

# ゴム支承の損傷メカニズムに関する基礎的検証

林 訓裕<sup>1</sup>・足立幸郎<sup>2</sup>・坂本直太<sup>3</sup>・五十嵐 晃<sup>4</sup>・党 紀<sup>5</sup>・大谷 修<sup>6</sup>・下池利孝<sup>7</sup>

<sup>1</sup>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: kunihito-hayashi@hanshin-exp.co.jp

<sup>2</sup>正会員 阪神高速道路(株)保全交通部(541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)

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

<sup>3</sup>正会員 阪神高速技術(株)技術部(〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町1-4-1)

E-mail: naota-sakamoto@hex-eng.co.jp

<sup>4</sup>正会員 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

<sup>5</sup>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

<sup>6</sup>正会員 (株)コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部(〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台1-5-5)

E-mail: otani.osamu@kki.kobelco.com

<sup>7</sup>正会員 (株)コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部(〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台1-5-5)

E-mail: shimoike.toshinori@kki.kobelco.com

地震力分散設計や免震設計等によりゴム支承の普及が著しいが、長期間供用され劣化損傷のあるゴム支承の残存性能確認試験を実施したところ、減衰性能が低下しているという結果を得るとともに鉛プラグが破断していることを確認した。そこで本研究では、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の経年劣化損傷に着目し、試験後の鉛プラグの観察を行うとともに、FEMによる挙動解析により発生メカニズムを検証した。その結果、鉛プラグの塑性ひずみが引張場で生じていることがわかり、そこからき裂の発生へ至るものと推定された。

**Key Words** : lead rubber bearing, damaging mechanism, plastic strain

## 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。阪神高速道路においても、1980年代半ばからゴム支承が導入され、全支承約88,000基に対しておよそ1/3を占めるまでとなっている。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対策工事(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が多くを占める。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課題となっているが、劣化による支承性能への影響は定量的に評価されていない。そのような中、劣化損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承(Lead Rubber Bearing, 以下「LRB」と呼ぶ。)の残存性能確認試験において減衰性能が低下しているという結果が得られている<sup>1)</sup>。これは鉛プラグの劣化の影響と考えられるため、本研究で

はLRBの劣化損傷の発生メカニズム検証を目的として、損傷鉛プラグの状況確認ならびに原因推定を行う。併せて、供用下のLRBをモデル化し、挙動解析によるせん断変形時の内部応力状態を把握するものである。

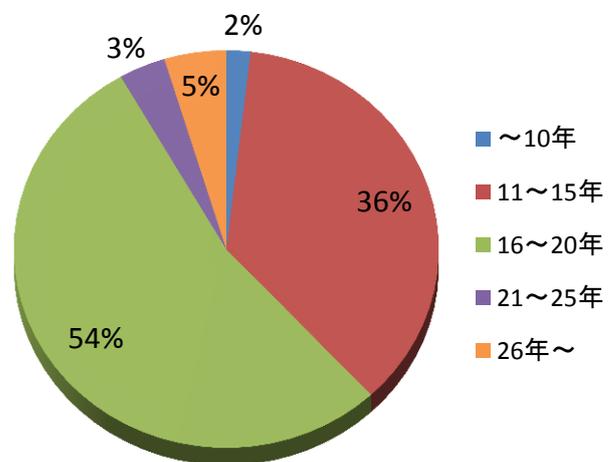


図-1 阪神高速におけるゴム支承の供用年数

## 2. LRBの沿革及び発生損傷

### (1) 沿革

免震用ゴム支承の一種であるLRBは1970年代にニュージーランドのW.H.Robinsonら<sup>2)</sup>によって開発された免震デバイスで、積層ゴムに円柱状の孔を設け、そこに高純度の鉛プラグを圧入し一体化したものである。鉛は非常に低い応力で降伏し、塑性域において安定した変形特性を有することに加え、塑性変形により生じた結晶格子のずれは変形終了後の再結晶と結晶粒子の成長が常温で速やかに行われることで変形前の性質に戻る<sup>3)</sup>。これらの特性を利用して地震エネルギー減衰、すなわち地震応答の低減を図っている。

阪神高速道路では、1990年代初頭から主桁連結に伴う水平力分散を目的として導入（鋼製支承からの取替え）しており、最も古いもので20年以上経過している。兵庫県南部地震後は耐震性向上のために多く採用されている。

### (2) 供用下における損傷

ゴム支承の供用年数の増加に伴い、経年劣化と考えられる損傷が報告されてきている<sup>1)</sup>。LRBにおける代表的な損傷を以降に示し、発生要因を考察する。

#### a) ゴムきれつ

きれつは写真-1に示すようにゴム表面に発生する。この事例は被覆ゴムに生じているものであるが、桁伸縮によるひずみ変形で引張応力が大きく生じている部分で起きていると考えられる。また天然ゴムの場合は耐オゾン抵抗性に乏しいため、オゾン劣化に起因するきれつの可能性もある。

#### b) ゴム側面ふくれ

支承側面の一部がふくらむもので、これは内部の鉛プラグが何らかの変状によりゴムを押し出したものと考えられる。この損傷が見られるのは橋軸方向の面であり、かつ側面から鉛プラグまでのかぶり（縁端距離）の小さいLRBに多いことがわかっている。

#### c) 鉛突出

文字どおり鉛プラグが支承より外へ突出するものであるが、損傷パターンには2種類ある。一つは支承上面から鉛が出るもの（写真-2）で、他方は側面からの押し出し（写真-3）である。

前者の要因は、フランジ幅の狭い鋼板桁での支承取替えの際に、ソールプレートフランジ幅に合わせることで多く、一部の鉛プラグがソールプレートに覆蓋されないため、上載荷重が鉛プラグに対して不均一にかかる影響により突出に至るものと推定される。後者は、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と考えられる。

これらの損傷に対する補修としては、オゾン劣化によるきれつ進行を抑制するための補修材塗布がなされている程度で、それ以外は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。しかしながら、ゴム側面ふくれや鉛突出は鉛プラグ自体が内部で損傷していることを示唆しており、設計で考慮する減衰性能を満足しない可能性がある。加えて地震のような大変形を受けずに損傷が発生していることから、桁の温度伸縮によるひずみ変形（最大70%ひずみ、以下「温度変形」と呼ぶ。）のみで起こっているものと考えられる。



写真-1 LRB ゴムきれつ

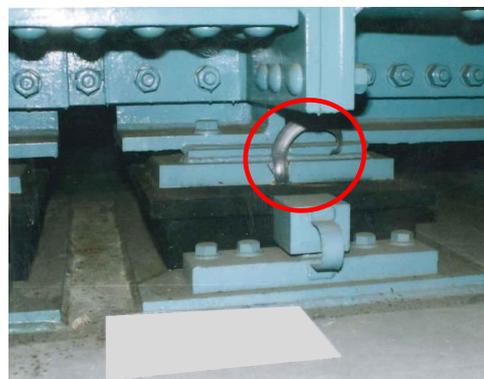


写真-2 鉛突出（上面から）



写真-3 鉛突出（側面から）

そこで本研究では、鉛プラグの損傷状況観察より原因を推定するとともに、温度変形に着目した挙動解析を行いメカニズムを検証することとする。

### 3. 劣化損傷支承の観察及び原因推定

#### (1) 支承の観察

文献1)におけるLRBを用いて損傷状況の観察を行った。供用中の損傷は写真-3に示すとおり、側面からの突出が供用（取替え）後13年で発見されている。この支承の特徴として、図-2に示すように橋軸方向の鉛プラグと支承側面の縁端距離がプラグ径よりも小さい構造となっている。

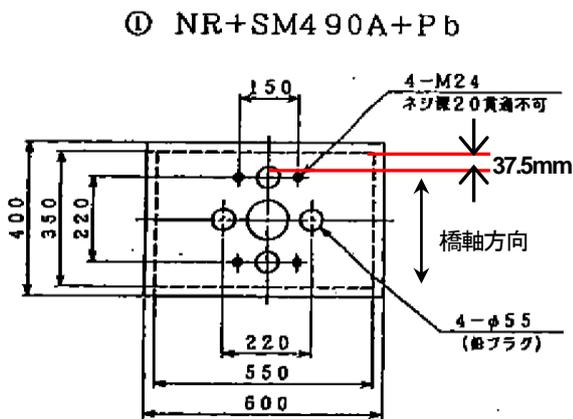


図-2 劣化損傷 LRB 平面図

ることから、前述のとおり拘束圧の差異及び繰り返し温度変形によって突出へ至ったものと考えられる。

次に、载荷試験後の外観を写真-4に、鉛プラグ位置にて切断したものを写真-5に示す。これは常時試験（70%ひずみで50年相当の正負交番载荷）を完了させた後の試験体である。鉛プラグが破断していると同時に支承側面への飛び出しも確認される。これらの要因は以下のように推定される。

- 橋梁用支承は一般的にゴム層が厚く、そのため鉛プラグの拘束力が弱くなり、支承のせん断変形時に鉛プラグは回転による引張を受ける。一方、上下鋼板部は拘束力が高いため純せん断となり、その境界面でき裂が発生する（図-3 参照）。これ



写真-4 载荷試験後の支承外観



写真-5 载荷試験後の鉛プラグ損傷状況

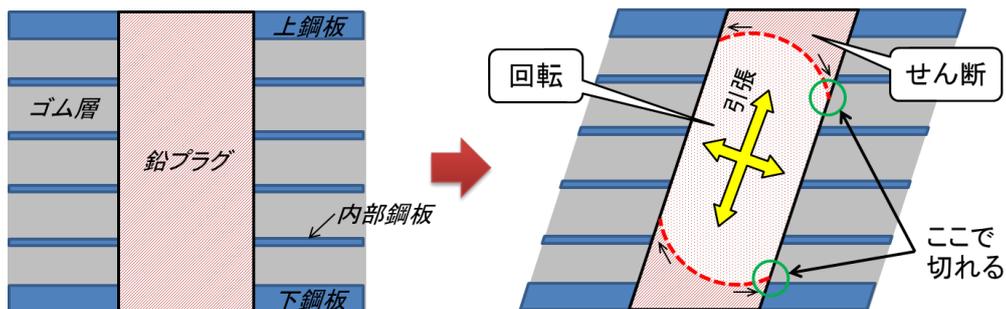


図-3 LRB せん断変形時の鉛プラグの応力場推定図

が繰り返されることできれつが進展して破断に至り、複数箇所で行われることにより鉛プラグは砂利状になる。

- 繰り返しせん断変形により拘束圧の弱い支承縁端側へ鉛が押し出された。

## (2) 鉛塊の観察

### a) 破断面SEM観察

切断後の供試体から損傷した鉛を取出し、破断過程を推定することを目的として破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。観察結果を写真-6に示す。

表面には所々に過大なせん断力による延性破壊であることを示す伸長形ディンプルと見られる模様が確認された。しかし、その伸長形ディンプルも明瞭なものは少なく、凹凸がすり減った様相を呈している。これは破断後も支承のせん断変形による擦動を繰り返し受けたことに

よることが考えられる。以上より、破断は供用時の温度変形により生じた可能性が高いものと推定されるが、その発生時期は不明である。

### b) 切断面結晶観察

鉛は常温下において、降伏後に再結晶により結晶格子のずれを自己修復するという特性により、ひずみが解消されて変形前の性質に戻るということが知られている。また、金属材料全般に言えることとして、再結晶の際に生成する結晶粒子の大きさ (結晶粒径) は塑性ひずみや材料強度に影響を及ぼす。すなわち粒径が大きいほど塑性ひずみが小さく、ひずみ硬化が解消する<sup>45)</sup>。

ここでは、結晶粒径を把握することを目的に、鉛プラグ切断面の結晶観察を行ったものである。比較のために、回収品 (以下、「劣化支承」と呼ぶ。) 及び新規製作品 (以下、「リファレンス支承」と呼ぶ。) に対してそれぞれ実施した。なお、劣化支承はL2試験後、リファレ

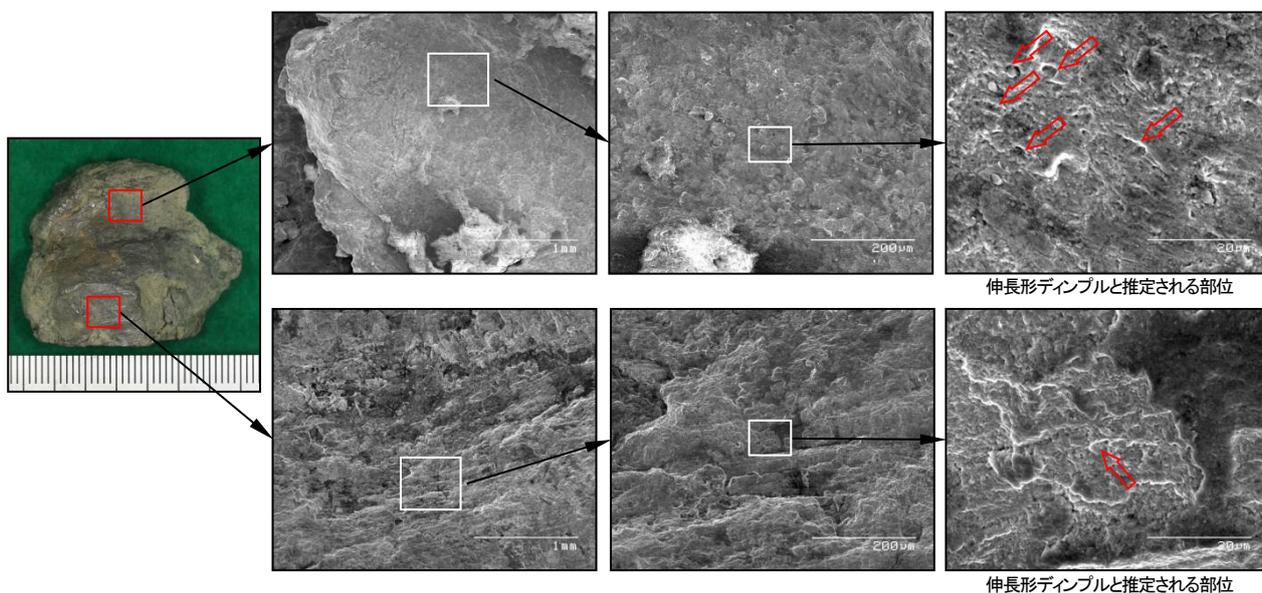


写真-6 破断面のSEM観察結果

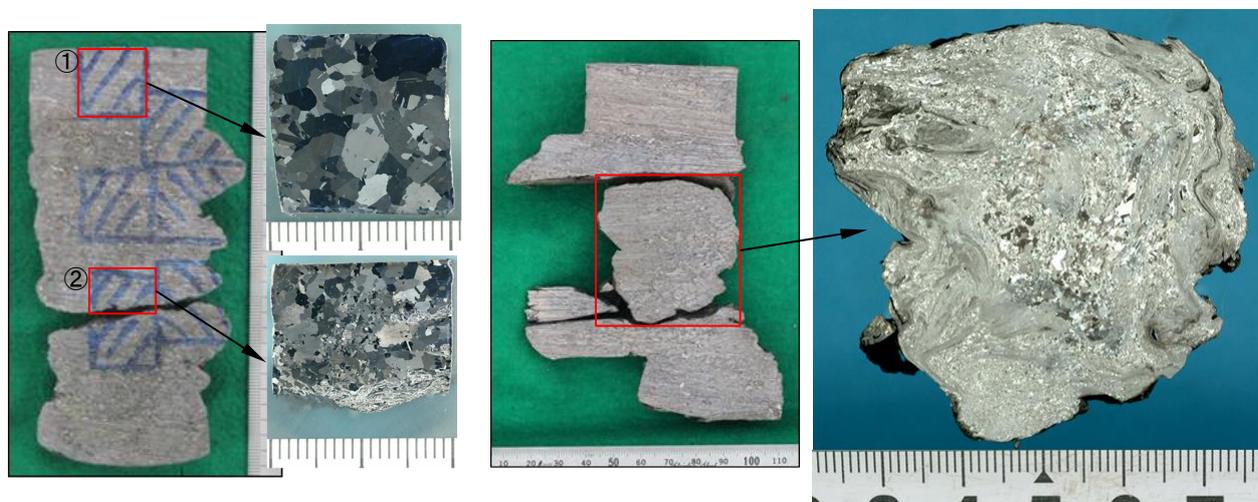


写真-7 切断面の結晶観察結果 (左: リファレンス支承 L1 試験後, 右: 劣化支承 L2 試験後)

ンス支承はL1試験後に供試体を取り出したものである。それぞれの観察結果を写真-7に示す。

リファレンス支承の結晶粒径は鋼板に拘束されて変形の少ない部分では大きく（位置①）、破断面近傍などの変形が大きい部分では小さくなっている（位置②）。また破断面やプラグくびれ部では結晶粒子の折り込みが認められることから、せん断による塑性変形が繰り返された結果、再結晶が不十分でひずみが解消されていないことがうかがえる。これより破断ひずみに至った箇所からきれつが生じ、それが進展することで破断したものと推定される。

一方、劣化支承においては、リファレンス支承の位置①に見られる初期の状態はほぼ見られず、結晶粒径は非常に小さい。またプラグ外縁部や破断面は目視で粒径が確認できない状態である。これは鉛プラグ全体が20年近く温度変形を受けていたこととL2試験による非常に大きな塑性変形を受けたことにより、結晶を流動させたものと考えられる。

両者を比較すると、リファレンス支承はL1試験では

あるものの大変形を経験しているにもかかわらず破断部等を除き結晶流動は起こしていないが、劣化支承は全体的に流動が発生している。このことから、長期間の温度変形により結晶が流動し、十分に再結晶が進行せず粒径が小さい状態に留まるため、塑性ひずみが解消されず破断に至るものと推定される。

#### 4. 挙動解析による損傷メカニズム検証

鉛の破断現象は供用時の温度変形により発生していることが推定されるため、温度変形時のLRBの挙動解析を行うことにより、鉛プラグに発生する応力状態を把握するとともに損傷メカニズムを検証する。

##### (1) 解析モデル

汎用解析コードABAQUS(Ver.6.12)を用い、鉛プラグのひずみに着目したLRBの弾塑性静的解析を行う。解析モデルは図-4に示すように中央部1/4を解析範囲とし、端

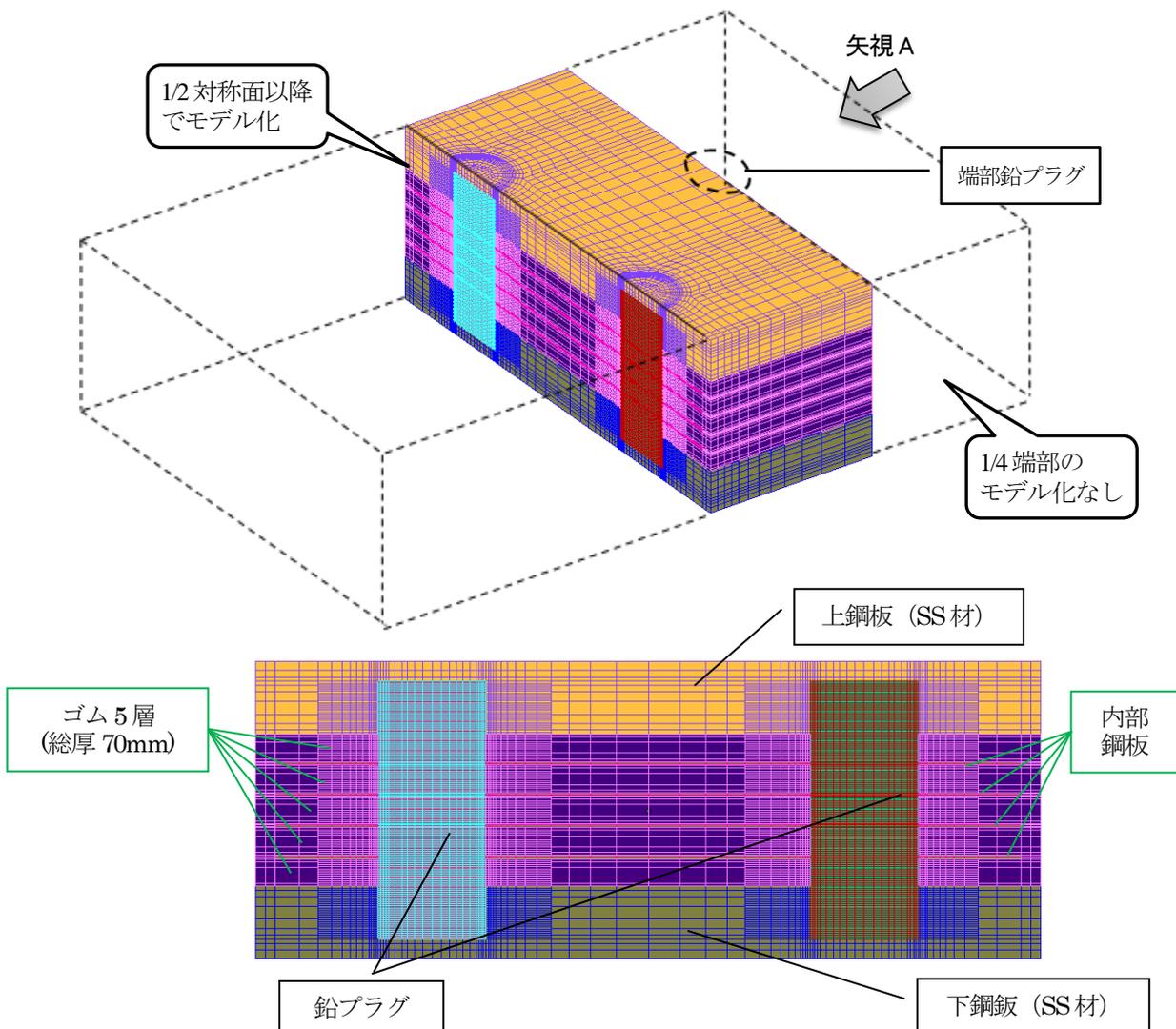


図-4 LRB 解析モデル

部鉛プラグは中央の鉛の変形挙動に大きな影響を与えないと考えられるため、解析速度向上のためモデル化していない。なお、矢視Aは鉛プラグの支承境界面における変形及びひずみ状態を見る方向として設定した。

材料の物性値については、弾性域における鋼板及び鉛は表-1に示す物性値を用いており、鋼板はJIS、鉛は松田ら<sup>9)</sup>の試験結果を引用した。塑性域において、鋼板はJISに規定されるSS材の真応力-真ひずみ関係とし(図-5)、硬化則は移動硬化則を用いた。

鉛では図-6に示すように、ひずみ速度0.01%/sの引張試験結果を用い、最大応力までを線形とし、それ以降の3次勾配は解析の収束性のため2次勾配の1/10と設定した。鉛はひずみ速度依存性の非常に大きい金属であるため、この物性値については既出の文献<sup>6)</sup>やHottaら<sup>7)</sup>の試験結果と比較したところ、大きな差異はないことを確認している。

表-1 鋼板及び鉛プラグの物性値(弾性域)

	ヤング率(MPa)	ポアソン比
鋼板	2.06E+05	0.30
鉛プラグ	1.60E+04	0.41

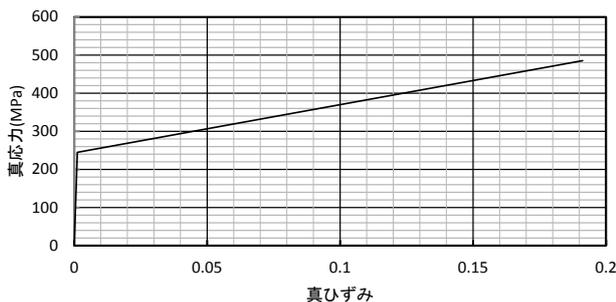


図-5 鋼板の真応力-真ひずみ線図

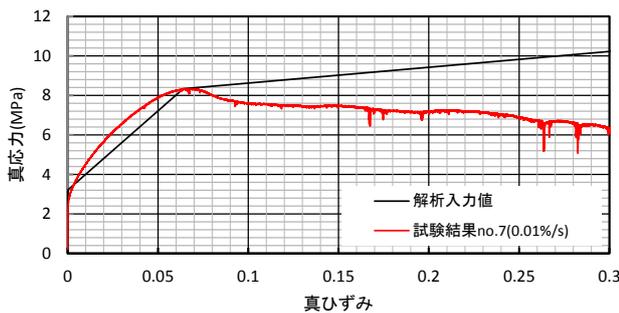


図-6 鉛の真応力-真ひずみ線図

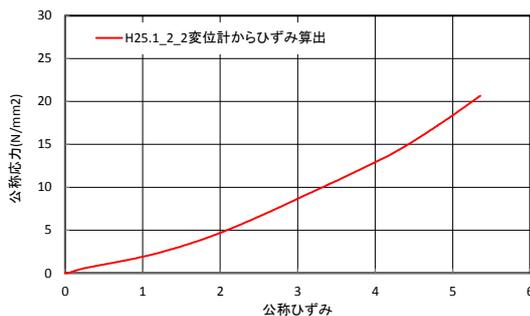


図-7 ゴムの公称応力-公称ひずみ線図

硬化則は同様に等方硬化則を用いた。ゴムは超弾性材料とし、文献1)の実験結果(図-7)を基にOgdenモデル<sup>8)</sup>を用いて設定した。

モデルに死荷重相当の面圧を与え、温度変形として橋軸方向(図-2のx方向)にゴム厚の70%(49mm)を負荷した。接触条件は、ゴムとすべての鋼板間を固着とし、鉛プラグとゴム及び鋼板間は接触としてモデル化した(鉛プラグ下面も接触とした)。なお、接触部の摩擦係数は0.8とした。

## (2) 解析手順

下記及び図-8に示すステップによりLRBの温度変形挙動解析を行った。

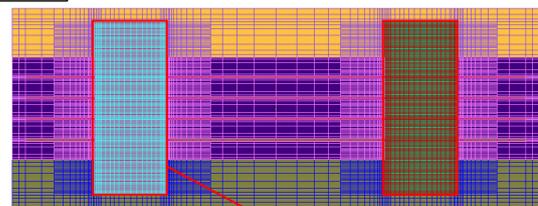
### STEP 1: 鉛プラグの挿入

ゴム支承に鉛プラグを挿入した状態を考慮し、鉛プラグの体積が2%膨張するように温度荷重を設定し、鉛挿入時の初期応力を負荷する。

### STEP 2: 死荷重載荷

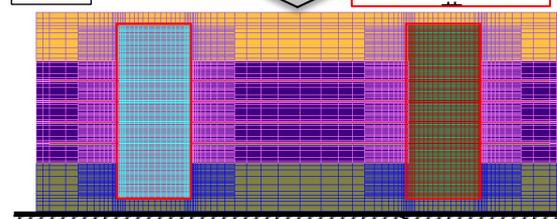
死荷重相当の面圧を載荷する(モデルに支承反力48.3tを与える)。

#### STEP 1



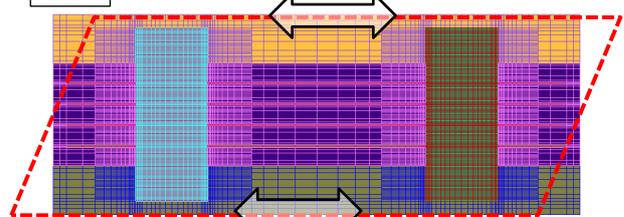
鉛の体積を2%膨張させる

#### STEP 2



下面拘束

#### STEP 3



模擬温度変形として±49mm(上下各々逆相で24.5mm)(ゴム厚さの70%)橋軸方向に負荷

図-8 解析ステップ

### STEP3：橋軸方向への負荷（温度変形）

橋軸方向への負荷として、供用時の温度変形を想定した解析を行う。解析条件は文献1)の荷重試験と同条件として、ゴム厚さの70%（49mm）を変位量として橋軸方向に負荷し、発生する応力（ひずみ）を求める。なお、本解析は下側も剛体でモデル化しているため、上下各々逆相で24.5mmを負荷する。

### (3) 解析結果

本解析条件では、1往復目の復路49mm（以下、「3/4往復目」と呼ぶ。）の次ステップにて発散し終了した。従って、本解析結果は3/4往復目負荷までの結果について述べる。なお、ひずみは破断に寄与する引張側について考察する。

て考察する。

#### a) 荷重前状態

初期状態からSTEP 1、STEP 2の変形挙動及び鉛直方向塑性ひずみコンター図を図-9に示す。STEP 1では、図-9(b)より鉛プラグに大きな変形は発生しないことがわかった。STEP 2に進むと、鉛プラグのゴムと接している部分に変形が発生し、それに押されることで支承側面にもふくらみが発生する結果となった（図-9(c)参照）。

また、鉛の鉛直方向全ひずみはSTEP 1で最大0.055、STEP 2で0.078生じている。これはゴムの物性が鋼板及び鉛に比べて非常に柔らかく、鋼板とゴムとの境界部において鉛プラグの拘束圧が急激に変化しているためであると考えられる。

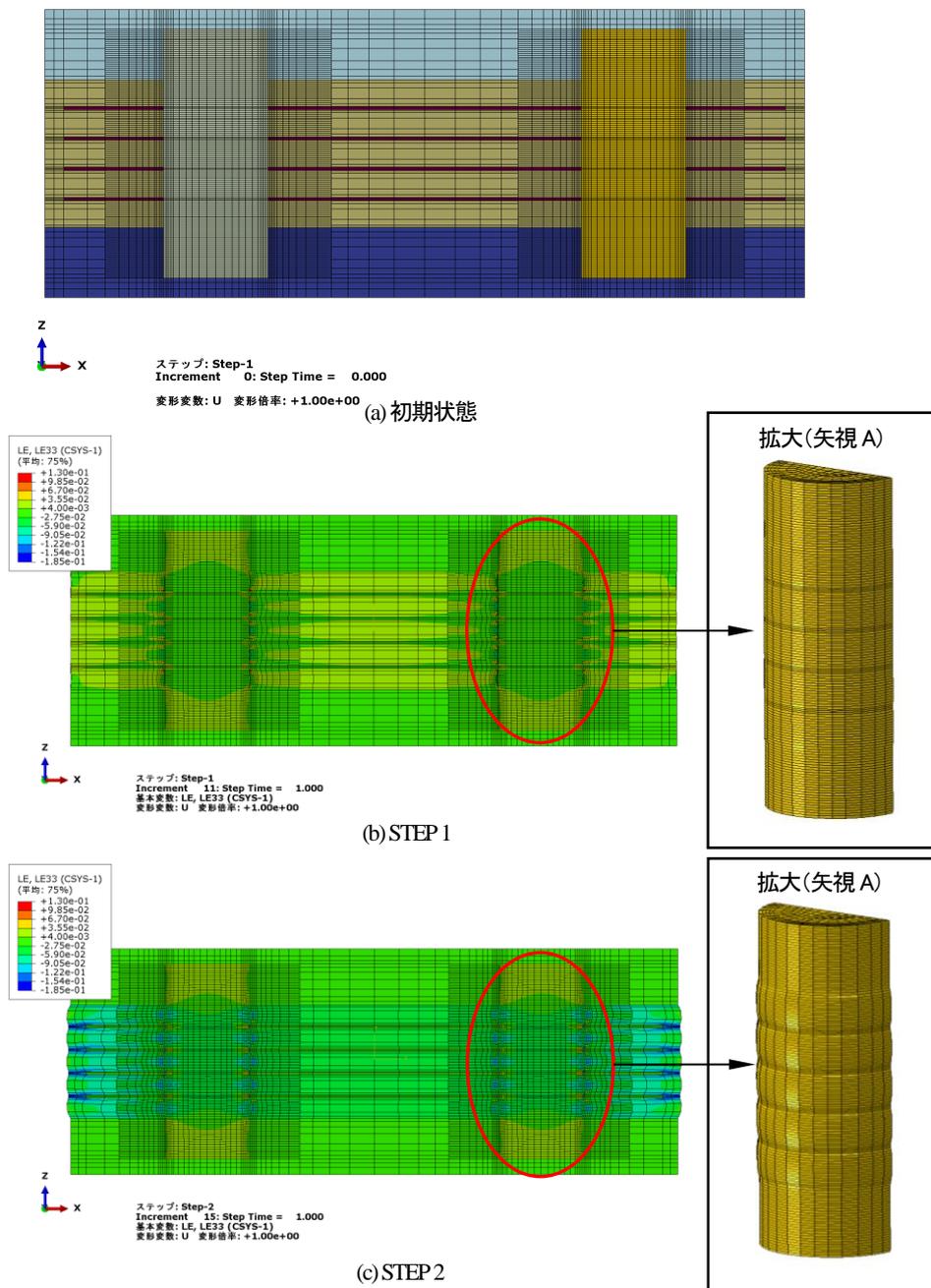


図-9 STEP1～2における変形挙動及び軸方向塑性ひずみコンター図

b) 荷状態

図-10に橋軸方向変位負荷（STEP 3）時の3/4往復目における鉛プラグの塑性ひずみコンター図を示す。3/4往復目の鉛の変形において、上下鋼板及び内部鋼板のエッジと接触している部分に大きな塑性変形が発生していることが確認された。これは鋼板とゴムとの剛度の差が非常に大きいため、境界部の応力集中により生じるものと考えると理解がしやすい。

鉛の塑性ひずみはせん断方向だけではなく、荷荷方向及び鉛直方向にも発生していることから、純せん断とはなっておらず引張・圧縮場も生じていることがわかる。なお、引張方向である鉛の塑性ひずみの最大値は内部鋼

板エッジと接触している要素において0.666となっている。参考ながら、本解析で用いた鉛物性値（図-6）のベースとなっているひずみ速度0.01%/sの引張試験では、およそ35%ひずみで破断に至っている。本解析と引張試験では条件が異なるため単純な比較はできないものの、破断に至るひずみレベルに達している可能性はある。

このことより、鉛は鋼板エッジとの接触位置において早いサイクルできれつが発生する可能性があると考えられる。温度変形の繰り返しごとに同一位置に引張場が生じることとなれば、きれつが進展し破断へ至ることが想定される。写真-5の鉛プラグ破断位置は鋼板の近傍が多いことから、実現象とよく一致していると言える。

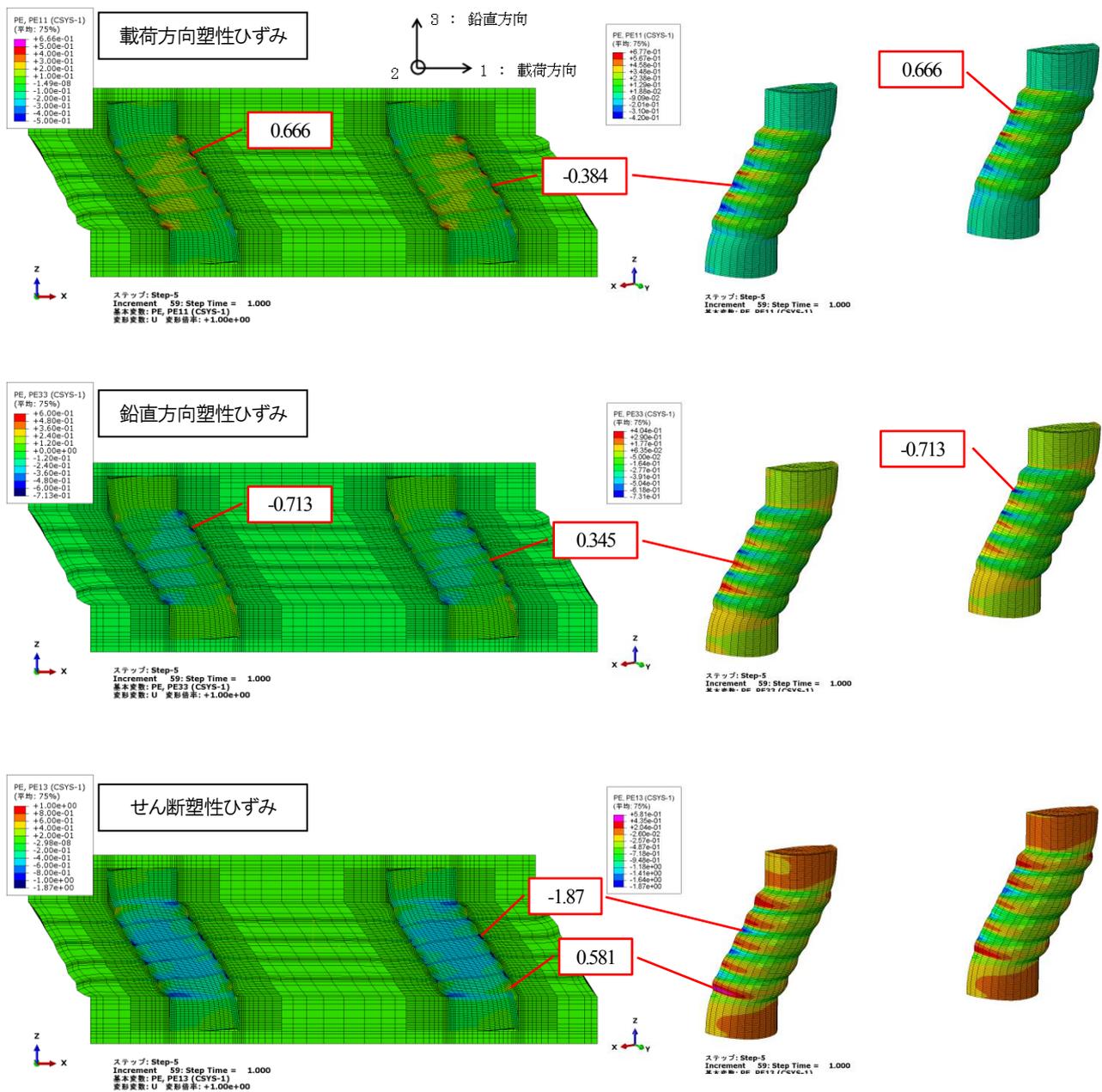


図-10 3/4 往復目における塑性ひずみコンター図(左: 支承断面, 右: 鉛プラグ矢視A)

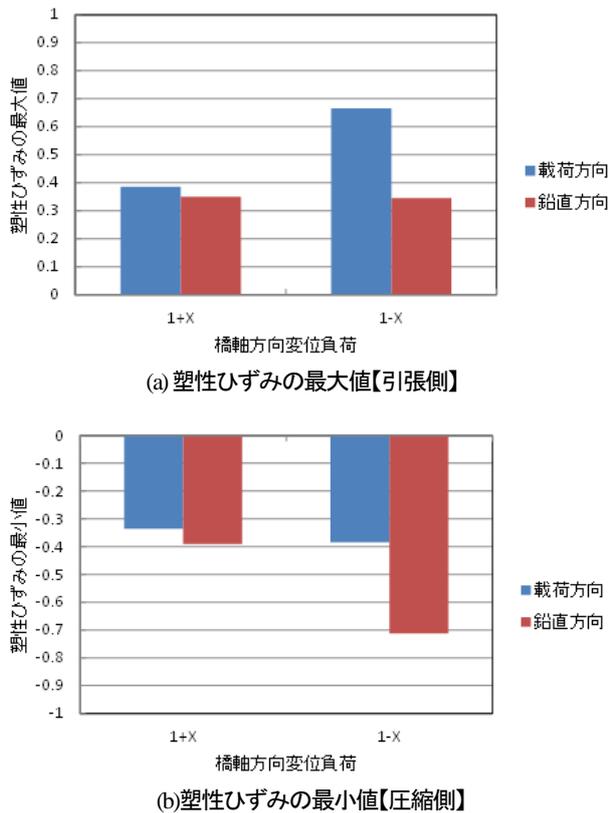


図-11 橋軸方向変位負荷 70%時の鉛プラグの塑性ひずみの比較

解析結果より、橋軸方向変位負荷70%ひずみ時における塑性ひずみの最大値（引張）及び最小値（圧縮）をプロットしたグラフを図-11に示す。ここで“1+X”は1往復目の往路+49mm（以下、「1/4往復目」と呼ぶ。）であり、“1-X”は3/4往復目である。

1/4往復目から3/4往復目へと解析（载荷）ステップが進むと、ひずみ量は増大している。特に引張に着目すると、载荷方向（水平方向）が厳しい側となっており、鉛プラグがこの方向に破断している実現象とも整合がとれていると言うこともできる。ここまでの結果のみで結論を導くことは困難だが、繰り返し温度変形による塑性ひずみ傾向を確認し、鉛プラグの損傷メカニズムを解明することが今後の課題である。

## 5. おわりに

LRBの劣化損傷メカニズムを検証するため、鉛プラグ損傷状況の観察と原因推定、緩速変形時におけるひずみ状態のシミュレーションを行った。得られた結果より下記のように考察される。

- 鉛プラグの損傷は供用下の温度変形により生じたものと推定される。発生要因としては、ゴム層が厚く鉛プラグの拘束が弱い部分が生じ、支承のせん断変形時に鉛内部で回転による引張を受けると考えられる。
- 断面観察の結果、破断した時期は不明だが、結晶粒径が小さいことから再結晶によるひずみ解消が完全ではなく、繰り返し変形で破断ひずみへ至った部分が損傷したと推定される。
- 挙動解析では引張場が生じており、その塑性ひずみが大きい箇所は実現象で破断した箇所とよく一致している。

解析は3/4往復目で終了しているため、現時点での損傷メカニズムは初步段階の検証に留まっている。しかしながら、実現象と整合している部分もあるため、今後はモデル改良を行い、繰り返し温度変形による塑性ひずみ状態のシミュレーションを行い、さらに検証を進める。

謝辞：本検証にあたり、筑波大学大学院システム情報工学研究科・松田昭博准教授にはLRB解析に関する貴重なご意見をいただいた。ここに深く感謝致します。

## 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, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.4, pp.1032-1042, 2014.
- 2) Robinson, W.H. and Tucker, A.G.: A Lead-rubber Shear Damper, *Bulletin of The New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.10, No.3, pp.151-153, 1977.
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, 丸善, 2004.
- 4) 山口喬久: 制震ダンパ用鉛の再結晶特性に関する研究, 東京大学工学部卒業論文, 2000.
- 5) 小山信次: 純鉄の再結晶現象に及ぼす塑性ひずみの影響, [http://ms-laboratory.jp/pdf/recrystal/re\\_cry.htm](http://ms-laboratory.jp/pdf/recrystal/re_cry.htm), (参照 2014/04/10)
- 6) 松田昭博, De Borst, R.: 免震・制振デバイスに用いられる鉛材料を対象とした熱力学的な有限要素解析, 電力中央研究所報告, N04040, 2006.
- 7) Hotta, S., Matsumoto, K., Murakami, T., Narushima, T. and Ouchi, C.: Dynamic and Static Restrtaion Behaviors of Pure Lead Tin in the Ambient Temperature Range, *Material Transactions*, Vol.48, No.10, pp.2665-2678, 2007.
- 8) Ogden, R.W.: Large deformation isotropic elasticity, on the correlations of the theory and experiment for compressible rubber-like solids, *the Royal Society of London*, A-326, pp.565-583, 1972.

## BASIC VALIFICATION FOR DAMAGING MECHANISM OF LEAD RUBBER BEARINGS

Kunihiro HAYASHI, Yukio ADACHI, Naota SAKAMOTO, Akira IGARASHI,  
Ji DANG, Osamu OTANI and Toshinori SHIMOIKE

Many rubber bearings in highway bridges have been adopted with the application of the horizontal seismic force distribution design and the seismic isolation design. However, the authors carried out the residual tests against some aging deterioration rubber bearings after served nearly 20 years, and found the results of less damping performance and fracture of lead plugs. In this study, we focused on the damages of aging deterioration of lead rubber bearings and also verified the damaging mechanism to observe the lead plugs of specimens after the loading tests and simulate the behavior under very slow deformation. As the results, the plastic strain of lead plugs emerged in the tensile zone, so it was estimated to develop into crack and fracture.