

積層ゴム支承のゴムと内部鋼板の接着層における
経年劣化特性の評価

坂本直太¹・向井梨紗²・篠原聖二³

¹正会員 阪神高速技術株式会社 技術部（〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町1-4-1）
²正会員 修（工） 阪神高速技術株式会社 技術部（〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町1-4-1）
³正会員 博（工） 阪神高速道路株式会社 技術部（〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3）

1. はじめに

27年間供用下にあった積層ゴム支承の表面にきれつ等の経年劣化損傷が生じており、その支承を実橋から取り出してせん断特性試験を行ったところ、終局限界性能試験において終局耐力の著しい低下が確認された¹⁾。取り出した支承を用いて終局耐力が低下した要因を調査したところ、ゴムと内部鋼板の接着層に異常が生じて耐力が低下した可能性が高く、表面のきれつが与えた影響は限定的であることが判明した²⁾。

積層ゴム支承のゴムと鋼板は接着接合されており、その接合メカニズムは未だ不明確な部分がある³⁾。その接着層が劣化したと仮定した場合、劣化要因が複雑に作用する自然環境下にある橋梁の支承ではその要因を特定するのが困難である。本稿はゴムと内部鋼板の接着層の経年劣化の要因を評価することを目的として、ゴムと内部鋼板の接着層を模した引張せん断供試体を製作し、せん断ひずみ、熱、湿度、塩水などの様々な劣化要因を与えて、せん断強さや破断面の性状の違いを評価した。

2. 試験内容

(1) 試験項目

ゴムと鋼板の接着の経年劣化に着目した試験を行うために、引張せん断試験と90°はく離試験を行った。

橋梁支承用ゴム材料の劣化要因は熱および光といわれている⁴⁾。オゾン劣化も一般にはいわれているが、過去の試験ではその影響が小さいことが確認さ

れている^{2),4)}。林らによる経年劣化ゴム支承の調査では、鋼板に生じる錆が耐力低下に影響した可能性を指摘している²⁾。また、有機物であるゴムの劣化には水分の影響が大きいとされている⁵⁾。このような劣化要因に加え、橋梁の温度変化で生じるせん断ひずみを考慮して試験項目を表-1のように設定した。

表-1 試験項目

試験項目	試験区分	鋼板材質	養生条件			養生時間	供試体数
			温度	湿度	ひずみ		
引張せん断試験	A	SS400	—	—	0%	0	5
	B		35℃	—	0%		25
					35%		25
					70%		25
	C		70℃	—	0%		25
					35%		25
					70%		25
	D		35℃	90%	0%		25
					35%		25
					70%		25
	E		35℃ ↓ 0℃	90%	0%		25
					35%		25
		70%			25		
	F	35℃	塩水	0%	20		
				35%	20		
				70%	20		
	G	35℃	—	0%	20		
35%				20			
70%				20			
H	SUS304	35℃	塩水	0%	20		
				35%	20		
				70%	20		
90℃はく離試験	I	SS400	—	—	—	0	5
	J		35℃	塩水	—	a)と同じ	20

(2) 供試体形状と材料

引張せん断試験に用いた供試体を図-1に、90° はく離試験に用いた供試体を図-2に示す。引張せん断試験の供試体は、せん断ひずみ付与と養生槽の大きさを考慮して設定した。90° はく離試験はJIS K 6256にしたがった大きさとした。

ゴム材質は天然ゴムNR (G10) であり、ゴムと鋼板の接合は、積層ゴム支承の製造過程と同様にブラスト処理後、接着剤を用いてゴムと鋼板を加硫接着している。鋼板は錆の影響を評価するために、G試験およびH試験の鋼板はSUS304、それ以外はSS400をブラスト処理後、表面処理を行わずに用いた。

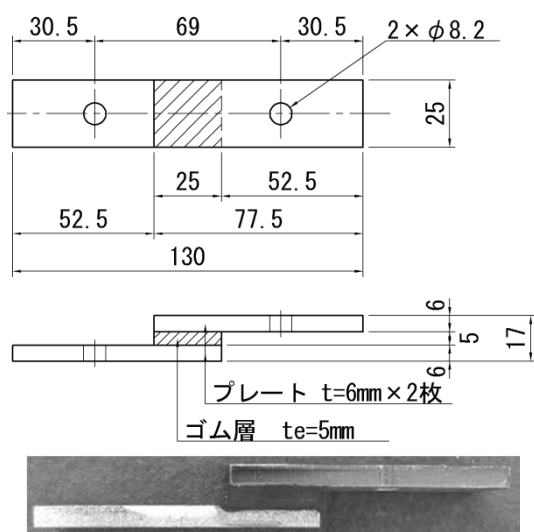


図-1 引張せん断試験供試体

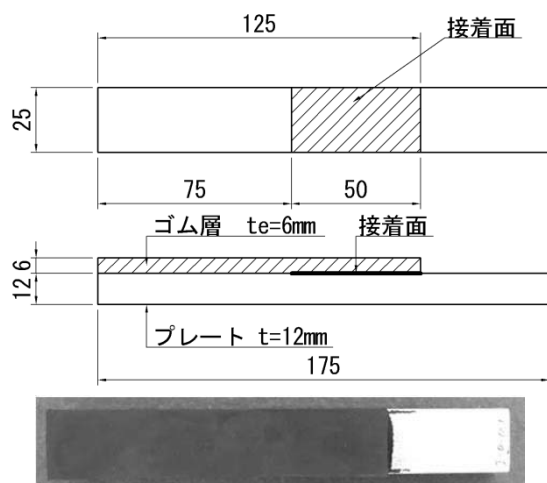


図-2 90° はく離試験供試体



写真-1 老化試験機と養生状況

(3) 養生条件

a) 温度

写真-1に示すギヤー式老化試験機を用いて、常温を35℃、劣化促進温を70℃として養生し、熱影響を確認した。劣化促進温度の70℃は伊藤らのゴム支承の耐久性に関する研究⁴⁾を参考に設定した。

b) 湿度

水分による影響を確認するために、写真-2に示す加熱・加湿処理機を用い、高湿の状況を湿度90%として養生した。

加えて冬期に地震により大きなせん断変形が生じた場合の影響を確認するために、湿度90%にて養生したものを0℃で冷却した状態で引張せん断試験を行った。

c) 塩水噴霧

JIS Z 2371:2000「塩水噴霧試験方法」中性塩水噴霧試験にしたがい写真-3に示す複合サイクル試験機を用い35℃で養生した。養生後の処理はイオン交換水で洗浄したのち試験を行った。

d) 養生時間

養生時間は伊藤らのゴム支承の耐久性に関する研究⁴⁾を参考に96時間、192時間、384時間、768時間、1536時間を養生時間として設定した。塩水噴霧については、既往の研究結果⁶⁾から500時間程度で接着力の低下が確認されていることから、最大を768時間とした。



写真-2 加熱・加湿処理機と養生状況

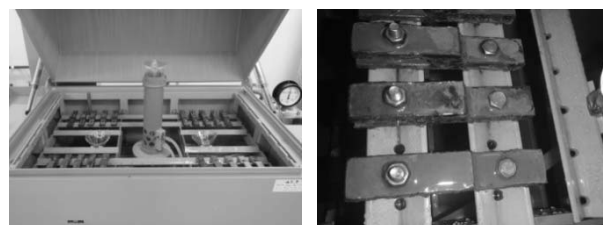


写真-3 複合サイクル試験機と養生状況

e) 予ひずみ

引張せん断試験のせん断ひずみ（以降、ひずみ）は、写真-4に示すように固定治具を用いて所定のひずみを与えて固定した。ひずみはゴム支承の常時における最大ひずみ70%を与え、その半分のひずみとして35%を与えた。各ひずみは供試体ゴム部の厚さ5mmに対して35%の場合は1.8mm、70%の場合は3.5mmである。

f) ばらつき

供試体はばらつき（不確かさ）を評価するために、一つの試験に対し5体作成して試験を行った。供試体の総数は引張せん断試験が485体、90°はく離試験が25体となる。

(4) 供試体番号

以下に示す試験結果における供試体番号は以下のように割り当てている。

供試体番号：①-②-③-④

- ①：試験区分 A～J
- ②：ひずみ 0, 35, 70 (%)
- ③：養生時間 0, 96, 192, 768, 1536 (h)
- ④：試験数 1～5

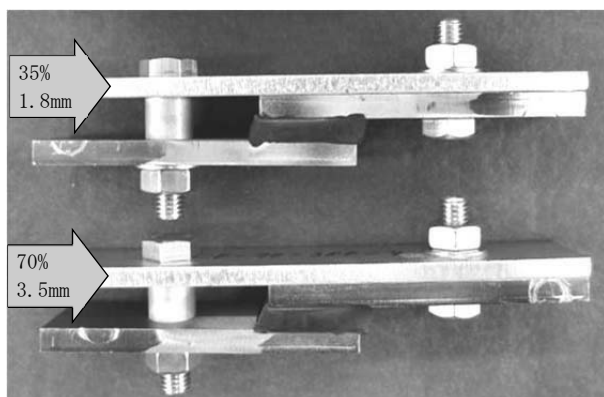


写真-4 引張せん断試験のひずみ付与

表-2 破壊様式

CF 凝集破壊	
SCF 特殊凝集破壊	
AF 接着破壊	

(5) 破壊様式

引張せん断試験の供試体破壊様式は、JIS K 6866:1999にしたがい表-2のように表す。破断面がゴムの中にあるものを凝集破壊、破断面がゴムの中の接着面付近にあるものを特殊凝集破壊としている。いずれも破断面にゴムが確認できる状態である。一方、接着破壊は破断面が接着剤の界面にある場合であり、目視で鋼板面が確認できる状態である。

写真-5に本試験における破壊様式例として、F-70-768-3試験の供試体写真を示す。破壊様式は面積比率を目視にて算出している。なお、その面積比率は目視による比率であり、正確な面積を計測しているものではない。

3. 試験結果および考察

(1) 引張せん断試験

引張せん断試験は写真-6に示す精密万能試験機を用いて行った。各養生後ひずみを解除し、試験室温湿度(23±2℃, 50±5%RH)にて状態調節後に試験を行った。なお、以下に示す試験結果は試験数5個の平均値で表している。また、基準となるA試験とB-0試験もグラフに表している。

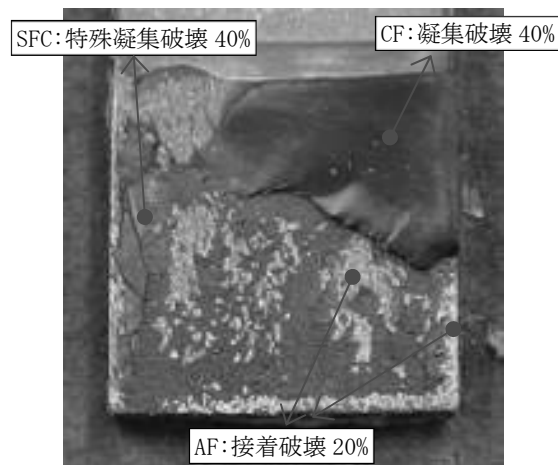


写真-5 F-70-768-3試験の破壊様式例



写真-6 精密万能試験機（引張せん断試験）

a) B試験 (35℃)

常温にて養生した供試体の引張せん断試験結果を図-3に示す。試験結果のばらつきは少なく、安定した結果が得られた。せん断強さは養生時間の増加とともに低下していく傾向にあるが、その幅は小さいといえる。

B試験の破壊様式の割合を図-4に示す。ほぼ全て凝集破壊および特殊凝集破壊である。養生時間が増加してもその割合はほとんど変化しない。

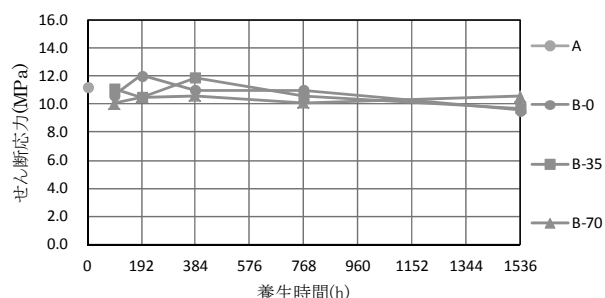


図-3 試験区分B引張せん断試験結果

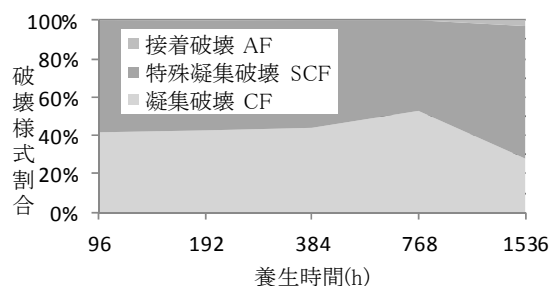


図-4 試験区分B破壊様式割合

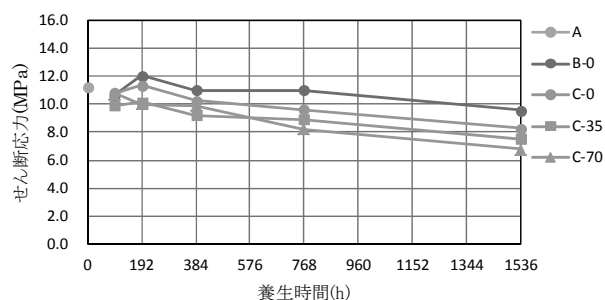


図-5 試験区分C引張せん断試験結果

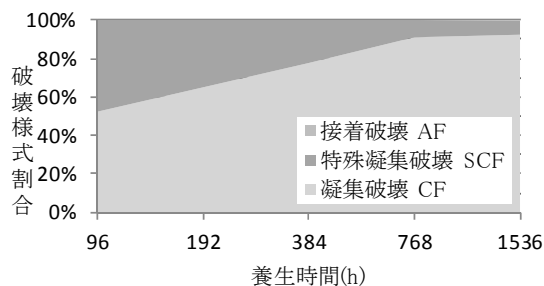


図-6 試験区分C破壊様式割合

b) C試験 (70℃)

70℃にて養生した供試体の引張せん断試験結果を図-5に示す。試験結果のばらつきは多少発生したが比較的安定した結果が得られた。せん断強さは192時間以降に明確な低下傾向が現れた。熱によりせん断強さは低下するといえる。また、わずかであるが予ひずみの影響が確認された。

C試験の破壊様式の割合を図-6に示す。全て凝集破壊および特殊凝集破壊である。C試験の破壊様式は他試験と異なり養生時間の増加とともに凝集破壊の割合が増加した。これは、接着破壊が全く発生していないことから推察すると、熱劣化によりせん断強さが低下したものと考えられ、接着力が低下したとは考えにくい。

c) D試験 (35℃ 湿度90%)

常温、湿度90%にて養生した供試体の引張せん断試験結果を図-7に示す。試験結果のばらつきは少なく、安定した結果が得られた。せん断強さは養生時間の増加とともに低下していく傾向にあるが、その幅は小さいといえる。

D試験の破壊様式の割合を図-8に示す。ほぼ全て凝集破壊および特殊凝集破壊でありB試験と同様の結果であった。したがって、湿度が劣化特性に与える影響は小さいと考えられる。

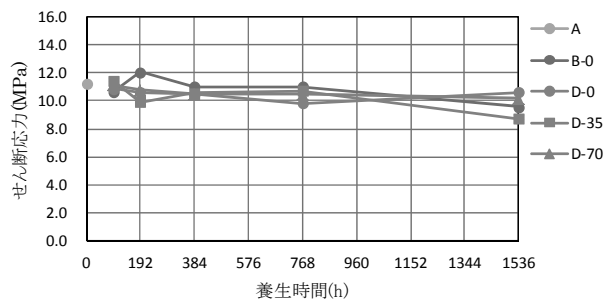


図-7 試験区分D引張せん断試験結果

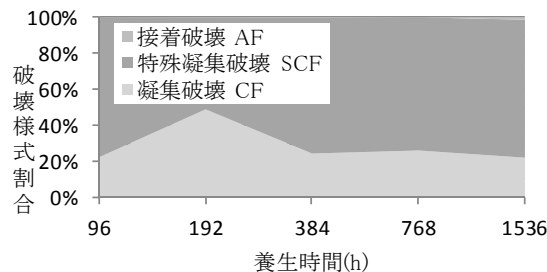


図-8 試験区分D破壊様式割合

d) E試験 (35℃ 湿度90% → 0℃)

D試験と同様に常温、湿度90%にて養生した供試体を0℃で冷却して引張せん断試験を行った。試験結果を図-9に示す。試験結果のばらつきは少なく、安定した結果が得られた。せん断強さは養生時間の増加とともに低下していく傾向にあるが、その幅は小さいといえる。また、わずかであるが予ひずみの影響が確認された。

E試験の破壊様式の割合を図-10に示す。全て凝集破壊および特殊凝集破壊でありD試験と同様の結果であった。冷却していないD試験と同様の結果であり、冷却してもせん断強さや破壊様式は変化しないと考えられる。

熱膨張率が異なる部材が接着されている場合、温度変化により接着面付近に応力が集中して接着破壊を起こす可能性がある。C試験およびE試験において、わずかに予ひずみの影響が確認されたことから、ひずみに加え熱や温度変化が複合して作用する場合にはせん断強さが低下する可能性があると考えられる。しかし、破壊様式と合わせて推察すると、接着力が低下してせん断強さが低下したとは考えにくく、ゴム自身の劣化によりせん断強さが低下したものと考えられる。

e) F試験 (35℃ 塩水噴霧)

JIS Z 2371にしたがって塩水噴霧にて養生した供試体の引張せん断試験結果を図-11に示す。試験結果のばらつきは少なく、安定した結果が得られた。

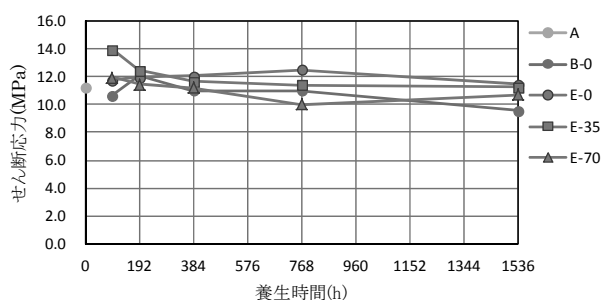


図-9 試験区分E引張せん断試験結果

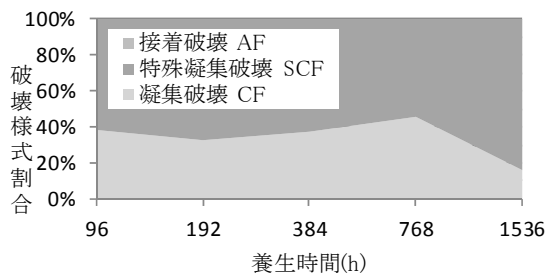


図-10 試験区分E破壊様式割合

せん断強さは養生時間の増加とともに低下していく傾向が現れた。塩水によりせん断強さは低下すると考えられるが、384時間から768時間にかけてほとんど低下していないことから、さらに長時間養生して評価する必要がある。

F試験の破壊様式の割合を図-12に示す。基本的には凝集破壊および特殊凝集破壊であるが、養生時間の増加とともに接着破壊が増加している。これはB～E試験と明らかに異なっており、塩水の影響により破壊特性が変化し、破壊面の性状変化ならびにせん断強さの低下に現れたものと考えられる。なお、接着破壊面に錆は観察できなかった。

f) G試験 (SUS 35℃)

錆の発生が接着力にどのような影響を及ぼすのか評価することを目的に、ステンレスにゴムを接着させた供試体を用いて試験した。後述するH試験の試験値を評価するためにG試験を行った。その引張せん断試験結果を図-13に示す。

せん断強さは全体的に低下傾向が確認できるものの、最大値は13.4MPa、最小値は3.9MPaと試験値に大きなばらつきが発生し、信頼性が低い結果となった。接着剤の説明書によると、ステンレスとの接着も良好であると示されている。しかし、ステンレスは接着に有害な酸化皮膜を作りやすいため、接着面のブラストに加え、アルカリ処理等を行う必要が指摘されており⁷⁾、今回の試験においても何らかの不具合が生じた可能性が考えられる。

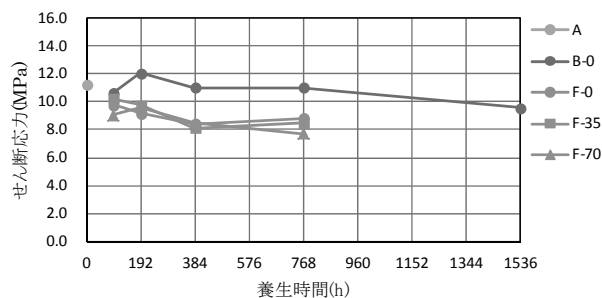


図-11 試験区分F引張せん断試験結果

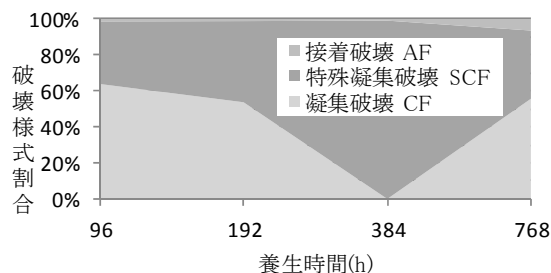


図-12 試験区分F破壊様式割合

G試験の破壊様式の割合を図-14に示す。ほぼ全て凝集破壊および特殊凝集破壊であるが、わずかに接着破壊が生じていた。しかし、後述するH試験とは明らかに異なる接着破壊であった。

g) H試験 (SUS 35℃ 塩水噴霧)

G試験と同様のステンレスの供試体を用い、F試験と同様に塩水噴霧にて養生した供試体の引張せん断試験結果を図-15に示す。G試験と同様に試験結果に大きなばらつきが確認された（最大値12.7MPa, 最小値3.0MPa）。

せん断強さは養生時間の増加とともに低下していく傾向が現れた。塩水によりせん断強さは低下すると考えられ、G試験と同様に試験値がばらついて

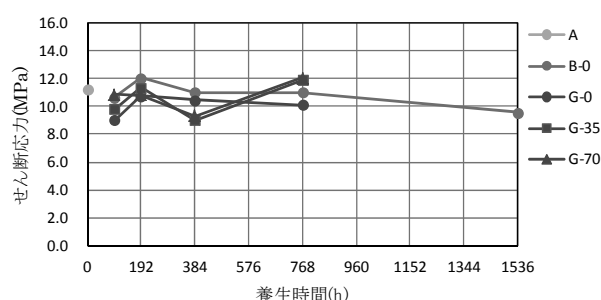


図-13 試験区分G引張せん断試験結果

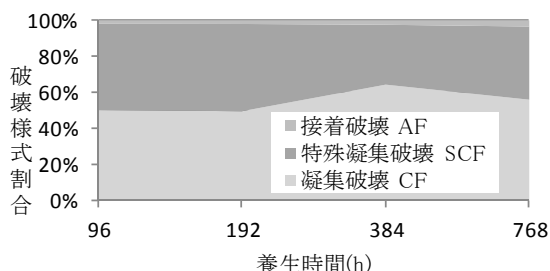


図-14 試験区分G破壊様式割合

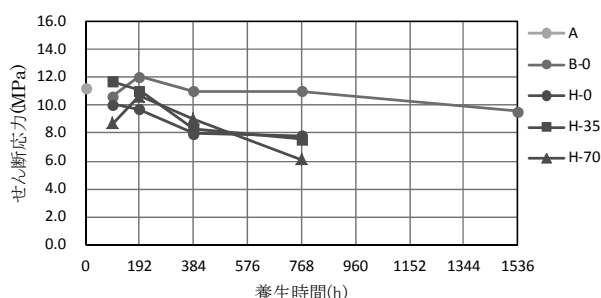


図-15 試験区分H引張せん断試験結果

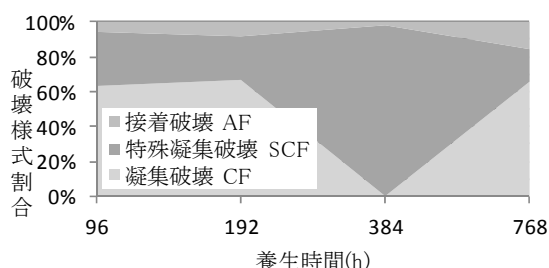


図-16 試験区分H破壊様式割合

いることから、その値自体の信頼性は低い。

H試験の破壊様式の割合を図-16に示す。基本的には凝集破壊および特殊凝集破壊であるが、他の試験に比べ明らかに接着破壊が増加している。また、それは養生時間の増加とともに増加傾向にある。G試験と破壊様式が明らかに異なることから、塩水の影響により破壊特性が変化し、破壊面の性状変化に現れたものと考えられる。

(2) 破壊様式

B試験、F試験、G試験およびH試験の試験後の供試体を写真-7に示す。塩水噴霧にて養生したF試験およびH試験は、接着破壊が養生時間の増加とともに増加した。とくに外周部に接着破壊が多い。一方、B～E試験では接着破壊がほとんど発生しておらず、とくに外周部に接着破壊は全く発生していない。塩水噴霧で養生したせん断強さには大きな低下は確認できないが、破壊様式では塩水噴霧を行った供試体で明確な違いが現れた。これらは塩水の影響により破壊特性が変化し、破壊面の性状が変化したものと考えられる。また、接着破壊は接着外周部に多く現れていることから、外側から侵食するような作用が働いていると考えられる。

H試験はステンレス鋼板であるため、塩水噴霧を行っても鉄と異なり錆はほとんど発生していない。したがって、錆が接着面に直接はく離のような作用を与えたとは考えにくく、外側から何らかの作用により侵食するような作用が働いたものと考えられる。

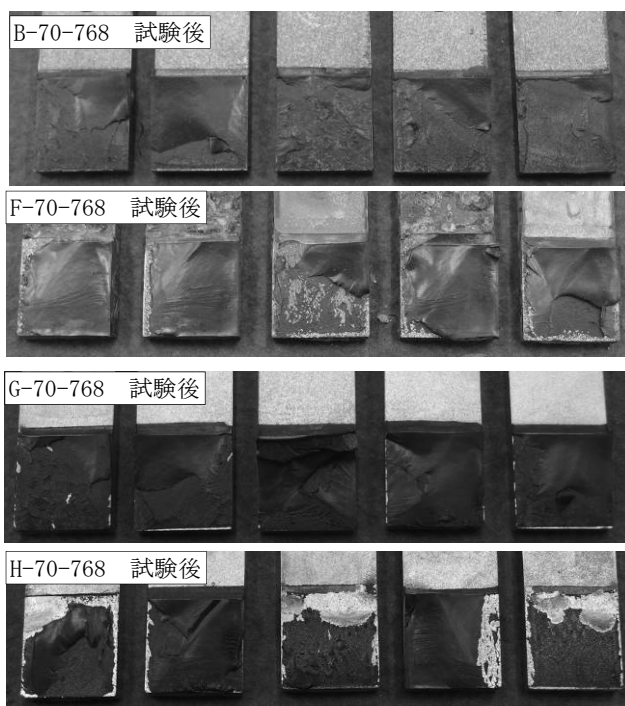


写真-7 B・F・H試験の試験後供試体

(3) 予ひずみの影響

各試験の予ひずみに着目した結果を図-17に示す。ひずみの大きさとせん断強さに関係をほとんど確認できない。しかし、B、CおよびE試験で若干の低下傾向が確認できる。ひずみを与えた場合、接着端部に局部応力が発生すると考えられ、その部分が劣化した場合、せん断強さは低下する可能性がある。今回の試験ではその状況は明確には確認できなかったものの、CおよびE試験の結果から、温度とひずみが複合して作用する場合にはせん断強さが低下する可能性があると考えられる。

今回の試験条件では、ゴム厚が小さいため局部応力が発生しにくいことや、正負繰り返してひずみを付与しておらず疲労の影響が再現できていないことが、ひずみとせん断強さの関係に明確に表れなかった原因であると考えられる。しかし、ひずみの影響は熱や塩水の影響に比べて小さいことから、ひずみが劣化特性に与える影響は比較的小さいと考えられる。

(4) 90° はく離試験

塩水の影響を評価するために、90° はく離試験を写真-8 に示す精密万能試験機を用い、基本となる養生時間 0 の I 試験と塩水噴霧で養生した J 試験を行った。試験結果を図-18 に示す。はく離強さは養生時間の増加とともに低下する傾向であるが、その値は小さい。

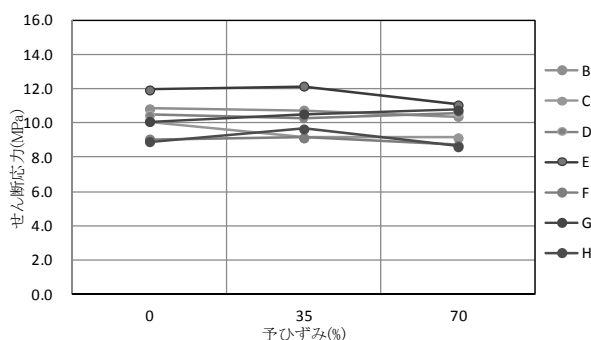


図-17 ひずみ毎の引張せん断試験結果



写真-8 精密万能試験機 (90°Cはく離試験)

破壊後の供試体を写真-9 に示す。J 試験は塩水の影響で鋼材に錆が発生している。破壊様式は、接着破壊が I 試験では全く発生していないのに対し、J 試験では接着外周部に集中して発生している。また、その面積は養生時間の増加とともに増加している。塩水の影響が外周から侵食するように現れており、これは引張せん断試験と同様である。この外周部の接着破壊の影響がはく離強さに現れていないことから、養生時間をさらに長くして評価する必要がある。

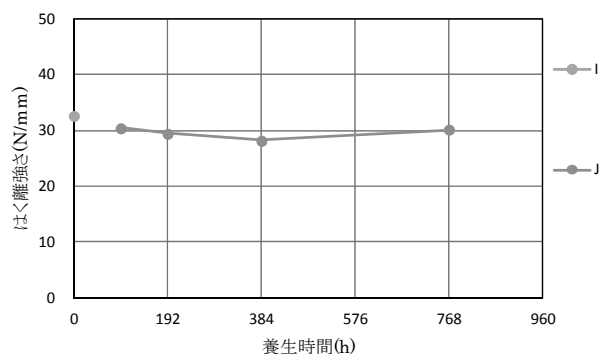


図-18 90° はく離試験結果

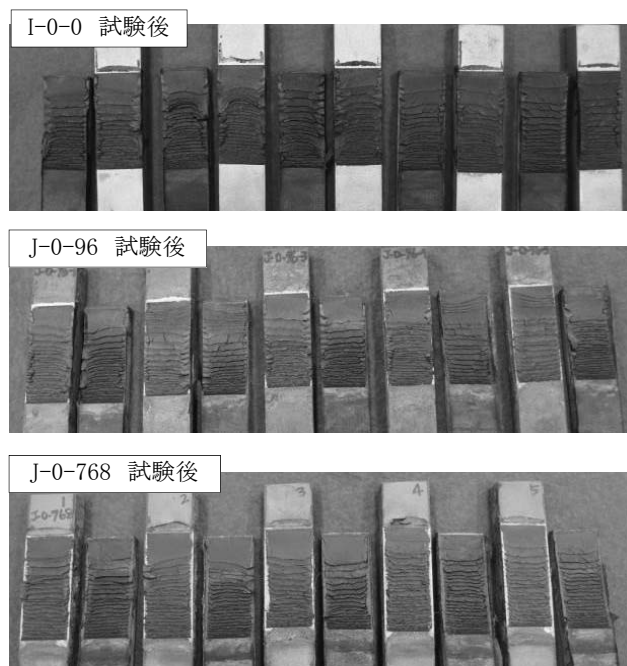


写真-9 90° はく離試験結果の破壊様式

4. おわりに

本稿ではゴムと内部鋼板の接着層の経年劣化に着目し、供試体に劣化要因を与えてせん断強さやはく離強さ、および破壊面の性状の違いを評価した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・常温では1536時間で明確なせん断強さの低下は確認できなかったが、70℃での劣化促進試験では明確なせん断強さの低下が確認された。せん断強さは低下するものの、破壊様式から推察するとそれはゴムの熱劣化に起因するものと考えられる。
- ・湿度が劣化特性に与える影響は小さいと考えられる。
- ・予ひずみに加え熱や温度変化が複合して作用する場合、せん断強さが低下するという劣化特性が現れるが、その影響は今回の試験条件では小さいと考えられる。
- ・塩水噴霧養生においてせん断強さの低下が確認され、接着破壊が養生時間の増加とともに増加するという破壊特性の変化が示された。
- ・塩水噴霧養生における接着破壊は、接着外周面から侵食するように現れたが、それによるはく離強度の低下は小さいことから、さらに長期養生を行い、せん断強さおよびはく離強さとともに再評価する必要がある。

参考文献

- 1) 林,足立,五十嵐,党,濱野,東出:積層ゴム支承の経年劣化損傷が残存性能に与える影響,第17回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,2014.7.
- 2) 林,足立,上田,肥田,坂本,五十嵐:経年劣化ゴム支承の耐震性能低下に関する確認試験,第18回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.
- 3) 大武義人:高分子材料の劣化と寿命予測,サイエンス&テクノロジー,2009.11.
- 4) 伊藤,佐藤,顧浩,山本: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 -72,253-266,2005.7.
- 5) 大武義人:ゴム・プラスチック材料のトラブルと対策,日刊工業新聞社,2005.3.
- 6) 横井,奥本,竹内,今井:天然ゴム-鋼板接着物の腐食劣化特性,日本ゴム協会誌,1993.7.
- 7) 芝崎一郎:ゴムと金属の接着,日本ゴム協会誌 39,870,1966.