遅れ破壊の初期き裂の発生条件について*

宮 本 博** 江 藤 元 大***

A Study on Initial Crack-Nucleating Condition in Delayed Fracture

by

Hiroshi MIYAMOTO

(Faculty of Engineering, Tokyo University, Tokyo)

and Gendai ETO

(Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Narashino)

In the preceding report, the effects of hydrogen upon various characteristics of steel were found by performing the static bending test and delayed fracture test on the specimens in which hydrogen was introduced by acid dipping.

In this report, the initial crack-nucleating condition in delayed fracture has been obtained based on the plastic solution of A.P. Green *et al.* for a sharply V notched specimen and the experimental results of the preceding report. And also the maximum stress to nucleate a crack when hydrogen is introduced has been obtained by using the calculation and the diagrams.

Furthermore, the static bending test and delayed fracture test were performed on the high strength hexagon bolts in order to ascertain whether this result can be applied in practice. And it has been found that the crack-nucleating stress obtained is applicable.

(Received July 26, 1972)

1 緒 言

1) 前報において、熱処理により強度を変えた低炭素ボロン鋼のシャルピー型曲げ試験片について、10%硫酸水溶液に30分間浸せきした後での静的曲げ試験、10%硫酸水溶液中での遅れ破壊試験、および、平滑試験片を10%硫酸水溶液に30分間浸せきした後での引張試験を行ない、水素の鋼に対する種々の特性を見いだすことができた。そのおもなものは、遅れ破壊限度以下の負荷応力では、切欠き底付近に、き裂の発生が見られなかったこと。鋼に外部より水素が侵入する場合、その侵入深さが非常に浅い表面層のみであったこと。および、鋼に水素を導入しても、降伏応力には差がみられなかったことなどである。

今回は、これらの実験結果を基にして、遅れ破壊の初期き裂の発生条件などを求めようとしたものである。

2 遅れ破壊き裂の伝ば

10%硫酸水溶液中での遅れ破壊のき裂伝ばは、前報の結果より、Fig. 1の過程に従うものと考えられる。

まず、一定荷重下の試験片を10%硫酸水溶液に浸せきすると表面から水素が侵入する。しかし、その侵入深さは表面層のみである。つぎに、切欠き部前方において応力により、微細き裂が発生する。微細き裂は成長して切欠き底と結合し、き裂内部にまで硫酸水溶液が侵入する。そこで、さらに水素はき裂底前方に侵入する。そして、そこで、新たに微細き裂が発生し、また、き裂底と結合する。このような過程を経て、遅れ破壊き裂は伝ばする。

ここで、遅れ破壊限度以下の負荷応力の場合、実験結果により、切欠き底付近にき裂の発生がみられなかったことから、遅れ破壊き裂の伝ばする条件を満たすことができない。このため、遅れ破壊は発生しなかったものと考えられる。したがって、切欠き底でき裂が発生することが、遅れ破壊を発生させることになる。これらのことから、切欠き底でのき裂発生条件を求めることが必要になってくるわけである。

3 切欠き底での弾塑性応力分布

A. R. Troiano などの研究²⁾では、遅れ破壊の初期き裂は切欠き底前方で発生し、切欠き底からの距離は、切欠き底の丸味半径の大きさによって決まり、丸味半径が大きければ、距離が大きくなることを実験的に確認

* 本報を「遅れ破壊に関する研究(第2報)」(A Study on Delayed Fracture, II)とする。

原稿受理 昭和47年7月26日

** 正 会 員 東京大学工学部 東京都文京区本郷

*** 千葉工業大学 習志野市谷津町

▨ Hydrogen-embrittled region

Fig. 1. The process of crack advance in delayed fracture.

している。この原因としては、切欠き底前方の三軸応力状態の高い静水圧力部分で、き裂が発生するためであるとしている。

一方、鋼に水素を導入しても、降伏応力は変化しないことから、少なくとも、切欠き底では応力集中により、降伏を起こした後でき裂が発生することは充分考えられる。また、多くの実験結果から、遅れ破壊を起こさせるには、特に高強度の鋼を除いて切欠きがあることが必要条件となっている。したがって、公称応力が低くても切欠き底では、降伏を起こしていることは明らかである。これらのことから、弾塑性的な考え方を切欠き底に適用した。

Fig. 2 は、切欠き底での弾塑性応力分布を示したものである。この場合、切欠き底では単軸引張りの降伏応力となり、塑性域の大きさ R が大きくなるにつれて縦方向応力 σ_y は増加する。しかし、塑性域が R_β に達すると、 σ_y は $\sigma_y^{\max}$ に達し、それ以上には大きく

Fig. 2. Variation of σ_y and σ_x with distance r ahead of a notch at a given value of plastic zone size R . (a) $R < R_\beta$. (b) $R > R_\beta$. R_β is the value of R at which $\sigma_y^{\max}$ is first raised to its maximum value.

なり得ない。

ここで、A. P. Green などの、すべり線場理論による V 型切欠き付シャルピー試験片の解を使用すると、塑性域の大きさ R が、 $0 < R \leq R_\beta$ の場合、

$$\sigma_y = 2k \left\{ 1 + l_n \left(1 + \frac{R}{\rho} \right) \right\} \quad (1)$$

k : せん断降伏応力

ρ : 切欠き底丸味半径

また、 $\sigma_y^{\max}$ は、

$$\sigma_y^{\max} = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} \right) \quad (2)$$

ω : 切欠きの開き角度

最初に、 $\sigma_y^{\max}$ に達する時の塑性域の大きさ R_β は、

$$R_\beta = \rho (e^{(\pi - \omega)/2} - 1) \quad (3)$$

となる。(1)式より、切欠き底半径が一定であれば、塑性域が大きくなるにつれて σ_y は増加し、(2)式より、最高値 $\sigma_y^{\max}$ は切欠きの角度 ω に依存する。また、 $\sigma_y^{\max}$ に達する時の塑性域の大きさ R_β は、(3)式より、切欠き角度 ω が決まれば、切欠き底半径 ρ によって決まることを示している。

4 遅れ破壊初期き裂の発生条件

以上のことから、遅れ破壊初期き裂の発生条件を求めてみると、Fig. 3 のようになる。すなわち、切欠き底での縦方向応力 σ_y の分布は、図の ABC のようになる。これに対して、水素の侵入深さを H とすると、切欠き底表面で最も強度が低下し、(しかし、その値は単軸引張りの降伏点以上である。) H の距離で水素の影響は全然なくなるものと考えられる。そして、その間での強度の変化は不明であるが、 H の距離が実際には小さいため、ほぼ直線的に変化するものと仮定す

Fig. 3. The initial crack nucleate condition on the notch specimen that was introduced hydrogen. ABC: Distribution of the normal stress σ_y ahead of the notch root. DE: Condition of the decrease in strength by introducing hydrogen. σ_Y : Uniaxial tensile yield stress. σ_h : Decrease in strength by hydrogen at the surface.

る(図のDFGE).すると,図の斜線部分では,(FG部分)応力 σ_y の方が材料の水素により低下した強度より高くなり,この範囲では降伏を起こさず, σ_y によりき裂が発生するものと考えられる.これが,遅れ破壊初期き裂の発生条件である.これらのことから,遅れ破壊を起こさない条件として, Fig. 4の3例が考えられる. Fig. 4(a)は,切欠き角度が大きな場合で, $\sigma_{y \max}$ は低くなるため,き裂は発生しない.また, Fig. 4(b)は,切欠き底丸味半径が大きいため, R_β が大きくなり結果的にはき裂が発生しない. Fig. 4(c)は,公称応力が低いいため,塑性域の大きさ R が小さく, σ_y の値も小さいので,き裂は発生しない.これは遅れ破壊限度以下の負荷応力の場合に相当する.

5 塑性域の大きさ R と,公称応力との関係

静的曲げ試験における, 応力-たわみ線図と塑性域の大きさ R との関係を示したのが Fig. 5である. 図の応力-たわみ線図は, 実験で得られた線図を模式化したものである. 実線で示したのは, 脱水素処理を行なった試験片の結果であり, 破線で示したのは, 水素を導入した試験片の結果である. まず, 脱水素処理を行なった試験片では, 図の(1)の点で切欠き底で降伏を開

Fig. 5. (a) The schematic diagram of result on static bending test, and (b) the condition of stress distribution at each point and the condition of crack.

始する. この点は, 実際には, 応力集中により切欠き底が単軸引張降伏応力に等しくなる時の公称応力およびたわみを示す点である. つぎに, (3)の位置で, $\sigma_{y \max}$ に達し(比例限度と考えられる), (3)と(4)の間は, $\sigma_{y \max}$ の応力で塑性域は内部へ進行する. そして, (4)の位置で全面降伏を起こし, 試験片は大きくた

Fig. 4. The condition that initial crack in delayed fracture is not occurred.

わみ始める。実験では、(4)–(5)の範囲で、き裂が発生し、(5)の位置付近で急速に伝ばする。このため、荷重も急激に低下する。その後、(7)の位置で試験片は分離破断する。

一方、水素を導入した試験片では、(2)の位置付近で、き裂が発生し、(7)でやはり分離破断する。

ここで、(2)の位置では、 $\sigma_y^{\max}$ より低い応力 σ_{y1} で、き裂が発生したことになる。もちろん、塑性域の大きさ R は R_β より小さいはずである。これらのことから、前回行なった実験結果より、水素を導入したときの静的曲げ試験におけるき裂発生応力 σ_{y1} 、および、遅れ破壊限度の応力 σ_{y2} を求めることができる。

6 き裂発生応力の求め方

静的曲げ試験および引張試験結果は、Table I のとおりである。まず、Fig. 5 の(a)の(1)の公称応力を S_b 、また、塑性域の大きさが R_β となったときの公称応力を S_a (比例限応力) とすると、

Table I. Mechanical properties of specimen.
(kg/mm²)

		No.1	No.2	No.3
Tensile test	Tensile strength	117.6	106.5	95.3
	Yield stress	111.9	103.3	91.9
Static bending test	Bending strength	257.8	233.6	219.7
	Proportional limit	255	228	217
	Crack nucleate stress (nominal)	181.6	194.8	204.3
Delayed fracture test	Delayed fracture test (nominal)	60	76	121

$$S_b \text{ で } R=0$$

$$S_a \text{ で } R=R_\beta$$

また、 S_b から S_a までは、荷重と塑性域の大きさ R は一次的な関係にあるとされているので、 $S_b \leq S \leq S_a$ の任意の公称応力 S に対しては、塑性域の大きさ R は簡単に比例関係から次式により求められる。

$$R = \frac{R_\beta}{S_a - S_b} (S - S_b) \quad (4)$$

(4)式に(3)式を代入すると、

$$R = \frac{\rho(e^{(\pi-\omega)/2} - 1)}{S_a - S_b} (S - S_b) \quad (5)$$

(5)式を(1)式に代入すると、

$$\sigma_y = 2k \left[1 + \ln \left\{ 1 + \frac{(e^{(\pi-\omega)/2} - 1)}{S_a - S_b} (S - S_b) \right\} \right] \quad (6)$$

ここで、 $S_b = \sigma_Y / \alpha$ を(6)式に代入し、トレスカの降伏条件 $\sigma_Y = 2 \cdot k$ を用いると、

$$\sigma_y = \sigma_Y \left[1 + \ln \left\{ 1 + \frac{(e^{(\pi-\omega)/2} - 1)}{\alpha S_a - \sigma_Y} (\alpha S - \sigma_Y) \right\} \right] \quad (7)$$

ただし、 α : 形状係数

σ_Y : 単軸引張降伏応力

(7)式において、実験に使用した試験片の形状係数 α は、ノイバーによれば、 $\alpha = 4.1$ であるから、実験結果より求めた公称応力を代入すれば、水素を導入したときのき裂発生応力 σ_{y1} 、および、遅れ破壊限度の応力 σ_{y2} を求めることができる。

つぎに、これらの関係を図より求めようとしたのが Fig. 6 である。Fig. 6 の(a)は、塑性域の大きさ R と、縦方向応力 σ_y の関係を示すもので、この関係は、(1)式による。Fig. 6 の(b)は、塑性域の大きさ R と、試験片とのたわみの関係を示し、また、Fig. 6 の(c)は、試験片の公称曲げ応力と、たわみとの関係を示したものである。この関係は、比例限応力以下の場合であるから、材料の強度が異なっても試験片形状が同一であれば、同一直線になる。また、 R_β の値は、試験片切欠き角度 45° で切欠き底丸味が 0.25 mm であるから、(3)式より、 $R_\beta = 0.56 \text{ mm}$ となる。したがって、 $R = 0.56 \text{ mm}$ で $\sigma_y^{\max}$ に達することになる。塑性域は、 S_b で $R=0$ 比例限応力 S_a で $R=R_\beta$ となり、その間は、応力と塑性域の大きさが一次的な関係を有するものとして直線で結んだ。

Fig. 6. The diagrams for obtaining the crack nucleate in static bending test and normal stress (σ_y) at delayed fracture limit upon the steel that was introduced hydrogen.

いま、実験結果より求めた、水素を導入したときの静的曲げ試験のき裂発生公称応力、および、遅れ破壊限度をFig. 6(c)に記入し、Fig. 6(b)から、各応力における塑性域の大きさを求め、Fig. 6(a)から、縦方向応力 σ_{y1} および σ_{y2} を求める。この操作を各強度ごとに行なえば、各強度の σ_{y1} および σ_{y2} を求めること

Table II. Test results.

Normal stress	(kg/mm ²)		
	No. 1	No. 2	No. 3
Crack nucleate stress σ_{c1} (10% H ₂ SO ₄ 30 min acid dip)	215	211	197
Delayed fracture limit σ_{c2} (In 10% H ₂ SO ₄)	144	149	165

ができる。

以上の方法で求めた、水素を導入したときのき裂発生応力 σ_{y1} 、および、遅れ破壊限度応力 σ_{y2} を Table II に示す。

つぎに、Fig. 6(a)において、同材質の強度を変えた試験片に水素を導入した場合のき裂発生応力 σ_{y1} を結んだ線と、遅れ破壊限度応力 σ_{y2} を結んだ線とが、 $R = R_{\beta}$ の位置で、ほぼ一点で交わるので、この交点より逆に、この材料の遅れ破壊を起こさない上限の降伏応力 σ_{y0} を求めることができる。また、この点は、静的曲げ試験のみでも求めることができることを示している。実際に使用した低炭素ボロン鋼の場合、 σ_{y0} は 85 kg/mm² である。

また、静的曲げ試験は、短時間で容易に行なうことができるが、遅れ破壊試験は長時間を要する。しかし、この図を利用すれば、強度の異なった数種類の試験片について、静的曲げ試験を行ない、 σ_{y1} を求めておき、つぎに同材質の任意の強度における遅れ破壊試験を一種類行ない σ_{y2} を求めれば、図より任意の強度についての遅れ破壊限度を類推することができる。

さらに、これらの図から、材料が同じでも、強度が上昇すると、き裂の発生点位置は、切欠き底に近づくことを意味し、わずかの水素の侵入量でも初期き裂が発生しやすいことを示している。

7 水素を導入した場合のき裂発生応力 σ_{y1} および遅れ破壊限度の応力 σ_{y2} の応用

以上の方法で求められた σ_{y1} 、 σ_{y2} が実際に利用できるかどうかを確かめるために、次の実験を行なった。すなわち、試験片と同材質、同強度のボルトを10%硫酸水溶液に30分浸せき後、JIS で決められているくさび引張試験 (Fig. 7)、および、ボルトをくさびを介して締め付け、10%硫酸水溶液に浸せきする遅れ破壊試験を行なった。(Fig. 8) これらの試験はいずれもボルト全体に曲げを生じさせる苛酷な試験である。実際の高力ボルトの遅れ破壊の発生位置は、頭部首下丸味部と不完全ねじ部である。Fig. 9 はこの部分の塑性応力分布、および、V型切欠き付シャルピー試験片の応力分布と、この場合の3種類の強度の σ_{y1} および σ_{y2} を同時に示したものである。

まず、この図から、No. 1, No. 3 の強度のいずれも、

Fig. 7. Equipment of test for strength under weadge loading of full size bolt. (JISB 1051)

Fig. 8. Equipment of delayed fracture test of full size bolt.

Fig. 9. Plastic stress distribution at vicinity of notch root.

不完全ねじ部において、遅れ破壊を起こすことは明らかである。しかし、ここで、No. 1 の強度を除いては、首下丸味部では、 $\sigma_{y, \max}$ は遅れ破壊限度応力より低くなっているので、き裂を発生するおそれはない。しかし、No. 1 の強度では、水素の侵入深さを H (実験結果から 0.5 mm 以内) とすると、き裂を発生する可能性のあることを示している。実際の遅れ破壊試験結果では、No. 1, No. 3 の強度のボルトの両方共、不完全

Fig. 10. The aspect of crack propagation of the bolt, after 10% H_2SO_4 dip in test for strength under weadage loading of full size bolt, (incomplete thread).

Fig. 11. The aspect of crack propagation of the bolt, in delayed fracture test in 10% H_2SO_4 (rounding under the head).

ねじ部より遅れ破壊を起こした。(Fig. 10) そして、No. 1 の場合、首下丸味部にも試験後ボルトを縦方向に切断して調べた結果、き裂の入っていることが認められた。(Fig. 11)

一般に、くさび引張試験の場合、水素を導入しないものの引張強度は、首下に平座金を挿入した引張試験の引張強度との間に大きな差がないのが普通である。これは、くさびによって曲げを受けても、全面降伏を起こすまでにき裂が発生することがないためである。しかるに、No. 1 に相当するボルトでは、水素を導入することにより34%の最高応力の低下がみられた。しかし、No. 3 のボルトでは、ほとんど強度の低下はみられなかった。このことは、No. 1 に相当するボルトは、全面降伏を起こす以前にき裂が発生したために、最高応力が低下したが、No. 3 については、Fig. 9 から、き裂発生応力の方が、縦方向応力 σ_y より高いた

め、全面降伏を起こしてもき裂は発生せず、このため差が出なかったものと考えられる。

これらの実験結果は、求めたき裂発生応力 σ_{y1} および遅れ破壊限度応力 σ_{y2} が、実際に、応用できることを示している。また、 σ_{y1} 、 σ_{y2} は、材質、強度および水素の侵入量によって決まる固有の量であり、切欠き底での応力分布は、試験片切欠きの形状によって決まるものであるから、 σ_{y2} 以下に $\sigma_y^{\max}$ になるような切欠き形状を選べば、遅れ破壊発生の可能性はなくなるものと考えられる。

8 結 言

水素が鋼中に入って発生する遅れ破壊は、切欠き底に初期き裂が発生することが必要条件であると考えられる。このき裂は、切欠き底前方で生ずる高い縦方向応力によって生じ、その大きさは、単軸引張降伏応力 σ_r 以上で、最大縦方向応力 $\sigma_y^{\max}$ より低くなるので、実験結果より、き裂発生応力また遅れ破壊限度の応力を計算または図により求めることができる。求められたこれらの応力は、実験により、実際に応用できることがわかった。切欠きの形状によって、最大縦方向応力を低くすることができれば、き裂は発生せず、したがって、切欠き形状の変更によって遅れ破壊を防止することは可能である。

(昭和47年5月30日 日本材料学会第21期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 宮本 博, 江藤元大, 材料, **21**, 223 (1972).
- 2) Troiano, A. R., H. H. Johnson and J. G. Morlet, Trans. AIME, 212, 528 (1958).
- 3) Tetelman, A. S., "Fracture of Structural Materials," 邦訳 宮本 博 (1970) 培風館
- 4) Green, A. P., and B. B. Hundy, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 4 (1956).
- 5) Hill, R., The Mathematical Theory of Plasticity, 邦訳 (1954) 培風館
- 6) JIS B 1051, ボルト, 小ねじの機械的性質.
- 7) JSSC, 高力ボルトの遅れ破壊, **6**, No. 52. (1970).