

論 文

UDC 621.785.72.019 : 621.791.05 : 669.14.018.29 : 620.178-7

鋼材の破壊靱性評価法としての落重試験法の検討*

大西 敬三**・塚田 尚史***・鈴木 公明***
村井 正光**・田中 泰彦***

Study of Drop Weight Test Procedure for Evaluation of Fracture Toughness of Steels

Keizo OHNISHI, Hisashi TSUKADA, Komei SUZUKI,
Masamitsu MURAI, and Yasuhiko TANAKA

Synopsis:

A study of the drop weight test procedure for the evaluation of fracture toughness of steels has been made using normal P-2 type specimen and fatigue notch type specimen. NDTTs of the steel having high susceptibility to temper embrittlement, which are evaluated by using P-2 type specimen, are significantly affected by the heat affected zone under the crack starter bear. In this case, the drop weight test of the fatigue notch type specimen is recommended.

There are some steels showing the large deviation of NDTT from the relation between NDTT and FATT which are widely known. For these steels, a method to estimate the deviation has been proposed.

It has been also found that NDTT has a good relationship to shear fracture transition property of the steels obtained by the fatigue crack notch Charpy impact test.

1. 緒 言

落重試験法は、低炭素鋼板の NDT (Nil Ductility Transition) 温度を求める工業的手法として、1952 年に米国 NRL (Naval Research Laboratory) において開発された。この試験法についての詳細は、ASTM・E208 に規格化されており、板状試験片上に硬化肉盛り溶接ビードを置いて、クラックスターターとしてノッチを切り、重錘の落下によりノッチ底からき裂を発生させ、その伝播状態により NDT 温度を評価するものである。

NDT 温度は、本来 Explosion Crack Test において脆性破壊の伝播がほとんど変形なしに可能な状態に遷移する温度、言い換えれば、微小き裂が存在する場合の脆性破壊発生の最高温度の意味に使われており、W. S. PELLINI らにより提案された FAD (Fracture Analysis Diagram) に基づく、脆性破壊発生防止の設計の基本となるものである。

この温度は、遷移温度を用いた安全設計の基準として、シャルピー破面遷移温度と同様に広く利用されている

が、ASME Code Section III, 1972 年 Summer Addenda Appendix G にみられるような線型破壊力学を用いた破壊靱性の評価にも用いられている。ここでは構造物の仮想欠陥と設計応力から計算される K_I 値が、使用温度における破壊靱性値 K_{IR} (Reference stress intensity factor) より小さいことが破壊防止の条件とされており、この K_{IR} は落重試験による NDT 温度およびシャルピー試験による吸収エネルギー、横膨出量から決められる RT_{NDT} (Reference Nil Ductility Transition Temperature) を用いて計算される。しかし、多くの材料では、この RT_{NDT} が NDT 温度で決まってしまうため、落重試験による NDT 温度は、重要な役割を果たしているといえる。

落重試験法については、ビードの熱影響¹⁾²⁾、溶接時における予熱・後熱の影響²⁾³⁾、ビードによる拘束の効果⁴⁾、試験片の形状・大きさ⁵⁾、重錘のエネルギー、などさまざまな観点から検討がなされており、これらの研究の成果ともいえる ASTM・E208 にしたがって試験を行えば、NDT 温度は精度よく求まるとされている。

* 昭和 50 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 12 月 5 日受付 (Received Dec. 5, 1977)

** (株)日本製鋼所室蘭製作所 工博 (Muroran Works, The Japan Steel Works Ltd., 4 Chatsu-cho Muroran 051)

*** (株)日本製鋼所室蘭製作所 (Muroran Works, The Japan Steel Works Ltd.)

しかし、これらの研究の多くは、低炭素鋼についてなされたものであり、例えば、前記 ASME Code Section III の対象となるような圧力容器用の低合金鋼については、あまり検討されていないのが現状である。したがって、このような低合金鋼の落重試験に関しては、その妥当性について再検討が必要であり、特に焼戻し脆化感受性の強い材料については、溶接の熱影響に關しての考察が必要である。

本研究では、落重試験片における熱影響部の存在が、圧力容器用鋼など低合金鋼の NDT 温度決定に、いかなる効果をもたらすかを調べ、溶接肉盛りビードを用いた、ASTM-E208 に基づく落重試験法がこれらの鋼種の破壊靱性評価法として適当であるかどうかを検討する。

2. 供 試 材

本実験で用いた鋼種は、次に示すものであり、いずれ

も構造用鋼として実際に用いられている材料である。

- (1) 0.2% 炭素鋼 (ボイラー用鋼板)
- (2) ASTM A387D (化学工業用高压容器材料)
- (3) ASTM A508Cl.1, A508 Cl.2, 3%Cr-Mo-V 鋼 (原子炉圧力容器用材料)
- (4) 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 (焼戻し脆化愛受性の強い高 Si のNi-Cr 系鍛鋼軸材)

これらの材料の化学成分を Table 1 に示す。またその熱処理および機械的性質を Table 2 に示す。熱処理はすべて製品に通常行なわれるものによつて行なつたが、A387D 鋼 C2 材、高 Si 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材では、調質終了後、材料を脆化させるために、ステップ冷却処理を行なつた。

3. 実 験 方 法

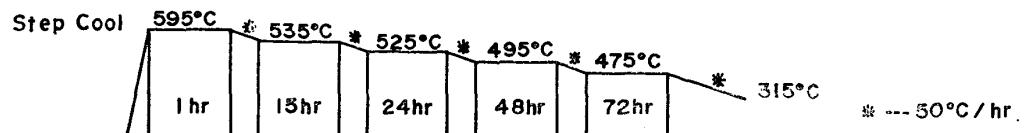
試験片は、ASTM-E208 に規定された P-2 試験片、

Table 1. Chemical compositions of materials tested.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	As	Sn	Sb
Boiler Steel A	.19	.36	.63	.007	.012	.18	.07	.05	<.01	.017	—	—	—
Boiler Steel B	.25	.28	.81	.012	.006	.11	.11	.05	<.01	.017	—	—	—
A387D	.16	.30	.50	.019	.013	.18	2.32	1.02	<.01	—	.029	.022	.0050
A508Cl. 1	.18	.24	1.21	.008	.007	.35	.15	.11	<.01	.024	.015	.014	.0030
A508Cl. 2	.20	.28	.90	.007	.005	.86	.37	.53	<.01	.024	.012	.010	.0034
3%CrMoV	.18	.24	.50	.014	.010	.02	2.93	.68	.32	—	.007	.006	.0015
3.5%NiCrMoV	.22	.34	.34	.010	.009	3.66	1.89	.42	.12	—	.011	.013	.0034

Table 2. Heat treatments and mechanical properties of the materials.

Material	Heat Treatment	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	FATT (°C)
Boiler Steel A	A 620°CX5hr (A.C)	31.8	50.5	3
Boiler Steel B	B 920°CX8hr (A.C)+650°CX2hr (F.C)	31.7	53.5	9
A387D	C1 920°CX3hr (W.Q)+655°CX7hr (A.C)	66.5	81.9	-40
	C2 C1+Step Cool	68.5	80.0	15
A508Cl. 1	D 895°CX12hr (W.Q)+660°CX9hr (A.C)	39.0	55.3	-55
A508Cl. 2	E 890°CX8hr (W.Q)+665°CX12hr (A.C)+600°CX30hr (F.C)	45.3	61.7	0
3%CrMoV	F 960°CX5hr (W.Q)+680°CX6hr (A.C)+695°CX18hr (F.C)	57.9	69.0	-64
3.5%NiCrMoV	G1 840°CX29hr (Fan)+605°CX52hr (Fan)	71.0	87.1	0
	G2 840°CX2hr (O.Q)+660°CX8hr (W.Q)	67.1	82.9	-120
	G3 G2+Step Cool	68.0	81.4	60



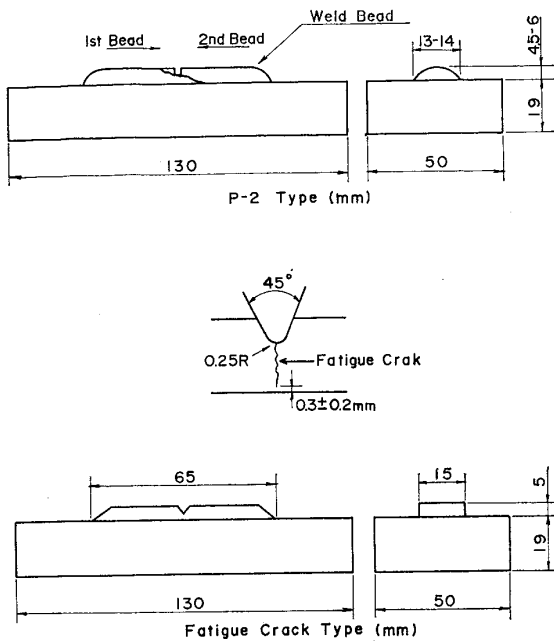


Fig. 1. Dimensions of P-2 and fatigue crack type drop weight specimen.

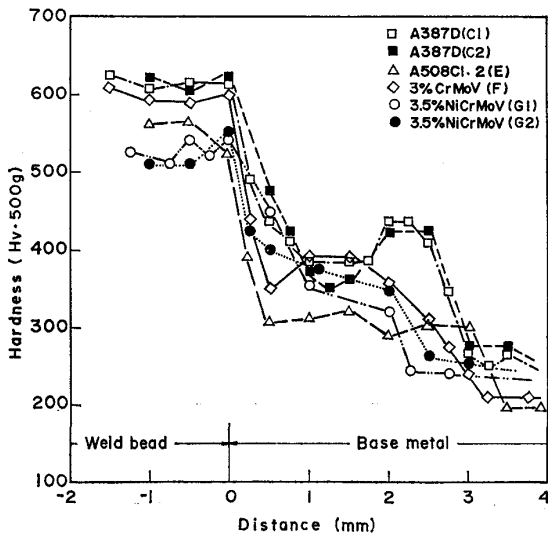


Fig. 2. Change of hardness in heat affected zone of P-2 type specimen for each material.

およびビードを盛らずに、P-2 試験片と同形状のものを切り出し、クラックスターターとして疲労き裂を導入したもの（以下疲労き裂付与試験片とよぶ）を用いている。Fig. 1 にこれらの試験片の形状およびき裂導入位置を示す。なお疲労き裂導入の際には、き裂先端の大規模な塑性変形を防ぐために、繰り返し応力が、降伏応力の 1/2 以下となるように配慮した。

Fig. 2 は P-2 試験片の溶接ビード近傍のかたさ分布を示したものであるが、どの鋼種にも、ビード下 2~3 mm に、熱影響が現われていることがわかる。

Table 3. Results of drop weight test by P-2 and fatigue crack type specimens.

Material		NDTT (°C)		FATT (°C)
		P-2	Fatigue	
Boiler Steel A	A	-10	-20	3
Boiler Steel B	B	-25	-25	9
A387D	C1	-25	-20	-40
	C2	-25	45	15
A508Cl. 1	D	-40	-50	-55
A508Cl. 2	E	-40	-40	0
3%CrMoV	F	-20	-20	-64
3.5%NiCrMoV	G1	-100	-35	0
	G2	-130	-125	-120
	G3	-85	10	60

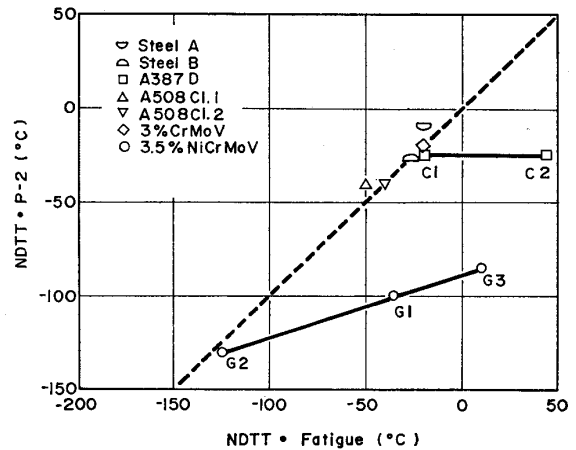


Fig. 3. Relation between NDTs obtained by P-2 and fatigue crack type specimens.

落重試験は、ASTM・E208 にしたがって行ない、試験後伝播したき裂の長さ、破面のマクロ的観察および走査型電子顕微鏡による観察を行なった。

また、各供試材について、シャルピー衝撃試験を行ない、遷移特性、破断面状態などと落重試験結果との関連を調べた。

4. 試験結果

4.1 P-2 および疲労き裂付与試験片による落重試験結果

熱影響部が NDT 温度におよぼす効果を調べるために、熱影響部の存在しない疲労き裂付与試験片を用いて NDT 温度を求め、P-2 試験片による NDT 温度との関連を調べた結果をつぎに示す。

Table 3 には、疲労き裂付与試験片および P-2 試験片の両試験片により得られた NDT 温度および、参考としてシャルピー衝撃試験による破面遷移温度 (FATT) を示した。また Fig. 3 には両試験片による NDT 温度

3.5% NiCrMoV (G2)

Specimen	Temperature (°C) and Results			
	-150	-130	-125	-120
P-2 Type	● Th Th	● ○ Th Th 5.0 9.5	○ ○ 6.2 4.8 5.8 6.4	○ 3.5 6.3
Fatigue Crack Type	● Th Th	● ○ Th 2.8 7.6 5.0	○ ○ 4.4 7.0 0.6 1.6	○ 0 0

3.5% NiCrMoV (G3)

Specimen	Temperature (°C) and Results				
	-100	-90	-85	-80	-50
P-2 Type	● Th Th	● Th Th	● Th Th	○ ○ 0.6 0.8 0 0	○ 0 0
Fatigue Crack Type	● Th Th	● Th Th	● ○ Th 4.7 7.2 5.6	○ ○ 5.5 6.4 2.8 6.6	○ 0 0

Fig. 4. Results of drop weight tests for quench-and-tempered (G2) and embrittled (G3) 3.5% Ni-Cr-Mo-V steel. Solid and open circle mean Break and No-break of specimen respectively, and numbers below the symbol show length of propagated crack on the surface of specimen and also (Th) meant propagation of the crack on entire surface of specimen.

の関係を示す。試験結果から明らかなように、通常の調質材においては、両試験片による NDT 温度の差異は認められないが、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼の G1, G3 材, A387D 鋼 C2 材など脆化材においては、両試験片による NDT 温度に顕著な差が認められる。さらに両試験片による NDT 温度の差は、脆化の度合いが大きくなるにつれて増加しており、疲労き裂付与試験片による NDT 温度は、P-2 試験片によるものより常に高くその差は 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材では 95°C にも達している。

Fig. 4 は 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼焼入れ焼戻し材 (以下 QT 材と記す) G2, および脆化材 G3 の破壊-非破壊の挙動を例として示したものである。QT 材では、各温度における両試験片の破壊-非破壊挙動には大きな差はみられないのに対し、脆化材では、P-2 試験片では全くき裂が伝播しない温度域においても、疲労き裂付与試験片は破壊していることがわかる。

以上のように、A387D 鋼や 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼など、強い焼戻し脆化感受性を示す鋼種では、材料の脆化状態によっては、両試験片による NDT 温度に大きな差を生じる場合のあることがわかった。

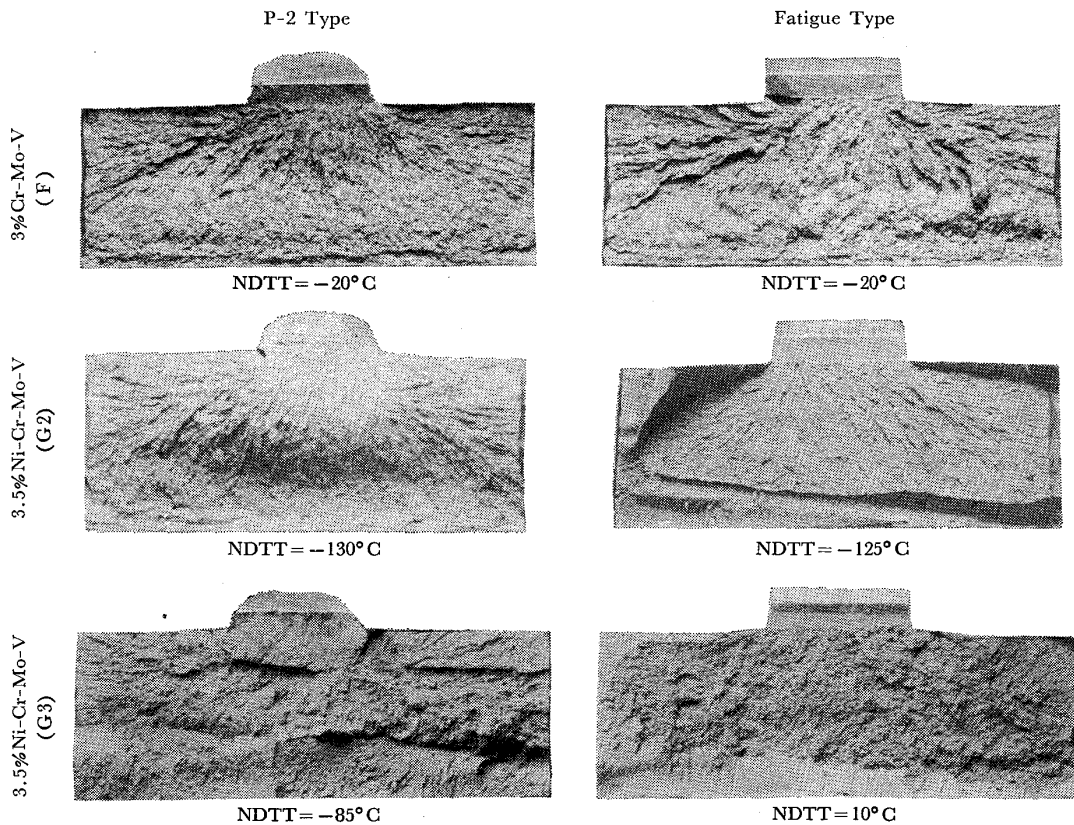


Photo. 1. Fracture surface 3%Cr-Mo-V steel, quench-and-tempered (G2) and temper embrittled (G3) 3.5%Ni-Cr-Mo-V steel at NDTT.

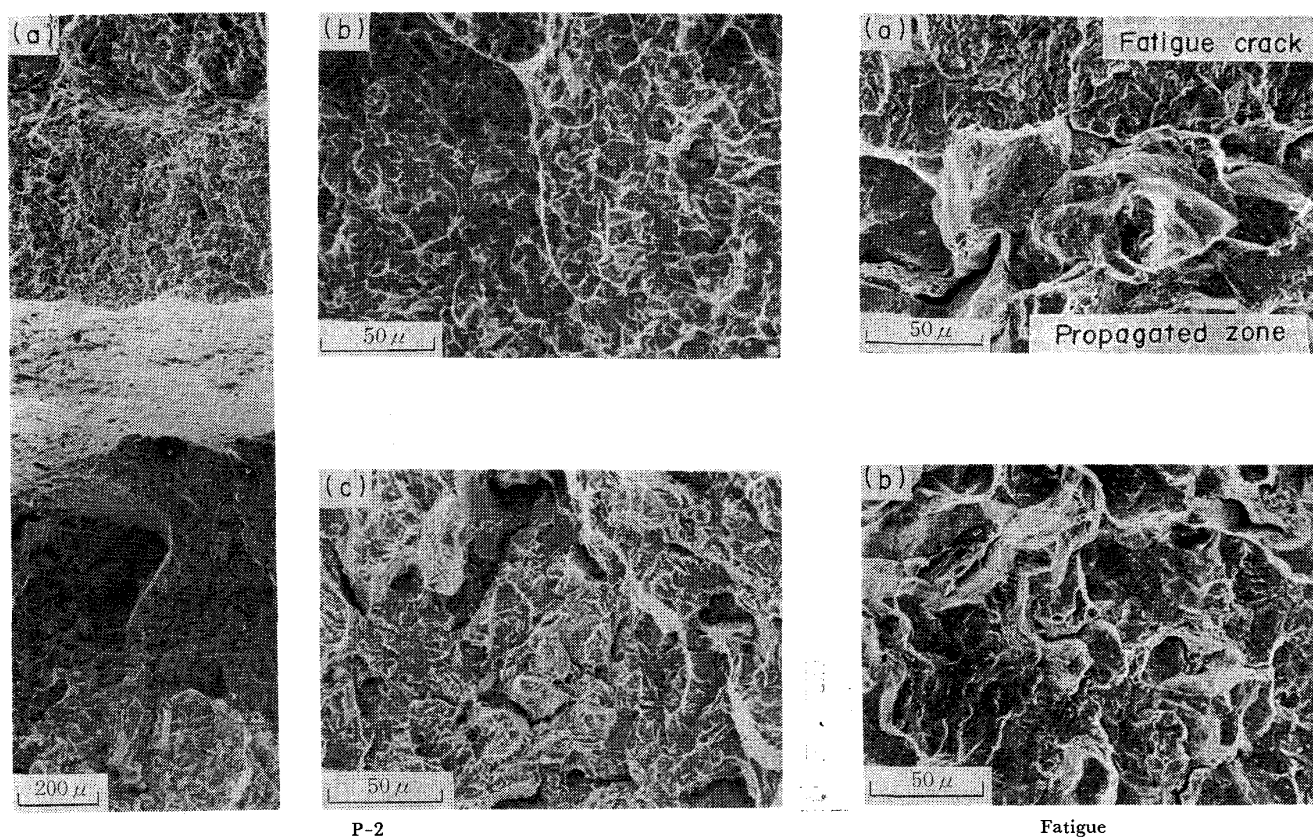


Photo. 2. Scanning electron micrographs of fracture surface of P-2 and fatigue crack type specimen at NDTT for embrittled 3.5%Ni-Cr-Mo-V steel.

P-2 (a) Overall view of heat affected zone

(b) Coarse grain zone

(c) Tempered area by welding of crack-starter bead

Fatigue (a) Near the fatigue crack tip

(b) Crack propagated area

4.2 破面観察

P-2 および 疲労き裂付与試験片伝播の様子を調べるために破面観察を行なった。Photo. 1 には、3%Cr-Mo-V 鋼および 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G2, G3 材の NDT 温度における破面を示す。3%Cr-Mo-V 鋼および 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G2 材は P-2, 疲労き裂付与試験片とも、ほとんど同じ NDT 温度を示しており、破面のマクロ的形態は当然のことながら、両者類似し、き裂は切欠き底部からなめらかに伝播している。脆化処理を行なった G3 材の場合、疲労き裂付与試験片では、疲労き裂の先端から直ちに伝播した形態であり、破面全体もなめらかなのに対し、P-2 試験片では、溶接ビード下の熱影響層近傍において、き裂の停滞部分が認められ、そこからさらに大きく伝播した様相を呈している。

Photo. 2 に、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材の両試験片破面の走査電子顕微鏡写真を示す。疲労き裂付与試験片では、破面全体が粒界破壊を呈しているのに対し、(Fatigue (a), (b)) P-2 試験片では、ボンド部直下の擬劈開破壊から、細粒層付近でのディンプル破壊、さら

に母材部での粒界破壊と破壊様式が変化している (P-2, (a), (b), (c))。また A387D 鋼 C2 材においても上記と全く同様の観察結果を得た。

Photo. 3 は、3%Cr-Mo-V 鋼および 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G2 材, G3 材の NDT 温度+5°C における試験片断面のき裂の状態を示したものである。3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G2 材では、P-2, 疲労き裂付与試験片とも、き裂が母材深くまで達しているのに対し、G3 材では、疲労き裂付与試験片でき裂が深くまで伝播しているが、P-2 試験片では熱影響部細粒化層でき裂が停止している。この材料では、P-2 試験片による NDT 温度が疲労き裂付与試験片に比べ 95°C も低くなつており、その原因は熱影響層でき裂の伝播が阻止されているためと考えられる。また 3%Cr-Mo-V 鋼では、疲労き裂付与試験片にき裂の伝播が見られないのに対し、P-2 試験片では母材にまで伝播しており、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材とは逆の様相を示している。この原因に対する考察は後で述べることにする。

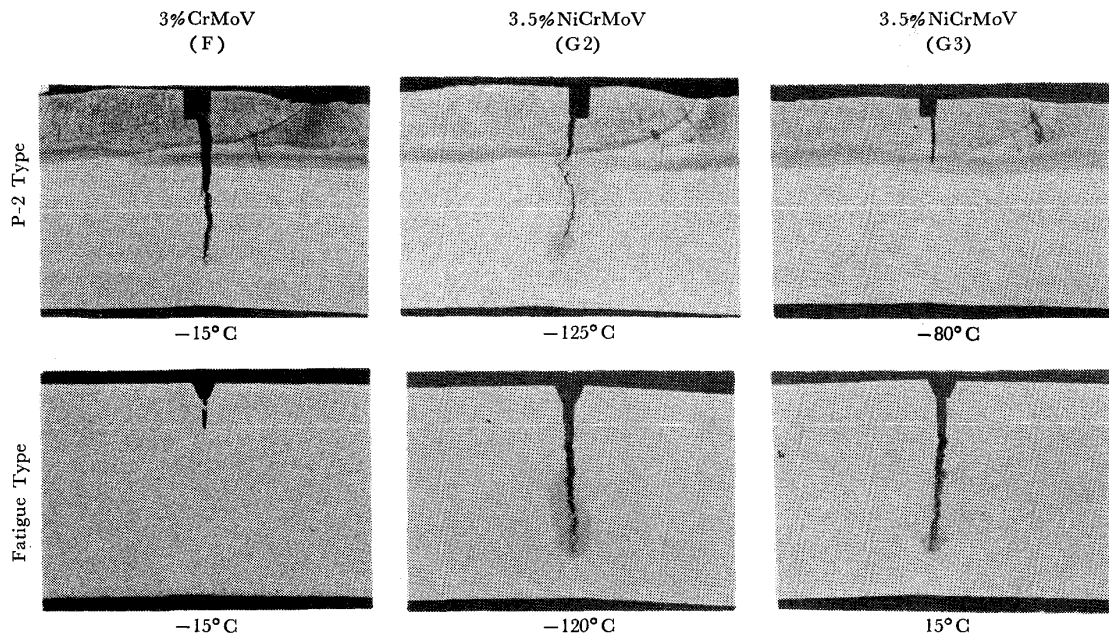


Photo. 3. Cross sections of drop weight specimens at NDTT+5°C.

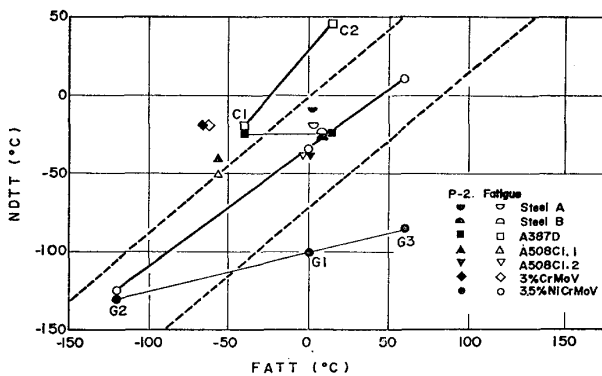


Fig. 5. Relation between FATT and NDTT. Solid and open symbol indicate the relation obtained by P-2 and fatigue crack type specimens respectively.

4.3 NDT 温度と FATT との関係

Fig. 5 に両試験片から得られた NDT 温度と FATT との関係を示す。図中の破線は GROSS が求めた NDT 温度と FATT との相関を示す回帰領域⁶⁾を示したものである。

この関係は、

$$NDTT = 0.89 \times FATT - 37 (\pm 36) \text{ } ^\circ\text{C}$$

という式で与えられるが、鋼 A、鋼 B、A508Cl.2 鋼などの鋼種について両試験片で得られた NDT 温度および A508Cl.1 鋼、3.5% Ni-Cr-Mo-V 鋼の疲労き裂付与試験片による NDT 温度はこの領域に含まれている。しかし、A 387D 鋼および 3%Cr-Mo-V 鋼の NDT 温度は GROSS の示す破線領域よりさらに高温側にずれ、3.5% Ni-Cr-Mo-V 鋼 G1, G3 材は破線領域より低温側にず

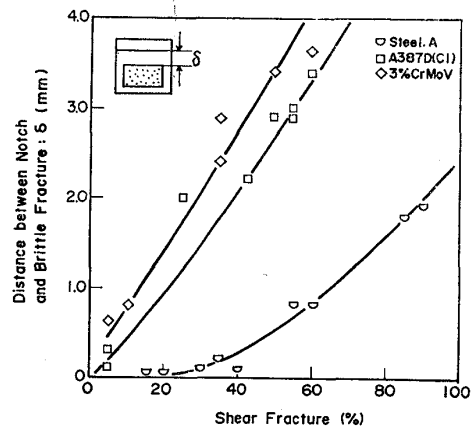


Fig. 6. Relation between shear fracture and width of plastic zone (Distance between bottom of notch and upper edge of brittle fracture of V-notch Charpy specimen).

れていることがわかる。

Fig. 6 は、ボイラー鋼 A、A387D 鋼、3%Cr-Mo-V 鋼のシャルピー試験片破面におけるノッチ底の塑性域の幅 (δ) と延性破面率の関係を示したものである。この図から GROSS の関係より高温側にずれる材料は、この幅が広く、ずれの程度とこの幅とはかなりよい対応がある。一方、低温度側の NDT 温度のずれについては、前項で述べた焼戻し脆化材の靱性回復に起因すると考えられる。

5. 考 察

5.1 両試験片による落重試験成績の差異についての考察

Fig. 3 に示したように、ASTM-E208 に規定された

P-2 試験片と、疲労き裂を導入した試験片により得られた NDT 温度は、大部分の鋼種では一致しているが、脆化材である A387D 鋼 C2 材、35%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G1, G3 材では両者の一致はみられず、P-2 試験片による NDT 温度は疲労き裂付与試験片によるものより、かなり低温側にずれている。

両試験片の基本的なちがいは、P-2 試験片には溶接部が存在し、一方疲労き裂付与試験片にはそれが不存在することである。P-2 試験片の熱影響部組織は、ボンド部近傍では粗大なマルテンサイトとなり、それから離れるにしたがつて結晶粒は細かくなって、 A_3 点付近まで加熱された位置では、微細なものとなる。また最高加熱温度が A_1 点以下の位置では、変態による組織変化はみられない

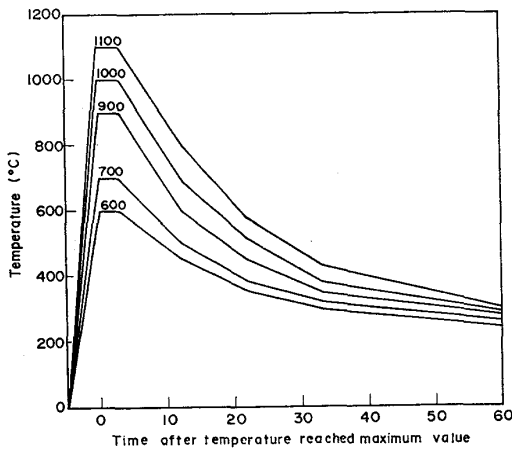


Fig. 7. Simulated weld thermal cycle curve.

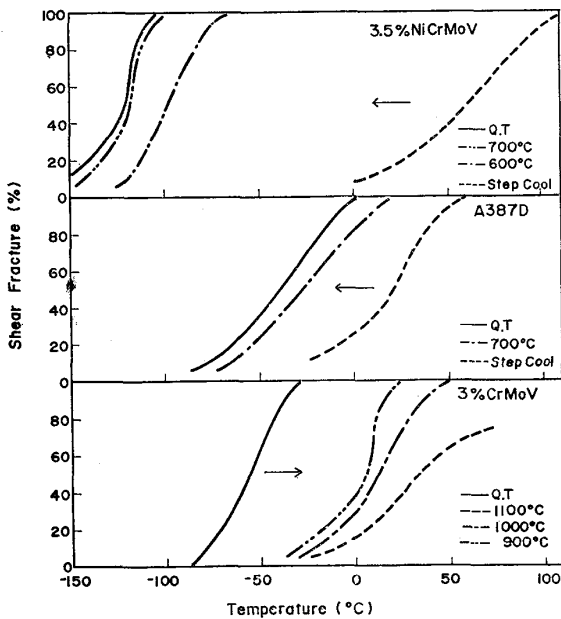


Fig. 8. Effect of weld thermal cycle on shear fracture transition properties of Charpy impact test.

いが、この温度域においても、鋼種によつては強い熱影響を受ける。このような溶接熱影響による母材の靱性の変化を知るために、両試験片による NDT 温度の差が大きかつた A387D 鋼 C2 材、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材および差の認められなかつた 3%Cr-Mo-V 鋼について、溶接熱サイクル装置を用いて、熱影響部の組織を再現し、その靱性について調べた。与えた溶接熱サイクルは Fig. 7 に示すもので、実測値に基づいて設定した。Fig. 8 には上記 3 鋼種について、熱サイクル付与後の破面遷移曲線と Q.T 材、脆化材の破面遷移曲線を併せて示した。この図から、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼 G3 材および A387D 鋼 C2 材では、600°C 以上の瞬間加熱により靱性がほぼ完全に回復することがわかる。一方、3%Cr-Mo-V 鋼では、熱影響部で靱性が最もよくなるといわれている 900°C ~ 1000°C に加熱された細粒層においても、靱性が母材より劣化していることがわかる。以上の結果から、脆化材の P-2 試験片熱影響部には、明らかに靱性回復領域が存在し、これが NDT 温度に影響を与えていると考えられる。すなわち、熱影響部でき裂の伝播がおこる温度が、脆化前の母材の NDT 温度付近まで下がり、その結果、NDT 温度が靱性回復層のない疲労き裂付与試験片より低くなつたといえる。P-2 試験片によつて得られる A387D 鋼 C2 の NDT 温度は、Q.T 材 G1 の NDT 温度と等しく、3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼の G1, G3 材でも Q.T 材 G2 の NDT 温度に近い値を示すことも、上記の事実を裏づけるものである。

Fig. 9 は、すでに Fig. 3 に示した 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼の試験結果に加え、G1 材に脆化処理を施し、P-2 試験片により求めた NDT 温度および G1 材による P-2 試験片に脆化処理を与えた後に求めた NDT 温度を示

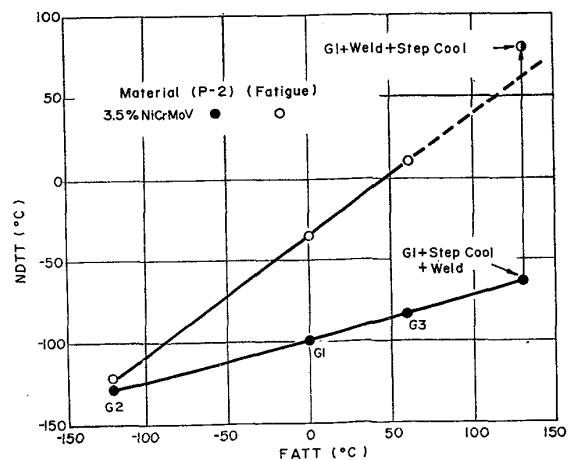


Fig. 9. Comparison of NDTs by P-2 type specimens welded after and before step cool treatment.

す。図からも明らかなように、P-2 試験片製作後、すなわちビード溶接後に脆化処理をした試験片による NDT 温度は、疲労クラック試験片により得られた種々の熱処理材の一連の NDT 温度を結ぶ直線の延長線上にあり、一方、脆化処理後ビードを置いて求めた NDT 温度は、P-2 試験片により得た NDT 温度を結ぶ直線上にある。以上のような方法によつても、靱性の高くなつた熱影響層の存在により NDT 温度が低くなることが確認できた。

このように、確かに P-2 試験片と疲労き裂試験片により NDT 温度が大きく異なる鋼種が存在するが、3% Cr-Mo-V 鋼はじめボイラー鋼 A, B など両者に差が現われない鋼種も多い。これらの両試験片により差の現われない鋼種は、3%Cr-Mo-V 鋼のように細粒化部で靱性の劣化する鋼種、あるいは熱影響により靱性が大きく変化しない鋼種といえる。

以上の結果から、脆化感受性の強い材料では、溶接熱影響によつて靱性が回復するため、P-2 タイプの落重試験片では正確な NDT 温度が得られない可能性がある。このような場合は、疲労き裂を導入した試験片を用いれば、正確な NDT 温度が得られると考えられ、現時点では NDT 温度を求める方法として、疲労き裂付与試験片を用いた落重試験が推奨できる。

本来ここで述べたような考察は、破壊力学との関連においてなされるべきであり、熱影響による靱性回復層の厚さ、およびその層における破壊靱性値などが考慮されなければならないが、これに関しては後でふれることにする。

5.2 材料の FATT からみた NDT 温度のばらつき

NDT 温度と FATT との関連は Fig. 5 に示したとうりであり、図中の 2 本の破線で囲まれた範囲は Gross が求めた回帰領域を示している。供試鋼材の大部分はこの領域に含まれるが、先に述べたとうり、NDT 温度が大きく低温側にずれるものとして、P-2 試験片による 3.5% Ni-Cr-Mo-V G1, G3 材、また高温側にずれるものとしては、疲労き裂付与試験片による A387D 鋼 C1, C2 材および 3%Cr-Mo-V 鋼があげられる。

ここで 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼が低温側にずれるのは、前節で述べたように、溶接熱影響のためである。逆に高温側にずれる A387D 鋼や 3%Cr-Mo-V 鋼についてはき裂の伝播停止特性に関係するものと判断され、特にき裂伝播抵抗性は低いと考えられる。この点については Fig. 6 からわかるように、両鋼はいずれもシャルピー衝撃試験片の切欠き底の塑性変形領域 (δ) が大きい、シェアリップは非常に小さく、脆性破壊発生に至るまで

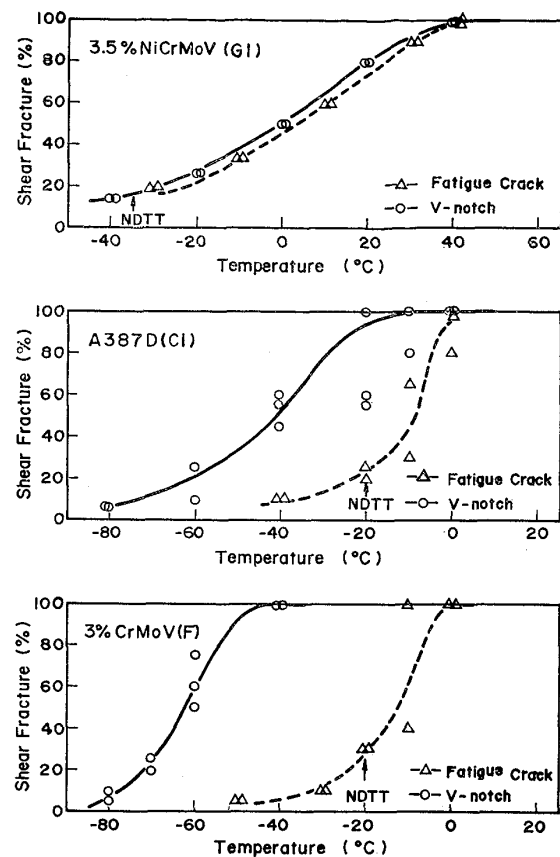


Fig. 10. Transition properties of V-notch Charpy specimen and fatigue crack specimen.

に大きなエネルギーを費す反面、発生したき裂は低エネルギーでも伝播することを意味している。この点を確認する意味で、あらかじめ疲労き裂を導入したシャルピー衝撃試験片を用いて、破面遷移性を調査した。試験片は深さ 1 mm の V ノッチを加工し、ノッチ底からさらに 1 mm の疲労き裂を導入したものである。試験結果を Fig. 10 に示す。図に明らかなように 3.5%Ni-Cr-Mo-V 鋼では疲労き裂付与シャルピー試験片、2 mm V ノッチ試験片ともに遷移挙動に変化は見られないが、A387D 鋼、3%Cr-Mo-V 鋼では、疲労き裂の導入により破面遷移温度 (FATT) は著しく高温側にシフトし、き裂先端の鋭どさの効果があらわれている。このシフトの程度は、NDT 温度の Gross の式により FATT から計算される値とのずれや Fig. 6 に示したような同一破面率における切欠底の塑性変形領域 (δ) の大きさと非常によい対応が認められ、これらが大きくなるほどシフト量も大きくなっている。以上の検討結果をとりまとめて、FATT における塑性変形領域幅 (δ) と Gross の式からの NDT 温度のずれとの関係について整理した結果、Fig. 11 に示すように、異なつた鋼種ではあるが直線関係を得ることができた。このことから、シャルピー衝撃試験片の

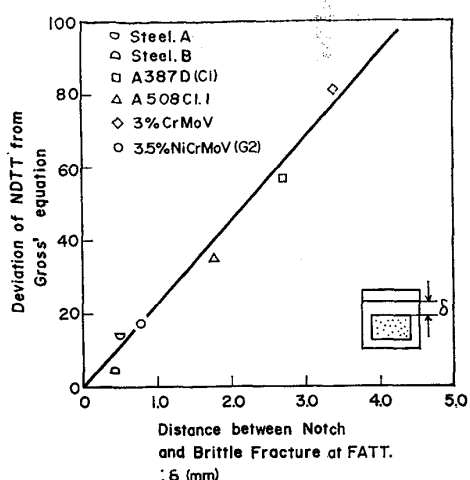


Fig. 11. Relation between width of plastic zone (δ) and deviation of NDT from GROSS' equation.

切欠底における塑性域の幅を調べることにより、NDT 温度のずれを推定することが可能であるといえる。また疲労き裂付与シャルピー試験片による破面遷移曲線で注目すべきことは、この曲線において 20~30% 剪断破面を示す温度域に NDT 温度があることである。したがって疲労き裂付与試験片を用いたシャルピー衝撃試験により、鋼種によらず、割合正確に NDT 温度を推定できる。

5.3 破壊力学によるアプローチ

材料の脆性破壊条件は、き裂の形状、深さ、作用する応力および K_{IC} 、 K_{Id} 、 K_{Ia} などの破壊靱性値により決まる。落重試験の場合、応力は降伏応力程度に限定されるため、予き裂の形状、深さおよび K_{Id} 、 K_{Ia} で決まるといえる。落重試験片の予き裂の深さは、溶接ビードおよび熱影響層の脆化部分と考えられるが、この深さは母材の性質により多少変化すると考えられ、正確な値を求めることは困難である。W. S. PELLINI⁷⁾は、予き裂の深さが NDT 温度に及ぼす影響を調べ、NDT 温度以上の温度では、 K_{Id} が急激に上昇するために、降伏応力程度の外力で破壊を発生させるには、より深い予き裂が必要になり、例えば、予き裂の深さを、通常の ASTM 落重試験片で予想されるもの (幅 20 mm、深さ 5 mm) の 2 倍程度にしても、NDT 温度より 10°C 高い温度では破壊は発生しないことを示した。したがって、溶接熱影響により脆化しやすい材料で、実質的な予き裂の深さが深くなつたとしても、NDT 温度はほとんど変化しないといえる。

3%Cr-Mo-V 鋼は、熱サイクル試験の結果からも明らかのように、熱影響によつて脆化しやすい材料であり、実質的な予き裂の深さは、かなり深いと考えられる。Photo. 3 に示したように、3%Cr-Mo-V 鋼では、NDT

温度 +5°C で、疲労き裂付与試験片にはき裂の伝播が見られないのに対し、P-2 試験片では深くまで伝播していることも、予き裂の深さの増大が原因と考えられるが両試験片で得られた NDT 温度は同じであり、PELLINI の結果を裏づけている。

5.1 では、熱影響層の効果について、定性的な議論をしたが、実際には、複雑なき裂の伝播・停止過程が存在し、これらを考慮に入れた議論をしなければならないだろう。例えば、もし熱影響による靱性回復層が非常にせまいなら、この部分でのき裂伝播によるエネルギー散逸が少なく、これを越えて伝播することも考えられる。また熱影響部自体、靱性は連続的に変化していると考えられ、これも厳密な解析を困難にしている理由の一つである。

仮りに P-2 試験片により、正しい NDT 温度が求まる条件を述べるなら、少なくとも NDT 温度においては靱性回復層の幅よりも、き裂先端の塑性域の幅が広くなければならないということである。よく知られているように、き裂先端の塑性域の幅 (R) は、おおむね次の式で表わされる⁸⁾。

$$R = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_{Id}}{\sigma_{Yd}} \right)^2$$

PELLINI⁷⁾によれば NDT 温度においては、 $K_{Id}/\sigma_{Yd} \approx 2 \sim 4 \sqrt{\text{mm}}$ であるから、この式に代入して、 $R = 0.2 \sim 0.9 \text{ mm}$ である。したがって、靱性回復域の幅が、この値より小さければ、P-2 試験片によつても正しい NDT 温度が求まるといえよう。本実験で P-2 試験片と疲労き裂付与試験片による NDT 温度に大きな差を生じた鋼種は、靱性の高くなつた細粒層のほかに、熱影響により脆化された部分が加わつて、この靱性回復域の幅が他鋼種に比べて広くなつており、その幅は温度測定結果および組織観察結果から 2 mm 以上あると考えられるのでき裂を停止させる基本的な条件はみたされていたといえる。さらに進んだ議論は熱影響部の破壊靱性値 K_{Id} 、 K_{Ia} あるいは計装化シャルピー試験などによるき裂先端のエネルギー的評価を基に行なわねばならないが、この議論は次の機会に譲りたい。

6. 結 言

低炭素鋼を含む構造用鋼の破壊靱性評価法としての現在の落重試験法に、落重試験片の溶接ビードの熱影響層が NDT 温度におよぼす影響という観点から検討を加えた結果、つぎのような結論を得た。

(1) 調査した鋼種の多くは、P-2 試験片により正しい NDT 温度が求まるが、焼戻し脆化感受性の強い材

料では P-2 試験片による NDT 温度と疲労き裂付与試験片による NDT 温度に大きな差が生じる。その原因はクラックスタータービードによる溶接熱影響によつて母材の靱性が回復するためである。このような鋼種については、疲労き裂付与試験片により NDT 温度を求める方法が推奨される。

(2) GROSS により求められた FATT と NDT 温度の関係から大きくずれる鋼種があることがわかった。このずれは、Vノッチシャルピー試験片の FATT での切欠き底の塑性変形領域幅と良い関係が見出され、塑性変形域の幅を測定することにより NDT 温度のずれが推定できる。

(3) 疲労き裂付与シャルピー試験片による破面遷移曲線の 20~30% 剪断破面を示す領域に NDT 温度があり、疲労き裂付与シャルピー試験片を用いれば NDT 温度をかなりよい精度で求められる。

(4) 溶接熱影響については、ビード下の熱影響層の K_{Id} , K_{Ia} , あるいは計装化シャルピー試験などによるき

裂先端のエネルギー的評価をもとに、より突込んだ破壊力学的アプローチがなされることが必要である。

文 献

- 1) C. PFEIFFER: *Welding J.*, 40(1961), p. 311S
- 2) S. A. AGNEW, M. D. MITTELMAN, and R. D. STOUT: *Welding J.*, 39(1960), p. 493S
- 3) W. S. PELLINI, P. P. PUZAK, and E. W. ESHABACHER: *Welding J.*, 38(1959), p. 209S
- 4) V. H. PAGANO and K. CHESNEY: *Welding J.*, 43(1964), p. 92S
- 5) C. R. ROPER, Jr., K. A. KOSHINITZKE, and R. D. STOUT: *Welding J.*, 46(1967), p. 254S
- 6) J. H. GROSS: *Welding J.*, 39(1960), p. 59S
- 7) W. S. PELLINI and F. J. LOSS: *NRL Report 6900*, (1969)
- 8) F. A. McCLINTOC and G. R. IRWINE: *Fracture Toughness Testing and Its Applications*, ASTM STP 381, (1965), p. 84
- 9) 大西敬三, 塚田尚史, 鈴木公明, 村井正光: 鉄鋼協会講演概要集, 61(1975)12, p. 400