

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

林 訓裕¹・足立幸郎²・五十嵐 晃³・党 紀⁴・濱野真彰⁵・東出知大⁶

¹ 正会員	工修	阪神高速道路株式会社 大阪管理部	(〒552-0006 大阪府大阪市港区石田3-1-25)
² 正会員	工博	阪神高速道路株式会社 大阪管理部	(〒552-0006 大阪府大阪市港区石田3-1-25)
³ 正会員	Ph.D.	京都大学防災研究所教授	(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
⁴ 正会員	工博	埼玉大学大学院理工学研究科助教	(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
⁵ 学生会員		京都大学大学院工学研究科	(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
⁶ 正会員	工修	オイレス工業株式会社	(〒252-0811 神奈川県藤沢市桐原町8番地)

1. はじめに

地震力分散設計や免震設計等により積層ゴム支承（以下、「ゴム支承」という。）の採用が進み、耐震性の向上が図られてきた。阪神高速道路における供用年数ごとの割合は図-1のとおりである。供用後11～20年弱を経過しているゴム支承が大半を占めているが、これは兵庫県南部地震以降に震災復旧工事及び耐震工事（主桁連結を含む）において鋼製支承から取替えられたものである。また、それ以前（20年超）のゴム支承も1割弱のアセットがある。

こうした背景のもと、長期間供用中のゴム支承の経年劣化が顕在化しているが、劣化による支承性能への影響は明確になっていないという課題がある¹⁾。

本研究は、兵庫県南部地震以前から供用しており、かつ経年劣化損傷のあるゴム支承を実橋から取り出し、各種試験を実施し、残存機能に与える影響について実験的に検討するものである。

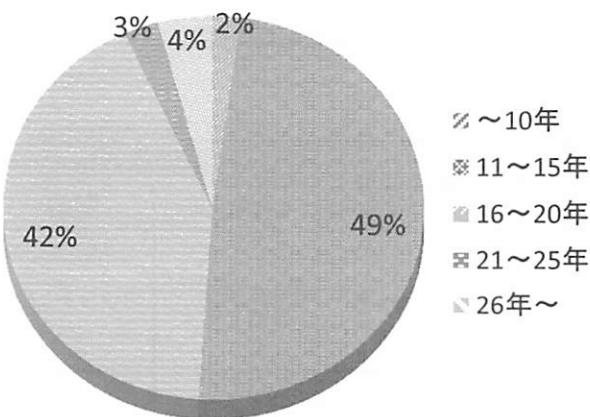


図-1 阪神高速におけるゴム支承の供用年数

2. 性能確認対象支承

本研究では27年供用されたゴム支承に対して性能確認を実施する。当該支承はゴム表面きれつが発生しており、損傷状況を写真-1に示す。

(1) 支承諸元

対象支承は、1986年の建設当初より水平力分散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。

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、形状係数は一次が $S_1=5.93$ 、二次が $S_2=3.55$ である。上部工は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。



写真-1 損傷状況

設計は1980年道路橋示方書に基づいており、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%に対して試験を行い満足している。

(2) 損傷状況

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年の間は損傷報告がなかった。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、支承の被害報告はなされていない。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れつが発生していることが確認された。これを受けて翌年に支承の詳細調査が実施され、本体からサンプルを採取し種々の分析を行った結果、きれつ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れつ深さは最大5mmと報告されているが、取り出し直前の2013年にきれつ深さを測定したところ、最大で21mmであったことから、損傷が進展していることがうかがえる。

3. 残存性能確認試験

(1) 力学試験

経年劣化損傷が支承残存性能へどのように影響しているかを検証するため、力学試験を実施した。ここでは比較を行うために新規製作品（リファレンス支承）に対しても取り出し品（劣化支承）と同じプロトコルで試験を実施した。なお、リファレンス支承は当時の材料表に基づき再現製作したものである。

試験プロトコルを表-1に示す。ここでの上載荷重は全ケースで死荷重反力相当とした。前述のとおり地震時の許容せん断ひずみ150%に対して設計されていることから、現行基準のレベル1地震動に相当

する試験を実施した。正負交番繰返し载荷により支承のゴム総厚150%（160.5mm）の水平変位を与え、5サイクルを1セットとして、3セット行い復元力の著しい低下が生じないことを確認する。一方、終局限界性能として、破断もしくは著しい耐荷力低下まで一方向载荷により水平変位を与える。許容せん断ひずみは、現在の道路橋示方書ではレベル2地震動に対する250%とされているが、当時の設計値を考慮し、本研究では150%を採用した。

試験は図-2に示す载荷装置を用いた。試験体の上側は鉛直方向と回転が拘束され、水平方向のみに移動するリンク機構の横はりを介し、2,000kNのアクチュエータによる橋軸方向の水平せん断変形が与えられる。同時に、下側は水平方向の移動がストッパーで拘束される载荷台に固定し、载荷台を支える4本の750kN油圧ジャッキにより、死荷重反力相当の約560kNの鉛直方向荷重を試験体を与える。

なお、载荷時における試験体の変位を計測するためにレーザー変位計を設置した。アクチュエータの変位はその上部に設置した糸巻式変位計により計測する。また、水平荷重ならびに鉛直ジャッキ荷重はロードセルを用いて計測した。

以下に試験概要、結果ならびに考察を示す。

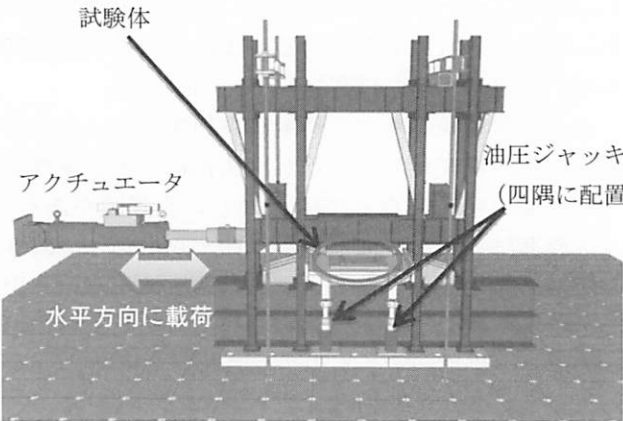


図-2 载荷装置概要図

表-1 力学試験のプロトコル

試験項目		試験方法	载荷変位／荷重	繰返し回数	载荷速度	性能確認方法	
						限界性能	閾値
1	地震時残存性能確認試験（L1）	繰返し水平変位载荷試験	±150%相当水平変位	5回／セット×3セット（セット間冷却1時間）	1.5mm/秒	著しい変形性能低下まで	3セット以上
2	地震時残存終局限界確認試験	一方向水平変位载荷試験	破断 or 著しい耐荷力の低下まで	—	0.5mm/秒	最大ひずみ量	150%以上

a) 地震時残存性能確認試験 (L1)

L1試験は劣化支承3体 (G1,G2,G5 ; 数字は桁番号, 以下同様) とリファレンス支承1体にて実施した。得られた復元力履歴曲線の比較を図-3に示す。

全支承ともに初期のサイクルでは大きな履歴曲線を描いており、これは処女载荷に現れるMullins効果によるものと考えられる。特に劣化支承の方が大きく、ハードニング現象が小さなひずみ領域から現れている。およそ1セット目の4サイクル以降は、全支承はほぼ同一の履歴曲線となり、履歴特性の相違は小さいと言える。ただし、リファレンス支承とG1支承に対して、G2,G5各支承の実験結果では剛性が減少し、履歴ループの面積がやや増加している傾向が見られた。

全支承の各セットにおける等価剛性値を表-2に示す。リファレンス支承とG1支承の等価剛性の変化はほとんど見られないが、G2及びG5支承の等価剛性はリファレンス支承に比べて3セットとも低下している。きれつによるゴム断面積の減少が等価剛性に影響したものと推定され、その低下の程度には個体差があると言える。

b) 地震時残存終局限界確認試験

終局試験は劣化支承4体 (G1,G2,G5,G7) とリファレンス支承1体にて実施した。ここでG1,G2,G5支承はL1試験後に引き続いて終局試験を実施している。

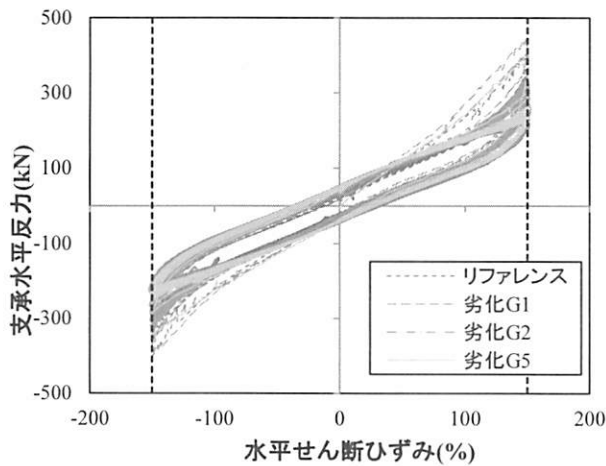


図-3 L1試験履歴曲線の比較

表-2 等価剛性の比較

set	k_{eq} (kN/mm)			
	リファレンス	劣化 G1	劣化 G2	劣化 G5
1	2.18	2.21	1.87	1.79
2	1.96	1.95	1.42	1.48
3	1.91	1.91	1.36	1.42

得られたせん断ひずみ-反力関係の比較を図-4に示す。リファレンス支承は許容せん断ひずみ150%を大幅に上回るひずみ218%で破断、この時の最大荷重は895kNであった。劣化支承では、G1,G2,G5の各支承は許容値を上回ったが、G7支承は許容値を下回る131%で破断した。劣化支承の履歴曲線の相違は、Mullins効果及び载荷中に進展するきれつの個体差に起因するものと想定される。また、劣化支承4体の最大荷重はリファレンス支承の50%以下となり、劣化によると考えられる耐荷力低下が確認された。

G7支承破断時の状況を写真-2に示す。試験体の载荷方向と逆側の最下層ゴム部が下部鋼板から剥がれ、さらに载荷を続けると、ゴム部と下部鋼板の間が破断し、それに追従するように载荷方向の下部鋼板とゴム部もずれが生じた。試験後に破断面の目視観察を行ったところ、鋼板の発錆が確認された。当該支承のきれつ深さは最大9mmであり、被覆ゴム厚5mmを上回っていたことから、供用中の水の浸入により発錆したものと推察され、これが破断の起点になった可能性がある。

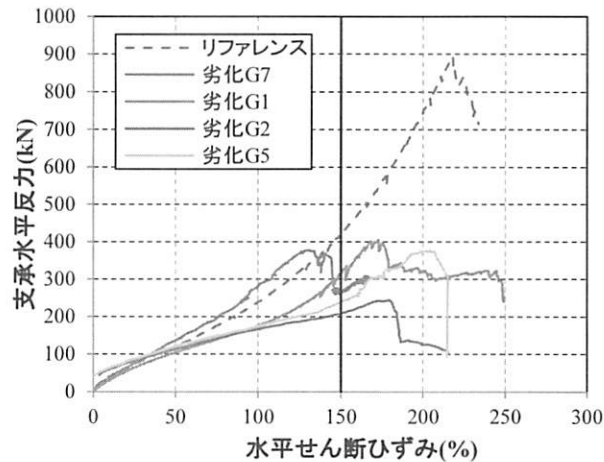


図-4 終局限界性能試験の比較

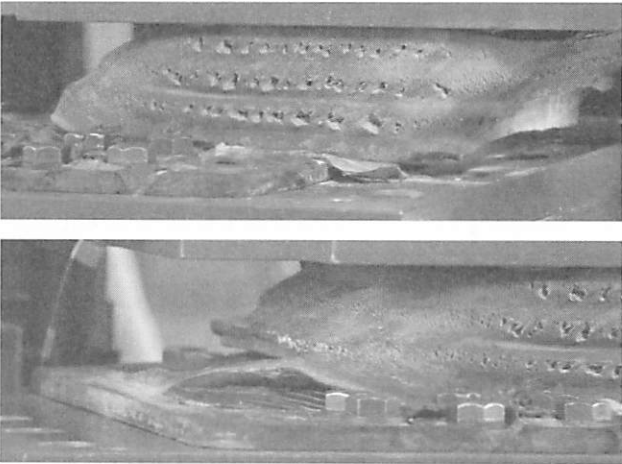


写真-2 劣化支承 (G7) 破断時の状況

表-3 材料試験のプロトコル

試験番号 試験項目			測定項目	性能確認方法	
				規格値 (G10)	JIS規格
物理試験	①	引張試験	引張強さ	15N/mm ² 以上	JIS K 6251
			破断伸び	550%以上	
	②	せん断変形試験	静的せん断弾性係数	1.0 N/mm ²	JIS K 6254
	③	硬さ試験	JIS硬さ	60±5	JIS K 6253
化学試験	④	接着剤剥離試験	接着性能	7N/mm以上	JIS K 6256
	⑤	組成分析	老化防止剤残量	—	JIS K O123
			溶存酸素量	—	—

(2) 材料試験

ゴムの物理的及び化学的残存性能の確認を目的として材料試験を実施した。試験内容を表-3 に示す。これらの項目は道路橋支承便覧²⁾のゴム材料の特性評価項目と、阪神高速道路の共通仕様書³⁾における天然ゴムの物理的性質に基づき決定したものである。性能確認方法として規格値を表中に記載している。

劣化支承及びリファレンス支承より試験片を採取しているが、表面部と深部との差を確認するために、各々の支承の図-5 に示す位置から採取した。併せて、表-3 中の試験番号①②④については積層ゴムの層毎の差異を見るため、劣化支承のみ複数の層からも採取した。なお、劣化支承は G10 支承を用いており、前述の力学試験には使用していない。以降に試験概要と結果を示す。

a) 引張試験

ゴムの機械的強度として、引張強さ（破断時の最大引張力を断面積で除した値）と破断時の伸び（破断した時の伸び比率）を測定した。試験片は橋軸直角方向の面より25mm, 105mm, 180mmの3位置について、劣化支承は1・2層目から計6体、リファレンス支承は2層目から計3体採取し、JIS K 6251に規定されるダンベル状3号型試験片を作成した。

図-6に引張強さ結果を、図-7に破断伸び結果を示す。引張強さはリファレンス支承に比べて劣化支承ではやや低下しているものの、全ての試験片において規格値15N/mm²以上が確認されている。また、破断伸びにおいてリファレンス支承では規格値550%を概ね満足していたが、劣化支承ではすべて下回る結果となった。劣化支承の最小値は420%（2層目）となり、規格値より2割以上低下している。なお、いずれの試験においても表面からの距離や層毎で明

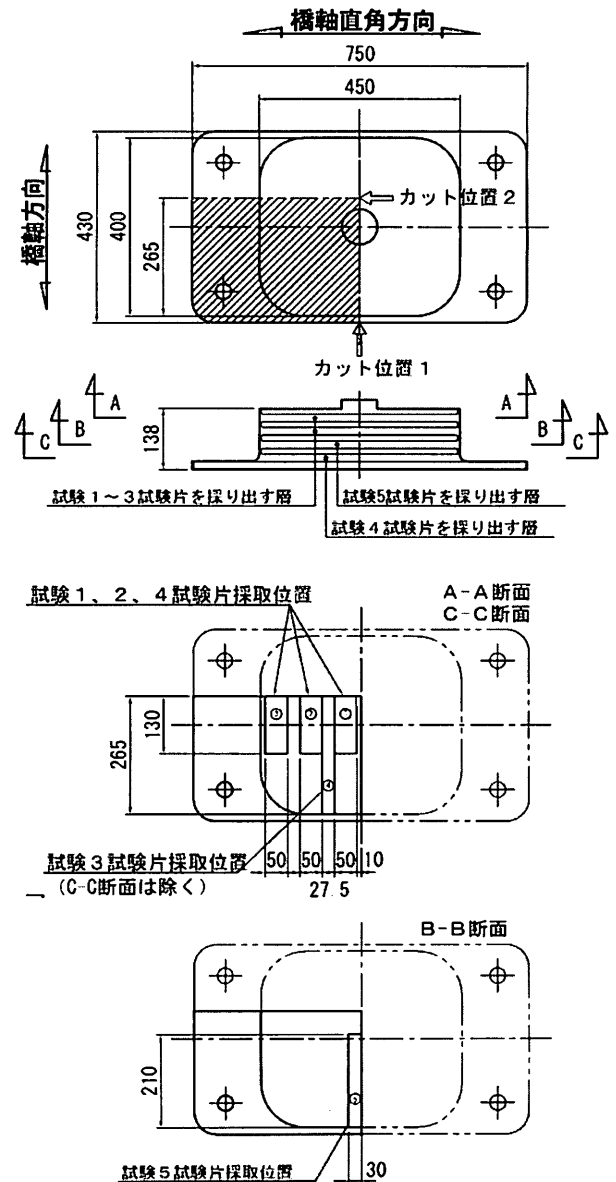


図-5 材料試験片採取位置

確な傾向は認められなかった。

b) せん断変形試験

ゴムの応力-ひずみ特性を求めるための静的せん断弾性率（引張伸びを 25%与えた場合の弾性率）を測定した。試験片の採取位置及び数量は引張試験と同じとし、JIS K 6254 に規定される短冊状 1 号型試験片を作成した。

測定結果を図-8 に示す。当該支承のゴムの弾性係数の呼びは G10 であり 1.0N/mm² が基準となる。リファレンス支承に比べ劣化支承の弾性率が大きくなっており、経年によるゴムの硬化が確認された。なお、表面からの距離や層毎における傾向に特段の相関性は見られなかった。

c) 硬さ試験

硬さ試験はデュロメータ試験機（タイプA）を用いて計測した。ゴム試験片にデュロメータの押針を押しつけ、その時に示す抵抗値（変形量）を0～100までの数値で示したものである。27.5×265mmの試験片を作成し、20mmピッチで計9箇所測定した。

図-9に示すとおり、劣化支承は外面から深部に向かい硬化傾向にあり、リファレンス支承はその逆であった。また、規格値（60±5）と比較すると、軟化している部分が存在していることが判明した。一般的な「経年劣化によるゴムの硬化」と相反する現象であるため、初期（製造時）もしくは供用中に何らかの影響があったことが考えられる。

d) 接着剤はく離試験

ゴムと鋼板の接着強さは、ゴム支承本体の耐荷力・耐久性に影響するものであり、その評価として JIS K 6256 に規定される90度はく離試験を実施した。

いずれの試験においても接着層ではなく、ゴムで破断する結果となり、図-10に示すとおりいずれも規格値（7N/mm）を上回っていた。接着層ではなく離でないことを考慮すると、接着強さは満足しているとみなすことができるが、前述の終局試験ではゴムと鋼板の境界部から破断したと考えられることから、特にきれつが生じている付近でははく離強さが低下していることも推定される。

e) 組成分析（老化防止剤残量）試験

ゴムの劣化を抑制する目的で老化防止剤が配合されているが、経年によるその変化（残量）と分布を確認する試験を実施した。試験方法はJIS K 0123に規定されるガスクロマトグラフ質量分析器を用いて測定した。

リファレンス支承の最深部（表面より200mmの位置）の残存量を100%とした場合の各測定箇所の割合を図-11に示す。アミン系老化防止剤は耐熱性、

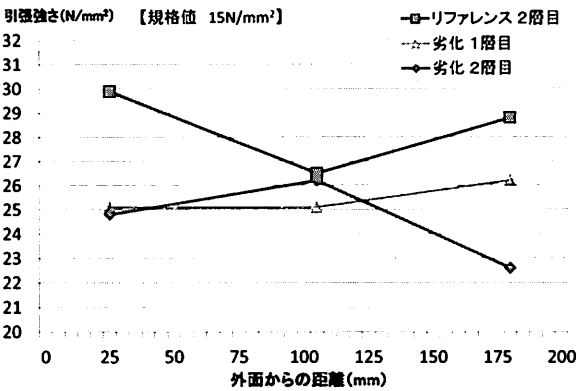


図-6 引張試験（引張強さ）結果

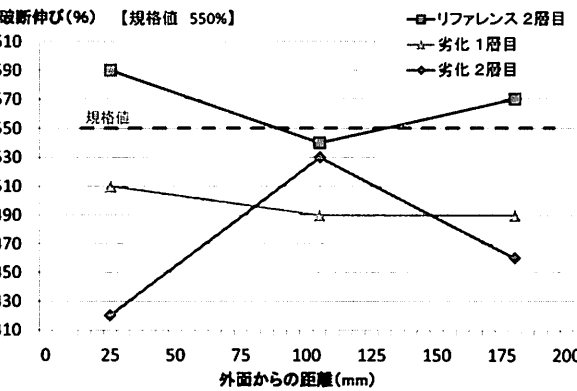


図-7 引張試験（破断伸び）結果

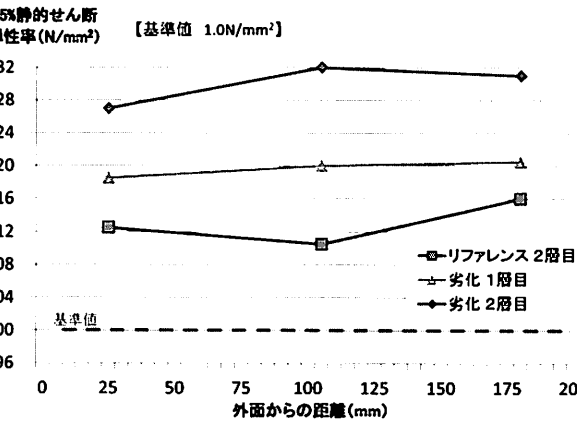


図-8 せん断変形試験結果

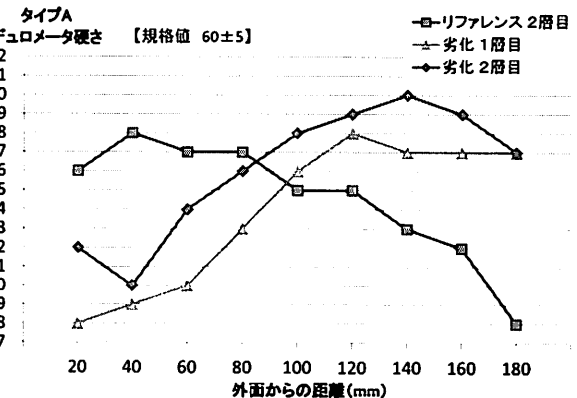


図-9 硬さ試験結果

耐オゾンきれつ性、耐日光性等に優れるという特性を有する⁴⁾ことから、劣化支承で表面に近いほど消費されて残量が少なくなっている傾向が確認された。
f) 組成分析（溶存酸素量）試験

ゴムの劣化は空気中のオゾンによる酸化劣化が主要因の一つであるため⁵⁾、ゴムの溶存酸素量を元素分析装置にて計測した。結果を図-12に示す。リファレンス支承は表面からの距離によらずほぼ一定値を示すのに対し、劣化支承は表面付近で高い溶存酸素の傾向が確認された。このことから、表面に近いほどオゾン劣化の発生確率が高いことがうかがえる。

4. おわりに

本研究ではゴム表面きれつという経年劣化損傷がゴム支承の残存性能へ与える影響について、力学試験及び材料試験により検証を行った。得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 劣化支承の剛性は、リファレンス支承と比較して、同等のものと低下しているものとの違いが生じた。これはきれつによるゴム断面積の減少が影響したものと推定され、その程度には個体差があると言える。
- 終局限界性能は許容値以下で破断する劣化支承もあり、かつ最大荷重はリファレンス支承の半分以下であった。この要因としてはゴム以外での劣化が影響している可能性が考えられる。
- 終局試験におけるゴム破断は、ゴムと鋼板の境界部において進展している。鋼板の発錆が確認されたことを考慮すると、きれつから水の浸入等により劣化したと推定される。
- 材料試験からは劣化がさほど顕著には見られないものの、硬さ試験で劣化支承のゴム軟化という結果が得られている。

ゴム材料自体の残存性能は特段問題ないと考えられるが、“ゴム支承”としての残存性能は想定よりも低下が著しい。これはゴムだけではなく他の要因との複合的な劣化による可能性があることを示唆していると言える。この結果を踏まえ、今後は終局試験にて破断した支承の詳細観察により劣化要因の推定を行うとともに、それを検証するためのメカニズムの解明を進める必要がある。

謝辞：本論文執筆にあたり、愛知工業大学・青木徹彦名誉教授には載荷装置使用において多大な協力をいただいた。ここに深く感謝致します。

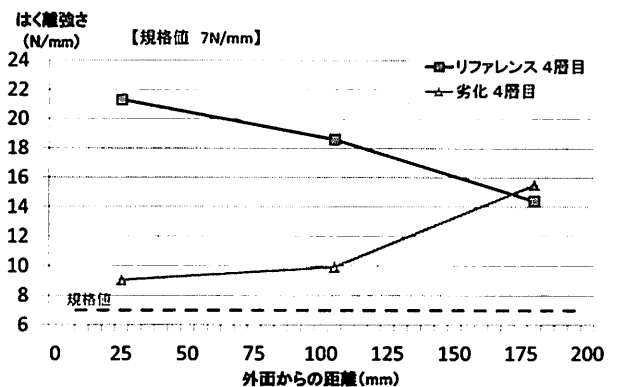


図-10 はく離強さ結果

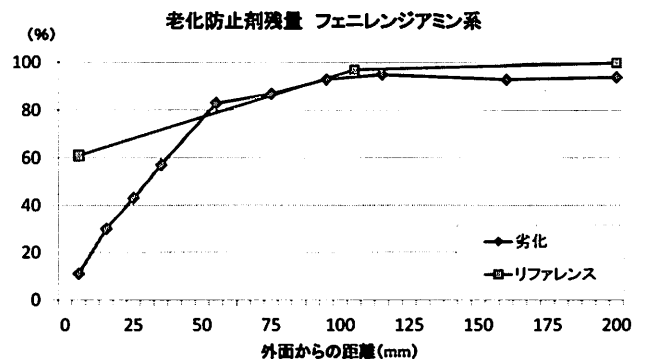


図-11 組成分析（老化防止剤残量）結果

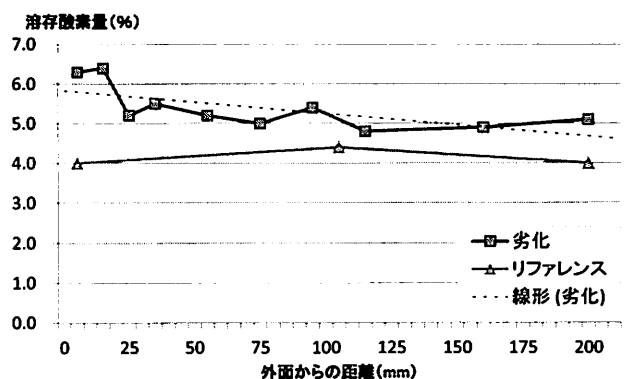


図-12 組成分析（溶存酸素量）結果

参考文献

- 1) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，ハツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化したゴム支承（LRB）の残存性能に関する実験的考察，第16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，Vol.16，pp.449-456，2013。
- 2) （社）日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004。
- 3) 阪神高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，2009。
- 4) 久保田威夫，栗林愿：ゴムの老化防止剤について，有機合成化学第13巻第11号，pp.33-39，1955。
- 5) 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。