経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の 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 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: kunihiko-hayashi@hanshin-exp.co.jp

² 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 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: katsuaki-komoto@hanshin-exp.co.jp

⁴ 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 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

⁶ 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 京都大学大学院理工学研究科 (〒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, aging deterioration, remaining performance, loading test, material test

1. はじめに

1995年に発生した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約88,000基に対して3割強となっている。

一方、ゴム支承の大部分を占める構成材料は天然ゴム(NR: Natural Rubber)であるが、この天然ゴムは、一般的に耐オゾン抵抗性に乏しいという特徴を有する¹⁾とともに、熱や紫外線などの環境依存性劣化、外力によるゴ

ム材料の疲労が劣化要因として挙げられる^{2),3)}。すなわち、ゴム支承は長期間の使用により劣化しやすいという特性を有しているが、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、これらゴム支承の大半のものは経過観察中にあるというのが実状である。

また、2011年の東北地方太平洋沖地震及びその余震において、破断を含む複数のゴム支承の損傷が報告されている^{4),5)}。その中でも、破断したゴム支承に対して行われた性能試験の結果より変形性能が新規製された再現支承に比べて大きく低下しているという特筆すべき内容

も報告されている。

これらを踏まえると、ゴム支承の劣化及びそれに伴う損傷は普遍的に発生する現象であることから、本研究ではゴム支承の経年劣化損傷が常時ならびに地震時残存性能に与える影響について、実際に損傷したゴム支承を用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. ゴム支承の現況と着目損傷

(1) 資産と供用年数

阪神高速道路では 1983 年よりゴム支承が使われ始め、現在その資産数は約 28,000 基となっている。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。

ゴム支承の種類としては、初期はコンクリート桁でのリングプレートタイプ支承が主流であったが、1990 年頃から主桁連結に伴う水平力分散を目的とした積層タイプが使われるようになった。震災後は前述のとおり耐震性能向上のためのゴム支承（鉛プラグ入りタイプや高減衰ゴムタイプなど）となっている。

(2) 損傷状況

2006～2012 年度の間に報告されたゴム支承の A ランク損傷は 811 件であり、その損傷内訳を図-2 に示す。A ランク損傷とは「機能低下があり、対策の必要がある」場合に判定される損傷のことである。

ゴムの経年劣化による損傷と考えられる「きれつ」や「上沓被覆ゴム破れ」、ゴム破れに伴う「鉛突出」は現時点では 1 割弱であるが、今後経年劣化が進めば増加していくと予測される。ここで「きれつ」はオゾン劣化もしくは変形に伴う応力集中部（引張部）で生じた筋状のクラック、「破れ」は被覆ゴムが引張を受けて上沓の角部において開口した状態のことであるが、両者に厳密な区分はない。これらの事例を写真-1 に示す。

なお「鉛突出」のメカニズムとしては、以下の 2 パターンが考えられる。

- ①古い鋼板桁はフランジ幅が狭く、支承取替えの際にソールプレートをフランジ幅に合わせざるを得ないため、一部の鉛プラグがソールプレートに覆蓋されず、上載荷重が支承全体に対して不均一にかかる影響により突出に至る。
- ②鉛プラグから支承側面までの縁端距離が小さい場合、その方向の拘束圧が相対的に小さくなることから、地震力もしくは桁の温度伸縮に伴うせん断変形を受けると鉛が拘束力の小さい側へ押し出され、それが繰り返されることで最終的にはゴムを破って側面から突出する。

図-1 阪神高速におけるゴム支承の供用年数

図-2 積層ゴム支承のAランク損傷

写真-1 ゴム支承損傷（上：きれつ，下：破れ）

写真-2 は阪神高速 3 号神戸線で発見された支承上面からの鉛プラグ突出であり、この損傷要因は前述の①に該当する。この支承は既に取り替えられているものの、類似の損傷は他の支承でも報告されており、取替え以外の補修方法がないために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。

上記のような現状を鑑み、本研究においてはゴムのきれつ（破れを含む）及び鉛の突出に着目し、それらが変形性能などの残存性能にどの程度影響しているかを検証することとする。この理由としては、ゴムのきれつが地震時の大変形により破断リスクが高まる可能性があることや、突出による鉛の減少により設計時に想定している地震エネルギー減衰性能が期待できないことが挙げられる。

3. 既往の研究及びその課題

ゴム支承の経年劣化に関しては、加熱促進試験及び数値解析による評価は行われている⁹⁾ものの、実際に長期間使用されたゴム支承を用いた試験により残存性能について述べられている事例は多くない。また、現在の設計

写真-2 鉛プラグの突出

写真-3 現地状況

においてはゴム支承の経年劣化による性能低下が考慮されていないのが実状である。このような現状に対して、設計における限界性能が確保されているのか把握が不可能という課題がある。

また、東北地方太平洋沖地震では仙台東部道路及び仙台北部道路において設置後約 10 年のゴム支承が破断するという損傷が発生しており、その損傷ゴム支承ならびに建設当時の材料表から再現製作した支承を用いた性能試験を行った結果、せん断変形性能が低下しているということが分かった⁵⁾。しかしながら、その低下が経年劣化によるものか、地震の影響によるものなのかについては明確に結論づけられてはいない。

一方、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB: Lead Rubber Bearing）に使用される純鉛については、機械的性質がほぼ自明の材料であり、一般に降伏による疲労が進行しにくいという特徴からほとんど研究対象として取り上げられていない。しかしながら、先の東北地方太平洋沖地震において、建築用の免震鉛ダンパーにきれつが生じている⁷⁾など、想定していなかった損傷が明らかになっている。現時点では鉛の経年劣化メカニズムは不明であることや供用中ゴム支承内部の鉛プラグの状況は把握不能であることから、設計上求められる減衰性能を有するか確認できないという課題がある。

4. 性能確認対象支承

本研究において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LRB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-3、上下部構造概要を図-3に示す。

建設当初（1970年竣工）は単純桁及び鋼製支承であったが、1995年に主桁連結化による水平力分散のため支承取替えが行われている。なお、当該箇所は連結桁（11径

図-3 上下部構造概要図

間)の端支点部に位置している。取替え後のゴム支承は図-4に示す構造図のとおり、天然ゴム5層の積層構造である。

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 $S_1=6.87$ 、二次が $S_2=4.71$ 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、設計は1990年道路橋示方書ならびに1991年道路橋支承便覧に基づき、当時の地震時許容せん断ひずみ175%に対して設計され、試験値を満足している。

損傷内容は写真-4に示すように、鉛プラグが支承の橋軸方向に面した側面から突出している。第2章(2)で述べた鉛突出のパターンのうち②に該当すると考えられ、鉛が内部より押し出されたことによりゴムが破れた(きれつ長 $L=100\text{mm}$)ものである。点検時に鉛の突出量は測定していないが、損傷位置は上下鋼板に近い箇所に見られ、ここはせん断変形による引張や圧縮を受けやすい箇所でもある。

過去の点検履歴より損傷は2005年(取替え後約10年)に側面ふくれが、2008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。なお、堺P181橋脚では同一支承線上に5基あり、全てほぼ同様な損傷状況である。参考までにゴム表面に見られる塗膜は桁の塗装塗替工事の際に施されたものであり、本来は不要のものである。

5. 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⁸⁾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(以下、「劣化支承」という。)及び新規製作品(以下、「リファレンス支承」という。)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。前述のとおり水平せん断ひずみ175%として設計されており、当時の設計値は等価剛性 2.08kN/mm 、等価減衰定数18%である。

試験は図-5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。

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

図-4 支承構造図

写真-4 損傷状況(左:全景, 右:損傷部拡大)

表-1 力学試験のプロトコル

試験項目		試験方法	荷重変位 / 荷重	繰返し回数	荷重速度	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 位荷重試験	±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 位荷重試験	±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 位荷重試験	著しい耐荷力の低下まで	—	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 位荷重試験	±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

図-5 載荷装置概要図

図-6 LRBの復元力履歴特性の比較 (L1・セット3)

表-2 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	0.090	0.196	33.9	69.6
2	2.34	2.20	0.077	0.192	29.8	66.8
3	2.31	2.16	0.076	0.185	29.4	66.4

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回の正負交番荷重を合計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-6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-2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が低下したものと考えられる。参考ながら水平せん断ひずみ 175%の設計値と比較すると、等価剛性はやや大きいもののリファレンス支承で平均+8%、劣化支承では+15%である。一方、等価減衰定数はリファレンス支承では設計値以上だが、劣化支承は大幅に下回っている。

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することができる。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。

また、鉛プラグが減衰性能を発揮するためには、ゴムと鋼板から受ける一様な拘束圧のもとで純せん断となる必要がある。しかしながら、突出に伴う鉛量の減少や形状変化によりプラグにかかる拘束圧が当初より低下かつ不均一となるため、鉛内部

で回転が発生し、曲げ変形を受けることが考えられる。これにより水平方向のせん断変形、すなわち鉛の塑性変形が抑制され、期待される減衰レベルに達しないとも言える。

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-7に示す。履歴ループには大きな差異はないが、劣化支承では水平せん断ひずみが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。表-3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確認される。

図-7 LRBの復元力履歴特性の比較 (L2・セット1)

表-3 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	0.069	0.133	41.1	78.9
2	2.28	2.10	0.067	0.113	37.3	67.2

図-8 L2試験における切片荷重 Q_d の推移

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-8)。これは大変形による鉛の変状・抜け出しが生じた可能性がある。

試験後に支承を切断したところ、写真-5に示すように鉛プラグの破断や側面への飛び出しが確認されていることから、これが切片荷重の減少と関連すると思われる。

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载荷を行った。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-9に示す。

写真-5 L2試験後のリファレンス支承鉛プラグ状況

図-9 LRBの終局限界性能試験の比較

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。ここで、ゴム体の破断開始時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(図-9の最初の荷重ピーク値)。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。なお、劣化支承は破断開始直後にいったん荷重が下がったが、载荷を継続すると完全破断まで荷重が増加している。これは破断面での摩擦により回転力が発生したためと考えられる。

写真-6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、さらに载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。

d) 常時残存性能確認試験

常時残存性能確認試験として、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返しせん断疲労試験に相当する载荷を行った。年間あたりの桁の温度伸縮による支承変形の累積変形量 ΔL は式(1)を用いて⁹⁾、累積変形量を常時変形許容ひずみである $\pm 70\%$ ($\pm 49\text{mm}$) の繰返し载荷に対応させる。

$$\Delta L = \Delta T \alpha l_m \quad (1)$$

ここに、

ΔT : 平均日較差であり、 7.35°C とする

α : 桁の線膨張係数であり、 12×10^{-6} とする⁹⁾

l_m : 伸縮桁長 149m

上式から年間の移動量は $9,594\text{mm}$ と算出され、これを $\pm 70\%$ の繰返し载荷に置換すると、約50サイクルとなる。これを1セットとし、年間の橋桁の温度伸縮による常時変形量に相当する変形量とする。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を満足するものとする。

10セットごとの履歴曲線の重ね合わせ比較を図-10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-11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。等価減衰定数は0.094(1セット目)から0.083(50セット目)と約1割低下しているが、図-10の履歴曲線の変化に大きな差異は確認されなかった。つまり常時変形を長期間受けると減衰性能は低下するが、致命的な影響は受けていないと言える。なお、等価減衰定数に関しては既往の研究¹⁰⁾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3~4%程度であると言える。

写真-6 破断状況 (上: 劣化, 下: リファレンス)

図-10 LRBの常時性能試験における履歴曲線

図-11 常時性能試験における支承パラメータの推移

表-4 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
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-4に示す。これらの項目は共通仕様書⁸⁾における天然ゴムの物理的性質と、支承便覧⁹⁾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-12に示す位置から採取した。併せて、表-4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、劣化支承においては載荷試験時トラブルによりL2試験の1セット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。

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-13に引張強さ結果を、図-14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。

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

図-12 ゴム試験片の採取平面位置 (劣化支承)

図-13 引張試験 (引張強さ) 結果

図-14 引張試験 (破断伸び) 結果

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-15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-16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-17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）の残存量を100%とした場合の各測定箇所の割合を図-18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¹⁰⁾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

図-15 せん断変形試験結果

図-16 硬さ試験結果

図-17 接着剤はく離試験結果

図-18 組成分析（老化防止剤残量）結果

止する効果がある¹²⁾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²⁾、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-19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-19 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-7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粉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侵入が影響しているものと考えられる。

写真-7 支承外面（上）及び内部状況（下）

6. 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は両支承で大きな差異はないが、水平せん断ひずみは劣化による影響が少なからず現れている。しかしながら、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、リファレンス支承は当時の材料表に基づき再現製作しているが、製造方法の完全再現まで

は困難であることから、試験結果は参考値と考えることとする。そのため、地震時残存性能については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) 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.
- 3) 阿波根朝浩：ゴムの疲労破壊，日本ゴム協会誌第75巻第6号，pp.246-251，2002.
- 4) 土木学会地震工学委員会：第15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 東日本大震災による橋梁等の被害分析WG報告書，pp.II 46-51，2012.
- 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 Vol.59A，pp.516-526，2013.
- 6) 伊藤義人，佐藤和也，顧浩声，山本吉久：橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究，土木学会論文集A，Vol.62，No.2，pp.255-266，2006.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，国総研資料第674号／建築研究資料第136号，2012.
- 8) 阪神高速道路株式会社：土木工事共通仕様書，2009.
- 9) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編，丸善，2012.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

(2013. 11. 15 受付, 2014. 2. 11 修正, 2014. 2. 22 受理)

EXPERIMENTAL VERIFICATION FOR REMAINING PERFORMANCE OF LEAD RUBBER BEARINGS WITH AGING 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 aging 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 aging deterioration of natural rubber and lead.