

# ゴム支承の低温時における限界性能に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野久志、白戸義孝、佐藤 京、  
山澤文雄、寺澤貴裕

## 【要旨】

ゴム支承は、橋梁の耐震性を確保するための重要な部材である。平成 24 年道路橋示方書では、“支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できること”、“供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること”として、支承部の力学的特性が使用される条件を考慮した試験により明らかでなければならぬことが新たに規定された。しかしながら、ゴム支承の破壊形態や限界状態に関する低温時影響は明確ではない。

本研究では、低温時におけるゴム支承の破壊形態や限界性能と限界性能評価のための簡便化手法の適用性を把握する。具体的には、低温影響に考慮した標準的試験の結果を踏まえた上で、ゴム支承の限界性能把握のために試験を実施し、基本的な限界時における性能を把握した。さらに、低温時限界性能を把握するための簡便化手法の開発に向け、ラップシエア試験に着目し、その適用性について JIS 試験結果との比較により把握した。

キーワード： ゴム支承， 温度依存， 限界状態， 性能評価

## 1. はじめに

ゴム支承は、橋梁の耐震性を確保するための重要な部材である。平成 24 年道路橋示方書では、“支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できること”、“供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること”として、支承部の力学的特性が使用される条件を考慮した試験により明らかでなければならぬことが新たに規定された。しかしながら、ゴム支承の破壊形態や限界状態に関する低温時影響は明確ではない。

ゴム支承は温度依存性を有し、特に寒暖差の大きな

寒冷地においては、橋梁の地震時挙動に影響を与える。ゴム支承の特性値（剛性・減衰定数等）の温度依存性について検証を行ってきた<sup>1)-3)</sup>が、破壊形態や限界状態に関する低温時影響は明確ではない。

寒冷地においても、確実に橋梁耐震性を確保するためには、低温環境条件下においても上記規定を満足する必要がある。本研究では、低温下における免震支承の基本的な限界性能や限界性能評価のための簡便化手法の適用性を把握する。

## 2. ゴム支承の限界状態

限界状態の性能と破壊形態について小型試験体を

表-1 試験体概要

試験体温度 (°C)	平面形状 (mm)	1層厚 (mm)	層数	形状係数 一次(S1)	形状係数 二次(S2)	RB 試験体数	LRB 試験体数	HDR 試験体数
23	240×240	11	5	5.45(5.10)	4.36	7	4	3
		7	5	8.57(8.01)	6.86	7	4	3
		7	8	8.57(8.01)	4.29	7	4	3
		7	10	8.57(8.01)	3.43	7	4	3
-20	160×160	7	5	5.71(5.34)	4.57	2	3	4
		5	5	8.00(7.48)	6.40	2	3	4
-30		7	5	5.71(5.34)	4.57	2	3	4
		5	5	8.00(7.48)	6.40	2	3	4

( )内は LRB 試験体

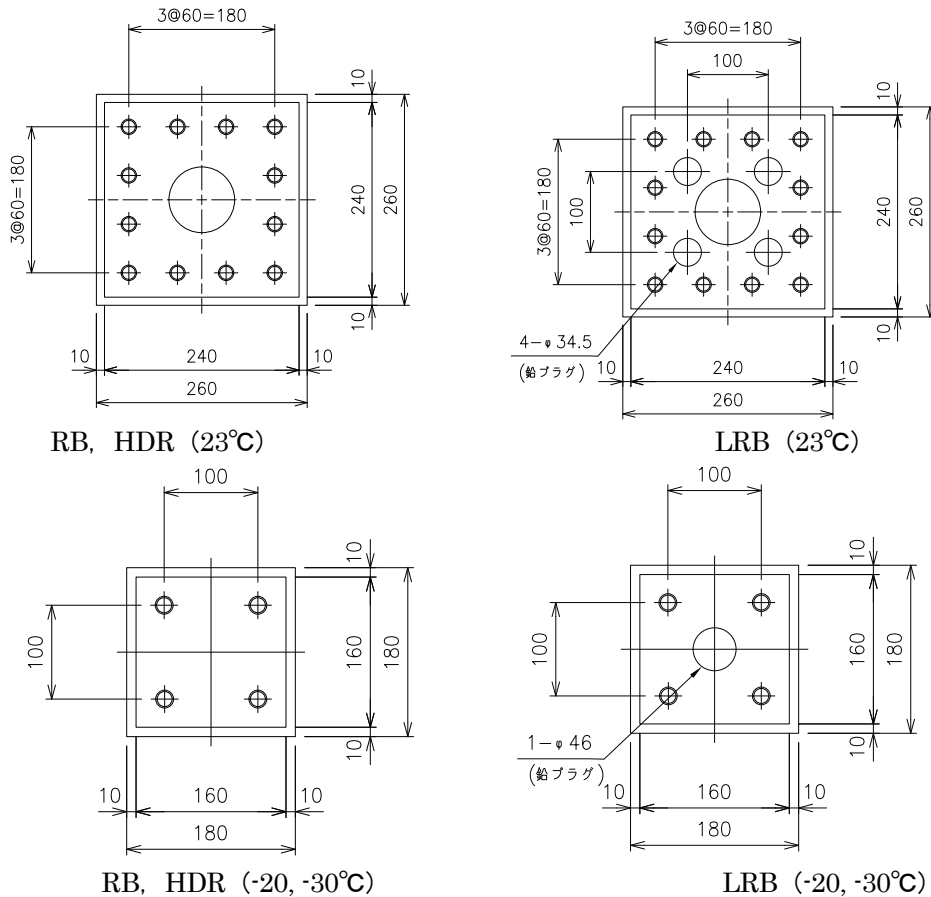


図-1 試験体平面図(図中単位 ; mm)

表-2 試験概要

試験 STEP	試験内容	载荷方法	面圧 (N/mm <sup>2</sup> )	加振回数	
				RB	LRB, HDR
1	±175%	正弦波	6	3	11
2	±250%	正弦波 or 三角波	6	6	6
3	±300%	正弦波 or 三角波	6	3	3
4	破断	単調水平载荷	6	片押し	

用いたせん断特性試験により確認した。

## 2. 1. 試験体概要

表-1 に示すように試験体温度が 23°C (常温) では平面形状□240×240、-20°Cと-30°C (低温) では□160×160 の試験体を用いた。また、表-1 に示すように常温では、形状係数 S1 で 2 種類、形状係数 S2 で 4 種類とし、低温では S1、S2 とともに 2 種類のを試験対象としている。低温の試験では、これまでの試験実績から試験の実施できる最大の寸法を設定した。図-1 には、試験体平面図を示す。これらの試験体は、せん断弾性係数を 1.2(N/mm<sup>2</sup>) とし、レベル 2 地震動に対する設計上の許容水平変位相当のせん断ひずみは 250%である。S1、S2 の異なる各試験体の個数は、地震時水平力分散

型ゴム支承(RB)のうち常温が各 7 個、低温が各 2 個、鉛プラグ入りゴム支承(LRB)のうち常温が各 4 個、低温が各 3 個、高減衰ゴム支承(HDR)のうち常温が各 3 個、低温が各 4 個である。

## 2. 2. 試験条件

せん断試験条件は、表-2 に示すように死荷重反力相当の鉛直応力 6.0(N/mm<sup>2</sup>) を初期载荷した状態より、試験体の特性確認を目的とした水平加振载荷と破断を目的とした単調水平载荷とした。また、低温時影響を確認するため、-20°Cおよび-30°Cに冷やした試験体に対しても同様の条件で行った。

試験は、表-2 に示す 1 から 3 の STEP で特性および挙動を評価したのち、STEP4 において破断試験を実施した。

STEP1 では、せん断ひずみ 175%(有効設計変位)を RB 支承には、加振 3 回、LRB および HDR 支承には、加振 11 回とした。これは、水平力-水平変位関係が安定する既存の知見に基づき回数を設定したものである。

STEP2 では、レベル 2 地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ 250%を支承種に関係なく加振 6 回とした。

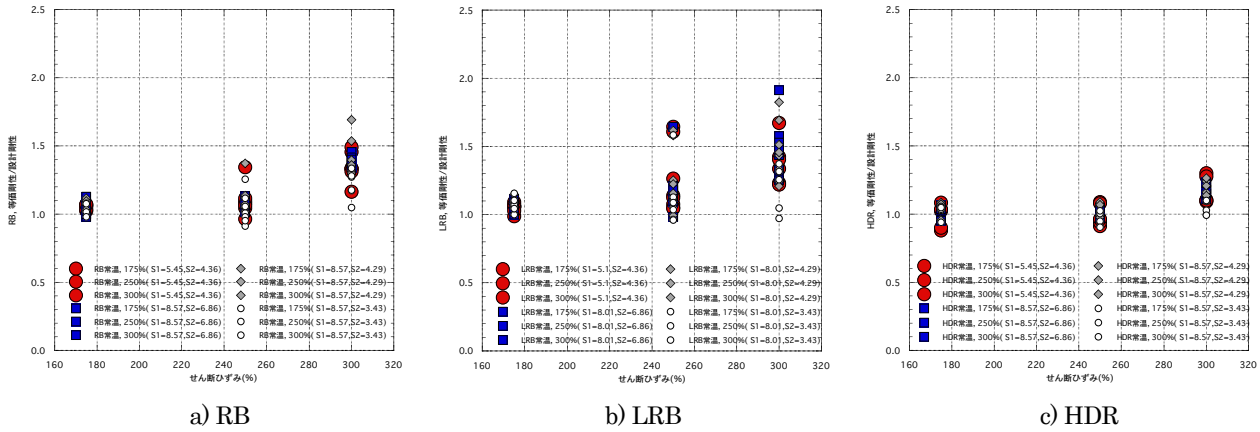


図-2 等価剛性—せん断ひずみ関係 (常温)

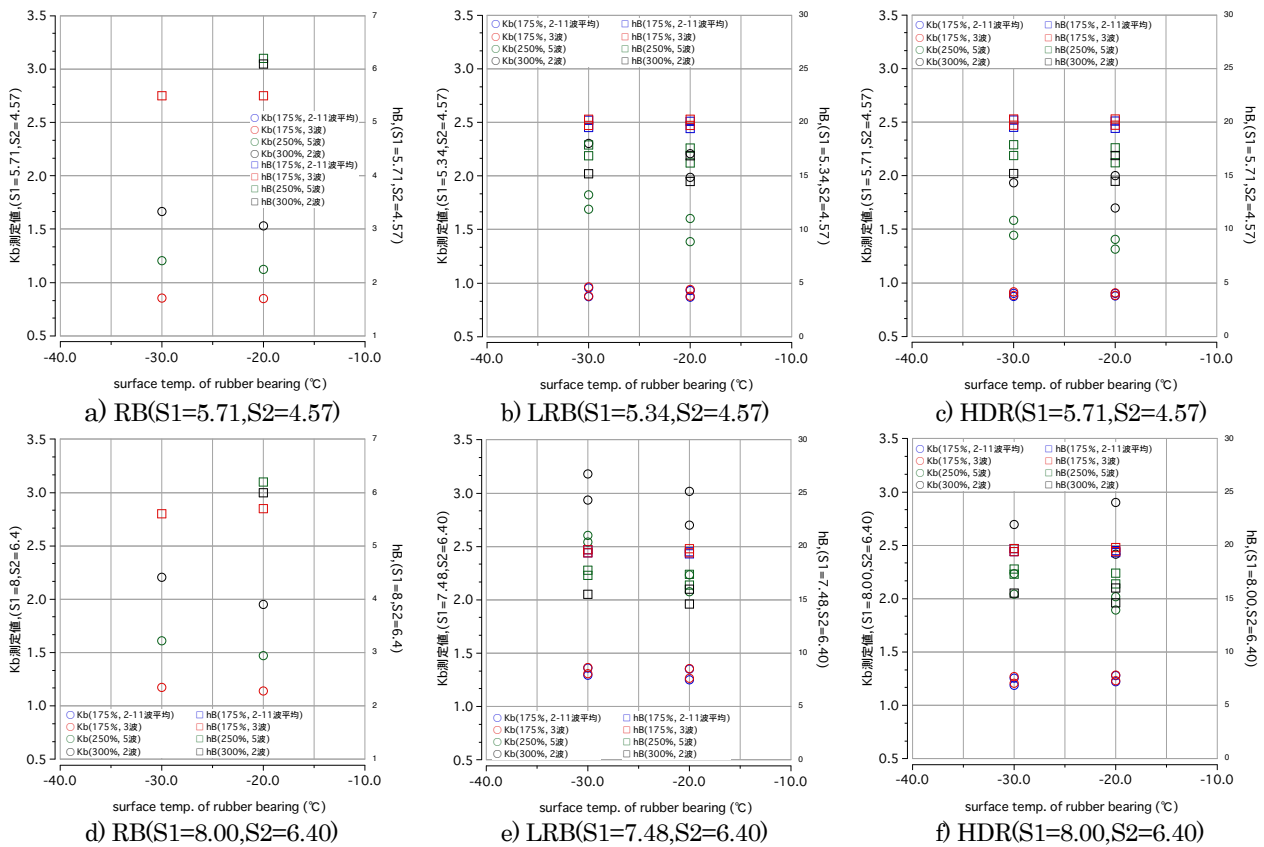


図-3 せん断ひずみ別による等価剛性および等価減衰定数 (低温)

STEP3 では、ゴム支承の破断や座屈などの損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態を想定し、レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ 250%の 1.2 倍に相当する 300%(終局限界変位)の変位を 3 回加振した。

STEP4 では、ゴム支承の限界時の挙動を明らかにするために、単調水平载荷により破断や座屈などの損傷が生じるまでせん断変位を与えた。

本報告では、破断試験結果を中心に示す。

### 2. 3. 試験結果

本試験で得られたゴム支承の等価剛性を支承種毎に形状係数での違いが分かるように図-2 に示す。ここでは、設計値に対する等価剛性の比を用いて示す。

天然ゴムを使用している RB および LRB 支承では、せん断ひずみが大きくなると剛性のばらつきが大きくなり、+20%を超えるものが確認できる。300%のひずみにおいては、等価剛性が高くなっており、ハードニングの影響が出ている。その中でも S2 が小さい支承では、変動が小さい。

HDR 支承においては、300%のせん断ひずみを加えた

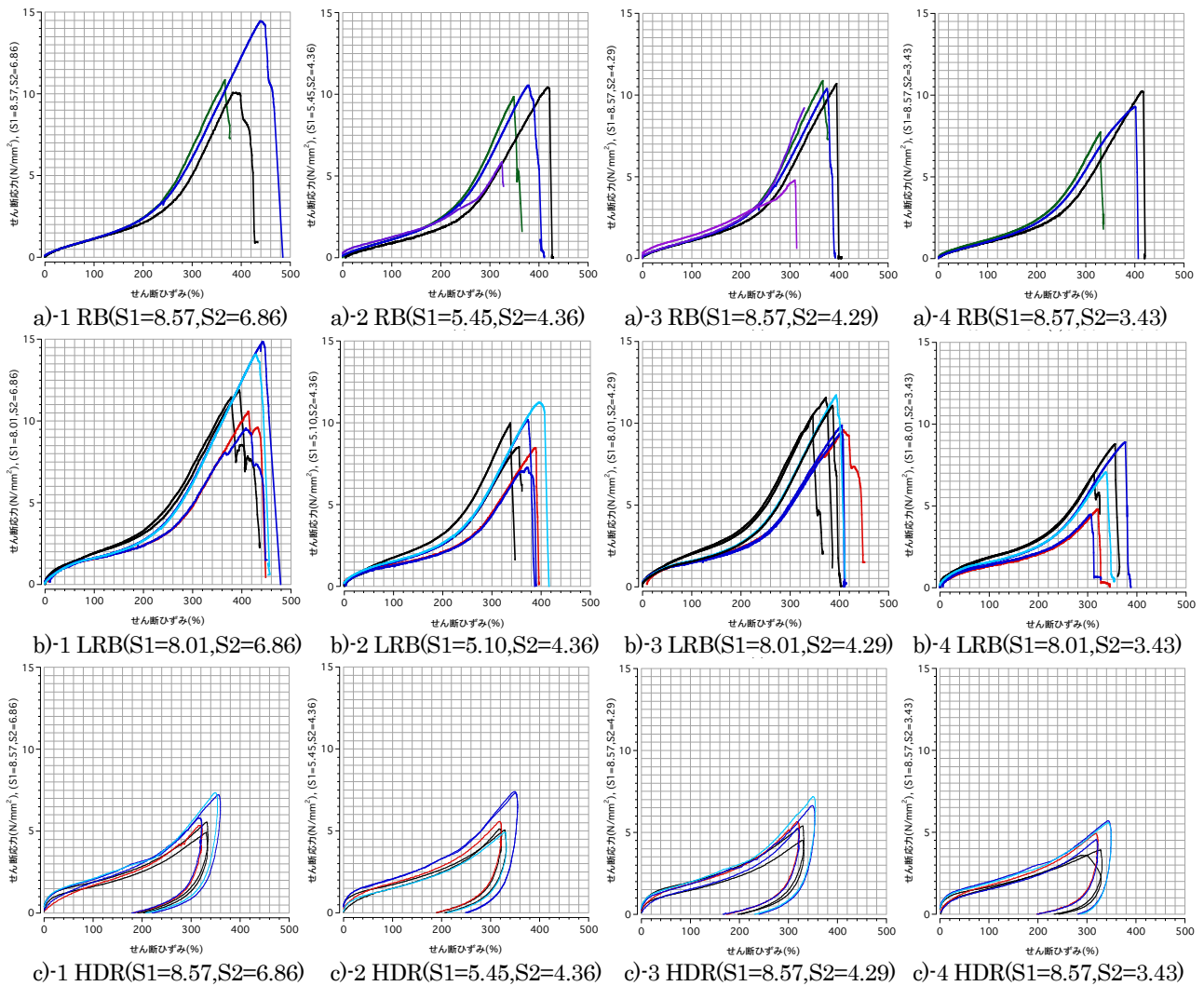


図-4 破断試験における等価剛性—せん断ひずみ関係（常温）

場合でも極端に大きな等価剛性とならず、天然ゴムと比較するとハードニングが小さいことが伺える。S2が小さい支承では、等価剛性の変動が小さい。この結果は、変動に差があるもののゴム種や支承種によらない。

図-3は、 $-20^{\circ}\text{C}$ と $-30^{\circ}\text{C}$ の表面温度に管理した試験体に行ったSTEP1～STEP3までの試験結果を整理したものである。支承種および形状係数毎に分けて、横軸にゴム支承表面温度、右縦軸に等価剛性、左縦軸に等価減衰定数を示したものである。ゴム剛性は低温の影響を受けるが、一般的に天然ゴム系は影響が小さく、合成ゴム混合系である高減衰ゴムは影響が大きいとされている。本試験においても低温になると剛性が高く、既往評価と類似の傾向を示し、せん断ひずみが大きくなり、より低温となるとせん断剛性が高くなることが伺えた。ただし、本試験体のうち、高減衰ゴム支承の低温依存が著しく高くなる結果ではなく、既往と異なるため今後の課題とする。

このような特性を持った支承に対して、STEP4の破断試験を実施した。その結果を図-4に示す。RBおよびLRBは、破断試験において破断した試験結果を形状係数毎に示した。HDRは、破断させられなかったため、全ケースの結果を形状係数毎に示す。

破断が生じたRBとLRBでは、概ね同じ傾向を示している。a)-1とb)-1の結果では、せん断ひずみやせん断応力が高い傾向が示されている。S1が異なるもののS2が同等のa)-2やa)-3、b)-2やb)-3は、せん断ひずみに多少のばらつきが確認できるがせん断応力 $10(\text{N}/\text{mm}^2)$ を閾値として破断していることがわかる。本試験でS2がもっとも小さいa)-4とb)-4は、他の結果よりも若干ではあるがせん断応力が低い値で破断が生じた。破断強度に与える影響は、S1よりもS2に関係性が高いと考えられる。

破断出来なかったHDRの結果は、RBやLRBと比較して同程度のせん断ひずみであっても載荷荷重が小

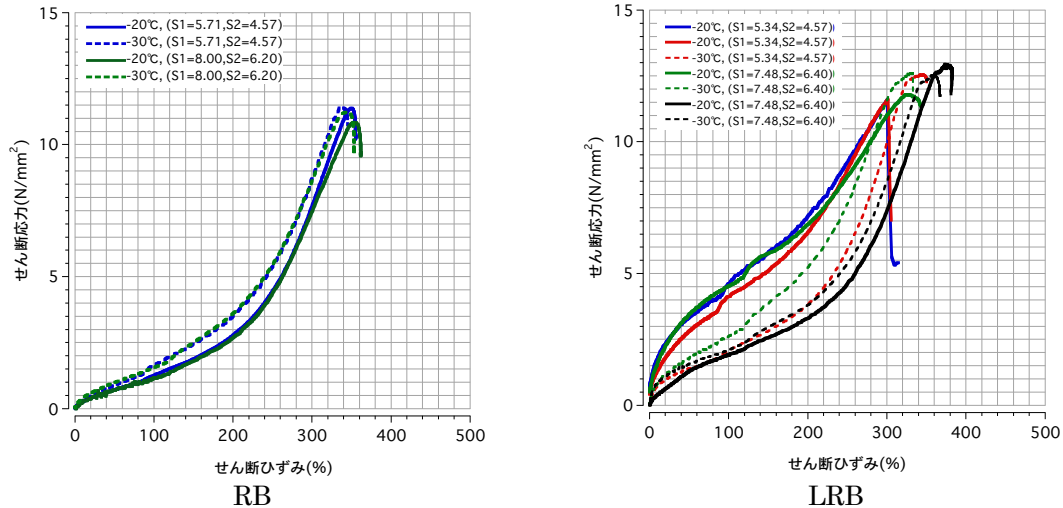


図-5 低温破断試験

さく、さらにせん断ひずみを与えたとしても鉛直荷重に対する有効断面が失われ、座屈状態となり水平せん断のみの評価をすることが困難と判断し試験を中断した。

低温における試験結果のうち、破断が確認されたケースのみを図-5 に示す。実線が-20°Cの結果を、破線が-30°Cの結果を示し、形状係数については図中の凡例に示した通りである。

常温の試験とは異なり RB では、S2 との関係性は低下し、低温影響は小さく、概ねせん断ひずみ 320%で、せん断応力 11(N/mm<sup>2</sup>)程度で破断している。LRB では、-20°Cの破断したせん断応力が 11(N/mm<sup>2</sup>)、-30°Cでは 12(N/mm<sup>2</sup>)を超えており、低温の影響を否定できない。常温の試験とは異なり、S2 と破断せん断応力の関係は明瞭ではない。

### 3. 限界性能評価のための簡便化手法

#### 3. 1. 低温時の性能評価方法における課題

前章で述べたように、ゴム支承の限界状態を把握するために平面寸法□240×240 の小型試験体により破断試験を実施した。同様に低温での限界状態を把握する試験<sup>1-3)</sup>も実施したが、荷重が大きくなり、所定のせん断ひずみを与えることができなかったため、平面寸法を□160×160 に縮小したものをを用いた。

このように試験体として低温の性能評価を行う際は荷重が大きくなり増加することから、道路橋示方書に記載されているように実物を対象とした限界状態を把握する方法の明確化は、大規模な設備の確保など、ハード面から困難であると考えられる。

#### 3. 2. 簡便化手法の適用性把握

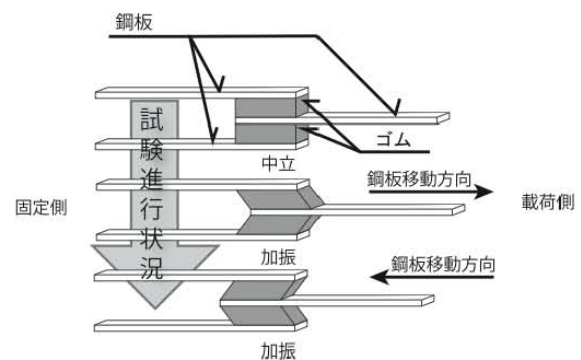


図-6 ラップシヤ試験イメージ

ゴム支承の限界性能を実物によらない簡便な試験により評価することができれば、低温時特性を含めた様々な知見を効果的に得ることが可能と考えられる。

ここでは、ゴムのせん断特性を把握する手法として用いられているラップシヤに着目した。ゴム支承の実物試験とラップシヤ試験の関係が明確となっていないため、それぞれの試験の違いと課題を把握する必要がある。

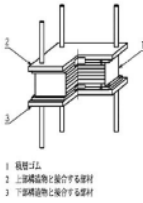
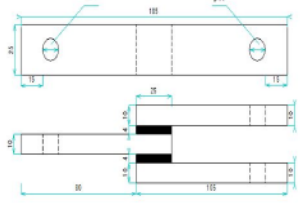
#### 3. 2. 1. ラップシヤ試験概要

ラップシヤ試験は、図-6 に示すような試験片を用いて、ゴムのせん断弾性係数、等価剛性、等価減衰定数及びせん断破断特性を確認することができる試験である。

#### 3. 2. 2. JIS K6411 とラップシヤ試験方法の比較

現在のゴム支承の性能確認試験は、JIS K6411:2011「道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法」(JIS 試験)に従い行われており、低温試験を実施す

表-3 JIS K6411 のせん断特性試験とラップシエア試験の比較

項目	JIS K6411	ラップシエア試験	
概要	試験に用いる支承試験体の実規模に比べて小さいが、低温試験を実施するためには試験設備が大規模になるため汎用性が低い。	試験に用いる試験体が JIS 試験に比べて非常に小さいことから、試験設備を大幅に縮小できるため汎用性が高い。	
試験体	ゴム平面形状(mm)	□100, □240, □400, □1000	□25
	1層のゴム厚(mm)	2, 5, 9, 25	4
	ゴム総数	6	2
	被覆ゴム厚さ	5, 10	0
	概要図		
試験	鉛直圧縮応力	6 (N/mm <sup>2</sup> )	0 (N/mm <sup>2</sup> )
	せん断ひずみ	175%	175%
	水平加振波形	正弦波または三角波	正弦波または三角波
	水平振動数	0.001Hz~0.5Hz	0.001Hz~0.5Hz

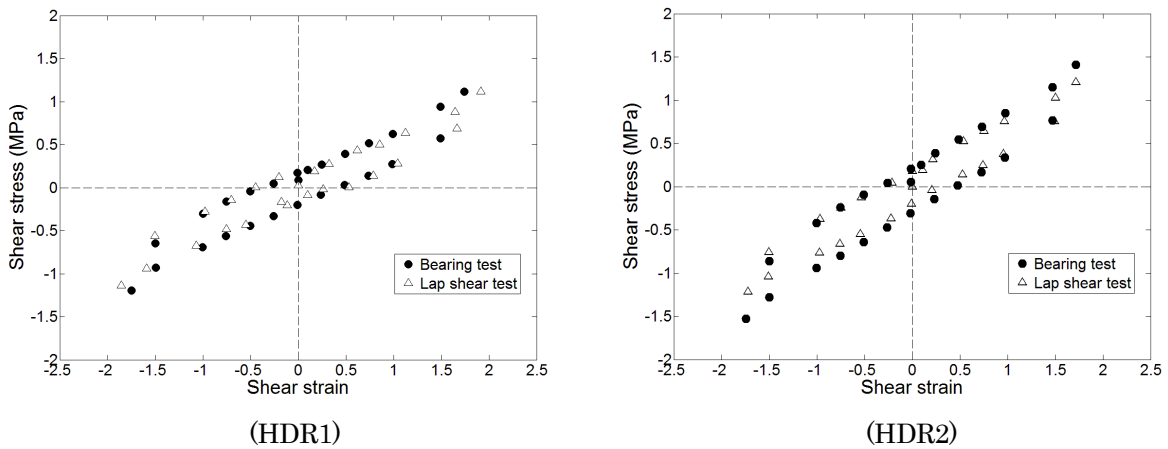


図-7 175%のせん断特性評価による JIS 試験とラップシエア試験の履歴比較

るためには、恒温室等の試験設備が大規模になり汎用性が低い状況である。一方、ラップシエア試験は、JIS 試験に比べ供試体は非常に小さく、試験設備を縮小でき汎用性が高い。

既存の JIS 試験との大きな違いは、「圧縮力を载荷していない」ことがあげられる。表-3 に試験の比較を示す。

### 3.2.3. ラップシエア試験結果

2 種類の HDR を対象に行ったせん断特性試験とそのゴム材料を用いて実施したラップシエア試験の荷重-

変位履歴を図-7 に示す。せん断ひずみとせん断応力の関係では、類似の傾向および示すことが確認できた。

## 4. 考察

ゴム支承の低温時における限界状態を把握するために実規模と比べて小型の試験体を用いた常温と低温における破断試験を実施した。破断させられた試験のみであるが、常温と低温の比較によりゴム支承の限界状態に関する大きな違いは無く、せん断ひずみは 300%を超え、せん断応力は 10 (N/mm<sup>2</sup>) を超えた状況

によりせん断破壊が生じることが確認された。破断した際の最大ひずみと最大荷重のばらつきを比較するとせん断ひずみよりも最大荷重が一定に収束する傾向にあり、極限状態の閾値を定義できる可能性が示唆された。

低温における限界性能評価に関しては、現状の国内の装置では実大模型での試験は困難が想定される。本研究の範囲では、ラップシエア試験の結果でせん断特性を概ね把握することが可能であることが示された。

## 5. まとめ

本検討では、せん断剛性が設計値と概ね一致する品質のゴム支承を用いて試験検討を実施した。

基本的な限界性能を把握するために行なった試験では、常温においては、限界状態時のハードニングの発生状況により、剛性の向上、特性のバラツキに違いが生じた。これに対して、低温では、ゴム種に関わらず、175%時の剛性に対する300%の剛性は2倍を超え、限界状態に対する低温時の影響が高いことが確認された。また、せん断破壊を目的とした試験によりゴム支承の破断強度が一定値に収束する傾向にあることから、

限界を定義できる可能性が確認できた。また、簡便な手法でゴム支承の特性を評価することは、ラップシエア試験を応用することで実現できる可能性が確認できた。

## 参考文献

- 1) 今井隆, 佐藤京, 西村貴明, 田中弘紀, 三田村浩: 寒冷地における橋梁用ゴム支承の温度依存性実験, 平成18年度土木学会北海道支部論文集第63号, 2007. 1.
- 2) 今井隆, 佐藤京, 西村貴明, 田中弘紀, 三田村浩: 寒冷地における橋梁用ゴム支承の温度依存性実験(その2), 平成19年度土木学会北海道支部論文集第64号, 2008. 1.
- 3) 今井隆, 田中弘紀, 佐藤京, 三田村浩: 低温環境下における橋梁用ゴム支承の温度依存性実験, 平成20年度土木学会北海道支部論文集第65号, 2009. 1.
- 4) 佐藤京, 西弘明, 今井隆, 奥井義昭: 橋梁用ゴム支承の低温時特性評価結果に与える実験時雰囲気温度の影響, 第18性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2015. 7.



## Research on marginal performance of rubber bearing under freezing temperature

**Budgeted :** Grants for operating expenses

General account

**Research Period :** FY2015-2017

**Research Team :** Structure Research Team,

Cold Region Technology Promotion Division

**Author :** NISHI Hiroaki, KONNO Hisashi

SHIROTO Yoshitaka, SATO Takashi

YAMASAWA Fumio, TERASAWA Takahiro

**Abstract:** Rubber bearing is an important member for ensuring earthquake resistance of bridges. In the Heisei 24-year road bridge specification document, "the state where the function of the support department is lost is clear, the safety against the condition can be secured", "stable behavior against the action by the earthquake occurring during the service period "It is newly stipulated that the mechanical characteristics of the bearing part must be obvious by examination considering the conditions under which it is used.

Furthermore, the influence of low temperature on the destruction form and limit state due to vibration speed (direct type earthquake, trench type earthquake) etc. is not clear.

In this study, the failure mode of rubber bearings at low temperatures and the applicability of simplified methods for evaluation of limit performance and limit performance are grasped. Specifically, based on the results of standard tests that take into account the effects of low temperatures, tests were conducted to determine the limit performance of rubber bearings, and the basic performance at the limit was determined. Furthermore, we focused on the lap shear test for the development of a simplified method for grasping the limit performance at low temperature and grasped its applicability by comparing with the JIS test results.

**Key words:** Rubber bearings, influence of low temperature, limit state, performance evaluation