

超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形に起因した 取付ボルトに作用する引張力

目崎 裕太¹・木下 幸治²

¹学生会員 岐阜大学大学院修士課程 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻
(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: x4523038@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (同上)
E-mail: kinosita@gifu-u.ac.jp

既往の研究より、地震時のゴム支承の取付ボルト部には、ゴム支承の曲げ変形とせん断変形が同時に発生することに起因して、引張とせん断の合成応力が作用し、取付ボルトが破断に至ることが示されてきている。本研究では、超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形に起因した取付ボルトの破壊挙動を最終的に検討することを目的に、ゴム支承のせん断変形時の曲げ変形を許容し、かつ取付ボルトを模擬できる実験システムを構築した。その上で、ゴム支承の曲げせん断変形に起因した取付ボルトに作用する軸力をボルト頭部のひずみを計測し、ゴム支承の曲げせん断変形と取付ボルトに作用する力の関係を把握した。

Key Words : *super high damping rubber bearing, bending deformation, shear deformation, fixing bolts*

1. はじめに

兵庫県南部地震において、鋼製支承を用いた橋梁では支承部に起因すると考えられる被害が多数見受けられた一方で、積層ゴム支承を用いた橋梁では比較的損傷が軽微であったことから、それ以降積層ゴム支承の普及が拡大してきた¹⁾。しかし、その後に発生した東北地方太平洋沖地震では、平成8年以降の基準²⁾に準拠して設計された東部高架橋において、ゴム支承に破断やき裂等の損傷が初めて確認された^{3)・4)}。さらに、熊本地震では、ゴム支承の破断のみならず、ゴム層の破断以前に支承取付ボルトが破断するといった損傷が生じた^{5)・7)}。これらのことから、ゴム支承の取付ボルトを含む破断メカニズムの解明のために、取付ボルトを含む実験・解析データの蓄積が重要である。

このような背景から、熊本地震以降、取付部を含むゴム支承破断メカニズムに関する研究がなされている^{8)・11)}。後藤ら⁸⁾の2径間橋梁模型の加振実験並びに解析、本橋ら⁹⁾の再現解析から、ゴム支承には曲げ変形とせん断変形が同時に作用し、それに起因して取付ボルトには合成応力(引張+せん断)が作用することで、取付ボルトは合成応力により破断する可能性が示された。さらに、二宮ら¹⁰⁾、中尾ら¹¹⁾は、熊本地震で損傷した橋梁から取り

出したゴム支承、支承に用いる六角ボルトを複数配置した試験体を用いた実験から、最初に合成応力が作用するボルトから破断し、残ったボルトがせん断破断することを明らかにした。以上の既往研究から、取付ボルトの破断はゴム支承の曲げせん断変形により取付部に発生する合成応力により発生していることが明らかとなっており、今後も、ゴム支承の曲げせん断変形とそれに起因する取付ボルトに作用する力の関係の把握並びに、取付部を含めた支承全体の破断メカニズムの解明は重要である。

本研究では、著者らの昨年度の研究で行った実物の超高減衰ゴム支承の変形挙動に及ぼす載荷方向の影響に関する実験¹²⁾に引き続き、実物の超高減衰ゴム支承を対象として載荷実験を行った。具体的には、超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形に起因した取付ボルトの破壊挙動を検討することを目的に、ゴム支承の曲げ変形を許容でき、かつ取付部を模擬できる実験システムを構築し、載荷実験を実施した。載荷実験中はゴム支承のせん断変形、曲げ変形、取付ボルトの頭部ひずみを計測し、ゴム支承の曲げせん断変形と取付ボルトに作用する引張力の関係を把握した。



写真-1 実物ゴム支承外観



写真-2 実物ゴム支承現地保管状況

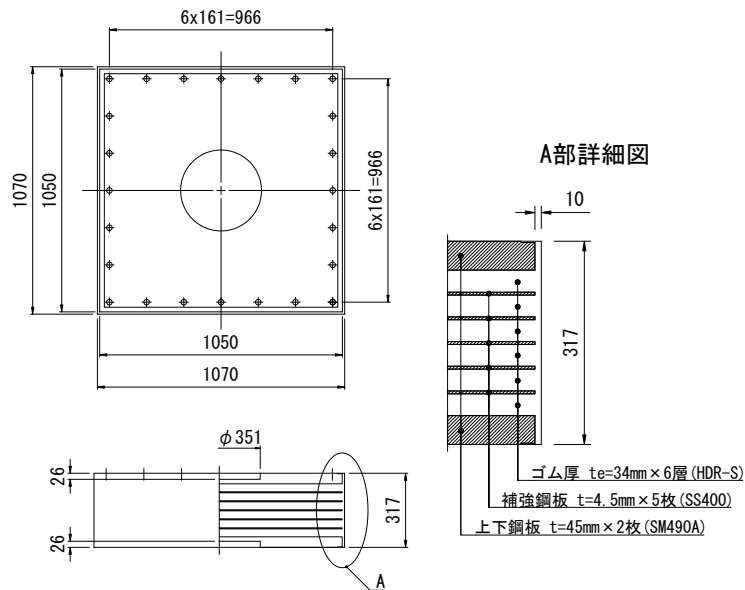


図-1 実物ゴム支承概要 (単位: mm)

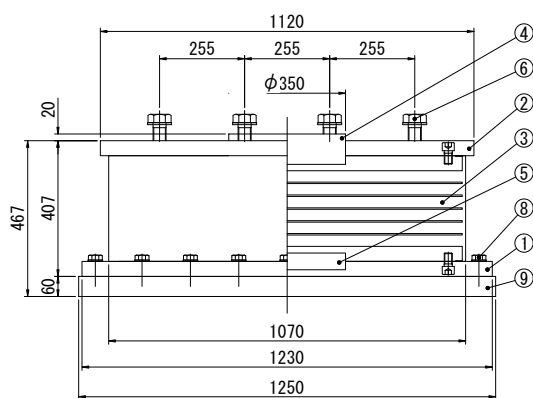


図-2 実物ゴム支承断面と部品番号
(単位: mm, 丸囲み数字: 部品番号)

表-2 実物ゴム支承に使用されている材料の規格値

部品番号	部品名	材質	備考
1	下査	SM490A	
2	上査	SM490A	
3	ゴム査	HDR-S +SS400+SM490A	
4	せん断キー(A)	SM490A	
5	せん断キー(B)	SM490A	
6	六角ボルト・座金	—	JIS B 1180 JIS B1256
7	六角穴付ボルト	—	JIS B 1176
8	六角ボルト・座金	—	JIS B 1180 JIS B1256
9	ベースプレート	SM490A	

2. ゴム支承概要

写真-1に実物ゴム支承の外観、図-1に実物ゴム支承の概要を示す。実物ゴム支承の種類は、免震用積層ゴム支承として広く使用されている超高減衰ゴム支承 (HDR-S) である。実物ゴム支承は2014年9月に製造されたもの現

場に搬入され、架設中に当該架橋位置において土砂災害を受けたため2015年1月に撤去されたものである。本研究において対象とした実物ゴム支承はA2橋台上に設置されていた2基のゴム支承のうち、G2桁側に設置されていた。撤去後のゴム支承は現地屋外にて保管され (写真-2参照)、2017年1月に本大学構内に移設されている。



写真3 実験システム全体写真

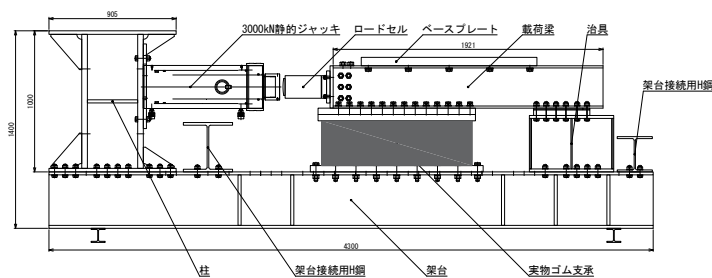


図-3 実験システム全体図面 (単位: mm)



写真4 長孔部



写真5 取付ボルト部

その後、実物ゴム支承は本大学構内においても屋外にて保管され(写真-1参照)、本載荷実験に至る。

実物ゴム支承は1辺が1050 mm(有効寸法)の正方形断面を有し、ゴム1層厚34 mm、ゴム層総数6層(ゴム層総厚204 mm)、厚さ4.5 mmの補強鋼板5枚、厚さ45 mmの上下鋼板2枚で構成されている。せん断弾性係数 G は1.0 N/mm²であり、1次形状係数 S_1 は7.72、2次形状係数 S_2 は5.15である。形状係数は道路橋支承便覧⁹⁾を参考に式(1)、(2)を用いて算出した。

$$S_1 = \frac{A_e}{2(a+b)t_e} \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{\min(a,b)}{\sum t_e} \quad (2)$$

ここで、 S_1 : 1次形状係数、 S_2 : 2次形状係数、 A_e : ゴム支承の有効寸法より求めた面積、 a : 橋軸方向の有効(鋼板)寸法、 b : 橋軸直角方向の有効(鋼板)寸法、 t_e : ゴム1層の厚さである。また、等価剛性および等価減衰定数の設計値は、それぞれ5.606 kN/mm、17.3%である。外観に有意な損傷は見られなかった。図-2に実物ゴム支承の断面寸法と部品番号、表-2に実物ゴム支承に使用されている材料の規格値を示す。ゴム部には、超高減衰ゴムが使用されており、鋼材部にはSS400、SM490A材、JIS B 1180、JIS B 1256の六角ボルト、JIS B 1176の六角穴付きボルトが使用されている。

3. 載荷実験概要

(1) 載荷実験システム

写真-3、図-3に大学構内に構築した実験システムの全体写真と図面を示す。実験フレームは2本のH鋼の上に設置した両端単純支持の自己つり合い式のフレームである。架台にはH鋼を3本使用し、それぞれが独立して動かないように奥行き方向に別のH鋼2本を渡し、架台とはボルトを使用して接続している。その架台の上に実物ゴム支承と治具を設置し、さらにその上に4本のH鋼で作成した載荷梁を設置した。4本の載荷梁はゴム支承側においてボルトで剛結されており、治具側に関しては写真-4に示すように長孔に高力ボルトを挿すことで鉛直方向の変位を固定している。すなわち、ゴム支承のせん断変形時に載荷梁は水平方向に自由に移動し、ゴム支承の回転には載荷梁および架台の曲げ剛性で抵抗する。また、4本の載荷梁はズレの防止と載荷梁の曲げ剛性を高めるために、実物ゴム支承から取り外したベースプレートにて接続している。

写真-5に取付ボルト部を示す。実橋と同じ径、本数のM39、強度区分10.9の六角ボルト12本を実橋と同じ位置に配置した。締付けトルクは支承製作会社の社内管理値と同等とした。

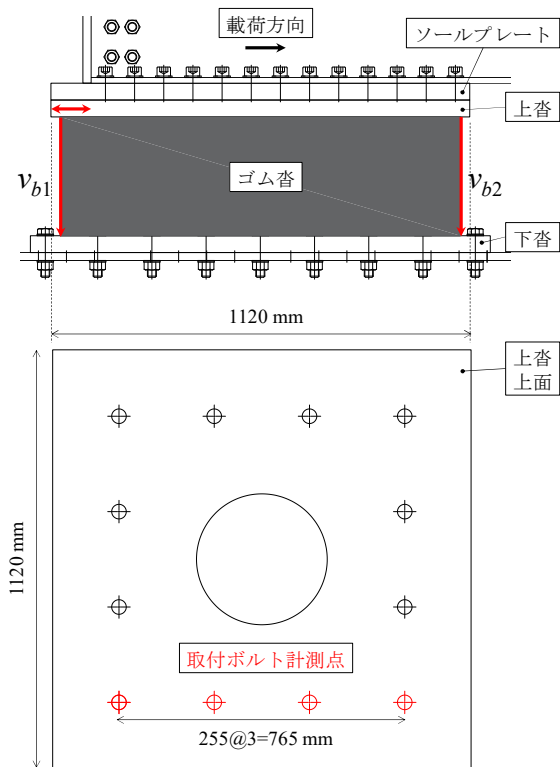


図-4 ゴム支承の変形と取付ボルトの計測点

水平荷重は大阪ジャッキ社製 3000 kN 油圧ジャッキを 1 基使用し、載荷梁に取り付けたロードセルを水平方向に片押しで押すことでゴム支承に与える。

(2) ゴム支承の曲げせん断変形と取付ボルトの軸力変動の計測箇所

図-4 に計測方法を示す。載荷実験ではゴム支承の変形を変位計により計測した。具体的には、ゴム支承の水平変位は上沓、ゴム支承の曲げによる回転角は上下沓間の相対鉛直変位 v_{b1} 、 v_{b2} により計測した。また、取付ボルトの軸力は図-4 に示すように載荷方向に沿って、片側 1 列を計測した。

(3) 取付ボルトに作用する引張力の計測方法と頭部ひずみ-軸力関係取得のためのキャリブレーション

六角ボルトの軸力測定方法の一つとして、ボルト頭部にひずみゲージを貼付け、頭部ひずみと軸力の関係からボルトに作用する軸力を算出する方法がある¹³⁾。本研究では、この方法を用いて載荷実験中の取付ボルト頭部ひずみを計測することで、取付ボルトに作用するゴム支承の曲げせん断変形に起因した引張力を算出した。しかし、この計測方法は事前に六角ボルトの頭部ひずみと軸力の関係を得るためのキャリブレーション試験が必要となる。そこで、キャリブレーション試験を以下の①～④の手順で実施した。

① 取付ボルト頭部にひずみゲージを貼付け、ゴム

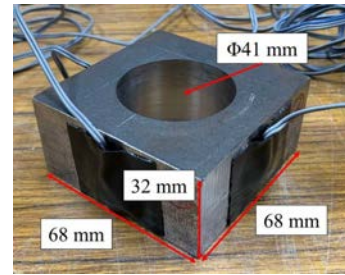


写真-6 荷重校正用治具

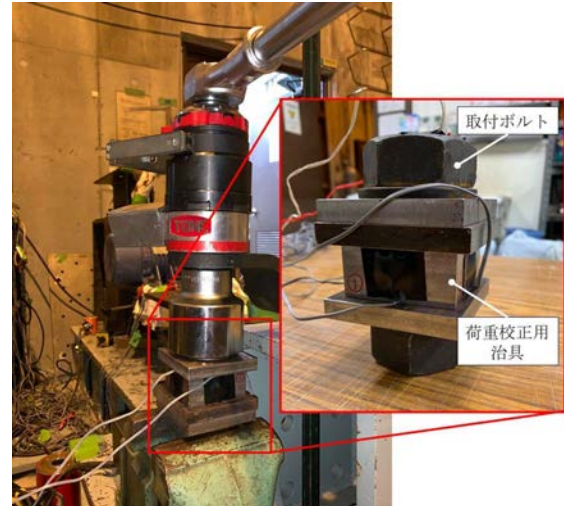


写真-7 ボルト頭部ひずみ-圧縮ひずみキャリブレーション試験状況

支承載荷実験中の頭部ひずみの変動を計測。

- ② 荷重校正用治具（写真-6）の圧縮試験を実施し、圧縮荷重-圧縮ひずみの関係を取得。
- ③ 荷重校正用治具を取付ボルトで締め付ける（写真-7）ことでボルト頭部ひずみ-圧縮ひずみの関係を取得。
- ④ ②、③の試験結果から、ボルト頭部ひずみ-圧縮荷重（ボルト軸力）の関係を取得し、①の実験で得られた頭部ひずみを基に取付ボルトに作用する引張力を算出。

a) 荷重校正用治具の圧縮試験

図-5 に荷重校正用治具の圧縮試験結果を示す。本試験は、荷重校正用治具の側面 4 面の中央に貼り付けたひずみゲージのうち、3 面のひずみ値の平均を治具の圧縮ひずみとした。圧縮荷重は、取付ボルトを締め付けた際に導入される軸力と同等の 100 kN を、JIS Z2241-1998 に従い、一定の速度で連続で 10 回載荷した。

圧縮荷重-圧縮ひずみ関係は、微小な載荷速度の差異、治具の加工に伴う残留応力または、ひずみゲージの接着剤の影響と考えられるばらつきがみられた。そこで、圧縮荷重と圧縮ひずみの校正係数は、各載荷の試験結果を最小二乗法を用いて原点を通る直線で近似¹⁴⁾することで算出し、それらの平均値を用いた（表-3）。

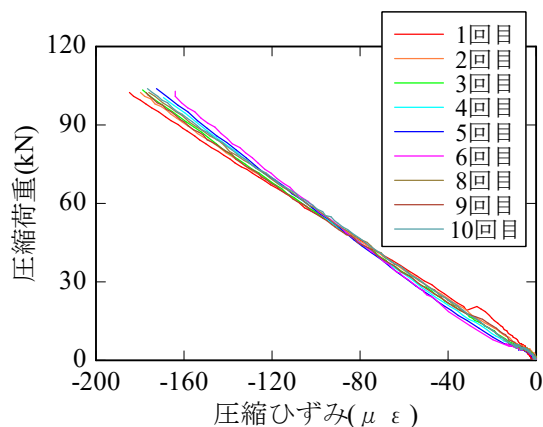


図-5 荷重校正用治具圧縮試験結果

表-3 算出した校正係数と平均値

载荷回数	校正係数 (kN/μ ε)	平均 (kN/μ ε)
1	-0.5597	-0.5754
2	-0.5690	
3	-0.5691	
4	-0.5781	
5	-0.5817	
6	-0.5905	
7※	-	
8	-0.5795	
9	-0.5673	
10	-0.5833	

※7回目は外れ値のため除去

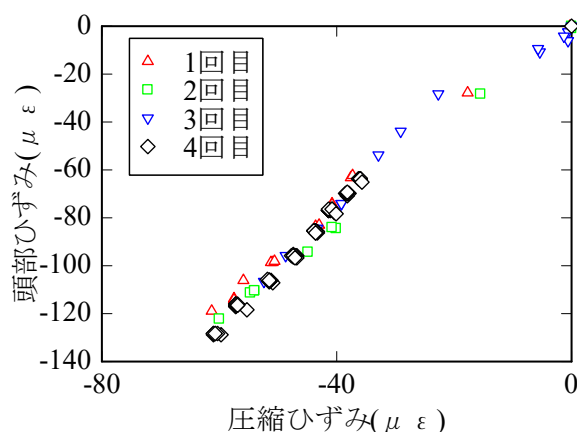


図-6 取付ボルトのキャリブレーション結果

表-4 算出した校正係数と平均値

試験回数	校正係数 (-)	平均 (-)
1	1.9015	1.953275
2	2.0512	
3	1.8667	
4	1.9937	

(1) 荷重－変位関係

図-7、写真-8 にせん断ひずみ $\gamma=10\sim70\%$ の荷重－変位関係および、 $\gamma=70\%$ 時の実験状況を示す。片押しの実験のため、 $\gamma=20\%$ 以降の実験では開始時に残留変位が生じている。本実験では载荷を繰り返すことにより、Mullins 効果¹⁵⁾による最大水平荷重が低下して収束する傾向が見られた。また、荷重－変位関係は、それ以前に経験したせん断ひずみ時の最大水平荷重付近を結ぶような正負交番载荷と同様な傾向を示した。

図-8に $\gamma=50\%$ の荷重－変位関係を示す。図-8中の昨年度実験は著者らの研究で行った 1 基目の実験結果 ($\gamma=50\%$)¹²⁾である。本実験と昨年度実験の 2 波目の最大水平荷重はそれぞれ 818 kN, 870 kN, 最大水平変位は 105 mm, 111 mm (目標変位 102 mm) であり、概ね一致し、両試験結果ともに载荷を繰り返すことによって最大荷重が低下し収束する傾向が見られた。また、二次剛性が昨年度実験と比較して高い結果となった。

最大水平荷重の収束について、昨年度実験と本実験の 2 回目と 5 回目载荷時の目標水平変位 (102 mm) 付近の水平荷重を比較した結果、昨年度実験が 10.2 % の減少、本実験が 5.9 % の減少となっており、概ね同等の減少率を示した。

次に、二次剛性の相違については各载荷時の残留変位が異なっているが、最大水平荷重は各载荷とも同等な値を示していることから、本実験の片押し単調载荷による残留変位の影響と考えられる。また、本実験では鉛直荷

b) 取付ボルトの頭部ひずみ－軸力キャリブレーション試験

図-6 に取付ボルトのキャリブレーション結果を示す。試験は 4 回実施し、頭部ひずみと圧縮ひずみの校正係数は、3.(3)b) と同様に算出し、それらの平均値を用いた (表-4)。以降の軸力の値は、この校正係数を用いて頭部ひずみから校正している。

(4) 载荷試験方法

本実験は、3.(1)で示した実験システムを使用し、鉛直荷重を与えずにせん断ひずみ $\gamma=10\sim50\%$ の载荷をインターバルを設けずに連続的に実施した。その後、日を空けて $\gamma=70\%$ の载荷を実施した。水平方向の载荷は変位制御により片押しの単調载荷で行い、载荷速度については手動による载荷とし、一定の速度になるように調整した。

4. 载荷試験結果

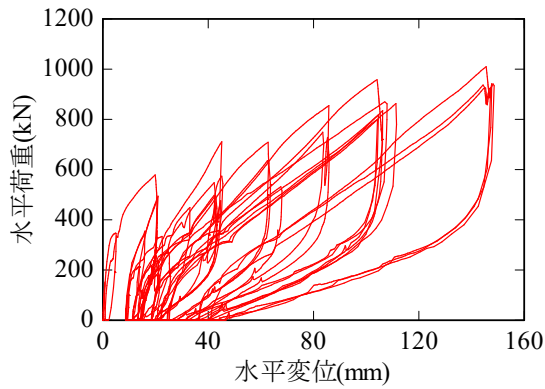


図-7 せん断ひずみ 10%～70%試験結果

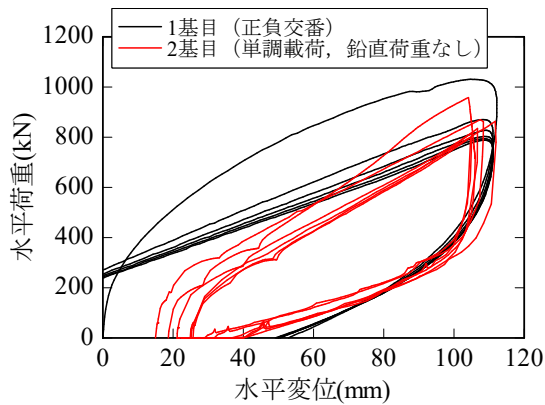


図-8 せん断ひずみ 50%試験の 1, 2 基目結果の比較

重が作用していないが、鉛直荷重を変化させて載荷した既往の研究¹⁶⁾¹⁸⁾において鉛直荷重を圧縮側で変化させたところ、荷重変位の变化はほとんど見られない、または、若干の変化があることが確認されている。このことから、本実験において鉛直荷重を与えていないことが二次剛性に与える影響は小さいと考えられる。

以上の $\gamma=10\sim70\%$ の荷重－変位関係の傾向、本実験結果を昨年度実験結果と比較した結果より、曲げせん断変形を与えた本実験の荷重－変位関係は、それ以前に経験したせん断ひずみ時の最大水平荷重付近を結ぶような正負交番載荷と同様な傾向を示し、かつ、せん断変形のみの実験の荷重－変位関係と同等な最大水平荷重を表すことを確認した。このことから、今後、解析によりモデル化する際、ゴム支承の水平特性は正負交番載荷から得られた結果を適用し、取付ボルトの軸力変動を検討できると言える。

(2) ゴム支承の回転変形挙動

図-9に $\gamma=70\%$ を1回目に与えた際の目標変位付近 (102 mm) における上下沓間の相対鉛直変位を示す。横軸は水平距離であり、下沓取付ボルトの左側最外列から右側に向かって正をとっている。このゴム支承の載荷軸方向の回転角は次式により算出した。



写真-8 せん断ひずみ 70%試験状況

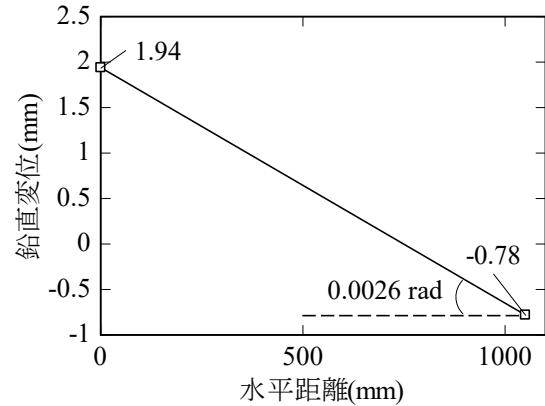


図-9 上下沓相対鉛直変位 ($\gamma=70\%$)

$$\overline{\theta}_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{d} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{\theta}_b$: $v_{b1} \sim v_{b2}$ 間の回転角、 d : 鉛直変位の計測点間の距離 ($d=1050$ mm) である。図-9 より、ゴム支承は写真-8において右回りに回転をしており、ゴム支承に曲げ変形が生じていることが確認された。この回転角は 0.0026 rad であり、構築した載荷装置により既往の実験結果⁹⁾の橋軸回り回転量 ($0.0006\sim0.0012 \text{ rad}$) と同等またはそれ以上の回転量を生じさせることが可能であることを確認した。

(3) 取付ボルトに作用する引張力

図-10, 11 にせん断ひずみ $\gamma=70\%$ の載荷実験中の取付ボルトに作用する軸力の変動および、せん断ひずみ $\gamma=70\%$ において各取付ボルトに作用する軸力の値を示す。図-10 より、ゴム支承のせん断ひずみ、回転角が増加するにつれて作用軸力は非線形的に増加する傾向を示した。また、図-11 より、ボルト①から④にかけて作用軸力は線形的に増加しており、ゴム支承の右回りの回転によって、せん断ひずみ 70% 、回転角 0.0026 rad の時に載荷方向先頭 (図-11④番) のボルトに1本あたり約 19 kN の引張力が作用することを確認した。

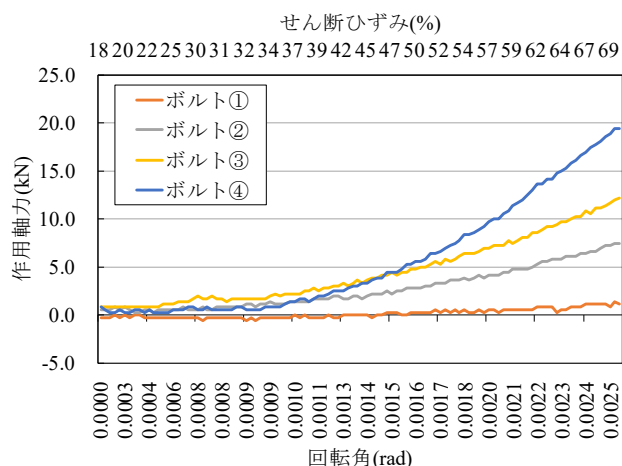


図-10 $\gamma=70\%$ 載荷中の取付ボルトに作用する軸力変動

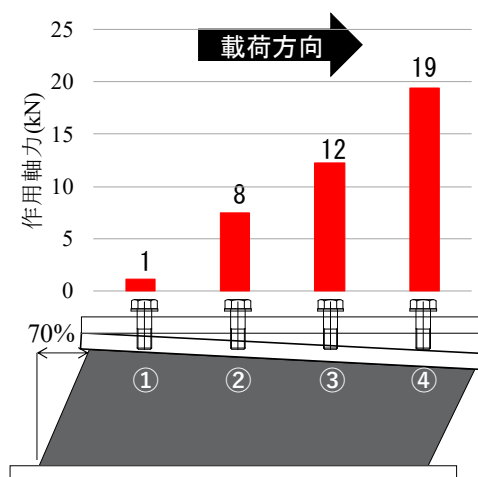


図-11 $\gamma=70\%$ における各取付ボルトに作用する軸力

5. 結論

本研究では、実物の超高減衰ゴム支承を対象として、超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形に起因した取付ボルトの挙動を検討することを目的に、ゴム支承の曲げ変形を許容でき、かつ取付部を模擬できる実験システムを構築し、ゴム支承の曲げせん断変形と取付ボルトに作用する引張力の関係を計測した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 実物のゴム支承の曲げ変形を許容できる実験システムを構築し、回転角 0.0026 rad を得た。これは、既往の実験結果⁸⁾の橋軸回り回転量 ($0.0006 \sim 0.0012 \text{ rad}$) と同等またはそれ以上の回転量である。
- 2) 取付ボルト頭部の圧縮ひずみからボルトに作用する軸力を算出した結果、ゴム支承のせん断ひずみが増加するにつれて作用軸力は非線形的に増加した。また、ゴム支承が右回りに回転することによって、取付ボルトに作用する軸力は最大水平変位時には載荷方向に線形的に大きくなる。

以上のように、ゴム支承の曲げせん断変形とそれに起因する取付ボルトに作用する軸力の傾向を把握した。しかし、本結果はせん断ひずみ 70% までであり、地震時に想定される高せん断ひずみ領域には達していない。このため、今後、本実験結果を再現できる解析モデルを構築し、そのモデルに基づいて高せん断ひずみ領域での取付ボルト挙動の検討を進めていく。

謝辞：浜松市市役所道路企画課の山本正孝氏、瀧上工業株式会社技術開発グループの櫻井勇太氏、株式会社川金コアテックの姫野岳彦氏、小澤亨氏には、多大なご協力をいただきました。ここに深く謝意を示します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2018.
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1996.
- 3) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 516-526, 2013.
- 4) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和志，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 527-539, 2013.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所，(独) 土木研究所：平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第 814 号／土木研究所資料第 4295 号，2014.12.
- 6) 大住道夫，星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷跡に基づく要因分析，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講演論文集，2017.7.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所，(独) 土木研究所：平成 28 年 (2016 年) 熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第 967 号／土木研究所資料第 4359 号，2017.3.
- 8) 後藤芳顕，奥村徹，海老澤健正：連続高架橋の多方向地震動下でのゴム支承と支承取付部の曲げせん断挙動，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 73, No. 3, pp. 532-551, 2017.
- 9) 本橋英樹，野中哲也，馬越一也，中村真貴，原田隆典：熊本地震の断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析，構造工学論文集，Vol. 63A, 2017.3.
- 10) 二宮智大，余野智哉，中尾尚史，大住道夫：地震の被害を行けた支承の損傷要因に関する実験的検討，第 22 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 13-20, 2019.7.
- 11) 中尾尚史，余野智哉，大住道夫：支承に用いる六角ボルトを複数配置した場合の耐力に関する検討，第 22 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 461-468, 2019.7.
- 12) 木下幸治，目崎裕太，姫野岳彦，小澤亨：超高減衰

- ゴム支承の変形挙動に及ぼす載荷方向の影響に関する実物載荷実験：土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 75(2019), No. 4, [特]地震工学論文集，Vol. 38, 2019.（登載決定）
- 13) 潘超，山口隆司，鈴木康夫：ひずみゲージを用いた高力ボルト軸力の測定法に関する検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，I-477, 2010.9.
 - 14) （社）土木学会：構造実験の手引き[2009 年版]，pp. 24, 丸善（株），2009.
 - 15) （社）日本ゴム協会免震用積層ゴム委員会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック，理工図書，2000.1.
 - 16) 深堀美英：高減衰免震ゴム，日本ゴム協会誌，第 62 巻，第 5 号，1989.
 - 17) 鶴野禎史，炭村透，金井宏司：各種ゴム支承の引張条件下における水平特性に関する研究，土木学会論文集，No. 190, 2003.
 - 18) 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），I_457-I_466, 2017.

TENSILE FORCE ACTING ON THE FIXING BOLTS CAUSED BY BENDING-SHEAR DEFORMATION OF SUPER HIGH DAMPING RUBBER BEARING

Yuta MEZAKI and Koji KINOSHITA

From previous studies, it is shown that a reason that the fixing bolts are broken during earthquakes caused by acting the combined stress based on both bending and shear deformation of rubber bearing at the fixing bolts. The objective of this study is to investigate the behavior induced by bending-shear deformation of fixing bolts of super high damping rubber bearing. Specifically, a loading system was developed that allowed bending deformation during shear deformation of rubber bearings and can simulate the fixing bolts. Then, calculation the axial force acting on the fixing bolt caused by the bending and shear deformation of the rubber bearing obtained from measuring the strain at the bolt head, and the relationship between the bending shear deformation of the rubber bearing and the force acting on the fixing bolt was grasped.