

高減衰ゴム支承の減衰性能と構造物の地震応答 低減効果の関係の検討

影本 直也¹・五十嵐 晃²・中村 保之³・山崎 信宏⁴

¹ 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻修士課程（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: kagemoto.naoya.42a@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学防災研究所教授（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 住友理工株式会社 化工品事業部（〒485-8550 愛知県小牧市東 3-1）

E-mail: yasuyuki.nakamura@jp.sumitomoriko.com

⁴ 正会員 日本鑄造株式会社 技術研究所（〒210-9567 神奈川県川崎市川崎区白石町 2-1）

E-mail: n_yamazaki@nipponchuzo.co.jp

より効果的な地震応答低減効果を得るため、既往のものよりも減衰性能・エネルギー吸収性能を増強した新しい高減衰ゴム支承の開発の試みがなされている。本研究では、高減衰ゴム支承の開発にあたっての基本的な適用効果の明確化のため、減衰性能と橋梁・構造物の地震応答の低減効果の関係を評価した。高減衰ゴム支承を想定したバイリニアモデルおよび修正バイリニアモデルの等価減衰定数を変化させた橋梁の構造モデルに対して、耐震性能評価用の入力地震動を用いた動的応答解析を実施し、減衰性能と構造モデルの最大応答値の関係の検討を行った。応答塑性率で表された構造物の最大応答値は、総合的に判断すればゴム支承の等価減衰定数がおおよそ 0.2 と 0.3 の間の値において最小となる傾向を示す結果が得られた。

Key Words: isolation, high dumping rubber, HDRex, hardening, restoring force, seismic response

1. はじめに

橋梁に免震ゴム支承の一種として適用されている高減衰ゴム支承は、天然ゴムに充填剤や補強材等を配合することでばね機能に加え減衰機能を付与したゴム材料を用いて、鋼板とともに積層構造としたゴム支承であり、長周期化による地震力の低減と地震エネルギーの吸収による応答低減効果の発揮を期待するものである。現在用いられている橋梁用の高減衰ゴムとして、HDR および HDR-S が挙げられる¹⁾。こうしたゴム支承においては、履歴復元力の経験ひずみ依存性、大ひずみ時のハードニングや低温時の特性変化²⁾など、設計や今後の活用にあたって将来的に改善が望まれる特性もあり、新しい高減衰ゴム材料を用いた新しいタイプのゴム支承の研究開発も行われている。

こうした試みの一つとして、従来の高減衰ゴム支承よりもさらに減衰性能・エネルギー吸収性能を増強することで、より効果的な地震応答低減効果を得る試みもなされている。例えば HDRex³⁾は、小さい温度依存性を狙い

とした新たな配合設計を行ったゴム材料を用いた高減衰ゴム支承であり、既存の高減衰ゴム支承に比べて高い減衰性能と、緩和されたハードニング特性を有している。このような高減衰ゴム支承を適用することにより、従来よりも効率的に耐震性能の確保を図ることが可能となり、より合理的な橋梁設計の実現につながることが期待される。

こうした新たな高減衰ゴム支承の開発を実施する上で、前提として、高減衰ゴム支承に付与する減衰性能の増強が、どの程度橋梁の地震応答の低減に効果的であるのかは、重要な課題である。一般的な免震の原理から考えれば、ゴム支承の減衰性能が増加するほど高い免震効果が得られ、より構造物の応答の低減が達成されるものと予想される。しかしながら、減衰性能の相当の向上が得られてきた高減衰ゴム支承において、そのような応答の低減傾向はどの程度の減衰性能まで当てはまるか、その適用範囲が明確化されているわけではない。そこで本研究では、将来的な高減衰ゴム支承の開発にあたっての基本的な適用効果を明確化することを目的として、減衰性

能と橋梁・構造物の地震応答の低減効果の関係を定量的に評価するため、高減衰ゴム支承の履歴復元力特性をバイリニアモデルおよび修正バイリニアモデルでモデル化した上で、そのパラメータの値により減衰性能を変化させて橋梁モデルに適用し、耐震性能評価用の入力地震動を用いた動的応答解析を実施した。得られる最大応答に基づき上述の検討を行った。

2. 高減衰ゴム支承の履歴復元力モデル

道路橋支承便覧³⁾では、規定されている高減衰ゴム支承（HDR）の履歴復元力特性を橋梁の耐震性能評価に反映する考え方として、せん断ひずみ振幅に対応したバイリニア復元力特性とした非線形履歴モデルを用いた動的応答解析による方法を規定している。最大ひずみ γ としてゴム支承の有効設計変位 u_{Be} に対応するひずみ γ_e を用い、図-1に示される等価剛性 K_h 、バイリニアモデルの2つの剛性 K_1 、 K_2 を最大ひずみ γ の関数として表すモデルである。

これに対し、本研究では、図-2に示すように最大せん断ひずみ γ が更新されていくときには γ の関数として表される骨格曲線上で復元力が変化し、 γ よりも小さいせん断ひずみ時は最大変位点を指向するバイリニアモデルとする。正側および負側の変位で生じた最大せん断ひずみ γ は反対側の変位でも生じたものと仮定している。このようなモデルを、本研究では修正バイリニアモデルと呼ぶ。骨格曲線として非線形関数を指定することで、時刻歴応答解析における高減衰ゴムの時々刻々のひずみに依存する非線形復元力を表現できる利点があることから、本研究では修正バイリニアモデルを用いることとした。なお、高減衰ゴムの温度依存性、面圧依存性および速度依存性は単純化のため無視することとする。

高減衰ゴム支承の減衰性能は、次式で定義される等価減衰定数 h_b で評価する。

$$h_b = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (1)$$

$$W = \frac{d_{max} \cdot F_{max}}{2} \quad (2)$$

ここに、 ΔW ：サイクルの履歴ループ面積、 W ：弾性ひずみエネルギー、 d_{max} 、 F_{max} はそれぞれ最大変位、最大荷重である。

バイリニアモデルの1サイクルの履歴ループの面積 ΔW_b は、次式で表される。

$$\Delta W_b = 4Q_d d_{max} - 4Q_d x_c \quad (3)$$

ここに、 Q_d は切片荷重、 x_c は降伏変位である。 $\Delta W = \Delta W_b$ として式(1)を用いることにより、等価減衰定数 h_{b2} は次式で表すことができる。

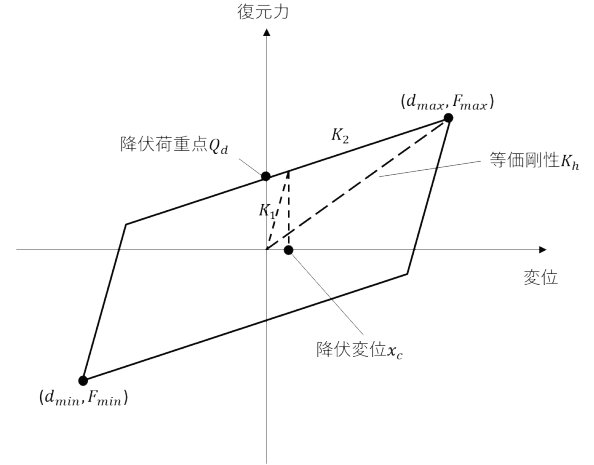


図-1 バイリニアモデル

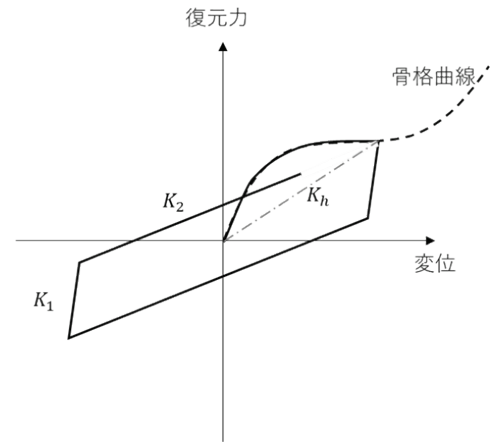


図-2 修正バイリニアモデルの概念図

$$h_{b2} = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(G_1 - G)(G - G_2)}{G(G_1 - G_2)} \quad (4)$$

ここに、 G 、 G_1 、 G_2 はそれぞれ K_h 、 K_1 、 K_2 に対応するせん断弾性係数である。

本研究では、HDRex の正負交番繰返し载荷試験結果に基づく以下の式のモデルを用いた。

$$G = a_1 \gamma^{a_2} + a_3 \gamma \quad (5)$$

$$G_1 = c_1 \gamma^{c_2} + c_3 \gamma \quad (6)$$

$$G_2 = d_1 \gamma^{d_2} + d_3 \gamma \quad (7)$$

ここに、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 d_1 、 d_2 、 d_3 は表-1に示す定数パラメータである。ただし、 $\gamma = 0.2$ をこれらの式の適用下限値とし、それより小さい γ の場合は $\gamma = 0.2$ の時の値で一定とする。载荷試験結果と併せ、式(5)、(6)、(7)の関係を図示したものを図-3に、修正バイリニアモデルにより得られる履歴ループを図-4に示す。実際の現実的な高減衰ゴム支承の特性を表現したモデルとなっている事が示されている。

表-1 修正バイリニアモデルのパラメータ

	a_1	a_2	a_3
G8	0.9492	-0.8752	0.1227
G10	1.2012	-0.9128	0.1725
G12	1.4665	-0.9048	0.1622
	c_1	c_2	c_3
G8	2.3741	-0.7516	0.3276
G10	3.4347	-0.6939	0.7379
G12	3.8256	-0.856	1.2123
	d_1	d_2	d_3
G8	0.5252	-0.9007	0.1134
G10	0.6809	-0.8658	0.1465
G12	0.7961	-0.9447	0.1577

3. 減衰性能と地震応答低減効果の関係の評価

高減衰ゴム支承の復元力モデルパラメータを変化させることで減衰性能を表す等価減衰定数を変化させた高減衰ゴム支承を表現し、これを適用した橋梁モデルに耐震性能評価用の入力地震動を用いた動的応答解析を実施した。仮定した高減衰ゴム支承モデルの等価減衰定数と橋梁モデルの最大応答値の関係を調べることで、ゴム支承の減衰性能と橋梁・構造物の地震応答低減効果の関係を定量的に検討した。

(1) 解析の方法

高減衰ゴム支承の等価減衰定数が 0.1 と 0.32 の間で変

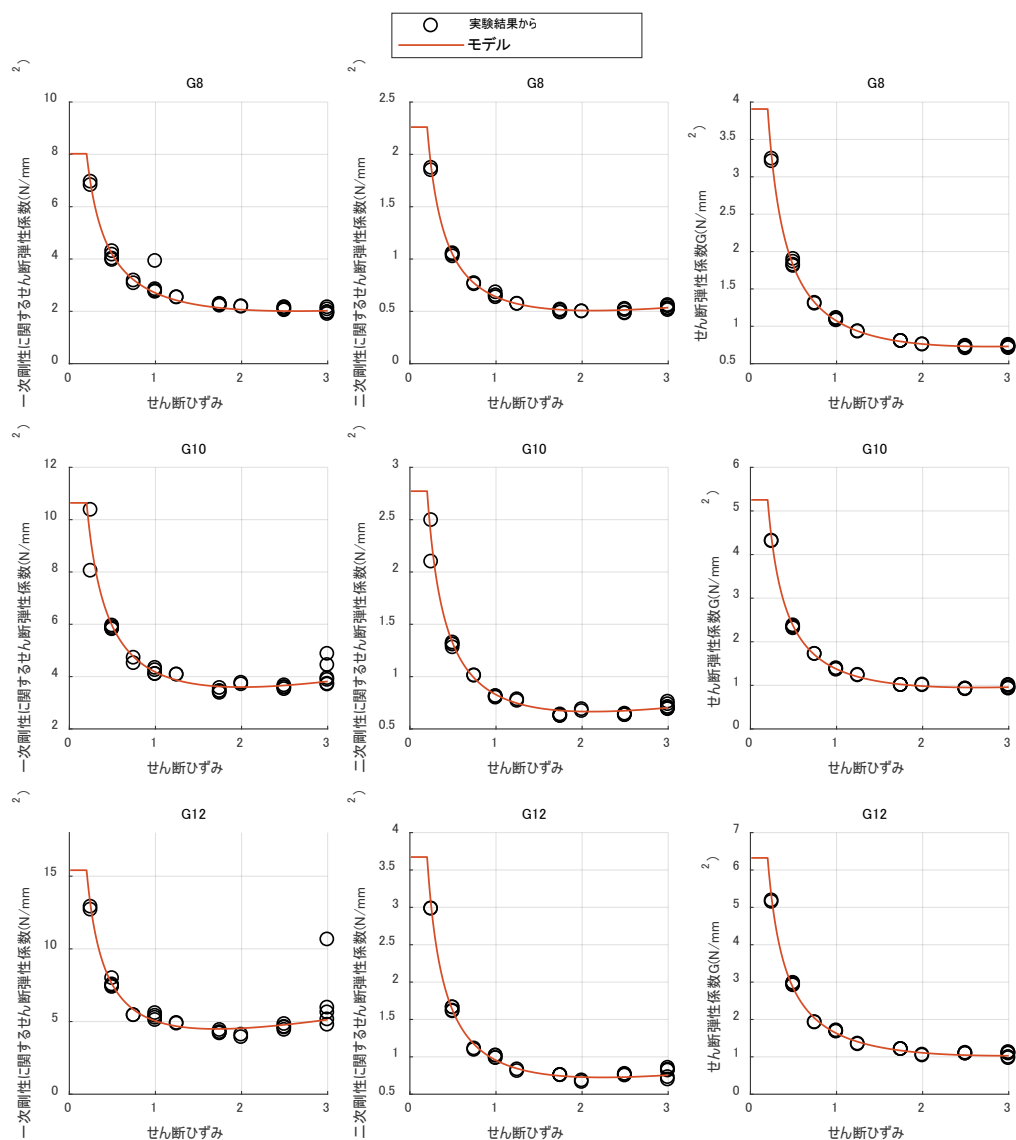


図-3 修正バイリニアモデルにおけるせん断弾性係数とせん断ひずみの関係

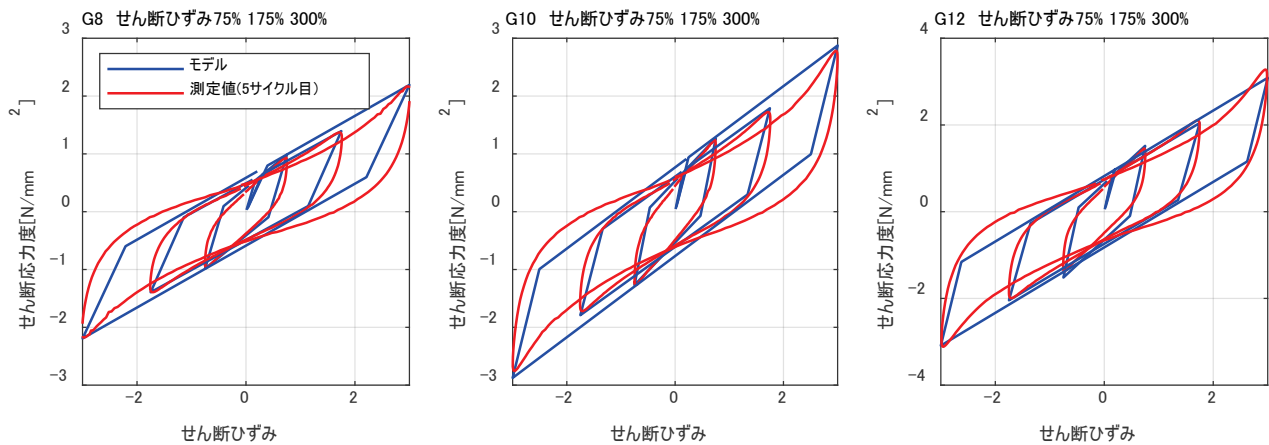


図-4 修正バイリニアモデルによる履歴ループの例

化するようなゴムの応力-ひずみ関係を仮定して応答解析を行った。高減衰ゴム支承の等価減衰定数を変化させる条件として、以下の3ケースを仮定した。

Case 1: 1次・2次せん断弾性係数を固定，切片せん断応力を変化

1次せん断弾性係数 G_1 を $5.0[\text{N}/\text{mm}^2]$ ，降伏後の2次せん断弾性係数 G_2 を $0.5[\text{N}/\text{mm}^2]$ で一定とするバイリニアモデルを仮定し，切片せん断応力 τ_d を変化させることで等価減衰 h_b を変化させる。概念図を図-5に示す。

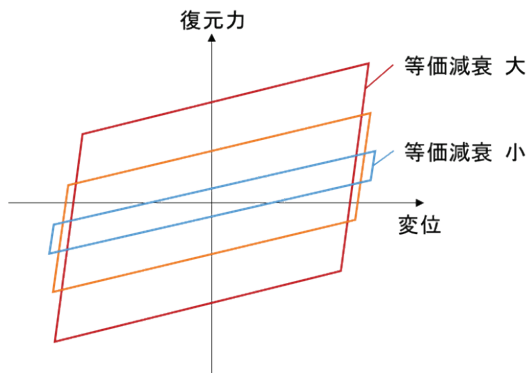


図-5 Case1 切片荷重を変化させたバイリニアモデル（1次剛性・2次剛性一定）

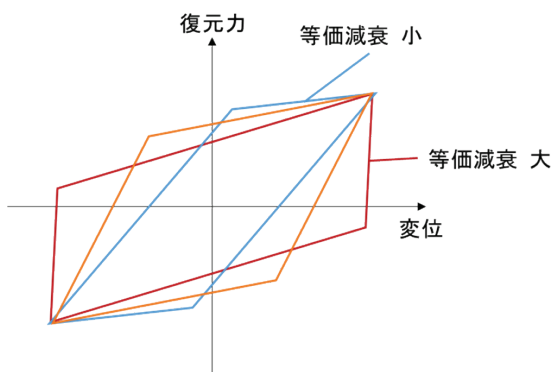


図-6 Case2 1次剛性を変化させたバイリニアモデル（等価剛性と1次剛性／2次剛性比一定）

Case 2: 等価せん断弾性係数と1次・2次せん断弾性係数の比を固定，2次せん断弾性係数を変化せん断ひずみ 175%時の等価せん断弾性係数 G を $1.20[\text{N}/\text{mm}^2]$ とし， G_1/G_2 の比が10で一定のバイリニアモデルを仮定した。 G_1 および G_2 の値を変化させることで，等価減衰 h_b を変化させる。概念図を図-6に示す。

Case 3: 等価せん断弾性係数はHDREx(G12)の値，1次・2次せん断弾性係数の比を固定，等価せん断弾性係数 G は前章で定めた修正バイリニアモデルのG12の場合の値を用い， G_1/G_2 の比が10で一定の修正バイリニアモデルを仮定した。 G_1 の値を変化させることで，等価減衰 h_b を変化させる。

図-7に示す橋梁の簡易モデルを用いて免震橋の非線形時刻歴応答解析を行う。この橋梁モデルではRC橋脚を弾塑性ばねと1つの質点で表し，橋桁を含む上部構造も重心位置における1つの質点として表している。橋脚天端における橋軸方向の復元力特性をClough型バイリニア

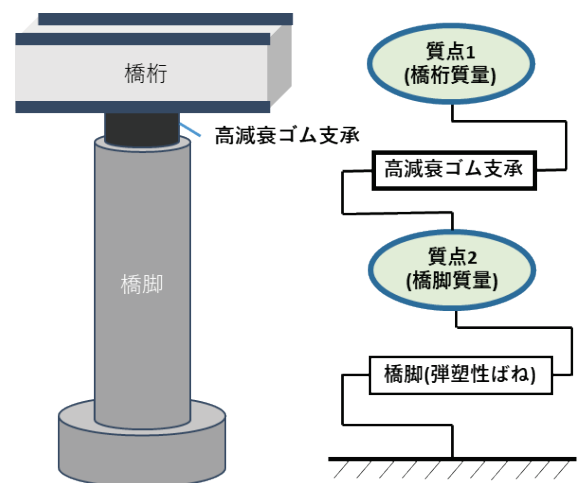


図-7 橋梁の簡易解析モデル

モデルで表す。本研究ではClough型バイリニアモデルにおいて除荷剛性は一次剛性と等しいと仮定している。各パラメータは表-2の通りである。免震支承がなく橋脚と橋桁が剛結されていると仮定した場合の固有周期は $T_0 = 0.7\text{sec}$ に設定し、免震後の固有周期はおよそ 1.57sec である。

解析にはNewmark β 法($\beta = 1/6$)を用いた。入力地震動には、道路橋示方書⁴⁾で定められているタイプⅠおよびタイプⅡのⅠ種、Ⅱ種、Ⅲ種地盤用地震動をそれぞれ用いた。入力地震動は簡略化して、例えばタイプⅡ、Ⅲ種地盤用地震動、sample 1の場合、231のように3桁の数字として表現することとする。

(1) 解析結果と考察

Case 1の解析結果を図-8に示す。入力地震動のサンプルによるばらつきが若干見られるが平均的な傾向に着目すれば、ゴム支承の最大せん断ひずみは等価減衰が増加するにつれて急激に小さくなっている。橋脚の応答塑性率に関しては、等価減衰が0.1より増加すると減少するが、さらに増加させると再び増加し、平均応答が最も小さくなるような等価減衰の値が存在する傾向が見られる。Ⅰ種地盤およびⅡ種地盤ではその等価減衰は0.2よりも小さい値であり、Ⅲ種地盤では0.2よりも大きい等価減衰で生じている。

Case 2の解析結果を図-9に示す。**Case 1**の場合よりも緩やかではあるが、ゴム支承の最大せん断ひずみは等価減衰が増加するにつれて小さくなっている。また、特にⅡ種地盤およびⅢ種地盤のタイプⅡ地震動のケースでは

表-2 解析条件

橋桁部	
質量	400 ton
高減衰ゴム支承 G12を使用	
ゴムの面積	1.00 m ²
総ゴム厚	16 cm
二次形状係数	6.25
粘性減衰定数	0
橋脚部	
質量	150 ton
降伏震度	0.5
降伏荷重	2697.7 kN
一次剛性	44.31 kN/mm
二次剛性	2.2156 kN/mm
減衰定数	0.05

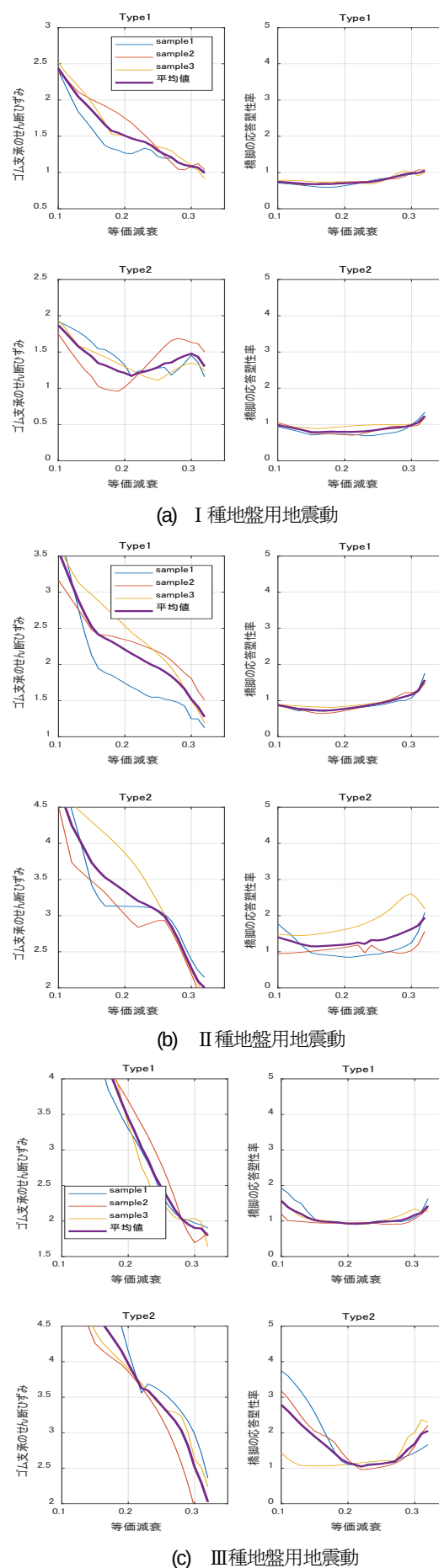
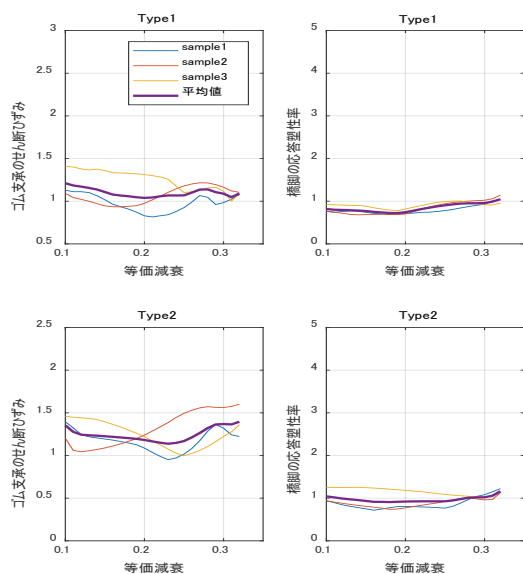
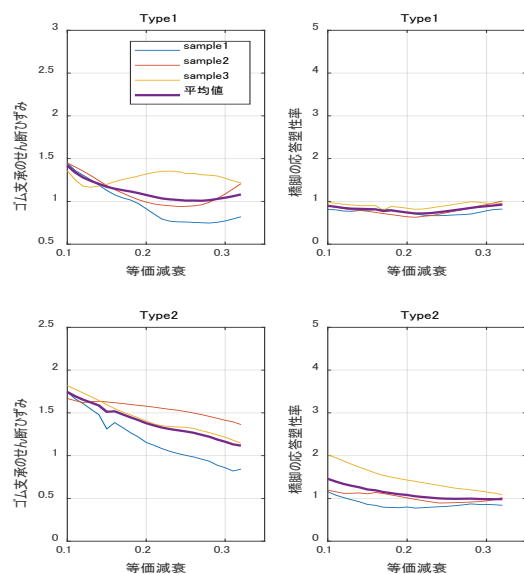


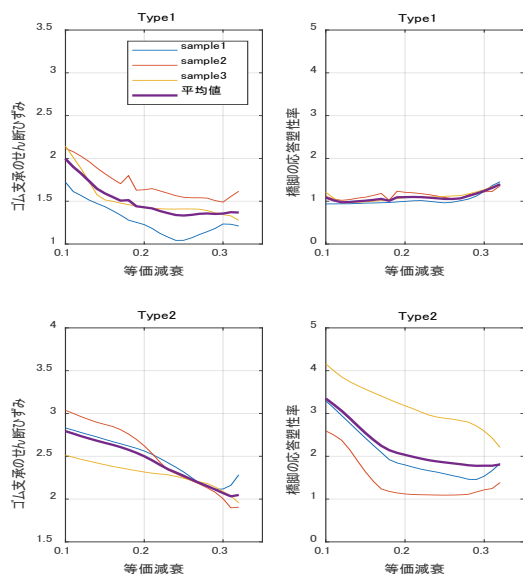
図-8 最大応答値と等価減衰の関係 (Case 1)



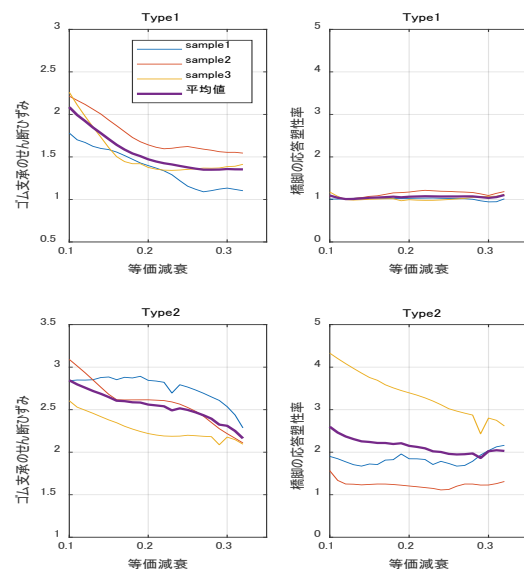
(a) I種地盤用地震動



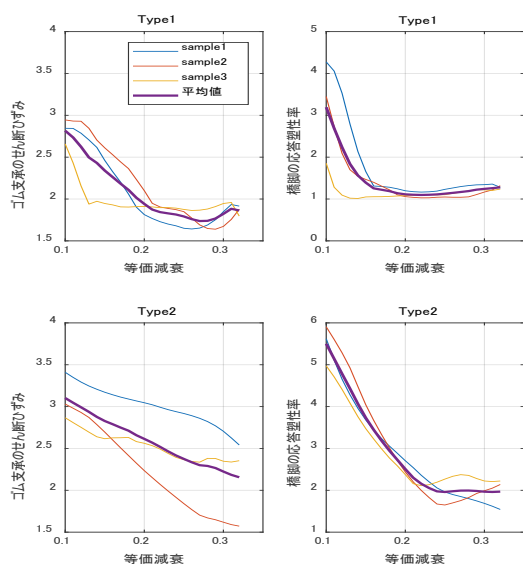
(a) I種地盤用地震動



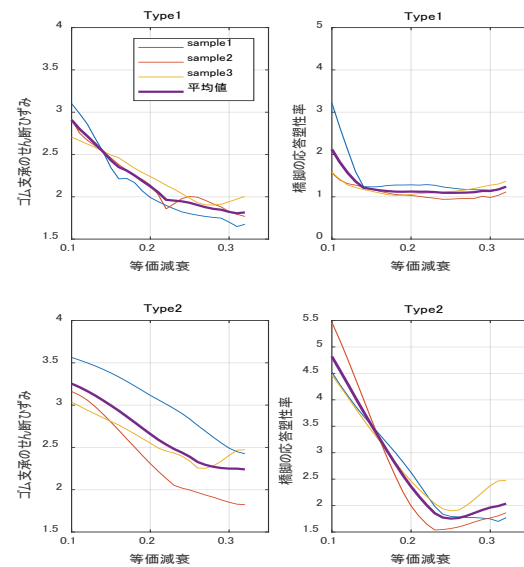
(b) II種地盤用地震動



(b) II種地盤用地震動



(c) III種地盤用地震動



(c) III種地盤用地震動

図-9 最大応答値と等価減衰の関係 (Case 2)

図-10 最大応答値と等価減衰の関係 (Case 3)

等価減衰定数が 0.2 を越えるまで橋脚の応答塑性率の急激な減少が見られ、減衰性能の増加の応答低減効果が大いだが、その後ほぼ横ばいとなっている。

Case 3 の解析結果を図-10 に示す。Case 3 の場合もゴム支承の最大せん断ひずみは等価減衰が増加するにつれて小さくなるのは同様であるが、橋脚の応答塑性率が最小となるのは、Ⅲ種地盤のタイプⅡ地震動のケースでは等価減衰が 0.2 と 0.3 の間の値である。Case 2 のような横ばいの傾向ではなく、大きな等価減衰では応答の増加に転じている傾向が見られるが、これは実際の高減衰ゴム支承の持つ大ひずみ領域での復元力特性の変化を取り入れたモデルとしている影響によるものと考えられる。

ここでは 3 つの復元力モデルへの減衰の変化の与え方について解析を行ったが、免震設計における地震作用は等価剛性に基づく等価固有周期がまず支配的な要因であることを考慮すれば、Case 2 および Case 3 の結果が最も実際の構造物の地震応答低減効果の性状を反映しているものと考えられる。これらのケースでの検討結果から、等価減衰定数をおよそ 0.2 と 0.3 の間程度の値まで増強することが、地震応答の低減効果がより効果的に得られる範囲であると考えられる。等価減衰定数をそれより大きくしても地震応答低減効果が増加しにくい理由として、ゴム支承のせん断ひずみは減少していくことから、エネルギー吸収が効率的に発現しにくくなることなどが考えられる。

5. おわりに

高減衰ゴム支承により大きな減衰性能を有する高減衰ゴム支承を適用することにより、従来よりも効率的な耐震性能の確保および合理的な橋梁設計の実現につながることが期待される。本研究では、高減衰ゴム支承の等価減衰定数を変化させた地震応答解析を行い、高減衰ゴム支承に付与する減衰性能と橋梁・構造物の地震応答低減効果の関係を数値的に検討した。その結果、等価減衰定数が概ね 0.2 と 0.3 の間までの値において、橋脚の応答塑性率が減少することが示された。それよりも大きな減衰性能を高減衰ゴム支承に付与しても、橋脚の応答塑性率応答の低減は横ばいか、あるいは逆に増加することがあることを確認した。

参考文献

- 1) 財団法人土木研究センター：道路橋の免震・制震設計法マニュアル（案），2011 年。
- 2) 斎藤剛彦，入江駿亮，中村保之，竹ノ内浩祐，宮森保紀，山崎智之：低温動的載荷実験による高減衰ゴム支承の力学的特性の検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.74, No.4, I_765-I_776，2018 年。
- 3) 日本道路協会：道路橋支承便覧（改訂版），2019 年。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017 年。

CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL SEISMIC RESPONSE REDUCTION EFFECT ASSOCIATED WITH DAMPING PERFORMANCE OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS

Naoya KAGEMOTO, Akira IGARASHI, Yasuyuki NAKAMURA and Nobuhiro YAMAZAKI

Efforts of research and development of new types of high-damping rubber bearings with enhanced damping and energy absorption performance have been made to achieve efficient seismic response reduction toward the improvement of structural design. In this study, relationship between the damping performance and the structural seismic response reduction effect is investigated for fundamental evaluation of the effect of high-damping rubber bearing application. Dynamic response analyses of nonlinear structural models of bridges with high damping rubber bearings using input ground motion for seismic performance assessment are conducted, assuming various values of equivalent damping ratios specified to the bearing represented by the bilinear and modified bilinear models. The maximum response in terms of the pier ductility factor response tends to achieve the minimum when the equivalent damping constant of the rubber bearing is between 0.2 and 0.3.