

### 3、試験研究

#### 3-1 試験概要

2項の「現状調査結果」から分かるように、橋梁に用いる構造用鋼材における曲げ加工材の靱性値については、歪時効の影響により靱性値が低下するものの、材料品質が向上している事や、JIS規格のシャルピー値より破壊力学的なCTOD値の方がより靱性値の評価に対して優位であることが、近年の研究より明らかになってきており、これらによる検討を行えば、現在の規定（道路橋示方書）である3%歪の緩和も十分可能と考えられる。

よって、今回の試験研究としては歪時効材の靱性値を「シャルピー試験」と「CTOD試験」の両方を実施し、鋼材の靱性値の研究ならびにシャルピー値とCTOD値の関係等を研究する事とした。

#### 3-2 試験計画

試験は、構造用鋼板の中で靱性値の低い非調質鋼のSM400BとSM490YBを用いる事とした。また、試験材の品質としては、出現率の可能性が少ない靱性値の低い材料で行う事とした。目的は、JIS規格値近傍の品質の材料でも歪量規定の緩和が可能かを調べる為とした。

また、鋼材に与える余歪はロール方向に0%、3%、7.5%とし、歪時効促進の熱処理（250°C-1H）を実施し、試験片の製作（ロール方向）を行う事とした。

試験は、「シャルピー試験」と「CTOD試験」を実施し、試験温度は+20°C~-70°Cの範囲で行う事とした。

試験のフローは図3-1 試験フロー図参照

### 3-2-1 試験フロー

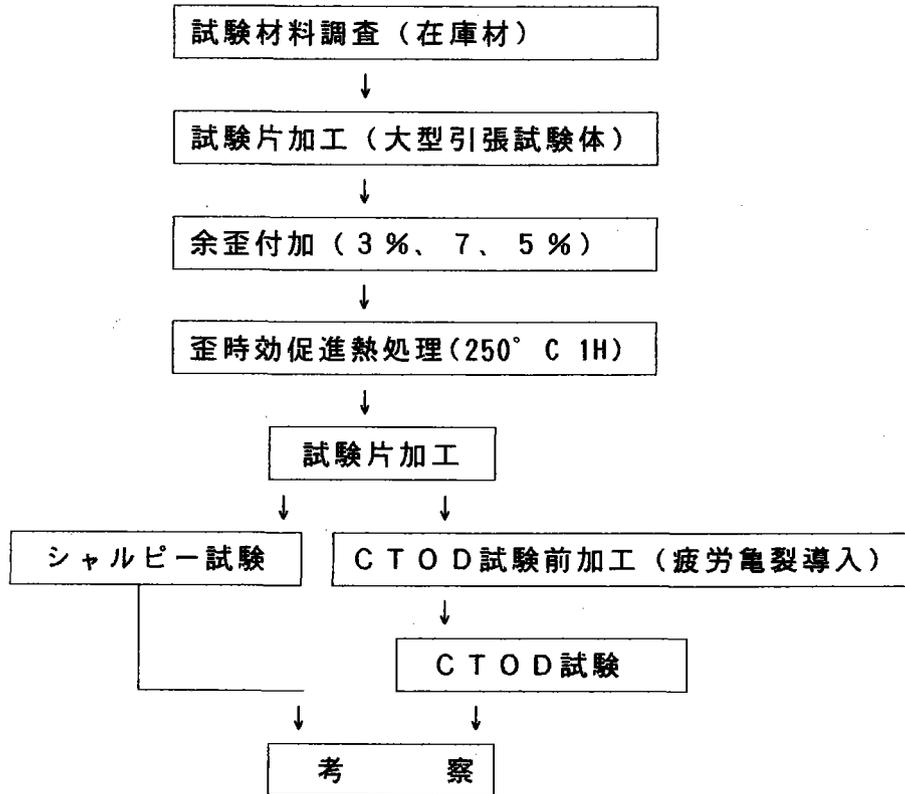


図 3-1 試験フロー図

### 3-2-2 試験材料

試験材料は、以下のグレードの材料で行う事とし、鋼技研メンバー各社における在庫材の中の適した材料にて行う事とした。

表 3-1 試験材料規格 (案)

試験材料シャルピー値	在庫材調査結果
49 J 以下	—
98 J 程度	—
147 J 程度	在庫材 156J有(*)

(\*): SM490YB(t=19)

(1) 予備試験材料

各社の調査結果、在庫材料には計画案通りの低い材料はSM490YB(t=19)156Jの在庫材のみであった為、この材料でとりあえず予備試験を行うこととした。

(2) 本試験材料

本試験用材料調査を引き続き行ったが、在庫材で本試験用に適した材料を探し出す事が非常に困難と分かった為、熱処理等で靱性値をコントロールした鋼材を、ニューロールする方針に変更した。

しかしながら、理論どりの低く均一な試験に適したグレードの靱性値を与える事は、鋼材スラブ自身の当初より持つ品質問題もあって、非常に困難な事である事が試行錯誤のうえ判明した。

よってSM400B規格で表3-2(上段)の靱性値(231J)をもつニューロール材料を用いる事とした。

また、この時期において丁度某ミルメーカーで、JIS規格は満足するも、非常にシャルピー値の低い材料(SM490YB-40J)ができ、社内基準で出荷を見合わせた材料があったため、今回の試験用として入手した。(表3-2下段材料)

表3-2 本試験材料の規格

規格	シャルピー	Y.S.	T.S.	伸び	C	Si	Mn	P	S
SM400B	231J	282	439	33	0.11	0.17	1.17	.021	.004
SM490YB	40J	432	584	24	0.17	0.44	1.37	.025	.004

板厚 SM400B・・・t=22mm

” SM490YB・・・t=19mm

### 3-3 試験実施

#### 3-3-1 試験実施要領

予備試験および本試験の実施は、在庫材等の制約条件で表3-3の要領で実施する事とした。

表3-3 試験要領総括表 (単位：本数)

試験区分		予備試験		本 試 験					
		SM490YB		SM400B			SM490YB		
試験温度		0 %	7.5%	0 %	3 %	7.5%	0 %	3 %	7.5%
シャルピー試験	-70	2	-	-	-	-	-	-	-
	-50	3	3	3	3	3	3	3	3
	-30	3	3	3	6	3	3	3	3
	-15	3	-	-	-	-	-	-	-
	-10	-	-	3	3	6	3	3	3
	0	3	3	3	3	3	6	3	3
	20	3	3	-	-	-	-	-	-
CTOD 試験	-50	3	3	3	2	2	2	2	2
	-30	3	3	1	2	1	3	2	2
	-15	-	-	-	-	-	-	-	-
	-10	3	3	2	3	3	2	2	2
	0	3	3	2	2	2	2	3	3
	20	-	0	-	-	-	1	1	1

#### 3-3-2 試験片加工

試験材より、ロール方向に歪付加用の大型試験片(図3-2)の製作を行い、万能試験機にて、所定の歪を付加した後、所定の温度(250° 1H)で歪時効促進の熱処理を行った。この後図3-2の部分よりシャルピー試験片とCTOD試験の製作を行った。試験片形状は図3-3および3-4に示す。

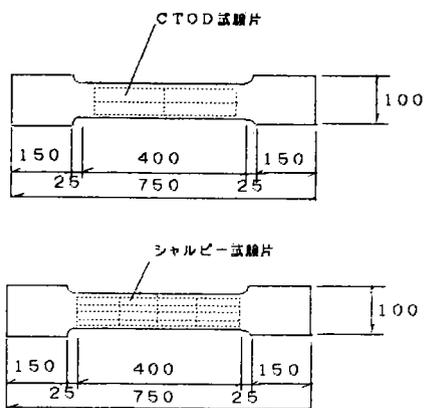


図 3-2 試験片採取位置 (大型試験片)

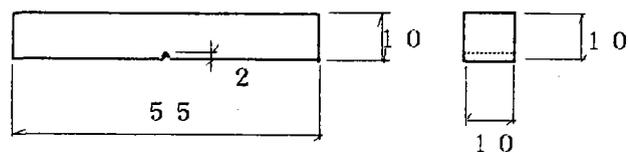


図 3-3 シャルピー試験片形状 (JIS Z 2202)

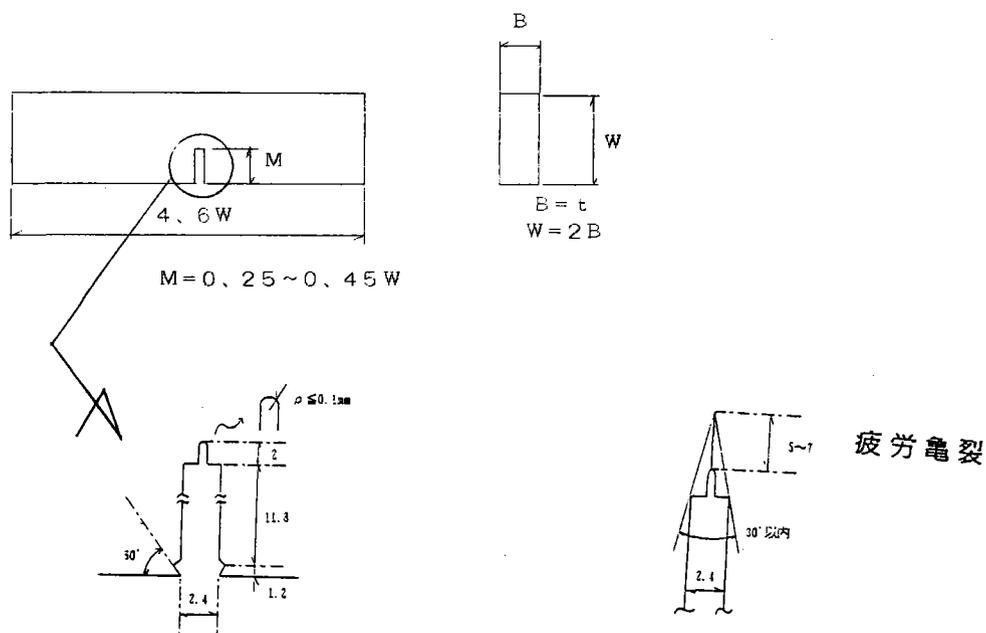


図 3-4 CTOD試験片形状 (BS 5762-1979)

CTOD試験片への疲労亀裂導入、ならびにCTOD試験概要については添付資料参照。

### 3-4 試験結果

予備試験、本試験結果は以下の通り。

#### 3-4-1 予備試験結果

SM490YB材における、0%および7.5%歪材の試験結果は以下の通り。

##### (1) シャルピー試験結果

予歪7.5%の歪時効材のVEの落ち幅は、 $-25^{\circ}\text{C}$ 以上において30~40%程度であり $-27^{\circ}\text{C}$ 以上で27.5Jを満たしている。

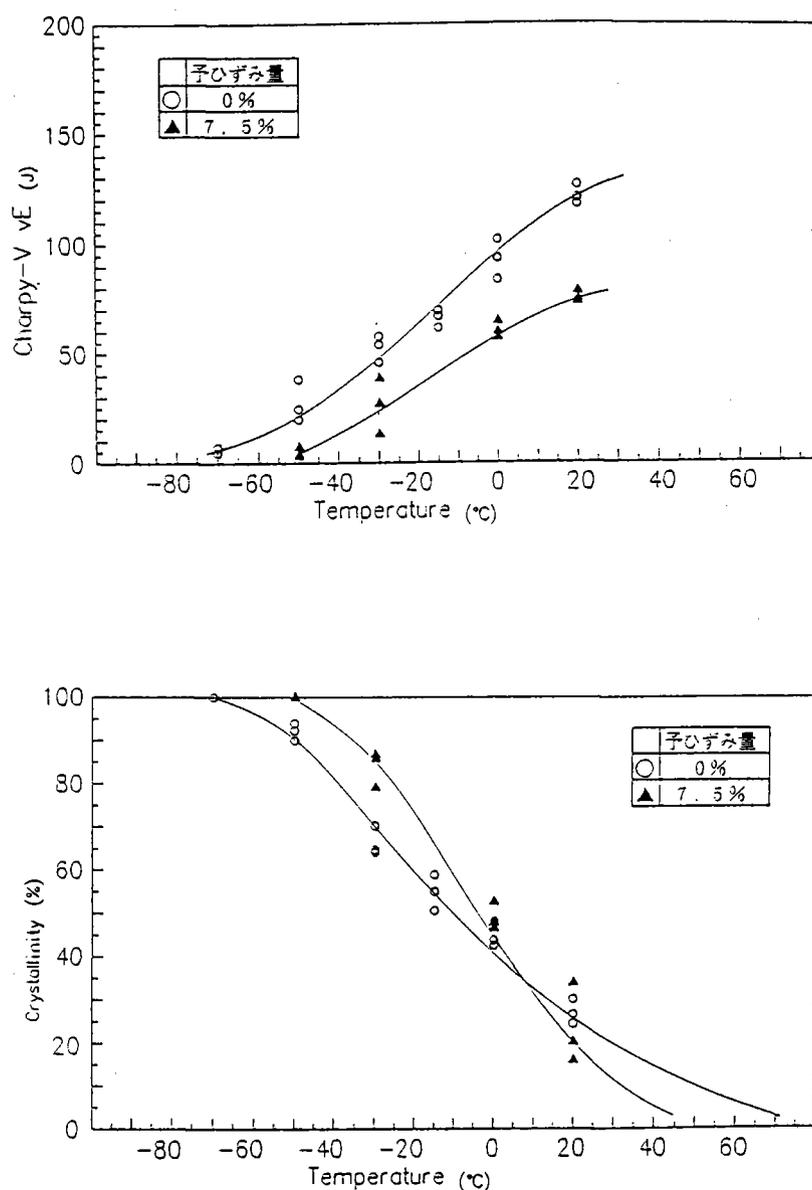


図3-5 シャルピー試験結果（予備試験結果）

(2) CTOD試験結果

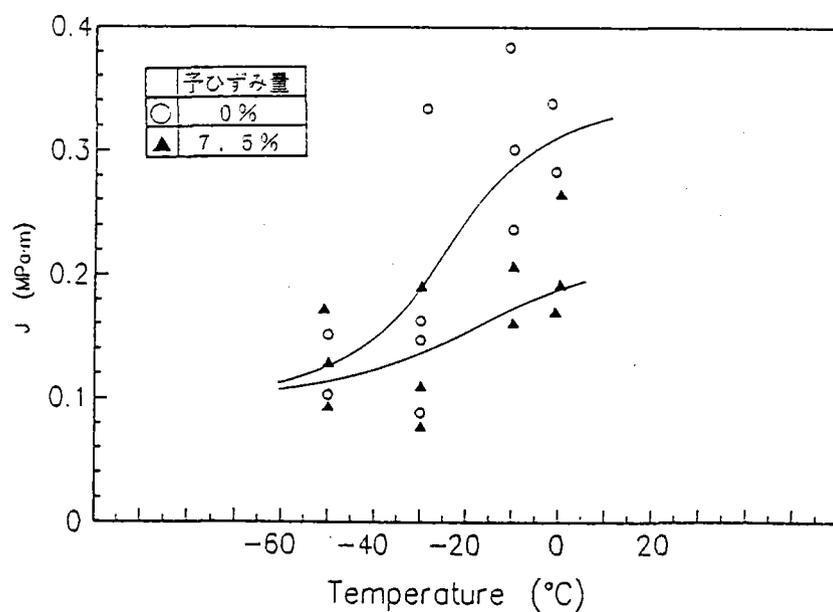
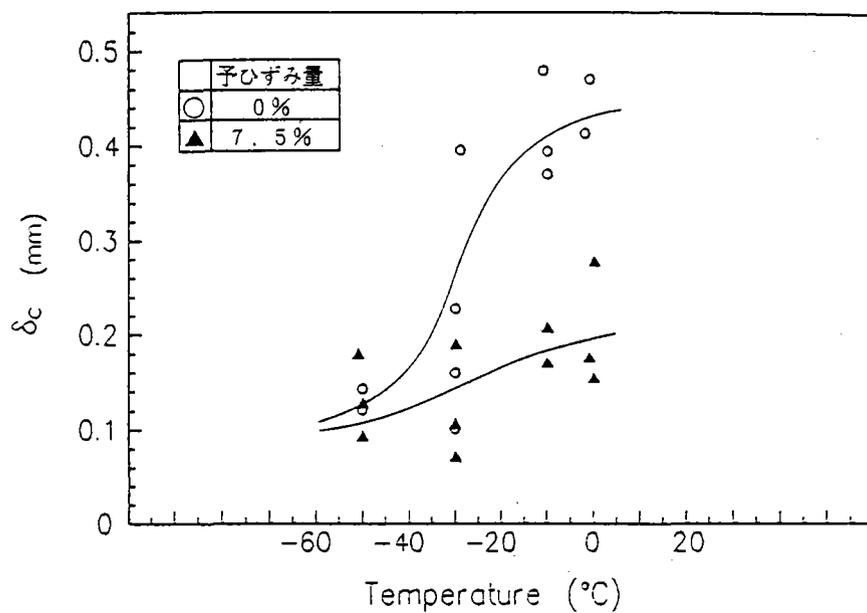


図3-6 CTOD試験結果(予備試験結果)

個々のCTOD試験(荷重-荷重点変位)結果は巻末資料参照

### (3) 予備試験のまとめ

予備試験の検討結果は以下の通り。

- ① シャルピー試験7.5%歪時効によるVEの落ち幅は $-25^{\circ}\text{C}$ 以上において30～40%であり、 $-27^{\circ}\text{C}$ 以上でJIS規格(27.5J)を満たしている。

図3-5参照

- ② CTOD値の評価基準として、海洋構造物に関する規定「API PR 2Z」に $-10^{\circ}\text{C}$ で0.25mmがある。また、WES 2805では欠陥特性寸法と欠陥に作用するひずみからCTOD要求値( $\delta$ )を算出する事が提案されている。

$$\delta = 3.5 \times e \times a \quad (e : \text{歪}, a : \text{欠陥性寸法})$$

この式を用い構造物から検出された欠陥より $\delta$ を算出し、試験より得られた限界CTOD $\delta_c$ と比較して $\delta_c$ が $\delta$ より大きければその欠陥は許容される。

歪時効による靱性の劣化度を限界CTOD $\delta_c$ にて、上式を用いて許容最大欠陥寸法を計算すると、図3-7のようになる。

なお、欠陥特性寸法は板厚貫通欠陥の欠陥半長であるため、これと力学的に等価な表面欠陥寸法になおすため、板厚貫通欠陥の応力拡大係数Kと表面欠陥のKが等しくなるよう繰り返し計算を行った結果が図3-8である。

$$(\text{板厚欠陥}) \quad K = \sigma \sqrt{\pi b} \cdot \sec(\pi a/w)$$

$$(\text{表面欠陥}) \quad K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Q \cdot F(a/t, a/b, b/W, \phi)$$

$\sigma$  : 応力、 $a$  : 欠陥深さ、 $b$  : 欠陥半長、 $Q$  : 楕円欠陥形状係数

$\phi$  : 亀裂前縁上の点に対する離心角

これによると、亀裂長さ50mmにおいて予歪7.5%を与えても、14mm以下の欠陥を許容する。また、亀裂長50mm以上でも板厚の3/5以下の亀裂深さであれば、予歪7.5%与えても十分な靱性を保っているといえる。

- ③ CTODとVEの相関については、WES 3003G種と日本溶接学会RTW委員会の推定式があるが、試験結果との比較では、RTW委員会の推定式がより相関性が高いと思われる。 図3-9、-10参照

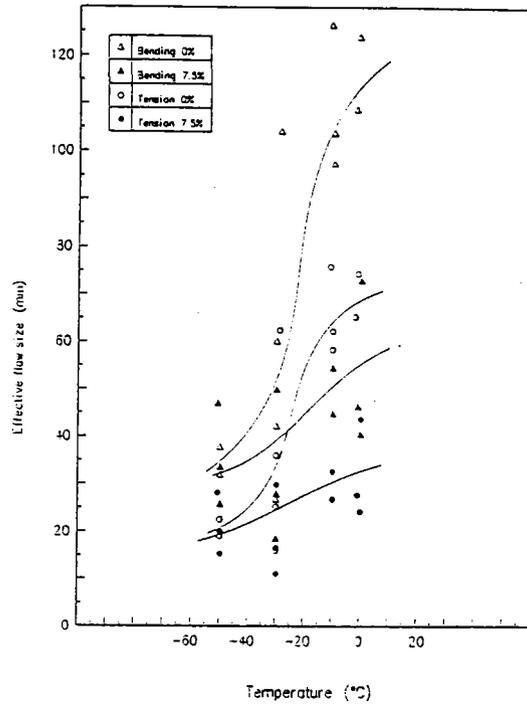


図 3 - 7 許容最大欠陥特性寸法 (予備試験結果)

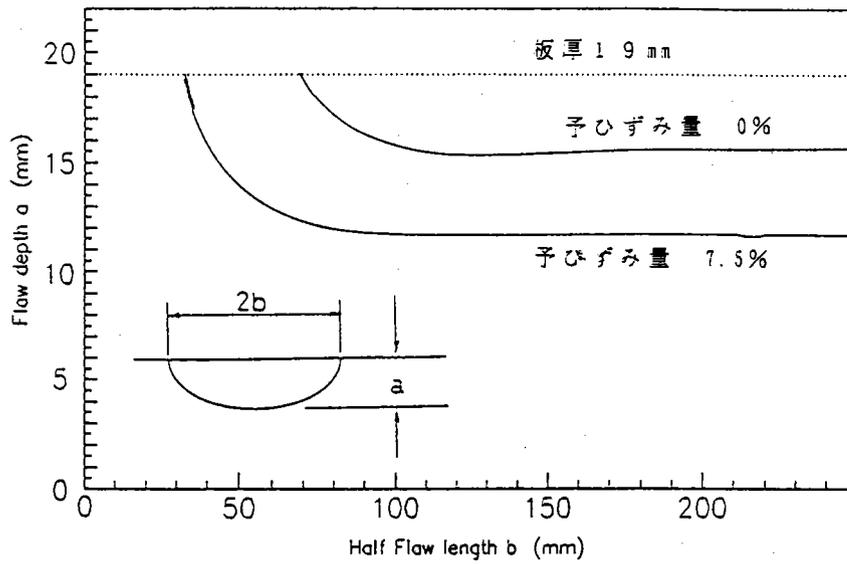


図 3 - 8 許容表面欠陥寸法 (予備試験結果)

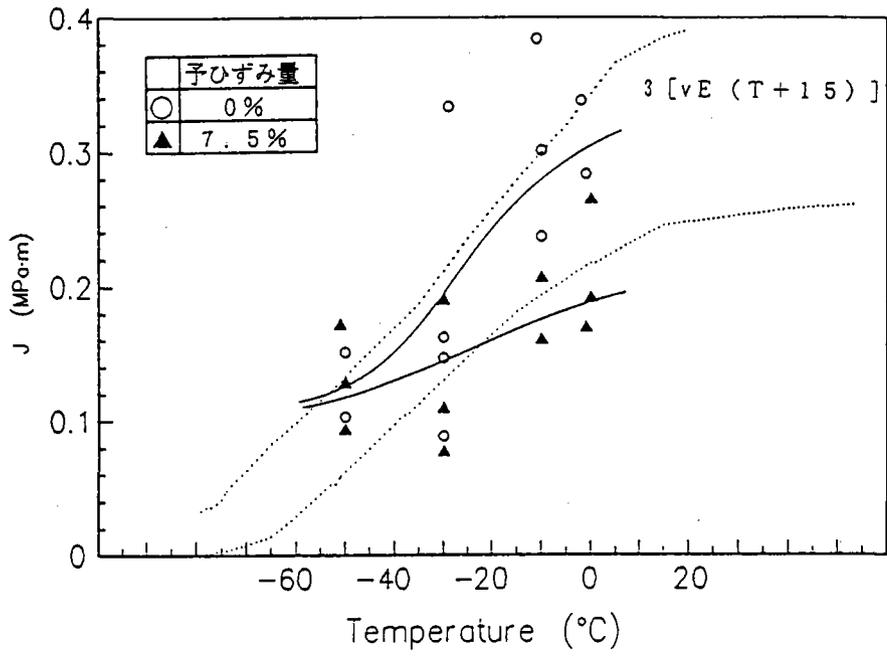


図 3-9 RTWの相関式によるJ遷移曲線シフト図(予備試験結果)

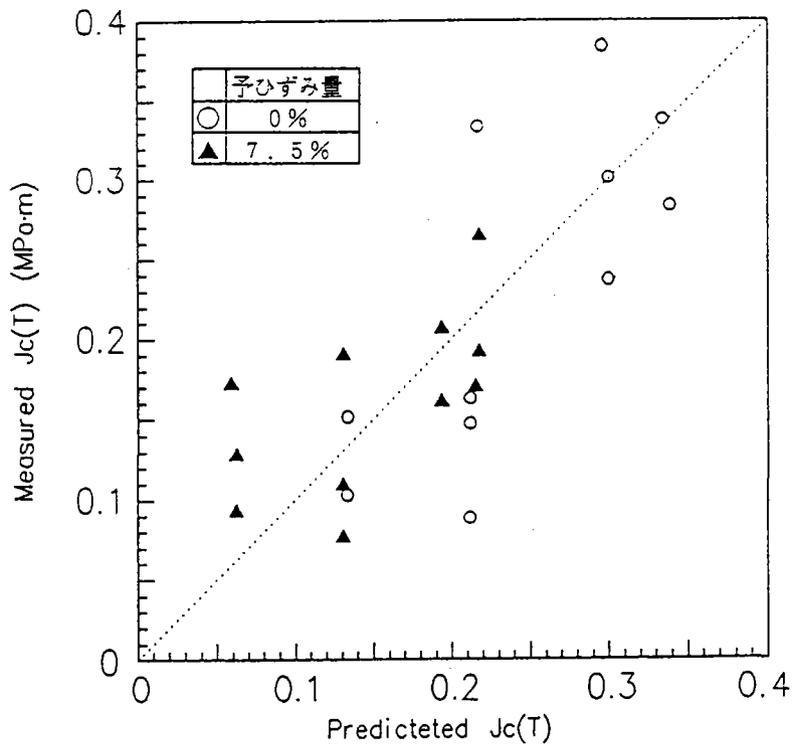


図 3-10 RTWの相関式によるJの試験値-推定値(予備試験結果)

### 3-4-2 本試験結果

#### (1) シャルピー試験結果

シャルピー値においてSM490YBは、素材時のシャルピー値が非常に低い事もあって、3.0%、7.5%歪では規定値(27.5J)を満足出来なかった。SM400Bは、平均的なシャルピー値より低めの材料であったが、歪量7.5%でも十分規定値を満足した。また、両鋼材とも余歪の増加につれて、遷移曲線が高温側に移動しており、歪時効による靱性の低下が認められた。

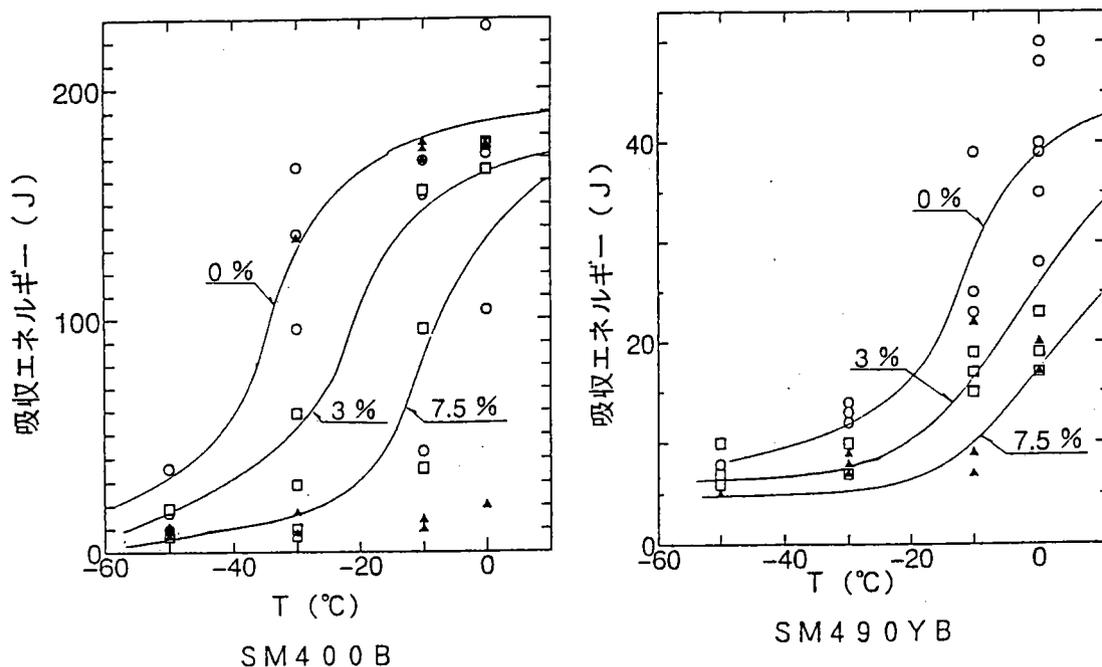


図 3-1-1 シャルピー吸収エネルギー—温度曲線

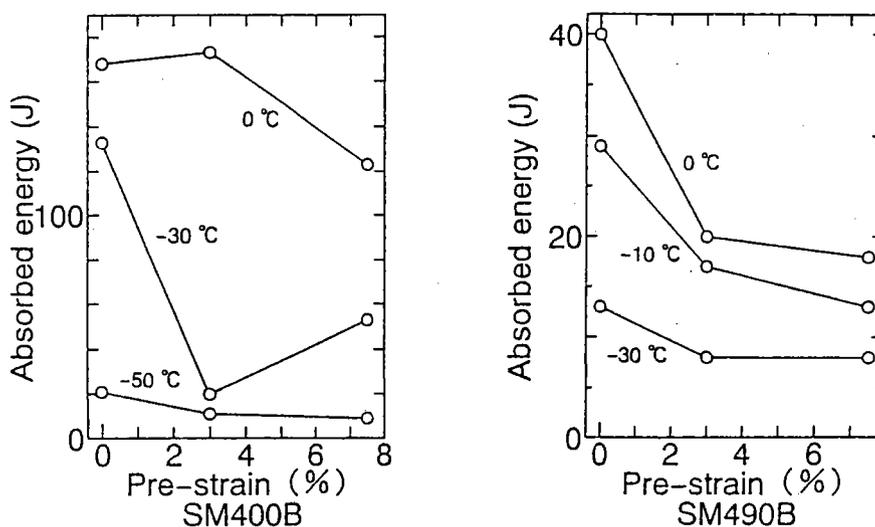


図 3-1-2 予歪とシャルピー吸収エネルギーの関係

(2) CTOD試験結果

CTOD値の規定値は、図3-13、-14に示す。海洋構造物に関する規定の「API RP 22」では溶接熱影響部で試験温度 $-10^{\circ}\text{C}$ で $0.25\text{mm}$ 以上を要求しているが、SM400Bはほぼ上回っているが、SM490YBは大きく下回った結果となった。またシャルピー試験結果同様に余歪の量にしたがって遷移曲線の高温側へのシフトが認められた。なお歪時効はシャルピー試験より明確に現れており、両鋼材とも3%歪で靱性値が急激に低下し、3~7%での低下率は小さい。

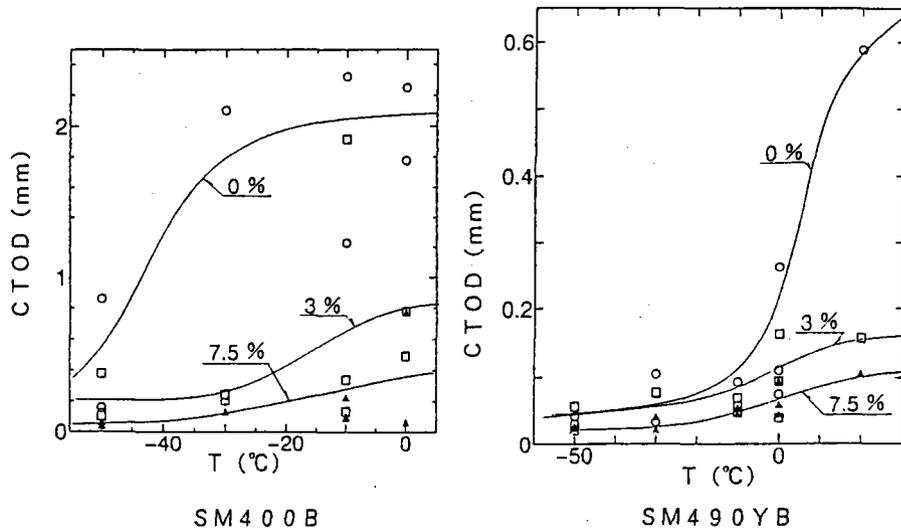


図 3-13 CTOD-温度曲線

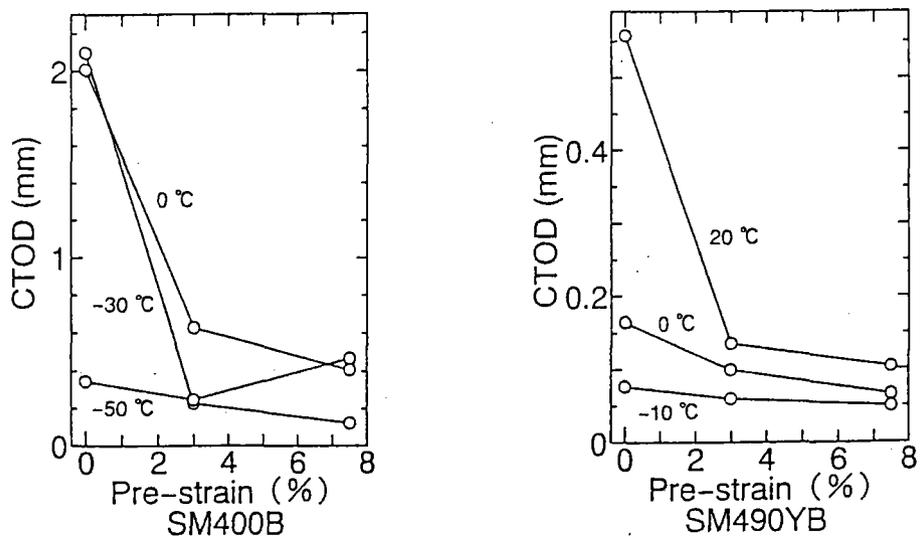


図 3-14 予歪量とCTODの関係

個々のCTOD試験（荷重-荷重点変位）結果は巻末資料参照

### (3) 電子顕微鏡観察結果

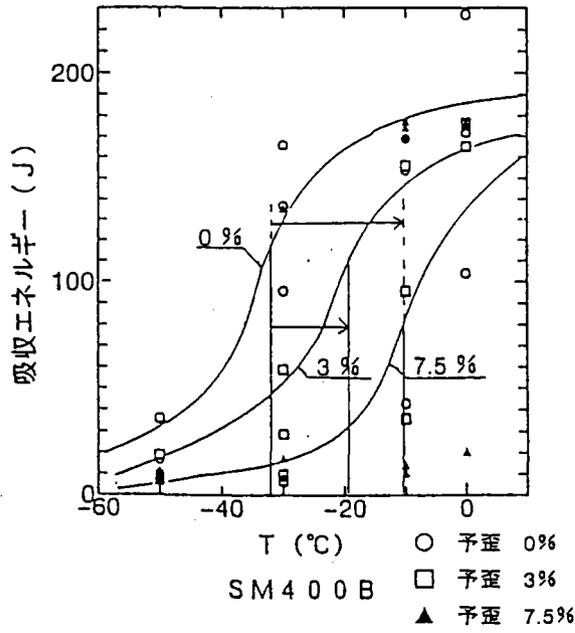
電子顕微鏡にて、SM490YBの0°CにおけるCTOD試験体の破面を各予歪量毎に予亀裂先端付近から10mmの範囲で観察した結果は以下の通り。(巻末付録写真参照)

- ① いずれの予歪量の場合も脆性破面は擬へき開破面を呈している。
- ② 予歪0%材では、他の予歪材のものに比べデンプルが多く見られた。
- ③ 予歪材(3%, 7.5%)では破面にデンプルは少なく予亀裂と脆性破面の境界付近で僅かに見られた。また予歪材では粒界破壊がみられた。

### (4) 本試験のまとめ

- ① CTOD試験結果から、予歪量が3%を越えると、CTOD低下のしかたは鈍くなってゆくことが認められた。図3-13参照
- ② CTOD試験結果とシャルピー試験結果を比較すると、アッパーシェルフに近い領域では、歪時効による遷移温度の上昇量もCTOD試験結果の方が大きく表れる。このことは、CTOD試験の方が歪時効による変化をより正確に把握できると考えられる。図3-15、16参照
- ③ 脆性破壊した鋼材の破面観察を電子顕微鏡による観察の結果、予歪により鋼材の破壊形態は微小空洞の合体から、へき開破壊に移行してゆくを確認できた。

さらに粒界破面率を測定した結果、母材のものに比べ大きく、またへき開破壊は歪時効効果により粒内破壊から粒界破壊へ移行していることが観察された。

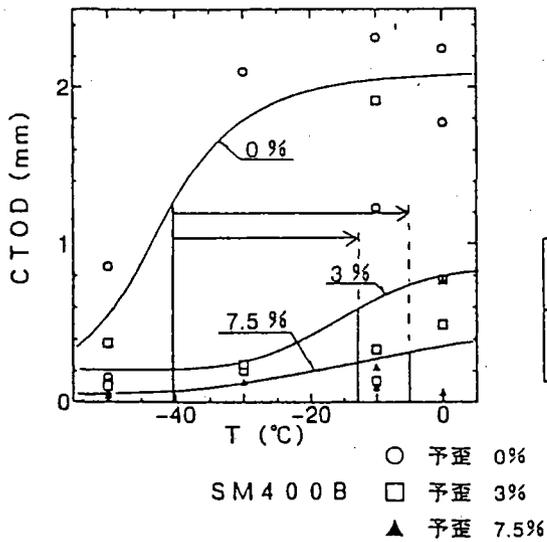


遷移温度の上昇量

	予歪3%	予歪7.5%
SM400B	13°C	22°C

シャルピー吸収エネルギー遷移曲線

図 3-15 歪時効による遷移温度の上昇 (シャルピー試験)



遷移温度の上昇量

	予歪3%	予歪7.5%
SM400B	28°C	35°C

CTOD遷移曲線

図 3-16 歪時効による遷移温度の上昇 (CTOD試験)

(5) 試験検討結果

予備試験の検討結果をふまえた本試験検討結果は、以下のとおり。

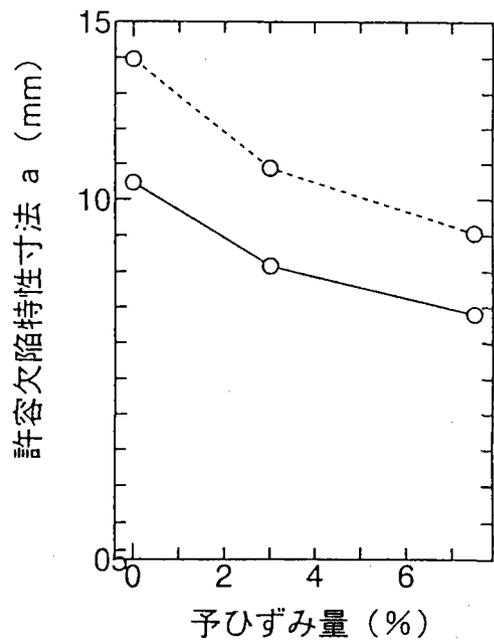
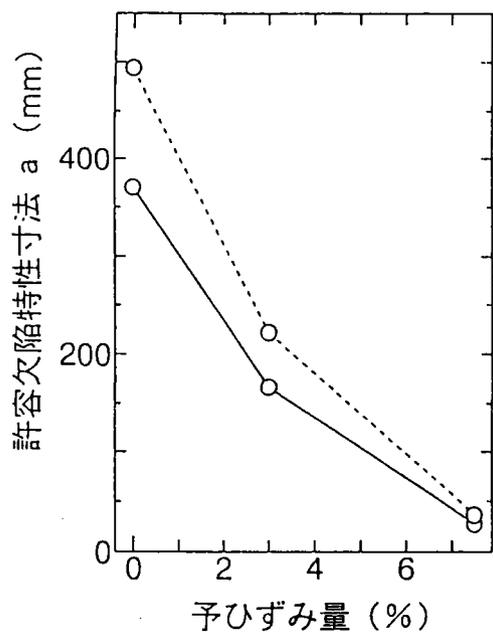
- ① シャルピー試験に比べCTOD試験はアッパーシェルフにおいても歪時効による靱性の低下を把握でき得る試験方法と考えられる。
- ② 歪時効材の電子顕微鏡による破面観察の結果、歪時効による粒界破壊の割合が増していく事が認められた。
- ③ 冷間加工による靱性変化の具体的評価として、CTOD試験結果から表面欠陥寸法を求めると、 $-10^{\circ}\text{C}$ で降伏強度に近い引張応力が働く場合、余歪量が7.5%以下であれば、今回の試験材料SM400B、SM490YBではそれぞれ板厚の $1/2$ 、 $1/4$ 以下の欠陥深さであれば、脆性破壊の危険性は低いことを示した。(図3-17、18参照)
- ④ CTOD値の低下を表す近似式を用いれば、CTOD試験結果から限界冷間加工半径を推定することができ、得られた値は、現在の規定値を緩和する値となっている。

表3-4 限界曲げ加工半径 (t:板厚)

	SM400B	AM490YB
予備試験結果	-	5.0 t
本試験結果	5.04t	7.37t

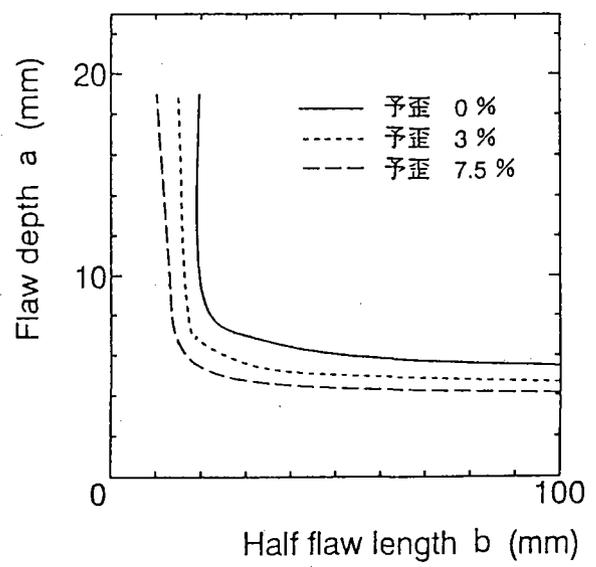
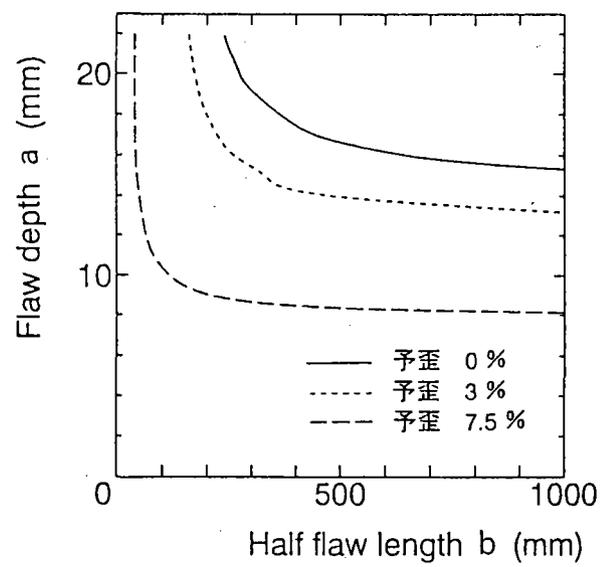
- ⑤ WES3003G種、およびRTW委員会のCTOD推定式について、予歪材への適用を検討した結果、RTW委員会の推定式はより正確であり、予歪材への適用は可能であると考えられる。

(図3-19~24参照)



SM400B      ..... 曲げ応力が働く場合  
 ——— 引張応力が働く場合      SM490YB

図 3 - 1 7 許容欠陥特性寸法



SM400B      SM490YB

図 3 - 1 8 許容欠陥寸法

○ : 推定値    △ : 実測値

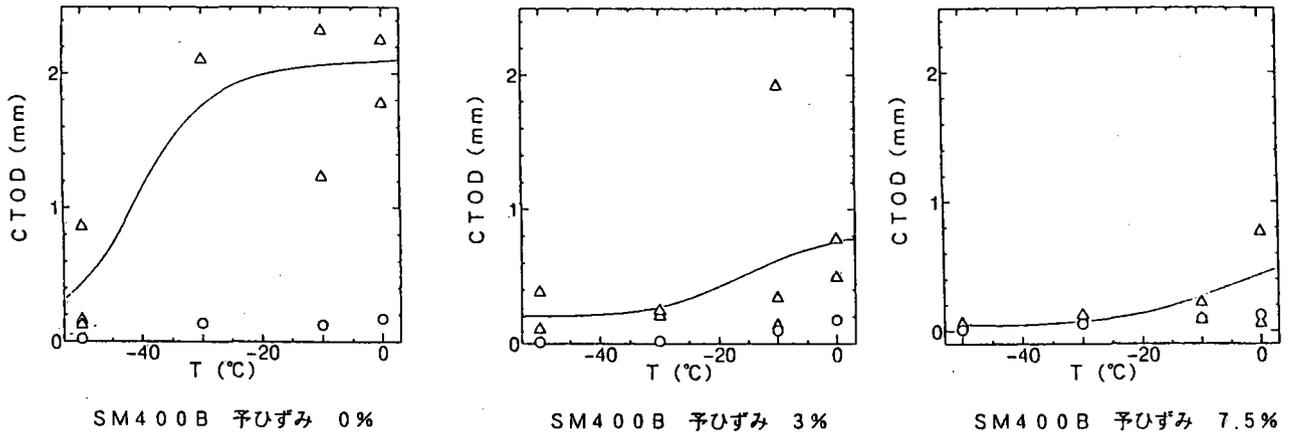


図 3-19 CTODの実測値とWES 3003G種による推定値(SM400B)

○ : 推定値    △ : 実測値

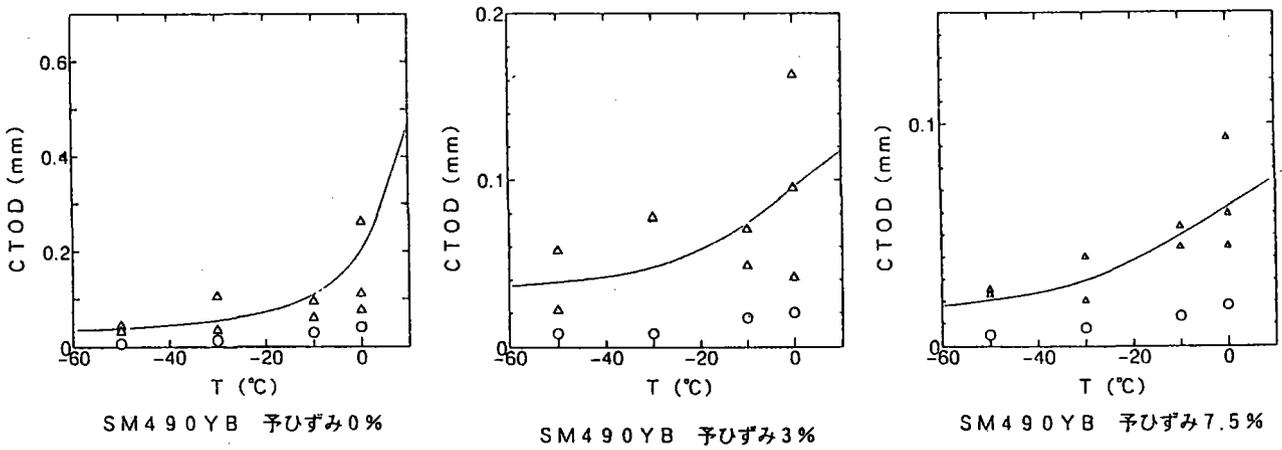


図 3-20 CTODの実測値とWES 3003G種による推定値(SM490YB)

○ : 推定値    △ : 実測値

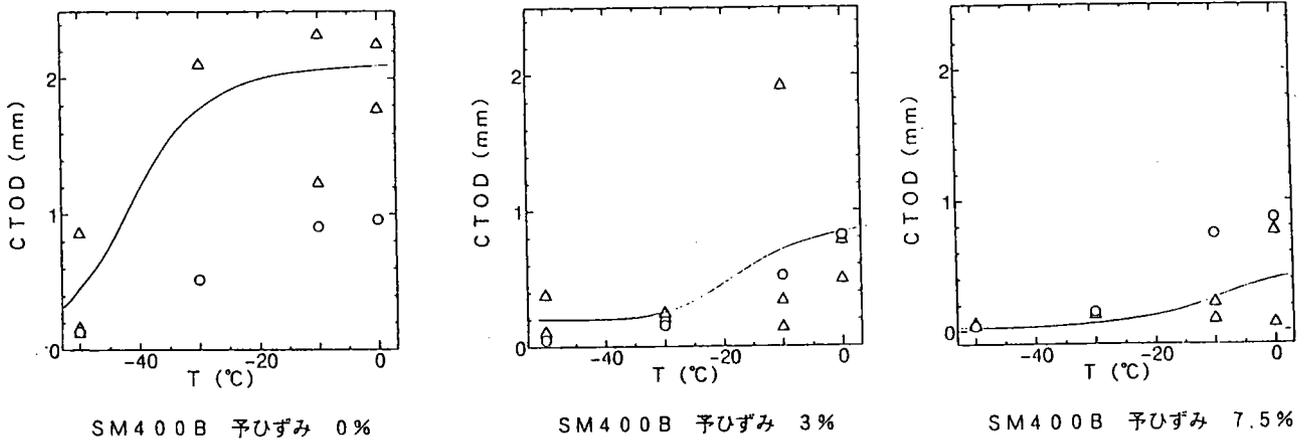


図 3-2 1 CTODの実測値とRTW委員会の推定式による推定値(SM400B)

○ : 推定値    △ : 実測値

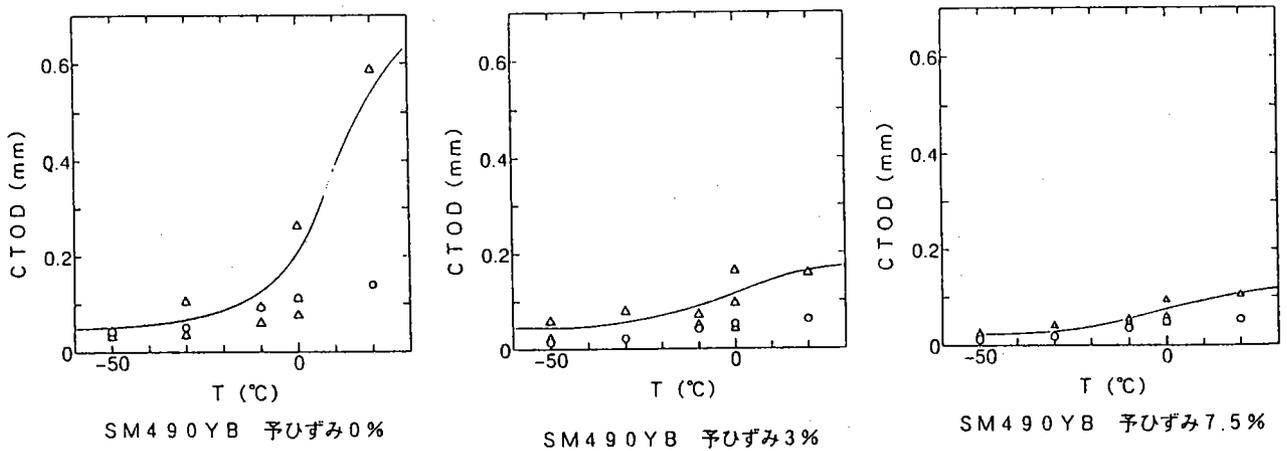


図 3-2 2 CTODの実測値とRTW委員会の推定式による推定値(SM490YB)

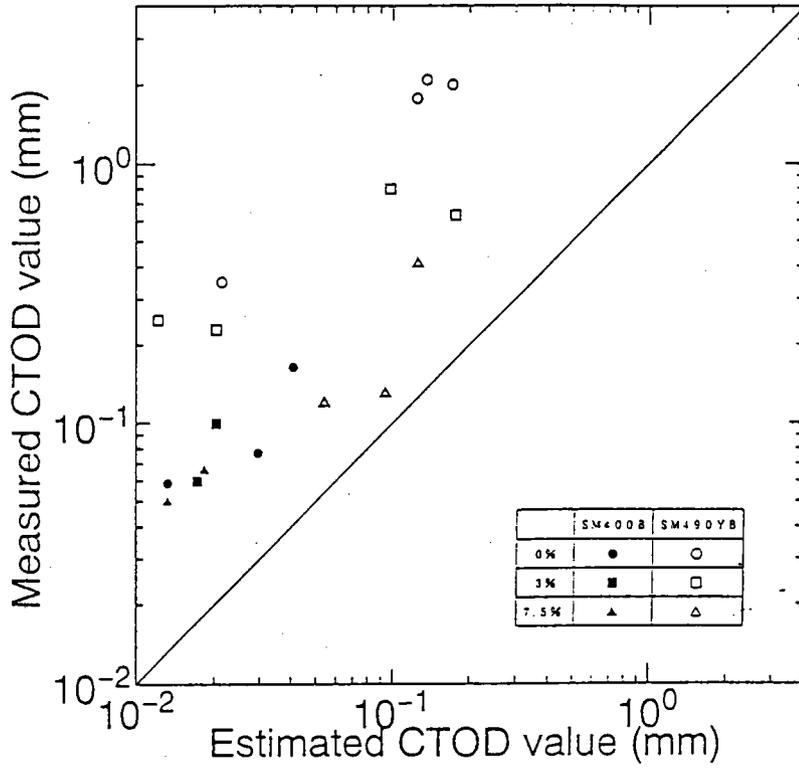


図 3-2 3 W E S 3003G 種による C T O D 推定値と実測値の相関

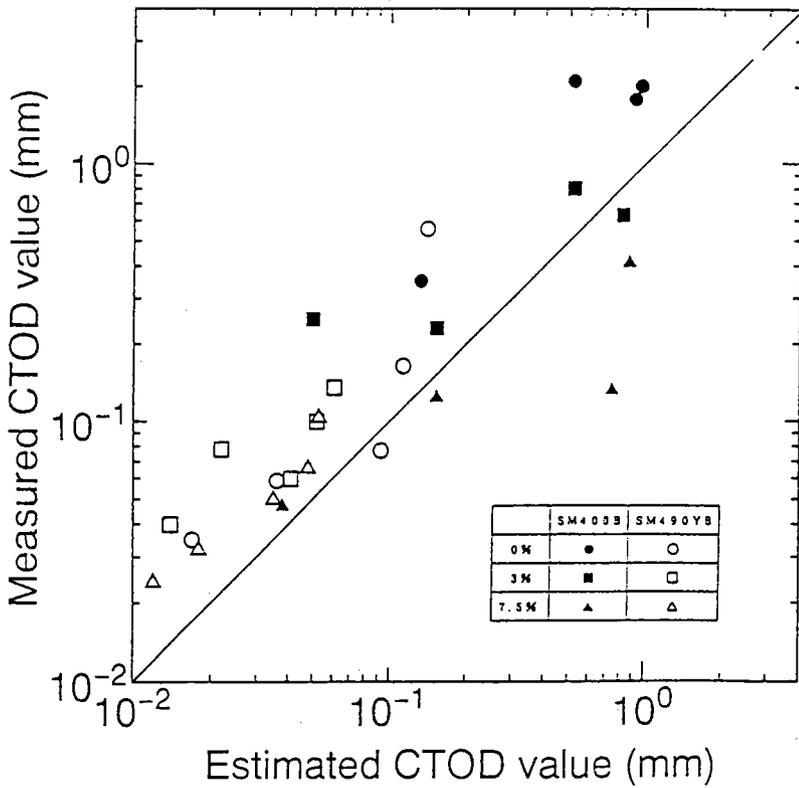


図 3-2 4 R T W 委員会 の 提 案 式 に よ る C T O D 値 と 実 測 値 の 相 関