

# 過大荷重によるSCC, 疲労、水素脆性き裂の進展阻止と き裂の無害化

Arrest of SCC, Fatigue and Hydrogen Assisted Cracks, and Make Harmless  
the Cracks by Overload

横浜国大工学部	安藤 柱	Kotoji ANDEO	Member
横浜国大工学部	高橋 宏治	Koji TAKAHASHI	No Member
小山高専	北條 恵司	Keiji HOUJYOU	No Member
横浜国大院生	橋倉 靖明	Yasuaki HASHIKURA	No Member
横浜国大院生	水上 博嗣	Hiroshi MIZUKAMI	No Member
横浜国大院生	佐野 勇人	Hayato SANNO	No Member

This study proposes an innovative method for arresting SCC, fatigue and hydrogen assisted cracks, and making harmless the cracks by overload. By overloading, compressive residual stress is introduced ahead of the crack. The residual stress reduce K values and arrest the crack. By theory,  $K_{ISCC}$ ,  $K_{IHE}$  and  $\Delta K_{th}$  increase with increasing Kov (K value by overload) and the nominal threshold values were given the equation:  ${}^N K_{ISCC}$ ,  ${}^N K_{IHE}$  and  $\Delta{}^N K_{th} = C + DKov$ . Where C is  $K_{ISCC}$ ,  $K_{IHE}$  and  $\Delta K_{th}$ , respectively, and D is a proportional constant and 0.24 ~ 0.27. Experimental results showed that D showed good agreement with theory, except SUS316 steel by SCC. The reason was assumed that SCC test time for  $K_{ISCC}$  definition was not enough but shorter. If threshold values are enough larger than applied K and  $\Delta K$  values, crack is able to grow and can be made harmless.

**Keywords:** Overload Effect, SCC, Fatigue, Hydrogen Assisted Crack, Crack Arrest, Make Crack Harmless

## 1. 緒言

機械・構造物では、使用中にき裂が発生することがある。このき裂に対応する技術としては、次の如き方法がある。

- 1) 発生したき裂を材料自身に自己治癒させ、強度を完全回復させる<sup>[1]~[3]</sup>。
- 2) 許容欠陥の場合には、早期にき裂の進展を阻止し、無害化する<sup>[4]~[6]</sup>。
- 3) 許容欠陥の場合には、非許容欠陥となるまで放置し、使用を継続する。
- 4) 直ちに修理する。

一部の構造用セラミックスでは、稼働中に発生したき裂を稼働中に自己治癒し、その温度での強度を完全回復できる<sup>[1]~[3]</sup>。しかし鉄鋼材料では、いろいろ試みたものの、残念ながらそのような技術を開発できなかった。次善の技術は、表面き裂を無害化することである。事実、材料の強度レベルにもよるが、

連絡先: 安藤 柱, 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区  
常盤台 79-5, 横浜国立大学, 電話 : 045-339-4016,  
E-mail: andokoto@ynu.ac.jp

深さが 0.2~1 mm 以下の微小き裂は、ピーニングにより無害化可能である<sup>[4]</sup>。大きいき裂については、研究例が少ないが、IHSI や L-SIP 技術を使用すれば、相当大きいき裂を無害化できることが報告されている<sup>[5],[6]</sup>。そこで、本論文では、上記技術を応用して、過大予荷重による SCC, 疲労、水素脆性き裂の進展阻止とき裂の無害化に関する基礎的研究を実施した。

## 2. 過大荷重効果によるき裂進展阻止の機構 2.1 基本モデル

き裂材に、過大予荷重 ( $P_{ov}$ , それによる応力拡大係数  $K_{ov}$ ) を負荷すれば、図 1 の如くそれによる塑性域  $R_{ov}$  が生じる。

$$R_{ov} = 1/\pi (K_{ov}/\alpha \sigma_y)^2 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $\alpha$  は平面応力で 1、平面ひずみで  $\sqrt{3}$  である。 $P_{ov}$  を除荷すれば、き裂先端部に圧縮降伏の塑性域  $R_{ry}$  が生じ、その大きさは下式で与えられる<sup>[5],[6]</sup>。

$$R_{ry} = 1/\pi (K_{ov}/2\alpha \sigma_y)^2 \quad (2)$$

Pov が塑性崩壊荷重に近い場合には、(1) 式は適用できないが、Rry は Rov に比べて小さいために、そのような場合でも適用可能である。

今、無限板に長さ 2a のき裂があり、無限遠で応力  $\sigma_{ov}$  を受けた場合を考える。図 1 において、き裂が圧縮降伏の塑性域 Rxy だけ進展したとすると、Rry 領域における圧縮残留応力による応力拡大係数 Krs0 は次式で与えられる<sup>[5],[6]</sup>。

$$Krs0 = -2\alpha \sigma_y \sqrt{\{(a+Rry)/\pi\} \arccos\{a/(a+Rry)\}} \quad (3)$$

## 2.2 SCCと水素脆性き裂の場合

図 2 に過大荷重の模式図を示した。今、 $Kov \leq K_{1SCC}$  の場合には、過大荷重効果は発生しない。そこで、見かけの  ${}^N K_{1SCC}$  は、下式の如く材料定数  $K_{1SCC}$  に等しくなる。

$${}^N K_{1SCC} = K_{1SCC} \quad (4)$$

しかし、 $Kov > K_{1SCC}$  の場合には下式で与えられる。

$${}^N K_{1SCC} = K_{1SCC} - Krs \quad (5)$$

ここで、Krs は圧縮塑性域による応力拡大係数であり、(3) 式を修正して下式で与えられる。

$$Krs = -2\alpha \sigma_y \sqrt{\{(a+Rry)/\pi\} \arccos\{(a+Rry^A)/(a+Rry)\}} \quad (6)$$

ここで、 $Rry^A$  は、 $K_{1SCC}$  時の Rry であり、(2) 式の Kov の代わりに  $K_{1SCC}$  を代入して得られる。

以上の議論は、 ${}^N K_{1SCC}$  と  $K_{1SCC}$  を、それぞれ  ${}^N K_{IHE}$  と  $K_{IHE}$  に置き換えることにより、水素脆性にも適用できる。

## 2.3 疲労き裂の場合

疲労き裂の場合には、応力比 S が大きな影響を及ぼすので、2.2 節に比べてやや複雑であり、その模式図を図 3 に示した。応力比 S が、 $S \leq 0$  の場合には、2.2 の結果を適用可能である。

しかし、 $S > 0$  の場合にはやや複雑である。いま、応力比が S の時の下限界応力拡大係数範囲を  $\Delta K_{th}^S$ 、見掛けのその値を  $\Delta^N K_{th}^S$  とする。

(A)  $Kov \leq \Delta K_{th}^S / (1-S)$  の場合には、Kov は OA 間にあり、(3) 式と同様の理由により  $\Delta^N K_{th}^S$  は下式で与えられる。

$$\Delta^N K_{th}^S = \Delta K_{th}^S \quad (7)$$

(B)  $Kov > \Delta K_{th}^S / (1-S)$  で、Kov が図 3 の A B 間にある場合。この場合には、図 3 の如く  $\Delta K$  の変動幅は変化しないが、Krs の効果により応

力比 S が低下する。この場合の  $\Delta^N K_{th}^S$  はやはり (7) 式で与えられるが、S は刻々の値であり、Kov で変化する。なお、B 点での応力比 S は 0 なので、 $Kov^B$  と  $Krs^B$  は下式で与えられ、 $Krs^B$  が得られる。

$$Krs^B + S \Delta K_{th}^S / (1-S) = 0 \quad (8)$$

上式を書き換えると下式のようになり、これから B 点での  $Rry^B$  を、またそれを (2) 式に代入して  $Kov^B$  が得られる。

$$Krs^B = -2\alpha \sigma_y \sqrt{\{(a+Rry^B)/\pi\} \arccos\{(a+Rry^A)/(a+Rry^B)\}} \quad (9)$$

(C)  $Kov > Kov^B$  の場合。いま、過大予荷重による Kov 負荷後に、 $\Delta K^S$  で疲労実験を開始したとする。この場合には、図 3 の如く A 点での  $Kov^A$  で過大予荷重効果が開始し、B 点での  $Kov^B$  で応力比が零になる。更に Kov が大きい場合には、 $\Delta K$  の有効な部分の変動幅  $\Delta K_{eff}$  は、Krs の効果により Kov の増大につれて低下する。B 点での応力比 S は 0 なので、 $Kov^B$  と  $Krs^B$  はおよび  $\Delta K^S$  の関係は下式で与えられ、 $Krs^B$  が得られる。

$$Krs^B + S \Delta K^S / (1-S) = 0 \quad (10)$$

疲労き裂の停留条件は下式で与えられる。

$$\Delta K_{eff} = \Delta K_{th}^0 \quad (11)$$

この場合の Krs や  $\Delta^N K_{th}^S$ 、および  $\Delta^N K_{th}^S$  は、それぞれ (12) (13) (14) 式で与えられる。

$$Krs = -2\alpha \sigma_y \sqrt{\{(a+Rry)/\pi\} \arccos\{(a+Rry^A)/(a+Rry)\}} \quad (12)$$

$$\Delta Krs^B = Krs - Krs^B \quad (13)$$

$$\Delta^N K_{th}^S = \Delta K_{th}^0 - \Delta Krs^B \quad (14)$$

## 3. 実験結果との比較

### 3.1 SCCの場合

試験片は WOL 型であり、板厚、幅および背は、それぞれ 12.7、31.4、及び 40.5mm である。材料は SUS304 と SUS316 であり、鋭敏化処理温度と時間は共に 650°C、20 時間である。試験は純水 (1L) に対してテトラチオン酸カリウム (10g) を配合後、硫酸を添加して pH=2 とした溶液中にて 300 時間で実施した。実験結果を図 4 の (a) と (b) に示した。SUS304 の実験結果は平面ひずみの解と良く一致している。しかし、SUS316 の場合には、Kov が 20MPa $\sqrt{m}$  以下の場合には一致しているもの

の、それ以上の $K_{ov}$ 領域では、実験の ${}^N K_{ISCC}$ の方が高い値を示している。この原因としては、SCCの感受性が低い SUS316 では、試験時間 300 h が充分でなかったと考えられる。現在、SUS316 に対して、1000 時間の SCC 試験を計画中である。なお、SUS304 と SUS316 の割れ形態は、それぞれ粒界破壊と粒内破壊であった。SCC が成長した場合と、成長しない場合の破面写真を図 5 に示した。

### 3.2 水素脆性の場合

試験片はWOL型であり、材料はSUP9を焼入れ・焼戻し処理したもので硬さは48HRCである。試験は5%硫酸液中にて40時間実施した。実験結果を図5に示した。SUP9の実験結果は、 $K_{ov}$ が $70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ まで平面ひずみの解とかなり良く一致している。なお、この場合の割れは粒内破壊であった。また、 $K_{ov}$ が $70\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の実験は、この材料の $K_{IC}$ が約 $75\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ のために実施できなかった。

### 3.3 疲労の場合

SUS316の室温大気中における $S=0.1$ の試験結果を図6に示した。実験結果は、 $K_{ov}$ が約 $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ まで解析結果を非常によく一致しており、 $\Delta^N K_{th}^{0.1}$ は、約 $7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ から $33\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ まで大幅に向上している。図7は、材料の降伏応力が、255~1200MPaの4種類の鋼材の結果を示したものである。実験結果は、解析結果と同様に、材料の降伏応力に依存せずほぼ一本の直線で示せる。なお、疲労試験での割れは全て粒内破壊割れであった。

## 4. 結論

- 1) 過大予荷重によるき裂進展阻止並びにき裂無害化のモデルを提案し、解析した。
- 2) 表記式には降伏応力 $\sigma_y$ やき裂長さ $a$ が入っているが、過大荷重による ${}^N K_{ISCC}$ や $\Delta^N K_{th}^S$ の向上挙動は、 $\sigma_y$ や $a$ にほとんど依存せずほぼ一本の直線で示せる。
- 3) 実験で得られたSUS304の ${}^N K_{ISCC}$ やSUP9の ${}^N K_{IHE}$ 向上挙動は、解析結果と良く一致していた。しかし、SUS316の結果は、 $K_{ov}$ が大きい部分で一致がわるい。これは、SUS316ではSCC感受性が低いために、実験時間が不足したためと考えられる。
- 4) 疲労では、材料の $\sigma_y$ レベルに依らず $K_{ov} \sim \Delta^N K_{th}^S$ 関係は、ほぼ一本の直線で示せ、解析結果と良く一致していた。
- 5) 疲労では、応力比の影響が大きく、それが大きい場合には $K_{ov}$ の影響度が低下する。
- 6) 以上のことから、過大荷重効果により比較的大きいき裂の進展を阻止し、無害化できるものと結論される。

## 参考文献

- [1] 安藤 柱 “ここまできた自己修復材料” 第5章 セラミックスの自己き裂治癒—稼働下でもき裂を全治癒できるセラミックス、工業調査会、(2003) PP.127-158.
- [2] K. Ando et al, “Self-healing Material” Wiley-VCH, (2008), PP183-217.
- [3] K. Ando et al, “Advanced Nano-materials” Wiley-VCH, (2009), P555-594.
- [4] 安藤柱 他、“特集I：構造物材料におけるき裂の無害化と自己治癒” 金属、アグネ技術センター、(2007)、pp1078-1097.
- [5] 安藤 他4名、圧力技術、47巻5号、(2009)、pp22-28.
- [6] 安藤 他3名、圧力技術、47巻6号、(2009)、pp11-18.

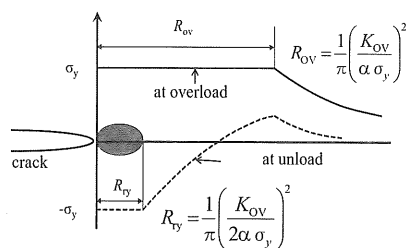


Fig.1 Plastic zone ahead of a crack

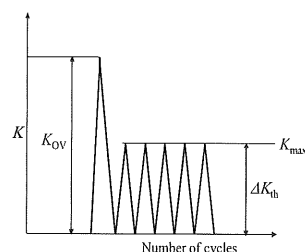


Fig.2 Schematic of overload

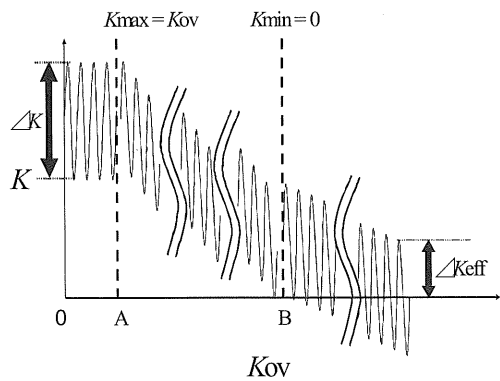


Fig. 3 Schematic of stress ratio on fatigue threshold by overload

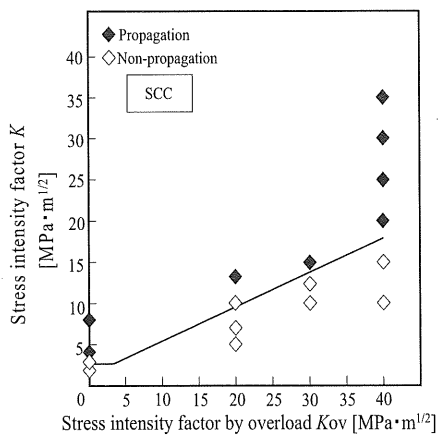


Fig. 4(a) SCC test results on SUS304

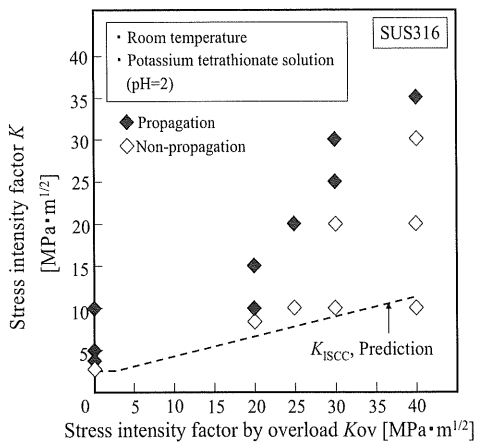


Fig. 4(b) SCC test results on SUS316

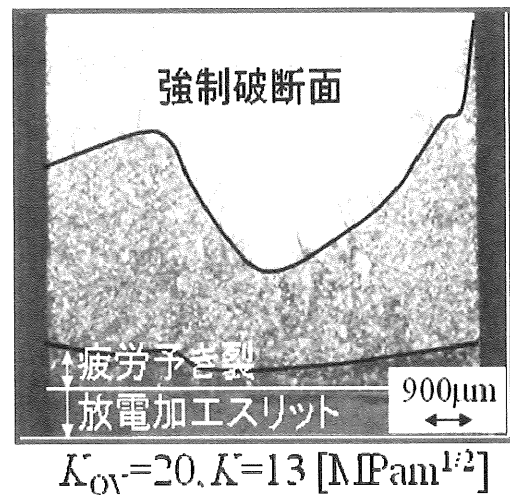
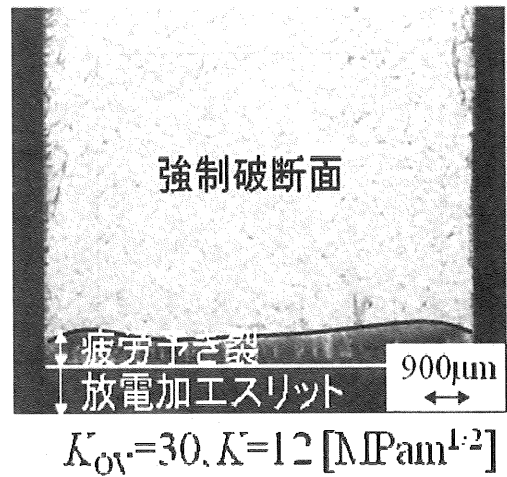


Fig. 5 Fracture surface of SUS304 SCC tested

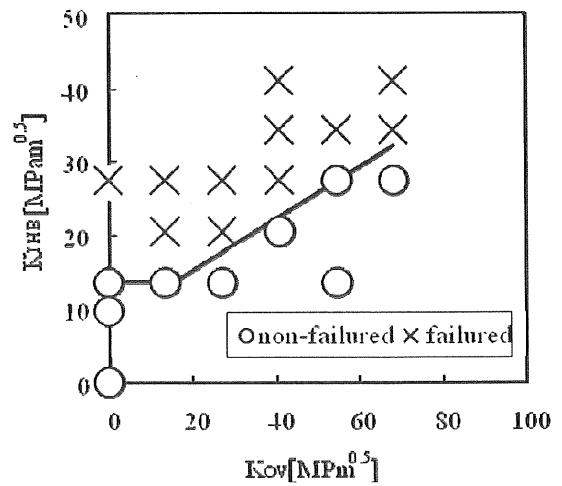
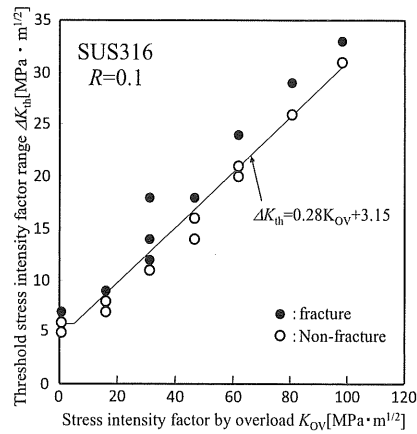


Fig. 6 Effect of overload on hydrogen embrittlement  $K_{HE}$



Relationship between  $\Delta K_{th}$  and  $K_{ov}$  for large crack-like surface defect

Fig. 7 Effect of overload on fatigue threshold stress intensity factor range of SUS316.

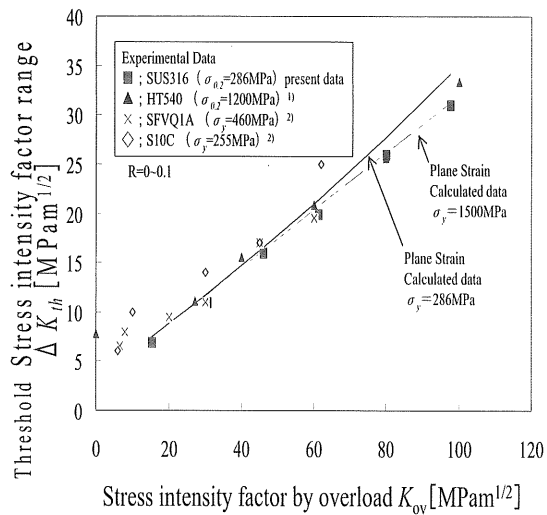


Fig. 8 Effect of overload on fatigue threshold stress intensity factor range of various steel (Yield stress: 255MPa-1200MPa).