

部分除荷法による遅れ破壊強度の向上

広島大学名誉教授 中佐啓治郎

1. 研究の経過 (その一)

「部分除荷法」の具体的な方法とその有効性・実用性と限界については後に述べるが、我々が、遅れ破壊強度を上昇させる方法として、全くの準備なしに、偶然に「部分除荷法」という方法を思い付いたという訳ではない。それまでに、3つの実験を行って、この方法にたどり着いたといえる。

この研究は、広島工業大学の木戸光夫先生、武井英雄教授、私との共同研究から始まった。まず、最初に行なった研究は、「高強度鋼の遅れ破壊き裂の発生におよぼす疲労蓄積の影響」であった(下記の論文(A))。その結果は、疲労蓄積は遅れ破壊強度を低下させる(下限界応力はあまり変化しない)というもので、切欠底の材料が疲労損傷を受ければ(ある場合にはすでに微小き裂が発生している)、疲労軟化は起こっても(これは降伏応力の低下につながるので、応力集中を低下させる効果はあるが)、遅れ破壊寿命が低下する。この実験の結果そのものには、大きな疑問点や考慮点はなく納得のいくものであった。

次のテーマをどうするかを3人で話し合ったとき、私は、その前に行った、「切欠きを有する高強度鋼材の水中における疲労き裂の発生」(「変動荷重下における遅れ破壊」参照)の続きの研究を行うことを提案した。微小変動応力の重畳は、切欠先端の腐食反応を促進し、水素の侵入を容易にする(遅れ破壊を促進する)が、疲労蓄積の実験で分かったことは、一方では切欠先端の材質も変化させているはずである。その効果を分離して考察すれば、あらたな論文になるかもしれない、と思った。

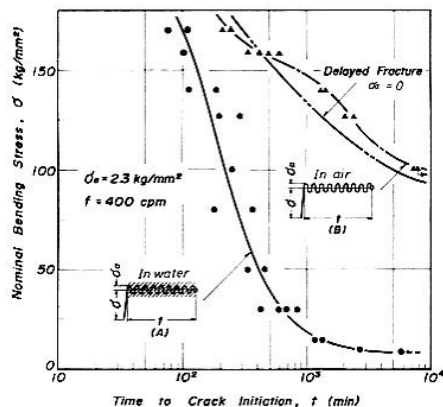


Fig.10 Decrease in crack initiation time and lower limit stress by superposition of small repeating stress.

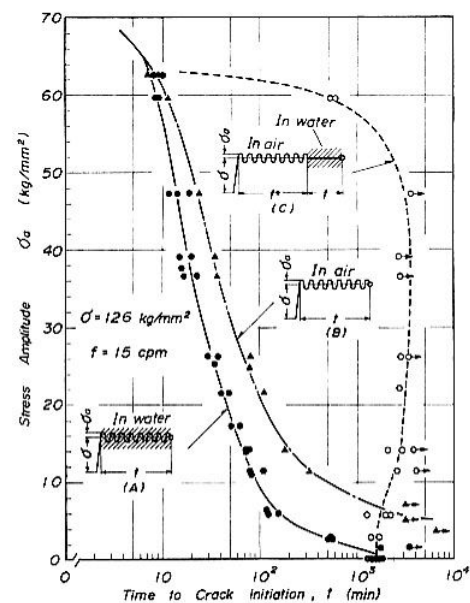


Fig.4 Effect of stress amplitude on the time to crack initiation in delayed fracture. Loading pattern (C) means that the fatigue accumulation is conducted in air for t^* min which is equal to the time to crack initiation in delayed fracture under repeating stress ((A), solid line), and without unloading, the static stress is applied in water.

そこで、変動応力を加えたときのき裂発生繰返し数と同じ繰返しを大気中（水中ではない）で加え、その後水中で、静荷重（変動荷重ではない）を加えて、遅れ破壊寿命を調べることにした。この場合、微小変動応力の材質変化を調べようとするのであるから、大気中で微小変動応力を加えたのちには、除荷（荷重をゼロにする）してはいけない。この実験の結果をまとめたものが、「高強度鋼の遅れ破壊き裂の発生におよぼす微小変動応力の影響」（論文B）である。その結果、まず、前ページの左図および右図に示すように、微小変動応力の重畳は、遅れ破壊き裂発生寿命および疲労き裂発生寿命を大きく低下させる。これは、すでに調べたことの確認であるが、右図に示すように、大気中で微小変動応力を加えたのちに、水中で静荷重を加えて遅れ破壊試験を行うと、驚いたことに、き裂発生寿命が著しく延びる。単なる重ね合わせで考えることはできないが、上の二つの図から、少なくとも、微小変動応力を加えて遅れ破壊試験をしている間に、切欠先端の材料は、見かけ上強化されているが（その原因は後述）、それにも増して、変動応力がき裂先端から水素を入りやすくして、結局は遅れ破壊寿命を大きく低下させている、と言える（ただし、条件によっては、あらかじめ与えた疲労蓄積（被害）それ自体も遅れ破壊き裂発生寿命を低下させている場合もある）。

そうすると、つぎの研究テーマは、疲労蓄積をどの程度与えたら、遅れ破壊き裂発生寿命を延ばすことができるか、ということになる。その研究が、「疲労蓄積による遅れ破壊き裂発生寿命の増加」（論文C）である。

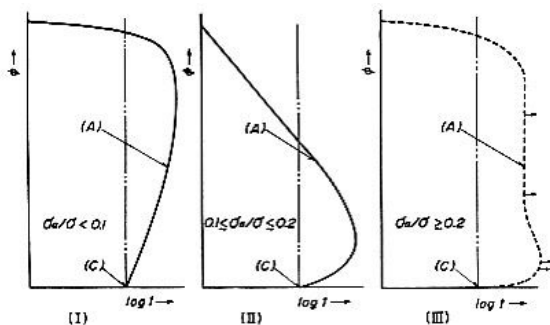


Fig. 12 Schematic classification of ϕ (fatigue accumulation percent) vs t (time to crack initiation in delayed fracture) curves using the parameter σ_a/σ .

左上図は、平均応力に対する繰返し応力の変動範囲の比が0.2くらいのおきに、広い範囲の疲労蓄積率（大気中疲労き裂発生繰返し数に対する疲労蓄積繰返し数の百分率）に対して、遅れ破壊き裂発生寿命が延びることを示している。また、右図は、大気中で所定の繰返しを与えて、除荷せず

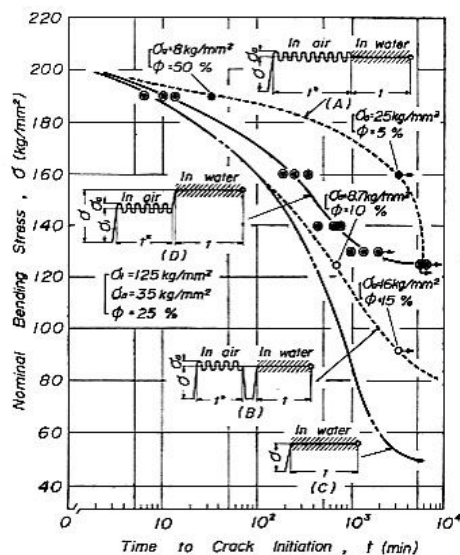


Fig. 13 Comparison of the relations between the nominal static stress and the time to crack initiation in various loading methods at the most preferable combination of stress amplitude σ_a and fatigue accumulation percent ϕ .

にそのまま遅れ破壊試験を行うと、遅れ破壊き裂発生寿命が著しく延びることを示している。

さて、実際のボルトの締め付け作業現場において、上記の現象を利用することは難しい。もちろん、あらかじめボルトに多数回の繰返しを与えたのちに、一度除荷して、現場に持って行き、ボルトを締め付けることはできるかもしれないが、一度除荷すると効果が少なくなる。そこで、もし、遅れ破壊寿命が延びる原因が、疲労軟化とは別の原因であれば（これは、除荷すると効果が少なくなることから見当がつく）、多数回ではなく、一回の繰返しでもよいのではなかろうか、という予測に行き着く。そこで、これについて系統的に調べることにした。短い呼び名がないと不便であるので、下記のように、それぞれの負荷方式に名前をつけた。

通常の遅れ破壊試験：応力を一定の値 σ に増加させ、そのままの応力で保持し、遅れ破壊試験を行う。

() **部分除荷法 (Partial-unloading Method) :**

応力を一定の値 σ_{max} に増加させたのち、応力を僅かに下げて(部分除荷, $-\sigma_a$)、応力ゼロまで除荷せずに、そのままの応力 ($= \sigma_{max} - \sigma_a$) で保持し、遅れ破壊試験を行う。

() **1 サイクル負荷法 (One Cycle Loading Method) :**

応力を一定の値まで増加させたのち、 σ_a を一サイクルだけ負荷して、除荷せずに、そのまま平均応力 σ で遅れ破壊試験を行う。

() **完全除荷法 (Perfect-unloading Method) :**

応力を一定の値 σ_{max} に増加させたのち、一度完全に除荷する。その後、最初の応力 σ_{max} よりも僅かに低い応力 ($= \sigma_{max} - \sigma_a$) にまで応力を上昇させ、その応力 σ に保持して、遅れ破壊試験を行う。

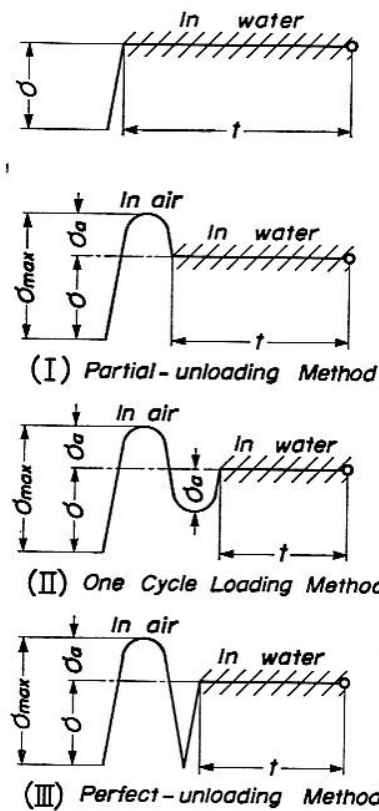


Fig. 2. Schematic diagram indicating various pre-stressing methods.

実験結果（論文 1）によると、右図に例を示すように、遅れ破壊き裂の発生強度は、「部分除荷法」 > 「1 サイクル負荷法」 > 「完全除荷法」 > 「通常の遅れ破壊試験」の順に大きい。とくに部分除荷法の効果はきわめて大きい。

ところで、試験ひずみよりも大きな予ひずみを与える、あるいは試験応力よりも大きな応力を加えておいてから試験すると（完全除荷法に相当する）、遅れ破壊強度が高まることは、当時すでに報告されていた（たとえば、C.S.Carter, Met. Trans. 3(1972), 584. 南雲道彦，門田安弘，水素による遅れ破壊の機構，鉄鋼基礎基礎共同研究会遅れ破壊部会，(1975),149.）。しかし、最大荷重から一部だけ除荷しそのまま遅れ破壊試験をする、という方法が、完全除荷法よりも大きな効果があることは、まだ誰も報告していないようであった。そこで、この方法を

どのように呼ぶか、3人で話し合った。実はこのころ、疲労の分野では、疲労き裂伝ばに及ぼす単一または複数サイクルの過大荷重（最後の荷重は最低水準まで完全に除荷する）の影響が報告されており、過大荷重を加えたのちにはき裂伝ばの遅延（retardation）が起こり（Over load effect）、その理由がき裂先端の応力分布の変化（圧縮残留応力の発生や有効応力拡大係数変動範囲の減少）から議論されていた。これらの状況から、遅れ破壊についても、「予ひずみ法」あるいは「過大荷重法」と呼んだらどうか、という案が出たが、私は、我々の方法では、完全に除荷しないことが重要であるので、他人のつけた名前にならうことなく、「**部分除荷法 (Partial Unloading Method)**」という呼び名をつけるほうがよいと述べて、結局そのようになった。したがって、「部分除荷法」は、あくまで我々3人（中佐，木戸，武井）がつけた名前である。

さて、遅れ破壊き裂の発生に部分除荷が大きな効果を与えるとすれば、それは疲労蓄積ではなく、疲労き裂伝ばの遅延効果と同様、切欠先端の引張り応力が大きく低下したことが原因と思われた。そこで、疲労の過大荷重効果やき裂の開閉口挙動の説明に用いられている図を参考にして、部分除荷法を適用したときの切欠き先端の応力分布を推定した。これを他の方法の場合の応力分布と合わせて次ページに示す。つまり、切欠き先端の引張り応力は、同じ試験応力では、部分除荷法の場合が最も小さくなる、したがって水素の集積も遅れる、という理由で、部分除荷法あるいは完全除荷

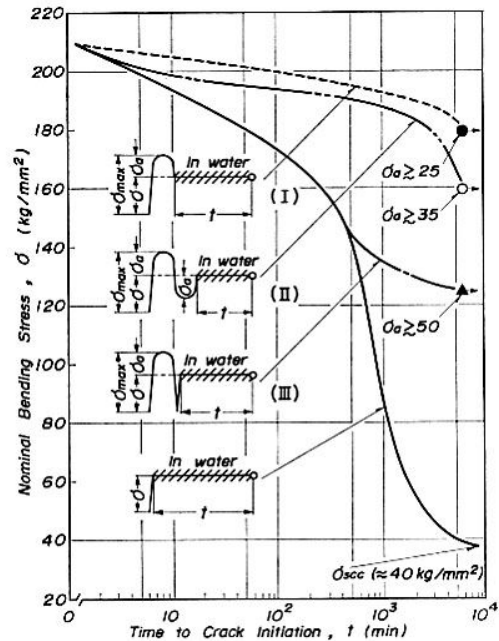


Fig. 8. Relation between nominal bending stress and time to crack initiation at various pre-stressing methods. Each curve was drawn using the results which proved to be most effective for increasing the delayed failure strength.

法による遅れ破壊強度の向上を説明した。

興味のある方は、下記の公表論文をご覧ください(部分除荷法による疲労・腐食疲労強度の向上についての論文も含まれます)。

A. 高強度鋼の遅れ破壊き裂の発生におよぼす疲労蓄積の影響, 日本金属学会誌, 第 39 巻, 第 7 号, pp.735-741, (1975) (木戸光夫, 中佐啓治郎, 武井英雄)

B. 高強度鋼の遅れ破壊き裂の発生におよぼす微小変動応力の影響, 日本金属学会誌, 第 40 巻, 第 7 号, pp.744-751, (1976) (中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄)

C. 疲労蓄積による遅れ破壊き裂発生寿命の増加, 日本金属学会誌, 第 41 巻, 第 10 号, pp.987-992, (1977) (木戸光夫, 中佐啓治郎, 武井英雄)

1. 部分除荷法による遅れ破壊き裂発生強さの向上, 鉄と鋼, 第 64 巻, 第 5 号, pp.578-584, (1978) (中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄)

2. Enhancement of Delayed Failure Resistance by Partial Unloading Method, Engineering Fracture Mechanics, Vol.11, No.4, pp.733-738, (1979) (Keijiro Nakasa, Hideo Takei, Mitsuo Kido)

3. 部分除荷をほどこした高強度鋼材の遅れ破壊強さにおよぼす試験片形状の影響, 鉄と鋼, 第 66 巻, 第 10 号 pp.1542-1549, (1980) (中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄)

4. Increase of Delayed Failure Strength by Partial Unloading Method, Trans. ISIJ, vol.22, No.2, pp.106-112, (1982) (Keijiro Nakasa, Mitsuo Kido, Hideo Takei) [文献 1 の英訳](#)

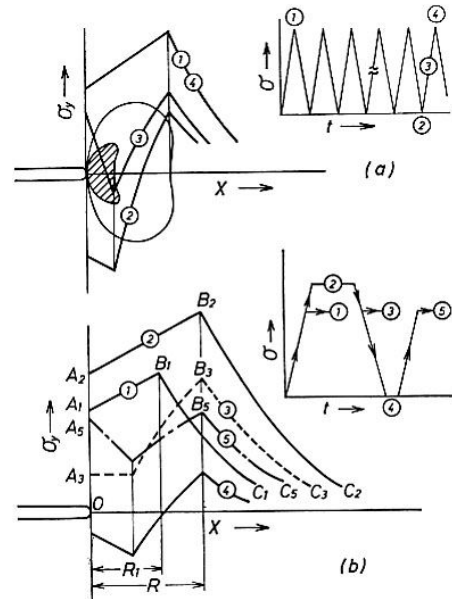


Fig. 10. Schematic illustration of stress distribution near notch root at various stress levels. (a): under monotonic or repeating stress. (b): at various pre-stressing stages.

5. 部分除荷法による高強度鋼材の切欠き疲労強度の改善, 材料, 第 32 巻, 第 352 号, pp.71-76, (1983) (中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄) 疲労
6. 部分除荷法による高強度切欠き鋼材の腐食疲労強度の改善 材料 第32巻 第354号 pp.310-314, (1983) (木戸光夫, 中佐啓治郎, 武井英雄) 腐食疲労
7. 変動荷重下での遅れ破壊き裂進展開始寿命に及ぼす予荷重の影響, 材料, 第 34 巻, 第 379 号, pp.394-399, (1985) (木戸光夫, 村本和久, 中佐啓治郎, 武井英雄)

2. 研究の経過 (その二)

さて,一連の研究が終わって,10年くらい経過したころ,軽金属学会のある研究会(研究会名は調査中,主査:小林俊郎 豊橋技術科学大学教授)から参加の誘いを受けた。この研究会では,日本でも製造が始まった Al-Li 合金(比強度,比弾性率が大きい)の機械的性質を調べることも目的の1つであったが,最終的には企業からの共同試料の提供が受けられず,代わりに別の企業から 7075 合金をいただいた。ただ,この合金系に限らず,アルミニウム合金の機械的性質に関する研究の蓄積は多く,あらたなテーマは思いつかない。そこで,疲労き裂発生および伝ば挙動に及ぼす予荷重(完全除荷)の影響に関する研究を行うとともに,微小領域 X 線回折装置を用いて,完全除荷法を適用したときの切欠き先端の応力分布を,実験的に求めることにした。その結果を下図に示すが,前ページの模式図(Fig.10)に示した結果と傾向が同じで,完全除荷により,切欠き先端の応力が減少していることが分かる。X 線応力測定には,一点でも相当の時間がかかる。今にして思えば,もう少し粘って,部分除荷のときの応力分布も測定しておけばよかったのであるが,後の祭りである。

8. 7075 アルミニウム合金切欠き材の疲労き裂発生および伝ば挙動に及ぼす予荷重の影響, 軽金属, 第 44 巻, 第 5 号, pp.292-297, (1994) (中佐啓治郎) 疲労

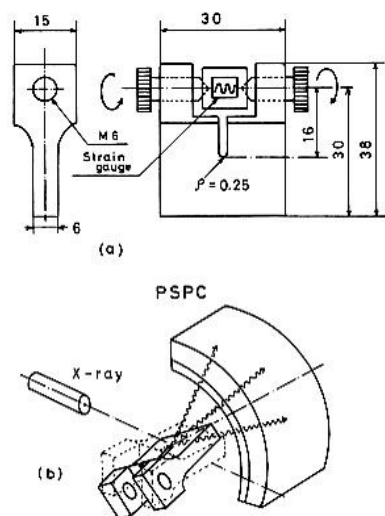


Fig. 2 (a) Specimen to measure the stress near notch root by X-ray diffraction method. (b) Microarea X-ray diffraction method by using position sensitive proportional counter.

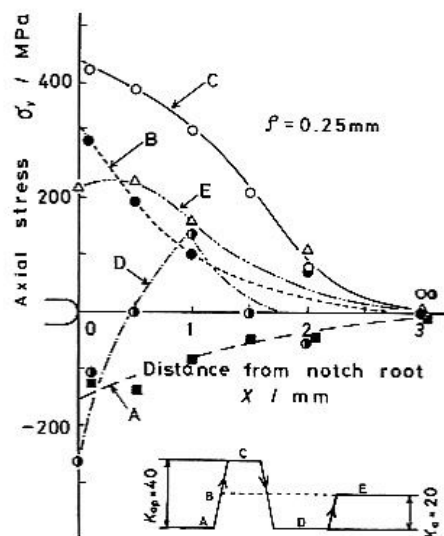


Fig. 6 Stress distribution near notch root at various loading stages obtained by X-ray diffraction method.

3. 研究回顧・随想

(1) 最近、日立製作所の宇佐美三郎氏が書かれた「印象深い破損例」という研究随想を読んだ（機械学会論文集（A編）77巻773号（2011-1））。

https://www.jstage.jst.go.jp/browse/kikaia/77/773/_contents/-char/ja/

その2ページ目の、「3・3 過負荷による強度向上」という項目に目がとまった。「・・・あるとき手間を省いて、予荷重後に荷重をゼロまで下げないでそのまま負荷を繰返したところ、疲労限度は大きく上昇しました。・・・」とあり、これは、我々が見出した部分除荷法による効果とほぼ同じであると思われた。この方法を見出すまでに、我々は、疲労蓄積という道筋を通ったので、それに至る過程はこの随想に書かれている道筋と異なる。あらためて感じたことは、どちらが先に見つけた、ということではなく、同じような研究をしていれば、同じようなことを見つけたり試みたりする人は、必ずいるものだ、ということである。

実は、その後「部分除荷法」を、誰かが何かに利用した、という報告は聞かない。荷重を一部下げるといことは、作業上面倒であるかもしれないので、仕方がない。しかし、この記事を読んで、大変心強く思ったのは確かである。つまり、このようなことが広く知られるならば、将来何かに利用され、遅れ破壊や疲労破壊の防止に役立つ可能性があるかもしれないからである。

(2) 圧力容器では、安全性を確認するために水圧試験を行う（常に行うかどうか、巨大な容器

でも行うかどうかは不明)。水は非圧縮性流体であるから、万一、水圧で容器が破壊するようなことがあっても、破片が遠くに飛ぶということはない。以前、破壊の専門書で、高強度鋼で製造したかなり大きな圧力容器が水圧試験のときに破壊した写真を見たことがある。水と鋼の腐食反応で発生した水素が短時間に鋼の欠陥（おそらく溶接部のき裂）に侵入して遅れ破壊をひき起こしたのであるが、使われる前に破壊したのでは、製造した企業は大損害である。しかし、この圧力容器が、もし水分のある環境中で用いるものであったなら、水圧試験により事故が未然に防げたことになる。水分、水素あるいは水素原子を含むガスを全く含まない気体を用いる圧力容器であれば、圧力容器の内壁に水が直接接触しないように何かを内張りして水圧試験を行うことも考えられるが、いずれにしても高強度鋼の使用には注意が必要である。ところで、このような水圧試験は、ある意味で、欠陥に対して完全除荷法を適用したことになり（使用圧力は、試験圧力よりも小さい）、耐圧試験が容器の安全性を高めている、と言えなくもない。このようなことは、すでに製造現場や設計で認識されていることかもしれないが、詳細は分からない。

（3）鉄鋼材料の強度を上げれば遅れ破壊感受性が増す。強度を大きくして、なお遅れ破壊の起こりにくい組織にするには、どのようにすればよいであろうか。古くは、マルテンサイト組織よりもベイナイト組織がよいことが報告されている。その後 1997 から始まった超鉄鋼材料研究プロジェクトでは、結晶粒の超微細化、水素を補足する微細な析出物の分散、などの組織改良が加えられてきたが、遅れ破壊は完全には克服できていないと思う。

我々の行った研究の大部分は遅れ破壊現象の解明や材料の遅れ破壊感受性の比較であり、遅れ破壊を防止するための材料開発や組織改善ではない。しかし、我々は、遅れ破壊研究の流れの中で、遅れ破壊強度を上昇させる試みを2つは行ったことになる。1つは、動的ひずみ時効（「変動応力下における遅れ破壊」参照）であり、もう1つは部分除荷法である。動的ひずみ時効は、負荷をかけてひずみ時効を起こさせる方法であり、部分除荷法は、切欠き先端の引張り応力を低下させることにより遅れ破壊強度を上昇させる方法であるが、いずれも組織自体が大きく変わることはない。その意味では、我々は、金属組織学的な立場（鉄鋼材料提供側）というよりも、材料力学的な手法（機械・構造部品のユーザー側）で問題に対処しようとした、ということになる。

圧縮残留応力の利用は、古くから疲労破壊の防止に利用されてきた。たとえば、リベット孔などへのロールがけ、転造によるねじの製造、ショットピーニングなどである（これらでは、加工硬化や結晶粒の変形も起こる）。これらの残留応力を利用する方法も、遅れ破壊の防止（き裂発生寿命の延長）に役立つと思われる。ただ、これらの方法や部分・完全除荷法の適用には限界があり、これで高強度鋼の遅れ破壊、水素脆性の問題を根本的に解決できた、ということにはならない。

遅れ破壊は、中強度鋼でも、水素の環境が厳しくなれば（圧力と温度の上昇、水素の侵入を促進する物質の存在など）、「水素誘起割れ」と形を変えて起こるようになる。繰返し応力が加わると、さらに危険性が増す。水素脆性を防止するには、金属組織の改善（加工熱処理などの利用）、締結・溶接法の改善、残留応力の利用、設計・定期検査法の確立など、材料・機械関係の研究者・技術者、設計・製造・ユーザー技術者の緊密な連携による総合的な対策が必要である。

ホームページに戻る

<http://www006.upp.so-net.ne.jp/nakasa/>