

# 超過作用時におけるゴム支承ボルトの破断に関する解析的検討

Analysis of rubber bearing bolts fracture during an earthquake

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 寺澤貴裕 (Takahiro TERASAWA)  
 正 員 佐藤 京 (Takashi SATO)  
 正 員 安中新太郎 (Shintaro YASUNAKA)

## 1. はじめに

平成 29 年 11 月に改訂された道路橋示方書では、設計地震動（レベル 2 地震動）に対し、橋を構成する各構造が要求される限界状態を超えないよう耐荷性能を満足するように設計を行うことが規定されている。しかしながら、設計地震動を超える作用（以下、超過作用）に対しては、構造上の配慮事項の記載はあるものの、具体的な規定が示されていない。

道路橋には緊急輸送道路等、地域防災計画において災害時に期待される機能を保持することが求められ、超過作用による損傷に対しても早期復旧、早期機能確保の観点から致命的な損傷を回避する必要がある。そのためには点検や補修が容易な部位に損傷を誘導・制御する設計を実現することが今後求められると考えられる。著者らはこれまでに超過作用に対する損傷制御手法として、橋脚と支承の耐力を階層化し、損傷部位を支承に誘導することが望ましい損傷シナリオであることを報告している。

そこで本研究では、超過作用時における道路橋の望ましい損傷シナリオの実現性検証を目的として、ゴム支承の 3 次元非線形モデルを用いた FEM による静的漸増載荷解析の結果から、超過作用時における支承各部位の応力状態について検証を行った。本報では、超過作用時におけるゴム支承の各取り付けボルトの応力状態の照査により、下沓取付ボルトを損傷誘導部材とする可能性について報告する。

## 2. 解析モデルと荷重条件

図-1 及び図-2 に支承の解析モデルを示す。積層ゴム部の断面寸法は、300mm×300mm、厚さ 15mm×3 層=45mm、内部鋼板の厚さは 3.2mm、上下鋼板の厚さは

各 28mm である。上沓及び下沓（厚さ各 28mm）と積層ゴムを接続する支承取付ボルトは M16 を上下各 8 本、また、下沓とベースプレート（厚さ 32mm）を接続する下沓取付ボルトは M16 を 4 本配置している。ボルト材質は SCM435 とした。

解析モデルはモデル及び荷重の対称性を考慮して中心線で分割する 1/2 モデルとし、鋼材・ボルトに材料非線形要素、ゴム体に超弾性体要素を用いた。鋼板の間の摩擦は、上沓と上鋼板、下鋼板と下沓の間は鋼-鋼の摩擦係数として  $\mu=0.2$ 、下沓とベースプレートの間は PTFE 板と SUS 板との摩擦を想定して  $\mu=0.1$  とした。ゴムは G10 の天然ゴムとし、文献 2) を参考にモデル化した。なお、G10 とはゴム支承に適用されるゴムの静的せん断弾性係数が  $1.0\text{N/mm}^2$  であることを示しており、これはゴム支承に適用される規格値の平均的な剛性である。

ボルトの破断基準値は、軸応力-軸ひずみ関係、せん断応力-せん断ひずみ関係を定義した。軸応力-軸ひずみ関係は、文献 2) に準じて引張試験から得たものを用

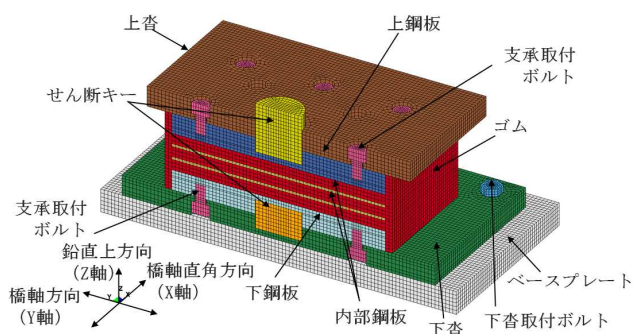


図-1 解析モデル（鳥観図）

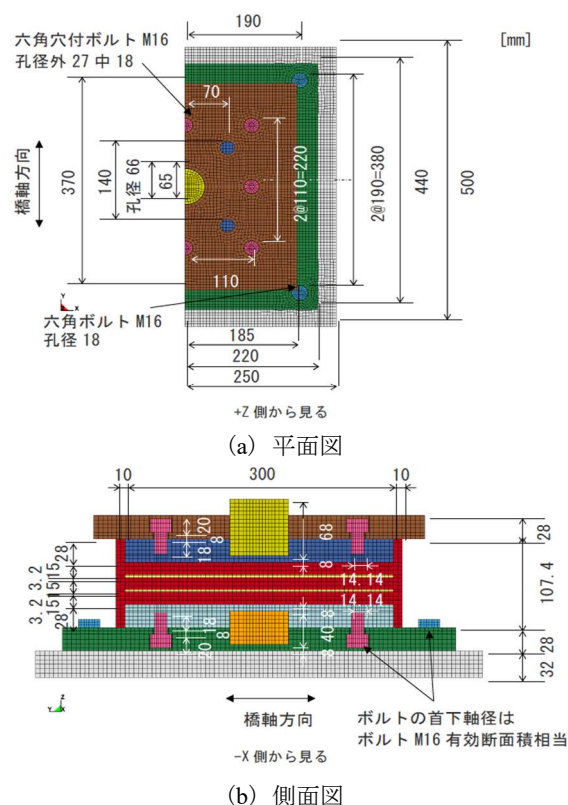


図-2 解析モデル（平面図及び側面図）

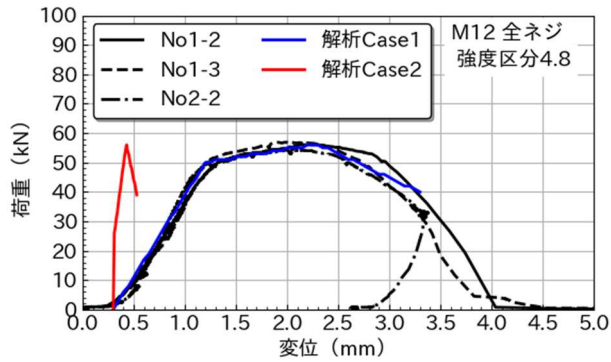


図-3 ボルトのせん断荷重－せん断変位関係図

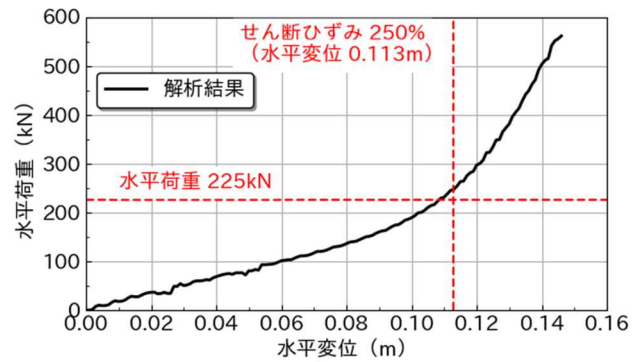


図-4 水平荷重と水平変位の関係

いた。せん断応力－せん断ひずみ関係は、M12 全ねじ、強度区分 4.8 のボルトを用いたせん断試験を実施し、図-3 に示す荷重－変位関係を得た後、ひずみ分布等を再現できるように Timoshenko 梁モデルを用いて挙動を同定した結果（解析 Case1）を用いた。なお、解析 Case2 とは、ボルトの公称値により挙動を再現した結果である。

荷重条件は、鉛直荷重 360kN を載荷し、上査と下査の平行を保ったまま、せん断ひずみ 320% 程度まで水平方向に強制変位を与えた。なお、下査取付ボルトは、施工時には軸力管理が行われないため、本解析においても締結力は考慮していない。

### 3. 解析結果

#### 3.1 水平荷重－水平変位曲線

図-4 に解析で得られた水平荷重－水平変位関係を示す。ゴムの静的せん断弾性係数が  $1.0\text{N/mm}^2$  であることから、支承の設計に用いられるせん断ひずみ 250% 時（水平変位 0.113m）の水平荷重は 225kN と計算される。一方、解析結果ではこの領域において僅かにゴムのハードニングの影響が見られるものの、同じせん断ひずみに対する水平荷重は前述した計算値とほぼ一致している。その後、水平変位が大きくなるとハードニングによりさらに水平荷重が大きくなり、変位 0.14m（せん断ひずみ 311%）時に水平荷重 500kN、解析の最終ステップでは変位 0.156m（せん断ひずみ 347%）時に水平荷重 561kN となった。

#### 3.2 ゴムの応力

図-5 に支承に水平変位が生じた状態におけるゴムの最大の主応力成分の大きさの分布を示す。図より、下鋼板の角部で引張応力が最大となっていることが確認できる。また、ゴムのせん断ひずみと下鋼板の角部のゴム応力の関係を図-6 に示す。支承の設計に用いられるせん断ひずみ 250% を超える領域においてもゴムの応力は増加するが、破断応力（ $=63.1\text{N/mm}^2$ ）<sup>2)</sup> には達しておらず、超過作用に達してもゴムの破断は発生しないと考えられる。

#### 3.3 下査位置における水平反力の分担

図-7 に下査とベースプレートの間の荷重の伝達に係わるボルト接触力と摩擦力の関係を示す。ここで、ボルト接触力とは、解析においてボルト軸の側面と下査のボルト孔の間に配置した接触バネの反力の合計値である。

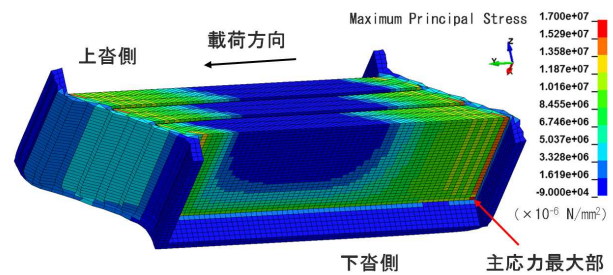


図-5 ゴムの主応力分布

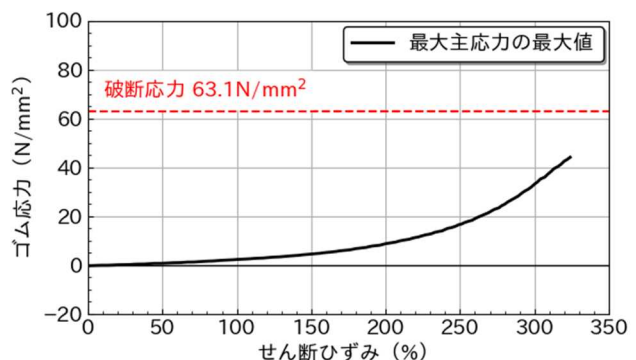


図-6 ゴムの最大主応力の最大値とせん断ひずみ関係

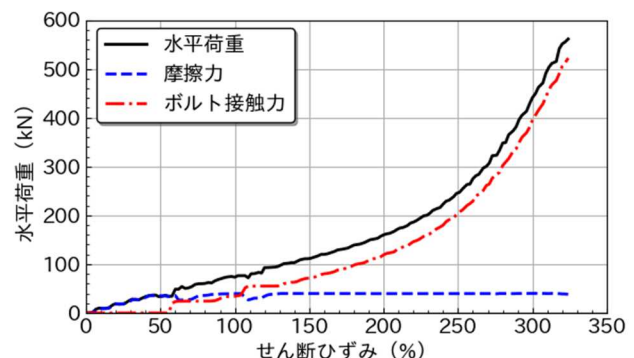


図-7 下査取付ボルトと鋼板間の摩擦抵抗による水平力分担

図より、水平荷重は摩擦係数と鉛直荷重から算出される摩擦力とほぼ同程度である約 40kN までは摩擦力が支配的となっているが、それ以降はボルト接触力が支配的と

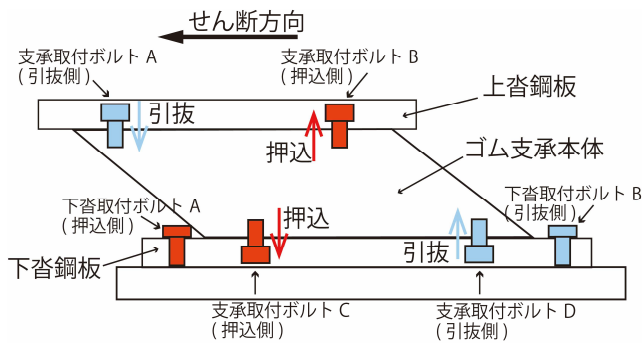


図-8 支承に水平変位が生じた状態における各取付ボルトの挙動

なることが確認できる。

### 3.4 下沓取付ボルトの応力

図-8に支承に水平変位が生じた状態における下沓取付ボルト及び支承取付ボルトの挙動を示す。図に示す通り、下沓取付ボルトはボルトAが押込側、ボルトBが引抜側、また、支承取付ボルトはボルトA及びボルトDが引抜側、ボルトB及びボルトCが押込側となると推察される。

図-9にゴムのせん断ひずみと下沓取付ボルト応力の関係を示す。また、図-10に同ボルトの破断判定を示す。ボルトの破断判定は、文献2)を参考に、(式-1)による $D$ 値（合成応力度の判定）が1.0以上で破断とした。

$$D = (\sigma_t / \sigma_{tf})^2 + (\tau_s / \tau_{sf})^2 \quad (\text{式-1})$$

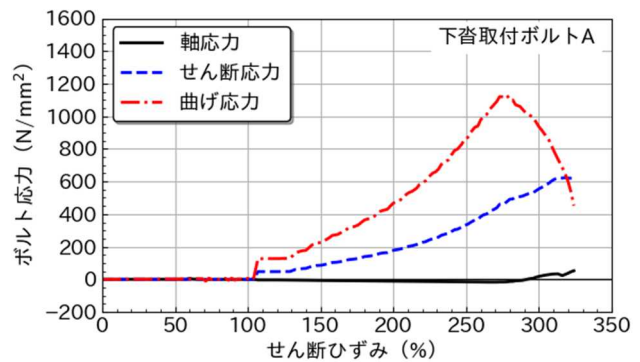
$\sigma_t$ ：ボルト軸応力， $\tau_s$ ：ボルトせん断応力， $\sigma_{tf}$ ：引張破断強度， $\tau_{sf}$ ：せん断破断強度（ $\sigma_{tf} / \sqrt{3}$ ）

図-9より、ゴムのせん断ひずみに対し、引抜側のボルトより押込側で遅れて応力が発生することが分かる。押込側ではせん断ひずみが100%を超えた後、せん断応力及び曲げ応力が増加し、せん断ひずみの増加とともに両者も増加するが、軸応力についてはほぼ0のままである。一方、引抜側ボルトでは、せん断ひずみが50%を超えた後、曲げ応力が急激に増加する。その後、曲げ応力はすぐに一定値となることからここでボルトの降伏が生じたと推察される。また、せん断応力及び軸応力についても曲げ応力発生時に増加するが、曲げ応力と比較して小さいことが分かる。せん断ひずみの増加に伴い再び曲げ応力の増加が確認できる。これはひずみ硬化によるものと推察される。

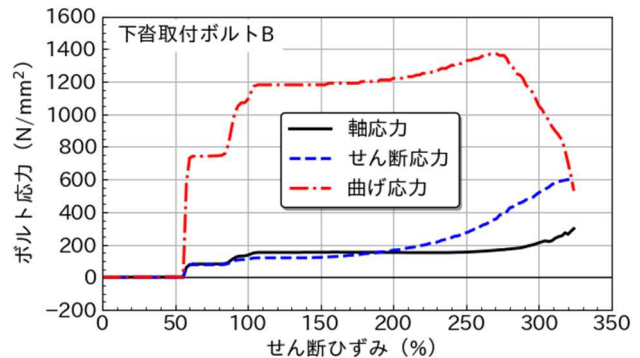
このように、押込側と引張側ではボルト応力の発生状態が大きく異なるが、図-10より、ゴムのせん断ひずみとボルトの $D$ 値の関係は押込側、引張側でほぼ同じ傾向であることが分かる。僅かにせん断ひずみの大きさに差が見られるものの、せん断ひずみ約310%において押込側、引抜側ともにボルトの $D$ 値が1.0を超えている。よって、このせん断ひずみ領域において下沓取付ボルト破断が起こるものと推察される。

### 3.5 支承取付ボルトの応力

図-11にゴムのせん断ひずみと支承取付ボルトの応



(a) ボルトA（押込側）



(b) ボルトB（引抜側）

図-9 下沓取付ボルトの応力

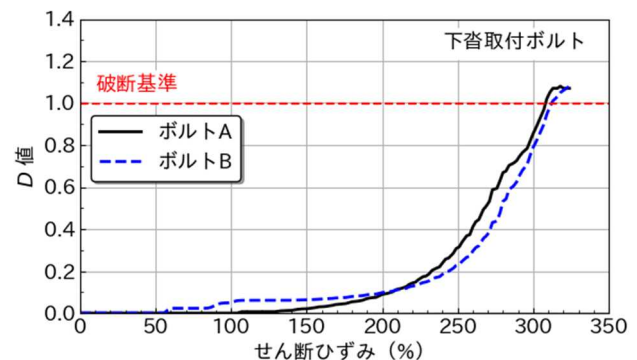


図-10 下沓取付ボルトの $D$ 値

力の関係を示す。また、図-12には同ボルトの破断判定を示す。図-11より、支承取付ボルトの応力は下沓取付ボルトに比較して小さいことが分かる。これは、上沓及び下沓と支承間にせん断キーが設けられており、これによる力の伝達が生じるためであると考えられる。支承取付ボルトでは、下沓取付ボルトで見られたような応力の急増及びボルトの降伏は確認できない。また、押込側は下沓取付ボルトと同様に、軸応力が曲げ応力及びせん断応力と比較して小さい。しかしながら、引抜側においては、下沓取付ボルトの傾向とは異なり、曲げ応力は小さく、軸応力及びせん断応力が支配的であることが確認できる。図-12より、支承取付ボルトの $D$ 値は超過作用時においても破断判定である1.0を大きくした下回ることが確認できる。このことから、超過作用時には下沓取付ボルトの破断が先行するものと考えられ、同ボルトを損傷誘導部材とすることが可能であると考え

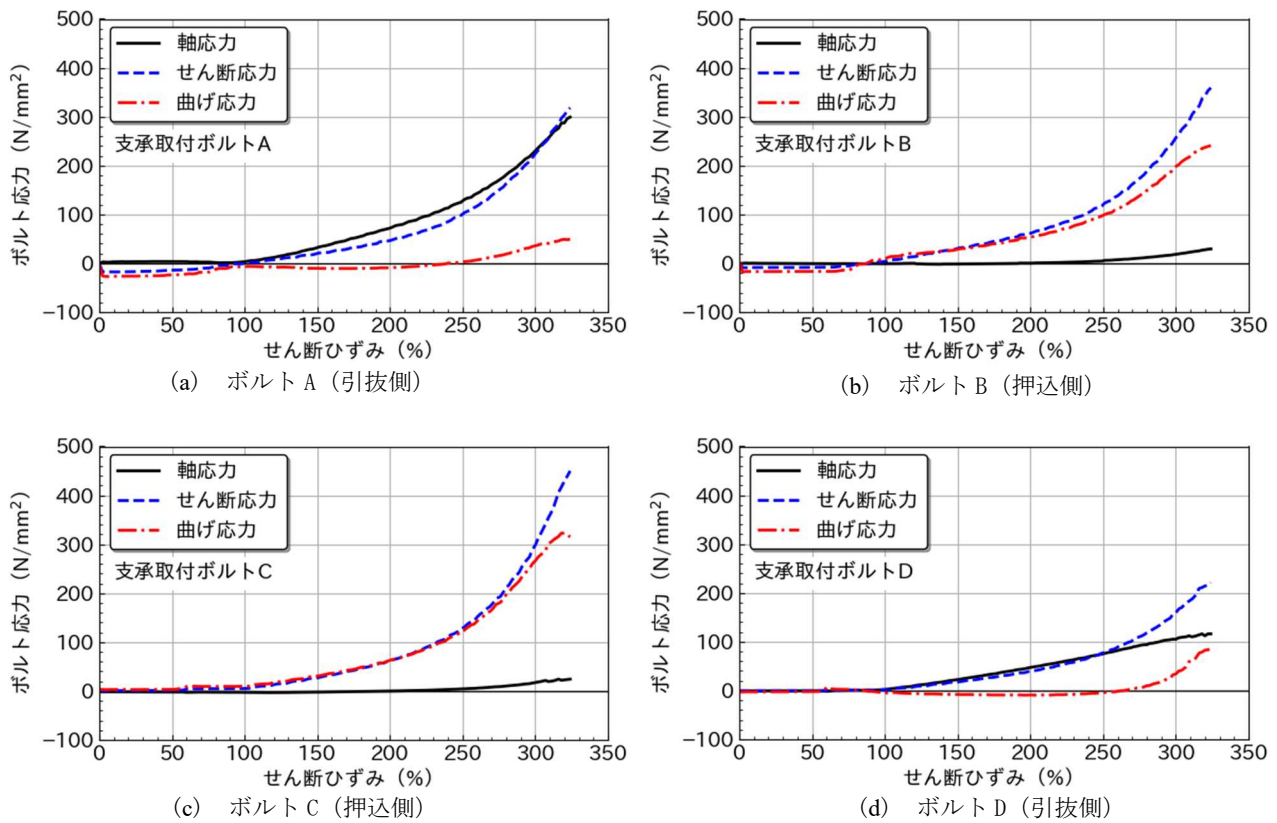


図-11 支承取付ボルトの応力

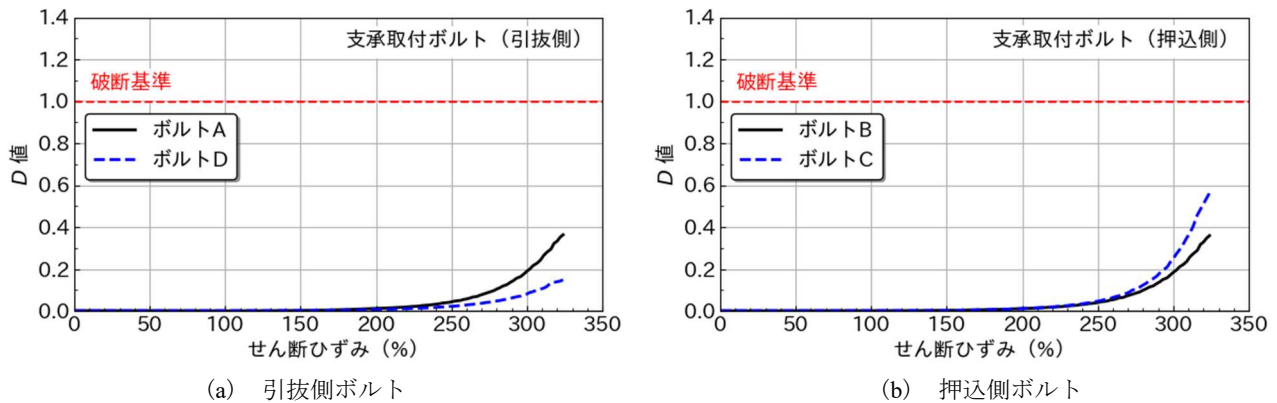


図-12 支承取付ボルトの  $D$  値

られる。

#### 4. まとめ

本研究では、超過作用時における道路橋の望ましい損傷シナリオの実現性検証を目的として、ゴム支承の3次元非線形モデルを用いた FEM による静的漸増载荷解析の結果から、超過作用時における支承各部位の応力状態について検証を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 下査取付ボルトでは、ゴムのせん断ひずみに対し、引抜側のボルトより押込側で遅れて応力が発生する。
- 2) 合成応力度による破壊判定法 ( $D$  値) を用いた場合、ゴムのせん断ひずみの増加に伴う下査取付ボルトの  $D$  値の増加傾向は押込側、引抜側でほぼ同様であり、

せん断ひずみ約 310% でボルト破断に至る。

- 3) 支承取付ボルトに発生する応力は、下査取付ボルトに発生する応力より小さく、超過作用時には下査取付ボルトの破断が先行することが想定される。このことから、下査取付ボルトを損傷誘導部材とすることが可能である。

#### 参考文献

- 1) 秋本光雄, 西弘明, 佐藤京: 超過作用に対する桁橋の損傷シナリオに関する検討, 第 21 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, pp225-228, 2018.7.
- 2) 熊本地震対応特別委員会: 2016 年熊本地震被害調査・分析報告書, 2019 年 3 月, (一般社団法人) 九州橋梁・構造工学研究会