

道路橋を対象としたZn-Al合金を用いた 制震ダンパーの開発に関する基礎的研究

松田 泰治¹・東 健司²・長弘 健太³・西本 達⁴

¹正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番地1号)

E-mail:mazda@kumamoto-u.ac.jp

²大阪府立大学大学院 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号)

E-mail:higashi@mtr.osakafu-u.ac.jp

³オイレス工業(株) 免制震事業部 技術開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町1000)

E-mail:nagahiro@oiles.co.jp

⁴学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39番地1号)

E-mail:123d8820@st.kumamoto-u.ac.jp

近い将来発生することが確実視されている東海・東南海・南海地震に備えるためには、既存の橋梁等の土木構造物における耐震性能向上を図ることが重要である。そのため制振ダンパーを組み込み、構造物の運動エネルギーを散逸させることで地震時の主構造の損傷を軽減するという損傷制御型の設計が行われる例が増えている。ダンパーとして用いられる材料は鉛や低降伏点鋼、高粘性材料など多種多様である。その中でも、室温で超塑性を示すZn-Al合金を利用した制震ダンパーが開発・実用化されている。本研究では道路橋の耐震性能向上を目的に載荷試験に基づき超塑性材料を用いた積層ゴム支承と鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性を比較し、超塑性材料を用いた積層ゴム支承の実用性を検討する。

Key Words : Damper, Super-plastic metal, Zinc, Aluminium, Loading

1. はじめに

世界有数の地震国である我が国は 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに併発した津波によって壊滅的な被害を受けたことは記憶に新しい。さらに将来発生することが確実視されている東海・東南海・南海地震のために過去の地震から学び、被害を軽減するための対策を考えることは必要不可欠なことである。近年、既存の橋梁等の土木構造物における耐震性能向上を目的として、制振ダンパーを組み込み、地震時にダンパーに、より構造物の運動エネルギーを吸収させることで主構造の損傷を軽減するという損傷制御型の設計が行われる例が増えている。つまり地震時に構造物が揺れ始めると、主要構造部材よりも先に制震ダンパーを弾塑性変形させることで地震のエネルギーを吸収し揺れを低減させるもので各種の構造物で適用されている。現在、様々なダンパーが開発・実用化されているが、その中で履歴型の鋼材系ダンパーは製作・施工が容易で安価であること、耐久性に優れることなどから広く用いられている。しかし、定期的なメンテナンス、点検が必要であり、大地震後は交換す

ることが必須となっている。

近年、様々な分野で活用されている一方、建物を対象として Zn-Al 合金は金属組織をナノレベルに微細制御することで室温超塑性を発揮する金属材料である。超塑性材料の特徴である高いひずみ速度依存性を示し、ひずみ速度が高くなるにつれて強度は高くなり、逆に伸びは低下する。東ら¹⁾は Zn-Al 合金が累積ひずみに対して加工硬化せず、応力がほぼ一定で、制振効果の安定性に極めて優れることを明らかにしている。また、東ら^{2,3)}は Zn-Al 合金を用いたビル用軸力ブレース型制振ダンパーの開発や木造用 Zn-Al 合金制振ダンパーの開発を行った。高木ら⁴⁾は Zn-Al 合金のインゴットに加工熱処理を段階的に行う TMCP 技術を用いて結晶粒を微細化し、このような工業的な製造プロセスを採用し、合金を量産化することに世界で初めて成功した。また、橋梁を対象としたものでは後藤ら⁵⁾が超弾性合金と超塑性合金からなる自己修復型複合構造ダンパーを開発し、鋼製橋脚で支持された 2 径間連続桁橋の耐震補強への適用を想定し、従来の鋼製軸降伏型ダンパー、粘性ダンパーを用いた場合と比較検討している。

本研究で検討対象としている Zn-Al 合金の特徴は延

性に優れ降伏強度のコントロールが容易であることと、従来用いられている鉛などの材料に懸念される環境の影響が少ないということである。本研究では超塑性材料を用いた積層ゴム支承と鉛プラグ入り積層ゴム支承との特性を比較し、超塑性材料を用いた積層ゴム支承の実用性を検討する。

2. 試験概要

(1)試験材料

対象とした超塑性材料は Zn-Al 合金である。延性に優れ、一般に引張りずみで 100%以上の変形能力を持ち、繰り返し荷重下においてもひずみ劣化や加工硬化が少ない材料である。また比較対象となる鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)は鋼製支承に比べメンテナンスが容易であることから現在、多くの使用実績がある。超塑性材料の安定した変形能力に着目し複数回の地震動に対して地震エネルギーの逸散を担うことを期待する。試験体の物性を表-1 に示す。

表-1 試験体の寸法・形状

せん断弾性率	G	0.8N/mm ²
ゴム径	D _R	100mm
鉛径	D _P	29mm
Zn-Al 径	D _Z	9mm
ゴム層厚	$\sum t_r$	13.8mm
鉛断面積	A _P	661mm ²
Zn-Al 断面積	A _Z	64mm ²
一次形状係数	S ₁	10.2
二次形状係数	S ₂	7.2
一次剛性／二次剛性	K ₁ /K ₂	6.5

(2)試験体

試験体の積層ゴム支承(RB)は1辺 110mm の正方形断面で高さ 25.3mm の積層ゴムである。試験体の構造概要を図-1, 2 に示す。2.3mm のゴムが 6 層、その間に

2.3mm の内部鋼板が 5 枚重なり、それを連結鋼板が上下に挟み込み、さらに内部ゴムの劣化を防ぐため外側が 5mm の被覆ゴムによって覆われている。プレートを取り付けるために上下部にそれぞれ 8 個のネジ穴を設けた。RB の中心に $\phi 29\text{mm}$ の貫通穴を設け、そこに鉛を圧入した鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)と、 $\phi 9\text{mm}$ の貫通穴に Zn-Al 合金を圧入した Zn-Al 合金積層ゴム支承(ZARB)の 2 種類の試験体に対して載荷試験を行う。LRB 試験体の基本的な力学特性を表-2 に示す。

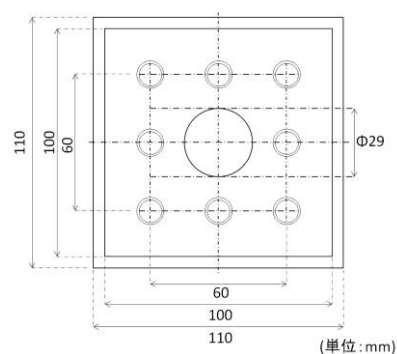


図-1 試験体図と断面図(LRB)

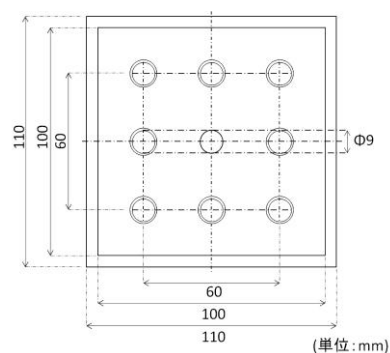


図-2 試験体図と断面図(ZARB)

表-2 LRB試験体の力学特性の設計値

等価剛性	Keq	0.61kN/mm
等価減衰	Heq	21.20%
降伏荷重	Qd	5.51kN
一次剛性	Ku	2.48kN/mm
二次剛性	Kd	0.382kN/mm
鉛直剛性	Kv	368.8kN/mm

(3)試験装置

試験には巴技研製の可搬型ハイブリッドアクチュエータ 20kN 型装置を用いて変位制御による载荷を行う。ハイブリッドアクチュエータに試験体を取りつけた概略図を図-3 に示す。計測にはレーザー変位計 LB-01(Keyence 社製)を用いた。ハイブリッドアクチュエータの性能は表-3 に示す。ハイブリッドアクチュエータは 2 軸载荷試験プログラムで制御されており、運転は手動/自動の切り替え可能、入力波は矩形や正弦波など選択することができる。試験体の上下にフランジプレートを用い、さらにハイブリッドアクチュエータと取り付けプレートで固定している。

表-3 ハイブリッドアクチュエータの性能

動的荷重	±20kN
最大荷重	±40kN
最大速度	23kein(正弦波)
ストローク	±200mm

表-4 载荷試験の条件

波形	正弦波
制御方式	変位
载荷回数	4 回
振幅	表-5 参照
周波数	0.01Hz

表-5 加振振幅

ゴムせん断ひずみ	片振幅(mm)
10%	1.38
20%	2.76
30%	4.14
40%	5.52
50%	6.9
60%	8.28
70%	9.66
80%	11.04
90%	12.42
100%	13.8
150%	20.7
200%	27.6

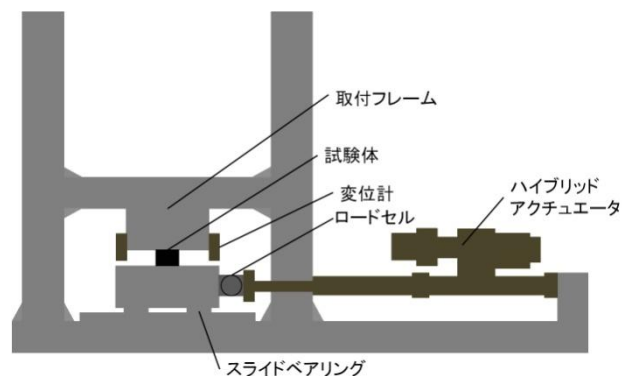


図-3 試験体取り付け図

(4)試験方法

試験体上面を鋼製フレームに固定した状態で試験体下面の取り付け架台にハイブリッドアクチュエータで強制変位を与えて加振する。供試体に対し一定の周波数で载荷する。载荷試験プログラムで载荷の制御を行い、各種設定を入力する。入力条件を表-4に示す。加振周波数0.01Hzの正弦波で、4サイクルの载荷を行う。試験体のゴム総厚に対するせん断ひずみで100%までは10%間隔で加振を行い、100~200%まではその間隔を50%と設定した。

3. 試験結果

正弦波载荷試験で得られたZn-Al合金を用いた積層ゴム支承(ZARB)の荷重-変位曲線の50%, 100%, 150%, 200%のケースの重ね書きを図-4に示す。微小ひずみ(10%~50%)のZARBの重ね合わせを図-5に示し、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の荷重-変位曲線の50%, 100%, 150%, 200%のケースの重ね書きを図-6に示す。また、LRBとZARBそれぞれの50%, 100%, 150%, 200%の単独の結果を図-7, 8, 9, 10に示す。载荷を行ったサイクルのうち、安定して挙動している3サイクル目をデータとして採用し、荷重-変位曲線を示している。LRB, ZARBとも安定した曲線を描きながら挙動していることがわかる。図-4よりZARBの履歴特性はゴムのせん断ひずみレベルに依存せず安定した特性を示している。ゴムせん断ひずみ200%時はややゴムのハードニングが認められる。微小せん断ひずみレベルにおいても図-5に示すように安定した履歴特性を示している。これらの結果よりは変位ゼロにおける荷重切片の幅を読み取り、減衰性能の変化を評価するとせん断ひずみレベルの増加により、荷重切片の値が増加する傾向が認められた。これはZn-Al合金が有するひずみ硬化の性質が履歴特性に表れたものと考えられる。図-6には同様の载荷試験におけるLRBの履歴特

性を示している。LRBもゴムせん断ひずみ200%時はややゴムのハードニングが認められるが、ゴムのせん断ひずみレベルに依存せず安定した履歴特性を示している。図-7~10にはそれぞれのひずみレベルにおけるZARBとLRBの履歴特性に比較を示した。表-1に示したように積層ゴムに圧入したZn-Al合金と鉛プラグの断面積の比は約10倍である。単純にZn-Al合金と同一径の鉛プラグを圧入して同様の载荷試験を行えば、切片荷重の幅は約10分

の一になると考えられるが、Zn-Al合金を圧入したケースではそれより大きな値となっている。また、先に言及したせん断ひずみレベルの増加により、荷重切片の値が増加する傾向はZn-Al合金の方が相対的には強い。この理由としてひずみレベルに応じて片ゼロ点近傍でのひずみ速度が増加する影響も考えられる。

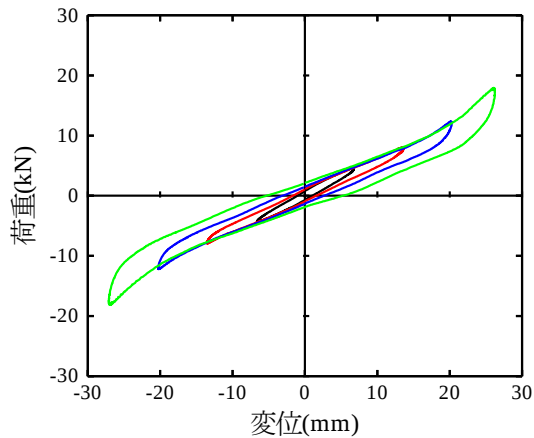


図-4 ZARBの履歴特性

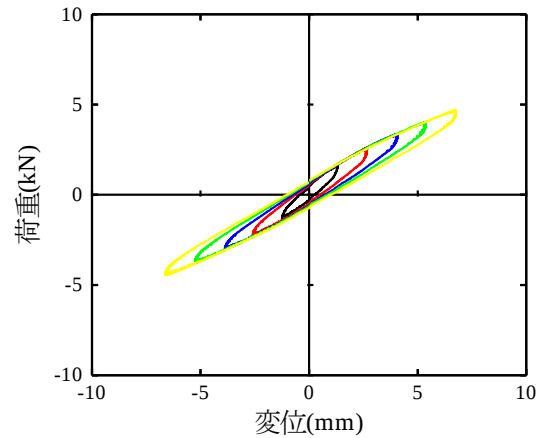


図-5 微小ひずみレベルの履歴(ZARB)

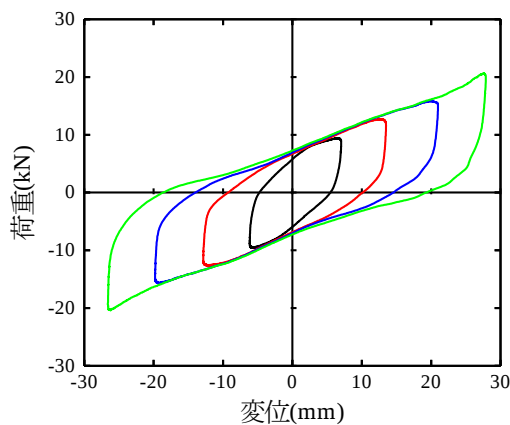


図-6 LRBの履歴特性

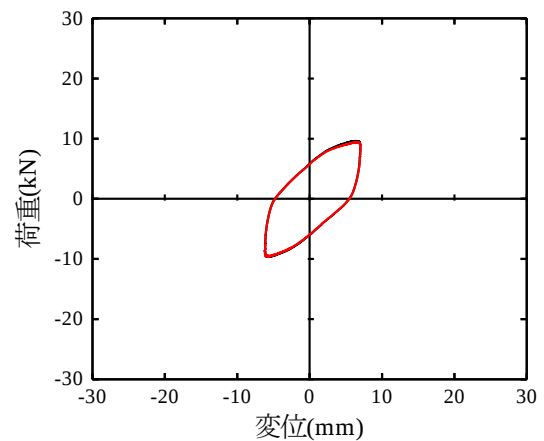
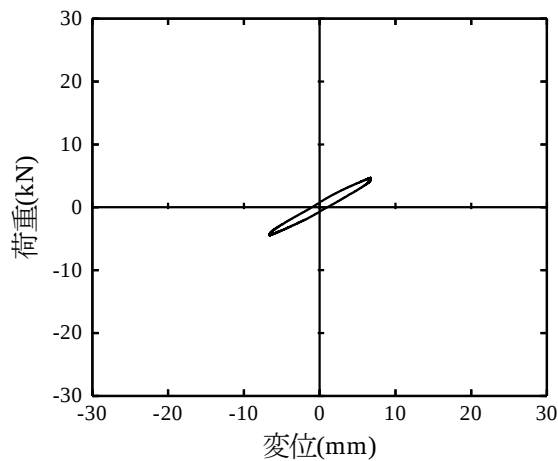


図-7 ゴムせん断ひずみ50%時のZARB(左)とLRB(右)の履歴特性の比較

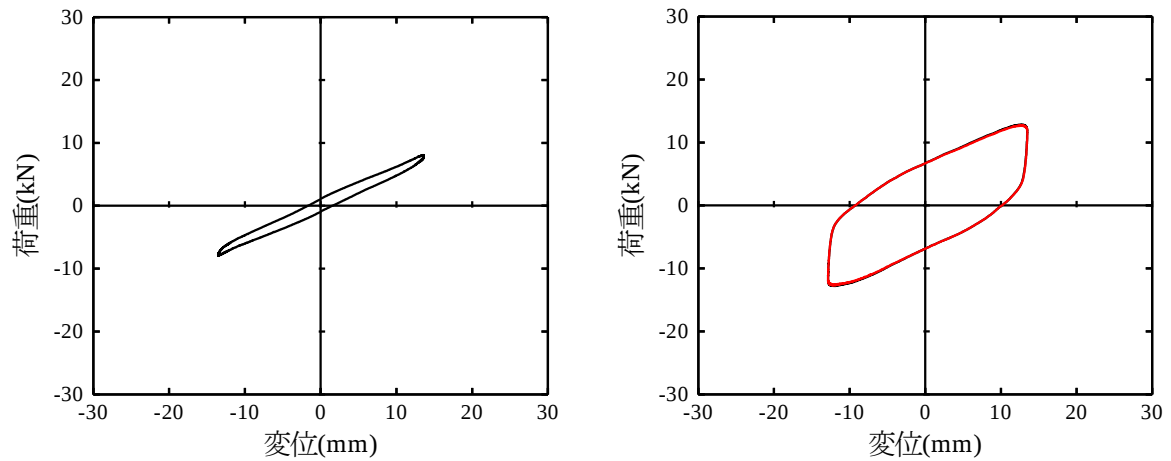


図-8 ゴムせん断ひずみ100%時のZARB(左)とLRB(右)の履歴特性の比較

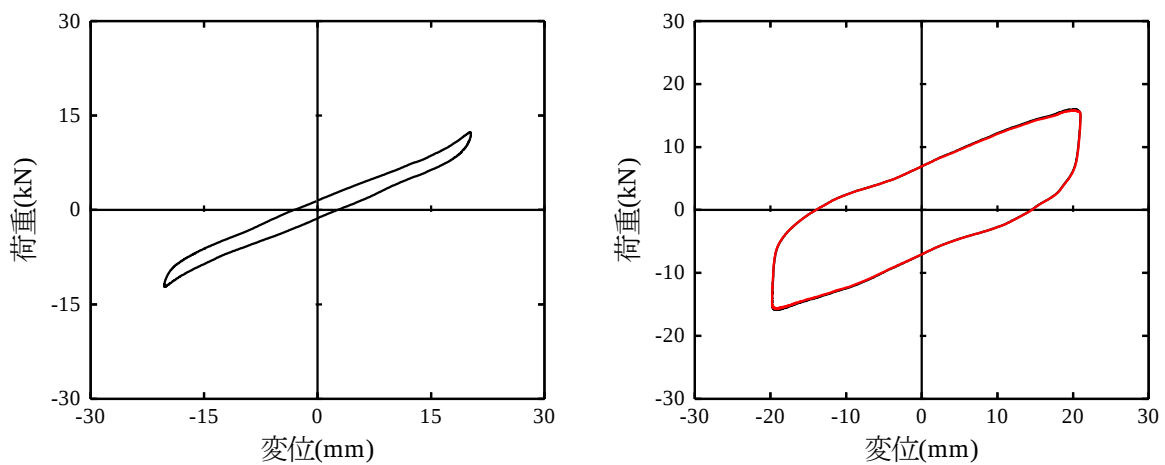


図-9 ゴムせん断ひずみ150%時のZARB(左)とLRB(右)の履歴特性の比較

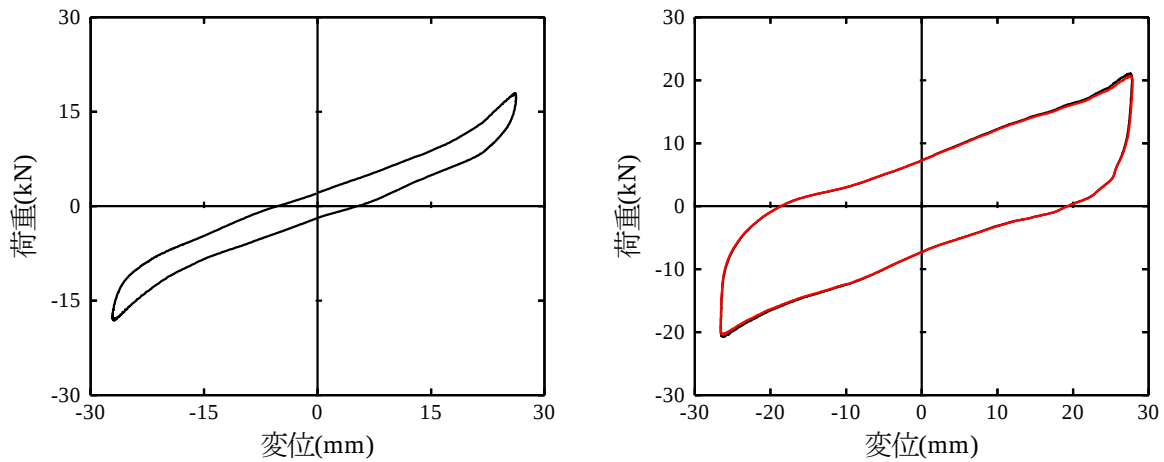


図-10 ゴムせん断ひずみ200%時のZARB(左)とLRB(右)の履歴特性の比較

4. まとめ

Zn-Al合金を圧入した積層ゴムと鉛入り積層ゴムを対象に、静的載荷試験を実施して、荷重-変位関係よりその力学特性の比較・検討を行った。その結果、Zn-Al合金を圧入した積層ゴムでは鉛入り積層ゴム

と同様にゴムせん断ひずみの増加に対して安定した履歴特性を示すことを確認した。また、履歴曲線から読み取った切片荷重の比較からZn-Al合金は鉛に比べ、見かけの降伏応力度が相対的に大きく、高い減衰性能を有することが明らかとなった。今後は、動的載荷試験を含めより詳細な検討を実施して、ダンパーとしての適用性を検証する予定である。

参考文献

- 1) A.Kushibe,K.Makii,L.F.Chang,T.Tanaka,M.Kohzu,K.Higashi, Mater.Sci.Forum.475-479(2005)3055.
- 2) 櫛部淳道, 西村章, 高木敏晃, 南知幸, 瀧川順庸, 槇井浩一, 東健司: 強風や地震に対して安心・安全な居住空間を実現する室温超塑性亜鉛アルミ合金制振ダンパーの開発と実用化, pp1-9, 2009
- 3) A.Kushibe, T.Tanaka, Y.Takigawa, K.Higashi : Fracture Mechanisms in Ultrafine-grained of Zn-22Al Alloy Exhibiting Room-temperature High-strain-rate Superplasticity, Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII, pp25-34, 2009
- 4) 高木敏晃, 南知幸, 櫛部淳道, 瀧川順庸, 東健司: 室温超塑性 Zn-Al 合金の開発と制振ダンパーへの適用, まてりあ 第48巻 第2号, pp.88-90, 2009.
- 5) 後藤芳顕, 海老澤健正, 和田廣人, 松澤陽: 超弾性合金と超塑性合金からなる自己修復型複合構造ダンパー, 構造工学論文集, pp.540-551, 2013

(2013.?.?受付)

STUDY ON DEVELOPMENT OF SEISMIC DAMPER USING Zn-Al ALLOY FOR HIGHWAY BRIDGES

Taiji MAZDA, Kenji HIGASHI, Kenta NAGAIRO, Satoru NISHIMOTO

In order to prepare for Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes, improvement of seismic performance of existing highway bridges is one of the important disaster protection countermeasures. After Kobe earthquake, adoption of seismic damper for highway bridges to absorb the kinetic energy of upper structure was increased. An ultra fine grained Zn-Al alloy was developed by means of Thermomechanical control process. This alloy has super-plasticity properties at room temperature. So, it is effective in the construction of a seismic damper for highway bridges. In this research, cyclic loading test of laminated rubber bearing with Zn-Al alloy plug. Basic mechanical property is compared with lead rubber bearing. Applicability as seismic damper for highway bridges is investigated.