

歪時効による鋼材の靱性変化の評価

A STUDY ON FRACTURE TOUGHNESS PROPERTIES OF STRAIN-AGED STRUCTURAL STEELS

森 好生* 塩崎 正孝** 三木 千寿*** 栗原 正好****

By Yoshio MORI, Masataka SHIOZAKI, Chitoshi MIKI and Masayoshi KURIHARA

Deterioration of toughness caused by strain-aging was studied in this paper using JIS SM41B and SM53B class steel plates. Toughness tests conducted were conventional Charpy impact tests and CTOD (Crack Tip Opening Displacement) tests in accordance with BS5762. Test results showed that both Charpy and CTOD properties tended to deteriorate with an increase in pre-strain. It was confirmed that CTOD value was more susceptible to pre-strain at upper shelf region of transition curve than Charpy absorbed energy at the same region. The correlations between Charpy absorbed energies and CTOD values were examined by applying equations proposed by WES3003G and RTW Committee in order to check the availability of those equations to strain-aged steels. Finally, on the basis of CTOD test results, influences of pre-strain on fracture toughness were analyzed in terms of maximum allowable defect size, as a case study for rationalization of safety assessment on pre-strained structural components.

1. はじめに

橋梁をはじめとする各種構造物に使用される鋼材は、受け入れのままの状態で使用されることはまれであり、曲げ加工などの冷間塑性加工、線状加熱、溶接など、なんらかの加工工程を経て実用に供せられる。これら加工を受けた部位の材質は、母材のままの状態に比べて変化しており、各々の加工方法においてその変化の程度を実験的に検証するか、あるいは法規的に許容値を定めて構造物としての安全性の確保が図られている。

冷間塑性加工による材質の変化に関しては、加工硬化、歪時効脆化の観点よりこれまで検討が加えられており⁽¹⁾、破断延性の低下、靱性の劣化に対して、経験的な実施工データーの蓄積、シャルピー衝撃試験などによる実験の評価に基づいてそれぞれの構造物について許容塑性加工量が定められてきた。例えば道路橋においては、冷間加工の曲げ半径を鋼材板厚の15倍以上(表面歪で3%程度以下)とする規定が採用されている⁽²⁾。また海洋構造物においては、5%以下の表面歪であれば特に考慮を要しないがこれを超える場合については加工後シャルピー衝撃試験を実施するようにとの指導があり⁽³⁾、道路橋より許容される歪量は大きくなっている。一方、近年の鋼材の製造プロセス技術改善による材質の向上さらにより実使用条件を考慮した材質評価手法自体の進歩は、冷間塑性加工量の許容制限をより最適化

* 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 所長 (〒220 横浜市西区高島1-2-5)

** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 建設専門官 (〒220 横浜市西区高島1-2-5)

*** 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

**** 工博 NKK日本鋼管(株) 鉄鋼研究所 主任部員 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

させ得る可能性を有するものであり、その結果構造物の合理的設計・施工や斬新な意匠の導入などが可能となり、その波及効果は大きい。

これまで冷間塑性加工による靱性劣化の実験的評価としては、シャルピー衝撃試験が通常的に用いられており、劣化の程度を母材のままの状態での衝撃特性との相対的比較により評価する手法がとられてきた。シャルピー衝撃試験は最も簡便な靱性評価試験であるが、実構造部材の破壊挙動の解析に直接的に応用できる靱性パラメーターではなく、シャルピー衝撃特性に基づく耐破壊安全性の評価は経験的相関にたよらざるを得ない。この点より、シャルピー衝撃試験は、鋼材選定上の目安あるいは品質管理的な指標として用いられることが現在では多い。

実構造部材の耐脆性破壊安全性を直接的かつ定量的に評価し得る靱性試験としては、近年発展してきた破壊力学に基づく K_{Ic} 試験やCTOD試験(CTOD : Crack Tip Opening Displacement)などがある⁽⁴⁾。 K_{Ic} 試験やCTOD試験は脆性破壊の発生特性を評価する試験であり、得られた破壊力学パラメーターに基づき構造部材中に許容できる欠陥寸法や欠陥の存在を想定した場合の許容力学条件の算定が可能となり、設計時に合理的な安全性検討が行えるのみならず、施工後の保守・点検周期の適切な設定も可能となる。また、CTOD試験は K_{Ic} 試験に比べて非線形領域にまで適用でき、構造部材の実使用温度に近い温度域での評価が行えるなどの利点を有している。したがって、冷間塑性加工による靱性の変化についてもCTOD試験を適用することにより、許容加工量を実使用条件との関連においてより具体的に評価することが可能となる。

本報告では、東京国際空港の沖合展開事業で施工される橋梁群において、景観を考慮して桁あるいは斜張橋の主塔部の鋼材で道路橋示方書の規定以上の曲げ加工を実施することを契機に、使用される構造用40キロ、50キロ級鋼を対象に冷間塑性加工による靱性変化について検討を加えた。試験は従来のシャルピー衝撃試験に加えて新たにCTOD試験を実施し、両試験結果より得られる特性を比較検討すると共にこれまでに提案されているシャルピー衝撃試験結果に基づくCTOD値推定式の歪時効材への適用の妥当性を検証した。さらにケーススタディーとしてCTOD試験結果に基づき、塑性加工量変化の影響を実際の安全性評価の指針となる許容欠陥寸法で示した。

2. 試験方法

試験材はSM41B鋼とSM53B鋼の2鋼種であり、板厚はSM41B鋼で16mm、SM53B鋼で36mmと今回対象とした橋梁に使用されるなかで冷間加工が最も厳しくなる板厚を選んだ。ミルシートに示されたこれら鋼材の化学成分を表1に、機械的性質を表2にそれぞれ示す。冷間塑性加工としては、3%、5%、7.5%の引張予歪を試験片採取前に短冊状に切り出した鋼板の圧延方向に付与し、その後250℃・1時間の時効促進処理を施した。

シャルピー衝撃試験はJIS Z2242に従い、JIS Z2202 4号試験片をその長手方向が予歪方向と一致するように採取加工し、各予歪条件で遷移曲線が得られるよう試験温度を5レベルに設定し、各レベル3本づつの試験片を用い試験を行った。

CTOD試験はBS5762 “Crack Opening Displacement

表1. 試験材の化学成分 (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM41B	0.13	0.21	0.69	0.018	0.004
SM53B	0.16	0.35	1.40	0.014	0.004

表2. 試験材の機械的性質

Material	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EI (%)	vEo°C (kgf-m)
SM41B	35	47	28	19.9
SM53B	42	55	30	28.4

(COD) Testing”⁽⁵⁾の規格に準拠し、全厚試験片をシャルピー試験片と同じくその長手方向が予歪方向と一致するように採取し、板厚貫通ノッチタイプの試験片を加工した。表3に試験片の概略寸法を、SM41B鋼とSM53B鋼のそれぞれについて示す。試験に先立ち機械加工のノッチ先端には疲労き裂を導入し、その後所定の温度条件で3点曲げ試験を行い、破壊発生時の荷重とクリップゲージによるき裂開口量の測定結果よりき裂先端での限界き裂開口変位量(限界CTOD値)を求めた。なお試験温度は、引張予歪量3%、7.5%材については-10℃に設定し、0%と5%材に対しては-10℃を含み遷移曲線が得られるよう設定し、各温度レベルで2本の試験片を用い試験を行った。

シャルピー衝撃試験とCTOD試験を実施した予歪条件を表4に示す。

表3．CTOD試験片寸法

	a	B	W	S	L
SM41B	16	16	32	128	148
SM53B	36	36	72	288	332

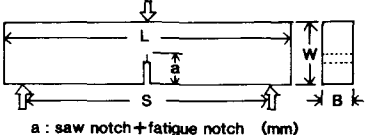


表4．試験項目と予歪量

Test Items	Tensile pre-strain (%)			
	0	3	5	7.5
Charpy impact test	○	○	○	○
CTOD test	-10℃	○	○	○
	full curve	○	—	○

3．試験結果および考察

(1) 予歪量と靱性変化

予歪によるシャルピー衝撃特性の変化を、シャルピー吸収エネルギーの平均値と脆性破面率の平均値をパラメーターとして図1に示す。SM41B鋼、SM53B鋼共に予歪量の増加につれて、エネルギー遷移曲線、破面遷移曲線は高温側へ移行し、靱性が低下していく傾向が認められるが、両鋼材共に7.5%の予歪であっても0℃における吸収エネルギーは20 kgf・mを超えており、JIS G3106に定める規格値2.8 kgf・mに比較し十分大きな値を示している。

図2は、この高温側への移行の程度を、特定温度での吸収エネルギーの平均値と50%脆性破面遷移温度($vTrs$)の変化で示したものである。吸収エネルギーの比較は、脆性破面率がほぼ0%を示すアッパーシェルフエネルギーに近い領域と遷移領域に相当する2温度条件で行い、SM41B鋼では0℃と-30℃、SM53B鋼では-10℃と-40℃とした。SM41B鋼、SM53B鋼共にアッパーシェルフに近い領域では吸収エネルギーの低下は小さく、予歪量0%と7.5%を比較した場合、両鋼材共15%程度の低下にとどまっている。一方、遷移領域では予歪量が3%を超えたあたりから顕著な吸収エネルギーの低下を示し、予歪量0%と7.5%を比較するとSM41B鋼で95%、SM53B鋼で86%も低下し

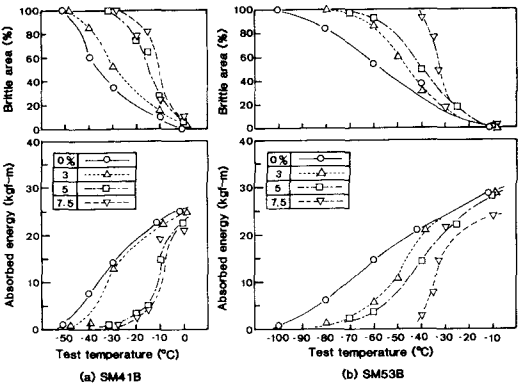


図1．シャルピー衝撃試験結果

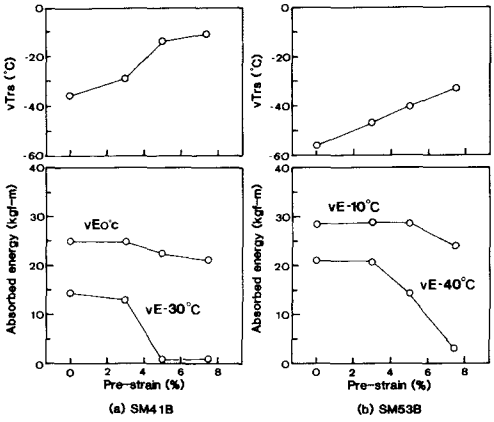


図2．予歪量のシャルピー衝撃特性に及ぼす影響

ている。また50%脆性破面遷移温度は、予歪量の増加に伴いほぼ単調に増加しており、予歪量0%から7.5%へ変化することによる破面遷移温度の上昇分はいずれの鋼材においても25℃前後であった。

CTOD特性に及ぼす予歪の影響を、限界CTOD値と試験温度との関係で図3に示す。限界CTOD値は破壊発生時のき裂先端での開口変位量であり、この値が大きい程耐破壊特性に優れていると評価される。なお限界CTOD値は板厚、初期き裂寸法など試験片形状の影響を受ける値であることより⁽⁶⁾⁽⁷⁾、表3に示したように板厚や初期き裂寸法の異なるSM41B鋼とSM53B鋼の結果を直接的に比較し優劣を判断することは出来ない。図3よりCTOD試験結果においても予歪量の増加につれて限界CTOD値が減少し、靱性が低下していく傾向がそれぞれの鋼材で認められる。限界CTOD値については特に比較となる鋼材規格は無いが、海洋構造物用鋼材に関するAPI RP 2Z "Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures"では、溶接熱影響部に対して試験温度-10℃で限界CTOD値0.25mm以上を要求しており⁽⁸⁾、この値とSM41B鋼とSM53B鋼の予歪量7.5%における-10℃での限界CTOD値とを比較すると、両鋼材とも要求値をクリアする値となっている。図中↑印つきのプロットはき裂開口変位測定用クリップゲージの測定可能範囲の上限に至っても破壊が生じなかった結果であり、試験打ち切り時の荷重-開口変位量関係より限界CTOD値を求めてプロットした。なお、この場合の荷重-開口変位曲線を見ると、試験打ち切り時の荷重は最大荷重点に近い値を示しており、したがって↑印つきのプロットの示す限界CTOD値は、ほぼその試験温度での上限値と見なすことができる。

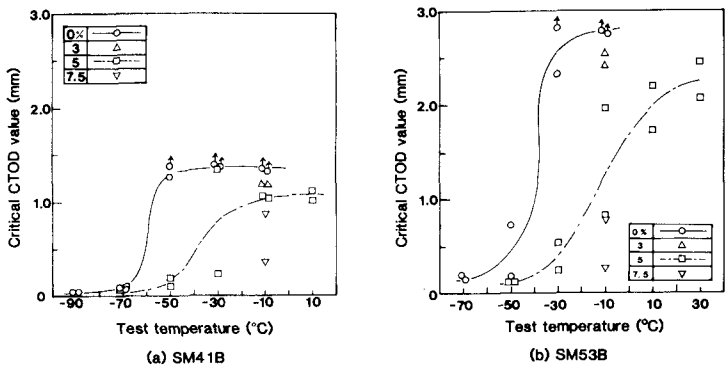


図3. CTOD試験結果

図4は、限界CTOD値の変化を予歪量との関係で、試験温度-10℃、-30℃、-50℃のそれぞれについて示したものである。なお限界CTOD値は各温度での平均値を用いた。ここで第一に特徴的なことは、CTOD遷移曲線のアッパーシェルフ領域と見なせる-10℃の試験温度において、すでに予歪量の増加に伴い限界CTOD値が顕著に低下する傾向が認められることであり、予歪量0%と7.5%を比較した場合、SM41B鋼で50%以上、SM53B鋼で80%以上の低下が示されている。またこの限界CTOD値の低下は予歪量3%程度においてもすでに生じている。これらの傾向は、シャルピー衝撃特性に及ぼす予歪量の影響が、アッパーシェルフに近い領域では吸収エネルギーにさほど変化をもたらさない傾向と大きく異なっている。

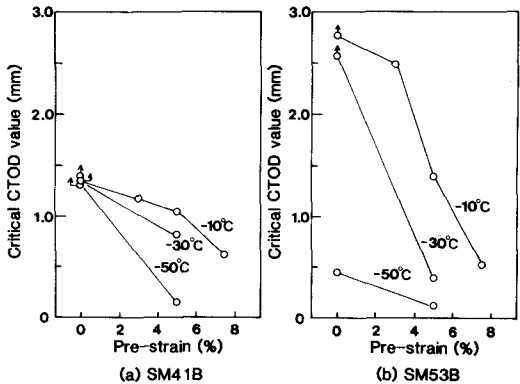


図4. 予歪量のCTOD特性に及ぼす影響

図5はSM53B鋼-10℃でのCTOD試験で得られた荷重－クリップゲージ変位曲線の一例であり、予歪量 0, 3, 5, 7.5%のそれぞれについて示したものである。予歪量の増加につれて加工硬化していく傾向が認められると共に、最大荷重点を示す変位が減少し、残留破断延性が低下していることが示されている。CTOD遷移曲線のアップパースェルフと見なせる領域における破壊がほぼ最大荷重点前後で発生することを考慮すると、予歪量増加によるアップパースェルフと見なせる領域での限界CTOD値の顕著な低下は、この残留破断延性の低下を表現していると考えられる。この点よりCTOD試験の方がシャルピー衝撃試験に比較し、予歪付与による材質変化を靱性を指標としてより総合的に把握し得る評価法であると言える。

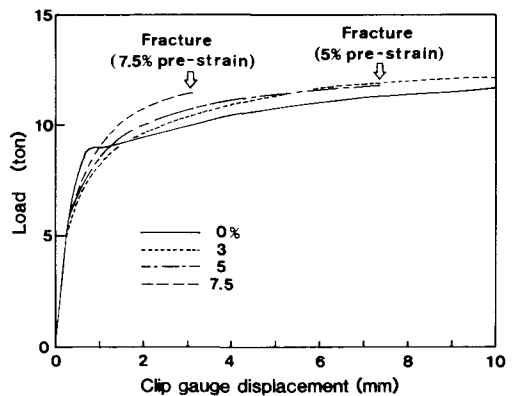


図5．CTOD試験の荷重－クリップゲージ変位曲線（SM53B, -10℃）

（2）シャルピー衝撃試験結果とCTOD試験結果の相関

CTOD試験はシャルピー衝撃試験に比較し、破壊力学に基づく試験法であることからその結果を直接的に実構造部材の脆性破壊安全評価に応用することが可能であるが、その一方、試験片加工や疲労き裂の導入、試験時の測定項目、試験後の解析の各段階においてシャルピー衝撃試験より、コスト、時間、手間のかかる試験となっている。そこでCTOD試験を行わずとも、簡便なシャルピー衝撃試験の結果からCTOD試験の限界CTOD値を推定しようとする試みが母材や溶接部についてこれまでなされており、その結果が取りまとめられている^{(9) (10)}。予歪付与による靱性の変化は前節で述べたように、シャルピー衝撃試験結果とCTOD試験結果とで必ずしも一致した傾向を示すものでないが、シャルピー衝撃試験結果より限界CTOD値を第一近似的にせよ推定出来得るならば、これまでに蓄積されている予歪材に関するシャルピーデーターを新たな観点より再整理、有効利用することも可能となる。また母材や溶接部について得られているこれまでの相関式が、予歪材についてどの程度成り立つものであるか検証することも相関式の適用範囲を拡大する上で役立つと考えられる。そこで本節ではWES3003「低温用圧延鋼板判定基準」G種において採用されている相関式⁽⁹⁾、ならびに最近出された日本溶接協会RTW委員会の提案式⁽¹⁰⁾を用いて本試験結果への適用を試みた。

WES3003G種は、一般的に脆性破壊を考慮する低温にさらされる溶接構造物に使用する鋼板に対するもので、そのシャルピー衝撃特性についての要求は次のシャルピー吸収エネルギーと限界CTOD値との相関式に基づいて導かれている。

$$\delta_c(T) = 0.01 v_E (T + \Delta T) \quad \dots \dots (1)$$

$$\Delta T = 133 - 1.23 \sigma_{Y0} - 6\sqrt{t}$$

ここで、 $\delta_c(T)$: T℃における限界CTOD値 (mm)

$v_E(T + \Delta T)$: T + ΔTにおけるシャルピー吸収エネルギー(kgf・m)

σ_{Y0} : 室温における降伏強度 (kgf/mm²)

t : 板厚 (mm)

(1)式の基本的な考え方は、数多くのデーターをもとにシャルピー衝撃試験とCTOD試験の遷移温度の差を考慮し、その温度差だけ両遷移曲線をずらすことによって限界CTOD値と吸収エネルギーの相関を求めているところであり、また限界CTOD値への板厚効果の影響を $6\sqrt{t}$ の形で取り込んでいる。なお(1)式の適用範囲は、公称降伏強度 $\sigma_{Y0} \leq 70 \text{ kgf/mm}^2$ 、使用温度 $T = 0 \sim -196^\circ\text{C}$ 、板厚 $t = 6 \sim 100 \text{ mm}$ となっている。

図6に(1)式による推定計算結果を実測された限界CTOD値との関係で示す。計算に際しシャルピー吸収エネルギーの値としては、図1に示したエネルギー遷移曲線上の値を用いた。今回得られた試験結果の範囲では限界CTOD値の推定値と実測値とに差が認められ、試験温度の高い、したがって限界CTOD値の大きい領域では安全側の推定結果を与えているが、試験温度の低い限界CTOD値の小さい領域では非安全側の推定結果となっている。この傾向は鋼種、予歪量のちがいにかかわらずデーター全体を通じて認められる。

日本溶接協会RTW委員会では、溶接部を対象にWES3003G種の相関式の問題点をも踏まえ限界CTOD値の推定式として次式を提案している。

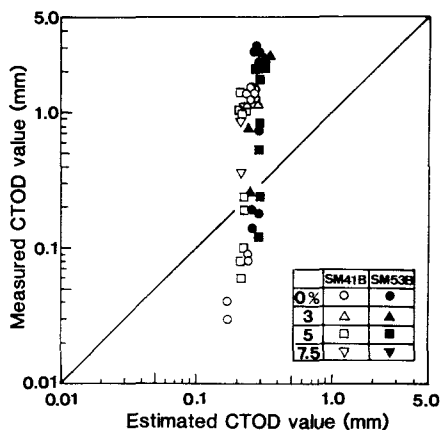


図6．WES3003G種の式による
限界CTOD値の推定

$$\delta_c(T) \cdot \sigma_Y(T) = \alpha [\nu_E(T + \Delta T)]^\beta \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $\delta_c(T)$: $T^\circ\text{C}$ における限界CTOD値 (mm)

$\sigma_Y(T)$: $T^\circ\text{C}$ における母材降伏強度 (kgf/mm²)

$\nu_E(T + \Delta T)$: $T + \Delta T$ における板厚内の平均的シャルピー吸収エネルギー(kgf・m)

$$\Delta T = \begin{cases} 134 - 30\sqrt{t} & (t \leq 30 \text{ mm}) \\ -30 & (t > 30 \text{ mm}) \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} 7.48 - 0.1\sigma_{Y0} & (\sigma_{Y0} \leq 36 \text{ kgf/mm}^2) \\ 1.0 & (\sigma_{Y0} > 36 \text{ kgf/mm}^2) \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} -0.027 + 3.13 \times 10^{-2} & (\sigma_{Y0} \leq 36 \text{ kgf/mm}^2) \\ 1.1 & (\sigma_{Y0} > 36 \text{ kgf/mm}^2) \end{cases}$$

σ_{Y0} : 母材公称降伏強度 (kgf/mm²)

RTW委員会の提案式は、CTOD試験より得られる限界CTOD値がき裂先端での変形能を示すパラメーターである一方、シャルピー吸収エネルギーは強度の効果をも含むパラメーターであるという差異に着目し、限界CTOD値に母材の降伏強度を乗ずることによってこの差異を補完しようと試みたものである。

(2)式の適用範囲は、公称降伏強度 $\sigma_{yo}=24\sim70$ kgf/mm²、使用温度 $T\geq -60^{\circ}\text{C}$ 、板厚 $t=15\sim90\text{mm}$ となっている。

図7に(2)式による限界CTOD値の推定計算結果を実測値との比較で示す。SM41B鋼7.5%予歪材-10°Cの試験結果の1点を除き、他の推定値はいずれも実測値より小さめの値、すなわち安全側の推定結果となっており、限界CTOD値が小さくなる程、より安全側の推定を与える傾向にある。図7よりRTW委員会の提案する限界CTOD値推定式は、溶接部のみならず予歪付与による靱性変化についても第一近似的に適用可能であることが認められるが、今後さらにデータ数を増やし推定式としての精度向上を図ることも必要であることが同時に認められる。

(3) 許容欠陥寸法

CTOD試験より得られる限界CTOD値に基づき、実構造部材の使用条件下における許容欠陥寸法あるいは許容力学条件を算定する評価手法の一つに、わが国ではWES2805「溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法」がある⁽¹¹⁾。WES2805ではき裂開口変位量 δ と欠陥特性寸法 $\bar{a}$ 、欠陥に作用する歪値 e との間に次式の関係が成立するとしている。

$$\delta = 3.5 \bar{a} e \quad \dots \dots (3)$$

ここで欠陥特性寸法 $\bar{a}$ は、表面欠陥や内部欠陥などの3次元板厚非貫通欠陥をそれと等価な2次元板厚貫通欠陥に換算して得られる貫通欠陥半長であり、歪値 e は設計応力、欠陥の存在形態、溶接部の場合には溶接残留応力や継手形状による歪集中を考慮し

て計算される力学条件である。そしてCTOD試験より得られる材料の限界CTOD値 δ_c と使用条件より計算される δ とを比較し、 $\delta_c > \delta$ を満足するなら検討対象とした欠陥は脆性破壊を起こさないと判定する。

図8は、本試験より得られた限界CTOD値の実測データの平均値に基づいて、(3)式により許容最大欠陥特性寸法をケーススタディーとして計算した結果である。ケーススタディーに際し、欠陥形態としては実構造部材中に存在する可能性の最も高いと考えられる表面欠陥を想定し、温度条件は各予歪量について共通してデータが得られている-10°Cに設定した。また力学条件としては降伏強度に等しい引張応力が働く場合と、曲げ応力が働く場合の2ケースを選んだ。なお現状データのあるのが母材部であることより、溶接残留応力ならびに継手形状による歪集中は力学条件の内に取り入れていない。図8より予歪量の増加につれて許容最大欠陥特性寸法 $\bar{a}$ が減少していく傾向が示されており、引張応力が働く場合の方が、曲げ応力の場合に比較し許容最大欠陥寸法が小さくなることも認められる。

欠陥特性寸法 $\bar{a}$ は板厚貫通欠陥の欠陥半長を表すパラメーターであり、これと等価な表面欠陥の寸法

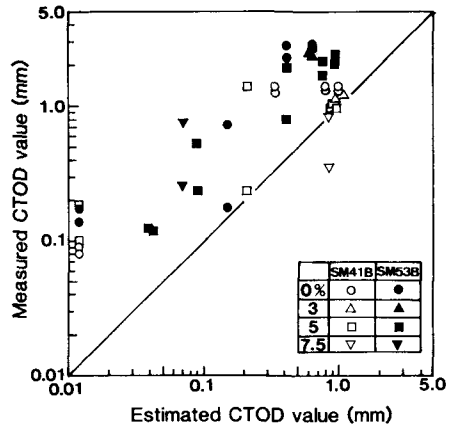


図7. RTW委員会の提案式による
限界CTOD値の推定

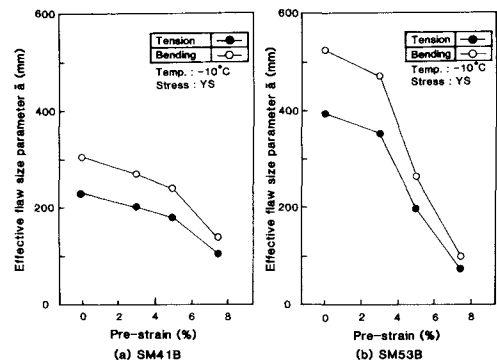


図8. 予歪量と許容欠陥特性寸法との関係

は、板厚貫通欠陥で計算される破壊力学パラメーター応力拡大係数K値と等しいKの最大値を有する表面欠陥を求めることにより与えられる。中央き裂型の板厚貫通欠陥に関する応力拡大係数K値は次式により計算される⁽¹²⁾。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a \cdot \sec(\pi a / W)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここでσは応力、aは欠陥半長、Wは欠陥を含む板の幅である。一方、表面欠陥のK値の基本形は次のように表される⁽¹³⁾。

$$K = \sigma \sqrt{\pi b / Q} \cdot F(b / t, b / a, a / w, \phi) \dots \dots \dots (5)$$

ここでa、bは表面き裂の半長と深さであり、tは板厚、wは板の半幅である。またQは楕円の形状係数、φはき裂前縁上の任意の点に対する離心角である。

図9は、(4)式に図8で示されているCTOD試験の実測値に基づく引張応力下での許容最大欠陥特性寸法aを代入して応力拡大係数K値を計算し、それと等しいKの最大値を有する表面欠陥の形状を(5)式による繰り返し計算により求めて欠陥深さと欠陥半長の関係で示したものである。表面欠陥の深さが増すにしたがい欠陥半長は減少し、板厚貫通欠陥の許容最大欠陥特性寸法に近づく。一方表面欠陥の深さが浅くなると許容欠陥半長は増加し、最終的に欠陥の深さは2次元片側欠陥における許容最大欠陥深さに漸近していく。図9より、予歪量の増加につれて許容表面欠陥寸法は減少していく傾向にあるが、本ケーススタディーの条件下では、予歪量が7.5%であっても板厚の半分程度以下の深さの表面欠陥であれば欠陥長さに関係無く許容できることが認められる。

本節では予歪付与による靱性の低下を許容欠陥寸法で表現したが、また(3)式の形が示すように、欠陥特性寸法をあらかじめ想定すれば許容力学条件で表現することも出来、CTOD試験に基づくことにより構造部材の使用条件に即した許容予歪量の靱性面からのより合理的な判断が可能となる。

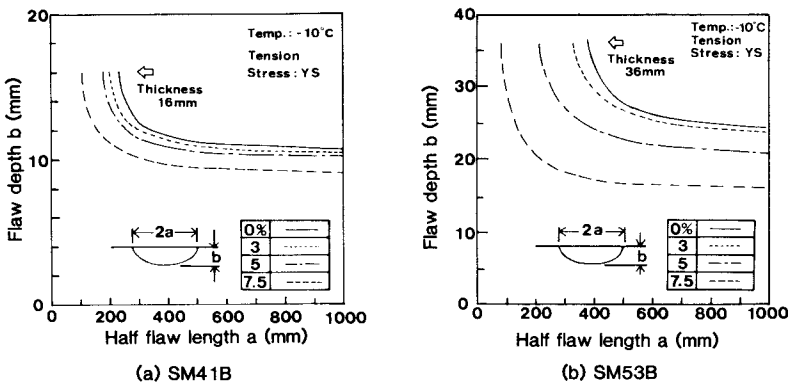


図9．予歪量と許容表面欠陥寸法との関係

4. まとめ

本報告では、冷間塑性加工が構造用鋼材の靱性に及ぼす影響を、破壊力学パラメーターの1つであるCTOD特性の変化に着目して検討を加えた。試験対象とした鋼材はSM41B鋼とSM53B鋼であり、これらに最大7.5%の引張予歪を付与し試験に供した。得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 予歪量の増加につれてCTOD試験より求まる限界CTOD値は減少し、この靱性低下の傾向はCTOD遷移曲線のアッパーシェルフと見なせる領域においても認められた。一方、従来歪時効材の評価に一般的に

用いられてきたシャルピー衝撃試験の結果では、吸収エネルギーのアップーシェルフに近い領域ではエネルギーの顕著な低下は認められなかった。鋼材の実使用温度に近いアップーシェルフと見なせる領域における限界CTOD値の低下は、残留破断延性の低下に対応するものであり、CTOD試験の方が予歪付与による材質変化を靱性を指標としてより総合的に評価し得る試験であることを示唆する結果である。

(2) CTOD試験より得られる限界CTOD値を簡便に推定する可能性を歪時効材についても調べることを目的に、CTOD試験結果とシャルピー衝撃試験結果の相関を、これまで母材、溶接部について提案されているWES3003G種ならびにRTW委員会の式を用いて検討した。その結果RTW委員会の式が概ね安全側の推定結果を与えることが明らかとなったが、さらに精度向上を図る必要性も認められた。

(3) CTOD試験に基づくことにより、冷間加工による塑性歪量を靱性面よりどの程度まで許容し得るかが合理的に判断可能となることを、予歪量と限界CTOD値より導かれる許容欠陥寸法の算定結果との関係で示した。本ケーススタディーでは予歪量が7.5%より小さい場合、母材部では板厚の半分程度以下の深さの表面欠陥であれば、-10℃で降伏強度近い引張応力が働いても脆性破壊発生の危険性の低いことが示された。現行、道路橋示方書冷間加工15tの規定について検討するには、さらに試験材の鋼種、板厚、溶接部を含む試験条件の範囲を広げデータの蓄積を図っていくことが必要と考えている。

参考文献

- 1) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化，土木学会論文報告集，p.13，第300号，1980年8月．
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編，昭和55年．
- 3) Department of Energy：Guidance Notes for the Design and Construction of Fixed Offshore Installations，1984 Draft．
- 4) 例えば金沢 武ほか：脆性破壊2，破壊力学と材料強度講座-8，培風館．
- 5) British Standard：Crack Opening Displacement (COD) Testing，BS5762-1979．
- 6) 萩原行人，宮本志郎：極厚材の破壊靱性値に及ぼす力学的板厚効果，鉄と鋼，p.647，第69年(1983)，第6号．
- 7) Kozasu, I., Watanabe, I. and Suzuki, M.: Significance of Coarse Grain Haz Toughness against Brittle Fracture, Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 1987, Houston.
- 8) American Petroleum Institute: Recommended Practice for Preproduction Qualification for Steel Plates for Offshore Structures, API RP 2Z, 1987.
- 9) 日本溶接協会：低温用圧延鋼板判定基準，WES3003-1983．
- 10) 日本溶接協会：溶接部靱性要求指針に関する研究，鉄鋼部会技術委員会RTW委員会，昭和62年．
- 11) 日本溶接協会：溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法，WES2805-1980．
- 12) 例えば岡村弘之：線形破壊力学入門，破壊力学と材料強度講座-1，培風館．
- 13) Newman, J.C. and Raju, I.S.: Analyses of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578, 1979.

(1989年10月2日受付)