

## 1 結 言

近年、PL法やISO9000などの影響から素形材産業における品質保証要求は、ますます高まっている。特に工業的な観点から構造用材料の品質保証を考える場合、強度だけでなく、その靱性の程度が、重要な課題である。しかしながら、その定義は曖昧で定性的な表現でしかない。構造用材料の生産現場では簡便迅速にかつ定量的に検討できる靱性評価手法が望まれている。

本報では、素形材生産現場での品質保証などを目的とした靱性評価法を検討した。試験速度を制御できる計装化された曲げ試験機を用い、得られた荷重変位曲線からエネルギー量を測定した。

## 2 工業的靱性評価に要求される条件

### 2-1 現在の靱性評価法

現実に多く採用されている構造用材料は、適度な靱性を持つものである。高靱性材料の破壊は、大規模降伏を伴う弾塑性破壊である。学術的に弾塑性破壊靱性は、 $J_{ic}^{(1)}$ もしくは $COD^{(2)}$ で評価される。しかしながら、 $J_{ic}$ は複数個の試料が必要なことや、 $COD$ は測定そのものが困難なことが指摘される。いずれも難解で時間を要すなど、工業的な靱性評価法としては経済的でなく不向きである。

現在、多くの素形材生産現場における靱性評価法は、動的にはシャルピー衝撃試験による吸収エネルギー値、静的には引張試験時の伸び測定や曲げ試験時のたわみ量測定などの変位量測定である。特に、シャルピー衝撃試験による吸収エネルギー値は、その物理的意味が不明確ながらも、多くのバックデータの存在などから現在も広く採用されている。また、計装化シャルピー衝撃試験<sup>3)</sup>により、弾塑性破壊靱性を総合的に評価する試みも行われている。

### 2-2 靱性評価に要求される条件

機械的性質は、温度、形状効果、ひずみ速度の影響を受けることが知られている。形状効果（切欠きの影響）は、実用上様々な形態が考えられるため一

義的に決めることは困難であるが、温度、ひずみ速度（静的から動的まで）の設定ができる評価方法が要求される。更に、生産現場向きの簡便で迅速な手法を検討する場合には、表1の条件が考えられる。

表1 工業的に要求される靱性評価法

- |   |                |
|---|----------------|
| ① | ひずみ速度の設定が可能    |
| ② | 試験温度の設定が可能     |
| ③ | 操作が簡便なこと       |
| ④ | 保守性が良いこと       |
| ⑤ | イニシャルコストが低いこと  |
| ⑥ | ランニングコストが低いこと  |
| ⑦ | 試験片加工の加工が容易なこと |
| ⑧ | 試験片加工の時間が単純なこと |
| ⑨ | 試験時間が短いこと      |
| ⑩ | 試験機校正が容易なこと    |

## 3 評価実験

### 3-1 曲げ試験による靱性評価

靱性は、負荷を吸収するエネルギー即ち、塑性変形に要するエネルギー量で整理ができる。本報では、表1などを考慮して、曲げ試験から得られるエネルギー量を用い靱性評価について検討することとした。

表2に曲げ試験の特徴を示す。シャルピー衝撃試験も、表2の長所③④⑤の条件を満足出来ていないが、原理的には3点曲げ試験であり、広義の曲げ試験法に含まれると考えられる。

曲げ試験において生じるエネルギー量は、荷重変位線図の面積で表されるため、これを自動的に算出するシステムを構築し評価実験を行った。

表2 曲げ試験の特徴

- | 長 所                     |
|-------------------------|
| ① 取扱いが簡便で、試験機構成が単純      |
| ② 試験の高速化が容易             |
| ③ 荷重検定による校正が可能          |
| ④ スパン調整で見かけの曲げ弾性率など調整可能 |
| ⑤ 亀裂伝播の方向が設定可能          |
| ⑥ 高硬度材料でも試験可能           |

- ⑦ 恒温槽を用いれば正確な温度設定が可能
- ⑧ 試験片形状に自由度が大きい

短 所

- ① 形状の影響を受ける
- ② 変形量が大きいとき、弾性的取り扱い不可
- ③ 応力分布が一様でなく、微視的な解析が困難

### 3-2 計測システム

図1に計測システム構成を示す。

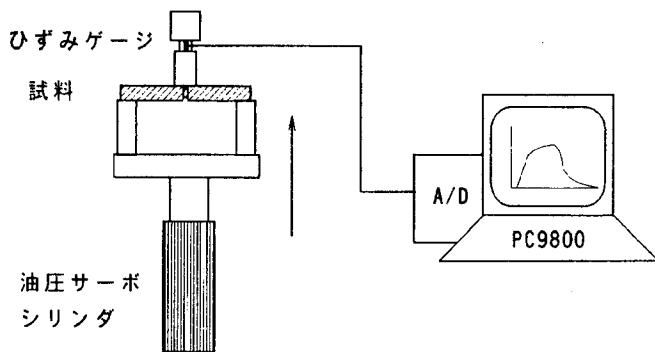


図1 計測システム構成

速度制御用アクチュエータとして、油圧サーボ式疲労試験機（株式会社島津製作所製EHF-10型）を用いた。試験速度（ストローク制御）は、 $5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ とした。荷重は、押し治具に張り付けたひずみゲージから検出した。荷重情報は、ストレインアンプから0-5Vアナログ電圧で出力される。これを高速A/Dコンバータ（株式会社インターフェース製AZI-3113最高サンプリングタイム $2 \mu\text{sec}$ ）でパーソナルコンピュータに取り込み、荷重、エネルギー量に変換する。荷重校正は、ループ荷重検力器により行った。

評価には、破断までの荷重変位関係を計測し、状態別エネルギー量を計算するプログラムを作成し用いた。開発言語はC言語である。荷重検出は、試験速度によらない計測を行うために、サンプリング速度と試験速度（ストローク制御）と同期させ、一定変位（本実験では $25 \mu\text{m}$ ）ごとの測定を行った。エネルギー量Uの算出は下式を用いた。

$$U = \int F \Delta y \quad (F: \text{単位変位あたりの荷重}, \Delta y: \text{単位変位})$$

### 3-3 試料及び試験条件

実験試料は、JIS SNCM439を用い、焼戻し温度を変化させることにより、吸収エネルギー量を調整した。図2に熱処理条件を示す。焼入れ温度1123Kで油冷し、650, 700, 750, 800, 850, 900K各温度で焼戻し後水冷した。図3に試験片形状、荷重及び支持条件を示す。試験片は、図3に示すように直径12mmの丸棒に応力集中部直径10mm、R1のノッチを入れ供した。曲げ試験方法は、試験片ノッチ部に直接荷重が加わらないように、4点曲げとし、両端単純支持スパン80mm、加圧2点間スパン16mmで行った。試験温度はすべて室温で行った。

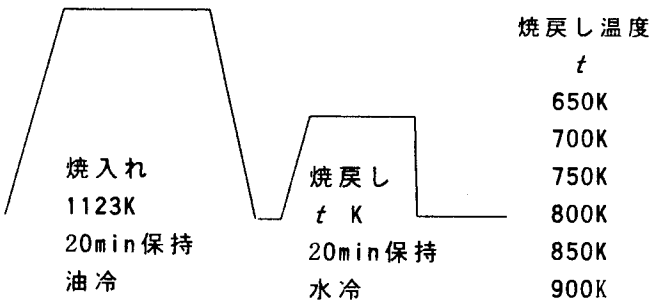


図2 試験片熱処理条件

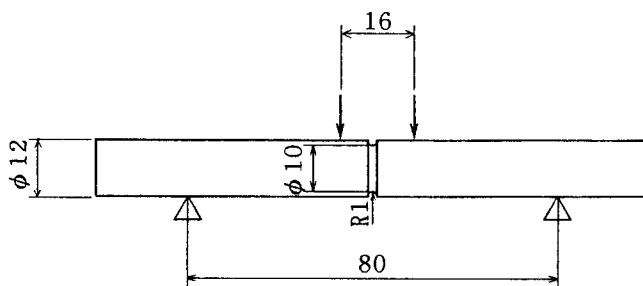


図3 試験片形状及び荷重方法

### 3-4 解析方法

図4に代表的な曲げ試験での荷重変位曲線を示す。

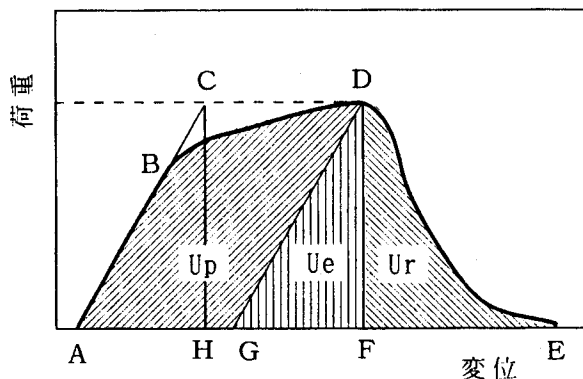


図4 荷重変位曲線と状態別エネルギー量

脆的な材料ではACHでとなる。高靱性な材料ではABDEのような形態を示す。

負荷を受けて変形、破壊していく構造物の状態は、巨視的に弾性、塑性、亀裂進展の3状態に区分できる。本報では、外力により生ずるエネルギー量を、状態別に区分し、それぞれ以下のように考えた。

- ①弾性状態では、原子格子間に蓄積されたひずみエネルギー( $\mathcal{L}e$ )
- ②塑性状態では、転位などで発生し熱などに変換されたエネルギー( $\mathcal{L}p$ )と残留しているひずみエネルギー( $\mathcal{L}e$ )
- ③亀裂進展状態では、へき開に要するエネルギー( $\mathcal{L}r$ )と開放された運動エネルギー( $\mathcal{L}l$ )

ここで図4の最大荷重をとるD点での状態を考える。曲げ試験においては、塑性状態で荷重を除去すると弾性変形率に平行な傾きで戻ることが知られている。このことから、ABDGは塑性変形で消失して熱に変換された塑性成分のエネルギー量( $\mathcal{L}p$ )、DGFは残留している弾性成分のエネルギー量( $\mathcal{L}e$ )、DEFは亀裂進展にともない生じるエネルギー量( $\mathcal{L}r$ )と仮定した。

これら状態別に仮定したエネルギー量を整理して、靱性の評価パラメータへの適応を試みた。また、靱性の評価基準は、安全係数や衝撃係数の様な設計定数的な考え方を参考に無次元パラメータとした。そのため、仮定した各状態でのエネルギー量や総エネルギー量( $\mathcal{L}t = \mathcal{L}p + \mathcal{L}e + \mathcal{L}r$ )を比較し、そこに見られる特徴を検討した。

### 3-5 実験結果及び考察

図5に実際に計測された荷重変異曲線を示す。図

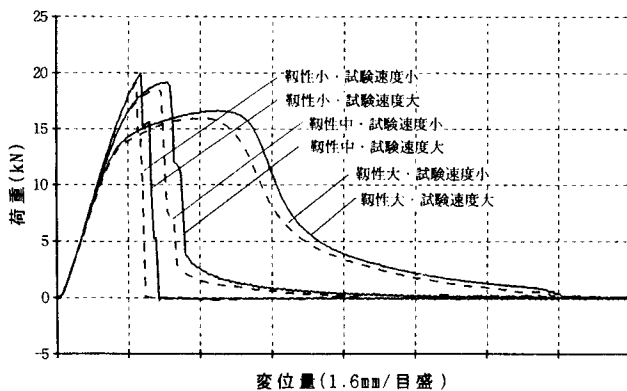


図5 荷重変位曲線計測例

5~8の図中の実線は、試験速度 $5 \times 10^{-2}$ , 破線は $5 \times 10^{-4}$ m/sを示す。

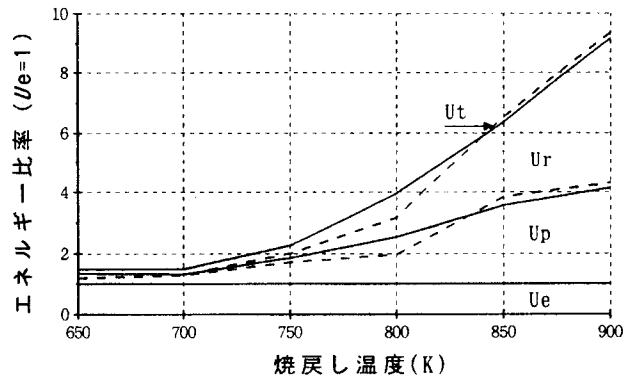


図6  $Ut/Ut$ 比

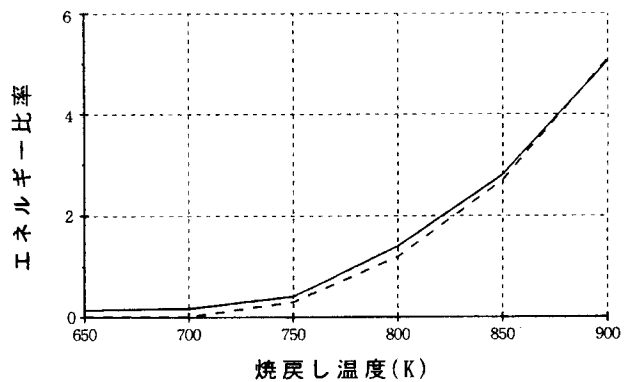


図7  $Ur/Ut$ 比

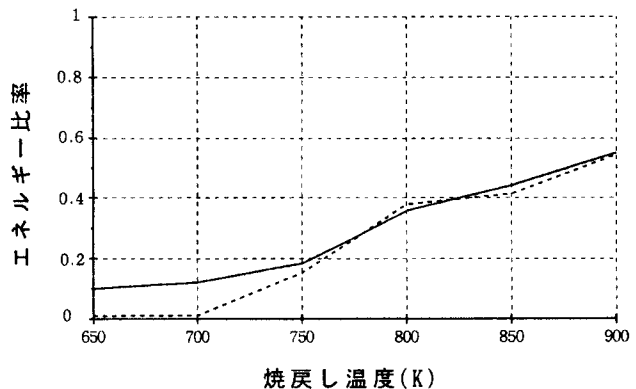


図8  $Ur/Ut$ 比

本報の仮定では、靱性の程度に伴い $\mathcal{L}p$ ,  $\mathcal{L}r$ 量が量が増える。脆的な破壊では、 $\mathcal{L}p$ ,  $\mathcal{L}r$ がほぼ0に等しいと考えられ、 $\mathcal{L}t/\mathcal{L}e$ 比が1となる。

図6に $\mathcal{L}t/\mathcal{L}e$ 比を示す。得られた $\mathcal{L}t/\mathcal{L}e$ 比は、既知のシャルピー衝撃値<sup>4)</sup>と酷似した結果を示し、靱性評価パラメータとして有効であると考えられる。

試験速度の差は、図5に示す $\mathcal{L}t$ の絶対値において見られたが、 $\mathcal{L}t/\mathcal{L}e$ 比では明確ではなかつ

た。これは、 $U_t/U_e$ 比が試験速度に依存しないパラメータである可能性を示すが、 $n$ 数（各水準、試験速度において $n=4$ ）が少ないので今後の検討課題である。

図7に $U_t/U_e$ 比を示す。実際の構造物破壊においては、破断時に開放されるエネルギー量 $U_t$ が事故の大きさに影響する。 $U_t=U_e/U_r$ と考えられるので、 $U_t/U_e$ 比があるしきい値以下の場合脆性的で危険な材料と判断できる。

図8に $U_t/U_e$ 比を示す。破壊靱性の考え方は $U_t$ の大きさに関連しており、 $U_t/U_e$ 比は破壊を示す工業的に有効なパラメータになる可能性がある。

#### 4 結 言

本実験により、以下の結果を得た。

- (1) 速度制御された曲げ試験機を計装化して、工業的な観点から検討した靱性評価手法を開発した。
- (2) 状態別エネルギー量の比による無次元定数 $U_t/U_e$ 比、 $U_r/U_e$ 比、 $U_p/U_t$ 比が、靱性評価パラメータとして有効である。

本実験においては、試験機の都合上シャルピー衝撃試験相当の動的なひずみ速度は得られていないが、現在の油圧技術や計測技術はそれを可能にしているため、本評価手法は、より広範囲の条件設定が可能である。

また、今後の課題として形状効果の影響や試験精度のSN比向上などがある。将来的には、球状黒鉛鋳鉄などへ適用し、製品の品質保証手段としての有効性を検討していきたい。

最後に、本研究は財団法人岡三加藤文化振興財団の助成を受け実施した。紙面を借りて謝意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 日本機械学会：“機械工学便覧”，A4材料力学(1990)、p.141
- 2) 日本機械学会：“機械工学便覧”，A4材料力学(1990)、p.141
- 3) 例えば小林：鉄と鋼、71(1985)、p.654
- 4) 日本規格協会：“機械構造用鋼と構造用合金鋼”、解説付(1956)、p.83