

高減衰ゴム系積層ゴム支承の水平 2 方向加力時における 限界性能に関する新たな知見について

社団法人日本免震構造協会技術委員会
水平 2 方向加力時の免震部材の特性と検証法 WG
高減衰ゴム系積層ゴム支承 SWG

1. はじめに

実大製品による高減衰ゴム系積層ゴム支承（以下 HDR）の水平 2 方向加力時の限界性能試験を実施したところ、ゴム部にねじれ変形が生じ、従来の 1 方向加力で評価されてきた場合より小さなせん断ひずみで破断することが確認された。一方、同時に実施された天然ゴム系、および鉛プラグ入り積層ゴム（ただし、積層ゴム中心部に鉛プラグが挿入されているもの）については、微小なねじれ変形は発生するが、限界性能には影響しないことが確認された^{1) 2)}。この結果を受け、(社)日本免震構造協会（以下 JSSI）では、限界性能の明確化を目的として、実験検討を進めてきた。今回、限界性能の考え方についての検討作業が完了した^{3) 4)}ことから、その概要について以下にまとめた。

2. 水平 2 方向加力実験による限界性能評価

2-1. 新たな知見の確認の経緯と実験概要

2007 年 8 月と 2008 年 2 月のカリフォルニア大学サンディエゴ校（以下 UCSD）における実験により HDR の水平 2 方向加力時の、1 方向加力時より小さなひずみでの破断が確認されてから 2009 年 6 月まで、計 5 回に分けて水平 2 方向加力時の積層ゴム支承の限界特性及び水平力学特性に関する評価試験が実施された。以下にその概要を示す。

(1) 実大製品による限界性能試験

- ・ 2007 年 8 月、UCSD において、直径 700 mm の HDR（ブリヂストン製ゴム質 X0.6）を用いて、図.1 に示すような楕円と 8 の字を複合した水平 2 方向の軌跡（以下複合軌跡）を与えたところ、せん断ひずみ 394 %を 2 回経験した後に、約 380 %にて破断した。尚、当該試験体と同一材料、同形状の積層ゴムは、従来の 1 方向加力試験では、450 %ひずみにおいても破断しないことが確認されていた。
- ・ 2008 年 2 月、USCD にて、同一試験体 2 体による再試験を実施したところ、ほぼ同等の結果が再現され、同時に積層ゴム表面にねじれ変形が確認された（図.2）。

(2) 縮小試験体による詳細試験

- ・ 2008 年 9 月～2009 年 5 月にわたり、現象解明のため、国内試験設備（JFE テクノリサーチ）において、縮小試験体（直径 225 mm および 158 mm）による実験を計 3 回実施し、座屈への影響や、面圧、二次形状係数、加力パターン、速度、繰り返し回数等に関する詳細な評価を実施した。その結果、HDR に 2 方向加力を与えた場合、ねじれ変形が発生し、それに伴う局所的なせん断ひずみの増分が早期の破断要因であることが確認

された。ここで、ねじれ変形に伴うせん断ひずみは、図.3 に示すように、積層ゴム側面にメッシュシールを貼り、ゴム表面上のねじれ変形を画像処理することによって求めた。また、2方向加力における破断時のねじれ変形によるせん断ひずみと長軸方向のせん断ひずみを足し合わせると、図.4 に示すように、1方向加力時の破断時せん断ひずみとほぼ一致することと、破断の起点は、ねじれによる成分と水平変形による成分の方向が一致する、水平変形方向に対し試験体を上方から見て反時計回りに 90°の位置と概ね一致することが確認された (図.5)。なお、本実験評価では、長軸：短軸=2:1 の楕円加力を破断特性評価の基本条件とした。これは、当 JSSI-SWG にて検討された幾つかの地震動を用いた 2 方向地震応答解析結果をもとに、最大応答値付近の変位軌跡の短軸と長軸の比率が上記条件を採用することで概ね安全側であると判断されることから、基準加力として採用した。

- 水平復元力特性は、ねじれ変形の影響によって、長軸方向では、1方向加力による曲線よりもループ面積や減衰定数が増加すること、短軸方向では、長軸変位が 0 の近傍で最大荷重値となる特異なループ形状を示すことが確認された。(図.6)
- 主な限界性能試験結果の一覧を表.1 に示す。HDR の 2 方向加力時破断ひずみは、同一面圧条件における 1 方向加力時の破断ひずみと比較して、減少していることが確認できる。また、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB、ただし中心部に鉛プラグが挿入されているタイプ)および天然ゴム系積層ゴム (NRB) では、1 方向と 2 方向ではほとんど差がないことが示されている。さらに、二次形状係数が小さくなるにつれ、破断ひずみも減少していることがわかる。

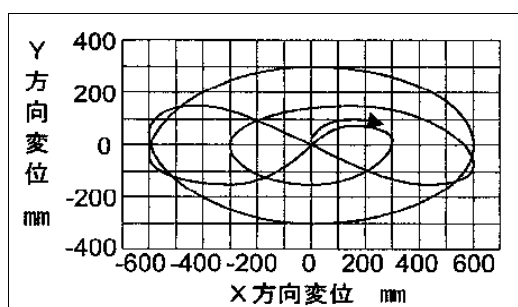


図.1 UCSD 試験における水平 2 方向の複合軌跡



図.2 HDR φ700 2 方向加力時のねじれ変形状態

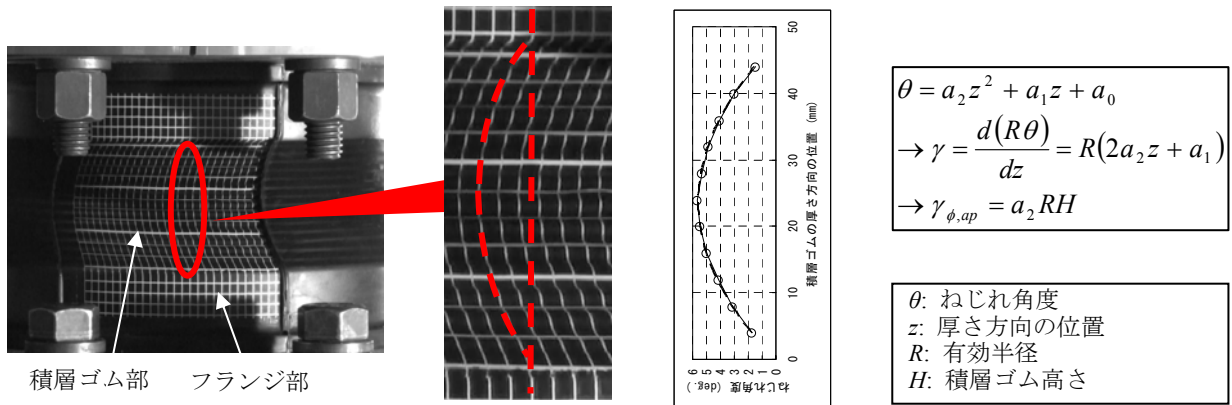


図.3 ねじれ変形によるせん断ひずみの計測例

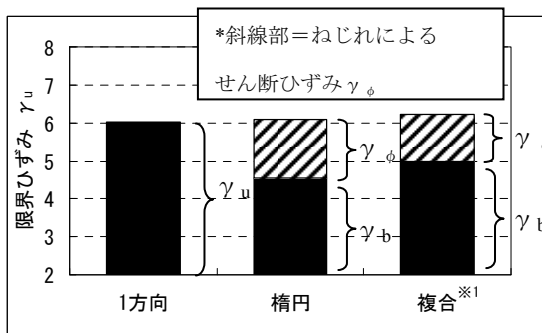


図.4.1 方向加力時と2方向加力時の破断ひずみの比較

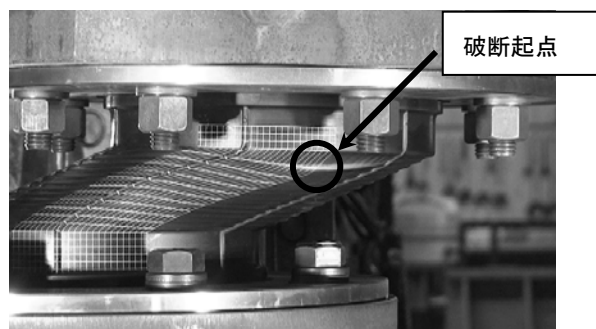


図.5 2方向（楕円）加力時の破断起点

*1: 複合加力：楕円と8の字を組み合わせた軌跡

表.1 主な限界性能試験結果

積層ゴム 直径(mm)	1次形状係数 S_1	二次形状係数 S_2	面圧 $\sigma(\text{N/mm}^2)$	2方向加力時 破断ひずみ	1方向加力時 破断ひずみ
φ700	36.5	5.0	14.0	394%	450%*1
φ225	31.3	8.3	14.0	450%	600%
φ160	31.3	5.0	13.0	388%	499%(座屈)
φ160	31.3	4.0	10.7	363%	374%(座屈)
φ225-LRB*2	31.3	8.3	14.0	600%	600%
φ225-NRB*3	31.3	8.3	14.0	600%	650%

*1 破断しないことを確認、*2:LRB: 鉛プラグ入り積層ゴム、*3:NRB: 天然ゴム系積層ゴム

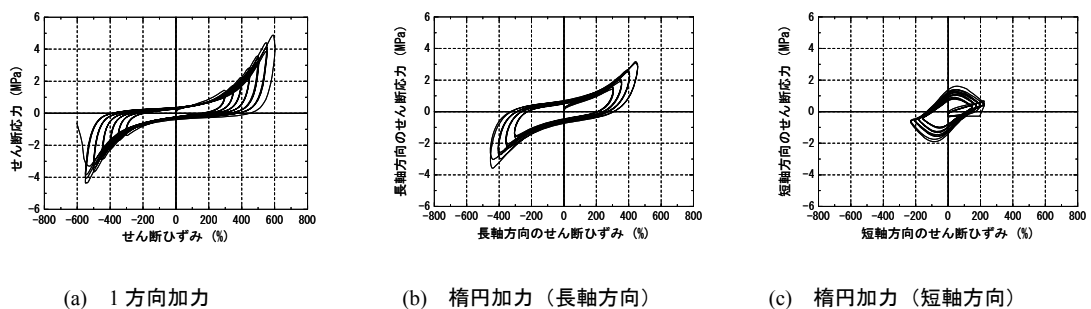


図.6 水平1方向および2方向加力時の荷重変位曲線図の比較

2-2. 水平 2 方向加力時の限界ひずみの特徴とねじれ変形の発生要因

ねじれ変形が発生するメカニズムは以下のように説明される。図.7 に示すように、積層ゴム支承が水平平面において、任意の曲線に沿ってせん断変形した際の HDR の復元力を、弾性成分と減衰成分に分離した場合、弾性成分は、せん断変形方向に発生しているのに対し、減衰成分は軌跡の接線方向に発生しているため、この成分が積層ゴム支承の各ゴム層に対して、せん断変形量を力点間距離とするねじれモーメントとして作用する。その結果、ゴム部には、せん断変形によるひずみのほかに、ねじれ変形に起因するせん断ひずみ γ_ϕ が付加され、上下の固定端にて最大値となる。また、ねじれによるせん断ひずみは、二次形状係数 S_2 (=ゴム直径/ゴム総厚) に反比例する形で、 S_2 が小さいほど増加する傾向にある。ただし、 S_2 が小さく、従来の 1 方向評価において限界ひずみとして、座屈現象にもとづく限界値を設定していた場合、2 方向加力によるねじれ変形は座屈限界ひずみに影響を与えないことが実験によって確認されている。

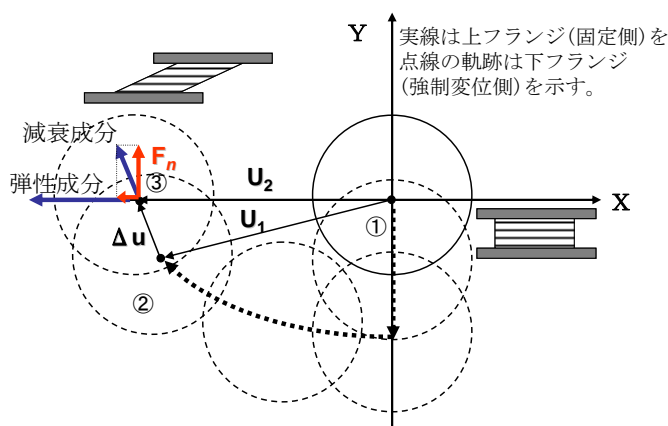


図.7 ねじれ変形が発生するメカニズム

2-3. 水平 2 方向加力時の限界ひずみ設定とその試験方法

HDR の水平 2 方向加力時の限界ひずみの特性とその設定方法に関する考え方については、以下のように要約される。

- (1) 2 方向加力時の破断せん断ひずみ γ_b は、ねじれ変形によるせん断ひずみ γ_ϕ を伴うために、1 方向加力時の破断ひずみ γ_u よりも小さくなる。ここに、実験より式 (1) の関係が成り立つ。ただし、ここで、水平 2 方向加力とは、長軸：短軸=2：1 の楕円加力とする。

$$\gamma_u = \gamma_b + \gamma_\phi \quad (1)$$

また、 γ_ϕ は二次形状係数に概ね反比例し、式 (2) のように表される。

$$\gamma_\phi = f_\phi(\gamma_x) / S_2 \quad (2)$$

ここに、 γ_x : 楕円加力時の長軸方向せん断ひずみ、破断時では $\gamma_x = \gamma_b$

$f_\phi(\gamma_x)$: $\gamma_\phi \times S_2$ を γ_x で表した関数で、実験結果より求める。図.8 に一例を示す。

- (2) 座屈限界に対しては 2 方向加力の影響はない。

式 (1) に照らし合わせて、限界ひずみを求めるための試験方法を以下のように提案する
3)。

- ① 破断ひずみの評価に際しては、スケール効果を適切に考慮する必要があるが、式 (1) における 1 方向加力時の破断ひずみ γ_u の評価については、スケール効果を考慮して実大製品を用いた試験に基づいて評価を行う。このとき、製品サイズは $\phi 600$ 以上とする。
- ② 一方、式 (1) 中、2 方向加力時のねじれ変形によるせん断 γ_ϕ については、スケール効果は無視しうるとして、 $S_2=3.5, 5, 8$ 等、 S_2 が異なる複数の試験体を用いて式 (2) 中の $f_\phi(\gamma_x)$ を求める。加力波形は、長軸：短軸=2：1 の楕円加力、3 サイクルとし、試験体表面にメッシュを描いて画像処理を行うなどの方法によって、 γ_x における γ_ϕ を計測し、 γ_x と $\gamma_\phi \times S_2$ の関係を最小二乗近似等により求める。
- ③ □ で得られた式 (2) を用いて、(1) で得られた γ_u から、式 (1) が成立する γ_b を求める。

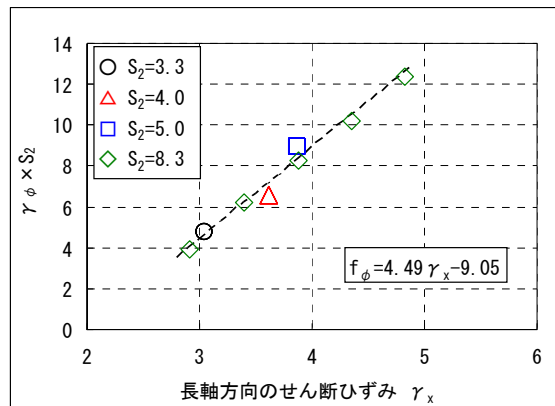


図.8 $f_\phi(\gamma_x)=\gamma_\phi \times S_2$ の設定例

2-4. 水平 2 方向加力実験によるその他の評価結果

その他、面圧、加力速度、加力パターン、繰り返し回数については以下の評価結果が得られている。

- ・ 面圧の増加と共に破断ひずみは若干低下する傾向にある。
- ・ 加力速度の増加と共に破断ひずみは増加する。
- ・ 破断ひずみは楕円加力と比較して 8 の字加力のほうが大きくなる。ねじれは繰り返し加力数と共に増加するが、10 サイクル程度でほぼ一定値に収束する。

3. まとめ

HDR の水平 2 方向加力時の限界特性について、詳細な実験評価の結果、水平 2 方向加力時には、HDR の減衰性に起因するねじれ変形が発生し、破断ひずみが、従来の 1 方向加力に比べ、ねじれに伴うせん断ひずみの分だけ減少することが確認された。また、面圧、繰り返し回数、二次形状係数、加力速度等の、ねじれ変形に与える影響についても評価を行い明らかにした。

HDR を使用するに際しては、これらの新たな知見に留意した設計が必要になる。HDR の水平 2 方向加力時の限界値については、製造会社が実施する試験結果をもとに定めることとする。

尚、JSSI では、さらに 2 方向加力時に適応した応答解析モデルの提案を含めた設計上の考え方についての検討を継続して行う。

[参考文献]

- 1) 嶺脇重雄、山本雅史、東野雅彦、和田章ほか：超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験、構造工学論文集 Vol.55B,2009.3
- 2) 山本雅史、嶺脇重雄、米田春美、東野雅彦、和田章：高減衰積層ゴム支承の水平 2 方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 638 号、pp.639-645、2009.4
- 3) 「水平 2 方向加力時の高減衰ゴム系積層ゴム支承の性状について」、日本免震構造協会 2009 年 7 月 ((社) 日本免震構造協会・会員専用サイト <http://www.jssi.or.jp/kaiin> よりダウンロード可能)
- 4) 「高減衰ゴム系積層ゴム支承水平 2 方向加力試験報告書」、日本免震構造協会 2009 年 7 月 ((社) 日本免震構造協会・会員専用サイト <http://www.jssi.or.jp/kaiin> よりダウンロード可能)