

積層ゴム支承における内部鋼板とゴムの接着層の 劣化特性評価

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 工学(修士) 阪神高速道路株式会社 総務人事部(〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)
³正会員 工学(博士) 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において、支承表面にオゾン劣化とみられるきれつ等の経年劣化損傷が生じていた。その支承を実橋から取り出してせん断载荷試験を行ったところ、終局せん断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せん断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何らかの異常が生じてせん断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った²⁾。供試体試験では、塩水噴霧養生した供試体においてせん断耐力の低下が顕著に現れ、接着破壊が増加するという破壊特性の変化が確認された³⁾。

積層ゴム支承は兵庫県南部地震以降、耐震性向上を目的に多く採用されてきた。20年以上経過したゴム支承も多くなってきており、ゴム支承の劣化特性を把握して適正に維持管理を行っていく必要がある。本研究では、積層ゴム支承のせん断耐力の低下要因をゴムと鋼板の接着に着目して評価するために、実橋から取り出した支承と新規製作した支承を解体調査した。さらに供試体試験を行い接着層が劣化する要因を特定し、せん断耐力の低下メカニズムを推定した。

2. ゴムと鋼板の接着について

橋梁の積層ゴム支承はゴムと鋼板の複合材料であり、鋼板とゴムは強固に接着されている。製造方法は各メーカーにより異なっており、詳細な製造方法や材料等は不明であるが、一般的にはゴムと鋼板の接着は加硫接着が用いられている。加硫接着とは、

鋼板に接着剤を塗布して未加硫ゴムを積層させ、加熱、加圧させることにより接着剤とゴムに架橋反応を生じさせて強固な接着力を得る方法である。その接着力はゴムの強度よりも強いいため、積層ゴムの強度試験を行った場合接着破壊が生じる前にゴムが破壊するのが一般的である。

図-1は加硫接着の接着層の一般的な模式図であり、本研究の対象であった積層ゴム支承も図-1のような層構成である。本研究ではゴムと鋼板の接着体のうち、接着剤とゴムが架橋反応している部分を架橋層、その架橋層を含めた接着部分を接着層と定義する。実橋から取り出したゴム支承の実際の接着層の厚さは20～40 μm 程度であった。

3. 支承解体調査による劣化要因の検討

実橋から取り出した図-2に示す積層ゴム支承（以下、劣化支承）と、劣化支承と同じ形状寸法、同じレシピで再現製造された支承（以下、リファレンス）をウォータージェットにて切断解体し、損傷状況の詳細観察、破断面等の詳細調査および成分分析等を行った。調査対象の支承は、既往研究¹⁾におけるせん断载荷試験により破壊した劣化支承およびリファレンスと、実橋から取り出したまま未試験のもの3体を用いた。

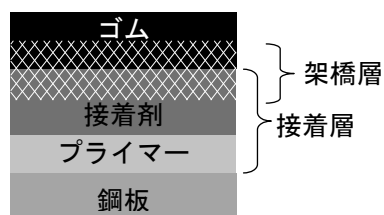


図-1 ゴムと鋼板の接着層の模式図

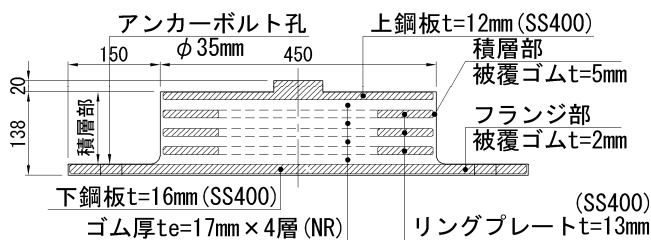


図-2 積層ゴム支承構造図

(1) 外観観察および錆びの分析

劣化支承が実橋に設置されていた状況を写真-1に示す。支承は下フランジ付きの支承であり、フランジ部に土砂が堆積し、取付アンカーボルトが腐食している。

劣化支承のフランジ部分を詳細に観察したところ、写真-2に示すようにアンカーボルト付近が著しく腐食しており、 $t=2\text{mm}$ の被覆ゴムが容易に剥がれる状態であった。また、フランジの中央には建設時に支承設置用に設けられた穴があり、補修した形跡が認められたものの、その部分も著しく腐食していることが確認された。積層部の $t=5\text{mm}$ の被覆ゴムを剥がして内部鋼板の側面を観察したところ、写真-3に示すように一部で錆が確認された。これはオゾン劣化等により被覆ゴムが劣化し、内部鋼板が部分的に腐食したことを示している。

積層部を液化窒素により強制冷却してゴムと鋼板を強制はく離させ、積層部に侵食する錆の状況を確認した。写真-4に示すとおり、下フランジに発生した錆は、積層内部に約2cm程度侵食していた。橋梁の死荷重が作用して圧縮状態にある支承においても錆は積層部まで侵食していた。この錆の侵食は、支承がせん断変形した場合、錆部が先行はく離して応力集中を招き、破壊の起点となった可能性がある。

フランジ部に発生した錆の断面をSEM-EDX（走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析装置）により元素分析したところ、写真-5に示すように錆の内部に広く塩素が分布していた。冬期に凍結防止剤が多量に散布される路線に位置していたこの支承は、凍結防止剤に含まれる塩化物の影響で錆が促進された可能性がある。

(2) ゴムおよび接着剤の成分分析

せん断耐力が異なる劣化支承とリファレンスにおいて、ゴム材料及び接着剤に差異がないか確認することを目的に、ガスクロマトグラフ等の分析装置を用いて成分分析を行った。



写真-1 劣化支承の取付状況

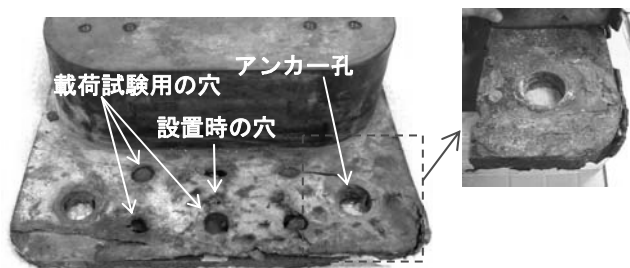


写真-2 劣化支承のフランジ腐食状況

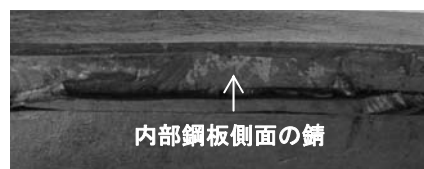


写真-3 劣化支承の内部鋼板側面の錆

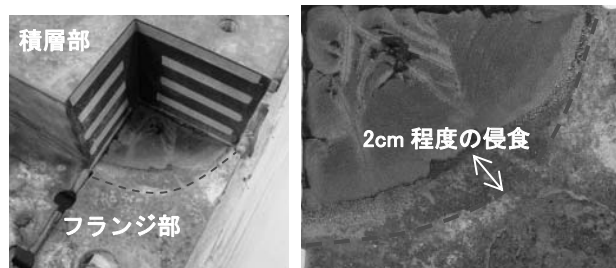


写真-4 劣化支承積層部の錆の侵食状況

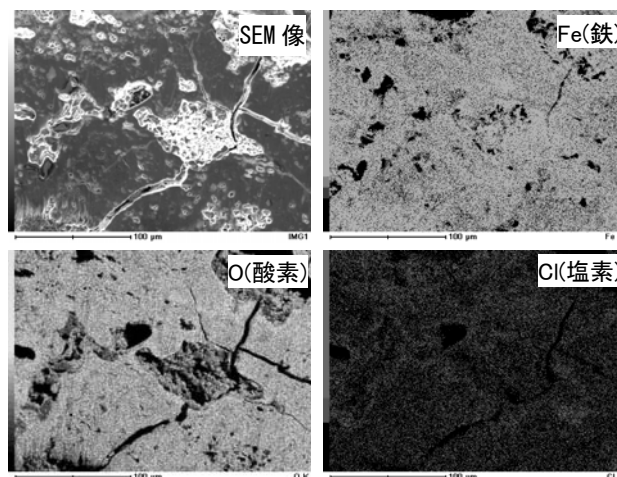


写真-5 フランジ部錆の断面元素マッピング

ゴムの配合は一部異なる配合が確認されたものの、基本的な成分は劣化支承とリファレンスで同様であることが確認できた。接着剤の成分においてもゴム同様に劣化支承とリファレンスにおいて同成分が検出され、同様のものを使用していることが確認できた。なお、接着剤の成分を構成する特徴的なものは、プライマーはチタン、接着剤は塩素である。

ゴムの老化防止剤を定量するために、写真-6に示す部分から試料を採取してガスクロマトグラフ等により分析した。分析結果の抜粋を表-1に示す。錆が生じていたフランジ部のゴムは、老化防止剤の量が著しく低下しており、長期間の供用により消費および漏出してゴムが劣化していた。このことがフランジ部の鋼材腐食を著しく進行させた要因の一つと考えられる。

ゴムの疲労状況を確認するために写真-6に示す位置から試料を採取し、示差走査熱量計によるガラス転移温度測定を行った。その結果を表-2に示す。ゴムが疲労劣化するとガラス転移温度が低下するはずであるが、劣化支承とリファレンスによる差はほとんど発生しておらずゴムは疲労により劣化していないことが確認された。このことから、ゴムが疲労してせん断耐力が低下した可能性は低いと考えられる。

(3) はく離面の分析

劣化支承とリファレンスにおいて、せん断载荷試験で破壊した鋼板とゴムのはく離面付近を分析した。

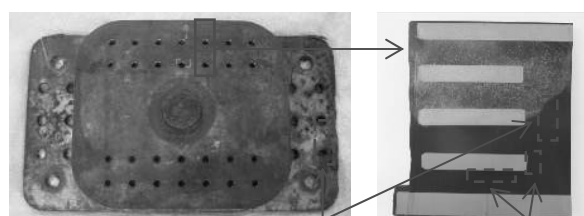


写真-6 成分分析試料採取位置

表-1 ゴムの成分分析結果（老化防止剤）(wt%)

項目	劣化支承		リファレンス	
	フランジ部	積層内部	フランジ部	積層内部
ADPAL量	0.005未満	0.26	0.22	0.37
IPPD量	0.005未満	0.26	0.11	0.29
6PPD量	0.005未満	0.005未満	0.11	0.13
パラフィンワックス量	0.02	0.72	0.58	0.73

表-2 ガラス転移温度測定結果

試料	測定箇所	ガラス転移温度T _g (°C)
劣化支承	内部鋼板直下	-55.5
	内部鋼板側面	-55.5
リファレンス	内部鋼板直下	-54.6
	内部鋼板側面	-54.6

接着層に有機物由来の不純物の存在を確認するために劣化支承、リファレンスそれぞれを液体窒素にて冷却し、ゴムと鋼板を強制はく離させた面をFT-IR（フーリエ変換赤外分光光度計）で分析した。有機物由来の不純物が接着層に存在した場合、接着力を落とす可能性があったが、図-3に示すとおりいずれの試料からでも有機物由来の成分は検出されなかった。このことから、製造時や供用時に接着層に不純物は混入していないと考えられる。

SEM-EDX（走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析装置）により接着剤厚さ、プライマー厚さおよびケレン状況を劣化支承とリファレンスで比較した。測定画像を写真-7に示す。両者に大きな差はなく、同様の製作が行われたことが伺えた。

これらのことから、製作時の不具合や品質の違いによりせん断耐力に差が生じた可能性は小さいと考えられる。

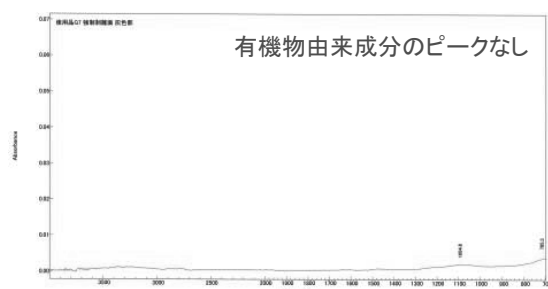
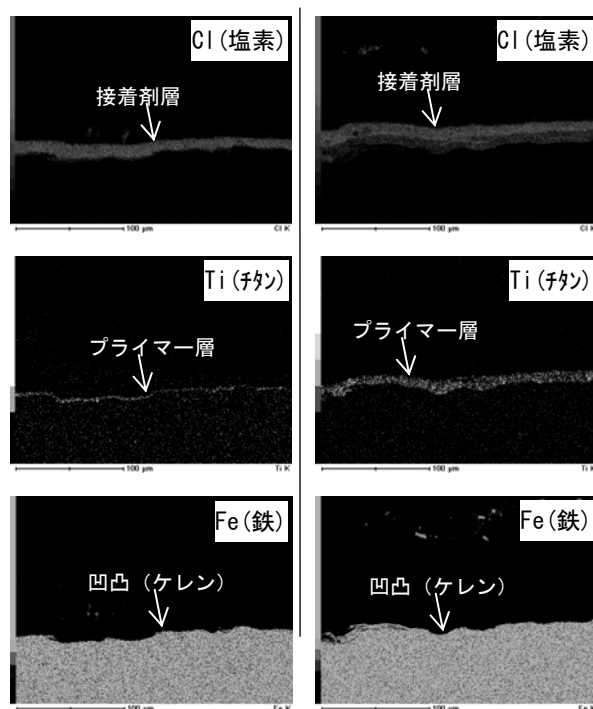


図-3 劣化支承の接着層のFT-IR結果



劣化支承 リファレンス
写真-7 接着剤層断面SEM-EDX結果

ここで、せん断载荷試験にて破壊させた劣化支承とリファレンスのうち、積層部の接着層付近で破壊した破壊面を目視にて再確認した。写真-8に鋭利なニードルで鋼板側破壊面を指した状況を示す。両者ともに鋼板付近で破断しているものの、リファレンスは極薄くゴムが残っているのが分かる。劣化支承は同じように鋼板面付近で破断しているのであるがゴム層がない。同じように接着層付近で破壊しても、破壊の状況が異なることが分かる。

以上のことから、せん断耐力の低下には錆の影響だけでなく、接着層が劣化する可能性があることが考えられる。

(4) 接着層の劣化分析

接着層が劣化することが考えられたため、接着剤の主成分である塩素の化学結合状態をXPS（X線光電子分光法）により分析した。試料は劣化支承、リファレンスそれぞれを液体窒素により冷却して接着を強制はく離させて接着層から採取した。分析結果を図-4に示す。劣化支承もリファレンスもほとんど同じ結果であるが、劣化支承は塩素のうち無機塩素由来のピークがリファレンスに比べ相対的に大きいことが判明した。これは接着層内に異種物質が存在することを意味し、接着層の強度低下を招く要因となる物質が生成された可能性を示唆するものである。

既往の研究^{4),5)}では、鋼材の腐食にともなう電気化学的作用により接着層に腐食反応生成物が発生し、接着力が低下することを指摘している。既往の研究においては腐食反応生成物の特定には至っていないが、今回の分析で確認された無機塩素が腐食反応生成物であると考えられる。これが接着層の劣化要因の一つと考えられ、接着力の低下、結果的にせん断耐力の低下につながった可能性があると考えられる。

4. 供試体を用いた劣化要因の検討

ゴムと内部鋼板の接着層の劣化要因を明らかにするために、接着層を模した供試体を作成し、劣化要因を与えた上で引張せん断試験と90°はく離試験を行った。

(1) 試験項目

文献6)に示されているように、ゴムの経年劣化は低温長時間を高温短時間と同意義と考えて良いため、高温により促進養生させた試験を行って経年劣化による破壊特性を確認した。

塩水噴霧により養生した供試体は、破壊特性の変

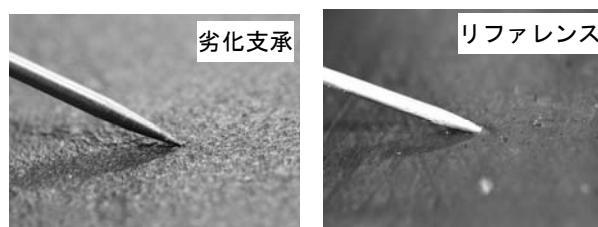


写真-8 支承の破断面の近接写真

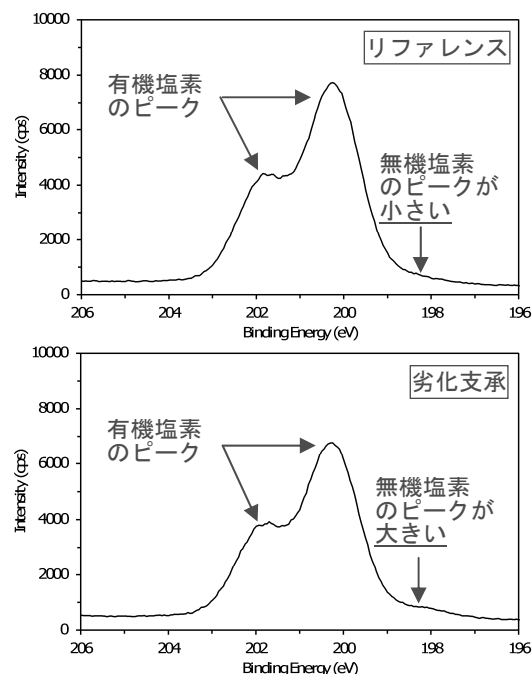


図-4 接着層のXPS結果

表-3 供試体試験項目

試験項目	試験区分	鋼板材質	養生条件			養生時間(h)
			温度	湿度	ひずみ	
引張せん断試験	A	SS400	35℃	-	0%	0 768 1536 3072
					70%	
	B		70℃	-	0%	
					70%	
	C		35℃	塩水	0%	0, 192, 384, 768
					70%	
90°はく離試験	D	SS400 接着剤のみ	35℃	塩水 乾湿繰	0%	0, 192, 384 768, 1536
					70%	
	E				-	
	F	SS400	35℃	塩水	-	0, 768, 1536, 3072

化とともにせん断強度が低下することが判明している³⁾。実橋から取り出したせん断耐力の低下した支承は、塩化物の影響により鋼材が腐食していたことから塩水噴霧による試験を行った。また、塩水により接着剤の特性が変化するか確認するために、接着剤と鋼板のみで製作した供試体を塩水噴霧により養生させた試験を行った。

この劣化要因に加え、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-3のように設定した。

(2) 供試体形状と材料

引張せん断試験は写真-9に示す精密万能試験機を用いて行った。引張せん断試験に用いた供試体を図-5および写真-10示す。引張せん断試験の供試体は、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にしたがい図-6に示す供試体とし、塩水の影響を接着面付近に作用させるため写真-11に示すようにゴムをめくり養生した。

ゴム材質は実橋に設置されていた積層ゴム支承と同材料の天然ゴムNR (G10) であり、ゴムと鋼板の接合は、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SS400である。

(3) 養生条件

a) 温度

常温を35℃と設定し、経年を短時間で置き換えるための促進温度を70℃として養生した。

b) 塩水噴霧および乾湿繰返し

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養生した。養生後の処理はイオン交換水で洗浄している。

塩水噴霧試験に加え、同濃度の塩水による乾湿繰返しも行った。養生条件は以下のとおりであり、1サイクル8時間とした。

- 1) 塩水噴霧：2時間
- 2) 乾燥 (60±1℃, 相対湿度20～30%RH)：4時間
- 3) 湿潤 (50±1℃, 相対湿度95%以上)：2時間

c) 養生時間

養生時間は既往の研究結果³⁾を参考にして768時間を基準に、1536時間、3072時間を養生時間として設定した。塩水噴霧の乾湿繰返しは、強腐食環境として768時間を最大とした。

d) 予ひずみ

橋梁の温度変化によりゴム支承に発生するせん断状態を再現するために、写真-10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許容ひずみである70%とした。なお、供試体の固定は電食を防止するために固定治具と供試体の間にゴムシートを挟んだ。

e) ばらつき

供試体はばらつき（不確かさ）を評価するために、一つの試験に対し引張せん断試験は5体、90° はく離試験は3体作成して試験を行った。

(4) 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-4のように表す。破壊様式別に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。

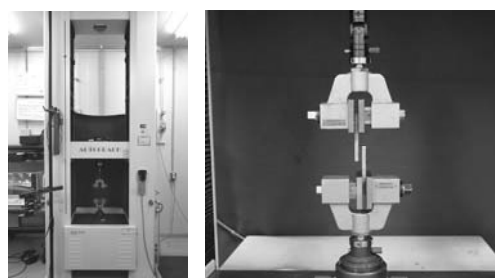


写真-9 精密万能試験機（引張せん断試験）

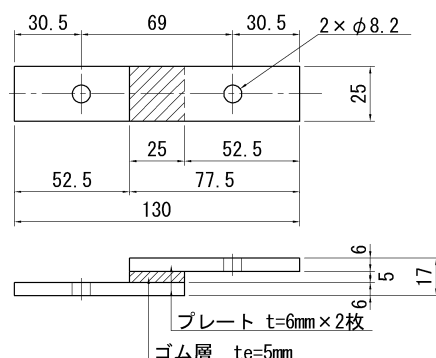


図-5 引張せん断試験供試体 (単位:mm)

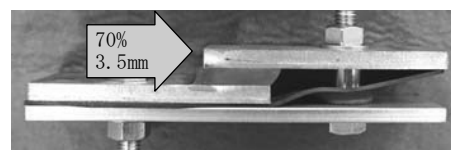


写真-10 供試体への予ひずみの与え方

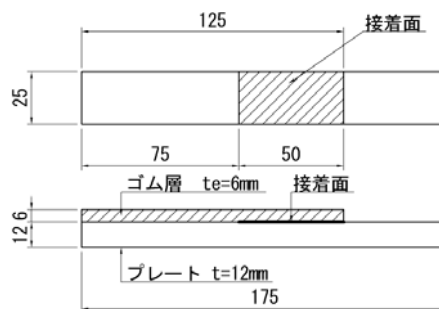


図-6 90° はく離試験供試体 (単位:mm)



写真-11 90° はく離試験供試体

表-4 破壊様式

C F 凝集破壊	
S C F 特殊凝集破壊	
A F 接着破壊	

5. 供試体試験結果

(1) 引張せん断試験

引張せん断試験は、各養生後、予ひずみを解放し、試験室温湿度(23±2℃, 50±5%RH)にて状態調節後に行った。なお、以下に示す試験結果は試験数5個の平均値で示している。また、基準となるA試験の結果も図中に示している。

a) A試験(35℃), B試験(70℃)

常温にて養生したA試験と促進養生したB試験の引張せん断試験結果を図-7に示す。せん断強度は常温ではほとんど低下しないが、促進養生では明確な低下が確認できた。促進養生によりせん断強度は低下する。

A試験, B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る。B試験の破壊様式はA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、経年劣化によりゴムのせん断強度が低下したものと考えられる。

b) C試験(35℃ 塩水噴霧), D試験(塩水噴霧・乾湿繰返し)

塩水噴霧にて養生したC試験と、同条件で乾湿を繰返して養生したD試験の引張せん断試験結果を図-9に示す。せん断強度は養生時間の増加とともに明確な低下傾向が現れた。塩水によりせん断強度は低下する。乾湿繰返しを行ったD試験では、養生時間が少なかったものの、せん断強度の低下がC試験に比べ大きくなることを確認した。

C試験, D試験の破壊様式の割合を図-10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AおよびB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、接着層の性状変化ならびにせん断強度の低下に現れたものと考えられる。乾湿繰返しを行ったD試験では、養生時間が1/4の768時間であるが接着破壊が20%近く発生している。このことから、乾湿繰返しの影響により破壊特性の変化は助長されることが考えられる。

C試験において、3072時間養生のものは、せん断強度が60%低下している。一方、破壊様式の割合のうち、接着破壊は3072時間養生で26%となっており、接着破壊の割合に比べ、せん断強度が大きく低下している。これは、接着破壊の影響に加え、接着強度そのものが低下していると考えられ、接着層の劣化現象であると考えられる。

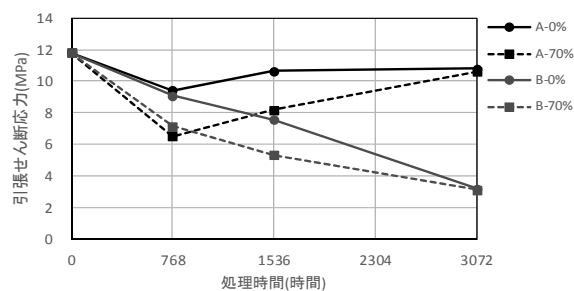


図-7 試験区分A・B引張せん断試験結果

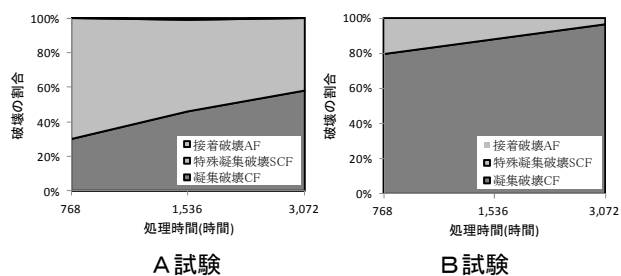


図-8 試験区分A・B破壊様式割合

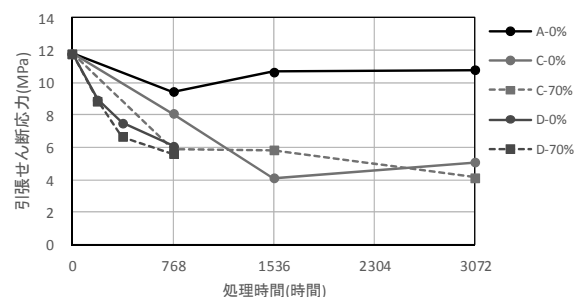


図-9 試験区分C・D引張せん断試験結果

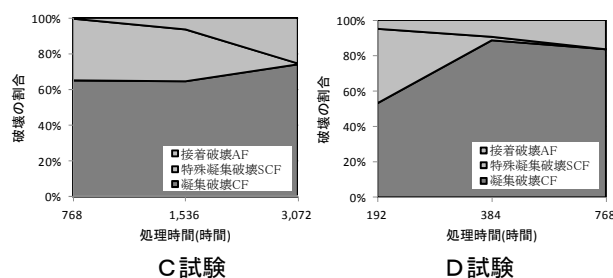


図-10 試験区分C・D破壊様式割合

c) E試験(接着剤のみ・塩水噴霧)

塩水によりせん断強度の低下が確認されたので、その原因が接着剤に起因するものか確認するために、鋼板を接着剤のみで接合させ、塩水噴霧にて養生した。その引張せん断試験結果を図-11に示す。接着剤のみで接合させたものはゴムを接着させたものに比べせん断強度が小さい。これはゴムと金属の加硫接着特有のもので、ゴムが接着剤を介して強力な結合力により接着されるためである⁷⁾。

接着剤のみで接合させた供試体は、塩水噴霧を行

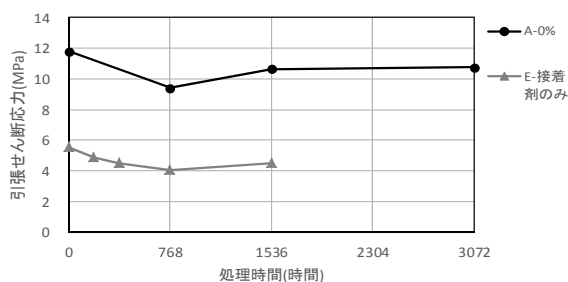


図-11 試験区分E引張せん断試験結果

ってもほとんどせん断強度は低下していない。このこととC試験の結果から、接着剤そのものが劣化した可能性は低く、せん断強度の低下はゴムと接着剤から成り立つ接着層のうちゴムと接着剤が反応する部分、すなわち架橋層付近にて生じているものと考えられる。

(2) 引張せん断試験の破壊様式について

A試験およびC試験の引張せん断試験後の供試体を写真-12に示す。塩水噴霧にて養生したC試験は、接着破壊が養生時間の増加とともに増加した。とくに外周部から侵食するような接着破壊が多い。一方、A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ものは、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、支承解体調査でも確認された錆の侵食と同様に外側から錆が侵食するような作用が働いていると考えられる。

塩水噴霧を行ったC試験にて、養生時間が短い768時間と1536時間では、特殊凝集破壊が全面で発生しているものがある。一方、3076時間養生したものは錆の侵食が明らかに多くなっているにもかかわらず、全面が特殊凝集破壊した供試体なかった。このことから、錆の侵食により接着破壊が外周から大きく進行したものは、破壊が錆の先端からゴム内部方向へ進みやすくなると考えられる。また、破壊様式によらず強度は低下していることから、鋼材腐食、ゴム強度および接着強度等の複数の要因がせん断強度の低下に影響していると考えられる。

(3) 塩水噴霧供試体における破断面の分析

支承解体調査では、接着層に鋼材の腐食反応生成物と考えられる無機塩素が検出された。塩水噴霧養生によるC試験で発生した接着破断面において、同様の無機塩素の有無をXPS (X線光電子分光法) で分析した。その結果を図-12に示す。実橋から取り出した劣化支承の接着破断面と同様に、塩水噴霧試

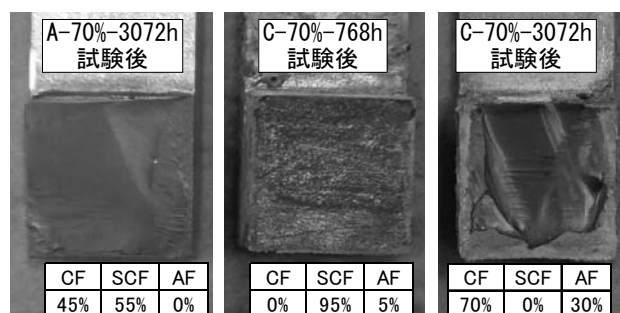


写真-12 試験区分A・C試験の試験後供試体 (抜粋)

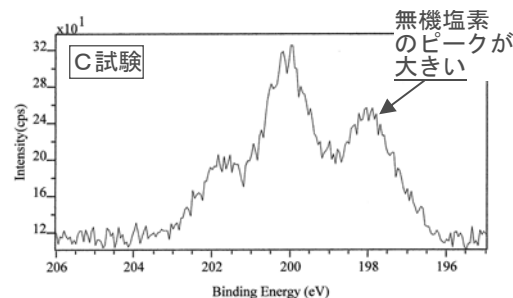


図-12 塩水噴霧供試体の接着層のXPS結果

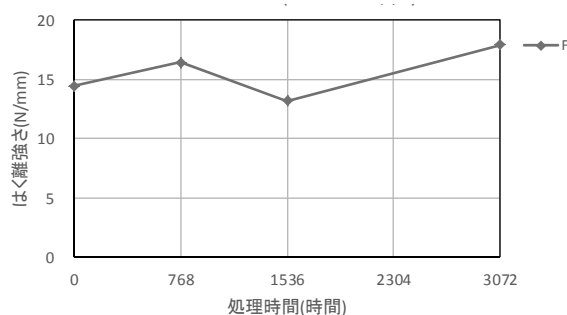


図-13 90° はく離試験結果

験の供試体破断面からも無機塩素のピークが検出された。このことから、塩水噴霧による鋼材の腐食により接着層の強度低下を招く要因となる物質が生成されたと考えられ、これが接着層の劣化要因となりせん断強度の低下につながった可能性がある。

(4) 90° はく離試験

塩水の影響を評価するために、塩水噴霧で養生した90° はく離試験のF試験を行った。試験結果を図-13に示す。引張せん断試験でのせん断強度は塩水養生により著しく低下するが、90° はく離試験でのはく離強度は低下しないという結果が得られた。

既往の研究⁸⁾によると、はく離試験では接着層の劣化作用の検出が困難であることが指摘されており、ゴムの接着を評価するためにはせん断試験の方が適しているとしている。今回の試験結果からも同様の結果が得られたことから、接着層の耐久性を評価するためにはせん断試験にて評価を行う必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、積層ゴム支承のせん断耐力の低下要因をゴムと鋼板の接着に着目して評価するために、実橋から取り出した支承の解体調査と供試体試験を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) ゴムにより被覆された鋼板は、被覆ゴムが劣化し、水分や塩化物の影響により腐食していた。とくにアンカーボルト孔等付近が著しく腐食していた。その腐食は圧縮状態の積層部の内側に侵食していた。
- (2) 接着層が劣化する可能性があり、それは接着層に生成された無機塩素が影響した可能性がある。
- (3) 供試体試験では塩水によりせん断強度は低下し、乾湿繰り返しによりそれはさらに助長された。そのせん断強度の低下は錆によるはく離に加え、接着層の劣化が影響していると考えられる。その接着層の劣化は、接着剤そのものが劣化する可能性は低く、ゴムと鋼板の架橋層付近で発生するものと考えられる。
- (4) 以上のことから、実橋から取り出した積層ゴム支承のせん断耐力が低下したメカニズムは以下のようになると考えられる（図-14）。
 - ① 鋼材を覆っているゴムがその老化により劣化し、鋼材は水分や塩化物によりアンカーボルト等の腐食しやすい部分から腐食する。
 - ② 鋼材の腐食が進行し、錆が積層部の内部まで侵食する。
 - ③ 鋼材の腐食にともなう電気化学的作用により接着層に腐食反応生成物が生成され、架橋層付近が劣化する。
 - ④ 積層ゴムが大きくせん断変形をした場合、積層部の内部まで侵食した鋼材腐食箇所が破壊の起点となり、架橋層付近の劣化した部分が接着はく離を起こし、せん断耐力を失う。

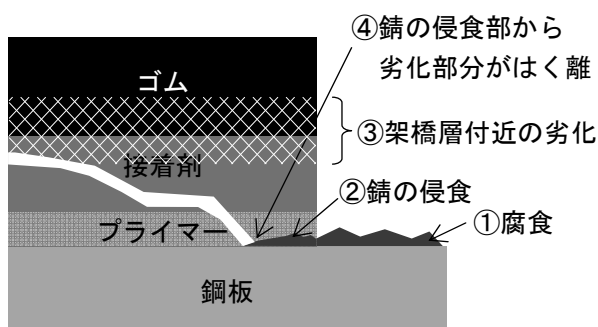


図-14 せん断耐力低下メカニズム概要図

謝辞：本研究については「積層ゴム支承の耐久性評価に関する検討会（主査：五十嵐晃京都大学大学院教授）」の委員各位より貴重なご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林訓裕, 足立幸郎, 五十嵐晃, 党紀, 濱野真彰, 東出知大：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) 林訓裕, 足立幸郎, 上田勝久, 肥田肇, 坂本直太, 五十嵐晃：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) 坂本直太, 向井梨紗, 篠原聖二：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, 第 19 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, 2016. 7.
- 4) 飯泉信吾：腐食環境におけるゴム/金属加硫接着体の耐久性, 日本ゴム協会誌 65, 96, 1992
- 5) 横井浩, 奥本忠興, 竹内勝政, 今井英幸：天然ゴム-鋼板接着物の腐食劣化特性, 日本ゴム協会誌 67, 198, 1994
- 6) 深堀美英：免震用積層ゴムの長期寿命予測, 日本ゴム協会誌 68, 388, 1995
- 7) 芝崎一郎：ゴムと金属の接着, 日本ゴム協会誌 39, 870, 1966
- 8) 末安知昌：積層ゴムと接着, 日本ゴム協会誌 73, 188, 2000