

ゴム支承の耐久性に係る品質確保のための評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 28～令 1
担当チーム：寒地構造チーム
研究担当者：葛西聡、佐藤京

【要旨】

本研究では橋梁用ゴム支承の耐久性確保を目的に、低温環境が耐久性に与える影響の分析とともに耐久性の評価試験に低温雰囲気を与える影響に係る検討を行った。また、ゴム支承の劣化損傷の進展を抑止するための補修方法の施工性についても検討を行った。

その結果、低温環境が劣化進行に与える影響が確認され、性能評価試験における低温条件下の試験の必要性が明確となった。また、ゴム支承が有する载荷速度、面圧等に対する低温雰囲気影響に関する試験を行いせん断特性に与える影響を明らかにした。さらに、常温および低温状況下での疲労载荷試験結果から 400 万回までの繰返し载荷においても劣化や損傷は、概ね発生しないことが明確となった。さらに冬期補修工法を想定した評価試験を実施し、付着性能試験の方法について提案を行った。

キーワード： ゴム支承、耐久性、性能評価、低温影響

1. はじめに

橋梁用ゴム支承は、橋梁の上部工および下部工を結ぶ重要な付属物である。地震時ではせん断ひずみ 250%を超えても破断に至らない性能が求められ、長期間にわたり性能が低下しないよう耐久性も要求される。

橋梁用ゴム支承の耐久性に、大きな影響を与えるものとして化学的劣化がある。伊藤ら¹⁾は熱酸化劣化が主であると指摘し、性能低下の評価式を提案するなど常温環境に対する研究が進んでいる。また、寒冷環境における耐久性については、杉本ら²⁾による寒冷地に限定した天然ゴム支承の表面亀裂の発生メカニズムとして、低温環境とオゾン劣化の相互作用に着目した耐候性保護剤の低温環境対応に対する成果がある。

一方、橋梁用ゴム支承の疲労については懸念されてはいるものの、ゴム支承特性に対する影響の検討事例は少なく、実態把握は進んでいない。特に低温雰囲気の影響を加味した報告はない。しかし、低温状態におけるゴム支承の温度依存性の研究からゴムの種類によっては大きな影響を受けることが明らかであることから、疲労に対する抵抗性や力学特性等への低温雰囲気が与える影響について検討する必要がある。

そこで、実態の把握とともに、耐久性評価のための模型試験より、载荷速度や面圧等の試験条件の低温依存性、さらには低温雰囲気における疲労試験による劣化やクラックの発生について検証を行った。

2. 低温雰囲気が耐久性に与える影響の実態調査

ゴム支承は、鋼材と高分子材（ゴムと接着剤）により構成され、性能低下要因については、材料変質と物理的損傷に分けることができる。

高分子材に関する劣化要因を図-2.1 に示す。橋梁用支承ゴムは、化学的作用によって性能が低下することが指摘¹⁾されているが、ゴム支承が使用され始めてから経過年数が短いことから、外観に生じた変化については日本国内での分析事例は多くない。

そこで、橋梁点検結果を対象として、ゴム支承の低温雰囲気も含めた劣化要因に関し、実態調査を行った。

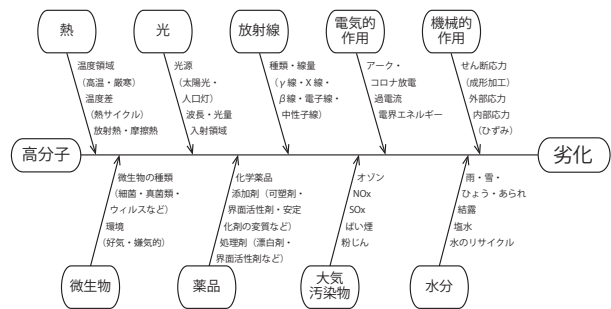


図-2.1 高分子の劣化要因³⁾

2.1 定期点検から確認された劣化損傷事例

国土交通省北海道開発局が実施している橋梁点検の平成 24～26 年の結果からゴム支承を有する橋梁 1732 橋を抽出し、ゴム支承の劣化として「変色・劣化」

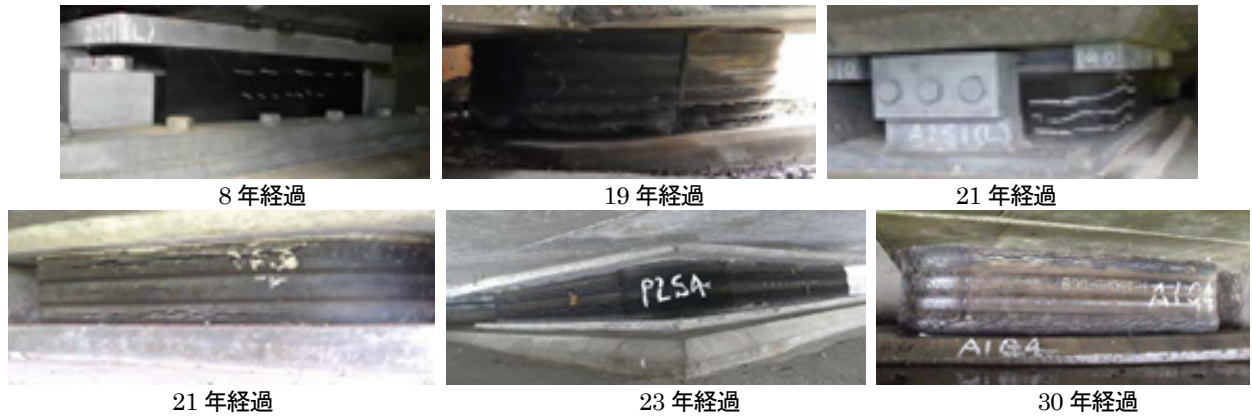


図-2.2 ゴム支承のひびわれの一例

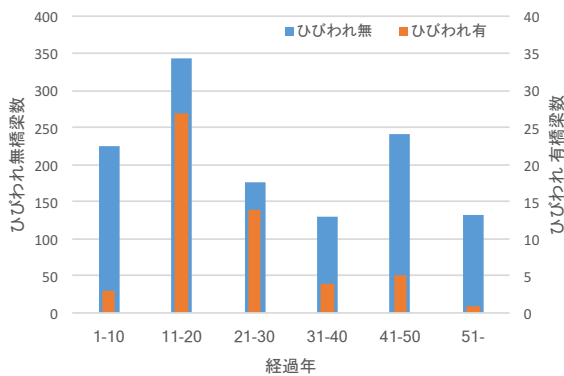


図-2.3 経過年別点検橋梁数（ゴム支承劣化の有無別）

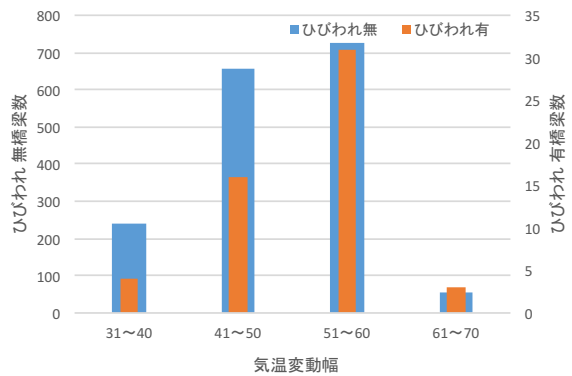


図-2.4 年平均気温変動幅と橋梁数（ゴム支承劣化の有無別）

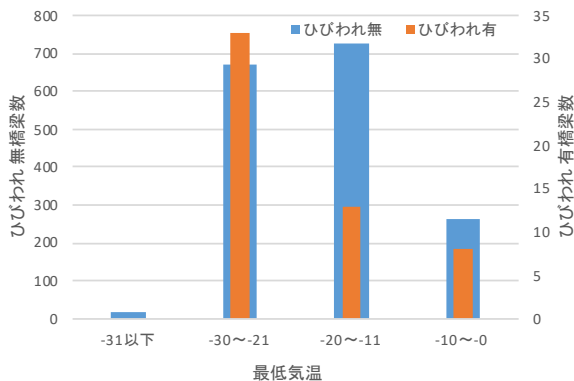


図-2.5 最低気温と橋梁数（ゴム支承劣化の有無別）

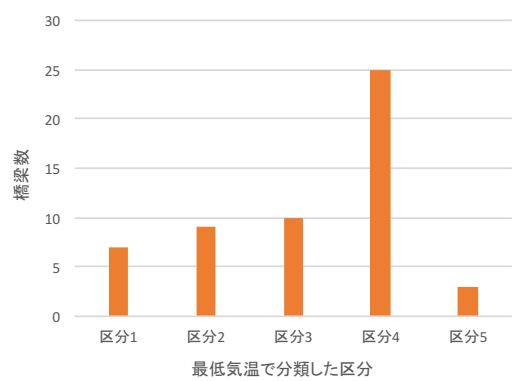


図-2.6 最低気温区分別ひびわれが確認された橋梁数

と記録された橋梁の点検写真より、ひびわれが確認できた54橋を抽出した。その外観について図-2.2に例示する。

外観で確認されるひびわれは、ゴムの引張作用と直行する方向に現れている。具体的には、橋軸方向に向いている面では、死荷重の影響により内部鋼板の位置で生じる局所ひずみの発生箇所に水平方向のひびわれが確認されたケースが多く、橋軸直角方向に向いている面では、橋梁の伸縮による影響と想定されるせん断変形にともなう斜め方向のひびわれが確認されたケースが多い。

2.2 寒冷環境と劣化傾向

橋梁点検結果を用いて劣化の有無に対する供用期間や気象の影響について資料調査を実施した。なお、劣化は、5年毎の点検により確認されるため橋梁定期点検年を基に劣化が発生した供用期間を算定することとした。

図-2.3に経過年別点検橋梁数をひびわれの有無で区分して示している。ゴム支承は、供用期間が短い橋梁に多く用いられていることがわかる。ゴム支承にひびわれが有る橋梁数は10年未満の供用期間では少なく、11年～30年経過した橋梁に多い。

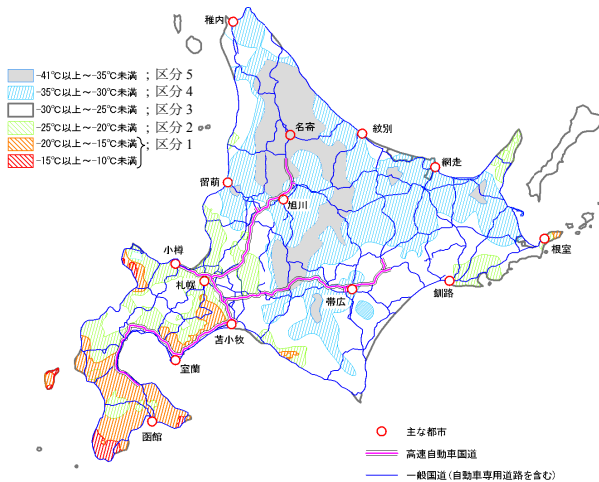


図-2.7 アメダスによる北海道の観測記録最低気温分布⁴⁾

外気温との関係性について、年平均気温変動幅と最低気温に着目して、図-2.4、図-2.5に整理した。年平均気温の変動幅が小さいとひびわれ有の橋梁が減少する。また、最低気温が低くなるとひびわれ有の橋梁が多くなる傾向が示されている。

次に、北海道を最低気温で分類した区分で整理したひびわれ確認橋梁数を図-2.6に示す。区分方法は、図-2.7に示す北海道における鋼道路橋の設計および施工指針に示された最低気温分布図⁴⁾を基準に、 -20°C 以上を区分1、 -25°C 以上 -20°C 未満を区分2、 -30°C 以上 -25°C 未満を区分3、 -35°C 以上 -30°C 未満を区分4、 -41°C 以上 -35°C 未満を区分5とした。図-2.6より最低気温が下がる区分になるに従って、ひびわれ有の橋梁数が増加する傾向が明確である。区分5で少ないのは、区分地域が狭く分析対象とした橋梁が少ないためと想定される。

2.3 考察

ゴム支承の劣化に与える低温雰囲気影響について、北海道開発局が実施している橋梁定期点検結果から実態調査を行った。

その結果、平成24年から平成26年の橋梁点検結果より抽出した1,732橋の内、ゴム支承の劣化が確認されたのは、54橋で3%程度と多くはない。またその状態は、桁の伸縮等による支承の引張方向に直角となるひびわれが発生しているものであり、供用期間が長くなると劣化事例が多くなることが確認された。また、外気温が低い地域において、劣化事例が多くなる傾向にあることも確認された。

3. 性能評価に関する検討

3.1 現行の評価手法における課題

平成29年に改定された道路橋示方書に従った橋梁

設計法では、ゴム支承に求められる性能が明確化され、それに対する品質確保のための試験項目が道路橋支承便覧(平成30年12月)に示された。その試験項目には、実物製品により試験を実施するものもある。ここで、図-3.1に示す「JIS K 6411:2012 道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法」(以下、JIS K 6411)の標準試験体 No.2 に準拠した高減衰ゴム支承(HDRS)を用いた、支承温度が常温状態と低温状態における恒温室でのせん断特性試験結果の一例を図-3.2に示す。試験体の温度を $+23^{\circ}\text{C}$ と -30°C とし、それらに合わせた雰囲気温度の条件下で、175%ひずみの水平せん断試験を実施した結果である。

$+23^{\circ}\text{C}$ の試験体温度では、せん断特性を評価可能な試験結果が得られているが、 -30°C の試験体温度では、ゴム支承の剛性が大幅に高くなり、2ループ目の荷重において試験機の最大荷重に達し、頭打ちとなっている。

つまり、建設地の雰囲気影響により低温時特性も把握することが要求された場合、低温時の品質管理に対し実物製品に関する適切な試験を実施することが困難になると予想される。

そこで、低温雰囲気下において小型模型やゴムの要

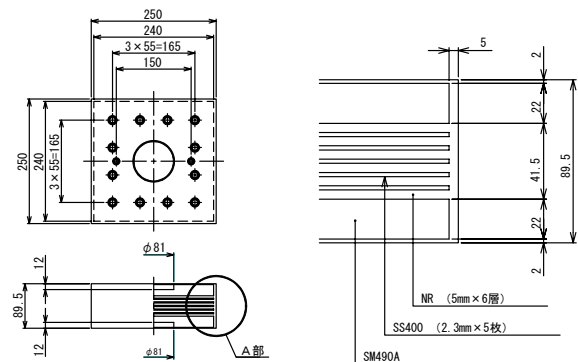


図-3.1 試験体寸法

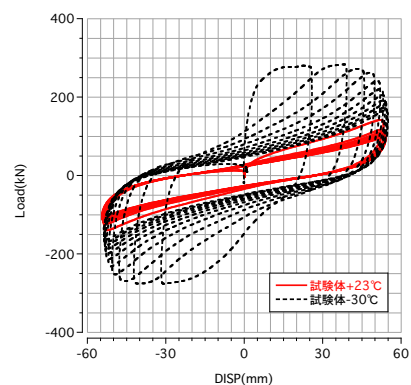


図-3.2 低温雰囲気下のせん断特性試験の温度影響結果

表-3.1 試験体概要

躯体番号	平面形状	内部鋼板厚 (mm)	ゴム厚 (mm)	ゴム層数 (mm)	ゴム層厚 (mm)	支承高さ (mm)	S1	S2
No. 1	100×100	2.3	3	6	18	97.5	8.3	5.6
No. 2	160×160	3.2	5	5	25	105.8	8.0	6.4
No. 3	240×240		7	6	42	126.0	8.6	5.7
No. 4	240×240	3.2	4.5	8	36	126.4	13.3	6.7
No. 5			6	6	36	120.0	10.0	
No. 6			9	4	36	113.6	6.7	
No. 7			12	3	36	110.4	5.0	
No. 8	240×240	3.2	7	7	49	136.2	8.6	4.9
No. 9				5	35	115.8		6.9
No. 10				4	28	105.6		8.6

S1 ; 1 次形状係数 (道路橋支承便覧 P. 141 参照)

S2 ; 2 次形状係数 (道路橋支承便覧 P. 142 参照)

表-3.2 雰囲気温度により用いた試験機や条件の違いについて

	低温状況下試験 (以下、低温時試験)	常温状況下試験 (以下、常温時試験)
雰囲気温度	約 6°C	約 23°C
水平加振波形	正弦波	三角波
載荷方法	せん断片押し	せん断片押し
面圧	0, 2, 4, 6 (N/mm ²)	0, 2, 4, 6 (N/mm ²)
載荷速度	10, 50, 75, 100mm/sec	3, 5, 7, 9mm/sec

素試験からの確に品質を評価または管理するための試験条件等について検討する。また、低温雰囲気が耐久性に与える影響を明確にするために鉛直疲労載荷試験を行い、低温雰囲気を考慮した品質管理の手法を検討する。

3.2 試験条件による影響

低温影響を考慮した特性評価試験に関して、実物大模型に対する代替寸法による評価手法を検討するために、JIS K 6411 の標準試験体を用いた試験を実施し、形状寸法、載荷速度、面圧に対する依存性を分析する。

3.2.1 試験概要

形状寸法、載荷速度、面圧に対する依存性の試験は、載荷速度、面圧に対して、寸法等が与える影響を分析するように試験ケースを計画するとともに、それらの低温雰囲気影響についての試験を行った。

対象とする試験体の概要を表-3.1 に示す。なお、平面形状 160×160 の No. 2 試験体は、標準試験体の間を

補完する形状寸法として設定した。

載荷速度と面圧依存性に対する低温雰囲気影響を確認するため表-3.2 に示す載荷条件によりせん断試験を行った。低温時試験は、所有している載荷装置の仕様により、対象試験体でひずみ 175%、速度 100(mm/sec)をピークとして条件を設定した。また、常温時試験は、品質管理用の試験装置を借用して行ったため、載荷速度と水平加振波形が異なる条件となっている。

本試験では、ゴム支承のせん断大変形時のハードニングが生じない範囲の変位における挙動に着目し、簡易な片押しによる試験とした。低温時試験では、試験体と載荷プレートを固定せず、ゴム支承が所定変位となった後、徐荷して自然にゴム支承の変位が概ね 0mm になるまで待ち、これを同条件で 5 回行う片押し繰り返し試験とし、載荷速度や面圧などの載荷条件を変えて試験を継続した。常温時試験では、試験体と載荷プ

表-3.3 常温時载荷試験結果

躯体番号	平面形状	内部鋼板厚 (mm)	ゴム厚 (mm)	ゴム層数	ゴム総厚 (mm)	支承高さ (mm)	S1	S2	各载荷条件におけるせん断剛性 (kN/mm)																			
									各载荷条件におけるせん断剛性 (kN/mm)																			
									载荷速度 (mm/sec)	3	5	7	9	9	9	9	5	3	5	7	9	9	9	9	9	9		
									鉛直荷重 (N/mm ²)	6	6	6	0	2	4	6	6	6	6	6	0	2	4	6				
									せん断ひずみ (%)	70	70	70	70	70	70	70	100	175	175	175	175	175	175	175	175			
No.1	100×100	2.3	3	6	18	97.5	8.3	5.6	NR_01			0.54						0.50		0.58								
									NR_02			0.60						0.58		0.60								
No.2	160×160	3.2	5	5	25	105.8	8	6.4	NR_01			1.17						1.09		1.08								
										NR_02			1.06						1.04		1.18							
No.3	240×240	3.2	7	6	42	126	8.6	5.7	NR_01			1.48						1.41		1.50								
										NR_02			1.42						1.37		1.55							
No.5	240×240	3.2	6	6	36	120	10	6.7	NR_01	1.66	1.67	1.66					1.67		1.63	1.56	1.54					1.62		
												NR_02	1.68	1.70	1.73				1.71		1.81	1.73	1.72					1.77
No.6	240×240	3.2	9	4	36	113.6	6.7	6.7	NR_01	1.56	1.57	1.55					1.57		1.54	1.48	1.47					1.50		
												NR_02	1.66	1.64	1.63					1.64		1.75	1.68	1.66				
No.7	240×240	3.2	12	3	36	110.4	5	6.9	NR_01	1.58	1.56	1.56					1.58		1.55	1.49	1.48					1.52		
												NR_02	1.66	1.63	1.63					1.63		1.74	1.68	1.66				
No.8	240×240	3.2	7	5	35	115.8	8.6	6.9	NR_01				1.30	1.30	1.27	1.26							1.25	1.19	1.18	1.16		
																NR_02				1.29	1.28	1.26	1.25					
No.9	240×240	3.2	7	5	35	115.8	8.6	6.9	NR_01				1.74	1.75	1.74	1.73							1.76	1.64	1.63	1.61		
																NR_02				1.73	1.76	1.71	1.70					
No.10	240×240	3.2	7	4	28	105.6	8.6	8.6	NR_01				2.09	2.13	2.11	2.11							1.98	1.90	1.86	1.84		
																NR_02				2.06	2.08	2.08	2.06					

表-3.4 低温時载荷試験結果

躯体番号	平面形状	内部鋼板厚 (mm)	ゴム厚 (mm)	ゴム層数	ゴム総厚 (mm)	支承高さ (mm)	S1	S2	各载荷条件におけるせん断剛性 (kN/mm)											
									各载荷条件におけるせん断剛性 (kN/mm)											
									载荷速度 (mm/sec)	10	50	75	100	100	100	100	100	100	100	100
									鉛直荷重 (N/mm ²)	6	6	6	0	2	4	6	6	6	6	6
									せん断ひずみ (%)	70	70	70	70	70	70	70	100	100	100	175
No.1	100×100	2.3	3	6	18	97.5	8.3	5.6	NR_01	0.43	0.43	0.41	0.42	0.36	0.40	0.31	0.27	0.21		
									NR_02	0.53	0.48	0.42	0.45	0.41	0.40	0.36	0.35	0.32		
No.2	160×160	3.2	5	5	25	105.8	8	6.4	NR_01	1.07	0.99	0.95	1.15	1.05	0.99	0.95	0.62	—		
										NR_02	0.99	1.02	1.06	1.01	1.04	0.94	0.93	0.75	—	
No.3	240×240	3.2	7	6	42	126	8.6	5.7	NR_01	1.38	1.25	1.12	1.51	1.37	1.24	1.36	1.21	—		
										NR_02	1.30	1.18	1.27	1.21	1.21	1.42	1.20	1.20	—	
No.4	240×240	3.2	4.5	8	36	126.4	13.3	6.7	NR_01	1.62	1.54	1.49	1.66	1.67	1.67	1.73	1.51	—		
												NR_02	1.53	1.49	1.45	1.59	1.43	1.43	1.45	1.30
No.5	240×240	3.2	6	6	36	120	10	6.7	NR_01	1.57	1.22	1.31	1.60	1.43	1.42	1.50	1.30	—		
												NR_02	1.54	1.49	1.35	1.76	1.52	1.64	1.60	1.42
No.6	240×240	3.2	9	4	36	113.6	6.7	6.7	NR_01	1.47	1.00	1.29	1.50	1.53	1.48	1.47	1.30	—		
												NR_02	1.54	1.22	1.43	1.50	1.42	1.36	1.29	1.37
No.7	240×240	3.2	12	3	36	110.4	5	6.9	NR_01	1.41	1.28	1.25	1.67	1.47	1.28	1.07	1.33	—		
												NR_02	1.52	1.27	1.36	1.61	1.44	1.44	1.45	1.32
No.8	240×240	3.2	7	5	35	115.8	8.6	6.9	NR_01	1.11	1.00	1.04	1.21	1.13	1.20	1.04	1.04	—		
																NR_02	1.15	1.06	0.94	1.23
No.9	240×240	3.2	7	5	35	115.8	8.6	6.9	NR_01	1.59	1.25	1.48	1.53	1.67	1.61	1.59	1.37	—		
																NR_02	1.57	1.41	1.45	1.58
No.10	240×240	3.2	7	4	28	105.6	8.6	8.6	NR_01	1.88	1.69	1.60	1.87	1.75	1.86	1.85	1.69	—		
																NR_02	1.86	1.65	1.43	1.76

レートを固定し、ゴム支承が所定の変位となった後、载荷プレートの移動操作により変位を初期値に戻し、同条件で5回の片押し繰り返し载荷を行い、これを载荷速度や面圧などの载荷条件を変え試験を続けた。対象とした試験体は、2種類の製造元が異なるG10の特性値を有する天然ゴム支承である。それらを試験結果が区別できるように、NR_01とNR_02として示す。

3.2.2 試験結果

各試験より得られた結果のうち、繰り返し実施した片押し载荷試験の5回の水平変位-荷重関係から、初回载荷分を除き、2~5回の平均の接線剛性を得た。その結果を表-3.3と表-3.4に示す。

(1) 形状寸法の影響

常温時载荷試験 No. 1~3 供試体における結果と低温時载荷試験 No. 1~3 供試体の内、载荷速度 10(mm/sec)の結果について、平面形状を横軸に、No. 1 試験体のせん断剛性を基準とした各試験の剛性の比を縦軸に示し

た結果を図-3.3に示す。凡例は、製造元番号、雰囲気温度、せん断ひずみの違いを示しており、マーカー形状

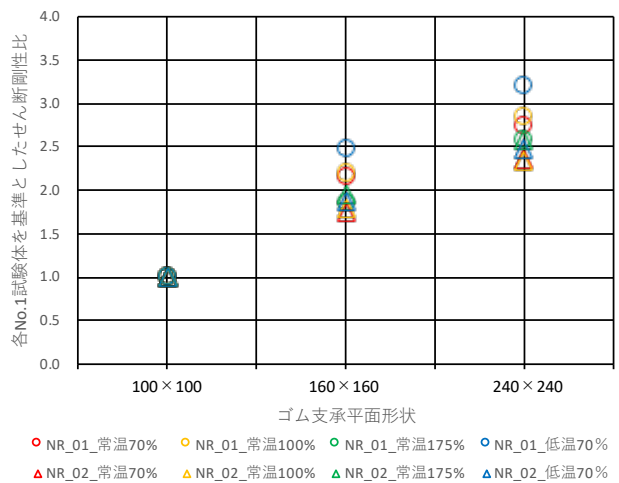


図-3.3 平面形状と各試験条件の No. 1 試験体を基準としたせん断剛性比

状が○のものがNR_01、△のものがNR_02を示している。

常温・低温時ともに、□100→□160→□240 と形状寸法が大きくなるに従い、せん断剛性比のばらつきが大きくなっている。試験体温度やせん断ひずみの違いによる関係性は確認できない。そのため、次に横軸に厚さ方向の形状寸法の関数となっているせん断剛性の設計値を用いて詳細な検討を行う。ゴム支承のせん断剛性の設計値は、道路橋示方書便覧に示されている式(1)を用いて評価されており、ゴムのせん断面積および総ゴム厚に関係している。

$$K_s = G(\gamma)A_e / \sum t_e \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

K_s : ゴム支承のせん断剛性 (N/mm)

$G(\gamma)$: H30 道路橋支承便覧 表-4.3.2 に示すゴム材料のせん断弾性係数の特性値

A_e : ゴムのせん断面積 (ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積) (mm²)

$\sum t_e$: 総ゴム厚(mm)

試験により得られたせん断剛性を縦軸に、(1)式より得られるゴム支承のせん断剛性の設計値を横軸にとって関係を確認する。

常温時試験と低温時試験を比較するため、常温時試験では、荷速度 5mm/sec と 9mm/sec を、低温時試験では、荷速度 10mm/sec の結果をそれぞれ図-3.4 と図-3.5 に示す。

試験装置や荷荷時温度、荷速度の違いによるものと考えられるが、常温時より低温時の試験値の1次回帰係数が、常温時試験で 1.0308、低温時試験で 0.9498 と低温時の方が小さくなっているものの、差が小さいことから、低速で低せん断ひずみの条件下においては、温度の影響が小さく、また平面形状もしくはせん断剛性の設計値に対する試験値のばらつきは小さく、線形の関係にあることが示された。

次に、ハードニングが生じる場合との比較のため、常温時試験の 9mm/sec 以下の荷速度で行なった、せん断変形 175%時の結果を図-3.6 に示す。先に示したような線形の関係が確認されるが、回帰直線に対してばらつきが大きいことが分かる。せん断ひずみ 70%の試験では生じていなかった、ひずみ増加に伴うハードニング現象が要因となり試験値にばらつきが生じたものと推察する。また、そのばらつきは、せん断剛性の

設計値が 1.6kN/mm を超えると顕著である。製造元により偏りが異なり回帰直線の上側と下側に分かれて分

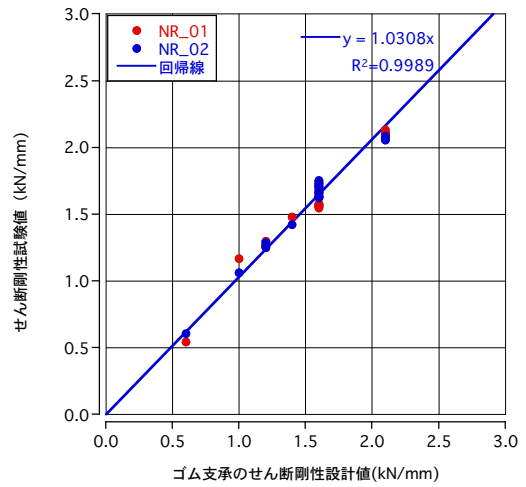


図-3.4 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
荷速度 5 と 9mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 常温

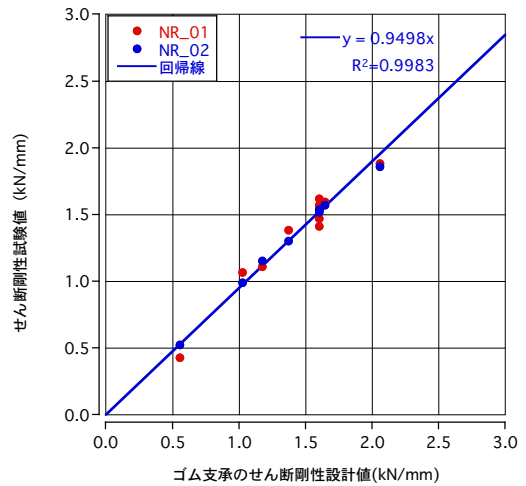


図-3.5 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
荷速度 10mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 低温

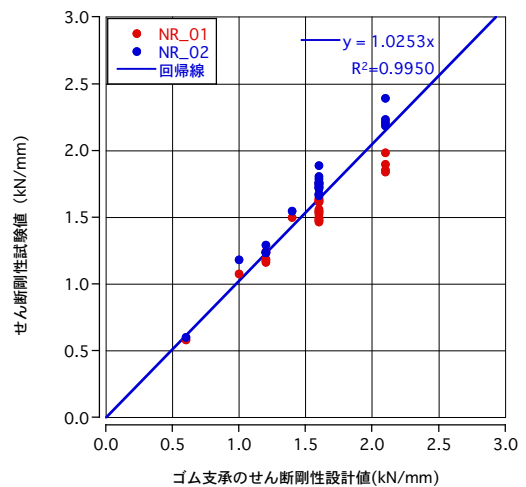


図-3.6 せん断剛性の設計と試験結果の関係
荷速度 3 と 5, 9mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=175\%$, 常温

布しており、その影響とも考えられる。

(2) 荷速度依存性

No. 5~7 供試体におけるせん断剛性について、荷速度を横軸として整理した。常温時は 3mm/sec のせん断剛性を基準として、荷速度 3~9mm/sec のせん断剛性を比で表し、低温時は 10mm/sec のせん断剛性を基準として、荷速度 10~100mm/sec のせん断剛性を比で表し、その結果を図-3.7 と図-3.8 に示した。図に示す凡例の S1 とは、ゴム支承の寸法形状を示す一次形状係数(道路橋支承便覧 P. 141 参照)を指しており、S1 が大きい場合は、ゴム 1 層の側面積に対する水平せん断面積が大きく、S1 が小さい場合は水平せん断面積が小さい形状となることを係数として示している。

常温時試験では、荷速度によらず、せん断剛性比が±数%の範囲に収まっていることから、3~9mm/sec の荷速度の範囲では、速度の影響は非常に小さいと考えられる。低温時試験では、荷速度の増加とは相関なく、不安定なばらつきを示していることが確認された。

以上から荷速度依存性に対するせん断剛性設計値と試験値の関係にも低温雰囲気の影響を与える可能性を見出すことが出来た。

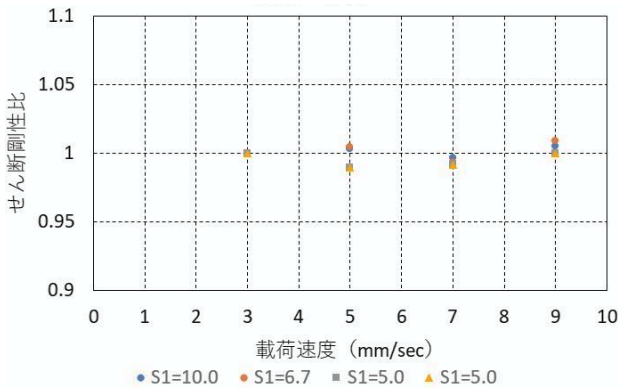


図-3.7 常温時における荷速度影響

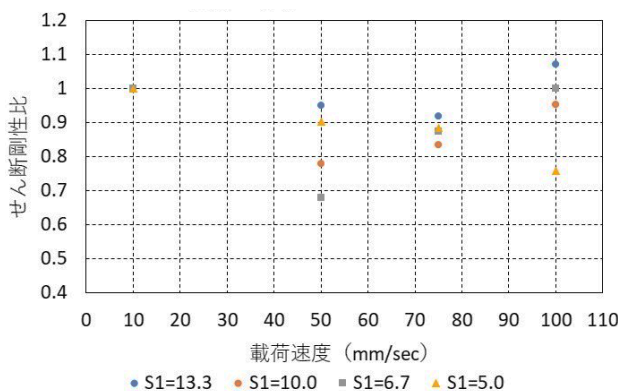


図-3.8 低温時における荷速度影響

次に寸法による影響の整理と同様にせん断剛性設計値と試験値の関係について、低温時試験で実施した 10mm/sec から 100mm/sec の異なる荷速度による比較

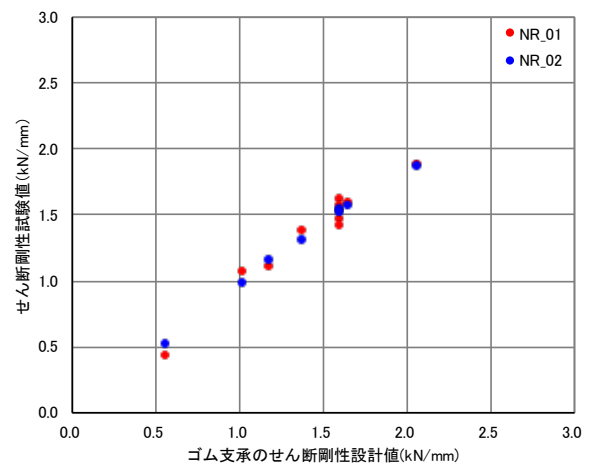


図-3.9 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
荷速度 10mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 低温

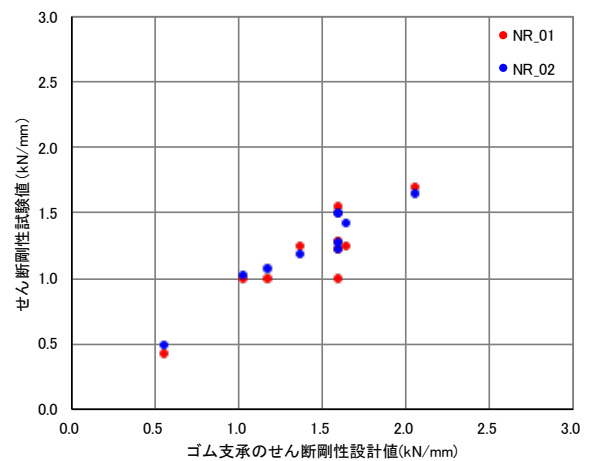


図-3.10 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
荷速度 50mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 低温

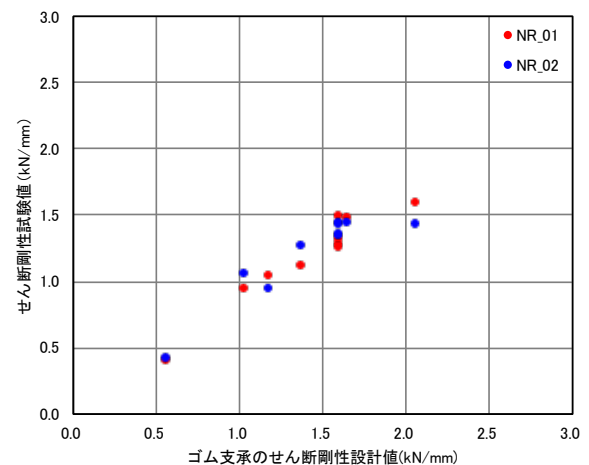


図-3.11 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
荷速度 75mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 低温

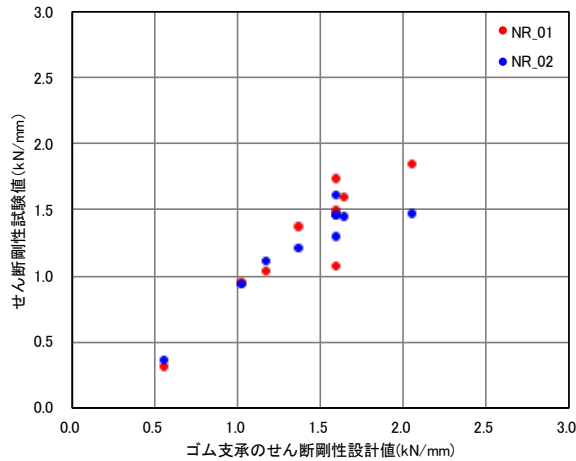


図-3.12 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
 载荷速度 100mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=70\%$, 低温

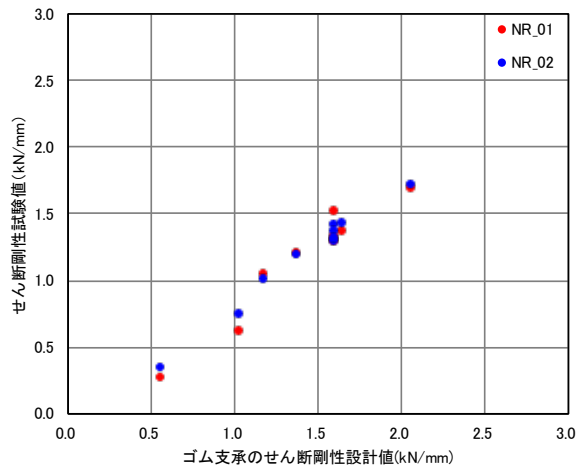


図-3.13 せん断剛性の設計値と試験結果の関係
 载荷速度 100mm/sec, 面圧 6MPa, $\gamma=100\%$, 低温

を行う。

図-3.9 から図-3.12 には、低温下において载荷条件として面圧 6N/mm^2 、せん断ひずみ $\gamma 70\%$ 、载荷速度が 10mm/sec 、 50mm/sec 、 75mm/sec 、 100mm/sec で実施した試験値と設計値とのせん断剛性の関係を示した。

いずれの载荷速度においても、ほぼ線形の関係を示しているものの、設計値の範囲によりばらつきに違いが確認でき、本試験の中で载荷速度が最も早い 100mm/sec では、ばらつきが顕著である。また、せん断剛性設計値 1.3kN/mm を境に、線形関係の傾きが変化していることが確認でき、载荷速度が高く、せん断剛性設計値が高くなるとせん断剛性試験値は低くなることが確認された。

また最も早い载荷速度におけるせん断ひずみの影響をさらに確認するため、図-3.13 にせん断ひずみ 100% の結果を示す。せん断ひずみ 70% と比べて設計値

と試験値のせん断剛性のばらつきが小さくなっているが、せん断剛性の試験値は、全体的に小さくなっていることが確認できる。

(3) 鉛直面圧依存性

No. 8~10 供試体におけるせん断剛性について、鉛直面圧を横軸として整理した結果を示す。縦軸は、常温時・低温時ともに各供試体の鉛直面圧 6N/mm^2 のせん断剛性を基準とした比で表した、各载荷条件にて得られたせん断剛性比と鉛直面圧の関係を図-3.14 と図-3.15 に示す。図の凡例に示した S2 とは、ゴム支承の二次形状係数（道路橋支承便覧 P. 142 参照）で、ゴム支承の橋軸方向または直角方向の有効長を総ゴム厚で除した値である。

常温時試験の結果では、鉛直面圧の変化があっても、せん断剛性比は $\pm 1\%$ の範囲に収まっており、鉛直面圧による影響は小さい。

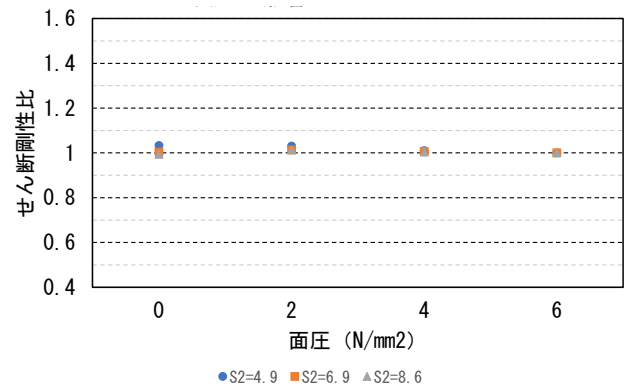


図-3.14 常温時における鉛直面圧影響

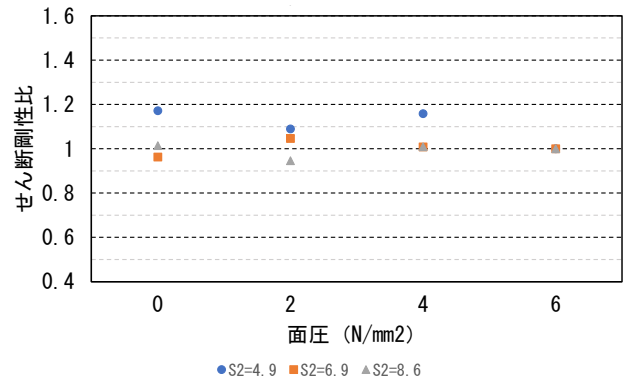


図-3.15 低温時における鉛直面圧影響

低温時試験の結果では、 $S2=6.9$ および $S2=8.6$ の供試体では、概ね鉛直面圧によらず、せん断剛性比は $\pm 10\%$ 以内となり、ゴム支承のせん断剛性に対する品質管理基準の $\pm 10\%$ 以内に収まっている。 $S2=4.9$ の供試体においては、鉛直面圧 0N/mm^2 と 6N/mm^2 のせん断剛性比では 2 割程度の違いが確認できる。この供試体は、常

温時試験では、鉛直面圧の影響が小さいことが確認できていることから、低温の雰囲気せん断剛性に対する鉛直面圧依存性に影響を与えている可能性がある。

各面圧毎に計測したせん断剛性の設計値と試験値の関係について、常温時についての载荷速度9mm/sec、せん断ひずみ70%の結果を図-3.16に示す。また、低温時については、载荷速度100mm/sec、せん断ひずみ70%の結果をゴム支承の製造元を分けて図-3.17、図-3.18に示す。図中の凡例は、ゴムの製造元と鉛直面圧を示している。

常温時の結果では、鉛直面圧によるばらつきもなく、せん断剛性の設計値と試験値が線形の関係であることが分かる。これに対して低温時試験では、鉛直面圧が高くなると設計値に対して試験値が低下する傾向にある。ゴムの製造元別で設計値と試験値の比較をすると、どちらのゴム支承も設計値が高くなると試験値がばらつく傾向があるが、NR_01よりもNR_02における試験値の低下が大きいことが確認できる。

本試験では、鉛直面圧上昇とともに生じるゴムのはらみ出しを計測しておらずその影響について明確にすることができないが、鉛直面圧とせん断剛性の関係は、はらみ出しの程度により変化することが想定される。低温時試験の設計値と試験値の関係において、設計値の増加とともに線形性に変化が生じることから、低温による影響を受けているものと考えられる。

3.2.3 考察

小型模型試験からの的確に品質を評価または管理するための試験条件等を明らかにするため、ゴム支承の特性試験における寸法依存性、速度依存性、面圧依存性と合わせて低温雰囲気が与える影響に着目した試験を行った。

その結果、形状寸法の影響においては、せん断ひずみが小さく载荷速度が遅い試験においては、ゴム総厚に係るせん断剛性設計値とせん断剛性試験値との関係について低温雰囲気の影響は小さく、線形により補間できることが確認できた。またハードニング現象が生じやすいせん断ひずみが大きい試験においては、寸法が大きく設計剛性の高いゴム支承では、ばらつきが大きくなり、さらにせん断剛性の設計値と試験値の関係では、剛性の低い側と高い側で異なる線形性を有し、せん断ひずみが小さく载荷速度が遅い試験とは、回帰式が異なってくるものとする。

载荷速度依存性については、载荷速度が大きくなると、設計値の増加とともに試験値の設計値に対する増加勾配が小さくなることを確認された。これはつまり

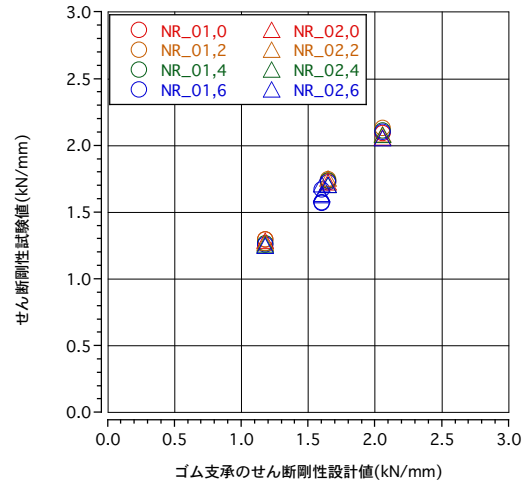


図-3.16 面圧毎のせん断剛性の設計値と試験値の関係 (载荷速度9mm/sec, $\gamma=70\%$, 常温)

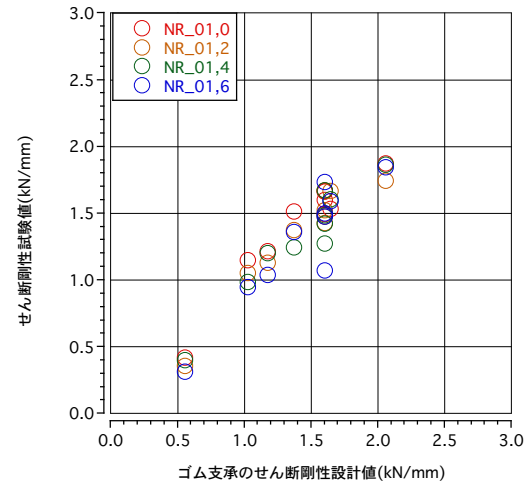


図-3.17 面圧毎のせん断剛性の設計値と試験値の関係 (载荷速度100mm/sec, $\gamma=70\%$, 低温, NR_01)

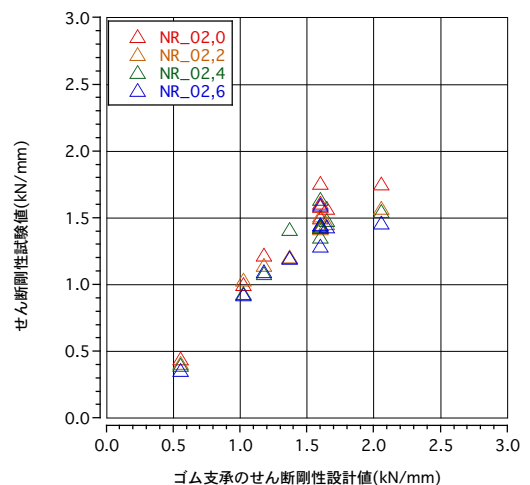


図-3.18 面圧毎のせん断剛性の設計値と試験値の関係 (载荷速度100mm/sec, $\gamma=70\%$, 低温, NR_02)

載荷速度が大きくなり、剛性が高いほど、試験値と形状寸法依存性が加味されている設計値との間に差が生じるということである。

鉛直面圧依存性については、今回の試験の範囲では、顕著ではないが常温時よりも低温時の影響が大きい。

小型模型やゴムの要素試験からの確に品質を評価または管理することを目的に、本検討の範囲に限るが、せん断剛性設計値から計測値を補間するための線形回帰式を求めた(図-3.4、図-3.5と図-3.6をまとめて図-3.19に示す)。せん断ひずみが小さく載荷速度が遅い試験結果から線形回帰式を求めた。図中のどのケースも線形回帰で相関係数Rが概ね1であることから、小型模型試験により低温時の品質を評価または管理できる可能性があると考えられる。

今後の課題として、載荷速度が大きく、せん断ひずみの大きな場合におけるせん断剛性設計値と試験値の関係について知見を蓄積することによって、小型模型試験による低温時の品質の評価または管理手法の確立につなげたい。

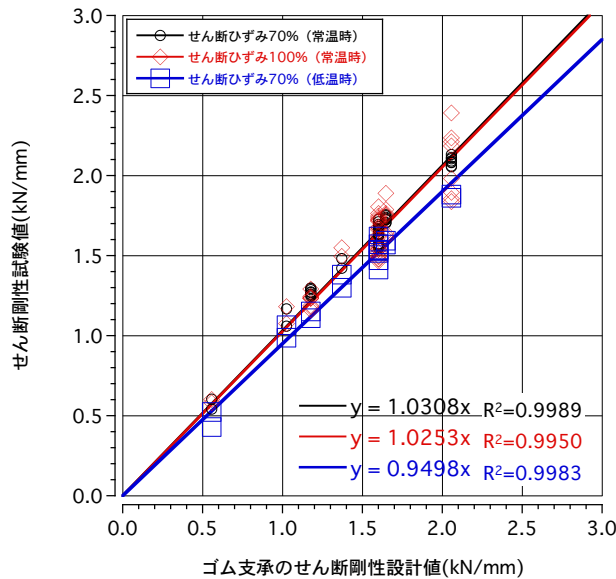


図-3.19 せん断剛性設計値と試験値の回帰

3.3 疲労耐久性に与える低温影響分析

ゴムの疲労により生じる現象は、疲労破壊の他に塑性流動と非破壊特性の変化に大別される。一般的に着目されているのは、微視的破壊現象が連続することによる疲労破壊であるが、微視的破壊現象が対象となるため、外観で評価することは難しい。

ここでは、ゴム支承に作用する交通荷重の繰返しを想定し、鉛直方向の繰返し圧縮疲労を受けたゴム支承

のせん断および圧縮特性を把握するための低温時検証試験を実施し、外観や特性の変化について整理した。

3.3.1 試験概要

(1) 試験体概要

試験対象のゴム支承の種類は、積層ゴム支承(RB)(クロロプレンゴム(CR)、天然ゴム(NR))、高減衰積層ゴム支承(HDR)、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)である。試験体は、JIS K 6411の標準試験体No.2に準拠した。図-3.20に試験体形状を示す。

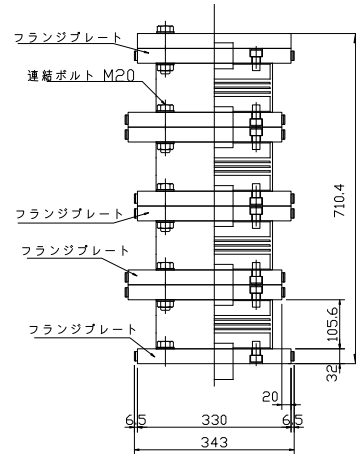


図-3.21 試験体の試験時状態側面図

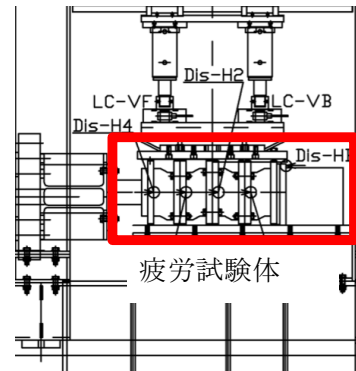


図-3.22 荷重配置図

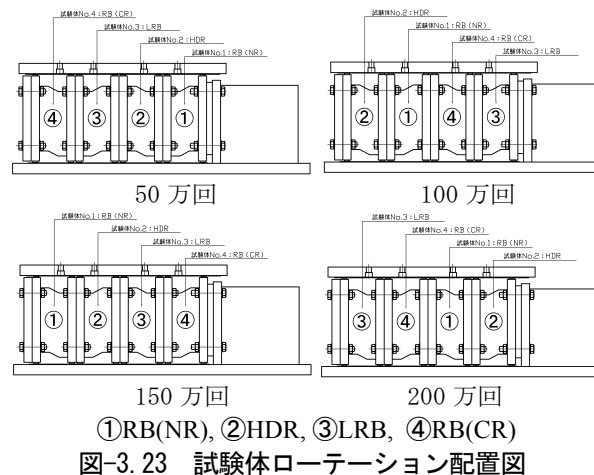


図-3.23 試験体ローテーション配置図

(2) 繰返し圧縮疲労試験

低温雰囲気が疲労耐久性に与える影響を検証するため、常温および低温環境下での繰返し圧縮試験を寒地土木研究所敷地内にある屋外サーボ疲労試験装置を用いて実施した。本試験は、JIS K 6411 の繰返し圧縮疲労試験方法を基本としている。図-3.21 に示すように4種4個の支承を連結し、ゴム支承の本来の鉛直方向が、試験機設置時には水平となるようにゴム支承固定ガイドにゴム支承を配置して雰囲気状態が同一となるよう試験条件に配慮した。試験条件を表-3.5 に示す。また、試験機器と試験体配置の関係を図-3.22 に示す。

表-3.5 繰返し圧縮疲労試験条件

下限荷重 (kN)	316.8(5.5N/mm ²)
上限荷重 (kN)	691.2(12N/mm ²)
载荷振動数(Hz)	2
载荷回数(回)	200 万(常温試験) 400 万(低温試験)
試験時せん断ひずみ(%)	70(19.6mm)

試験体には、エネルギー吸収性の高い支承も含まれており連結したゴム支承の载荷点位置による影響が想定されるため、それを回避するように、図-3.23 に示すように50万回毎にゴム支承の配置替えを行いつつ繰返し载荷した。

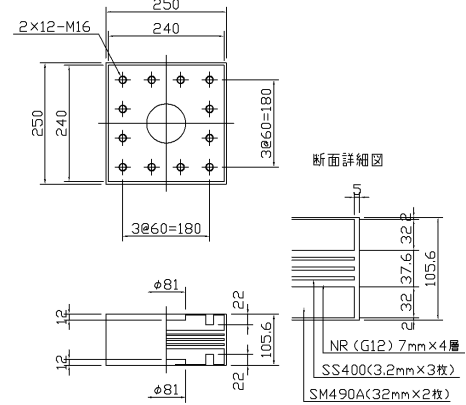
表-3.6 特性試験条件

せん断特性試験	
繰返し回数(回)	5(RB), 11(HDR, LRB)
鉛直荷重 (kN)	345.6(6N/mm ²)
せん断ひずみ振幅(%)	175(±49mm)
载荷速度(mm/sec)	10 (sin 波)
圧縮特性試験	
繰返し回数 (回)	3
鉛直荷重(N/mm ²)	0~8.0
载荷振動数(Hz)	0.001 以上(sin 波)

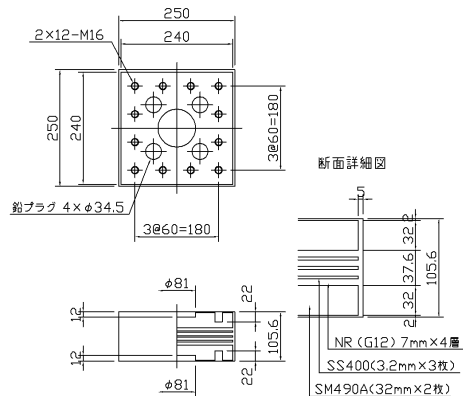
(3) 特性試験

ゴム支承の特性変化を確認するため、繰返し圧縮疲労試験前、繰返し载荷回数200万回と400万回後、6ヶ月以上の気中養生後に、せん断特性試験と圧縮特性試験を実施した。表-3.6 に示した特性試験条件は、JIS K 6411 のせん断特性試験方法および圧縮特性試験方法に基づいている。

3.3.2 試験結果と考察



(a) RB(CR), RB(NR), HDR



(b) LRB

図-3.20 試験体

(1) 等価剛性と等価減衰定数

RB(CR)とRB(NR)については、履歴ループ3回目のせん断試験結果を、HDRおよびLRBについては、履歴ループ5回目の試験結果を等価剛性としている。図-3.24 に各载荷サイクル後の等価剛性の変化を初期等価剛性からの変化率として、また、図-3.25 には減衰定数の変化を初期減衰からの変化率として示す。なお、a)は天然ゴム系を、b)は合成ゴム系を示す。

天然ゴム系では、常温、低温どちらの雰囲気においても、繰返し回数に伴う剛性変化は、±5%以内と小さく、400万回の繰返し疲労試験後においても大きな違いは生じていない。これに対して減衰定数は、ばらつきが大きく、傾向を評価するには至らないが、RBが常温、低温ともに大きく増加しているのに対し、減衰性を有するLRBは、常温では減衰が増加、低温では15%程度も減少する結果が得られている。

合成ゴム系では、天然ゴム系とは異なり、常温、低温どちらの雰囲気においても繰返し回数が増加すると等価剛性が高くなる傾向が示された。その変化率は、

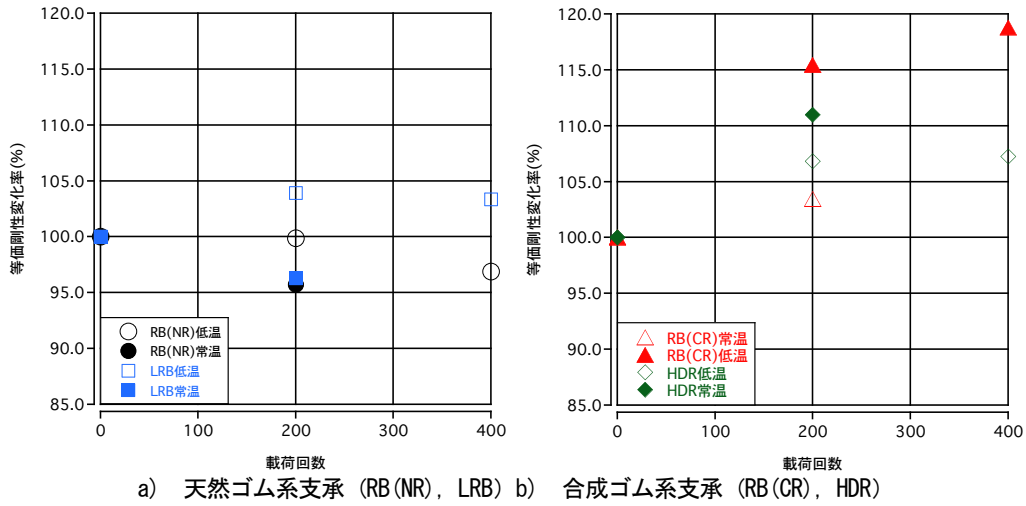


図-3.24 繰返し圧縮荷を受けたゴム支承の等価剛性の変化

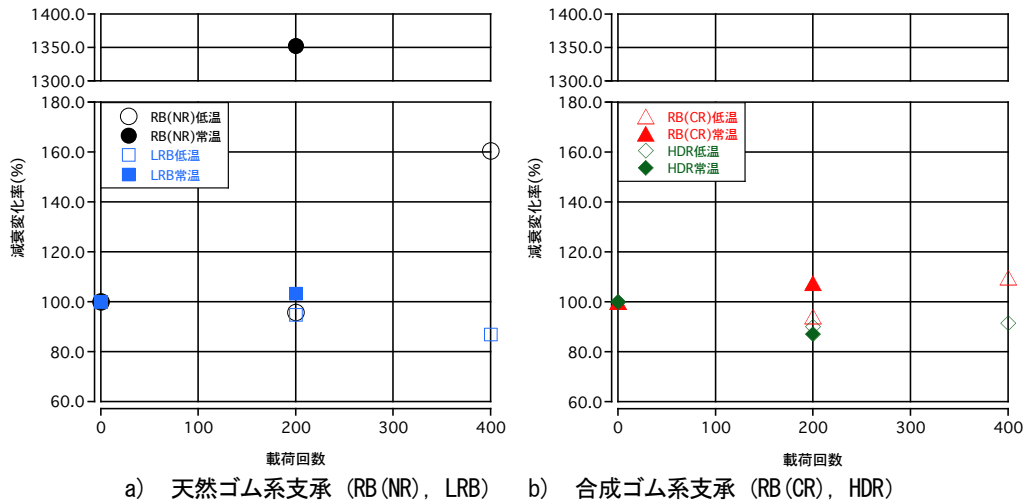


図-3.25 繰返し圧縮荷を受けたゴム支承の等価減衰定数の変化

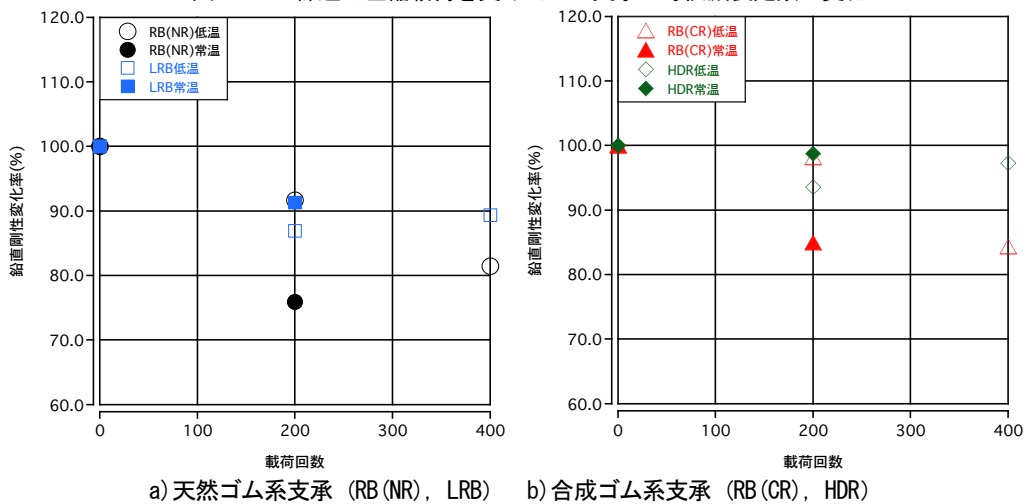


図-3.26 繰返し圧縮荷を受けたゴム支承の圧縮剛性の変化

最大で19%である。減衰性能を有するHDRの減衰定数は、200万回の繰返し圧縮疲労試験後の変化では常温、低温とも10%程度減少しているが、低温では400万回の繰返し疲労試験後であっても大きく変化していない。

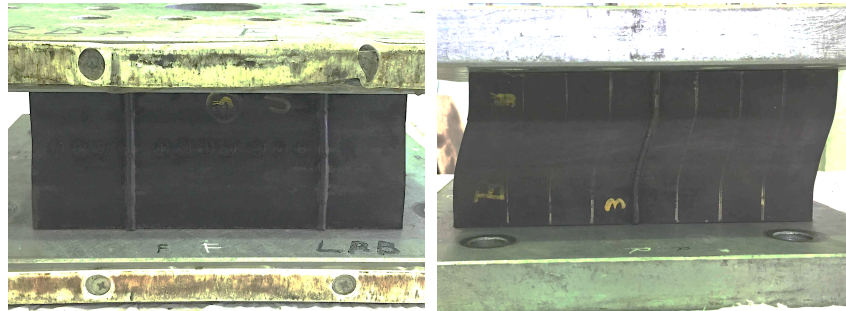
(2) 圧縮剛性

図-3.26に初期圧縮剛性を基準とした、载荷サイクル後の圧縮剛性の変化率を示す。

天然ゴム系支承では、载荷回数が増加すると圧縮剛



a) RB(NR) (左; 橋軸面, 右; 橋軸直角面)



b) LRB (左; 橋軸面, 右; 橋軸直角面)



c) RB(CR) (左; 橋軸面, 右; 橋軸直角面)



d) HDR (左; 橋軸面, 右; 橋軸直角面)

図-3.27 疲労試験 400 万回後のせん断特性試験終了直後の試験体表面

性が減少する傾向にある。RB(NR)では、荷回数増加とともに、常温では200万回で25%の低減、低温では10%から20%の低減であり、常温の方が低減率が大きかった。LRBにおける荷回数200万回の低減率は、常温と低温において10%程度と同程度、さらに低温試験のみ行った400万回は、200万回時の変化率と同程度の結果となり、変化が収束する傾向がみられた。

合成ゴム系支承では、HDRの変化が小さく変化率は5%程度であり、400万回まででは剛性低下の進行が明確ではない。RB(CR)では、常温の200万回の低減率と低温の400万回の低減率が概ね一致していることが確認された。

(3) 外観変化

疲労試験400万回後に行った175%せん断特性試験

直後のゴム支承表面状況を図-3.27 に示す。写真の撮影方向は、図-3.28 に示すように、橋軸面（橋軸方向に向かう面）が、疲労試験時に70%せん断変形を与えた面で、橋軸直角面は、図-3.28 に見られる断面と同じ向きの面である。

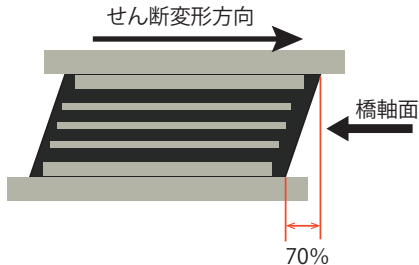


図-3.28 表面写真の撮影方向の説明図

外観変化は、ゴム種ではなく、支承タイプにより異なっている。RB(NR)とRB(CR)は、残留変形が小さく、

表面のシワやひびわれも確認されていない。LRB は、残留変形が大きいものの表面のシワやひびわれは確認できない。HDR は、残留変形が大きく表面にシワが生じた。しかし、どの支承においてもひびわれは確認はできなかった。

(4) 内部の目視評価

繰返し圧縮疲労試験終了後、さらに特性試験と極限試験として、せん断ひずみ300%を加える水平せん断载荷試験を行い、その後、ゴム支承の内部の目視確認を実施した。

図-3.29 から図-3.32 にゴム支承別に繰返し回数200万回および400万回後の試験体切断面を示す。

大型車交通の影響を想定した繰返し回数200万回と400万回の鉛直载荷を行ったゴム支承のLRBを除くすべてで内部損傷は確認されなかった。LRBでは、200万回の繰返し時点で、鉛の変形、ゴムと鋼板の付着切れ、それに伴う鉛の側方への流出が確認され、400万



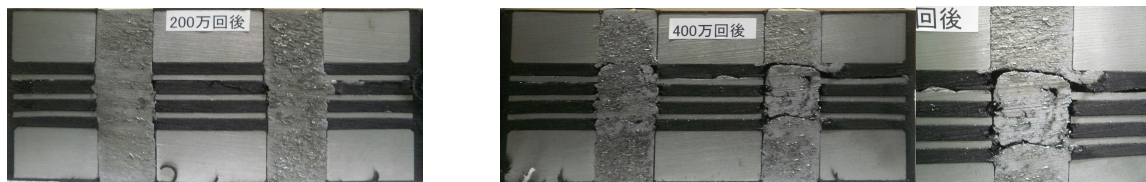
(a) 常温環境の200万回の繰返し载荷を受けた断面 (b) 低温環境の400万回の繰返し载荷を受けた断面
図-3.29 RB(NR) ゴム支承の極限せん断試験後の断面切断写真



(a) 常温環境の200万回の繰返し载荷を受けた断面 (b) 低温環境の400万回の繰返し载荷を受けた断面
図-3.30 RB(CR) ゴム支承の極限せん断試験後の断面切断写真



(a) 常温環境の200万回の繰返し载荷を受けた断面 (b) 低温環境の400万回の繰返し载荷を受けた断面
図-3.31 HDR ゴム支承の極限せん断試験後の断面切断写真



(a) 常温環境の200万回の繰返し载荷を受けた断面 (b) 低温環境の400万回の繰返し载荷を受けた断面
および鉛部拡大

図-3.32 LRB ゴム支承の極限せん断試験後の断面切断写真

回後の状況では、200 万回の損傷と比べ、鉛の損傷、側方への流出、ゴムと鋼板の付着切れが一層進行していることが確認された。

ゴムと鋼板の付着切れに関しては、繰返し圧縮疲労試験か、疲労状態を評価するためのせん断特性試験によるものか、あるいは最後に実施した極限試験の結果によるものかが確定できない。しかし、ゴムと鋼板の接着不良または耐久性不足は、橋梁の耐震安定性や安全性の確保に支障をきたすため、現評価方法に影響を及ぼすものなのか、またさらに試験方法の最適化をすべきかといった検討が必要と考えられる。

4. 冬期の補修

ゴム支承の損傷の多くは被覆ゴム部のひびわれや変色劣化であり、これらは支承本体ゴムの耐久性に影響を及ぼす。

ひびわれによる劣化に対し、ゴム支承の耐久性を保持するための補修工法に着目して、その低温施工性に関する試験を行った。

4. 1 低温環境における補修工法確認試験

低温施工時の品質確認試験として、 -24°C の恒温室にて天然ゴム支承に補修剤を塗布し、その後、水平せん断試験を実施した。用いた補修剤は、常温における伸び性能が 1,000%以上のクロロプレンゴム系の一液型コート剤である。

-24°C の恒温室でゴム支承の内部温度が -20°C になったゴム支承に補修剤を塗布した後、外気温 -10°C を想定した恒温室にて 60 分間の養生を行なうことにより、低温施工時の品質を確認した。その結果、施工性に問題はなく、低温環境下でも補修剤は乾燥したが、養生時間は常温時の 20 分に比べ、低温時は 60 分程度と長く要した。(図-4.1 から図-4.4 の施工状況写真参照)



図-4.1 試験施工前のゴム支承の状態（支承温度 -22°C ）

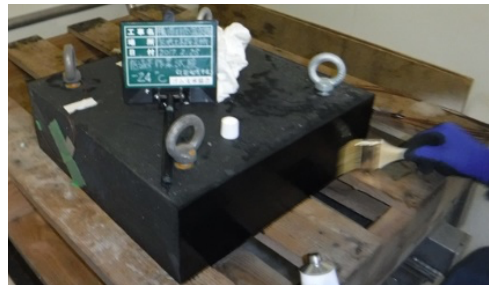


図-4.2 施工状況



図-4.3 施工後 30 分の表面状況

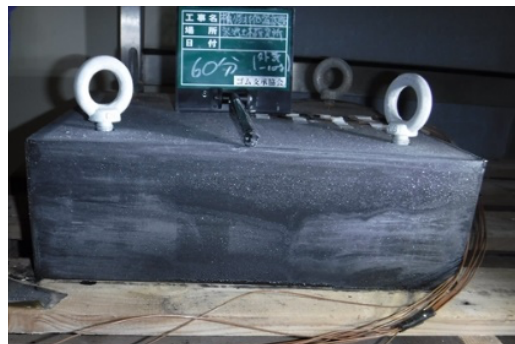


図-4.4 施工後 60 分の表面状況

十分乾燥した補修剤について、接着性能を評価するために水平せん断試験 ($\gamma=70\%$ 、 175%) を実施した。試験は、品質管理に等に用いられる鉛直力 5,390kN、水平力 1,960kN、水平ストローク $\pm 400\text{mm}$ の能力を有する圧縮せん断試験機を用いて実施した。付着評価を目的として、常時挙動を想定したせん断ひずみ $\pm 70\%$ で連続 100 回加振による試験、さらに地震時挙動を想定したひずみ $\pm 175\%$ の 11 回水平繰返し載荷試験を 2 回実施し性能を評価した。

常時挙動を想定した試験時の荷重-変位関係を図-4.5 に示す。大きな変化もなく試験が繰り返されていることが確認できる。

付着状況を確認するため試験前の状況を図-4.6 に、せん断ひずみ $\pm 70\%$ のせん断試験後の状況を図-4.7 と図-4.8 に示す。

いずれの段階においても補修剤の剥がれは確認できなかった。

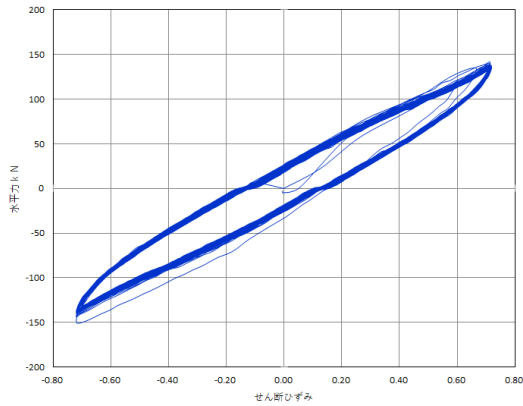


図-4.5 ±70%, 100回連続加振時の荷重-変位関係



図-4.6 せん断試験前の状況写真



図-4.7 ±70%, 100回連続加振終了状況写真



図-4.8 加振後の補修剤の付着状況写真

地震時挙動を想定したせん断ひずみ±175%のせん断試験時の荷重-変位関係を図-4.9に示す。载荷初期の剛性の高い応答後は、概ね同じループをたどり試験が実施されていることが確認できる。図-4.10に载荷後の表面の状態を示す。地震時を想定したせん断試験に対する補修剤の剥がれは確認できなかった。

4.2 考察

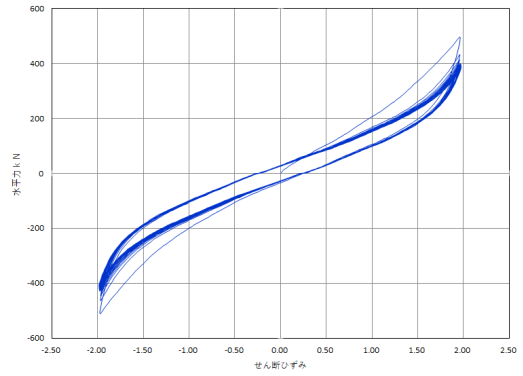


図-4.9 ±175%加振時の荷重-変位関係



図-4.10 ±175%加振後の補修剤付着状況写真

被覆ゴム部のひびわれによる耐久性の低下を抑止する補修工法についての低温施工時の品質確保に着目し、低温状態での施工試験を行った。また、補修後の耐久性を評価するため、長期低温雰囲気下での養生の実施後、常時挙動を想定したせん断ひずみ±70%の100回連続加振試験および地震時挙動を想定したせん断ひずみ±175%を11回繰り返して載荷試験を2回繰り返して加振試験を実施した。ゴム支承の補修は実績が少なく、特に北海道のような寒冷地域では、その地域特性を考慮した性能試験を実施する必要がある。今回の試験は、その手法確立の第一段階であり、この時点では特段の問題は生じていない。今後は、低温施工における補修部の劣化因子の遮断性能など検証事例を積み上げ評価法の確立につなげたい。

5. まとめ

本研究では橋梁用ゴム支承の耐久性確保を目的に、低温環境が耐久性に与える影響の分析とともに耐久性の評価試験に低温が与える影響について検討を行った。また、ゴム支承の劣化損傷の進展を抑止するための補修方法について低温施工後の耐久性確保に係る検討も行った。

その結果、以下の知見を得た。

- 1) 橋梁定期点検結果から低温環境はゴム支承の耐久性を低下させる要因の一つである可能性が確認された。
- 2) ゴム支承の特性や品質を確認する試験のうち、低温条件下でのせん断剛性を評価する場合には、設計せん断剛性値と試験値に線形性があることを確認した。さらに、載荷速度が大きくなると線形の傾きが小さくなることや、低温雰囲気下においては、せん断剛性に面圧依存性があることを確認した。
- 3) せん断剛性の設計値と試験値の線形関係におけるばらつきについては、いくつかの条件で増加することが確認されたが、その要因の特定にはさらなる検討が必要である。
- 4) 疲労耐久性に対する低温雰囲気における繰返し圧縮試験を実施した結果、外観上の劣化や損傷が概ね発生しなかったが、ゴムと鋼板の付着切れが発生したことから接着性能の耐久性に影響を与える課題が確認された。
- 5) 寒冷環境での補修剤の接着性に対する試験を行い、常時挙動を想定した±70%の100回連続加振試験と地

震時挙動を想定した±175%11回加振を2回実施し、耐久性の低下が見られないことを確認した。

参考文献

- 1) 伊藤義人, 矢澤晃夫, 佐藤和也, 顧浩声, 忽那幸浩, 山本吉久: 橋梁支承用ゴムの環境劣化特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp253-266, 2005.
- 2) 杉本博之, 溝江実, 山本吉久, 池永雅: 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究, 土木学会論文集, No. 693/VI-53, pp. 73-86, 2001.
- 3) 編集委員会: 入門講座 やさしいゴムの化学 第7講ゴムの劣化を理解して防止する, 日本ゴム協会誌, Vol. 77(2004), No. 3, pp. 109-115, 2004.
- 4) 北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会: 北海道における鋼道路橋の設計および施工指針[第1編]設計・施工編 平成24年1月, 北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会, 2012.

A STUDY ON EVALUATE METHOD OF RUBBER BEARING FOR QUALITY MANAEGMENT OF DURABILITY

Research Period : FY2016-2019

Research Team : Cold-Region Construction

Engineering Research Group

(Structures)

Author : KASAI Satoshi, SATO Takashi

Abstract: In this study, in order to ensure the durability of rubber bearings for bridges, we analyzed the influence of low temperature environment on durability and examined the influence of low temperature environment on the durability evaluation test under low temperature environment. In addition, we examined the workability of the repair method to prevent the progress of deterioration and damage of rubber bearings. As a result, the influence of low temperature environment on the deterioration progress was confirmed, and the necessity of the test under the low temperature condition was clarified in the performance evaluation test. In addition, we conducted a test on the effect of low temperature on various dependencies of rubber bearings and clarified the effect on performance evaluation. In addition, it was clarified from the results of the low temperature effect test in the fatigue loading test that almost no deterioration or damage occurs after repeated loading of 4 million times. An evaluation test for repair in winter was conducted and a test method for adhesion performance was proposed.

Key words: rubber bearings, durability, performance evaluation, influence of low temperature