# 異なる軸応力下における 積層ゴム支承のせん断変形性能

### 庄司学1・齊藤啓2・亀田敏弘3・笛木孝哲4

<sup>1</sup>筑波大学機能工学系講師(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp <sup>2</sup>筑波大学大学院理工学研究科(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:ksaito@kz.tsukuba.ac.jp <sup>3</sup>筑波大学機能工学系講師(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:kameda@kz.tsukuba.ac.jp <sup>4</sup>筑波大学工学システム学類(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1) E-mail:kfueki@kz.tsukuba.ac.jp

積層ゴム支承が支持する構造形式の多様化に伴って,積層ゴム支承に作用する軸応力が圧縮領域で収ま らず,引張領域にまで及ぶ可能性が指摘されている.本研究では,橋梁の耐震補強に用いられる積層ゴム 支承を対象として,繰り返し載荷実験によりせん断変形時に積層ゴム支承に生じるひずみ場を画像解析に よって求めるとともに,等価介在物法を理論的な拠り所として積層ゴム支承に生じる応力場の同定を試み た.供試体に生じるひずみ場および応力場は作用する軸応力に応じて特徴的な分布を示し,領域によって は局所的に大きなひずみあるいは応力が生じていることが明らかとなった.

Key Words : Seismic performance, laminated rubber bearing, shear plastic deformation, axial loading

1.はじめに

土木・建築の分野を問わず,積層ゴム支承が支持 する構造形式の多様化に伴って,積層ゴム支承に作 用する軸応力が圧縮領域で収まらず,引張領域にま で及ぶ可能性が指摘されている<sup>1).2)</sup>.このように, 従来想定されていた圧縮軸応力と異なる軸応力下で 積層ゴム支承を使用するためには,マクロ的な力学 的特性を表す水平力-水平変位の履歴関係だけでな く,積層ゴム支承を構成するゴム層と鋼板に生じる 局部的なひずみ場や応力場に関しても検討する必要 がある.

積層ゴム支承は鉛直剛性を高めるためにゴム層と 鋼板の互層となっており,両端部には上下部鋼板が 取り付けられている.このような境界条件を有する 積層ゴム支承に生じるひずみ場や応力場に関しては, 古典的かつ理論的な研究<sup>3),4)</sup>を端緒とし,FEM ベー スの研究<sup>5),6)</sup>に至るまで様々な手法によって検討さ れている.しかし,積層ゴム支承が大変形領域まで せん断変形した場合のひずみ場や応力場に関しては, 実証的に十分なデータが得られているとは言えない.

以上を踏まえ,本研究では橋梁の耐震補強に用い られる積層ゴム支承を対象として,これらに繰り返 しせん断変形を与えることにより,せん断変形時に 積層ゴム支承に生じるひずみ場を画像解析によって 求めるとともに,等価介在物法<sup>つ</sup>を理論的な拠り所



として積層ゴム支承に生じる応力場の同定を試みた. これらの実験および解析を通じて圧縮,引張の軸応 力の相違が積層ゴム支承のせん断変形性能に与える 影響について考察した.

2.繰り返し載荷実験ならびに画像解析の概要

#### (1) 実験供試体と載荷方法

実験供試体の概要を図 - 1 に示す.供試体は 8mm×3 層の天然ゴム層と 3mm×2 枚の内部鋼板 (SS400)で構成されている.天然ゴムの静的せん 断弾性係数Gは 1.2MPa である.供試体の表面には, 図 - 2 に示すようにひずみ場の同定に必要な各変形 状態における変位を測定するため,225点(9行×25 列)の標点がマークされている.

図 - 3 に載荷方法を示す.供試体を架台の上に設



図 - 3 載荷方法(単位は mm)

置した上で,供試体の上面には桁を模擬した梁(以下,上梁と呼ぶ)を設置した.2本の鉛直アクチュ エータと水平アクチュエータのスイベルエンドを上 梁に取り付け,2本の鉛直アクチュエータで一定の 軸力を荷重制御で保持しつつ,水平アクチュエータ で目標とするせん断変形を変位制御によって与えた.

(2) 実験ケース

実験ケースを表 - 1 に示す.以下では,供試体に 作用させるせん断変形(水平変位x)の指標として これをゴム総厚で除したせん断ひずみ $\gamma$ (百分率) を用い,また,圧縮軸応力をマイナス(-),引張 軸応力をプラス(+)でそれぞれ表すこととする.

いずれの実験ケースにおいても,所定の軸応力を 作用させた状態で,載荷と除荷を3回ずつ繰り返し ながらせん断ひずみ7を50%,75%,100%,125% 150%,200%,250%の順に漸増させた.これらのせ ん断ひずみ7ならびに繰り返し回数に関しては,地 震時において積層ゴム支承に作用しうるせん断変形 を想定し,定めたものである.

なお,ケース1に関しては-6MPaの圧縮軸応力

| 表 - 1 実験ケース |                                    |
|-------------|------------------------------------|
| 実験ケース       | 載荷方法(軸応力+せん断変形)                    |
| ケース1        | 一定圧縮(-6MPa)+一定回転(1/50)+<br>せん断変形漸増 |
| ケース2        | 一定引張(2MPa) + せん断変形漸増               |



図 - 4 画像解析の流れ

を作用させた状態で積層ゴム支承に曲げを作用させ た.この場合には,せん断ひずみを漸増させる各載 荷ステップにおいて2回目の載荷のピークのせん断 変形時に載荷を一旦保持した上で,1/50相当の回転 変形を積層ゴム支承に作用させた.1/50の回転変形 は地震時において下部構造の塑性化を想定して定め たものである<sup>8</sup>.

#### (3) 画像解析によるひずみ場の取得

画像解析の概要を図 - 4 に示す.第1に,実験中 に供試体の変形状態をデジタルビデオで撮影し,撮 影したデジタルデータを AVI ファイルに出力する. これを AVI 操作ソフトウェア ConvertLB により bitmap 型の連番ファイルに出力し,画像解析ソフト ウェア Move-tr32/2D を用いて,供試体にマークし た標点の x 方向ならびに y 方向の座標と変位を取得 する.次に,供試体にマークした標点に対して4点 要素の格子として形状関数を用いて,得られた座標 と変位をもとに各標点におけるひずみ場 $\varepsilon_{xx}$ , $\varepsilon_{yy}$ ,  $\gamma_{xy}$ を算出する.

(4) 等価介在物法による応力場の同定

積層ゴム支承に生じる応力場に関しては等価介在 物法をベースとして同定を行った<sup>77</sup>.本手法によれ ば,対象とする材料が非弾性な特性を有する場合や 不均一な材料特性を有する場合に対しても,ひずみ 場および境界に生じる応力場を与条件として材料内 部の応力場を求めることが可能となる.理論展開に 関しては参考文献 7)に詳述されているのでここで は割愛するが,本研究においては,積層ゴム支承に 生じる面内のひずみ場と積層ゴム支承の自由表面及 び上下部鋼板との境界に生じる応力場を実験的に取 得することによって,積層ゴム支承に生じる応力場 の同定を試みた.

ここでは,積層ゴム支承にせん断変形を与える載 荷方向としては橋軸方向を想定しているため,橋軸 直角方向(載荷直角方向)に対して積層ゴム支承は 平面応力状態にあると近似的に仮定した.その上で, 前節で述べたように載荷直角方向(橋軸直角方向) からデジタルビデオで積層ゴム支承に生じる面内の ひずみ場を取得するとともに,積層ゴム支承のゴム 層と上下部鋼板の境界に貼付された3軸ゲージによ って計測されたひずみ場から積層ゴム支承の境界に 生じる応力場を算出し,これらを与条件として積層 ゴム支承に生じる面内の内部応力場を推定した.

## 3.積層ゴム支承に生じる局所的なひずみ場お よび応力場

2MPa の引張軸応力を作用させたケース 2 に関して供試体に生じたひずみ場を示すと図 - 5 のようになる.ここでは,150%のせん断ひずみ<sup>γ</sup>を与えた場合の結果を示している.

*ε*<sub>xx</sub> に関しては供試体の領域全体に - 0.02 ~ 0.02 のひずみが分布しているものの,供試体の右上及び 左下隅角部においては - 0.2 程度のひずみが,逆に 右下及び左上隅角部においては 0.07~0.09 のひずみ が生じている. & 、、に関しては - 0.02 ~ 0.03 のひず みが領域全体に分布している. Υ<sub>xy</sub> についてはゴム 層と内部鋼板でひずみの分布が明瞭に分かれており、 ゴム層には 1.4~1.6 程度の大きなひずみが生じてい る.なお,内部鋼板に生じる Y<sub>xy</sub>は本来小さくなる べきであるが,本ケースでは 0.9 程度の γ<sub>xy</sub> が生じ ている.これは,せん断ひずみγが 150%以上の変 形状態となると、内部鋼板に貼付したひずみ場計測 用の標点(図-2参照)が鋼板部分よりゴム層領域 に僅かながらずれて,画像解析する際に見かけ上鋼 板がひずんだように処理されてしまったためである。 今後,ひずみ場の算定をより精度良く行うため,こ れらの点を考慮して実験方法の改良を行う予定であ る.

同様に,ケース2において供試体に生じた応力場 を求めると図-6のようになる. $\sigma_{xx}$ に関しては供 試体の右上及び左下領域において2.5~6.5MPa 程度 の応力が,逆に右下及び左上領域においては-6.5 ~ - 2.5MPaの応力が生じている. $\sigma_{yy}$ に関しては供 試体内部の領域において - 11.0~ - 4.0MPa 程度の 応力が領域全体に生じており,逆に左右自由表面付 近において0~4.0MPaの応力が生じている. $\sigma_{xy}$ に ついては,供試体内部の領域においてゴム層と内部 鋼板で応力の分布傾向が異なっており,ゴム層では - 30.0~ - 15.0MPa 程度の応力が生じている.逆 に供試体の左右自由表面付近において7.0~ 14.0MPa 程度の応力が生じている.

以上より,供試体に生じるひずみ場および応力場 は作用する軸応力に応じて,供試体内部の領域と左 右自由表面付近,あるいはゴム層と内部鋼板付近で



図 - 5 供試体に生じるひずみ場(実験ケース 2, せん断 ひずみ <sup>γ</sup> が 150%の場合,上段: ε<sub>xx</sub>,中段: ε<sub>yy</sub>, 下段: <sub><sup>γ</sup>xy</sub>)

は異なる分布傾向を示し,領域によっては局所的に 大きなひずみあるいは応力が生じていることがわか る.積層ゴム支承の終局状態としてはゴム層あるい はゴム-内部鋼板間の破断が想定されることから, このようなひずみ場や応力場の分布傾向の把握や定 量的な評価をより精緻化に行い,設計の指標として 還元していく必要があると考える.

4. 結論

本研究では,積層ゴム支承に対して繰り返しせん 断変形を与え,変形状態を画像解析することにより,



図 - 6 供試体に生じる応力場 (実験ケース 2, せん断ひ ずみ <sup>γ</sup> が 150%の場合, 凡例の単位は kgf/cm<sup>2</sup>, 上 段: σ<sub>xx</sub>, 中段: σ<sub>yy</sub>, 下段: σ<sub>xy</sub>)

せん断変形下において積層ゴム支承に生じるひずみ 場を求め,さらに等価介在物法をベースとして応力 場の推定を行った.得られた知見をまとめると以下 の通りである.

1) 供試体に生じるひずみ場および応力場は作用す

る軸応力に応じて,供試体内部の領域と左右自由表 面付近,あるいはゴム層と内部鋼板付近では異なる 分布を示し,領域によっては局所的に大きなひずみ あるいは応力が生じることが明らかになった. 2) 積層ゴム支承の終局状態としてはゴム層あるい はゴム-内部鋼板間の破断が想定されることから, 積層ゴム支承に生じる局所的なひずみ場や応力場の 分布の把握や定量的な評価をより精緻化に行い,設 計の指標として還元していく必要がある.

謝辞:本研究において使用した積層ゴム支承はゴム 支承協会の関連メーカーに製作していただきました. 実験の準備,治具の設置や撤去,載荷にあたっては 筑波大学機能工学系の小島篤志技官に大変尽力して いただきました.ここに記して深く御礼申し上げま す.

#### 参考文献

- 1) 例えば,菊池優,北村佳久,林章二,河島庸一,坂口 達,山田親文:引張力を受ける積層ゴムの復元力特性に 関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 524 号, pp.57-64,1999.10.
- 2) 例えば,高橋良和,家村浩和,平井崇士:滑り型免震 支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響,第
  26 回地震工学研究発表会講演論文集,土木学会, Vol.2, pp.1077-1080,2001.8.
- 3) Gent, A. N. and Meinecke, E. A. : Compression, Bending and Shear of Bonded Rubber Blocks, *Polymer Engineering and Science*, 10(1), pp.48-53, 1970.
- 4) Kelly, J. M. : *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, 2nd Edition, Springer, 1997.
- 5) 松田泰治,大塚久哲,中島崇之:FEM を用いた積層ゴ ム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究,構造工学 論文集,土木学会,Vol.48A,pp.833-842,2002.3.
- 6) 吉田純司,阿部雅人,藤野陽三:高減衰積層ゴム支承 の3次元有限要素解析法,土木学会論文集,No.717/I-61, pp.37-52,2002.10.
- 7) Hori, M., Kameda, T. and Hosokawa, N.: Formulation of Identifying Material Property Distribution Based on Equivalent Inclusion Method, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp. 13-22, 1999.
- 8) 庄司学,川島一彦,加藤享二:高減衰積層ゴム支承の 設計における橋脚の回転変形の影響,構造工学論文集, 土木学会, Vol.48A, pp.851-861, 2002.3.

(2003. 9.11. 受付)