樹脂管の急速破壊伝ばに関する一考察[†]

北 尾 幸 市*

A Study of Rapid Crack Propagation in Gas-Pressurized Plastic Pipes

by

Koichi KITAO*

This paper describes the theoretical aspect of rapid crack propagation in gas-pressurized plastic pipes. The rapid crack propagation shows brittle fracture and has about the same velocity as decompression. The method applied here is to compare two characteristic curves, i. e., the crack velocity and the gas decompression curve. This method has been proposed by Mimura and adopted for analysis of shear crack propagation in steel pipelines. The behavior of crack propagation and arrest is well explained by this analysis. Finally, drop weight tear test (DWTT) is proposed as a simple test method to evaluate the brittle fracture of plastic pipes.

Key words : Rapid crack propagation, Brittle fracture, Plastics pipes, Crack velocity, Decompression velocity, DWTT

1 緒 言

鋼製ラインパイプではぜい性破壊ならびに不安定延性破壊による数百メートルに及ぶ急速進展破壊現象は良く知られている。鋼と同じ破壊現象の発生する可能性が樹脂管においても指摘され¹⁾、ポリエチレン管を対象に試験および解析方法が種々検討されてきた。80年代の中頃実施された24 mの埋設下のフルスケール試験(実管試験)が本破壊現象の基本的認識を与えた。これは0°Cにおいて種々のサイズで実施され、以下の結果が得られている^{2)~4)}。

- 急速き裂進展の発生(全長に渡ってき裂が進展する)には最小の限界初期圧力 P_c が必要である。
- 破壊はぜい性的に生じる。
- サイズが大きくなるほど限界の初期圧力は低下する。
- 急速き裂は200 m/s 前後の定常速度で伝ばする。
- 温度がわずかでも高くなると限界の初期圧力 P_c は急激に大きくなる。

最近では16インチサイズのパイプを用いて、全長24 m、中央部をき裂発生部として片側を0°C もう片側を20°C に設定したバースト試験が報告されている。その結果は0°C 側のみき裂伝ばしたとのことであり⁵⁾、上記温度の影響を再現している。

これらのバースト試験はgo or no-go 試験であり同一温度において最小の伝ば圧力を評価するため種々の圧力で実施していく必要がある。しかしながら伝ば／

アレストの判定があいまいであり、き裂が数メートルではアレストであり一方十数メートルでは伝ばと判定されているのが実情である。すなわち伝ばとされたものでももし試験長が十分にあればアレストが確認された可能性は皆無ではないはずであろう。

同時期に簡便な小型試験の確立をはかるため1.5 m長さ程度の改良ロバートソン試験が実施され、高圧ではやはり200 m/s の定常急速き裂進展速度を得た⁷⁾。その後ガス流出を抑制することによりパイプの定常き裂伝ば速度が容易に得られる7D程度(D: 直径)長さの小型のS4試験が開発された^{8)~11)}。ISOでもこの評価方法が提案され、ラウンドロビントストが実施されき裂伝ばの限界圧力 $P_{c,s4}$ の評価が中心となりつつある。しかしながらS4試験で評価されたき裂伝ばの限界圧力 $P_{c,s4}$ はフルスケール試験で得られた限界初期圧力 P_c に比べ1/3程度と小さく、S4試験から実際の限界初期圧力を予測するためにはスケーリングファクターを考慮する必要がある。この限界圧力の相違はガス流出がある実管試験とガス流出を抑制したS4試験との試験条件の相違によると考えられるがスケーリングファクター算出の根拠が不明確である。

解析の基本的な考え方はパイプ系のエネルギー開放率と材料の破壊抵抗としてのエネルギー開放率との大小で伝ば／アレストの条件が決まるというものである¹⁾。すなわち破壊によりパイプ系に蓄積されていたエネルギーが開放されるが、これが破面形成に費やされるエネルギーより小さければアレストされ、逆の場合には

[†] 原稿受理 平成5年9月16日 Received Sep. 16, 1993

* 正 会 員 NKK 総合材料技術研究所 〒210 川崎市川崎区南渡田町, Mat. & Processing Res. Center NKK Corp., Kawasaki-ku, Kawasaki, 210

伝ばする。この考え方は正統的であるが本現象のように動的現象ではそれぞれの評価の精度に問題があることさらに実際のき裂がどの程度で停止するかは評価できないため不十分である。評価の前提になる系のエネルギー開放率の評価算出は圧力が一定の場合容易であるが、ガス流出により圧力低下を伴う動的な場合、一般式が導出されていない。Kaninnen¹³⁾は計算機を駆使して特定条件について算出している。計算方法は仮想的なき裂進展速度でき裂を進展させき裂長さに関係なくエネルギー開放率が一定に収束するところを定常状態のエネルギー開放率と判定している。一方材料の破壊抵抗としてのエネルギー開放率は Kaninnen, Maxey^{14)~16)}らは衝撃試験の吸収エネルギーより評価している。しかし衝撃試験の吸収エネルギーの寸法効果は周知の事実であり、ラインパイプのように膨大な実験結果に基づき寸法効果を加味して評価する必要がある、現時点では信頼性に欠けると思われる。

前述したごとく評価試験間の整合性の欠如、解析手法の未確立の状況にある。改めて急速き裂進展の現象の正確な把握、解析手法の確立が不可欠であり、その結果に基づき設計、材料評価試験を決定する必要がある。本報告は鉄鋼協会での不安定延性破壊に関する報告¹⁷⁾で採用された三村のクライテリアを基に樹脂管特にここではポリエチレンの急速き裂進展の解析手法および評価試験について検討したものである。また急速破壊防止のための材料選定試験として落錘衝撃試験(drop weight tear test, 以下 DWTT と略す)の妥当性を提案するものである。

2 解析方法の検討

2.1 基本的考え方

ラインパイプではき裂進展速度が管中のガスの音速より高速なぜい性破壊伝ばと音速より遅い不安定延性破壊伝ばがある。ガスの減圧波速度の最大は音速であることから、き裂進展速度が音速より高速であればき裂先端は常に初期圧力を維持する。一方き裂進展速度が音速より遅い場合き裂先端は初期圧力より低下するが、定常伝ば状態をとるかアレストになるかどうかが不安定延性破壊伝ばの問題であった。

ぜい性破壊伝ば速度の最大値 $V_{c,max}$ は次式で評価できる¹⁸⁾。

$$V_{c,max} = 0.38\sqrt{E/\rho}$$

E : 弾性率 ρ : 密度

ポリエチレン (MDPE) の動的弾性率は 1.31~1.84 GPa と報告されており⁵⁾、密度を 0.94 g/cm³ とすると $P_{c,max}$ は 450~530 m/s と見積もることができる。これは鋼の 1960 m/s に比べ著しく低く、天然ガスの 0℃での音速 430 m/s に近い。ポリエチレンの急速き裂進展破壊は材料の破壊挙動としてはぜい性破壊であ

る。しかしそのき裂進展速度が管中のガスの音速より小さいため樹脂管のぜい性破壊による急速き裂進展は見掛け上ラインパイプの不安定延性破壊伝ばとき裂進展速度とガス圧力の減圧波速度の競合関係について同じ挙動になる。したがってラインパイプの不安定延性破壊伝ばで鉄鋼協会グループが評価解析に採用した三村の考え方が本問題を扱う上で有用であると判断した。

これは以下の二つの特性曲線を考える。

(a) 破壊抵抗曲線

き裂先端の圧力とその時のき裂伝ば速度の関係式である。圧力が大きい時には伝ば速度が大きく、一方ある圧力以下では伝ばしない。き裂発生時には初期圧力に相当するき裂速度で伝ばするがガス流出に伴う圧力低下によりこの関係式に従い速度低下を生じるがその挙動はこの関係式からは確定できない。

破壊抵抗の大きなものは高压側で低いき裂進展速度および高い限界圧力を示す。この関係式はサイズ、温度ごとに圧力の依存性を評価するものである。材料が異なれば当然変化する。

(b) 減圧波速度曲線

これはき裂先端でのガス圧力の減圧挙動を表すものである。ガスの初期圧力から低下し始める減圧波速度はそのガスの音速に等しく、一方初期圧力より低い圧力レベルが伝ばする速度はそれより低い速度になる。しかし減圧波速度-圧力関係は初期圧力に依存して、初期圧力が大きければ大きな圧力の減圧波速度も小さくなる。その結果初期圧力が大きい時には後述するようにき裂速度が小さい時でも競合関係が生じる。

破壊挙動はこの二つの特性曲線の相対的位置で決定される。初期圧力ごとに減圧波曲線が異なるが設定された初期圧力でのそれぞれの速度を比較することで評価できる。

Fig. 1(a) ではき裂速度が減圧波速度より大きくき裂先端では常に初期状態が維持され初期圧力に対応したき裂伝ば速度で伝ばする。(d) 常に減圧波速度の方がき裂進展速度より大きければ当該パイプのき裂先端の圧力は初期圧力から限界圧力まで破壊抵抗曲線上を動いてき裂は停止する。(b) では初期のき裂伝ば速度が減圧波速度より小さくき裂先端の圧力は低下し、き裂速度も低下する。しかし交差する圧力(初期圧力より低い)でき裂進展速度と減圧波速度が一致して定常き裂進展状態が得られる。したがって伝ば/アレストの限界条件は Fig. 1(c) の二つの特性曲線の接する条件になる。

この考え方は簡便かつ簡易な動的解析を可能にしかつ後述する減速挙動の評価と組合せることにより進展挙動を推定できる。

Fig. 1. Schematic of analysis method.

2・2 解析の基礎式

2・2・1 特性曲線 (a) 破壊抵抗曲線

ポリエチレンについては $\phi 180$, -15°C のS4試験⁸⁾で圧力 P -き裂進展速度 V_c の関係図が示されている。このデータを次式で近似する。

$$V_c = V_{ci}(P/P_a - 1)^m \quad (1)$$

V_{ci} , m は定数であり, P_a はき裂が停止する時のき裂先端の圧力。ここで $V_{ci} = 210 \text{ m/s}$, $P_a = 2.0 \text{ bar}$, $m = 1/3$ とした時の計算値は実験値を良く記述した。式(1)はMaxeyが導出した次式を考慮した¹⁹⁾。

$$V_c \propto (P/P_a - 1)^{1/6}$$

(b) 減圧波速度曲線

減圧波速度 V_m -圧力 P 関係は次式で与えられる¹⁵⁾。

$$P = P_0(1 - (n-1)/(n+1)(1 - V_m/V_{m0}))^{2n/(n-1)} \quad (2)$$

V_{m0} はガスの音速, n は比熱比, P_0 は初期圧力である。

2・2・2 伝ば距離の算出 き裂速度の変化 dV_c/dt から破壊試験での伝ば距離を評価する。計算方法は文献²⁰⁾に詳細に示されているがその概略をここに示す。

き裂発生からのき裂先端までの距離 x は次式で評

価される。

$$x = \int^t V_c dt \quad (3)$$

き裂先端での内圧 P は次式で定義する減圧波速度 V_m の関数として式(2)で与えられる。

$$V_m = x/t \quad (4)$$

き裂速度の変化 dV_c/dt は次の微分式

$$dV_c/dt = (dV_c/dP)(dP/dV_m)(dV_m/dt) \quad (5)$$

で評価でき、右辺第一項および第二項はそれぞれ式(1), (2)の微分値から得られる。

第三項は式(3), (4)の微分式から

$$dV_m/dt = (V_c - V_m)/t$$

が得られ結果的に次式で評価できる。

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{(dV_c/dP)}{(dV_m/dP)t} (V_c - V_m) \quad (6)$$

式(6)より微小時間 Δt の間のき裂の増分 ΔL は次式で計算した。

$$\Delta L = V_c \Delta t + (dV_c/dt)(\Delta t)^2/2 \quad (7)$$

3 挙動解析

本解析方法で急速き裂進展現象を定量的に記述できることをシミュレーションで示す。

3・1 アレスト／伝ば

フルスケール試験が実施された条件では窒素ガスで 0°C であり、減圧波速度の計算では $V_{m0}=337\text{ m/s}$, $n=1.4$ を用いる。

評価の一例を Fig. 2 に示す。パイプ特性として $V_{ci}=210\text{ m/s}$, $P_a=3.0\text{ bar}$, $m=1/3$ を仮定して式 (1) から材料の特性曲線である圧力-き裂速度 P - V_c 関係を計算できる。一方圧力-減圧波速度 P - V_m 関係は式 (2) より上記定数を用いて計算できる。この関係は初期圧力 P_0 に依存するためここでは $P_0=4, 6, 8, 10\text{ bar}$ の時の値を示す。Fig. 2 からこの破壊抵抗曲線と種々の初期圧力 P_0 の減圧波曲線との接点から $P_0=8\text{ bar}$ が限界の初期圧力 P_c になり、限界の定常速度は $120\sim 130\text{ m/s}$ となる。逆にある限界初期圧力 P_c が要求される時、必要な材料特性は P_c を初期圧力とする減圧波速度曲線に接する破壊抵抗特性曲線となる。

本計算からフルスケール試験で伝ばが生じるための限界初期圧力 P_c は定圧下で伝ばする限界値 P_a よりかなり大きくなる。ここでは $P_a=3.0\text{ bar}$ と仮定して $P_c=8\text{ bar}$ となりこれまでの報告と定量的に一致する。

S4 試験で評価されたき裂伝ばの限界圧力 $P_{c,s4}$ とフルスケール試験で得られた限界初期圧力 P_c との関連については種々検討されてきている。これらは両方共初期設定圧力である。しかし S4 試験ではガス圧力の低下を極力抑制しているため限界圧力 $P_{c,s4}$ はき裂先端での圧力-き裂進展速度関係の限界値すなわち式 (1) の限界圧力 P_a に相当する。一方フルスケール試験で得られた限界初期圧力 P_c はアレスト／伝ばの境界の初期圧力であり、式 (2) で表される減圧波速度曲線が破壊抵抗曲線に接するために必要な初期圧力である。

以上の検討より S4 試験で評価された限界圧力 $P_{c,s4}$ とフルスケール試験で得られた限界初期圧力 P_c との相関係数「スケーリングファクター」導出は困難であることが理解されるであろう。むしろ S4 試験は破壊抵抗特性曲線を評価するための材料評価試験と位置付けされる。

Fig. 2. Evaluation of steady state for rapid crack propagation.

3・2 伝ば挙動

伝ば距離は積分で求めるため初期値の設定が必要である。そこで初期き裂長さを 0.5 m , その間のき裂速度 V_{c0} を 400 m/s と仮定する。

パイプ特性として $V_{ci}=210\text{ m/s}$, $P_a=3.0\text{ bar}$, $m=1/3$ を仮定し、初期圧力 $P_0=7, 7.5, 8, 9\text{ bar}$ で上記条件でき裂を発生させた時の伝ば距離 30 m の範囲を Fig. 3 に示す。これから

- アレスト／伝ばの境界条件である初期圧力 $P_0=8\text{ bar}$ では、き裂進展速度は漸減し 30 m 地点で 160 m/s 程度である。しかし先に示した定常速度 $120\sim 130\text{ m/s}$ より大きくこの伝ば距離では定常状態に至っていないことが認められる。
- 伝ば条件である初期圧力 P_0 が 8 bar 以上では、Fig. 2 から予想されるように初期圧力 P_0 が大きいほど高い定常速度が得られる。
- アレスト条件である初期圧力 P_0 が 8 bar 以下では、初期圧力 P_0 が低いほど伝ば距離は短くなるものの直ちにアレストはしない。ちなみに 7.5 bar での伝ば距離は 61.5 m である。
- もしある有限距離で停止させるためには使用圧力は限界初期圧力より小さくする必要があり、その距離に依存し、長さを短くするほど使用圧力は小さくする必要がある。

以上の結果はフルスケール試験で得られた結果を定性的に十分記述するものであり本解析の妥当性を示すものである。本解析から逆にフルスケール試験といえども 24 m の試験長では限界圧力の正確な評価は困難であり伝ば速度、伝ば距離などの伝ば挙動の評価が重要となる。

本解析方法の精度は破壊特性曲線および減圧波速度曲線の精度に依存する。このうち減圧波速度式はギロチン破断から導かれたものであり¹⁹⁾、ラインパイプの解析で用いられた際にも計算値は実験値より同一速度で

Fig. 3. Evaluation of crack propagation distance.

は高压側に、同一圧力では低速側になることが指摘されている^{14),15)}。これは高速のき裂進展部からのガス流出を考慮すれば当然予想されることであろう。その結果き裂先端での圧力低下を小さく予測し、限界初期圧力を低く見積もらせることになると考えられる。

4 簡便評価方法

急速き裂進展破壊はぜい性破壊であり、ぜい性破壊の防止はぜい性-延性の遷移温度を低温側に移行させることである。これにより破壊特性曲線は高压側かつ低速側にシフトして減圧波曲線との接する条件は実質的に解消される。

S4 試験およびシャルピー試験の温度依存性が検討されている。小型の衝撃試験で得られる遷移温度と S4 試験でのそれとは大略の傾向は一致するものの寸法効果もあり必ずしも精度良くは対応していない^{8),10)}。またシャルピー試験においてサイドノッチを入れ拘束効果を挙げ遷移温度を高温側にシフトさせた結果が報告されているが板厚効果の定量性に欠ける²¹⁾。一方鋼のラインパイプで用いられている DWTT²²⁾の破面評価は厚さを実管と一致させており、ぜい性破壊防止評価には検討の価値があると考えられる。

そこでポリエチレン管について DWTT を実施した。試験には MDPE 管から試験片を切出し、再プレス成

Fig. 4. Fracture surface of DWTT for 16 mm.
(test temperature were -20 , -10 , 0 , 10 , 20 and 30°C from the left side).

Fig. 5. Comparison of fracture surface with specimen thickness.
(test temperature was 10°C).

Fig. 6. Relation between ductile failure ratio and temperature.

形を行い API 規格に準じた厚さ 16 mm の寸法に仕上げた。プレス切欠きの代りに V 切欠きを付けさらに切欠き先端にレーザーによる深さ 2 mm のき裂を挿入した。板厚効果を検討するため 16 mm のプレス板から表裏切削により中央部を残した厚さ 6 mm と 11 mm の試験片を作製した。試験は半径 1.8 m のアームの落錘衝撃試験機を用いた。16 mm 材の -20°C ~ 30°C の試験温度での破面形態を Fig. 4 に示す。破面は鋼と同様にぜい性的破損を示す平坦部と延性的破損を示すせん断部からなる。10°C での各板厚での破面を比較して Fig. 5 に示す。16 mm 材はぜい性破壊を示す平坦部の割合が大きく一方 6 mm 材では切欠き部直下でき裂停止に至っていることが認められ顕著な板厚効果が観察される。この破面形態を定量化するため破面率測定を行った。API 同様に切欠き部および反対側から板厚に等しい長さ分を除いた部分を破面の評価領域とする²²⁾。延性破面率と試験温度の関係を Fig. 6 に示す。延性破面率と試験温度の関係は厚さが大きくなると高温側に遷移することが認められる。この板厚効果は顕著であり、大径パイプで急速き裂伝ばが生じやすいとされているが、これは大径になると厚肉になるためであろうとした Leever の指摘を裏付ける結果になる。つぎにいくらの延性破面率が伝ば防止のためのクライテリアになるかが問題になる。本試験では速度を評価していないが、今後伝ば速度と破面率の関係が明確になればこれに対する解が得られよう。少なくとも鋼の API で要求されているような 85% もの延性破面率は必要ないと考えられる^{23)~25)}。

5 ま と め

(1) ポリエチレンの急速き裂進展破壊は材料の破壊挙動としてはぜい性破壊である。しかしそのき裂進展速度が管中のガスの音速より小さいため見掛け上ラインパイプの不安定延性破壊伝ばとはき裂進展速度とガス圧力の減圧波速度の競合関係については同じ挙動に

なる。そこでラインパイプの不安定延性破壊伝ぱの評価解析に採用された三村の考えにより解析し、これまでに報告されたポリエチレン管の急速き裂進展破壊現象を定量的に記述できることを示し、その妥当性を確認した。

(2) 本解析は欧州で提案されている小型急速き裂進展試験である S4 試験の材料評価試験としての物理的根拠を与え得る。

(3) ポリエチレンの急速き裂進展破壊はぜい性破壊であり、この防止のためには破面遷移温度を考慮すべきである。このため DWTT が有力な評価試験になると考える。

参 考 文 献

- 1) K. Prabhat, W. A. Maxey, L. E. Hulbert and M. M. Mamoun, Proc. 8th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, p. 128 (1983).
- 2) J. M. Greig and L. Ewing, Proc. 5th Intl. Conf. Plastic Pipes, York, U. K., p. 13. 1 (1982).
- 3) J. M. Greig, Proc. 6th Intl. Conf. Plastic Pipes, York, U. K., p. 20. 1 (1985).
- 4) J. M. Greig and L. Ewing, Proc. 8th Intl. Conf. Plastic Pipes, Koningshof, C2/1 (1992).
- 5) M. F. Kanninen, C. P. Leung, S. C. Grigory, C. F. Popelar, H. R. Couque and P. E. O'Donoghue, Proc. 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, p. 70 (1991).
- 6) P. Krishnaswamy, W. Maxey, B. Leis and L. Hulbert, GRI 85/0010, PB88-157367 (1986).
- 7) M. Wolters and G. Ketel, Proc. 8th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, p. 137 (1983).
- 8) P. S. Leever and P. Yayla, Proc. 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, p. 58 (1991).
- 9) J. M. Greig, P. S. Leever and P. Yayla, Engineering Fracture Mechanics, **42**, 663 (1992).
- 10) P. Yayla and P. S. Leever, Engineering Fracture Mechanics, **42**, 675 (1992).
- 11) P. S. Leever, G. Venizelos and A. Ivankovic, Proc. 8th Intl. Conf. Plastic Pipes, Koningshof, D1/7 (1992).
- 12) P. W. E. Peereboom and M. Wolters, Proc. 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, p. 47 (1991).
- 13) C. P. Leung, M. F. Kanninen, C. F. Popelar, H. R. Couque and M. M. Mamoun, Proc. 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, Boston, p. 84 (1991).
- 14) E. Sugie, M. Matsuoka, T. Akiyama, H. Mimura and Y. Kawaguchi, Transaction of the ASME, J. Pressure Vessel Technology, **104**, 338 (1982).
- 15) 杉江英司, 松岡雅典, 秋山俊弥, 三村 宏, 住友芳夫, 鉄と鋼, **69**, p. 1190 (1983).
- 16) E. Sugie, H. Kaji, T. Taira, M. Ohasi and Y. Sumitomo, Trans. J. Energy Resources Tech., **106**, 55 (1984).
- 17) H. Mimura, Proceedings of the Sixteenth Japan Congress on Materials Research, Kyoto, p. 101 (1972).
- 18) 岡村弘之, “線形破壊力学入門”, 153 (1976) 培風館
- 19) W. A. Maxey, Proc. 5th Symposium on Line Pipe Research, American Gas Association, Houston, J-1 (1974).
- 20) E. Sugie, M. Matsuoka, T. Akiyama, K. Tanaka and M. Tsukamoto, Fracture Mechanics, Eighteenth Symposium, ASTM STP 945, p. 237 (1987).
- 21) G. P. Marshall, P. G. Harry, A. L. Ward and D. Pearson, Proc. 8th Intl. Conf. Plastic Pipes, Koningshof, C1/2 (1992).
- 22) API Recommended Practice for Conducting Drop-weight Tear Test on Line Pipe, API RP 5L3, Second Edition, March (1978).
- 23) R. J. Eiber and G. M. McClure, The Oil and Gas Journal, September 23 (1963).
- 24) R. J. Eiber, Symposium on Line Pipe Research, American Gas Association, Houston (1965).
- 25) R. J. Eiber, Proc. 2nd Symposium on Line Pipe Research, Pipe research Committee of American Gas Association (1969).