

建築鉄骨現場溶接部の品質保証に関する研究(その1)

—非破壊試験の欠陥検出能力が溶接部の信頼性に及ぼす影響—

中 辻 照 幸

倉 持 貢

藤 盛 紀 明

§ 1. まえがき

近年、超高層建築物のような大型構造物や重要な構造物のみならず、中小建築物にも構造主体に鉄骨が数多く用いられている。一般に、これらの鉄骨の接合方法には高力ボルト摩擦接合法および溶接接合法があるが、柱・はり接合のほとんどには溶接接合法が採用され、また、柱・柱接合およびはり・はり接合にも溶接接合法が多く採用されているのが現状である。このため、鉄骨の施工においては、溶接部の品質確保が重要な課題となっている。

溶接部の品質を確保するために、溶接工の技量、開先の状態および溶接条件等について、溶接前や溶接中に行なう管理によって溶接欠陥の発生を少なくする努力がなされているが、欠陥の発生を皆無とすることはできない。また、建築鉄骨では、溶接工の手作業で溶接を行なうのがほとんどで、この場合、偶発的に生じる溶接欠陥も避け得ない。このように溶接部に発生した欠陥を検出し、ある基準値以上の欠陥を補修して品質を確保するために、溶接後に非破壊検査が適用されている。

しかしながら、非破壊検査はある欠陥検出能力を有していると考えられるので、非破壊試験で検出され指示された欠陥寸法は、必ずしも溶接部に発生している欠陥の実寸法を示しているとはいえない。したがって、非破壊試験の結果からだけでは、溶接部に発生している欠陥の実態、すなわち溶接部の品質の状態を的確に評価できないと考えられる。

本研究では、以上の点に注目し、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、解析および数値実験による考察を行ない、溶接品質を信頼性で評価することを試みる。さらに、要求される信頼性を確保し、溶接部の品質を保証するためには、欠陥の補修限界基準や、抜取検査方法はどうかを検討し、非破壊検査体制の合理化手法を提案することを本研究の目的とする。

まず本報では、溶接部の信頼性評価方法を提示し、溶接部の信頼性に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響について検討する。さらに、溶接部の信頼性と非破壊試験の欠陥検出能力を考慮した補修限界欠陥長さの合理的な決定手法についても検討する。

§ 2. 溶接部の信頼性評価方法

2.1 信頼性の定義とその評価手順

本研究では、鉄骨溶接部の危険率(F)を、「継手性能確保の観点から許容される最大欠陥寸法を超える欠陥を含む継手が一つの建築物の全継手の中に存在する確率」と定義し、溶接部の信頼性(R)を $R=1-F$ と定義する。

図-1に、検査された溶接部の信頼性評価の手順を示す。信頼性評価手順は以下に示すとおりである。

(1)欠陥実長さの頻度分布($p(a)$ 、ここでは $p(a)$ をワイブル分布で近似)を推定する。

欠陥指示長さの頻度分布($p_d(A)$)は、欠陥実長さの頻度分布($p(a)$)、非破壊試験による欠陥検出確率($D(a)$)²⁾、欠陥長さの測定精度($f(A|a)$)²⁾を用いて式(1)で示される。

$$p_d(A) = \int_0^{\infty} D(a) \cdot f(A|a) \cdot p(a) da \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 a : 欠陥実長さ

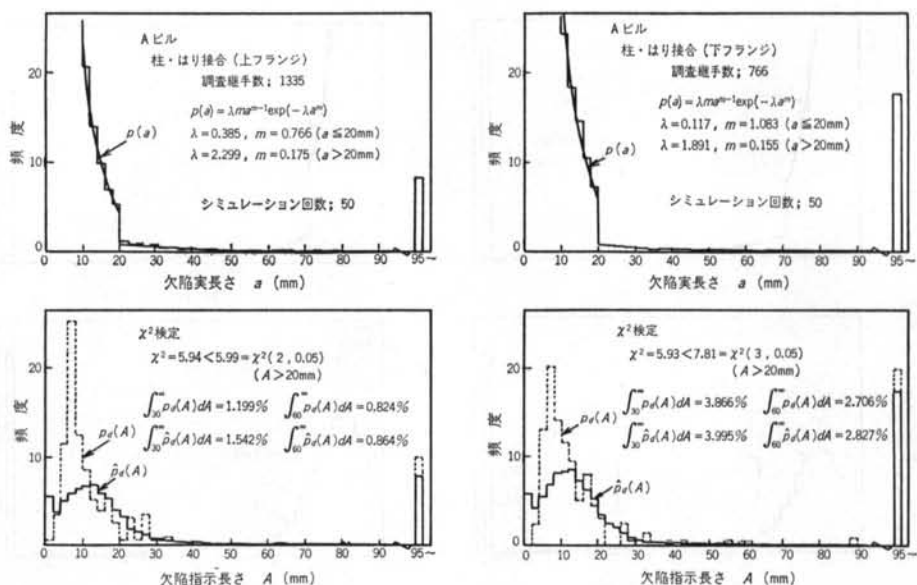
A : 欠陥指示長さ

式(1)から、現場で得た欠陥指示長さの頻度分布($p_d(A)$)に適合するようにワイブル分布($p(a)$)の母数を決定する。この決定した母数の適合度の検討には χ^2 検定を用いる。

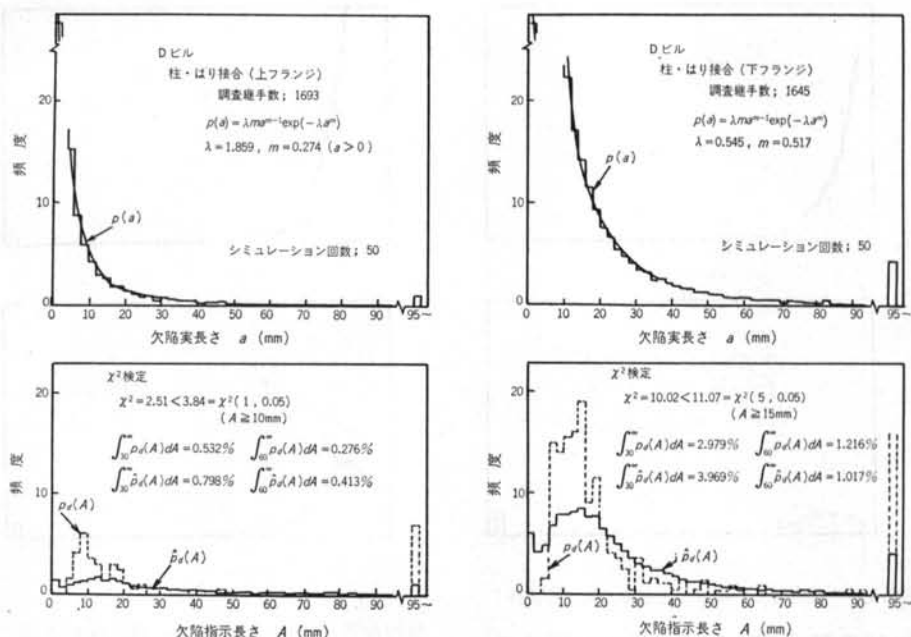
(2)検査通過後に残存すると仮想される欠陥実長さの頻度分布($p_r(a)$)を計算する。ただし、補修限界欠陥長さ(A_{cr})より大きな欠陥は補修するものとする。

$p_r(a)$ は次のようにして求められる。

(a)検出されなかった欠陥の確率密度



図一2 欠陥実長さの頻度分布の推定 (Aビル; 柱・はり接合)



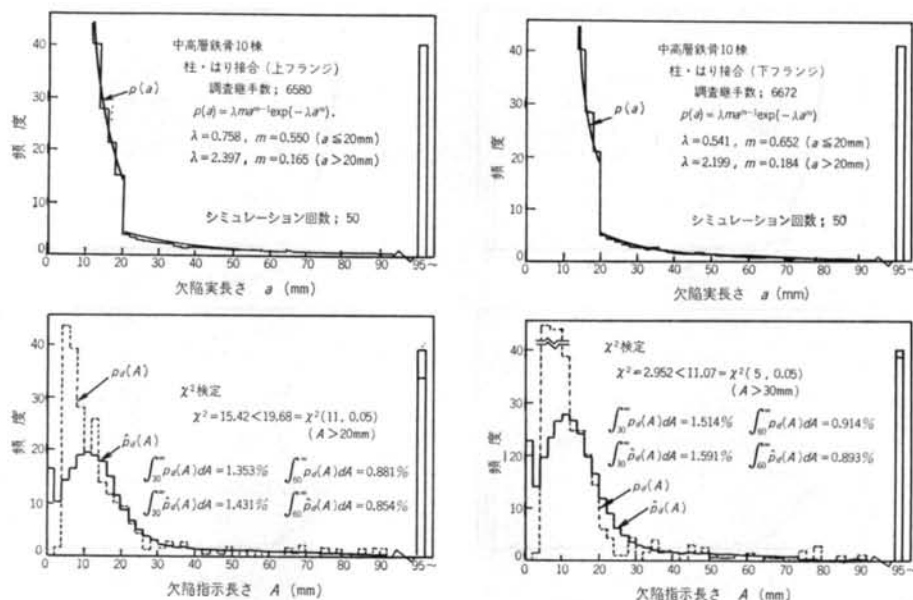
図一3 欠陥実長さの頻度分布の推定 (Dビル; 柱・はり接合)

2.3 建築鉄骨現場溶接部の信頼性の試算

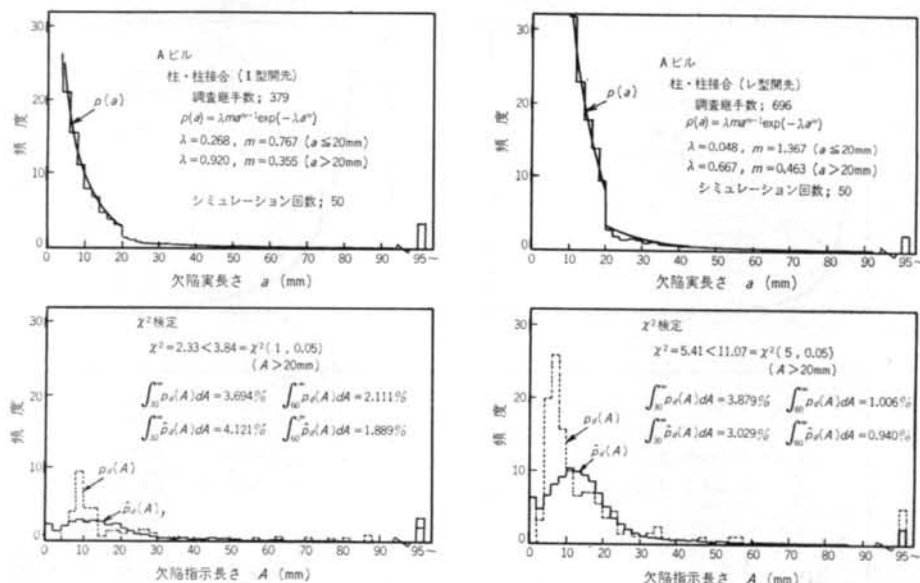
図一7～図一9は、前項で示した欠陥実長さの推定頻度分布 ($p(a)$) および実際の検査の抜取率を用いてA, Dビルおよび中高層鉄骨建築物の柱・はり溶接部の信頼性をシミュレーションによって試算した結果を示したものである。計算に際し、補修限界欠陥長さ (A_{cr}) は日本建築学会超音波検査規程の合格判定基準と同程度の値

として30mmを用いた。また、許容限界欠陥長さ (a_{cr}) については、参考文献3)に示す溶け込み不良を用いた欠陥の限界評価に関する実験結果のうち、欠陥高さ4mm、はりフランジ板厚25mm、溶接長300mmの許容限界欠陥長さ60mmを用いた。

以上の仮定に基づいて試算した各建築物の信頼性は、ほぼ98.7～99.6%程度であった。



図一 4 欠陥実長さの頻度分布の推定 (中高層鉄骨; 柱・はり接合)



図一 5 欠陥実長さの頻度分布の推定 (Aビル; 柱・柱接合)

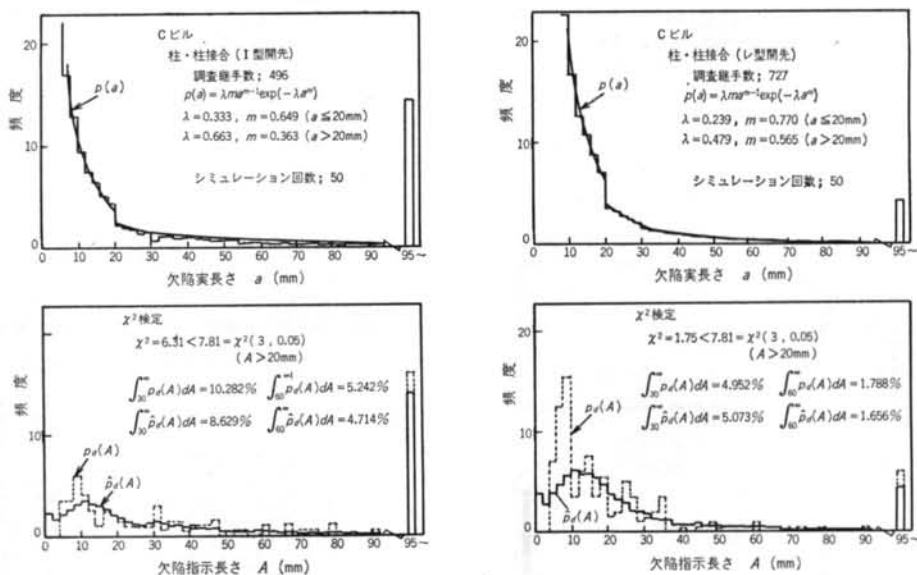
§ 3. 溶接部の信頼性に及ぼす検査諸因子の影響

非破壊検査後の溶接部の信頼性を支配する因子として以下のものが考えられる。

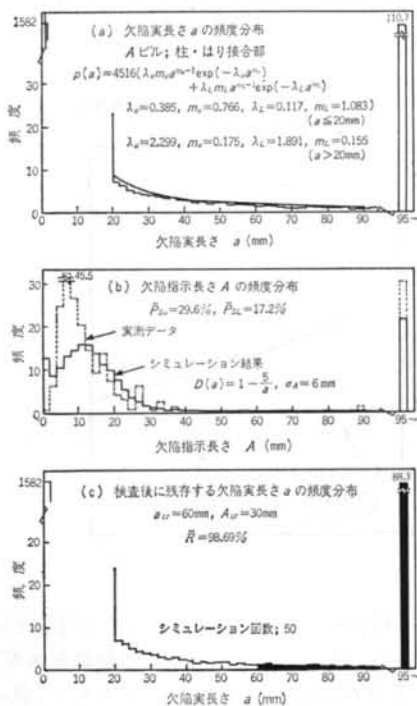
- (a) 溶接継手数 S
- (b) 補修限界欠陥寸法 A_{cr}
- (c) 非破壊試験の欠陥検出能力 $D(a)$, $f(A|a)$
- (d) 抜取検査手法および抜取率

抜取検査手法および抜取率に関しては次報で検討するので、本節では抜取率を 100% とし、(a), (b), (c) の因子が検査後の溶接部の信頼性に及ぼす影響について検討する。なお解析には、前節で上・下フランジ別に推定した D ビルの欠陥実長さの頻度分布を用いる。また、許容限界欠陥長さ a_{cr} は、主に前節で述べたように 60 mm に設定して解析を行なう。

3.1 溶接継手数の影響

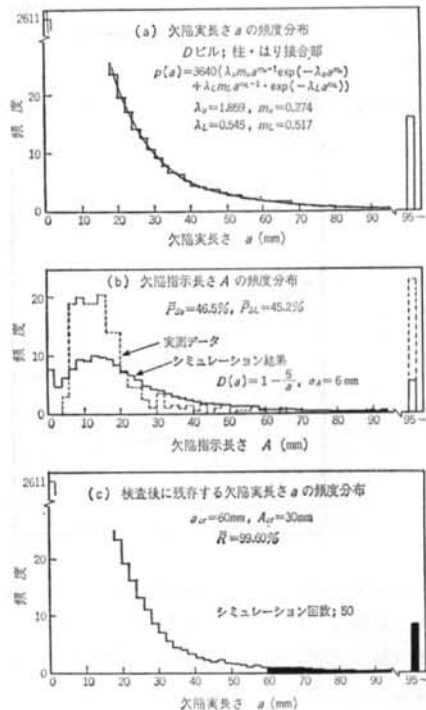


図—6 欠陥実長さの頻度分布の推定 (Cビル; 柱・柱接合)



図—7 溶接部の信頼性の試算 (Aビル; 柱・はり接合)

図—10は、溶接継手数 (S) が検査後の溶接部の信頼性 (R) に及ぼす影響について、Dビルの欠陥実長さの推定頻度分布を用いて計算した例である。図中の実線は信頼性の理論値 ($\bar{R}$) を、破線や鎖線は信頼性 (R) の95%信頼限界下限を示す。図—10から分かるように、溶



図—8 溶接部の信頼性の試算 (Dビル; 柱・はり接合)

接継手数 (S) が多いと信頼性 (R) のばらつきは小さく理論値 ($\bar{R}$) に近づくが、 S が少なくなるにつれ信頼性 (R) のばらつきは大きくなる。これは、溶接継手数 (S) が少ない場合、各シミュレーション毎の a_{cr} を超える欠陥数のわずかな変動に対して S が少ないためにその

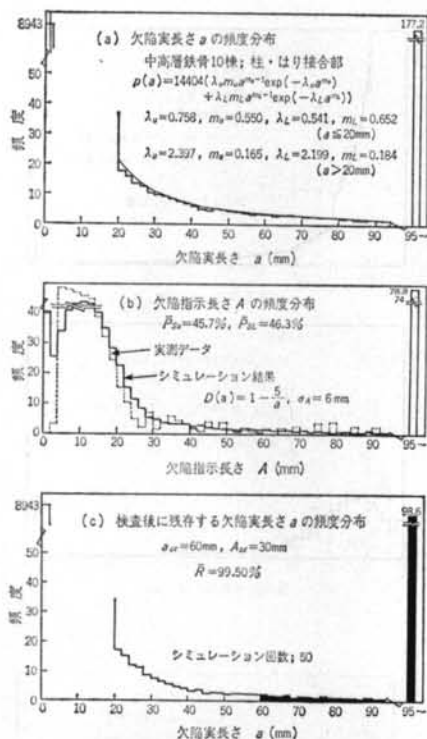
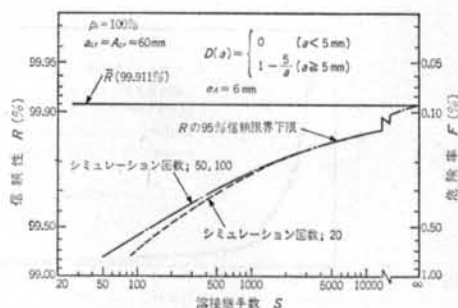


図-9 溶接部の信頼性の試算(中高層鉄骨:柱・はり接合)



図—10 溶接部の信頼性のばらつきに及ぼす溶接継手数の影響

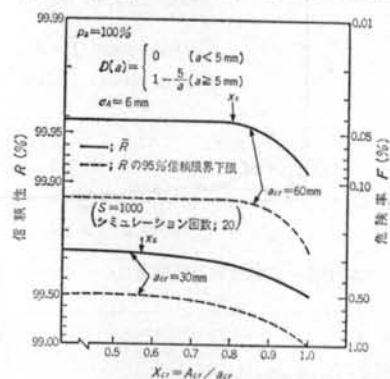
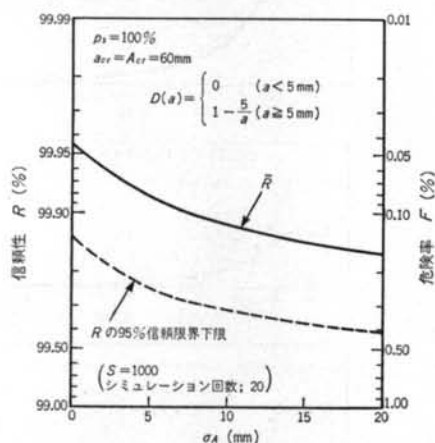


図-11 溶接部の信頼性に及ぼす補修限界欠陥長さの影響



図一12 溶接部の信頼性に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響

比率である危険率(F)の変動が大きくなるためと、 acr を超える欠陥の偶然の検出・非検出が溶接部の信頼性を大きく変動させるためである。このことは、溶接継手数が少ないと、場合によっては検査後の溶接部の品質にばらつきがみられる可能性があることを示している。

3.2 補修限界欠陥長さの影響

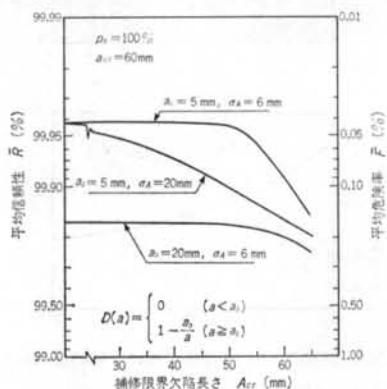
図-11は、参考文献2)で示した欠陥検出能力を有する超音波探傷試験を適用したときの、補修限界欠陥長さ

(A_{cr})と検査後の溶接部の信頼性(R)の関係を示したものである。図から分かるように、補修限界欠陥長さ(A_{cr})を許容限界欠陥長さ(a_{cr})より小さく設定すれば、溶接部の信頼性(R)の値は大きくなり、溶接品質が向上する。しかし、 A_{cr} をある程度以上小さく設定してもほとんど R は向上しなくなり、ほぼ一定値を示すようになる。(図では $A_{cr}=0$ のときの R より0.001%低下した R となる A_{cr} と a_{cr} の比を X_s とした。)

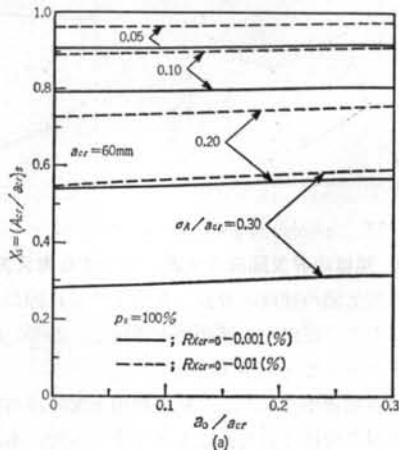
3.3 非破壊試験の欠陥検出能力の影響

図一12は、非破壊試験の欠陥検出能力が検査後の溶接部の信頼性に及ぼす影響を示したものである。当然ながら、非破壊試験の欠陥検出能力が向上するにしたがい、すなわち参考文献2)に示す欠陥検出確率を支配する指数 a_0 や欠陥長さの測定精度を支配する指数 σ_A が小さくなるにしたがい、溶接部の信頼性 (R) は向上する。

図一13は、溶接部の信頼性 ($\bar{R}$) と補修限界欠陥長さ (A_{cr}) 関係に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響を示したものである。図には、文献2)で示した超音波探傷試験の欠陥検出能力 ($a_0=5\text{ mm}$, $\sigma_A=6\text{ mm}$) に比較して、欠陥長さ測定精度が著しく劣る場合 ($\sigma_A=20\text{ mm}$) と欠陥検出確率が著しく劣る場合 ($a_0=20\text{ mm}$) について試算した例を示すが、 σ_A と a_0 では、それらの低下が溶接部の信頼性 ($\bar{R}$) の低下に及ぼす影響の様子が異なる。すなわち、 σ_A が大きく測定値のばらつきが大きい場合、補修限界欠陥長さ (A_{cr}) を小さく設定すれば溶接部の



図一13 溶接部の信頼性と補修限界欠陥長さ関係に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響



信頼性 ($\bar{R}$) は向上するが、 a_0 が大きい場合、 A_{cr} を小さく設定しても $\bar{R}$ は向上しない。これは、 a_0 が大きくなる場合と σ_A が大きくなる場合では $\bar{R}$ の低下をもたらす原因が異なり、 a_0 が大きくなると $a > a_{cr}$ の欠陥を発見できず見逃すことによって $\bar{R}$ 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 $A < A_{cr}$ と評価して補修しないことによって $\bar{R}$ が低下する。したがって、 σ_A が大きい場合は A_{cr} を小さく設定すれば、 $a > a_{cr}$ の欠陥を $A < A_{cr}$ と評価する確率が小さくなり信頼性は向上するのである。

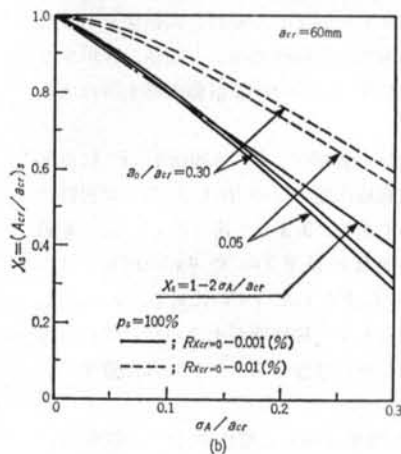
以上から非破壊試験の欠陥検出能力に応じて、補修限界欠陥長さ (A_{cr}) を設定する必要があることが分かる。

前項で許容限界欠陥長さ (a_{cr}) に比べて補修限界欠陥長さ (A_{cr}) をある程度以上 (このときの A_{cr} と a_{cr} の比を X_s と定義する) 小さく設定しても、溶接部の信頼性は向上しないことを述べた。以下、非破壊試験の欠陥検出能力が X_s に及ぼす影響について検討する。

欠陥実長さの頻度分布 ($p(a)$) にDピルの推定分布を用いて X_s に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響について計算した結果を図一14に示す。ここでの X_s の値は、 $\bar{R}$ が $A_{cr}=0$ のときの値より 0.01% および 0.001% 小さくなるときの A_{cr}/a_{cr} で与えている。この図から、 X_s は a_0 にはほとんど依存せず σ_A によって影響を受けており、また図一14(b)から、

$$X_s = A_{cr}/a_{cr} \doteq (a_{cr} - k\sigma_A)/a_{cr} \quad \dots\dots(9)$$

と表わされるので、 X_s を与える A_{cr} は a_{cr} より $k\sigma_A$ 小さい値であることが分かる。なお、本計算の条件のもとでは、 A_{cr} は a_{cr} より σ_A の2倍程度小さく設定すれば、 $A_{cr}=0$ とした場合の $\bar{R}$ より $a > a_{cr}$ の欠陥を $A < A_{cr}$ と評価することによる $\bar{R}$ の低下は 0.001% 程度となる。



図一14 X_s に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力

§ 4. 補修限界欠陥長さの決定手法

前節に、補修限界欠陥長さ (A_{cr}) を許容限界欠陥長さ (a_{cr}) より小さく設定することによって、より高い信頼性が得られることを示した。一方、 A_{cr} を必要以上小さく設定すると、当然ながら補修箇所数は増加する。これは現場工程や費用の面から好ましいことではなく、また HSE(Hot Straining Embrittlement) による継手性能の低下という問題もある。したがって、 A_{cr} の決定にはこれらの点も考慮した形でなされるべきである。本節では、まず補修率の問題をとりあげ、次いで補修限界欠陥長さ決定手法の合理化への考察を行なう。

4.1 補修率に及ぼす諸因子の影響

全溶接継手数 (S) に対する補修箇所数 (N_r) の割合を補修率 (r) と定義する。

欠陥指示長さの頻度分布 ($p_d(A)$) は、検査の抜取率 ($\bar{p}_d$) を考慮すれば式(1)から、

$$p_d(A) = \int_0^{\infty} \bar{p}_d \cdot D(a) \cdot f(A|a) \cdot p(a) da \quad \dots\dots(10)$$

となり、 $A > A_{cr}$ なる欠陥が補修の対象となるから、補修率 ($\bar{r}$) は、

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \int_{A_{cr}}^{\infty} p_d(A) dA \\ &= \bar{p}_d \left[\int_{A_{cr}}^{\infty} \int_0^{\infty} D(a) \cdot f(A|a) \cdot p(a) da dA \right] \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

で求められる。§.3 で溶接部の信頼性について述べたのと同様、式(11)は溶接継手数 (S) が十分大きな場合に成立し、 S が有限個の場合には、補修率は式(11)を平均値として、あるばらつきを有することになる。

図-15は、検査の抜取率が100%の場合について、溶接継手数 (S) が補修率へ及ぼす影響についてモンテカルロ法によるシミュレーションで検討した結果を示したものであるが、溶接部の信頼性の場合と同様、 S が少なくなるにつれて補修率 (r) の95%信頼限界上限は大きくなるのが分かる。

図-16は、溶接部の信頼性 ($\bar{R}$) と補修率 ($\bar{r}$) に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力 (a_0 および σ_A) の影響について示したものである。3.3でも述べたように、非破壊試験の欠陥検出能力の低下 (a_0 や σ_A の増加) はいずれの場合も $\bar{R}$ の低下をもたらすのに対し、 $\bar{r}$ に対しては全く逆の傾向にあり、補修率が大きいだけでは溶接部の信頼性は向上しない場合もあることには注意する必要がある。

また、検査の抜取率 ($\bar{p}_d$) と補修率 ($\bar{r}$) の関係は、式(11)から明らかのように線形関係にある。

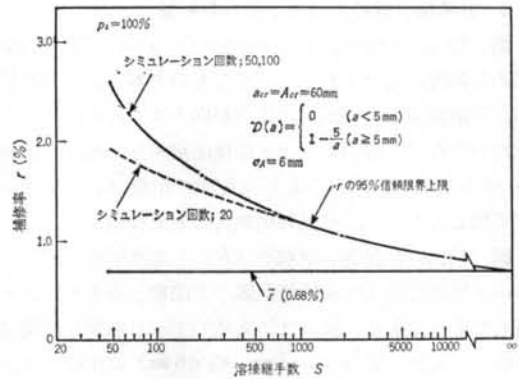


図-15 補修率のばらつきに及ぼす溶接継手数の影響

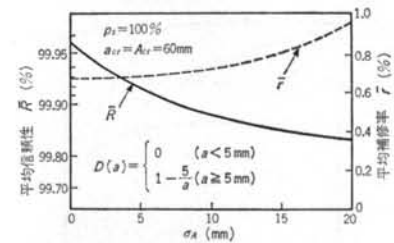
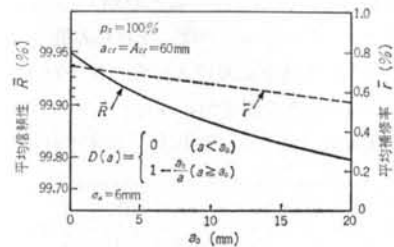


図-16 溶接部の信頼性と補修率に及ぼす非破壊試験の欠陥検出能力の影響

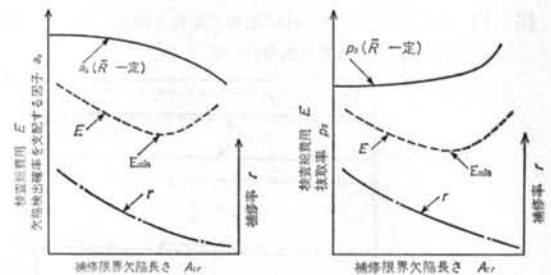
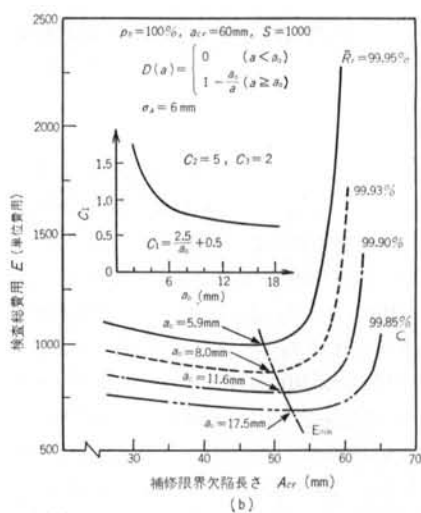
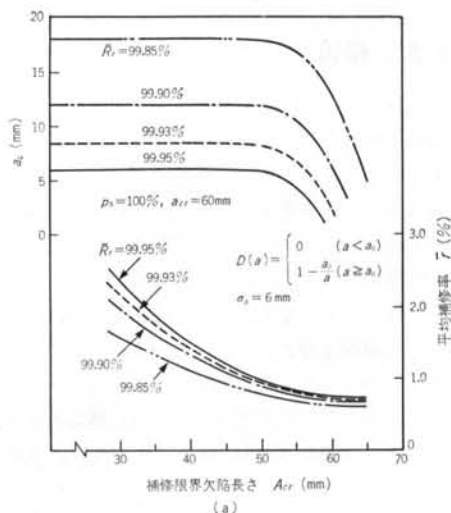


図-17 合理的な補修限界欠陥長さ決定の考え方の模式図

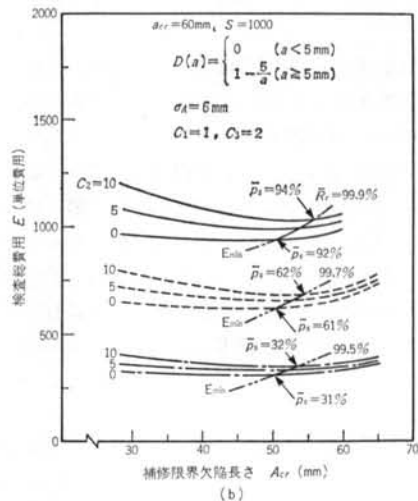
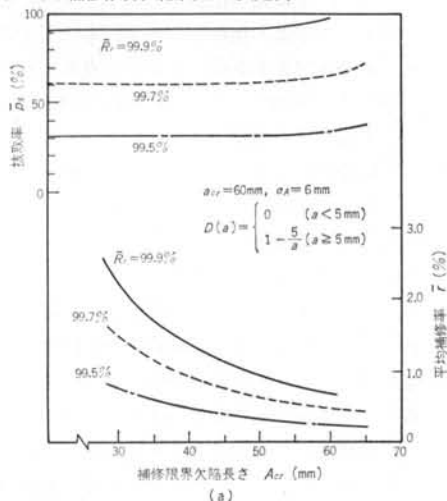
4.2 補修限界欠陥長さ決定の基本的な考え方

溶接欠陥の補修限界長さを決定するに際しては、溶接部にある一定以上の信頼性を確保し、かつ、検査費用が最小であることが望ましい。

検査総費用 (E) は、検査費用と欠陥採否判定後の補修費用に分けて考えることができるので、本論文では次式で与える。



図—18 合理的な補修限界欠陥長さの決定例



図—19 合理的な補修限界欠陥長さの決定例

$$E = C_1 \cdot (N_s + C_3 \cdot N_r) + C_2 \cdot N_r$$

$$= C_1 \cdot N_s + (C_1 \cdot C_3 + C_2) \cdot N_r \quad \dots\dots (12)$$

ここで、 N_s : 検査個所数

N_r : 補修個所数

C_1 : 1 検査当たりの費用

C_2 : 補修溶接費用

C_3 : 補修溶接後の再検査費用係数

この検査総費用 (E) は、溶接部に要求される信頼性、非破壊試験の欠陥検出能力、補修限界長さや検査の抜取率などに依存する。

図—17は、一定の溶接部の信頼性 ($\bar{R}$) を確保するための、欠陥検出確率を支配する指数 (a_0) (a_0 が大きいほど試験で欠陥を見逃す確率が高い) や抜取率 ($\bar{p}_s$) と補修限界欠陥長さ (A_{er}) の関係 (実線)、およびそれ

に対応する補修率 ($\bar{r}$) と A_{er} の関係 (一点鎖線) を定性的に示したものである。実線の関係から A_{er} を大きく設定すると、一定の信頼性 ($\bar{R}$) を得るためには、小さな a_0 をもつ試験を行なうか、大きな抜取率 ($\bar{p}_s$) で試験を行なう必要があり、そのため式(12)の C_1 なる一検査当たりの費用または検査個所数が増大し、結局検査総費用 (E) が増大する。一方、 A_{er} を小さく設定すると補修数が増大し、やはり E が増大する。したがって、図中の破線で示したように、検査総費用が最低になる非破壊試験条件が存在し、そのときの a_0 または $\bar{p}_s$ と A_{er} が最適条件であるといえる。

4.3 補修限界欠陥長さの決定例

図—18, 図—19は、前項で示した考え方に基づき、最

適と考えられる補修限界欠陥長さ (A_{er}) の決定の具体的な計算例を示したものである。溶接部に要求される信頼性 ($\bar{R}_r$) の計算に際して、許容限界欠陥長さ (a_{er}) は 2.3 と同様 60 mm に設定した。

図-18は、全数検査の場合について、欠陥検出確率を支配する指数 (a_0) と補修限界欠陥長さ (A_{er}) の最適値を求めた例を示したものである。図-18(a)は、要求信頼性 ($\bar{R}_r$) を 99.85%~99.95% に設定した場合に、各 $\bar{R}_r$ を確保するための a_0 と A_{er} の関係、およびそれらの関係に対応する補修率 ($\bar{r}$) と A_{er} の関係を示したものである。図-18(b)は、図に示すように一検査当たりの費用 (C_1) と a_0 の関係を $C_1=2.5/a_0+0.5$ (単位費用)、補修溶接費用 (C_2) を 5 (単位費用)、再検査費用係数 (C_3) を 2 と仮定し、図-18(a)で要求した信頼性 ($\bar{R}_r$) を確保するのに必要な検査総費用 (E) を求め、その E が最小となる条件から a_0 と A_{er} の組合せを決定した結果である。

また、図-19は同様の考え方に立って、検査の抜取率 ($\bar{p}_s$) と補修限界欠陥長さ (A_{er}) の最適値を求めた例である。図-19(a)は、要求信頼性 ($\bar{R}_r$) を確保するための $\bar{p}_s$ と A_{er} の関係、およびそれらの関係に対応する補修率 ($\bar{r}$) と A_{er} の関係を示したものである。図-19(b)は、図に示すように一検査当たりの費用 (C_1) を 1 (単位費用)、再検査費用係数 (C_3) を 2 と固定し、補修溶接費用 (C_2) のみを変化させ、それぞれの場合において $\bar{R}_r$ を確保するための検査総費用 (E) を求めたものである。この場合も、 $\bar{p}_s$ と A_{er} の最適値は E が最小となる条件から求めることができる。図から分かるように、同一信頼性 ($\bar{R}_r$) を確保するにしても、補修溶接費用 (C_2) が大きくなるにつれて、 $\bar{p}_s$ と A_{er} の最適値は $\bar{p}_s$ が高くなり、 A_{er} が大きくなる傾向にある。

以上の計算例から、 a_0 、 $\bar{p}_s$ や C_1 、 C_2 、 C_3 が異なっても、許容限界欠陥長さ a_{er} が 60 mm の場合、 A_{er} を 50 mm 程度に設定すれば検査総費用 (E) はほぼ最小になることが分かる。

§ 5. 結論

本論文では、非破壊試験の欠陥検出能力を考慮して、欠陥指示長さの頻度分布から欠陥実長さの頻度分布を推定する手法を示した。欠陥実長さの頻度分布はワイブル分布で近似できるようであり、そのようにして求めた欠陥実長さの頻度分布を用いて検査諸因子の信頼性に及ぼす影響について具体的な検討を行なった。さらに、溶接部の信頼性を一定水準以上に確保しつつ、検査費用を考慮した補修限界欠陥長さ決定手法についても検討した。以下に得られた主な結論を示す。

- (1) 調査した鉄骨建築物の柱・はり溶接部の信頼性は、許容限界欠陥長さを 60 mm と設定すれば、ほぼ 98.7%~99.6% であった。
- (2) 非破壊試験の欠陥検出確率や欠陥長さの測定精度が向上すれば、溶接部の信頼性は向上する。ただし、両者の向上が溶接部の信頼性の向上にもたらす原因は異なり、欠陥検出確率が高いと許容限界欠陥長さを超える欠陥を多く検出するために信頼性が向上するのに対して、欠陥長さの測定精度が高いと許容限界長さを超える欠陥を補修限界長さ以下と過小評価する確率が低くなることによって、信頼性が向上する。
- (3) 補修限界欠陥長さ (A_{er}) を許容限界欠陥長さ (a_{er}) より小さく設定すれば、溶接部の信頼性は向上するが、 $A_{er} \leq a_{er} - 2\sigma_A$ の範囲では溶接部の信頼性はほとんど向上しなくなる。逆に、補修限界欠陥長さを小さく設定しすぎると、補修数が増加するばかりでなく補修溶接による溶接部の性能の低下も懸念される。したがって、合理的な非破壊検査を考える場合、経済性も考慮した本論文に示した方法で補修限界欠陥長さを決定すればよいと考えられる。

謝辞 本研究は、大阪大学 佐藤邦彦教授ならびに豊田政男助教授との共同研究として行なわれたものであり、また、数値実験のプログラム開発には大阪大学 南二三吉助手の御協力を得た。末筆ながら謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 中辻, 藤盛, 倉持: “建築鉄骨現場溶接部の欠陥発生状況の調査研究” 日本建築学会論文報告集 第314号 (昭和57年4月)
- 2) 中辻, 倉持, 藤盛, 小早川: “超音波探傷試験の信頼性” 清水建設研究所報 第34号 (昭和56年4月)
- 3) 中辻, 藤盛, 鈴木: “建築鉄骨溶接部における溶接欠陥の限界評価に関する研究 (その2)” 清水建設研究所報 第32号 (昭和55年4月)