

鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) の 経年劣化による残存性能に関する実験的検証

林 訓裕¹・足立幸郎²・甲元克明³・八ツ元 仁⁴・五十嵐 晃⁵・党 紀⁶・東出知大⁷

¹正会員 阪神高速道路(株)大阪管理部 (〒552-0006 大阪府大阪市港区石田 3-1-25)

E-mail: kunihiro-hayashi@hanshin-exp.co.jp

²正会員 阪神高速道路(株)大阪管理部 (〒552-0006 大阪府大阪市港区石田 3-1-25)

E-mail: yukio-adachi@hanshin-exp.co.jp

³正会員 阪神高速道路(株)大阪管理部 (〒552-0006 大阪府大阪市港区石田 3-1-25)

E-mail: katsuki-komoto@hanshin-exp.co.jp

⁴正会員 阪神高速道路(株)技術部 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

E-mail: hitoshi-yatsumoto@hanshin-exp.co.jp

⁵正会員 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)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

⁶正会員 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail: dangji@mail.saitama-u.ac.jp

⁷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)

E-mail: higashide.tomohiro.85v@st.kyoto-u.ac.jp

兵庫県南部地震以降、地震力を分散させる設計や免震設計等により耐震性の向上が図られ、ゴム支承の普及が著しい。しかしながら、長期に渡り供用中であるゴム支承に経年劣化と考えられる損傷が顕在化しているが、支承性能へどのように影響するかが明確でないため、経過観察の状態にとどまっている。本論文では経年劣化損傷の発生した鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) の残存性能を検証するため、力学試験及び材料試験を実施した。この結果、ゴムや鉛の経年劣化による剛性の増加及び減衰性能低下が確認された。

Key Words: lead rubber bearing, aged deterioration, remaining performance, load test, material test

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、地震力分散設計や免震設計等の設計手法により積層ゴム支承（以下、「ゴム支承」という）を採用し、耐震性能の向上が図られてきた。阪神高速道路においても支承取替えを含む耐震工事や桁連結工事が盛んに行われ、ゴム支承の占める比率は全数 87,605 基に対して約 3 割となっている。

一方、ゴム支承に多く使用される天然ゴム (NR: Natural Rubber) は耐オゾン抵抗性に乏しいという特徴を有する¹⁾。すなわち、長期間の使用により劣化することを意味するが、実際、経年に伴う損傷が顕在化してきて

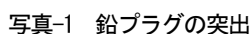
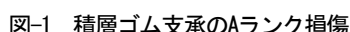
おり、補修すべきと考えられる外観を呈しているものが存在する。しかしながら、損傷が発生したゴム支承の残存性能は明確ではなく、かつ効果的な補修方法がないため、現在は経過観察中のものが大半である。

本論文はゴム支承の経年劣化損傷が常時ならびに地震時残存機能に与える影響について、力学試験及び材料試験により検証するものである。

2. ゴム支承の損傷状況

阪神高速道路における平成 18～24 年度の間に報告された積層ゴム支承の A ランク損傷は 811 件であり、その

写真-1 は阪神高速 3 号神戸線で発見された鉛プラグ突出である。この支承は既に取り替えられているが、類似の損傷はいくつか報告されており、経過観察の点検判定となっているものがほとんどである。



今回残存性能試験を実施するのは、阪神高速15号堺線の堺P181橋脚の鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB: Lead Rubber Bearing）である。当該支承は、残存性能への影響が大きいと考えられる鉛プラグの突出損傷が発生している。現地状況を写真-2、構造概要を図-2に示す。

写真-2 現地状況（堺P181）

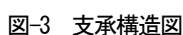
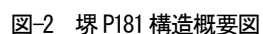




写真-3 損傷状況

ゴムの平面寸法は350mm×550mm、総厚は14mm×5層=70mm、形状係数は一次が $S_1=7.26$ 、二次が $S_2=5.00$ であり、地震エネルギー減衰を目的とする鉛プラグ（φ55mm）4本が菱形配置されている。なお、設計当時の地震時許容せん断ひずみ175%に対して試験され、満足している。

損傷内容は写真-3に示すように、鉛プラグが支承側面から突出しており、同一支承線上に5基あるが、全てほぼ同様な損傷状況である。過去の点検履歴より損傷は平成17年（取替え後約10年）に側面ふくれが、平成20年の点検で鉛突出の損傷が報告されていることから、徐々に進行しているものと考えられる。

4. 残存性能確認試験

(1) 力学試験

経年劣化後の地震時及び常時残存性能を確認することを目的として力学試験を実施した。表-1に示す試験プロトコルは阪神高速道路の共通仕様書²⁾におけるゴム支承の検査項目を参照しており、供用中においても保持されていることが望ましい重要な性能である。

上載荷重は全ケースで死荷重反力相当とし、実橋からの回収品（劣化支承）及び新規製作品（リファレンス支

承）に対してそれぞれ実施した。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。

試験は図-4に示す載荷装置を用いた。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梁を介し、2,000kNのアクチュエータにて橋軸方向の水平せん断変形を与える。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載荷台に固定し、載荷台を支える4本の750kN油圧ジャッキにより、死荷重反力相当の約500kNの鉛直方向荷重を試験体を与える。

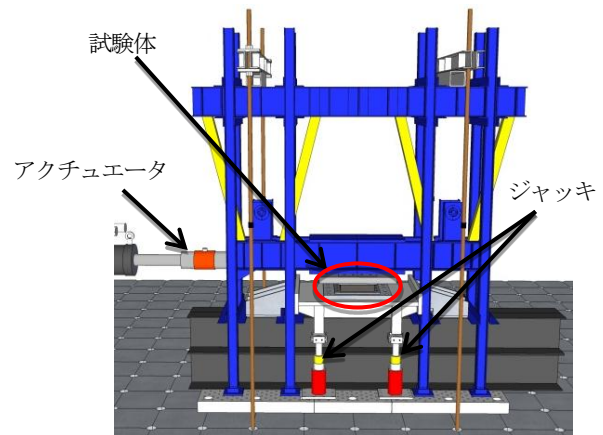


図-4 載荷装置概要図

表-1 力学試験のプロトコル

試験項目	試験方法	載荷変位 ／荷重	繰返し回数	載荷速度	性能確認方法	
					限界性能	閾値（案）
1 地震時残存性能 確認試験（L1）	繰返し水平変 位載荷試験	±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)	2～3mm/秒	著しい変形性 能低下まで	3セット以上
					エネルギー 吸収性能	著しい低下がな い
2 地震時残存性能 確認試験（L2）	繰返し水平変 位載荷試験	±250%相当 水平変位	5回／セット ×2セット (セット間 冷却1時間)	1～2mm/秒	著しい変形性 能低下まで	1セット以上
					エネルギー 吸収性能	著しい低下がな い
3 地震時残存終局 限界確認試験	一方向水平変 位載荷試験	著しい耐力力 の低下まで	—	0.5mm/秒	最大ひずみ量	250%以上 or 設計変位以上
4 常時残存性能 確認試験	繰返し水平変 位載荷試験	±70%相当 水平変位	50回／セット ×50セット	0.5mm/秒	著しい変形性 能低下まで	50セット以上

地震時残存性能確認試験として、L1 地震、L2 地震、終局限界の3ケースを実施した。地震時試験での供試体は劣化支承・リファレンス支承とも各試験で1個ずつをあてがっている。常時残存性能確認試験と併せて、以下に試験概要、結果ならびに考察を示す。

a) 地震時残存性能確認試験 (L1)

L1 試験では水平せん断ひずみ 150%を目標変位とし、1セット5回の正負交番载荷を合計3セット実施した。なお、加力による支承の温度上昇影響をできるだけ排除するため、セット間で1時間の冷却時間を設けた。

3セット目における履歴曲線の比較を図-5に示す。劣化支承の履歴ループが細っており、減衰性能の低下がうかがえる。表-3は支承性能パラメータ（等価剛性 k_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} 及び切片荷重 Q_d ）の全セットの比較である。等価剛性はリファレンス支承より4~7%増加しており、ゴムが硬化していることが考えられる。また、等価減衰定数及び切片荷重はリファレンス支承と比べて半分以下になっていることから、主に鉛プラグの減衰性能低下が推察される。

本試験に用いた劣化支承は鉛突出により、製造時の鉛プラグ量に比べて減少していたことから、その影響が現れたと言うことができる。しかしながら、突出によりどの程度減少していたのかは把握できていないため、減衰性能の低下と定量的に関連付けることは困難である。

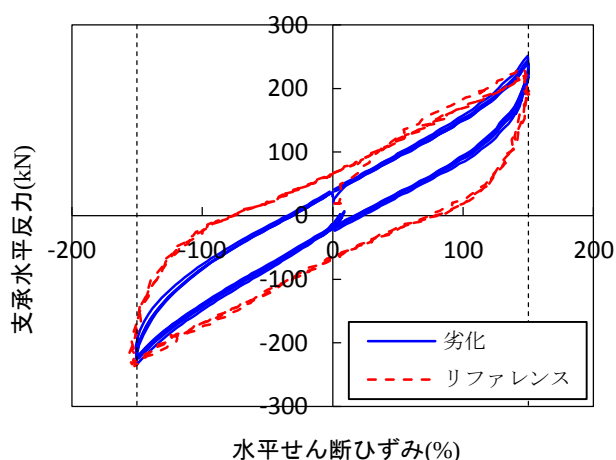


図-5 LRBの復元力履歴特性の比較 (L1・セット3)

表-3 L1試験における各パラメータ

セット	k_{eq} (kN/mm)		h_{eq}		Q_d (kN)	
	劣化支承	リファレンス支承	劣化支承	リファレンス支承	劣化支承	リファレンス支承
1	2.52	2.42	0.0904	0.196	33.9	69.6
2	2.34	2.20	0.0766	0.192	29.8	66.8
3	2.31	2.16	0.0756	0.185	29.4	66.4

b) 地震時残存性能確認試験 (L2)

L2試験（目標変位：水平せん断ひずみ250%）もL1試験と同様に正負交番载荷を行った。L2地震動は供用中に発生する確率が低いことから1セット終了後に著しい変形性能の低下がなければ残存性能を満足することとするが、性能確認のためさらに1セット追加载荷を行った。

両支承の1セット目における復元力履歴特性の比較を図-6に示す。履歴ループには大きな差異はないが、劣化支承ではせん断ひずみが200%を超えたあたりから荷重が増加していることから、ゴムのハードニング現象が起きていると想定される。表-4に示す各パラメータの比較より、L1試験同様、経年劣化によるゴムの硬化と鉛の減衰性能低下がうかがえる。

また、等価減衰と切片荷重のサイクル毎の変化は、劣化支承が微減であるのに対し、リファレンス支承は徐々に低下している（図-7）。これは大変形による鉛の変状・抜け出しが可能性として考えられる。

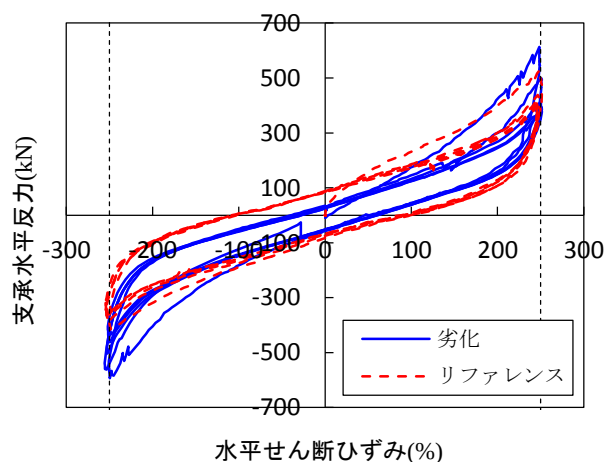


図-6 LRBの復元力履歴特性の比較 (L2・セット1)

表-4 L2試験における各パラメータ

セット	k_{eq} (kN/mm)		h_{eq}		Q_d (kN)	
	劣化支承	リファレンス支承	劣化支承	リファレンス支承	劣化支承	リファレンス支承
1	2.78	2.35	0.0692	0.133	41.1	78.9
2	2.28	2.10	0.0669	0.113	37.3	67.2

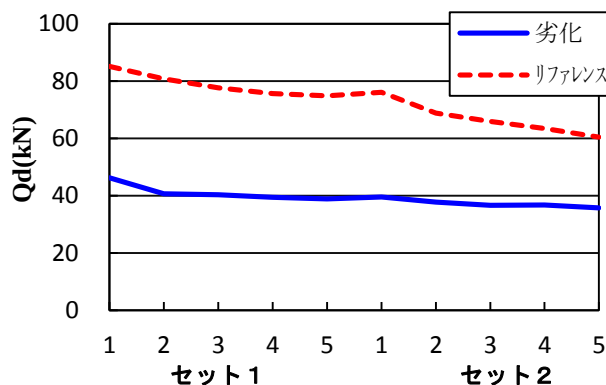


図-7 L2試験における切片荷重 Q_d の推移

c) 地震時残存終局限界確認試験

終局限界確認試験では試験体の破断もしくは著しい耐荷力低下まで静的な単調載荷を行った。水平変位は0.5mm/sの一定速度で漸増させるものとした。

試験で得られた反力-せん断ひずみ関係を図-8に示す。ゴムの破断の発生時の荷重は両者ともほぼ同じレベルであるのに対し、終局時せん断ひずみは劣化支承の方がやや小さい値となったのは、主に経年劣化によるゴムの硬化に起因する剛性の増加に起因するものと考えられる。なお、ゴム体の破断を基準とした終局せん断変形性能は、劣化支承274%、リファレンス支承329%であった。両支承ともにL2地震動のせん断ひずみ許容値である250%に対する変形性能は満足していることが判明した。

写真-4にゴム破断時の状況を示す。位置は異なるが破断はいずれもゴム層内で生じていた。まず端部が破れ（図-8の最初の荷重ピーク時）、さらに載荷を続けると破断面が徐々に広がり、その後一気に全体が断裂した。

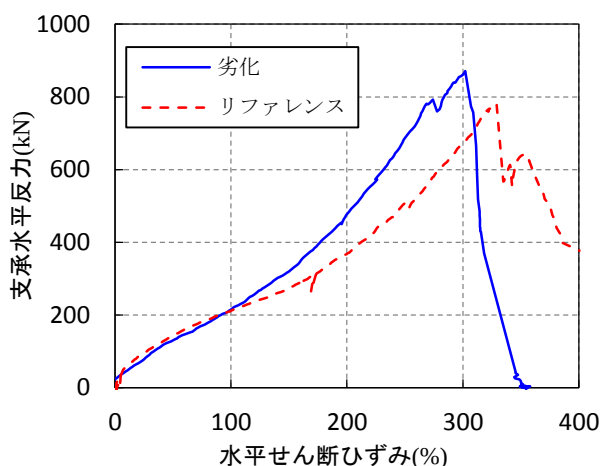


図-8 LRBの終局限界性能試験の比較



写真-4 破断状況（上：劣化，下：リファレンス）

d) 常時残存性能確認試験

常時に関しては、桁の温度伸縮による支承変形が及ぼす残存性能を評価することを目的とした、低速繰り返しせん断疲労試験に相当する載荷を行った。年間あたりの桁の温度伸縮による支承変形の累積変位に基づき、振幅±70%せん断ひずみの50サイクル載荷に対応させるものとし、これを1セットとする。50年間の供用に対応する50セット以上で著しい性能低下が見られなければ、供用期間中の残存性能が確認される。

10セットおきの履歴曲線の重ね合わせ比較を図-9に示す。この結果より復元力特性の著しい変動は見られず、安定した履歴が得られていることが分かる。また、負側に荷重が偏っているが、これは初期状態（現地より取り出した時点）において残留ひずみがあったものと想定される。

図-10は等価剛性と等価減衰定数のセットごとの推移をプロットしたものであるが、両者とも徐々に低下していく傾向にある。しかしながら、等価減衰定数の低下は大きくないことから、図-9の履歴曲線の変化に明確な差異は確認されなかった。つまり常時における減衰性能低下はほとんど影響を受けないと言うことができる。なお、等価減衰定数に関しては既往の研究³⁾により天然ゴムの常時変形においておよそ5%であることが分かっており、これより鉛の寄与率は2~3%程度であると言える。

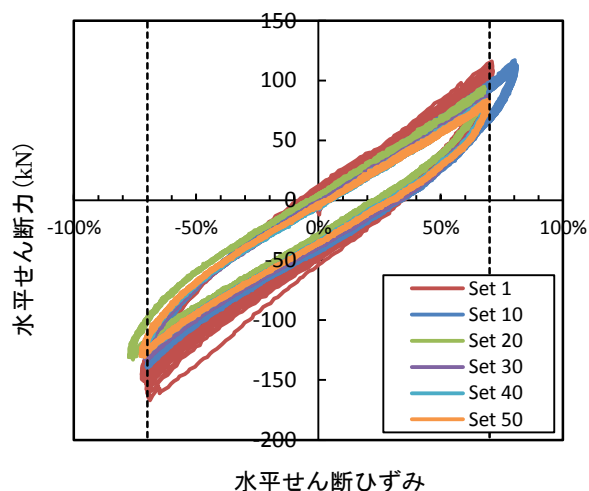


図-9 LRBの常時性能試験における履歴曲線

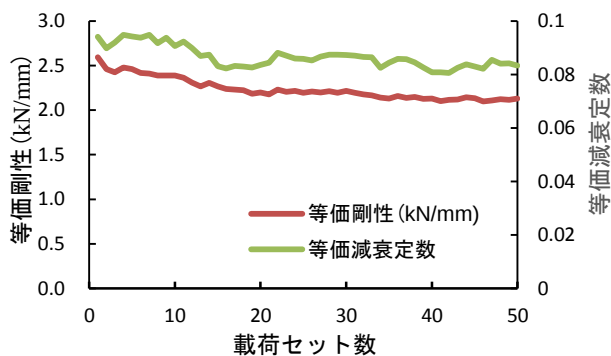


図-10 常時性能試験における支承パラメータの推移

表-2 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（G8）	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	0.8 N/mm ²	JIS K 6254
	③	硬さ試験	JIS硬さ	50±5	JIS K 6253
	④	接着剤剥離試験	接着性能	7N/mm以上	JIS K 6256
化学試験	⑤	組成分析	老化防止剤残量	—	JIS K 0123
			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-2 に示す。これらの項目は共通仕様書²⁾における天然ゴムの物理的性質と、支承便覧¹⁾のゴム材料の特性評価項目に基づき決定したものである。性能確認方法として、各々の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-11に示す位置から採取した。併せて、表-2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、劣化支承のみ図に記載の層からも採取した。なお、両支承とも前述したL1試験実施後の支承から試験片を採取する予定であったが、劣化支承の載荷試験トラブルによりL2試験の1セット目途中で載荷中断した支承を転用している。以降に試験概要と結果を示す。

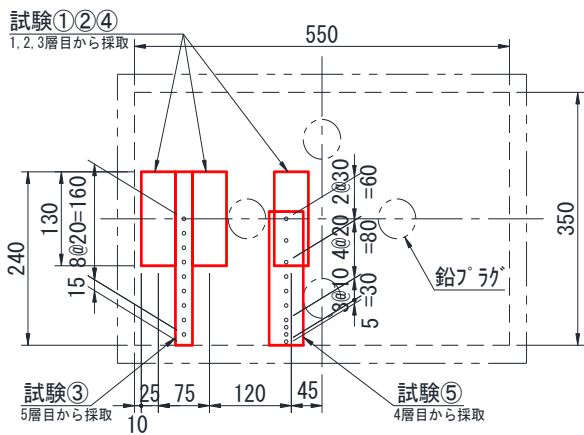


図-11 ゴム試験片の採取平面位置（劣化支承）

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35mm、110mm、230mmの3位置について、劣化支承は1・2・3層目から計9体、リファレンス支承は3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-12に引張強さ結果を、図-13に破断伸び結果を示す。引張強さは全ての試験片で規格値15 N/mm²以上が確認されたものの、リファレンス支承に比べて劣化支承は7～16%低下している。また、破断伸びにおいてリファレンス支承では規格値550%を満足していたが、劣化支承ではほぼ下回る結果となった。製作当時のミルシートでは破断伸び570%であることから、それより2～16%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確な差異は認められなかった。

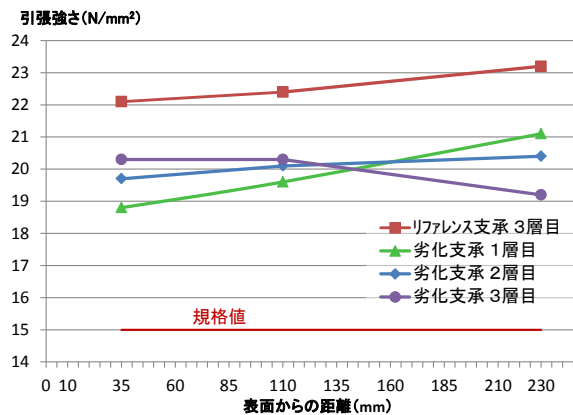


図-12 引張試験（引張強さ）結果

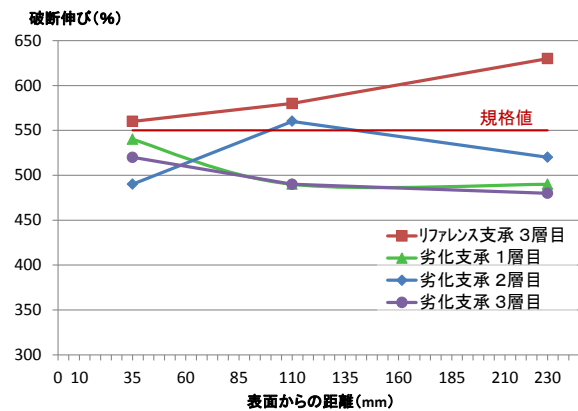


図-13 引張試験(破断伸び)結果

b) セン断変形試験

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-14に示す。新規製作品に比べ劣化支承の弾性率が大きくなっている。当該支承のゴムの弾性係数の呼びはG8であり 0.8 N/mm^2 が基準となる。リファレンス支承が基準値に近い（5%以内）のに対し、劣化支承は平均で20%程度大きい結果となり、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。橋軸直角方向の面より72.5mmの位置から $25 \times 240 \text{ mm}$ の試験片を作成し、表面より15mmの深さを起点に20mmピッチで計9箇所測定した。

図-15に示すとおり、試験値にはバラツキがあるものの、いずれも規格値（G8： 50 ± 5 ）に入っていることが判明した。一方、リファレンス支承に比べ劣化支承は硬い傾向を示した。これは経年劣化によるゴムの硬化とおよそ一致するものと考えられる。また、表面からの距離による影響は明確ではない。

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く離したものはなく、ゴムで破断する結果となった。はく離強さは図-16に示すとおり、一部で規格値（ 7 N/mm 以上）を下回るものもあるが、接着層ではく離では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。また、劣化支承の強度が高い傾向であることから、ゴムの硬化が影響しているものと考えられる。

なお、JIS規定では鋼板にゴムを接着させた試験片を使用するのに対し、今回のように既存積層ゴムから取り出して製作する試験片は、鋼板とゴムの境界付近をカッターで切断したものとなるため、そのことが影響していると考えられる。

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計測した。

リファレンス支承の最深部（表面より175mmの位置）の残量を100%とした場合の各測定箇所割合を図-17に示す。ここで薬品Aはアミン系、薬品Bはワックス類である。アミン系老化防止剤は耐熱性、耐オゾンき裂性、耐日光性等に優れるという特性を有する⁴⁾ことから、劣化支承において表面に近いほど消費されて残量が少なく

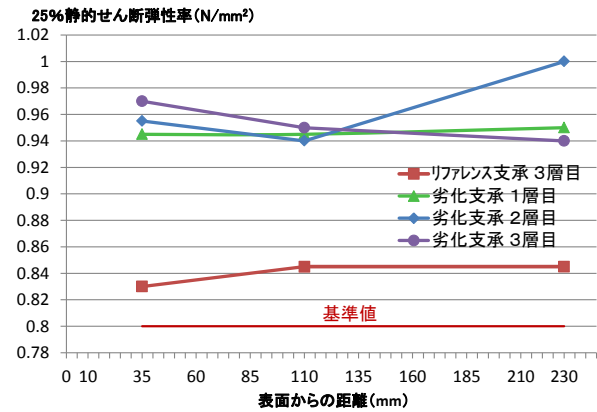


図-14 セン断変形試験結果

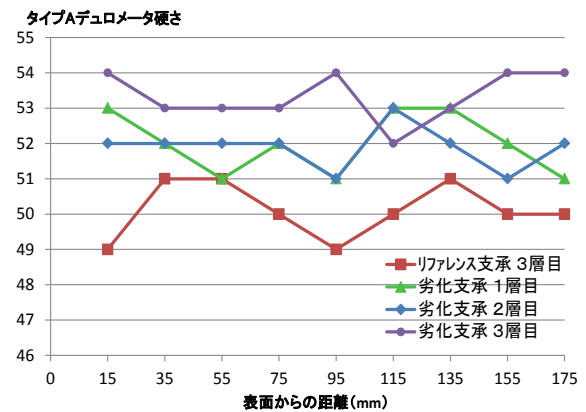


図-15 硬さ試験結果

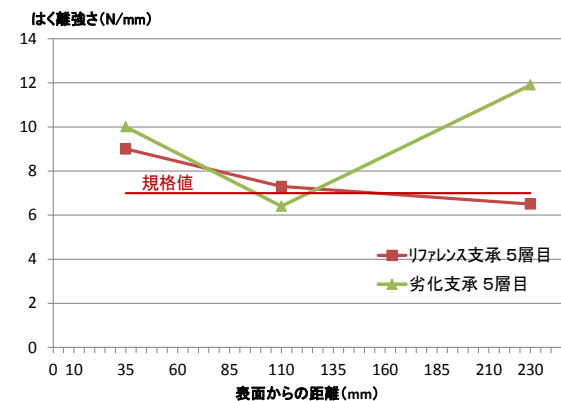


図-16 接着剤はく離試験結果

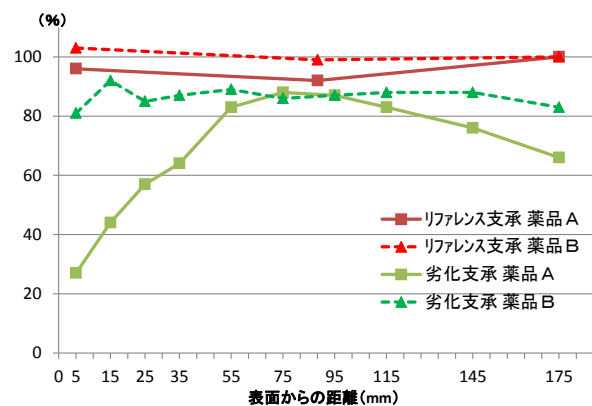


図-17 組成分析（老化防止剤残量）結果

なっている傾向が確認された。一方、ワックス類はアミン系と併用すると耐オゾン性が向上し、表面き裂を防止する効果がある⁵⁾が、本試験では幾分か消費されているものの、表面からの深さ方向で明確な変化は確認されなかった。

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⁶⁾，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-18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、劣化支承はバラツキがあるものの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。

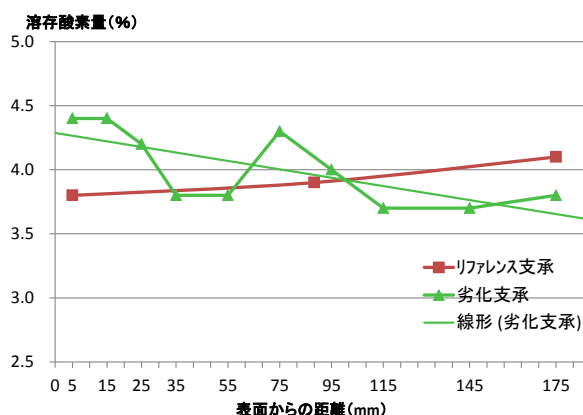


図-18 組成分析（溶存酸素量）結果

(3) 目視観察

力学試験後のゴム支承の外観及び切断面観察を実施した。写真-5に外面及び切断後の内部状況の一例を示す。外面は特段目立った変化は確認できなかった（当初の損傷を除く）が、切断後の内部状況は鉛の変形によりプラグ孔に空隙が生じ、一部は鉛がゴムへ押し出されゴムと鋼板との接着面が剥離した状態にあった。併せて鉛プラグの割れが生じていることや土状の紛体の付着も確認された。

このような状況に至ったメカニズムは現時点では未解明だが、供用中（常時）や載荷試験時の変形、あるいは何らかの劣化因子の浸入が影響しているものと推察される。



写真-5 支承外面（上）及び内部状況（下）

5. 結言

鉛プラグの突出が見られた経年劣化損傷LRBの保有性能を水平載荷による力学試験及び材料試験により確認するとともに、各々リファレンス支承との比較により残存性能の検証を行った。これらにより得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 劣化支承とリファレンス支承との比較から、経年劣化によるゴムの硬化により剛性が増加しているものと推定される。
- 等価減衰定数及び切片荷重の比較より、減衰性能が低下している傾向が見られる。この主要因としては鉛プラグの劣化もしくは突出による鉛総量の減少による影響が考えられる。
- 終局限界試験におけるゴム破断時の水平荷重及びせん断変形ひずみは両支承で大きな差異がなく、変形性能は確保されていると言える。
- 常時残存性能については、50年相当の載荷による復元力特性の著しい変動は見られず安定な挙動が得られている。

常時性能及び変形性能に関しては特段の問題はないと考えられる。ただし地震時残存性能については、リファレンス支承の試験結果は参考値であるため、直ちに結論を導くことは困難なため、並行して実施している解析と併せて、より詳細に評価する必要がある。

なお、目視観察において鉛プラグの変状が顕著であった。鉛の突出損傷と併せて、減衰性能の低下に影響している可能性が考えられることから、今後はこちらにも着目し調査することが望ましい。

謝辞： 本論文執筆にあたり、愛知工業大学耐震実験センター長・青木徹彦教授（当時、現愛知工業大学名誉教授）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。

参考文献

- 1) （社）日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004。

- 2) 阪神高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，2009.
- 3) 鶴野禎史・森重行雄・今井隆・竹之内勇：天然ゴム系ゴム支承のせん断変形性能，第2回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.143-148, 2000.
- 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) 安藤慎二・深町真治：老化防止剤，日本ゴム協会誌第82巻第2号，pp.45-49, 2009.
- 6) 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.

EXPELIMANTAL VERIFICATION FOR REMAINING PERFORMANCE OF LEAD RUBBER BEARING WITH AGED DETERIORATION

Kunihiro HAYASHI, Yukio ADACHI, Katsuaki KOMOTO, Hitoshi YATSUMOTO,
Akira IGARASHI, Ji DANG and Tomohiro HIGASHIDE

Since Hyogo-ken Nanbu Earthquake in 1995, many laminated rubber bearings have been installed because of horizontal force dispersion or seismic isolated design. Although some rubber bearings with long period in service are reported several damages caused by aged deterioration, it is not clear about the bearing performance and most damaged bearings are remained as it is. In this study, the authors carried out the load test and the material test using some aged deterioration damaged lead rubber bearings, in order to verify the remaining performance. As a result, it turned out that the bearing stiffness was increased and seismic damping performance was reduced caused by aged deterioration of natural rubber and lead.