

寒冷地でのゴム製支承を用いた橋梁の最適設計手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：寒地構造チーム、寒地技術推進室

研究担当者：西 弘明、今野久志、岡田慎哉、佐藤 京、澤松俊寿

【要旨】

北海道では、夏季は+30℃を超え、冬季は-30℃を下回り、年間に 60℃の外気温差が生じるような地域があり、土木構造物に対しては、非常に厳しい環境条件下にあるといえる。橋梁に用いられているゴム製支承は耐震・免震設計上、重要な部材の一つとなっているが、低温時に支承剛性が増加する等の温度依存性により、地震時における橋梁下部への作用外力が大きく増加し、夏期に満足できる耐震性能が、冬期に満足できない場合がありうることから、これを適切に評価する必要がある。

現在、寒冷地においても耐震補強対策が進められつつある中で、橋梁の安定した耐震性能を確保し、より合理的な耐震設計を実施するため、低温下におけるゴム製支承の動的挙動を適切に評価し、地域ごとに必要とする性能を照査できるような設計モデルの開発や、それらを用いた最適設計手法の確立が求められている。

本研究課題では、橋梁に用いられるゴム製支承の低温環境下における各種力学的物性について実験的アプローチによって明確にし、低温下における挙動を適切に反映した最適設計モデルを作成した。

キーワード： ゴム製支承、最適設計手法、レオロジーモデル

1. はじめに

厳しい経済状況の下で公共事業の一層のコスト削減を実施しながら、高品質を確保するためには、その地域の条件にあった技術や材料を用い、規格を適切に設定することが必要である。北海道では、夏季は+30℃を超え、冬季は-30℃を下回り、年間に 60℃の外気温差が生じるような地域があり、土木構造物に対しては、非常に厳しい環境条件下にあるといえ、長寿命化をすすめるためには、より高度な技術と新材料の適切な活用も必要と思われる。

兵庫県南部地震以降、有効性が確認され、広く普及したゴム支承は、耐震・免震設計上、重要な橋梁部材の一つとなっており、さらにゴム材料の減衰性能を高めた高減衰ゴム支承も開発されるなどの背景から、耐震補強対策への活用も始められた。

しかしながら、寒冷地域において、低温時に支承剛性が増加する等の温度依存性により、地震時における橋梁下部への作用外力が大きく増加し、夏期に満足できる耐震性能が、冬期に満足できない場合がありうることから、これを適切に評価する必要がある。

そこで、ゴム製支承の低温環境下における各種力学的物性を実験的アプローチによって明確にするとともに、低温下における挙動を適切に反映した最適設計モ

デルの検討を実施した。

2. ゴム製支承の挙動

2. 1 ゴム支承の特性

橋梁を設計する際のゴム支承は、等価線形化部材として、等価剛性や等価減衰定数を一定値とする場合と非線形化部材としてバイリニアにてモデル化がなされる場合がある。しかし、ゴム製支承は、非線形履歴特性やひずみ依存性、速度依存性、温度依存性などの特性を有するため、現在の設計モデルが地震時挙動を精度よく再現しているとはいいがたい。このため、塑性挙動やハードニングが再現できるだけでなく、温度依存性も考慮したモデル設定に着目した。

2. 2 レオロジーモデル

着目したモデルは、3 パラメータ Maxwell モデル¹⁾ にスライダを並列に配置した、図-1 に示すような最も単純な粘弾塑性モデルである。

スライダ S は、一定以上の応力が作用すると滑る設定とし、直列にバネ A を配置することによってゴム支承の塑性挙動を再現する。バネ B は、ひずみ累乗項を含む非線形バネであり、大ひずみ域で生じるハードニングを再現する。そして、ダッシュポット D とバネ C によって速度依存性を再現する。

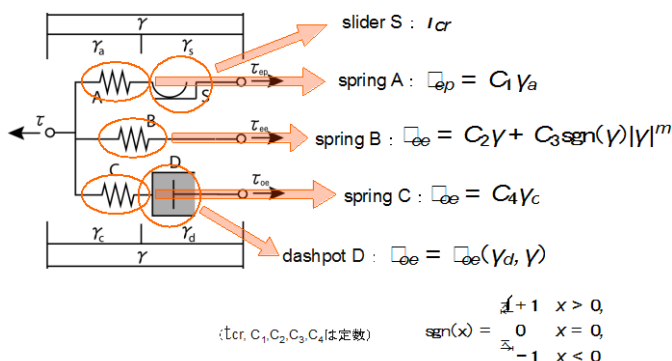


図-1 レオロジーモデル

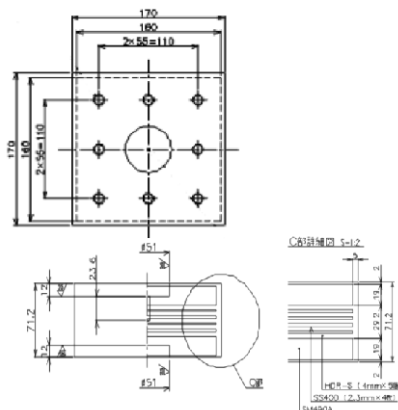


図-2 供試体寸法 (HDR)

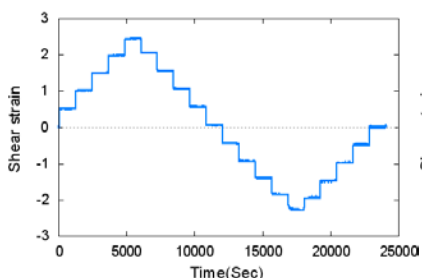


図-3 MSR 試験の入力ひずみ履歴

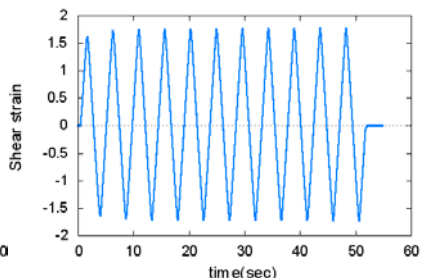


図-4 SS 試験入力ひずみ履歴

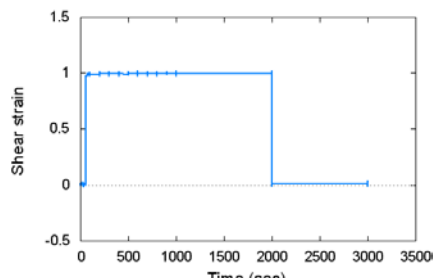


図-5 SR 試験の入力ひずみ履歴

3. モデルの設定

3. 1 パラメータ同定手法

本検討では、RB 支承、LRB 支承、HDR 支承の 3 種の形式を対象として検討を進めた。

モデル構築を行なうためには、図-1 に示したパラメータを同定するための実験を行なう必要がある。図-2 に示す供試体を用いて、(1) マルチステップリラクゼーション試験 (MSR 試験)、(2) シンプルシエア試験 (SS 試験)、(3) シンプルリラクゼーション試験 (SR 試験) を -30°C 、 -10°C 、 $+23^{\circ}\text{C}$ の供試体温度にて実施した。

(1) MSR 試験

本試験では、釣り合い応答における応力-ひずみ関係を求める。試験は、図-3 に示す入力ひずみ履歴により、異なるひずみレベルを一定値に保ちつつ、リラクゼーション試験をステップ変化で連続的に行なう。各ひずみ変化後に応力の経時変化が収束した状態の応力を読み取り、釣り合い応答時の応力-ひずみ関係を整理する。この試験では、釣り合い状態では、ダッシュポット D は、ひずみ速度が 0 であるため力が作用しない。このため、バネ A、B およびスライダ S のみに影響を与え、これらの要素の同定が可能となる。

(2) SS 試験

この試験では、バネ C を同定するために瞬時応答を求める。図-4 に示すようにひずみ速度を一定に保った単調载荷試験をひずみ速度を徐々に上げて複数回行う。この結果から求められた応力-ひずみ関係の瞬時応答における値を外挿して求める。

(3) SR 試験

この試験では、ダッシュポット D の特性を同定するため、ダッシュポット部分の作用応力とひずみ速度の関係を求める。まず、図-5 に示すひずみ履歴を与え、応力の応答を得る。

このとき、応力の経時変化が収束した状態はつり合い状態であり、そこからの応力の差はオーバーストレスと呼ばれる。このオーバーストレスはバネ C およびダッシュポット D に作用している応力となる。バネ C の特性は SS 試験で同定され、バネ部のひずみを作用応力 (= オーバーストレス) から算定することができる。全ひずみからこのバネ部のひずみを差し引くことでダッシュポット D の部分のひずみを算定できる。

3. 2 試験結果とパラメータ

試験結果の一例として、図-6 に MSR 試験、図-7 に SS 試験、図-8 に SR 試験を示す。各図は、 -30°C の時の結果であり、同定したパラメータによるモデルでの実験シミュレーションと各試験結果を同一グラフ上に併

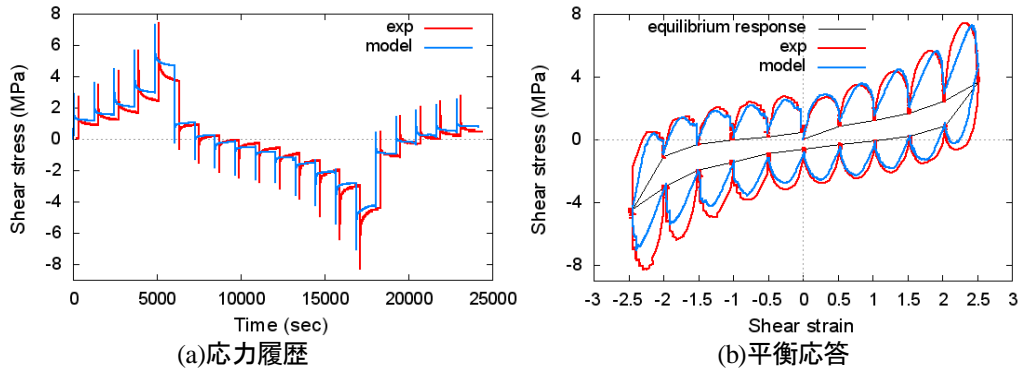


図-6 HDR の-30°Cにおける MSR 試験

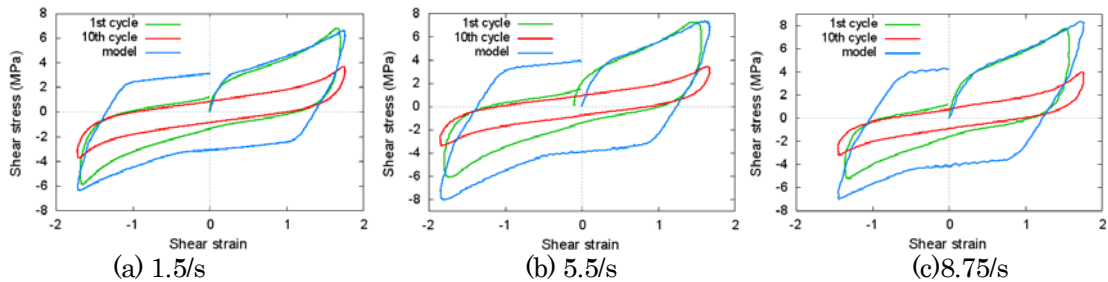


図-7 HDR の-30°Cにおける SS 試験に対する応力ひずみ曲線

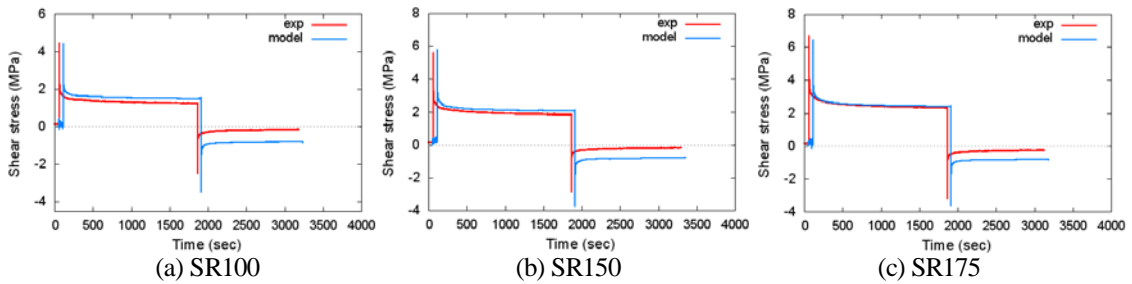


図-8 HDR の-30°Cにおける SR 試験に対する応力履歴

記して示す。一例で示した HDR のレオロジーモデルのパラメータを表-1 に示す。

3. 3 支承内部温度上昇の影響

パラメータ同定を行なう試験の他に、温度影響に着目して、内部温度を測定しながら、荷重 6MPa、載荷速度 0.5Hz、入力ひずみ 175%の繰り返しせん断試験を行っている。図-9 には配置した熱電対の位置を示す。

実験は、恒温恒湿試験室内に載荷環境を整え、せん断弾性係数 G12 として設計した HDR を用いて、内部温度 -30°C、-20°C、+23°C における応答を確認した。図-10 には、-30°C と -20°C の実験結果を横軸に載荷回数、縦軸には、内部温度と逸散エネルギーを示す。

試験結果では、1 サイクル目から、内部温度が上昇を始める。載荷サイクルが増加するに従い逸散エネルギーが増加するとともに内部温度は、上昇を続け、-30°C のケースでは、11 サイクル目で 0°C、-20°C のケースでは、8 サイクル目で 0°C まで上昇している。この

表-1HDR のレオロジーモデルのパラメータ

Temp.	C_1 (MPa)	τ_{cr} (MPa)	C_2 (MPa)	C_3 (MPa)	C_4 (MPa)	m
-30°C	14.70	0.715	0.619	0.0199	13.52	4.92
-10°C	10.60	0.399	0.524	0.0130	7.68	5.10
23°C	2.50	0.247	0.653	0.0062	3.25	6.62
Temp	A_1 (MPa)	A_2 (MPa)	q	n		
-30°C	1.729	2.142	0.531	0.226		
-10°C	0.769	1.197	0.755	0.218		
23°C	1.120	1.020	0.340	0.220		

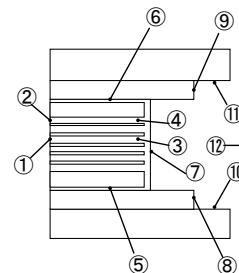


図-9 ゴム支承に設置した熱電対位置

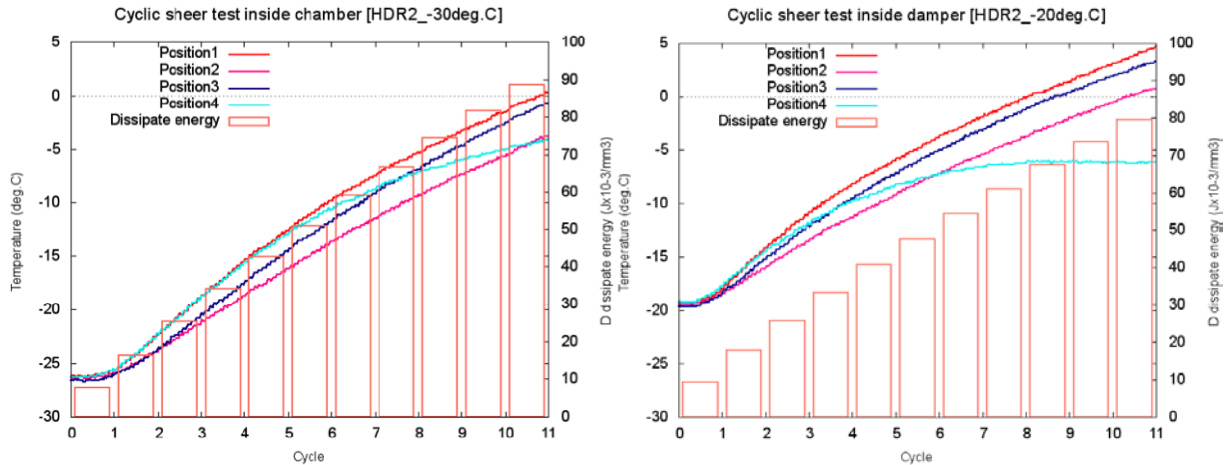


図-10 载荷回数と内部温度および逸散エネルギー（左；-30℃、右；-20℃）

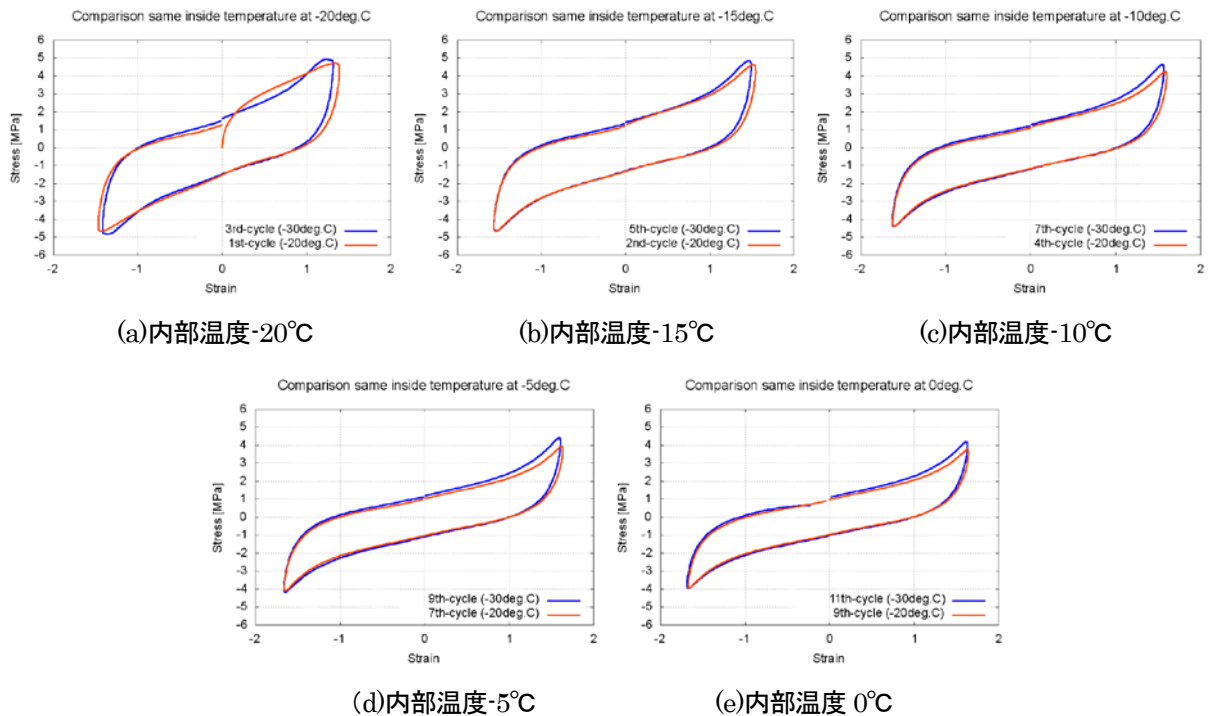


図-11 载荷回数が異なる同一内部温度での応力履歴曲線の比較

結果を内部温度が同程度となったケースで応力履歴曲線の比較を行なった。図-11には内部温度-20℃～0℃までの-5℃間隔で整理したものを示す。図中の青実線は、雰囲気温度が-30℃、赤実線が雰囲気温度-20℃での結果である。

内部温度-20℃における比較図を見ると、雰囲気温度-30℃の第3サイクルの最大応力は雰囲気温度-20℃の第1サイクルの最大応力と近い値であることがわかる。他の内部温度のケースにおいても、+17%近傍での違いはあるものの、荷重を除荷するにしたがって、同様の履歴を示していることが確認できる。

本実験では、175%ひずみを繰返すという特殊なケー

スによる検討であるが、内部温度上昇の影響が明確となった。

4. まとめ

橋梁に用いられるゴム製支承の低温環境下における各種力学的物性について実験的アプローチによって明確にし、低温下における挙動を適切に反映した最適設計モデルを作成することを目的として検討を実施した。

その結果、塑性挙動やハードニングが再現できるだけでなく、温度依存性も考慮したレオロジーモデルの各種パラメータの同定が出来た。

しかし、精度にばらつきがあったため、内部温度の影響について検討すると、繰返し载荷の過程で内部温度が上昇し、剛性が変化していることが明確となった。

今後の課題であるが、レオロジーモデルの精度をより高めるためには、内部温度上昇の影響を考慮したパラメータの設定について検討が必要である。

参考文献

- 1) Hwang, J.S., and Wang, J.C., 1998. Seismic response prediction of HDR bearings using fractional derivatives Maxwell model, *Engineering Structures*, 20, 849-856.

STUDY ON OPTIMAL DESIGN METHOD OF BRIDGE USING RUBBER BEARING OF IN COLD REGION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2012

Research Team : Structure Research Team,

Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki, KONNO Hisashi

OKADA Shin-ya, SATO Takashi

SAWAMATSU Toshikazu

Abstract: Some parts of Hokkaido experience a wide range of air temperatures. Temperatures can exceed 30°C in summer and fall below -30°C in winter, for a 60 °C difference in a year. On account of this, it can be said that civil engineering structures in Hokkaido are under a harsh environment. Rubber bearings are an important bridge member in terms of seismic (isolation) design. Because their behavior is temperature-dependent (i.e., they are more rigid at lower temperatures, the external forces on the lower parts of bridges could be higher for an earthquake in winter than in summer, and the seismic performance of bridges that is sufficient for an earthquake in summer could be insufficient for one in winter. For this reason, it is important to determine the relationship between rubber bearing behavior and temperature.

Seismic reinforcement is now under way in the cold snowy regions of Japan as well as in other parts of Japan. For the purpose of securing stable seismic performance of bridges and enabling more practical seismic design, it is required to appropriately evaluate the dynamic behavior of rubber bearings at low temperatures, and to develop a design model that allows determining appropriate seismic performances for a region, and establishing an optimal design method. The present research experimentally clarified various mechanical properties of rubber bearings used in bridges at low temperatures, produced an optimal design model that appropriately reflects the behaviors of rubber bearings at low temperature.

Key words: rubber bearing , optimal seismic isolation design method, rheology model