

シェブロンノッチ落重引裂試験によるラインパイプの材質評価

日本鉄鋼協会共同研究会鋼管部会高級ラインパイプ専門委員会

久保 高宏*・塩飽 豊明*²・近藤 丈*³・宮崎 英樹*⁴・川口 喜昭*⁵

Quality Evaluation of Line Pipes by the Chevron Notched Drop Weight Tear Test

Takahiro KUBO, Toyooki SHIWAKU, Joe KONDO, Hideki MIYAZAKI and Yoshiaki KAWAGUCHI

Synopsis : The WG in High Strength Line Pipe Research Subcommittee of Steel Pipes and Tubes Committee of The Joint Research Society of ISIJ investigated the applicability of the Chevron Notched Drop Weight Tear Test to Japanese high toughness line pipes, and developed a new test method, i.e., the Slit Chevron Notched Drop Weight Tear Test. The effects of the slit width and the notch angle of the specimen was investigated in details, and the established method was verified by the burst tests on actual pipes. The fracture appearance transition temperature of the established test is a little safe side estimation to the brittle fracture of line pipes, and the impact energy of the test gives the prediction to the ductile crack propagation and arrest in natural gas transmission pipelines. It is expected that the developed method serves for the quality evaluation of high toughness line pipes against brittle fracture and ductile crack propagation and arrest.

Key words : fracture ; toughness ; ductility ; drop weight tear test ; chevron notch ; fracture appearance transition ; impact energy ; HLP Research Committee.

1. 緒言

1990年以来アメリカ石油協会(以下API)はWGを作って落重引裂試験(Drop Weight Tear Test, 以下DWTT)の試験法改訂を検討している。そこではシェブロンノッチDWTTという新しい試験法が提案されたが、日本鉄鋼協会共同研究会鋼管部会高級ラインパイプ専門委員会(以下HLP委員会)の破壊WGは、この試験法が我国の高靱性ラインパイプに適用可能かどうかを検討し、その修正であるスリット型シェブロンノッチDWTTを提案するに至った。本報告はその提案に至る一連の研究成果を示すものである。

2. 種々のDWTTとその試験片形状

標準的なDWTTはAPI RP 5L3¹⁾として推奨規格になっている。Fig. 1に示すように、試験片には鋭いプレスノッチが刻まれ、ノッチ直下の加工硬化部から脆性亀裂が発生する。試験片の破面性状の温度依存性から85%SATT(Shear Area Transition Temperature)や50%FATT(Fracture Appearance Transition Temperature)が材料の脆性破壊への抵抗の指標とされるものである。

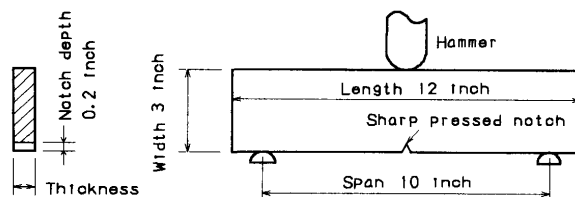


Fig. 1. Standard Drop Weight Tear Test specified in the current API RP 5L3.

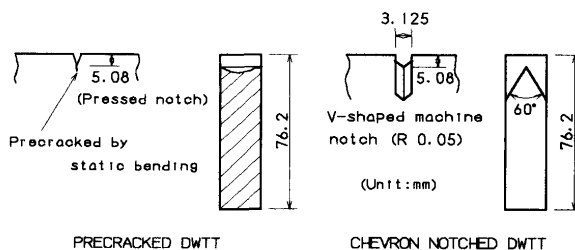


Fig. 2. Precracked DWTT and Chevron Notched DWTT specimens proposed by Battelle's reserchers.

しかしながら最近では、この試験法を新しい高靱性材料(TMCP鋼など)に適用するのは問題があることが指摘され²⁾、バットル研究所の研究者からFig. 2に示す試験片が提案された³⁾⁴⁾。左側はプレクラックDWTT、右側はシェブロンノッ

平成6年11月9日受付 平成7年1月13日受理 (Received on Nov. 9, 1994; Accepted on Jan. 13, 1995)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

* 2 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

* 3 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK)

* 4 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

* 5 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Sunayama Hasaki-machi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

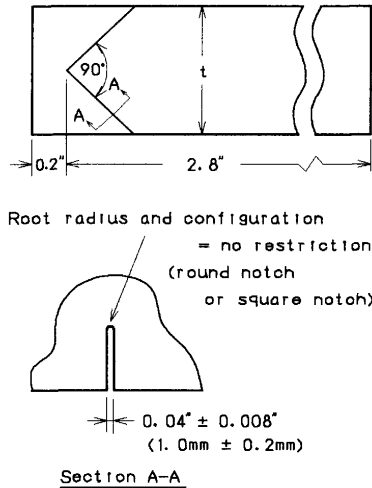


Fig. 3. Slit Chevron Notched DWTT specimen proposed by Japanese HLP Research Committee.

チDWTTで、現在APIで検討されているのは右側の試験片である。

一方、Fig. 3はHLP委員会の破壊WGが最終的に推奨するスリット型シェブロンノッチDWTTである。原案のV型ノッチは単純な1mm巾のスリット型ノッチに、ノッチの角度は60度から90度にそれぞれ変更されている。次章にはこの試験片採用に至る過程を述べる。

3. DWTTの遷移温度とラインパイプの脆性破壊

3.1 DWTTの破面遷移温度

85% SATTおよび50% FATTを13種類の鋼管(No.1~13)および2種類の鋼板(No.14, 15)について調べた結果をTable 1に示す。標準型プレスノッチDWTT(ST-DWTT)の結果で*印のついたものは一般に逆破面といわれ、プレスノッチの底部から脆性亀裂が発生せずに延性亀裂が発生し、かつ試験片破断の途中で脆性亀裂に転じるもので、

Table 1. Transition temperatures of Slit Chevron Notched DWTT compared with those of original Chevron Notched DWTT and standard DWTT.

No.	Grade -WT (Inch)	85% SATT (°C)			50% FATT (°C)		
		SCN-DWTT	CN-DWTT	ST-DWTT	SCN-DWTT	CN-DWTT	ST-DWTT
1	X65-0.500	-8	-5	-23*	-11	-9	-24*
2	X65-0.894	-18	-11	-16*	-32	-26	-42*
3	X65-0.894	-18	+6	-21*	-61	-50	-54*
5	X70-0.689	-59	-40	-42	-74	-60	-60
6	X80-0.394	-66	-70	-65	-79	-84	-77
7	X80-0.563	-28	-24	-18	-37	-48	-49
8	X80-0.693	-46	-38	-57*	-54	-55	-66*
9	X80-0.693	-29	-21	-26	-52	-49	-53
10	X100-0.752	-17	0	+2	-25	-27	-20
12	X70-0.435	-39	-23	-46*	-40	-27	-51*
13	X80-0.435	+3	+28	-17*	-1	+26	-27*
14	HT570-0.689	-12	-3	-13	-18	-18	-18
15	HT780-0.689	+15	+20	-3	+9	+11	-7

* Inverse fracture appearance

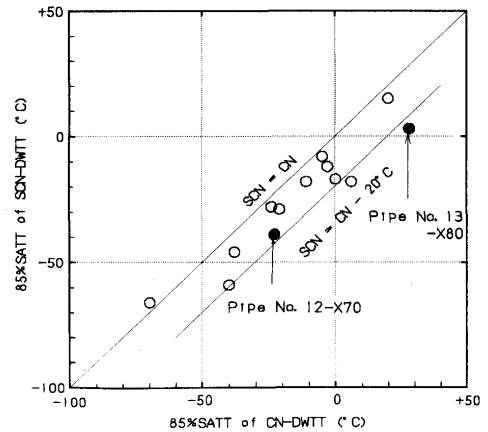


Fig. 4. Comparison of transition temperatures (85% FATT) between Slit Chevron Notched DWTT and original Chevron Notched DWTT.

プレスノッチ底の脆化が十分でなく、有効とはいえない試験結果である。スリット型シェブロンノッチDWTT(SCN-DWTT)および原案のシェブロンノッチDWTT(CN-DWTT)ではこの逆破面が現われない。逆破面を防止して有効な試験結果を得られる点では両者に差はない。

一方Fig. 4はSCN-DWTTとCN-DWTTの85% SATTを比較したものである。両者の間に最大20度Cの差がみられ、SCN-DWTTのほうが低温となる(なおここでSCN-DWTTのスリット巾はFig. 3に示したものと異なって、0.2mmという狭いものを用いた。スリット巾の影響は後に考察する)。ここでどちらが実際の鋼管の破壊挙動に近いかが問題となる。そこで図中に示す供試材No.12とNo.13について静水圧バースト試験を実施することとした。

3.2 静水圧バースト試験の遷移温度

Table 2に示すように供試鋼管は焼入れ・焼もどし材である。

試験体の形状をFig. 5に示す。温度を変えて試験体に静水圧をかけ、破壊時の周方向応力、亀裂速度および破面の延性破面率を測定した。

鋼管No.13の試験結果をTable 3に示す。もっとも重要な

Table 2. Quenched and tempered pipes for hydrostatic burst tests.

Pipe	Grade	OD (mm)	WT (mm)	HT	YS (MPa)	TS (MPa)
No. 12	X70	244.5	11.05	QT	513	625
No. 13	X80	244.5	11.05	QT	646	754

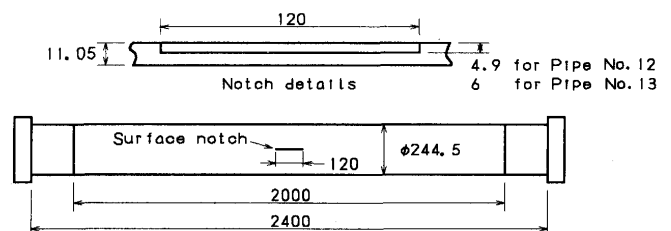


Fig. 5. Specimen configuration of hydrostatic burst tests.

Table 3. Results of hydrostatic burst tests on Pipe No.13-X80.

Temp. (°C)	Failure stress (MPa)	East side		West side	
		Crack vel. (m/sec)	Shear (%)	Crack vel. (m/sec)	Shear (%)
0	500	50 - 100	100	40 - 70	100
	482	60	100	30 - 70	100
-10	541	80	100	110 - 460	42
	476	260 - 380	45	110 - 150	100
	511	No data	100	200 - 390	32
-20	509	90 - 390	25	210 - 400	20
	470	50	100	80	100
	532	80 - 520	29	260 - 340	39

[Failure stress = P(D-2t)/(2t)]

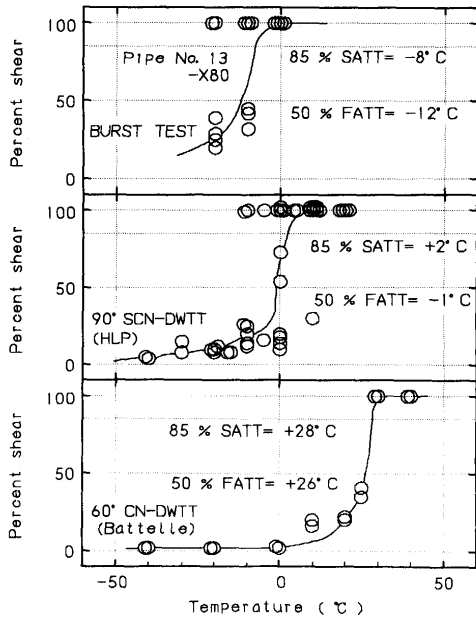


Fig. 6. Transition of fracture appearance in hydrostatic burst tests compared with Slit Chevron Notched DWTT and original Chevron Notched DWTT (Pipe No.13-X80).

ことは、バースト試験、スリット型シェブロンノッチDWTTおよびシェブロンノッチDWTTの破面遷移温度を比較することである。Fig. 6にNo.13-X80の場合を示す。脆性破壊のもっとも一般的な指標85%FATTは、バースト試験の場合-8度Cである。SCN-DWTTのそれは+2度Cで10度C高い。CN-DWTTでは+28度Cで実に36度C高い。No.12-X70の場合はバースト試験の85%FATTは-46度Cで、SCN-DWTTのそれは6度C高く、CN-DWTTのそれは23度C高い温度であった。

以上の結果は、SCN-DWTTの破面遷移温度は実管のそれにたいし若干(10度C程度)高温側すなわち安全側であるが、CN-DWTTのそれは極端に(20~30度C)高温側、すなわち過度に安全側であることを示す。その程度は材料ごとに変ると考えられるが、少なくともCN-DWTTよりもSCN-DWTTのほうが実管の破壊に近いといえる。なおここで用いたSCN-DWTTの試験片のスリット巾はFig. 3に示した1.2mmのものでなく、0.2mmのものであるが、スリット巾の影響は次節に示される。

3.3 スリット型シェブロンノッチDWTT試験法の確立

Fig. 3に示した試験片形状は、SCN-DWTTの最終的なものである。当初は亀裂発生を容易にするため、スリット巾はできるだけ狭いものが望ましいという考えのもとに0.2mmとした。しかしこの値は試験片の加工をきわめて困難にする。そこでスリット巾の影響を調べ、どこまで広げることができかを確認することにした。また同時にノッチ角度の影響も調べることにした。

Fig. 7に試験条件を示す。スリット巾は0.2mmから1.2mm(ただし角度は一定で90度)、ノッチ角度は45度から120度(ただしスリット巾は一定で0.2mm)の間で変化させた。

Fig. 8にスリット巾の影響を示す。85%SATTおよび50%FATTともにスリット巾の影響は受けない。同様の結果は鋼管No.5、鋼板No.14およびNo.15においても得られた。

Fig. 9にノッチ角度の影響を示す。ノッチ巾の影響と対照的に、85%SATTと50%FATTのいずれも大きな影響を受ける。ノッチ角度が大きくなるにつれて破面遷移温度は低下し、材料にたいして、緩い評価を与えることになる。原案のCN-DWTTは角度60度の場合にはほぼ一致し、CN-DWTTとSCN-DWTTの遷移温度の差はシェブロンノッチの形状が大きく変っているにもかかわらず、おもにノッチ角度の影響(60度と90度)によるものと考えられる。

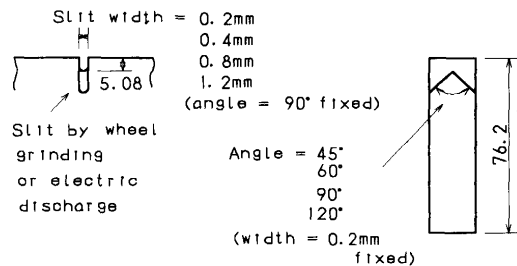


Fig. 7. Variations of slit width and notch angle for Slit Chevron Notched DWTT.

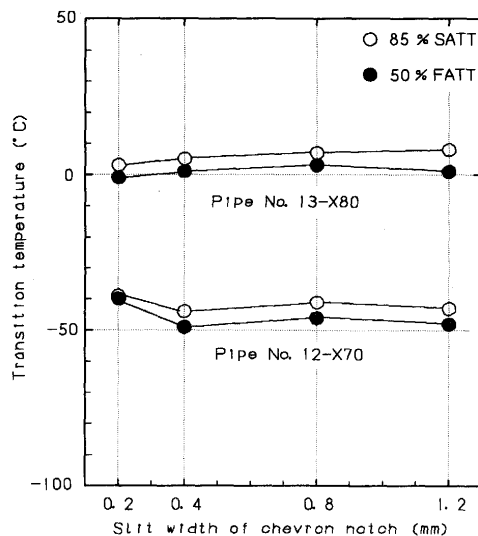


Fig. 8. Effect of slit width in Slit Chevron Notched DWTT to transition temperatures.

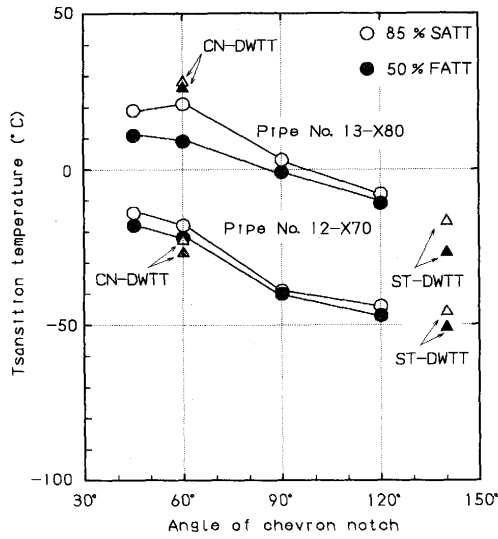


Fig. 9. Effect of notch angle in Slit Chevron Notched DWTT to transition temperatures.

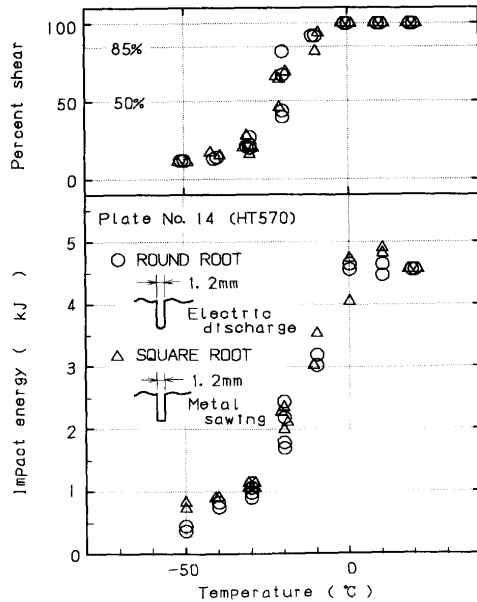


Fig. 10. Effect of notch root configuration in Slit Chevron Notched DWTT.

もう一つの問題はノッチ底形状の影響である。スリット底の形状は円板グラインダー、メタルソー、バンドソー、放電加工などの加工法によって異なるが、Fig.10に放電加工による半円状の場合とメタルソーによる短形状の場合の比較を示す。破面遷移、衝撃エネルギーともに有意差は認められない。他にバンドソーの場合の不規則な形状についても調べたが同様であった。

以上の結果と前節の静水圧バースト試験の結果からFig. 3に示した最終的な形状が決定された。スリット巾はノッチ巾の実験の上限に近い1mm、ノッチ角度は静水圧バースト試験結果とよく対応する90度とし、加工法は問わない(いいかえればノッチ底の形状は問わない)。加工の容易さと試験のコストからみてもこの試験片は実用的といえよう。

3・4 部分ガスバースト試験による検証

スリット型シェブロンノッチDWTTは3・2節で示した静水圧バースト試験との比較からその妥当性が確認されたが、その場合の亀裂伝播は200ないし300mmと短い。天然ガスパイプラインでは長い亀裂伝播が生じることが知られており、破面の性状(脆性または延性)が亀裂伝播中に変化する可能性も考えられる。そこで少しでも長く亀裂を伝播させるために、部分ガスバースト試験を行ってその破面を調べることにした。

Fig.11に試験体形状を示す。試験は3回行われたが、破壊発生時のガス量比(体積比)は17%、13%、12%であった(残余は水)。亀裂は中央の表面切欠から発生するが、試験体の両側を異なった温度にして1回の試験から2温度のデータを得られるようにした。

Fig.12は破壊状況の一例を示す。左側(West)は-100度Cであり、亀裂は発生してすぐに(中心から0.6mのところ)で枝分れになり、その近傍に脆性破面(Percent Shear=40ないし54)が認められた。右側は-80度Cであり、亀裂は3.5m伝播した。破面はほとんど延性であったがごく一部にわずかな脆性(PS=96)が認められた。

同時に二重引張試験も行った。パイプを展伸して平板とし、Fig.13に示す試験片を採取した。温度勾配型では荷重を変化させ、温度平坦型では温度を変化させて試験を行い、温度と亀裂の破面性状(延性破面率)を調べた。

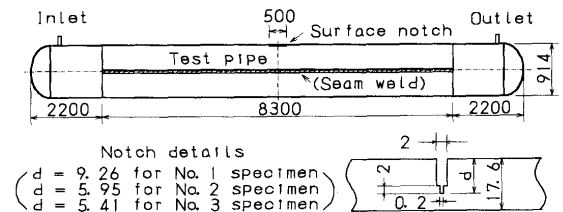


Fig. 11. Specimen configuration of partial gas burst tests.

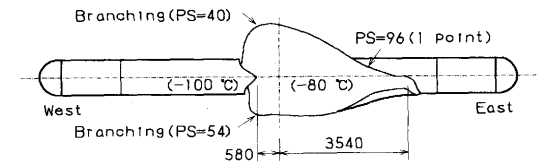


Fig. 12. Partial gas burst test at -80 and -100 degrees Celsius.

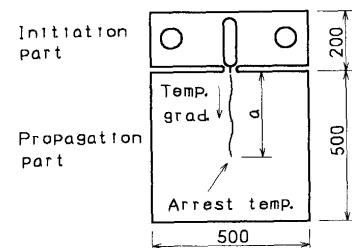


Fig. 13. Specimen configuration of double tension tests (temperature gradient type).

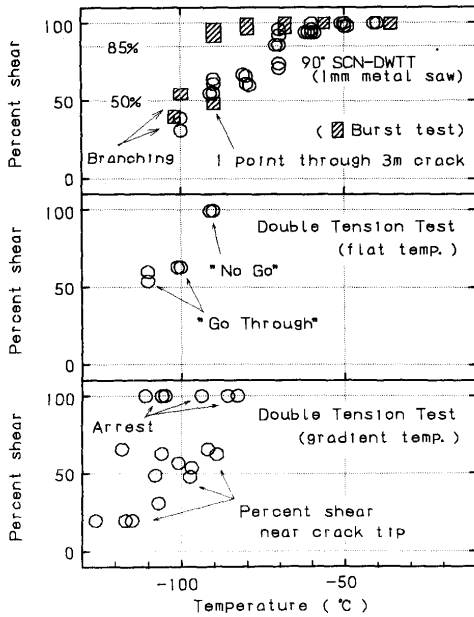


Fig. 14. Transition of fracture appearance of all tests.

試験結果をFig.14に示す。部分ガスバースト試験の破面率は一つの亀裂伝播中の範囲を短形(▨)で示した。スリット型シェブロンノッチDWTTの85%SATTは-70度Cであるが、この温度ではバースト試験、温度平坦型二重引張試験および温度勾配型試験のいずれにおいても脆性破面は認められず、50%FATTもほぼ高温側(安全側)にあるといえる。スリット巾1mm、ノッチ角度90度のスリット型シェブロンノッチDWTTはラインパイプの脆性破壊にたいする評価法として妥当なものであることが明らかとなった。

4. DWTTの衝撃エネルギーとラインパイプの延性破壊

4.1 亀裂停止に必要なDWTT衝撃エネルギー

天然ガスパイプラインでは長い延性亀裂が伝播するいわゆる高速延性破壊(Propagating shear fracture)が知られているが⁵⁾、HLP委員会は1979年から1983年の間に7回の全ガスバースト試験を行い、亀裂の伝播と停止を予測する手法を確立している⁶⁾⁷⁾。ただし当時の衝撃エネルギーとしてはFig. 2 左図に示したプレクラックDWTTのものを採用し、多くの条件のもとに伝播と停止のシミュレーションを行い、亀裂の停止に必要なエネルギーを次のように与えている⁸⁾。

単相ガス(純メタン)で許容破壊長さ20mの場合:

$$D_p = 7.36 \times 10^{-5} \times D^{0.316} \times t^{1.16} \times \sigma^{2.04} \dots (1)$$

単相ガス(純メタン)で許容破壊長さ40mの場合:

$$D_p = 11.50 \times 10^{-5} \times D^{0.261} \times t^{1.17} \times \sigma^{2.01} \dots (2)$$

二相ガス(リッチガス)で許容破壊長さ20mの場合:

$$D_p = 1.87 \times 10^{-5} \times D^{0.338} \times t^{1.08} \times \sigma^{2.40} \dots (3)$$

二相ガス(リッチガス)で許容破壊長さ40mの場合:

$$D_p = 3.75 \times 10^{-5} \times D^{0.261} \times t^{1.11} \times \sigma^{2.33} \dots (4)$$

ここで D_p はプレクラックDWTTの衝撃エネルギー(J), D は管外径(mm), t は管厚(mm), σ は管周方向応力(MPa)である。

スリット型シェブロンノッチDWTTの衝撃エネルギーを実際に用いるためにはプレクラックDWTTのエネルギー、さらにはシャルピー試験のエネルギーと関係づけなくてはならない。

4.2 DWTTとシャルピー試験のエネルギーの関係

Fig.15にスリット型シェブロンノッチDWTTとプレクラックDWTTのエネルギーの関係を示す。おおむね次式が成立する。

$$D_{sc} = 1.2 \times D_p \dots (5)$$

ここで D_{sc} はスリット型シェブロンノッチの衝撃エネルギー

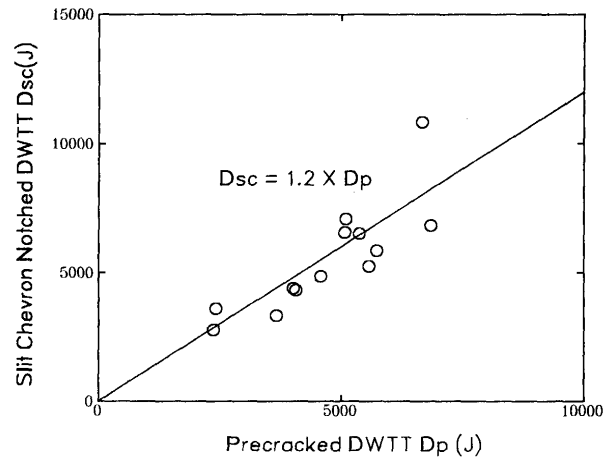


Fig. 15. Correlation between impact energies of Slit Chevron Notched DWTT and Precracked DWTT.

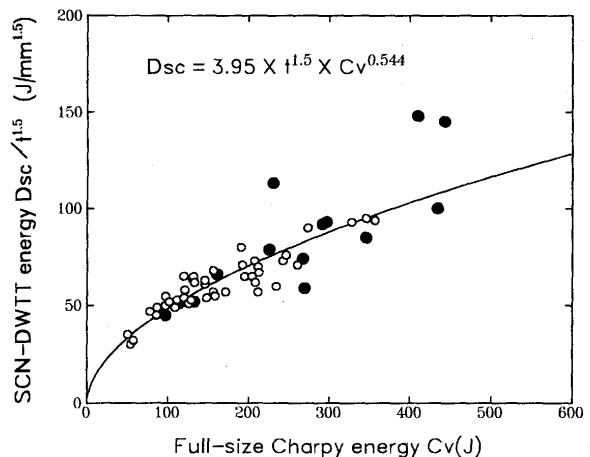


Fig. 16. Correlation between impact energies of Slit Chevron Notched DWTT and Charpy test.

(J)である。

Fig.16はスリット型シェブロンノッチDWTTとシャルピー試験の衝撃エネルギーの関係を示す。図中○印はHLP委員会の旧データ⁷⁾を式(5)で換算したものである。原管厚をそのまま用いるDWTTの衝撃エネルギーは厚さの1.5乗に比例することが知られているので⁹⁾、次の関係が成立つ。

$$D_{sc} = 3.95 \times t^{1.5} \times C_v^{0.544} \dots\dots\dots (6)$$

ここで C_v はシャルピー衝撃エネルギー(J)である。

式(1)~(6)を用いれば延性亀裂を停止させるに必要なシャルピー衝撃エネルギーを求めることができる。

4.3 シャルピー試験による延性亀裂伝播の予測例

HLP委員会の亀裂の伝播と停止の手法⁷⁾に新たに得られた式(5)と式(6)をあてはめた2つの例を以下に示す。

Fig.17はX70パイプラインの例である。設計圧力は公称降伏強さ(70ksi)の72%に相当すると想定し、単相ガス(純メタン)と二相ガス(メタン以外により重いガスを不純物として含むいわゆるリッチガス)の場合について予測した。二相ガスの場合は、亀裂を停止させるには200~300Jの高い C_v 値(シャルピー衝撃エネルギー値)が必要である。

Fig.18はX80パイプラインに5本ごとに厚肉管をはさんだ、いわゆるクラックアレスター管を用いた場合を示す。X80でリッチガスの場合はX70よりもさらに厳しい C_v 値が要求されるが、このようなアレスターを用いることも亀裂を停止さ

せるのに有効な手段であることが示されている。

5. まとめ

アメリカ石油協会のWGが提案したシェブロンノッチDWTTの適用性を我国の代表的な高靱性ラインパイプ材について調べ、新たにスリット型シェブロンノッチDWTT試験法を確立した。スリットの巾とノッチの角度の影響を調べた結果、破面遷移温度はスリットの巾の影響を受けず、一方ノッチ角度の影響が著しいことを見出してスリット巾1mm、ノッチ角度90度を採用した。実管の破壊特性を静水圧バースト試験と部分ガスバースト試験で確認し、スリット型シェブロンノッチDWTTがそれらの結果とよく一致してラインパイプの脆性破壊をその破面遷移温度によって評価できることを明らかにした。

一方この試験法の衝撃エネルギーはプレクラックDWTTとシャルピー試験のエネルギーに関連づけることによって、天然ガスパイプラインにおける高速延性破壊の亀裂伝播と亀裂停止を予測するのに有効であることを示した。

スリット型シェブロンノッチDWTTは現在アメリカ石油協会のWGで検討されており、近々API規格として採用される見込みである。この試験法がラインパイプの脆性破壊および延性破壊にたいする材質評価に有効な役割を果たすことが期待される。

本研究は日本鉄鋼協会鋼管部会高級ラインパイプ専門委員会の共同研究の一環として行われたものである。公表にあたり、委員各位に深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) API Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Test on Line Pipe, (1978)
- 2) G.M.Wilkowski: AGA 6th Symposium on Line Pipe Research, (1978), K-1
- 3) G.M.Wilkowski, M.A.Maxey and R.J.Eiber: AGA/API Drop Weight Tear Test Round Robin Testing Program, A. G. A. Catalog No.L5147, (1985)
- 4) W.A.Maxey and C.R.Barnes: NG-18/HLP Joint Technical Meeting on Line Pipe Research, Paper 4, (1990)
- 5) R.J.Eiber: AGA 4th Symposium on Line Pipe Research, (1969), I-1
- 6) E.Sugie, M.Matsuoka, T.Akiyama, K.Tanaka and Y. Kawaguchi: Trans. ASME, J. Press. Vess. Tech., **109** (1987), p.428
- 7) E.Sugie, M.Matsuoka, T.Akiyama, K.Tanaka and Y. Kawaguchi: Trans. ASME, J. Off. Mech. Arc. Eng., **109** (1987), p.2
- 8) E. Sugie, M.Matsuoka, T.Akiyama, K.Tanaka and M.Tsukamoto: ASTM Special Technical Publication 945, (1987), p.237
- 9) N.Nozaqi, K.Bessyo, Y.Sumitomo, I.Takeuchi and A.Yamashita: The Sumitomo Search, **26** (1981), p.76

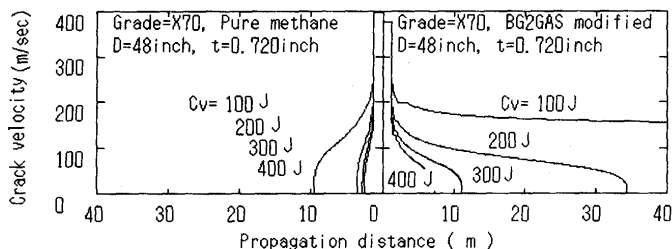


Fig. 17. Predicted crack propagation and arrest in X70 natural gas transmission pipelines.

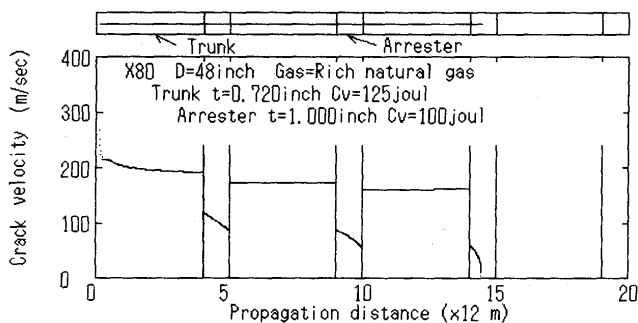


Fig. 18. Predicted effect of insert type crack arrester in X80 rich natural gas transmission pipeline.