ゴム支承の FEM 解析に向けた天然ゴム G10 の超弾性パラメータの同定

東北学院大学大学　　学生会員　○瀬戸万夢　正会員　千田　知弘
西日本高速道路株式会社　正会員　　崔　準祜

１．はじめに

近年，ゴム支承の免震・耐震性能に期待が高まっており，今後更なるゴム支承の最適設計に向けては，FEM 解析による解析手法の確立もまた望まれている．本研究では，その基礎的研究として，以前実験 [1]が行われた天然ゴム(G10)を対象とした FEM 解析を実施し，比較検討した．具体的には，均等二軸引張試験，単軸引張を基にカーブフィッティングを行い，動的せん断試験，引張圧縮試験を Ogden モデルでシミュレートした結果を報告する．

２．解析手法および FEM 解析モデル

ゴム支承研究会においては，ゴム支承の免振・耐震性能の最適化を目指す研究活動の一環として，様々な解析ツールによる解析結果，解析手法を広く公開していく取り組みを行っており，著者らは ANSYS を用いた解析手法の確立に取り組んでいる．ゴムといった超弾性材料のパラメータの同定に際しては，同じ実験結果を用いても，どの範囲の値を用いるかは任意であるため，仮に解析結果に差が生じた場合，使用した値によるものか，プラットフォームの差によるものかの判断が難しい．そこで本研究では，ADINA を用いて秦らが同定したパラメータ [1]を用いて実験結果のばらつきを無くして解析を進めていく．なお，秦らと本研究の違いは，秦らが行っていないせん断試験の実験値と解析値の比較を行っている点である．

対象とする試験体の代表例として拘束ゴム層引張・圧縮試験の試験供試体モデル [1]の概略図を**図-1** に示す．本解析では，拘束ゴム層引張・圧縮試験と拘束ゴム層せん断試験の三種類の試験体のモデルに対して解析を行った．拘束ゴム層引張・圧縮試験供試体は，直径 45mm 高さ 34mm ゴム層厚 1.7mm，拘束ゴム層せん断試験供試体は，直径 30mm 高さ 28mm ゴム層厚 3.7mm となっている．

解析手順としては，ゴムの超弾性パラメータの同定を最初に行い，その値の精度と妥当性を拘束ゴム層引張・圧縮試験の再現解析により確認した後，最後に拘束ゴム層せん断試験の再現解析を行った．対象とする試験体の代表例として拘束ゴム層引張・圧縮試験の試験供試体モデル [1]の要素分解図を**図-2** に示す．なお，予備解析において，ゴム要素に直接境界条件,変位条件を与えたところ,各条件付与節点付近に極めて高い応力の卓越が見られたため，実験で用いられた鋼製ジグもモデル化し，鋼製ジグに境界条件，変位条件を与えて解析を行った．鋼製ジグの材料定数を**表-1** に示す．ゴムの超弾性パラメータの同定に際しては，拘束ゴム層単軸引張試験および均等二軸引張試験データの包絡線であるひずみ-応力グラフを用いた三次の Ogden モデルとして得られるが，上記の通り今回は秦の報告書 [1]から引用した(**表-2**)．引用した値が同じ値でも，異なるプラットフォームを用いることによって差が生じるかを確認するため,拘束ゴム層単軸引張試験および均等二軸引張試験データ包絡線のひずみ-応力グラフと引用した値とのカーブフィットと拘束ゴム層引張・圧縮試験の再現解析により比較検討する．

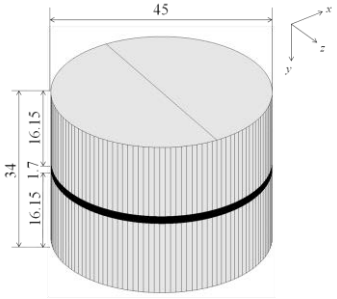

図-1 引張圧縮試験供試体モデル図

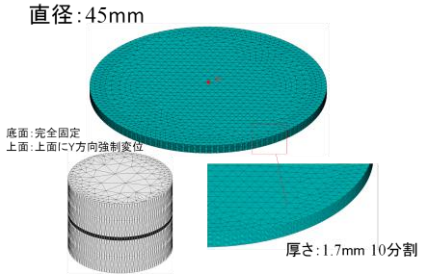

図-2 引張圧縮試験要素分割図

表-1　解析に使用した材料定数

部材名	鋼板
ヤング率	206GPa
ポアソン比	0.3

表-2　解析に使用した超弾性パラメータ

n	αn	μn	dn
1	2	0.70135	0
2	4	0.21392	0
3	-2	-0.13031	0

キーワード　天然ゴム　FEM　ゴム支承

連絡先　　〒980-8537　宮城県多賀城市中央一丁目 13-1　TEL022-368-7418

超弾性パラメータの妥当性を確認した後，拘束ゴム層せん断試験の供試体モデルを対象とした解析を行い，得られたせん断応力と実験値とを比較検討していく．拘束ゴム層引張・圧縮試験の再現解析場合境界条件は，底面の鋼版の *xz* 平面上にある全ての節点の全方向変位を拘束した，強制変位条件としては，上面の鋼版の *xz* 平面上にある全ての節点に *y* 方向±0.2mm 強制変位を加えた．拘束ゴム層せん断試験の再現解析の場合境界条件は，底面の鋼版の *xz* 平面上にある全ての節点の全方向変位を拘束，上面の鋼版の *xz* 平面上にある全ての節点の *y* 方向変位を拘束した，強制変位条件としては，*z* 方向に変位 0~10mm 間を等間隔で計 10 点の強制変位を加えプロットした．要素サイズは，鋼板に関しては，全てのモデルで *xz* 平面を一辺 10mm とし，ゴム層に関しては，*xz* 平面を一辺 1.5mm としたが，高さ方向は，より高い精度を得るためより細かい要素分割を行った．具体的には，拘束ゴム層引張・圧縮試験の再現解析では，高さ方向に 10 分割，拘束ゴム層せん断試験の再現解析では，高さ方向に 21 分割とした．

３．結果と考察

試験データ包絡線のひずみ-応力グラフと超弾性パラメータをカーブフィットさせた図を**図-3** に示す．**図-3** を見ると，本解析においても超弾性パラメータは，報告書[1)]と同様に高い精度が得られていることが確認できた．拘束ゴム層引張・圧縮試験に関しても，変位，変形形状，各応力ともに，同じ精度が得られたためここでは省略する．拘束ゴム層せん断試験の再現解析の実験値と解析値のせん断応力-変位関係を**図-4** に，FEM から得られたせん断応力分布図を**図-5** に示す．**図-4** における解析から得られたせん断応力に関しては，応力集中を避けるため，**図-5** 中の点 A の位置のせん断応力の値を用いた．ただし，**図-4** 中の実験値に関しては，点線で示した値が報告書[1)]では示されているが，実験値が実際に得られた値に ΔL/2 を乗じた値になっている可能性も示唆されており[1)]，実験値を二倍した値も赤実線で示している．本論文では赤実線で示した値を実験値として解析値を比較していく．**図-4** においては特徴的な挙動を示す青枠区間と赤枠区間に分けて比較検討していく．青枠区間における実験値と解析値の差については，差が生じる原因として試験体のサイズが関係していると推察される．試験体が小さいために寸法効果が生じ，**図-5** に示す通り応力集中が各エッジに生じ，応力分布が複雑になるために理論値から得られる実験値と差が生じたと考えられる．一方，赤枠の実験値と解析値の差は，Mullins 効果と言われる剛性低下を示す差だと考えられる．仮に青枠の解析値を実験値合わせた場合，赤枠における実験値と解析値の差が大きくなることが考えられ，より Mullins 効果が顕著に現れると考えられる．

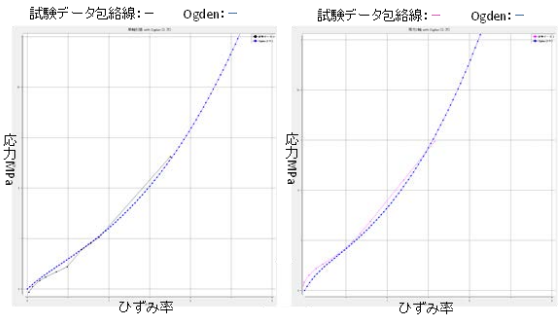

図-3 カーブフィット図

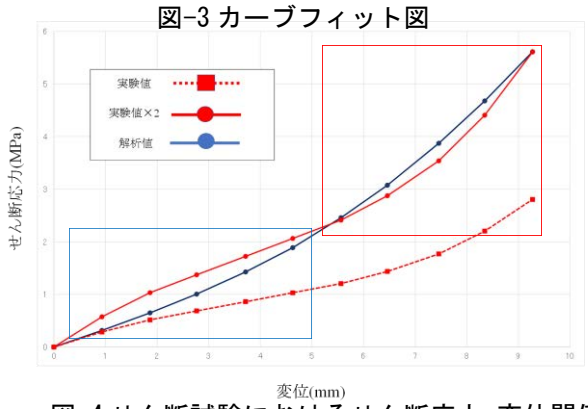

図-4 せん断試験におけるせん断応力-変位関係

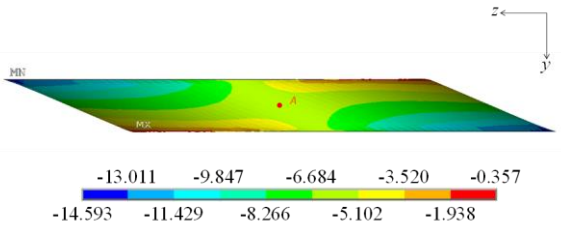

図-5 せん断応力分布図(MPa)

４．まとめ

本研究では，拘束ゴム層引張・圧縮試験，拘束ゴム層せん断試験の二つの解析モデルを用いて FEM 解析を行い，ゴムの力学的性質を照査した．カーブフィッティングおよび拘束ゴム層引張・圧縮試験の再現解析は，報告書[1)]と同様に高い精度が得られた．しかし拘束ゴム層せん断試験の再現解析においては実験値と解析値の間に差が生じた，その理由として試験体が小さかったため寸法効果が生じ，理論値における実験値と解析値との間に差が生じた可能性が認められた．また剛性低下が生じる Mullins 効果による剛性差が解析値と実験値との差で確認できた．今後 Mullins 効果を適切に反映していき，更なる超弾性パラメータの確立を目指していく．

参考文献

1）秦逸平(2019)　第 3 回ゴム支承研究会報告書 G10 ゴム材料の超弾性パラメータの同定