研究論文

非破壊試験の信頼性を考慮した検査後の 溶接品質とその支配因子*

—建築鉄骨溶接部の例—

佐藤邦彦** 豊田政男** 南 二三吉**

藤盛紀明*** 中辻照幸***

Reliability of Inspected Welds Taking Defect Detectability of NDT into Account and Influence Factors to Reliability of Welds*

—An Application for Welded Steel Framed Structure—

by Kunihiko Satoh**, Masao Toyoda**, Fumiyoshi Minami**

Toshiaki Fujimori*** and Teruyuki Nakatsui***

NDT, in general, is performed for quality assurance of welds. The reliability of welds, however, is affected by the defect detectability of NDT or the other inspection factors. In the present paper, an analysis method for getting the reliability of inspected welds is declared, and the controlling factors of the reliability of welds are discussed.

The reliability of welds is decided by correlation of the defect detectability of NDT and critical defect level for repair. According to the defect detectability of NDT, therefore, critical defect level for repair A_{cr} should be set smaller than critical allowable defect size a_{cr} .

Deteriorating the defect detectability of NDT, the reliability of welds deteriorates. And the degree of deterioration of reliability depends on the sensitivity factor a_0 and on the accuracy factor σ_A , but if a_0 or σ_A is much smaller than a_{cr} , improvement of NDT detectability does not always increase the reliability of welds. It is necessary to select the inspection procedure according to a_{cr} for QA of welds.

In sampling inspection, the reliability of welds R is decided definitely according to average sampling ratio $\bar{p}_s$, and $R-\bar{p}_s$ is in linear relationship. If the highly defective joints exist, the reliability of welds increases by performing sampling inspection with emphasis on those joints.

1. 緒 言

溶接部の使用性能を確保するためには、構造物や構造要素の破損をもたらすような欠陥を排除することが必要となる。そのためには、性能低下を招く欠陥の適確な把握と排除すべき欠陥の限界評価の確立が重要である。欠陥の検出は非破壊検査によるのが普通であるから、溶接部の品質は非破壊検査に起因する諸因子の影響を受けるのは当然である。

非破壊検査においては、必ずしも欠陥の状態が正確に把握されるわけではない。すなわち、欠陥検出能力という非破壊試験のもつ信頼性の存在が検査後の溶接品質に影響を与える^{1,2)}。また、非破壊検査で通常採用されている抜取り検査などは同じく確率的要因であり、溶接品質の支配因子となろう。このような現状を考慮するとき、検査後の溶接品質は非破壊試験の欠陥指示寸法の情報のみから判断できないことがわかる。更に欠陥指示寸法に対する採否許容限界は性能面からの欠陥の許容限界とは異なるものであることが予想される。

本報告では、この点に注目し、非破壊試験の欠陥検出能力を考慮した検査後の溶接品質に関して解析的、数値実験的考察を行う。そこで、溶接部の品質と非破壊試験

*原稿受付 昭和55年2月7日(昭和54年5月第55回WD分科会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 清水建設(株)研究所 Member, SHIMIZU Construction Co., Ltd

との関係の把握の仕方の基本的な考え方と、その品質への諸因子の影響を考察するために、ここでは、とくに骨組構造物で用いられる超音波探傷試験を例にとって具体的な解析例を示す。

2. 超音波探傷試験の欠陥検出能力

非破壊試験の信頼性(欠陥検出能力)には、1)欠陥が試験によって検出され得るかを表す検出確率、と、2)検出された欠陥の指示寸法の実寸法に対する精度、の2つが考えられる。非破壊試験の信頼性の検討は、従来実験室的なものが多く^{3,4)}、現実には使用されている試験法に関するデータは皆無といってよい。その信頼性は、非破壊試験に用いる装置、検査員、欠陥の判定方法、対象欠陥の種類などの多くの因子に起因する。例えば Packman³⁾や Herr, Marsh⁴⁾などが検出能力や Human Error に関する調査を行った例があるが、その一般的傾向はなかなかつかみにくのが実情である。

著者らは、別報に詳細を述べるように、建築鉄骨の現場溶接に用いられる超音波探傷試験を取り上げ、現行建築学会基準によった場合の超音波探傷試験の欠陥検出能力について検討した⁵⁾。Figs. 1, 2 は、その検出確率、精度に関する結果の代表例を示したものである。Fig. 1 は、2つの超高層ビルを対象に、手動探傷の欠陥検出率について調査した結果を示したものである。すなわち、同一継手に対して自動探傷と手動探傷を適用し、両者で発見された欠陥の和集合を100%と仮定して手動探傷による欠陥検出率を求めたものである。自動探傷、手動探傷で100%の欠陥が必ずしも発見できるわけではないが、従来の研究結果^{3,4)}なども考慮すると建築学会基準の手動探傷では、Fig. 1 に示す検出確率に近いものを有していると判断される。すなわち、長さ a の実欠陥が発見される確率 $D(a)$ は、

$$D(a) = (1 - a_0/a)^{\gamma} \quad (a \geq a_0) \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされ、骨組構造物現場溶接では $a_0 = 5 \text{ mm}$ 、 $\gamma = 1$ 程度とみなせる。

一方、Fig. 2 は人工的に欠陥を含む溶接部を作成し、それに対して検査員、検査回数などを変えて得た指示長さのばらつきと実寸法を示した代表例である。今回の調査では、欠陥指示長さの平均値はほぼ実欠陥寸法と対応している。また試験のばらつきは欠陥の種類に依存し、割れ状の欠陥では、そのばらつきの標準偏差 σ_A は3 mm 程度である。Fig. 2 からわかるように、実寸法 a のものを A の大きさと判断する確率密度 $f(A/a)$ はほぼ正規分布⁷⁾に近く、

$$f(A/a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_A} \exp\left\{-\frac{(A-a)^2}{2\sigma_A^2}\right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Fig. 1 Probability of detection of defect by ultrasonic examination

Fig. 2 Accuracy of measuring the length of defects by ultrasonic examination

と表され、 $\sigma_A \approx 3 \text{ mm}$ と見ればよいようである。

以下の具体的解析においては、検出能力は(1)、(2)を基準とし、更に超音波探傷の検出能力は今回の調査の結果を代表例として用いる。なお、他の検査手法を用いる場合には、当然ここで用いるものと定量的に異なることに注意しなければならない。

3. 非破壊試験の欠陥検出能力を考慮した検査後の溶接部の信頼性

3.1 検査後の溶接部の信頼性

いま、構造物の使用要求性能の見地から溶接部に許容される欠陥寸法が明らかにされており、その最大欠陥代表寸法が a_{cr} であるとする。もし、非破壊試験によってすべての欠陥が実体どおりに把握されるのならば、 a_{cr} を超える寸法の欠陥に対して補修を行うことによって、溶接部は性能面から100%の信頼性が得られることになる。しかし、現実には非破壊試験には一定の欠陥検出能力があり、また、抜き取り検査などの手法がとられるため、必ずしも信頼性は100%とはいえない。本論文では、

いくつかの溶接部をもつ構造物において、限界寸法 a_{cr} は既に与えられているとし、その構造物の検査後の溶接部の信頼性 R を

$$R = \text{検査後に } a_{cr} \text{ を超える寸法の欠陥が残存しない確率} \quad \dots\dots\dots(3)$$

と定義する。

一般には、一定の検出能力 ($D(a)$, $f(A/a)$ など) をもつ非破壊試験が一定の抜取り率 p_s でもって適用され、試験で指示された欠陥寸法に対して一定の採否 (補修) 限界寸法 A_{cr} を超える欠陥について補修されるという検査体制がとられている。この場合の検査後の信頼性 R は、もしその構造物の溶接部に発生する欠陥の実寸法 a に対する確率密度 $p(a)$ がわかっているならば、確率論的解析手法あるいはモンテカルロ法による数値実験的シミュレーション手法などによって求めることができる。解析的手法によると、 R の値は、1 から a_{cr} 以上の寸法の欠陥が残存する割合を引いたもので求められ、この a_{cr} 以上の残存欠陥率は、非破壊試験によって a_{cr} 以上だけれども発見できなかったものと、 a_{cr} 以上だけれども A_{cr} 以下の寸法と判断してしまったものの和で与えられるので、結局

$$R = 1 - \int_{a_{cr}}^{\infty} p(a) [1 - p_s \cdot D(a)] \cdot \left[\int_{A_{cr}}^{\infty} f(A/a) dA \right] da \quad \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。また、Fig. 3 は検査シミュレーションの手順を示したもので、(4)式は、検査対象が数多くある場合に対応するのに対して、シミュレーションによれば有限の検査対象に対する結果のばらつきなどが把握できる。

Fig. 3 Flow chart of sampling inspection considering the reliability of ultrasonic examination

3.2 実欠陥寸法分布の推定

前項のように検査後の溶接部の信頼性 R を求めるにはその構造物の欠陥の実寸法分布関数 $p(a)$ を明らかにしておく必要がある。しかし、現実の非破壊検査で得られる情報は欠陥指示寸法分布である。いま、適用される非破壊試験の信頼性がわかっているならば、従来の同種構造物の欠陥指示寸法分布から、Fig. 4 に示す手順によって実欠陥寸法分布の密度関数 $p(a)$ が推定できる。

例えば、Fig. 5 はある超高層ビル (20階、S 造) の鉄骨現場溶接における欠陥指示寸法分布を示したものであり、Fig. 6(a) は、これを用いて前述の超音波探傷の検出確率と抜取り率を考慮して求めた実欠陥寸法分布を示してある。この場合 $p(a)$ は、

$$p(a) = \lambda a^{m-1} e^{-\lambda a^m} \quad \dots\dots\dots(5)$$

なる2母数 Weibull 分布⁷⁾と仮定し、 λ , m を決定した。

Fig. 6(b), (c) は、この実欠陥寸法分布を用いて検査過程をシミュレートして得られた欠陥指示寸法分布(実線)と残存欠陥寸法分布であり、この場合には一例として

Fig. 4 Procedure for estimating actual defect length distribution

Fig. 5 An example of the indicated defect length distribution obtained from field welding in a steel building construction

Fig. 6 Results of the simulation concerning the reliability of welds

$A_{cr} = a_{cr} = 60 \text{ mm}$ と設定した。この a_{cr} の値は、超高層ビルの設計設定条件から従来の著者らの研究結果⁶⁾をもとに計算した値である。(c)図における塗りつぶした $a_r \geq a_{cr}$ なる欠陥の残存確率は破損確率 f を表しており、信頼性 R は $R = 1 - f$ から求められる。この構造では本シミュレーション結果によると平均信頼性 $\bar{R}$ は 99.57%と求まる。

このような検査後の溶接部の信頼性は、非破壊試験の検出能力、補修限界 A_{cr} 、抜取り率 p_s 、及び、抜取り手法、(d)非破壊試験の検出確率指数 a_0 in $D(a)$, (e)非破壊試験の検出精度指数 σ_A in $f(A/a)$ などがある。これらの因子の影響について、Fig. 6の実欠陥寸法分布と建築鉄骨の超音波探傷試験を対象として検討した結果を示す。なお、以下では a_{cr} は既与えられたものと考え、ここでは主に $a_{cr} = 60 \text{ mm}$ とし

4. 検査後の溶接品質に及ぼす諸因子の影響

非破壊検査後の溶接品質(信頼性)を支配する主な因子は、(a)検査対象数 N , (b)補修限界寸法 A_{cr} , (c)抜取り率 p_s , 及び、抜取り手法、(d)非破壊試験の検出確率指数 a_0 in $D(a)$, (e)非破壊試験の検出精度指数 σ_A in $f(A/a)$ などがある。これらの因子の影響について、Fig. 6の実欠陥寸法分布と建築鉄骨の超音波探傷試験を対象として検討した結果を示す。なお、以下では a_{cr} は既与えられたものと考え、ここでは主に $a_{cr} = 60 \text{ mm}$ とし

て解析してある。

Fig. 7 は、検査対象数 N が信頼性 R に及ぼす影響を示したもので、実線はシミュレーションによって得られる R の平均を鎖線は R のばらつきを考えた95%信頼下限である。図のように N が多いとばらつきも小さく解析的手法($N = \infty$)に近づくが、 N が少なくなるにつれて、 R の信頼下限は低くなり、検査対象個数が少なければそれだけ溶接品質が悪くなることもあることを示している。

Fig. 8 は、シミュレーションより求められる一定の検出能力をもつ非破壊試験を適用したときの設定補修限界 A_{cr} と溶接部の信頼性 R の関係を示したものである。補修限界 A_{cr} をその構造物の欠陥許容限界 a_{cr} よりも小さく設定すれば、 R の値は大きくなり、溶接品質が向上する。同時にこの R - A_{cr} 関係は、ある程度 A_{cr} を

Fig. 7 Effect of the size of sample on the reliability of welds

Fig. 8 Relation between critical level for repair and the reliability of welds

Fig. 9 Effect of the defect detectability of NDT on the reliability of welds

小さくすれば、それ以上 A_{cr} を小さく設定しても R はほとんど変化しなくなり、溶接品質の向上は望めないことを示している。そのようなほぼ一定の R を示す A_{cr} の値は非破壊試験の検出精度の影響が大きいことが図からうかがえる。いずれにしても溶接品質の点から非破壊試験が一定の検出能力をもつ場合、補修限界 A_{cr} を a_{cr} よりも小さく設定する必要性が示唆されている。

Fig. 9 は、非破壊試験の欠陥検出能力が信頼性 R に及ぼす影響を示したもので、当然ながら欠陥検出能力が悪くなると、すなわち a_0 や σ_A が大きくなると信頼性 R は低下する。しかし、次報に詳述するように a_0 が大きくなる場合と σ_A が大きくなる場合では R の低下をもたらす原因が異なり、 a_0 が大きくなると $a > a_{cr}$ の欠陥を発見することができず見逃すことによって R が低下するのに対して、 σ_A が大きくなると $a > a_{cr}$ の欠陥を $A < A_{cr}$ と過小評価して補修しないことによって R が低下する。

一般には抜取り検査が採用される場合が多いが、抜取り率 p_s が定まると、(4)式から

$$R = 1 - \int_{a_{cr}}^{\infty} p(a) da + p_s \int_{a_{cr}}^{\infty} p(a) \cdot D(a) \cdot \int_{A_{cr}}^{\infty} f(A/a) da \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、検査対象、試験方法が一定の場合

$$R = (1-k) + p_s k_1 \quad \dots\dots\dots(7)$$

の形となって、 R と p_s は線形関係にある。ここで k , k_1 は実欠陥分布、非破壊試験の信頼性、 A_{cr} に依存する量である。 k_1 の値は $R-p_s$ 関係の傾きを示し、 A_{cr}/a_{cr} , a_0/a_{cr} , σ_A/a_{cr} が小さくなるほど大きくなる。こ

Table 1 Relation between the defect rate and the weld conditions in steel building constructions (Column-beam welded joints)

		Upper flange		Lower flange	
		RG > 7mm	RG ≤ 7mm	RG > 7mm	RG ≤ 7mm
Defect rate (%)	A > 30mm	0.844	0.933	1.865	4.637
	A > 60mm	0.563	0.685	0.622	2.859

A: Indicated defect length

RG: Root gap (Single-bevel-groove with backing plate)

Defect rate; No. of defects/No. of joints which are included in each condition

のように R の値は p_s によって一意的に定まるので、抜取り率のみを指定するような手法（補修は検査不合格部のみ）によって溶接品質の十分な確保がなされるとは限らない。

ところで、欠陥の発生確率は溶接諸条件に依存している場合が多い。Table 1 は超高層ビル2例（5449検査箇所）を例にとって柱・梁接合部の現場溶接での大きな欠陥発生状況を上・下フランジ別とルート間隔7mm以上と以下の4組合せの場合について示したものである。この表から鉄骨現場溶接では下フランジでルート間隔7mm以下の場合は他の場合よりも欠陥発生率が高いことがわかる。このような欠陥の高発生確率部が溶接諸条件との関係でわかっている場合には、その場所を選択的に抜取することは非破壊検査上有利と予想される。Fig. 10は上記4組合せのうち、下フランジ・ルート間隔7mm以下の場合のみを他の場合に比べて5倍だけ余分に抜取ったときの検査後の溶接部の信頼性 R と平均抜取り率 $\bar{p}_s$ との関係を示したものである。このような高発生確率部選択抜取り手法を採用すると同一の平均抜取り率であっ

Fig. 10 Relation between the sampling ratio and the reliability when examination applied with emphasis on the joints where defects occur more frequently

ても, Random sampling の場合に比べてより大きな信頼性 R が得られ, この場合 S を大きくとるほど R が大きくなる。

抜き取り検査の採用に対しては, このような欠陥発生と溶接諸条件の関係を把握し, 抜き取り手法の合理化を図ることが必要である。

5. 結 論

非破壊試験の欠陥検出能力を考慮した検査後の溶接品質 (溶接部の信頼性) の解析手法の具体化を試み, 次のような結論を得た。

(1) 非破壊検査後の溶接品質は, 非破壊試験の欠陥検出能力と補修限界の設定の相互効果によって決まる。そして非破壊試験の検出能力に応じて, 補修限界は要求性能から定まる欠陥の許容限界 a_{cr} よりも小さく設定する必要性が指摘された。

(2) 非破壊試験の欠陥検出能力が低下すると, 一定の検査手法のもとでは溶接品質 R の低下をもたらす傾向がある。その低下の程度は, 検出確率指数 a_0 や精度指数 σ_A に依存するが, a_0 や σ_A が a_{cr} に比べて小さな範囲では検出能力の増強が必ずしも大きな溶接品質の向上をもたらすとは限らない。許容限界 a_{cr} に見合った検査手法の選定が必要となる。

(3) 抜き取り検査では, 溶接品質 R は構造物の平均抜き取り率 $\bar{P}_s$ によって一義的に定まり, $R-\bar{P}_s$ は線形関係にある。したがって, 単純抜き取りは信頼性の点からはあまり意味がない。溶接諸条件と欠陥の発生確率との間に相関が認められる場合には, 高発生確率部選択抜き取りは信頼性 R の向上の点から意味がある。

なお, 本論文では具体例を示す意味において建築鉄骨溶接部を例にとり, 超音波探傷試験を対象として取り上げた。またこの場合, 性能面からの主たる考慮対象欠陥は平面状欠陥である。一般には対象構造物によって, 主たる保証性能が異なるし, 適用される非破壊試験法も種種のものが考えられる。このような場合には定量的にはここでの結果がただちに適用されないが, 溶接部の品質の考え方は全く同じであり, 同様な考察のもとにより高い品質を得る努力が必要となる。

文 献

- 1) 板垣 浩, 尾崎文夫, 根本知明: 構造物中の欠陥分布推定に関する一考察, 日本造船学会論文集, 139 (1976), 292
- 2) 北川英夫, 久田俊明: 圧力容器の非破壊検査の破壊力学的・信頼性工学的評価方法, 圧力技術, 17 (1979), 46
- 3) Packman, R. F.: Status of Non-Destructive Inspection Techniques with Special Reference to Welding Defects, Significance of defects in welded structure, Univ. of Tokyo Press., (1974), 9
- 4) Herr, J. C. and G. L. Marsh: NDT Reliability and Human Factor, Mat. Evaluation, Dec. (1978), 41
- 5) 中辻照幸, 藤盛紀明, 倉持 貢, 佐藤邦彦, 豊田政男: 建築鉄骨溶接部における超音波探傷試験の信頼性, 非破壊検査, 投稿中
- 6) 中辻照幸, 鈴木 進, 藤盛紀明: 鉄骨溶接部の欠陥評価に関する研究 (その3), 日本建築学会論概, 54-9 (1979), 1095
- 7) 確率論の応用に関しては, 例えば, 板垣, 岡村: 強度の統計的取扱, 培風館 (1979)