

板はり構造鋼試験片の4点曲げひずみ挙動における サイクル応答差の検討

真谷捷郎*・梶川達朗*
高野淳二*

Effect of Cyclic Load on Strain Behavior of Steel Beam Specimen under 4-point Bend

by

Katsuro Shingai, Tatsuro Kajikawa, Jyunji Takano

The fatigue test of surface crack propagation was conducted on the plate specimen with the small hole at a notch root in the low cycle fatigue region. The cyclic strain at a notch root was measured by strain gage and the cyclic strain behavior have been shown as the relationship between strain and number of cycles. The rate of surface fatigue crack propagation at a notch root were found from the crack length curve. It is found that the rate of surface fatigue crack propagation is expressed as the m th power of the range of strain intensity factor. Where the strain intensity factor is defined as the parameter multiplied the cyclic strain range at a notch root by root of the surface crack length. The m of m th power of the strain intensity factor range are different in the middle and in the edge of plate thickness. These experimental data and discussion have been presented.

1. 最初に

船、機械、橋、建築物等の構造物には、耐荷重・耐変形の能力と曲げ強度を高めるために、縦材には柱またははりを、横材にははりを使用するはり構造形式が多く採用されていることは、良く知られている。鋼構造物に大きいサイクル荷重が作用する場合には、鋼材料では転位と炭素に基づく降伏現象が変形と強度に大きい影響をおよぼし、1サイクル時のひずみ挙動は降伏現象により相当複雑な挙動となり、さらに2サイクル以上では1サイクル時とは相当有意差のあるひずみ挙動となる。すなわち、単調増加型荷重が作用する場合には、0.25サイクル（作用荷重までで除荷はないので、サイクル数としては0.25サイクルと数える）の降伏現象と加工硬化による静変形と破壊が問題になり、大きいサイクル荷重が作用する場合には1サイクル以上の低サイクル疲労強度が問題になる。従来はり構造のサイクルひずみ挙動を詳細に調べた論文はないよう

である。著者らは、鋼材料の板はり構造試験片を対象にして、その平滑材と切欠き材について単調増加型曲げ荷重下の0.25サイクル時の降伏現象によるひずみ挙動を実験的に詳細に調べて、その複雑なひずみ挙動を検討してきた。(1)、(2)、(3)、(4)

本報告では、今までの続きとして、鋼材料の板はり構造試験片を対象にして、その平滑材と切欠き材について繰返し曲げ荷重下の1サイクル時の降伏現象によるひずみ挙動および2サイクル以降のひずみ挙動をひずみゲージを使用して実験的に調べて、ひずみ挙動におよぼすサイクル荷重の影響を検討した。特に定荷重と定変位の条件における曲げひずみのサイクル過程の挙動とサイクル変化および両条件における有意差を詳細に調べた。

2. 材料と試験片

試験に使用した材料は、S25C鋼板の焼きなまし材

で、この化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。

Table 1 Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ca
0.24	0.22	0.50	0.012	0.016	0.07	0.15	0.13

Table 2 Mechanical properties

Modulus of elasticity	199 GPa
Yield stress	273 MPa
Tensile stress	457 MPa
Elongation	38 %

図2.1に本材の降伏域の応力ひずみ線図を示す。はり構造試験片としては基本的な帯板の4点曲げを考え、平滑試験片と切欠き試験片を図2.2に示す。平滑試験片ははり高さBが15と20mmの2種類とし、切欠き試験片ははり高さが40mmで、両側に半径8mmの半円切欠きを有する試験片である。平滑試験片には図2.3.aのようにはり高さの上下にひずみゲージをそれぞれ2枚ずつ貼付し、また側面にも数枚貼付した。切欠き試験片には図2.3.bのように切欠き底と側面にひずみゲージを貼付した。4点曲げ荷重装置を図2.4に示す。試験機は今井固体研の1トンオートグラフを利用した。なお、ひずみ計測には構造工学科のデータロガーを利用した。

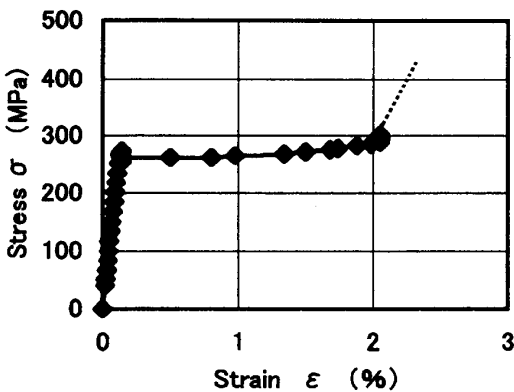
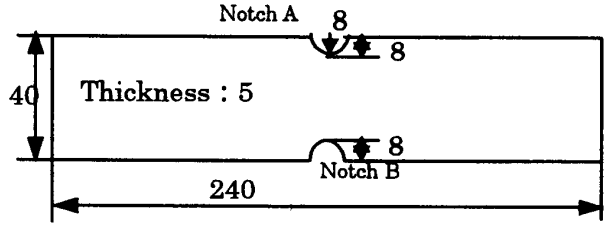
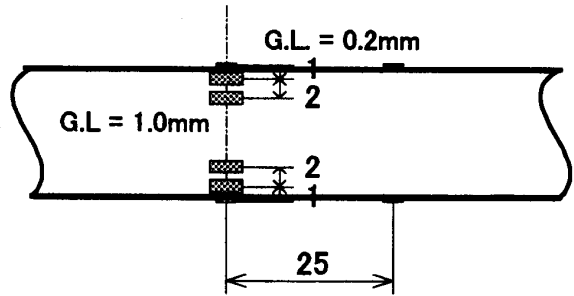


Fig.2.1 Stress-strain curve of S25C steel

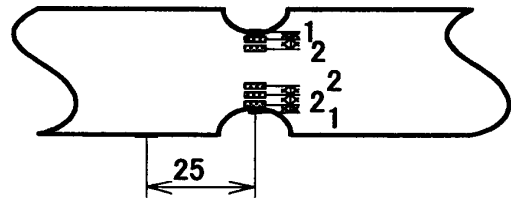


b. Notched specimen

Fig.2.2 Specimens



a. Plain specimen



b. Notched specimen

Fig.2.3 Positions of strain gages

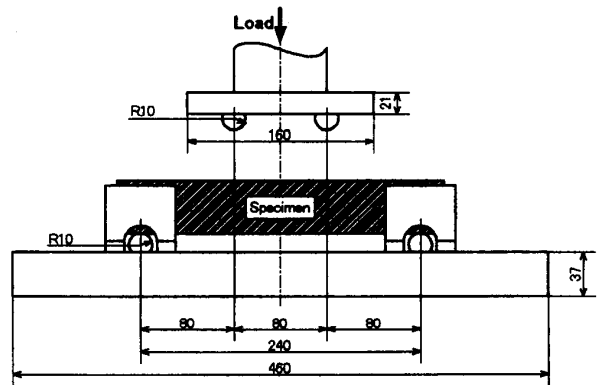
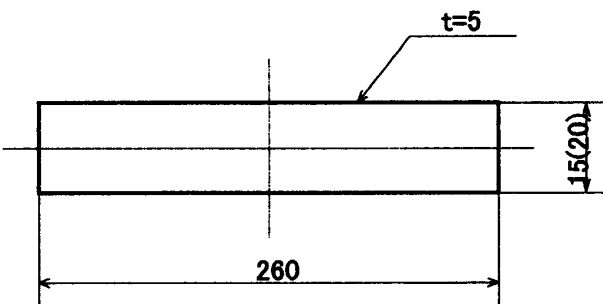


Fig.2.4 Apparatus for 4-point bend

3. 試験結果と検討

3.1 平滑試験片の定荷重曲げ

平滑試験片の定荷重曲げの方法は、図2.4に示す4点曲げ試験装置に1トンオートグラフで荷重をPまで作用後除荷して0にして、ここで試験片のはり高さを逆に置き換えて、また荷重をPまで作用後除荷して0にすることで、1サイクルの定荷重曲げとなる。本操作を必要サイクル数まで行う。



a. Plain specimen

3.1.1 1および2サイクルのはり最大曲げひずみ挙動と有意差

はり高さ20mmの平滑試験片に、定荷重で1サイクルの荷重をかけた時のはり中立軸より上下10mmの両表面の引張りと圧縮の最大曲げひずみ1、2、4の変化を、ひずみ1とひずみ2、4の関係で表すと図3.1.1となる。定荷重の最大荷重は最大曲げひずみ1で2.6%位までとした。作用荷重の増加に伴い、降伏現象が生じるので引張りひずみ1と圧縮ひずみ2、4のひずみ値は同じにならないで、相当複雑な曲線になることがわかる。次に除荷と逆荷重をかけるとひずみ1とひずみ2、4の関係は直線になり、比例関係を示す。また、図3.1.2には、2サイクル時のひずみ1とひずみ2、4の関係を示す。1サイクルで降伏現象が終わると、その後のサイクルではひずみ1に対するひずみ2、4の関係は比例関係になる。

図3.1.3には、ひずみ1とひずみ比の絶対値の関係を示すが、降伏現象を生じている時にはひずみ比は大きく変化することが分かる。

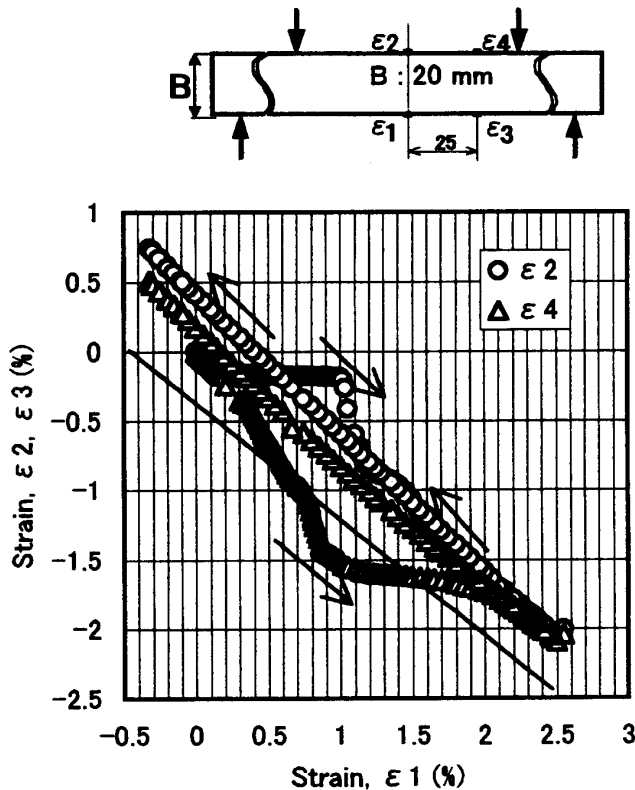


Fig.3.1.1 Relationship between strain 1 and strains 2, 4 at 1 st. cycle

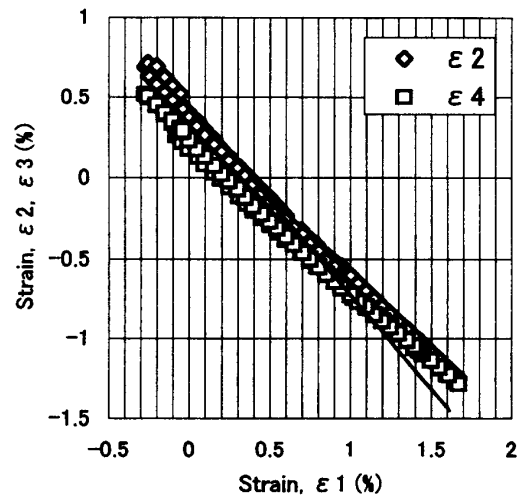


Fig.3.1.2 Relationship between strain 1 and strains 2, 4 at 2 nd. cycles

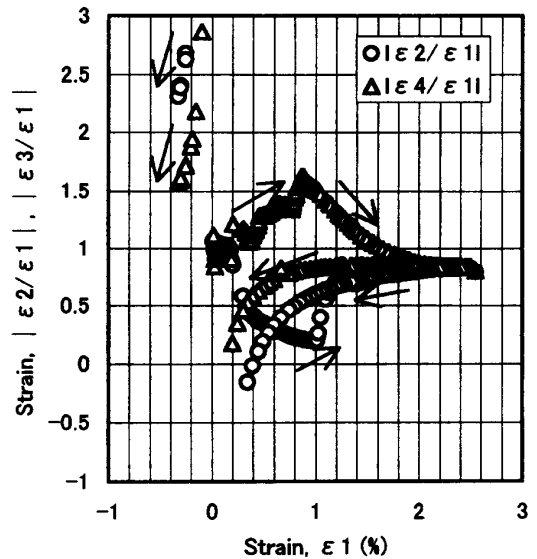
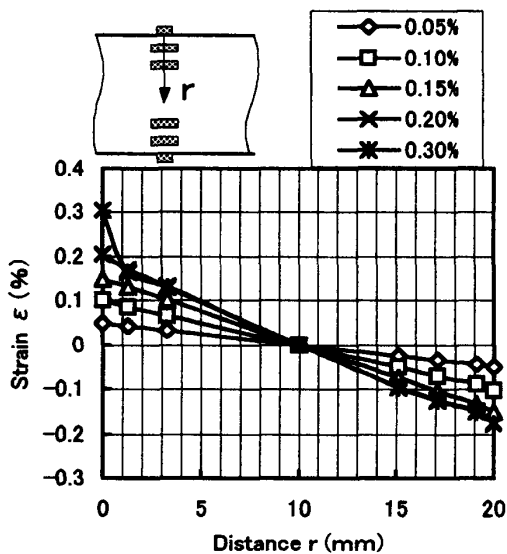


Fig.3.1.3 Relationship between strain 1 and strain ratios

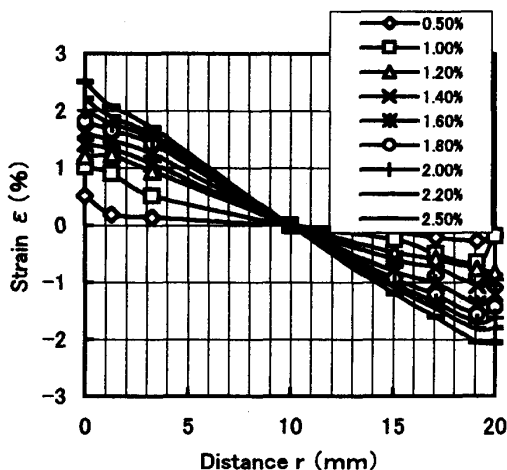
3.1.2 1および2サイクルの曲げひずみ分布の変化

図3.1.4には、1サイクル目の負荷、除荷、逆負荷、除荷と2サイクル目の再負荷、除荷、逆負荷、除荷の順序における曲げひずみ分布の変化を示す。図3.1.4, a, bには、負荷過程の引張り最大ひずみが0.05%から2.5%までのひずみ分布変化を示すが、0.15%までは弾性状態のためひずみ分布は直線分布になるが、0.3%以上のひずみになると表面のひずみは直線分布からはずれて、負荷上昇毎に特異な分布となる。図3.1.4, cには、除荷時のひずみ2.2%から試験片のり高さを置き換えて逆負荷を作用後除荷するまでのサイクルにおけるひずみ分布変化を示している。ひずみ分布は負荷時の特異な分布に似ている。なお、1

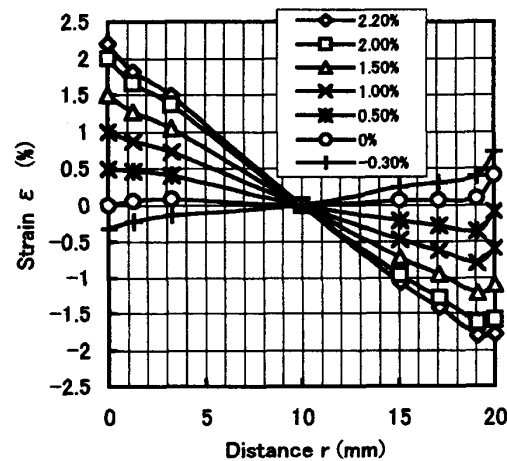
サイクル終了の除荷後のひずみ分布はひずみ0に近い分布となる。



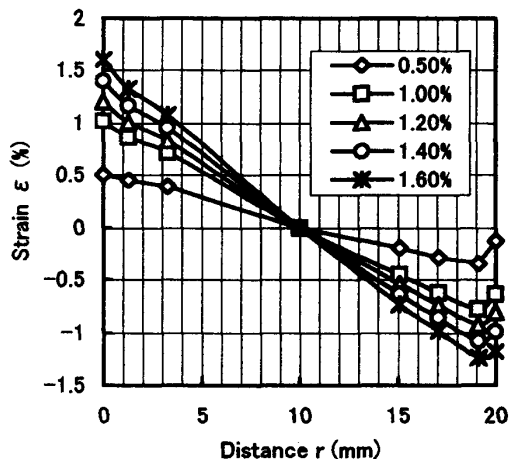
a. Loading of 1 cycle



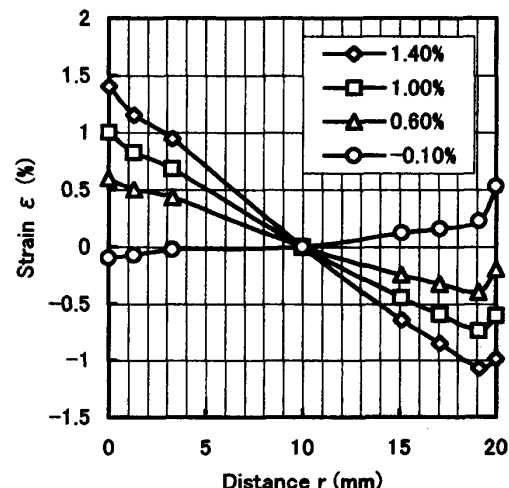
b. Loading of 1 cycle



c. Inverse loading and unloading of 1 cycle after unloading



d. Loading of 2 cycle



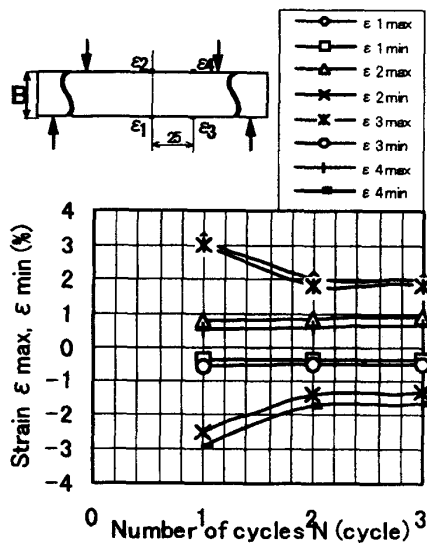
e. Inverse loading and unloading of 2 cycle after unloading

Fig.3.1.4 Change of strain distribution of 1 and 2 cycle

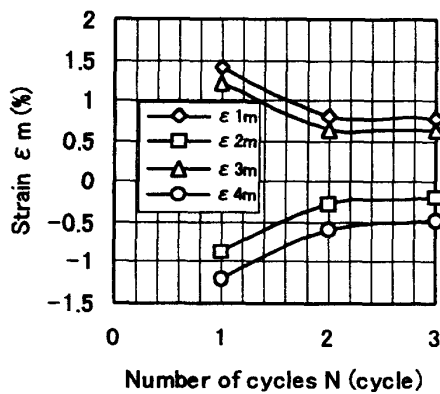
次に、2サイクル目の同様なひずみ分布変化を図3.1.4, d, eに示すが、ひずみ分布は直線分布ではなく、上記の特異分布のままである。

3.1.3 最大曲げひずみのサイクル変化

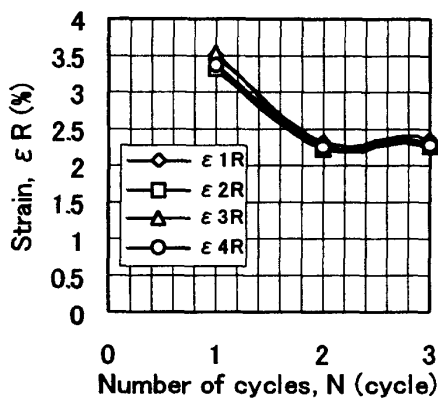
図3.1.5には、最大曲げひずみ、最小曲げひずみおよび低サイクル疲労で重要な量であるひずみ範囲と平均ひずみの3サイクルまでの変化を示す。これらの量は、1サイクルと2サイクルでは大きな有意差が見られるが、2, 3サイクルではほぼ同じになる。



a. Cyclic change of max. and min. strain



b. Cyclic change of strain range



c. Cyclic change of mean strain

Fig.3.1.15 Cyclic change of max. strain, min. strain and strain range, mean strain

3.2 平滑試験片の定変位曲げ

平滑試験片の定変位曲げの方法は、図2.4に示す4点曲げ試験装置に1トンオートグラフでベッド変位をある変位Yまで作用後除荷して、ここで試験片のはり高さを逆に置き換えて、また変位をYまで作用後除荷することで、1サイクルの定変位曲げとなる。本操作を必要サイクル数まで行う。

3.2.1 1および2サイクルのはり最大曲げひずみ挙動と有意差

はり高さ15mmの平滑試験片に、定曲げ変位で1サイクルの曲げ変位サイクルをかけた時のはり中立軸より上下7.5mmの両表面の引張りと圧縮の最大曲げひずみ1と2、3、4の変化を、ひずみ1とひずみ2、3、4の関係で表すと図3.2.1となる。定変位の最大変位は最大曲げひずみ1で2.2%位までとした。作用変位の増加に伴い、降伏現象が生じるので引張りひずみ1、3と圧縮ひずみ2、4のひずみ値は同じにならないで、相当複雑な曲線になることがわかる。次に除荷と逆荷重をかけるとひずみ1とひずみ2、3、4の関係は直線になり、比例関係を示す。図3.2.2には、2サイクル時のひずみ1とひずみ2、3、4の関係を示す。1サイクルで降伏現象が終了してないので、2サイクル目の負荷過程でまた降伏現象が現れて、ひずみ1に対するひずみ2、3、4の関係は曲線部分が見られる。除荷後逆負荷では直線的になる。

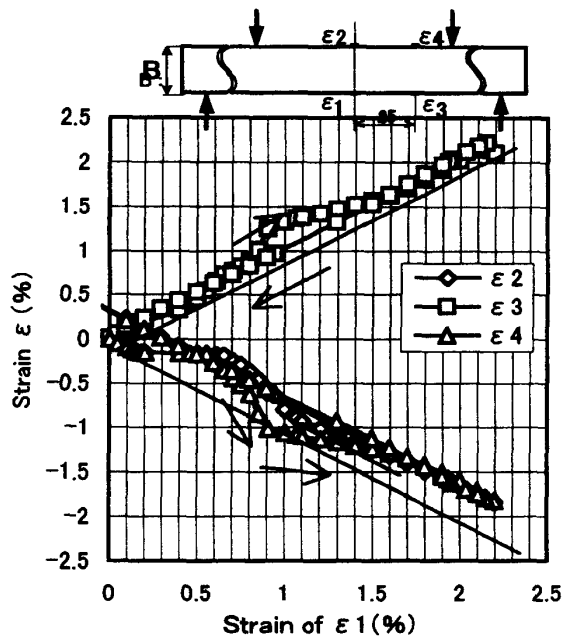


Fig.3.2.1. Relationship between strain 1 and strains 2, 3, 4 at 1 cycle

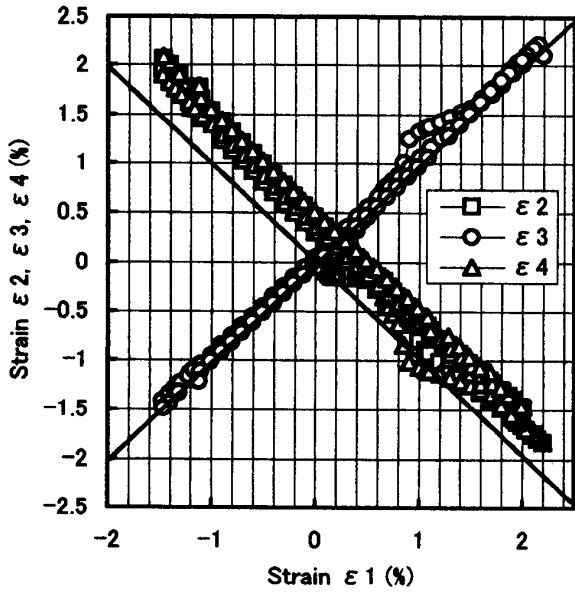


Fig.3.2.2. Relationship between strain 1 and strains 2, 3, 4 at 2 cycle

また、図3.2.3には、ひずみ1とひずみ比の絶対値の関係を示すが、降伏現象を生じている時にはひずみ比は大きく変化することが分かる。

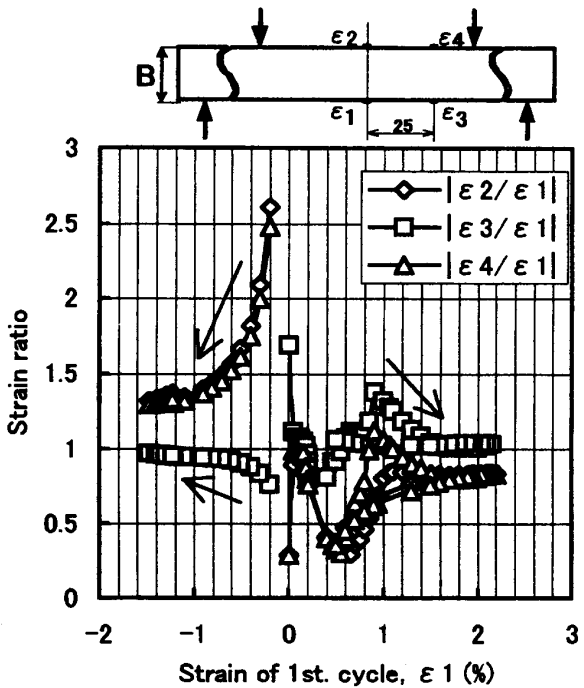
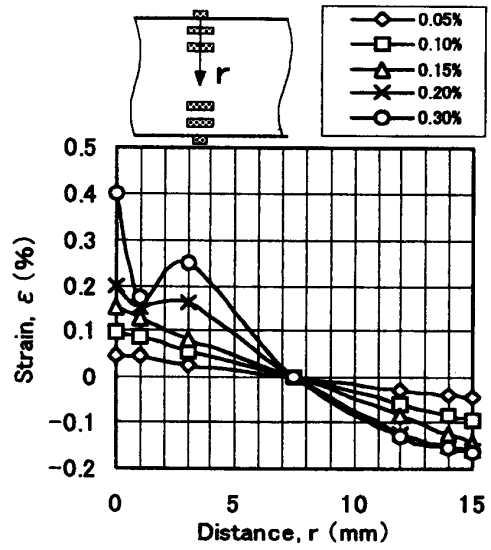


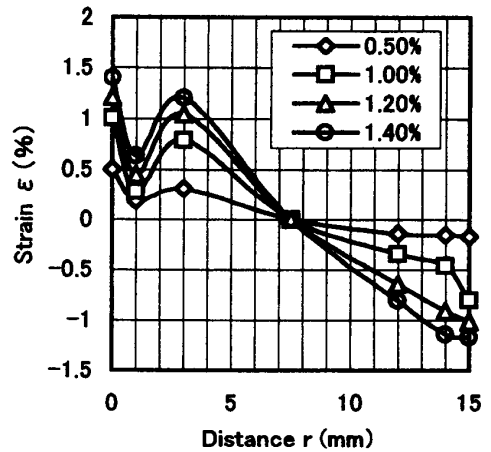
Fig.3.2.3. Relationship between strain 1 and strain ratios

3.2.2 1および2サイクルの曲げひずみ分布の変化

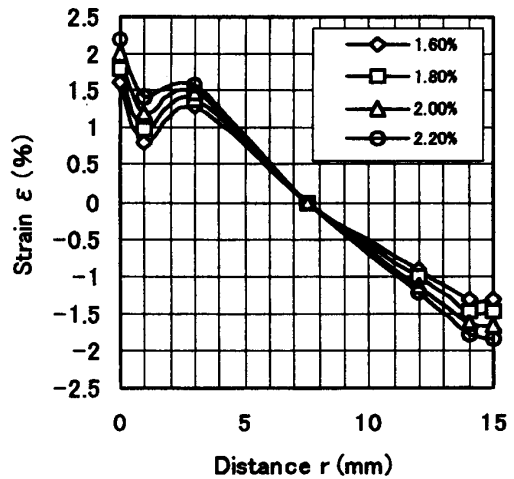
図3.2.4には、1サイクル目の負荷、除荷、逆負荷、除荷と2サイクル目の再負荷、除荷、逆負荷、除荷の順序における曲げひずみ分布の変化を示す。図3.



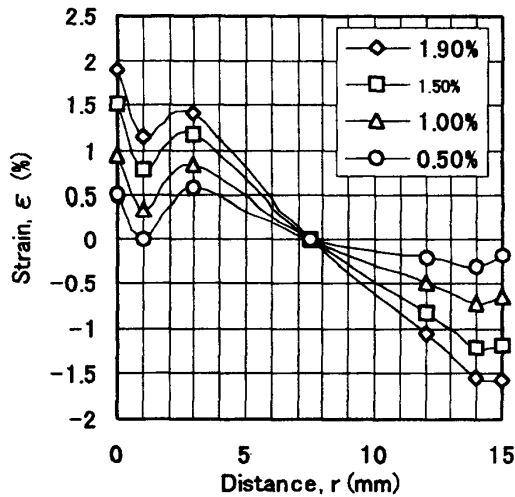
a. Loading of 1 cycle



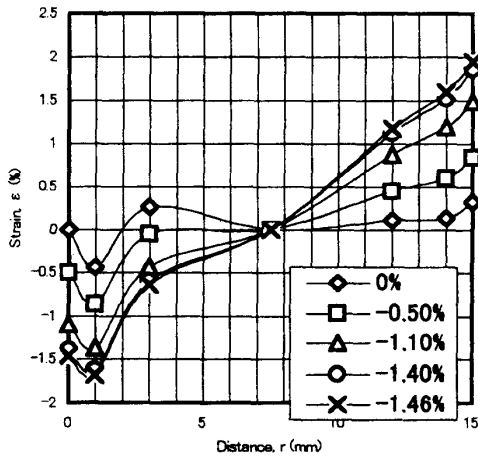
b. Loading of 1 cycle



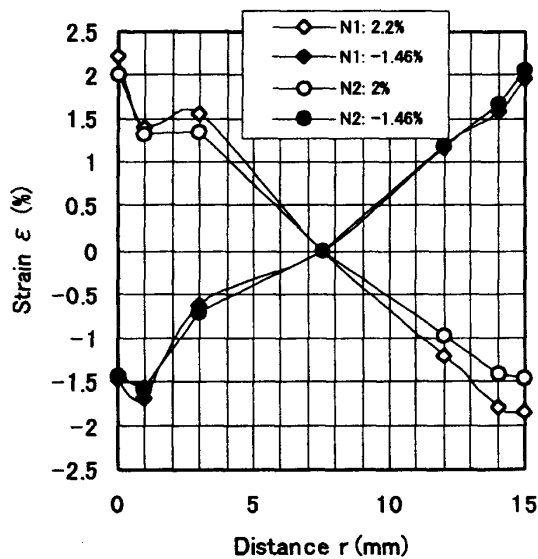
c. Loading of 1 cycle



d. Inverse loading of 1 cycle after unloading



e. Inverse loading of 1 cycle after unloading

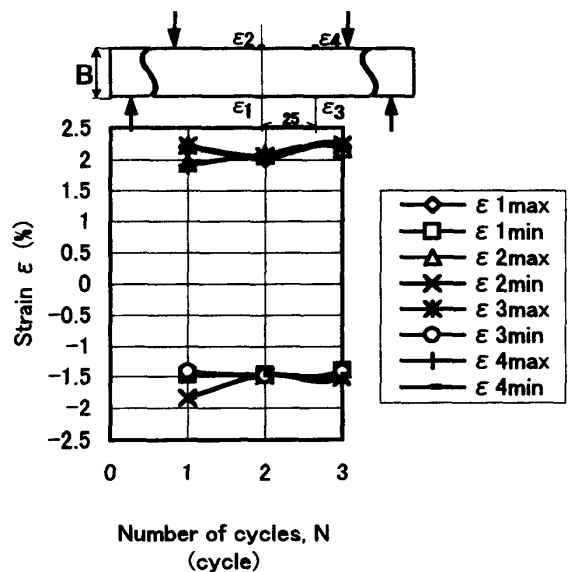


f. Max. strain and min. strain at 1 and 2 cycle

2.4, a, b, cには、負荷過程の引張り最大ひずみが0.05%から2.2%までのひずみ分布変化を示すが、0.15%までは弾性状態のためひずみ分布は直線分布になるが、0.2%以上のひずみになると表面のひずみは直線分布からはずれて、負荷上昇毎に特異な分布となる。図3.2.4, d, eには、除荷後試験片のはり高さを置き換えて逆負荷を作用した時のサイクルにおけるひずみ分布変化を示している。ひずみ分布は負荷時の特異な分布に似ている。次に、1、2サイクルの最大曲げと逆最大曲げ時のひずみ分布変化を図3.2.4, fに示すが、ひずみ分布は直線分布ではなく、上記の特異分布のままである。また、定荷重では逆曲げ時(図3.1.4.cの-0.3%の分布)のひずみ分布は0に近いが、定変位では逆曲げ時(図3.2.4.eの-1.46%の分布)のひずみは圧縮と引張りが大きくなっているひずみ分布となり、定荷重のそれと比べて大きい差が見られる。

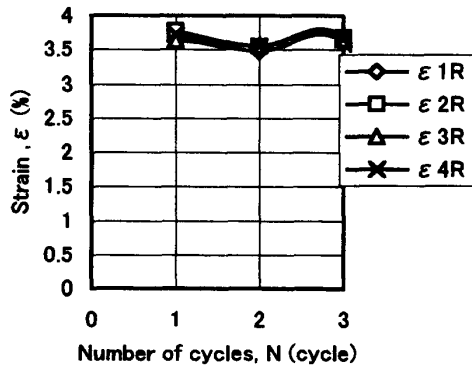
3.2.3 最大曲げひずみのサイクル変化

図3.2.5には、最大曲げひずみ、最小曲げひずみおよびひずみ範囲と平均ひずみの3サイクルまでの変化を示す。最大曲げひずみ、最小曲げひずみおよびひずみ範囲の量は、1サイクルから3サイクルまではほぼ同じになる。平均ひずみは1サイクルと2サイクルでは差がみられるが、2、3サイクルではほぼ同じになる。この傾向は定荷重の場合には1、2サイクルでは大きい差があることと異なっている。

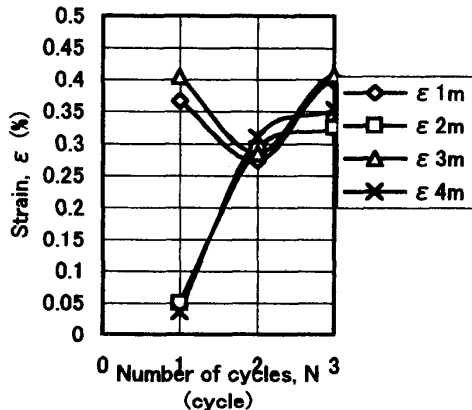


a. Cyclic change of max. and min. strain

Fig.3.2.4 Change of strain distribution



b. Cyclic change of strain range



c. Cyclic change of mean strain

Fig.3.2.5 Cyclic change of max. strain, min. strain and strain range, mean strain

3.3 切欠き試験片の定荷重曲げ

3.3.1 1および2サイクルの切欠き底のひずみ挙動の有意差

図3.3.1には、定荷重曲げ下の試験片平行部の公称ひずみ ϵ_n に対する両側の切欠き底のひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 の変化をサイクルループとして3サイクルまで示す。まず、ひずみ1、または2について1と2サイクルではループに差があるが、2と3サイクルでは差が小さい。また各サイクル毎のひずみ1と2のループにも差がある。これらは鋼材の降伏現象の影響と考えられる。公称ひずみサイクルは、0.075%から-0.071%までの範囲になり、ほぼ両振りに近いが、切欠き底のひずみサイクルは片振りに近くなる。

3.3.2 1および2サイクルの切欠き底のひずみ分布挙動の変化

図3.3.2には、1、2、10、20サイクル時の最大曲げ（最大ひずみ）と逆最大曲げ（最小ひずみ）の切欠き底のひずみ分布の変化を示している。切欠き底のひずみ分布も平滑試験片のひずみ分布と同様に、ひずみ分布は直線的分布にはならず、表面近くで特異的分

布になる。また、1サイクルと2サイクル以降のひずみ分布には相当な差が見られる。

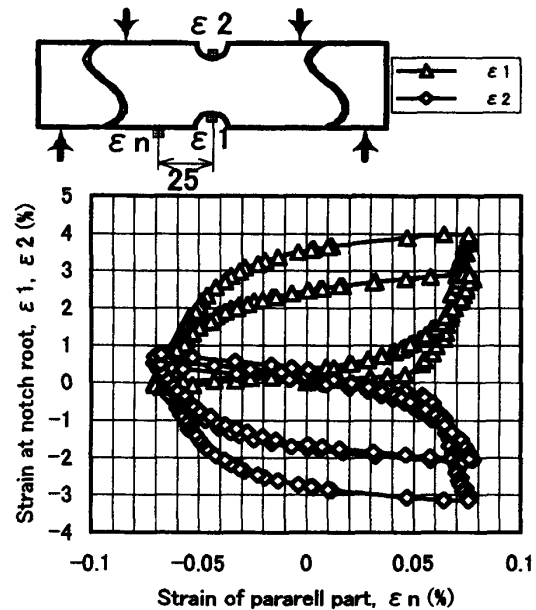


Fig.3.3.1 Change of cyclic loop up to 3 cycles

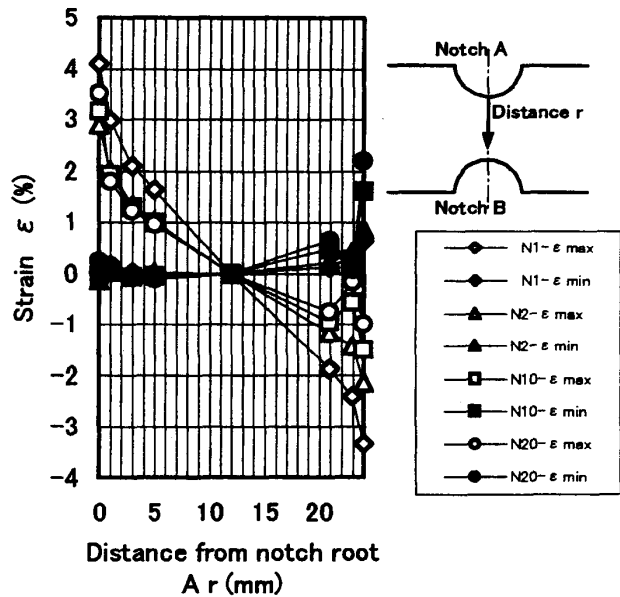


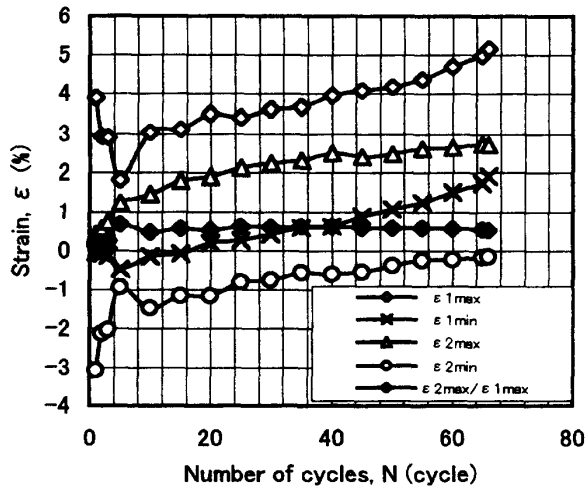
Fig.3.3.2 Cyclic change of strain distribution

3.3.3 切欠き底ひずみのサイクル変化

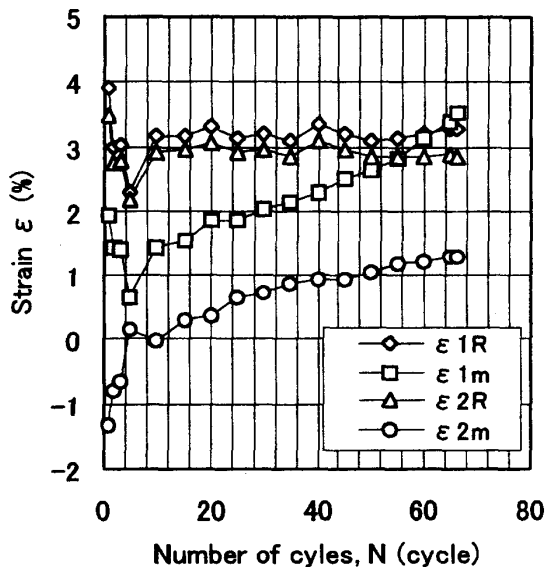
図3.3.3, aには、切欠き底の最大ひずみ、最小ひずみおよび両者の比と繰返し数の関係を示している。5サイクル以上では、最大ひずみと最小ひずみは繰返しとともに増加する傾向が見られる。また、両者の比は、約0.6となり繰返しに対してほぼ一定になる。

図3.3.3, bには、切欠き底のひずみ範囲、平均ひずみと繰返し数の関係を示している。5サイクル以

上では、繰返し数に対してひずみ範囲はほぼ一定になるが、平均ひずみは増加する傾向になる。



a. Cyclic change of max. and min. strain



b. Cyclic change of strain range and mean strain

Fig.3.3.3 Cyclic change of max. strain, min. strain and strain range, mean strain

3.4 切欠き試験片の定変位曲げ

3.4.1 1および2サイクルの切欠き底のひずみ挙動の有意差

図3.4.1には、定変位曲げ下の試験片平行部の公称ひずみ ϵ_n に対する両側の切欠き底のひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 の変化をサイクルループとして3サイクルまで示す。まず、ひずみ1または2について1と2サイクルではループに差があるが、2と3サイクルでは差が小さい。また各サイクル毎のひずみ1と2のループの差は、定荷重の場合に比べて小さい。2サイクル以上の

公称ひずみサイクルは、0.075%から-0.071%までの範囲になり、ほぼ両振りに近い、切欠き底のひずみサイクルも両振りに近い部分片振りになる。

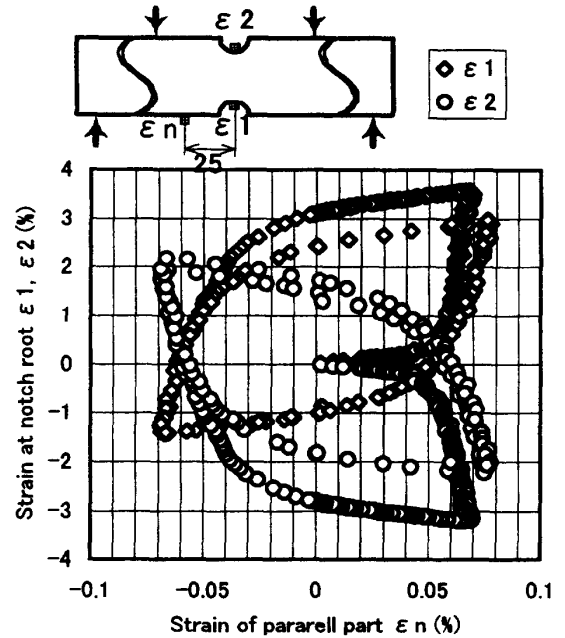


Fig.3.4.1 Change of cyclic loop up to 3 cycles

3.4.2 1および2サイクルの切欠き底のひずみ分布挙動の変化

図3.4.2には、1、2、5、10サイクル時の最大ひずみと最小ひずみの切欠き底のひずみ分布の変化を示している。切欠き底のひずみ分布も平滑試験片のひずみ分布と同様に、ひずみ分布は直線的分布にはならず、表面近くで特異的分布になる。また、1サイクルと2サイクル以降のひずみ分布には相当な差が見られる。

3.4.3 切欠き底ひずみのサイクル変化

図3.4.3, aには、切欠き底の最大ひずみ、最小ひずみおよび両者の比と繰返し数の関係を示している。2サイクル以上では、最大ひずみと最小ひずみは繰返しとともに僅かに増加する傾向が見られる。また、両者の比は、繰返しとともに0.8から0.9程度になる。

図3.4.3, bには、切欠き底のひずみ範囲、平均ひずみと繰返し数の関係を示している。

2サイクル以上では、ひずみ範囲と平均ひずみは繰返し数に対して、僅かに減少する傾向が見られるが、これは繰返し数に対する最小ひずみの増加が最大ひずみの増加より大きいためであるが、疲労過程の初期であるので、10サイクル以上繰り返すとこれらの量は飽和してその後増加すると推察される。

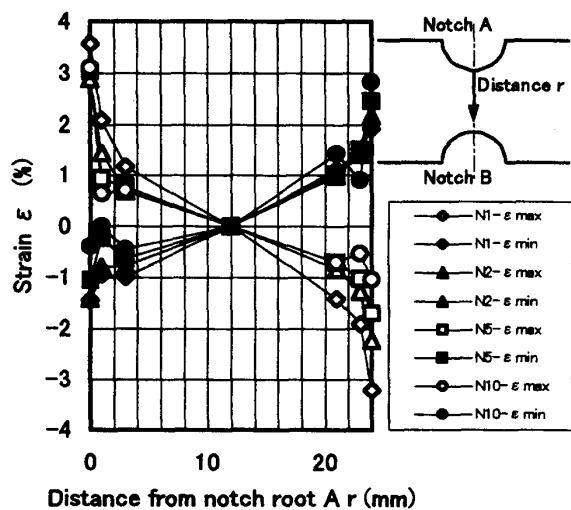


Fig.3.4.2 Cyclic change of strain distribution

4. 得られた結果

平滑試験片と切欠き試験片、定荷重と定変位の条件についてなされた繰返し4点曲げ試験において得られたひずみ挙動の特徴を次に記す。

(1)板はり試験片の繰返し4点曲げでは、一般的に1サイクルのひずみ挙動と2サイクル以上のそれには相当な有意差が見られるが、これは鋼材の降伏現象に起因するものである。また、平滑および切欠き試験片の曲げひずみ分布は、1サイクルおよび2サイクル以降も直線分布ではなく、特異なひずみ分布になる。

(2)切欠き試験片では、定荷重と定変位に依らず1サイクルのひずみ範囲は2サイクル以降のひずみ範囲より大きい。平滑試験片の定荷重では、1サイクルのひずみ範囲は2サイクル以降のひずみ範囲より大きい、定変位では繰返しひずみは1サイクルのひずみ範囲は2サイクル以降のひずみ範囲はほぼ等しくなる。両振り定荷重では片振りに近くなり、両振り定変位では両振りに近くなる。切欠き試験片では、平均ひずみは繰返しとともに増加する傾向が見られる。

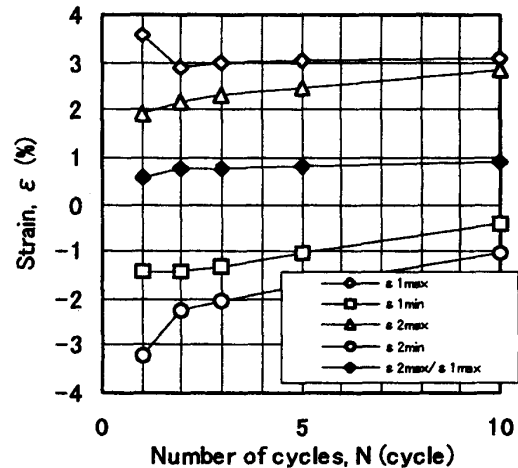
(3)平滑試験片では、0.25サイクルまでの単調増加荷重過程における曲げひずみのバラツキは大きい。

謝 辞

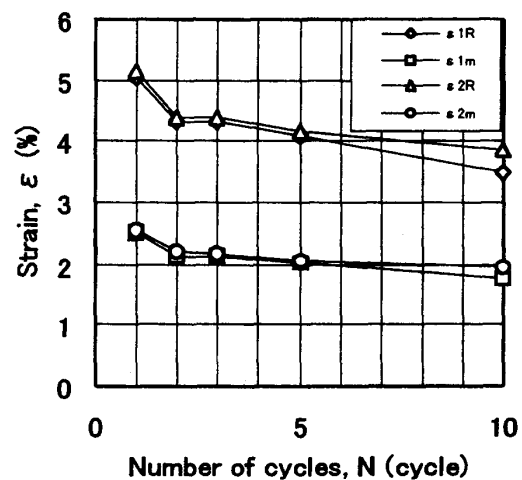
試験片加工において、ご支援を頂きました実習工場の皆様にお礼を述べます。

参 考 文 献

1) 真谷捷郎、吉井雄一、福井太介：単調増加面内横荷重下の切欠き鋼試験片の降伏ひずみ挙動、長崎大学工学部研究報告、Vol.30, No.55, pp.161-163,



a. Cyclic change of max. strain and min. strain



b. Cyclic change of strain range and mean strain

Fig.3.4.3 Cyclic change of max. strain, min. strain and strain range, mean strain

2000.7

2) 真谷捷郎、平早水智之、松尾浩一、吉井雄一、福井太介：低サイクル疲労強度差におよぼす平滑材と切欠き材の繰返しひずみ挙動差の詳細な考察、長崎大学工学部研究報告、Vol.31, No.55, pp.29-34, 2001.1

3) 真谷捷郎、平滑材と切欠き材の低サイクル疲労強度差におよぼす繰返しひずみ挙動差の検討、日本機械学会九州支部講演論文集、No.018-1, pp.19-20, 2001.3

4) 真谷捷郎、梶川達朗、高野淳二：はり構造鋼試験片の単調4点曲げ降伏ひずみ挙動の詳細検討、長崎大学工学部研究報告、Vol.31, No.57, pp.1-6, 2001.7