

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引張挙動

岐阜大学大学院 学生会員 ○目崎 裕太
岐阜大学 正会員 木下 幸治

1. 背景と目的

兵庫県南部地震以降、普及が拡大したゴム支承であるが、熊本地震において、ゴム層の破断のみならず、ゴム層が健全な状態にもかかわらず取付ボルトが破断するという設計では想定されていない損傷が発生した¹⁾。これにより、主桁下フランジの座屈、及び支承部周辺の上部構造の取付部に対して局部座屈が発生し、復旧に多大な時間を要した²⁾。取付ボルトのゴム層より先の破断は計意図と異なり、耐荷力を完全に喪失することから防止する必要があるため、取付ボルトを含むゴム支承の実験、解析データの蓄積が重要と考えられる。以上の背景から、熊本地震以降、取付ボルトを含むゴム支承の破断メカニズムに関する研究がなされており^{例え3)}、取付ボルトはゴム支承の曲げせん断変形に起因した合成応力（引張+せん断）により破断に至ることが示されている。今後は実験のゴム支承の変形挙動、及び取付ボルトに作用する引張力の関係、さらにはそれらを裏付ける解析モデルの妥当性の検証が求められる。一方で、実物を用いた実験は寸法効果の影響がなく、実際の影響を把握することができるため、実物の実験データの蓄積は重要と考えられる。

著者らは、曲げ変形を含まないゴム支承の水平鉛直変形挙動の把握を目的に、実物の超高減衰ゴム支承を対象として載荷実験を行ってきた⁴⁾。本概要では、**図-1**に示す支承取付ボルト(M39)を含む実物の超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形を許容するゴム支承の単調載荷実験とその解析を行い、取付ボルトの引張挙動の把握を試みた。

2. 曲げせん断変形を許容する実物ゴム支承の実験概要

2.1 実物ゴム支承概要

図-2に実物ゴム支承の寸法を示す。実物ゴム支承の種類は超高減衰ゴム支承(HDR-S)であり、製造日は2014年9月である。ゴムのせん断弾性係数 G は 1.0 N/mm^2 であり、1次形状係数は $S_1=7.72$ 、2次形状係数は $S_2=5.15$ である。また、等価剛性、及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。

2.2 載荷実験システム

図-3に構築した実験システムを示す。実験フレームは、架台、柱、治具、載荷梁で構成されている。水平荷重は容量 3000 kN の油圧ジャッキを1基使用して、載荷梁に取り付けられ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た。せん断ひずみは 20% から 70% まで 10% ずつ漸増させた。**図-4**に示すように、ゴム支承の水平変位は変位計により上沓の水平変位 δ_h を計測し、回転角は上沓の4隅に設置した変位計により上沓と下沓の相

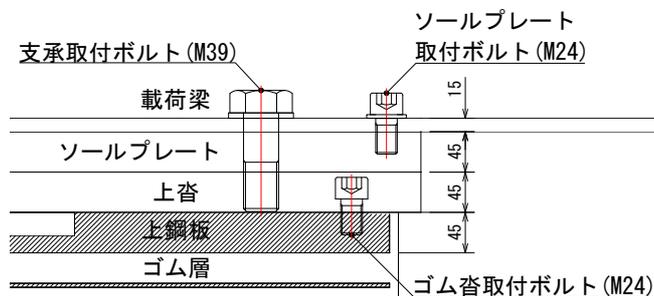


図-1 支承取付部詳細図 (単位: mm)

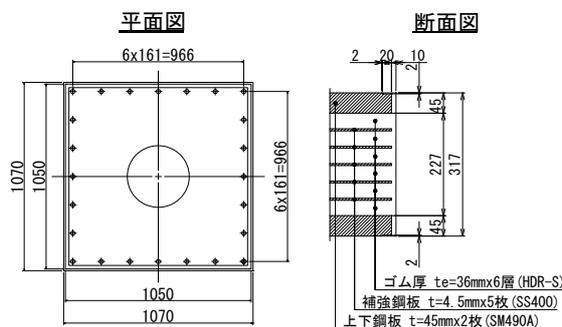


図-2 実物ゴム支承寸法 (単位: mm)

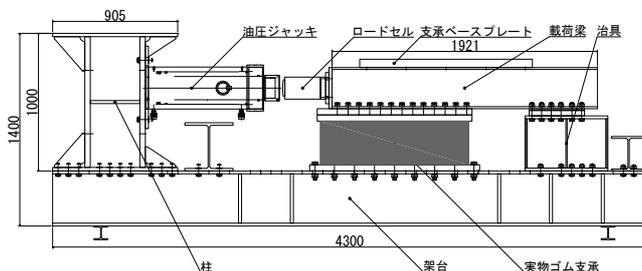


図-3 実験システム (単位: mm)

対鉛直変位 $v_{b1} \sim v_{b4}$ を計測することで算出した。また、解析において取付ボルトの締付けによって発生する初期導入軸力の影響を考慮しなくてもよいことで実験と解析の結果を比較しやすくするために、取付ボルトの初期導入軸力をトルクレンチにて管理した場合と、ゼロとした場合の2種類の実験を行った。

2.3 取付ボルトに作用する引張力の計測方法

取付ボルトに作用する引張力は、ボルトヘッドに貼り付けた3軸ひずみゲージにより主ひずみを計測し、実験前にあらかじめ行ったキャリブレーション結果により換算した⁵⁾。主ひずみは**図-4**に示すように載荷方向に向かって左右の2列の合計8本を計測した。なお、本実験においてひずみゲージはボルト締付け後に貼り付けたため、以降換算される引張力は載荷によりボルトに付加的に作用したものであることに注意されたい。

キーワード：超高減衰ゴム支承，実物大実験，曲げせん断変形，取付ボルト，引張力

連絡先：〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部 社会基盤工学科 TEL：058-293-2424

3. 荷重実験結果

図-5 に、ボルト初期軸力の有無のせん断ひずみ $\gamma=20\sim70\%$ の荷重変位関係を正負交番荷重実験の結果 ($\gamma=50\%$) と合わせて示す。初期軸力なしの実験は初期軸力ありの実験後に行っているため、繰り返し荷重の影響により最大水平荷重が低下している。両者ともに、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荷重と同様な傾向を示しており、 $\gamma=50\%$ では、正負交番荷重と同程度の最大水平荷重を示した。以上より、曲げ変形を含む片押し単調荷重でも、正負交番荷重と似たような荷重変位関係を得ることができたため、4.の解析においてせん断剛性には曲げ変形を含まない正負交番荷重の結果を用いることができると言える。

図-6 に取付ボルト 1 本あたりに作用する付加軸力とゴム支承回転角の関係を北側南側合わせて、さらに初期軸力の有無に分けて示す。なお、4.で行った解析結果も合わせて示している。ゴム支承の回転は荷重方向と同じ向きに生じた。初期導入軸力ありの場合において、ボルト付加軸力が増加しない領域が見られる。これは、取付部に作用する引張力がボルトの初期導入軸力により発生する板間の材間圧縮力の減少とつり合って伝達されるからである。一方で、この現象は初期導入軸力なしの実験におけるボルト III, IV では見られなかった。

4. 荷重実験の再現解析

図-7 に解析モデルを示す。解析ソフトは UC-win/FRAE(3D)を使用した。解析対象はボルト初期導入軸力なしの実験である。モデルは、ばね要素と梁要素を用いて構成し、節点 a, m と b, n はそれぞれ 2 重節点とした。ゴム部、取付ボルト部、荷重梁は剛体梁要素で接続している。境界条件はモデル最下端を完全固定、荷重梁右端を y 方向の移動のみ固定し、強制変位を荷重梁左端に x 軸正方向に与えた。ゴム部には、積層ゴムの断面を 10 分割し、各分割断面の鉛直剛性を持つ並列鉛直ばね、及びせん断ばねをゴム部下端に配置した。鉛直ばね剛性には、著者らの実施した実物ゴム支承の単純圧縮引張試験結果⁴⁾を使用した。せん断ばね剛性は正負交番荷重実験結果⁴⁾を使用し、図-8(b)に示すような本実験で生じた残留変位分の Gap を持つバイリニアモデルとした。取付ボルト部は図-8(c), (d)で表される材間接触ばねとボルトの軸剛性を持つばねで構成した。

図-6(b)に解析結果を示す。解析値はゴム支承の回転角、及び取付ボルト付加軸力ともに、実験値の 99%、90% となり、よく再現できていると言える。実験のボルト付加軸力の最大値が I から IV にかけて線形的に大きくなる点のみ再現できていないが、本解析モデルでは上沓の断面、並びにその他取付ボルトを考慮していないため、実験中に計測された上沓端部の 2 次的な曲げ変形を再現できていないことが要因と考えられる。

今後、構築した解析モデルを用いた本実験の $\gamma=70\%$ 以

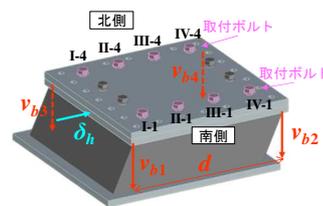


図-4 ゴム支承計測箇所

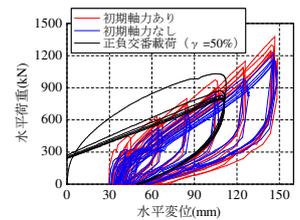
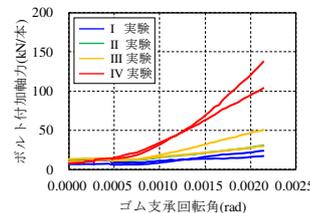
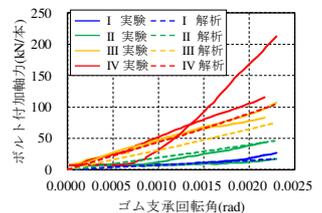


図-5 荷重変位関係



(a) 初期導入軸力あり



(b) 初期導入軸力なし

図-6 取付ボルト付加軸力推移の実験と解析の比較

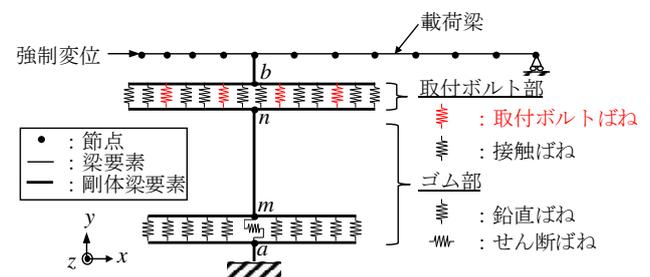
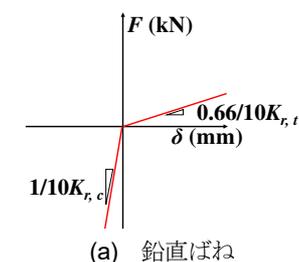
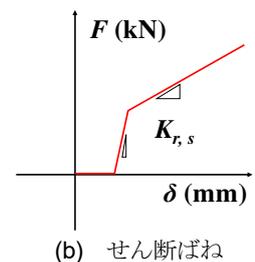


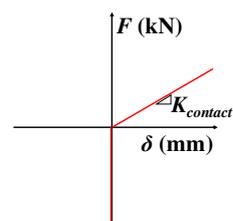
図-7 解析モデル



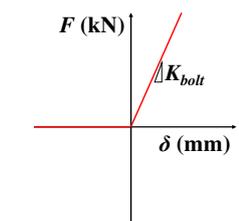
(a) 鉛直ばね



(b) せん断ばね



(c) 材間接触ばね



(d) ボルトばね

図-8 各ばね剛性

上のせん断ひずみ領域の解析を行い、取付ボルトに作用する引張力、及びせん断力から取付ボルトの合成応力照査を行うことで取付ボルトの破断タイミングを検討する。
参考文献：1)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，2014.12.2) (社)日本道路協会：道路橋支保便覧，丸善，2018.3)後藤ら：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. 4)木下ら：超高減衰ゴム支承の変形挙動に及ぼす荷重方向の影響に関する実物荷重実験：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 (報告)，pp. 754-762, Vol. 38, 2019. 5)山口ら：高力ボルト引張継手を用いた箱型断面接合部の組み合わせ荷重下における力学的挙動，構造工学論文集，Vol. 47A, pp. 103-112, 2001.3. 6)林訓裕：長期間供用により経年劣化した道路橋免震ゴム支承の耐震性能評価に関する研究，京都大学博士論文，2016.9.