

免震用積層ゴム支承の力学的挙動解析

信州大学工学部 学生会員 ○田島 駿
 信州大学工学部 正会員 大上俊之
 信州大学工学部 正会員 小山 茂

1. はじめに

日本列島は世界有数の地震多発地域であり、巨大地震が相次いで発生している。土木構造物は耐震・免震化が進められており、橋梁では兵庫県南部地震を機に橋脚・支承部などの耐震・免震化が進められている。支承部は鋼製支承が多く採用されてきたが、この地震を契機として、せん断変形性能を有するゴム支承が採用されるようになった。

ゴム支承は、ゴムの最大の特徴である大きく伸び縮するゴム弾性を利用し、過大な変位への追従性を有している。ゴム支承の破断に至るせん断ひずみは350%と言われており、ゴム支承の耐久性はかなり高いのが特徴である。積層ゴム支承は、鋼板とゴムを交互に積層させた構造であり、側面のはみだし量が非常に小さくなる。このことにより、圧縮剛性が大きくなり、重い上部構造を支えることができる。近年では、支承の免震設計が取り入れられ、アイソレート機能と減衰機能を併せ持った支承など様々な支承が実用されている。

近年、想定を超えた巨大地震が発生している。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、初めて積層ゴム支承が破断した。また、2016年4月に発生した熊本地震でもゴム支承が破断した。本研究では、4種類の積層ゴム支承について、水平1方向載荷の力学挙動と地震応答を数値解析によって比較検討を行うものである。

2. 解析モデル

解析には汎用 FEM 解析ツール ANSYS¹⁾を用いた。モデルは橋梁用積層ゴム支承とし、天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承（鉛1本）、鉛プラグ入り積層ゴム支承（4本）、および今回試みとして鋼プラグ入り積層ゴム支承の4つのモデルについて検討する。上部からの面圧は設計面圧の許容値7.84 [MPa]とし、対称性より、橋軸方向に1/2のみ

を解析領域とした。解析モデルの寸法は次の通りである。

平面形：200×200 [mm]，プラグ直径：40 [mm]
 ゴム層厚：5.0 [mm]，鋼板層厚：2.3 [mm]

ゴム部は超弾性非圧縮体の天然ゴム（NR）とし、NRの応力はひずみエネルギー密度関数によって与えた。本研究では、圧縮－引張両域に対して Mooney-Rivlin モデル²⁾を5パラメータでモデル化し、8節点3次元ソリッド要素を用いた。補強鋼板部は一般構造用鋼（SS400）を8節点3次元ソリッド－シェル要素、プラグ部は鉛及び一般構造用鋼（SS400）を8節点3次元ソリッド要素とし、幾何学的非線形性および超弾性理論に基づいた非線形解析を行った。

その他の材料定数はゴム部のポアソン比 0.4999、鋼板部のヤング率 206 [GPa]、ポアソン比 0.3、鉛プラグのヤング率 16 [GPa]、ポアソン比 0.41とした。解析モデルの一例を図1に示す。

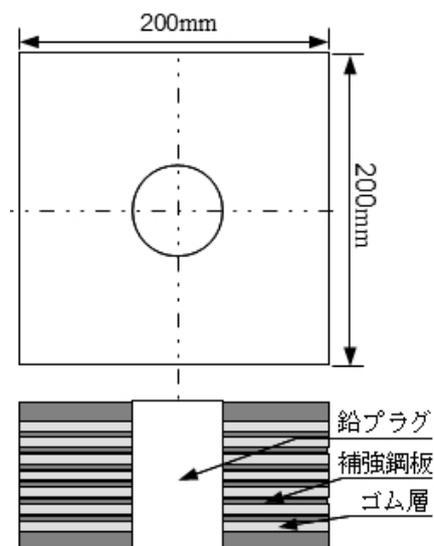


図1 解析モデル

3. 解析条件

水平1方向載荷の特性を調べるために、単調増加載荷と繰り返し載荷の2つの解析を行った。境界条件は底面を完全固定とし、モデルの最上部の橋軸直角方

向の水平方向を固定とし、対称面はローラー支持とした。最初に設計許容面圧 7.84 [MPa] を鉛直方向に載荷し、その後橋軸方向の水平方向に強制変位を与えた。ただし、対称性より与えた面圧は、設計許容面圧の半分の 3.92 [MPa] である。

次に、水平 1 方向の復元力特性を調べるために、水平 1 方向に繰り返し載荷を行った。境界条件、載荷手順は単調増加載荷と同様である。水平復元力特性のせん断依存性試験³⁾に従い、せん断ひずみを 25% ずつ増加させて、せん断ひずみに相当する水平変位を与えた。与えた繰り返しせん断ひずみを図-2 に示す。

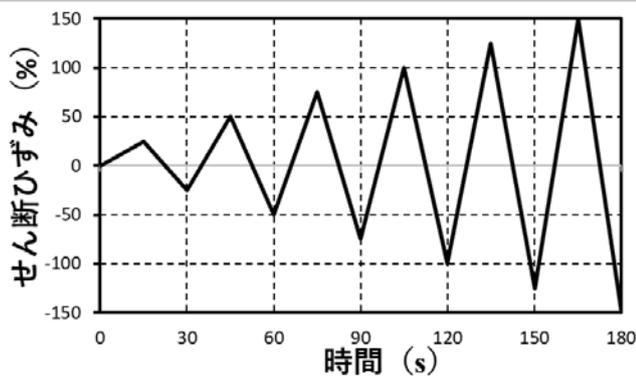


図 2 繰り返しせん断ひずみ

4. 解析結果

単調増加載荷の荷重-せん断ひずみ関係を図-3 に示す。天然ゴム系積層ゴム支承は、せん断ひずみの 150% 付近からハードニングにより水平剛性が大きくなっている。

一方、鉛プラグ入り積層ゴム支承 (1 本) は、天然ゴム系積層ゴム支承とほぼ同様な荷重-せん断ひずみ関係を示すが、鉛の塑性変形により耐荷力は大きくなる。また、4 本入りの場合は、さらに耐荷力が大きくなる。鋼プラグ入り積層ゴム支承は、鋼材の剛性が高く耐荷力は大きいですが、せん断変形性能に劣る。

繰り返し載荷の荷重-せん断ひずみ関係の履歴を図-4 に示す。天然ゴム系積層ゴム支承は、耐荷力は小さく、せん断変形性能が卓越しており、ゴム弾性の特性が顕著に表れている。鉛プラグ入り積層ゴム支承 (1 本)、鉛プラグ入り (4 本) は、天然ゴム系積層ゴム支承とほぼ等しい曲線を示すが、鉛の弾塑性変形により、エネルギー吸収性を有している。鋼プラグ入り積層ゴム支承は、耐荷力が高いがせん断変形性

能に劣り、せん断ひずみ 35% 付近から鋼プラグ下部にて塑性ヒンジが形成され、これにより繰り返し 2 サイクル目で解が収束しなかった。鋼プラグの口径を変化させることにより、せん断変形性能が大きく耐荷力の高い支承モデルを提案できる可能性がある。

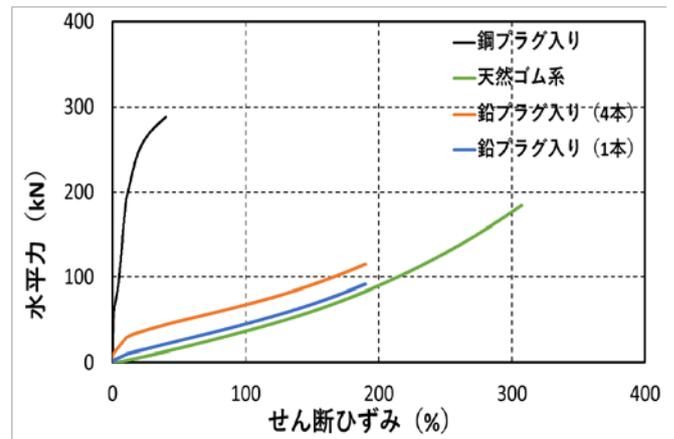


図-3 荷重-せん断ひずみ関係 (単調増加載荷)

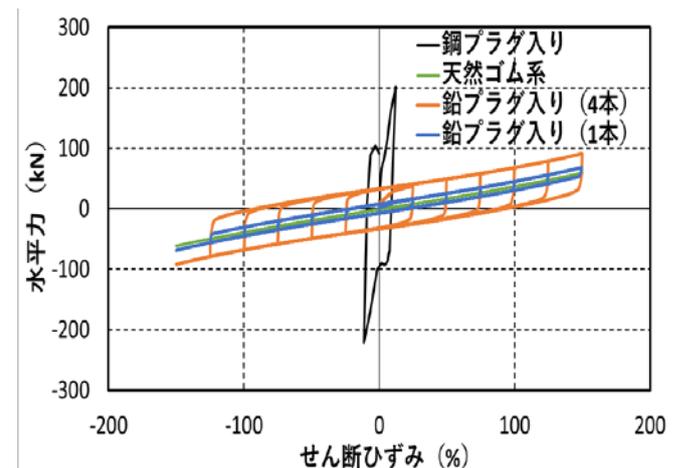


図 4 荷重-せん断ひずみ関係 (繰り返し載荷)

参考文献

- 1) CAD/CAE 研究会：有限要素法解析ソフト ANSYS 工学解析入門，理工学社，2001.
- 2) 結城 洋一，玉井 宏樹：ケーブル式落橋防止構造における緩衝材の動的応答評価に向けた解析的研究，鋼構造論文集，第 23 巻第 90 号，105-114，2016.
- 3) 社団法人 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.
- 4) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三：免震用積層ゴム支承の水平 2 方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集 No.696/I-58，125-144，2002.