

鋼球落下標準AE源を介した計測値と 割れの大きさの対応*

神尾 昭** 榊 昌英** 勝又 健一**

Correlation between Acoustic Emission and Crack Size calibrated by Standard AE Source generated by dropped Steel Ball

by

Akira KANNŌ, Masahide SAKAKI and Kenichi KATSUMATA

Ship Research Institute, Ministry of Transport

A linear correlation in log-log plot between energy of acoustic emission and area of crack was obtained in a tearing test of TIG welded specimen. Energy of AE was calibrated in comparison with a standard AE source which was generated by a steel ball dropped on the tested specimen from a known height.

As for the standard AE, experiments show that:

- (1) ringing frequency of standard AE signal is approximately inversely proportional to the diameter of a ball and independent of the dropping height and the thickness of plate,
- (2) the amplitude of standard AE signal is proportional to the 2/3 power of the dropping height.

These results were well explained by a theory on rebound height of dropped ball.

1. ま え が き

圧力容器などの溶接構造物の耐圧試験時に、欠陥に起因する応力集中部や、進展しつつある亀裂先端より発生する弾性波(AE)を検出して構造物の安全性を評価する方法が最近多くの関心を集め、我国でも実用化がはかられている。また、この方法により溶接中あるいは溶接後に発生する割れ検出も行なわれている。しかしAE信号を割れ発生のエネルギーや割れの大きさと関連づけて定量的に測定した例は少ない。また、それらの例においても、たとえばAEの個数とエネルギーの関係が明らかでないなどの問題点を含んでいるといえよう。

構造物の安全評価をするには、まず測定されたAEの値が相互に比較できることが必要である。ついで欠陥の

大きさと関係づけて定量的に測定されることが望ましい。このためには標準となるAE源が必要であるが、これについては未だ定められていない。ここでは鋼溶接部に生ずる割れのAEは、鋼球衝突の逆の現象であるとも考えられるので、鋼球落下によって発生するAEを標準AEとした。試験片の形状、試験方法を一定にすれば、得られる標準AEは常に一定であるはずで、探触子、増幅装置、記録装置を含めて、各種装置間の性能を比較することができる。また実験で得られたAE信号の大きさをAEが発生する原因となった弾性変形エネルギーと関係づけて推定することが可能であろう。

ここでは比較的脆い割れを対象として、AE計測値からそれに対応する割れの大きさ(面積)を推定する実験を行なったので、ここに報告する。そのほか、鋼球落下による標準AE源そのものの特性を調べるための実験も行なっている。

* 昭和48年3月24日 昭和48年度春季大会講演会で講演 昭和49年4月6日原稿受理

** 船舶技術研究所(三鷹市新川6-38-1)

2. 実験装置とその特性

使用したAE測定装置は NORTEC・NDT・200 である。記録はAE測定装置からのピーク検波出力をデータレコーダ (TEAC・R410), ホトコーダ (YEW・2901) の記録装置にて行なった。NORTEC・NDT・200の構成は図1に示した。増幅率はプリアンプ, メインアンプを含めて最大約 86dBであったが, プリアンプは8V以上の出力では頭打ちの特性を示した。またプリアンプ, メインアンプを通しての周波数特性は図2に示すものであったが, プリアンプは使用周波数範囲でほぼ平坦な特性を示した。なお, この実験ではフィルタはEXTのみを用いた。またプリアンプは 22 dB または 46 dB に切替えることができた。

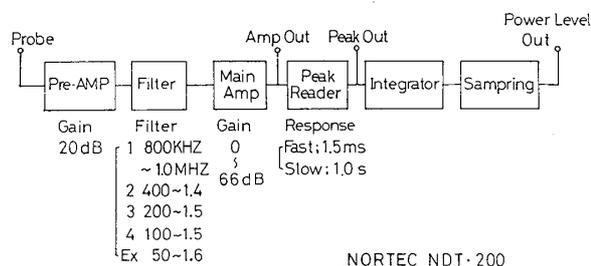


図1 NORTEC・NDT・200の構成

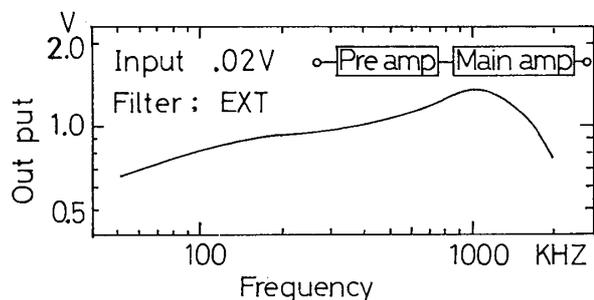
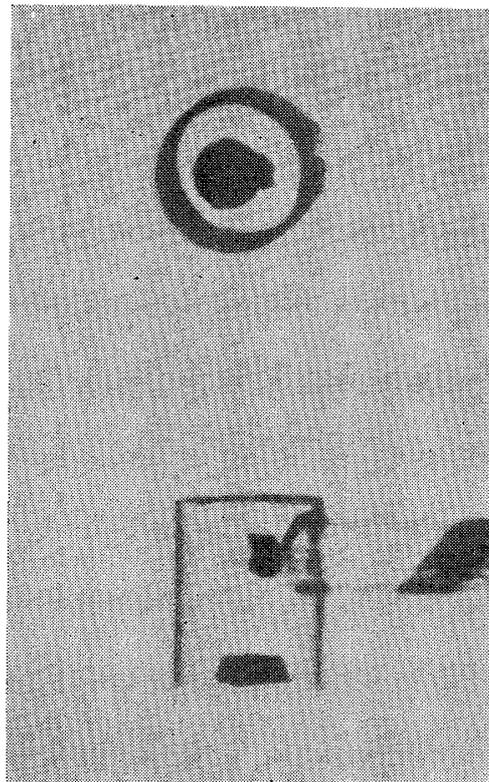


図2 増幅器の周波数特性

探触子は公称 1 MHz の共振周波数を有する P Z T でその大きさは X 線写真によれば厚さ 2 mm, 直径 7 mm であった。これを図3に示した。この周波数特性の測定は, 同じ2個の探触子を向かい合わせてクランプし, 一方の探触子を入力電圧 0.02V の連続サイン波によって励振し, 他方の探触子の端子電圧をプリアンプを使って増幅した。探触子1個の特性は $\frac{1}{2}$ 乗することによって求めた。この結果は図4に示した。共振点はあつみたて振動が, 1.1MHz, ひろがり振動が 340KHzのほか, 120, 600, 800KHzにもあったが, 340KHzが最大電圧を示した。

データレコーダは, FM10Vレンジを選び, 記録は 6 I S P, 再生は 3 I P S の速度でおこなった。この場合の感度一様な周波数範囲は DC ~ 2 KHz である。ホトコーダに使用した振動子 (YEW2916・02・G1000AF) の感度一様な上限周波数は 400Hz であった。実測され



Radiography of Probe

図3 探触子の X 線透過写真

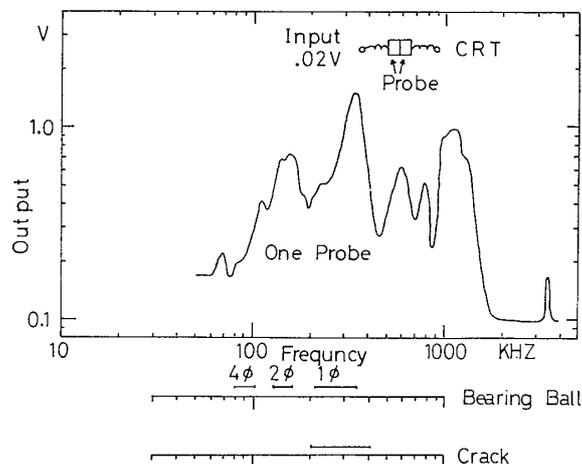


図4 探触子の周波数特性

る割れは, 10ms に1個程度がリングングをともなって現われるが, これが検波されて1個となると周波数は 100Hz となって, 立上りの部分に問題はあるが, 記録装置は十分な周波数特性をもっているといえる。

3. 鋼球落下によるAE

鋼溶接部に生ずるような割れは, 鋼球衝突の逆の現象であるとも考えられるので, この種の割れに類似した AE として, 鋼球落下によって発生する AE を標準 AE としてとり上げた。この標準音源は常に一定した AE を発

生するはずであり、各種装置の性能比較ができるほか、実験室での小形試験片のデータを現場に適用する際の感度調整音源としても利用できると思われる。ここでは鋼球落下による標準音源の特長について、まず調べた。使用した鋼材はSM41相当のものである。ただし、割れ試験においては使用した試験片の上におとした。

3.1 探触子の端子電圧

探触子の端子電圧は、 $1\text{ mm}\phi\sim 4\text{ mm}\phi$ の鋼球を高さ $1\text{ cm}\sim 50\text{ cm}$ より320番のペルトサンダで仕上げた鋼板の上に落下させ、発生したAEによって生じさせたものである。実験方法は図5に示した。図6は横軸に鋼球落下高さ h_1 、縦軸に探触子端子電圧 V を両対数グラフでとったものである。測定は探触子端子電圧を直接メモリスコープ(CRT)に入れ単掃引で得られたAC電圧を測った。なお落下高さ h_1 とはねかえり高さ h_2 の関係は図7に示されるように $h_1 \approx 2h_2$ であった。したがって図6からほぼ $V \propto h_2^{3/2}$ の関係が求まる。また試験片の

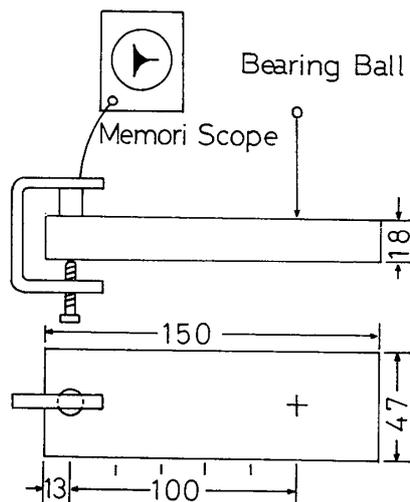


図5 探触子端子電圧についての鋼球落下実験の方法

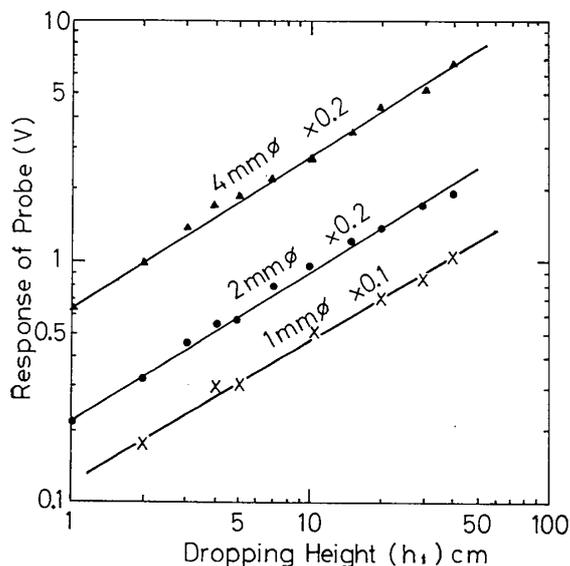


図6 探触子の端子電圧と鋼球の落下高さとの関係

支持方法による変化は認められなかったが、試験片の大きさ、形状によって端子電圧は変化した。そのほか試験片上の落下位置によっても変化した。その例を図8(a)、図8(b)に示した。これによれば試験片の端での振幅は大きく、また位置の変化によるAEの大きさの変化は $4\text{ mm}\phi$ の場合が著しかった。したがって、測定は中心における一定位置で行なった。

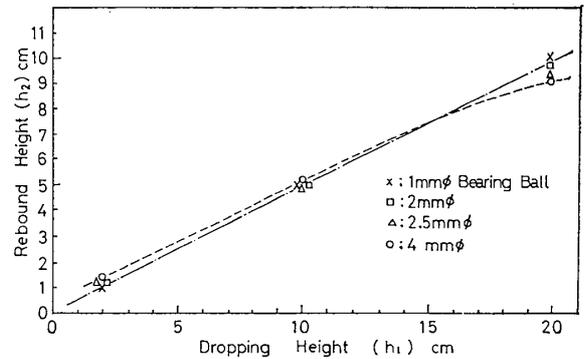


図7 鋼球の落下高さとはねかえり高さとの関係

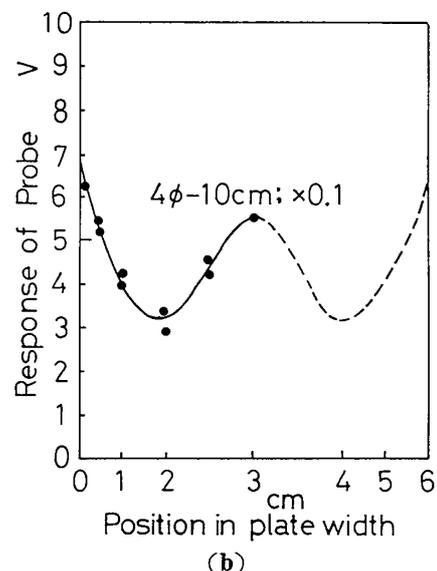
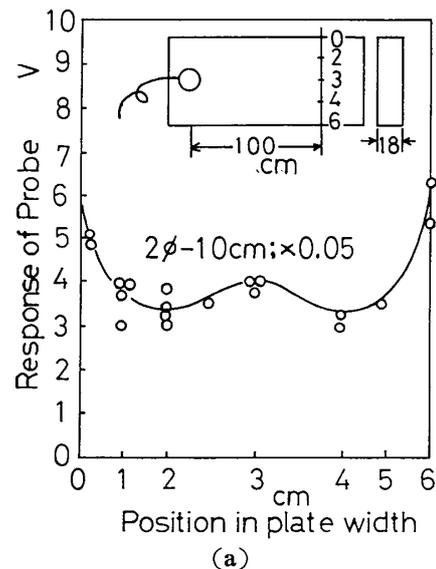
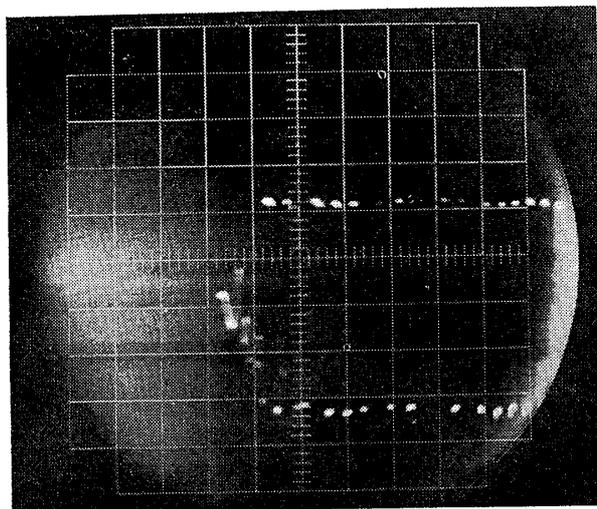


図8 鋼球落下位置と探触子の端子電圧との関係

3.2 周波数について

標準音源として利用するためには、その周波数を検討する必要がある。測定方法は探触子をとおしてAE測定装置のアンプアウトからAC信号で取り出したものを、メモリスコープで記録し、単位時間内におけるピーク数を数えて周波数を求めた。したがってAEの減衰する信号は一杯に増幅されてピークは点線となって直線上に並んだ。その測定例を図9に示し、実験結果を図10に示した。1mmφの鋼球の結果がばらついているのは、表面状態によるものが多いと考えられるが、実験は適時サンドペーパーで磨いた平滑面に対して行なった。実験結果を整理すれば次のようになる。

- (1) 同一径の鋼球を落下させた場合、その周波数は落下高さの影響を受けない。
- (2) 周波数は板厚の影響を受けない。
- (3) 径が小さい鋼球ほどその周波数は高くなる。大ざっぱに見れば、1mmφ、2mmφ、4mmφの鋼球の周



2mmφ Bearing Ball
Height ; 10 cm
[2V / DIV
20μs / DIV]

図9 周波数の測定例

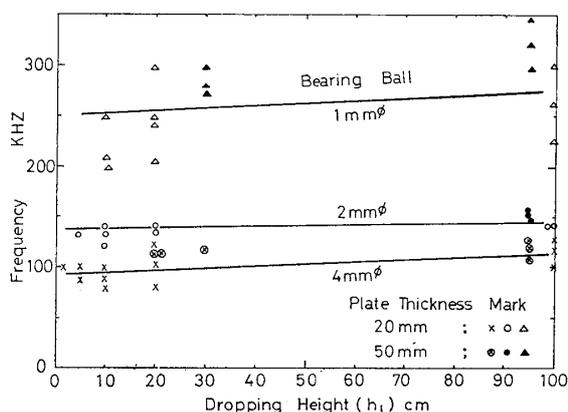


図10 鋼球落下高さと周波数の関係

波数は約 250KHz, 140KHz, 80KHz である。したがって、周波数は鋼球径にほぼ反比例する。

3.3 鋼球落下の関係式

F.P. Bowden 等¹⁾は、動的降伏圧力 P (一定)の模型から鋼板に鋼球を落下させる場合の種々の理論式を求め実験結果との対応を確かめている。動的降伏圧力 P の模型について簡単に記せば、鋼球が鋼板に接している間、降伏圧力以上にならないので、それらの相互間の圧力 P は一定であり、また圧力 P は鋼球の動的接触のため静的圧力と異なっていると考えている。

この Bowden 等の式をもとに、鋼球落下によるAEの実験結果を説明しようとするものである。

- (1) 探触子の端子電圧 V と鋼のはねかえり高さ h_2 との関係

鋼球のはねかえりは、鋼球落下によって出来た圧こん表面が弾性回復することによって起こると考え、Bowden 等は次の関係式を導いた。

$$mgh_2 = 0.34P^2d^3(1/E_1 + 1/E_2) \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 mgh_2 : 鋼球のはねかえりエネルギー、 d : 圧こん弦径、 E_1, E_2 : 鋼球、鋼板の縦弾性係数、 P : 動的降伏圧力(一定)、ポアソン比: 0.3

以上の Bowden の式をもとにし、AE測定電圧 V とはねかえり高さ h_2 の関係を求めると次のようになる。

鋼球が鋼板に最も深くくいこんでいる場合には $\pi/4d^2$ の面積に一樣に一定の動的降伏圧力 P が発生しているとすると、探触子の近傍における音圧 P_T は $\frac{\pi}{4}d^2$ に比例すると考えられる。

$$P_T \propto \frac{\pi}{4}d^2P \dots\dots\dots(2)$$

一方(1)式より、

$$h_2 \propto P^2d^3 \dots\dots\dots(3)$$

P は一定であるので(2)式と(3)式より

$$h_2 \propto P_T \frac{3}{2} \dots\dots\dots(4)$$

P_T は探触子の端子電圧に比例するので、次の関係が求まる。

$$V \propto h_2^{2/3} \dots\dots\dots(5)$$

- (2) 周波数について

Bowden 等は、鋼球が鋼板に接触してから静止するまでの時間 t_0 について次の関係式を求めている。

$$t_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi r p}}$$

ただし、 m : 鋼球の質量、 r : 鋼球の半径

これは、 x を凹みの変位としたとき、 $m\ddot{x} = -2\pi r P x$ 運動方程式より x 最大になる時間 (t_0) を示すものである。

ここでは Bowden の式で示される時間 t_0 の2倍の時

間、この衝突によって生じたAE波の周期になると仮定すると周波数 f は次式となる。

$$f = \frac{1}{2t_0} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{3P}{2\rho}} \cdot \frac{1}{r} \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 ρ : 鋼球の密度

3.4 実験結果との対応および問題点

- (1) V および h_2 を両対数グラフに示した図6の勾配は % であり、理論的考察とよく一致している。しかし異なった径の鋼球相互間の h_2 と V との関係は求めることができなかった。これは鋼球の径によってそのAEの周波数が異なるため、探触子の周波数特性によるゲインの影響もあるものと考えられる。
- (2) 鋼球落下音源の周波数についても、(6)式は実験結果をよく説明している。(6)式のほかに周波数について次の関係式も考えられる。

$$f = \frac{v}{2d} \dots\dots\dots(7)$$

ただし v : 音速, d : 最大凹み時における弦径

計算によると(6)式から求めた4mm中の周波数は70KHz, (7)式から求めたものは75MHzであった。70KHzは実測80KHzとほぼ等しい値である。現象としては、(6)式と(7)式に基因する二つの周波数が存在すると思われるが、(6)式の周波数のみについて実測できたものであろう。

4. 割れの大きさの推定

鋼溶接部に発生する割れを対象として、そのAE計測値と割れの大きさとの関係を求める実験を行なった。ここで割れAE計測値と鋼球落下標準音源との比較によってAEエネルギーを推定した。ここでAEエネルギーとは、計測したAEを発生するに要したエネルギーで、AE Source Energy と同じものとする。

実験は小形試験片のみならず大形試験片についても行なった。この目的は、簡単に数多くの実験が行なえる小形試験片の結果を圧力容器のような大型構造物へ適応させるための第1段階にもなると考えたからである。

標準音源を利用する実験は、基本的には次の考えをもとにしている。鋼球落下によって発生したAEの計測値と同じ計測値が割れのAEとして測定されたときには、両者の音源におけるAEエネルギーは同じであるとして、鋼球落下による反撥エネルギーから割れエネルギーを推定し実測された割れの大きさ(面積)と割れAEエネルギーとの関係を求めるものである。なおこの場合、鋼球の反撥エネルギーに相当する弾性変形が、割れ発生部分に起こっていると考えている。

落下鋼球としては、2mmφのものを選んだがその理由は次のとおりである。鋼球の場合と同様の方法で割れの周波数を測定したところ、ほぼ200KHzから500K

Hzの範囲に分布していた。一方1mmφ, 2mmφ, 4mmφの鋼球の周波数は、約250KHz, 140KHz, 80KHzであった。したがって鋼球としては1mmφを選ぶのが適当とも思われるが、鋼球が小さいため表面状態によって実験値にばらつきを生じやすく、その他にも取扱いが非常に困難である。一方、探触子の周波数特性(図4)によれば120KHz近傍にも探触子に高い共振点があるので、鋼球の取り扱い易さも考慮して、約140KHzの周波数を発生する2mmφの鋼球を使用することを考えた。

4.1 実験方法

AEの測定は、NORTEC・200を使用し、そのピークアウト(時定数1.5ms)から検波出力を取り出し、データレコーダを通してホトコードにて記録した。小形試験片の形状は図11に示した。鋼球落下点は大きい方の中央部であった。大形試験片の形状は図12に示した。この場合の鋼球落下点は割れAEが発生する近傍であった。ここで大形試験片については構造物の検査を遠隔で記録することを想定して、増幅器と記録装置との間を20mの同軸ケーブルで接続した。この方法による感度調整の結果、大形試験片における増幅率は小形試験片の12倍となった。割れAEの発生は、仮付溶接部を引き裂く方法を取り、小形試験片の場合には、図13、大形試験片では図12のような方法で行なった。なお仮付溶接部はTIG溶接にてその一部を溶融させ、ほぼ図12、図13の位置に作った。また試験片と外部との音をゴムによって遮断し、その遮断の効果についても確かめた。ここで本実験での割れAE信号は大きく、きわめて低い増幅率で行なったの

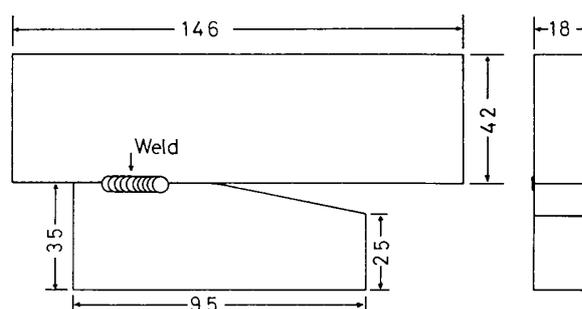


図11 小形試験片の形状

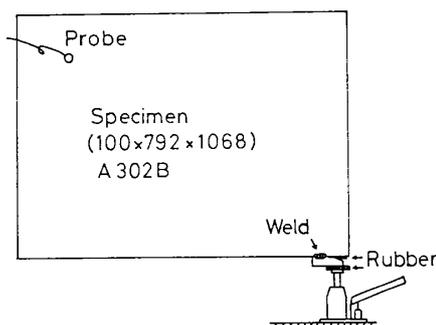


図12 大形試験片の形状と実験方法

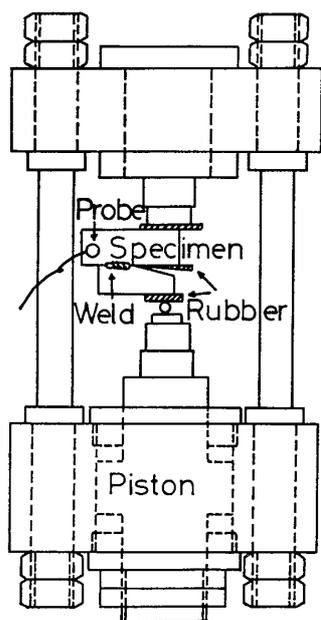
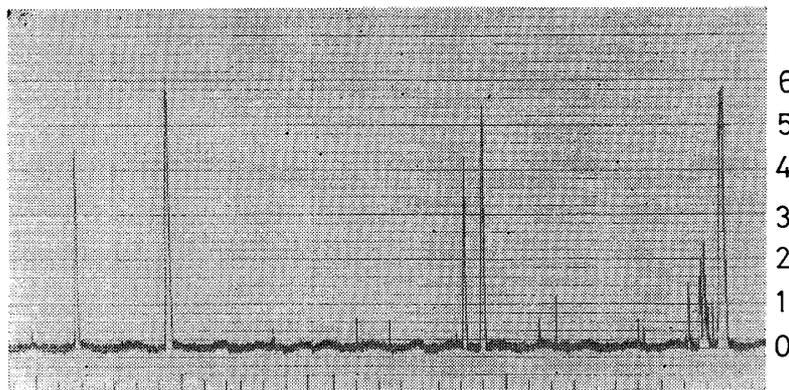


図13 小形試験片の実験方法



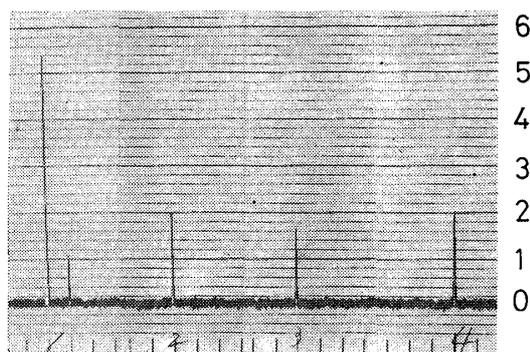
Crack Direction → 0.1s



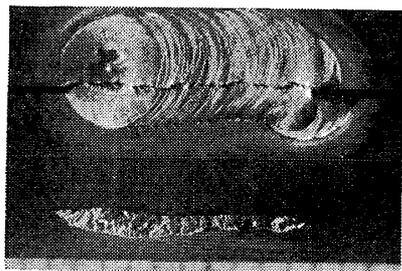
Crack Direction → 1mm

(b)

図14 ホトコーダに現れた信号と それに対応した割れの大きさ



Crack Direction → 0.1s



Crack Direction → 1mm

(a)

で割れ以外の雑音を十分消すことができた。

小形試験片については、ピストンの移動速度を 0.4m/min 一定にし、またその際の割れの拡がりを変位計によって測定した。そのほか 8mmカメラを使って割れの進展状況も撮影した。

4.2 実験結果および考察

割れの進展状況について 8mmカメラで撮影した結果によれば、高速で進展中の割れ過程は記録できなかったが、割れはピストンの加圧スピードによらず、何回かに

分れて間欠的に進行していることがわかった。割れAEの実測例は図14(a), 図14(b) に示した。この記録によってもわかるとおり、AEが間欠的に現われているので 8mmカメラの結果ともよく対応しているものと思われる。

割れた部分の状況写真も図14(a), 図14(b) に示した。破面は巨視的には脆い破壊を示していた。また割れの面積の測定は小さい凹凸を無視し、目盛付ルーペにて行なった。なお割れの大きさは溶触の長さによって変えた。

割れAEエネルギー (AEが発生した部分の音源エネルギー)

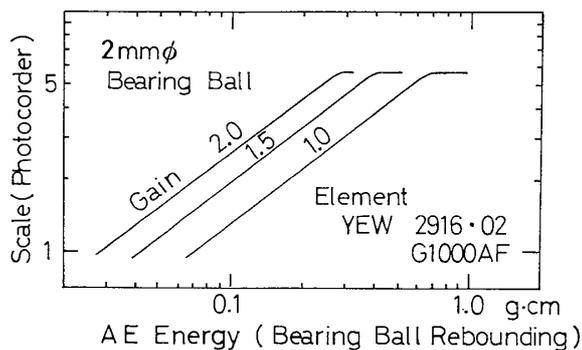


図15 2mmφ鋼球のはねかえりエネルギーと振幅目盛との関係

ぎ)は、まず図14(a), 図14(b)のような割れAE信号に相当する2mmφの鋼球落下AE信号を求め、それに対応する鋼球の反撥エネルギーから求めた。ここで鋼球落下によって求まるエネルギーとホコダにおけるAE信号の信号の振幅目盛との関係は図15に示した。なお割れAE信号が飽和した場合には、その信号の振幅目盛1.0における幅と、これに相当する標準音源の信号の幅とを比較することによって飽和AE信号のエネルギーを求めた。しかし、このような例はほとんどなかった。

縦軸にAE音源エネルギー(2mmφ落下によるエネルギーに換算)をとり、横軸に割れ面積をとった両対数グラフにおいて、割れ実験で得られた値をプロットすると図16が得られた。実線は代表線を示した。実測点は3個の例外を除きほぼ破線内にある。なお3個の例外は、すべて小形試験片による値である。図16は測定装置の種類に関係なく、同種材料、同種割れ発生に対しては同じ結果が得られるべきもので、各装置について図15の関係をあらかじめ求めておけば、図16を使用してAE信号から割れ面積を装置によらず推定できるであろう。

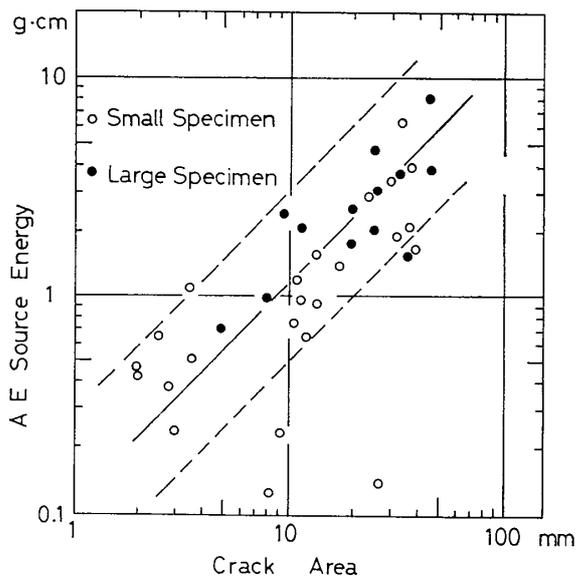


図16 AE音源エネルギーと割れ面積との関係

3個の低い値のものについて、AEの発生頻度および割れの進展速度を調べたが、今回のような測定方法では平均的な値のものとの差異は認められず、ただAE信号の振幅のみが小さくなっているだけのようであった。したがって溶融された部分の材質がなんらかの原因で特に脆くなり、低いAE信号が発生したものと考えられた。

また小形と大形試験片の間には、大きな実験結果の

差異はなかった。

なお、図16のAEエネルギーは絶対的なものではない。この理由は、割れのAE信号を割れエネルギーに変換するために用いた図15の特性によるものである。すなわち図15の反撥エネルギーと鋼球落下AE信号の振幅目盛との関係は、標準音源の鋼球径のちがいによって多少の差を生じ、同じグラフを求めることができないからである。したがって、絶対的なエネルギーの表示と誤解されることも考えられるので、他の表現方法たとえば2mmφの鋼球を使用することを原則として、落下高さ10cmエネルギーを基準とした単位 H_{10} にて表すこと等が、より妥当とも思われる。

5. 結論

5.1 鋼球落下音源を利用して、鋼溶接部に発生するような比較的脆い割れを対象とすれば、そのAE計測値から割れの大きさを推定できることがわかった。なおAEエネルギーと割れ面積との関係は、両対数グラフで直線で示される関係が認められた。

5.2 鋼球落下音源を利用し各測定系の感度比較をすれば、数多くの実験が比較的簡単にできる小形試験片のデータを、圧力容器のような大型構造物にも適用できることの可能性を示した。

5.3 鋼球を落下させた際にあらわれる探触子の端子電圧 V は、鋼球のはねかえり高さ h_2 の $3/8$ 乗に比例する。

5.4 鋼球落下音源の周波数については、次のことが言えた。

- (1) 同一径の鋼球を落下させた場合、その周波数は落下高さの影響を受けない。
- (2) 周波数は板厚の影響を受けない。
- (3) 径が小さいほどその周波数は高くなる。

5.5 鋼球を鋼板に落下させた場合のF.P. Bowden等による動的降伏圧力 P (一定)の模型から求めた理論式は、我々の実験結果をよく説明することができた。したがって、鋼球落下の場合には鋼球と鋼板との接触面において動的降伏圧力 P が一定である模型に近い現象が支配的であると考えられる。

参考文献

- 1) F.P. Bowden, D. Tabor; 固体の摩擦と潤滑(The Friction of Solids, 1954の訳書: 丸善) pp. 9~16, pp. 247~257