) で制御して与える。

4.3 载荷条件

供試体に与える面圧を Table2、せん断条件を Table3 に示す。圧縮荷重の载荷速度は 20kN/min に設定し、圧縮荷重が面圧条件に達すると一定時間荷重を維持するように設定する。せん断条件の水平せん断ひずみ 175% は、免振支承として使用される場合の水平せん断ひずみの制限値である。

試験の手順は「圧縮開始→圧縮完了→せん断開始→せん断完了→せん断、圧縮荷重除荷→面圧条件（圧縮荷重条件）変更」の順序で行い、面圧条件を変更する場合は残留変形を取り除くために時間を空ける必要がある。本試験では午前、午後にそれぞれ 2 つの面圧条件

下で試験を行う。



Photo1 DICM 計測機器

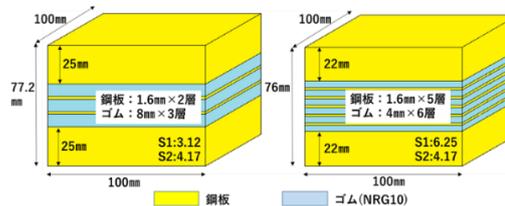


Fig. 4 供試体イメージ図

Table1 形状係数

	3 層供試体	6 層供試体
1 次形状係数 S1	3.12	6.25
2 次形状係数 S2	4.17	4.17

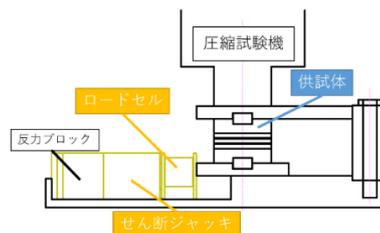


Fig. 5 試験機概要

Table2 面圧条件

面圧	荷重	面圧条件
3N/mm <sup>2</sup>	30kN	
6N/mm <sup>2</sup>	60kN	死荷重条件
8N/mm <sup>2</sup>	80kN	
12N/mm <sup>2</sup>	120kN	最大圧縮条件

Table3 せん断条件

せん断ひずみ率	175%
せん断変位量	42mm



Photo2 試験風景

#### 4.4 計測方法

圧縮荷重は試験機，せん断荷重はロードセル，変位は変位計により得る．圧縮変位計は，積層ゴム供試体の圧縮荷重の偏心による上部鋼板の回転の有無を確認するため，供試体を挟むように上部に2つ設置し，2つの変位計の平均値を圧縮変位とする．また，供試体の圧縮せん断変形状態を CCD カメラで撮影し，画像解析ソフトである VIC-3D を用いて縦ひずみ分布を導出する．撮影は圧縮荷重 10kN 増加ごと，せん断ひずみ 10% 増加ごとに行う．

#### 4.5 試験結果

試験結果として，縦ひずみコンター図，圧縮荷重－変位曲線，せん断荷重－せん断ひずみ曲線を導出する．縦ひずみを選択したのはゴム層の膨出の確認が容易であるためである．紙面の都合により，3 層の被覆ゴム有積層ゴム供試体の結果のみを示す．Fig. 6 に面圧条件 12N/mm<sup>2</sup>のせん断ひずみ 0%，175%の縦ひずみのコンター図を示す．試験状況として，圧縮荷重－変位曲線，せん断荷重－せん断ひずみ曲線を Fig. 7 に示す．また，積層ゴム供試体の上面の回転状況について2つの圧縮変位計の値を縦軸，横軸としたグラフ (Fig. 8) で確認する．これにより圧縮荷重の偏心及び供試体上面の回転は最低限に抑えられていることがわかる．

#### 4.6 結論

DICM の大変形特性への適用に際して，微小変形材料や線形材料の計測方法及び試験方法を踏襲した場合に修正が必要となる課題が生じた．例としてランダムパターンの表層剥離 (Photo3) や繰り返し载荷による鉛

直剛性の低下 (Fig. 9) が挙げられる．本研究では試験及び修正を繰り返し，本論で示した試験方法で積層ゴムの表面ひずみの可視化が可能であることが確認できた．

### 5. 表面ひずみの評価

#### 5.1. ゴム層の挙動の評価

3 層被覆ゴム有積層ゴム供試体とゴム単層 (8mm) 被覆ゴム有供試体の表面ひずみの比較を行う．ゴム層に生じる縦ひずみの最大値縦ひずみと水平せん断ひずみの関係を各面圧条件で比較する．これにより，圧縮荷重が大きくなると最大縦ひずみも大きくなること，積層することによりゴム層に生じる縦ひずみが大きくなるのがわかる．したがって，ゴム層は複雑な変形状態にあり，複雑な応力状態にあることが分かる．そのため積層ゴム支承の性能評価は実験的に確認する必要があることを示せた．

#### 5.2. 積層数による比較

Fig. 11 より，積層数が多くなると内部鋼板によるゴム層の膨出を拘束するため鉛直剛性が大きくなることを示した．また，せん断変形には内部鋼板の拘束の影響層の膨出を拘束するため鉛直剛性が大きくなることを示した．また，せん断変形には内部鋼板の拘束の影響を受けず，層数による影響はないものと考えられる．

#### 5.3. 被覆ゴム有無による比較

Fig. 12 に示すように被覆ゴムが無い供試体は表面ひずみが平均的に広く分布しているのに対して，被覆ゴムがある供試体は中央ゴム層，及び両端部に最大縦ひずみが集中している．よって，被覆ゴムによっても，ゴム層の膨出を拘束されていることがわかる．

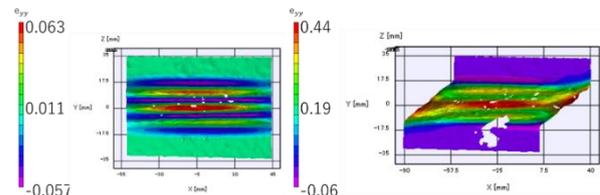


Fig. 6 縦ひずみコンター図

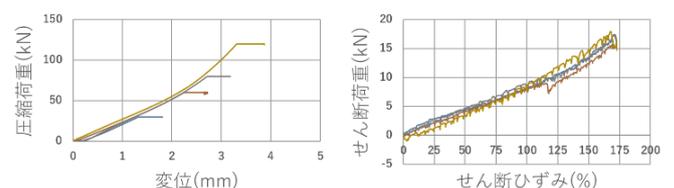


Fig. 7 試験状況

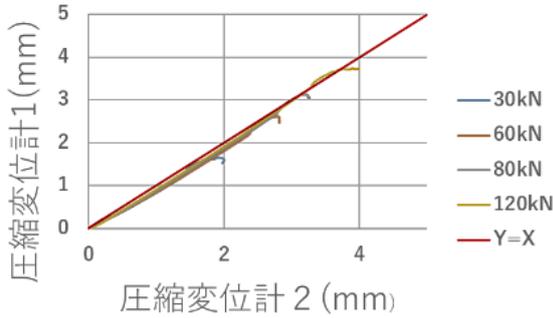


Fig. 10 最大縦ひずみ比較

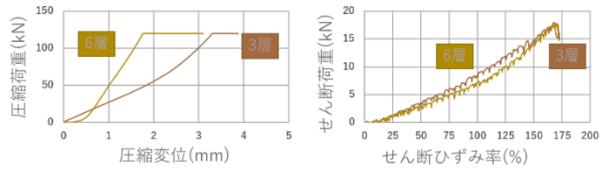


Fig. 11 3層, 6層比較

Fig. 8 供試体上面の回転状況

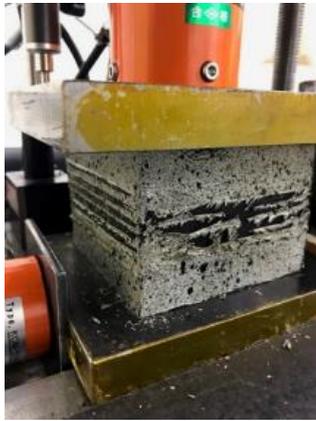


Photo3 表層剥離

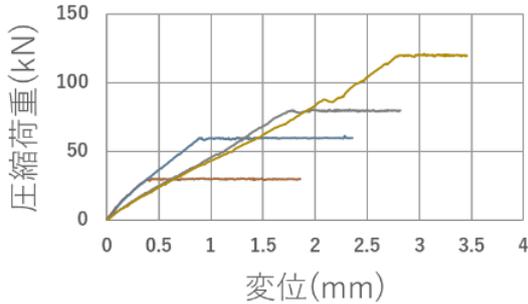


Fig. 9 鉛直剛性の低下

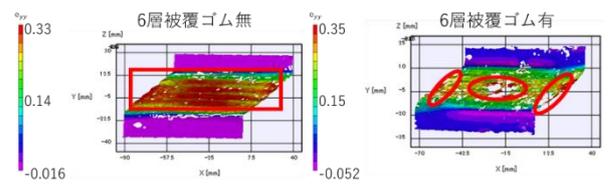
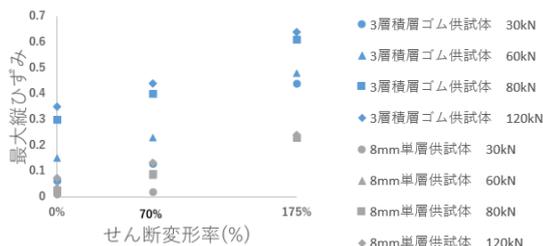


Fig. 12 被覆ゴムの有無による比較

## 6. ゴムダンベル 1号を用いた一軸引張試験

DICMを用いてゴムダンベル1号の一軸引張試験を行った。ゴムダンベル1号の概要をFig.13に示し、島津製「オートグラフ AGS-10kND TYPE2」を用いて60mmの強制変位を与え、縦ひずみ分布を導出する。CCDカメラの撮影は強制変位2mm増加ごとに行う。試験結果である縦ひずみコンター図をFig.14に示す。また、縦ひずみコンター図の中央点より上下15mmで平均縦ひずみを取り、平均縦ひずみと強制変位の関係を導出する。この関係をFig.15に示す。

一軸引張試験の結果から得た平均縦ひずみと強制変位の関係から、積層ゴム支承に生じる表面ひずみがゴムダンベル1号にどれだけの強制変位を与えた場合に発生する表面ひずみに相当するかが分かる。それにより、積層ゴム支承の表面ひずみの定量評価が可能であると示せた。

## 7. 非線形 FEM 解析

解析ソフトである Marc/mentat を用いて各試験のシミュレーション解析を行った。

### 7.1 圧縮せん断試験のシミュレーション解析

積層ゴム供試体に用いられるゴム材料の策定を行った結果、大変形モデルに対して用いられる Ogden 材料モデルを採用し、Table4 に示す材料定数を与える。内部鋼板の材料定数は静弾性係数 21,000 (N/mm<sup>2</sup>), ポ

アソン比 0.33 を与える。それぞれの層の境界面は節点共有させている。荷重方法の策定を行った結果、せん断変形を与えた後に圧縮荷重を与えて、圧縮せん断変形を与える方法が最も試験で与えた変形状態となった。よって変位制御で、せん断変位 42 mm をモデル下面に与え、その後面圧条件に相当する鉛直変位を与える。面圧条件 12N/mm<sup>2</sup>、せん断ひずみ 175% の 6 層被覆ゴム有積層ゴムモデルのひずみコンター図を示す。また各面圧条件の荷重状況については試験結果と比較する。鉛直剛性は試験結果にふくらみが生じているが、傾きについてはよく一致している。せん断剛性についてもよく一致している。しかし、縦ひずみコンター図においては、要素分割数が小さいため膨出が再現できず、引張ひずみが出ていない。よって今後要素形状、分割数の最適化を行う必要がある。

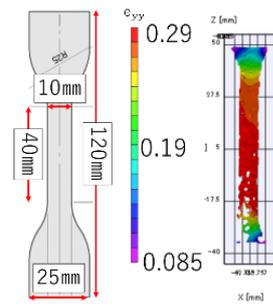


Fig. 13 試験片寸法 Fig. 14 試験結果

### 7.2 一軸引張試験のシミュレーション解析

一軸引張試験においてもゴムダンベル 1 号モデルを作成し、試験より導出した平均縦ひずみと強制変位関係の妥当性の評価を行う。解析と試験結果の比較を図 18 に示す。これにより、試験結果と解析結果はよく一致していることが示された。よって解析上でゴムダンベル 1 号の破断領域である強制変位 600% までの平均縦ひずみと強制変位関係から積層ゴム支承に生じる表面ひずみの限界値の推定が可能であると考えられる。

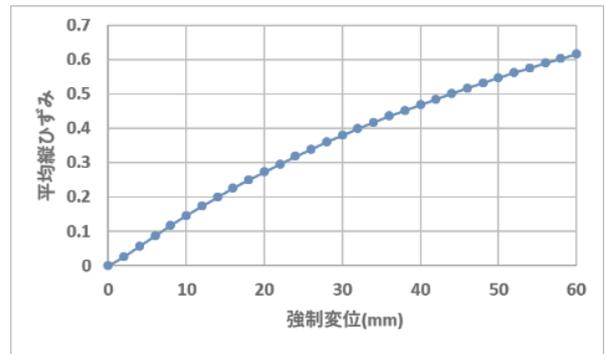


Fig. 15 平均縦ひずみと強制変位の関係

### 8. 結論

本研究では、積層ゴム支承の表面ひずみの定量的評価方法を目的に DICM を用いた積層ゴム供試体の圧縮せん断試験方法の開発を行い、表面ひずみの導出方法を示した。それにより得たひずみ分布からゴム層の圧縮せん断変形時のゴム層の挙動、積層数、被覆ゴムによる表面ひずみへの影響を検証した。また、ゴムダンベル 1 号を用いた一軸引張試験から得られた平均ひずみと強制変位関係より積層ゴム支承の表面ひずみの定量的な評価方法を示している。

Table 4 Ogden 材料定数

$i$	$\mu_i$	$\alpha_i$
1	2.0	0.90
2	9.0E-4	8.0
3	-5.0E-3	-3.5



Fig. 16 縦ひずみコンター図

### 参考文献

- 1) 公益団体法人日本道路橋協会, 道路橋支承便覧 H30 年改訂版
- 2) 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.

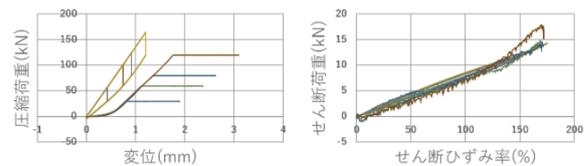


Fig. 17 荷重状況

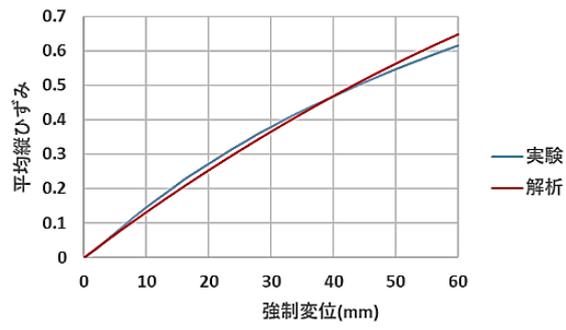


Fig. 18 平均縦ひずみと強制変位の関係解析比較