MF-Ⅲ小委員会

繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究　その3（実験WG）

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

（一社）日本溶接協会原子力研究委員会MFD小委員会ナレッジプラットフォーム公開資料（2017年）：MF-Ⅲ小委員会「繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の健全性評価に関する研究（その3）（平成21年度最終報告書）」

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

小委員会の概要

MF-Ⅲ 小委員会　　(MF：Multi-axial Fatigue)

【研究題目】 繰り返し複合荷重に対する軽水炉機器・構造物の
健全性評価に関する研究　その3

【研究期間】 平成19年9月～平成22年3月

【研究体制】（役職・役職は研究機関当時）

主査： 矢川元基（東洋大学計算力学センター長　教授）

実験WGリーダー： 田中啓介（名城大学理工学部工学部教授）

数値解析リーダー： 菊池正紀（東京理科大学理工学部教授）

き裂進展WGリーダー： 高橋由紀夫（(財)電力中央研究所上席研究員）

幹事： 4機関，4名

委員： 17機関，24名

【委託元】 東京電力(株)，北海道電力(株)、東北電力(株)，中部電力(株)，
北陸電力(株)，関西電力(株)，中国電力(株)，四国電力(株)，
九州電力(株)，日本原子力発電(株)，電源開発(株)

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

本資料の構成

本資料は、MF-Ⅲ小委員会の主要な成果を以下の構成でまとめたものである。

第1章　研究背景と目的

第2章　研究内容及び成果概要

第3章　供試材

第4章　応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

第5章　疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化

第6章　まとめ

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

1　研究背景と目的

軽水炉機器・構造物の損傷事例において、異なる様式または大きさの荷重が複合して作用し、この繰返しによって、疲労き裂が発生・進展したと推定される事象が認められた。このような繰返し複合荷重下での疲労損傷に対して、データを収集／蓄積／整理し、実機設計に参照できる形にすることは、新設の原子力発電プラントにおける設計のみならず、高経年化した原子力設備の評価にも有益である。

先行研究(MF, MF-Ⅱ)においては、疲労寿命試験を通してステンレス鋼の疲労寿命挙動に関する新たな現象が確認された。また、疲労き裂進展試験並びにき裂先端応力場の解析評価等を通して、多軸応力場におけるき裂進展挙動の予測が可能な段階まで解析に関する知識、技術の拡充が得られた。

疲労評価に関する知見・技術水準の継続的な向上を図ることにより、
将来的な疲労評価手法の高度化(精緻化、合理化)に資することを目的に、

① 応力集中部を有するステンレス鋼材の複合荷重に対する疲労寿命挙動の解明
② 複合荷重による多軸応力場における疲労き裂進展のシミュレーション技術の高度化

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

2 研究内容及び成果概要(1)

(1) 応力集中部を有するステンレス鋼材の複合荷重下疲労寿命挙動の解明

- ステンレス鋼切欠き材の応力集中率の異なる環状切欠き丸棒について捩りと軸力の複合荷重条件下での疲労寿命データを取得
- 全寿命を、切欠き底におけるき裂発生寿命とその後の進展寿命に分離し、両寿命に対する切欠き効果を検証
  - 切欠きが鋭くなるほどき裂発生寿命は短くなるが、き裂進展がき裂面の接触により遅延するため寿命が延びる
  - 静的引張応力を重畳させると、き裂進展の遅延が低減され、切欠きが鋭くなるに従い寿命が低下
- 切欠き底のひずみ挙動の実測とともに解析的予測法の検討し、ひずみ挙動をもとにき裂発生寿命を評価
- 切欠き底でのき裂の進展挙動の微視的観察をもとに、き裂進展挙動のモデル化を検討

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

2 研究内容及び成果概要(2)

(2) 複合荷重下の疲労き裂進展シミュレーション技術の高度化

複合荷重下のき裂進展式を用いて、連続的にき裂進展をシミュレートすることが可能な評価技術を検討

1. シミュレーション技術の検証のため、平板検証試験片、段付き丸棒検証試験片を用いて疲労き裂進展試験を行い実験データを取得
2. 2 次元き裂に対する疲労き裂進展シミュレーション技術を確認した。階層メッシュ法、SPH 法、重合メッシュ法、Dual BEM により二次元き裂の疲労き裂進展シミュレーションが行われ妥当な結果を得た
3. 3 次元平面き裂、3 次元曲面き裂に対する疲労き裂シミュレーション技術の高度化を行った。階層メッシュ法、SPH 法、テトラ要素、Dual-BEM、Smeared crack model、重合メッシュ法などを用いて3 次元平面き裂、3次元曲面き裂の疲労き裂進展解析を実施
4. これらの数値解析により、混合モードの影響、ファクトリルーフの形成、複数き裂の相互作用、切欠き部の影響など、実験WGでの成果と対比できる解析結果を取得
5. またこれらの技術を用いて検証試験との比較・検討を行った。実験とよく一致した結果を得るとともに、今後の課題も明らかになった

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

3　供試材

供試材

(1) オーステナイト系ステンレス鋼板材(SUS316L)
(2) 炭素鋼(SGV410)
(3) オーステナイト系ステンレス鋼鍛造材(SUS316)
(4) 一般構造用炭素鋼(SS400)

表　疲労試験に用いた供試材の概要

供試材	試験項目	試験片
SUS316L SGV410	疲労寿命試験	小型試験片 （試験部直径：φ8～φ16）
SUS316		大型試験片 （試験部直径：φ60）
SS400	疲労き裂進展試験	大型段付試験片 （試験部：φ60）

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

MF-IIでは、多軸疲労強度に及ぼす切欠き効果(応力集中)に注目

- 炭素鋼では、応力集中が大きくなるにつれて疲労寿命が減少するという従来知見どおりの結果が得られた。
- オーステナイト系ステンレス鋼では、軸力を重畳させた捩り疲労の場合には応力集中が大きくなるに従って疲労寿命が減少するが、捩り単独の場合には応力集中が大きくなるにつれて疲労寿命が増加するという複雑な現象が認められた。

これらの先行研究を基に、本研究では複合荷重下での疲労特性に及ぼす切欠き効果を明らかにすることを目的とする。

課題1. シミュレーション技術に用いる基礎データの取得

課題2. 小型試験片を用いた複合荷重下疲労試験によるデータの取得

課題3. 大型試験片を用いた複合荷重下疲労試験による応力集中部のひずみ測定データの取得

課題4. 複合荷重下疲労試験の解析的検討

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

ステンレス鋼小型試験片の繰返し複合荷重下での疲労試験の概要

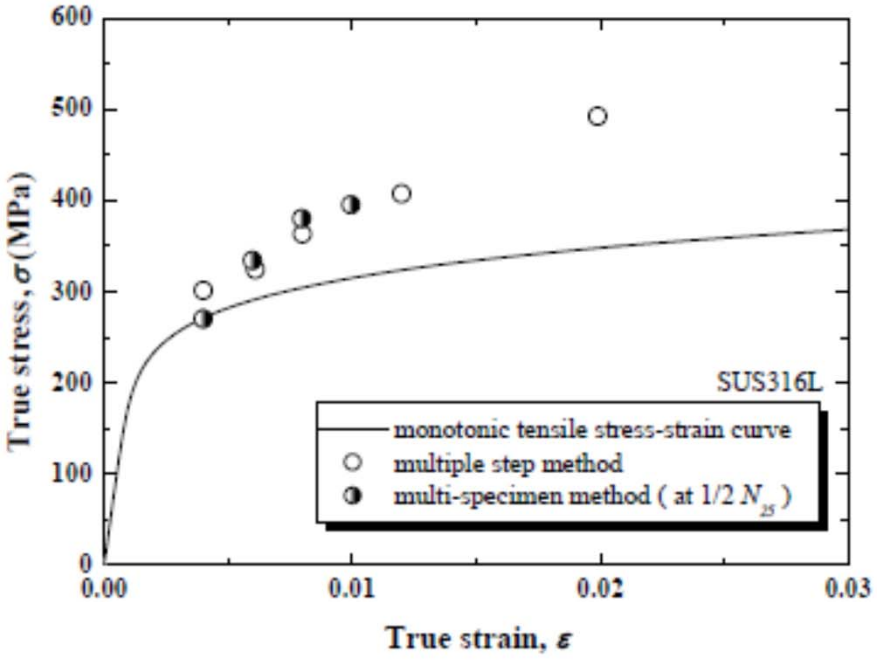
試験片形状		Kt or ρ(mm)	単調引張	軸力 σa	一定軸力＋振り				非比例負荷 (90°位相差)
				平均応力 σm	σm固定	σm／τa比一定			
				レベル0 (0MPa)	σm	1	0.5	0 (純振り τa)	
中空	平滑	Kt=1		Ho F *1	Ho	E	E	Ho F	F
中実	平滑	Kt=1	I	I *2 E Ho F	Ho	M T	T	M Ho T F	F
	環状V溝切欠き	Kt=1.5		I Ho F	Ho *3	M T	T	M Ho *3 T F	F
		Kt=2.5		I F		M T	T	M T F	F
		Kt=4.2						F	F
		Kt=5				M		M	
		Kt=6						F	F
	環状段付切欠き	ρ=4.5				Y		Y	
		ρ=1.07				Y		Y	
		ρ=0.22				Y		Y	

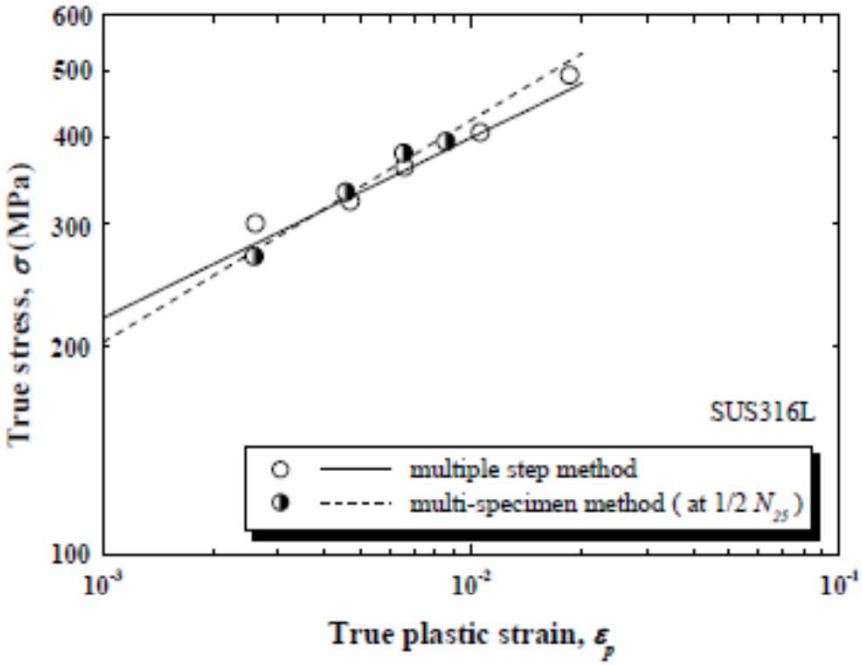
IHI E:電中研 M:名城大学 Ho:法政大学 T:東芝 F:福井大学 Y:横浜国立大学
*1:単一試験片漸増荷重法
*2:複数試験片一定荷重法
*3:2段切欠き試験片(Kt=1, 1.5)

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

基礎データ　- 応力･ひずみ関係 -





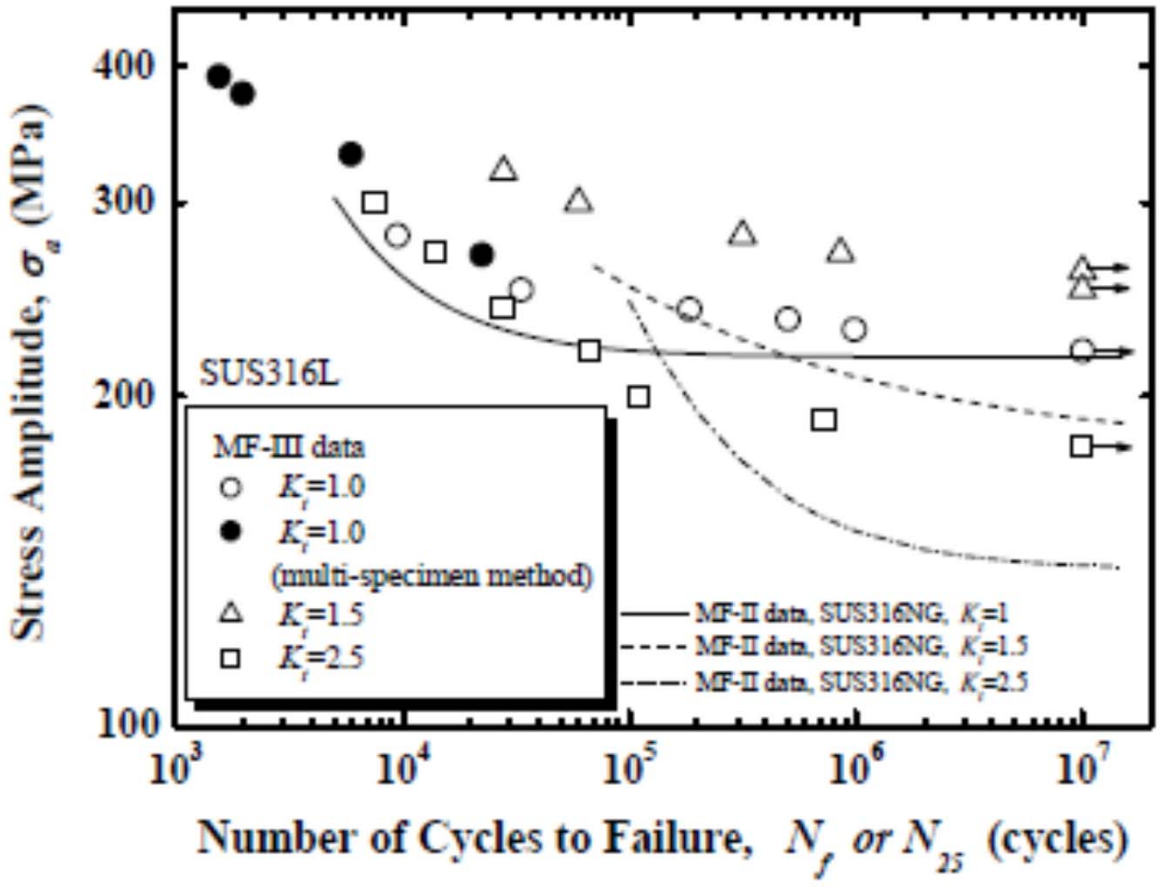
$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}=\frac{\sigma}{\sigma_y}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n$$

$$\sigma = A\varepsilon_p^m$$

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

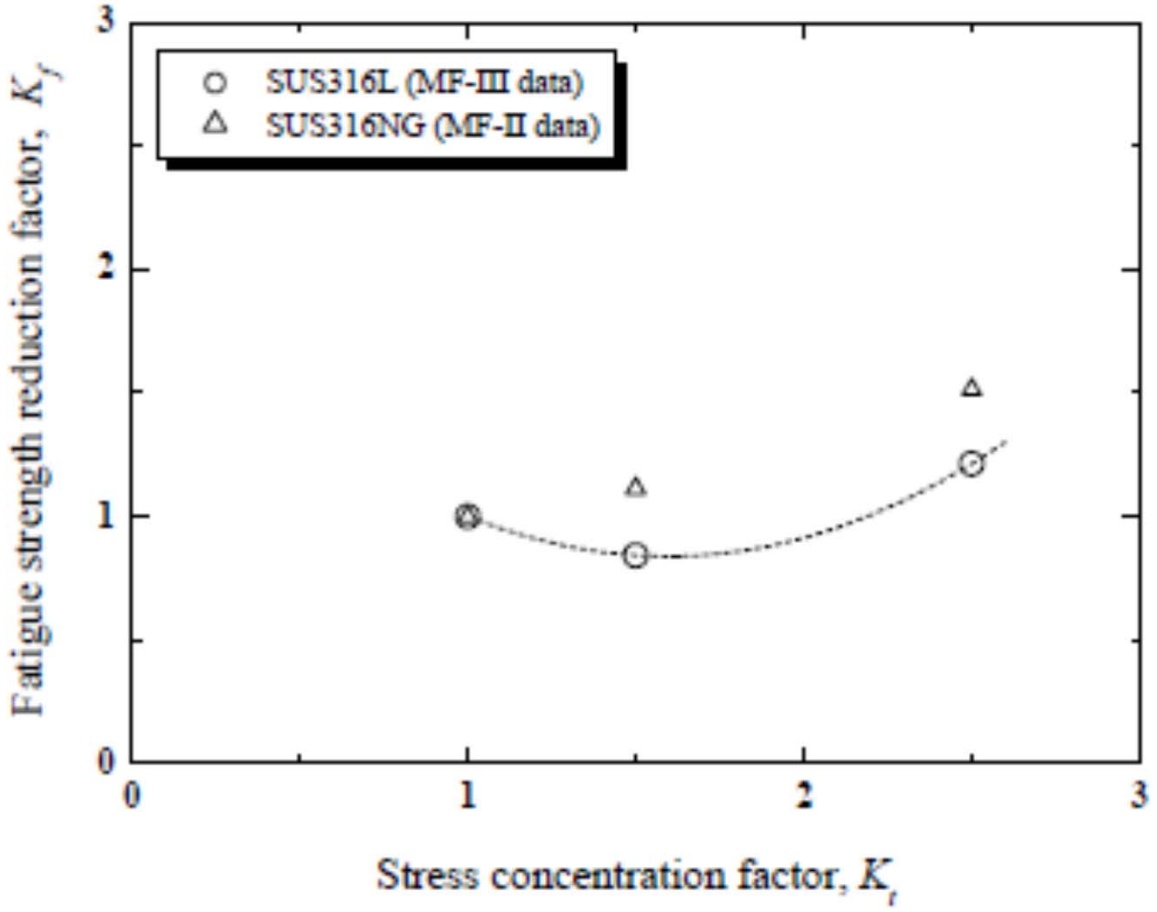
基礎データ　- 疲労試験結果 -



Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

基礎データ　- 疲労限度 -

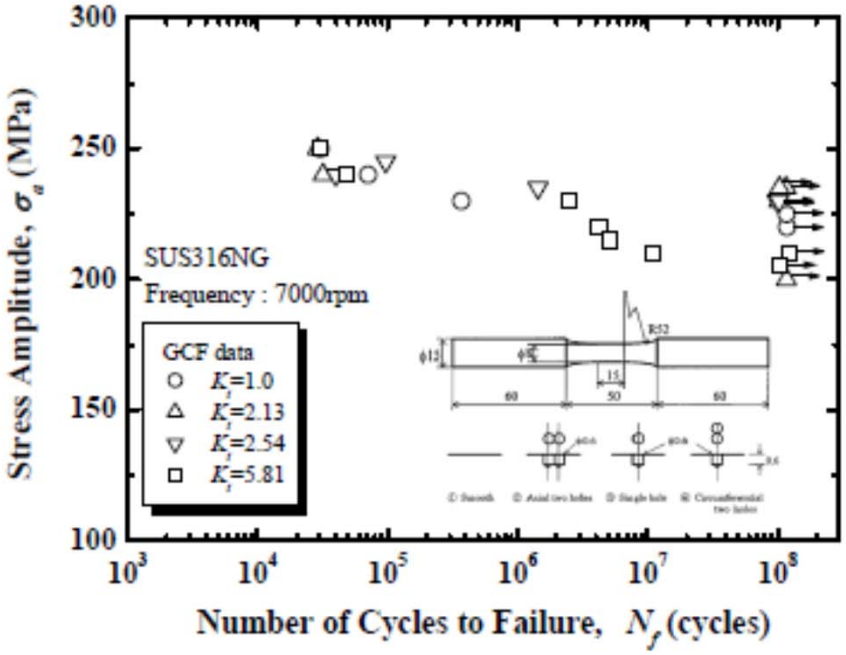


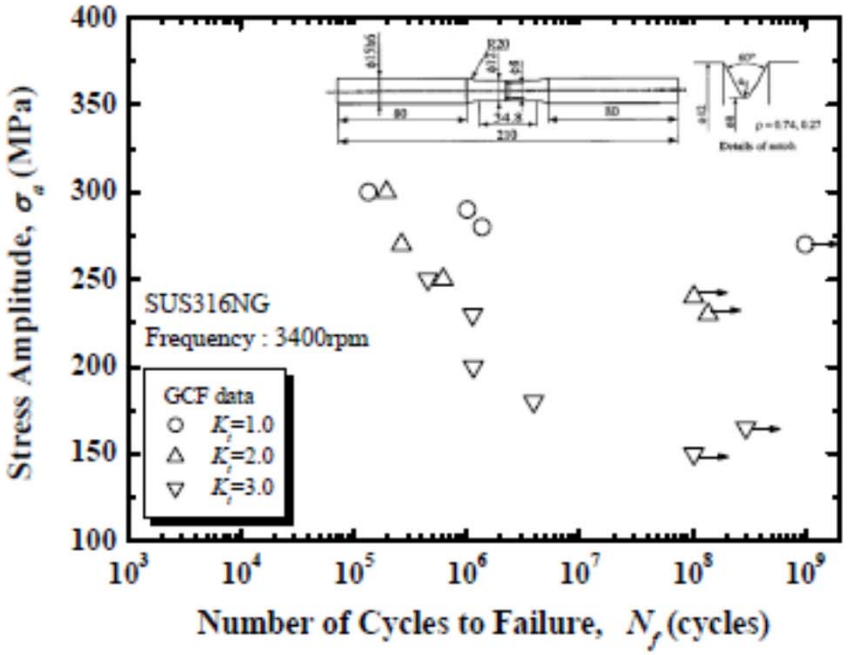
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

基礎データ　- 疲労試験結果 -

GCF、SUS316NG

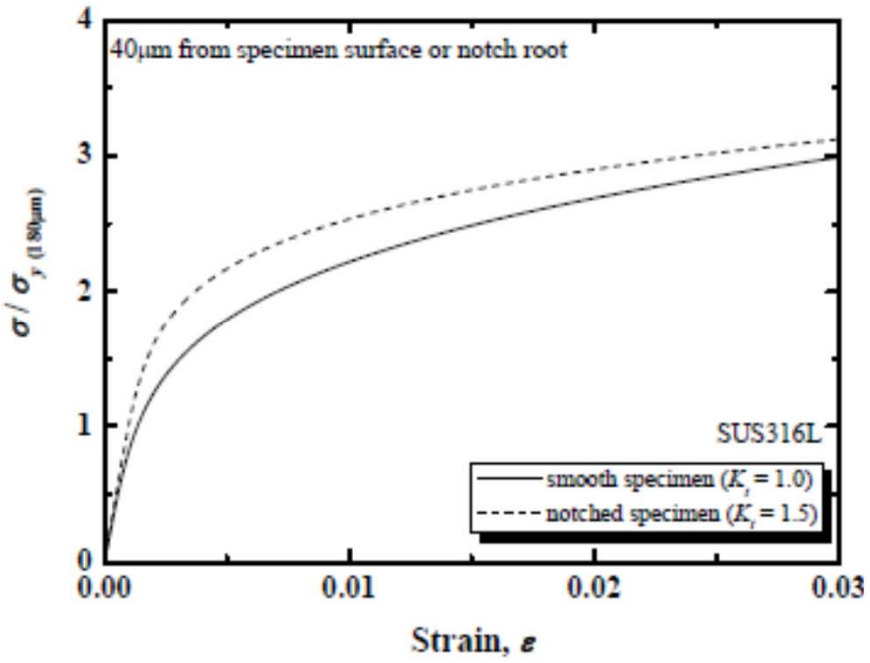


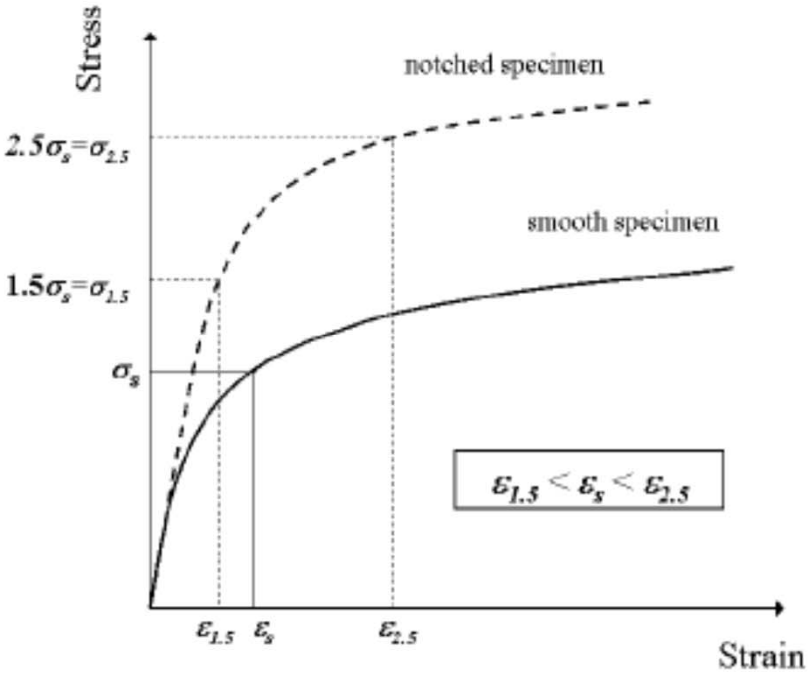


Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

基礎データ　- 疲労試験結果 -

GCF、SUS316NG





Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

基礎データ　- まとめ -

SUS316L に関する基礎データ取得を目的として、単調引張試験および繰返し負荷試験を実施した。また、平滑材丸棒試験片および環状切欠き試験片(K_t = 1.5 および2.5)を用いて、軸力荷重下における疲労強度データを取得した。

- MF-Ⅱ のときの結果と同様、切欠き材による切欠き強化の傾向は、SUS316L 材でも確認されたが、切欠き半径が小さくなり応力集中が大きくなると、平滑試験片より短寿命、すなわち切欠き弱化となることが確認された。
- 疲労強度特性は繰返し硬化後の応力-ひずみ関係に依存するため、切欠き強化・切欠き弱化のメカニズムの解明には、繰返し硬化後の試験片表面の応力-ひずみ関係を取得して検討すべきである。

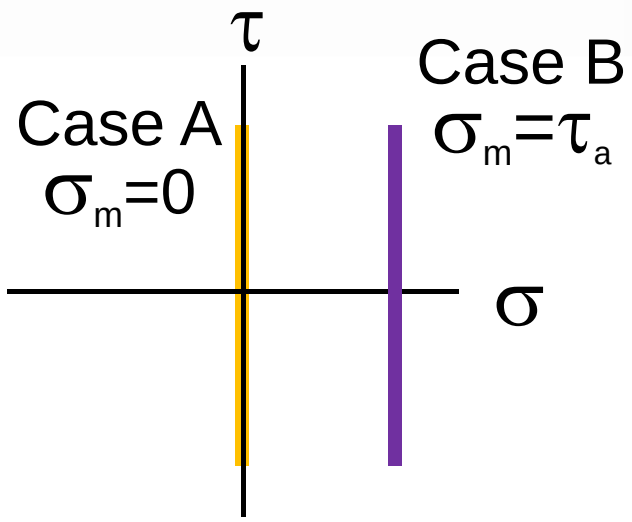
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

軸力、軸力＋捩り（1） - 試験条件 -

切欠き底半径応力集中係数

Specimen type	NA	NB	NC
Notch root radius (mm)	4.5	1.07	0.22
Tension	1.50	2.50	5.07
Torsion	1.17	1.55	2.54

SM: 平滑材
SM-M: 平滑材（中型試験片）
NA: K_t=1.5
NB: K_t=2.5
NC: K_t=5

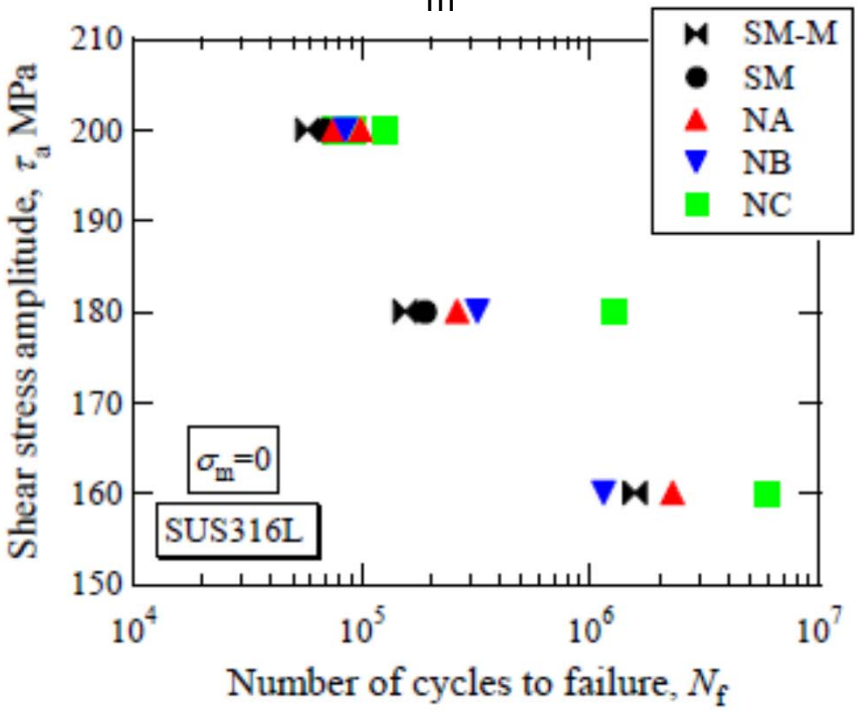


Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

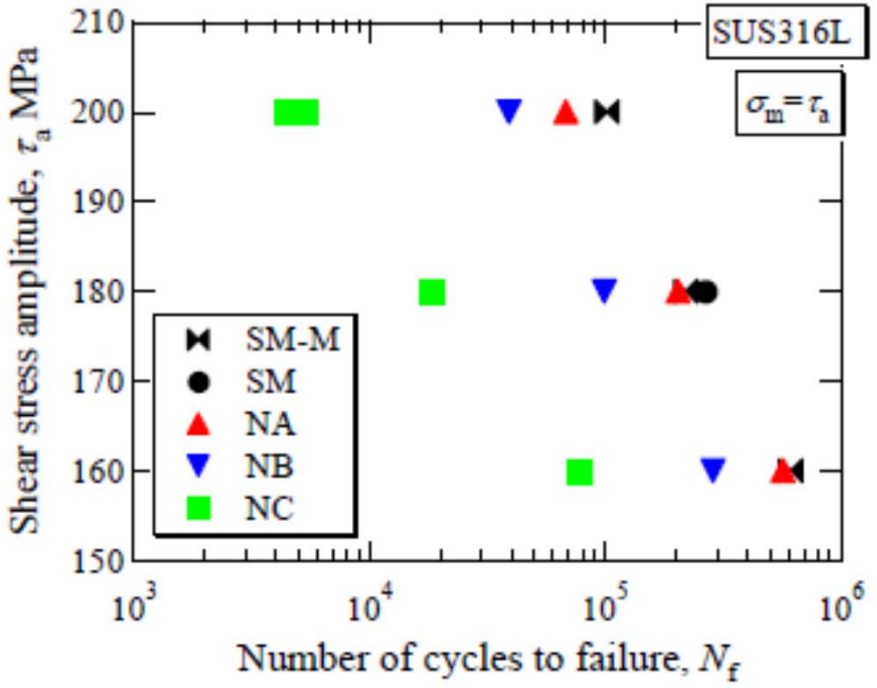
4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1) - SUS316 破損寿命特性 -

$\sigma_m=0$



$\sigma_m=\tau_a$



$\sigma_m=0$

K_tの増加に伴って寿命増

＜切欠き強化＞

$\sigma_m=\tau_a$

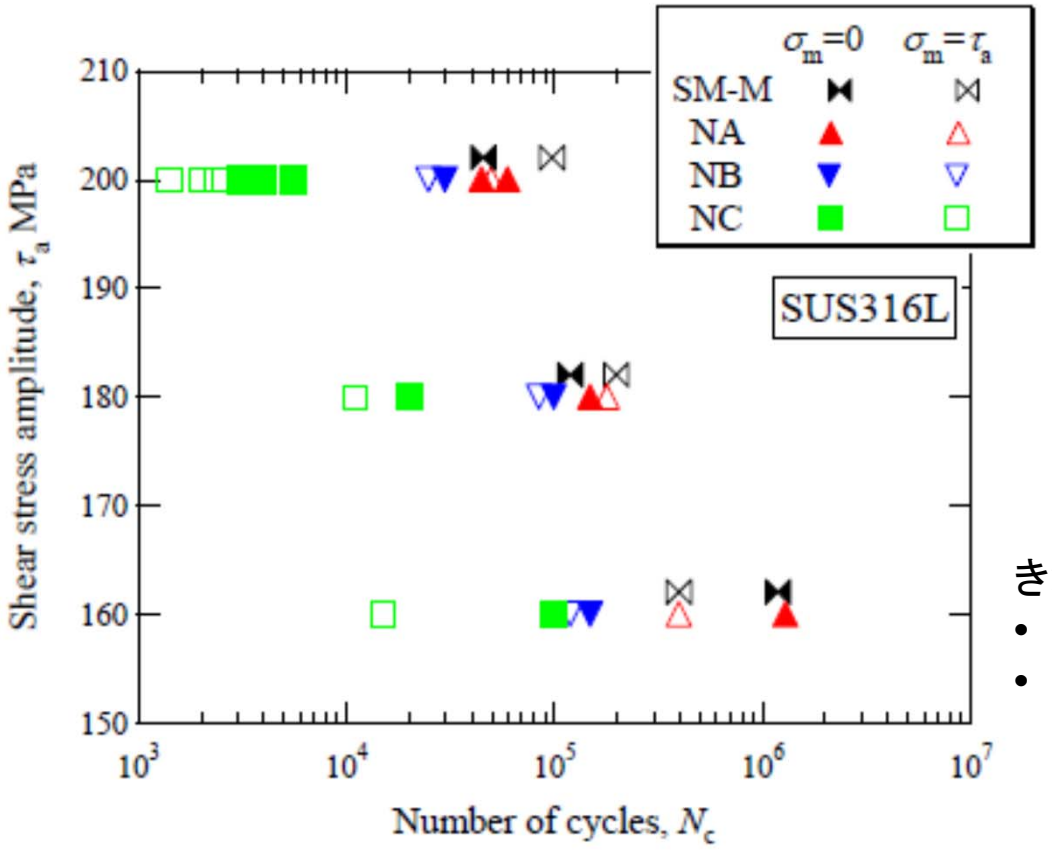
K_tの増加に伴って寿命減

$\sigma_m=0$の寿命よりも長寿命

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1) - SUS316L き裂発生寿命特性 -



き裂の評価
- 電位差法
- コンプライアンス法

σ_m=0およびσ_m=τ_aともに
き裂発生寿命は、K_tの増加に伴って、短くなる

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1) - SUS316L き裂写真 -

σ_m=0, τ_a=200MPa　　σ_m=τ_a =200MPa

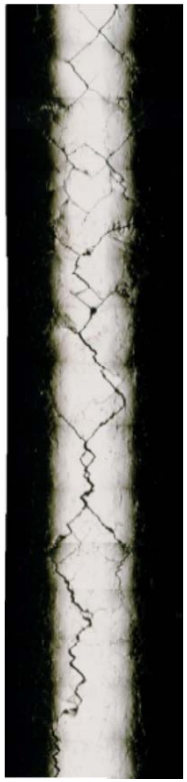
SM

NA

NB

NC

(a) SM-M specimen, N_f=5.84×10⁴



(a) SM-M specimen, N_f=1.02×10⁵

(a) NA specimen, N_f=7.63×10⁴

(a) NA speciemn N_f=6.8×10⁴

(b) NB specimen, N_f=8.54×10⁴

(b) NB speciemn N_f=3.9×10⁴

(c) NC specimen, N_f=1.26×10⁵

(c) NC specimen, N_f=5.07×10⁵

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1) - SUS316L まとめ -

(a)ケースA(繰返し捩り単独)の場合には、切欠き試験片の疲労寿命が平滑材より長くなり、かつ切欠きが鋭くなるほど疲労寿命が長くなる。＜切欠きによる寿命増＞

(b)全ひずみ範囲および塑性ひずみ幅に関して、同一応力振幅では切欠きが鋭くなるほど小さくなる。＜切欠きによる硬化＞

(c)ケースB(引張＋繰返し捩り)の方が、ケースAよりひずみが小さい。また、減少の程度は、同一試験片では応力が高いほど大きく、また同一応力では鈍い切欠きほど大きくなる。

(d)切欠きが鋭い方がき裂発生は早くなるが,進展が遅くなるため全寿命が長くなり,全寿命で見ると,切欠き強化を引き起こす。＜ケースAのファクトリールーフの形成＞

(e)同一応力振幅で、ケースAとケースBの寿命を比較した場合、平滑試験片では静的引張の重畳により寿命は長くなるが、これは塑性ひずみ幅が小さくなるためである。一方、切欠き試験片では寿命は短くなる。

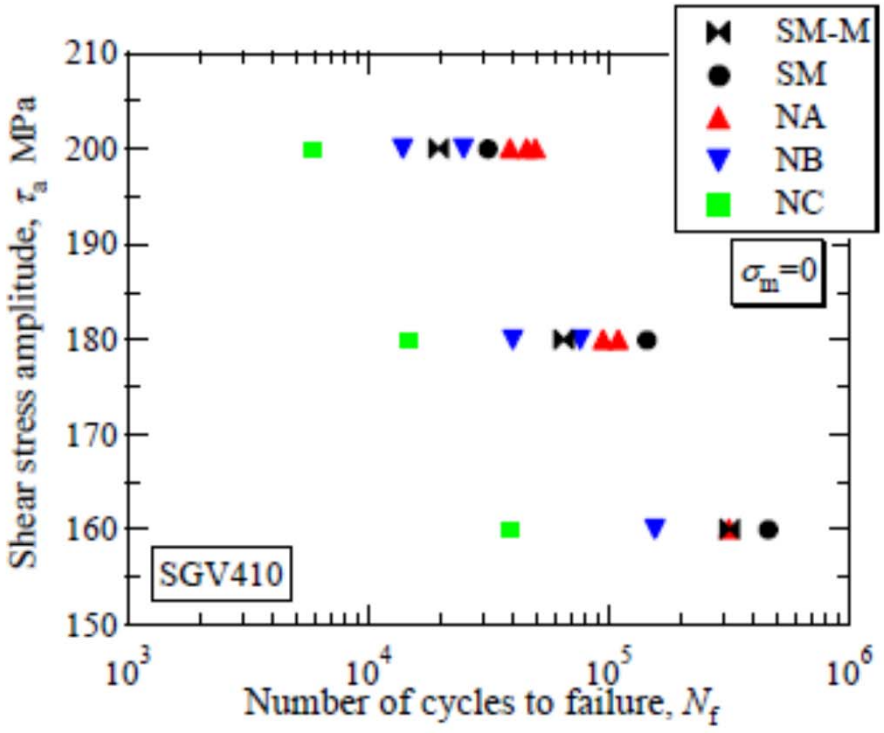
(f) ケースBの場合には、き裂の進展挙動はJ積分範囲によって予測可能である。ケースAの場合には、き裂進展とともに進展速度が低下するというき裂遅延が認められ、破面接触の影響が明確である。

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

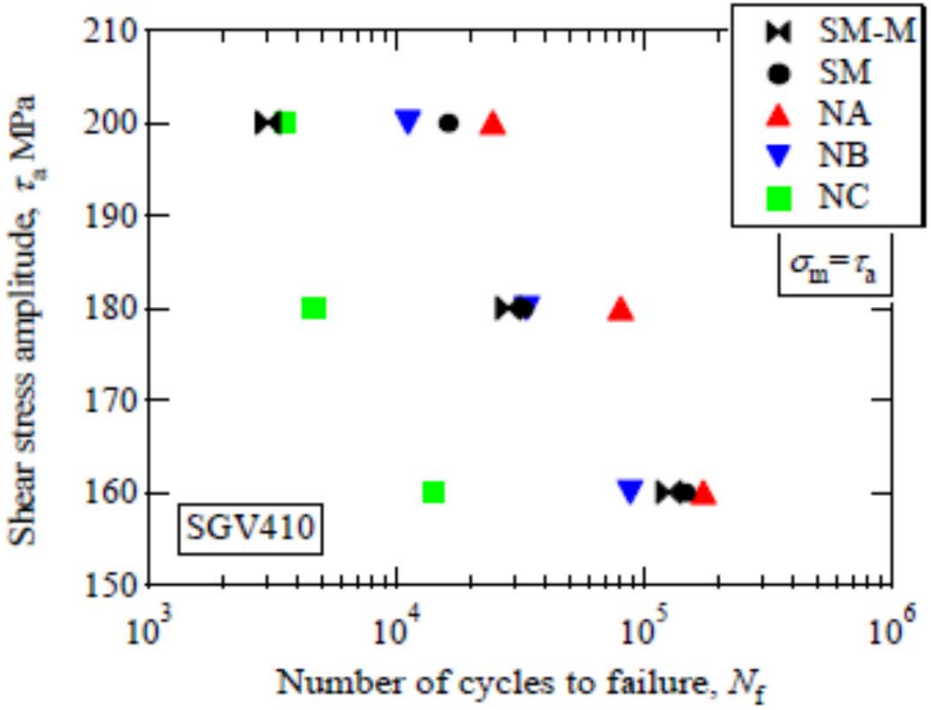
4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1) - SGV410L 破損寿命特性 -

$\sigma_m=0$



$\sigma_m=\tau_a$



$\sigma_m=0$

K_tの増加に伴って寿命減

＜切欠き強化なし＞

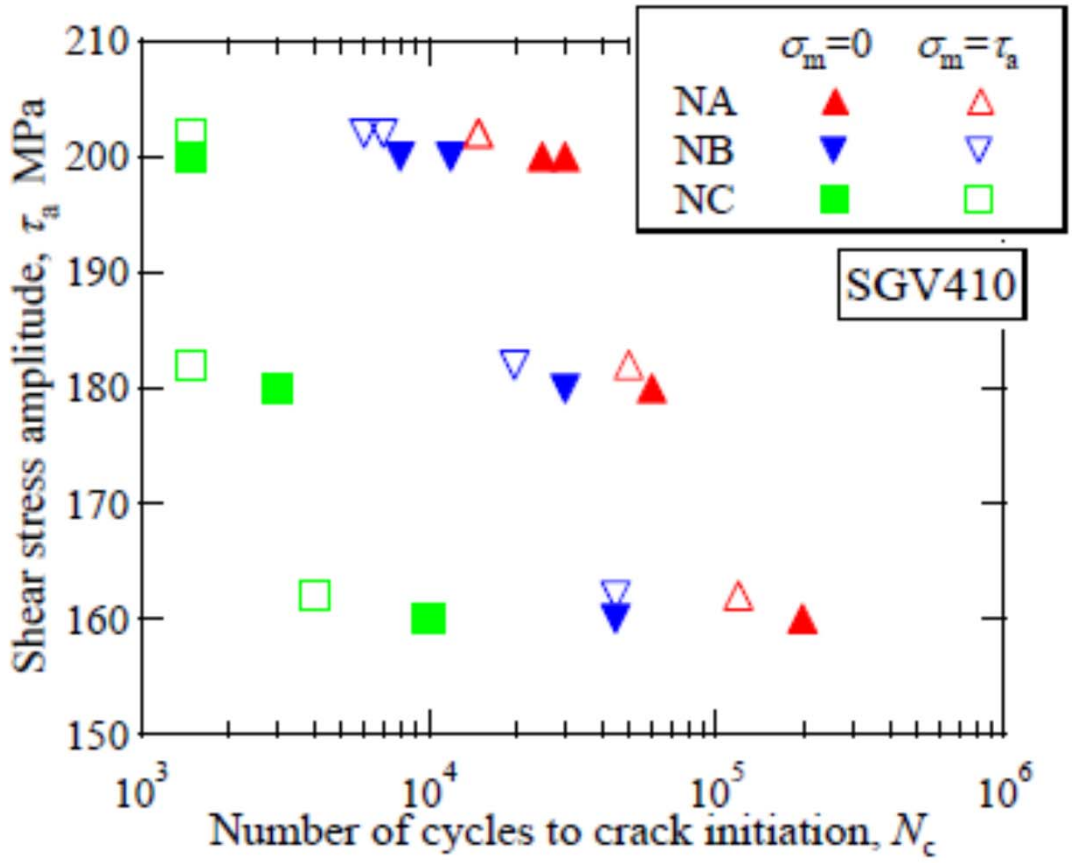
$\sigma_m=\tau_a$

$\sigma_m=0$の結果と同様

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り（1） - SGV410 き裂発生寿命特性 -



σ_m=0およびσ_m=τ_a結果ともに、
き裂発生寿命は、K_tの増加に伴って、短くなる

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

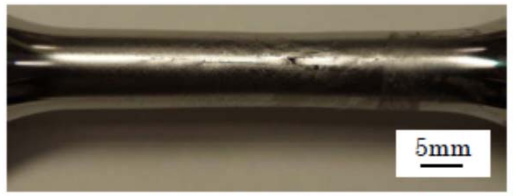
4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

軸力、軸力＋捩り(1)　- SGV410 き裂写真 -

σ_m=0, τ_a=200MPa　　σ_m=τ_a =200MPa

SM

(a) SGV410 SM specimen, τ_a=200MPa, σ_m=0MPa N_f=3.15x10⁴



(a) SGV410 SM specimen, τ_a=200MPa, σ_m=200MPa N_f=1.63x10⁴

NA

(b) SGV410 NA specimen, τ_a=200MPa, σ_m=0MPa, N_f=5.00x10⁴

(b) SGV410 NA specimen, τ_a=200MPa, σ_m=200MPa, N_f=2.48x10⁴

NB

(c) SGV410 NB specimen, τ_a=200MPa, σ_m=0MPa, N_f=2.51x10⁴

(c) SGV410 NB specimen, τ_a=200MPa, σ_m=200MPa, N_f=1.13x10⁴

NC

(d) SGV410 NC τ_a=200MPa, σ_m=0MPa, N_f=5.83x10⁵

(d) SGV410 NC specimen, τ_a=200MPa, σ_m=200MPa, N_f=3.56x10⁵

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

軸力、軸力＋捩り(1) - SGV410 まとめ -

(a) ケースA およびケースB の場合のいずれの応力振幅においても、平滑試験片の寿命が切欠き試験片より小さくなる場合がある。また、切欠き試験片に関してはいずれの応力レベルでも、切欠きが鋭くなるほど寿命が短い。また、ケースA とケースB の寿命を比較すると、いずれの場合も静的引張が重畳するケースB の方が、寿命は短い。

(b) 平滑試験片において、ケースA では、疲労初期では繰返しとともにひずみ幅が減少する繰返し硬化を示すのに対して、ケースB ではひずみが増大する繰返し軟化となる。

(c) き裂発生寿命は、同一応力振幅では、ケースA およびケースB の両応力振幅のいずれにおいても、切欠きが鋭い方が短い。また、ケースA の方がケースBよりき裂発生寿命の占める割合が小さい。＜ステンレス鋼と同様＞

(d) ケースA の場合においても、高応力レベル下では破面同士のこすれにより平坦な破面となり、低応力レベルでわずかにファクトリー・ルーフが認められるが、ステンレス鋼で見られた明瞭なファクトリー・ルーフは認められない。

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 試験内容 -

I. 繰返し応力ーひずみ関係(繰返し構成関係)を得るための多段振幅変動試験(ステップアップ試験)

II. 切欠材の変形・寿命特性を得るためのひずみ制御疲労試験

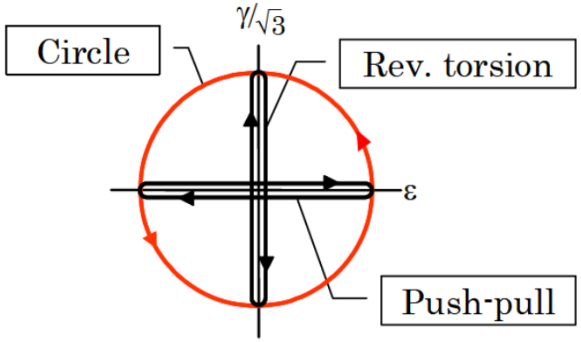
III. ひずみおよび荷重制御試験の寿命特性の違いを調べるための荷重制御疲労試験

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

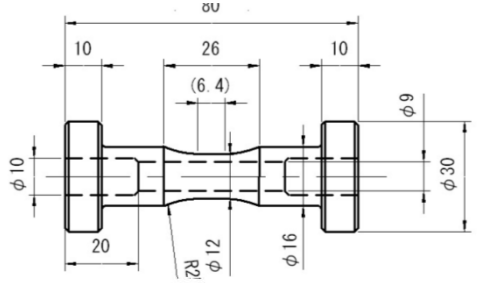
4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

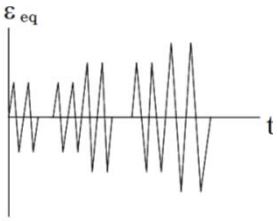
ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 試験片、試験条件 -

ひずみ経路

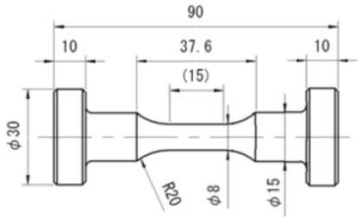


円筒試験片
（ステップアップ試験）



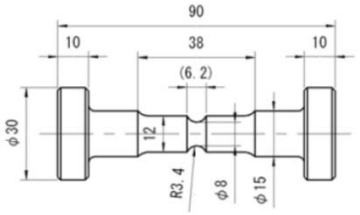


ひずみ波形

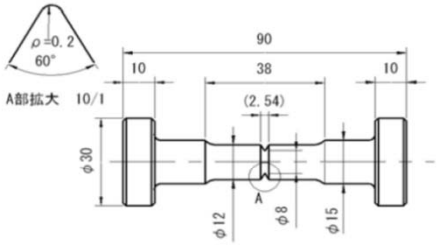


(a) Smooth specimen

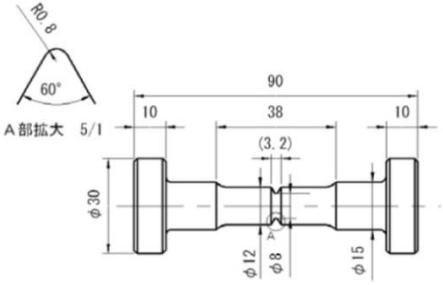
切欠き試験片
(K_t=1, 1.5, 4.2, 2.5, 6)



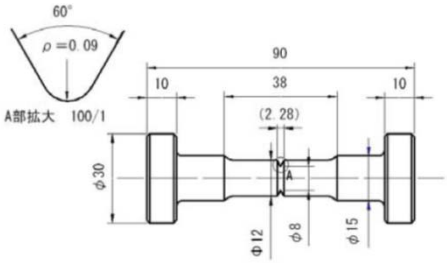
(b) Notched specimen (K_t=1.5)



(d) Notched specimen (K_t=4.2)



(c) Notched specimen (K_t=2.5)

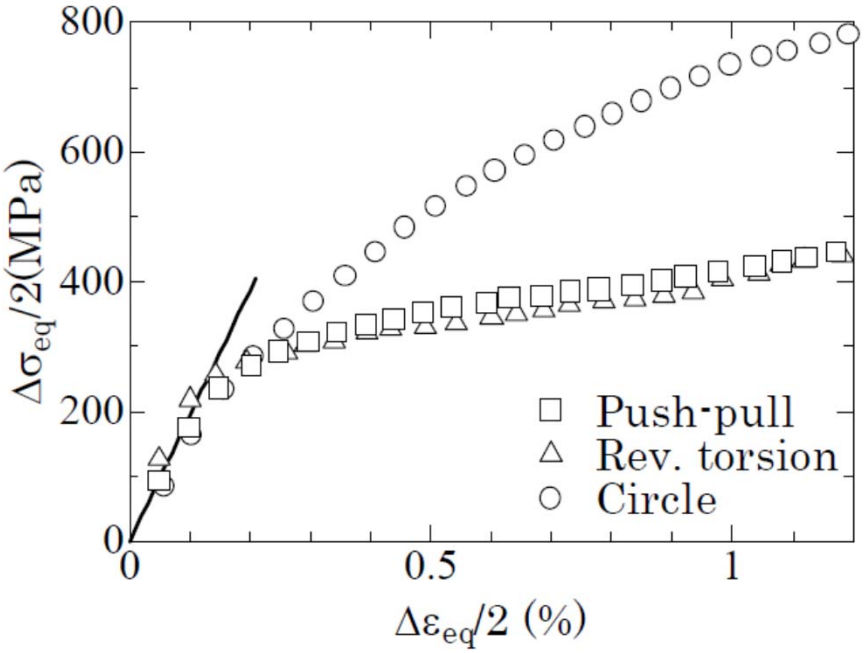


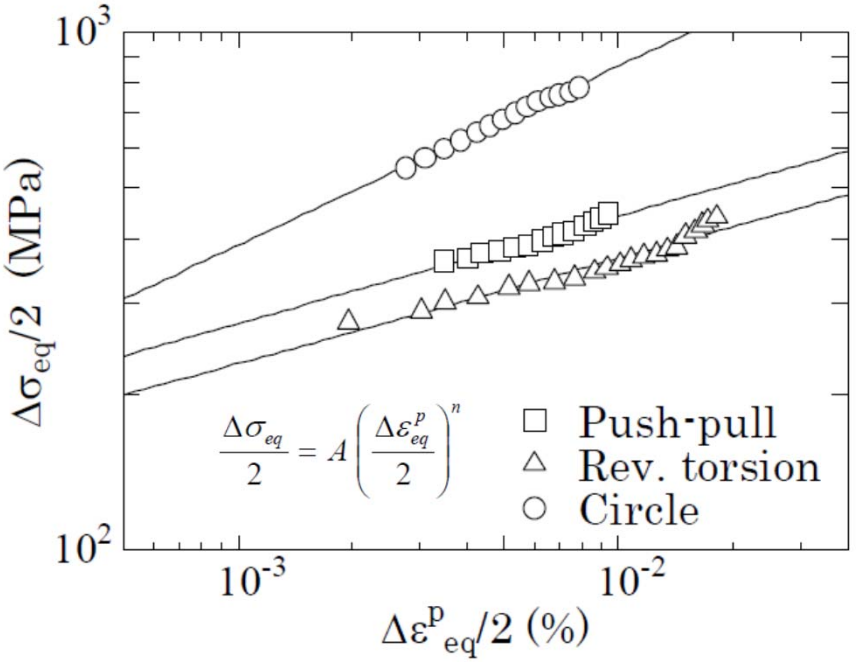
(e) Notched specimen (K_t=6.0)

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - ステップアップ試験 -

繰返し応力ひずみ関係





非比例負荷(円形負荷)による応力増加(追硬化)

Strain path	A (MPa)	n
Push-pull	950	0.17
Rev. torsion	870	0.19
Circle	5500	0.40

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 疲労試験 -

寿命データ表

Strain path	Stress concentration factor, K_t (K_s)	Stress ranges at 1/2 N_f		Number of cycles to failure N_f (cycles)
		$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sqrt{3}\Delta\tau$ (MPa)	
Push-pull	1.0	680	–	6,909
	1.5	800	–	2,237
	2.5	800	–	871
	4.2	810	–	571
	6.0	830	–	418
Circle	1.0	780	1050	2,082
	1.5	850	1030	2,248
	2.5	880	1080	475
	4.2	900	1140	212
	6.0	850	930	156
Rev. torsion	1.0	–	600 *	over 135,000
	1.5 (1.17)	–	720	54,809
	2.5 (1.55)	–	910	4,806
	4.2 (1.87)	–	890	3,094
	6.0 (1.96)	–	850	2,243

軸応力範囲の増加

せん断応力範囲の増加

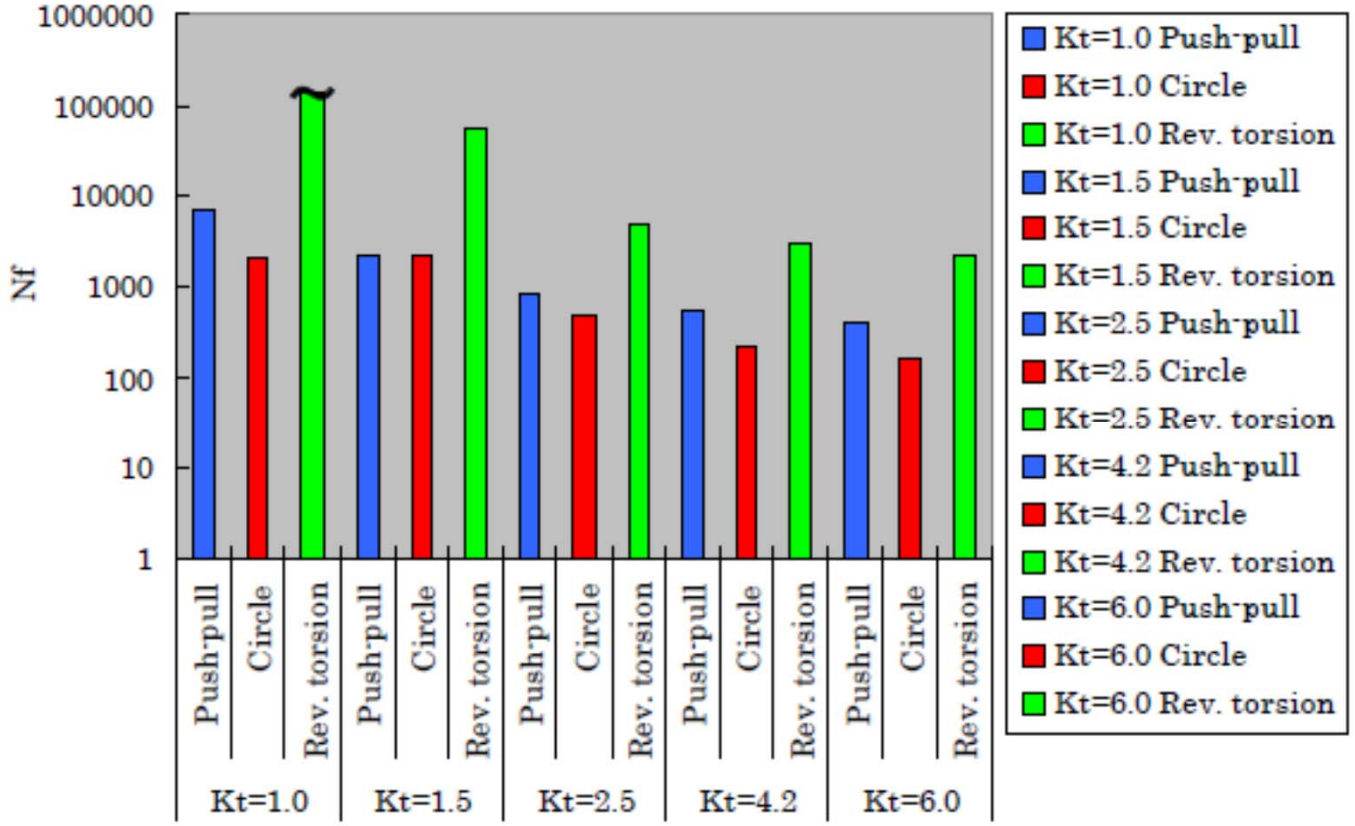
非比例負荷による著しい応力増加

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 疲労試験 -

破損寿命の比較

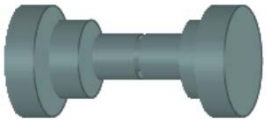


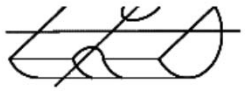
- 非比例負荷による寿命低下(応力増加と関連)
- K_tの増加に伴い寿命低下

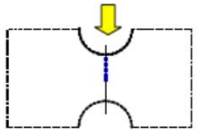
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 疲労試験 -

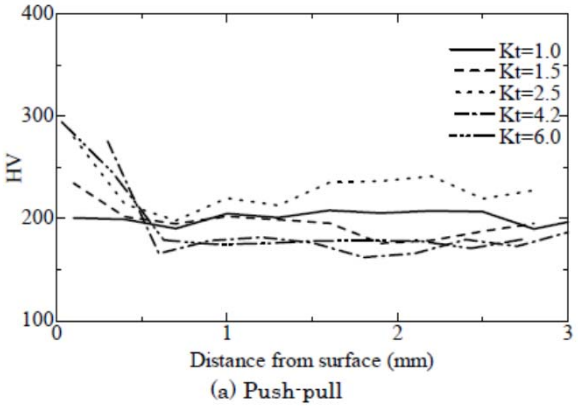




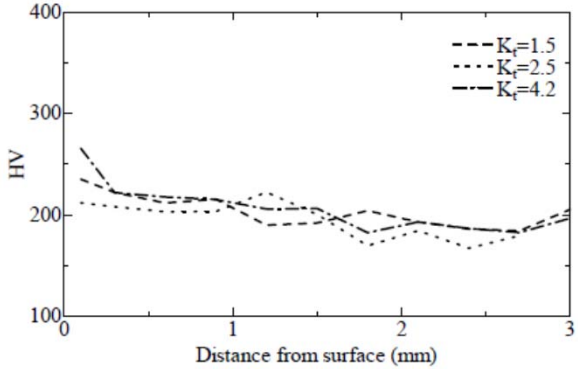


硬さ測定

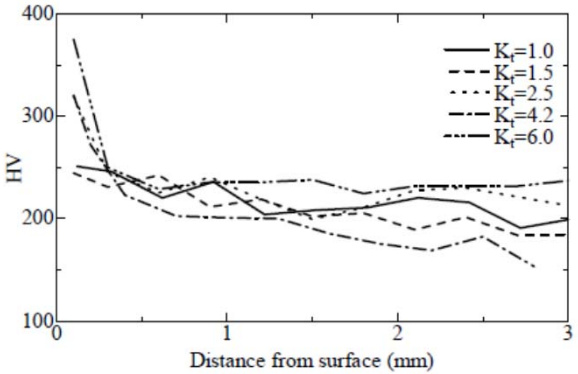
マイクロビッカース硬度



(a) Push-pull



(c) Rev. torsion



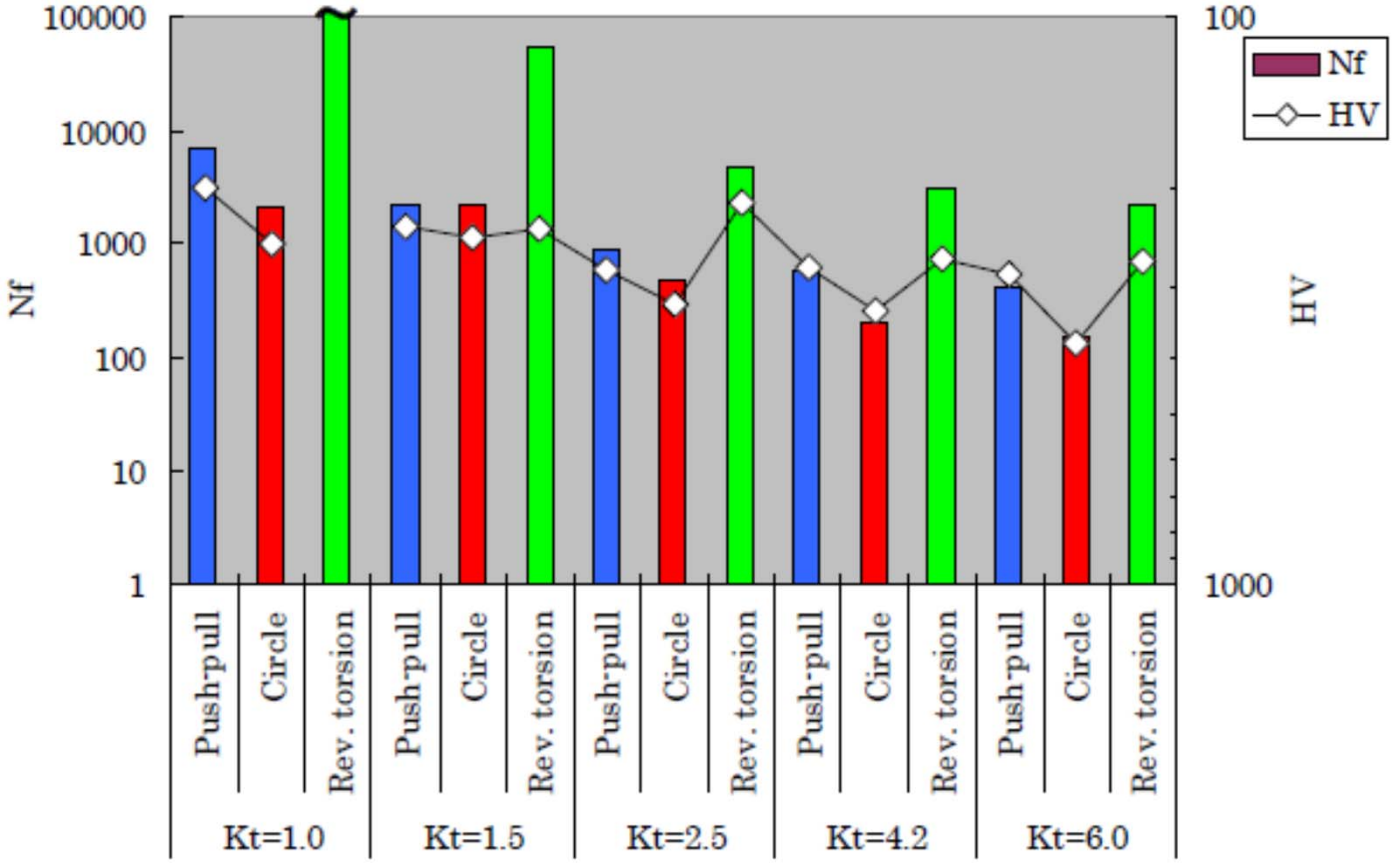
(b) Circle

- 非比例負荷による切欠き底の硬さの増加
- K_tの増加に伴い試験片表面での硬さの増加が顕著（捩りはなし）

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 疲労試験 -

試験片表面近傍の硬さと破損寿命との関係



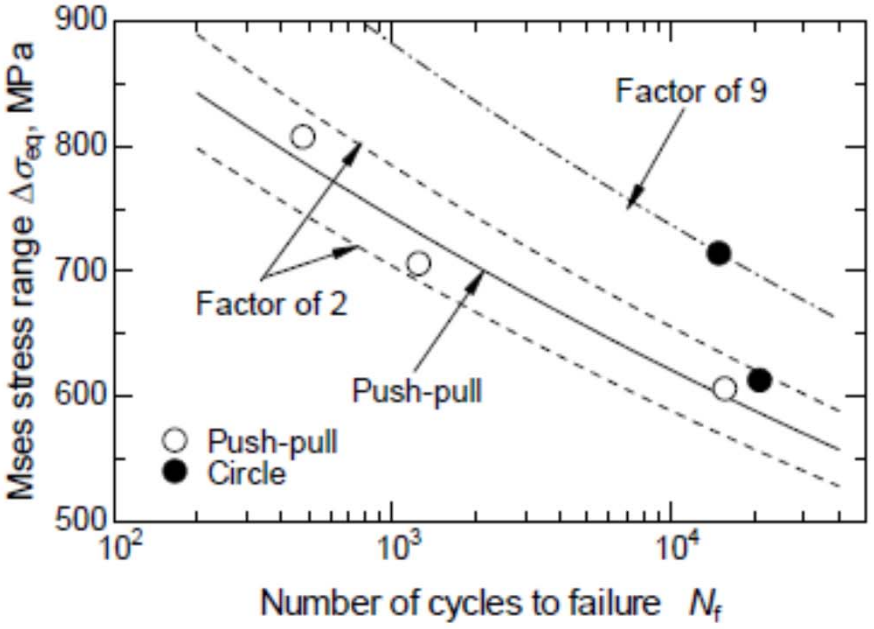
- 硬さの増加と破損寿命の低下の傾向が一致

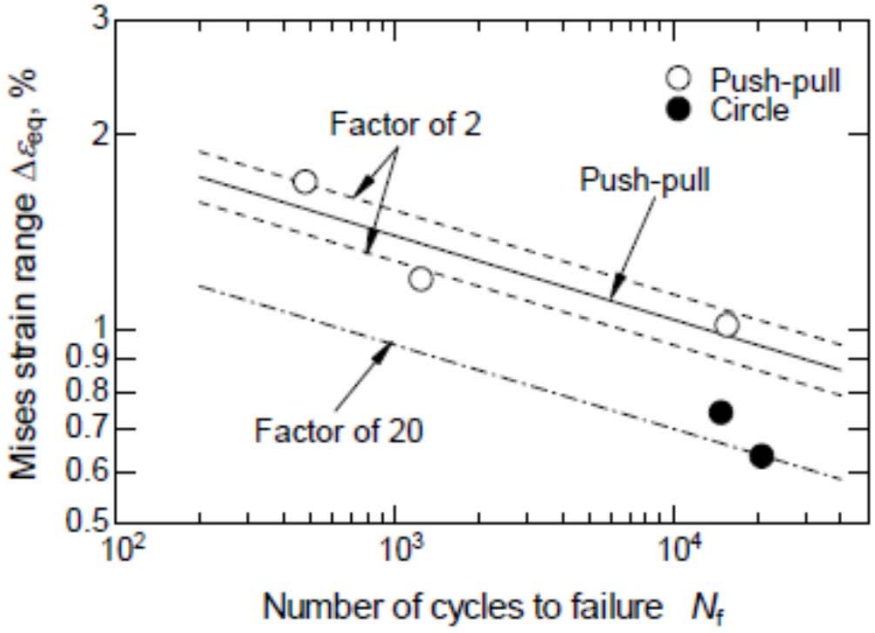
Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

4 応力集中部を有するステンレス鋼の疲労寿命特性

ひずみ制御試験　SUS316L (2) - 応力制御試験(比較) -

試験片表面近傍の硬さと破損寿命との関係





- 非比例負荷による破損寿命の増加
- 追硬化によるひずみ範囲の減少

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

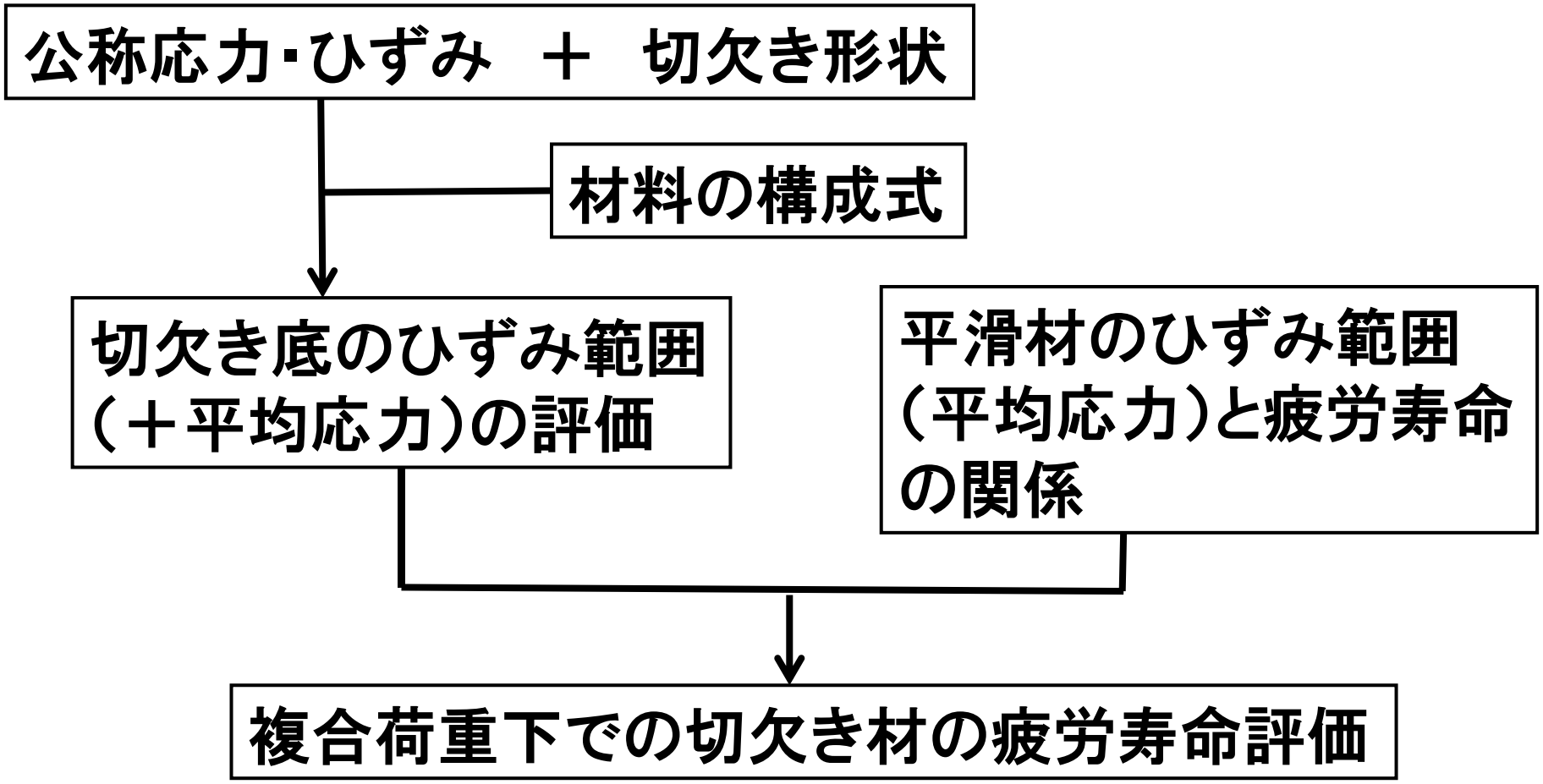
ひずみ制御試験　SUS316L (2) - まとめ -

1. 多軸負荷における繰返し応力ーひずみ関係は、引張・圧縮試験と繰返し純ねじり試験で大差はなかったが、円形負荷では非比例負荷による著しい追硬化が見られた。
2. ミーゼス基準の相当全ひずみ範囲で平滑材(K_t=1.0)の寿命を評価すると、引張・圧縮試験に比べて円形負荷の寿命は短く、逆に繰返し純ねじりでは寿命は長くなった。
3. 切欠試験片については、Rev. torsion 試験の寿命がPush-pull 試験に比べて長寿命となる傾向は、各K_tの試験結果でも同様に見られた。
4. 切欠底での硬さは、同じK_tで比較するとPush-pull に比べてCircle が高くなり、非比例負荷による追硬化が見られた。Rev. torsion では試験片の硬化は、K_tの影響をほとんど受けないものと考えられる。
5. 硬化特性はK_tおよび負荷経路の両者に依存し、寿命特性とよい相関があることがわかった。
6. 応力制御試験では、非比例負荷の寿命が比例負荷の寿命に比べて増加した。これは、非比例負荷による追硬化によって非比例負荷での非弾性ひずみ範囲が減少したことに起因する。

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

- 全体まとめ -

切欠き材のき裂発生寿命の評価プロセス



Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.

MF-Ⅲ小委員会成果の公開文献

小委員会成果の主要な国内文献

(1) 遠藤 亮雄, 金田 忍, 小川 武史:“S031011 ステンレス鋼SUS316Lの切欠き付き平板のねじり疲労き裂進展挙動”, 日本機械学会 , 年次大会, pp.″S031011-1″-″S031011 -5″, 2011-09-11

(2) 大川慧, 大川功:“634環状切欠きを有する低炭素鋼丸棒のねじり疲労挙動”, 日本材料学会, 学術講演会講演論文集 59, pp.443-444, 2010-05-21

Copyright © 2017 The Japan Welding Engineering Society, All Right Reserved.