

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

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	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		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)
⁴ 正会員	工修	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)
⁵ 正会員	Ph.D.	京都大学大学院工学研究科准教授	(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
⁶ 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)
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)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、積層ゴム支承の採用により地震力分散設計や免震設計等の設計手法により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、積層ゴム支承の占める比率は全数87,605に対して約32%となっている。

一方、ゴム支承に使用される天然ゴム（NR）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残存機能に与える影響について、試験及び解析によるアプローチにより明らかにするものである。

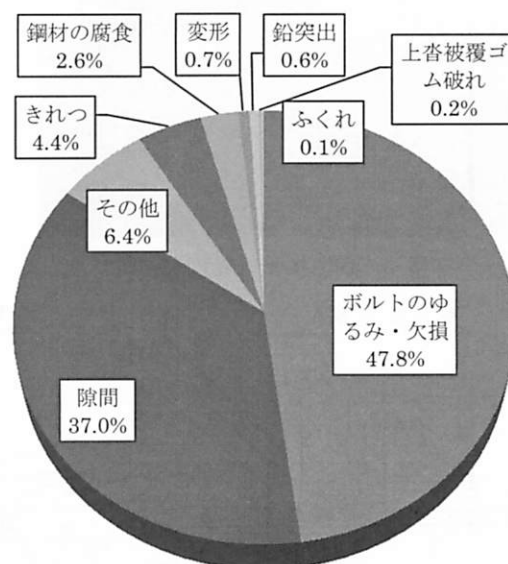


図-1 積層ゴム支承のAランク損傷

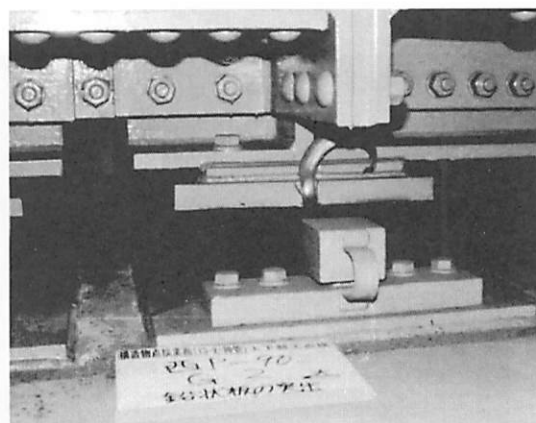


写真-1 鉛プラグの突出

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、その損傷内訳を図-1に示す。ゴムの経年劣化による損傷と考えられる「きれつ」や「被覆ゴム破れ」、ゴム破れに伴う「鉛突出」は全体としては1割弱であるが、今後増加していくと想定される。

写真-1は3号神戸線で発見された鉛プラグ突出である。この支承は後に取替えられているが、類似の

損傷は他路線でも報告されており，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。

3. 性能確認対象支承

今回残存性能試験を実施するのは，15号堺線の堺P181橋脚の鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）である。当該支承は，支承性能への影響が大きいと考えられる損傷である鉛プラグの突出が発生している。現地状況を写真-2，構造概要を図-2に示す。建設当初（昭和45年竣工）は単純桁＋鋼製支承であったが，平成7年に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。取替え後の支承は図-3に示す構造図のとおり，天然ゴム（NR）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 $S_1=7.26$ ，二次が $S_2=5.00$ であり，地震時のエネルギー減衰を目的とする鉛プラグ（φ55mm）が4本配置されている。

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，同一支承線上で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。なお，当該箇所は連結桁（11径間）の端支部に位置している。



写真-2 現地状況（堺 P181）

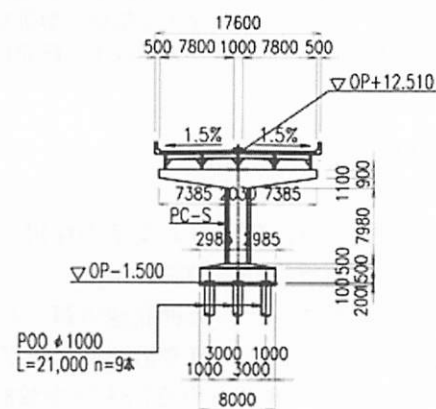


図-2 堺 P181 構造概要図

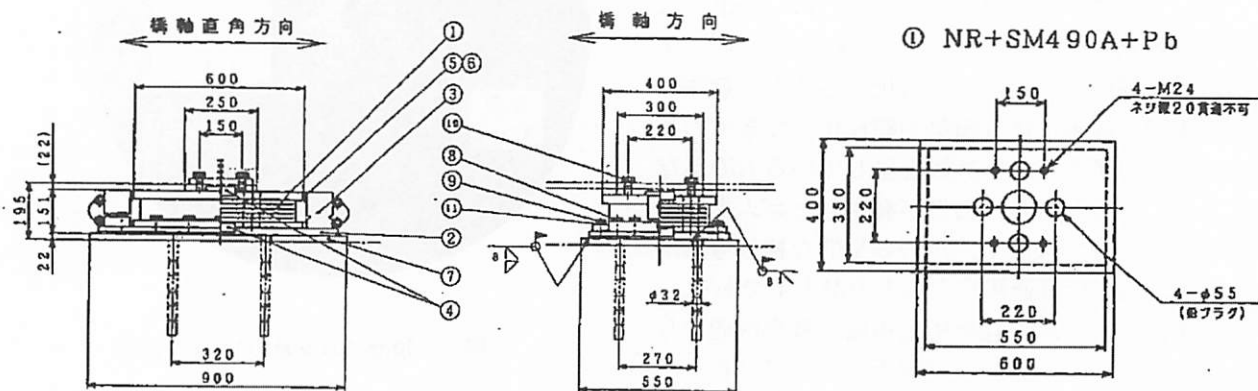


図-3 支承構造図

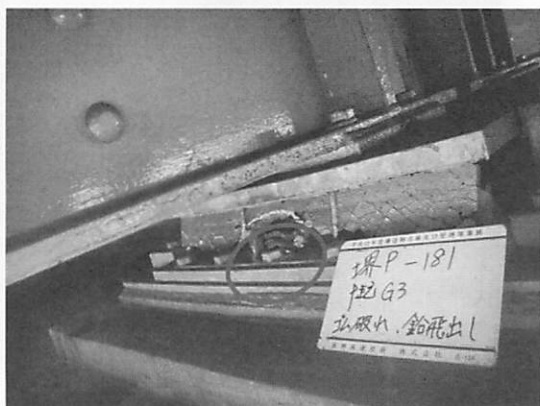


写真-3 損傷状況

4. 残存性能確認試験

(1) 試験内容

a) 力学試験

経年劣化後の地震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、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ばりを介し、2000kN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。

b) 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。

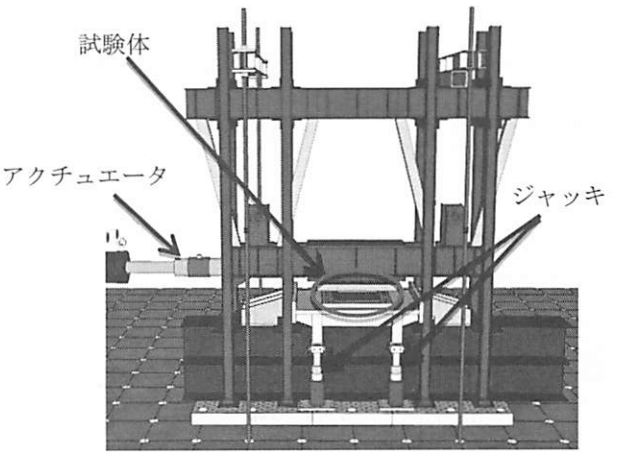


図-4 載荷装置概要図

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	2～3mm/秒	著しい変形性能低下まで	3セット以上
				（セット間冷却1時間）		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	1～2mm/秒	著しい変形性能低下まで	1セット以上
				（セット間冷却1時間）		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

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
化学試験	⑤	組成分析	接着性能	7N/mm以上	JIS K 6256
			老化防止剤残量	—	JIS K O123
			溶存酸素量	—	—

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。

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-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、図に記載の層からも採取した。

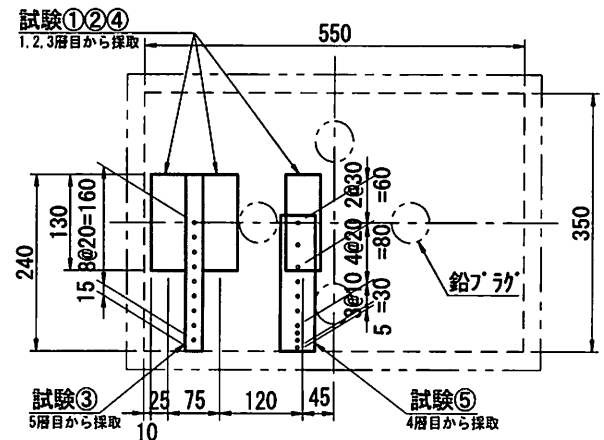


図-5 ゴム試験片の採取平面位置

(2) 試験結果

a) 力学試験

L1の残存性能確認試験はせん断ひずみ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セットを実施した。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-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やや増加しており、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。

L2の確認試験（目標変位：せん断ひずみ250%）における両支承の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、せん断ひずみ（変位）が大きくなるにつれ荷重が増加していることから、ゴムの剛性が増加していると想定される。表-4に示す各パラメータの比較から、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。

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の速度で増加させるものとした。試験で得られた支承水平反力－水平せん断ひずみ関係を

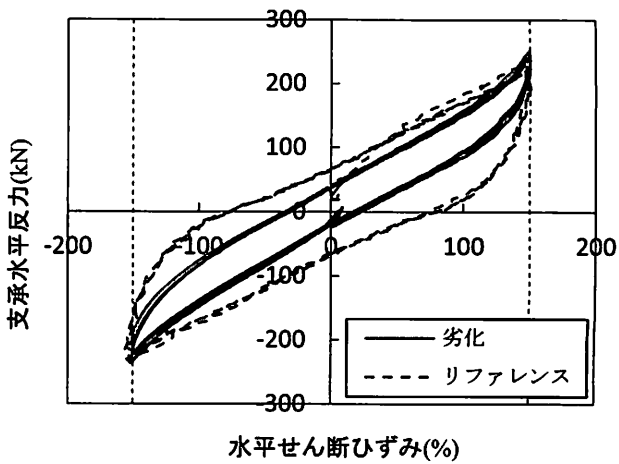


図-6 LRBの復元力履歴特性の比較（L1・セット3）

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

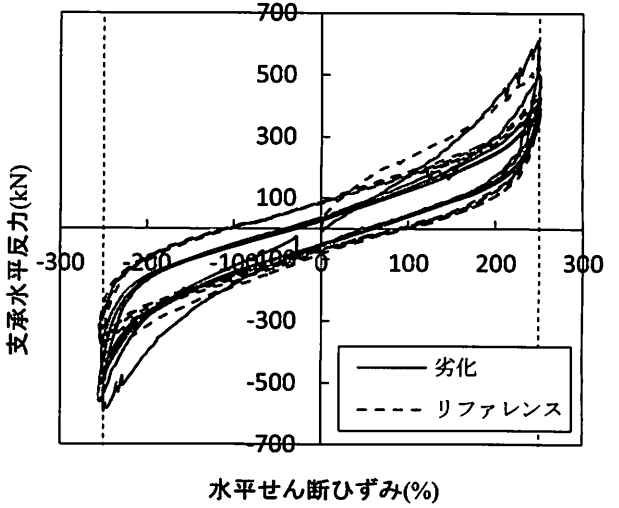


図-7 LRBの復元力履歴特性の比較（L2・セット1）

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-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が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と考えられる剛性の増加によ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。

写真-4及び写真-5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）、さらに载荷を続けると、破れた部分が徐々に広がり、その後一気に全体が断裂し、荷重が低下した。

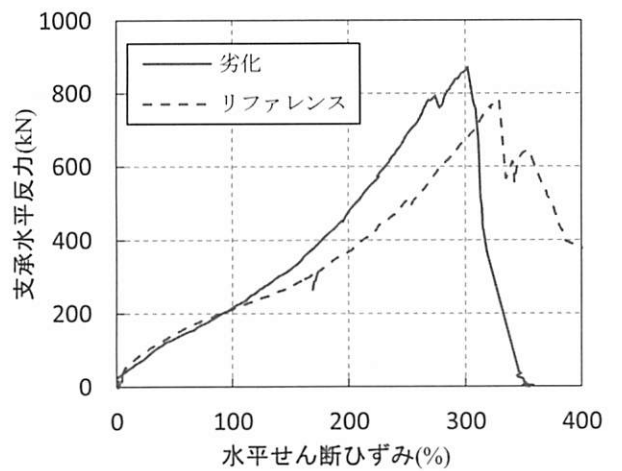


図-8 LRB の終局限界性能試験の比較

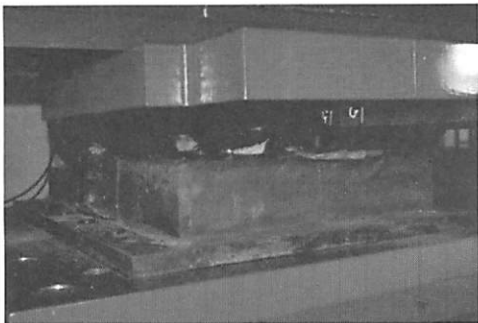


写真-4 劣化支承の破断状況

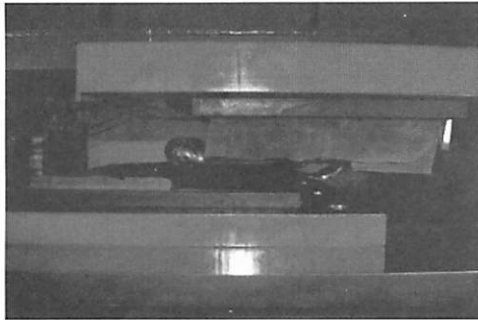


写真-5 リファレンス支承の破断状況

b) 材料試験

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。図-9に引張強さ結果を、図-10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15N/mm²（=15MPa）以上が確認されたものの、劣化支承の破断伸びにおいて規格値550%をほぼ下回る結果となった。なお、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。

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）測定結果を図-11に示す。新規製作品に比べ劣化支承

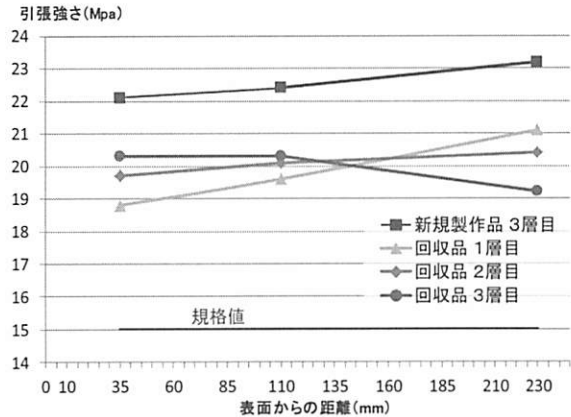


図-9 引張試験（引張強さ）結果

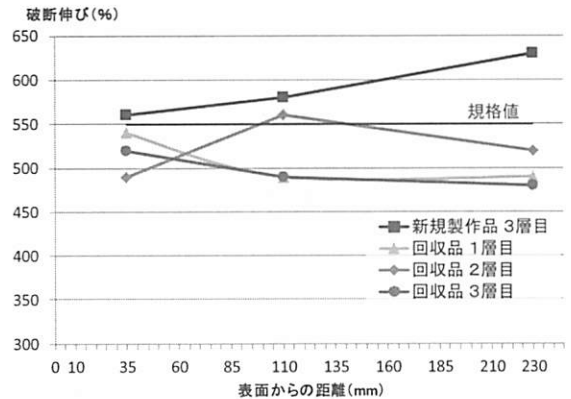


図-10 引張試験（破断伸び）結果

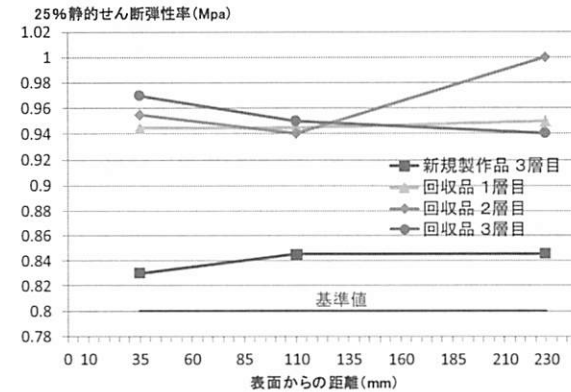


図-11 せん断変形試験結果

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、 $0.8 \text{ N/mm}^2 (=0.8\text{MPa})$ が基準となるためリファレンス支承は5%程度、劣化支承は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での相関性は見られなかった。

硬さ試験はデュロメータという試験機を用いて計測した。図-12に示すとおり、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およそ一致するものと考えられる。

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³⁾、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-13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。

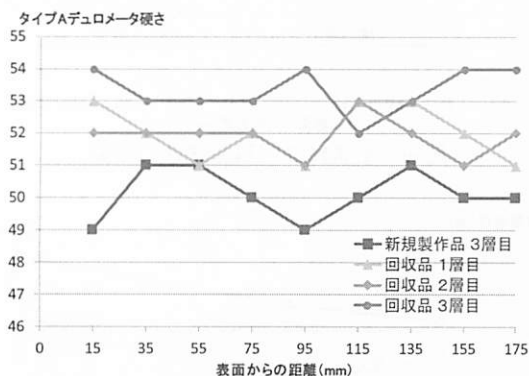


図-12 硬さ試験結果

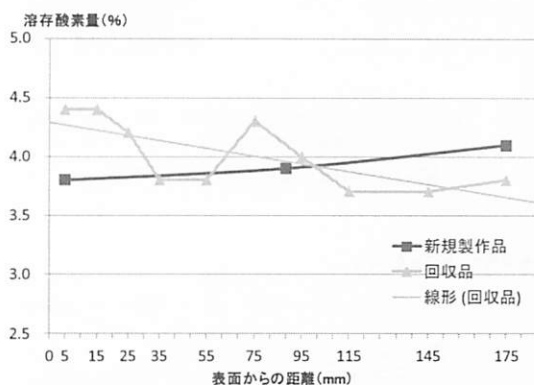


図-13 組成分析（溶存酸素量）結果

c) 目視確認

力学試験後の支承の外観および切断面観察を実施した。写真-6に外面およ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不明だが、供用中（常時）や载荷試験時の変形、あるいは何らか劣化因子の浸入が影響しているものと推察される。

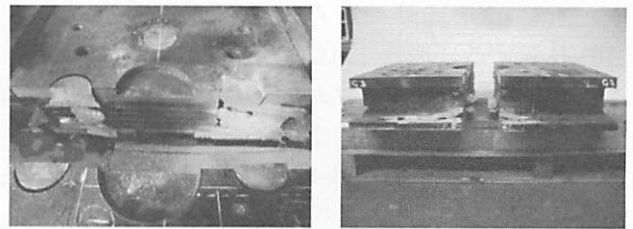


写真-6 支承外面（左）および内部状況（右）

5. 簡易モデルの動的応答解析に基づく残存性能評価

残存性能確認試験にて得られたパラメータに基づき、L2地震動入力に対する動的応答の観点から見た経年劣化支承の基礎的な残存性能の評価を試みた。

(1) 動的応答解析の概要

図-14に示すように堺P181を含む11径間連結鉄桁橋を単純化して、橋桁部（上部構造）一質点、橋脚部一質点とした2自由度系モデルを用いて非線形時刻歴動的応答解析を行った。ゴム支承は1支承線あたり5基用いられ、桁端橋脚に5基、中間橋脚に10基設置されており、支承1基当たりの死荷重490kNに支承数110を掛けて上部構造質量 $m1=53,900\text{kN}$ の質点をLRBが支持するモデルとした。

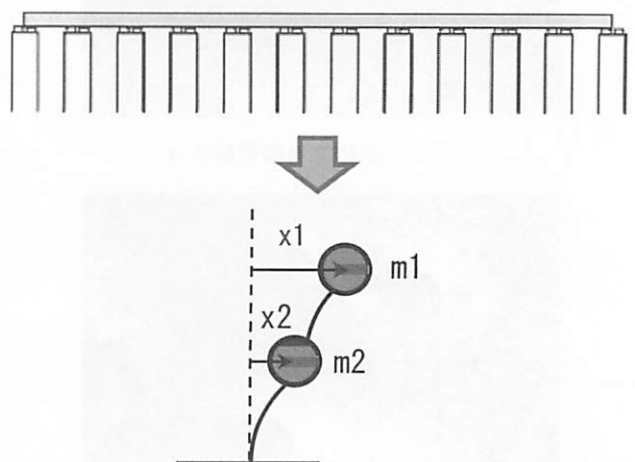


図-14 解析モデル概念図

支承部の履歴復元力特性は、劣化支承とリファレンス支承を用いたそれぞれの実験結果を基に、バイリニアモデルでモデル化している。L2地震動に対する応答を解析することから、L2試験（せん断ひずみ250%）のセット1の結果を用いた。モデルのパラメータは、実験の履歴曲線から初期値を取り出し、最適化計算の手法であるKH法⁴⁾を用いて、バイリニアモデルのパラメータを同定した。それぞれの支承のバイリニアモデルを図-15及び図-16に、得られたパラメータを表-5に示す。

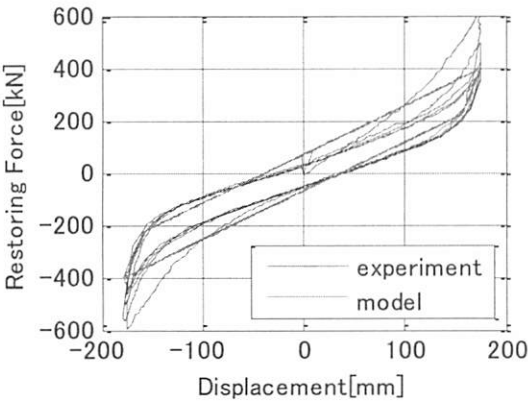


図-15 劣化支承のバイリニアモデル

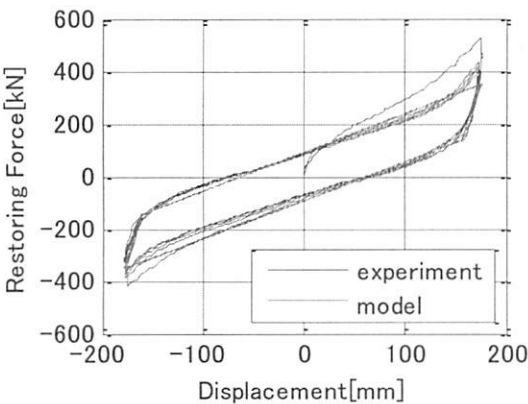


図-16 リファレンス支承のバイリニアモデル

表-5 バイリニアモデルの1支承あたりパラメータ

	劣化支承	リファレンス支承
初期剛性 k_1 (kN/mm)	9.251	12.605
二次剛性 k_2 (kN/mm)	1.869	1.468
切片荷重 Q_d (kN)	69.909	91.601

橋脚については、耐震補強工事の設計計算書より、補強後の橋軸方向の値から必要なパラメータを用いてモデル化している。橋脚質量 m_2 は橋脚等価質量 $W=6,937\text{kN}$ 及び1橋脚あたりで支持する上部構造質

量 $W_U=4,900\text{kN}$ から道路橋示方書Vの式(6.4.8)⁵⁾より計算した1橋脚の質量 $W_p=4,075\text{kN}$ を採用した。

また、橋脚の非線形モデルは骨格曲線をバイリニア型とし、除荷剛性が漸減するClough型モデルとする⁶⁾。ただし、骨格曲線の二次剛性比 $\alpha=0.05$ 、除荷時剛性低下率 $\beta=0.2$ としている。

入力地震波には、道路橋示方書V⁵⁾におけるタイプII地震動の標準加速度波形（I種地盤～III種地盤）計9波を用いた。

(2) 解析結果

9波の入力地震動のうち、II種地盤の地震波（T2-II-1）に対する応答変位時刻歴および復元力履歴の結果を両支承で比較したものを図-17、図-18に示す。劣化支承の解析結果では、試験と同様にせん断ひずみ（変位）が大きくなるにつれ、荷重がリファレンス支承の結果より増加しており、ここからも二次剛性の違いによる影響を見てとれる。

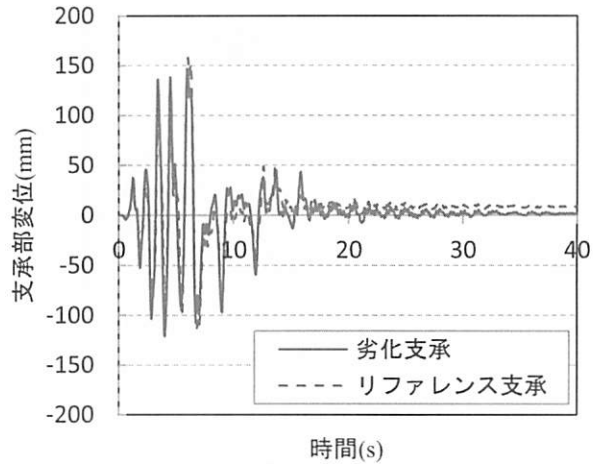


図-17 支承部応答変位時刻歴の比較

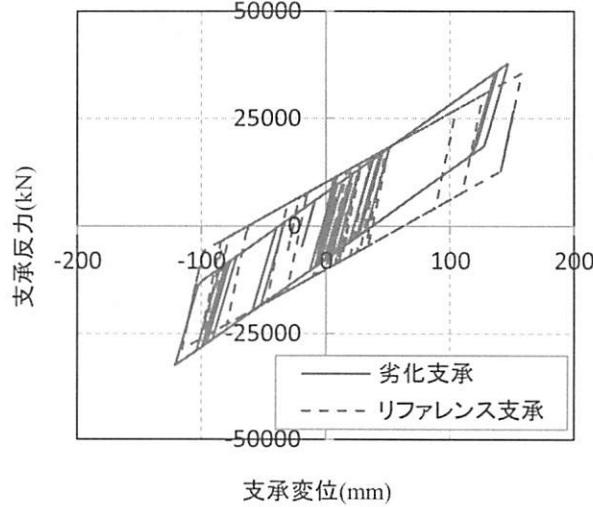


図-18 支承部履歴曲線の比較

全ての入力地震動に対して、劣化支承とリファレンス支承の最大応答せん断ひずみの値の対応関係をまとめたものを図-19に示す。縦軸は劣化支承、横軸がリファレンス支承の値である。なお、両支承の終局限界試験における破断時のせん断ひずみ値を限界値として表示した。

最大せん断ひずみは地盤が軟弱になるほど劣化支承がリファレンス支承より小さくなる傾向となった。いずれの支承も道示波に対する応答において、破断まで至ることはないと考えられる。

地震時の下部構造への最大水平荷重への影響に対応する絶対応答加速度についての比較を図-20に示す。リファレンス支承と比べて絶対応答加速度は平均で1.087倍増加した。

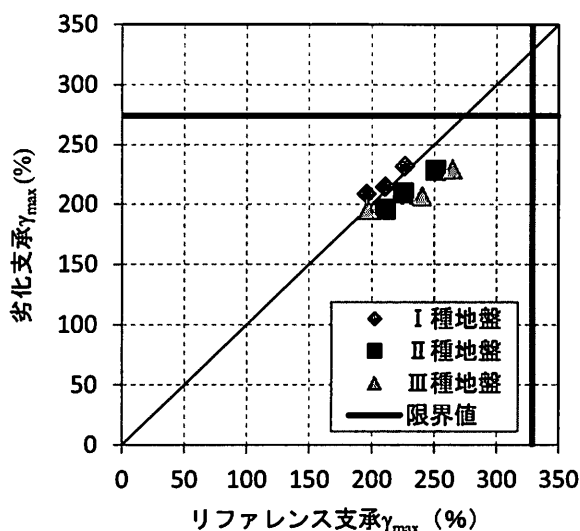


図-19 最大応答せん断ひずみの比較

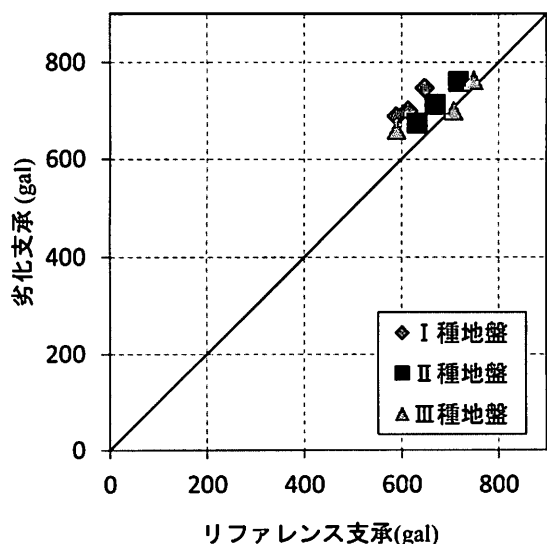


図-20 最大応答絶対加速度の比較

6. おわりに

鉛プラグの突出が見られた経年劣化損傷LRBの残存性能をせん断載荷試験により確認するとともに、簡易モデルを用いた非線形時刻歴応答解析に基づき動的性能の検討を行った。これらの検討により得られた知見をまとめれば、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から、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。
- 橋梁系を単純化したモデル及び試験より得られたパラメータを用いた解析により、L2地震時の応答値は支承の破断まで至るものではない。

残存性能確認試験から常時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ことや、簡易な解析モデルでの検証にとどまっていることから、直ちに結論を導くことは困難なため、より詳細に検討・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) 伊藤・矢澤・佐藤・顧・忽那・山本：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.
- 4) 黒田英夫：Visual Basicによる工学計算プログラム，CQ出版社，pp.69-74, 2001.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書 V耐震設計編，丸善，2012.
- 6) Clough, R.W. and Johnston, S.B. : Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirement, Proc. of Japan Earthquake Engineering Symposium, 1966.