

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：12401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560473  
 研究課題名（和文）積層ゴム支承の耐震設計用レオロジーモデルの開発：低温下における設計法の確立  
 研究課題名（英文）Development of a rheology model of laminated rubber bearings for seismic design: Establishment of design method at low temperature  
 研究代表者  
 奥井 義昭（OKUI YOSHIAKI）  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：40214051

研究成果の概要（和文）：橋梁の耐震設計における動的非線形解析で用いるゴム支承モデルの開発を目的として、ゴム支承を用いた載荷試験を行った。高減衰ゴムでは温度依存性により、低温下での挙動が常温時の挙動と大きく異なるため、材料試験では常温下での試験に加えて低温下の試験も行い、高減衰ゴムの温度依存性明らかにした。高減衰ゴム支承では粘性効果が主な減衰メカニズムであるため、粘性効果が表現出来る粘弾塑性型のレオロジーモデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：A seismic design model of base-isolation rubber bearings for nonlinear dynamic analyses is investigated especially under low temperature conditions. The rubber bearing tests are carried out in low temperatures environment up to -30 C deg. to identify temperature dependency of mechanical behavior. A rheology model including elastic-visco-plastic elements is developed to reproduce strain-rate dependent response prominent in high damping rubber bearings and elastic-plastic response in lead rubber bearings.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震構造

## 1. 研究開始当初の背景

高減衰ゴム(HDR)は、配合によりゴムに減衰性能を持たせ、変形時にばね機能と減衰機能を有するようにしたものである。兵庫県南部地震以降、その高い耐震性から橋梁用ゴム支承の材料として多く用いられるようになった。近年ではHDRより更に粘性効果を高めた超高減衰ゴム(SHDR等)が開発され実用に供されている。

これらの高減衰ゴム支承は耐震設計時の非線形動的解析においてバイリニアモデルによってモデル化されている。このバイリニアモデルの形状は、ある特定の振動数と振幅で正弦波加振を行った時の実験結果に基づき定められている。したがって、振動数や振幅が異なる場合、必ずしも良いモデル化にはならない。さらに、高減衰ゴム支承では、主に粘性効果によって減衰性能を引き出して

いるにも関わらず、弾塑性なバイリニアモデルでモデル化されているため、粘性効果の特性である応答の速度依存効果は表現出来ない欠点がある。

## 2. 研究の目的

本研究では橋梁の耐震設計における動的非線形解析で用いるゴム支承モデルの開発を目的とした。特に、北海道地方など低温下でのゴム支承の設計モデルの開発を検討した。

高減衰ゴム支承では粘性効果が主な減衰メカニズムであるため粘性効果が表現出来る粘弾塑性型のレオロジーモデルの開発を目指した。具体的には、ゴム支承を図1に示す粘弾塑性モデルにモデル化し、バネ A, B, C およびスライダ S, ダッシュポット D のパラメータを同定することを目的とする。このモデルはスライダとマクスウエルモデルを並列につなげたもので、最も単純な粘弾塑性モデルといえる。モデルの構成は単純なものとし、その代わりにバネおよびダッシュポットを非線形モデルとすることで、実際のゴム支承の挙動を再現することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) レオロジーモデルの検討

図1に示す粘弾塑性モデルにおいて、バネ A, C は線形、バネ B はゴム支承のハードニングを表す非線形バネでモデル化する。ダッシュポットについては過去に行った研究成果から全ひずみとダッシュポット部分のひずみ速度の非線形関数でモデル化することとした。

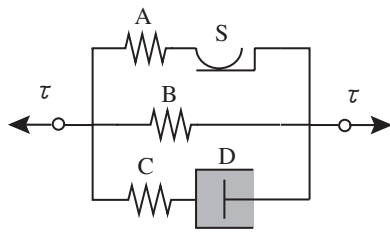


図1 レオロジーモデル

### (2) モデルパラメータの同定手法の開発

過去に行った材料レベルでのパラメータ同定手法をベースにして、ゴム支承のモデルパラメータの同定手法を開発した。具体的には図2に示すように(a)サイクリック・リラクゼーション試験, (b)単調載荷試験, (c)シンプル・リラクゼーション試験の3つを行い逐次パラメータを同定する。

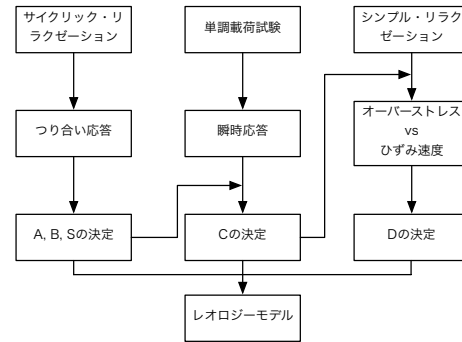


図2 パラメータ同定手順

## 4. 研究成果

### (1) 非線形粘性の同定と提案モデル

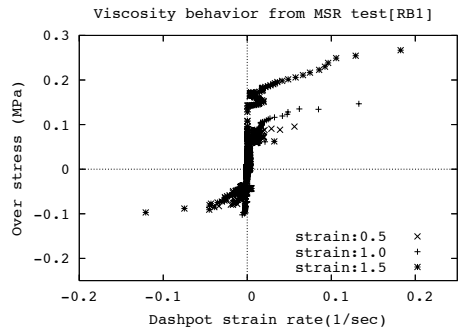
研究成果の一例として、リラクゼーション試験結果より得られた、オーバーストレス（ダッシュポット部分に作用する応力）とダッシュポットのひずみ速度の関係を図3に示す。同図でひずみ速度が正の部分が載荷時、負の部分が除荷時のリラクゼーション試験の結果を示す。同図より、オーバーストレスとひずみ速度は直線関係になく、ひずみ速度が増加するにつれて、粘性係数（曲線の勾配）が減少する非線形性を有していることが分かる。また、オーバーストレスの大きさは高減衰ゴム支承 (HDRB)、鉛プラグ入りゴム支承 (LRB)、天然ゴム支承 (RB) の順に小さくなり、RB では、HDRB のほぼ 1/5 程度であることが分かった。さらに、LRB では、HDRB に見られるような粘性の全ひずみに関する依存性もほとんどなく、除荷時と載荷時の差も小さいことが分かった。これより、RB と LRB に関しては、図1のレオロジーモデルにおいて、バネ C とダッシュポット D を除いた簡略化したモデルを提案し、以下に示すモデル橋の応答解析を実施し、この簡略化の妥当性を検討することとした。

一方、高減衰ゴムに関しては、パラメータ同定に用いているくり返し載荷を伴う試験において、自己発熱の影響によって、低温時試験でもゴム支承内部の温度がかなり上昇していることが分かった。しかし、実際の地震時では自己発熱は、さほど大きくないと予想されるため、自己発熱の影響を補正する必要があり、これについては今後の課題となった。

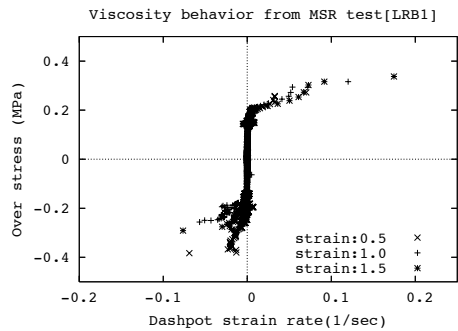
### (2) 高架橋モデルを用いたモデル化の影響の検討

天然ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承に関しては自己発熱の影響は小さいため、提案モデルおよび既往の設計モデル（バイリニアモデル）を用いて高架橋の地震時応答解析を行った。検討に用いた高架橋はスパン 35m の 5

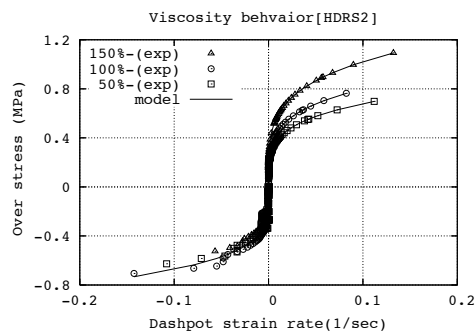
径間連続合成桁橋で橋脚は RC 製でフーティング上縁から上部工の重心位置までの高さが 11.2m である。基礎は杭基礎で 2 種地盤を想定した。RC 橋脚や杭基礎、上部工の諸元は道路橋示方書にしたがって試設計を行い決



(a) 天然ゴム支承 (RB)



(b) 鉛プラグ入りゴム支承 (LRB)



(c) 高減衰ゴム支承 (HDRB)

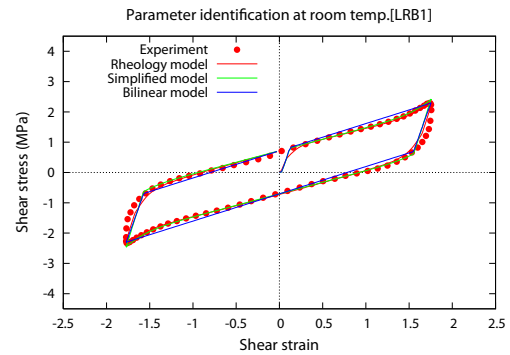
図 3 オーバーストレスとひずみ速度の関係 (常温時)

定した。

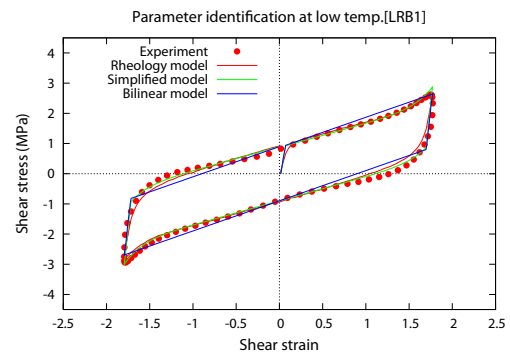
時刻歴非線形応答解析においては、上部構造は線形はり要素、RC 橋脚は塑性ヒンジをもつはり要素、基礎は道示に規定のバネでモデル化した。RC 橋脚の塑性ヒンジ部分の復元力モデルとしては武田モデルを用いた。ゴム支

承のモデル化については、(a) 図 1 のレオロジーモデル、(b) バネ C とダッシュポット D を除いた簡略化した弾塑性モデル、(c) 現在の設計基準で規定されているバイリニアモデルの 3 つの異なるモデル化で解析を実施し、解析結果を比較することで、モデル化の違いが解析結果に与える影響を検討した。

図 4 に解析で用いたレオロジーモデル、簡略化したモデル、バイリニアモデルと正弦波加振試験結果 (振動数 0.5Hz) を比較した結果を示す。縦軸はゴム部の平均せん断応力、横軸は平均せん断ひずみを示し、図 (a) は常温時 (23°C)、図 (b) は低温時 (-20°C) の結果である。3 つのモデルともこの図で示した正弦波加振試験の結果に合わせるようにパラメータを決定することで、モデル化の違いによる影響だけを検討することとした。



(a) LRB, 23°C



(b) LRB -20°C

図 4 提案モデル、簡略化したモデル、バイリニアモデルと正弦波加振実験結果 (0.5Hz) との比較

解析結果の一例として低温下 (-20°C) におけるゴム支承の最大応答をまとめた結果を図 4 に示す。同図において、縦軸はゴム支承の最大応答せん断ひずみを許容せん断ひずみで無次元化したものであり、凡例において "Design model" はバイリニアモデル表

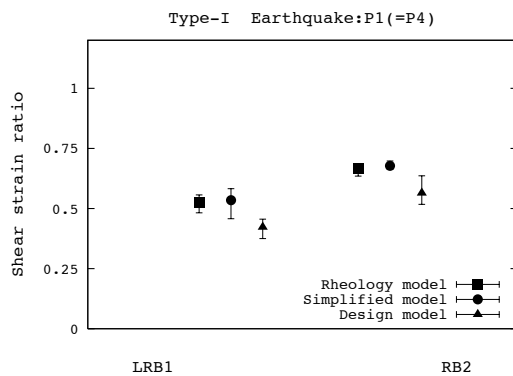
す。横軸のLRB1とRB2は各々、鉛プラグ入りゴム支承と天然ゴム支承の結果を示す。また、■、●、▲のシンボルは道示に規定の地震波3波の応答の平均値を表し、エラーバーは最大値と最小値を表す。

ゴム支承の最大応答に関しては、タイプI地震、タイプII地震とも、モデル間の応答値の差はさほど大きく無いが、既往のバイリニアモデルは若干小さめの応答値を与えることが分かる。

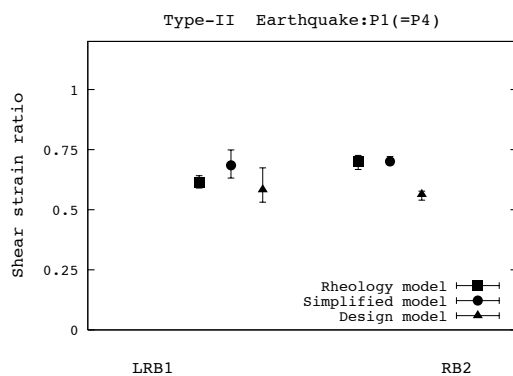
同様な図をRC橋脚の塑性ヒンジ部の最大応答回転角についてまとめたのが図5である。

この図では、コンクリート橋脚塑性ヒンジ部の(最大応答回転角/許容回転角)を鉛プラグ入りゴム支承(LRB1)と天然ゴム支承(RB2)の結果を示している。タイプI地震に関してはバイリニアモデルを用いて求められた橋脚の応答はRBの場合、提案モデルの結果と比較し約25%程度、過大評価することが分かった。

低温下のゴム支承の耐震設計用モデルとして既往のバイリニアモデルを用いるとは結果に大きな誤差を生じる事を示した。さら



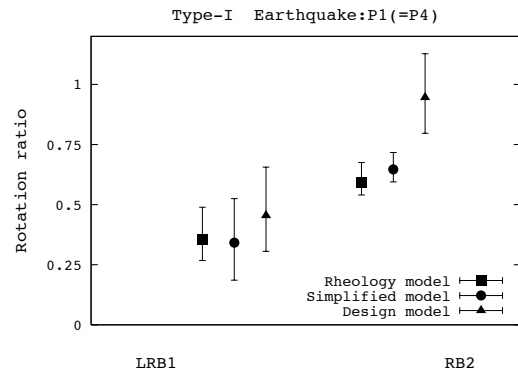
(a) タイプ I 地震



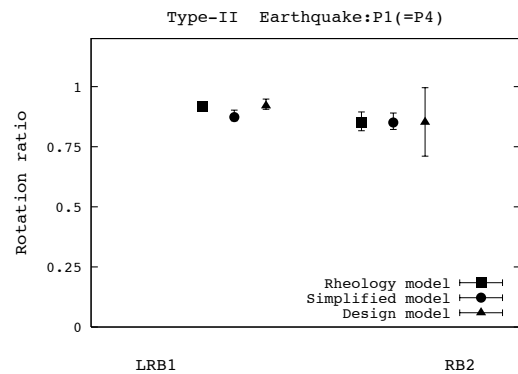
(b) タイプ II 地震

図5 ゴム支承の最大応答ひずみの比較 (温度-20°C, 縦軸[最大応答せん断ひずみ/許容ひずみ])

に、高減衰ゴム支承では低温下での応答曲線がバイリニアモデルとは大きく異なるためバイリニアモデルの適用そのものに問題があることを示した。



(a) タイプ I 地震



(b) タイプ II 地震

図6 RC橋脚の最大応答回転角の比較 (温度-20°C, 縦軸[最大塑性ヒンジ回転角/許容回転角])

### (3) まとめ

天然ゴム支承(RB)と鉛プラグ入りゴム支承(LRB)の常温時および低温時のモデルの構築と高架橋の耐震解析結果より得られた結果をまとめると以下の通りである。

#### ① レオロジーモデルと簡略化されたレオロジーモデルの比較

上記両者の比較では橋脚、ゴム支承とも最大応答値はほぼ一致し、簡略化されたレオロジーモデルによって、モデル化が可能なことを示した。

#### ② タイプI地震とタイプII地震の比較

タイプI地震動による橋脚の応答は支承のモデル化に大きく依存するものの、タイプII地震では余り依存しないことが分かった。

#### ③ 設計モデル(バイリニアモデル)と簡略

化されたレオロジーモデルの比較  
バイリニアモデルではタイプ I 地震時の橋脚の応答を過大評価する傾向があり、特に低温時 (-20°C) においては、約 25% 過大評価することが分かった。

#### ④ 低温下の影響

低温下 (-20°C) においては、既往のバイリニアモデルでは、ゴム支承の応答を過小評価し、橋脚の応答を過大評価する。

以上の結論は、1 つの高架橋モデルの解析結果より得られたものであり、今後他の橋梁モデルで同様な解析を実施し、一般性のある結論であるかどうか検証する必要がある。

また、高減衰ゴム支承の特に低温時におけるくり返し載荷を行った試験に関しては、自己発熱による影響を補正し、モデルパラメータを同定することが必要である。

上記の事項について、本研究期間中に実施することが出来ず、今後の課題となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Muhammad Kashif RAZZAQ, Yoshiaki OKUI, Abdur Rahman BHUIYAN, A. F. M. Saiful AMIN, Hiroshi MITAMURA, Takashi IMAI, Application of Rheology Modeling to Natural Rubber and Lead Rubber Bearings: A Simplified Model and Low Temperature Behavior, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), 査読有り, Vol. 68, No. 3, pp.526-541, 2012.

[学会発表] (計 6 件)

1. Muhammad Kashif RAZZAQ, Yoshiaki OKUI, Hiroshi MITAMURA, Takashi IMAI, Seismic Response Prediction of Base Isolated Multi-Span Highway Bridge With Different Modeling Techniques For Lead Rubber Bearings, Proc. of 18<sup>th</sup> IABSE Congress, Seoul, Korea, A-0058, 2012.9.20

2. M. K. Razzaq, Y. Okui, H. Mitamura, T. Imai, Effect of Isolation Bearing's Modeling on Seismic Response Prediction of Base Isolated Multi-Span Highway Bridge, 3rd International Structural Specialty Conference, CSCE, Edmonton, Alberta, Canada, STR-1004-1-10, 2012.6.8

3. T.Imai, A.R.Bhuiyan, M.K.Razzaq,

Y.Okui, H.Mitamura, Experimental Study of Rate-Dependent Mechanical Behavior of Laminated Rubber Bearings, Proc. of 7th Int. Conf. on Urban Earthquake Eng. & 5th Int. Conf. on Earthquake Eng., pp.1921-1928, Tokyo, Japan, 2010.3.4

4. M. K. Razzaq, A. R. Bhuiyan, Y. Okui, H. Mitamura, and T. Imai, Effect of Rubber Bearing's Modeling on Seismic Response of Base Isolated Highway Bridge, Proc. of 7th Int. Conf. on Urban Earthquake Eng. & 5th Int. Conf. on Earthquake Eng., pp.1855-1862, Tokyo, Japan, 2010.3.4

5. 奥井義昭, Nguyen Anh Dung, 今井隆, 三田村浩, ゴム支承の温度依存性に関する研究と Mullins 効果のモデル化の検討, 石島慎也, 平成 24 年度土木学会全国大会 第 67 回年次学術講演会概要集, 名古屋, 愛知県, I-397, 2012. 9. 5

6. 奥井義昭, A. Rahman Bhuiyan, 三田村浩, 今井隆, 高減衰ゴム支承のモデル化に違いによる橋梁応答解析結果への影響と低温時の挙動, I-572, pp.1143-1144, 土木学会 第 65 回年次学術講演会, 札幌, 北海道, 2010. 9. 1

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

奥井 義昭 (OKUI YOSHIAKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：40214051

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし