技術資料

非破壊試験の欠陥検出能力の調査の動き*

荒 川 敬 弘**

The Recent Trend of Investigations on Ability of Defect Detection by Nondestructive Examinations*

by Takahiro Arakawa**

キーワード：非破壊試験，欠陥検出，超音波探傷試験，欠陥検出能力，自然欠陥

1. はじめに

構造物の機能がより高度化し、更に長寿命化を計ることへの関心が高まると共に、非破壊検査の役割の重要性が強調されてきている。このため、より信頼し得る検査方法の開発と、自然欠陥に対する検査精度の定量化が望まれている。

特に超音波探傷試験は構造物の破壊に重要な影響を及ぼす割れ等の面状欠陥の検出に有効な手段であり、高い関心が示されている。一方、自然欠陥面の表面状態は凹凸に富み多種多様であり、欠陥面での超音波反射特性も多様となる。検査精度を定量的に扱おうには多くの試験結果を統計的に検討することが重要となる。この目的で、近年多くのプロジェクトが世界各地で行われてきた。最も大きなものの一つとして PISC-II 計画を挙げることができる。

本計画は日本を含む世界15ヶ国の国際協力によるものであり、圧力容器中の合否限界寸法近く欠陥に対する検出、位置標定及び寸法測定に関して、新しい超音波探傷技術の評価することを目的としている。

一方、国内においても発電設備技術検査協会が日本自転車振興会より機械工業振興金の補助を受けて、超音波探傷試験による自然欠陥の定量化に関する基礎研究を目的とした非破壊検査調査研究委員会を設立し、共同研究を昭和52年より実施してきた。本報告ではこれらの活動の概要を紹介すると共に、自然欠陥の検出に関する著者の検討結果について述べる¹⁾。

2. PISC-II 計画をめぐる世界の動向

欧州—アメリカ・カナダ—日本間での国際協力として行われている PISC (Programme for Inspection of Steel Components)—II 計画について紹介する。

本計画の最も主要な活動の一つとして、ラウンド・ロビン・テストがある。軽水炉型原子炉圧力容器の溶接部の一部を模擬した大型試験体中に、各種欠陥を作成して、これを世界各地の参加チーム間を回送させ、各チームが提案した探傷手法による探傷結果を総合的に評価するのである。今回これに参加したチームは約50チームにも及んだ。

本計画にはラウンド・ロビン・テストの他に、超音波探傷試験時に起る現象を解明するためのパラメトリック・スタディが並行して行われており、最終的には両者を合せた総合評価がなされる予定である。

PISC-II 計画の発足について述べるには、1965年のアメリカにさかのぼる必要がある。当時の米国圧力容器研究委員会 (PVRC) は圧力容器鋼板中の欠陥検出、位置標定及び寸法測定に関する研究を開始させた。この目的で1968年には12体の大型試験体を作成した。これらの試験体の3体が欧州 (OECD-CSNI) の委員会 (Plate Inspection Steering Committee) に送られて、PISC-I 計画が始まった。

PISC-I 計画には欧州10ヶ国の34チームが参加し、当時の ASME 規格に基づく探傷手順 (PISC Procedure) やそれ以外の代替探傷手順による探傷がラウンド・ロビン・テストとして行われた。これらの結果は1980年10月に報告された^{2,3)}。これによれば、距離振幅特性曲線の50%を検出レベルとした当時の ASME 規格に基づいた探傷結果よりも、欧州で用いられていた探傷手順

*原稿受付 昭和61年3月17日

**正 員 石川島播磨重工業(株)技術研究所 Member, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

等の代替探傷手順による方がより優れた結果を示した。図1に欠陥検出に関する試験結果の例を示す。

しかしながら、3体の試験体に作成された欠陥は現実の溶接部に発生する欠陥形態とかけ離れたものであり、また欠陥数も比較的少なかったため、客観的な評価に欠けることが強調された。さらに試験の解析に多くの時間を費やし、その間の非破壊検査技術の進歩が急であったために、更に新しい試験計画が必要であることが指摘された。ここに PISC-II 計画の出現となった。

PISC-II 計画は OECD-NEA より提案され、OECD への非加盟国をも加えた国際協力として発足した。日本は日本鉄鋼協会に作られた日本压力容器会議の非破壊試験専門委員会(雑賀喜規委員長)で活動することとなった。PISC-II 計画を管理するための第1回の会合は、Dr. R. W. Nichols (英国) を議長として、1981年1月にパリで開催された。

ラウンド・ロビン・テストに用いられる4体の試験体はイギリス、西ドイツ、イタリア及び日本より提供された。日本で製作したノズル付試験体(No.9)には、ノズルコーナー部の3つの疲労割れの他に、突合せ溶接部の水素による遅れ割れを中心とした12の欠陥が作成された。図2には4つの試験体の形状を示している。2体はノズル付試験体であり残りの2体は平板試験体である。

試験体の回送は1982年1月より開始され、15ヶ国を回

送するのに2年9ヶ月を要して、1984年9月に試験は完了した。日本では、2体のノズル付試験体の探傷試験を1982年10月から12月にかけて行い、また平板試験体を1984年1月から3月にかけて行った。日本から参加したチームは表1に示す如く、述べ14チームである。各チームは

図1 PISC・I計画で得られた欠陥検出に関する探傷結果の一例

図2 PISC・IIラウンド・ロビン・テストに用いられた試験体概略

表 1 PISC・II ラウンド・ロビン・テストで実施した日本チームの探傷方法の一覧表

teams	name of procedure	plates	Remarks
1	Modified ASME	1, 2, 3, 9	Detection level 20% DAC, 50% DAC
2	Japanese National Standard (JIS Z 3060)	do.	Detection level 25% DAC
3	Tandem probes Technique	1, 2, 9	—
4	Tomographic search	1, 2, 3, 9	Multi-probes
5	Mode-converted surface wave method	do.	Sizing technique
6	Tip-peak Echo Method	do.	Sizing technique
7	Acoustic Holography	do	Computer-aided Sizing technique (Immersion)
8	Digital Acoustical Holography	do.	Computer-aided Sizing technique
9	Dinamically Focussed Beam Technique		
10	Line Synthetic Aperture Technique		
11	Phazed Array Ultrasonic Testing Method	do.	Computer-aided
12	Immerston Technique Tip-peak Echo method	1, 2	Mechanized Immersion System
13	Mannual Scanning and Automated Recording System Using Focussing Probes	1, 2	Computer-aided Recording
14	Detection of Fatigue Crack of Nozzle Corner Inside	3, 9	—

1つの試験体の探傷に要する日数の限度を1週間として、順次試験した。探傷中の写真例を図3に示す。

得られた探傷結果の詳細は、ラウンド・ロビン・テストを統括した EC の研究機関の JRC Ispra (Italy) に全て送付された。日本チームを含めたすべてのチームの結果の解析は現在なお進行中ではあるが、一部の結果は既に中間報告として発表されている⁴⁾。これによれば、筆者の個人見解も含まれることと断りながらも、いくつかの興味深い結果が見うけられる。

ASME 規格に準じた探傷を行った各チームに対して、欠陥検出に関する検討の結果が図4～6に示されている。欠陥の検出に及ぼす検出レベルの影響は図4に示されて

いる。検出レベルとは、記録すべき欠陥の最低エコー高さを示すレベルであり、検出レベル未満のエコーが得られた場合には記録されない。距離振幅特性曲線の50%を検出レベルとした場合には、欠陥高さが約 20 mm 以下の欠陥の検出性が悪くなるのが解る。一方10%を検出レベルとした場合の検出性は、20%の場合と大差のないことも解る。検出レベルをあまり低くすることは、むしろ欠陥エコーと擬似エコーの判別が困難となる等の理由で好ましくないと指摘されている。図4の結果は、日本で作成したノズル付試験体 (No.9) に対して得られた結果である。距離振幅特性曲線の20%を検出レベルとすることは例えば現在の ASME Section III の超音波探傷試

図 3 PISC・II ラウンド・ロビン・テストにおける日本チームの探傷実施状況を示す写真の一例

図4 PISC・II ラウンド・ロビン・テストで得られた欠陥検出に関する探傷結果の例—検出レベルの影響 (点線は割れに対する著者の検討結果を示す)

図5 PISC・II ラウンド・ロビン・テストで得られた欠陥検出に関する探傷結果の例—70° 斜角探傷, タンデム探傷を補足して探傷した場合の影響 (点線は割れに対する著者の検討結果を示す)

図6 PISC・II ラウンド・ロビン・テストで得られた欠陥検出に関する探傷結果の例—欠陥タイプの違いによる影響

験に規定されている方法でもある。

検出レベルが一定であっても、用いる探触子の組合せを変えた探傷方法によって検出確率は異なってくる。図5は垂直探傷、屈折角45°と60°の斜角探傷で検出レベルを距離振幅特性曲線の10%または20%とした時の欠陥

検出確率は、検出レベルが35%または50%であっても更に70°斜角探傷とタンデム探傷のいずれかあるいは両方を併用して探傷した時の検出確率とは等しいことを示している。欠陥検出確率は、単に検出レベルの設定のみならず、欠陥への超音波ビームの入射方向を考慮して、欠陥をねらう方向を増すことで大きく改善されることを示している。図5の結果は平板試験体 No.2 に対して得られたものである。

一方、現在解析が進められている2体のノズル付試験体と一体の平板試験体の3体には種々の欠陥のタイプが導入されていた。これらを3つのタイプに分類した時の各タイプ毎の検出確率を比較した結果を図6は示している。aの曲線は欠陥面が平滑であり、かつ欠陥先端部が極めてシャープな欠陥群の検出確率を示している。これらの欠陥は、平滑な機械加工面を拡散接合等で接合し、面の一部を欠陥として残存する方法等で作成された。欠陥面の超音波ビームの反射指向性は鋭く、欠陥検出率は悪くなっている。

bの曲線は、水素による遅れ割れ等のように欠陥面において比較的凹凸が多いような欠陥に対する結果である。面での反射指向性が鈍くなると共に、検出確率はより高くなっている。cで示される欠陥群は、スラグ巻込み等の塊状の欠陥である。最も高い検出確率が得られている。このように、欠陥検出能力は検出対象となる欠陥形状を配慮することが重要であると言える。

ラウンド・ロビン・テストに用いられた4体の試験体の内の残りの平板試験体1体には、導入を予定した欠陥以外に、その周辺に多くの微細な欠陥が発生していて結果の解析が困難となったために、遅れている。なお、現在更に詳細な解析が続行中であり、最終報告ではより多くの貴重な知見が得られるであろう。PISC IIの最終のシンポジウムが1986年10月13~15日に Ispra (Italy) で予定されている。

欧米各国では、PISC II ラウンド・ロビン・テストと並行して独自の計画を実施している。例えば英国においては、PISC II ラウンド・ロビン・テストに提供した試験体の外に3体の試験体を作成して、独自の解析を試みている⁵⁾。この目的は加圧水型原子炉压力容器の使用期間中検査法の確認である。これら各国における計画も PISC II 計画と密接な関連を持っていると言える。最終評価には、各国のこれらの結果も反映されるであろう。

また、日本においても1968年に米国で製作された12体の試験体の内の2体の供与を受け、これのラウンド・ロビン・テストを1980年2月より1981年の12月までに実施している。また、PISC II ラウンド・ロビン・テストに

提供した試験体と同規模の試験体を 2 体作成して、これのラウンド・ロビン・テストを1981年 8 月より1983年 3 月に実施した。

3. 非破壊検査調査研究委員会の活動

国内における非破壊検査に関する委員会活動も多くのある。ここでは著者も関与して、長期間に渡って基礎的データの集積に当たった委員会活動として、非破壊検査調査研究委員会を紹介する。

本委員会は1977年に仙田富男阪大教授を委員長として、発電設備技術検査協会に発足し、現在なお継続中である。本委員会の主要目的は、超音波探傷試験による鋼継手部の自然欠陥に対する検出、位置標定、形状判別及び寸法測定に関する基礎データの集積と、推奨される探傷方法

の提案である。

1985年までの 8 年間には、板厚 50 mm を中心に 13 mm から 200 mm の炭素鋼及び低合金鋼の平板突合せ溶接部の自然欠陥を対象とした検討が行われた。この間に取扱った自然欠陥の総数は 233 個であり、割れが94 個含まれている。1985年よりはオーステナイト系ステンレス鋼の突合せ溶接部を対象とした試験が開始された。

本委員会での成果は、年度毎の調査研究報告書として報告された外、1983年と1985年に発電設備技術検査協会の研究成果発表会として公表された^{6,7)}。欠陥検出に関する検討結果例を図 7 に示す。欠陥をねらう方向の組合せを種々変化させることにより検出確率が変化することがわかる。PISC II ラウンド・ロビン・テストの中間報告結果の図 5 に対応した結果と言える。

なお、本委員会でも収集された試験データをより詳細に検討することで、更に興味ある結果を導くことができる。次項に示す検討結果は、著者が本委員会でも得られたデータを中心に検討を加えた結果、得られたものである。

4. 欠陥検出に関する一考察

欠陥の検出性を論じるには、まず欠陥形状と超音波反射特性の関係を理解する必要がある。ブローホール等の球状欠陥と割れ等の面状欠陥との比較を模式的に図 8 に示す。球状欠陥に対しては、超音波ビームの欠陥への入射方向に依存することなく、一定のエコー高さとなる。

一方、面状の欠陥を対象とした場合のエコー高さは、超音波ビームが欠陥に入射する方向に大きく依存する。超音波ビームを図 8 (b) に示す A 方向または B 方向から欠陥面に入射させた場合には、面からの強い反射エコーはそれぞれ A'、B' 方向に進み、一探触子法では受信できない。この時、欠陥端部等で起る低い散乱エコー

図 7 非破壊検査調査研究委員会で得られた欠陥検出に関する探傷結果の一例一探傷方法の違いによる欠陥検出率の比較

図 8 欠陥タイプの違いによる検出性の差を示す模式図

のみを受信する結果となる。欠陥面には垂直に入射するC方向からの探傷を行うことで高いエコー高さが得られる。

欠陥面が平滑な場合に得られるエコー高さは、超音波ビームの指向性を考慮して理論的に求める。仙田ら⁸⁾が求めた結果の一例を図9に示す。超音波ビームの欠陥への入射角(ϕ)がわずかに傾くと、エコー高さは大きく減少し、減少の割合は大きな欠陥ほど顕著となる。

欠陥が検出されるかどうかは、欠陥からのエコー高さが予め設定された検出レベルを超えるか否かで評価される。検出レベルの設定によっては、波長との関連で特定の寸法範囲の欠陥しか検出できないことを図9は示している。平滑な面をもつ欠陥を確実に検出するには、できるだけ超音波ビームが欠陥面に垂直に入射するような幾何的条件下で探傷する必要がある。

図9 平滑な面を持つ板状欠陥からのエコー高さに及ぼす、超音波ビームの欠陥への入射角(ϕ)の影響

一方、溶接部に発生する水素による遅れ割れ等の欠陥を対象とした場合、平滑面での超音波反射特性とは異なった特徴が得られる。すなわち割れの表面は凹凸に富んでおり、微小な平面がモザイク状に連なった状態となっている。このため超音波の反射に寄与する割合は、位置によって不規則に変化する結果となる。集束形探触子を用いて、超音波ビームがほぼ垂直に入射する方向より水素による遅れ割れを探索して得られた音圧分布を、図10に示す。不均一な音圧分布となっており、音圧分布は超音波ビームの欠陥へ入射する方向を変えることで異なってくる。超音波ビームが拡散する通常の探触子を用いる場合に、割れ面での反射指向性が平滑面に比べて鈍くなるのが理解できる。自然欠陥の検出性を考慮する場合、自然欠陥面での反射指向性を検討することが重要である。

平板突合せ溶接継手部の内部に作成した種々の自然欠陥に対して、1つの走査線を設けてその線上で種々の屈折角の探触子で探傷を行い、この時の超音波ビームが欠陥に入射する密度を変えた時の各最大エコー高さを比較して図11、12が得られた。図11は、48方向から詳細に探傷して、いずれかの方向で超音波ビームが欠陥面にはほぼ垂直入射するように配慮した時の最大エコー高さを縦軸に、15°間隔で超音波ビームが欠陥に入射するように深傷した時の最大エコー高さ横軸にとって示したものである。この時、板表面に平行方向で超音波ビームを入射させることはできないのでタンデム探傷を行った。両者のエコー高さの差は小さく、自然欠陥面での鈍い反射指向性を理解できる。

通常の探傷では、より粗い超音波ビームの欠陥への入射方向が用いられる。図12は垂直探傷及び屈折角45°と60°の斜角探傷を試験体の片面両側から行なった時に得られる最大エコー高さと、より詳細な探傷による場合のそれとを比較した結果である。両者にばらつきが見られ、

図10 水素による遅れ割れを、集束型探触子を用いて水浸法で探傷して得られる探傷パターンの一例

図11 48方向から詳細に超音波ビームを欠陥に入射して得られる最大エコー高さと、15°間隔で超音波ビームを欠陥に入射して得られる最大エコー高さととの比較

図12 48方向から詳細に超音波ビームを欠陥に入射して得られる最大エコー高さと、試験体の片面両側から垂直探傷及び45°, 60°斜角探傷して得られる最大エコー高さととの比較

割れを対象とした場合のばらつきの限界は線 C-D で表われる。

垂直探傷及び屈折角 45° と 60° の探傷を、検出レベルを距離振幅特性曲線の 20% (-14 dB) として行った場合の割れの検出性について検討して見よう。この時 ACIH で囲まれた割れは未検出となり、また IHBD で囲まれた割れは検出できたことを意味する。一方、検出レベルに等しいエコー高さが得られた割れに対して、更に種々の方向より詳細に探傷を行った場合のエコー高さは、H 点から I 点の +2 dB まで得られることが解る。H 点に位置する欠陥は、5つの超音波ビームのいずれかが欠陥面にほぼ垂直に入射したため、欠陥寸法が小さいにもかかわらず検出できたと言える。反面、I 点に位置する割れの傾きは、欠陥検出に最も不都合な向きにあったために、欠陥寸法が大きいにもかかわらず、検出レベルに等しいエコー高さが得られなかったと言える。割れの検出限界寸法を求めるには、I 点に位置する欠陥の寸法を求める必要がある。

超音波ビームが割れ面に垂直に入射した時に得られるエコー高さは欠陥寸法と関連付けられる。長さが有効ビーム幅より長いとして、平滑面をもつ帯状平面欠陥で得ら

れるエコー高さと欠陥高さの関係式⁹⁾を用いて欠陥高さを推定した値と、切断試験によって求めた実長を比較したところ図13を得た。推定値は実測値の約 1/3 の値を示している。この値は、割れ面を構成している微少平面の集合の中で、より反射に帰与する面積の比率と解釈できる。この関係を用いることで、I 点、H 点に位置する割れの高さを予測できる。

PISC II ラウンド・ロビン・テストで実施された探傷条件に合わせて I 点、H 点の欠陥寸法を求めた。I 点の欠陥の傾きは板厚方向であり、また H 点の欠陥は屈折角 45° の探傷で超音波ビームが垂直入射していると仮定して欠陥高さを求めると、それぞれ 8.8 mm 及び 0.8 mm が得られた。この結果を、PISC II ラウンド・ロビン・テストで得られた結果の図 4.5 にプロットすると、点 A、B となる。両者を結んで線 b' となる。一方、検出レベルを距離振幅特性曲線の 50% とした場合について同様の検討を行なうと図 4 の線 c' が得られる。ここでの検討結果が PISC II ラウンド・ロビン・テストの結果と、ほぼ妥当な一致を示していることが知られる。

欠陥検出性を更に論じるには、この他にも対比試験片と試験体との伝達損失及び減衰率の違いによる問題¹⁰⁾

図13 割れ面に垂直に超音波ビームが入射して得られるエコー高さから、平滑な帯状欠陥に対する理論式を用いて求めた欠陥高さの推定値と、切断により求めた実測値の比較

や、探傷器や探触子の特性の差によるばらつきの問題、母材中に介在物が存在する場合の影響の問題あるいはヒューマン・エラーの問題等に関しても検討が必要であろう。しかしながら、ここで論じた欠陥の傾きと欠陥面での反射指向性を考慮することが基本的に重要であると言える。

5. ま と め

世界15ヶ国間の国際協力として行われている PISC II 計画と、発電設備検査技術協会が1977年より実施している非破壊検査調査研究委員会の概要について述べた。また、非破壊検査調査研究委員会で得られた膨大なデータを中心に、著者が超音波探傷試験による割れの検出性に関して検討したところ、PISC II ラウンド・ロビン・テストの中間報告結果とほぼよい対応が得られた。

PISC II 計画は1986年10月で完了予定であるが、更に規模を拡大した PISC III 計画が開始されている。ここではオーステナイト系ステンレス鋼での探傷試験や、既

に廃炉となった構造物中の実欠陥に対する探傷試験も計画されている。また非破壊検査調査研究委員会では、1985年よりオーステナイト系ステンレス鋼突合せ継手部の自然欠陥に対する試験が開始されている。これらの成果が、信頼性の高い、機能上のより優れた構造物の設計に大きく貢献できるものと確信するものである。

また、日本溶接協会規格 WES 2005「鋼溶接部の非破壊試験施行方法の確認試験方法」が1986年2月に制定された。軟鋼、炭素鋼及び低合金鋼の突合せ溶接継手部に発生が予測される有害な自然欠陥に対して、予め検査方法の適正を確認するためのものであり、本資料に述べた事項との関連も深いと考え、最後に紹介しておきたい。

参 考 文 献

- 1) T. Arakawa et al: "The detection of weld cracks using ultrasonic testing" NDT International Vol.18 (1985), No.1 p9-s
- 2) "Analysis of the PISC Trials Results for Alternative Procedures" CSNI Report 48, EUR 637 IEN Report No.6 June 1980
- 3) 雑賀, 岸上; "ヨーロッパにおける溶接試験体の超音波探傷回送実験の結果について" NDI 資料 No.2825 昭55-11月
- 4) S. Crutzen et al: "The PISC II Project; Initial Conclusions regarding the procedures in the round-robin tests" NDT International Vol.18 (1985), No.5 p 243-s
- 5) R.A.Murgatroyd et al; "Implications of the results of the Defect Detection Trials" NDT International Vol.18 (1985) No.4 p 195-s
- 6) "溶接部の非破壊検査に関する研究発表会予稿集" (財)発電用熱機関協会 昭58-3月
- 7) "第2回溶接部の非破壊検査に関する研究発表会予稿集" (財)発電設備技術検査協会 昭60-9月
- 8) 仙田他 "一探触子法における模型欠陥エコー高さの計算方法-2, 斜角法の場合" NDI 資料 No. 2760 昭54-11月
- 9) 廣瀬他 "Ⅲ非破壊試験の溶接検査への適用-5, 内部欠陥と超音波探傷試験" 本誌 50-11 (1981) p 1049-s
- 10) 廣瀬他 "超音波探傷試験適用時の留意点 (その1)" 本誌 54-1 (1985) p 28-s