

試験及び解析による構造物の局部破壊の 支配因子に関する研究

Experimental and Analytical Study on Dominant Parameters of Local Failure of Structures

東京大学	恒本 芳樹	Yoshiki TSUNEMOTO	Non-Member
東京大学	坂口 貴史	Takashi SAKAGUCHI	Non-Member
東京大学	佐藤 拓哉	Takuya SATO	Non-Member
東京大学	笠原 直人	Naoto KASAHARA	Member

Experimental and analytical study was carried out with notched specimens which simulated multiaxial stress state in structural discontinuity, in order to reveal the mechanism and dominant parameters of “local failure”. Both the tensile test and finite element analyses (FEA) exhibited, notch strengthening. Furthermore, in the tensile test, failures of notched specimens were progressed from inside, where hydrostatic stress showed the maximum value in the FEM, whereas Mises stress did not show the maximum value.

Based on above results of the tensile test and the FEA, author investigated the relationship between the degree of notch strengthening and the maximum value of hydrostatic stress, which turned out to be proportional.

Therefore, it was revealed that both Mises stress and hydrostatic stress are dominant parameters of local failure.

Keywords: local failure, multiaxial stress, notch strengthening, hydrostatic stress, Mises stress

1. 研究の背景及び目的

1.1 研究の背景

従来の原子炉設計においては、高温高圧状態での延性破壊を想定し、ミーゼス応力を用いて強度評価が行われてきた。福島第一原子力発電所事故において、設計想定を超えた荷重が、原子炉の構造不連続部に、部材の内部から破壊が進展するという特殊な破壊モードである「局部破壊」[1]を引き起こした可能性が指摘されている。しかし、局部破壊のメカニズムは十分に解明されているとはいえない[2]。この特殊な破壊のメカニズムと支配因子を明らかにすることは重要である。

1.2 研究の目的

構造不連続部を模擬した切欠き付き丸棒試験片及び切欠き付き厚板試験片を用いて、試験及び解析により、局部破壊のメカニズムと支配因子について研究する。これ

連絡先: 恒本芳樹、
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1、
東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻、
E-mail: yoshikitsunemoto-7574615414@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

までの筆者らの研究で、切欠き付き試験片の引張強度において、平滑部分の断面と最小断面の直径または幅の比（以下、「断面寸法比」、英: “sectional dimension ratio”と表記）が切欠き強化の因子となることが明らかになっている。この比を広範囲にわたって変えたときの切欠き強化の特性及び破壊箇所と応力分布の関係を検討し、局部破壊の支配因子を明らかにする。

2. 局部破壊について

一般的な多軸応力状態を、Fig.1 に示す。

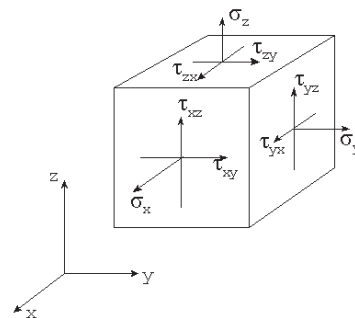


Fig.1 Multiaxial stress state

局部破損の検討に用いられるミーゼス応力 σ_{Mises} と静水圧応力 σ_m の定義式は、式 (2.1), (2.2) のとおりである。ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は主応力である。

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.2)$$

材料の降伏強度や引張強度は、一般に単軸引張試験から求められ、応力—ひずみ関係に関する議論は1次元の単軸応力場にて行われる。これに対して、実際の構造物は多軸応力状態である。そのため、多軸応力状態に対してさまざまな降伏理論が提案されているが、一般に広く用いられているのが、Fig.2 に示す von Mises の降伏曲面である[2]。

von Mises の降伏曲面は静水圧応力の軸に平行な曲面となっており、降伏強度は静水圧応力の影響を受けないことがわかる。つまり、この降伏曲面に従う材料は、静水圧応力によっては降伏しないことを表している。

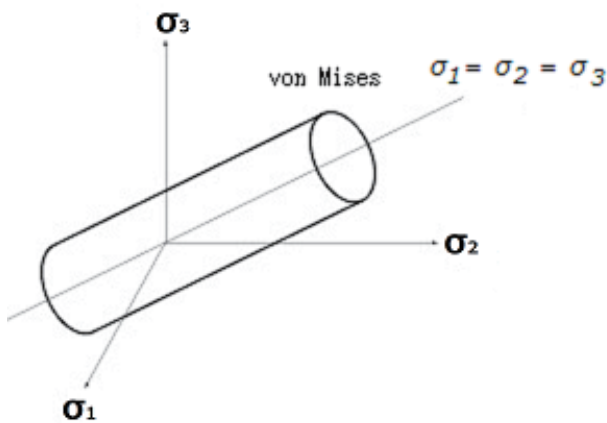


Fig.2 Yield surface of von Mises [2]

金属の降伏は、von Mises の降伏曲面によって比較的精度よく表され、広く運用されてきた。しかし、最近の研究により、静水圧応力が大きい場合と小さい場合とは異なることがわかってきた。

ミーゼス応力と静水圧応力の両方を考慮するために、静水圧応力とミーゼス応力の比で表される、「3軸応力度」というファクターが提案された[1]。3軸応力度 T_r は、式 (2.3) のとおりである。

$$T_r = \frac{\sigma_m}{\sigma_{Mises}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (2.3)$$

切欠き付き部材等、周囲の拘束により塑性変形を生じにくくなっている部材では、局部的に3軸応力度が高くなる。このように、狭い領域で局部的に大きな塑性変形が生じる構造では、一般的な延性破壊に基づく評価に加え、多軸応力状態において特有の破損モードであると考えられている局部破損についても評価する必要がある。

3. 切欠き付き丸棒試験片及び切欠き付き厚板試験片を用いた引張試験

3.1 試験方法

3.1.1 試験機及び試験方法

Fig.3 に示す、SHIMADZU AG-XD50kNplus 引張試験機（製造：島津製作所）を用いた。試験機の最大負荷容量は50kNで、負荷方式は高精度定速ひずみ制御方式である。今回の引張試験では、試験片の上部に強制変位を与え、ロードセルにより荷重を測定した。変位速度は6.0mm/minで、全試験片に対して同一である。この条件で各試験片が破断するまで引っ張り、変位に対する荷重を測定する。治具（つかみ歯）間の距離は50mm、試験温度はRT（室温）で一定である。

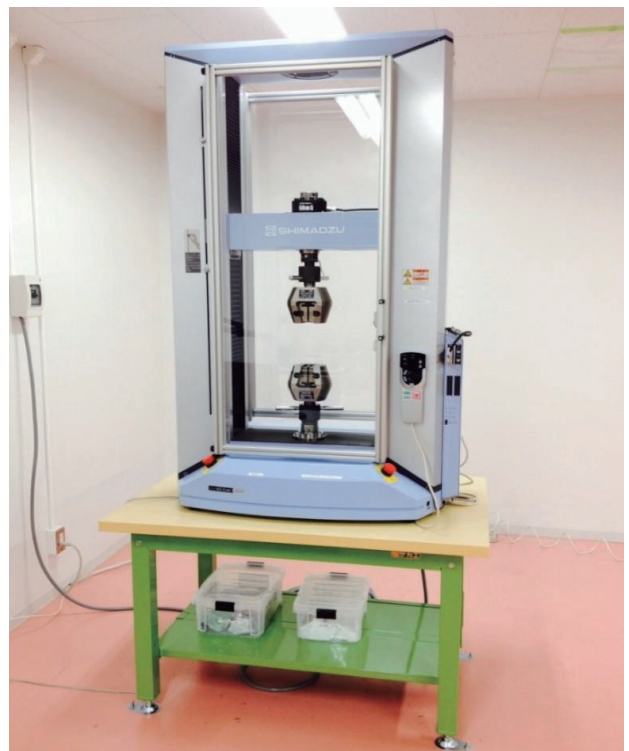


Fig.3 Tensile test machine (SHIMADZU AG-XD50kNplus)

3.1.2 試験片

材料は、実機における鉄鋼材料の高温状態を模擬できる鉛—アンチモン合金を用いた。Fig.4に示す、各5種類の丸棒試験片及び厚板試験片を用い、破断するまで強制引張変位を加えて荷重を測定した。丸棒試験片の直径と厚板試験片の板幅は同一であり、厚板試験片の板厚は30mmである。

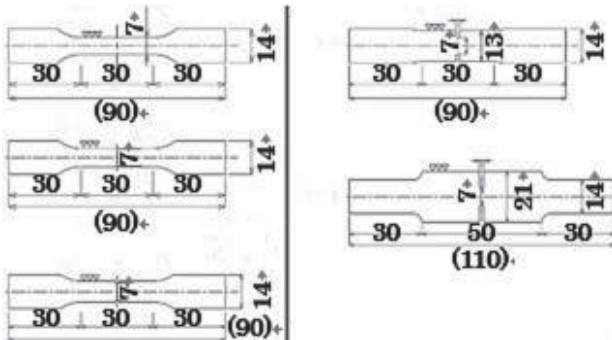


Fig.4 Shape of specimens (round bars and thick plates)

次に、各試験片の断面寸法比を Table 1 に示す。ただし、平滑試験片については、その断面寸法比は1となる。

Table 1 List of “sectional dimension ratio”

Number of specimen	“Sectional dimension ratio”
Bar①, Plate①	1 (smooth)
Bar②, Plate②	1.073
Bar③, Plate③	1.25
Bar④, Plate④	1.857
Bar⑤, Plate⑤	3

3.2 試験結果

3.2.1 試験片の破断箇所と状況

ここでは、平滑丸棒試験片（丸棒①）、切欠き付き丸棒試験片（丸棒③）の破断箇所の状況を Fig.5 に示す。丸棒①は大きく塑性変形してから破断に至るのに対し、丸棒③は殆ど塑性変形を伴っておらず、また破面の形状から切欠き底ではなく内部から破断に至ることが分かった。内部からの破壊進展は、局部破損に特有の現象である。



(a) Smooth bar (Bar①)



(b) Notched bar (Bar③)

Fig.5 Observation of fracture

内部からの破壊進展のメカニズムの説明図を Fig.6 に示す[2]。このメカニズムは、材料の内部にボイドが発生し、このボイドが合体して破断に至る、というものである。

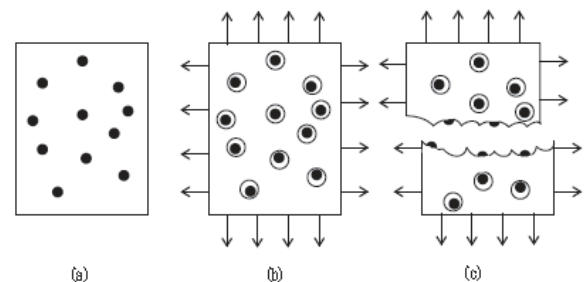
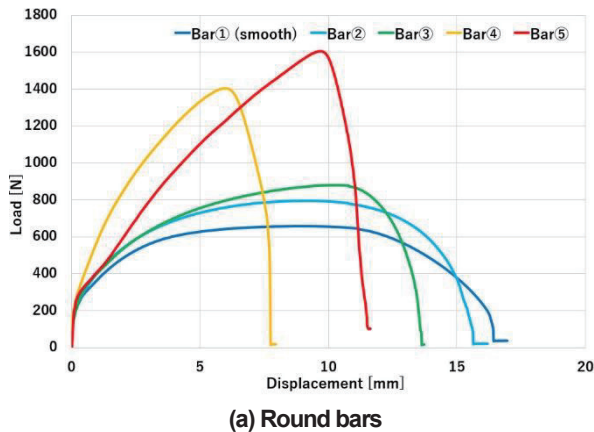


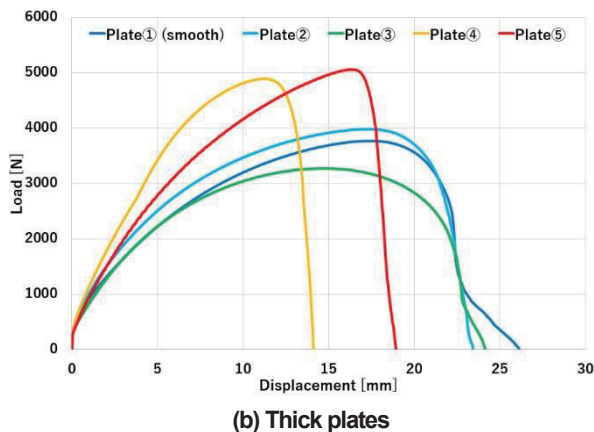
Fig.6 Fracture progress from inside [2]

3.2.2 荷重—変位関係と切欠き強化

丸棒試験片及び厚板試験片の荷重—変位曲線を Fig.7 に示す。丸棒試験片、厚板試験片ともに、断面寸法比が大きくなるとともに最大荷重が上昇する傾向の結果がある。丸棒試験片、厚板試験片ともに、断面寸法比が大きくなるとともに、最大荷重に達する変位は小さくなる傾向にある。



(a) Round bars



(b) Thick plates

Fig.7 Load-displacement curves (tensile test)

切欠き付き試験片の最大荷重を平滑試験片の最大荷重で規格化したものを「切欠き強化度」(英: "degree of notch strengthening")と定義し、断面寸法比との関係を Fig.8 に示す。丸棒試験片、厚板試験片ともに、断面寸法比とともに切欠き強化度は大きくなり、一定値に漸近する。一般に、丸棒試験片の切欠き強化度は厚板試験片の切欠き強化度よりも大きい。

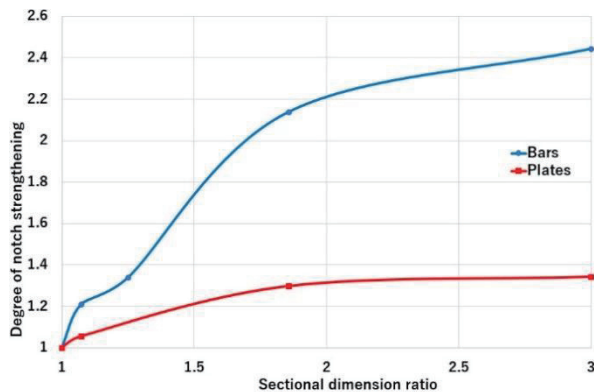


Fig.8 Relationship between "sectional dimension ratio" and "degree of notch strengthening" (tensile test)

4. 切欠き付き丸棒試験片及び切欠き付き厚板試験片の有限要素解析

4.1 解析モデル及び解析条件

丸棒試験片については軸対称要素を、厚板試験片については単位厚さ(今回は厚さ 1mm)の平面ひずみ要素を用い、Fig.4 に示した各 5 種類の丸棒試験片及び厚板試験片の形状をもとに、その対称性を活用したモデルを作成した。そのため、丸棒試験片、厚板試験片ともに、試験片の中心または重心、すなわち最小断面の中心または中央を、極座標系または直交座標系の原点としている。このとき、断面寸法比の等しい丸棒試験片と厚板試験片の解析モデルの形状は同一であり、ここでは丸棒③、厚板③のモデル形状を Fig.9 に示す(図中の数字の単位は mm である)。すべてのモデルについて、全要素が四辺形要素となるようなメッシュを作成した。ただし、引張試験において試験片の両端の部分に殆ど変形がみられなかったため、構造不連続部、すなわち断面形状が変化する部分を割愛しないことも念頭に、丸棒①～④、厚板①～④については端から 15mm の部分を、丸棒⑤、厚板⑤については端から 25mm の部分を省略したうえで、すべてのモデルについて 5mm の強制変位を与えた。全 10 種類の解析モデルにおいて、この変位は最大荷重点に達するのに十分である (Fig.11 を参照)。

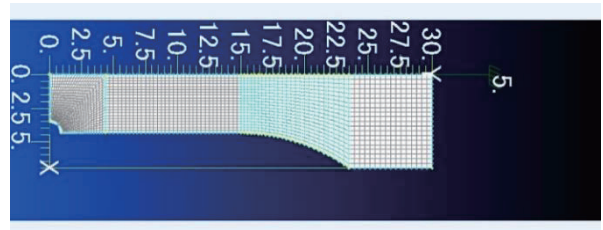


Fig.9 Finite element analysis model (Bar③, Plate③)

本研究で用いたツールは、有限要素法プリ・ポストプロセッサ FEMAP[3]と、汎用非線形構造解析システム FINAS/STAR[4][5]である。

また、引張試験にて平滑丸棒試験片(丸棒①)は大きく塑性変形してから破断に至った (Fig.5 を参照) ので、大変形弾塑性解析を行うこととし、平滑丸棒試験片の引張試験から得られた真応力-真ひずみ曲線を多直線近似して入力した。入力した真応力-真ひずみ曲線は、Fig.10 のとおりである。

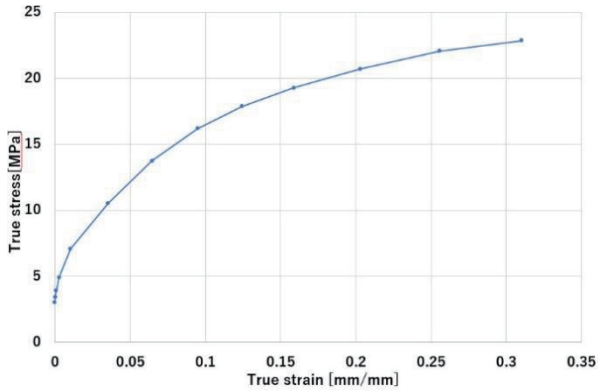


Fig.10 True stress-true strain curve

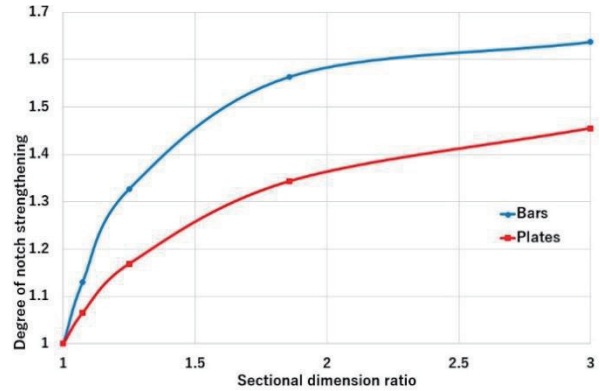
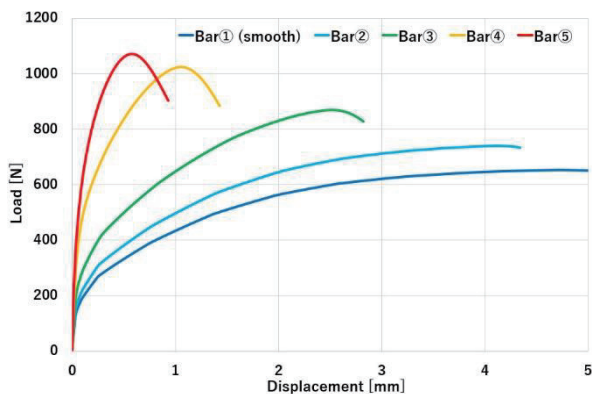


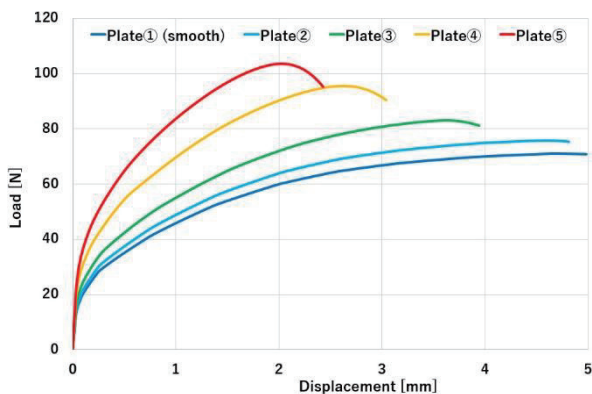
Fig.12 Relationship between "sectional dimension ratio" and "degree of notch strengthening" (FEM)

4.2 解析結果

丸棒試験片及び厚板試験片の荷重—変位曲線を Fig.11 に示す。断面寸法比と切欠き強化度の関係を Fig.12 に示す。引張試験同様、丸棒試験片、厚板試験片ともに、断面寸法比が大きくなるとともに最大荷重が上昇し、一定値に漸近した (Fig.7, Fig.8 を参照)。



(a) Round bars



(b) Thick plates

Fig.11 Load-displacement curves (FEM)

5. 考察

5.1 丸棒試験片と厚板試験片の応力状態

等しい断面寸法比に対する切欠き強化度は、丸棒試験片の方が厚板試験片より大きい (Fig.8, Fig.12 を参照)。この原因として考えられるものに、構造不連続部にて起こると考えられている「塑性拘束」の強さの違いが挙げられる。

切欠き付き丸棒試験片における塑性拘束の概念図を Fig.13 に示す。切欠き付き丸棒試験片において Fig.13 のような引張荷重を与えた場合、荷重方向の応力 (軸方向応力) は、断面積の小さい部分 (図の下側の部分) において、断面積の大きい部分 (図の上側の部分) より大きくなるため、ポアソン比効果を考慮すれば、半径方向または板幅方向において、圧縮方向に大きく変形しようとするのは断面積の小さい部分、ということになる。この、断面積の小さい部分と大きい部分との、半径方向または板幅方向の変形量の差が、その方向の応力を、断面積の小さい部分では引張方向に、断面積の大きい部分では圧縮方向に生じさせる。これが塑性拘束のメカニズムである。

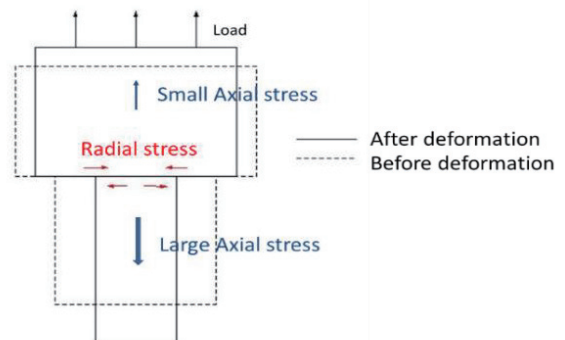
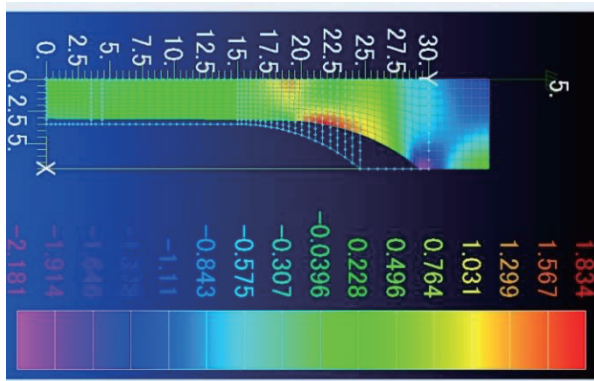


Fig.13 Mechanism of plastic constraint (notched bars)

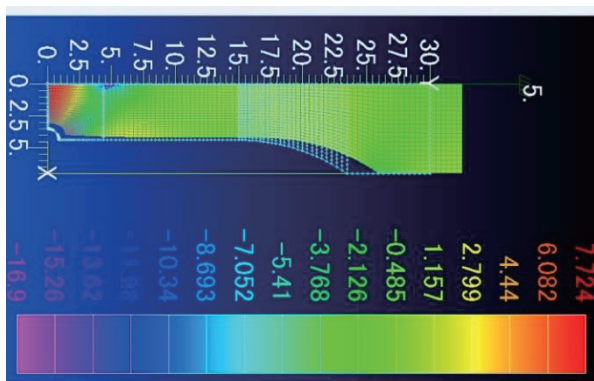
まず、丸棒試験片における塑性拘束をみるために、最大荷重点における丸棒①、丸棒③の周方向応力の分布を Fig.14 に示す。丸棒①においては、最小断面付近において周方向応力は殆ど存在せず、塑性拘束が存在しないことが確認できるのに対し、丸棒③においては塑性拘束が存在していることがわかる。

次に、厚板試験片における塑性拘束をみるために、ここでは、最大荷重点における厚板①、厚板③の板厚方向応力の分布を Fig.15 に示す。厚板③の板厚方向応力は厚板①よりも大きいものの、その比率はそれほど大きな値の差は存在しない。

したがって、丸棒試験片、厚板試験片ともに、最小断面部における周方向応力または板厚方向応力は、断面寸法比とともに大きくなるが、その比率は丸棒試験片の方が厚板試験片よりも明らかに大きいことがわかる。したがって、厚板試験片では厚さ方向には拘束がなく、拘束するのは幅方向のみであるのに対し、丸棒試験片では塑性拘束が半径方向、周方向の両方向に生じることが、断面寸法比に対する切欠き強化度が、丸棒試験片の方が厚板試験片より大きい理由であると考えられる。

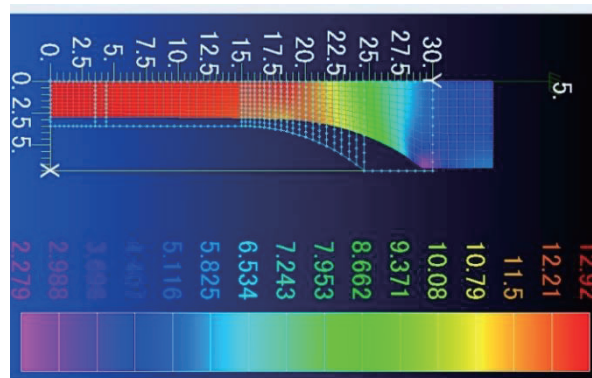


(a) Smooth bar (Bar①)

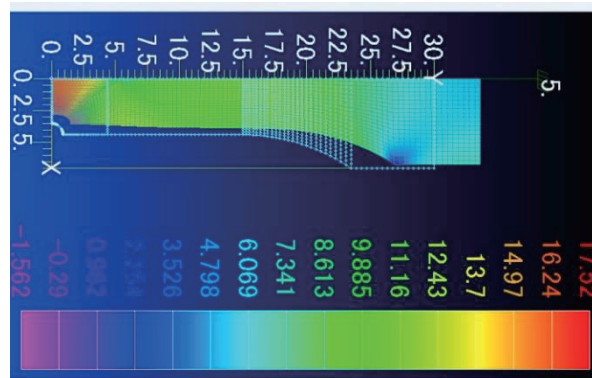


(b) Notched bar (Bar③)

Fig.14 Hoop stress distribution in round bars



(a) Smooth plate (Plate①)



(b) Notched plate (Plate③)

Fig.15 Thickness-direction stress distribution in thick plates

5.2 ミーゼス応力と静水圧応力の分布

ここでは、最大荷重点における、丸棒③のミーゼス応力の分布を Fig.16 に、丸棒③の静水圧応力の分布を Fig.17 に示す。従来の局部破損の評価指標であるミーゼス応力は切欠き底（モデルの左下の部分）で最大値を示し、局部破損箇所が内部であることを説明できないことがわかる。これに対し、静水圧応力は最小断面の内部（モデルの上側の部分）で最大値を示し、局部破損箇所によく一致している。

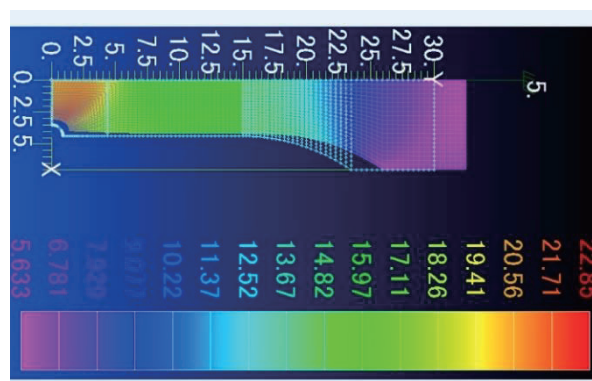


Fig.16 Mises stress distribution (Bar③, notched bar)

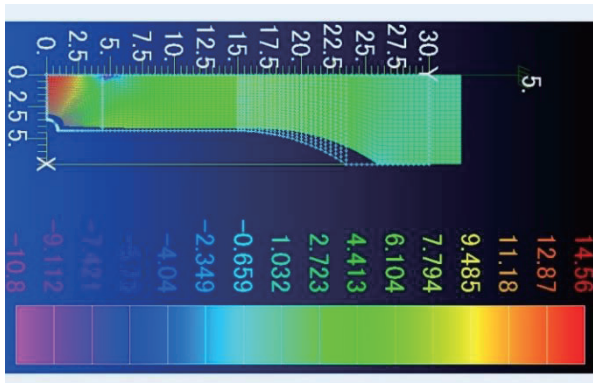
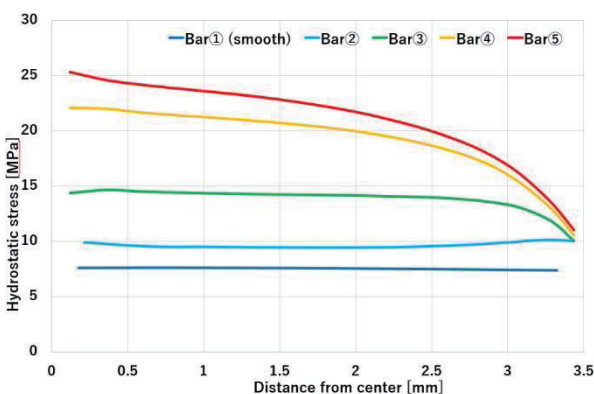


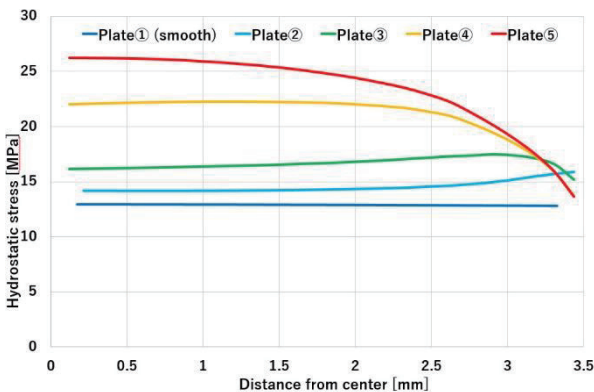
Fig.17 Hydrostatic stress distribution (Bar③, notched bar)

5.3 静水圧応力と局部破損の関係

詳細に静水圧応力の最大箇所及び最大値について調査するため、最大荷重点における、丸棒試験片及び厚板試験片の最小断面における静水圧応力の分布を Fig.18 に示す。断面寸法比を大きくしていくと、最大箇所が最小断面の中心部または中央部（グラフの左側）に移るとともに、静水圧応力の最大値が一定値に漸近する傾向が見られる。



(a) Round bars



(b) Thick plates

Fig.18 Hydrostatic stress distribution in minimum cross section

局部破損箇所が板厚の内部であることを説明するには、局部破損の従来の評価指標であるミーゼス応力と、静水圧応力のいずれが適するかを確認した。断面寸法比を変えたときの静水圧応力の変化を見るために、切欠き付き試験片の最小断面における静水圧応力の最大値を、平滑試験片の最小断面における静水圧応力の最大値で規格化したものを「静水圧応力比」（英：”hydrostatic stress ratio”）と定義し、断面寸法比と静水圧応力比の関係を Fig.19 に示す。丸棒試験片、厚板試験片ともに、静水圧応力比は断面寸法比とともに大きくなり、一定値に漸近する。丸棒試験片は厚板試験片よりも大きな値を示した。また、切欠き強化度も丸棒試験片で厚板試験片よりも大きな値を示す（Fig.8, Fig.12 を参照）ことから、静水圧応力には塑性拘束の違い（5.1 節を参照）が反映されると考えられ、断面寸法比よりも静水圧応力が切欠き強化の直接の支配因子であると考えられる。

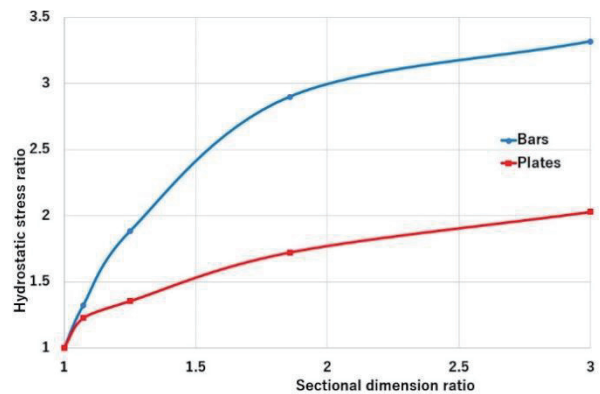


Fig.19 Relationship between “sectional dimension ratio” and “hydrostatic stress ratio”

断面寸法比を大きくしていくと、丸棒試験片、厚板試験片ともに、切欠き強化度、静水圧応力比の両者の値が大きくなり、一定値に漸近する結果が得られたので、静水圧応力比と切欠き強化度の関係を調べた。

丸棒試験片及び厚板試験片の、静水圧応力比と切欠き強化度の関係を、Fig.20 に示す。丸棒試験片、厚板試験片ともにグラフは直線に近いことから、切欠き強化の支配因子は静水圧応力であることが明らかである。

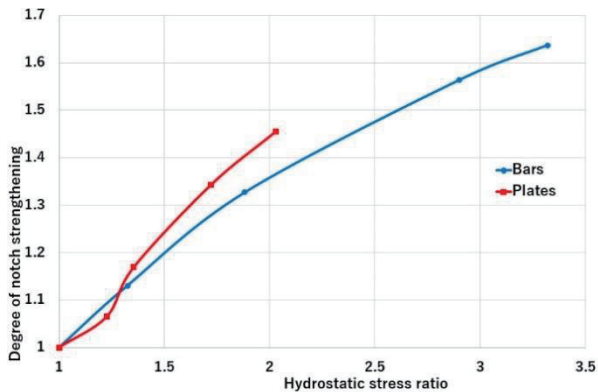


Fig.20 Relationship between “hydrostatic stress ratio” and “degree of notch strengthening”

6. 結論

局部破損現象を解明するために、切欠き付丸棒試験片及び切欠き付き厚板試験片の引張試験及び大変形弾塑性有限要素解析を行い、以下のような結論を得た。

- ① 引張試験において、丸棒試験片、厚板試験片ともに、内部からの破壊の発生及び切欠き強化がみられた。有限要素解析においても、引張試験と同様に、切欠き強化の傾向が得られた。
- ② ミーゼス応力だけでは多軸応力状態での局部破損を表すには不十分である。これに対し、静水圧応力の分布は、局部破損箇所が内部であることをよく表し、さらに、静水圧応力の大きさは切欠き強化度とよく対応する。
- ③ 以上から、ミーゼス応力に加え、静水圧応力も局部破損の重要な支配因子である。

参考文献

- [1] David A. Osage, P.E., “ASME Section VIII-Division 2 Criteria and Commentary”, The Equity Engineering Group, Inc., 2009.
- [2] 佐藤拓哉, “圧力設備の破損モードと応力”, 日本工業出版, 2013.
- [3] “FEMAP v.9.3.1 ワークブック”, Numerical Simulation Tech Co., Ltd., 2007.
- [4] “FINAS v19.0 使用説明書”, 伊藤忠テクノソリューションズ, 2008.
- [5] “FINAS 解析例題書 (第二版)”, 核燃料サイクル開発機構, 2003.