

福山大学工学部紀要
第2号 1980年3月

鋼材の脆性破壊に関する研究

中山昭夫*

Study on the brittle fracture of steel structures

ABSTRACT

In structural design, we do not take into consideration of cracks, which exist in steel structures inevitably in a rolling and welding process, etc, and the existance of the cracks causes the stress concentration around them.

In such a case, the conventional design method becomes invalid and it is necessary to develop the new design system.

The fracture mechanics is the one that can estimate the safety and reliability of steel members with cracks. In this paper, the auther examines the fracture toughness of steel members by means of the Crack Opening Displacement (C O D) testing that is one of the applications of the fracture mechanics and is considered to be most available for the brittle fracture of steel structures.

*建築学科助教授

§ 1. はじめに

構造物を合理的、かつ安全に設計することは構造工学の究極の目的であり、構造技術者の最大の関心事でもある。

現在まで多数の慣用設計法が提案され、実用化されているが、その主なものは許容応力度設計法である。

この許容応力度設計においては、

$$\frac{\text{終局強度}}{\text{存在応力度}} = \nu (\text{安全率})$$

で安全率 (ν) を一定の値に限定し

$$\frac{\text{終局強度}}{\nu} = \text{設計強度} (= \text{許容応力度})$$

により許容応力度を定め、構造物の存在応力度との大小を比較して構造物の安全をはかるという手順をとる。

しかしながら、現実の構造物の終局強度は材料強度のバラツキ、及び施工の精度等のため一定とはならず、

設計強度 (= 許容応力度) $\times \nu$ = 終局強度という可逆的な関係は一般に成立しない。また構造設計に際して構造物中に含まれるき裂等の欠陥の存在は考慮されないのが普通である。

現実の構造物には大小の差こそあれ欠陥は存在するものであり、この欠陥の存在は応力集中の原因ともなり、構造物の強度等に重大な影響を与える。

き裂等の欠陥が存在すれば構造物にはその近傍から局部的塑性変形領域が形成される。

その結果、そこから破壊が発生し、やがて構造物全体の破壊へと進展していく。

このような場合には従来の慣用設計法では不十分で、より安全で信頼性の高い設計を行なうためにはき裂等の欠陥を考慮に入れた解析が必要となる。

現在このようなき裂等の存在する構造物の解析には破壊力学が一般に用いられている。

破壊力学は近年急速に発展してきた力学手法であり、各分野における応用にはめざましいものがある。

Griffithのガラスによる破壊力学、いわゆるGriffithの理論はOrowan, Irwinの修正を経て鋼材の脆性破壊に適用されるに至る。鋼材の脆性破壊が問題となってきたのは大型鋼

構造物に溶接が多用されるようになった1940年頃からであり、1938年に起ったベルギーのハツセルト溶接橋の脆性破壊事故例以来、多数の溶接構造物が冬季の低温のもとで脆性破壊事故を引き起こした。

一般に鋼材の脆性破壊の発生条件としては次の3つが考えられる。

- (1) 局部的塑性変形の進展
- (2) 微小クラックの発生
- (3) 脆性クラックの伝播

(1)及び(2)の条件は構造物中に欠陥が存在すれば通常引き起こされるものであるが(3)の条件は一般に満足されない。

すなわち脆性破壊において、そのInitiationの条件は一般にき裂が存在すれば満足され、脆性クラックが発生する。

しかしながら脆性破壊のPropagationは材料の性質、温度、ひずみエネルギーの条件等によって左右される。

鋼材の脆性破壊に影響を及ぼす主な要因を列記すれば次のようになる。

- 1) 材質に関するもの(鋼材種別、溶接等による材質の変化、鋼材の異方性等)
- 2) 温度に関するもの(脆性破壊の遷移温度)
- 3) 塑性変形の拘束効果(平面ひずみ、部材の寸法等)
- 4) 残留応力の影響(圧延、溶接等)

脆性破壊はこれらの要因が重畳されて起きるものであるが、それ等の各要因がどのように関連し合うかを明きらかにする必要がある。

そこで本研究では脆性破壊に関する第一段階として比較的3)、及び4)の影響の少ない小型試験体を用い、1)、及び2)の影響を調べることを主目的とした実験結果について報告する。

§ 2. 実験の概要

(1) C.O.D試験

脆性破壊発生メカニズムを説明する破壊力学の工学的手法として、き裂先端での挙動を何らかの物理量として表わせればそれが破壊発生のCriterionとなり得る。

これら工学的物理量を表わすCriteriaとしてStress Intensity Factor K, Crack Opening Displacement (C.O.D)及びSize of

Tensile Yield Zone ρ^+ 説等が提案されている。

K説は Griffith-Orowan-Irwin の理論から出発した線形破壊力学であり，Macro的弾性体の仮定の上での理論であって小規模降伏の領域でしか成立しない。

C.O.D (Φ)説はき裂先端での開口変位量をパラメーターとする工学的物理量であり，その

物理的意味は不明瞭ながら多数の実験からその妥当性は確かめられている。

ρ^+ 説はき裂近傍における塑性変形領域の大きさ (ρ^+)がある一定値に近ずいた時に破壊が生じるという Criterionである。

各種 Criteria の比較を Table 1 に示す。

表より明らかなようにC.O.D説は適用範囲が広く，実験的手法に適していることがわかる。

Table.1 Comparison of Criteria

Criterion	K_c	p_c^+	Φ_c
適用範囲	小規模降伏 (small scale yielding) の場合のみ	全面降伏以後は適用不可	全ての範囲
測定	極く簡単	困難	簡単
予荷重，残留応力がある場合の破壊応力の推定	不適當	適當	
計算手順	複雑	極く簡単	かなり簡単
推定の原則	不明瞭	明瞭	やや不明瞭

(2) 試験体

本実験では材質に関する要因として鋼材種別，熱影響による材質の劣化，及びロール方向の違いによる異方性の3つを考慮に入れて試験片を製作した。

まず鋼材の材質は現在建築の分野で最も一般に使用されているSS41及びSM50Aの2種類である。

材質の劣化には，ガス炎を用い，ノッチ加工にガス切断を併用した。

試験体はH型钢 (H-414×404×18×28)のウェブ部分よりロール方向 (以下X方向と呼ぶ)，及び板幅方向 (次下Y方向と呼ぶ)に板を切り出し，ロール方向の異方性を検討した。本実験に用いたC.O.D曲げ試験体の概要を，Fig-1に示す。

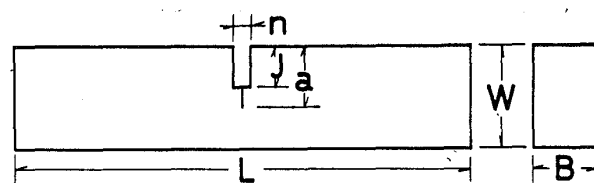
(a)は機械切欠き試験体 (M-Cut Type)，(b)はガス炎切欠き試験体 (G-Cut Type, G'-Cut Type)でG及びG'-Cut Typeはガス切断の際の火口の条件等が異なる。

その条件を Table 2 に示す。

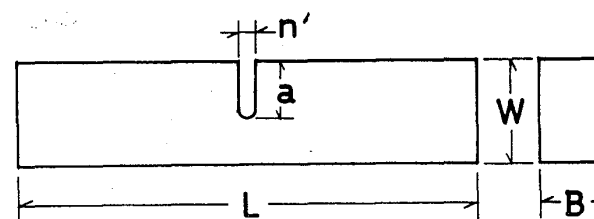
同図(a)のノッチ切欠き幅は0.2mmである。

各試験体の Specimen Mark を Table 3 のように定める。

また本実験で使用したSS41，及びSM50AのX，Y方向の機械的性質を Table 4 に示す。



(a) M-Cut Type



(b) G,G'-Cut Type

W=36.0 B=18.0 L=155.0 a=18.0 n=2.0
n'=1.3 1.8 J=16.0

Fig.1 COD Bending Specimen

Table.2 Cutting Condition

Type of Specimen	Nozzle	Pressure(O ₂) (kg/cm ²)	Pressure(C.H.) (kg/cm ²)
G-Cut Type	0	4.0	0.3
G-Cut Type	1	4.0	0.4

Table.3 Specimen Mark

Material Type	SS41		SM50A	
	X	Y	X	Y
M-Cut Type	SXM	SYM	MXM	MYM
G-Cut Type	SXG	SYG	MXG	MYG
G-Cut Type	SXG	SYG	MXG	MYG

Table.4 Mechanical Properties

Material	Yield Stress (kg/mm ²)	Ultimate Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SS41-X	26.1	45.7	38.6
SS41-Y	26.4	43.4	34.3
SM50A-X	38.8	56.9	35.3
SM50A-Y	39.4	56.4	26.9

(3) 試験方法

日本における建築鋼構造物の受ける温度履歴を考えた場合、安全性を加味して考えてもほぼ -50℃~80℃程度だと考えて差しつかえない。

それ故建築の分野における温度履歴の範囲はこの程度で十分であろう。

本実験では以上の考えから試験温度域を6段階に分けA(80℃), B(40℃), C(20℃) D(0℃), E(-20℃), F(-50℃)とし、温度はSpecimen Markの後にA~Fの記号で表示した。

曲げ試験はFig2に示すように3点曲げで行ない、開口変位はクリップゲージによりナイフエッジ面での開口変位を測定した。

また曲げ荷重、および開口変位はX-Y recorderにより記録し、クリップゲージは数回の試験ごとに較正を行なった。

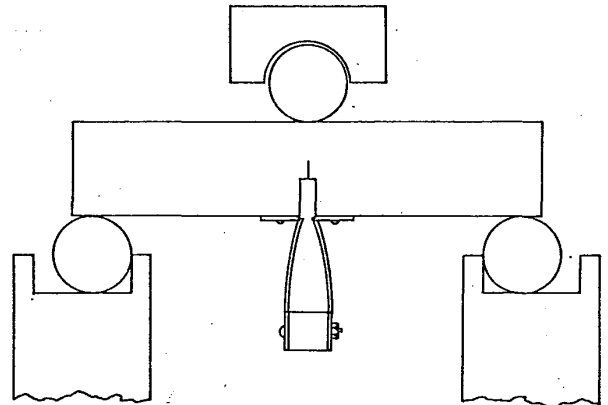


Fig-2 Bend Test Fixture

§ 3. 実験結果

本実験に先だってG-Cut typeのCOD試験体の硬度分布を求めた。

測定にはRockwell式硬度計を用いガス切断切欠き部近傍の硬度を計測した。

その結果をFig3に示す。

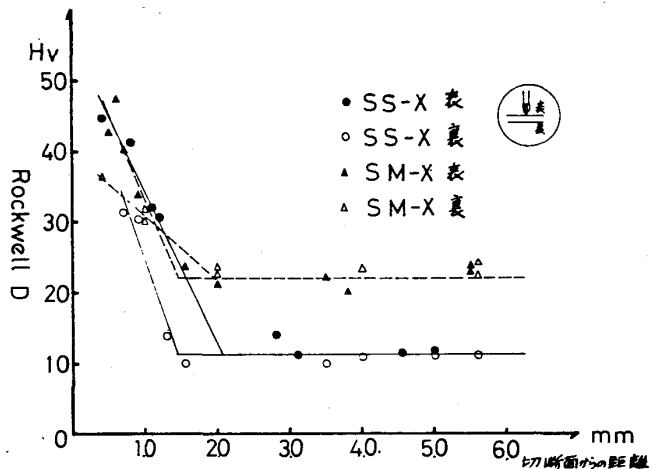


Fig.3 Distribution of rockwell D Hardness

同図に示されるようにガス切断面からの距離が2mm以上離れると熱影響はなくなるが、2mm以内の範囲では硬度が急上昇していて材質の劣化が顕著である。

このことは後で述べる破壊靱性にも影響を与える。

Fig4-(1)~(24)に各温度域での曲げ荷重と開口変位の実験結果を示す。

図中の▼印は最大曲げ荷重を示した点である。

Fig4-(1)~(8)はM-Cut type, Fig4-(9)~(20)はG-Cut type, Fig4-(21)~(24)はG-Cut

typeの実験結果である。M-Cut type A~E (80°C~-20°C)では靱性に富み、安定したクラックが徐々に進展しながら破壊に至っている。しかし(-50°C)では最初延性クラックが進展しているが、ある点で突然脆性破壊を生じる。G-Cut type A~C (80°C~20°C)の温度域ではほぼM-Cut typeの高温域と同様の破壊特性を示す。

しかしBC(40°C, 20°C)では荷重増加が一担0になってから最大荷重に達する実験結果が多く見られた。

D(0°C)では微小脆性クラックの発生のため明確な荷重減少となり、以下温度が低くなるにしたがってこの傾向が一層顕著となる。

G-Cut typeはG-Cut typeとほぼ同様の破壊特性を示すが、前述の傾向がより一層顕著になっている。

またPmax時の開口変位は同一温度、同一材料であっても一般にM-Cut type, G-Cut type G-Cut typeの順に小さくなっている。

材質の違いによる破壊特性の相異として、Pmax時の開口変位が切欠きの種類に関係なくSX, MX, SY, MYの順に小さくなっていて、両鋼種ともX方向に比べY方向の開口変位は小さい。またPmax後の荷重減少の割合もY方向の方が大きい。

Fig.4 Load-Displacement Curve

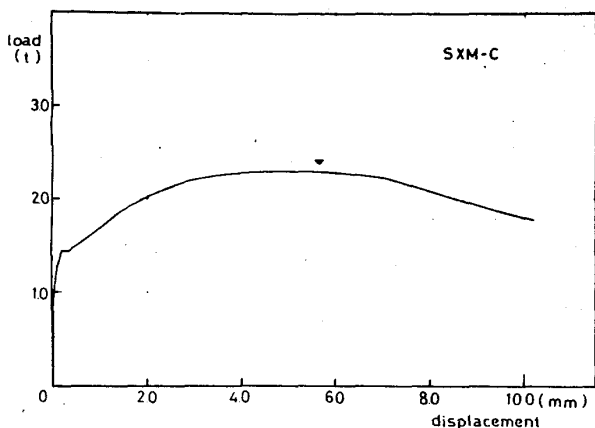


Fig.4-(1)

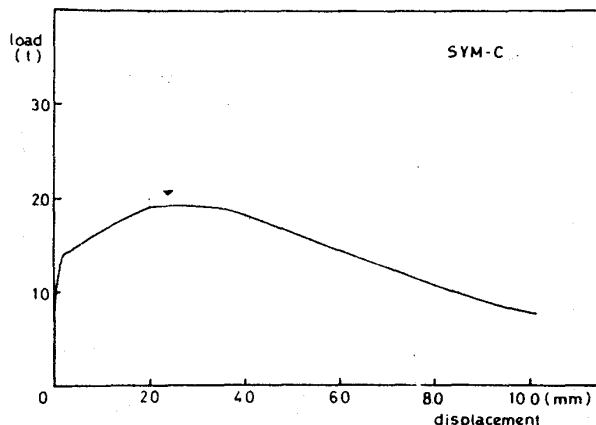


Fig.4-(2)

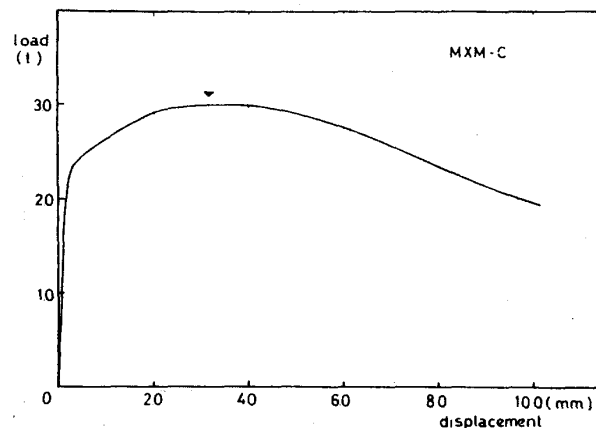


Fig.4-(3)

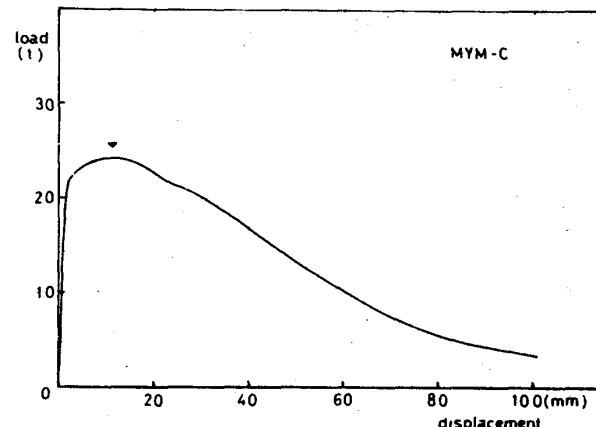


Fig.4-(4)

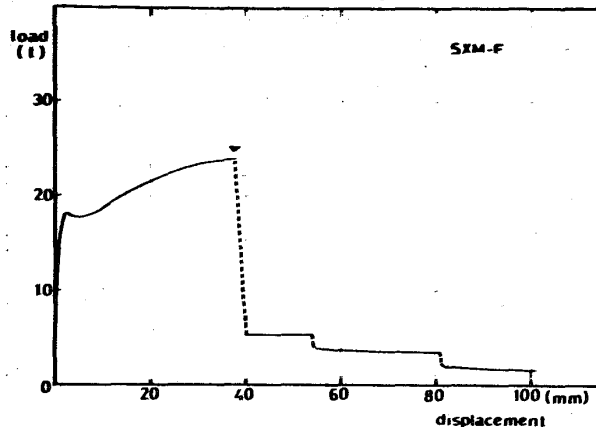


Fig.4-(5)

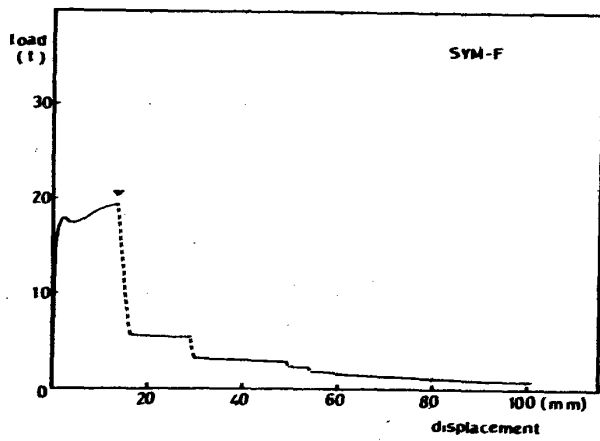


Fig.4-(6)

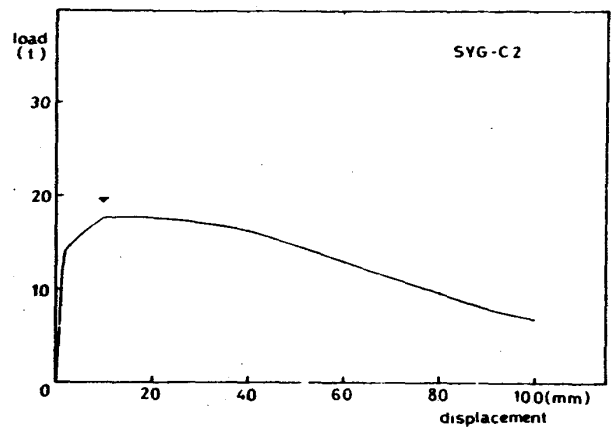


Fig.4-(10)

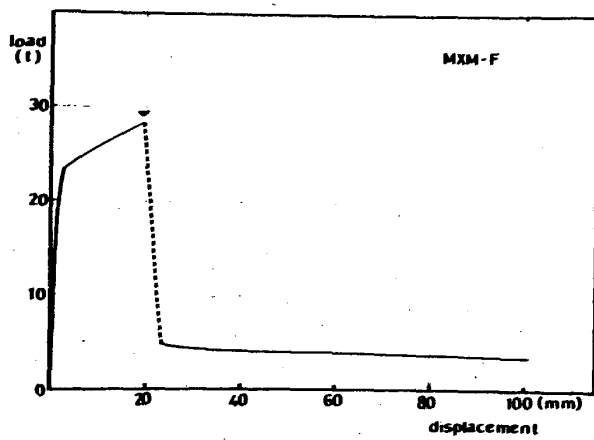


Fig.4-(7)

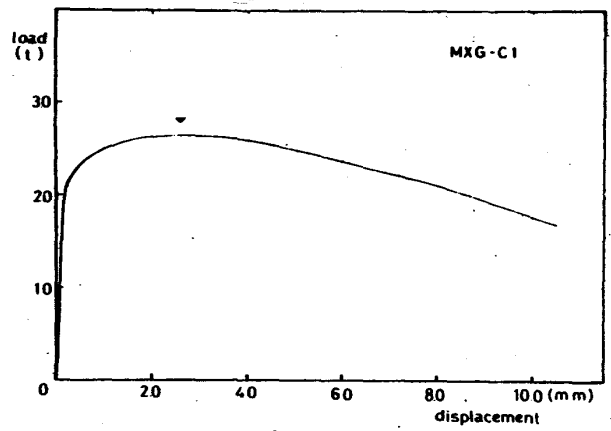


Fig.4-(11)

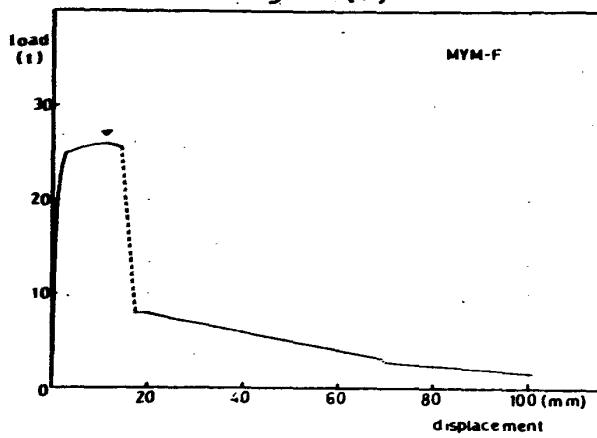


Fig.4-(8)

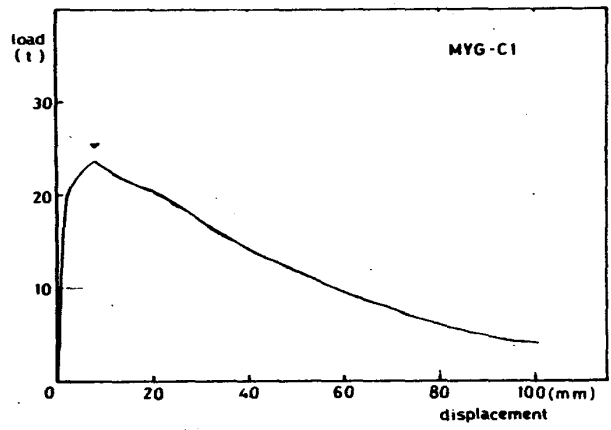


Fig.4-(12)

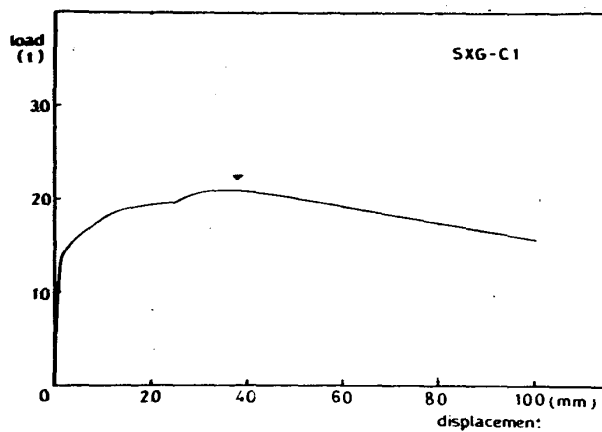


Fig.4-(9)

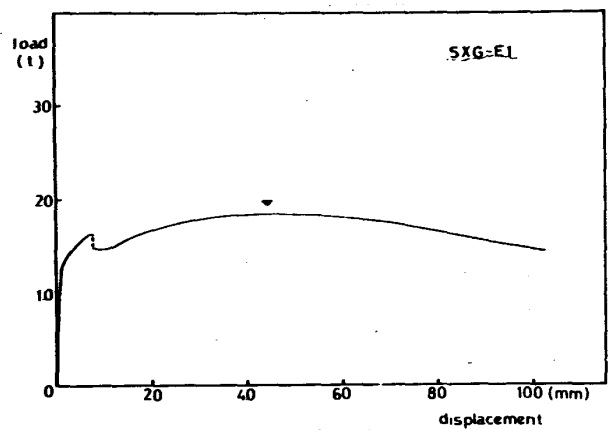


Fig.4-(13)

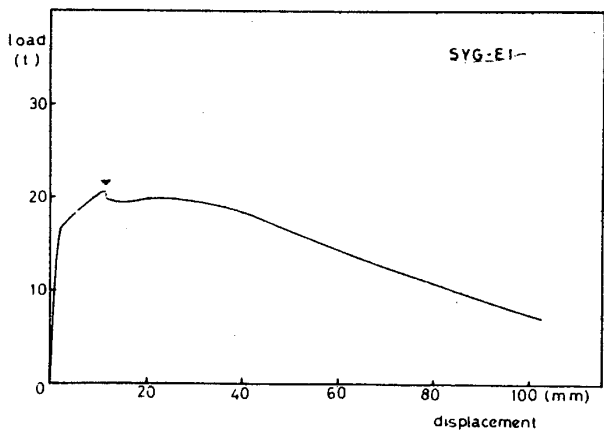


Fig.4-(14)

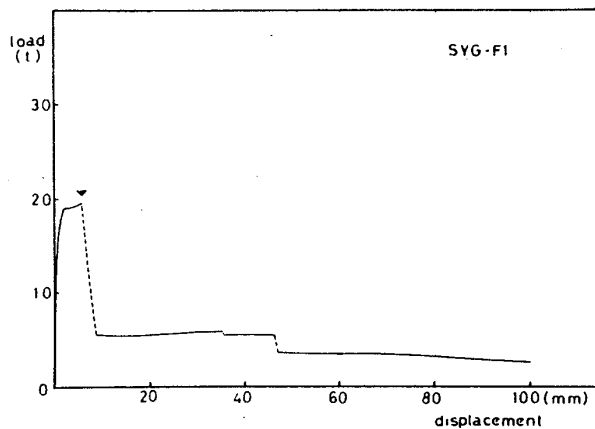


Fig.4-(18)

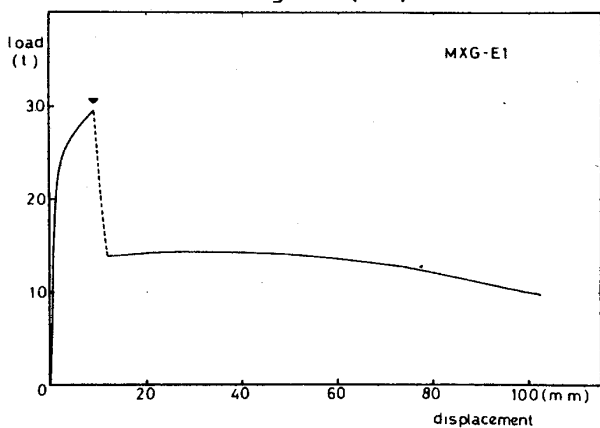


Fig.4-(15)

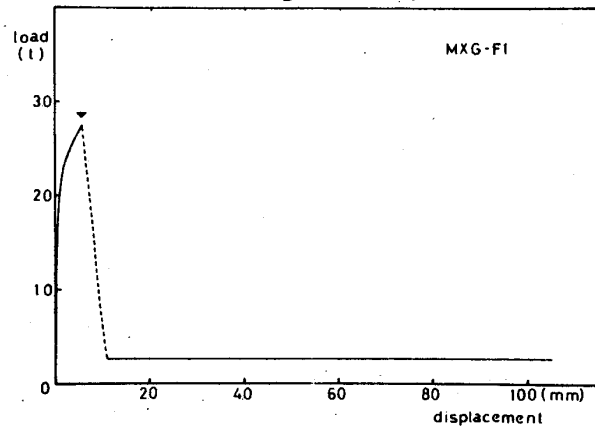


Fig.4-(19)

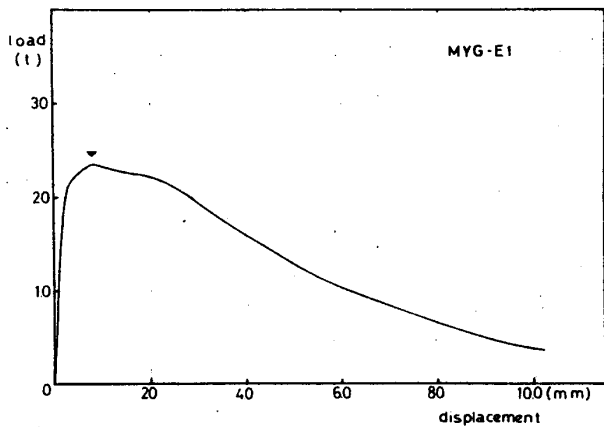


Fig.4-(16)

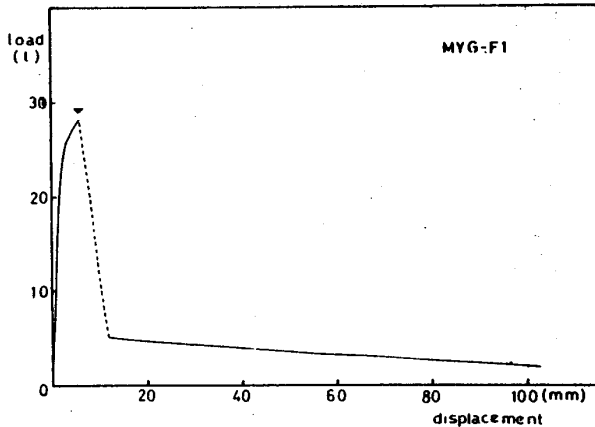


Fig.4-(20)

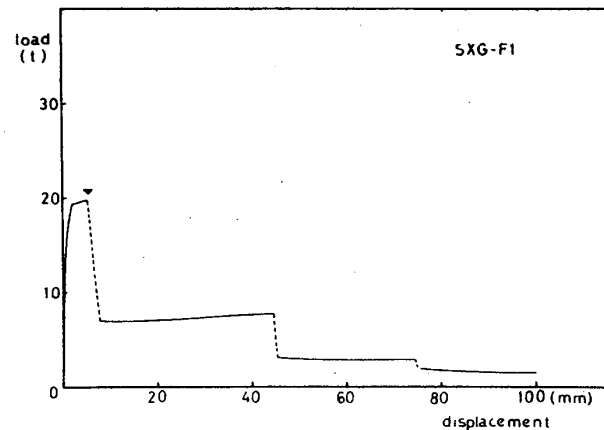


Fig.4-(17)

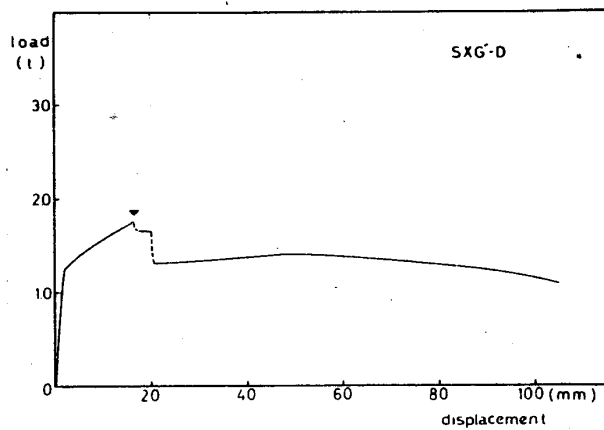
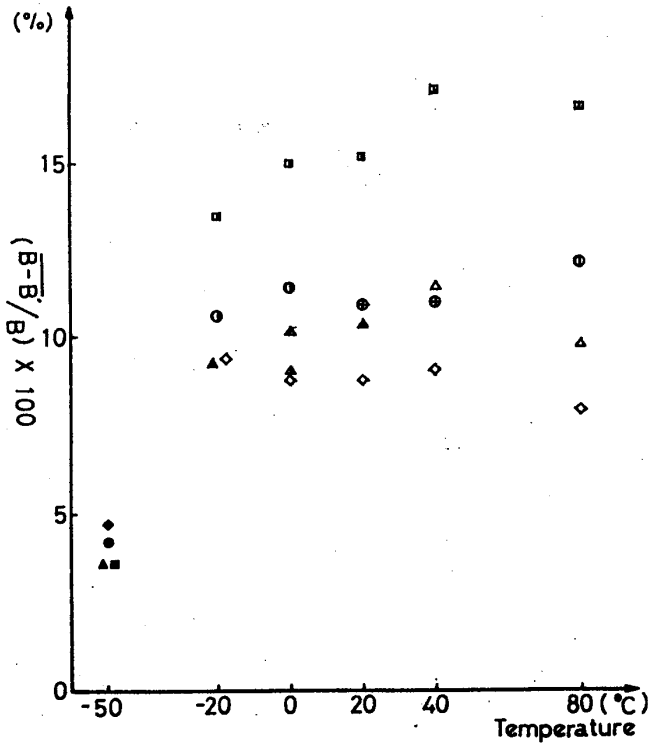
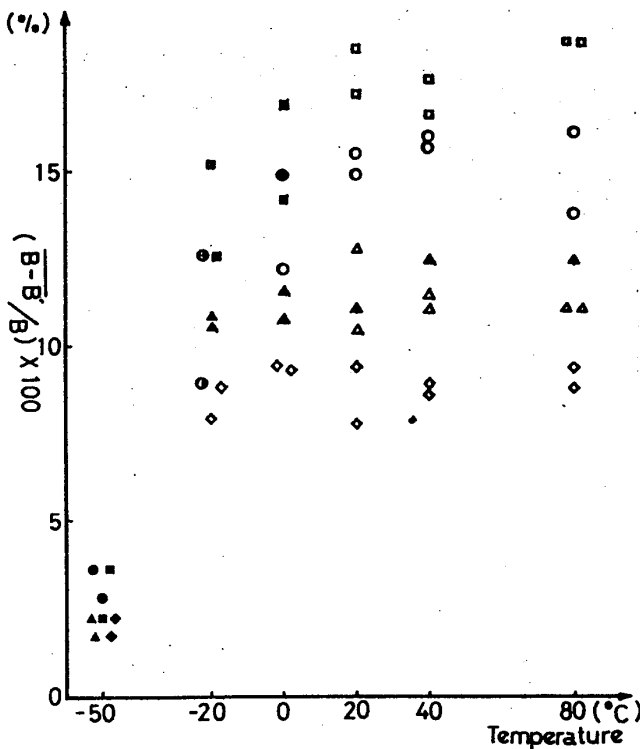


Fig.4-(21)



(b) G-Cut Type



(c) G'-Cut Type

○ 横収縮率と破壊様式

Fig 6 -(a)(b)(c)は各種COD曲げ試験体の横収縮率破壊様式と試験体温度の関係を図示したものである。

$$\text{横収縮率は, } \frac{B - B'}{B} \times 100 (\%)$$

B ; 実験前の試験体の幅

B' ; 実験後の試験体の最小幅

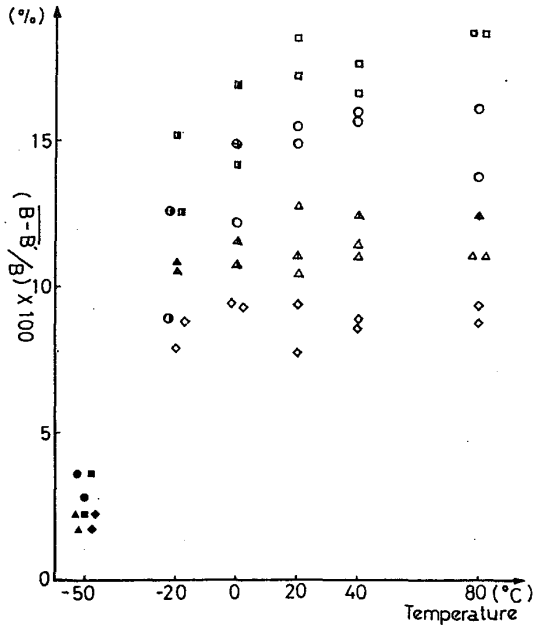
で与えられる。

又SS41のX方向の試験体についてのものを○, SS41のY方向のものについては△, SM50AのX方向のものについては□, SM50AのY方向のものについては◇で表わし, その内部には破壊様式を表示しており, これは以下のものについても同様である。

Fig 6 -(a), (b), (c)から何れの試験体についても試験体温度の低下につれ, 横収縮率は減少しているが, その度合はSS41のX方向の試験体が最も大きく, 次いでSM50AのX方向のものSS41のY方向のものが続き, SM50AのY方向のものは最も小さいことがわかる。

又材質的にはSM50AのX方向の横収縮率が最も大きく, SS41のX方向のもの, SS41のY方向のものが続き, SM50AのY方向のものが最も小さい。切断方法の違いでは, M-Cut type, G-Cut type, G'-Cut typeとなるにつれて横収縮率は低下していることがわかる。

Fig.6 Lateral Shrinkage Percentages & Fracture Modes v.s Temperature



(c) G'-Cut Type

Fig. 6 Lateral Shrinkage Percentages & Fracture Modes v.s Temperature

○ COD 値 (Φ) と破壊様式

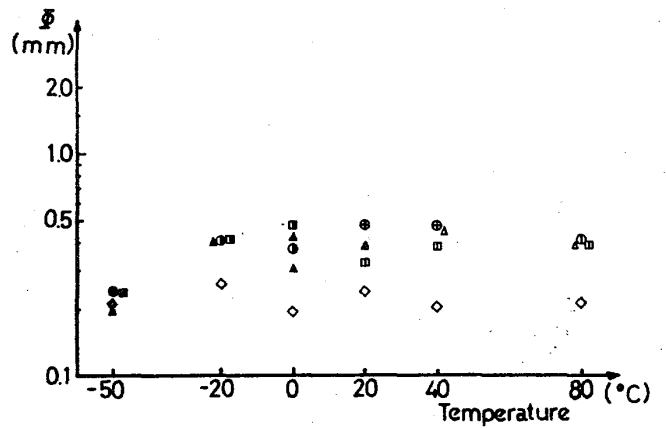
British Standards Institution の COD 試験法案 DD19 によると、不安定破壊に先だていささかでも安定破壊が発生する場合、その発生時の COD 計測が重要であると指摘されているが、それを実際に採用するのは容易でなく、諸々の提案がなされている。

本実験の場合は原則として Pmax に至ったときの開口変位を有効クリップゲージ変位とし、Pmax に至る前に明破な荷重減少が見られた場合にはその点での開口変位を有効クリップゲージ変位と見なすことにした。Fig 7 (a)~(c) はこのようにして得られた開口変位を COD (Φ) に変換し、破壊様式と試験体温度との関係を示したものである。

同図から M-Cut type の試験体については、温度 E (-20°C) 以上では Φ 値はほとんど変化しないが、G-Cut type では D (0°C) 近傍で Φ 値は大きく変化し、又 G'-Cut type では高温側でも Φ 値は他の二者と比較して小さいといえる。

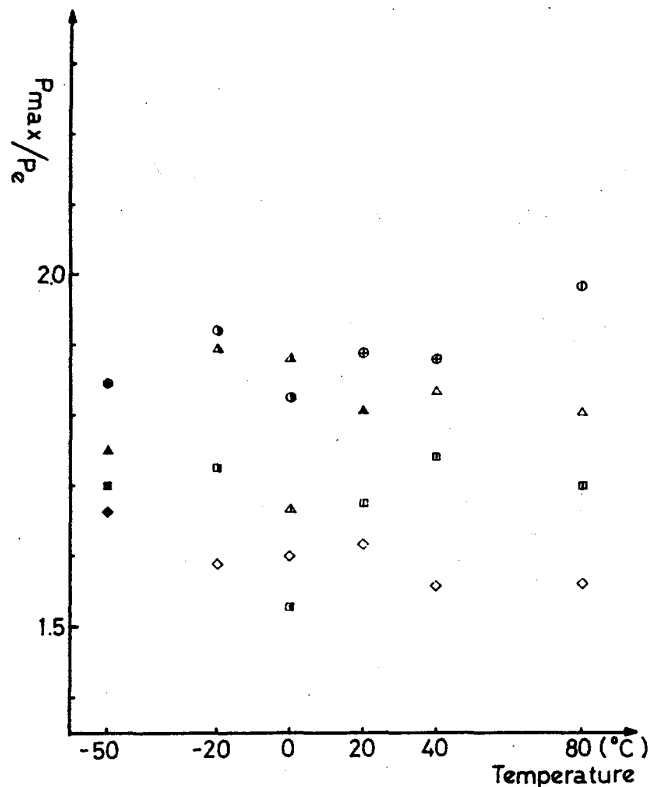
また Fig 8 に最大曲げ荷重と全塑性モーメント

荷重との比 Pmax/Pe と試験体温度及び破壊様式との関係を図示する。



(c) G'-Cut Type

Fig. 7 COD Values & Fracture Modes v.s Temperature



(c) G'-Cut Type

Fig. 8 Ratio Pmax/Pe & Fracture Modes v.s Temperature

○ COD 曲げ試験体の脆性破壊発生特性

各種 COD 曲げ試験体の実験結果とその考察により、試験体温度 $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ の破壊特性を曲げ荷重とクラック深さの関係で図示すると Fig 9 (a), (b), (c) に示すとくに模式的に考えられる。縦軸は曲げ荷重で、横軸は Crack Depth で各段階を数字 (0~7) で表示している。直線 ABCDEF (各記号は試験体温度の記号と一致している。) は各種 COD 試験体の母材の材質・切断方法・試験体温度によって定められる直線で、この直線と破壊特性が交わった点でその試験体は安定破壊から不安定破壊に移行すると考える直線で、この直線を破壊遷移直線と名づけておく。今試験体に曲げ荷重を加えても切り欠き先端にはクラックは発生せず P は垂直に上昇する。

fibrous cleavage 若しくは fibrous 領域では P_e を越えてもクラックは発生せず、点 a で fibrous 型の微小クラックがまず発生する。しかし fibrous 型クラックが進展してもしばらく曲げ荷重は上昇するが、M-Cut type の場合そのまま上昇し P_{max} に至るのに対し、G, G' - Cut type では点 β でいったん微小脆性クラックが発生し曲げ荷重は低下するが、点 γ で再び fibrous 型に転化しその為再び曲げ荷重は上昇し P_{max} に至る。しかしながらもし破壊遷移直線と交わればその点で fibrous 型クラックは cleavage 型クラックに転化し破壊に至る。もちろん α, β, γ の位置は母材の材質・切断方法によって変化する。

Table 6 は破壊様式によって (1), (2), (5) を 0, (3) を -, (4), (6), (7) を 1 とした各種 COD 試験体の破壊様相の一覧表である。

Table.6 Safety Matrix of Each Specimens

Material	SS41-X	SS41-Y	SM50A-X	SM50A-Y
Cut	M G G'	M G G'	M G G'	M G G'
80°C	o o o	o o o	o o o	o o o
40°C	o o o	o o o	o o o	o o o
20°C	o o o	o o o	o o o	o o o
0°C	o o /	o oo/	o / /	o o o
-20°C	o - /	o- / /	o / /	o o o
-50°C	/ / /	/ / /	/ / /	/ / /

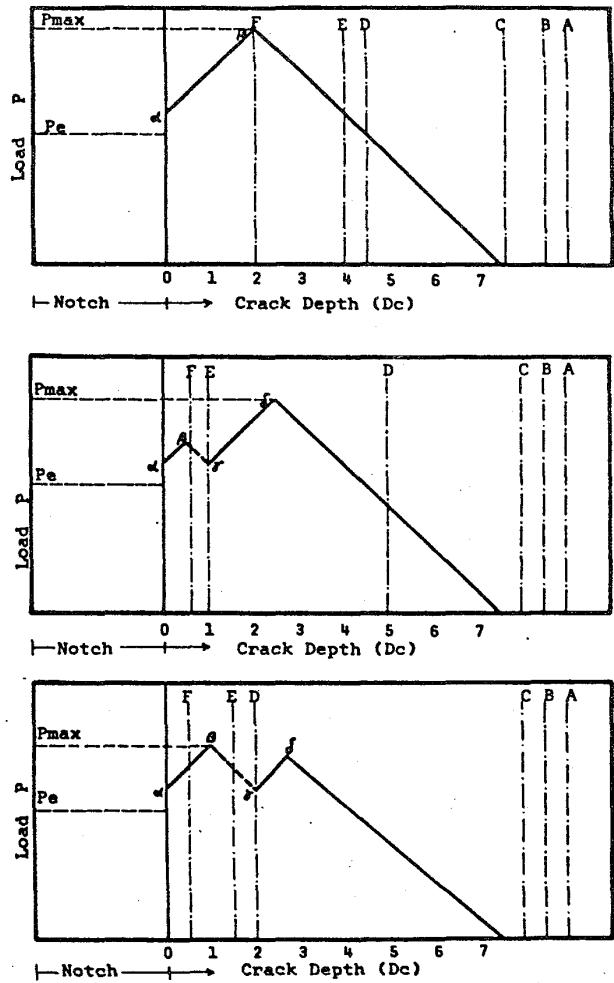


Fig.9 Schematic Illustration of notch Brittleness.

§ 4. 結 論

鋼材の脆性破壊に関して材質による相違、及び温度に関する影響を把握する目的で COD 曲げ試験を行なったが本実験の結果をまとめると次のようになる。

- (1) まず鋼材種別による相違として、SS41と SM50A とでは COD 値にさほど大きな差異は見られないが若干 SS41 の方が COD 値は大きい。
すなわち強度が大きい程破壊靱性は小さくなる傾向がある。
- (2) 圧延型鋼のロール方向とそれに直交する板幅方向の相違については、かなり破壊様式が違ってくる。

即ちロール方向の場合は高温域において安定したクラックが徐々に進展し、破面は繊維状破面を呈しているが板幅方向の場合はいわゆる Tear の様な破壊となり、破面もわりとなめらかで COD 値も一般に低くなっている。

- (3) ガス切断ノッチをもつ G 及び \acute{G} -Cut Type の場合は熱影響による材質の劣化が顕著で、COD 値も M-Cut Type に比べて低くなる。熱影響の大きい \acute{G} -Cut Type の方がより一

層顕著に材質が劣化していることがわかる。

以上の結果から早急に結論づけることはできないが、一般に材質の劣化が破壊に相当の影響を与えることは明らかである。

-50℃ではほとんど全ての試験体が脆性破壊を起していること、また材質が劣化すれば、0℃程度でも脆性破壊の生じること等を考えあわせると我国の建築構造物も脆性破壊に対して安全であるとは言いきれない。

特に超高層建築物のように板厚 60 mm 程度の鋼材を使用する場合は極厚部材の拘束効果も含めて検討していく必要があると思われる。

《参 考 文 献》

- (1) British Standard Institution. "Method For Crack Opening Displacement Testing" DD19: 1972
- (2) 渡辺正紀, 佐藤邦彦「溶接力学とその応用」朝倉書店
- (3) 木原博, 金沢武, 他「破壊力学と材料強度講座 8, 脆性破壊 2 = 破壊靱性試験」培風館
- (4) 木原博, 佐藤邦彦, 他「日本における溶接構造物の脆性破壊発生に関する研究 (その 2)」溶接学会誌 第 42 巻 第 4 号 1973.
- (5) 金多潔, 中山昭夫, 他「圧延鋼材の切断過程における残留応力の変動について (その 1 ~ その 4)」日本建築学会大会学術講演梗概集 昭 48 ~ 52 年