

鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）の耐久性検討のための鉛材料の低サイクル疲労特性の評価

篠原 聖二¹・林 訓裕²・足立 幸郎³・河内山 修⁴・長弘 健太⁵・
五十嵐 晃⁶・高橋 良和⁷

¹正会員 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）
E-mail:masatsugu-shinohara@hanshin-exp.co.jp

²正会員 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）
E-mail:kunihiro-hayashi@hanshin-exp.co.jp

³正会員 阪神高速技術株式会社経営企画部（〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-4-1）
E-mail:yukio-adachi@hex-eng.co.jp

⁴正会員 オイレス工業株式会社開発部（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000）
E-mail:kouchiyama@oiles.co.jp

⁵正会員 オイレス工業株式会社開発部（〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000）
E-mail:nagahiro@oiles.co.jp

⁶正会員 京都大学教授 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

⁷正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail:takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

本研究では、継続的にせん断変形を受けるLRB内の鉛プラグの繰返し変形特性に着目し、鉛単体の試験片を用いた低サイクル疲労試験を行い、緩速の繰返し変形に対する鉛の材料特性を評価した。さらに、LRBの孔内に充填し密閉された鉛プラグの応力場の状態を明らかにするために、FE解析を行い、水平せん断変形中の鉛プラグの応力場の状態を評価した。FE解析の結果、鉛プラグが鉛プラグ孔への充填と鉛直力の作用により適正な圧縮状態となる条件では、鉛プラグの上下方向の最大、最小、および平均応力はいずれも圧縮域にあることがわかった。鉛プラグの表面に発生したき裂が内部に進展するためには、き裂面直交方向に引張応力が発生する必要があると考えられるが、前述の試験のような鉛プラグが鉛プラグ孔への充填と鉛直力の作用により適正な圧縮状態となる条件では、き裂面直交方向に引張応力が発生しないため、き裂が進展する速度は低下すると考えられる。

Key Words : lead rubber bearing, durability mechanism, low cycle fatigue, creep phenomenon

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、道路橋の支承としてゴム支承が広く普及してきた。これは、当時の建設省より通達された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様¹⁾」において、ゴム支承の被災事例が少なかったことから、ゴム支承を積極的に用いることが望ましいと記載されたこと、また、1996年には、それまでの研究成果としてとりまとめられていた免震設計マニュアル(案)²⁾が、新たに道路橋示方書³⁾に取り入れられたことが理由としてあげられる。一方、近年、2011年東北地方

太平洋沖地震や2016年熊本地震において、1996年道路橋示方書に基づいてレベル2地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた事例が報告されており、ゴム支承の経年劣化が要因のひとつとしてあげられている^{4)~8)}。

阪神高速道路においても、15号堺線の高架橋に設置した、約17年が経過した鉛プラグ入り積層ゴム支承（以下、LRB）に、鉛の突出や、鉛プラグが分断されて塊状になるなどの変状が確認された⁹⁾。当該高架橋はレベル2地震動に相当するような強い地震動は経験していないことから、LRBの鉛プラグの変状は何らかの常時の経年的な作

用により生じたと考えられる。常時の作用としては、外気温の日変動や季節変動による、上部構造の温度伸縮に伴う緩速の繰返しせん断変形の影響が考えられる。

今後、発生が想定される南海トラフ地震や都市直下型地震に備えるためには、ゴム支承が地震時に水平反力の分散やエネルギー吸収等の所定の機能を確実に発揮する必要がある。そのためには、既設のゴム支承の変状メカニズムを踏まえて、点検、診断、補修、交換等の維持管理を適切に行う手法を確立しておくことが求められる。

筆者らは、LRB の鉛プラグの変状メカニズムを明らかにするために、上部構造の温度伸縮に伴う緩速の繰返しせん断変形に着目し、実橋における LRB の常時挙動の調査、鉛の外部への突出要因の推定を行った。さらに、鉛プラグの分断を再現するために供試体に緩速繰返しせん断変形を与える試験を行い、き裂や分断等の鉛プラグの変状の再現と緩速繰返し変形の影響の分析を試みた¹⁰⁾。LRB 供試体において、鉛プラグ孔容積より大きい体積の鉛の充填による圧縮力と、さらに鉛直力の載荷による圧縮力の2つの圧縮力を加えることによって適正な圧縮状態となった鉛プラグを有するものを標準供試体とした。LRB 供試体による緩速繰返しせん断変形試験の結果、標準供試体の鉛プラグは分断しなかったが、所定の設計面圧に対して 1/10 の面圧としたケース、および、鉛量をあえて充填不足にしたケースの鉛プラグは円弧状に分断した。これは、標準供試体はせん断変形中も鉛プラグ内に面圧作用による圧縮応力場が形成されていたのに対して、設計面圧 1/10 および孔容積未満の体積の鉛の挿入により圧縮力が小さかった充填不足の供試体では、部分的に引張応力が発生していたためき裂が進展したと考えられる。

鉛の特性にはひずみ速度依存性があり、地震時のように比較的速いせん断変形に対しては弾塑性体として安定したエネルギー吸収が期待できる。一方、緩やかな速度のせん断変形に対しては反力が小さく、ほとんど抵抗せずにクリープ変形を起こすので、温度変化による上部構造の伸縮に伴う不静定力の低減の効果が得られる。金属素材が塑性変形を受けた後、加熱されるとその歪んだ結晶構造が歪みのない新たな結晶粒になることを再結晶と呼び、それに必要な温度を再結晶温度と呼ぶ。金属の再結晶は鉛特有ではなく、例えば鉄の再結晶温度が 450℃であるのに対して、鉛は 20℃未満と常温に近い温度である。そのため、鉛の降伏は鋼材と異なり疲労が進行しないので、大変形領域でも安定した履歴特性を示すと言われている¹¹⁾。しかしながら、高架橋に設置した LRB については、外気温の日変動や季節変動による、上部構造の温度伸縮に伴うせん断変形の影響を常時受けると考えられ、そのように継続的にせん断変形を受ける場合の

鉛プラグの劣化に関する特性は明らかになっていない。一般に鉛材料の疲労強度には振動数依存性があり、寿命サイクル数は繰返し載荷が緩速なほど著しく低下することが知られている¹²⁾。現在、LRB の耐久性評価にはこの鉛の疲労特性が考慮されていないことから、その影響を検討しておく必要がある。

また、この変形は非常にゆっくりとした速度で与えられるため、前述したように変形が長時間保持されることによるクリープ現象も伴うと考えられる。低サイクル疲労においては、応力振幅が主要な影響因子になるが、速度が非常に遅い条件でのクリープ現象を伴う場合は、対象材料の応力場が重要となる。緩速の繰返し変形においては、LRB のように孔内に充填し密閉された鉛プラグに対しても、鉛プラグの応力場が引張応力場の場合と圧縮応力場の場合とでは、クリープ現象を伴う低サイクル疲労特性に影響があると考えられる。

そこで本研究では、継続的にせん断変形を受ける鉛プラグの繰返し変形特性に着目し、鉛単体の試験片を用いた低サイクル疲労試験を行い、緩速の繰返し変形に対する鉛の材料特性の変化を評価する。さらに、LRB の孔内に充填し密閉された鉛プラグの応力場の状態を明らかにするために、既往の研究における LRB のせん断試験を対象とした FE 解析を行い、水平せん断変形中の鉛プラグの応力場の状態を評価する。

2. 鉛材料のき裂発生特性とき裂進展特性

繰返し変形を受ける鉛材料の特性の変化を評価するために、鉛単体の供試体を用いて、鉛材料にき裂が発生する特性、および、き裂発生後にき裂が進展する特性の2段階で鉛単体のクリープ現象を伴う低サイクル疲労特性の評価を試みる。

(1) き裂発生特性の評価

繰返し荷重を受ける鉛材料にき裂が発生する段階を推定するために、鉛単体の供試体を対象に低サイクル疲労試験を行う。なお、高ひずみ領域の圧縮載荷については、鉛材料の座屈が先行するため、正確に疲労特性を評価することが困難となる。そこで、座屈の影響が小さく試験を実施できる低ひずみ領域（最大全ひずみ範囲 1.0%）の低サイクル疲労試験に加え、静的引張試験を行うことにより 1.0%以上の高ひずみ領域の疲労特性について補完することとした。

a) 低サイクル疲労試験

低サイクル疲労試験の試験片の形状を図-1 に、試験

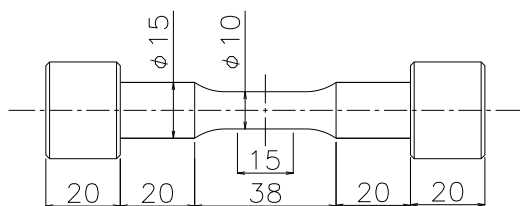


図-1 低サイクル疲労試験の試験片 (単位: mm)

表-1 低サイクル疲労試験の試験条件

試験温度 ℃	ひずみ速度 %/sec	全ひずみ範囲 %	試験体数
RT	0.4	0.5	1
		0.6	1
		1.0	1
	0.01	0.5	1
		0.76	1
		1.0	1
50	0.4	0.5	1
		0.75	1
		1.0	1
	0.01	0.5	1
		0.6	1
		0.76	1
計			12

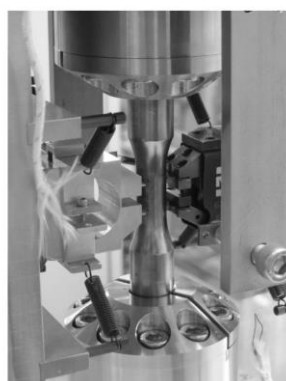
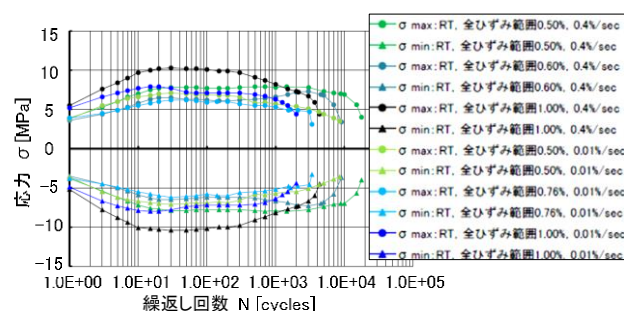


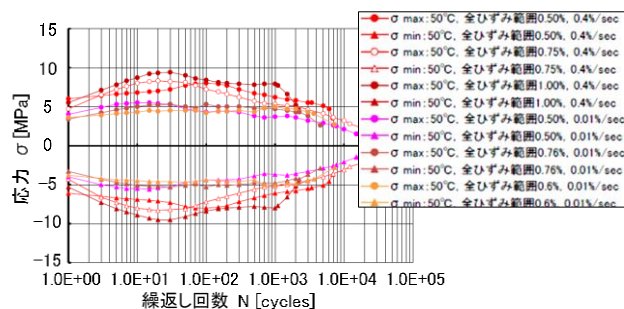
写真-1 低サイクル疲労試験の試験状況

条件を表-1に示す。表中のRTは室温を表す。試験温度をRT(室温)、50℃の2ケース、ひずみ速度を0.4、0.01%/secの2ケース、全ひずみ範囲を0.5~1.0%とし、計12体の試験を行った。低サイクル疲労試験の状況を写真-1に示す。

各試験条件により得られた繰返しに伴う引張側および圧縮側の応力振幅の変化を図-2に示す。RT、50℃いずれの場合においても、繰返しの過程で、1サイクル中の引張側応力振幅が一旦最大値に到達した後、破断に至るまでクリープを伴いながら、なだらかに減少する繰返し軟化挙動を示した。低サイクル疲労試験における一般的な破損繰返し数 N_f の決定方法では、引張側応力振幅値が顕著な低下を示し始める時点から一定の応力低下量を示した繰返し数と定義されている¹³⁾。しかし、鉛のよう



(a) 試験温度: RT



(b) 試験温度: 50℃

図-2 繰返しに伴う引張側および圧縮側応力振幅の変化

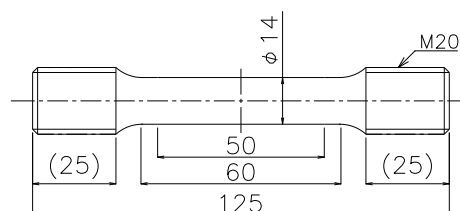


図-3 静的引張試験の試験片 (単位: mm)

表-2 静的引張試験の試験条件

試験温度 ℃	ひずみ速度 %/sec	試験体数
RT	0.1	1
	0.01	1
50	0.1	1
	0.01	1
計		4

に顕著な荷重低下を示さない場合には、この方法を適用できず、試験片におけるき裂発生および進展状況を確認して適切な破損繰返し数の決定方法を定める必要があった。そこで本試験では、便宜的に引張側応力振幅がその最大値から50%低下した時点をもって N_f と定義して試験結果を整理した。

b) 静的引張試験

引張試験片の形状を図-3に示す。試験片はJIS Z 2241 4号試験片とした。引張試験の試験条件を表-2に示す。試験温度をRT(室温)、50℃の2ケース、ひずみ速度を0.1、0.01%/secの2ケースとし、計4体の試験を行った。各温度、ひずみ速度条件における静的引張試験の結

表-3 静的引張試験結果

試験片番号	温度 °C	ひずみ速度 %/sec	ヤング率 E (MPa)	耐力 σ_Y (MPa)	引張強さ σ_B (MPa)	第一領域	第二領域	真破断 ひずみ
No.3	20	0.1	17100	3.98	10.5	$\sigma_t=69.2\epsilon_t+3.96$	$\sigma_t=1.14\sigma_t+12.9$	3.58
No.4	20	0.01	17100	4.02	7.68	$\sigma_t=76.8\epsilon_t+4.0$	$\sigma_t=0.89\sigma_t+6.99$	3.53
No.5	50	0.1	15900	3.72	7.88	$\sigma_t=79.1\epsilon_t+3.7$	$\sigma_t=2.05\sigma_t+7.06$	4.36
No.6	50	0.01	15900	3.3	5.25	$\sigma_t=69.2\epsilon_t+3.29$	$\sigma_t=2.26\sigma_t+3.6$	5.57

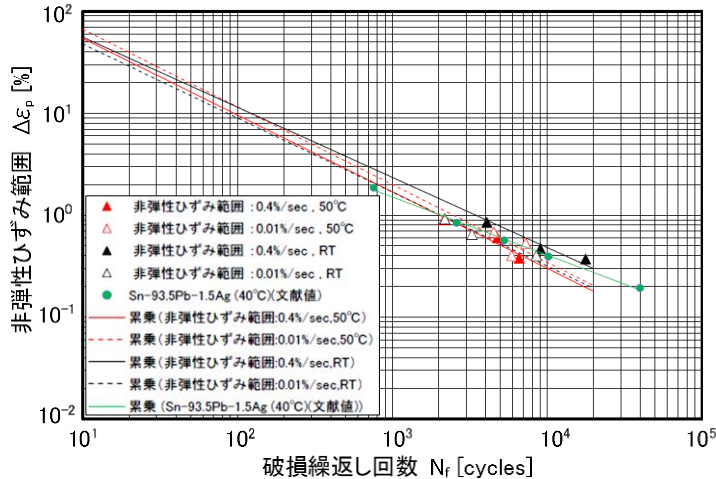
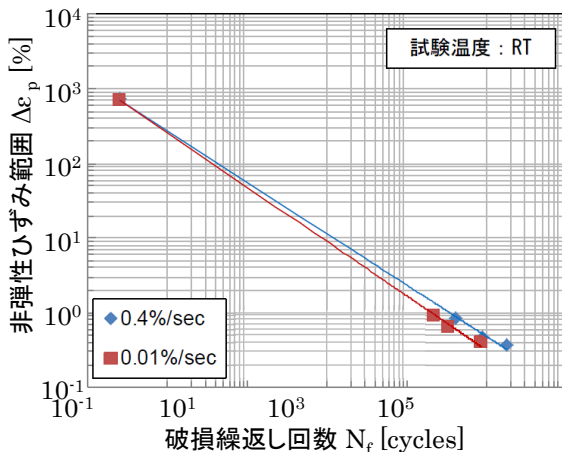


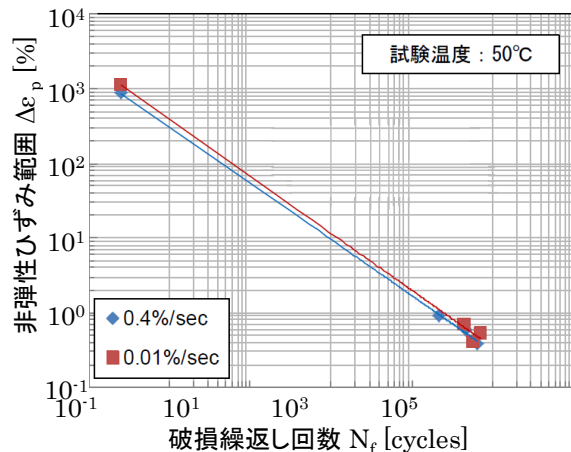
図-4 引張破断延性データを含めて算出した低サイクル寿命に関する非弾性ひずみ範囲と破損繰返し回数の関係

表-4 低サイクル疲労試験結果での疲労寿命線図の近似式

試験温度 (°C)	ひずみ速度 (%/sec)	低サイクル疲労寿命 線図近似式 $\Delta \epsilon_p$ (%)
RT	0.4	$\Delta \epsilon_p = 272.5 N_f^{-0.688}$
	0.01	$\Delta \epsilon_p = 254.6 N_f^{-0.726}$
50	0.4	$\Delta \epsilon_p = 306.8 N_f^{-0.752}$
	0.01	$\Delta \epsilon_p = 386.6 N_f^{-0.762}$



(a) 試験温度: RT



(b) 試験温度: 50°C

図-5 周波数修正法を適用した非弾性ひずみ範囲と破損繰返し回数の関係

果を表-3 に示す。試験温度 20°Cではひずみ速度の違いが真破断ひずみの大きさに与える影響は小さいが、50°Cでは、ひずみ速度 0.01%/secの方が、0.1%/secよりも大きな真破断ひずみを示した。

c) 非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係

非弾性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_p$ と破損繰返し数 N_f の関係を図-4 に示す。各条件のカーブ（両対数線図上で直線とする）は、静的引張試験における真破断ひずみ σ_B の 2 倍 ($2\sigma_B$) を、 $N_f=1/4$ サイクルにおける非弾性ひずみ範囲としたデータも含めて、低ひずみ領域の繰返し載荷試験の結果に、

Coffin-Manson 則¹⁴⁾ が成立するとして近似した。試験条件として、ひずみ速度を 0.4%/sec と 0.01%/sec の 2 ケース、また温度について室温と 50°C の 2 ケースとしたが、この試験範囲において、室温ではひずみ速度が遅いほど寿命が短く、また、50°Cにおいては室温よりも寿命が短い傾向が認められた。図-4 にはんだ (Sn-93.5PB-1.5Ag) のひずみ速度 0.5%/sec の文献値¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾をプロットして比較すると、本試験に用いた 99.9%鉛ははんだと近似した特性を有していることがわかる。

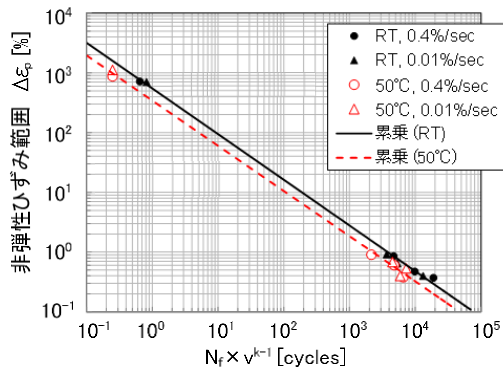


図-6 周波数修正線図

表-5 周波数修正則における係数 k , C , α

試験温度 (°C)	k	C	α
20	0.9	547.5	-0.765
50	1	343.2	-0.757

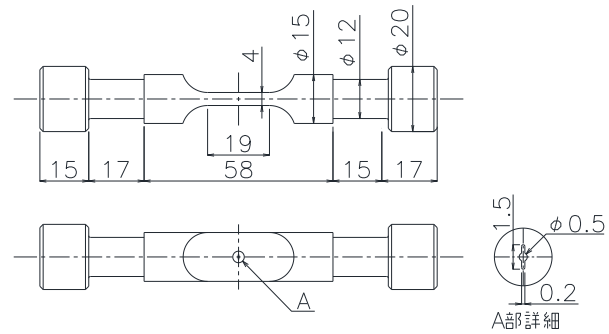
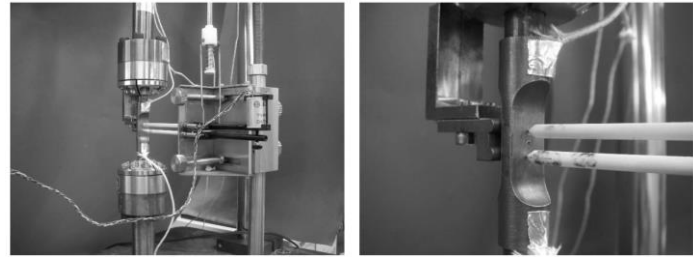


図-7 低サイクル疲労き裂の進展特性の試験片 (単位: mm)



(a) 試験状況

(b) 試験片設置状況

写真-2 鉛の低サイクル疲労き裂の進展特性の試験状況

表-6 鉛の低サイクル疲労き裂の進展特性の試験条件

試験温度	制御周波数 (Hz)	アクチュエータ変位 Δ (mm)	開口変位幅 ΔV (mm)	ひずみ(%) ($\Delta V / GL \times 100$)	ひずみ速度 (%/sec)	試験体数
RT	1	± 0.05	0.024~0.041	0.30~0.51	0.60~1.02	1
	0.1	$\pm 0.05, \pm 0.07$	0.019~0.033	0.24~0.41	0.05~0.08	1
50°C	1	± 0.05	0.022~0.063	0.27~0.79	0.54~1.57	1
	0.1	$\pm 0.05, \pm 0.08$	0.022~0.104	0.28~1.30	0.06~0.16	1
計						4

d) 周波数修正法による低サイクル疲労寿命評価

ここでは、図-4 の非弾性ひずみ範囲と破損繰返し回数 の関係 ($\Delta \epsilon_p$ - N_f 曲線) に対し” Coffin の frequency modified fatigue life (周波数修正疲労寿命)” の法則¹⁴⁾を用いて、周波数修正 $\Delta \epsilon_p$ - N_f 曲線を決定する。低サイクル疲労試験の結果について Coffin-Manson 則が成立するとした累乗近似式を表-4 に、非弾性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_p$ と破損繰返し数 N_f を試験温度毎に図-5 に示す。ここで Coffin の周波数修正則は式(1)で表される。

$$\Delta \epsilon_p = C(N_f \nu^{k-1})^\alpha \quad (1)$$

$\Delta \epsilon_p$: 非弾性ひずみ範囲 [%]

N_f : 破損繰返し数 [cycle]

ν : 周波数 [周期の逆数] [Hz]

C, k, α : 係数

式(1)の3つの係数 C , k , α のうち、周波数依存性に関係する係数は k であり、50°Cにおいては有意な周波数依存性が現れなかったため、 $k=1$ となった。一方、室温に

おいては明らかに周波数依存性が認められ、今回の低サイクル疲労特性試験範囲 ($\Delta \epsilon_p=0.4 \sim 0.9$) から更に少回数域まで含めた範囲にわたって周波数依存性が極力小さくなるように k を決定すると、 $k \approx 0.9$ となった。次に、これらの k 値 ($k=0.9$ (RT), 1.0 (50°C)) を用いて、温度条件毎に周波数修正則における係数 C と指数 α を回帰により求めた。結果を図-6 と表-5 に示す。周波数修正寿命線図の傾きを示す α は、温度によってほとんど差異がなく -0.76 程度の値となり、 C については高温のほうが小さくなることがわかった。

(2) 鉛材料の低サイクル疲労き裂の進展特性評価

鉛材料の低サイクル疲労き裂の進展特性評価における試験体の形状を図-7 に、試験条件を表-6 に示す。試験体は中央き裂平板試験片 (幅 5mm, 厚さ 4mm, 初期切欠き長さ 1.65mm) とした。試験状況および試験片の設置状況を写真-2に示す。

文献 18)に基づき、一定繰返し数毎の荷重 (P) -開口変位 (V) のヒステリシスデータと、測微鏡にて実測し

た試験片両面のき裂長さ (2a) から、各繰返し数 (N) におけるき裂長さ (2a), J 積分範囲 (ΔJ), および、き裂進展速度 (da/dN) を算出した。ここで、J 積分範囲とは、弾塑性状態下での疲労き裂進展速度を律速するパラメータとして、弾塑性破壊力学パラメータである J 積分を疲労現象に拡張適用したものである¹⁹⁾。J 積分範囲は、き裂長さ、試験片寸法パラメータと繰返し応力ひずみ関係のヒステリシス・ループの負荷曲線を用いて評価される。通常、弾塑性状態下での疲労き裂進展速度の整理にあたっては、応力拡大係数範囲は適用できないため、それに代わって J 積分範囲が適用される。

試験により得られたき裂進展特性を図-8 に示す。ここで、文献 14) より、き裂進展速度 da/dN と J 積分範囲 ΔJ の関係は式(2)で表現される。

$$da/dN = C\Delta J^m \quad (2)$$

ΔJ : J 積分範囲 [N/m]

da/dN : き裂進展速度 [m/cycle]

$$C=6.00 \times 10^{-10}$$

$$m=1.10$$

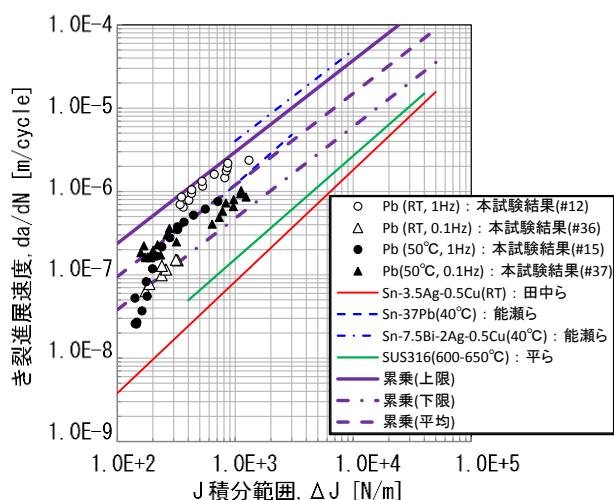


図-8 き裂進展速度 da/dN と J 積分範囲 (ΔJ) の関係

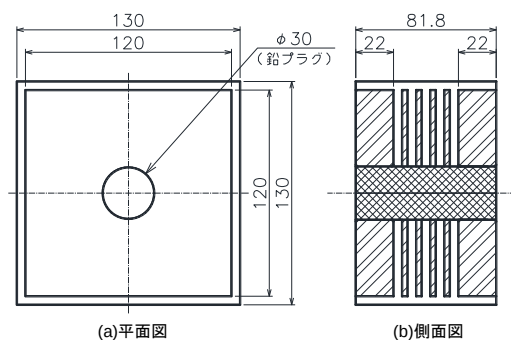


図-9 LRB 供試体の形状 (単位: mm)

結果には個体ごとの材料及び計測のバラツキなどが内在していると考えられることから、RT~50°Cにおいて、図-8 に示すように本試験結果がほぼ収まる範囲で上下限を設定し、鉛材料のき裂進展特性はこの範囲内に発生するとした。また、鉛と比較的特性に近いと考えられる各種はんだの常温~40°C等の比較を図-8 に示す¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。本試験結果の平均値は、ほぼ Sn-37Pb(40°C)付近に位置していた。

3. FE解析による鉛プラグの応力状態の評価

橋梁に設置された LRB が、上部構造の温度伸縮によりせん断変形する際の鉛プラグの応力状態を評価するために FE 解析を実施した。

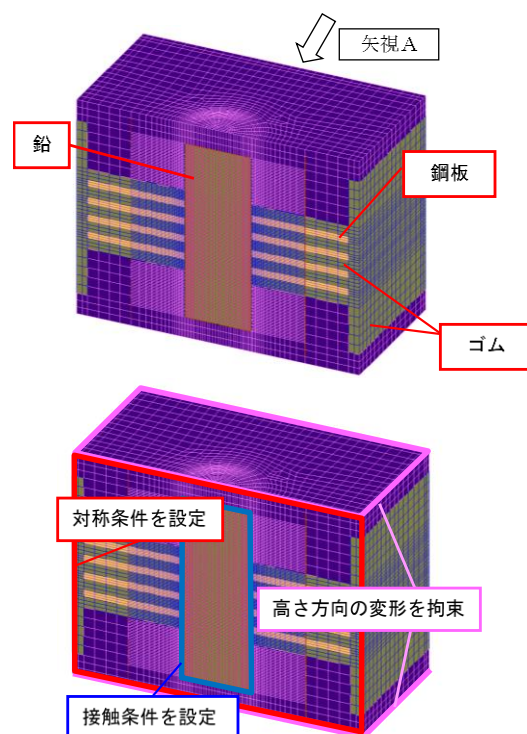


図-10 LRB 解析モデルと境界条件

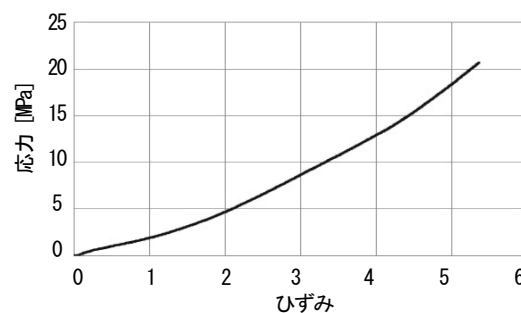


図-11 ゴムの応力-ひずみ関係

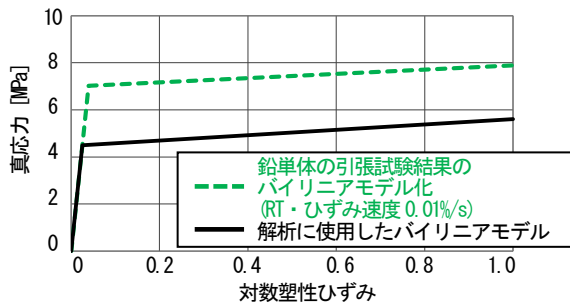


図-12 鉛の真応力-対数塑性ひずみの関係

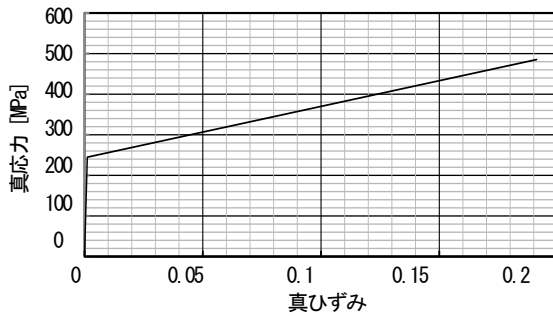


図-13 鋼板の塑性域での真応力-真ひずみの関係

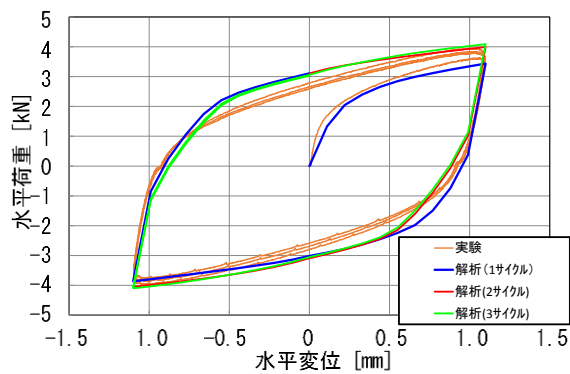


図-14 緩速試験の水平荷重-水平変位の関係
(既往の実験¹⁰⁾ および解析の比較)

表-7 鋼板および鉛プラグの物性値 (弾性域)

名称	ヤング率(MPa)	ポアソン比
鋼板	2.058E+05	0.3
鉛	1.710E+04	0.41

(1) 解析条件

解析対象は、文献 10)のせん断ひずみ $\gamma 22\%$ の緩速繰返し载荷試験に用いた LRB 供試体の標準ケースとした。対象とした LRB 供試体を図-9 に、解析モデルを図-10 に示す。解析モデルは対称であるため、実際の 1/2 の範囲をモデル化した。鉛とゴム、鉛と内部鋼板の境界は文献 4) に基づき摩擦係数 0.8 とし、その他の境界部は固着とした。ゴムは超弾性材料とし、林ら⁴⁾の引張試験結果を基に図-11 に示すような Ogden モデル²⁰⁾を用いて設定した。鉛の物性値は、図-12 に示すように、本論 2 章における室温・ひずみ速度 0.01%/sec の引張試験結果から

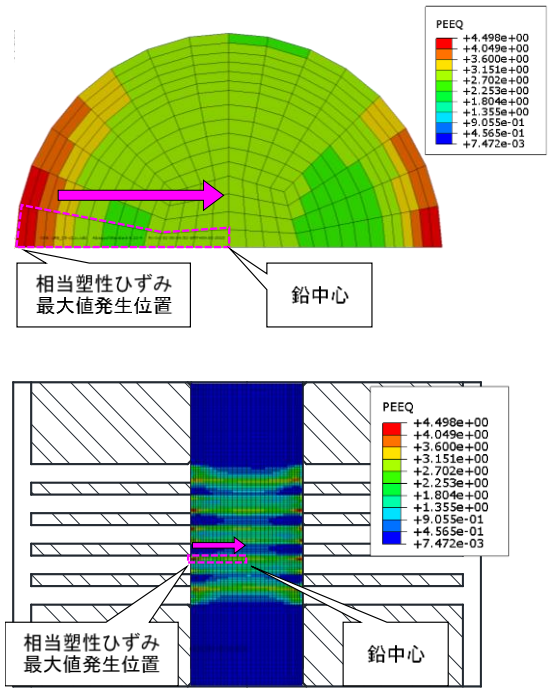


図-15 き裂の進展経路の推定

降伏点を 4.5MPa に調整したバイリニアモデルとした。内部鋼板は、図-13 に示すように弾性範囲に JIS で規定される物性を用い、塑性範囲は SS 材の JIS の規定の下限値から算出した真応力-真ひずみ曲線を用いた。硬化則は線形移動硬化則を用いた。鋼板および鉛プラグの弾性域の材料特性を表-7 に示す。ポアソン比は、文献 21) に記載の値を用いた。

解析ステップについては、まず、面圧 6MPa に適した鉛量の充填による圧縮力を模擬するために、熱荷重を与え、鉛体積を熱膨張させた。次に、供試体の面圧が 6MPa となるように鉛直荷重をモデル上面に作用させた。最後に、せん断ひずみ $\gamma 22\%$ に相当する変形 ($\pm 5.7\text{mm}$) を 4 サイクル载荷した。図-14 にせん断ひずみ $\gamma 4.4\%$ の水平荷重-水平変位の既往の試験結果と、本解析モデルにより実施した解析結果を示す。本検討で用いた解析モデルにより、概ね試験結果を再現できていることがわかる。

(2) 鉛プラグのき裂進展経路の評価

解析結果として、各部位におけるひずみの要素中心値を出力し、最大ひずみ発生部位の要素中心に初期のき裂先端があるとして、き裂進展経路を評価した。図-15 に相当塑性ひずみの分布、および推定したき裂進展経路を示す。相当塑性ひずみの最大値発生位置は鉛プラグの最外縁で内部鋼板との接触部付近であった。相当塑性ひずみ分布より、き裂は鉛プラグ最外縁の最大値発生位置から鉛プラグの中心に向かって進展していると推定できる。

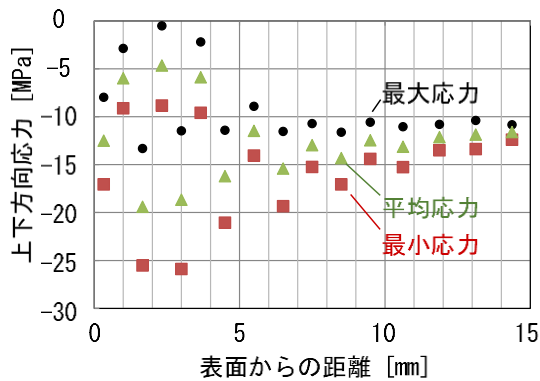


図-16 推定したき裂進展経路における4サイクル目の上下方向の最大、最小、および平均応力

相当塑性ひずみ範囲は、0.2 を超えており、用いた鉛の材料特性より、推定したき裂進展経路は全域で塑性化していることが示された。

(3) 鉛プラグの応力状態の評価

筆者らが行った LRB 供試体による緩速繰返しせん断変形試験の結果、面圧が 6MPa 作用している条件における鉛プラグは分断しなかった¹⁰⁾。ここでは、面圧が 6MPa 作用している条件における鉛プラグが分断しなかった原因について考察する。推定したき裂進展経路における4サイクル目の上下方向の最大、最小、および平均応力を図-16 に示す。面圧が 6MPa 作用している条件では、き裂面直交面応力の最大応力 (σ_{max}) 及び、平均応力 ($\sigma_m = [\sigma_{max} + \sigma_{min}]/2$) はいずれも圧縮域にあることがわかる。鉛プラグの表面に発生したき裂が内部に進展するためには、き裂面直交方向に引張応力が発生する必要があると考えられるが、前述の試験のような鉛プラグに面圧 6MPa に適した鉛量の充填による圧縮力と面圧 6MPa による圧縮力の2つの圧縮力が作用している条件では、き裂面直交方向に引張応力が発生しないため、き裂が進展する速度は低下すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、継続的にせん断変形を受ける鉛プラグの繰返し変形特性に着目し、鉛単体の試験片を用いた低サイクル疲労試験を行い、緩速の繰返し荷重に対する鉛の材料特性の変化を評価した。さらに、LRBの孔内に密閉された鉛プラグの応力場の状態を明らかにするために、FE解析を行い、水平せん断変形中の鉛プラグの応力場の状態を評価した。本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) 鉛材料の試験片を用いて低サイクル疲労試験を行った結果、1サイクル中の引張側応力振幅が最大値に到達した後、破断に至るまでだらかに減少する繰返し軟化挙動を示し、引張側応力振幅値が顕著な低下を示すことがなかった。
- 2) 低サイクル疲労試験の結果について、引張破断延性データを含めて算出した非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係から、室温ではひずみ速度が遅いほど寿命が短く、また、50℃においては室温よりも寿命が短い傾向が認められた。
- 3) 周波数修正法により低サイクル疲労寿命を評価し、50℃においては有意な周波数依存性が現れなかったが、室温においては明らかな周波数依存性が認められた。
- 4) 鉛材料の低サイクル疲労き裂の進展特性を評価し、鉛と比較的特性に近いと考えられる各種はんだの常温～40℃等について比較したところ、鉛材料の平均値は Sn-37Pb(40℃)付近に位置していた。
- 5) 既往の研究において緩速繰返し载荷試験を行った LRB 供試体を対象に FE 解析を行い、鉛プラグのき裂進展経路を推定した。また相当塑性ひずみ範囲は、0.2 を超えており、用いた鉛の材料特性より、仮定したき裂進展経路は全域で塑性化していることが示された。
- 6) FE 解析の結果、面圧が 6MPa 作用している条件では、鉛プラグの上下方向の最大、最小、および平均応力はいずれも圧縮域にあることがわかった。鉛プラグの表面に発生したき裂が内部に進展するためには、き裂面直交方向に引張応力が発生する必要があると考えられるが、鉛プラグに面圧 6MPa に適した鉛量の充填による圧縮力と面圧 6MPa による圧縮力の2つの圧縮力が作用している条件では、き裂面直交方向に引張応力が発生しないため、き裂が進展する速度は低下すると考えられる。

謝辞：本検討は、阪神高速道路株式会社とオイレス工業株式会社との「鉛プラグ入り積層ゴム支承の耐久性に関する共同研究」の成果の一部である。また、鉛材料の試験については、株式会社コベルコ科研に多大な協力を頂いた。検討にあたっては一般財団法人阪神高速道路技術センター主催の「劣化したLRBの性能検証に関する検討会（主査：京都大学防災研究所 五十嵐晃教授）」の委員各位からも貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の

- 復旧に係る仕様, 1995.
- 2) (財)土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル(案)，1992.
 - 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
 - 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国土技術政策総合研究所資料第 646 号/土木研究所資料 4202 号，2011.
 - 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，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.516-526，2013.
 - 6) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和史，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.59A，pp.527-539，2013.
 - 7) 篠原聖二，星隈順一：地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性評価に関する実験的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol.71，No.4，[特]地震工学論文集，Vol.34，pp.1587-1599，2015.9.
 - 8) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第 967 号，土木研究所資料第 4359 号，2018.3.
 - 9) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，八ツ元仁，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(地震工学論文集第 33 巻)，2014.
 - 10) 篠原聖二，林訓裕，足立幸郎，長弘健太，河内山修，五十嵐晃，高橋良和：鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）に緩速繰返しせん断変形が及ぼす影響の分析，第 21 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，(公社)土木学会地震工学委員会，pp.103-110，2018.7.
 - 11) (公社)土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会：実務者のための耐震設計入門別冊，2001.10. 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様，1995.
 - 12) Guruswamy, S. : *Engineering Properties and Applications of Lead Alloys*, CRC Press, 1999.
 - 13) 北川正樹，山口弘二：低サイクル疲労に関する VAMAS ラウンドロビン試験，鉄と鋼，第 78 年（1992）第 9 号，pp.25-34，1992.
 - 14) Coffin, L.F. : *Met. Trans.*, Vol.3, p.1777, 1972.
 - 15) 田中啓介，鈴木健太，藤井貴之，渋谷隆治，藤山一成：鉛フリーはんだにおける疲労き裂進展に及ぼす平均ひずみと平均応力の影響，機械学会論文集 A 編 79-799，pp.266-280，2013.
 - 16) 能瀬春雄，坂根政男，山下満男，塩川国夫：鉛系および非鉛系はんだの引張・圧縮低サイクル疲労き裂進展挙動，機械学会論文集 A 編 68-665，pp.88-95，2002.
 - 17) 平修二，大谷隆一，材料の高温強度論，オーム社，1980.
 - 18) Dowling, N.E. : Geometry effects and J integral approach to elastic-plastic fatigue crack growth, *Cracks and Fracture, ASTM STP 601*, American Society for Testing and Materials, pp.19-32, 1976.
 - 19) (公社)日本材料学会：改訂・材料強度学，2005.
 - 20) 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.
 - 21) (一財)電力中央研究所：免震・制振デバイスに用いられる鉛材料を対象とした熱動力学的な有限要素解析 -鉛のひずみ速度と温度依存性を考慮した構成式の提案-，電力中央研究上報告書，2006.6.

EVALUATION OF LOW-CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF PURE LEAD FOR INVESTIGATION OF DURABILITY OF RUBBER BEARINGS WITH LEAD PLUGS (LRB)

Masatsugu SHINOHARA, Kunihiro HAYASHI, Yukio ADACHI, Osamu KOUCHIYAMA,
Kenta NAGAIRO, Akira IGARASHI and Yoshikazu TAKAHASHI

To evaluate the mechanical properties of lead plugs used in lead rubber bearings subjected to cyclic deformation, uniaxial low cycle fatigue tests and tensile deformation tests of pure lead were conducted under various strain rate and temperature conditions. From the results of the uniaxial low cycle fatigue tests and the tensile tests, the effect of strain rate and temperature dependency on the low-cycle fatigue behavior of pure lead were determined. On the other hand, the result of finite element analysis of lead rubber bearings under shear deformations suggests that the stress range induced in the lead plugs during cyclic deformation is within the compression range, if a compressive stress due to the axial stress of 6MPa and sufficient filling of lead is provided to the bearing. It is surmised that the rate of fatigue crack growth under this condition is remarkably lower than the tensile stress condition.