

塑性履歴を受けた鋼切欠き部および 2, 3の溶接継手の疲労強度

OVERLOAD EFFECTS ON THE FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL COMPONENTS

後藤芳顯* 柴山昌和** 長谷川彰夫*** 松浦聖****

By Yoshiaki GOTO, Masakazu SHIBAYAMA, Akio HASEGAWA and Sei MATSUURA

Owing to earthquakes and overloaded vehicles, it is possible that the stress around stress concentration points in steel structures temporarily exceeds the elastic limit of the material. Such a load history develops some residual stress and deformation around these points and may have an effect on the fatigue life of the structures.

This paper experimentally examined the overload effect concerning several kinds of fundamental structural components with noiches or welds.

1. まえがき

鋼構造物では、地震荷重や過載移動荷重が作用すると、応力集中部では、一時的に弾性限を越えるような応力が発生する場合がある。このような塑性履歴によって生ずる応力集中部近傍の残留応力、残留変形や鋼材の劣化は、その後の弾性範囲内での繰り返し荷重下の構造物の疲労特性に影響を与える可能性がある。

しかしながら、この問題に関しては、き裂開閉挙動を基礎とした遅延モデルによる、小規模降伏条件の成立する場合の、き裂進展の遅延の研究¹⁾、試験片表面の残留応力の測定値、および下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の変化による、き裂進展速度の研究²⁾、ならびに、応力拡大係数と、き裂進展の遅延との関係より、過大荷重の影響を定量的に求める方法の研究³⁾など、き裂伝ば速度に及ぼす荷重履歴の影響⁴⁾はかなり研究されているが、き裂発生寿命を含めた全体の疲労寿命が受ける影響および実際の鋼構造要素に対する影響に関しては、ほとんど明らかにされていない。

ここでは、切欠き材ならびに土木構造物に用いられる基本的な鋼構造要素である2, 3の溶接継手材を対象として、塑性履歴を持たない試験片 (Virgin材) と、塑性履歴をあらかじめ与えた試験片 (塑性履歴材) について疲労試験を行い、過大荷重による塑性履歴が、実際の鋼構造要素のき裂発生寿命 N_c 、き裂進展寿命 N_p などの疲労特性に与える影響を実験的に検討した。

* 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 名古屋工業大学大学院修士課程 土木工学専攻 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

*** 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷)

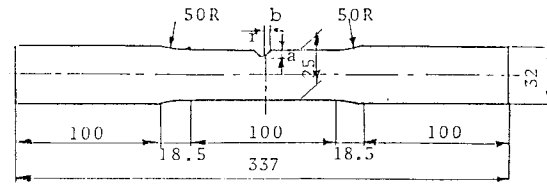
**** 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

2. 試験方法

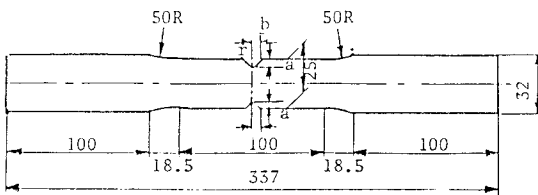
本研究に用いた鋼材はSS41材で、ミルシートによる機械的性質および化学成分を表-1に示す。実験に用いた鋼構造要素は、片側切欠き材（Aシリーズ）、両側切欠き材（Bシリーズ）、横突合せ溶接継手材（Cシリーズ）、横リブ十字隅肉溶接継手材（Dシリーズ）、および隅肉溶接継手材（Eシリーズ）で各シリーズの試験片の形状と寸法を図-1に示す。試験片の板取りは、試験片の長辺が鋼板の圧延方向と一致するように採取し試験片表面は黒皮状態のままとした。溶接部はCシリーズを除き非仕上げとし、Cシリーズでは余盛を残したシリーズ（C-

表-1 使用鋼材の機械的性質と化学成分

機 械 的 性 質				化 学 成 分 (%)				
板厚 (mm)	降伏点 (kgf/mm ²)	引張り強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
6	29	43	31	10	19	66	19	12
9	29	43	31	10	19	66	19	12
12	31	43	30	13	20	71	14	5

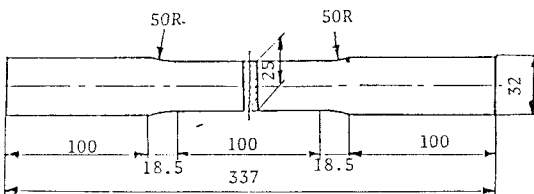


a. 片側切欠き材（Aシリーズ）

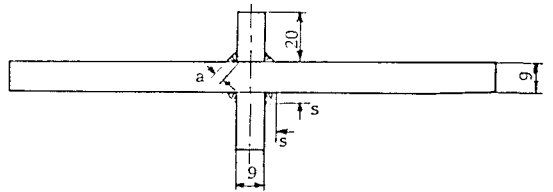
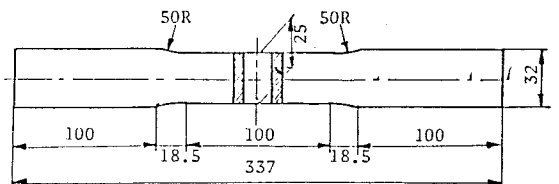
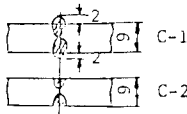


b. 両側切欠き材（Bシリーズ）

	A-1 B-1	B-2	B-3	B-4
板厚(mm)	6.0	6.0	6.0	9.0
a(mm)	5.0	5.0	5.0	3.0
2b(mm)	4.8	10.4	24.4	6.4
r(mm)	0.5	0.5	0.5	0.5

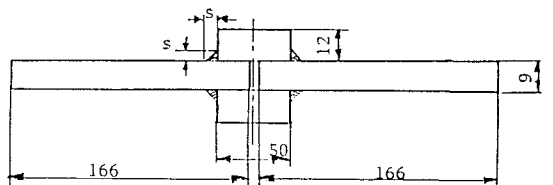
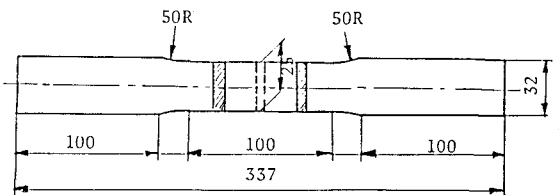


c. 横突合せ溶接継手材（Cシリーズ）



	D-1	D-2
脚長 s(mm)	6.5	9.0
のど厚 a(mm)	4.5	6.5

d. 横リブ十字隅肉溶接継手材（Dシリーズ）



	E-1	E-2
脚長 s(mm)	6.5	9.0

e. 隅肉溶接継手材（Eシリーズ）

図-1 試験片の形状と寸法（単位mm）

1) と、余盛を除去したシリーズ (C-2) について試験を行った。切欠き材の切欠き部は、機械加工により $1/10\text{ mm}$ の精度を確保した。また、今回考慮した塑性履歴は一種類のみで、一回の負荷・除荷過程によるものである。すなわち、応力集中部に定量的な塑性履歴を与えることが困難であるため、平滑部を対象に 2% ひずみ点まで引張り除荷したものを用いた。これは、使用鋼材のひずみ硬化開始点前後にほぼ相当するひずみである。

疲労試験には最大荷重 $\pm 12.5\text{ ton}$ の電気油圧式動的試験機を用い、載荷波形は、振動数 5 Hz のサイン波で、引張り片振とした。このときの応力設定としては鋼材の降伏応力 σ_y と引張り強さ σ_b を用いて、最大応力は σ_y , $\sigma_b/2$, $(\sigma_y + \sigma_b/2)/2$ の 3 種類とした。これは、さほど静的強度の高くない材料においては疲労限度が $\sigma_b/2$ 程度であること⁵⁾ と、現在鋼構造物の設計には許容応力度法が採用されており、部材応力が弾性範囲内におさえられていることによる。なお、最小応力は $2\text{ kgf/mm}^2 \sim 6\text{ kgf/mm}^2$ とし、応力としては、最小断面の平均応力として与えた。また、き裂進展状況を把握するために、切欠き材では図-2 に示すように切欠き部表面に 0.2 mm 間隔のクラックゲージを貼付し、 0.2 mm ごとのき裂進展に対する、繰返し回数を記録し、横リブ十字隅肉溶接継手材に対しては、ピーチマーク試験を実施した。

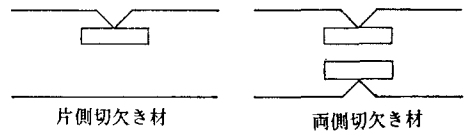


図-2 クラックゲージの貼付状況

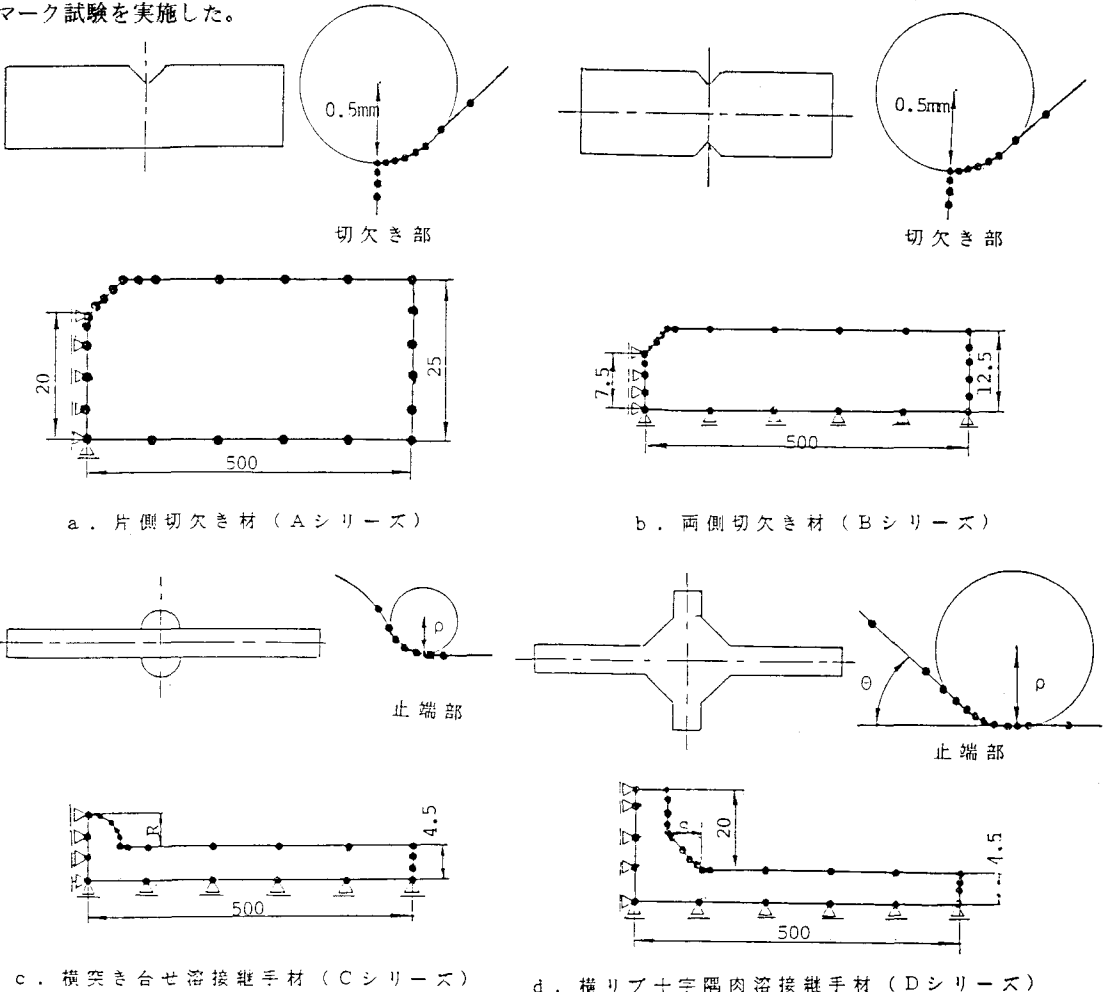


図-3 解析モデル

3. 初期き裂発生部の応力解析

応力分布および応力集中係数の計算には、少ない自由度で通常の有限要素法より精度の良い計算が可能となることから、境界要素法を適用した。この手法については文献6)、7)などに述べられているので、ここでは解析モデルを示すにとどめる。解析モデルとしては図-3に示すように、構造物の対称性を考慮し、Aシリーズでは1/2の部分、B、C、Dシリーズでは1/4の部分とした。なお、境界要素には線形要素を用い、表面力の不連続性は2重節点法⁹⁾により考慮した。節点分割は数種類の分割数で計算し、収束性などを考慮し、その中で最適と思われる図-3のような節点分割を用いた。

4. 試験結果の整理方法

疲労試験結果としては、疲労寿命と応力範囲を両対数目盛上に図示した。このとき、破断した試験片の疲労寿命の対数値のばらつきが、正規分布に従うものと仮定し、最小二乗法による50%破壊確率に相当するS-Nf線も図中に記入した。なお、今回の試験では、疲労寿命の上限を200万回とし、200万回で破断しなかった鋼材については、矢印をつけて表した。

5. 試験結果と考察

5-1 切欠き材

片側切欠き材、および両側切欠き材の疲労試験結果を図-4、6、7に、また、き裂進展状況を図-5、8に示す。図-4、6、7より、いずれの切欠き材も今回の塑性履歴により疲労寿命が向上する傾向にあり特に、両側切欠き材では、塑性履歴材の疲労寿命の向上が顕著である。一方0.2mmのき裂発生後のき裂進展寿命は図-5、8からわかるように、いずれも塑性履歴材とVirgin材との間で明確な差はなく、これらの疲労寿命の違いは0.2mmのき裂発生寿命の差によるものといえる。

このような塑性履歴材の疲労寿命向上の原因は次のように考えられる。まず、過大荷重が負荷された際に図-9に示す切欠き部の応力集中により、切欠き底では、中央部より大きな塑性変形が生ずる。したがって除荷後は、切欠き底近傍に圧縮、その他の部分ではこれにつり合う引張り応力が残留することになり、この圧縮残留応力により、疲労き裂発生寿命が向上するものと考えられる。しかしながら0.2mmのき裂発生後のき裂進展に対しては、塑性履歴の影響は小さいことから、今回の試験片では、圧縮残留応力の発生範囲は、切欠き底のごく近傍であるといえる。

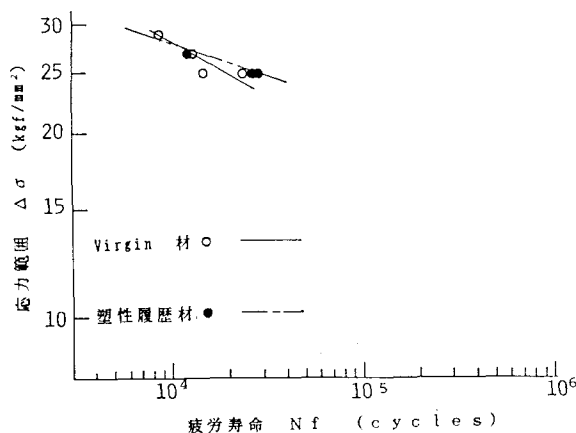


図-4 片側切欠き材の疲労試験結果
(A-シリーズ)

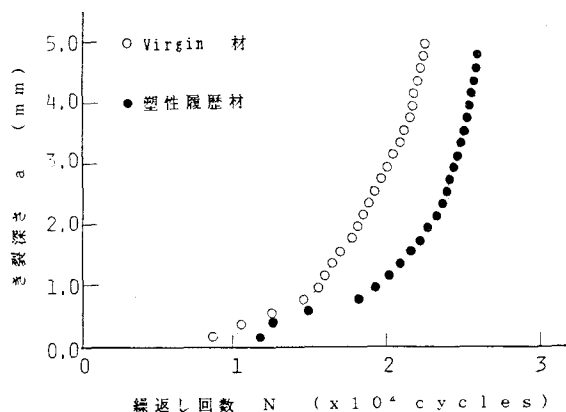


図-5 片側切欠き材のき裂進展曲線
(A-シリーズ $\Delta\sigma=25\text{kgf/mm}^2$)

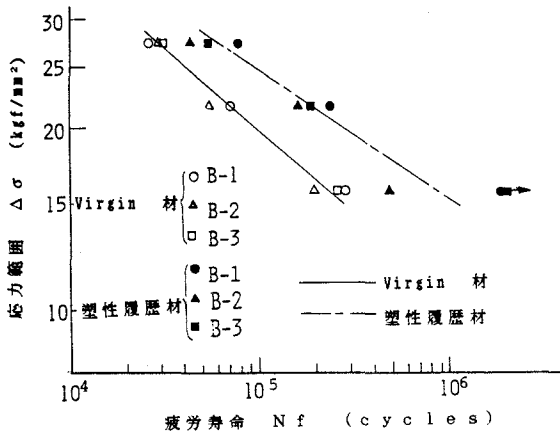


図-6 両側切欠き材の疲労試験結果
(B-1～B-3シリーズ)

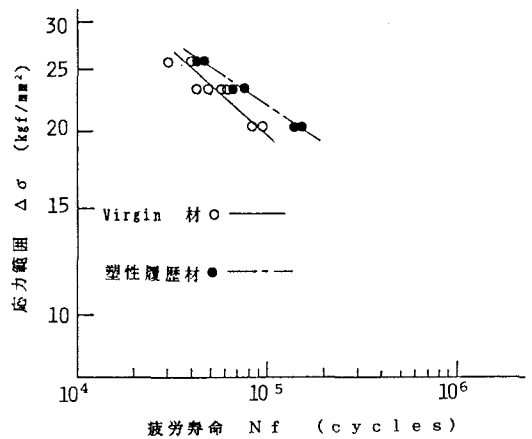


図-7 両側切欠き材の疲労試験結果
(B-4シリーズ)

片側切欠き材と両側切欠き材とを比較すると、塑性履歴による前者の疲労寿命の向上は、後者ほど大きくない。図-9のように片側切欠き材の切欠き底の応力集中係数は両側切欠き材の約1.6倍になっており、前者ではより大きな塑性変形を受けるので、圧縮残留応力の値ならびに発生範囲は後者に比べ大きくなると考えられ、疲労寿命もより向上するはずである。しかしながら、逆の結果となったのは文献9)に示すようにある限度以上の大きな塑性変形であるため、材料の劣化、あるいは塑性変形により断面積が減少するので、疲労寿命が向上しなかったものと考えられる。なお、片側切欠き材の疲労寿命が塑性履歴材、Virgin材とも両側切欠き材より小さいが、これは上に述べたように、片側切欠き材の応力集中係数が大きいことに起因している。

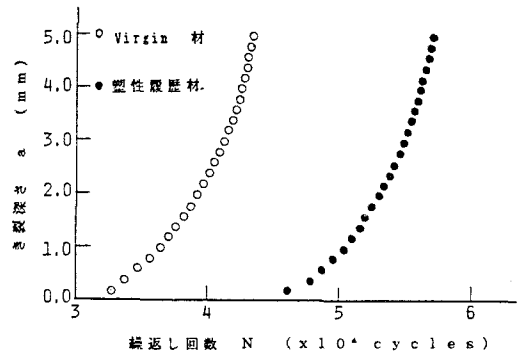
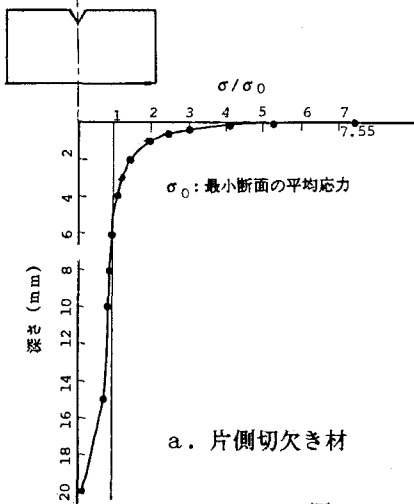
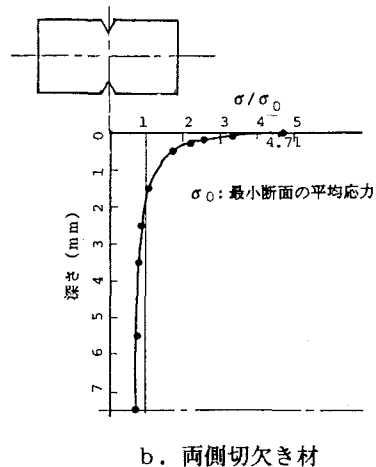


図-8 両側切欠き材のき裂進展曲線
(B-4シリーズ $\Delta\sigma=23.52\text{kgf/mm}^2$)



a. 片側切欠き材



b. 両側切欠き材

図-9 切欠き材の応力分布

5-2 溶接材

横突き合せ溶接継手材では余盛を残したシリーズ（C-1）と余盛を除去したシリーズ（C-2）の2種類について疲労試験を行った。余盛を残したC-1シリーズについては、図-10から塑性履歴材とVirgin材の間に明確な疲労寿命の差は見られないが、少なくとも塑性履歴材を受けたことにより、疲労寿命が低下する傾向はないといえる。

上記の試験結果を考察するために、余盛断面を半径Rの半円とモデル化し、Rならびに、止端半径 ρ を実際の範囲で変化させて計算した応力集中係数の値を表-2に示す。これによると、応力集中係数の値は切欠き材に比べて全般的に小さく、また止端半径の値により大きく変化している。本試験においても、塑性履歴材には、先に述べた切欠き材と同様の発生機構

で、圧縮残留応力が発生すると考えられるが、応力集中係数の値が切欠き材より小さいことから残留応力値、ならびに発生

範囲とも減少するといえる。このことと、止端半径ならびに溶接残留応力が試験片によりばらつくことを考慮すると、止端半径および溶接残留応力のばらつきに比べ塑性履歴の影響が小さく、塑性履歴材とVirgin材との間に明確な疲労寿命の差が現れなかったものと考えられる。

一方余盛を除去したC-2シリーズでは最大応力振幅下でも、200万回で疲労破壊しなかったため、他の応力振幅下での疲労試験を打ち切った。

横リブ十字隅肉溶接継手材では、のど厚・脚長の異なる2種類の試験片（D-1、D-2シリーズ）について疲労試験を行った。このとき、のど厚・脚長の大きいD-2シリーズでは、ピーチマーク試験を実施し、き裂進展状況を観察した。のど厚・脚長の小さいD-1シリーズでは、図-11の疲労試験結果からわか

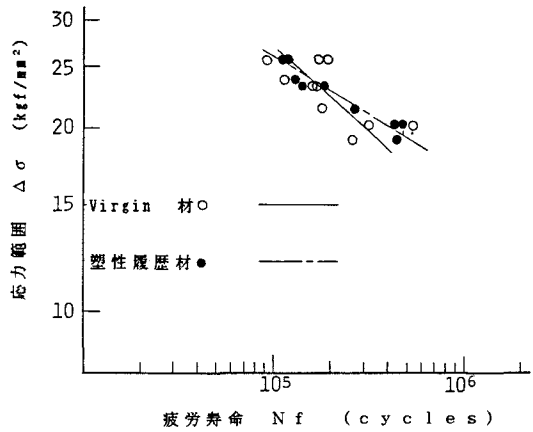


図-10 C-1シリーズの疲労試験結果

表-2 C-1シリーズの応力集中係数

$R \backslash \rho$	0.5mm	1.0mm	2.0mm	余盛のモデル化
2.0mm	2.02	1.76	1.60	
3.0mm	2.21	1.90	1.67	
4.0mm	2.36	2.00	1.71	

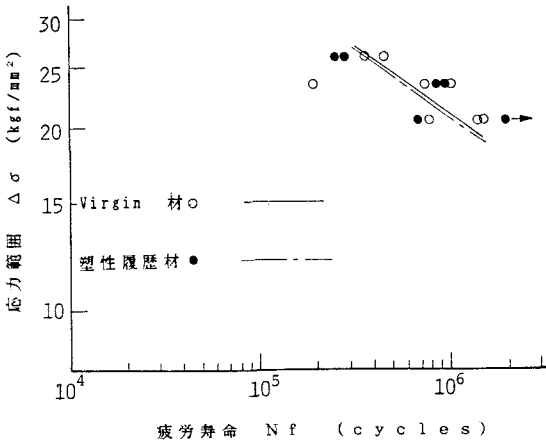


図-11 D-1シリーズの疲労試験結果

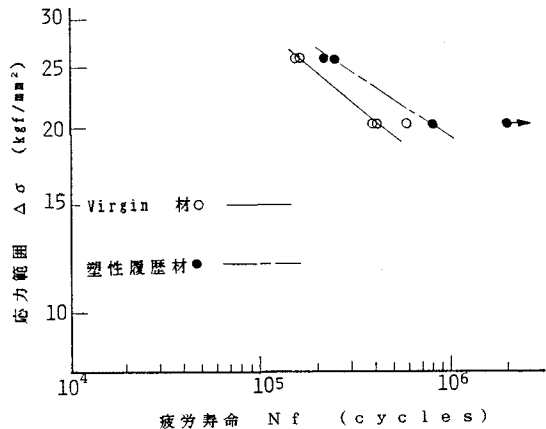
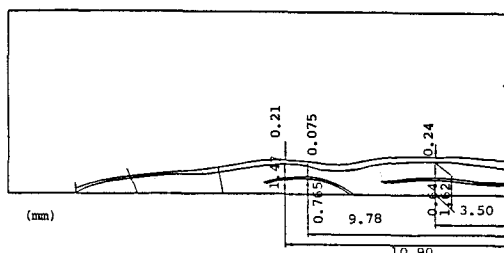
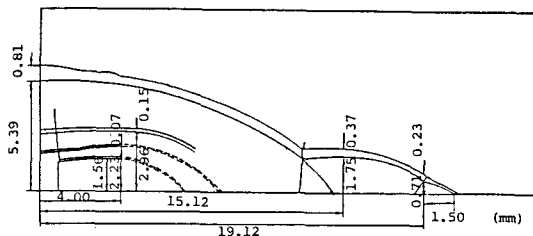


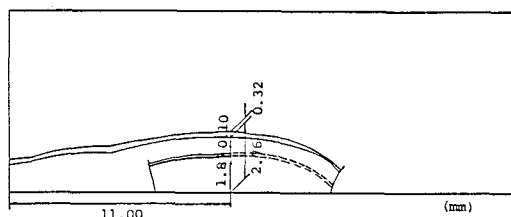
図-12 D-2シリーズの疲労試験結果



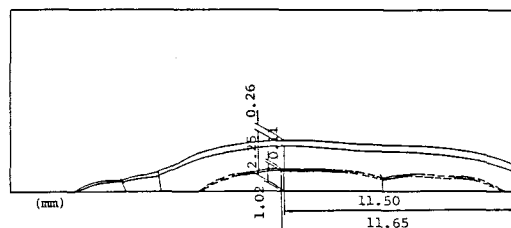
D 2 - 1 (Virgin材 $\Delta\sigma=26.00\text{kgf/mm}^2$)



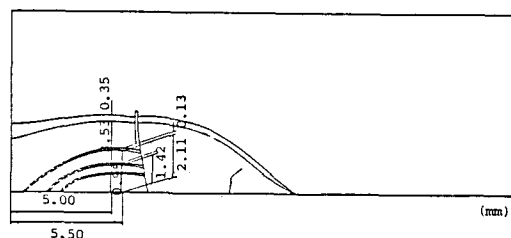
D 2 - 2 (Virgin材 $\Delta\sigma=20.42\text{kgf/mm}^2$)



D 2 - 3 (Virgin材 $\Delta\sigma=20.42\text{kgf/mm}^2$)



D 2 - 4 (塑性履歴材 $\Delta\sigma=26.00\text{kgf/mm}^2$)



D 2 - 5 (塑性履歴材 $\Delta\sigma=20.42\text{kgf/mm}^2$)

図-13 D-2シリーズのピーチマーク

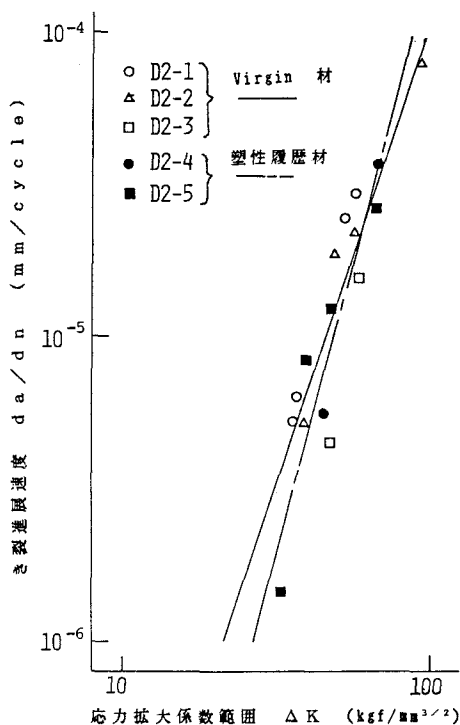


図-14 D-2シリーズのda/dn-ΔK 曲線

るように、塑性履歴材とVirgin材の疲労寿命に明確な差はないが、のど厚・脚長の大きいD-2シリーズでは図-12に示すように塑性履歴材の疲労寿命がVirgin材に比べて明らかに向上している。また図-13, 14にD-2シリーズのピーチマーク試験の結果を示すが、き裂進展過程においては、塑性履歴材とVirgin材の間には明確な差は認められない。

以上の結果に関して、塑性履歴により、D-2シリーズでは疲労寿命が向上し、D-1シリーズでは向上しなかった理由について考察する。D-1, D-2シリーズの力学性状の差となって現れる原因としては、のど厚・脚長の幾何学的寸法による応力集中係数の差と、溶接残留応力、幾何学的初期不整の差等が主なものと考えられる。まず幾何学的寸法を変化させて、応力集中係数を計算した結果を表-3, 4に示す。表-3, 4より、先に述べたC-1シリーズと同様、応力集中係数の値は切欠き材に比べて小さく、また、のど厚・脚長の差、止端角の差が応力集中係数に与える影響は止端半径に比べ十分小さいことがわかる。したがって、切欠き材に比べ応

力集中係数が小さいこと、また止端半径が、D-1、D-2シリーズで同じようにばらつくことを考えれば、幾何学的寸法の条件はC-1シリーズとほぼ同様であり、のど厚・脚長の幾何学的寸法がD-2シリーズの塑性履歴による疲労寿命向上の直接の原因ではないといえる。

表-3 Dシリーズの応力集中係数 ($\theta=45^\circ$)

脚長 \ ρ	0.5mm	1.0mm	2.0mm
6.5mm (D-1シリーズ)	2.57	2.13	1.78
9.0mm (D-2シリーズ)	2.60	2.14	1.79

つぎに、溶接残留応力、幾何学的初期不整については、のど厚・脚長の大きいD-2シリーズが一般に大きいと考えられる。これはD-2シリーズの疲労寿命がD-1シリーズに比べて小さいという疲労試験結果からも間接的に確認される。塑性履歴に

表-4 D-2シリーズの θ 、 ρ による応力集中係数の変化

θ \ ρ	0.5mm	1.0mm	2.0mm
30°	2.40	2.03	1.76
45°	2.60	2.14	1.79
60°	2.58	2.14	1.79

より、溶接残留応力がどのように変化するかを明確にすることは困難であるが、少なくとも初期不整はかなり除かれることは明らかであるので、初期不整の大きいD-2シリーズではこれがD-1シリーズに比べ疲労寿命が向上する一つの原因といえよう。

隅肉溶接継手材についても、のど厚・脚長の異なる2種類 (E-1、E-2シリーズ) の試験片について疲労試験を行った。脚長の小さなE-1シリーズの結果を図-15に、脚長の大きなE-2シリーズの結果を図-16に示す。試験片の数が少ないので明確ではないが、若干塑性履歴材の疲労寿命がVirgin材の疲労寿命より大きく、またのど厚・脚長の大きなE-2シリーズの方がやや疲労寿命が向上する傾向にある。この結果は、ほぼ横リブ十字隅肉溶接継手材とほぼ同様であり、原因としても同様に考えることができよう。

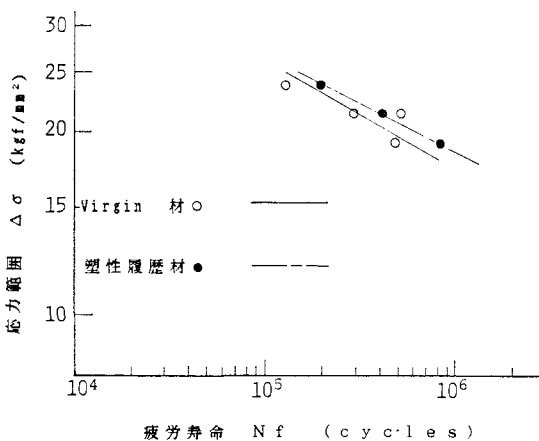


図-15 E-1シリーズの疲労試験結果

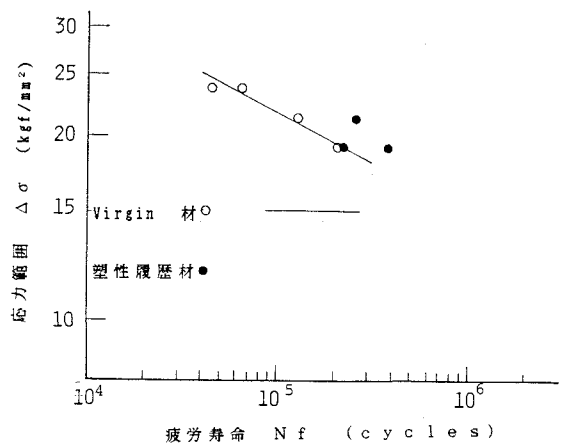


図-16 E-2シリーズの疲労試験結果

6. まとめ

本実験で与えた塑性履歴は一種類のみであり、必ずしも十分なものでないが、今回得られた塑性履歴を受けた鋼構造要素の基本特性をまとめると以下のようになる。

1) 切欠き材では今回の塑性履歴により疲労寿命が向上する傾向にある。この場合、0.2mm のき裂発生後のき裂進展はVirgin材と大差なく、0.2mm のき裂発生寿命に比べその後のき裂進展寿命に及ばず塑性履歴

の影響は小さい。これは、切欠き底が引張り塑性変形を受けるため除荷時に切欠き底のごく近傍に圧縮残留応力が発生し、0.2mm のき裂発生寿命の向上に寄与するものと考えられる。しかしながら、ある限度以上の塑性変形を与えると材料が劣化したり、あるいは塑性変形により断面積が減少するので、逆に、疲労寿命が低下する可能性がある。

2) 溶接継手材では一般に止端形状ならびに溶接による残留応力の影響が大きく、これらのばらつきのために、横リブ十字隅肉溶接継手材ならびに隅肉溶接継手材の一部を除き、今回の塑性履歴の影響は必ずしも明確に現れなかったが、塑性履歴を受けたことにより、少なくとも疲労寿命が低下することはないといえる。なお、横リブ十字隅肉溶接継手材ならびに隅肉溶接継手材で脚長の大きいシリーズでは、塑性履歴材の疲労寿命の向上が比較的明確に現れたが、これは、溶接熱量が多いことによる幾何学的初期不整が、今回の塑性履歴により除去されたことが一つの原因と考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、御援助いただいた名古屋高速道路公社、ならびに実験を協力いただいた名古屋工業大学大学院森下博氏（現鳥取県）、増山琢也氏（現新日鉄）に謝意を表する。

参考文献

- 1) 松岡三郎，田中紘一：疲労き裂伝ばにおよぼす過大荷重の影響，日本機械学会論文集，44巻，378号，PP375-382，昭和53年2月
- 2) Allerthammer, W., Varge, T.: A Rule to Estimate Overload Effects on a Cracked Body of Steel, Res Mechanics, PP39-46, Vol. 10, 1984
- 3) 大内田久，後藤芳樹：高張力鋼溶接継手の疲労き裂進展に及ぼす過大予荷重の影響，工学院大学研究報告，第56号，PP1-7，昭和59年4月
- 4) 西谷弘信編：総合材料強度学講座6 疲労強度学，オーム社，昭和60年3月
- 5) 村上裕則，大南正瑛：破壊力学入門，オーム社，昭和54年3月
- 6) 田中正隆，田中喜久昭：境界要素法－基礎と応用，丸善，昭和57年4月
- 7) Brebbia, C.A., Telles, J.C.F., and Wrobel, L.C.: 境界要素解析－理論と応用，丸善，昭和59年9月
- 8) Chaudonneret, M.: On the Discontinuity of the Stress Vector in the Boundary Integral Equation Method for Elastic Analysis, Recent Advances in Boundary Element Methods, PP185-194, Petech Press, 1978
- 9) 柴山昌和，後藤芳顯，長谷川彰夫，松浦聖：2，3の異なる塑性履歴を与えた鋼切欠き材の疲労強度，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，I-103，昭和60年9月

(1985年10月18日受付)