

(論文)

室温高速超塑性の発現と制震デバイスへの展開

横井浩一(工博)*・上田宏樹**・岡田 徹**・加藤 稔(工博)**・三村裕一***・田淵勝道****

*技術開発本部・材料研究所 **技術開発本部・機械研究所 ***都市環境・エンジニアリングカンパニー・建設エンジニアリング部
****株式会社竹中工務店

High-speed Superplasticity at Room Temperature for Seismic Device Applications

Dr. Koichi Makii・Hiroki Ueda・Toru Okada・Dr. Minoru Kato・Yuichi Mimura・Masamichi Tabuchi

High-strain-rate superplasticity was first realized at room temperature with a Zn-Al alloy. Compared to low-yield-point steels, Zn-Al alloys have some excellent properties. In particular, Zn-Al alloys have lower work hardening rate and higher ductility. In this paper, a seismic damper design using a Zn-Al alloy is presented. The resultant damper design, a so-called "maintenance-free seismic device", successfully provides both ecological and high performance characteristics.

まえがき = 阪神大震災以降、地震時の建築構造物の応答を低減させ、建築構造物の損傷を回避するための制震デバイスの研究が多数行われている^{1)~4)}。地震時の建築構造物の振動を吸収するためのダンパについては以下の形式に分類される。

- ・金属の塑性変形時の変形と塑性変形荷重とのヒステリシス特性を利用したダンパ。
- ・ダッシュポットによるメカニカルダンパ。
- ・粘性樹脂のせん断変形による制震ダンパ。

金属の塑性変形時の変形と塑性変形荷重とのヒステリシス特性を利用したタイプには、極軟鋼(100MPa級、235MPa級)⁵⁾が一般にもちいられている。しかし、鉄鋼材料は塑性変形時に加工硬化、歪み劣化する特性があり、極軟鋼をもちいた制震デバイスは、地震後に点検、交換をおこなう必要がある。また、地震時の繰り返し変形に対し、加工硬化することにより変形荷重が増加するので、建築構造物の地震応答に対する設計が困難である。免震デバイスを中心にPbが使用されているが、Pbは有害金属であり、環境問題の観点で、Pbフリーダンパーが必要になると予想される。また、メカニカルダンパにおいては、デバイスが非常に高価になるうえ、定期的な保守点検が必要である。粘性樹脂のせん断変形による制震ダンパは、粘性樹脂の機械特性が温度依存性を有する。

本研究では、極軟鋼の問題点を補い、代替可能な金属材料として超塑性特性を有するZn-Al合金に着目し、その特性を利用した制震デバイスを開発した。超塑性Zn-Al合金は、塑性変形時に加工硬化が少なく、歪み劣化し難い特性を有している。しかし、加工硬化が少ないことから、塑性変形が局部的に進行し、所要の塑性変形荷重がえられないだけでなく、局所破断に至る問題点も有している。そこで、加工硬化の少ないZn-Al合金を有効に塑性変形させるための構造としてせん断変形型に着

目し、地震時の振動において安定した変位-荷重ヒステリシス特性を有し、地震後の破損のない制震デバイス(メンテナンスフリー)を実現している。

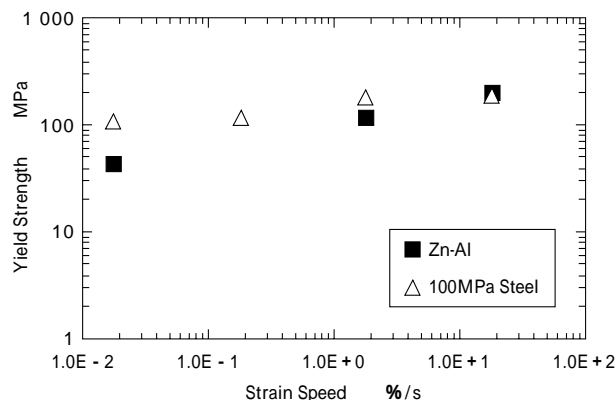
なお、常温高速超塑性合金の制震デバイスへの展開は、(株)竹中工務店技術研究所基礎研究部、同社大阪本店設計部の協力をえて実施した。

1. 室温高速超塑性 Zn-Al 合金の材料特性

Zn-Al合金には、「加工硬化しない」「歪み劣化しない」「延性が大きい」「Pbを含まないので環境にやさしい」の特徴がある。Zn-Al合金の組成および諸元を第1表に示す⁶⁾⁷⁾。次に、歪み速度に対する降伏強度、引張強度および伸び特性を従来の100MPa級極軟鋼と比較して第1図、第2図および第3図に示す。100MPa級極軟鋼を第1~3図中では「100MPa Steel」と表記する。また、累積歪みに対する応力の変化を第4図に示す。第1図、第2図より、Zn-Al合金は10~20%/sの歪み速度域で降伏強度が200MPa、引張強度が250MPaであり、そのときの伸びは第3図より60%以上で100MPa級極軟鋼より大きいことがわかる。

第4図から100MPa級極軟鋼は累積歪み10%までは加工硬化して応力が上昇するのに対し、Zn-Al合金はつねに一定の応力であり、加工硬化しないことがわかる。

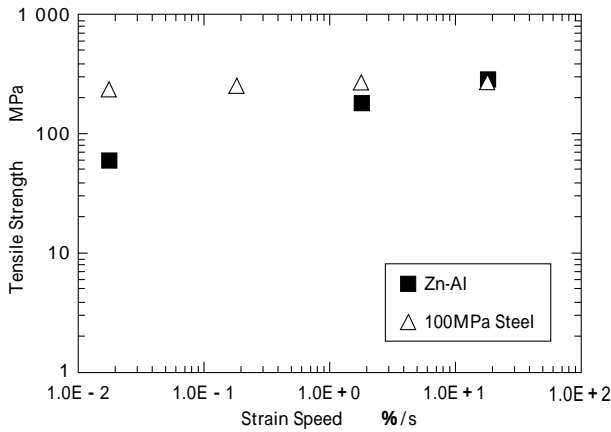
なお、累積歪み_{total}の定義を以下に示す。



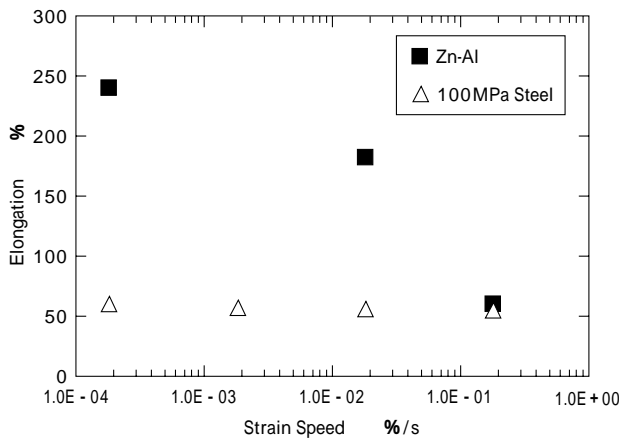
第1図 降伏強度の歪み速度依存性
Fig. 1 Strain rate sensitivity of yield strength

第1表 Zn-Al合金の物性値
Table 1 Zn-Al alloy's property

Organization	mass%	78% Zn-22%Al
Young's Modulus		66GPa
Density		5.140kg/m ³
Melting Point		382



第2図 引張強度の歪み速度感受性
Fig. 2 Strain rate sensitivity of tensile strength



第3図 伸びの歪み速度感受性
Fig. 3 Strain rate sensitivity of elongation

$$\sigma_{total} = (4n - 3) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、nは累積回数、 σ は歪み振幅(±0.1%)を示している。

2. せん断変形型制震デバイスの設計

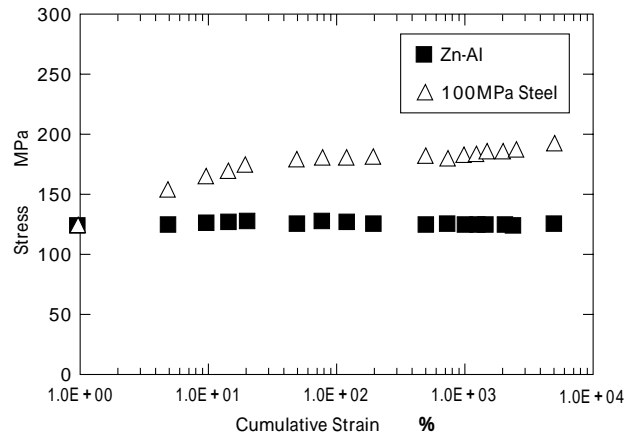
Zn-Al合金をもちいた制震デバイスの構造について、加工硬化が少ないための局所変形の影響が少ない形式として、Zn-Al合金部材に対する変形荷重の作用点が多くなるせん断パネル型を採用する。せん断パネル型は、一般に建築構造物において第5図に示すように設置され、層間変形に対して、せん断変形することによりパネル部が塑性変形し、荷重を発生させる機構になっている。ここで、従来はパネル部材には極軟鋼がもちいられている。

3. Zn-Alせん断パネル制震デバイスの性能

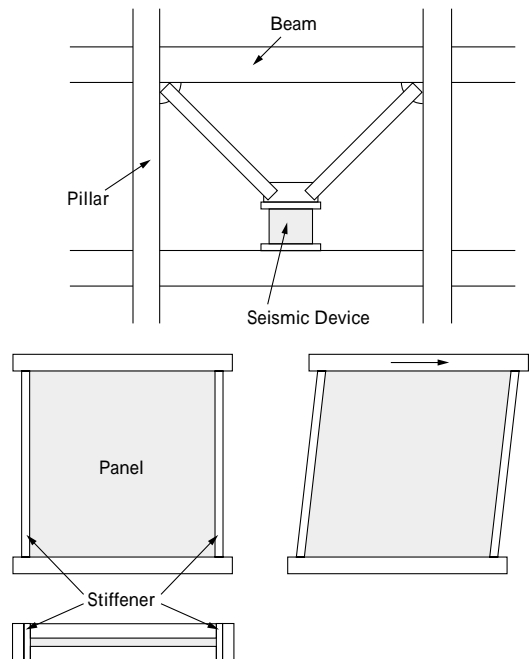
第6図に示す供試体を製作し³⁾、繰り返し変形時の変位-荷重特性の評価を実施した。せん断パネル部が面外に座屈するため、その変形を抑制する座屈防止構造を追加している。Zn-Alパネルの仕様を以下に示す。

- 板厚 t : 10mm
- せん断長さ L : 300mm
- 設計せん断荷重 : 4.3×10^5 N

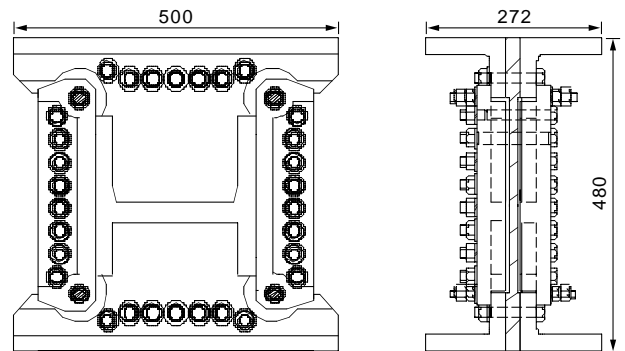
載荷条件は変位 ±16mm (変位角 0.053rad), 1.2Hz, 軸歪み速度 20%/s である。なお、第7図に変位-荷重



第4図 繰返し歪み負荷における変形応力変化
Fig. 4 Cumulative strain vs flow stress

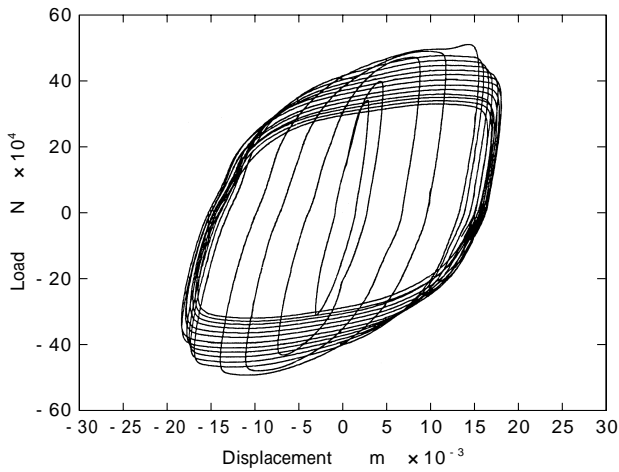


第5図 せん断変形型ダンパーの模式図
Fig. 5 Shear deformation panel type damper



第6図 Zn-Alせん断変形型ダンパーの外観
Fig. 6 Zn-Al shear deformation damper

ヒステリシス特性の測定結果を示す。予備載荷を2cycleおこなった後、3cycle目から合計18cycle連続的に載荷している。せん断荷重は1cycle目においてはほぼ設定値である430kNに達した。繰り返し変形に対する変位-荷重ヒステリシスの1cycle目からの荷重の変動は30%である。また、写真1に繰り返し変形後のZn-Alパネルを示す。繰り返し変形をおこなっても、Zn-Al合金にはき裂、損傷は一切見られないことがわかる。



第7図 ヒステリシス特性 (±16mm, 1.2Hz)
Fig. 7 Hysteresis property at ±16mm, 1.2Hz

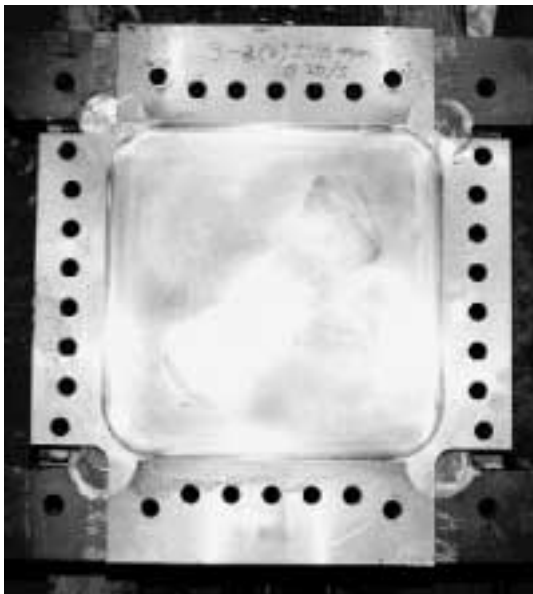


写真1 試験後の Zn-Al 合金パネル (±16mm, 1.2Hz)
Photo 1 Zn-Al alloy panel after deformation at ±16mm, 1.2Hz

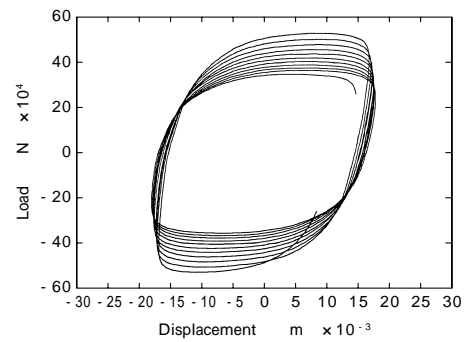
次に, Zn-Al 合金の変形荷重の速度依存性, 温度依存性について示す。

変位±16mm, 0.6Hz, 軸歪み速度 10%/s の結果を第8図に, ±32mm, 0.03Hz, 軸歪み速度 1%/s の結果を第9図に示す。

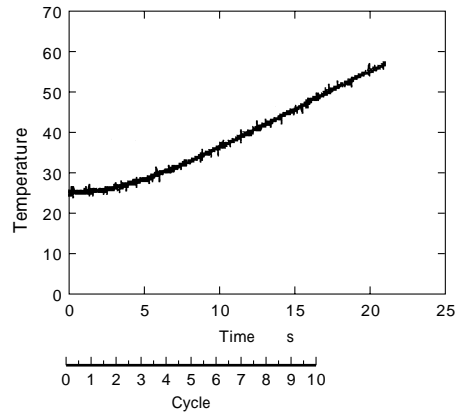
温度上昇最大値はともに 57 であり, そのときの荷重はほぼ同じ値になった。ただし, ±16mm, 0.6Hz, 軸歪み速度 10%/s の場合は歪み速度が速いため, 降伏強度の速度依存性から, 1cycle 目の荷重値が ±32mm, 0.03Hz, 軸歪み速度 1%/s の場合の 1.1 倍であった。このことは第1図で示す歪速度に対する降伏強度の関係と一致している。

また, ±32mm, 0.03Hz, 軸歪み速度 1%/s の場合は 4cycle 目以降温度が一定になっており, 荷重も一定になっていることが分る。このことから, Zn-Al 合金の変形荷重の温度依存性については, 温度が一定であれば荷重も一定になることが示された。

次に, 1 枚の Zn-Al 合金パネルに対し, ±8mm (変位角 0.027rad), 1.2Hz, 軸歪速度 10%/s,



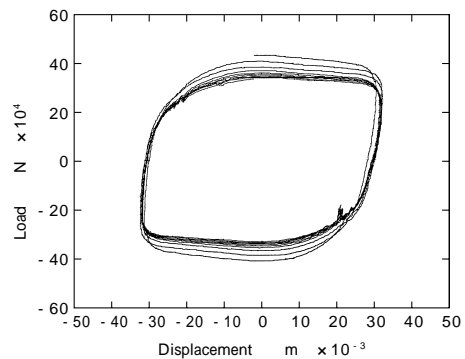
a) Hysteresis Property at ±16mm, 0.6Hz



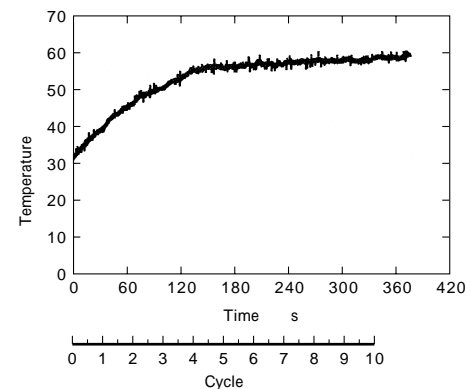
b) Temperature Change at ±16mm, 0.6Hz

第8図 変形中の温度変化と荷重変化 (±16mm, 0.6Hz)

Fig. 8 Temperature change and flow stress during deformation at ±16mm, 1.2Hz



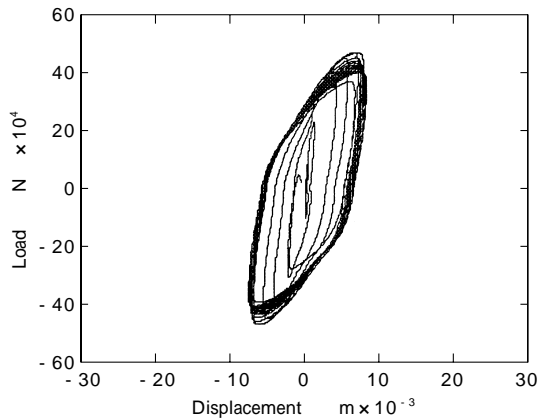
a) Hysteresis Property at ±32mm, 0.03Hz



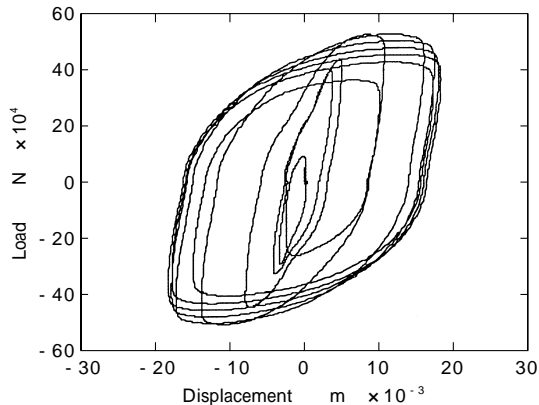
b) Temperature Change at ±32mm, 0.03Hz

第9図 変形中の温度変化と荷重変化 (±32mm, 0.03Hz)

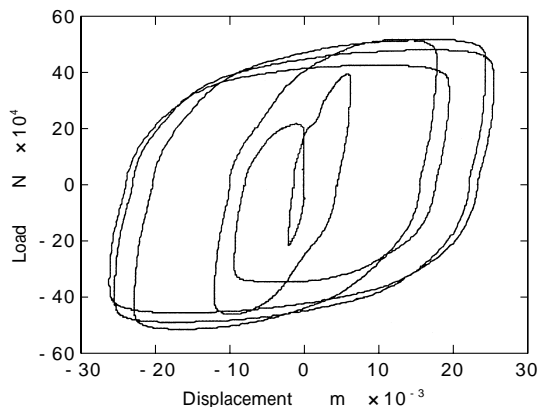
Fig. 9 Temperature change and flow stress during deformation at ±32mm, 0.03Hz



a) ±8mm, 1.2Hz



b) ±16mm, 1.2Hz



c) ±24mm, 0.8Hz

第10図 連続搭荷時のヒステリシス特性
Fig. 10 Hysteresis property in continuously loading

±16mm (変位角 0.053rad), 1.2Hz 軸歪速度 20%/s,
±24mm (変位角 0.080rad), 0.8Hz 軸歪速度 20%/s
の3条件について、上記の順番で1条件搭荷終了後に停止し、次の条件を搭荷する連続実験をおこなった。第10図に試験結果を示す。±8mm(変位角 0.027rad), 1.2Hz, 軸歪速度 10%/s と ±16mm (変位角 0.053rad), 1.2Hz, 軸歪速度 20%/s および ±24mm (変位角 0.080rad), 0.8Hz, 軸歪速度 20%/s のいずれの条件においても 1cycle 目の荷重はほぼ同じ値であった。つまりデバイス特性として加工硬化が少なく、また、一度塑性変形しても歪劣化が少ないことが確認された。

むすび = Zn-Al 合金をもちいて室温高速超塑性の発現と、本材料の制震デバイスへの適用を検討した結果、次の結論をえた。

- 1) Zn-Al 合金をもちいて世界ではじめて、室温高速超塑性合金の大型化に成功した。
- 2) 加工硬化が少なく、溶接が困難な Zn-Al 合金をせん断パネル型制震デバイスに適用するためには、パネル部を有効にせん断変形させるために補剛部材をリンク構造にし、4 辺すべてで Zn-Al 合金パネルをボルト結合させる構造が適している。
- 3) 連続搭荷に対して、変位 - 荷重ヒステリシス特性が安定で、搭荷後にせん断パネル部に破損が生じないことを確認した。
- 4) Zn - Al 合金製制震デバイスの変位 - 荷重ヒステリシス特性については、歪速度に対しては、Zn - Al 素材の降伏強度特性が発揮できており、荷重は温度に依存して低下することを確認した。
- 5) 一度塑性変形を受けても繰り返し同じせん断荷重を発生させることが可能であることを確認した。

本研究により、制震デバイスのメンテナンスフリー化に目処をえて実物件に適用された。今後、本デバイスを普及していくために、常温高速超塑性材料自身とデバイスとしての性能をさらに向上し、対象とする建築構造物を拡大していく。

メンテナンスフリー制震デバイスは新築構造物のみならず、既存建築物、重要文化財などのレトロフィットにも対応可能であり、本技術は安心・安全な環境づくり以外にも、個人資産・文化資産の維持にも貢献可能な技術である。

なお、本研究の推進にあたり竹中工務店技術研究所基礎研究部 長嶋俊雄部長をはじめ同研究部関係各位、ならびに同社大阪本店設計部 岡本達雄副部長をはじめ同設計部関係各位に多大なるご指導をいただきました。この場をかりて深甚の感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤田隆史ほか、機講論, No.97-10, Vol. A, (1997) p.320.
- 2) 岩田範生ほか、日本建築学会講演論文集, Vol.3, (1999) p.937.
- 3) 梁川幸盛ほか、日本建築学会講演論文集, Vol.3, (1999) p.871.
- 4) 千葉隆文ほか、戸田建設技報, (1999) p.45.
- 5) 鈴木孝彦ほか、日本建築学会便概集, 材料施工 (A - 1), (1997), p.501.
- 6) 横井浩一ほか、日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系・環境系, (1999) p.25.
- 7) 横井浩一、日本建築学会全国大会講演便概集, 材料施工 (A - 1), (2000) p.255.
- 8) 上田宏樹ほか、日本機械学会ダイナミクス&デザインカンファランス講演論文集, (2000) p.322.