

東洋精鋼株式会社
岐阜大学工学部

渡邊 吉弘
長谷川 典彦

1. 緒言

自動車の軽量化にともない自動車用ボルト材料の高強度化が強く望まれているが、高強度にすることにより遅れ破壊感受性が高くなり、必要な強度の材料が使用できなくなっている。著者らは前報で高強度鋼の遅れ破壊強度がショットピーニングにより向上することを塩酸水溶液環境下で定荷重静曲げ試験により確認した⁽¹⁾。しかし、試験中塩酸水溶液による試験片の腐食溶解が起り、ショットピーニングの有効効果層が除去されるために試験時間の経過とともにピーニング処理材の遅れ破壊強度が未処理材のそれに近づく傾向にあった。

そこで、本報では腐食溶解の影響がない水素チャージ下において遅れ破壊試験を前報と同じ定荷重静曲げ試験で行った。さらに、実ボルトにかかる軸荷重下でもピーニング効果が得られるかを確認する目的で、切欠きを施したボルト試験片を用いて遅れ破壊試験を行った。ショットピーニング効果の遅れ破壊特性に及ぼす影響は、遅れ破壊寿命、試験片の変形挙動および破面観察により評価した。

2. 実験方法

供試材はSCM435で、素材を1173K 2時間保持後空冷、1123Kで30分間保持後油焼入れをした後、引張強さが1400MPaになるように673Kで1時間保持後水冷の焼もどしを行った。素材の化学成分を表1に、熱処理後

表1 供試材の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.38	0.21	0.80	0.026	0.010	0.11	0.06	1.02	0.16

表2 熱処理後の機械的性質

0.2% Proof Stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Tensile strength σ_B MPa	Elongation $\phi\%$	Reduction of area $\psi\%$
1313	1411	16	50

表3 ショット粒硬度および粒径

	Hardness (HV)	Diameter (μm)
Shot A	550	150
Shot B	800	150
Shot C	800	90

の機械的性質を表2に示す。熱処理後、静曲げ試験片は図1に示す形状寸法に機械加工した。また、ボルト試験片は冷間鍛造でM6(並目)ボルトを作製後、曲げ試験片と同様の熱処理を施した。さらに、破断箇所を同一にするために熱処理後切欠きを施した。ボルト試験片の形状寸法を図2に示す。

静曲げ試験片の遅れ破壊試験機は、前報と同様でJIS原案の高力ボルト用鋼材の遅れ破壊試験方法に基づいた自作の片持はり式定荷重曲げ試験機である。ボルト試験片の遅れ破壊試験は電気油圧式サーボ試験機を用い定荷重で実施した。両試験片ともに試験片の切欠き部に腐食層を取り付け、水素チャージを陰極電解法により陽極に白金線を用い1%NaCl水溶液中、電流密度424 A/m²で行った。

各々の試験機概要を図3に示す。また、遅れ破壊過程における試験片の変形挙動を観察するために、静曲げ試験ではモーメントアーム先端部、ボルト試験片では試験片つかみ部の変位量をレーザー式変位計を用い連続的に測定した。

ショットピーニング加工に使用した3種類のショット粒の平均硬度と平均粒径を表3に示す。ショットピーニング装置はエア式(圧力0.2 MPa)で、投射時間は10分である。

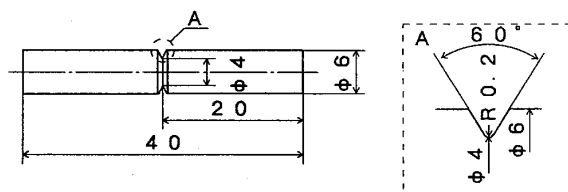


図1 静曲げ試験片

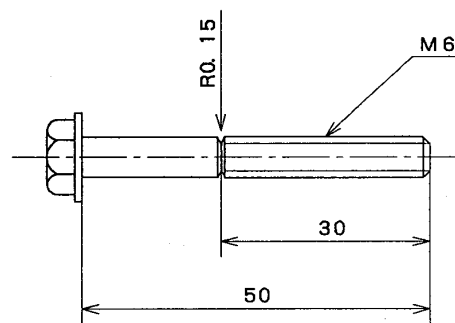
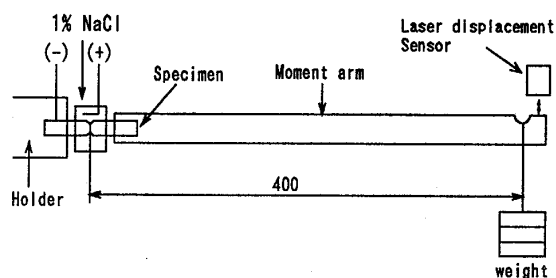
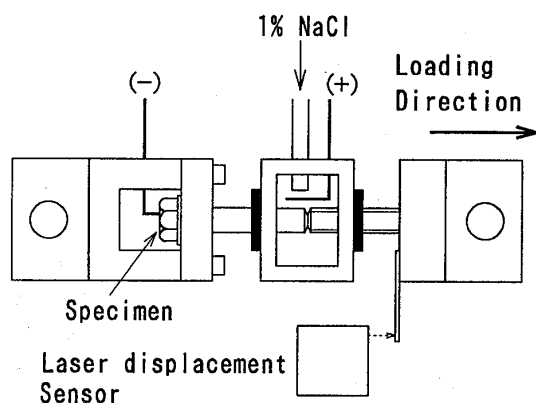


図2 ボルト試験片



(A) 静曲げ試験機



(B) 軸荷重試験機

図3 遅れ破壊試験機

3. 実験結果および考察

3.1 ショットピーニング後の圧縮残留応力分布

曲げ試験片およびボルト試験片のショットピーニング後の試験片表面近傍の残留応力分布をX線応力測定法により測定した結果を図4に示す。なお、図には未処理材のそれも併記した。図から明らかなように、ショットピーニングによって表面の圧縮残留応力は450 MPaから600 MPaとなり、前報と同様に未処理材に比べおよそ350 MPa増加し、表面からおよそ80 μm の深さでも約200~400 MPa程度の圧縮残留応力が生じていることがわかる。

3.2 遅れ破壊試験結果

曲げ試験片およびボルト試験片のピーニング処理材（以下SP材とする）と未処理材の遅れ破壊試験結果を図5および図6に示す。図において、縦軸は切欠き底における負荷応力、横軸は破断までの時間である。ボルト試験片のSP材のショット条件は静曲げ試験で最も遅れ破壊強度が高いShot Bの1種類のみとした。図によればいずれの試験方法でも、SP材の実験点は、前報の塩酸水溶液環境下における結果と同様に未処理材の実験点に比べ上方に位置し、ショットピーニングにより遅れ破壊強度が大幅に改善されている。また、前報でみられた試験中塩酸水溶液による試験片の腐食

溶解が起こらなかったためショットピーニングの有効効果層が除去されず100時間に至ってもショットピーニングの効果が残存していることがわかる。

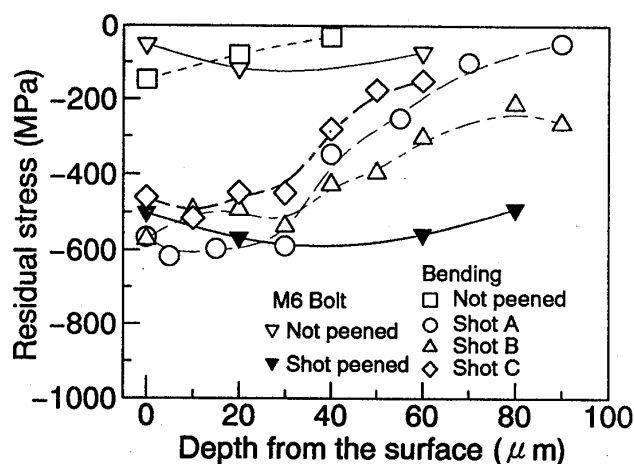


図4 圧縮残留応力分布

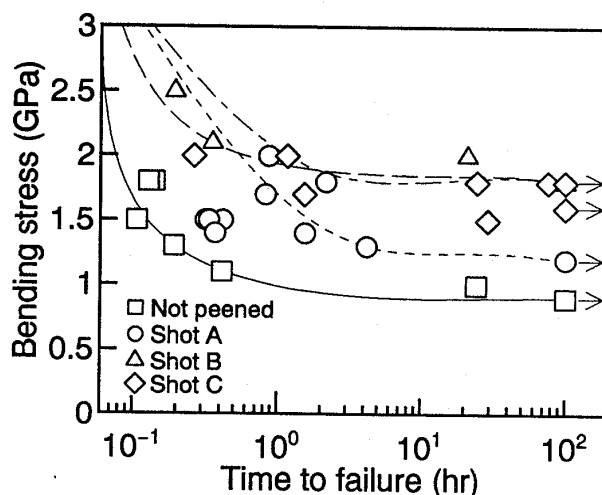


図5 遅れ破壊線図（静曲げ試験）

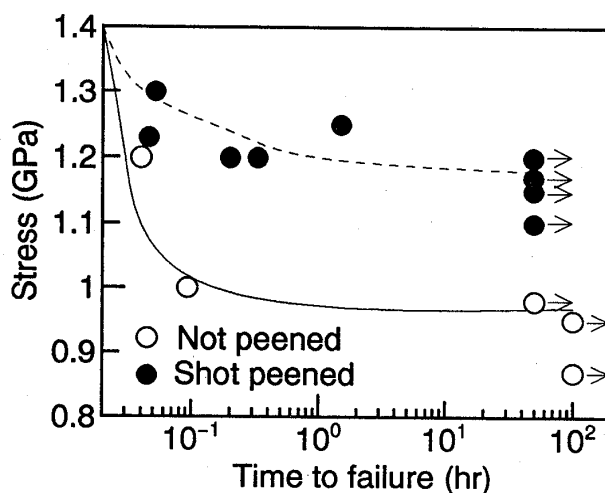


図6 遅れ破壊線図（軸荷重試験）

3.3 変位量変化測定結果

著者らは前報でショットピーニングにより遅れ破壊特性が改善された理由は、モーメントアーム先端の変位量変化測定結果から、表面層の圧縮残留応力が3軸応力成分を小さくし、臨界水素量に達するまでの時間を延長し⁽⁸⁾、結果としてき裂の発生が遅れることによることを明らかにした。そこで、本研究の水素チャージ下においても同様な傾向が得られるかどうかを確認した。静曲げ試験片におけるモーメントアーム先端の変位量変化を図7に示す。塩酸水溶液環境下における変位挙動と同様なものとなり、SP材の遅れ破壊強度向上はき裂の発生が遅れたことによる。次に、ボルト試験片の負荷応力1.2GPaにおける試験片変位挙動測定結果を図8に示す。SP材および未処理材ともに試験開始後一定期間変位はほとんど変化なく推移し、やがて急速に増加しついには破断した。このような変位挙動は異なる負荷応力においても同様な結果が得られた。そして、前報でも確認されたようにSP材は急速に変位が増加し始めるまでの時間が未処理材に比べ大幅に長くなっている。さらに、変位量変化がほとんど認められない時間において試験を中断しき裂の発生有無を確認したところ、き裂を確認することはできなかった。以上のことから、ボルト試験片でのショットピーニングによる遅れ破壊強度向上は曲げ試験片でみられたように、表面層の圧縮残留応力が3軸応力成分を小さくして、臨界水素量に達するまでの時間を延長し、結果としてき裂の発生が遅れたものと考えられる。

3.4 破面観察結果

ボルト試験片におけるSP材および未処理材の破断面のSEM観察結果を図9に示す。ここで負荷応力はSP材が1.2GPa、未処理材で1.0GPaのものである。いずれの材料ともに表面からおよそ100 μm のところまで粒

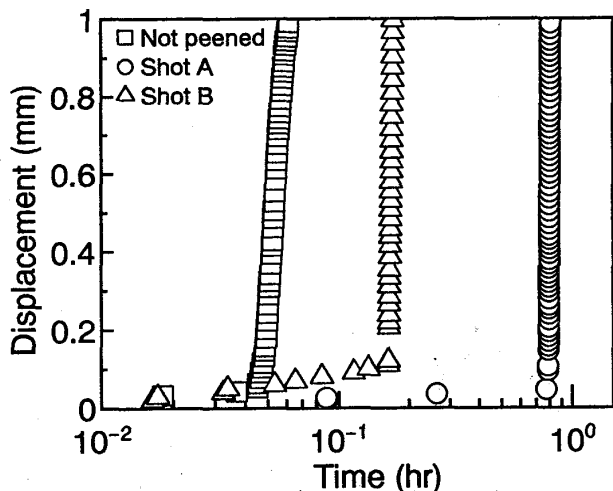


図7 試験片の変位量変化(静曲げ試験)

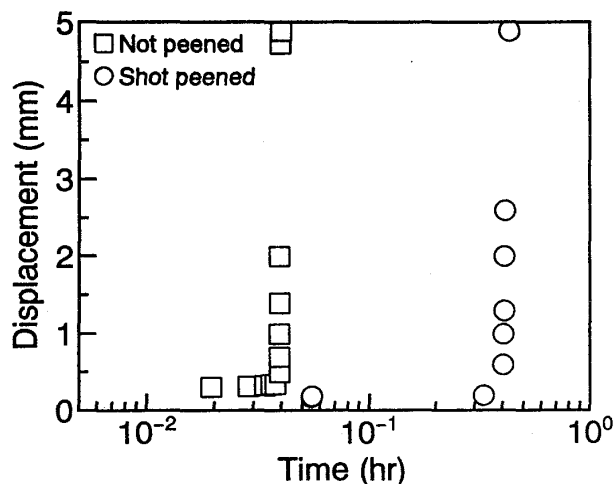


図8 試験片の変位量変化(軸荷重試験)

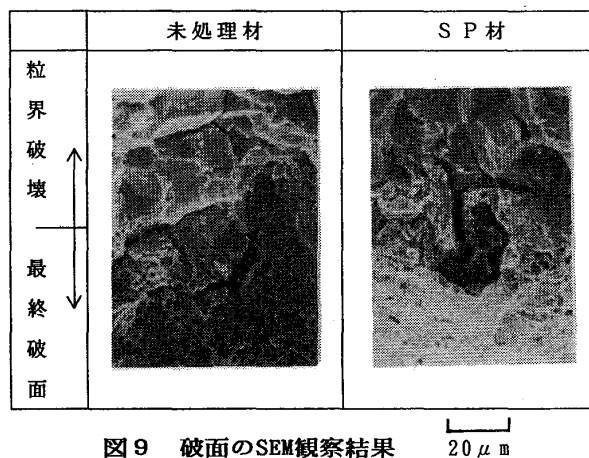


図9 破面のSEM観察結果

界破面から最終破断面へと移行していた。これはき裂が発生した直後に破断したことを示しており、先の試験片変位挙動の結果と一致する。

4. 結言

高強度鋼SCM435の水素チャージ下における遅れ破壊特性を静曲げ試験片およびボルト試験片で評価したところショットピーニングにより大幅に遅れ破壊強度が上昇した。ショットピーニング加工による遅れ破壊強度の向上は、モーメントアーム先端の変位量の測定および試験片のつかみ部における変位量測定より、表面層の圧縮残留応力が3軸応力成分を小さくし、鋼中に侵入した水素の臨界濃度に達するまでの時間、つまりき裂の発生までの時間が延長されることに起因し、これは前報の塩酸水溶液環境下における結果と一致する。また、ボルト試験片の破断面SEM観察よりSP材および未処理材ともに粒界破面から最終破断面へと移行していた。これは変位量変化測定結果と一致し、き裂発生後直ちに破断したものと考えられる。

(参考文献略)