

動的破壊試験による強度評価

Evaluation of Mechanical Properties and Fracture Characteristics by Dynamic Fracture Testing

塚本雅敏/Masatoshi Tsukamoto・住友金属テクノロジー(株) 強度受託研究部 波崎事業所 所長 工博

傳田岳史/Takeshi Denda・住友金属テクノロジー(株) 強度受託研究部 波崎事業所 課長 工博

鈴木清一/Kiyokazu Suzuki・住友金属テクノロジー(株) 強度受託研究部 波崎事業所

村上哲也/Tetsuya Murakami・住友金属テクノロジー(株) 強度受託研究部 波崎事業所

要 約

地震荷重あるいは自動車の衝突等の動的負荷を受ける材料、部材の強度評価を行うため、使用される条件を再現するための工夫が必要となる。

材料試験として一般に要求されるのは引張試験の応力-歪曲線であり、構造部材では圧縮試験あるいは曲げ試験が求められることが多い。

通常の静的試験で得られる応力-歪曲線は、歪速度 $10^{-3}/s$ 程度の値であり、動的、衝撃負荷では $10^3/s$ あるいはそれ以上の歪速度領域となる。

これら広範な要求に答えるため、比較的低速で大きな荷重容量を持つ動的破壊試験機と、荷重容量を押さえ速度を速くした高速衝撃試験装置とによる試験の例を紹介する。

Synopsis

When testing structural materials, it is important to consider if the testing condition properly reproduces the actual condition which the interested structural member undergoes. Generally, representing mechanical properties come out from stress-strain curves obtained from the static tests at the strain rate ranging $10^{-3} (s^{-1})$. However, the strain rate on the occasion of the dynamic loading can be $10^3 (s^{-1})$ or higher. To meet the requirements for high strain rate testing, a dynamic fracture testing machine with large load capacity and a high speed impact loading machine with the smaller load capacity are employed.

In this paper, results from several rapid loading and impact loading tests, conducted on two types of dynamic testing machines capable of reproducing loading conditions such as strong earth quake and automobile collision, are briefed.

1. はじめに

構造用材料および構造部材の使用される条件下での強度評価には実態を再現するための工夫が凝らされる。阪神淡路大震災にみられた地震荷重あるいは自動車の衝突に代表される衝突荷重等の動的負荷を受ける材料、部材の強度評価を行うための2種類の試験装置と試験の例について紹介する。

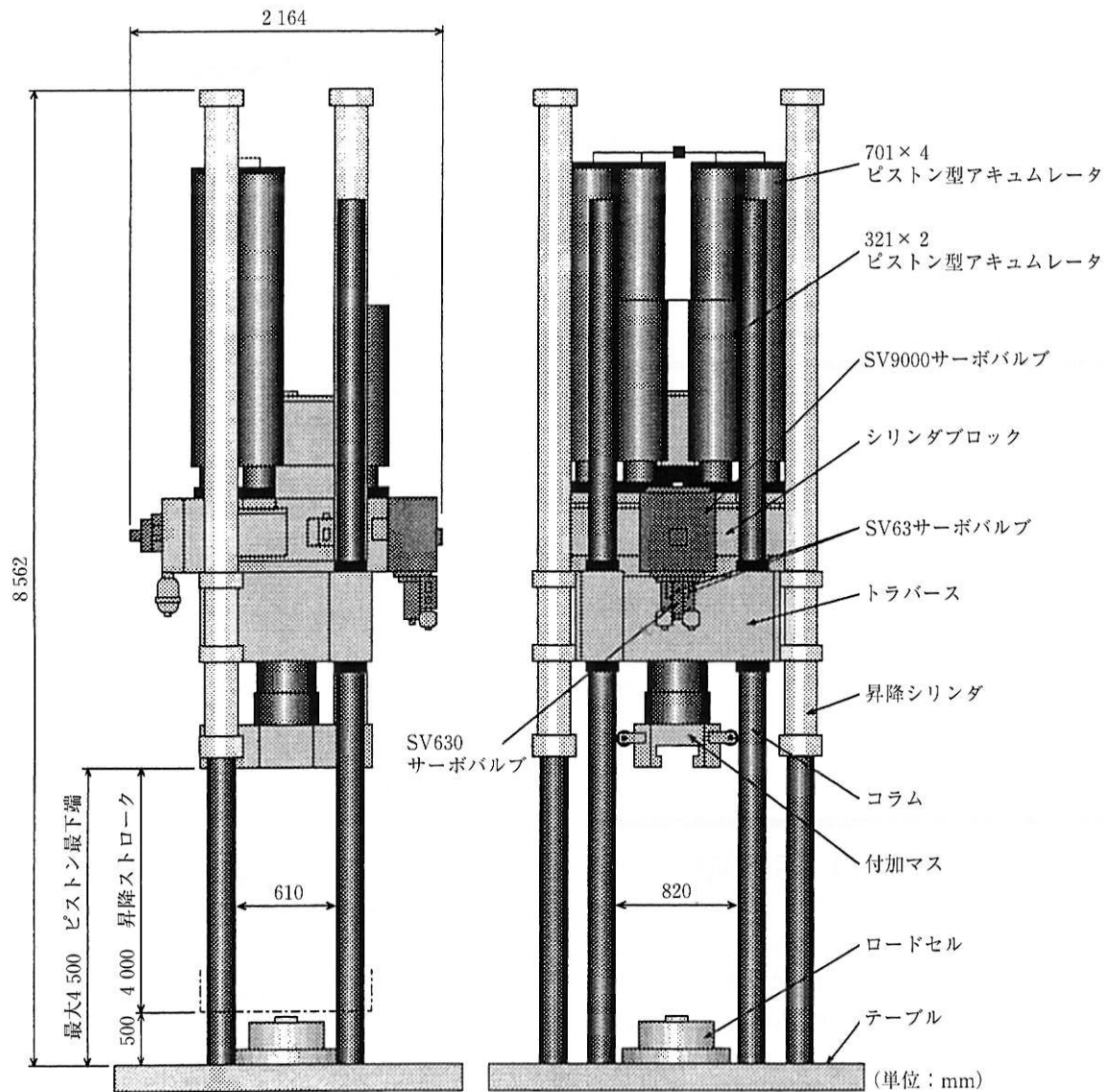
材料試験として一般に要求されるのは引張試験の応力-歪曲線であり、構造部材では圧縮試験あるいは曲げ試験が求められることが多い。

通常の静的試験で得られる応力-歪曲線は、歪速度 $10^{-3}/s$ 程度の値であり、動的、衝撃負荷では $10^3/s$ あるいはそれ以上の歪速度領域となる。

これら広範な要求に答えるため、比較的低速で大きな荷重容量を持つ動的破壊試験機と、荷重容量を押さえ速度を速くした高速衝撃試験装置とを用意した。

2. 動的破壊試験機

第1図に動的破壊試験機の概要を示す。本試験機の作動原理はガス油圧式と称し、試験機を直接作動させる油圧の背後にガス室を設け、試験機を速い速度で作動中、油圧の低下を最小限に押さえる。油圧シリンダ先端には付加重物を設け、作動中の慣性力をも利用する。試験機が作動し、所定の速度に達した後試験体を掴み、試験体はできるだけ速やかに所定の速度で載荷できるようにする等工夫されている。



仕 様

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1) 定格荷重 1.5MN | 5) 試験片 |
| 2) アクチュエータストローク 250mm | 丸棒試験片 JIS 4号 |
| 3) 試験速度範囲 0.01~4 000mm/s | CT 試験片 t=25, 50, 75mm |
| 1.5MN 負荷 100~2 000mm/s | COD 試験片 t=20~80mm |
| 0.5MN 負荷 100~4 000mm/s | 6) パワーバック |
| 4) 制御モード | 定格圧力 28MPa |
| 荷重, 変位制御(クローズドループ) | 流 量 max=165 ℓ/min |
| バルブ開度制御(オープンループ) | |
| 荷重制御 (疲労試験) | |

機器仕様

| |
|--------------------------------------|
| 1) アクチュエータ型式 PLZ2, OX |
| 荷重容量 引張側 静的 2 MN, 動的 1.5 MN |
| 圧縮側 静的 1.25 MN, 動的 1 MN |
| ストローク 250mm |
| 2) 付属サーボバルブ |
| (1) 型式 SV630/9.5 (3 ステージ), 630 ℓ/min |
| (2) 型式 SV63×2, 126 ℓ/min |
| (3) 型式 SV9000, 9 000 ℓ/min |

第 1 図 動的破壊試験機本体外観

本体は 4 本柱とし、柱間隔 820mm×610mm、チャック間距離 4000mm であり、構造部材あるいは構造模型試験を想定した大きさとした。

載荷能力は荷重 1.5MN 時に速度 2 m/s, 0.5MN 時に速度 4 m/s を有する。

平滑材を引張試験するとき、歪速度はゲージ長に逆比例

製品紹介

し、载荷速度に比例して大きくなり、歪速度は $10^2/s$ 程度までの試験が可能である。

亀裂材あるいは歪集中のある構造部材を試験するとき、歪が局所に集中するため、歪速度は非常に大きくなる。このため破壊靱性試験を行うとき、あるいは構造部材試験を行うとき、载荷速度を押さえ、荷重容量の大きい本試験機が有効となり、例えば厚鋼板を使用し、元厚ままで ASTM E399-90 A7 に推奨する動的破壊靱性試験が可能となる¹⁾。

3. 高速衝撃試験装置²⁾

本試験装置については今回の特集の「自動車用薄鋼板の高速引張試験と部材圧壊試験」で紹介した。本方法(One Bar 法)の特徴は、1本の棒(出力棒)を用いるのみでよいこと、引張試験に使用しやすいこと、出力棒を十分長く取ることにより延性の大きな材料でも破断までの応力-歪曲線が得やすいことにある。スプリットホプキンソン棒法(SHPB 法)とは、SHPB 法が試料の両端に2本の棒(入力棒, 出力棒)を用い、主として圧縮に用いられることなどが異なる。

4. 試験例

4-1 動的破壊試験機による引張試験

第2図に鋼材の引張試験結果の例を示す。静的試験と比較し、载荷速度が速くなると降伏応力、引張強さとも高くなるが、引張強さに比べ降伏応力の上昇が著しい。また今回示した試験の範囲では、破断伸びも载荷速度が速くなるに従って大きくなっていることが分かる。

ASTM E399では動的降伏応力 σ_{YD} を式(1)により推定するとしている。第3図は動的引張試験結果を式(1)と比較したものであり、よく一致していると言える。図中実線で示した曲線は式(2)に示した鉄鋼協会データシート分科会³⁾で提案されている静的試験の温度依存性を推定する式であり、式(1)は式(2)に動的効果を勘案した形となっている。

$$\sigma_{YD} = \sigma_{YS} + A / (T_K \text{Log}_{10}(2 \times 10^4 t)) - B \quad (1)$$

ここに $T_K = 1.8T$ T : 試験温度($^{\circ}\text{K}$)

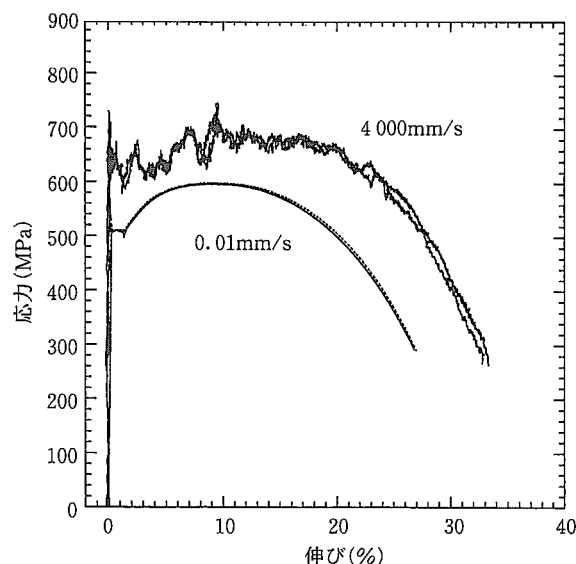
σ_{YS} : 室温での静的降伏応力

t : 負荷開始から降伏応力に達するまでの時間 (msec)

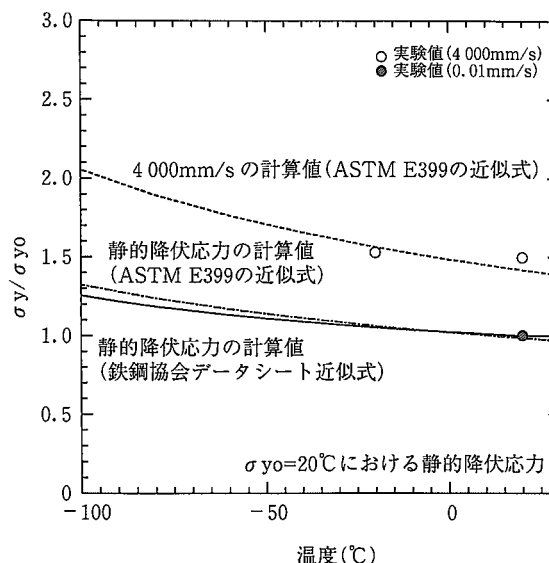
A : 定数(=1 198 860)

B : 定数(=187.4MPa)

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0} \text{EXP} \{ (389.5 - 80.5 \ln \sigma_{Y0}) (1/T_K - 1/293) \} \quad (2)$$



第2図 応力-伸び曲線と载荷速度の関係



第3図 降伏応力の温度および载荷速度依存性

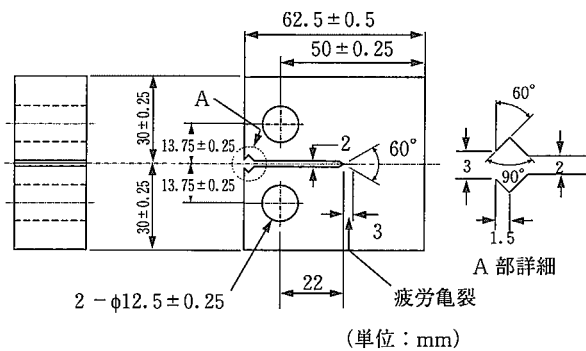
ここに σ_{YS} : 室温での静的降伏応力

T_K : σ_Y の温度($^{\circ}\text{K}$)

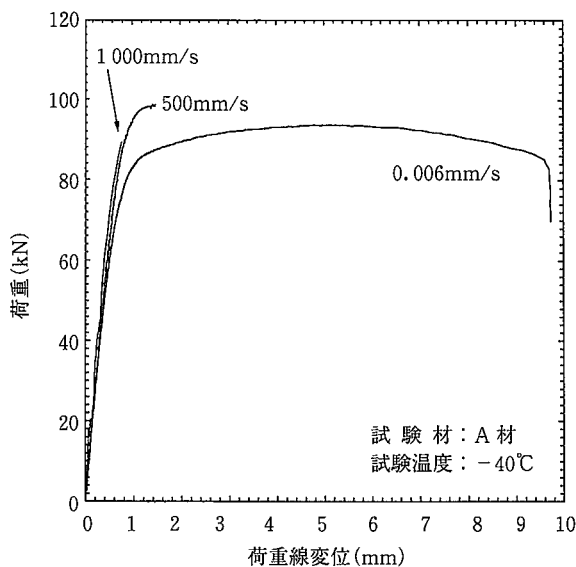
4-2 動的破壊試験機による破壊靱性試験

第4図に示す試験片は ASTM E399に規定する 1 TCT 試験片である。

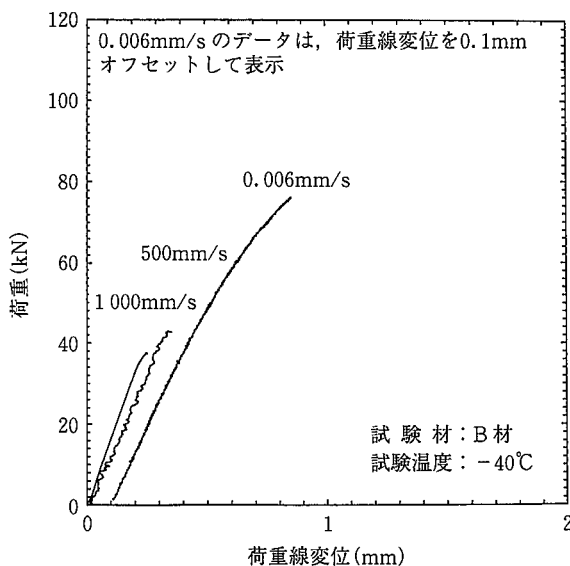
第5図は荷重-荷重線変位曲線であり、静的試験(0.006mm/s)では脆性破壊を生じていない。载荷速度が500mm/sでは若干の塑性変形を生じた後、脆性的に破壊した。このとき破壊時の強度は静的試験の場合に比較し約10%上昇しており、载荷速度の影響がうかがえる。1000mm/sではほとんど塑性変形を生じることなく破壊し、载荷速度が速くなるに従い脆性破壊が生じやすくなっていることが分かる。



第4図 CT試験片形状



第5図 荷重-荷重線変位曲線と載荷速度の関係(1)



第6図 荷重-荷重線変位曲線と載荷速度の関係(2)

第6図は材料を変えて行った試験の荷重-荷重線変位曲線であり、静的試験の場合(0.006mm/s)でも脆性破壊を生じた。載荷速度が500mm/sでは破壊荷重が大きく低下し、1000mm/sでは更に破壊荷重の低下を生じた。

第7図は荷重-荷重線変位曲線から式(3)を用いて破壊靱性値(K_{IC} , $K(J)$ 値)を求めて示したものであり、動的載荷により破壊靱性値が急激に低下していることが分かる。

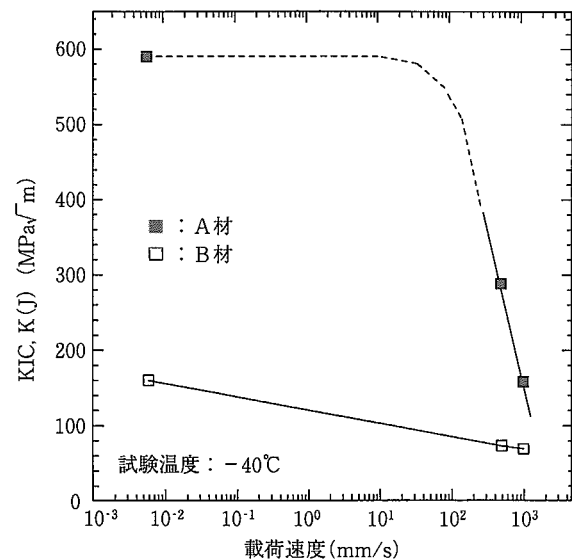
$$K = P / (BW^{1/2}) \cdot f(a/W) \quad (3)$$

ここに P: 破壊荷重 B: 試験片板厚

W: 試験片幅 (= 2B)

$f(a/W)$: 予亀裂による形状係数

a: 予亀裂長さ

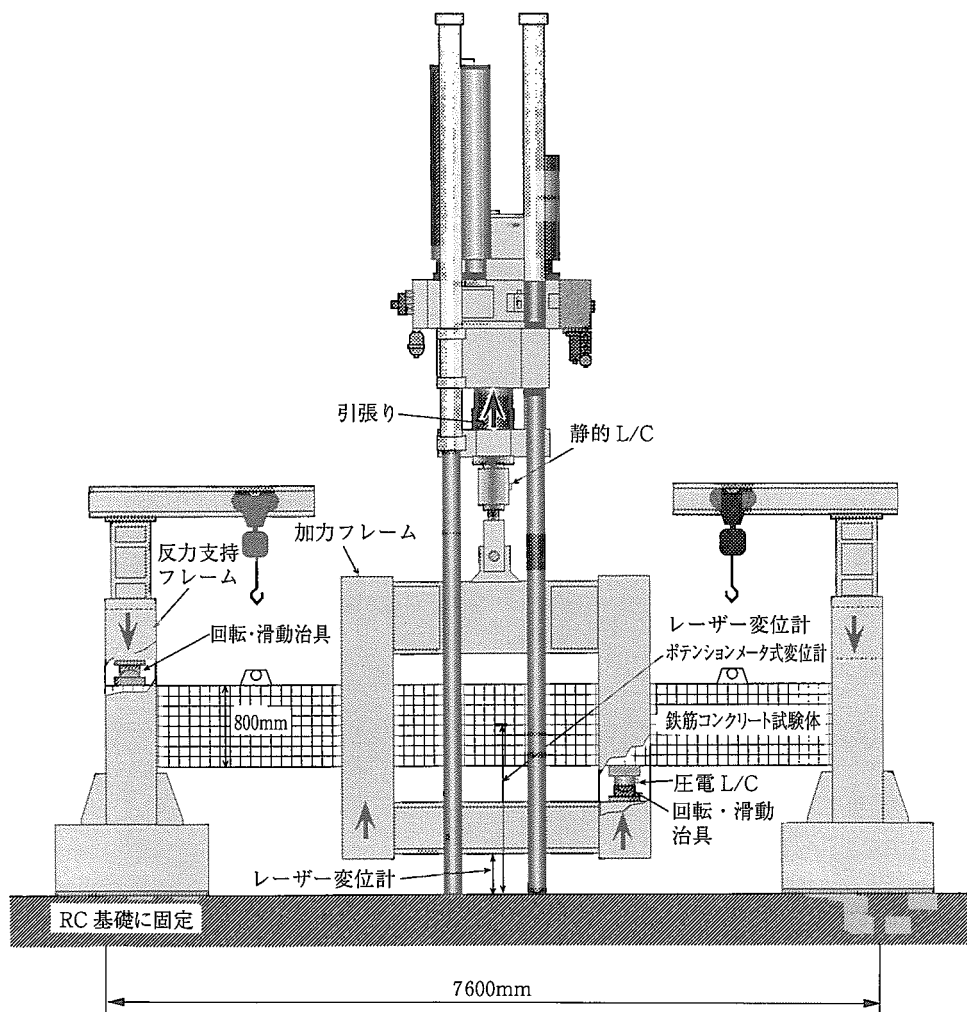


第7図 載荷速度と破壊靱性値との関係

4-3 動的破壊試験機による梁の曲げ試験

第8図に動的曲げ試験の模式図を示す。試験体は大型の鉄筋コンクリート梁であり、載荷ジグを工夫することにより、実構造部材の動的載荷試験を四点曲げにより実施した例である。試験機は引張試験機であるため、反力は床に固定した支持フレームへ持たせた。なお試験機の基礎は衝撃荷重に耐えるため、幅8m×長さ12m×深さ4mの鉄筋コンクリート製である。

製品紹介



第8図 鉄筋コンクリートの動的曲げ試験方法

4-4 高速衝撃試験装置による荷重、歪の計測

One Bar 法は一次元弾性波伝播理論に基づき比較的単純な負荷構造と応力波の伝播機構とからなる。本方法を用いた動的応力 $\sigma(t)$ 、動的歪 $\varepsilon(t)$ および歪速度 $\dot{\varepsilon}(t)$ は式(4)～式(6)で表される。

$$\sigma(t) = (S_0/S)E \cdot \varepsilon_g(t+a/c) \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = (U_A(t) - U_B(t)) / L$$

$$= \int_0^t \{V(\tau) - c \cdot \dot{\varepsilon}_g(\tau+a/c)\} d\tau / L \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \{V(t) - c \cdot \dot{\varepsilon}_g(t+a/c)\} / L \quad (6)$$

ここに、

c : 出力棒材料の縦弾性波伝播速度 ($=E/\rho$)

E, ρ : 出力棒のそれぞれヤング率, 密度

$V(t)$: 衝撃ブロックの速度

S_0 : 出力棒の断面積

S : 試験片の断面積

L : 試験片のゲージ長

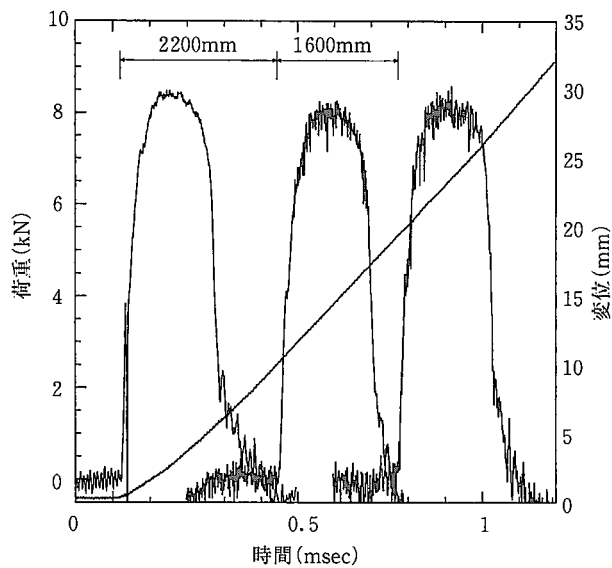
U_A, U_B : 試験片のそれぞれ載荷側, 支持側の変位

ε_g : 出力棒の歪測定値

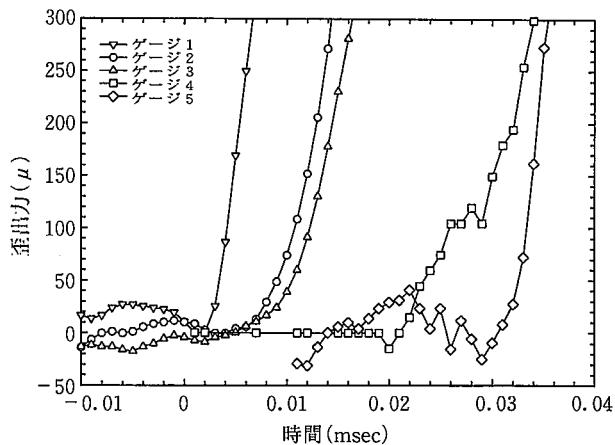
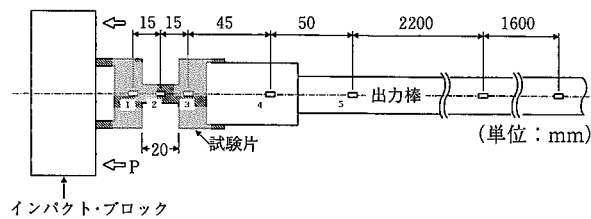
a : 試験片支持端から出力棒の歪測定位置までの距離

第9図に本装置の出力棒に貼った半導体ゲージおよび歪ゲージの出力を示した。波形はほとんど減衰無しに伝播し、一次元弾性波伝播理論が成立していると言える。

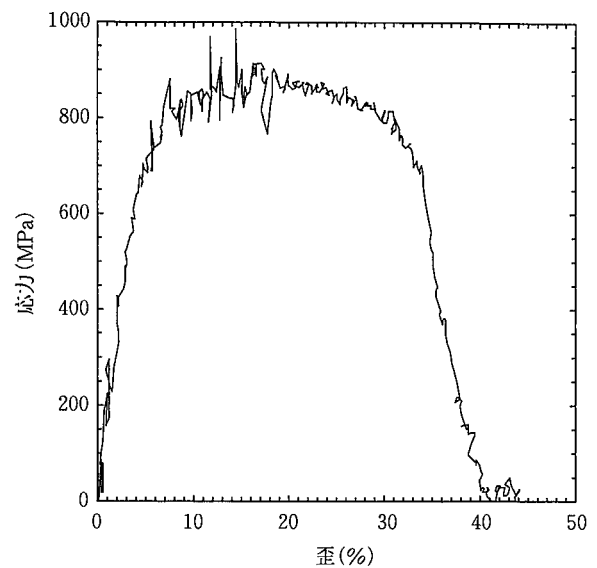
第10図は試験片近傍に貼った歪ゲージ出力を示した。それぞれの歪ゲージ出力の時間差は荷重の伝播状況を示す。図から本試験で用いた試験片形状寸法、継手形状(ネジ継手)で問題のないことを確認し、衝撃引張試験を行い、結果を第11図に示す。図は計測値から式(4)、式(5)を用い求めた例である。



第9図 出力棒のゲージ出力



第10図 試験片近傍のゲージ出力



第11図 応力-歪曲線の例

5. 今後の予定

動的破壊試験機および高速衝撃試験装置により、地震あるいは衝突現象の一部を実験室的に再現できるようになったと考えている。今後これらの装置類を更に発展させ、構造要素ひいては構造本体の衝突安全性の確保に寄与したいと考えている。

終わりに、高速衝撃試験装置の開発に当たり御指導をいただきました、東京理科大学 河田幸三教授に深く謝意を表します。

問合せ先

住友金属テクノロジー(株)
強度受託研究部 波崎事業所
所長 工博
☎0479(46)5151 塚本

参考文献

- 1) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, 03.01(1997)
- 2) 河田幸三：固体の耐衝撃性とその新しい測定法，材料，36

(1987)，p.1298

- 3) 社団法人 日本鉄鋼協会：データシートシリーズ4「構造用鋼板の破壊靱性値」，(1972)