

ゴム支承取付ボルトの超過作用時における 破断に関する解析的検討

寺澤 貴裕¹・佐藤 京²・安中 新太郎¹

¹正会員 修（工）（国研）土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員（国研）土木研究所寒地土木研究所

1. はじめに

道路橋示方書¹⁾による設計では、具体的には考慮されない不測の外力に対しては、構造設計上配慮する旨の記載はあるものの、その具体的な内容が示されていない。道路橋は、設計地震動を超える作用（以下、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し制御するための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損傷シナリオが望ましいものであることを報告²⁾している。

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の検証を目的として、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を行い、そこで得られた超過作用時における支承各部位の応力状態から、下査とベースプレートを接続する下査取付ボルトを損傷誘導部材とすることの適否について検討した。

2. 数値解析概要

図-1に支承の解析モデル図を示す。モデルは支承構造および荷重の対称性を考慮し、中心線で分割した1/2モデルとした。ゴム体には超弾性体要素を、鋼材・ボルトには材料非線形要素をそれぞれ用いた。積層ゴム部は、断面寸法300mm×300mm、ゴム厚さ15mm×3層=45mm、内部鋼板は厚さ3.2mm、上・下鋼板はそれぞれ厚さ28mmである。ゴムはG10の天然ゴムとし、文献3)を参考にモデル化した。なお、G10とはゴムの静的せん断弾性係

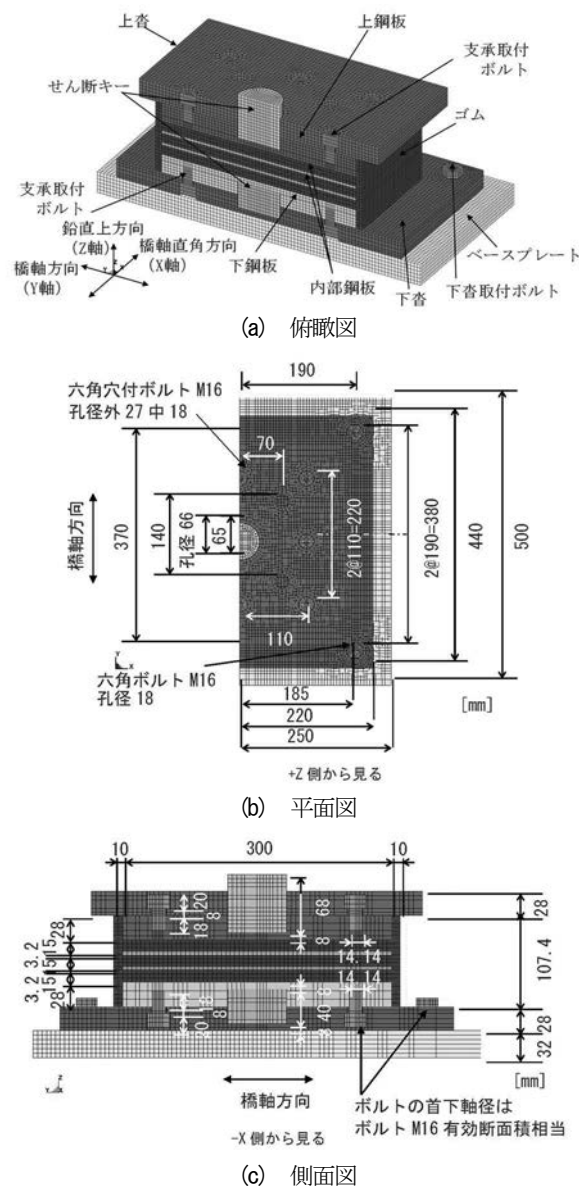


図-1 解析モデル図

数が 1.0N/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にあたる。上・下鋼板と上沓および下沓を接続するボルト（以下、支承取付ボルト）はM16を上下に各8本、また、下沓とベースプレートとを接続するボルト（以下、下沓取付ボルト）はM16を4本配置している。本研究では、この下沓取付ボルトを損傷誘導部材として扱った。この部材に損傷を誘導するためには、下沓とベースプレート間の水平荷重伝達をできるだけ同ボルトに集中させる必要があると考えられる。そのため、図-2に示すように下沓とベースプレート間にPTFE板とSUS板を設置し摩擦力による水平荷重伝達の低減を図った。なお、摩擦係数は道路橋示方書⁹⁾に示された $\mu=0.1$ とした。上沓と上鋼板、下沓と下鋼板の間の摩擦係数は、鋼-鋼の摩擦係数として $\mu=0.2$ とした。ゴムの破断応力は、文献3)に準じて 63.1N/mm^2 とした。ボルトには、軸応力-軸ひずみ関係およびせん断応力-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3)に準じて引張試験から得たものを用いた。せん断応力-せん断ひずみ関係は、鋼材SCM435の $\sigma-\varepsilon$ 関係とポアソン比0.3（降伏後は0.5）から得られるものを用いた。数値解析は、上部工荷重を想定した鉛直荷重 360kN を載荷し、上沓と下沓の平行を保ったまま、上沓に水平方向に強制変位を与えた。支承の設計に用いられるゴムのせん断ひずみ250%以降の超過作用を想定し、水平変位の最大値はせん断ひずみ320%程度とした。なお、本解析にはLS-DYNAを使用した。

3. 数値解析結果

(1) せん断応力-せん断ひずみ

図-3に解析で得られたゴムのせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。せん断ひずみ225%程度までは図中破線で示したせん断弾性係数 1.0N/mm^2 となるせん断応力-せん断ひずみ関係とほぼ一致しており、それ以降顕著にハードニングが生じていることが確認できる。なお、図中に示したとおり、せん断ひずみ250%及び320%の時の上沓の水平変位は0.113m及び0.144mであった。

(2) ゴムの主応力

図-4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、下鋼板の角部のゴム主応力-せん断ひずみの関係を図-5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主応力は増加するが、破断応力には達していないことが確認できる。このことより、増加する作用が超過範囲に達した時点ではゴ

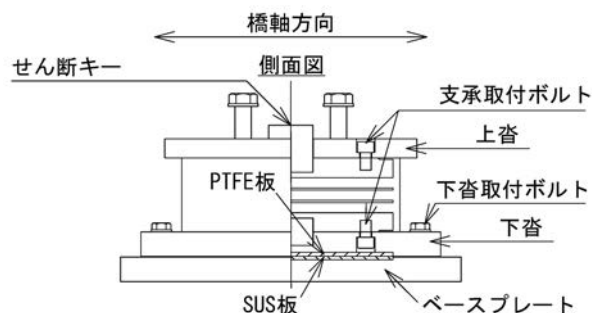


図-2 数値解析で考慮した PTFE 板と SUS 板の配置

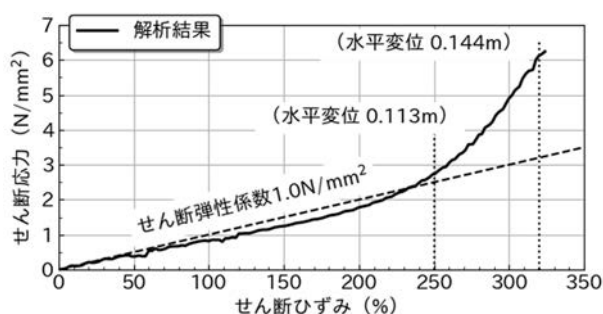


図-3 ゴムのせん断応力-せん断ひずみ関係

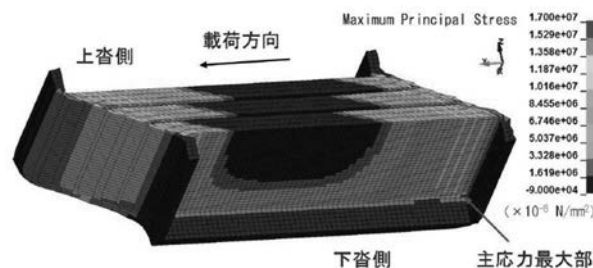


図-4 ゴムの主応力分布

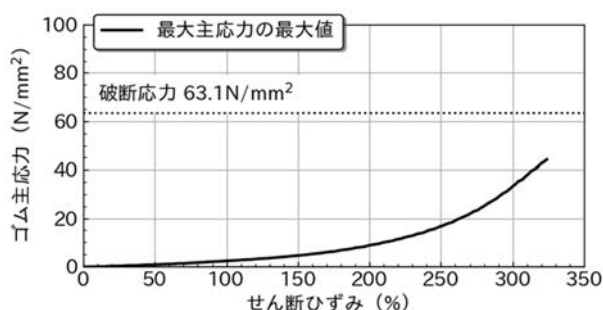


図-5 ゴムの最大主応力の最大値-せん断ひずみ関係

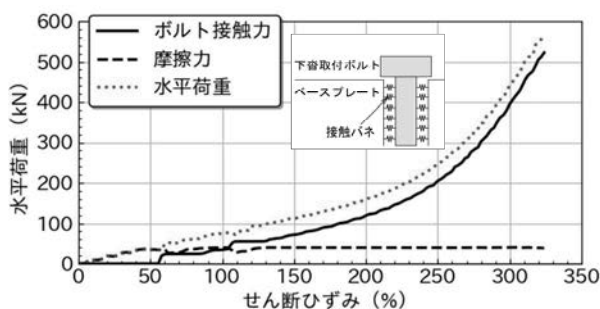


図-6 ボルト接触力および摩擦力ーせん断ひずみ関係

ムは破断しないと考えられる。

(3) 下沓位置における水平反力の分担

図-6に下沓とベースプレート間の水平荷重の伝達に係わるボルト接触力および摩擦力ーゴムのせん断ひずみ関係を示す。ここで、ボルト接触力とは図中に示すとおり、数値解析においてボルト軸の側面と下沓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、それ以降ではボルト接触力が支配的となることが確認できる。

(4) 支承取付ボルトの応力

図-7に支承に水平変位が生じた状態における支承取付ボルトおよび下沓取付ボルトの挙動を示す。図に示すとおり、支承取付ボルトはボルトAおよびボルトDが引抜側、ボルトBおよびボルトCが押込側、また、下沓取付ボルトはボルトXが引抜側、ボルトYが押込側になると推察される。

図-8に支承取付ボルト応力ーゴムのせん断ひずみ関係を示す。図より、引抜側（ボルトA,D）の軸応力およびせん断応力、押込側（ボルトB,C）のせん断応力および曲げ応力はせん断ひずみの増加とともに応力が増加していることが確認できる。しかしながら、引抜側の曲げ応力および押込側の軸応力はせん断ひずみ250%程度まではほぼ0のままであり、それ以降に応力が増加することが確認できる。

図-9に同ボルトの破断判定を示す。ボルトの破断判定は、文献3)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。

$$D = \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{tf}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sf}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_t ：ボルト軸応力、 τ_s ：ボルトせん断応力、 σ_{tf} ：引張破断強度、 τ_{sf} ：せん断破断強度（ $\sigma_{tf}/\sqrt{3}$ ）

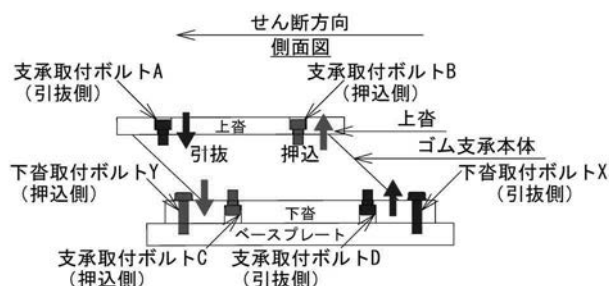
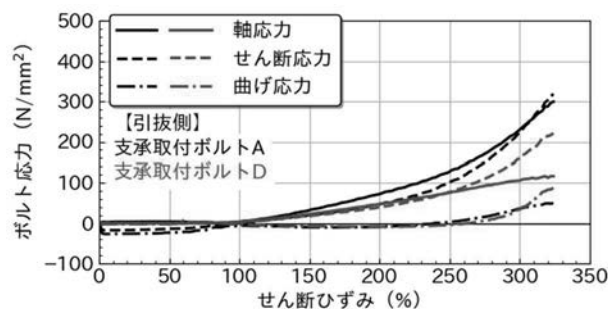
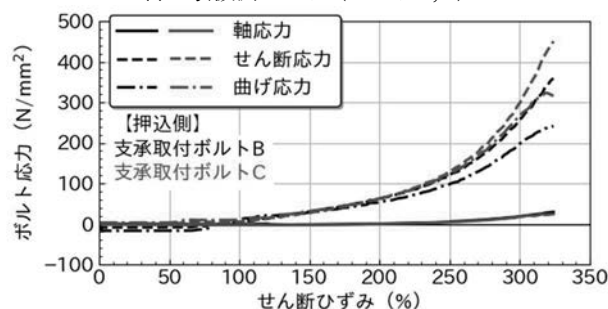


図-7 支承に水平変位が生じた状態における各取付ボルトの挙動

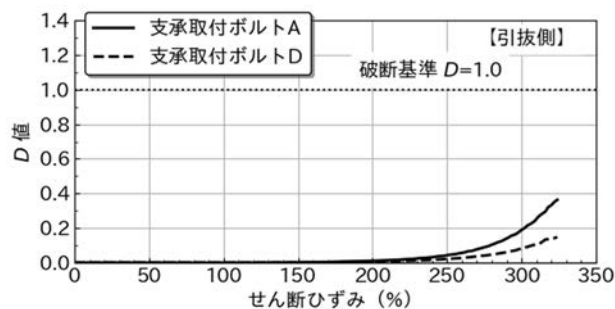


(a) 引抜側ボルト（ボルトA,D）

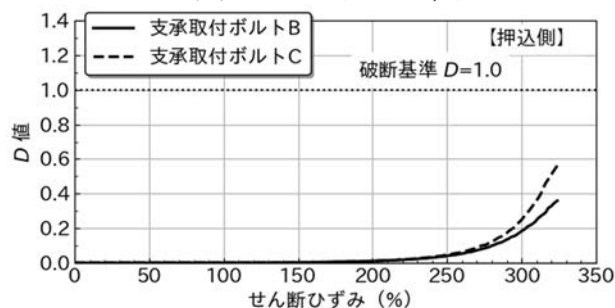


(b) 押込側ボルト（ボルトB,C）

図-8 支承取付ボルト応力ーせん断ひずみ関係



(a) 引抜側ボルト（ボルトA,D）



(b) 押込側ボルト（ボルトB,C）

図-9 支承取付ボルトのD値ーせん断ひずみ関係

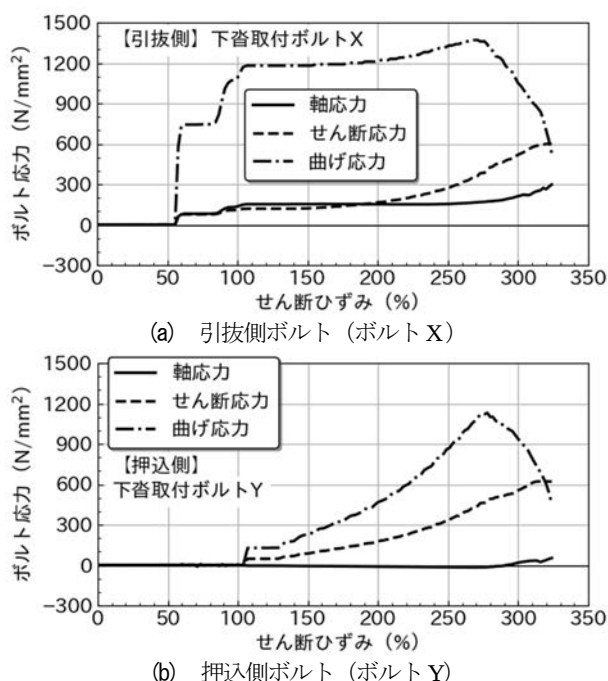


図-10 下査取付ボルト応力ーせん断ひずみ関係

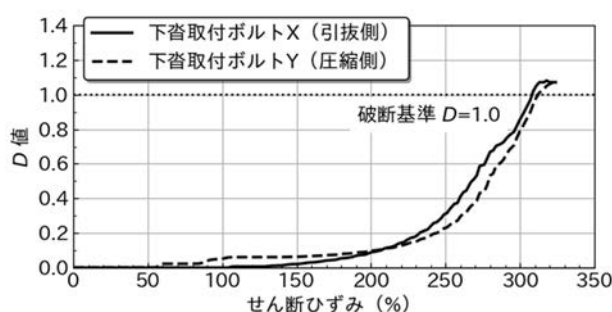


図-11 下査取付ボルトのD値ーせん断ひずみ関係

図より、支承取付ボルトのD値は引抜側、押込側ともにせん断ひずみ320%においても破断判定である $D=1.0$ を大きく下回っていることが確認できる。このことより、増加する作用が超過範囲に達した時点では支承取付ボルトは破断しないと考えられる。

(5) 下査取付ボルトの応力

図-10に下査取付ボルト応力ーゴムのせん断ひずみ関係を示す。また、図-11には同ボルトの破断判定を示す。図より、引抜側、押込側ともに支承取付ボルトと比較して応力が大きいことが確認できる。引抜側（ボルトX）では図-10(a)より、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ことが確認できる。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、せん断応力およ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。押込側（ボルトY）では図-10(b)より、ゴムのせん断ひずみに対し、引抜側のボルトより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、せん断応力およ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。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-11より、ボルトのD値ーゴムのせん断ひずみ関係は押込側、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、引張側ともにボルトの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査取付ボルト破断が起こるものと推察される。このことから、超過作用時には同ボルトを損傷誘導部材とし設計することが可能であると考えられる。

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の検証を目的として、ゴム支承の3次元非線形モデルを用いたFEMによる静的漸増荷重解析を行い、そこで得られた超過作用時における支承各部位の応力状態から、下査とベースプレートを接続する下査取付ボルトを損傷誘導部材とすることの適否について検討した。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) 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、合成応力度による破壊判定（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る。
- 3) 下査取付ボルトは、せん断ひずみ約310%で破断に至ることから、同ボルトを損傷誘導部材として設計することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編，2017.11
- 2) 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.
- 3) 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