

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18107

研究課題名(和文) 曲線橋の地震時挙動を想定したゴム支承の引張せん断実験調査とFEM解析

研究課題名(英文) An Experimental and Numerical Study on Evaluation of Shear Properties of Rubber Bearings under Tensile Force

研究代表者

チェ ジュンホ (CHOI, Joon-Ho)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：30600134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では橋梁用ゴム支承の地震時発生し得る引張せん断時の力学的特性を明らかにすることを目的としており、積層ゴム支承(RB)を対象に軸応力をパラメータとした繰り返しせん断載荷実験とFE解析を実施した。本研究により、ゴム支承が引張と大きなせん断ひずみを伴うとゴム支承が大きく変形しやすくなり、圧縮時に比べ設計上厳しくなることがわかった。

本研究により得られた知見は、2016年発生した熊本地震の被災原因推定に大いに活用されるものと期待される。またゴム支承の設計基準においてこれまで規定されていなかった引張せん断特性について改定される可能性があるが、本研究の成果はその参考資料として活用されようとしている。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to investigate the shear behavior and shear properties of Rubber Bearings (RB) subjected to tensile force, cyclic loading tests using 7 test specimens of RB were conducted. To evaluate the shear properties of RB, here in, the tests varied with axial stress were carried out. It was found that the rubber bearing could be deformed largely when it subjected to a tensile-shear loading by experiments and analyses. It is also expected that the results of this study are utilized for the estimation of seismic damage mechanism in the 2016 Kumamoto earthquake.

研究分野：耐震工学

キーワード：ゴム支承 引張せん断特性 繰り返し載荷実験 FE解析 内部応力

1. 研究開始当初の背景

ゴム支承の鉛直方向に対する力学的特性に関しては、これまで基本的な性能確認試験は過去に行われているものの、ゴム支承が圧縮力に対して十分な耐力を有していることや、'ゴム支承本体に引張力が生じる場合は原則としてゴム支承を採用してはならない'という規定があることから、実設計において厳密に考慮されていないのが現状である。しかし、地震時上部構造の鉛直方向の挙動が複雑といわれている曲線橋や支承高が高い高架橋、また鉛直方向の地震動が大きくなりやすい地盤上の橋梁においては、支承部に負反力が生じる可能性が高く、ゴム支承を採用する場合はゴム支承の鉛直方向の力学的特性を適切に考慮して設計する必要がある。特にゴム支承の引張特性に関しては、圧縮剛性より引張剛性はるかに小さいことが過去の試験により明らかになっており、こうしたゴム支承の引張特性を取り入れて地震応答解析を行うと、現行の設計手法により求められた地震時応答と大きく異なる結果が得られることが知られている。また、2011年東北地方太平洋沖地震の際には、複数の曲線高架橋において多数のゴム支承が破断する被害が発生しており、現在様々な観点から原因分析が進められているが、申請者は曲線橋の地震時挙動特性がこうした被害の一要因である可能性が高いと考えている。すなわち、地震時曲線桁の複雑な鉛直挙動によりゴム支承に引張応力が生じ、その応力状態において水平地震力が加わり、最終的にゴム支承は引張せん断破壊をしたのではないかと考えている。しかし、こうしたゴム支承の引張下におけるせん断特性については明らかになっていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、曲線橋の地震時挙動を想定したゴム支承の鉛直挙動特性がゴム支承の耐震性能に及ぼす影響を明らかにすることを最終ゴールとし、まずは引張力をパラメータとしたゴム支承の引張せん断実験を行い、ゴム支承の力学的特性を調査する。また、将来様々な応力状態におけるゴム支承の力学的特性を検討していく予定であり、本実験に対しFEM解析による再現性を確認するところまで本研究期間内に実施することを本研究の目的としている。本研究における検討内容の概略を以下に示す。

(1) 鉛直力と水平力を相互に受けるゴム支承の引張せん断実験

現在橋梁設計において広く用いられているゴム系支承を対象に、鉛直力をパラメータとしたゴム支承の引張せん断試験を実施する。引張力を受けている状態でゴム支承がどのような挙動を示すか、また引張力の変化によりゴム支承のせん断特性や終局特性がどのように変化するかについて明らかにする。

(2) FEM解析による引張せん断実験の再

現性調査およびゴム支承の内部応力状態評価

(1)の実験に用いたゴム支承に対し超弾性材料を用いた有限要素でモデル化し、3次元解析によりゴム支承の引張せん断実験に対する再現性を確認する。また、実験ケースごとにゴム支承の内部の応力状態を評価し、軸応力変化がゴム支承のせん断変形時の内部応力にどのような影響を及ぼすかについて調査した。

3. 研究の方法

(1) 鉛直力と水平力を相互に受けるゴム支承の引張せん断実験

本研究では、ゴム支承の引張せん断特性を把握することを目的とし、積層ゴム支承(RB)を対象に軸応力をパラメータとし、一次形状係数の異なる2種類のゴム支承を用いてせん断実験を実施した。実験により得られた水平荷重-変位履歴から、等価剛性、等価減衰定数などを軸応力ごとに整理し、ゴム支承に作用する軸応力がゴム支承のせん断特性に及ぼす影響について調査した。

本実験では、JISの標準試験体に合わせ、図-1に示すような平面寸法400mm×400mmを有する積層ゴム支承7体を作製し、軸応力および一次形状係数をパラメータとした繰返しせん断載荷実験を行った。実験は研究協力者の協力のもと、研究協力者所有の実験装置を利用して実施した(写真-1)。

(2) FEM解析による再現性調査およびゴム支承の内部応力状態評価

本解析では、超弾性モデルを用いた3次元FEM解析による引張せん断実験の再現性調査およびゴム支承の内部応力を評価することが目的である。

FEM解析ソフトは、ゴム系材料に対する有

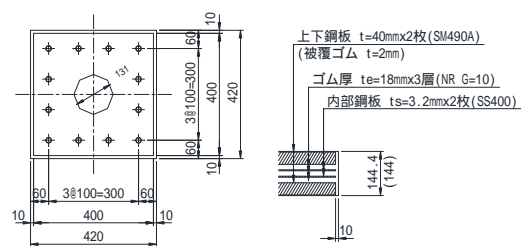


図-1 実験に用いたゴム支承の構造図



写真-1 実験のセットアップ様子

限要素解析に広く使われている ADINA (Ver.9.2.5) を用いた。ゴム材料に関しては、超弾性モデルとして広く用いられている Ogden モデルを採用し、粘弾性効果を考慮した。ゴムの変形に伴う損傷を評価するモデルとして一般に Mullins 効果を考慮するが、負側の繰り返し挙動に際しては再現性が乏しいことから本解析では粘弾性効果を考慮することとした。材料定数については、既往の実験等により求められている公開データを参考にして設定した。このような条件で作成したモデルを用い、過去に実施した実験結果の再現性を確認するとともに、内部応力状態を評価した。

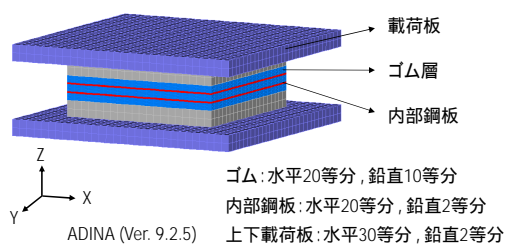


図-2 解析モデル図

#### 4. 研究成果

##### (1) 鉛直力と水平力を相互に受けるゴム支承の引張せん断実験

せん断ひずみ 175%の荷重では、軸応力の変化によるゴム支承の荷重-変位履歴に変化はほとんどみられておらず、軸応力の影響はみられなかったが、せん断ひずみ 250%と 300%の荷重では、引張応力-2MPa を与えた場合ゴム支承が鉛直方向に大きく伸びた状態でせん断変形し、内部鋼板が上下方向に変形していることが確認された。これに伴いゴム支承のせん断特性が変わる結果となった(図-3)。

また、一次形状係数の違いによる影響については、せん断ひずみ 175%程度のせん断変形であれば引張応力下でのせん断特性がそれほど大きく変化しないが、せん断ひずみ 250%以上の領域ではゴム支承が一次形状係数の変化による影響を受けやすいことがわかった(図-4)。一次形状係数が小さい供試体の場合、ゴムの変状に伴い水平耐力や等価剛性が低下する結果となり、引張応力下においてはゴム支承の一次形状係数の影響は大きいことが確認された。また、一次形状係数の小さいゴム支承においては、ゴム支承が引張力を受けた状態で水平力が作用する場合、限界状態に対する余裕が少ないことが分かった。

##### (2) FEM 解析による引張せん断実験の再現性調査およびゴム支承の内部応力状態評価

まず、ゴム支承の引張せん断実験に対する再現性調査については、圧縮 6MPa と引張 2MPa の軸応力を載荷した状態でせん断ひずみ 250%を繰り返して載荷した実験結果と比較した。比較データとしては、ゴム支承の水平荷重-水平変位の履歴を用いたが、解析で用

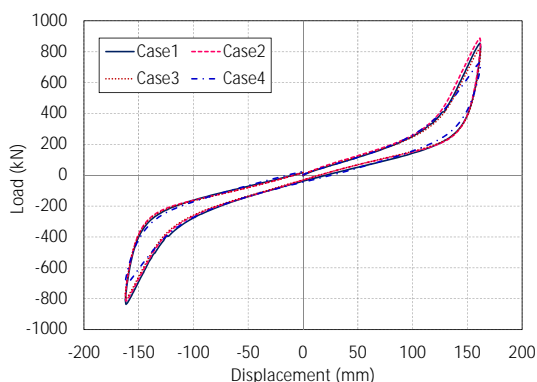


図-3 300% 荷重時の荷重-変位履歴  
(Case1: 圧縮 6MPa, Case2: 0MPa, Case3: 引張 1MPa, Case4: 引張 2MPa)

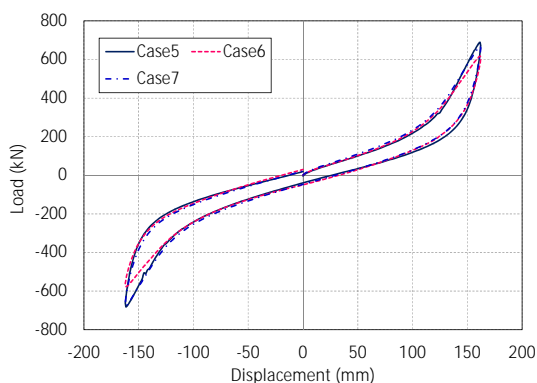


図-4 300% 荷重時の荷重-変位履歴  
(Case5: 圧縮 6MPa 一次形状係数 5.56, Case6: 引張 2MPa 一次形状係数 5.56, Case7: 引張 2MPa 一次形状係数 11.11)



写真-2 実験の様子  
(引張 2MPa, せん断ひずみ 250% 荷重時)

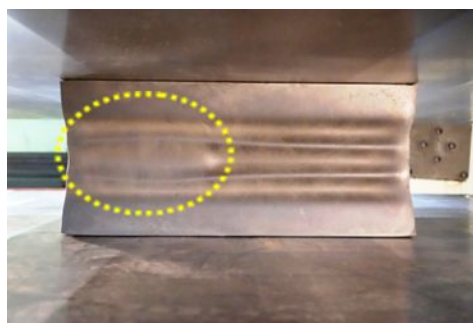


写真-3 実験の様子  
(引張 2MPa, せん断ひずみ 300% 荷重後)

いたゴム材料の材料定数は実験で用いたゴム材料の材料定数と異なる可能性があるため、履歴形状においてハードニング特性に関しては再現できなかったが、最大荷重および履歴吸収エネルギーに関しては粘弾性効果を考慮する際に必要な係数を調整し、実験結果をおおむね再現できることが確認できた（図-5）。

また、ゴム支承の内部応力評価について、静水圧応力で比較した。まず圧縮せん断実験におけるゴム支承の内部応力評価については、図-6 に示すようにせん断ひずみを 175% 載荷した場合には、圧縮応力が作用する領域が支承中央部を中心にして広範囲で広がっているが、せん断ひずみが大きくなるにつれて圧縮応力を受ける領域が徐々に減っていくことが確認された。せん断ひずみを 300% 載荷した場合には、圧縮応力を受ける領域が半分程度まで減り、せん断ひずみを厳しく受ける左右の端部には引張応力を受けるところも現れ、せん断ひずみの変化によってゴム支承の内部応力が大きく変化していくことがわかった。

一方、引張せん断実験におけるゴム支承の内部応力評価については、図-7 に示すようにせん断ひずみ 175% を載荷した場合には、圧縮応力載荷時と同様に支承中央部を中心に引張応力を受ける領域が広がっているが、せん断を受けることでゴム部材がさらに引張を受けることになり、せん断ひずみが大きくなるにつれて支承中央部の引張応力がより上昇していく傾向を示した。しかし、せん断ひずみの増大に伴い、引張応力の分布も変化しており、ゴム内部で最大引張応力が発生する領域はせん断変形方向の反対の対角方向に分布することがわかった。このことより、ゴム支承が引張応力下においてせん断を受ける場合には、ゴムの上下層の端部で引張応力を厳しく受けることが考えられる。実験においてもゴム層間でゴムの伸びが不均等に大きく内部鋼板がそれに沿って変形していたことが確認されており、実験時のゴム支承の変状とおおむね一致していることがわかった（写真-3）。

### (3) 今後の展望

2016 年に発生した熊本地震では、写真-4 に示すように多くのゴム支承が被害を受けているが、断層破壊による大きな地盤変状や強い鉛直地震動によりゴム支承に強い引張力が作用していた可能性も高いと考えられる。本研究により得られた知見は、こうした近年発生した地震被災の原因推定に大いに活用されるものと考えられる。また、ゴム支承の設計基準において、これまで規定されていなかった引張せん断特性について改定されると思われるが、本研究の成果はその参考資料として活用されようとしている。

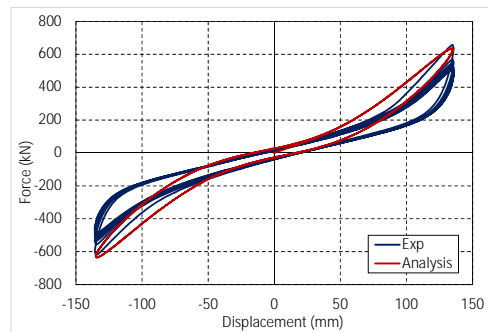


図-5 実験と解析結果の荷重-変位履歴比較  
(軸応力引張 2MPa, せん断ひずみ 250%)

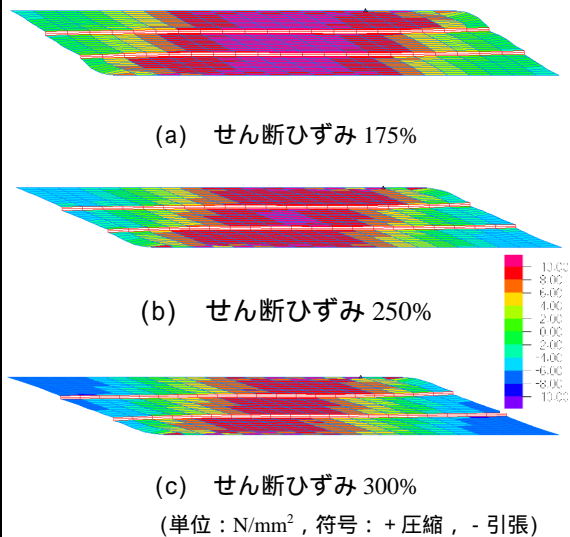


図-6 静水圧応力の比較（軸応力圧縮 6MPa）

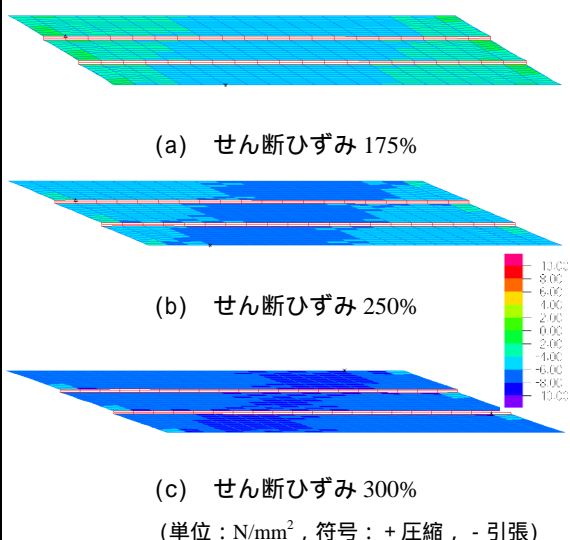


図-7 静水圧応力の比較（軸応力引張 2MPa）



写真-4 2016 熊本地震によるゴム支承の被災

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

崔準祐, 原暢彦, 今井隆, 植田健介, 成炫禹: 軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), 2017 年 7 月掲載予定

### 〔学会発表〕(計 5 件)

成炫禹, 原暢彦, 今井隆, 植田健介, 崔準祐: 軸応力とせん断ひずみの変化に伴うゴム支承の局部応力状態評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017 年 9 月発表予定

成炫禹, 原暢彦, 今井隆, 植田健介, 崔準祐: 軸応力とせん断ひずみの変化に伴うゴム支承の局部応力変化に関する解析的検討, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, 2017 年 7 月発表予定

J.H.CH01: Rubber Bearings Damaged by Recent Earthquakes and Recent Research on Rubber Bearings, 3rd Workshop with NCRE and Kyushu University, Paper No.7, 2017.4

崔準祐, 原暢彦, 今井隆, 植田健介, 成炫禹: 軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験, 第 36 回土木学会地震工学研究発表会, Paper No.947, 2016 年 10 月

崔準祐, 原暢彦, 今井隆, 植田健介, 成炫禹: 軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, pp.295-300, 2016 年 7 月

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

#### 出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

#### 取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

### 〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

崔 準祐 (CH01, Joon-Ho)  
九州大学・工学研究院・助教  
研究者番号: 30600134

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

今井 隆 (IMAI, Takashi)  
原 暢彦 (HARA, Nobuhiko)  
植田 健介 (UEDA, Kensuke)