

第 I 部門 ナノ多層膜コーティングを施した鋼部材の疲労強度改善に関する実験的研究

大阪市立大学工学部 学生員 中村 和晶
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 松村 政秀
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 兼子 佳久

大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 山口 隆司
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 橋本 敏

1. 研究背景および目的

近年、鋼桁橋の桁端部やガセットプレート取付部、鋼床版の縦リブとデッキプレートの溶接部など、鋼橋の疲労き裂の発生が非常に大きな問題となっている。建設後 50 年を経過し、補修が必要となる橋梁数の増加も予想され、簡易で確実な疲労強度の改善技術の開発が強く望まれている。疲労強度の改善には、鋼板をボルトや溶接により追加補強する方法が一般的であるが、本研究では、機械部品に対する顕著な疲労寿命の向上が報告されているナノ多層膜コーティング¹⁾に着目する。鋼橋においても、ソールプレート近傍など疲労き裂発生の可能性がある箇所に施工段階でナノ多層膜コーティングを施したり、疲労き裂発生部位にナノ多層膜コーティングを施すことで、鋼構造物の長寿命化・延命化が期待される。

本研究では、ナノ多層膜コーティングを施した供試体の疲労試験を行い、鋼構造分野における本手法による疲労強度向上の適用可能性について実験的に検討する。

2. 疲労試験

2.1 ナノ多層膜コーティング

Hall-Petch 則²⁾に従うと、金属材料全体の結晶粒径をナノメートルスケールまで小さくできれば、非常に高い強度が得られることになる。また、摩擦・磨耗、および疲労特性に関しては表面の性質に強く支配されるため、材料の表面のみナノ構造化することで材料全体が強化される。このような経緯で研究開発されたのがナノ多層膜コーティングである。Cu と Ni のナノ多層膜コーティングの 1 例を図-1 に示す。この多層膜で疲労強度が 50 倍以上改善されたことが既に報告されている。

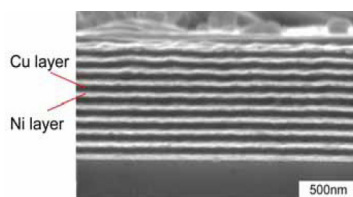


図-1 ナノ多層膜コーティングの 1 例

2.2 試験概要

ナノ多層膜コーティングの下地となるストライクめっきのみを施した供試体およびナノ多層膜コーティングを施した供試体を用いて以下の 2 項目に着目した疲労試験を行う。

- ① 疲労強度改善効果の検証
- ② き裂発生抑制効果の検証

また、電子顕微鏡を用いた破面解析により疲労強度改善メカニズムを考察する。

2.3 供試体の内訳

試験供試体は図-2 に示す CCT 試験片であり³⁾、材質は SS400、板厚は 6 mm である。

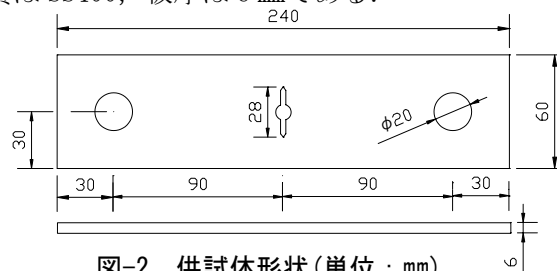


図-2 供試体形状(単位: mm)

無補強の供試体(NR)、ナノ多層膜コーティングを施した供試体(NC-A)、予き裂導入後にナノ多層膜コーティングを施した供試体(NC-B)、および予き裂導入後にストライクめっきのみを施した供試体(ST)の計 4 種類の供試体を用意した(表-1)。

表-1 供試体の内訳とめっき厚

供試体	予き裂	ストライクめっき厚(μm)	ナノ多層膜コーティング厚(μm)
NR	なし	—	—
NC-A	なし	10	5
NC-B	4 mm	10	5
ST	4 mm	10	—

2.4 供試体の作製

Ni/Cu の積層からなるナノ多層膜を電気めっき法により CCT 試験片中央部のみに成膜した。写真-1 にナノ多層膜コーティングの成膜状況を示す。各層厚を 100 nm とし、50 層繰り返すことで 5 μm の Ni/Cu

ナノ多層膜を形成し、その下地となるストライクめっき厚は通電量で制御し、10 μ mとなるように成膜した。

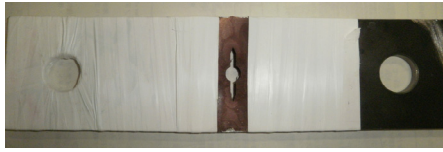


写真-1 ナノ多層膜コーティングの成膜状況

2.5 载荷条件

MTS810 疲労試験機を用いて、定荷重・定振幅試験およびビーチマーク試験を行う。各試験の载荷条件を表-2に示す。最大荷重を一定に保ち、最小荷重を変化させてビーチマークを形成した。

表-2 各試験方法と载荷条件

	定荷重・定振幅	ビーチマーク
①最大荷重 (kN)	35	35
②最小荷重 (kN)	7	21
平均荷重 (kN)	21	28
応力比 $R(=②/①)$	0.2	0.6
繰返し速度 (Hz)	5	5

3. 試験結果と考察

き裂発生繰返し回数および破断繰返し回数を表-3に示す。ただしき裂発生繰返し回数はクラックゲージの示す抵抗値が1段階変化した時を発生と定義している。NRと比較して、NC-Aでは約5.5%、NC-Bでは約23%、STでは約11%疲労強度が改善した。NC-B、STの疲労強度計算には、NRのき裂長さが4mm到達後の繰返し回数を用いて比較した。NRとNC-Aよりき裂発生繰返し回数はほぼ同じ回数であり、ナノ多層膜コーティングによるき裂発生抑制効果は明確には認められなかった。また、NC-BとSTより、予き裂を導入した供試体にナノ多層膜コーティング、およびストライクめっきを施すと、き裂の再進展が抑制できることがわかった。き裂発生抑制効果はき裂発生部のスリット形状および予き裂の有無が関係していると考えられる。

表-3 き裂発生繰返し回数と破断繰返し回数

供試体	き裂発生繰返し回数 (cycles)	破断繰返し回数 (cycles)
NR	2.59×10^4	1.28×10^5
NC-A	2.66×10^4	1.35×10^5
NC-B	1.76×10^4	6.73×10^4
ST	1.58×10^4	6.10×10^4

また、応力拡大係数 ΔK とき裂進展速度の関係を図-3に示す。 $\Delta K > 1.7$ の範囲でNCのき裂進展速度がNR、STに比べて小さくなり、ナノ多層膜コーティングによる、疲労強度の改善が確認できる。NRとSTでは

き裂進展速度と応力拡大係数の関係にあまり有為な差異は確認できなかった。

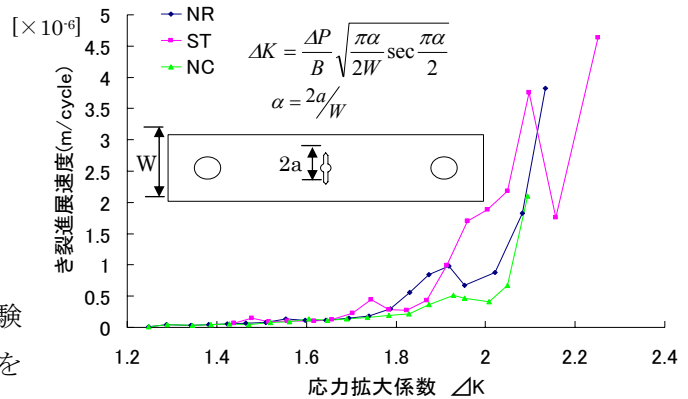
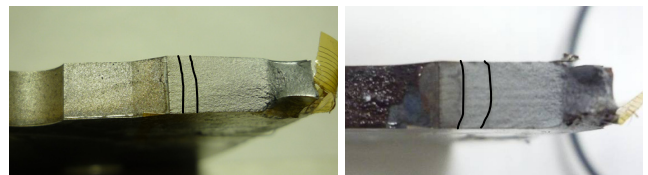


図-3 応力拡大係数とき裂進展速度の関係

4. ビーチマーク形状

NRおよびNCのビーチマーク形状を写真-2にそれぞれ示す。NRと比べ、NCの表面付近でのビーチマーク形状の曲率が大きくなっていることから、ナノ多層膜コーティングにより表面が強化され、表面付近でのき裂進展速度が小さくなっていることがわかる。



(a)NR

(b)NC

写真-2 ビーチマーク形状

5. 破面解析

電子顕微鏡を用いてめっきの密着性を観察した。ストライクめっきと鋼材の間で剥離している箇所が確認された。ストライクめっきとナノ多層膜の間には間隙はなく良好に密着していたと考えられる。

6. まとめ

- 1) ナノ多層膜コーティングを施すことで、 ΔK が1.7以上の範囲でき裂進展速度が低下した。
- 2) 予き裂がある供試体にナノ多層膜コーティングを施すと、き裂の再進展が遅延し疲労強度が改善した。ナノ多層膜コーティングにより、鋼材表面が強化され、表面付近でのき裂進展速度が低下し、材料全体の疲労強度が改善したためと考えられる。これは破面のビーチマーク形状からも確認できる

参考文献

- 1) 兼子佳久: ナノ多層膜コーティングによる材料表面の強化, 大阪市立大学産学官連携データベース
- 2) 石原祥江: めっきの基礎, 槇書店, 1994.5
- 3) ASTM Standard: E647-08, 2008