

ローカルアプローチに基づく等価 CTOD 概念の提案と 継手破壊性能評価への応用

正員 大畑 充* 正員 南 二三吉*
 正員 豊田 政男* 田中 輝幸**
 正員 有持 和茂** A. G. Glover***
 T. H. North****

Equivalent CTOD Concept Based on the Local Approach and Its Application to
 Fracture Performance Evaluation of Welded Joints

by Mitsuru Ohata, *Member* Fumiyoshi Minami, *Member*
 Masao Toyoda, *Member* Teruyuki Tanaka
 Kazushige Arimochi, *Member* Alan G. Glover
 Tom H. North

Summary

In this study, an equivalent CTOD concept was proposed on the basis of the local approach. This concept was born to consider the transferability of 3-point bend CTOD results to fracture performance evaluation of structural components. The equivalent CTOD was defined as the CTOD at which the 3-point bend specimen and the structural component provide the compatible Weibull stress. The fracture performance of a wide plate with a surface notch predicted by the equivalent CTOD concept was consistent with the experimental result. On the other hand, the analysis based on the conventional CTOD concept gave very conservative estimation of the fracture performance of the wide plate.

A new procedure for fracture toughness requirement was presented based on the equivalent CTOD concept. It was pointed out that the equivalent bend CTOD δ_{3P}^e to meet the required deformability of the wide plate was much smaller than the required CTOD δ_{3P}^r for the wide plate. The equivalent CTOD concept was effective to quantify the strength mis-match effect between the base and weld metals on the required fracture toughness of the weld metals. The required weld metal CTOD δ_{3P}^r for the wide plate increased with decreasing the yield strength mis-match ratio σ_y^w/σ_y^b between the base and weld metals. By contrast, the required bend CTOD δ_{3P}^r of the weld metal was not always affected very much by the mis-match condition in welds.

1. 緒 言

従来から、脆性破壊を対象とした構造部材の破壊性能評価に関して、き裂先端開口変位(CTOD) δ と作用ひずみ ϵ_∞ の関係、いわゆる CTOD 設計曲線が工学的に用いられてい

る^{1,2)}。この CTOD 設計曲線は、破壊靱性試験結果からみた構造部材の破壊性能評価のため、また、構造要素の変形性能確保のための材料の必要破壊靱性値の決定のためなどに適用されている。しかし、破壊に先立つき裂先端近傍の塑性変形領域の大きさが部材寸法に比べて無視できなくなると(大規模降伏状態)、CTOD で評価した材料の破壊限界は試験片形状や切欠き長さ、さらに負荷様式の影響を大きく受けることが報告されており³⁾、一般に深い切欠きを有する標準三点曲げ試験片で得られる破壊限界 CTOD は引張り試験で得られる値よりもかなり小さくなる。この結果は、三点曲げ破壊限界 CTOD 値を基準とした構造部材の破壊性能評価は過度に安全側評価となる可能性のあることを指摘している。

* 大阪大学工学部

** 住友金属工業(株)

*** Nova Gas Transmission Ltd. Calgary,
CANADA

**** University of Toronto, CANADA

原稿受理 平成 8 年 1 月 10 日

春季講演会において講演 平成 8 年 5 月 15, 16 日

最近、脆性破壊を対象とした新しい破壊限界評価法としてき裂先端近傍の応力場の影響を考慮したローカルアプローチ^{4,5)}が提案された。ローカルアプローチでは従来の破壊力学パラメータに代わる新たな破壊指標としてワイブル応力 σ_w を導入し、ワイブル応力で評価すると材料の破壊限界は試験片の幾何学的形状や負荷様式には依存しない材料特性値となることが示された⁶⁻⁸⁾。

本研究ではこのローカルアプローチに基づき、構造部材の破壊性能を三点曲げCTOD試験結果から評価するための等価CTOD概念を提案する。この等価CTOD概念の詳細は後に述べるが、三点曲げCTOD試験片と構造部材とが同じワイブル応力を与えるCTODレベルとして定義されるものである。本研究では、構造要素として引張り荷重を受ける広幅溶接継手を取り上げ、等価CTOD概念に基づき三点曲げCTOD試験結果から広幅継手の破壊性能を予測することを行った。さらに、この等価CTOD概念の応用として、継手要求性能確保のための材料の必要破壊靱性値の決定手法を提案し、溶接金属の必要破壊靱性値に及ぼす母材と溶接金属の強度ミスマッチの影響について検討を行った。

2. ローカルアプローチに基づく等価CTOD概念の提案

2.1 等価CTOD概念

先に述べたCTOD設計曲線(き裂先端開口変位 δ と作用ひずみ値 ε_∞ の関係)に基づく構造部材の破壊性能評価法は、CTODがき裂先端近傍の応力場を一義的に支配する力学的パラメータであることを前提としている。しかし、Fig. 1に示すように大規模降伏状態では、き裂先端近傍の応力場は同じCTODレベルにあっても試験片形状の違いによる塑性拘束の影響を大きく受けることが多くの解析的検討によって示された。このような応力場の相違は破壊限界値にも影響を及ぼすことが検証され^{7,8)}、大規模降伏下では従来のCTODは材料の破壊限界評価のための指標として必ずしも用いることができないことが示された。

本研究では、靱性試験で通常用いられる三点曲げCTOD

試験片と主として引張り荷重を受ける構造部材との切欠き先端近傍の応力分布特性の差に注目し、靱性試験結果を構造部材の破壊性能評価に定量的に結びつけるための等価CTOD概念を提案する。従来のCTODに代わるこの新しい概念としての等価CTODは、ローカルアプローチ^{4,5)}で用いられているワイブル応力 σ_w に基づいて評価される。ワイブル応力 σ_w (詳細は後述する)とは、次式で表されるように、切欠き先端近傍の応力分布と高応力域の広がり等を考慮にいたれたパラメータであり、このワイブル応力で評価した材料の脆性破壊限界 $(\sigma_w)_{cr}$ は試験片形状・寸法によらず一義的に決定されることが示されている^{4,5)}。

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_{V_f} (\sigma_{eff})^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

ここで、 V_f :破壊プロセスゾーンの体積、 σ_{eff} :プロセスゾーン内の有効応力(例えば最大主応力)、 m , V_0 :材料定数。Fig. 1は等価CTOD概念を図示したもので、三点曲げCTOD試験片と構造部材とが等しい切欠き先端近傍の応力場、すなわち等しいワイブル応力を与えるCTOD(本研究では曲げ試験片のCTODを基準にする)として等価CTODが与えられる。

2.2 等価CTOD概念に基づく破壊性能評価手法

本研究では、この等価CTOD概念に基づいて三点曲げ破壊靱性試験結果から大型引張り試験片の破壊性能を評価する手順を提案する。Fig. 2はその評価手順を示したものである。まず、三点曲げCTOD試験結果と3次元FEM解析による切欠き先端近傍の応力分布から材料定数である m 値を決定し、三点曲げ試験片のワイブル応力 σ_w とCTOD, δ の関係を算出する。次に大型試験片の3次元FEM解析を実施し、先に得られた m 値を用いて切欠き先端近傍の応力分布から大型試験片のワイブル応力 σ_w と作用ひずみ ε_∞ の関係を算出する。これらの σ_w - δ 関係および σ_w - ε_∞ 関係が得られると、三点曲げ試験片の破壊時の限界CTOD値から、曲げ試験片と大型試験片とが同じワイブル応力を呈する条件より大型試験片の破壊限界作用ひずみ $(\varepsilon_\infty)_{cr}$ が推定できる。

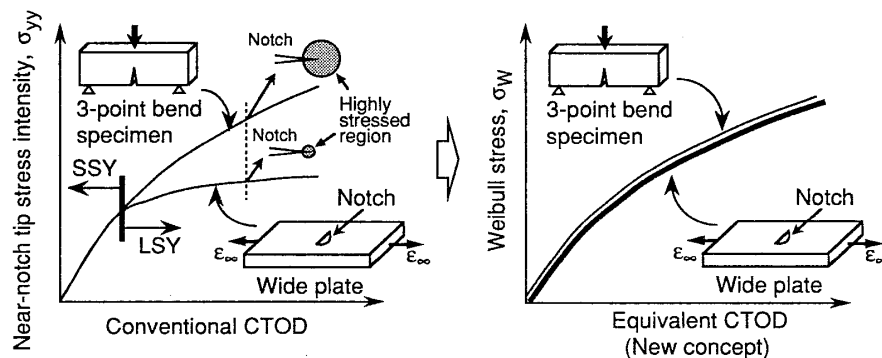


Fig. 1 Equivalent CTOD concept

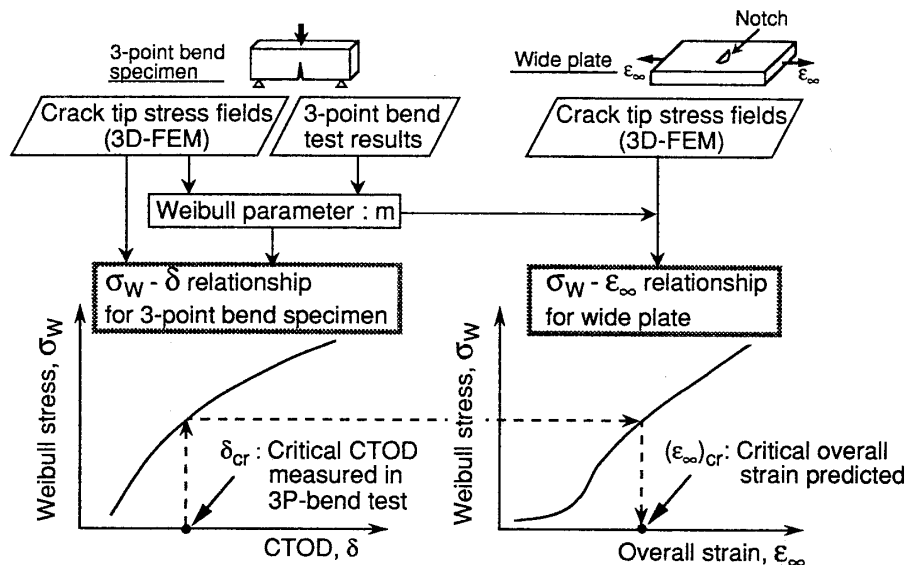


Fig. 2 Procedure for fracture performance evaluation of structural component based on the equivalent CTOD concept

2.3 ワイブル応力

等価 CTOD 概念に基づく構造部材の破壊性能評価のためには、式(1)に示したワイブル応力 σ_w を求める必要がある。ここでは、ワイブル応力算出に必要な基本的情報について説明する。

ワイブル応力 σ_w は、切欠き材の脆性破壊に関する確率的考察（ローカルアプローチ）により導かれたパラメータで、式(1)における脆性破壊に対する有効応力 σ_{eff} はマイクロクラックの空間分布とき裂先端近傍の多軸応力状態を考慮したときには式(2)で表現される⁹⁾。

$$\sigma_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi \left[\sigma_n^2 + \frac{4}{(2-\nu)^2} \tau^2 \right]^{\frac{m}{2}} \sin \theta d\theta d\varphi \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

ここで、 σ_n , τ はそれぞれ、マイクロクラックに作用する垂直応力と面内最大剪断応力、 θ , φ は主応力方向に対するマイクロクラックの傾きである。式(2)の導出においては、多軸応力状態下での破壊クライテリオンとしてエネルギー条件 (coplanar energy release rate concept)¹⁰⁾ が採用されている。

ワイブル応力で評価した材料の破壊限界 ($\sigma_w)_{\text{cr}}$ は、切欠き材の幾何学的因子や負荷様式には依存しない 2 母数 Weibull 分布

$$F(\sigma_w, \text{cr}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_w, \text{cr}}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (3)$$

を呈することが導かれている。 σ_u は材料定数であり、マイクロクラックの寸法分布と材料の破壊エネルギーの関数として与えられる。

このように、ワイブル応力の算出には切欠き先端近傍の応力分布を正確に求めておくことが必要で、本研究では 3 次元 FEM によって応力分布を解析する。また、ワイブル応力算出時の積分計算には、積分を効率よく行うためにガウ

ス積分^{11,12)}を用いることにした。なお、破壊基本体積の V_0 はワイブルパラメータ m には影響を及ぼさないことから、簡便のために単位体積 ($V_0=1$) を採用した。

3. 等価 CTOD 概念の有効性の検証

構造部材として引張り負荷を受ける広幅溶接継手を取り上げ、本研究で提案した等価 CTOD 概念に基づいて、三点曲げ CTOD 試験結果から継手破壊性能を予測することを試みる。このために、三点曲げ CTOD 試験および広幅引張り試験を実施し、さらにこれら両試験片に対して FEM 解析を行った。

3.1 広幅引張り試験および三点曲げ CTOD 試験

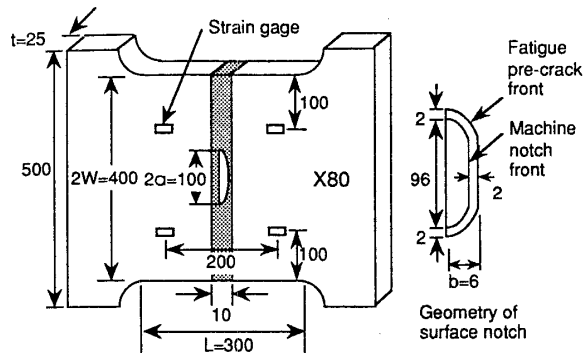
母材として降伏点 550 MPa 級のラインパイプ用高強度鋼 (X 80) を使い、Undermatch 継手、Match 継手、Overmatch 継手の 3 種類の溶接継手を作製した。Table 1 に母材と溶接金属の機械的特性を示す。Overmatch 継手および Undermatch 継手の母材と溶接金属の降伏応力の比 (σ_y^w/σ_y^p) は約 $\pm 10\%$ となっている。本研究ではこれらの継手から広幅引張り試験片と三点曲げ CTOD 試験片を採取し、溶接金属中央部に切欠きを設けた試験を行った。Fig. 3 に試験片形状・寸法を示す。広幅引張り試験片の切欠きは長さ $2a=100$ mm、深さ $b=6$ mm の表面型切欠きとした。曲げ試験片は、試験片幅 W = 試験片厚さ B タイプの正方形断面を有し、 W に対する切欠き長さ a の比 $a/W=0.5$ とした。なお、切欠きは両試験片とも溶接ルート部側に設け、き裂先端には長さ約 2 mm の疲労予き裂を導入した。

試験は地中埋没型パイプラインの最低使用温度に相当する -5°C で実施した。曲げ試験では荷重 P と切欠き末端開口変位 V_g の関係を、広幅引張り試験では荷重 P と試験片表面における切欠き中央部の開口変位 V_g の関係および P

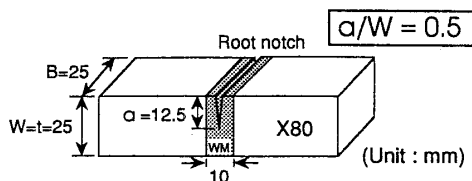
Table 1 Mechanical properties of base metal and weld metals used

		σ_Y (MPa)	σ_T (MPa)	σ_Y^W/σ_Y^B	σ_T^W/σ_T^B	YR (%)	RA (%)	El. (%)	vE (J) (at -5°C)	Position
Base metal (X80)		572	694	-	-	82	67	24	277	Middle of thickness
Weld metal	Overmatch	621	691	1.09	1.00	90	73	28	87	
	Match	581	670	1.02	0.97	87	75	25	58	
	Undermatch	505	601	0.88	0.86	84	75	27	90	

σ_Y : 0.2% proof stress, σ_T : Ultimate tensile strength
 σ_Y^B, σ_Y^W : σ_Y of base metal and weld metal, σ_T^B, σ_T^W : σ_T of base metal and weld metal
 YR: σ_Y/σ_T , RA: Reduction in area, El.: Elongation in G.L.=50, Dia.=12.5 (BM), G.L.=30, Dia.=12.5 (WM)



(a) Wide plate



(b) 3-point bend specimen

Fig. 3 Configuration of specimens with a notch in weld metal used in experiment

と全ひずみ ϵ_∞ の関係を測定した。なお、 ϵ_∞ は広幅引張り試験片の切欠き面から 100 mm 離れた位置 (Fig. 3 参照) の表裏面にひずみゲージを添付して計測した。

Fig. 4 に広幅引張り試験で得られた切欠き末端開口変位 Vg と全ひずみ ϵ_∞ (ひずみゲージの平均出力) の関係を示す。Undermatch 継手および Match 継手の $Vg-\epsilon_\infty$ 関係はほぼ同じであるが、Overmatch 継手の Vg はこれらの継手より明らかに小さくなっている。Match 継手は延性き裂成長後に脆性破壊したが、Undermatch 継手や Overmatch 継手は完全延性破壊を呈した。

Fig. 5 に三点曲げ試験で得られた溶接金属の破壊限界 CTOD を示した。なお、CTOD 値は切欠き末端開口変位 Vg から英国規格 BS 7448¹³⁾ に準拠して算出し、脆性破壊に至るまでの延性き裂成長量 Δa によって破壊形態を分類した (δ_c : $\Delta a < 0.2$ mm のときの脆性破壊限界 CTOD, δ_u : $\Delta a \geq 0.2$ mm のときの脆性破壊限界 CTOD, δ_m : 延性破壊したものの最大荷重時における CTOD)。Match 継手

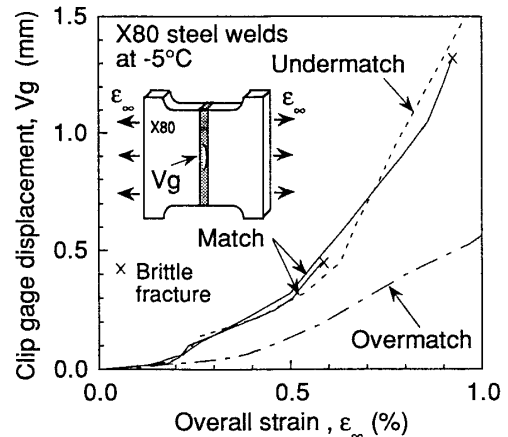


Fig. 4 Deformation behavior of wide plates with surface notch in weld metal

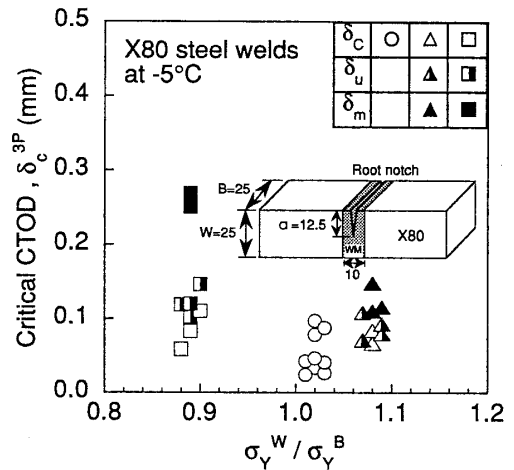


Fig. 5 Three-point bend CTOD results for undermatched, matched and overmatched weld metals

では全ての試験片において脆性破壊を呈したのに対して、Undermatch 継手および Overmatch 継手においては延性破壊を呈するものが見られた。

3.2 FEM 解析

本研究では三点曲げ CTOD 試験結果を広幅溶接継手の破壊性能評価にいかにつなげるかを、ワイブル応力に基づく等価 CTOD 概念によって検討する。このワイブル応力を算出するためには、試験片の切欠き先端近傍の応力場お

よび変形挙動を正確に把握する必要がある。そこで、広幅引張り試験片および三点曲げ CTOD 試験片に対して弾塑性 FEM 解析を行った。広幅引張り試験片に対しては、Fig. 6 に示す 3 次元モデルと、比較のために 2 次元モデルに対しても解析を行った。両モデルとも母材と溶接金属のみから成り溶接金属中央に切欠きが存在する。3 次元モデル (a) では、実験で用いたものと同じ形状・寸法の表面型切欠きを導入した。一方、2 次元モデル (b) においては、表面型切欠きの最大応力拡大係数 K_{max} と同じ K 値を有する等価板厚貫通切欠き¹⁴⁾ を設けた。本実験の条件では等価貫通欠陥寸法 $2\bar{a}$ は 19 mm であった。解析は試験片の対称性を考慮して全体の 1/4 を対象とし、2 次元解析については平面応力および平面ひずみ状態の二種類の境界条件のもとで実施した。また、三点曲げ CTOD 試験片については、実験で用いたものと同じ形状・寸法の 3 次元モデル (全体の 1/4 を対象) を用いて解析を行った。Fig. 7 に、本解析で用いた試験温度 -5°C における母材および溶接金属の真応力・真ひずみ関係を示す。

解析コードとしては J-NIKE 3D (3 次元解析) および J-NIKE 2D (2 次元解析) を用いた。3 次元解析では 8 ガウス積分点を有する 8 節点アイソパラメトリック要素を使用した。広幅引張り試験片の切欠き先端の最小要素寸法は、3 次元モデルでは $0.2 \times 0.2 \times 2.0$ mm, 2 次元モデルでは 0.067×0.067 mm である。

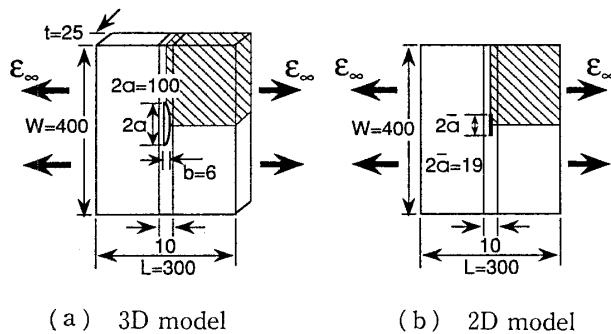


Fig. 6 Models of wide plate specimens used for 3D and 2D FE-analyses

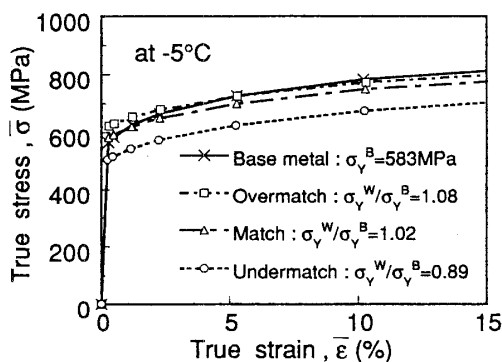


Fig. 7 True stress-true strain curves of materials used in FE-analysis

Fig. 8 は、一例として Match 継手を取り上げて解析で得られた Vg - ϵ_{∞} 関係を実験結果と比較して示したものである。なお、2 次元解析での Vg は切欠き中央での開口変位である。3 次元解析結果は実験結果とよく一致しているが、2 次元解析では平面応力および平面ひずみ状態のどちらの境界条件でも実験値よりも大きな Vg を呈しており、特にこの傾向は 0.2% 以上のひずみレベルにおいて顕著である。この結果は、表面切欠きを有する平板の変形挙動解析のためには等価 K 値概念に基づいて簡易な 2 次元モデルは必ずしも用いることができないことを示している。Undermatch 継手および Overmatch 継手においても Match 継手の場合と同様の結果が得られた。このような結果をふまえ、本研究では以後、3 次元モデルを用いて考察を進める。

3.3 三点曲げ CTOD 試験結果からの広幅溶接継手の破壊性能の評価

3 次元 FEM 解析結果に照らして、三点曲げ CTOD 試験結果から広幅溶接継手の破壊性能を予測する。

Fig. 9 に 3 次元 FEM 解析で得られた広幅引張り試験片の CTOD, δ と全ひずみ ϵ_{∞} の関係を示す。なお、表面切欠きに対する CTOD 値は切欠き中央断面において切欠き末端開口変位 Vg から Tangential-method¹⁵⁾ によって求めた。この δ - ϵ_{∞} 関係を用い、まず従来の CTOD 概念に従って、三点曲げ試験で得られた破壊限界 CTOD 値から広幅引張り試験片の破壊限界ひずみ (ϵ_{∞})_{cr} を推定してみる。従来の CTOD 概念では、Fig. 10 に示すように広幅引張り試験片の δ - ϵ_{∞} 関係から直接得られる三点曲げ試験で得られた破壊限界 CTOD 値 (ばらつきを持つ) に対応する全ひずみ ϵ_{∞} として (ϵ_{∞})_{cr} の推定値が得られる。Fig. 11 に (ϵ_{∞})_{cr} の推定結果を広幅引張り試験の実測値と比較して示す。なお、延性的に破壊した Undermatch 継手, Overmatch 継手では実験データとして最大荷重時における全ひずみ (ϵ_{∞})_{max} をプロットした。これを見ると、従来の CTOD 概念による推定結果は広幅引張り試験片の破壊性能を過度に低く評価していることがわかる。これは、先にも述べたように従来

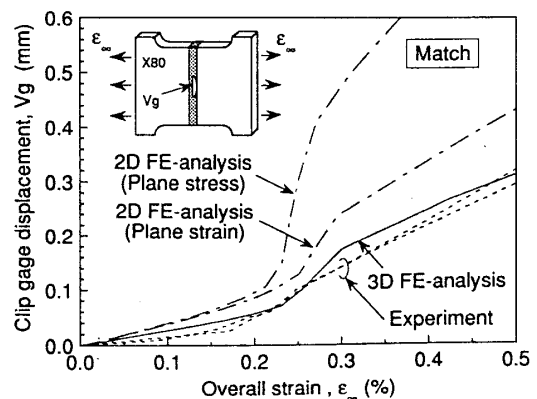


Fig. 8 Vg - ϵ_{∞} relationship obtained by FE-analyses and experiment for matched wide plate

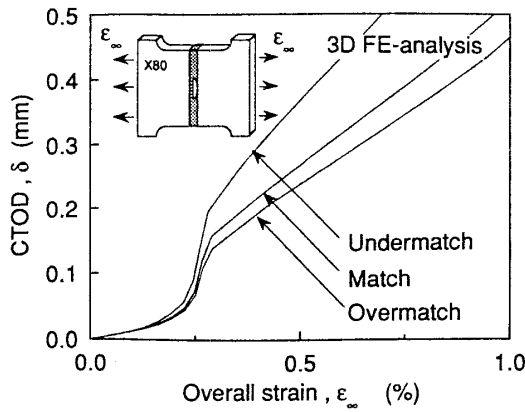


Fig. 9 δ - ϵ_{∞} relation for undermatched, matched and overmatched wide plates obtained by 3D FE-analysis

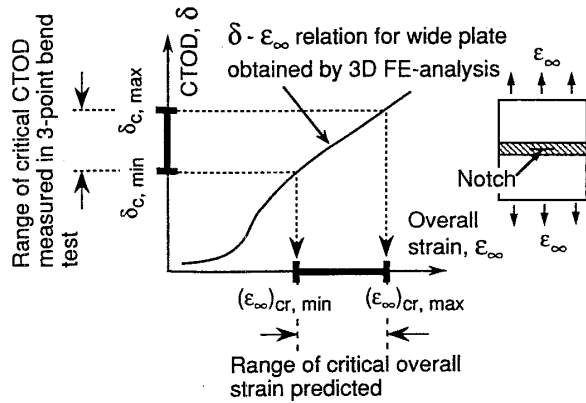


Fig. 10 Procedure to predict critical overall strain $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ of wide plate from 3-point CTOD results based on the conventional CTOD concept

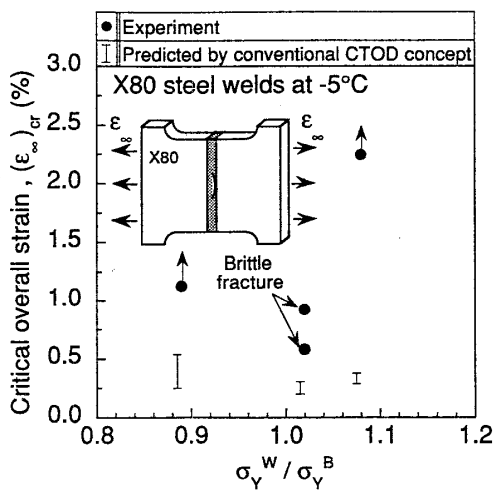


Fig. 11 Comparison between critical overall strain $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ of wide plates predicted by the conventional CTOD concept and that measured in experiment

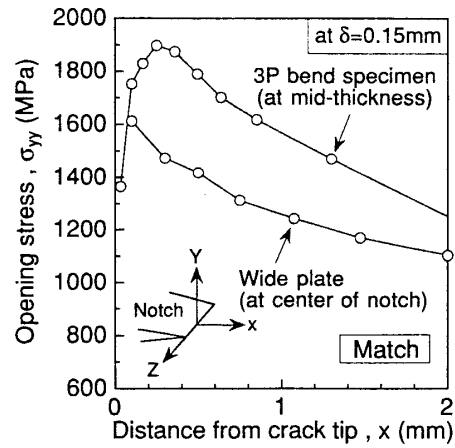


Fig. 12 Distribution of crack opening stress σ_{yy} in the vicinity of crack tip for 3-point bend specimen and wide plate at the same CTOD level

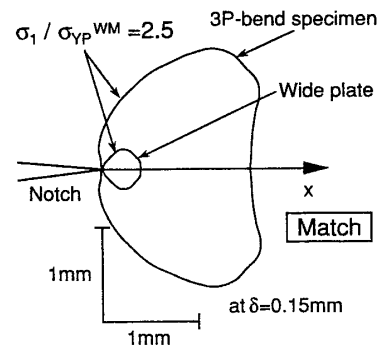


Fig. 13 Contours of $\sigma_1 = 2.5\sigma_{Yp}^{WM}$ around crack tip for 3-point bend specimen and wide plate at the same CTOD level, where σ_1 and σ_{Yp}^{WM} are maximum principal stress and yield point of weld metal, respectively

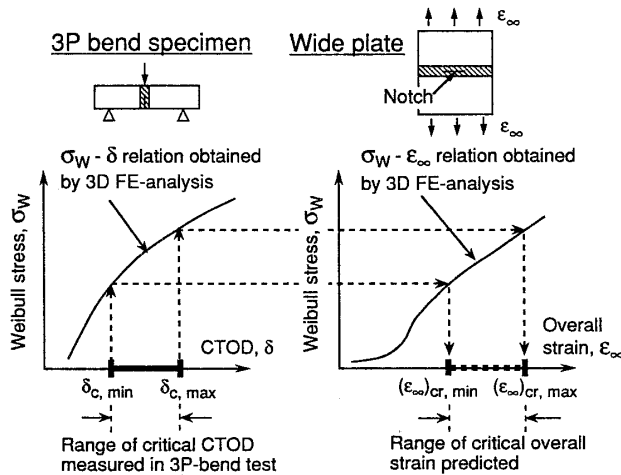
の CTOD は切欠き先端近傍の応力場を一義的に支配していないためである。Fig. 12 に、一例として Match 継手の FEM 解析で得られた広幅引張り試験片と三点曲げ試験片の同一 CTOD レベル $\delta = 0.15 \text{ mm}$ におけるき裂先端近傍の応力分布 (切欠き中央断面でのき裂線上の開口方向応力 σ_{yy} の分布) を示す。CTOD レベルが同一であるにもかかわらず、曲げ試験片の方が広幅引張り試験片より明らかに高い σ_{yy} 値を呈しているのがわかる。また、Fig. 13 は $\delta = 0.15 \text{ mm}$ レベルでの広幅引張り試験片と三点曲げ試験片の切欠き先端近傍の高応力域の広がり (最大主応力 $\sigma_1 = 3\sigma_{Yp}^{WM}$ の等応力線として表示、 σ_{Yp}^{WM} : 溶接金属の降伏点) を比較したものである。き裂先端近傍の高応力域も曲げ試験片の方が広幅引張り試験片よりも明らかに大きくなっている。

そこで本研究で提案する等価 CTOD 概念に基づいて、曲げ CTOD 試験結果から広幅溶接継手の破壊性能を予測する。

Fig. 2 に示す手順に従って、等価 CTOD 概念に基づいて三点曲げ試験結果から構造部材としての広幅引張り試験片

Table 2 Weibull parameters m and σ_u for undermatched, matched and overmatched weld metals

	Shape parameter m	Scale parameter σ_u (MPa)
Undermatch	38.3	1591
Match	27.6	1683
Overmatch	33.1	1828

Fig. 14 Procedure to predict critical overall strain $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ of wide plate from 3-point bend CTOD results based on the equivalent CTOD concept

の破壊限界ひずみ値 $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ を推定するには、両試験片のワイブル応力 σ_w と変形レベルの関係を算出する必要がある。三点曲げ試験結果から求めた溶接金属のワイブルパラメータ m , σ_u を Table 2 に示す。なお、これらの値の決定には文献 6) で提案した繰返し計算法⁶⁾ を用いた。材料定数である m 値が決定されると、広幅引張り試験片のワイブル応力 σ_w と全ひずみ ϵ_{∞} の関係を計算によって求めることができる。Fig. 14 に示す手順に従って、三点曲げ CTOD 試験で得られた破壊限界 CTOD 値の範囲からワイブル応力に基づく等価 CTOD 概念によって推定された広幅引張り試験片の破壊限界ひずみ値 $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ の範囲を Fig. 15 に示す。従来の CTOD 概念による推定結果と比較すると、脆性破壊を呈した Match 継手の $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ の推定範囲は実験結果とよい対応にある。すなわち、従来手法に比べて、等価 CTOD 概念の妥当性が示されたといえる。なお、延性的に破壊した Undermatch 継手、Overmatch 継手の破壊性能評価に対しては、脆性破壊を対象としたワイブル応力に基づく等価 CTOD 概念の適用範囲外であり、き裂成長を考慮した評価が必要である。

4. 等価 CTOD 概念に基づく要求破壊靱性値決定手法

4.1 継手破壊性能確保のための必要破壊靱性値決定手順

以上のように、広幅引張り試験片の破壊性能と三点曲げ

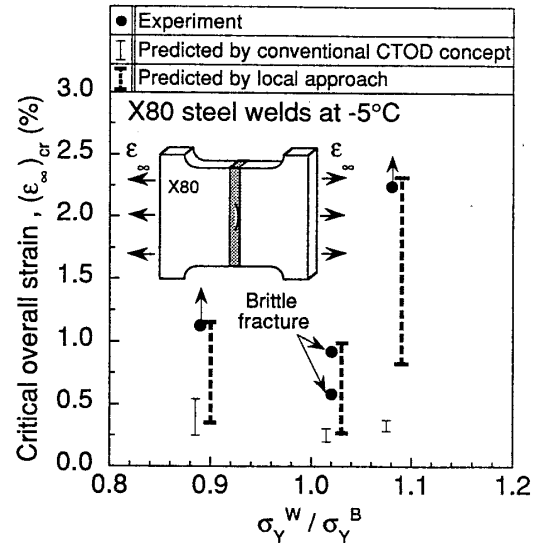
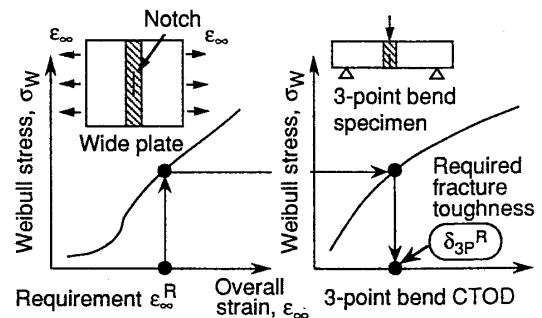
Fig. 15 Comparison of critical overall strains $(\epsilon_{\infty})_{cr}$ of wide plate predicted by the equivalent CTOD concept and the conventional CTOD concept

Fig. 16 Procedure for determining required fracture toughness based on the equivalent CTOD concept

CTOD 試験結果とを量的に関連づける等価 CTOD 概念の有効性が検証された。この等価 CTOD 概念を応用すると、広幅溶接継手の要求破壊性能を確保するための材料の必要破壊靱性値の決定手順(等価 CTOD 概念に基づく新しい要求破壊靱性値決定手法)を導くことができる。Fig. 16 にその要求破壊靱性値決定手順を示す。広幅引張り試験片の作用ひずみ ϵ_{∞} とワイブル応力 σ_w の関係から得られる要求破壊性能 ϵ_{∞}^R に対応するワイブル応力が、三点曲げ CTOD 試験片のワイブル応力と等しくなるときの CTOD 値を必要破壊靱性値 δ_{3P}^R として決定される。

4.2 必要破壊靱性値に及ぼす強度ミスマッチの影響

広幅継手の要求変形性能 ϵ_{∞}^R として、地中埋設パイプラインの敷設時の Girth welds に対する設計基準として用いられている $\epsilon_{\infty}^R=0.5\%$ を例に取り上げ¹⁰⁾、 $\epsilon_{\infty}^R=0.5\%$ を満たすための溶接金属の必要靱性値を本実験で用いたラインパイプ用高強度鋼(X80)溶接継手を対象として計算してみる。

Fig. 3 に示した溶接金属中央部に表面型切欠きを設けた

広幅溶接継手において、Table 3 に示すように切欠き寸法がほぼ一定で板厚 $t=25\text{ mm}$ と $t=12\text{ mm}$ の2種類の引張り試験片を対象として3次元 FEM 解析を実施した。これらの広幅溶接継手の等価貫通欠陥寸法 $2\bar{a}$ は板厚 $t=12\text{ mm}$ の試験片では $2\bar{a}=36\text{ mm}$ 、 $t=25\text{ mm}$ の試験片では $2\bar{a}=19\text{ mm}$ であり、継手寸法に対する相対的な欠陥寸法は板厚 $t=12\text{ mm}$ の試験片の方が $t=25\text{ mm}$ のものよりも大きい。また、靱性試験片としての三点曲げ CTOD 試験片の解析は、Fig. 17 に示すように両試験片とも試験片幅 W (板厚 t) = 試験片厚さ B タイプの正方形断面を有し、 W に対する切欠き長さ a の比 $a/W=0.5$ のものに対して実施した。なお、解析で用いた母材および溶接金属の機械的特性は Fig. 7 に示したものと同一とした。このような条件で、広幅継手の要求変形性能 $\epsilon_{\infty}^R=0.5\%$ を確保するための溶接金属の必要破壊靱性値 δ_{3P}^R に及ぼす母材と溶接金属の強度ミスマッチの影響について検討する。

Fig. 18 は、板厚 $t=25\text{ mm}$ の場合について、三点曲げ試験での溶接金属の必要 CTOD δ_{3P}^R を試算した結果を示したものである。比較のために $\epsilon_{\infty}^R=0.5\%$ を確保するための広幅試験片の必要 CTOD δ_{WP}^R も同時に示した。これを見ると、広幅試験片の必要 CTOD δ_{WP}^R に比べて曲げ試験片の必要 CTOD δ_{3P}^R はかなり小さいことがわかる。なお、溶接金属の必要 CTOD 値は強度ミスマッチの影響を受けており、 σ_Y^W/σ_Y^B (母材に対する溶接金属の降伏応力の比) が小さくなると必要 CTOD 値が大きくなる傾向にある。

板厚 $t=12\text{ mm}$ の場合の試算結果を Fig. 19 に示す。板厚 $t=12\text{ mm}$ の広幅試験片の必要 CTOD δ_{WP}^R は $t=25\text{ mm}$ の場合に比べてかなり大きくなっている。これは、表面切欠きの寸法をほぼ一定として板厚を減少させたことにより、変形拘束度が低下したことによるものと考えられる。一方、三点曲げ試験片の必要 CTOD 値 δ_{3P}^R は本計算条件では逆に板厚 $t=12\text{ mm}$ の方が $t=25\text{ mm}$ の場合よりも小さくなり、引張り試験片と曲げ試験片の必要 CTOD レベルの差が非常に大きくなっている。この Fig. 19 での注目される結果として、板厚 $t=12\text{ mm}$ の三点曲げ試験片の必要

CTOD 値 δ_{3P}^R は $t=25\text{ mm}$ の場合に比べて強度ミスマッチの影響を受けにくい傾向にあることがあげられる。なお、このような要求靱性値 δ_{3P}^R は想定欠陥寸法や強度ミスマッチの影響だけでなく、材料の応力-ひずみ特性にも影響されることが予想される。

本研究では、三点曲げ CTOD 試験結果から溶接継手の破壊性能を評価するには、曲げ試験片と構造部材とのき裂先端近傍の応力分布特性の差を考慮する必要性のあることを指摘し、ワイプル応力に注目した新しい破壊評価法 (等価 CTOD 概念) を提案した。本概念は、き裂先端近傍の応力が支配的でき裂先端からほぼ直接的に脆性破壊を呈する場合を対象としたもので、不安定破壊に至るまでに大きな延性き裂成長が生じるような破壊には本文中でも述べたよう

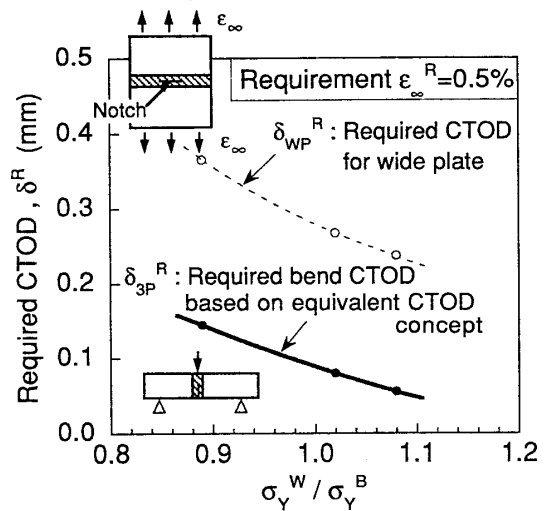


Fig. 18 Influence of strength mis-matching between base and weld metals on required CTOD δ_{3P}^R and δ_{WP}^R to meet design requirement ϵ_{∞}^R

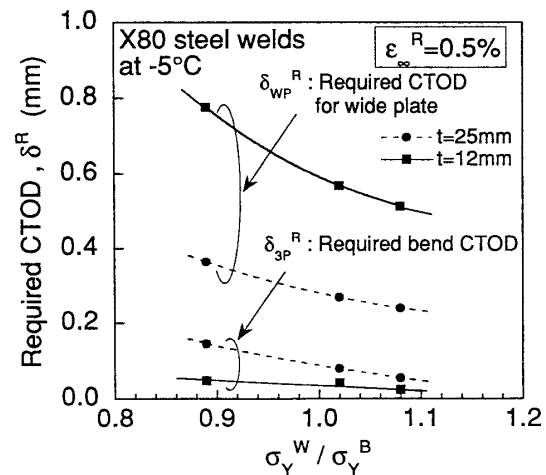


Fig. 19 Influence of strength mis-matching between base and weld metals for specimens with different thickness on required CTOD δ_{3P}^R and δ_{WP}^R

Table 3 Assumed Crack size in welded joint used for FE-analysis

Plate thickness t	Crack length $2a$	Crack depth b	Equivalent crack size $2\bar{a}$
$t = 25$	$4t = 100$	6	19
$t = 12$	$10t = 120$	6	36

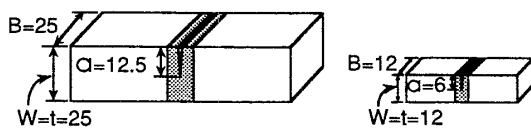


Fig. 17 3-point bend specimens used for 3D FE-analysis

にそのままでは適用できない。き裂成長を考慮したワイブル応力の評価法、実構造で想定される塑性拘束の程度など本手法の実構造への適用にあたって今後さらに検討を重ねていく。

6. 結 言

(1) 本研究では、ローカルアプローチに基づくワイブル応力 σ_w を介して構造部材の破壊性能と三点曲げ CTOD 試験結果とを定量的に関係づける等価 CTOD 概念を提案した。等価 CTOD とは、三点曲げ CTOD 試験片と構造部材とが同じワイブル応力を与える CTOD として定義されるものである。

(2) X 80 鋼溶接継手を対象とした実験的検討および解析的検討を行い、三点曲げ CTOD 試験結果から等価 CTOD 概念によって推定した広幅溶接継手の破壊性能が実験で得られたものとよい対応関係にあったことを示すことにより、等価 CTOD 概念の有効性を検証した。一方、従来の CTOD 概念では推定結果は実測値よりもかなり小さくなる。

(3) 等価 CTOD 概念の応用として、構造要素の要求変形性能 ($\epsilon_{\delta}^{\delta}$) 確保のための必要破壊靱性値の新しい決定手順を導いた。等価 CTOD 概念によって決定される三点曲げ試験片の要求 CTOD 値 $\delta_{\delta p}^{\delta}$ は、 $\epsilon_{\delta}^{\delta}$ を満たすための広幅試験片の要求 CTOD 値 $\delta_{\delta p}^{\delta}$ と比べてかなり低い値を呈する。

(4) 設計要求値 ($\epsilon_{\delta}^{\delta}$) 確保のための三点曲げ試験片の必要 CTOD 値 $\delta_{\delta p}^{\delta}$ は、母材と溶接金属の強度ミスマッチの影響を受け、一般に σ_y^w/σ_y^b (母材に対する溶接金属の降伏応力の比) が小さくなるほど $\delta_{\delta p}^{\delta}$ は大きくなる傾向を示す。しかし、 $\delta_{\delta p}^{\delta}$ の値は溶接継手での想定欠陥寸法の影響を受け、 $\delta_{\delta p}^{\delta}$ が σ_y^w/σ_y^b に必ずしも大きく依存しない場合のあることを示した。

参 考 文 献

- 1) 日本溶接協会 WES 2805-1980: 溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法, (1980).
- 2) Schwalbe, K.-H.: Welded Joints With Non-Matching Weld Metal-Crack Driving Force considerations on The Basis of The Engineering Treatment Model (ETM), International Journal of Fracture, 62, (1993) 1-24.
- 3) Minami, F., Ruggieri, C., Toyoda, M., Arimochi, K., Suzuki, S., Bessyo, K.: Significance of Shallow Notch CTOD Test in Fracture Performance Evaluation of Welded Joint, Proc. 12th Int. Conf. OMAE, Glasgow, 3B, (1993) 761-768.
- 4) Beremin, F. M.: A Local Criterion for Cleavage Fracture of a Nuclear Pressure Vessel Steel, Metallurgical Trans. 14A, (1983) 2277-2287.
- 5) Mudry, F.: A Local Approach to Cleavage Fracture, Nuclear Engineering and Design, 105, (1987) 65-76.
- 6) Minami, F., Bruckner-Foit, A., Munz, D. and Trolldenier, B.: Estimation Procedure for the Weibull Parameter Used in the Local Approach, International Journal of Fracture, 54, (1992) 197-210.
- 7) Ruggieri, C., Minami, F., Toyoda, M., Hagiwara, Y., Inoue, T.: Local Approach to Notch Depth Dependence of CTOD Results, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, 171, (1992) 381-387.
- 8) Minami, F., Ohata, M., Toyoda, M., Arimochi, K., Suzuki, S., Bessyo, K.: Prediction of Specimen geometry Effect on Fracture Resistance of HAZ-Notched Welds by the Local Approach, IIW Doc. X-1300-94, Proc. Workshop on Constraint Effects on the Structural Performance of Welded Joints, Osaka, (1994) 1-10.
- 9) Minami, F., Bruckner-Foit, A., Trolldenier, B.: Numerical Procedure for Determining Weibull Parameters Based of the Local Approach, Preprint of 8th Biennial European Conference on Fracture-ECF8, Torino, 1, (1990) 76-81.
- 10) Paris, P. C., Sih, G. C.: Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and Its Application, ASTM STP, 381, (1965) 30-83.
- 11) Ruggieri, C., Minami, F., Toyoda, M.: Effect of Strength Mismatch on Crack Tip Stress Fields of HAZ-Notched Joints Subjected to Bending and Tension, Jl. Naval. Archit. Japan, 174, (1993) 543-549.
- 12) Gerald, C. F., Wheatkey, P. O.: Applied Numerical Analysis, 4th ed., Addison-Wesley Publication, (1989) 299-336.
- 13) BS7448, Part 1, Fracture Mechanics Toughness Tests, Method for Determination of KIC, Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials, British Standard Institution (1991).
- 14) Newman, Jr. J. C. and Raju, I. S.: An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics, 15, (1981) 185-192.
- 15) Harrison, J. D.: The State-of-the-Art in Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Testing and Analysis, Part 1 - Background and Testing Methods, Metal Construction, 12, (1980) 415-422.
- 16) Minami, F., Ohata, M., Toyoda, M., Tanaka, T., Arimochi, K., Glover, A. G., North, T. H.: The effect of Weld Metal Yield Strength on the Fracture Behavior of Girth Welds in Grade 550 Pipe, Pipeline Technology, 1, (1995) 441-461.