

積層ゴム支承におけるゴム層と内部鋼板の接着層の劣化メカニズム

篠原 聖二¹・坂本 直太²・向井 梨沙³

¹正会員 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)

E-mail: masatsugu-shinohara@hanshin-exp.co.jp

²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)

³正会員 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)

本研究では、積層ゴム支承のゴム層と内部鋼板の接着層の劣化メカニズムを明らかにすることを目的とする。設置後27年が経過し、経年劣化に伴う損傷がみられるリングプレート型ゴム支承を対象に、せん断強度試験後に、ゴム支承を解体し、外的要因を調査するために成分分析を行った。さらに、外的要因の影響度を評価するために、ゴム層と内部鋼板の接着層を模した供試体を用いた促進劣化試験を行い、引張せん断試験を行うことで、接着層の力学的特性の経年変化について評価した。評価の結果、接着層の劣化には塩化物と水分が影響しており、フランジ部や積層部表面近傍の鋼板に錆が生じるとともに（アノード反応）、内部ではカソード反応が生じていると推察される。この電気化学反応で生じる水酸化物イオンや無機塩化物などの生成物により積層部内部で接着層の劣化が生じ、せん断耐力が低下したと考えられる。

Key Words : *rubber bearing, deterioration mechanism, adhesion layer of rubber layer and steel plate*

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震における道路橋の被災経験を踏まえ、当時の建設省より通達された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様¹⁾」において、ゴム支承を積極的に用いることが望ましいと記載されたこと、また、平成8年には、それまでの研究成果としてとりまとめられていた免震設計マニュアル(案)²⁾が、新たに道路橋示方書³⁾に取り入れられたことを背景として、それ以降、ゴム支承が広く普及するようになった。

一方、平成23年東北地方太平洋沖地震では、平成8年道路橋示方書に基づいてレベル2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた。仙台東部道路の東部高架橋では、地震時水平力分散型ゴム支承18基が破断した。また、仙台北部道路の利府高架橋では、3月11日の本震時に地震時水平力分散型ゴム支承3基が破断し、さらに5基にき裂が生じた。さらに4月7日の余震で、8基が破断し、その他9基が損傷を受けた⁴⁾。東水戸道路の新那珂川大橋では、地震時水平力分散型ゴム支承9基にき裂が発生し、国道6号バイパスの旭高架橋においても、鉛プラグ入り積層ゴム支承4基にき裂が発生した⁵⁾。平成28年熊本地震でも、平

成8年道路橋示方書に基づいてレベル2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた。俵山大橋では、ゴム支承の破断、脱落、残留変形といった損傷が生じた。大切畑大橋でもゴム支承の破断が生じた⁷⁾。

以上のように、地震によるゴム支承の損傷が発生している中で、今後、ゴム支承の維持管理を適切に行っていくにあたっては、その損傷の発生原因や損傷メカニズム（進展過程）、地震による損傷や経年的な劣化に伴う材料特性の変化がゴム支承の力学的特性に与える影響などを明らかにしておく必要が生じている。

伊藤ら⁸⁾は、積層ゴム支承に用いられる天然ゴムやクロロプレンゴムを対象に、酸素、オゾン、光、塩水、酸性雨などの因子を付与し、ゴム自体の物理的性質の変化を調査している。曾田ら⁹⁾は、設置後14年が経過し、東北地方太平洋沖地震による破断等の被害を受けた地震時水平力分散型ゴム支承を対象に調査を行い、破断はゴム層と内部鋼板の接着層およびその付近で生じていることを示した。一方、地震で破断した支承と同じ方法で新規に製作したゴム支承の破断試験も行ったが、ゴム層と内部鋼板の接着層ではなく、ゴム層内で破断が生じていることを示している。

また、筆者らは平成 23 年東北地方太平洋沖地震によりにより周囲 41cm にわたりき裂が生じた積層ゴム支承を切断解体し、ゴム表面に生じていたき裂は内部でゴム層と内部鋼板の境界に向かって屈曲し、き裂が伸びていた内部鋼板とゴム層は一体化しておらず離れていたことを示した⁹⁾。林ら¹⁰⁾は、設置後 27 年が経過し、経年劣化に伴う損傷があるリングプレート型ゴム支承を対象に、常時および地震時の残存機能に与える影響に着目した試験を行い、損傷を有する支承の剛性は、新規に製作したリファレンス支承と比較して、終局耐力の低下が認められた。さらに坂本ら¹¹⁾は、せん断試験後の破断面の調査から、新規に製作したリファレンス支承ではゴム層で破断しているのに対し、劣化支承では、ゴム層と内部鋼板の接着層で破断しており、なんらかの変状が生じている可能性があることを示した。

このように、道路橋として供用下にあったゴム支承の地震時の破断事象や、取り出した上での破断試験では、ゴム層と内部鋼板の接着層で破断しているという共通点が認められる。図-1 に示すように積層ゴム支承はゴムと鋼板の複合材料であり、鋼板とゴムは接着されている。製造方法は各メーカーにより異なっているが、一般的にはゴムと鋼板は加硫接着されている。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、加圧することにより接着剤とゴムに架橋反応を生じさせて

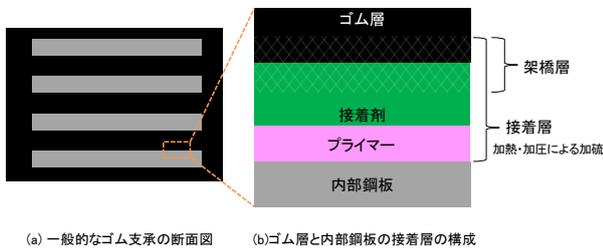


図-1 ゴム層と内部鋼板の接着層の構成

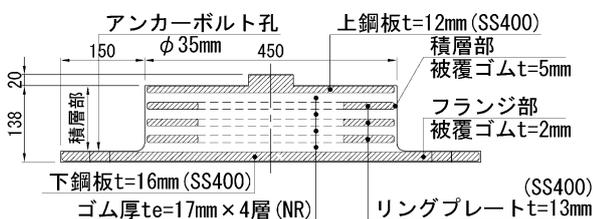


図-2 検討対象支承の構造 (単位: mm)



写真-1 検討対象支承に発生していたき裂

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大きいため、積層ゴム支承のせん断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。実際に、地震により破断した支承と同じ製造方法で新規に製作したゴム支承の破断試験では、接着層ではなくゴム層内で破断が生じている^(例えば5,11)。

既往の研究^(例えば9)より、ゴム自体は経年変化により、架橋密度が上昇し、それに伴い剛性や強度が大きくなることが示されている。逆に有機材料である接着剤を含む接着層の強度は経年劣化により低下すると考えると、時間の経過に伴い、積層ゴム支承の中のゴム層の強度と接着層の強度が、一定の時間が経過した時に逆転するような現象が発生している可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、既往の研究で対象とした劣化ゴム支承について、ゴム層と内部鋼板の接着層の劣化メカニズムを明らかにすることを目的とし、ゴム支承を解体し、外的要因を調査するために成分分析を行った。さらに、外的要因の影響度を評価するために、ゴム層と内部鋼板の接着層を模した供試体を用いた促進劣化試験を行い、引張せん断試験を行うことで接着層の力学的特性の経年変化について評価した。

2. 検討対象支承

対象支承は、1986年の建設時に設置されたものであり、上部構造の水平力を分散することを目的としてゴム支承が採用されており、リングプレートタイプとなっている。この支承の特徴は、内部鋼板に開口部を有しており、鉛直荷重によるゴム材料の膨出を抑制するとともに、ゴムの拘束度を高めて鉛直方向の支持力を向上させる役割を担う。検討対象支承の構造を図-2に示す。構造は天然ゴム (NR) 4層の積層構造である。ゴムの平面寸法は400mm×450mm、総厚は107mm、形状係数はS1=5.93、S2=3.55である。上部構造はPCポストテンションT桁であり、死荷重反力は563kN、最大反力は819kNとなっている。なお、当該支承は5径間連結桁の端部に位置している。設計は昭和55年道路橋示方書に基づいており、設計水平震度kh=0.2により地震時設計されるとともに、地震時許容せん断ひずみ150%に対して製品出荷試験を行い満足している。

1986年の竣工後、定期的に点検が実施されてきており、履歴からは供用後約20年の間は損傷が報告されていなかった。なお、1995年の兵庫県南部地震の際にも端横桁に損傷は生じたものの、支承の被害報告はされていない。しかし、2006年の点検で1支承線(10基)すべての表面(被覆ゴム)に写真-1に示すような水平き裂が発生している

ことが確認された。これを受けて詳細調査が実施され、本体からサンプルと採取し種々の分析を行った結果、き裂はオゾン劣化によるものと推定されている。

さらに、上記調査の際に測定されたき裂深さは最大5mmと報告されているが、取り出す直前の2013年にき裂深さを測定したところ、最大で21mmであったことから、損傷が進展していたと考えられる。

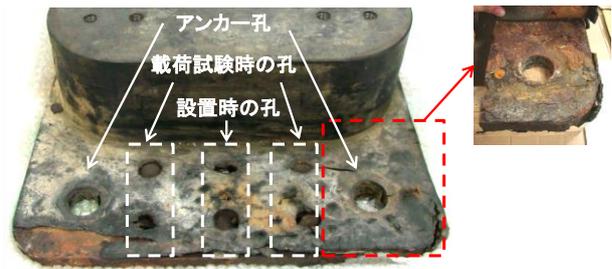


図-3 ゴム層と内部鋼板の接着層の構成

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、既往の研究¹⁰)におけるせん断載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。

(1) 外観観察および錆びの分析

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、図-3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、図-4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。



図-4 内部鋼板側面の錆

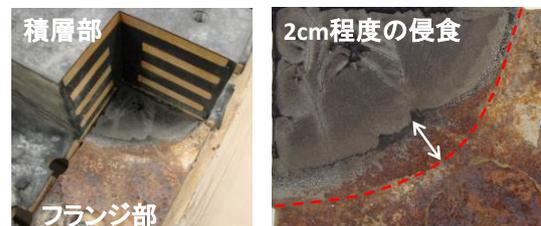


図-5 劣化支承積層部の錆の侵食状況

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。図-5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、図-6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。

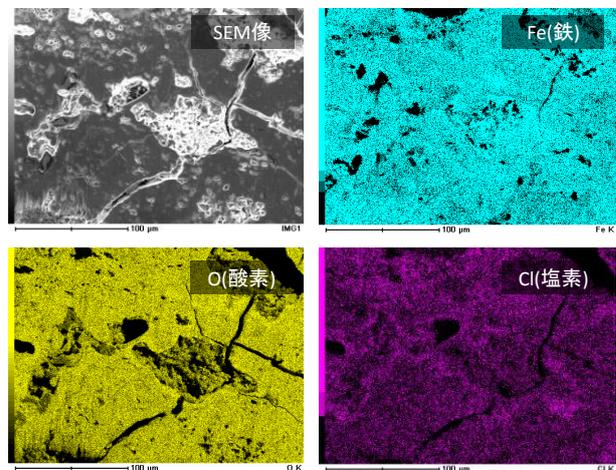


図-6 フランジ部錆の断面元素マッピング

(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。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、**図-7**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**図-7**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-1**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支承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

劣化支承と新規支承において、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。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、いずれの試料から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支承と比較した。測定画像を**写真-8**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。

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支承のうち、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-9**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、リファレンス支承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が分かるがゴム層がない。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。

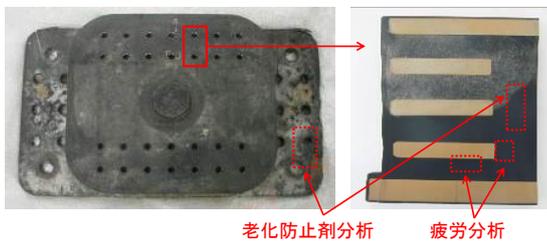


図-7 成分分析試料採取位置

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

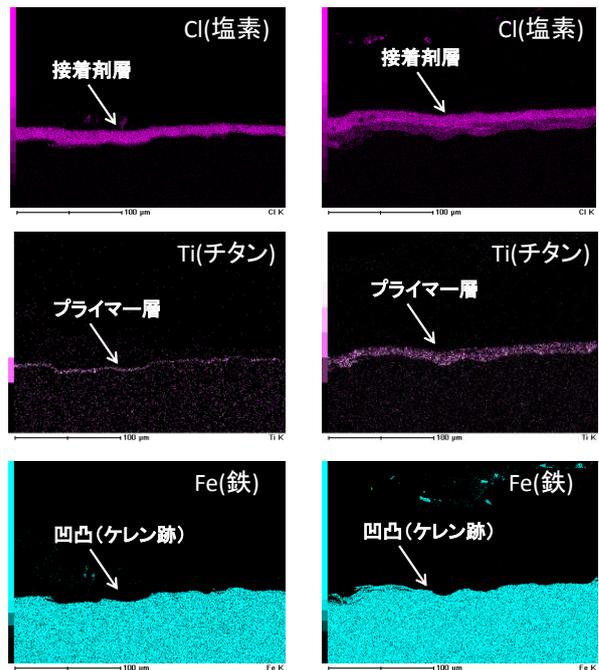


図-8 接着剤層断面 SEM-EDX 結果

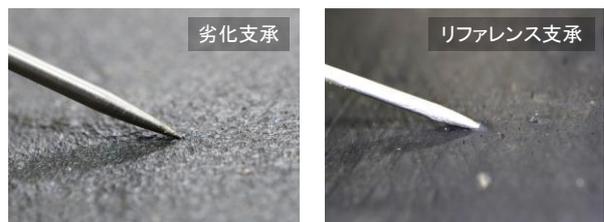


図-9 破断面のニードル調査状況

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、リファレンス支承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-10に示す。劣化支承もリファレンス支承も接着剤由来の有機塩素の反応が大きいという傾向は同じであるが、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支承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^{12),13)}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が指摘されている。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、本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. ゴム層と内部鋼板の接着層の劣化メカニズムの検討条件

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 14)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とされている。そこで、接着層の経年劣化についても、ゴムの考え方を準用し、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、破壊特性の変化とともにせん断強度が低下することが判明している¹¹⁾。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

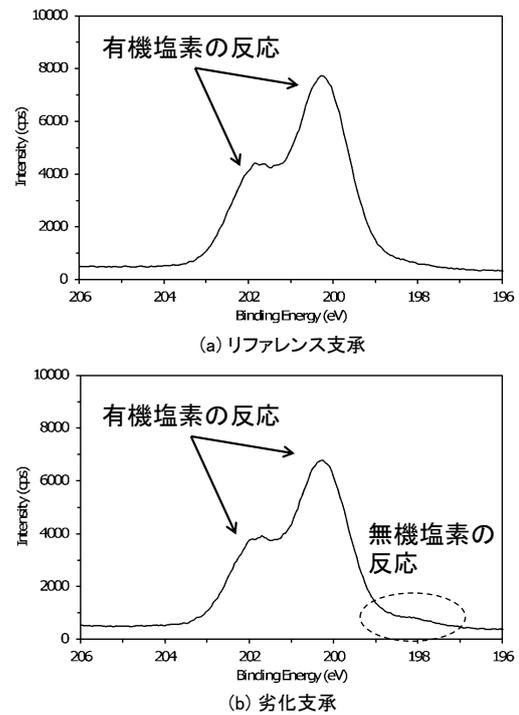


図-10 ゴム支承の接着層のXPS結果

表-4 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°C	-	0%	0
					70%	
	B		70°C	-	0%	1536
					70%	
	C		35°C	塩水	0%	0, 192, 384
					70%	
D	35°C	塩水 乾湿繰	0%	0, 192, 384		
			70%		768, 1536	
E	SS400 接着剤のみ	35°C	塩水	-		0, 192, 384 768, 1536
90°はく離試験	F	SS400	35°C	塩水	-	0, 768, 1536, 3072



図-11 精密万能試験機（引張せん断試験）

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-4のように設定した。

(2) 供試体形状と材料

引張せん断試験は図-11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-12および図-13示す。引張せん断試験の供試体は、ひずみ付与

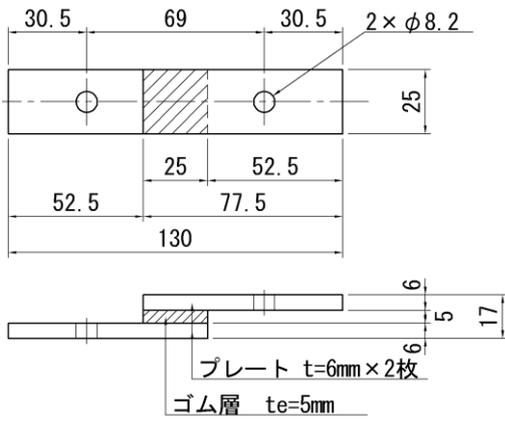


図-12 引張せん断供試体 (単位: mm)

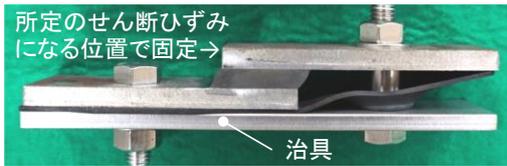


図-13 供試体への予ひずみの与え方

表-5 破壊様式

CF 凝集破壊	
SCF 特殊凝集破壊	
AF 接着破壊	

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 にしたがって図-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、プラスト処理後、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°C 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°C 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°C, 相対湿度 20~30%RH) : 4 時間

3) 湿潤 (50±1°C, 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⁸⁾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、図-13 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せん断ひずみである 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

試験のばらつき (不確かさ) を評価するために、1 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 にしたがって表-5 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。

5. 試験結果に基づく劣化メカニズムの検討

(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°C, 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、基準試験と位置付けた A 試験の結果も図中に示している。

a) A 試験 (35°C) , B 試験 (70°C)

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-14 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-15 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°C 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-16 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-17 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と考えられる。

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。

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-18 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¹⁵⁾。

接着剤のみで接合させた供試体は、塩水噴霧を行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

A 試験および C 試験の引張せん断試験後の供試体を図-19 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

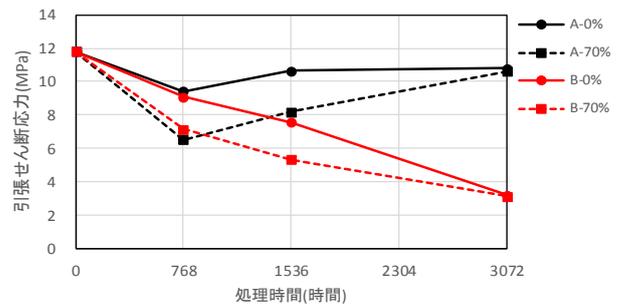


図-14 試験区分 A・B 引張せん断試験結果

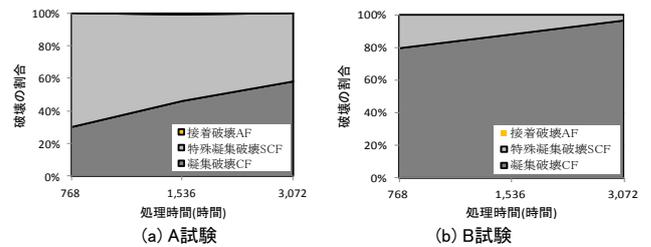


図-15 試験区分 A・B 破壊様式割合

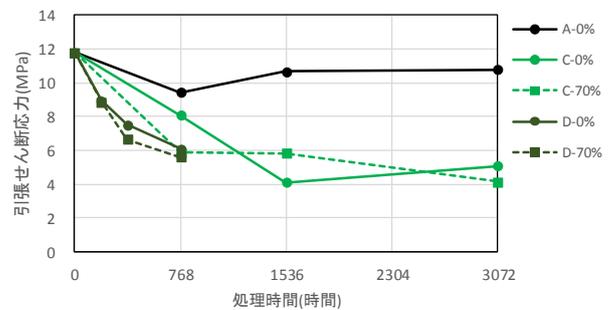


図-16 試験区分 C・D 引張せん断試験結果

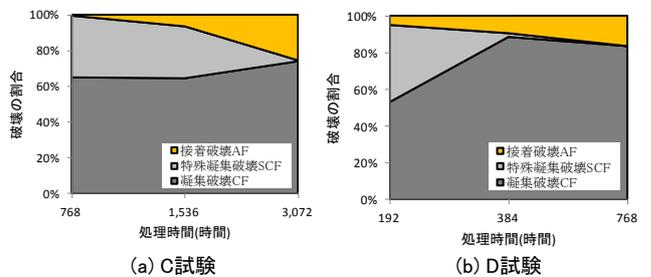


図-17 試験区分 C・D 破壊様式割合

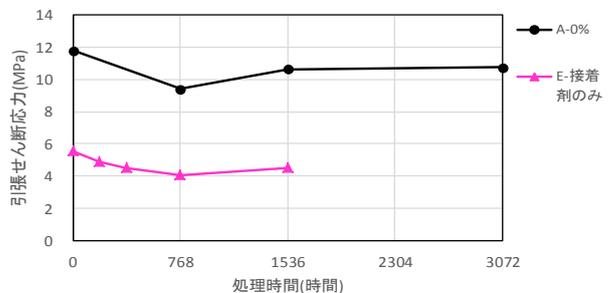


図-18 試験区分 E 引張せん断試験結果

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がなかった。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)で分析した結果を図-20に示す。図-10に示した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。

図-21に示すように、接着層の強度低下を招く要因となる物質の生成には塩化物と水分が影響しており、水分や塩化物が、ゴムのき裂やゴム内部へ浸透により、接着層に到達することで、フランジ部や積層部表面近傍の鋼板に錆が生じるとともに(アノード反応)、やや内部でカソード反応が生じていると推察される。この電気化学反応で生じる水酸化物イオンや無機塩化物などの生成物により積層部内部で接着層の劣化(異種物質が接着界面に存在することによる強度低下)が生じ、せん断耐力が低下したと考えられる。

(4) 90°はく離試験

塩水の影響を評価するために、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-22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、引張せん断試験の結果のように、低下することなく、道路橋支承便覧¹⁶⁾に示された規定値を満足するという結果が得られた。

既往の研究¹⁷⁾によると、はく離試験では接着層の劣化

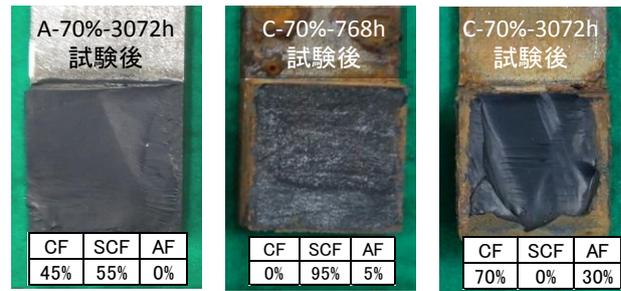


図-19 試験区分A・C試験の供試体の破断面

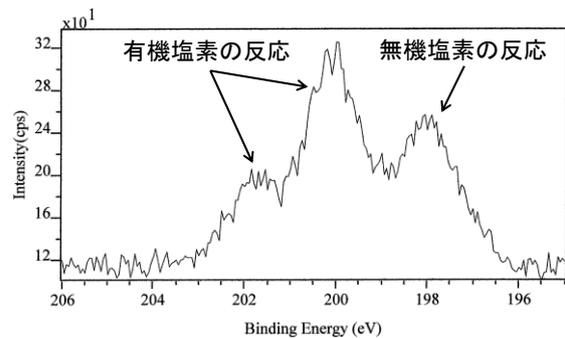


図-20 塩水噴霧供試体の接着層のXPS結果

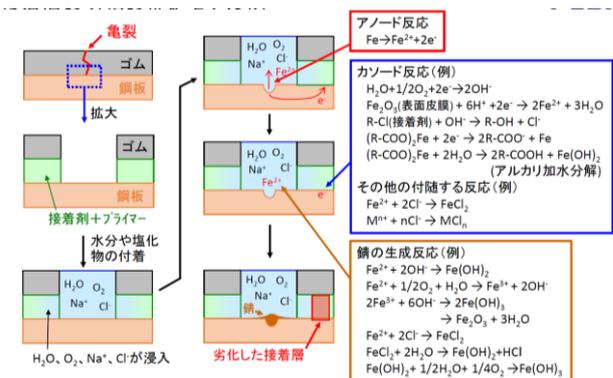


図-21 接着層の推定劣化メカニズム

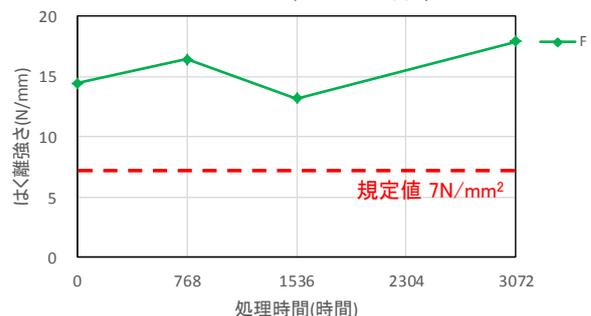


図-22 90°はく離試験(F試験)結果

作用の検出が困難であることが指摘されており、ゴムの接着の強度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、接着層の強度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。

5. 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。本研究で得られた主な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まで侵食していた。
- 2) XPS (X線光電子分光法) 試験において、劣化支承、リファレンス支承も概ね同様の傾向であるが、劣化支承は塩素のうち無機塩素由来の反応がリファレンス支承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。
- 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、接着剤のみを対象とした促進劣化試験および引張せん断試験の結果から、接着剤そのものが劣化する可能性は小さく、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) 接着層の劣化には塩化物と水分が影響しており、フランジ部や積層部表面近傍の鋼板に錆が生じるとともに(アノード反応)、やや内部でカソード反応が生じていると推察される。この電気化学反応で生じる水酸化物イオンや無機塩化物などの生成物により積層部内部で接着層の劣化が生じ、せん断耐力が低下したと考えられる。

謝辞: 本研究については「一般財団法人阪神高速道路技術センター 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。また、解体調査や各種成分分析については、一般財団法人化学物質評価研究機構にて実施して頂きました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省道路局: 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様, 1995.
- 2) (財)土木研究センター: 建設省道路橋の免震設計法マニユ

アル(案), 1992.

- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 4) 山田金喜, 曾田信雄, 木水隆夫, 広瀬剛, 名古屋和史, 鈴木基行: 東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討, 構造工学論文集, (公社)土木学会, Vol.59A, pp.527-539, 2013.
- 5) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験, 構造工学論文集, (公社)土木学会, Vol.59A, pp.516-526, 2013.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報, 国土技術政策総合研究所資料第 646 号/土木研究所資料 4202 号, 2011.
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所: 平成 28 年(2016 年)熊本地震土木施設被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第 967 号, 土木研究所資料第 4359 号, 2018.3.
- 8) 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, pp.253-266, 2005.
- 9) 篠原聖二, 星隈順一: 地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性評価に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.71, No.4, [特]地震工学論文集, Vol.34, pp.L587-L599, 2015.9.
- 10) 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検討, 第 17 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.197-202, 2014.
- 11) 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.
- 12) 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, 日本ゴム協会誌第 65 巻, pp.96-104, 1992.
- 13) 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, 日本ゴム協会誌第 67 巻, pp.198-206, 1994.
- 14) 深堀美英: 免震用積層ゴムの長期寿命予測, 日本ゴム協会誌第 68 巻, pp.388-296, 1995.
- 15) 芝崎一郎: ゴムと金属の接着, 日本ゴム協会誌 39, 870, 1966.
- 16) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.
- 17) 末安知昌: 積層ゴムと接着, 日本ゴム協会誌, 第 73 巻, pp.188-195, 2000.

DETERIORATION MECHANISM OF ADHESION LAYER OF RUBBER LAYER AND STEEL PLATE OF RUBBER BEARING

Masatsugu SHINOHARA, Naota SAKAMOTO and Risa MUKAI

The use of laminated rubber bearings for bridges have been recommended to employ after the 1995 Kobe Earthquake, and the number of bridges designed with the laminated rubber bearings by a design earthquake (Level 2) has been increasing. It was observed during the 2011 Great East Japan Earthquake that some of those laminated rubber bearings in existing bridges suffered intensive damage including rupture and cracking. In this paper, aging effect of water/saltwater, shear strain and temperature on the deterioration mechanism of adhesion layer of rubber layer and steel plate of rubber bearings were experimentally studied. Test results showed that chloride and water affected the deterioration mechanism of adhesion layer of rubber layer and steel plate of rubber bearings.