

(討12) テーパー形DCB試験の開発とNi添加鋼板の脆性破壊伝播停止特性について

住友金属工業 (株) 中央技研 長谷部茂雄 ○川口喜昭

I 緒言

鋼材の靱性は、一般にシャルピー衝撃試験によって判定される。しかしこの試験の結果得られる諸指標は、その物理的意義がきわめて薄弱であり、靱性というあいまいな概念をあいまいなままに、材料の相対比較をなし得るにすぎない。他方、吉識、金沢によって開発された二重引張試験は、鋼材の靱性を限界応力拡大係数、いわゆる K_{IC} 値で表わすことができ、脆性破壊伝播停止特性としてその物理的意義も明瞭であり、鋼構造物の設計に定量的に利用できる点で優れている。

しかしながら、二重引張試験はいわゆる大型試験であり、鋼材の靱性を系統的に明らかにするための材質試験としてはとうてい採用し得るものではない。WES 規格では、シャルピー試験の遷移温度との実験的相関が求められているものの、実用上の目安としての意味しか持たないであろう。従来シャルピー試験にたよっていたために生じたと推定される諸矛盾を解決し、鋼材の靱性を支配する諸要因を明らかにするためには、 K_{IC} 値を直接測定することのできる小型試験の開発が必要不可欠である。

本報告は、比較的小型で脆性破壊伝播停止特性としての K_{IC} 値をもとめ得る試験法を開発して二重引張試験との対応を明らかにし、その試験法を用いてNi添加鋼板(0~5%)の伝播停止特性を調べて、シャルピー衝撃特性と対比することによって得られた鋼材の靱性にたいする新たな知見に関するものである。

II テーパー形DCB試験の開発

深い側溝を両側に持った梁を一端から引裂いて破壊靱性をもとめるDCB(Double Cantilever Beam)試験は、J.P. Berry によって開発され(1963年)、最近では鉄鋼材料にもその適用がはかられている。この試験法の特徴は、亀裂の伝播につれて試験片の歪エネルギー解放率が低下し、ひとたび発生した脆性亀裂は材料の靱性に依じてある亀裂長さで停止することにある。二重引張試験が温度勾配型であるのにたいし、応力勾配型であるといえよう。したがって、亀裂停止点における歪エネルギー解放率がわかれば、材料特性としての K_{IC} 値がもとめられ、二重引張試験と本質的に一致した結果が得られるはずである。

図-1は、今回開発されたテーパー形DCB試験片の形状を示す。従来の諸試験片と異なる点は、亀裂発生部のノッチ先端にもろい溶着鋼をおき、室温に近い高温でも脆性亀裂が発生するようにしたこと、 K_{IC} 値の測定範囲を拡げるためにテーパー形とし、梁の断面が亀裂の伝播とともに減少するようにしたことなどである。この試験片を冷却槽にセットし、ピン穴に引張荷重を与えて脆性亀裂を発生させ、亀裂の停止長さを調べて、伝播停止特性としての K_{IC} 値をもとめるのである。

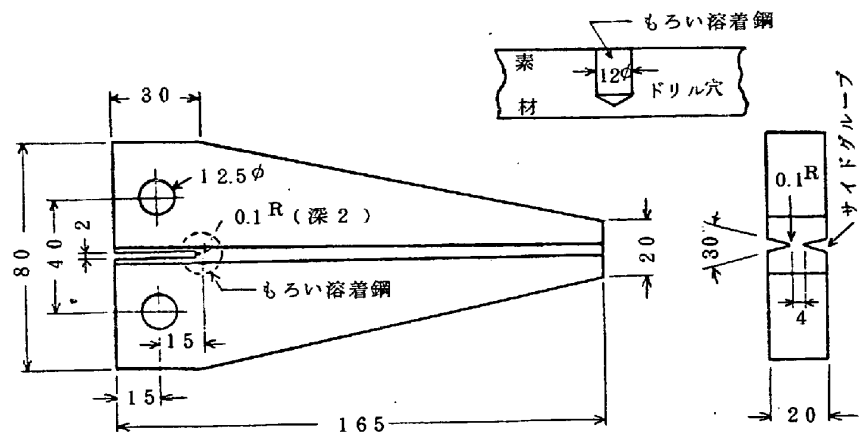


図-1 テーパー形DCB試験片の形状

引張試験機のカロスヘッドの動きは、脆性亀裂の伝播速度に比べれば無視できるほど小さく、亀裂が発生して停止するまでの間に定変位条件が保たれているとして、 K_c 値は次式で与えられる。

$$K_c = y \sqrt{\frac{E}{2w} \left(-\frac{dM(c)}{dC} \right)} \quad \text{----- (1)}$$

ここで y : 亀裂発生時のピン間変位 E : 弾性係数
 w : 破面巾 $M(c)$: 亀裂長さ C での試験片のバネ定数 C : 亀裂長さ

今回開発された試験片について、切欠を機械加工によって延長し、亀裂長さ C とバネ定数 $M(c)$ の関係を実測し、その結果を近似式で表わして、次式を得た。

$$K_c = y \sqrt{\frac{E}{2w} \beta e^{\alpha - \beta c}} \quad \text{----- (2)}$$

ここで $\alpha = 9.95$ $\beta = 0.0409$ $w = 4 \text{ mm}$

したがって、発生荷重をクロスヘッドの変位 y に換算し、停止亀裂長さ c を測定すれば上式から伝播停止特性としての K_c 値がもとめられる。

以上の方法により、12種類の鋼板についてテーパ形 DCB 試験を実施し、二重引張試験の結果と比較した。その一例を図-2に示す。温度と K_c 値の関係は両試験結果とも類似しているが、テーパ形 DCB 試験の K_c 曲線は二重引張試験の K_c 曲線よりもやや高温側に現われる。その程度は、鋼板の板厚に依存することが明らかとなった。

図-3は、テーパ形 DCB 試験の結果が二重引張試験の結果よりもどの程度高温側に現われるかを示したものである。板厚の増大とともに両者の温度差は小さくなり、50mm で一致する。50mm 以下の板厚については、テーパ形 DCB 試験により得られた K_c 曲線を、板厚に応じてこの図に示された温度だけ低温側に移行することによって、かなり正確に二重引張試験の結果を推定することができる。

テーパ形 DCB 試験と二重引張試験の対応における板厚の影響は、二重引張試験におけるいわゆる板厚効果を示すものであり、またテーパ形 DCB 試験における亀裂先端の応力状態が、深いサイドグループの影響によって、二重引張試験における 50mm の板厚の中心部における応力状態と同等の厳しい三軸応力度にあることを示していると考えられる。

以上によって、テーパ形 DCB 試験は、二重引張試験に代替し得る、小型の材質試験として有用であることが証明された。

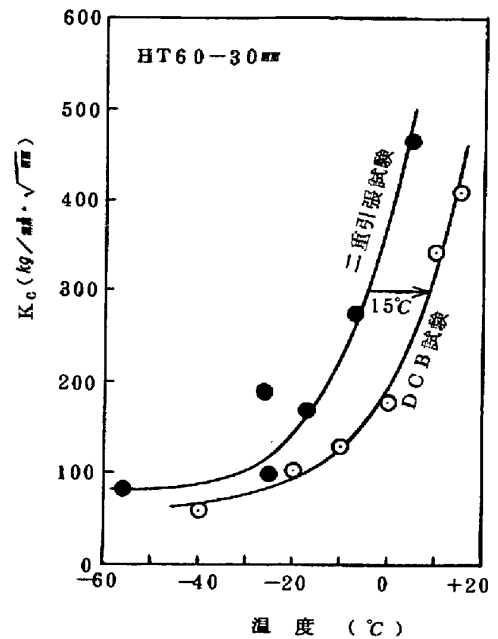


図-2 テーパ形 DCB 試験結果と二重引張試験結果の対応例

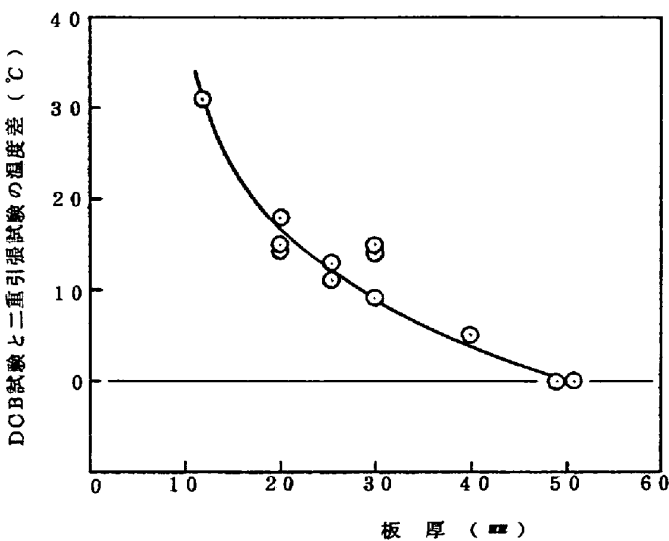


図-3 テーパ形 DCB 試験結果と二重引張試験結果の対応にたいする板厚の影響

■ Ni 添加鋼板の脆性破壊伝播停止特性

テーパ形 DCB 試験が、二重引張試験ときわめて良好な対応を示すことが明らかになったので、低C-Mn鋼にNiを添加してその脆性破壊伝播停止特性を調べ、鋼材の靱性を向上させる基本成分であるNi量の影響と熱処理の影響を明らかにすることを試みた。

表-1は供試鋼板の化学成分である。Ni量を0~5%の範囲で変化させ、2.4mm厚に圧延した。熱処理は焼ならしおよび焼入れ・焼もどしの2種とした。降伏点は焼ならし材で27~40kg/mm²、焼入れ・焼もどし材で32~55kg/mm²、引張強さは焼ならし材で41~64kg/mm²、焼入れ・焼もどし材で45~65kg/mm²の間をNi量の増加にともなって順次変化している。

図-4および図-5は、以上の鋼板におけるテーパ形DCB試験とシャルピー衝撃試験の結果である。テーパ形DCB試験におけるG種およびA種温度は公称降伏点を50kg/mm²として計算したものであり、前章の結果によれば、板厚5.0mmの場合の二重引張試験に対応するものである。

これらの図によれば、脆性破壊伝播停止特性を表わすG種温度(K_c=140kg/mm²・mm)およびA種温度(K_c=443kg/mm²・mm)とシャルピー衝撃特性であるvT_sとは、Ni量にたいして明らかに異なった挙動を示していることが判然とする。図-4の焼ならし材において、vT_sはNi量2%以上で

表-1 供試鋼板の化学成分(%)

記号	C	Si	Mn	P	S	Ni
0	0.10	0.25	0.55	0.009	0.007	0.03
1	0.10	0.27	0.57	0.010	0.007	1.05
2	0.10	0.31	0.61	0.009	0.008	2.26
3	0.09	0.24	0.52	0.009	0.008	3.00
4	0.09	0.26	0.54	0.008	0.008	3.85
5	0.10	0.30	0.57	0.009	0.011	5.11

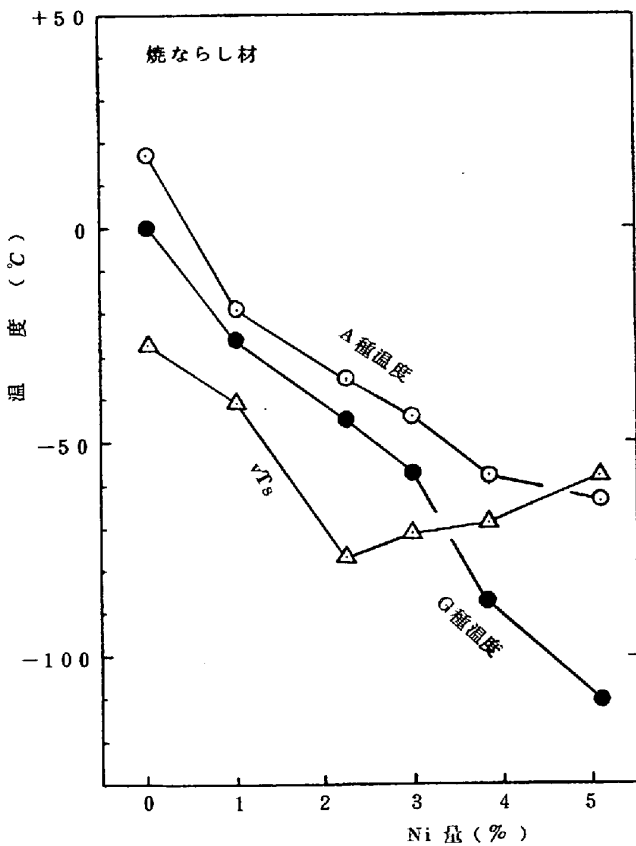


図-4 焼ならし材の試験結果

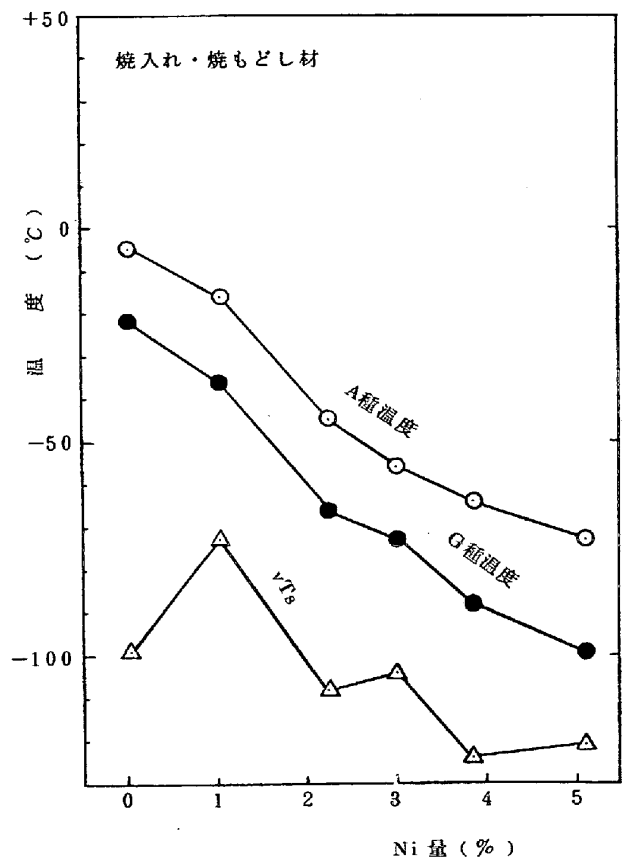


図-5 焼入れ・焼もどし材の試験結果

はかえって劣化するが、G種およびA種温度は5%まで単調に向上していく。vTsの2%以上の劣化は、組織観察によれば粗いベイニティックな組織の発達に対応しており、脆性破壊伝播停止特性はかかる組織変化に鈍感であると解釈された。他方、図-5の焼入れ・焼もどし材においてもNi量0%と1%の比較において、vTsとG種およびA種温度との間に傾向の逆転がみられるが、これも組織観察から1%Niにおけるベイニティックな組織が伝播停止特性に影響を与えないことで説明できた。

図-6は、焼入れ・焼もどしによって、焼ならし材よりもどの程度の特性の向上がみられるかを、Ni量との関係において示したものである。シャルピー衝撃特性を示すvTsは、熱処理の変化による組織の微細化を反映して大巾な向上がみられ、Ni量1~3%の範囲でほぼ30℃、0

および4~5%ではそれ以上の向上を示す。しかるに脆性破壊伝播停止特性を表わすG種およびA種温度は最大20℃、ほぼ10℃程度の向上しか示さず、vTsとは傾向的にも一致しない。したがって、脆性破壊伝播停止特性は、熱処理の変化による組織の微細化にたいしても鈍感であると解釈される。

以上の実験結果から、Niを添加した低C-Mn鋼板に関して次のような結論を得ることができた。

- (1)脆性破壊伝播停止特性は、焼ならし材においても焼入れ・焼もどし材においてもNi添加量の増大につれて直線的に向上する。シャルピー衝撃特性を劣化させるベイニティックな組織は、伝播停止特性に影響をおよぼさない。
- (2)熱処理の変化による組織の微細化は、シャルピー衝撃特性を大巾に向上させるが、脆性破壊伝播停止特性の向上はわずかであるにすぎない。
- (3)総じて、脆性破壊伝播停止特性とシャルピー衝撃特性は明らかに異なった挙動を示す。前者は化学成分(Ni量)の変化にたいしては敏感であるが、組織の変化(ベイニティックな組織、熱処理による組織の微細化)にたいしては鈍感である。

IV 結言

鋼材の靱性は、脆性破壊にたいする安全性を保証するために要求される材料特性である。溶接用鋼材の母材としての性能は、脆性破壊の発生特性よりも伝播停止特性が必要とされる。この意味で、シャルピー衝撃特性の意義は明瞭でなく、かわって二重引張試験を代替するテーパ形DCB試験が、鋼板の改良や開発に利用されることが期待される。また、本報告におけるNi添加鋼板についての結論はまだどこまで一般化できるかは明らかではないが、シャルピー衝撃特性と脆性破壊伝播停止特性がかなり異なった挙動を示すであろうことは明らかであり、テーパ形DCB試験が鋼材の靱性を支配する諸要因について新しい知見をもたらすことを期待してよいであろう。

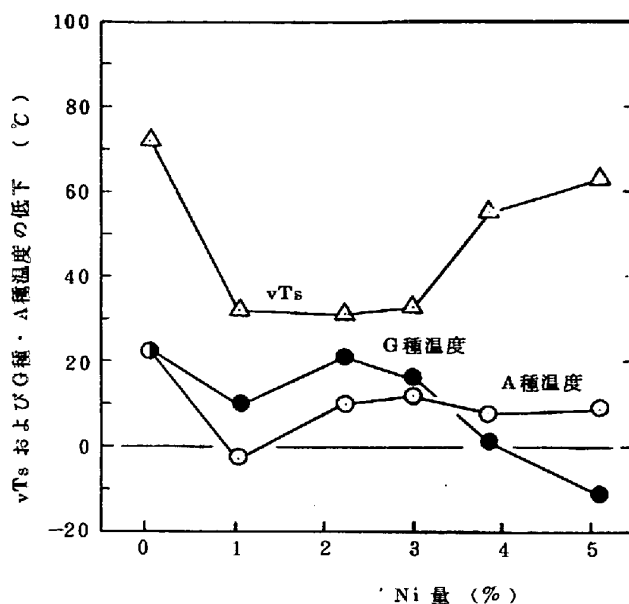


図-6 Ni量と熱処理(焼ならし → 焼入れ・焼もどし)による特性の向上の関係