

初期載荷状態の高減衰積層ゴム支承を用いた ハイブリッド地震応答実験

高橋良和¹・鶴野禎史²・高井智康³・朝倉康信⁴・加藤亨二⁵・山田博⁶・兼子一弘⁷

¹正会員 博士（工学） 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

²正会員 （株）川金コアテック 技術研究所（〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43）

³正会員 （株）川金コアテック 大阪支店（〒530-0012 大阪市北区芝田1-14-8）

⁴正会員 日本鑄造(株) エンジニアリング開発部（〒210-9567 川崎市川崎区白石町2-1）

⁵正会員 （株）ブリジストン 免震・制振開発部（〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町1）

⁶正会員 東海ゴム工業(株) 免震デバイス事業室（〒485-8550 愛知県小牧市東3-1）

⁷正会員 横浜ゴム(株) 平塚製造所（〒254-8601 平塚市追分2-1）

1. はじめに

橋梁の支承部に求められる条件は、常時の荷重に対する機能だけでなく、地震時の挙動も考慮して定める必要がある。特に地震の影響を支配的に受ける部材である支承部の中でも免震支承では、支承部が破壊すると、エネルギー吸収が期待できなくなるため、その力学的特性は実験により十分検証することが必要である。

従来より、ゴム支承の性能を確認するに当たっては、正負交番載荷実験が行われるが、定常的な振動に対する応答特性に着目されていたことから、一般に初期載荷（1回目の履歴）は考慮せず、2回目以降の繰返し載荷により、その特性が評価されていた。しかしながら、平成24年に改訂された道路橋示方書¹⁾では、初期載荷における履歴特性が2回目以降の載荷における特性と大きく異なる特性を有するものに対しては、初期載荷の特性の影響について適切に考慮することが求められるようになった。免震支承の中でも高減衰ゴム支承は、繰返し載荷の影響が大きいことが明らかとなっている。特に、1回目の履歴曲線は、大きな剛性と減衰能を示し、2回目以降の履歴曲線と大きな違いを示す。通常、ゴム支承は、納品される前に、せん断ひずみ175%に相当する正負交番載荷実験により、特性確認が行われる。そのため、市場に出回っているゴム支承は初期載荷状態ではないものの、ゴム支承の特性繰返し載荷を受けた後、除荷した状態で放置すると、初期

に近い状態に復元する。

本研究では、製作後未載荷（初期載荷状態）の高減衰ゴム支承の地震時挙動を明らかにするため、ハイブリッド地震応答実験を行うものである。

2. 実験供試体

実験供試体の詳細を図-1に示す。供試体は、JIS等で標準化されている試験体形状（400mm×400mm×9mm×6層）に準拠し、試験装置の能力に合わせて縮小したものである。ゴム層厚は $\Sigma t_g=5\text{mm} \times 6\text{層}=30\text{mm}$ である。ゴム材料は、HDR-S（超高減衰ゴム、G12）を用いる。初期載荷状態の影響を検討するため、工場製作状態（バージン状態）で納品されている。

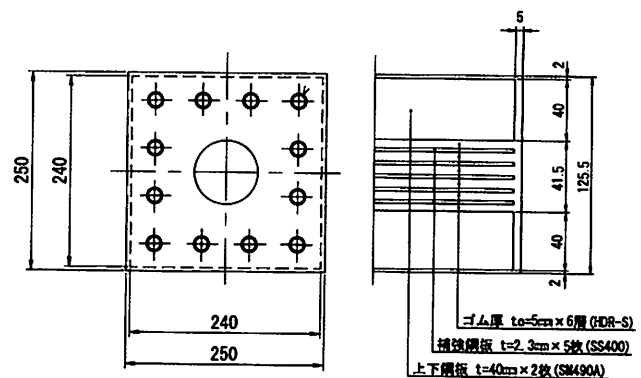


図-1 実験供試体

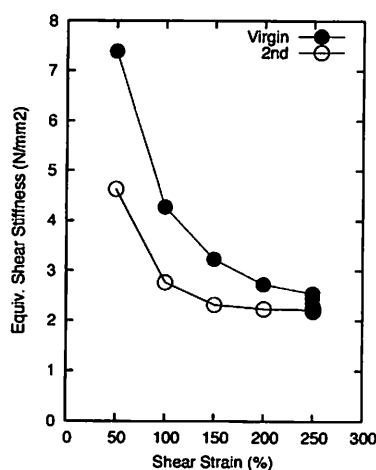


図-5 等価せん断弾性係数のせん断ひずみ依存性

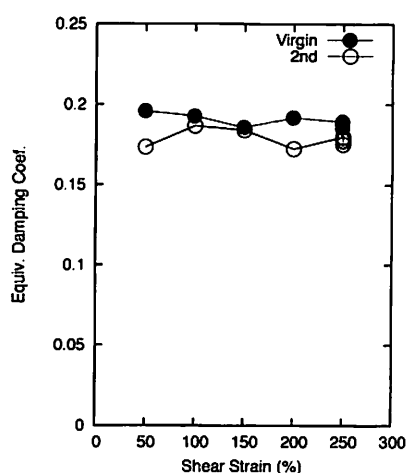


図-6 等価減衰定数のせん断ひずみ依存性

5. 地震応答解析による入力地震動の調整

正負交番载荷実験結果より、本支承の特性を载荷経験済み供試体実験結果を基に設定すると、一次剛性16.06 MN/m, 降伏荷重40.0 kN, 二次剛性比0.08と同定でき、せん断ひずみ175%における等価剛性は1.986 MN/mとなる(図-7)。

これを用いてハイブリッド実験モデルの上部構造質量を設定すると、201.3 tonとなる。本研究では、平成14年道路橋示方書²⁾に規定されるレベル2タイプ2設計地震動波形(Ⅱ種地盤用, 3波)を用いて実験を行う。4章で同定された载荷経験済み供試体の諸量を基に、各設計地震動が入力した場合、ゴム支承のせん断ひずみが250%となるように調整する。その結果、図-8のように入力調整倍率を得ることができる。

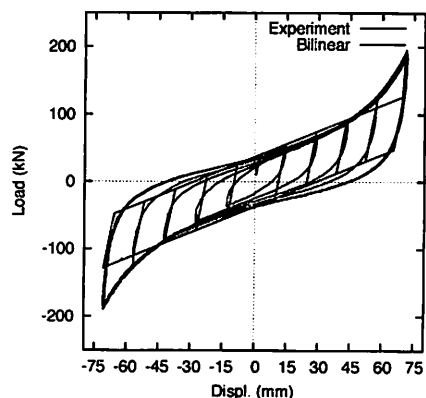


図-7 载荷経験済みゴム支承の荷重-変位関係と設計で用いるバイリニアモデル

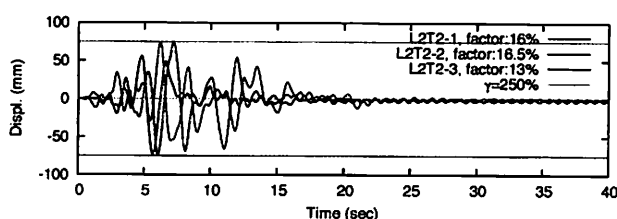


図-8 地震応答解析によるゴム支承の変形応答

6. ハイブリッド地震応答実験

(1) 実験ケース

1体のゴム支承に対し、次の順序で各実験ケースを実施する。各々の実験ケース前には、変形0で荷重0となるよう残留変形の影響を取り除く調整を行っている。

1. 初期载荷状態の実験供試体に対するハイブリッド地震応答実験
2. 载荷経験済み実験供試体に対するハイブリッド地震応答実験
3. 性能確認のための175%せん断ひずみ11回正負交番载荷実験
4. 载荷経験済み実験供試体に対するハイブリッド地震応答実験

以降、本論文においては、上記順序の1回目および2回目の結果を用いて考察する。

(2) 設計地震動1

図-9に、設計地震動1に対するゴム支承応答の比較を示す。まず、正負交番载荷実験結果と同様に、全体的に初期载荷状態の方が大きな復元力を示して

いる。また、载荷経験済み状態の方が復元力が小さいことを考えると、変位応答も大きくなると予想されたが、最大変位応答はほぼ同程度であった。

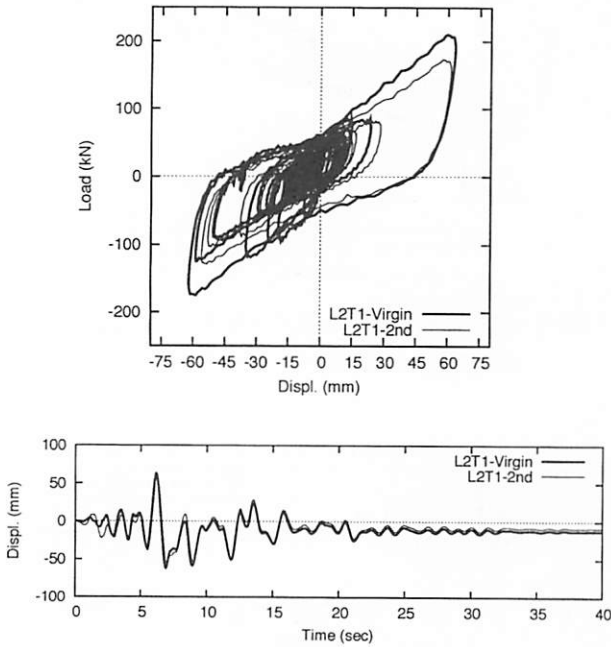


図-9 設計地震動 1 を用いたゴム支承応答の比較

(3) 設計地震動 2

図-10に、設計地震動 2 に対する結果を示す。傾向は設計地震動 1 とほぼ同様であり、初期载荷状態の方が大きな復元力を示しているものの、変位応答に大きな差異は見受けられない。

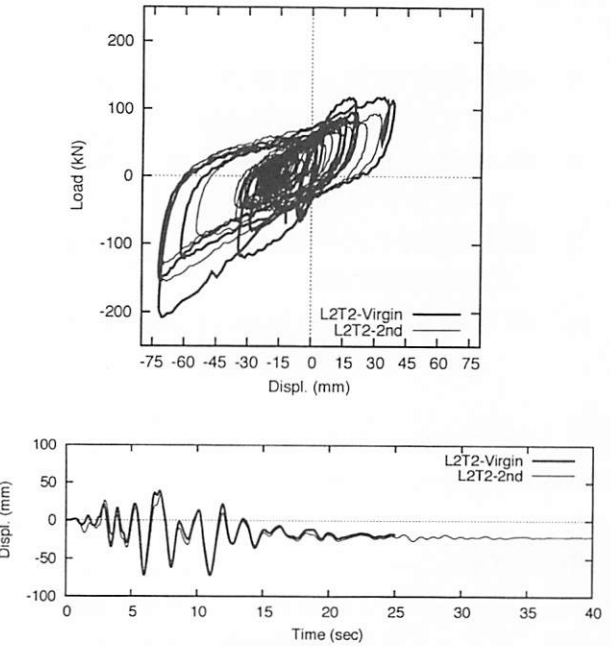


図-10 設計地震動 2 を用いたゴム支承応答の比較

(4) 設計地震動 3

図-11に、設計地震動 3 に対する結果を示す。本ケースでは、復元力が大きな初期载荷状態に比べ、復元力が小さくなる载荷経験済み状態の方が大きな最大変形、残留変形を示しているなど、設計地震動 1, 2 と異なる傾向を示している。

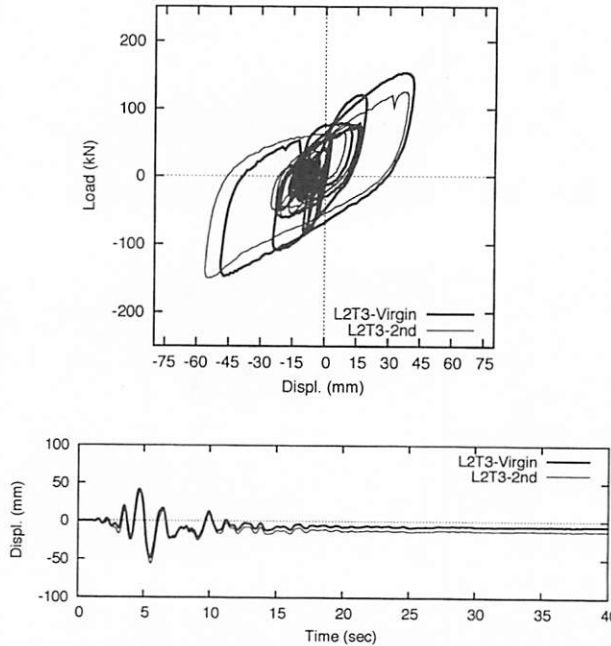


図-11 設計地震動 3 を用いたゴム支承応答の比較

(5) 設計地震動 1 ～ 3 に対する考察

これら実験結果が示すように、大きな復元力を示す初期载荷状態の支承を用いた方が、小さな応答変位となるケース（設計地震動 3）もあれば、ほぼ同等の応答変位となるケース（設計地震動 1, 2）もある。この結果について、構造物への入力エネルギーの観点から考察する。

構造物の運動方程式は、次式で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{z}_0 \quad (1)$$

ここで、 x は構造物の応答変位、 z_0 は地動変位である。(1)式の両辺に $dx = \dot{x}dt$ を乗じて地震の全継続時間 t_0 にわたって積分すれば、(2)式を得る。これがエネルギーに基づく釣り合い方程式である。

$$m \int_0^{t_0} \ddot{x} dx + c \int_0^{t_0} \dot{x}^2 dt + \int_0^{t_0} F(x) \dot{x} dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{x} dt \quad (2)$$

この右辺が地震動による構造物へのエネルギー入力 の総和量 E を表す。本実験における入力エネルギーも、この E で議論することが本来であるが、実験では応答速度は記録していなかったため、その代替としてエネルギースペクトルを用いて考察する。

エネルギースペクトルは、エネルギー入力総和量 E を構造物の周期に対してプロットしたものであるが、エネルギー入力の総量が質量に依存することを考慮して、(3)式より等価速度 V_E に換算して用いられることが多い（エネルギー換算速度応答スペクトル、 VE スペクトル）。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (3)$$

本実験で用いた入力地震動に対するエネルギー換算速度応答スペクトルを図-12に示す。ここで、図-6に示す等価減衰定数がせん断ひずみ依存性が大きいことを参考にして、等価減衰定数20%を用いて算出した。

また、図-13に、図-5および本実験で用いた上部構造質量から算出した等価固有周期のせん断ひずみ依存性を示す。初期载荷状態では、せん断ひずみ50%では等価固有周期が約1秒であるのに対し、载荷経験済み状態では、約1.3秒である。図-12の VE スペクトルを見ると、全ての設計地震動において、ほぼ周期1秒でピークを示し、周期が長くなるにつれて小さな入力エネルギーとなる。つまり、小さな振幅で固有周期が短くなる初期载荷状態では、構造物に入力されるエネルギーが载荷経験済み状態よりも大きくなる。結果、復元力の大きな初期载荷状態支承の応答が、载荷経験済み状態と同等であった原因と考えられる。また、設計地震動3に対しては、周期1～2秒において、スペクトルの値は大きく変化しない。これより、構造物への入力エネルギーはせん断ひずみに対してほぼ一定となり、復元力が大きな初期载荷状態の方が応答変位が小さくなるという、当初予測された結果をもたらしたと考えられる。

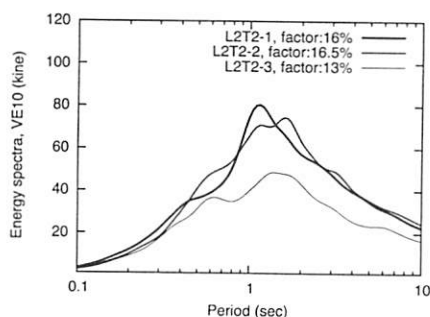


図-12 各設計地震動に対する VE スペクトル

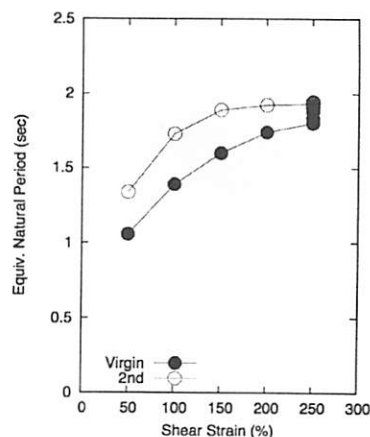


図-13 等価固有周期のせん断ひずみ依存性

(6) 履歴形状の安定性

設計地震動1に対し、異なる3体の支承を用いてハイブリッド地震応答実験を実施した。目的は高減衰ゴム支承は、初期载荷状態と载荷経験済み状態で大きく特性が異なるものの、その履歴形状の再現性を検討するためである。

図-14, 15に、それぞれ初期载荷状態、载荷経験済み状態の支承応答の比較を示す。これより、3体の履歴形状の差は小さく、初期载荷状態時に地震応答のような複雑な履歴を経験した後の挙動も、最大応答時でも5%程度の変動に留まり、結果、変位応答は、残留変形を含めほぼ同じ結果を得た。

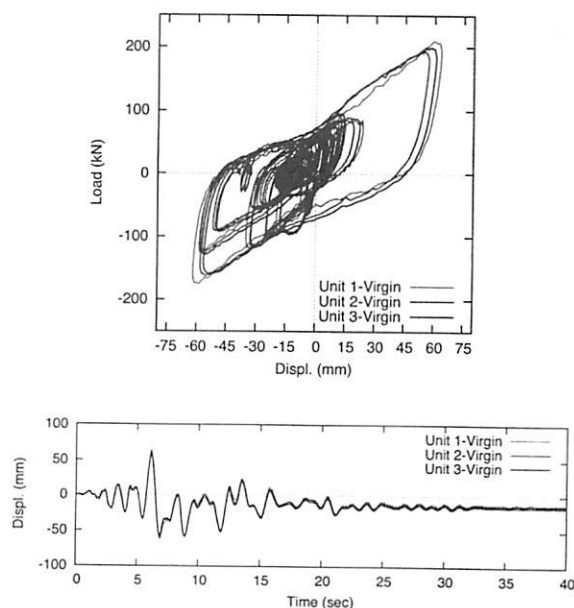


図-14 初期载荷状態に対するゴム支承応答の比較

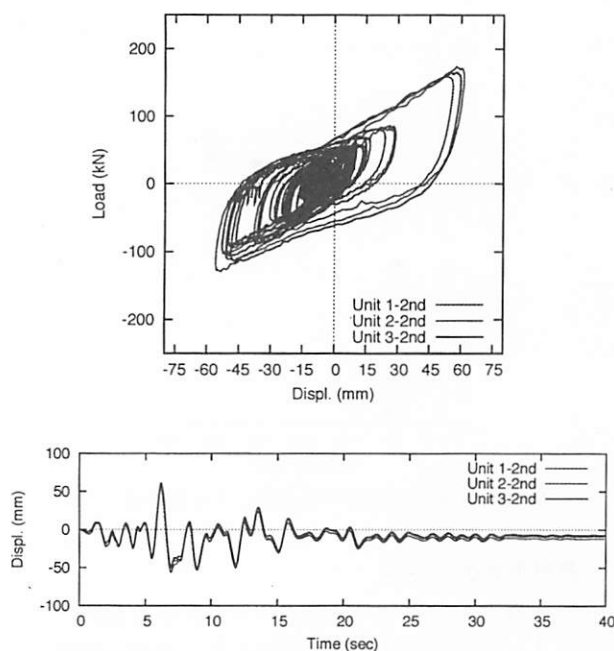


図-15 载荷経験済み状態に対するゴム支承応答の比較

以上より、高減衰ゴム支承は初期载荷状態とそれ以降の载荷で挙動は変化するものの、その再現性は高く、初期载荷状態から载荷経験済み状態へ変化する数値解析モデルを適切に設定することが可能であれば、地震時応答を評価することは可能となる。

6. まとめ

本研究では、初期载荷における履歴特性が2回目以降の载荷における特性と大きく異なる特性を有する支承である高減衰ゴム支承（HDR-S）を対象に、地震時応答に対する初期载荷の特性の影響、またその安定性を評価するため、製作後未载荷（初期载荷

状態）および载荷経験済み状態の高減衰ゴム支承に対するハイブリッド地震応答実験を行った。本研究から得られた結論は以下の通りである。

- ・ 初期载荷状態と载荷経験済み状態では、特にせん断ひずみが小さい領域で、せん断弾性係数の差が大きい。
- ・ 加速度応答スペクトルがほぼ同じ3つの設計地震動を入力してハイブリッド地震応答実験を行った結果、復元力は初期载荷状態の方が大きいものの、応答変位は地震動特性に依存する。想定する応答せん断ひずみ領域において入力エネルギーが大きく変化しない場合、大きな復元力を示す初期载荷状態の方が小さな応答変位となる傾向にあるが、免震支承を用いる橋梁で設計される周期帯では、1秒以降入力エネルギーが一樣に減少する傾向にあるため、結果を比較するに当たっては入力エネルギーに対する考察が重要である。
- ・ 初期载荷状態から载荷経験済み状態で履歴特性は変化するものの、異なる支承間での再現性は高い。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，2012.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，2002.