

橋軸方向の地震動が作用する高架橋システムにおけるゴム支承と支承取付ボルトの力学挙動

九州産業大学 正会員 奥村徹

1. はじめに

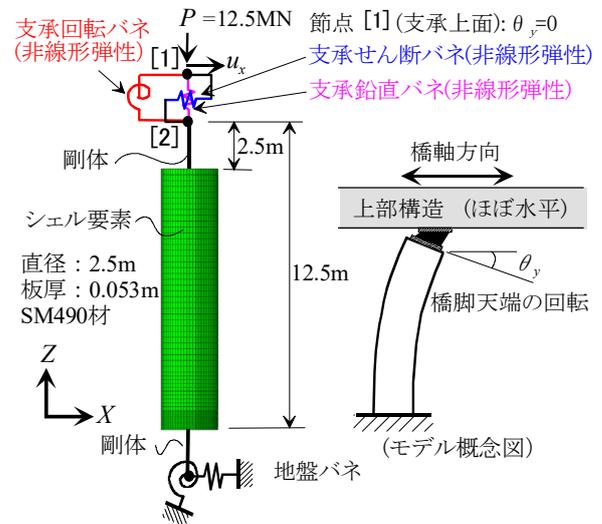
ゴム支承を有する高架橋に橋軸方向の地震動が作用する場合、主桁はほぼ水平を維持した状態で橋脚天端は橋脚の損傷を伴うたわみ変形により橋軸直角軸まわりに回転する。このため、ゴム支承には橋軸直角軸まわりの相対回転角と純曲げモーメントが生じる。著者らは連続高架橋模型の加振実験により検証を行った数値解析に基づき、通常の設計では無視されている上記のメカニズムによる純曲げモーメントが支承取付ボルトの破断に影響を及ぼす可能性があることを指摘した¹⁾。本研究では、上記の解析において非線形バネにより簡易的に考慮した支承部の力学挙動をより詳細に検討するために、支承取付ボルトを含むゴム支承単体のFE解析を行い、せん断、曲げ、および圧縮・引張作用下におけるゴム支承ならびに支承取付ボルトの力学挙動について考察した。

2. 解析対象とモデル

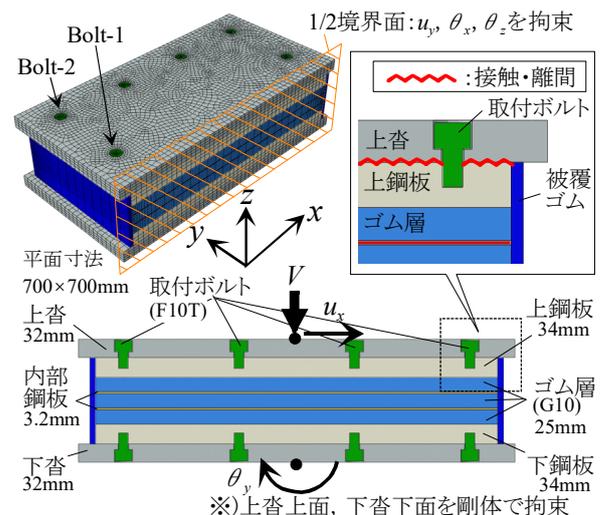
高架橋に橋軸方向の地震慣性力が作用する場合を想定して、図-1a)に示すモデル（橋脚・支承モデル）を設定する。支承の挙動をあらわす非線形弾性バネは支承単体のせん断、曲げ、および圧縮の各作用に対する載荷実験に基づき設定している²⁾。橋脚・支承モデルに一定の死荷重下で橋軸方向に漸増繰り返し載荷を行い、支承上下面位置（節点 [1], [2]）における変位成分 (u_x, θ_y) の履歴をゴム支承単体のソリッド要素を用いた FE モデル（図-1b) 支承詳細モデル）の上下面に与える。変位制御により解析を行う理由は、連続高架橋に設置された支承のせん断ひずみと相対回転角の地震時の応答はゴム支承の回転剛性に対してほとんど影響を受けない¹⁾ためである。支承詳細モデルではゴムに圧縮性を考慮した超弾性の材料構成則²⁾を用い、静水圧応力が引張状態になった際の内部のボイド発生による剛性低下を考慮する（図-2）。

3. 高架橋に設置されたゴム支承の力学挙動

橋脚・支承モデルの橋脚頂部の水平荷重—水平変位 ($F_x - u_x$) 関係とともにゴム支承の平均せん断応力—平均せん断ひずみ ($\tau - \gamma$) 関係、純曲げモーメント—相対回転角 ($M_{\theta_y} - \theta_y$) 関係を図-3 に示す。図-3 b), c) では参考として橋脚・支承モデルに用いた非線形弾性バネの



a) 橋脚・支承モデル



b) 支承詳細モデル (1/2 モデル)

図-1 解析モデルの概要

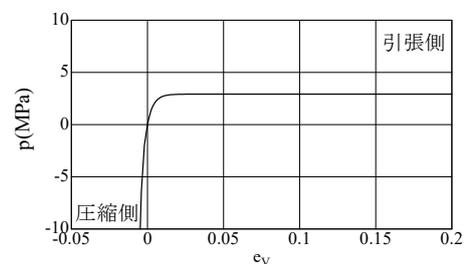


図-2 ゴムの静水圧応力—体積ひずみ関係

履歴曲線を示している。支承詳細モデルの $\tau - \gamma$ 関係については橋脚・支承モデルの非線形弾性バネの履歴とよく

キーワード ゴム支承, 取付ボルト, 高架橋, 地震動
連絡先 〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台 2-3-1 九州産業大学 TEL 092-673-5671

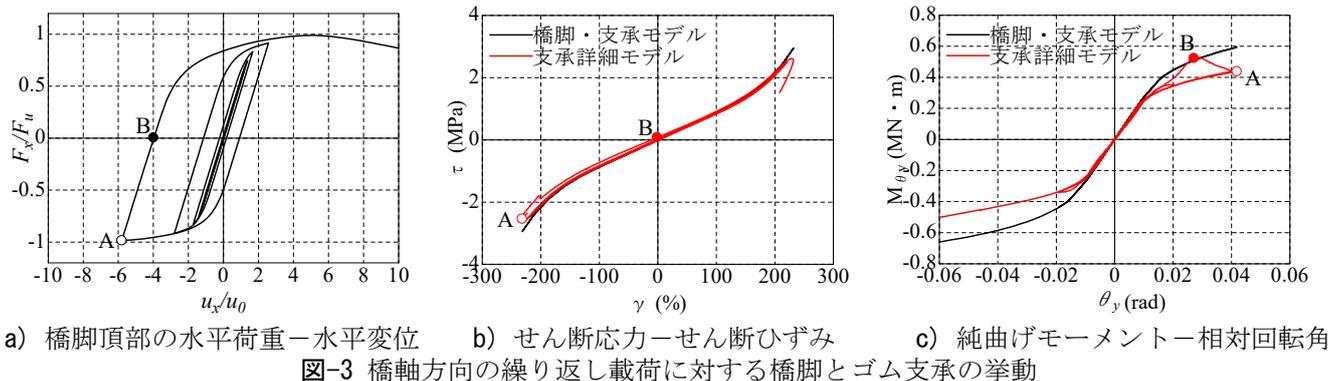


図-3 橋軸方向の繰り返し载荷に対する橋脚とゴム支承の挙動

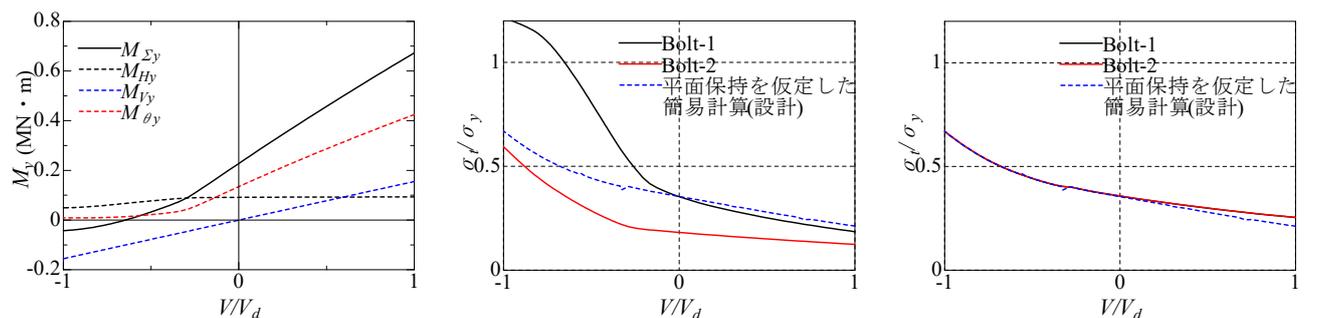


図-4 取付ボルト位置の作用モーメント

図-5 取付ボルトの引張応力

図-6 取付ボルトの引張応力 (ゴム剛性大)

一致しており、純曲げとの連成による影響はほとんどみられない。一方、 $M_{\theta_y} - \theta_y$ 関係については、初期剛性は一致しているものの $\theta_y = 0.01 \text{ rad}$ 以降、橋脚・支承モデルと比べて低くなっている。これはせん断変形により有効面積が減少することが一つの要因として考えられる。したがって、除荷後の B 点ではせん断ひずみが 0 であるため有効面積が回復し、曲げモーメントの値が A 点よりも増加していることが確認できる。

4. 取付ボルトの挙動

最大水平力作用時の A 点において支承に負反力が作用する状態を考える。取付ボルトの引張応力に関与する支承上面位置の曲げモーメント成分は、せん断の偶力による M_{Hy} 、鉛直力の $P - \delta$ 効果による M_{Vy} 、および純曲げ M_{θ_y} からなる。最大水平力作用時である A 点において死荷重による支承への圧縮鉛直力 V を負反力に移行させた場合の支承詳細モデルの上面の取付ボルト位置（上鋼板と上沓の境界）における各モーメント成分の推移を図-4 に示す。死荷重作用下 ($V/V_d = 1$) において支承上面位置でのこれらのモーメント成分の割合は $M_{Hy} : M_{Vy} : M_{\theta_y} = 0.13 : 0.23 : 0.64$ となっており、設計で考慮されていない純曲げによる成分 M_{θ_y} の寄与率が高い。しかしながら鉛直力 V が正反力から負反力へ移行するに伴い、純曲げモーメント M_{θ_y} が減少していることがわかる。これは、図-2 に示したゴムの静水圧応力と体積ひずみ関係において引張領域で静水圧応力が頭打ちになっているためであると考えられる。この現象は既往の実験³⁾においても確認されてい

る。図-5 には縁端の取付ボルト Bolt-1, 2 (図-1 b) 参照) の軸方向応力 (ボルト軸部の断面の平均応力) の推移を同様に示している。これより、2つのボルトは回転軸から同距離にあるにもかかわらず、挙動が大きく異なることがわかる。さらに同図には支承詳細モデルの解析で得られた支承上面への作用鉛直力と曲げモーメントを用いて、設計で用いる平面保持を仮定した簡易計算による Bolt-1, 2 の軸方向応力の算定値を示しているが、FE 解析による Bolt-1, 2 との差異は大きい。参考のために、支承詳細モデルにおいてゴムの剛性を大きく (材料構成則を鋼材のヤング係数を有する線形弾性体と仮定) 設定して荷重制御により同様の計算を行った場合には Bolt-1, 2 の挙動は一致し、簡易計算の精度もよい (図-6)。以上の結果は、ゴム層に支持される上・下鋼板はゴムの圧縮剛性、有効面積の減少等の影響により設計で仮定している平面保持の条件が満足されていないことを示唆している。

5. まとめ

橋脚のたわみにより生ずるゴム支承の純曲げモーメントは反力の低下に伴い減少する。ゴム層に接着される上・下鋼板は平面保持の仮定を満足しないため、設計で用いられる簡易計算による算定値の精度が低下する。

参考文献: 1) 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.552-551, 2017. 2) 松田泰治, 大塚久哲, 北村幸司: FEM によるゴム材料の圧縮性を考慮した積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.575-584, 2004. 3) 石井建, 菊池優, 北村佳久, 中村崇仁: せん断変形と曲げモーメントを受ける免震積層ゴムの力学挙動解析, 日本建築学会論文集, 第75巻, 第647号, pp.87-93, 2010.