(7) 限界重さもまた試料のかたさに応じて、同じく最初急激にその後ゆるやかに、順次大きくなってゆくようである。

(8) さきに筆者の示した限界押付力線図⁽²⁾は、この質量効果の最も鋭敏に作用する範囲の試料を用いての結果であることがわかった。

(9) 今回の実験結果より見ると、最大限界押付力はおおよそ25~30 kg 程度であり、これ以上の押付力を用いれば、試料の材質、かたさ および重さのいかんにかかわらず、押付力の影響はこれを避けることができるようである。

(10) 従来発表されている結果を質量効果の点から再検討し、以前筆者が示した限界押付力線図⁽²⁾にさらにもう2本の曲線を付加してより完全なものとした。

文 献

- (1) 町田, 機械学会論文集, 19, 87 (昭 28), 1.
- (2) 町田, 機械学会論文集, 20, 91 (昭 29-3), 136.
- (3) 町田, 機械学会論文集, 20, 95 (昭 29-7), 424.
- (4) 町田, 機械学会論文集, 20, 99 (昭 29-11), 733.
- (5) 町田, 機械学会論文集, 23, 127 (昭 32-3), 230.
- (6) 町田, 機械学会論文集, 23, 131 (昭 32-7), 497.
- (7) 町田, 機械学会論文集, 23, 131 (昭 32-7), 504.
- (8) 町田, 機械学会論文集, 24, 139 (昭 33-3), 198.
- (9) 町田, 機械学会論文集, 24, 143 (昭 33-7), 494.
- (10) 鈴木, 機械学会論文集, 14, 47 (昭 23) I-97.
- (11) 吉沢, 機械学会誌, 54, 392 (昭 26-9) 360.
- (12) たとえば, 明石製作所説明書 (反撥式硬度計使用法). 古いシ
ョア会社説明書. F. S. Tritton, *Inst. Metals, Jour.*,
26, (1921), 267; *Metal Industry*, 19 (1921), 361, およ
び, その他 三繩, 「試験及び測定機器」, 山海堂版, (昭 17),
120. などの一般解説書.
- (13) たとえば, ショア会社説明用カタログ. 上田, 製鉄研究, 180号,
(昭 17-7), 27. および, その他の一般解説書.

620.179.5

大 形 鋼 材 の 超 音 波 探 傷 法

(第1報, 特に水中モデル実験について)*

高 沖 亮**

Ultrasonic Testing of Heavy Steel Forgings

(1st Report, Reflection from Simulated Discontinuity under Water)

by Akira TAKAOKI

Ultrasonic reflection from simulated discontinuities and bottom surfaces were studied under water, as a fundamental experiment of ultrasonic techniques to be applied to the nondestructive testing of heavy steel forgings. Equivalent reflection surfaces of simulated discontinuities and of bottom were investigated and nomograms for the size of discontinuities were established from the ratio of flaw-to-bottom indications and the distances from transducer to the flaws. Although the results obtained may not be applied to heavy steel forgings as they are, yet they will be of some help for analyses of reflection phenomena in steels.

1. 緒 言

重要な大形鋼材では超音波パルスによる内部欠陥の検出が盛んに行われている。しかし検出した欠陥反射波から内在欠陥の大きさ形状などを求めるためには、冶金学的な知識と経験とに依存せざるを得ない。また検出した欠陥波について定量的な表示をするに困難な場合もある。したがって超音波探傷器の定量的表示に

対する努力が必要であるが、一方反射に関する基礎的な実験を進めることが肝要である。超音波探傷の実情では一定感度方式、基準感度方式と称すべき方法⁽¹⁾が採られ、反射に関しては流体中の理論が実用されている現状である。

本報告は大形鋼材の探傷を目的とした基礎実験の一部であって、水そう中に各種のモデル欠陥をおき、等価反射体の比較、欠陥反射波の底面比などをしらべて探傷図形と欠陥の大きさとの関係を求めたもので、反射に関する基礎的な試験である。これらの結果は実際に鋼材を探傷したときの探傷図形と破壊半破壊試験結

* 昭和 32 年 7 月 11 日・創立 60 周年記念地方第 2 区 (札幌) 講演会において講演, 原稿受付 昭和 33 年 7 月 24 日.

** 正員, 日本製鋼所室蘭製作所 (室蘭市茶津町 4)

第 1 図

果との関連を求める際に役立たせるためのものである。

2. 実験要領

Sperry Reflectoscope および FD-4 型超音波探傷器をそのまま一探触子法として用い、1 Mc/s (28φ, 25φ 水晶振動子) で第1図に示す要領で超音波パルスを送受し、ブラウン管図形から直接エコーの振れを読取った。

実験装置は薄鉄板製の直径 900 mm の水そうで、超音波ビームの中心線がモデル欠陥の中央で直角に当るよう各種のモデル欠陥をおき、その欠陥の大きさと探傷距離とを種々変えた。またモデル底面についても形状と底面までの距離とを種々変えた。

欠陥モデルは同図に示すごとく、鋼中の細長いパイプ状欠陥としての円柱 (0.15~10φ), その長さが 5~50 mm (1~8φ) のもの、白点状欠陥としての円板 (1.8~10φ) およびブローホールに相当する球 (3.9~11φ) などを用いた。いずれも Fe, Cu, Ni 製の棒または薄板で、球は軸受用鋼球を用い、いずれも水中における探傷距離 $x=100\sim500$ mm においた。底面のモデルは 300~900φ 用凹型円柱面、平面および 50~100φ 凸型円柱面などを薄鉄板をはんだ付けして成形した。

まず超音波ビームの指向性を二探触子法によって確かめ、ビームの中心線を求めた。つぎに欠陥モデルによって近距離音場の状況をしらべ $x \geq 100$ mm で一様

減衰状況が示されることを確かめた。また水道水を一昼夜以上放置して脱ガスを行い、水温の変化による影響をしらべたが $6\sim22^\circ$ 間では反射波に変化は認めなかった。欠陥モデルの材質による反射状況の差はなく、音響勢力の透過については種々実験調査したが誤差範囲内で影響はほとんどなかった。また欠陥モデル支持棒による底面反射波の変化は後述のごとくほとんど認めなかった。なお FD-4 型探傷器は DC 図形で飽和高さ 30 mm, なるべく最高最低値は使用しなかった。

以下は記述の簡略化のため次の記号を用いることとする。 F : 欠陥反射波 mm, B : 底面反射波 mm, x : 探傷距離 mm, d : 探触子から底面までの距離 mm, $\gamma = F/B$: 欠陥反射波の底面比, α_s^m : 探傷器の調度係数で m はパルス幅目盛, n は感度目盛, β_f, β_b : 形状係数で f は欠陥モデル, b は底面モデルを示す。φ d , φ c , φ c' , φ s : モデル欠陥の直径 mm で D は円板, C は無限円柱, C' は有限円柱で長さ l (mm) のとき S は球のときをそれぞれ意味する。

3. 実験結果

以下は主として Sperry Reflectoscope の例について述べることにする。

(1) 欠陥の等価反射体について 調度を一定としたとき x に対して欠陥モデルの直径 φ と F との関係を示す。第2図に示す。 $x=x_1$ において球状モデルでは、 $F \propto \phi$ 関係がある。円柱 (∞) モデルでは、 $x=x_1$ で $F \propto \sqrt{\phi}$ 関係があることを第3図 (a) で示す。また円板モデルでは $F \propto \phi^2$ 関係があり同図 (b) にその例を示した。

つぎにこれら3種の欠陥モデルを用いて、 F を等しくする φ を $x=x_1$ で比較したものが第4図である。 $x=200$ では φ $c=0.3$, φ $D=2.2$, φ $s=10.8$ が等価反

第 2 図

第 3 図

第 4 図 欠陥の等価反射体の比較

第 5 図

射体であり、 $F=10\sim30$ の変化に対応するモデル欠陥の直径は $\phi_c=0.1\sim0.3$, $\phi_D=1.0\sim2.2$, $\phi_S=3.5\sim10.8$ にわたっていることがわかる。これらの関係は受信器の利得には関係しないが、 x によってわずかに異なる。また用いた 2 種の探傷器間にも差が示される。なお無限円柱モデルでその直径が水中の波長 λ にほぼ等しいとき F は急に低下する特異現象がある。このことは $\phi_c=\lambda/2$ 付近ではわずかな変化があるようであるが $\phi_c=2\lambda$ では認めなかった。

第 5 図は有限円柱について $x=100\sim400$, $\phi_c'=2\sim8$, $l=5\sim50$ について $F\sim l$ 関係を示す一例で $l\geq 25\sim30$ では x , ϕ_c' に関せず ϕ_c の場合と同一反射を示すことを示した。これは振動子直径が 28 mm のため一探触子法では直径付近の長さが限界であることが示され、それ以下の l に対しては $F\propto \log l$ 関係が示される。

(2) 底面の等価反射体について α を一定とし、欠陥なきときの底面形状 β_0 および距離 d による底面反射波 B の状況をしらべたものが第 6 図である。平板状底面が最も大なる B を示し、ほぼ d に比例するごとくである。凹型凸型円柱面の順に B は小となるが、凸型円柱底面からの B は d が減少すると非常に大となる。特に円柱状大形鋼材の探傷時に中心穴の有無は問題となることが多いのでその比較を試みることにする。 $d=400\sim800$ 試料の中心に 100ϕ 穴の存在は Sperry Reflectoscope では穴がないときと B は変らないが、 50ϕ 穴では B が小さい。FD 型の場合は 75ϕ 穴が 800ϕ 円柱の中央にあるときには同一の B を得られるが、 $d<800$ では 75ϕ 中心穴の

第 6 図 底面の等価反射体

方が B は大となる。

(3) 欠陥による底面反射波の変化 β_b, d に関せず、常に無欠陥時の基準底面反射波を $B=70$ になるとく調度 α を定める。欠陥の存在によって F が現われるとともに B は低下する。それらをおのおの F_1, B_1 として、 β_b, d に対し各種のモデル欠陥 ϕ による F_1, B_1 状況を x をパラメータとしてしらべた一例が第7図である。 β_b =凸型円柱底面で直径 100, $d=450$ の場合で、 ϕ の増大に伴い F_1 は増大し B_1 は小となることを示す。黒丸を付すは $\gamma=F_1/B_1=1$ の点である。 x の増加に伴って $\gamma=1$ を示す ϕ は β_f =円板では増大するが、 β_f =円柱のときは増大するとは限らず B_1 の低下量も大である。

第7図

第8図 円板状欠陥の $\gamma=F/B$ とその大きさ ϕ_d

(4) $\gamma=F/B$ と欠陥の大きさ ϕ との関係 第7図のごとく F_1, B_1 と ϕ との関係を各種の β_f, x, β_b, d に対して多数求め、 $\gamma \sim \phi$ 関係を整理すると、ある傾向が見出される。第8図は β_f =円板状欠陥について各種の β_b, d, x に対してしらべた結果から $\gamma \sim \phi_d$ 関係を一括表示した例である。 β_b =平板では $d=200 \sim 800$, β_b =凹型円柱面では $d=300 \sim 800$, β_b =凸型円柱面の 100ϕ では $d=150 \sim 450$, 50ϕ では $d=175 \sim 475$ をそれぞれ用い、 $x=100 \sim 400$ を用いたときの $\phi_d \sim \gamma$ 関係を両対数グラフに記入したものである。いずれも直線関係で表示されることがわかる。したがって $\gamma=1$ なる ϕ_d が求めれば任意の γ に対する ϕ_d を求めることができる。

よって第7図のごとき関係図から $\gamma=1$ を示す ϕ_d を β_b, d をパラメータとして x に対してしらべると第9図のごとき関係が得られる。すなわち、ある β_b においては d に関せず $\tan \phi_d/x$ が一定であり、 $x=x_1$ においては d による ϕ_d は一定間隔を示している。したがって、ある β_b と d, x とから $\gamma=1$ ならしめる ϕ_d を求めることができる。ただし凹型円柱底面については $x \leq d/2$ では上述の関係があるが $x > d/2$ でははずれる。

ϕ_c では、同様に多くの実験結果を $\gamma \sim \phi_c$ 関係について整理すると、 β_b =平板のとき $\log \gamma \sim \phi_c$ 関係、 β_b =凹型円柱面では $x'=d/2-x$ を用いて $\log \gamma \sim \phi_c$ 関係、 β_b =凸型円柱面では $x'=d-x$ を用いて $\log \gamma \sim \phi_c$ 関係にそれぞれ一定の傾向が求められる。第10図左は 100ϕ 凸型円柱底面で $d=150 \sim 450$ に

第9図 $\gamma=1$ を示す円板状欠陥モデル

第 10 図 100φ 円柱底面の γ と ϕ_{cyl} , ϕ_{sphere} 関係

第 11 図 100φ 円柱底面の場合

対する $\gamma \sim \phi_c$ 関係を示す例である。

ϕ_s については $\log \gamma \sim \phi_s$ 関係が各種の β_0 , d についてある傾向をもち、第 10 図右はその一例で 100φ 凸型円柱底面で $d=150 \sim 450$ の場合を示す。

以上から被検材の大きさ d と底面形状 β_0 とが定まれば x , γ は探傷して得られ、モデル欠陥の ϕ を求めることができる。第 11 図は $\beta_0=100\phi$ 凸型円柱底面の場合で d と x とから $\gamma=1$ なる ϕ_D または $\gamma=0.15$ なる ϕ_S を求めるノモグラムの例である。この ϕ_D から任意の γ に対する ϕ_D は第 8 図から、また第 10 図から任意の γ に対する ϕ_S を求めることができる。

(5) 有限円柱状欠陥の反射および径長比 $\beta_f =$ 有限円柱 を用い、その長さ l を種々変えたときの γ 状況をしらべたものが第 12 図である。 $\beta_0 =$ 平板 のときで $d=400 \sim 800$, $\phi_c' = 2 \sim 8$ の例を示し、 $\gamma \sim \sqrt{l}$ 関係が x , ϕ_c' に関せず、ある傾向が認められる。

図から $x=x_1$ において γ を等しくする $l \sim \phi$ 関係を多数求めて γ をパラメータとして図示すると第 13 図のごとき曲線群が得られる。図は $\beta_0 =$ 平板 の場

第 12 図

第 13 図 平板状底面で $l \rightarrow \infty$ 時の γ と等価な ϕ_c' と l

合であるが、無限円柱における γ が求められると、それと等しい γ を有する ϕ_c' と l とを求めることができる。実際上では欠陥の径長比が推定されると、探傷して得られる γ に対応する ϕ_c' および l が容易に求められる。

4. 実験結果の考察

以上は各種形状の欠陥および底面モデルを水中の種々の位置において、その反射状況と欠陥の大きさとの関係をしらべたものである。水中における超音波の反射理論については先に研究報告⁽²⁾があるが、鋼材の探傷においては欠陥反射波の底面比を問題とするので、種々の実験を行ったものである。もちろん、欠陥形状の差による反射状況および等価反射体の比較については良く一致した傾向が示された。

本実験においては欠陥面に垂直なる入射波のみを考えているが、実際の鋼中欠陥では形状が複雑であるのみでなく、超音波の入射角は雑多である。特に入射方

向に対する欠陥の方向、位置などは超音波指向性と関連して考慮すべき問題が多い。S. Serabian ら⁽⁸⁾ はロータ材の探傷を目的として 1 Mc/s で水中実験を行い金属製欠陥モデルによる超音波の分散に関する研究を進めている。

さらに円柱状欠陥モデルは等価反射をする他の形状の欠陥モデルに比し、非常に小径であり、また軸と直角なすべての方向に超音波を反射しうる。したがってロータシャフト材の回転連続探傷において“Travelling Indication”⁽⁴⁾を示すものの内、径方向の割れのみでなく円柱状欠陥もあることが考えられる。実際この種のロータ材では Interdendritic Shrinkage が問題であり、細長く軸方向に鍛伸された欠陥中には円柱状欠陥に近い場合もある。また円柱状欠陥モデルはより良く“Travelling Indication”を示すことは水中実験で確かめられる。

水中における超音波の反射状況と鋼材中における反射状況との相違点は種々考えられる。第 8 図に示す円板状欠陥の直径と $\gamma = F/B$ とに関する実験結果は A. W. Rankin ら⁽⁵⁾ が先に発電機およびタービン用ロータ材に用いた関係図と傾向がよく一致している。しかし、媒質の減衰定数の差、欠陥の境界面における音響インピーダンスの相違、理想欠陥と実在欠陥との形状の差、エネルギー変換部におけるマッチングのこと、接触状況、指向性の問題など多くの要検討分野が残っている。特に鋼材の場合は結晶組織および残留応力などによる超音波減衰は、とても水の場合と比較し得ないほど大きいことは多くの報告⁽⁶⁾にみられる。

したがって本実験結果が直ちに鋼材探傷時に適用しうべきものではなく、反射に関する基礎的な知識を与え、欠陥とその反射とに関する傾向を知って実際探傷

時の切断試験の手数を省くことが主眼である。既に幾多の切断比較試験例が報告されているが、これらの整理に有益なる示唆が得られるものと考えている。

5. 結 言

大形鋼材の超音波探傷を目的として、まず水中実験によって欠陥および底面による反射状況をしらべ、等価反射体の比較、欠陥反射波の底面比 $\gamma = F/B$ と欠陥の大きさ形状との関係などをしらべた。また任意形状大きさの底面に対し、欠陥反射波の底面比と探傷距離とから欠陥を円柱、円板または球状などと仮定したときその大きさを求めるノモグラムの書き方を水中実験で求めた。

これらの結果は実際の鋼材探傷において、そのままでは利用し得ないが、反射状況、評価方法、整理方法などについては切断試験結果との関連を求めるときおおいに役立つと考える。

最後に本研究の発表に当り、日本製鋼所室蘭製作所 所長 常務取締役皆川孝光氏ならびに 同所次長 近藤八三氏に深謝し、御指導御鞭撻をいただいた同所研究部長 下田秀夫博士に御礼を申上げる。

文 献

- (1) 高沖, マシナリー, 20 (昭 32), 1273.
- (2) 実吉, 日本音響学会誌, 4, 12 (昭 18), 1.
- (3) S. Serabian & G. E. Lockyer, Dec. 1957, A.S.M.E. (N.Y.) にて発表.
- (4) A. W. Rankin & C. D. Moriarty, A. S. M. E., Trans., 78 (1956), 1603.
- (5) A. W. Rankin, C. J. Boyle, C. D. Moriarty, & B. R. Seguin, Mech. Engg., 72 (1950-7), 562.
- (6) P. Bastien, J. Bleton, & E. de Kerversau, Rev. d. Met., 5 (1949), 27; 6 (1950) 421.
広根, 神垣, 日本金属学会誌, 18 (昭 29), 185, 483;
日本學術振興会編, 超音波探傷法 (昭 31), 200;
高沖, 日本金属学会誌, 21 (昭 32), 14, 589, 593; 22 (昭 33) 81, 84.

昭和 32 年の粉末冶金製品生産実績

このほど発表された通産省の統計によると昭和 32 年 (1 月—12 月) の粉末冶金の生産実績つぎのとおり。

製 品 名	鉄 系		銅 系		そ の 他	
	重 量 (kg)	金 額 (千円)	重 量 (kg)	金 額 (千円)	重 量 (kg)	金 額 (千円)
機 械 部 品	306 294	384 233	330 243	552 163	5 729	14 492
(軸 受 合 金)	200 331	223 370	323 352	537 805	5 609	13 592
(摩 擦 材 料)	1 818	1 078	1 866	7 141	—	—
(リ ン グ 類)	89 414	139 051	—	—	—	—
(歯 車)	1 064	1 818	—	—	—	—
(そ の 他)	13 667	18 917	5 025	7 217	120	900
フィルタおよびスクリーン	163	474	339	1 869	—	—
電 気 接 点	530	5 470	—	—	24 426	535 483
電 球 および真空管材料	—	—	—	—	49 279	664 213
集 電 材 料	—	—	71 475	116 217	8 046	37 565
磁 性 材 料	48 995	70 650	—	—	472 457	856 532
そ の 他	—	—	164	262	15 865	55 624
合 計	355 982	460 827	402 221	670 511	575 802	2 163 909