

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	構造物の長寿命化を目的としたレーザピーニングの圧縮残留応力の付与効果の有効性に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	角谷利恵
Author(English)	Rie Sumiya
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4143号, 授与年月日:2017年7月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:岸本 喜久雄,中村 春夫,井上 裕嗣,水谷 義弘,因幡 和晃
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4143号, Conferred date:2017/7/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

レーザピーニング（LP）は、表層の残留応力改善が可能なピーニングの一つであり、沸騰水型原子炉（BWR）プラントや加圧水型原子炉（PWR）プラントの炉内構造物の応力腐食割れ対策工法や機器の疲労強度向上の工法としての実績がある。この方法は、表層に約 1mm の圧縮残留応力を付与することが可能であるが、施工された機器の使用環境により、付与した圧縮残留応力が変化することが考えられ、施工にあたり、圧縮残留応力の持続性を把握することは機器の信頼性向上のために重要である。残留応力が変化する要因としては、温度変化、応力負荷、クリープ等、様々な要因が考えられる。そこで、本研究では、炉内構造物材料を対象としてクリープひずみが生じない BWR 環境の運転温度域での応力緩和挙動を評価し、さらに、ガスタービンのホイール材を対象として、クリープひずみが生じる温度域で評価し、さらに表面から発生するホールタイムクラッキングに対する影響を評価した。また、他分野への適用も考え、大型構造物である橋梁材への気中での LP 施工の検討を行い、疲労試験にて、LP が疲労限度に及ぼす影響を評価した。

第 1 章においては、残留応力除去ならびに付与方法とそれらの適用先として、応力腐食割れ発生予防対策、疲労強度改善向上、高温疲労およびクリープ破断寿命延伸への適用検討例と圧縮残留応力付与効果の持続性評価についての調査結果を示した。

第 2 章においては、原子力プラントの原子炉炉内機器の構成材料である SUS316L の試験片に LP 施工を実施し、その試験片に応力を負荷して、負荷前後の表面残留応力を X 線回折法にて測定、外部負荷応力が表面の圧縮残留応力に及ぼす影響を評価した。その結果、LP 施工後の表面残留応力は高い圧縮であり、応力を負荷すると表面残留応力に変化が認められ、その変化は引張応力負荷で大きくなるが、室温および 288 °C で、0.2%耐力相当かそれを超える応力を負荷しても残留応力は圧縮応力状態が維持されることを確認した。また、応力の繰り返し負荷が残留応力の変化に及ぼす影響は小さく、初期の繰り返し負荷による変化量は大きいものの、それ以降の残留応力の変化は小さいかほとんど認められないことを確認した。これらの残留応力の変化を FEM 解析で考察し、表面残留応力の変化を内部残留応力の再分布で説明できることを示し、実際の機器のように大きい試験片を想定しても、断面全面に負荷される応力が 0.2%耐力以下であれば、圧縮残留応力が維持されることを示した。加えて、応力集中部等で表面に 0.2%耐力以上の高い引張応力が負荷される場合においても、公称応力が 0.2%耐力を超えていなければ表面の圧縮残留応力が維持されることを示した。

第 3 章においては、ガスタービンのホイールの材料として使用されている Ni 基超合金 Alloy 706 の試験片で 450°C から 630°C までの熱時効処理試験を実施し、ショットピーニング（SP）材および LP 材の残留応力緩和挙動を評価するとともに、予測手法を検討した。その結果、SP および LP を施工した試験体の表面残留応力は高い圧縮であり、いずれの温度においても最長 10000 時間の熱時効処理試験後の残留応力は、圧縮が維持されていることを確認した。残留応力の変化は温度が高いほど大きい傾向が認められ、また、熱時効時

間が残留応力緩和に及ぼす影響は小さいことを示した。さらに、内部の残留応力についても、表面残留応力と同様、圧縮を維持していることを確認した。表面残留応力の変化を、機械的特性の温度依存性とクリープひずみ式で評価可能であることを示した。さらに、残留応力は短時間で緩和するために、機械的特性の温度依存性が支配的であることを示し、すなわち、残留応力の大きさを保持温度の弾性限度とヤング率から評価可能なことを示した。加えて、LP 材のように残留応力の大きさが方向により異なる大きさをもつ場合には、Mises 相当応力で残留応力緩和量を評価できることを示した。また、残留応力の方向性を制御することで、1 方向に高い圧縮残留応力を残すことができる可能性を示した。

第4章においては、ガスタービンのホイール材として使用されている Ni 基超合金 Alloy 706 の階段状試験片に SP および LP を行い、450℃と 500℃で応力熱時効試験を実施し、試験前後の残留応力を測定した。温度、時間、応力が表面残留応力の変化の及ぼす影響を評価するとともに、破断寿命に対する考察も行った。450℃、500℃の試験の最大負荷応力はそれぞれ 1000MPa と 900MPa である。試験の結果、450℃、500℃とも LP 材は約 12000 時間の試験においても破断にいたらなかったが、450℃の未施工材の破断時間は 2980 時間と 13262 時間、500℃では 6660 時間と 7296 時間であった。一方、SP 材の破断時間は、450℃が 4702、6144 および 7178 時間、500℃が約 9529 時間と約 13225 時間であった。いずれの試験片もき裂の初生位置は表面であり、割れの形態は粒界割れ（ホールドタイムクラッキング）であることを確認した。450℃、最大応力 1000MPa で応力熱時効試験結果においては、未施工材の破断寿命のばらつきが大きく、ピーニングがクリープ破断寿命に及ぼす影響は明確には確認できなかった。なお、0.2%耐力を超える 1000MPa の応力負荷で、試験後の残留応力は SP、LP ともほぼ 0 になっていることがわかった。500℃、最大応力 900MPa の応力熱時効試験結果において、SP 材の破断時間は未施工材の破断時間よりも長く、LP 材の試験中断時間はさらに長く、破断時間に及ぼす SP および LP の効果が確認された。0.2%耐力を超える 900MPa の応力を負荷しても試験後の SP 施工面および LP 施工面の残留応力は圧縮残留応力が維持されていることが、クリープ破断寿命向上の一要因と考えられる。LP 材の結果においては、SP と同等以上の効果が確認されたが、0.2%耐力を超える 900MPa の応力を負荷しても試験後の LP 施工面の残留応力は 400MPa で圧縮残留応力が維持されていること、また、EBSD による観察結果から表面の塑性ひずみが SP 材に比べて小さいことが、クリープ破断寿命向上の一要因と考えられる。

第5章においては、LP を橋梁等、実際の大型構造物に容易に施工可能にするための基礎的研究として、気中でノズルタイプの LP を施した場合、残留応力の板厚分布が水中施工の場合と異なるか否かを検討した。また、パルスエネルギーを低くした場合に、生成される残留応力と疲労寿命がどのように変化するかを検討した。その結果、ノズルタイプの LP でも、水中施工と同等の大きさおよび深さの圧縮残留応力が生成される事を確認し、水中施工と同等の効果が期待できることを示唆した。また、SM400 材、HT780 材の板材で、パルスエネルギーが残留応力に及ぼす影響を評価した。その結果、SM400 ではパルスエネルギーが小

さくなくても、200mJ の場合と同等の表面および最大圧縮残留応力が生成されていることを確認し、HT780 では、パルスエネルギーが低くなると、テーブルの移動方向と直角方向の表面および最大残留応力が減少する傾向が見られたが、20mJ でも比較的大きな表面圧縮残留応力が生成されていることを確認し、鋼材強度に関わらず、圧縮残留応力の生成深さはパルスエネルギーが低くなると急激に浅くなる傾向があることがわかった。これらの条件で、HT780 材を用いて、疲労試験を実施した結果、パルスエネルギーが低くなると疲労寿命が短くなることが明らかとなった。以上の結果から、表面残留応力に加えて、圧縮残留応力の深さが溶接部の疲労寿命に大きな影響を及ぼしていることが示された。

以上、LP 施工材について、圧縮残留応力の緩和挙動を評価するとともに、LP がホールドタイムクラッキングや疲労寿命に及ぼす影響を評価した。残留応力緩和挙動に関しては、全断面に 0.2%耐力を超える応力を負荷しても、圧縮残留応力が残存することがわかり、実機での使用については、1つの安心材料と考える。また、クリープ温度域においても圧縮残留応力が残存することを明確に示したことも本研究の成果と考える。なお、緩和挙動について、BWR プラントで使用される材料について、評価可能になったものの、当初の文献においては引張負荷よりも圧縮負荷で緩和量が大きかったことから、緩和挙動に対する材料依存性があることがわかった。今後、ほかの材料を評価するに当たっては、どちらの材料に近いのかを残留応力緩和のメカニズムから明確にする必要があると考える。さらに、FEM 解析で、ピーニングによる圧縮残留応力を模擬したが、LP のように方向により残留応力が異なる場合には、LP そのものの解析手法だけでなく、固有ひずみ法による解析手法等、残留応力のモデル化を確立することで、緩和挙動評価やほかの評価に役立つものと考えられる。さらに、今回はホールドタイムクラッキングに対するピーニングの影響を評価したが、ホールドタイムクラッキングの発生に関しては、ピーニングの影響、温度、表面残留応力の影響等。発生メカニズムも含めて不明な点も多く、今回の研究で、それらの一部を評価できたとともに、課題が明らかになり、本研究の貢献するところは大きいと思われる。さらに、大型構造物である橋梁を対象として、気中 LP の適用可能性を示唆できたことは、今後の LP の展開を考えると有意義であったと思われる。