

〈一般研究課題〉 制震構造体摺動面の表面改質による建築構造物の
耐震性向上

助成研究者 名城大学 宇佐美 初彦



制震構造体摺動面の表面改質による建築構造物の 耐震性向上

宇佐美 初彦
(名城大学)

Improvement of seismic resistance for building structure by means of surface modification for dumper surface

Hatsuhiko Usami
(Meijo University)

Abstract :

The present study describes improvement of seismic resistance for building structure by means of surface modification for dumping system. It is well recognized that reliability of the building structure against earthquake is mainly guaranteed by seismic base isolation and seismic resistance systems consisting of dumping mechanics. A shock absorbing element and a guideway system including friction resistance are frequently applied to the vibration damping mechanics. The characteristic of sliding interface is an important factor for maintain the friction properties the elements. In addition, a long term reliability of the elements against the lubricants depletion and surface corrosion is necessary required. We focus on surface modification for the sliding interface of the damping system using a zinc (Zn) as a supplement material. Zinc (Zn) and zinc oxide (ZnO) fine powder were used. Various techniques, wet plating, dry coating by means of a shot peening and dispersion into lubricant were applied to the supplement. Results of the sliding friction experiment showed that the supplement of Zn was effective means to decrease the friction coefficient and the wear loss. Rolling contact fatigue life of the Zn wet plating was more than 10 times larger than that of mirror finished surface. The dispersion of Zn and ZnO into lubricant decrease in the friction coefficient and contributed to the improvement of fatigue life. Effects of the Zn supplement on the rolling contact fatigue life were discussed from residual stress distribution and elemental

analysis results.

1. はじめに

地震に対する構造物の安全性は、免振あるいは制震システムによって担保されている。同システムは摩擦力や流体の粘性減衰を応用した構造であり、転がりあるいは滑り接触する案内面から構成される。この案内面の長期に渡る信頼性を確保することが、構造物の安全性に直接寄与する。したがって、摩擦低減を目的とする表面改質は、軌道面に負荷される接線応力を低減でき劣化を抑制できるので、摩擦損失を低減するだけでなく信頼性向上に寄与する^{1, 2)}。

摩擦低減を目的とした表面改質には、自己潤滑性を発現する材種の成膜が挙げられる。DLCのような硬質膜も転がり軸受軌道面に適用されているが、界面の密着性に起因するはく離の問題が存在する³⁾。スズ(Sn)等の軟質金属は硬質基材上に成膜することで自己潤滑性を発現するが、材種や膜厚によっては弾性ヒステリシスが増加し摩擦抵抗を増加させる可能性がある⁴⁾。一方、摩擦調整剤の油剤への配合は、すべり摩擦のみならず転がり摩擦でも摩擦低減に有効であるが、低温では被膜形成が促進されず十分に摩擦低減効果を発現しないことも指摘されている⁵⁾。また、固化や酸化などの経年劣化による油剤の性能低下の懸念もある。

亜鉛(Zn)は軟質金属の一つであり、犠牲防食機能を有し成膜による腐食抑制が転がり軸受の疲労寿命向上に寄与することが報告されている⁶⁾。他方、Znの酸化物である酸化亜鉛(ZnO)にも自己潤滑特性が確認されている⁷⁾。以上から、油剤にZnを分散し軌道面に供給することはZnの酸化抑制効果とZnOの潤滑効果が期待でき、疲労寿命向上に寄与する可能性は大きい。

そこで本報告では、Znの接触面への供給による表面改質を案内面に適用し、すべり接触と転がり接触試験の両手法でその摩擦摩耗低減および信頼性向上の効果を評価した。さらに接触面の詳細な観察を通して、Znの犠牲防食やZnOの自己潤滑効果を考察し、制震・免震構造案内面へのZn添加の適用可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片は市販の高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)のスラスト軸受軌道輪(形式51105, $\phi 42 \times \phi 25 \times t3$ mm)であり、熱処理(200 °C×12 h)によって残留応力を除去した後、端面をダイヤモンドスラリーで鏡面($<0.01 \mu\text{m Ra}$)として試験表面とした。また、この鏡面仕上げされた試験表面に湿式(Wet plating)及び乾式(Mechanical plating)手法でZnを成膜した。湿式Zn鍍金は電解鍍金により電圧3 V、電流0.9 Aで3分行い、乾式Zn鍍金ではZnをコーティングした鉄粒子を60 m/secの速度で10分間表面に投射させZnを成膜した。なお、膜厚は乾式、湿式共に2 μm 程度である。

図1は各試験表面の光学顕微鏡像及び表面粗さである。湿式及び乾式鍍金によるZn成膜後では鏡面に比して表面粗さは増大した。これらのZn膜に加え、比較対象として湿式手法により銅(Cu)およびスズ(Sn)被膜も作製した。

本実験で使用した潤滑油剤はPAOであり、この中に、平均粒径1 μm のZnおよびZnOを超音波洗浄振動により潤滑油中に分散懸濁させた。なお、ZnOの分散による潤滑油の粘度の変化は見られなかった。この場合も比較対象として固体潤滑剤であるグラファイト(粒径5 μm)および二硫化モリブ

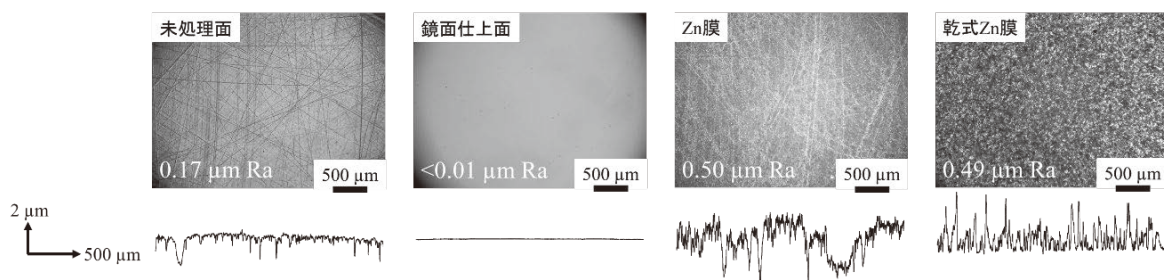


図1 ディスク試験片の光学顕微鏡像と表面粗さ

デン (MoS_2 , 同 $5\mu\text{m}$) も同様な手法で懸濁させ実験に供した。

2・2 すべり摩擦試験

すべり摩擦特性は3ボールオンディスク方式の試験装置で評価した。ボールは直径1/4インチ (=6.35 mm) のSUJ2を3個用い、直径33.5 mmのピッチ円状に等間隔に配置され治具に固定される。ボール試験片は試験装置上部の駆動軸に、ディスク試験片(SUJ2)は下部に設置され、接触荷重はディスク側からエアシリンダを用いて圧縮空気によって負荷した。試験条件は負荷荷重を約50 N (最大接触面圧2 GPa), 試験速度は0.25 m/s, 潤滑油量は0.2 ml供給し、室温大気中(25-28 °C, 相対湿度40-65 %) で実施した。

2・3 転がり疲労試験

転がり疲労特性はスラスト式転がり疲労試験機を用いて評価した。試験片を下部の治具に設置し、三つの転動体を保持器に120 °間隔に配置した。転動体には直径1/4インチ (=6.35 mm) のSUJ2球を用いた。試験片には一定荷重が印加され、上部の治具を一定速度で回転させることにより試験を行った。試験条件は、負荷荷重を約4410 N, 3822 N, 2940 N(最大接触面圧7.2 GPa, 6.9 GPa, 6.3 GPa), 回転数1500 rpm, 室温大気中(25-28 °C, 相対湿度40-65 %) である。

3. 実験結果

3・1 すべり摩擦特性

すべり摩擦試験の結果が図2である。同図左は被膜面の結果であり、鏡面の摩擦係数は実験初期には0.1程度であるが、摩擦距離の増加に伴い0.08程度まで減少する。摩擦係数は湿式Zn鍍金膜を付与した場合に最も小さく最終的には0.05程度であった。CuやSn膜でも摩擦低減に寄与するが、その効果はZn膜に比して小さい。また、乾式Zn膜の摩擦係数は実験初期には低いものの、最終的にはSn膜と同程度であった。

油剤に微細粒子を分散した結果が図2右である。 MoS_2 分散油剤の摩擦係数は脈動を伴い、最終的には鏡面仕上面と同程度であった。黒鉛分散油剤では、脈動は発生しないものの、摩擦低減効果は小さい。これに対してZnおよびZnO粒子分散油剤の摩擦係数は実験中他に比して低く安定している。以上のように、被膜による摩擦低減効果はZn膜で顕著であり、油剤分散による効果は、ZnおよびZnOで確認されたことから、Znは摩擦低減に有効であることが明らかとなった。

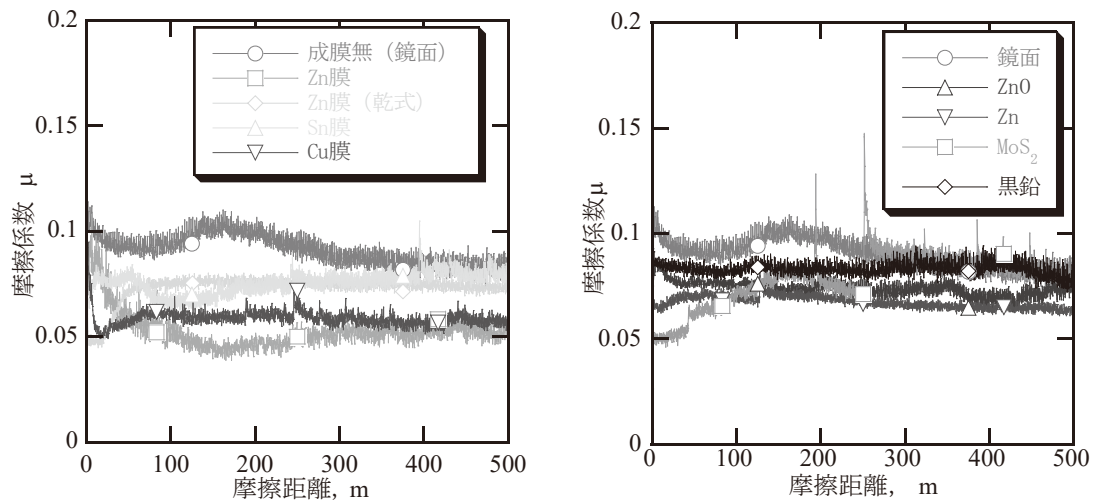


図2 摩擦係数の経時変化(左:軟質金属成膜面,右:微細粒子添加油剤)

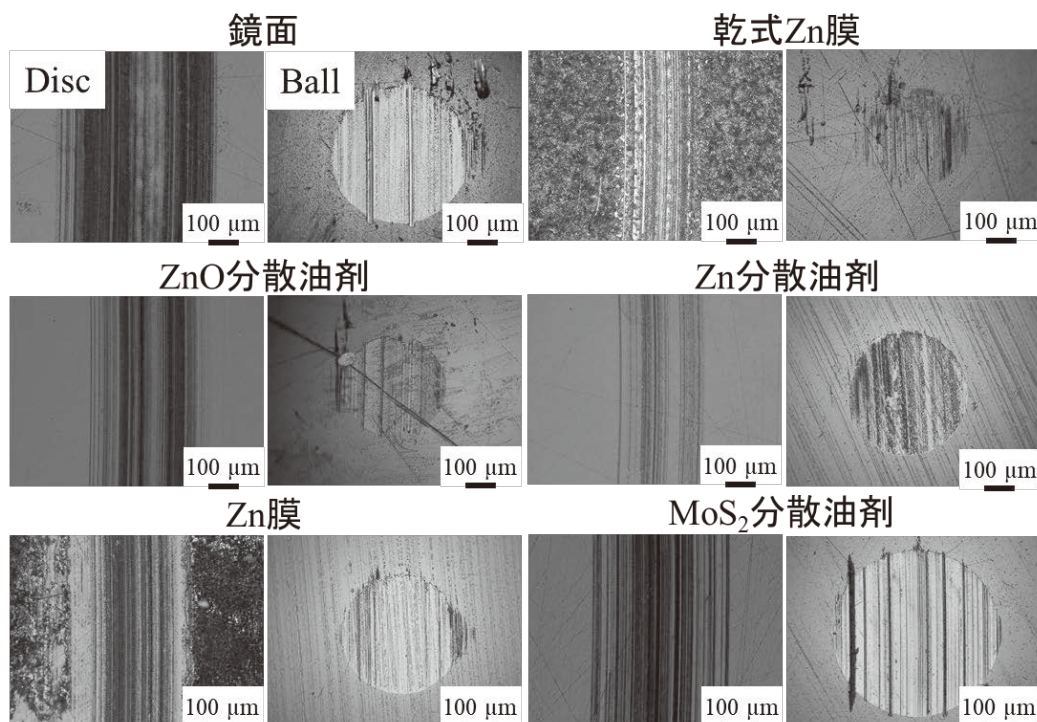


図3 実験後の摩擦面の光学顕微鏡像(左:ディスク,右:ボール)

図3は実験後の摩擦面の光学顕微鏡像である。いずれの結果でもディスク側の摩耗深さは小さく摩耗量の算出は困難であった。ボール側摩耗面は摩耗により円形となる。この直径より比摩耗量を算出した結果、鏡面では $2.41 \times 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{N}$ 、乾式Zn皮膜では $1.69 \times 10^{-12} \text{ mm}^2/\text{N}$ であり、成膜面では最小となった。一方、分散油剤の結果でもMoS₂は $5.53 \times 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{N}$ であり、分散によって増加する傾向であったが、ZnやZnOを分散した場合には減少した。以上から、すべり摩擦において、Znの接触面への供給は摩擦摩耗低減に有効であることが分かった。

3・2 転がり疲労試験結果

図4は転がり疲労特性(S-N曲線)である。転がり疲労試験はすべり摩擦試験において鏡面に比し

て摩擦係数の低減が確認されたZnO分散油剤、Zn膜および乾式Zn膜を評価対象とした。Zn分散油剤は疲労試験では振動値が実験初期から大きく検出されたため除外した。最大接触面圧7.2 GPaの場合、Zn膜は、PAOのみを用いた鏡面試験片に比して疲労寿命が約10倍向上する結果となった。また、ZnO分散油剤を用いた試験片でも鏡面に比して疲労寿命が約10倍向上し、Zn膜と同等の疲労寿命向上効果が得られた。最大接触面圧6.3 GPaの場合、ZnO分散油剤は鏡面に比して疲労寿命は約3倍向上し、Zn膜では疲労寿命が約18倍向上した。

図5は、最大接触面圧6.3 GPa条件下での各試験片のはく離の光学顕微鏡像及び表面プロファイルである。鏡面に比してZnO分散油剤及び湿式Zn鍍金では軌道輪の接触幅が大きい。また、すべて摩擦試験での摩擦低減効果と転がり疲労寿命には相関が確認される。

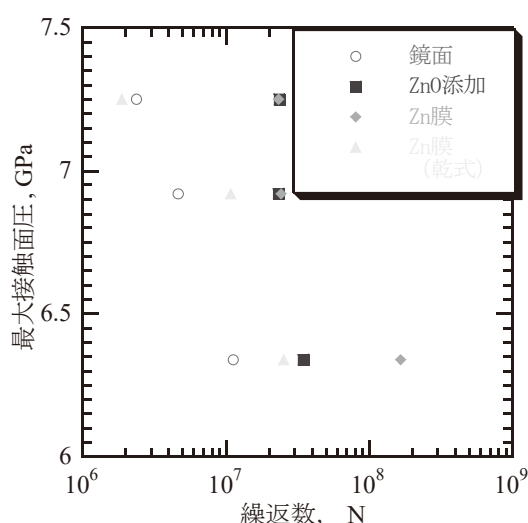


図4 転がり疲労特性

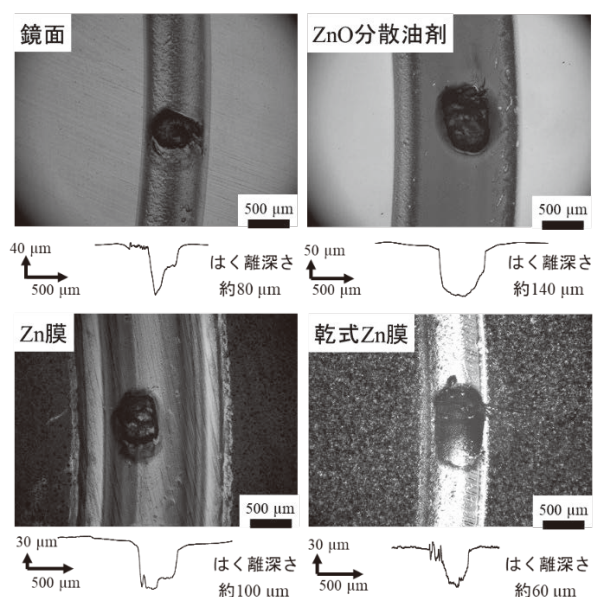


図5 軌道面はく離部分の光学顕微鏡像

4. 考察

実験結果より、Znの供給は摩擦係数、摩耗量、耐疲労特性向上に有効であることを確認した。そこで、Znの表面改質効果を検討するために、試験途中の被膜の形成状態を評価した結果が図6である。図示のごとく鏡面の軌道面は黒色に変色しているのに対して、Zn膜およびZnO分散油剤では軌道面の変色は僅かである。Znについては犠牲防食作用、ZnOでは自己潤滑機能の発現が知られている。SEM/EDX観察では軌道面にZnの残存が確認される。図7は、図6の赤枠で示したZnO軌道面上でのSEM/EDX分析結果である。ZnOではZn及びOが軌道輪上から検出された。潤滑油中へのZnO微粉末分散によっても軌道輪上にZnOが供給され成膜されたことが示唆される。図8は、試験時間及び荷重を統一した転がり疲労試験後の各試験片を電解研磨し、深さ方向に残留応力を測定した結果である。試験後の表面ではZn膜で最大の圧縮残留応力が測定されており、内部では湿式Zn鍍金及びZnO分散油剤が鏡面に比して高い圧縮残留応力が付与されていた。図5の表面形状から各試験片のはく離深さの平均は約100 μmであり、表面から深さ100 μmの位置で最も圧縮方向に残留応力が付与されていたのはZnO分散油剤である。き裂進展の起点となる深さ付近で圧縮方向に付与された残留応力がき裂の進展を抑制し、疲労寿命が向上したことが示唆される。

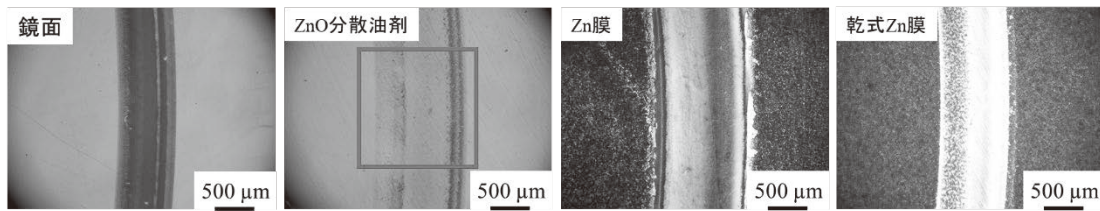


図6 繰り返し数64800回後の軌道輪の光学顕微鏡像 ($P_{max} = 5.9$ GPa)

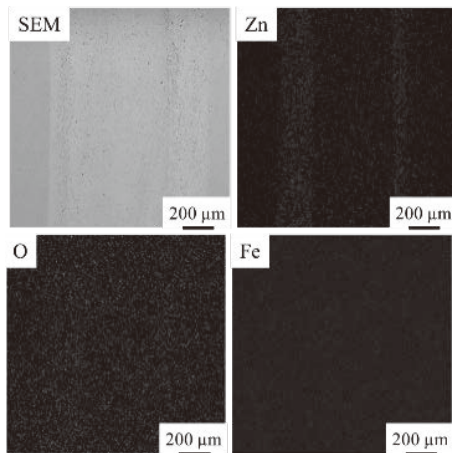


図7 ZnO分散油剤を用いた軌道面のSEM/EDX結果(分析位置は図5赤枠に対応)

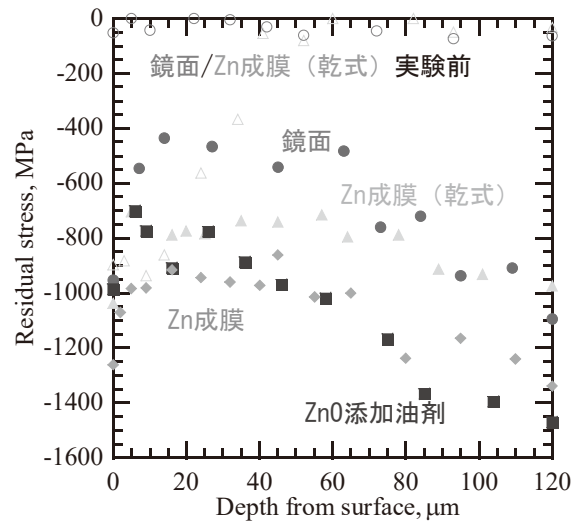


図8 軌道面深さ方向残留応力分布

5. 結言

建築構造物の耐震性を担う制震、免振システムの性能および信頼性向上を目的として、亜鉛 (Zn) を用いた構成機器案内面の表面改質の適用可能性を検討した。得られた結果を要約すれば以下のようなものである。

- (1) 疲労寿命はZn膜面では未処理面(鏡面)に比して一桁以上の改善が確認された。この場合、すべり摩擦の低減効果も大きいことから、接触面での微小滑りに起因するすべり摩擦の低減による可能性が示唆される。
- (2) すべり摩擦試験で得られた摩擦係数と転がり疲労試験で得られた疲労寿命には相関が確認された。
- (3) ZnO分散油剤の疲労寿命改善や滑り摩擦低減効果はZn膜には及ばないものの、その優位性が確認された。

文 献

- 1) 武田 篤史・田中 浩一：摩擦型ダンパーを用いた橋梁系の振動台実験 土木工学会論文集, 67, 3(2011)628
- 2) 渡辺 亨, 藤井 慶太, 白井 雄一, 背戸 一登：超音波振動を利用した免震構造物のための可変摩擦ダンパの基礎研究, 理論応用力学講演会 講演論文集, 2005年 54 巻 3F19
- 3) 佐藤 努, 齋藤 剛：DLC被膜の転がり軸受への適用, 日本機械学会年次大会, 11. 1(2011) 1
- 4) 阿部 俊介, 安藤 泰久：硬質金属と軟質金属を組み合わせたナノストライプ構造の乾燥摩

- 擦特性, トライボロジスト, 61, 1 (2016) 50
- 5) 森 誠之: トライボロジーと表面技術, 表面技術, 65, 12 (2014) 546
 - 6) 長谷 拓海, 宇佐美 初彦: ショットピーニングによって形成された亜鉛薄膜の転がり疲労寿命改善効果, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 19, 332 (2019) 102
 - 7) F. A. Essa, Qiaoxin Zhang, Xingjiu Huang, Mohamed Kamei Ahmed Ali, Ahmed Elagouz and Mohamed A. A. Abdelkareem: Effects of ZnO and MoS₂ Solid Lubricants on Mechanical and Tribological Properties of M50-steel-Based Composites at High Temperatures: Experimental and Simulation Study, Tribology Letters, 65, 97 (2017) 10
 - 8) 松本 將: 混合潤滑状態下における転がり-すべり接触面の接線力とピッチング発生限界の関係, 日本機械学会論文集, 81, 823 (2015) 14 吉田亨: 自由転がり摩擦, 精密機械, 27, 318 (1961) 468
 - 9) 田川 一生, 村木 正芳: 転がり軸受の疲労寿命に及ぼすポリアルキルメタクリレート系添加剤の影響, トライボロジスト, 60, 11 (2015) 758
 - 10) 和田 正毅, 水野 萬亀雄: 潤滑下における固体潤滑剤の効果, 精密機械, 51, 7 (1985) 1414
 - 11) Taizo Makino, Takanori Kato, Kenjo Hirakawa: The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel, International Journal of Fatigue, 36, (2012) 68