

氏 名	NGUYEN ANH DUNG
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第 232 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	A RHEOLOGY MODEL OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS FOR SEISMIC ANALYSIS AT ROOM AND LOW TEMPERATURES (常温時と低温時における高減衰ゴム支承の耐震設計用レオロジーモデル)
論文審査委員	委員長 教 授 奥井 義昭 委 員 教 授 齊藤 正人 委 員 教 授 松本 泰尚 委 員 准教授 牧 剛史

論文の内容の要旨

The use of seismic isolation is one of the most effective ways to protect structures from destructive earthquakes. Rubber bearings have been widely applied in recent years as seismic isolation devices in bridges, especially after Kobe earthquake in 1995, when good behavior of structures with rubber bearings was recorded. More recently, high damping rubber bearings (HDRBs) have been employed in Japan due to their high flexibility and high damping capability. However, some of the important mechanical behavior of HDRBs, such as the rate and temperature dependence are still difficult and less understood issues in engineering practice. Since the simplified models in some guide specifications neglect rate-dependent and other inelastic behavior of the bearings, a design model of HDRBs should take the rate-dependent behavior into account.

In this dissertation, the mechanical behavior of HDRBs was investigated by conducting experiments at room (23°C) and also at low temperatures (-10°C and -30°C). The bearing tests were carried out by Japan Rubber Bearing Association. On the basis of the experimental observations, an improved rheology model is proposed to reproduce the rate-dependent hysteresis behavior of HDRBs. The ability of the proposed model is verified by comparing the numerical simulation results and experimental data. Moreover, a series of sinusoidal loading tests were carried out to investigate self-heating of HDRBs at three different ambient temperatures.

A test program was carried out to investigate the mechanical behavior of HDRBs at constant ambient temperatures in an environmental test chamber. All specimens were tested under shear deformation with a constant vertical compressive average stress of 6 MPa. All virgin specimens were first subjected to a preloading sequence before the actual tests to remove Mullins effect.

The stress response of the equilibrium state of HDRBs obtained from multi-step relaxation (MSR) tests increases with decreasing ambient temperatures. However, this increase is smaller than the increase in the overstress, when ambient temperature is reduced.

Simple relaxation (SR) test results show that the overstress responses at the same strain level remarkably increase at

low ambient temperatures. This behavior can be attributed to the temperature dependence of the viscosity of HDRBs. In addition, the temperature dependence of overstress is much larger than the dependence of the equilibrium stress at the end of relaxation period.

The equilibrium state of HDRBs obtained from multi-step relaxation tests presented high strain hardening at high strain level and hysteresis phenomenon. Therefore, a rate-independent model that is constructed by combining a nonlinear spring and an ideal elasto-plastic model (spring-slider) in parallel is proposed to represent these experimental observations.

The instantaneous state obtained from cyclic shear (CS) tests shown that the initial stiffness is very high and then the second stiffness is lower. These aspects can be simulated by combining a spring and an elasto-plastic element in parallel. Therefore, a structure similar to the rate-independent part is used in the rate-dependent overstress part. This part is connected with a dashpot that can describe the rate-dependent behavior of HDRBs. Moreover, on the basis of the nonlinear viscosity law deduced from the simple relaxation test results, a nonlinear relationship between the overstress and the strain rate of the dashpot is proposed.

Finally, the equilibrium parameters are identified from MSR tests by a standard nonlinear least square method. The overstress parameters are determined from the first cycle of a sinusoidal loading test by an optimizing technique.

In order to verify the adequacy of the proposed rheology model, a series of numerical simulations of the experimental tests were carried out. To do this, the model with the identified parameters was used in the simulation. The experimental data were compared with the simulation results for the verification. The simulations of relaxation tests (SR tests and MSR tests) and cyclic shear tests portrayed the adequacy of the proposed model in reproducing the mechanical behavior of HDRBs.

The numerical simulation results of CS responses at slow and fast strain rates present the ability of the model to logically reproduce the rate-dependent behavior of HDRBs, and its inherent promises at the design desk. However, a detail comparison between experimental data and simulation results of the first cycle of sinusoidal loading tests points out the existence of some differences, especially at low temperatures. These differences may be caused by the self-heating effect.

The self-heating of HDRBs at room and low temperatures is investigated experimentally. The experimental results show that the temperatures in the HDRBs increase under sinusoidal loading tests, especially at low ambient temperatures. In addition, the experimental results also present that stress-strain relationships of HDRBs are governed by the inside temperatures, but not by the ambient temperature. Therefore, a seismic model for HDRBs at low temperatures should be based on the inside temperatures.

Since the overstress parameters of the proposed model in Chapter 3 are determined based on a stress-strain relationship obtained from sinusoidal loading tests after several cycles of loading to avoid the stress-softening phenomenon appearing in the first cycle, the design temperature of the model should be chosen to be the inside temperature of the bearings in the selected cycle of the sinusoidal loading tests.

論文の審査結果の要旨

論文の審査委員会は2016年2月3日に論文発表会を開催し、その発表会を含めて学位論文の審査を行った。本論文の概要と審査結果は以下の通りである。

阪神淡路大震災以降、多くの橋梁において積層ゴム支承が使用されるようになったが、震災直後に多用されたゴム支承はいわゆる天然ゴム支承で、減衰効果は小さく、橋梁を多点で弾性支持することで支承や脚に伝わる地震時の慣性力を分散することに主眼が置かれていた。その後、ゴム支承によって橋梁の固有周期を長周期化し、地震時の入力エネルギーを小さくする免震化に主眼が置かれるようになった。しかし、免震化による弊害として地震時の応答変位が大きくなることから、応答変位を小さくすべく、ゴム材料自身に減衰機能をもたせた高減衰ゴム支承が開発され、現在広く用いられている。しかし、高減衰ゴム支承ではゴム自身の粘性効果によって減衰性能を発現されているにも係わらず、耐震解析におけるゴム支承のモデルは、粘性効果は全く考慮していない弾塑性モデルによってモデル化されている。そのため、応答のひずみ速度依存効果などが表現できない問題が指摘されている。さらに最近では、支承の小型化や高減衰化を目指して、ゴムの組成を調整し減衰性能を更に高めた超高減衰ゴム等が開発され使用されるようになり、ひずみ速度依存性や温度依存性が更に大きくなっている。

このような背景から、本研究では、高減衰ゴム支承の粘性効果を考慮した耐震設計用モデルの開発を目的としている。特に寒冷地での高減衰ゴム支承の使用を促進するため、低温時の力学挙動の温度依存性と繰り返し载荷による自己発熱の影響について検討している。

本論文は、序論と結論を含む6章から構成されている。

第1章では高減衰ゴム支承の力学的特性と、橋梁の耐震設計における支承のモデル化について概説している。さらに高減衰ゴム支承の力学的挙動の温度依存性や、低温下で特に問題となる繰り返し载荷時の自己発熱について既往の研究をレビューして示している。また、高減衰ゴム支承のモデル化に関する研究についても調査を行い、本研究の工学的な意義を明確化し、研究目的を説明している。

2章では常温(23℃)と低温下(-10, -30℃)で行われた高減衰ゴム支承の载荷試験結果を報告している。载荷試験は低温試験室内に設置された油圧サーボ試験機によって行われ、橋梁の自重を模擬した一定圧縮応力下で、横方向に強制変位を与えることで実施した。試験で用いた载荷履歴としては、マルチステップ・リラクゼーション試験、粘性効果を検討するためのリラクゼーション試験、正弦波载荷試験などである。

3章では、2章で得られた実験データに基づきゴム支承の耐震解析用モデルの考案し、その中で用いられているパラメータの同定手法について検討している。提案モデルはダッシュポットやスライダ、非線形バネを組み合わせたレオロジーモデルとなっている。また、このモデルにおけるダッシュポットは、リラクゼーション試験結果から非線形性を有していることを明らかになったため、ひずみ速度の上昇ともに粘性係数が減少する非線形粘性要素としてモデル化されている。

4章では提案されたモデルとパラメータ同定手法で決定された各温度のパラメータを用いて、ゴム支承単体の载荷実験のシミュレーションを行い、提案モデルの検証を行っている。具体的には、リラクゼーション試験、マルチステップ・リラクゼーション試験、三角波加振実験、正弦波加振実験のシミュレーションを行い、実験結果との比較を行っている。

5章では繰り返し载荷時における自己発熱の影響を検討した。従来、ゴム支承の温度依存性試験は雰囲気温度で整理され、しかも繰り返し载荷による軟化現象である Mullins 効果を試験結果から取り除くため、繰り返し载荷時の5-6サイクル後の応答を用いて判定されていた。しかし、特に低温下の繰り返し载荷におい

ては、自己発熱によって内部温度と雰囲気温度は大きく異なり、従来 Mullins 効果によるひずみ軟化現象と
思われていたものは、自己発熱と高減衰ゴムの温度依存性によることを明らかにした。さらに、繰り返し載
荷時の散逸エネルギーを用いて比較的簡便に内部温度を推定する手法を開発した。この手法を用いることで過
去に行った内部温度を計測していない繰り返し载荷試験に関しても内部温度を推定することが可能となり、
温度依存性データの補正を行うことが可能となった。

最後に、第 6 章において各章の要約と本研究で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後の課題
について言及している。

上記のとおり、本学位論文は学術的および工学的に有意義な結果を含んでいる。さらに、本研究の成果は、
審査制度のある学術雑誌に 1 編、全文査読付きの国際会議論文が 1 編、アブストラクト査読の国際会議プロ
シーディングが 3 編、国際シンポジウムにおける口頭発表 3 編にまとめられている。以上のことから、本審
査委員会は、本論文を博士（学術）の学位を授与するに値するものと判断し、合格と判定した。