

溶接部の非破壊検査

大阪大学工学部 浦 地 一 義

1. 結 言

機器、構造物の設計が行なわれる際になされる強度計算あるいは安全率の設定には、その基準値として材料の破壊試験によつて得られた強度値を用いる。この場合使用する材料は、完全な弾性連続体であるという仮定を置いているのであるから、実際に用いる材料が欠陥を含み、不連続部分が存在したり、あるいは材質的に異常な応力挙動をするような部分が不均一に存在したりするような場合は、強度的な条件が異なつて来て設計強度が得られないようなことも起り得るのである。

実用金属材料においては、圧延鋼板における層状組織、非金属介在物の存在、等の欠陥も少なからず存在するし、その溶接部においては溶接欠陥の介入は不可避の事柄でもある。

強度部材に、かかる欠陥が存在することが不都合であるのは論を待たぬところであり、極力欠陥の除去とその対策を考える必要がある。実用構造物についての欠陥は、これを検出する為には非破壊裡に行なわねばならない。これがいわゆる非破壊検査である。

ところが経験的にいつて、完全な素材を用い、また製造の中間工程にあるうちに非破壊検査を施してその欠陥を排除是正するならば、完工品は完全でもあり、この方が欠陥是正にも有利であるのは明かである。最近における非破壊検査)実質はかかるところに存し、生産工程の合理化と品質管理に与つて力のある重要な工程となつていのである。現に、素材の吟味と、中間検査に主力を注ぎ、完工品については外観検査を主体にしているメーカーもある。

このように、非破壊検査の徹底によつて、品価の廉化と、強度的保証が得られ、製品に対する信頼性が向上しつつあることは明白であり、さらに高度の性能を有する機器、構造物あるい

は製品への第一歩であつて、工業界の発展は非破壊検査にその基底を置くと云つても強ち誇張であると云えないものがあるであろう。

2. 各種検査法

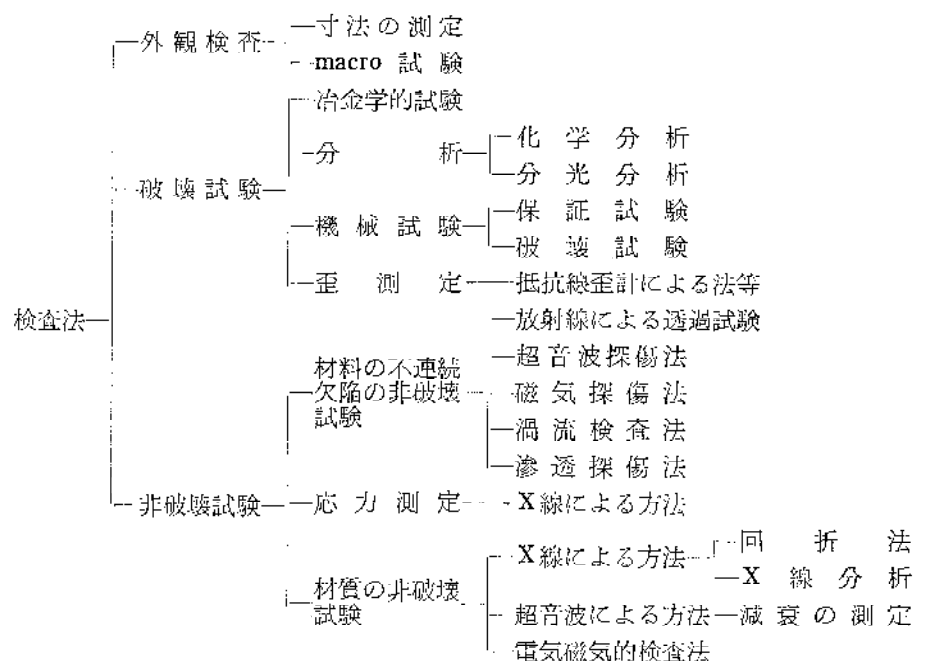
非破壊検査は、その目的とするところが単に疵探しや、あらさがしばかりではなく、生産管理と品質の保証にあるというように、重要な生産工程の一つとして近代工業に不可欠の存在となり、多方面に用いられるようになると共に検査方法、検査装置の進歩も著しく、検査の適用状況と装置の性能は相摩して発展しつつあるのである。

検査法は、一般に非破壊試験と破壊試験とに大別することが出来る。ここでは物体をそのままの状態で、加工せず、その性質とか状態を詳しく調べるような検査法を非破壊検査と定義し、物体を変形、破壊または消滅せしめてその物体の性質、状態等を調べることを破壊試験ということにする。したがつて、一瞥するだけで詳細の分らない外観検査は非破壊に入らない。これらの検査法を分類整理して表にすると第1表のようになる。

3. 放射線透過試験

放射線透過試験には、X線によるもの、 γ 線によるもの

第1表 検査法の分類



のおよび加速器を用いるものの3つがある。

3.1 X線透過試験

高速度に加速した電子を対陰極金属に当てたとき生ずる電磁波であるX線には、物体を貫透する力、および写真作用力をもつ。したがってX線を物体に照射して、その物体の裏側にフィルムを置いておくと、物体を貫通したX線はフィルムを黒化する。このときX線は物体によつて吸収されるのであるが、表面に凹凸や内部に欠陥があると吸収される程度が異なるから、フィルムの黒化が不均一なものとなるから、このフィルムの濃淡を調べて欠陥の有無を調べる訳である。従つて焦点と欠陥の関係からきまる解像力の範囲内において、あらゆる欠陥を現出するものであつて、形、数、大きさも知ることが出来るので最も確実である。現在行なわれている非破壊検査の約半数はX線透過試験である。

3.1.1 ペネトラメーター

撮影したX線写真がどの程度の欠陥を現出し得ているかということを示す一つの方法として、透過度計を用いる。わが国では針金型透過度計を用いることがJISの規格に定められている。A型は50mm以下の板厚に用いるものであり、B型は50mm～100mmの板厚試料に用いる。いずれも太さの異なる針金を何本も並べたものであつて、A型は3～5mmの間隔で0.1mmφから1.0mmφまでの0.1mmづつ太くなる10本の針金を並べたものであり、B型は0.8mmφ～2.0mmφの0.2mmづつ太くなる針金を並べたものである。

透過度計の置き方は、針金の細い方を中心から外側に置く。3個用いるのが原則であるが、平面の場合には中心の1個を省いてもよい。

欠陥の検出能力Pは次式で与えられる。

$$P = \frac{\text{認め得る針金の最小直径 (mm)}}{\text{被写体の板厚 (mm)}} \times 100$$

JISによれば、板厚の2%に相当する欠陥検出能力を有することが規定されている。

3.1.2 増感紙

X線写真を撮影するとき、フィルムのみでは露出に長時間かかり、時間経済に合わなくなることがある。電圧電流は装置の定格で抑えられると云う場合があるので、このような場合には増感紙を用いてフィルムの感度を上げることが行なわれる。増感紙には蛍光増感紙と鉛箔増感紙とがある。蛍光増感紙としては通常タングステン酸カルシウム(CaWO₄)などが用いられ、X線によつて発する蛍光がフィルムの感光を助けるがやや鮮鋭度

が落ちる。この点鉛箔増感紙はX線の為に箔から出る電子により感度がやや上がると共に、斜方向の散乱X線の吸収にも役立つのできわめて鮮鋭な写真が得られる。

3.1.3 像のコントラスト

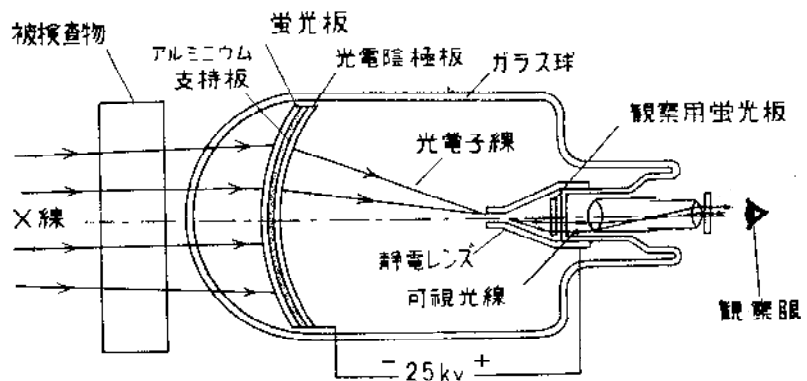
鋼材中に、ある欠陥が存在する場合を考える。今この欠陥が空隙であると考え、鋼材の厚さDを透過したX線の強さI₁と欠陥部分を透過したX線の強さI₂とは、X線吸収法則により次式によつて与えられる。

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu D}$$

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-\mu(D-d)}$$

したがつて $\frac{I_2}{I_1} = e^{\mu d}$

このI₂/I₁の比が1に近い程欠陥の判別はしがたい。dが一定の場合には、I₂/I₁の比を大きくするためには吸収係数μが大きい方が望ましい。この為にはX線の波長を長くして、X線を軟くしてやる必要がある。つまり低い電圧の方がよいことになる。しかし電圧が低くなると、長時間の露出が必要となつて、時間的経済と相尸することとなる。実際問題としては、被写体の種類と厚



第1図 イメージインテンシファイア

さによつて許される限度まで電圧を下げて、コントラストを強くする方法がとられている。

3.1.4 イメージインテンシファイア

第1図のようなイメージインテンシファイアという装置を用いると、直接X線像を観察することが出来る。この方法の利点は暗室内での作業の必要がなく、連続的な検査、あるいは流れ作業に用いることが出来る。今後の発展は期待出来るものがある。

3.1.5 ゼララジオグラフィー

乾式写真法とも言うべきものである。原理は光学写真に用いる照度計と同様であつて、金属板にセレンをコーティングしたものであつて、ここに電荷をチャージして置いてX線像をこの上に投射する。X線の強さに応じた放電が起るから、X線像の明暗(強弱)に比例した模様が見られる訳である。1枚の感光板から2～3分毎に1枚づつの複写を10枚以上作ることが可能である。感度も解像力もすぐれている。

3.2 γ 線透過試験

γ 線による方法も、透過試験の方法はX線の場合と類似したものである。すなわち γ 線のもつ、物質を貫透する力と、吸収効果の利用によつて材料の欠陥をフィルムに現わすものであつて、根本的な相違はない。X線と γ 線との性質を比較すると第2表の通りである。

第2表 X線と γ 線の比較

	X線	γ 線
発生源	管球並びに高圧発生装置その他	ラジウム及び放射性同位元素例えば C_{60}^{60}
制御	必要時のみ放射出来る	常時放射され次第に強度が減少する
線質	装置に許される範囲内で変化出来る	常に一定である
装置	低圧では比較的小型であるが、高圧では大型となる	小型軽量である
障害	比較的簡単に防護が行える	防護にかなり注意を要す
撮影	短時間で出来る	長時間を要する
厚さ補償	必要。肉厚部と薄肉部は別々に撮る必要がある	あまり必要がない 肉厚部と薄肉部の欠陥が同時にとれる
コントラスト	良好	X線ほど良くない
散乱線による像の悪化	多いので適当な工夫が必要	少い
蛍光板法	可能	不可能

γ 線透過試験は線源を置いた周囲に被検査試料を並べて撮影を行うような場合が多い。またドラムや肉厚円筒では円筒の中心に線源を吊して、その外周にフィルムを貼りつけて撮影する方法が用いられる。つまり多くの製品、多くの部分の同時撮影ができるので、1ヵ所あたりの撮影時間は数字的に短くなることが考えられる。なおペネトラメーター、フィルムとその処理などはすべてX線の場合に準ずる。

一般に C_{60}^{60} を用いるのはそのエネルギーと半減期が適当であるからである。第3表はしばしば放射線源として利用されている放射性同位元素である。

3.3 加速器による非破壊試験

各種工業技術の進歩発展に伴い、その検査方法もそれに応じて進展して来たことは明らかな事実である。放射線透過検査の装置、方法も近年急激な進展を遂げ、ある進歩の飽和状態に近いとも考えられる程である。超音波、磁気探傷法などについても然りであるが、X線についてはことさらその感が深い。40KV以下の装置では可

第3表 放射線源として利用されている放射性同位元素

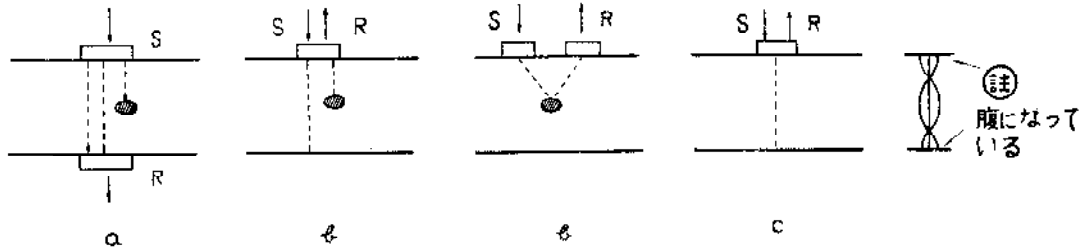
放射性同位元素	半減期	γ 線のエネルギー (M_eV)	
コバルト C_{60}^{60}	5.3年	1.16	1.30
セレンウム S_{75}^{75}	125日	0.08	0.10
アンチモニー S_{b125}^{125}	2.7年	0.55	0.60
セシウム Cs_{134}^{134}	2.3年	0.57	0.79
ヨーロッパウム Eu_{154}^{154}	5~8年	1.10	1.20
“ Eu_{155}^{155}	2.3年	0.84	
プラセオジウム P_{144}^{144}	275日	0.135	0.145
タンタル Ta_{182}^{182}	117日	1.22	1.13
イリジウム I_{192}^{192}	70日	0.20	0.61

搬式として軽量小型のものが手軽に使用されているし、定置式のものでは1,000KV装置が既に能力不足とさえ考えられている次第である。ベータートロン、ファン・デ・グラフなども戦前は高エネルギー粒子を得る加速装置として数少ないものであつたが、最近では工業用に広く用いられ、量産されつつある。造船、高压容器などの大形化、厚物化と鋳鋼品検査の普及、それに原子炉の構築などに伴いこれらの高エネルギー加速装置の普及が拍車をかけた次第である。ファン・ド・グラフはある上限が技術的に存在するが、ベータートロンは円形コイルに電流が流れるとき生ずる磁束の時間的変化によつて生ずる起電力で電子を加速しようとする装置であつて、相当高エネルギーのものまで作製が可能である。ベータートロンをラジオグラフィに用いる特長は、工業用としては、

1. そのエネルギーが高く線質特性がきわめて硬いので透過能力が大きい
 2. 線質特性が硬いことは撮影域がきわめて大きいことになる。したがつて形状複雑なものの透過も可能となる。
 3. 線源の大きさが小さいので写真の鮮鋭度が大きい。
 4. 他の Cockcroft-Walton 型加速器等に比して小型にならう。
 5. ボルト当りの建造費が数 M_eV の普通のX線装置その他に比して低廉である。
- 等であつて、電氣的絶縁上の心配がないことと共に、極めて有利な非破壊検査装置である。今後の発展が予期され、価格と需要が反例してその普及が考えられるのである。

4. 超音波探傷法

一般に20Kc以上の周波数の音波を超音波という。探傷に用いる音波は0.5~15Mcのものが多く、可聴音波を超えた周波数であるけれども、普通にいう音波と異なつたものではない。普通水晶の圧電氣的性質を利用し



第 2 図 超音波試験方式の説明図

て、水晶板に電圧を加え、その時生ずる体積振動によつて超音波を発生させるものである。超音波を物体に導入すると、材料の不連続部分において、音波の影を生じ、または欠陥からの反射が生ずることによつてその存在を知ることが出来る。これらを利用したのが超音波探傷法の原理である。

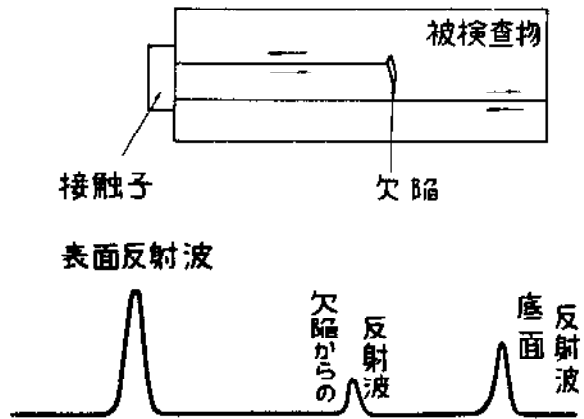
超音波探傷試験方法には大別して3つの方法、透過法、反射法ならびに共振法がある。第2図はこれらの方式についての説明図である。

透過法(第2図 a)は送信器 S と受信器 R を用い、S からパルス波を送信し、R で受信する。もし材料内に欠陥があれば、R に到るエネルギーが弱まるから、受信波を測定すれば欠陥の有無を知ることが出来る。この方法は被検査物の表裏両側に近づかねばならない。

反射法(第2図 b, b')は超音波探傷法として最も多い型である。パルス波を漸続的に送信して、これが底面に衝り、反射して来るまでの時間をブラウン管上で測定するようになっていて、もし中に欠陥があれば、そこからのエコーが帰つて来るから、時間的には底面からのエコーより短くなるはずであつて、ブラウン管上には表面とのエコーの為の図形の途中に欠陥よりのエコーの図形が表われる。第3図にはその状態を示す。反射法には垂直探傷法と斜角探傷法とがある。溶接部の欠陥検査は溶接ビードを仕上げる必要のない斜角探傷法が多く用いられている。

共振法は厚み計として用いられる場合が多く、板の一面より超音波を連続的に導入する方法である。超音波を送信すると、その板厚に応じてある周波数の超音波は板と共振する。この共振を生じる周波数を読み板厚を知る方法である。

また、水浸または油浸法と呼ばれる方法がある。これ



第 3 図 超音波探傷図形

は水中または油中に被試験体を没し、水または油を通じて超音波を試験片に導入する方法である。また金属中よ

第 4 表

反射探傷法	垂直法	<ul style="list-style-type: none"> -1. 探傷面より 10 mm ~ 数 m 深部の欠陥発見用 -2. 形状簡易なもの(太棒, 立方形材) -3. 欠陥の少ないもの(鍛造品)
	斜角法	<ul style="list-style-type: none"> -1. 4 m 厚以上の板材 -2. 欠陥の少ないもの
	表面波法	<ul style="list-style-type: none"> -1. 探傷面下数 mm 以内の表面欠陥発見用 -2. 面は上仕上げ
透過探傷法		<ul style="list-style-type: none"> -1. 肉厚 50 mm 以内 -2. 形状比較的簡易なもの(板, ダイカスト鋳物) -3. 探傷面が比較的平滑なもの(製品検査)
共振法		<ul style="list-style-type: none"> -1. 板材の厚み測定 -2. 探傷面に平行な大きな欠陥発見用(例えばラミネーション) -3. 探傷面が比較的平滑なもの

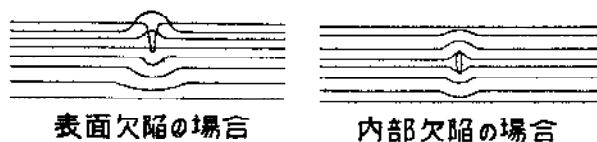
り、液中の方が超音波ビームの指向性が鋭いので、傷の位置の精度も高い。なお中間に液を介するので、試験片の表面も他の超音波探傷法のように、振動子に密着するように仕上げる必要もなく、形状複雑な製品に適用することが出来、発信装置を移動しつつ連続探傷が可能であるので、近時大いに用いられている。

各超音波探傷法にはそれぞれ特長があるので、その使用区分を概括的に分類してみると第4表のごとくなる。なお超音波は固体中で減衰する。これは拡散、粘性およ

ば散乱によるのであつて、拡散減衰は音波が球面波となつて拡がる為であり、粘性減衰は金属の内部摩擦によるものと言われており、散乱減衰は結晶の境界とか材質的不連続部分に起る散乱のエネルギーである。これらの減衰を測定して、材料の状態を知ることが可能である。また圧延鋼材等で組織的不均一を含む超音波図形は、はなはだ複雑な様相を呈する。こういう点から金属研究家が超音波を用いた研究を大に行う必要があると思われる。

5. 磁気探傷法

磁氣的性質を利用して検査する方法には、磁化曲線の変化を利用する方法と、磁力線束の変化を利用する方法とがある。前者は材質の判別に用いることが出来、後者は材料の不連続を検出するのに用いられる。いわゆる探傷である。欠陥のある強磁性体を磁化すると、第4図のように漏洩磁束を生ずる。この漏洩磁束を検出するのである。



第4図 欠陥による漏洩磁束

磁化方法は磁化電流の種類、通電時間、通電方法によつて分類され、磁化電流は交流、直流いずれも用いられるが、これらの優劣は一概には決められない。一般に交流は表皮効果のため、表面に近い傷の検出に適しており、直流はある程度の深さまで検出が可能である。磁化方法はまとめると、第5表の通りである。

第5表 磁化方法

磁化名称	磁場	磁化の方法
軸通電法	円形磁場	直接被検査物に軸方向の電流を流す
貫通法	円形磁場	被検査物の穴に通した導線に電流を流す
プロッド法	円形磁場	2電極を試験品の近接した2点にあてて電流を流す
コイル法	直流磁場	被検査物をコイルの中に入れて磁化電流を流す
極間法	直線磁場	被検査物を電磁石または永久磁石の2極間におく

欠陥の検出、すなわち漏洩磁束の検出には、探査コイルおよび磁粉が用いられる。棒材には探査コイルを用いることが多い。これは漏洩磁束を切ることによつてコイルに誘起される電圧から欠陥を知る方法である。磁粉検

査は、磁化した物体に磁粉をふりかけると、漏洩磁束のある部分に磁路に沿つた吸着が起るから、欠陥の形に近い磁粉の図形を観察することが出来る。普通の磁粉を用いる方法を磁粉探傷といい、螢光性磁粉を用いる場合を螢光磁粉探傷という。螢光磁粉は紫外線で見易い特徴がある。なお磁粉の供給方式には、油に磁粉を懸濁させて用いる湿式法と磁粉だけで行なう乾式法とがある。

連続法と残留磁気法とを比較すると、連続法の方が感度がよく、残留磁気法は磁化と散抹検査とが別々に行なえて、能率的であるが、磁気残留の少ない材質では精度が高くない。

6. 渦流検査法

この方法は交流を流したコイルに導体を近付けたり、またその中に導体を入れると、その導体内に発生する渦電流のためにコイルのインピーダンスが変わることを利用している。このインピーダンスは被検査物の材質、つまり成分や組織によつて異なり、また欠陥等によつて変化する。さらにコイル電流の周波数、被検査物の電気伝導度、導率率等の条件によつても変わる。このインピーダンスを知つて材料の性質を検査する方法であるので、磁性体や非鉄金属のいずれでもよく、したがつて鋼、ステンレス鋼、アルミニウムの溶接管の溶接部の試験を行うのに便利である。測定はインピーダンス・ブリッジまたはオシログラフによる振幅位相の測定によつて行なうことが出来る。

7. 滲透検査法

滲透液を検査物質に塗布し、またはその液中に浸して引き上げて、表面の疵の中にまでしみ込むようにする。この滲透液は、一定時間の後すつかり拭きとり、その後現像液を塗布する。何も無い表面はそのまま残るが、疵の部分はその中に滲透液が残っているから、これが現像液にしみ出て来て欠陥の存在を知らせるのである。

この方法は表面疵の検出にのみ用いられるものであつて、螢光法と染色法とがある。螢光法は滲透液中に螢光物質を懸濁させてあるものであつて、現像剤は、残留螢光物質を小さい欠陥からしみ出させるものである。そうして紫外線灯の光の下で見ると螢光物質により、表面疵は鮮明に見ることが出来る。染色法は螢光物質の代わりに赤色の塗料を用い、白色の現像剤の上に赤くしみ出すのを調べて疵を探知するものである。

滲透検査はボイラ用チューブに用いられるほか、放射線検査と併用して効果がある。引張り側である表面欠陥の検出が大切であると共に、その表面欠陥の検出感度は板厚によつては、滲透法の方が放射線よりも細く検出

来るからである。

8. X線による応力測定法

材料の内部欠陥を探知することはもちろん重要であるけれども、応力を測定することが出来るということはさらに重要なことである。いくら欠陥があつても力が働かなければ破壊することはないからである。現在応力の測定にはいろんな方法があるが、破壊測定である場合が多い。X線による応力測定もまだ完全に実用的なものになりきつてはないのであつて、現場において広く用いられている訳ではない。しかし唯一の非破壊応力測定法であつて、X線回折法の工業的応用の代表的なものである。また応力の物理的意味から言つて、この方法が最高の測定法である。これまで実用化されなかつた理由は、

1. X線発生装置が膨大であつて、しかも複雑なこと。
2. 測定する部分が非常に小さくまた忠実にすぎること（これはまた長所でもあるが）。

3. 測定に要する時間が長いこと。

である。しかしこれらの欠点も、X線装置の小型化、取扱いの単純化、また測定時間と精度はG.M.管法によつて解決されそうである。しかもこの方法には、

1. 非破壊測定法であること。
2. 極く微小な部分の応力が測定出来ること、従つて又勾配の急な応力を測定出来ること。
3. 弾性歪と塑性歪とを分けて測定出来ること。

の利点をもつており、今後の発展が期待される。しかしなお研究すべき余地が残つている。1つは応力の計算式に弾性学の数式をそのまま用い、等方連続体という仮定の下に立つていることであり、もう1つは現在用いている仮定がそのまま正しくあてはまるものであると仮定し

た上においても、試料の表面状況や結晶粒の大きさに対処する方法についてさらに検討しなければならないことがある。

9. 結 言

以上述べて来た方法によつて材料内に含まれる欠陥の殆んどすべてのものは検出することが出来る。欠陥を検出するという事は、1つの技術であつて学問ではない。非破壊検査の真意の1つは、これらの諸欠陥がいかに強度に影響を及ぼすかということに判定すべきところにある。ここで単に強度と云つたのは、構造物の強度、素材の強度と金属の強度の3つの意味を含ませる積りであつたのであつて、同様な言葉ではあるが、強度の考え方が異なつた基礎分野に立つものであるからである。溶接の場合は溶接によつて構造物が組み立てられるのであるから、構造物に違いないのであるが、材料自身不連続欠陥をもつものであるから、材料強度の問題であるとも云える訳であつて、両分野からの考え方が必要である。

溶接欠陥の強度に及ぼす影響について認識を深めると共に検査に当つては、

1. 図面、仕様書の解釈、理解と溶接担当者への適切な説明の有無。
2. 施工法の確認とその検討。
 - ・ 溶接条件の検討と溶接実施場所についての認識。
 - ・ 被検査物の使用目的の認知。
5. 検査結果に対する総合的な判定とその解釈。
 - ・ 記録。

について、充分注意を行なえば、次第に欠陥の発生率は減少するであろう。ここまでの指導を行うのはやはり非破壊検査の担当者であるべきである。