

実大免震試験施設を活用した免震部材におけるスケール効果の解明

東京科学大学 ○吉敷祥一*
// 黒澤未来**
// 小林真帆***

天然ゴム系積層ゴムアイソレータ 各種依存性
ハードニング 損傷評価 スケール効果

研究の目的

近年、免震建物の高層化に伴い、免震部材も大型化する傾向にある。しかし、国内においては大型の免震部材に対して性能検証が可能な条件や施設が限られていた。2023年に実大免震試験施設 E-Isolation が完成し、大型の免震部材に対して高面圧下かつ実速度での加振実験が可能となった^{1), 2)}など。免震部材として広く用いられる積層ゴムは、ゴム直径とゴム層厚から形状係数が決定される。しかし、形状係数が等しい試験体であってもゴム以外の部材寸法がゴム直径に対してプロポーショナルに変化しておらず、ゴム直径が小さくなるほど寸法比が相対的に大きくなる傾向にある。本研究では、E-Isolation を活用して天然ゴム系積層ゴムアイソレータ（以下、天然ゴム系積層ゴム）を対象とした動的加振実験を行い、ゴム直径の違いによる影響である“スケール効果”が基本特性や終局特性に及ぼす影響を検討する。

研究の内容

試験体は、ゴム直径 300、600、1100mm の天然ゴム系積層ゴムであり、加振速度や加振回数が異なる 2 期（Phase1、2）に分けて実験を行った。セットアップを Fig. 3 に示す。水平荷重 P は、水平アクチュエータによって与え、反力梁に接続した荷重計測リンクおよび回転拘束リンクに取り付けロードセルを用いて算出する。鉛直荷重 N は、24 本の鉛直アクチュエータを制御して与え、アクチュエータに取り付けたロードセルにより計測する²⁾。

試験体の限界性能曲線を、振幅領域の定義を兼ねて Fig. 4 に、加振プログラムを Fig. 5 に示す。はじめに、基準面

圧 15MPa、振幅 100% でベンチマーク試験（以降、BM 試験）を行った後、振幅 200% までの小・中振幅領域において面圧を 15、20、10、5、25、30MPa の順に変化させて加



Fig. 1 本研究で用いた試験体

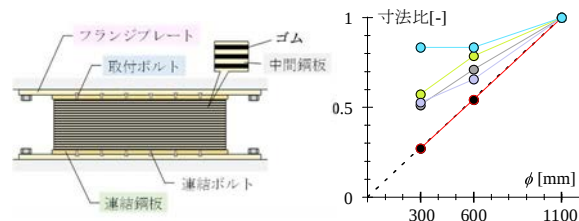


Fig. 2 試験体の部材名称と寸法比

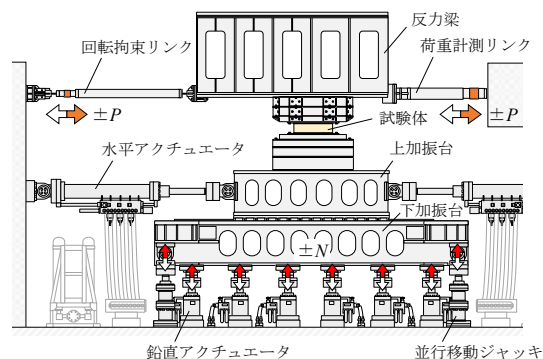


Fig. 3 E-Isolation におけるセットアップ

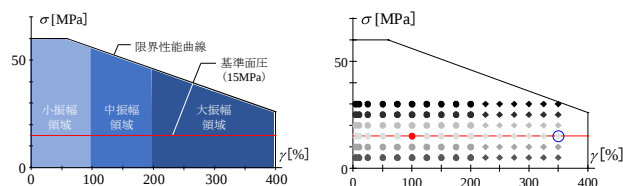
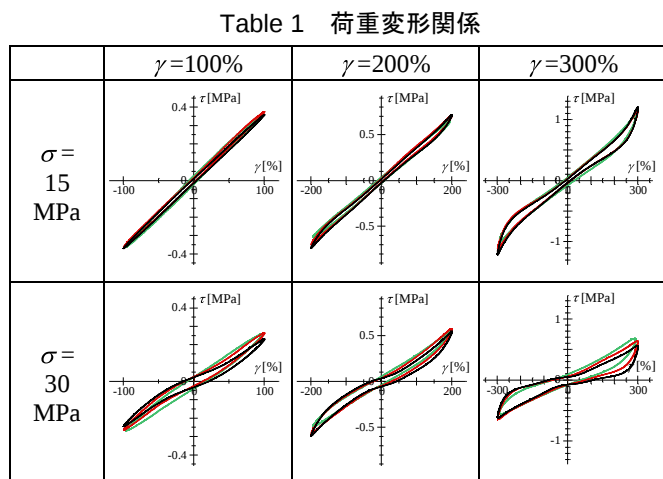


Fig. 4 振幅領域の定義

Fig. 5 加振プログラム

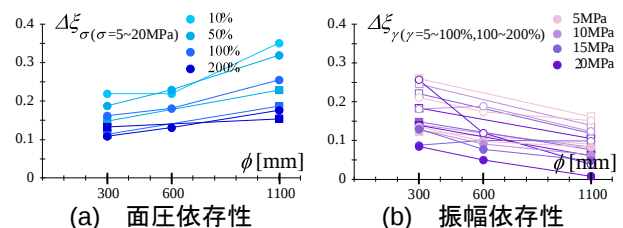


Fig. 6 各種依存性におけるスケール効果

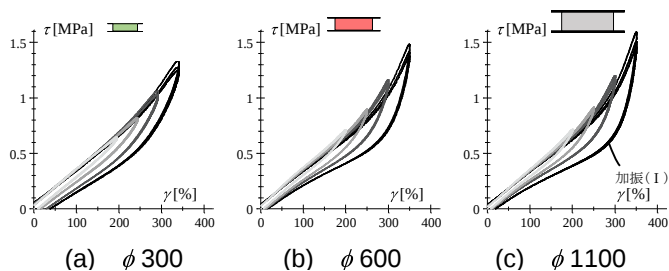


Fig. 7 大振幅領域における荷重変形関係

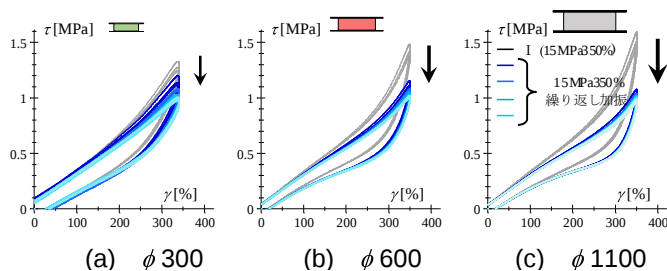


Fig. 8 多数回繰り返し加振における荷重変形関係

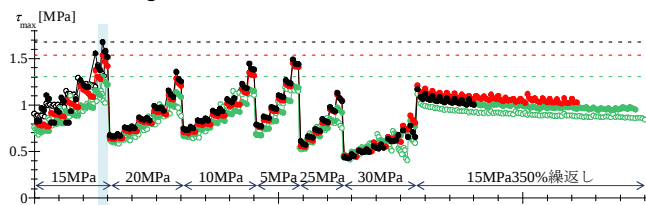


Fig. 9 大振幅領域における最大せん断応力の推移

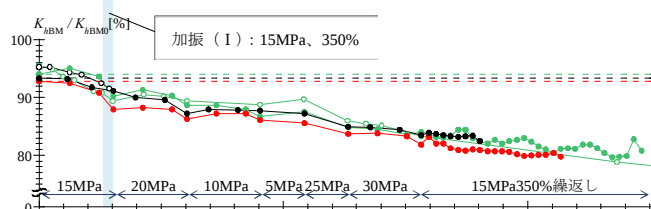


Fig. 10 大振幅領域における BM 試験の水平剛性の推移

を実施する。すべての面圧下で加振を行った後、振幅 225% 以降の大振幅領域において同様の順序で加振を行う。最終的に上述した所定の加振プログラムを終えた後は、基準面圧 15MPa、振幅 350% の条件で多数回繰り返し加振を行う。なお、基準面圧 15MPa、振幅 350% の初めての加振を加振 (I) と称し、多数回繰り返し加振と比較する。

研究の成果、新発見

荷重変形関係を Table1 に示す。図の縦軸はせん断応力 τ であり、横軸は振幅 γ である。なお、 $\phi 300$ を緑色、 $\phi 600$ を赤色、 $\phi 1100$ を黒色で区別して示す。面圧 20MPa 以下かつ振幅 200% 以下の小・中振幅領域の範囲では履歴曲線が高い線形性を示すものの、振幅 200% 超の大振幅領域や高面圧の範囲ではハードニングによる荷重上昇や履歴曲線の膨らみの増加がみられた。これらの結果から、面圧 20MPa 以下かつ小・中振幅領域の範囲 (以降、線形領域) にて基本特性の分析を行う。

各種依存性におけるスケール効果を Fig. 6 にまとめる。面圧依存性同一の振幅における水平剛性 K_h を基準面圧 15MPa 下での水平剛性 $K_{h(\sigma=15\text{MPa})}$ 、あるいは振幅 100% 時の水平剛性 $K_{h(\gamma=100\%)}$ で除した変化率 ξ における線形領域での最大値と最小値の差分 $\Delta\xi$ を縦軸に、ゴム直径 ϕ を横軸に示す。なお、図中には面圧と振幅の大きさを色の濃淡で区別して表している。水平剛性に対する面圧・振幅依存性は、ゴム直径が大きくなるにつれて直線的に変化する。

ゴム直径が大きいほど水平剛性に対する面圧依存性は大きく、一方では水平剛性に対する振幅依存性は小さいことがわかった。

次に、大振幅領域における終局特性について考察する。基準面圧下における大振幅領域の荷重変形関係を Fig. 7 に、多数回繰り返し加振における荷重変形関係を Fig. 8 に、それぞれゴム直径ごとに示す。さらに大振幅領域における最大せん断応力および BM 試験の水平剛性の加振ごとの推移を Fig. 9、Fig. 10 に示す。まず大振幅領域における荷重変形関係 (Fig. 7) では、ゴム直径が大きくなるほどハードニングによる荷重上昇が顕著に現れている。次いで、多数回繰り返し加振における荷重変形関係 (Fig. 8) をみると、ゴム直径が大きくなるほど、加振 (I) と多数回繰り返し加振の開始時点での最大振幅時の荷重の差が大きいが、多数回繰り返し加振の開始時点ではゴム直径の違いによる差は小さくなっている。

ここで、大振幅領域における最大せん断応力の推移 (Fig. 9) をみると、大振幅領域および多数回繰り返し加振における最大せん断応力の推移において、ゴム直径の違いによる影響はみられない。一方、大振幅領域における BM 試験の水平剛性の推移 (Fig. 10) をみると、加振が増えるに従って水平剛性が直線的に低下していることがわかる。すなわち、BM 試験の水平剛性の傾向は、種々の実験による損傷の蓄積を評価できる可能性を示唆しているものであるといえる。

今後の予定

免震部材における下部コンクリートなどの周辺部を含めたスケール効果の影響を検討する。

謝辞

本研究は、一般財団法人 大成学術財団の研究助成および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2106・JPMJSP2180 の支援による成果です。また、実験に際しては、和田章先生をはじめとする一般財団法人 免震研究推進機構にご協力をいただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Takahashi, Y., Takeuchi, T., Kishiki, S., Shinozaki, Y., Yoneda, M., Kajiwar, K., Wada, A.: E-Isolation: High-performance Dynamic Testing Installation for Seismic Isolation Bearing and Damping Devices, High-Rise Buildings, Vol.12, pp.93-105, 2023.3
- 2) 酒井一至, 吉敷祥一, 小林真帆, 平野一郎, 黒澤未来, 高橋良和: 実大免震試験機 “E-Isolation” の建設時における各部の性能検証, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 第 821 号, pp.727-738, 2024.7

*東京科学大学 総合研究院 教授・博士 (工学)

**東京科学大学 総合研究院 助教・博士 (工学)

***東京科学大学 博士後期課程 修士 (工学)

*Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.

**Assistant Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.

***Doctoral Student, Institute of Science Tokyo, M. Eng.