9% ニッケル鋼の衝撃引張特性†

吉 江 伸 二* Carlo Albertini** 面 谷 幸 男***

Impact Tensile Properties of Nine Per Cent Nickel Steel

by

Shinji YOSHIE*, Carlo ALBERTINI** and Yukio MENTANI***

Clarifying material dynamic behavior is of the highest priority for safety evaluation of any structure under an impact problem. Grasping the strain rate dependence of material is necessary for the evaluation of structural integrity. To derive the strain rate dependence, the impact tensile tests should be done in a way that strain rate could be maintained constant. To realize this, two kinds of testing devices have been developed in JRC (Joint Research Centre), Ispra. One is the hydro-pneumatic machine for a medium strain rate range from 0.1 to 100 s⁻¹ and the other is the Modified Hopkinson bar device for a high strain rate range from 100 to 5 000 s⁻¹.

In the present study, for nine per cent nickel (9Ni) steel used for LNG (Liquefied Natural Gas) structure, the impact tensile tests were performed at strain rates up to the order of 1 000 s⁻¹, and the experimental results obtained are compared with those of carbon steel. The current tests revealed that 9Ni steel could have 50% more safety margin of strain energy even at a strain rate in the order of 1 000 s⁻¹ than that for carbon steel.

Key words: Dynamic material behavior, Impact, Tensile test, Strain rate, Hopkinson bar, LNG
Nine per cent nickel steel

1 緒 言

衝突や爆発を起因とする事故時の衝撃荷重を構造物が受けた場合に健全性を維持できるかどうかを評価する手法を構築しておくことは、重要である。本論文は、LNG（液化天然ガス）タンク構造物に航空機あるいは飛来物が衝突した場合を想定した衝撃評価に備え、タンクの構造材料である 9% ニッケル鋼（SL9N590、以下 9% Ni 鋼）の衝撃引張特性を調べ、巨視的な考察を試みた結果を述べる。

構造物は、通常その使用限度に見合った静的荷重条件を基に余裕を見て設計される。構造物の健全性評価は、この余裕を含め、使用材料の破壊に至るまでの限界荷重と設計荷重との差で代表されるような安全裕度がどの程度あるのか、あるいは破壊に至るか否かを調べることになる。また、構造物が衝撃荷重によってどの程度、変形するのか、時刻的にいつ破壊に至るかが予測できれば事故後の対処方法を考えたり、事故が拡大しないような方法を考える行く大切な手がかりとなる。材料の機械的性質は、ひずみ速度に応じて変化する^{1), 2)}ので構造物の衝撃評価に当たっては、使用材料のひずみ速度依存性を調べておくことが必要となる。ひずみ速度が上昇すると、金属材料の多くは、室温下で流動応力が上昇して伸びが低下する傾向となる。構造物の健全性を実験あるいは解析のいずれで評価する場合にも、ひずみ速度依存性のデータ取得が必要となる。通常、実験は、縮小モデルを用

いて実施し、最終的に実物大の構造物を解析コードで評価する手法が取られる。この場合に入力となる材料の構成則の精度が解析結果に与える影響が最も大きいと言える。

以上の観点から本研究は、9%Ni 鋼を対象として衝撃引張試験を実施し、ひずみ速度依存性を定量的に明らかにすることを目的として行われた。衝撃引張試験により、ひずみ速度依存性を抽出する場合、単軸引張においては、一樣伸びまでの塑性域において負荷中の真ひずみ速度ができる限り一定に保たれるような制御を行って試験する必要がある。本論文では、一樣伸び領域での平均的な真ひずみ速度を 0.001s⁻¹から 1 000s⁻¹オーダーまで変えて、負荷中にほぼ一定となるような水空力式試験法および改良型ホプキンソン棒による試験方法を示すと共に、試験結果を基に、ひずみ速度に応じた応力と伸びの変化について考察した。

2 対象材料とひずみ速度の範囲

2.1 LNG と 9%Ni 鋼

天然ガスは、比較的大容量で輸送あるいは貯蔵する場合、常圧下で冷凍液化され、-160℃の沸点を持つ極低温液体として取り扱われる。³⁾このため LNG 容器の材料は、低温において液圧・ガス圧に耐える強度を有することに加えて、低温ぜい性破壊しない、すなわち十分な切欠きじん性を有し、かつき裂が発生してもき裂伝ば停止性能が優れていなければならない。金属は、一般に低温にな

† 原稿受理 平成 8 年 12 月 2 日 Received Dec. 2, 1996

* 正 会 員 川崎重工(株)原子力本部 〒136 東京都江東区南砂, Nuclear Syst. Div., Kawasaki Heavy Indust. Ltd., Koto-Ku, Tokyo, 136 (現在 (財)電力中央研究所 柏江研究所)

** Commission of the European Communities, Joint Res. Centre, Ispra, Inst. for Syst., Informatics and Safety (ISIS), Structural Mechanics Unit, Italy

*** 川崎重工(株)鉄構(事) 〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島, Steel Structure Div., Kawasaki Heavy Indust. Ltd., Kako-gun, Hyogo, 675-01

ると流動応力が上昇し伸びが低下するぜい化現象が起きる。低温ぜい性は、金属の結晶構造と関係があり、面心立方格子の結晶構造を有する Al, Ni およびその合金、オーステナイト系ステンレス鋼などは、低温においてぜい性を示さない。一方、炭素鋼および 9%Ni 鋼などの体心立方格子の金属は、ある温度以下において切欠じん性が急激に減少する遷移現象を有するのでその使用温度には自ずから制限がある。古くはオーステナイト系ステンレス鋼や Al 合金がぜい性破壊の非感受性の点から広く使用されてきた。その後、十分な低温じん性を示し、溶接性、加工性の優れた 9%Ni 鋼が登場し、極低温材料としての優秀性および国内外の使用実績が確立されている。また、9%Ni 鋼のタンクがぜい性的にカタストロフィックに崩壊することは、極めて起こりにくいことが示され、産業界で安全性の一つの判断材料となる LBB (Leak-Before-Break) 概念に見合うものであることが立証されてきている。⁴⁾ 9%Ni 鋼が -200°C 近くの温度まで高いじん性を有する理由としては、Ni を多量に含有するため、フェライト相のじん性が著しく向上すること、熱処理により結晶粒の微細化と炭化物、窒化物の均一、微細な分散が得られることの 2 点があげられる。

以上のように 9%Ni 鋼は、静的状態での低温ぜい性に対して優れるが高ひずみ速度における衝撃特性は、別に調べる必要がある。ここでは衝撃による硬化を、ひずみ速度硬化 (Strain-rate hardening) と呼ぶ。

2・2 衝撃引張試験に用いた 9%Ni 鋼の組成と参照材

試験に使用した 9%Ni 鋼の組成と静的な機械的性質を Table I に示す。参照材として、炭素鋼 (SS400) を選択し、9%Ni 鋼と同様の手法にて衝撃引張試験を実施した。9%Ni 鋼のように特殊に開発された材料に対して、炭素鋼が一般的に使用されている材料であること、これに加えて LNG タンク・二重殻構造の外槽材として使用されていることが参照材としての選択理由である。

衝撃引張試験温度は、参照材を含めて室温にて実施した。衝撃評価対象は、LNG タンク・二重殻構造であり外槽材の炭素鋼は、室温、内槽材の 9%Ni 鋼は、極低温が通常の使用状態となる。今回は、両材料とも室温において母材を対象に実施し、衝撃特性を比較することが基本になると判断した。9%Ni 鋼の極低温における、ひずみ速度依存性は、室温での知見をベースに今後、調べて行く予定である。

2・3 ひずみ速度の設定範囲

緒言に述べたように構造物の評価実験では、多くの場合、縮小したモデルを使用し、相似則として通常、縮小率に対して速度を一致させる等速効果則を用いるため、ひずみ速度は、縮小率に応じて上昇する。この意味でも対象材料のひずみ速度依存性は、前もって把握しておく必要がある。構造物の評価実験結果の解釈を行う場合に材料の衝撃特性を外挿評価することなく、内挿評価できるように衝撃引張試験時のひずみ速度の範囲は、出来るだけ上限を指数的に大きく設定してお

Table I. Mill specification of nine per cent nickel steel.

Specification	JIS G3127	SL9N590
Chemical composition	[%]	
C	0.05	(≤ 0.12)
Si	0.23	(≤ 0.30)
Mn	0.61	(≤ 0.90)
P	0.003	(≤ 0.025)
S	0	(≤ 0.025)
Ni	9.17	(8.50 ~ 9.50)
0.2% Yield stress	686 MPa	(≥ 590)
Tensile strength	728 MPa	(690 ~ 830)
Elongation	31 %	(≥ 21.0)
Charpy (-196°C)	231 J, thrice average	(≥ 41 J)
Heat treatment	QT	

Values in the parenthesis refer to JIS G3127 SL9N590.

くことが好ましい。

今回の衝撃引張試験のひずみ速度範囲として、下限は、Table I に示した静的なデータとの比較を行う意味から 0.001s^{-1} オーダーとし、上限は、 1000s^{-1} オーダーに設定した。中間値として、 1s^{-1} および 100s^{-1} オーダーを設定し、4 種類のひずみ速度を選んだ。ただし、炭素鋼については 100s^{-1} オーダーの試験を省いた。ひずみ速度の上限値の例として、飛来物が速度 45m/s にて板厚 6mm の鋼板に衝突することを想定した場合、⁵⁾ 衝突点のひずみ速度は、コードを用いた解析⁶⁾ から 1000s^{-1} オーダーであるため、上記のように設定した。

3 衝撃引張試験の方法

衝撃引張試験の目的は、対象材料のひずみ速度依存性を抽出することであり前述のように引張試験中に真ひずみ速度は、できる限り一定に保たれる必要がある。このため以下に示す試験方法を採用した。

試験方法は、ひずみ速度の大きさに応じて異なり、 0.001s^{-1} オーダーの静的なひずみ速度に対しては、汎用の変位制御型油圧試験機を使用し、 0.1s^{-1} から 100s^{-1} オーダーの中程度のひずみ速度範囲については、圧縮ガスの膨張と背圧としての水噴出を組み合わせた水空力式試験機⁷⁾を使用した。 100s^{-1} を超え 1000s^{-1} オーダーの高ひずみ速度の領域に対しては、応力波の形で試験片に負荷することになり Hopkinson-Davies bar 法^{8)~11)} を引張ひずみエネルギー蓄積型に改造した改良型ホプキンソン棒法^{7), 12)} による試験装置を製作し、試験を実施した。

材料のひずみ速度依存性を調べる場合、ひずみ速度の大きさによらず試験方法は同一であることが理想であるが、ひずみ速度の上昇に応じて応力波を媒体として機械的性質を調べて行くことになるため、これに見合った試験方法を選択することになる。この意味で、ひずみ速度 100s^{-1} 付近は、試験方法の選択において境界領域となる。

以下に、それぞれの試験方法について述べる。試験片は、試験方法によらず、同一のものを使用した。試験片形状を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. Specimen.

3・1 水空力式試験 (ひずみ速度: $0.1 - 100\text{s}^{-1}$)

構造原理を Fig. 2 に示す。試験片の一端は、ガス内圧によって駆動する軽量のピストンに接続される。ピストン上部のタンク内には背圧として作用する水を入れる。作用水の開放側端部には同図 A に示すように校正したオリフィスが設置され、更に下流にはラプチャーディスクを設置する。試験前はガス側と水側を同圧力に保ち、ラプチャーディスクを破裂させて試験を開始する。水は、オリフィスを通じて一定速度に制限されて噴出し、ピストンは、ほぼ一定速度で移動する。これにより試験片に一定の公称ひずみ速度で負荷がかけられるようにする。ピストンの動力となるガス内圧は、試験片の破断応力に見合った圧力に余裕を見て設定する。応力は、固定側弾性棒のひずみゲージにより、また、ひずみは、ピストン棒側の変位計によって計測される。今回の材料を対象にして、計測した変位および荷重の時間履歴を基に公称ひずみ速度が試験中、ほぼ一定となることを試験結果 5・1 節に示す。

3・2 改良型ホプキンソン棒試験

(ひずみ速度: $100 - 5000\text{s}^{-1}$)

著者らが用いる改良型ホプキンソン棒法は、打撃棒を使用せず、入力棒の一部に静的な引張弾性ひずみエネルギーを蓄えて入力棒に直接、引張波を入力し、公称ひずみ速度が、ほぼ一定になるようにした試験方法であり、特許¹³⁾を得ている。また、蓄積したエネルギーの開放を瞬時にできるようにして、試験片変形の初期段階から内部に応力平衡を実現できるようにしていることが特徴である。試験装置の原理を Fig. 3 に示す。図に示すように入力棒の一部である予負荷部 (図中 A) の端部 (図上部) をピストン形状にし、試験前に水圧アクチュエータによって、弾性限度内にて引張る。予負荷部のもう一方の端部 (図中央部、点線枠内) は、ぜい性材料で製作したトリガー (Brittle intermediate piece) を内装したチャック (Gripping jaws) にて固定する。試験は、トリガーの破断によるチャックの開放によって開始され、蓄積した静的な引張弾性エネルギーが直接入力棒の残部 (図中 B) に伝ばする。これによって、入力棒に、立ち上がりの早い振幅一定の引張応力波が入射できる。チャックの開放は、入力棒の中心軸に対して均等に行う構造としており、曲げ効果が生じないようにしている。また、入、出力棒には、ひずみゲージをブリッジに組んで貼付し、

Fig. 2. Schematic of hydraulic-pneumatic machine for dynamic tensile tests at constant strain-rate ($0.1 - 100\text{s}^{-1}$).⁷⁾ Fig. 3. Modified Hopkinson bar with prestressed bar loading device for tensile tests.⁷⁾

曲げ成分を消失して計測する。本チャックの使用によって、入射波の立ち上がり時間は、約 $25\mu\text{s}$ で、波の持続時間に比べて十分短い。入、出力棒としては、直径 10mm の超強力鋼を使用した。弾性棒直径に対して棒中に伝ばする波の波長は、十分大きく、1 次元弾性平面波の波動理論を仮定でき散逸の無視できる弾性波が棒表面のひずみゲージを用いて観測できる。これにより、ひずみ速度をパラメータとした応力-ひずみ線図に必要な各物理量が入力棒での入射波 ϵ_i 、反射波 ϵ_r および出力棒での透過波 ϵ_t の計測によって、得られる。入力となる ϵ_i に対して、出力となる ϵ_r および ϵ_t の各振幅は、大部分、試験片の塑性的性質によって定まる。

以下に、改良型ホプキンソン棒試験法によって、応力平衡が実現できること、および公称ひずみ速度が、ほぼ一定となることを示す。試験片の長さは、各棒の長さに比べて十分に短く、試験片内部では、試験片の両端を境界条件として、弾性波および塑性波の伝ば速度に応じて、透過波の反射が繰り返され、試験片内部は、応力平衡に到達する。この時、以下の近似が成立する。

$$\varepsilon_i + (-\varepsilon_r) \approx \varepsilon_t \quad (1)$$

今回の試験で得られた代表的なひずみパルスを図 4 に示す。本図は、試験片端部より 500mm 離れた入射棒上のひずみゲージ I における観測例を示す。上部トレースは、入射波および約 200 μ s 後 ($2 \times 500\text{mm}/C_0$, C_0 : 棒の縦弾性伝ば速度) から反射波が返り、重なったパルスを、下部トレースは、透過波を示している。正方向の出力信号が引張、負方向が圧縮に対応する。同図においては、入射波の観測後、約 200 μ s まで一定振幅が観測され、入射波全体としては、予負荷部長さに対応して、約 800 μ s ($2 \times 2000\text{mm}/C_0$) だけ持続し得る。入射波の全体は、入射棒および予負荷部上のチャック近傍位置にひずみゲージを貼付して、観測する。Fig. 4 に示すように、入射棒側の入射波および反射波の重畳 $\varepsilon_i + (-\varepsilon_r)$ が出力棒側の透過波 ε_t とほぼ一致し、応力平衡が成立することを実験的に確認した。通常、ゲージ長が 13mm 以下の金属試験片であれば、試験精度範囲内で式 (1) が成り立つ。¹¹⁾

以上により、1次元波動伝ば理論から、公称ひずみ ε_s 、公称ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_s$ および公称応力 σ_s は、以下のように表現される。

$$\varepsilon_s(t) = \frac{C_0}{\ell_0} \int_0^t \{\varepsilon_i - (-\varepsilon_r) - \varepsilon_t\} dt' \approx \frac{2C_0}{\ell_0} \int_0^t \varepsilon_r dt' \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{\ell_0} \{\varepsilon_i - (-\varepsilon_r) - \varepsilon_t\} \approx \frac{2C_0}{\ell_0} \varepsilon_r \quad (3)$$

$$\sigma_s(t) = \frac{1}{2} E \frac{A}{A_0} \{\varepsilon_i + (-\varepsilon_r) + \varepsilon_t\} \approx E \frac{A}{A_0} \varepsilon_t \quad (4)$$

ここで E , A は、それぞれ弾性棒の縦弾性係数、断面積である。 ℓ_0 , A_0 は、試験片の初期ゲージ長と断面積である。また、公称応力-公称ひずみ関係から真応力 σ -真

ひずみ ε 関係へは、次式を用いて変換した。

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_s) \quad (5)$$

$$\sigma = (1 + \varepsilon_s) \sigma_s \quad (6)$$

上式 (3) から $\dot{\varepsilon}_s$ を一定にするためには、 ε_r が一定に保たれる必要がある。Fig. 4 において、最大荷重までの一様伸び領域での ε_r は、ほぼ一定で、公称ひずみ速度は、ほぼ一定となっている。 ε_r すなわち $\varepsilon_i - \varepsilon_t$ は、 ε_t の変化分に対して一定振幅の ε_i を十分に大きくできれば、ほぼ一定とみなせる。厳密に言えば、対象材料の加工硬化率が正であれば ε_t の増加分だけ $\dot{\varepsilon}_s$ は、低下する。また、 $\dot{\varepsilon}_s$ の大きさによって $\dot{\varepsilon}_s$ の変化に違いが現れる。入力となる ε_i の大きさを大きくする一方、式 (4) より $\varepsilon_t \approx (A_0/EA) \sigma_s$ であるから、応力棒の材質、試験片と棒の断面積比により定まる A_0/EA の値をできるだけ小さくすることが一定ひずみ速度を得ることに寄与する。Fig. 4 の試験結果に示すように、一定振幅 ε_i の大きさに比べて ε_t は、小さく、また加工硬化率が大きくなく、 ε_t の変化分が小さいことが、一定ひずみ速度を得ることに寄与している。著者らの経験上、本方法により、金属材料に対して $\dot{\varepsilon}_s$ が、ほぼ一定と見なせる下限値は通常、約 100s^{-1} である。Fig. 4 において、最大荷重到達後 ε_r が漸次増加する傾向となるのは、試験片にくびれが生じて荷重が減少するためである。(図中 A) 公称ひずみから真ひずみに変換後、一様伸び領域における時間勾配の平均的な真ひずみ速度は、ほぼ一定と見なすことができる。これについては、5・1 試験結果の項で述べる。

4 データ処理方法

本章では、計測されたデータを用いて材料の機械的性質をより正確に表現するために用いたデータ処理方法⁷⁾を述べる。

4・1 ゲージ長以外の試験片の伸びの考慮

試験片平行部であるゲージ長 (ℓ_0) 以外の部分が伸びに寄与するため、試験片破断後に両端部の伸び量を顕微鏡で計測して、実質的なゲージ長 ℓ'_0 を以下のように求め ℓ_0 を補正した。補正に当たって、ゲージ長増分に対する全体の伸び増分の比だけ平行部以外の部分 (丸み状の肩部) も変形しているとした。別の金属材料を用いて 100 μ s のコマ間隔で試験中に高速撮影し、くびれ前の伸び状況が破断後の計測とほぼ比例すると判断した。

$$\ell'_0 = \ell_0 \cdot \Delta \ell / \Delta \ell_0 \quad (7)$$

ここで、 ℓ'_0 ; 実質ゲージ長
 ℓ_0 ; 初期ゲージ長
 ℓ ; 両端部を含む初期長さ
 $\Delta \ell_0, \Delta \ell$; ℓ_0 および ℓ の伸び増分

4・2 縦弾性係数について

応力波の反射によって試験片部に応力平衡が実現するまでは、有限の時間が必要となるため、ホプキンソン棒法における縦弾性係数は、見かけ上、低下する。縦弾性係数は、ひずみ速度に依存しない^{8), 9), 14)} ことから、静的な縦弾性係数を統一して使用し、ひずみ値は、Fig. 5 に示すように補正した。

Fig. 4. Verification of stress equilibrium (SS400, Strain rate: 1000 s^{-1} order).

Fig. 5. Correction of dynamic stress-strain curve to the slope of static elastic modulus.⁷⁾

5 衝撃引張試験の結果と考察

5・1 試験結果

水空力試験における荷重および変位の時間履歴を Fig. 6 に、改良型ホプキンソン棒におけるそれを Fig. 7 に示す。変位の時間勾配、すなわち公称ひずみ速度は、ほぼ一定に推移する。公称ひずみから真ひずみに変換後、一様伸びの範囲においては、真ひずみ速度について、ほぼ一定と見なすことができる。ここで、真ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、一様伸びの範囲での真ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ を、この間に要した時間 Δt で除して平均値として求めた。

衝撃引張試験で得られた 9%Ni 鋼のひずみ速度をパラメータとした応力-ひずみ線図を Fig. 8 に、炭素鋼について Fig. 9 に示す。これらのデータは同一条件で 2 回、実施した結果を平均した。再現性幅は、引張応力値と一様伸び値において、共に約 $\pm 2\%$ である。高ひずみ速度における降伏点近傍の波打ち現象についても、最大、約 $\pm 5\%$ の範囲で再現性がある。Fig. 8 の図中、 $\dot{\epsilon} = 360 \text{ s}^{-1}$ の結果は、破断伸び $\lambda = 40\%$ を想定した場合、所定入射波の持続時間 $\Delta t = 1.1 \text{ ms}$ ($\lambda / \dot{\epsilon}$) に対して、入力棒、予負荷部の長さが現状の 2m では不足したため（所要長さ： $\Delta t \cdot C_0 / 2 \approx 3 \text{ m}$ ）、破断伸びが見かけ上、小さくなっている。この場合、破断後の試験片を用いて顕微鏡観察により、 $\lambda \approx 30\%$ を得た。

5・2 結果の考察

試験結果を基に特徴的な機械的性質を抽出し、9%Ni 鋼を中心に炭素鋼と比較して考察を試みた。

(1) 応力に対するひずみ速度効果

9%Ni 鋼および炭素鋼は、両者とも、ひずみ速度の増加に応じて高応力側に移行し、ひずみ速度硬化を示す。Fig. 10 は、ひずみ速度をパラメータとして取得した応力-ひずみ線図から全ひずみ 5% 時点に着目して、流動応力に対する、ひずみ速度依存性について 9%Ni 鋼と炭素鋼を比較したものを示す。この場合の応力のひずみ速度に対する依存度を図中の勾配 m ($\Delta \sigma / \Delta \log \dot{\epsilon}$) で表し、その変化を 9%Ni 鋼について調べた。 $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ オーダーまでは、緩慢に応力が上昇し、 $m \approx 5 \text{ MPa}$ である。この

Fig. 6. Displacement and force histories using hydraulic-pneumatic machine (SS400, Strain rate: 2 s^{-1} order).

Fig. 7. Displacement and force histories using Modified Hopkinson bar (SL9N590, Strain rate: $1\,000 \text{ s}^{-1}$ order).

領域のひずみ速度を超えると明瞭にひずみ速度依存性が現れ、 $m \approx 40 \text{ MPa}$ となって応力値は、約 1 割上昇する。更に $\dot{\epsilon} = 1\,000 \text{ s}^{-1}$ オーダーの領域になると、 $m \approx 130 \text{ MPa}$ に加速され、応力値は、静的な値に対して約 2 割上昇する。このような傾向は、炭素鋼についても同様であるが応力値は $\dot{\epsilon} = 1\,000 \text{ s}^{-1}$ オーダーになると静的な値に対して約 4 割上昇する。

以上のように、ひずみ速度に対する応力上昇と言う点から、9%Ni 鋼および炭素鋼は、共に衝撃評価に対して安全裕度が増すことが明らかとなった。

(2) 伸びに対するひずみ速度効果

9%Ni 鋼について、 $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$ オーダーの静的な状態から 1 s^{-1} オーダーに増加することによって、一様伸び ϵ_{uni} は、約 15% から 10% へ約 3 割減少する。このひずみ速度の範囲では、応力値は、さほど変化しないが ϵ_{uni} が減少しているために、ひずみエネルギーとしては、約 3 割減少することになる。 $\dot{\epsilon} = 1\,000 \text{ s}^{-1}$ オーダーへ上昇した場合、静的な状態から比較すれば ϵ_{uni} は、減少するものの、ひずみエネルギーは、目立った減少をしない傾向にある。以下、ひずみエネルギーに着目して次項に述べる。

(3) ひずみエネルギーに対するひずみ速度効果

飛来物の衝突を設定した場合、衝突後の構造物は、変

形を開始し、飛来物の運動エネルギーの大半を塑性ひずみエネルギーとして吸収し事象が終結する。これを念頭におけば、材料の動的破損の定義として、限界応力あるいは限界伸びの制限に加えて、ひずみエネルギーによる制限が必要と考えられる。そこで材料の単位体積当たりの破損限界エネルギー E_f を実質的に、ひずみ吸収できる範囲であると考え、一様伸びまでの塑性ひずみエネルギーとして定義した。すなわち、

$$E_f = \int_{\epsilon_{0.2}}^{\epsilon_{uni}} \sigma d\epsilon \quad (8)$$

とした。各ひずみ速度に対しての引張強さ σ_{UTS} 、 ϵ_{uni} および概略の E_f の各値を 9%Ni 鋼と炭素鋼を比較して Table II に示す。この表から 9%Ni 鋼は、炭素鋼に比べて伸びがない分を高応力側への移行で補って、破損限界エネルギー値が大きく、高ひずみ速度においてもその値は、目立った減少をしない特徴のあることがわかる。一方、炭素鋼は、ひずみ速度増加に伴って伸びの低下が高応力へ移行することよりも顕著なため、破損限界エネルギー値が低下する。

流動応力が静的状態の時点から比較的大きく、ひずみ速度の増加に伴って、高応力側へ移行する 9%Ni 鋼は、ひずみの小さい時点から、すなわち時刻的に初期より、ひずみエネルギーが炭素鋼に比べて大きいのが特徴である。従って 9%Ni 鋼は、低ひずみ速度での低温ぜい性に優れると共に、室温では衝撃エネルギーの吸収にも優れた利点のあることが定量的に把握できた。

6 結 言

LNG 構造材料である 9%Ni 鋼 (SL9N590) を対象として室温において、ひずみ速度を $0.001s^{-1}$ から $1000s^{-1}$ の範囲でパラメトリックに変えて衝撃引張試験を実施した。引張試験中に、平均的な真ひずみ速度が、ほぼ一定に保たれるように制御して、破断までの応力-ひずみ関係を取得し、ひずみ速度依存性を明らかにした。同時に炭素鋼 (SS400) を参照材として同一の条件で試験を実施し、比較した。試験手法として、中程度のひずみ速度範囲 ($0.1s^{-1}$ – $100s^{-1}$) には、ガス加圧と水の背圧による水空力式試験法を、高ひずみ速度範囲 ($100s^{-1}$ – $1000s^{-1}$) に対しては、弾性引張エネルギー蓄積式の改良型ホプキンソン棒法を採用し、それぞれの特徴について述べた。

今回の試験で得られた主な成果を以下に要約する。

(1) 室温において、9%Ni 鋼と炭素鋼は、両者とも、ひずみ速度の上昇に応じて高応力側に移行する、ひずみ速度硬化を示し、特に $1s^{-1}$ オーダーを超えると顕著な硬化が現れることを把握した。全ひずみ 5% 時において静的な引張状態と比較すると、ひずみ速度が $1000s^{-1}$ オーダーの場合 9%Ni 鋼の応力レベルは、約 2 割増加、炭素鋼では、約 4 割増加することが明らかとなった。

(2) 伸びについて、炭素鋼は、ひずみ速度の増加に伴って減少する傾向を示す一方で、9%Ni 鋼は、 $1000s^{-1}$ オーダーまで、ほぼ一定の一樣伸びを維持できることが明

Fig. 8. True stress-strain diagrams of nine per cent nickel steel.

Fig. 9. True stress-strain diagrams of carbon steel.

Fig. 10. Strain rate effect on stress.

Table II. Dependence of parameters on strain rate.

Order of $\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	9 % Ni steel			Carbon steel		
	σ_{US} [MPa]	ϵ_{uni} [%]	E_f [MJ/m ³]	σ_{US} [MPa]	ϵ_{uni} [%]	E_f [MJ/m ³]
10 ⁻³	820	15	110	580	20	90
1	800	10	70	590	17	90
100	940	12	100	—	—	—
1000	940	10	100	720	10	65

Notes: $\dot{\epsilon}$: True strain rate σ_{US} : Tensile strength ϵ_{uni} : Uniform elongation E_f : Absorbed strain energy to failure

らかとなった。

(3) 一様伸びまでの塑性ひずみエネルギーを破損限界エネルギーとして定義すると9%Ni鋼は、1000s⁻¹オーダーの高ひずみ速度においても炭素鋼に比べて破損限界エネルギーが約5割大きく、衝撃評価に対する安全裕度を有することが明らかになった。9%Ni鋼は、低ひずみ速度での低温ぜい性に優れると共に、室温では衝撃エネルギーの吸収にも優れた利点のあることが定量的に把握できた。

本論文のまとめにあたって、ご指導を頂きました東京大学先端科学技術研究センター長・岸 輝雄教授に厚く感謝致します。また議論を通じて、貴重な御助言を頂きました日本原子力研究所原子炉安全工学部機器信頼性研究室・磯崎敏邦主任研究員に謝意を表します。

本試験は、JRC, Ispra 研究所において実施したもので、改良型ホプキンソン棒法の構築は Dr. M. Montagnani をはじめとするチームの長年の努力によるものであり、深甚の謝意を表します。本研究の実施にあ

たっては、川崎重工(株)鉄構事業部 鉄構施設技術総括部長 平川 長氏に尽力を頂きました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) E. El-Magd, Journ. De Physique IV, C8-149 (1944).
- 2) C. Albertini, K. Iida, A. D. Grande, M. Forlani, A. Pachera and M. Montagnani, ASTM Standard Technical Publication 1046, 2, 387 (1990).
- 3) 平川誠一, “液化天然ガス (LNG) 技術総覧”, p.71 (1973) ソフトサイエンス社.
- 4) W. S. Mounce, NiDI Technical Series No. 10030, 6 (1989).
- 5) “Recommendations for the design and construction of refrigerated liquefied gas storage tanks”, Publication No.147, p.17 (1986) EEMUA.
- 6) 吉江伸二, “動的的非線型解析コード AUTODYN を用いた衝突解析” (1996) 川崎重工(株)資料.
- 7) C. Albertini and M. Montagnani, Nuclear Science and Technology, EUR 5787 (1977).
- 8) H. Kolsky, “Stress waves in solids”, p.154 (1953) Clarendon Press; (1963) Dover Publication.
- 9) J. D. Campbell, Materials Science and Engineering, 12, 3 (1973).
- 10) R. M. Davies, Phil. Trans. Roy. Soc., Ser.A, 240, 375 (1948).
- 11) U. S. Lindholm, “Techniques of Metals Research”, Vol.5, Part 1, Chap.4 (1971) John Wiley & Sons.
- 12) C. Albertini and M. Montagnani, Institute of Physics, Conf. Ser. No.21, 22 (1974).
- 13) M. Motagnani, C. Albertini, U. Buzzi and M. Forlani, EUR Patent: Ref.1707 (1974).
- 14) U. S. Lindholm and L. M. Yeakley, Experimental Mechanics, 25, 6 (1968).