溶接継手の静的強度に関する信頼性の見地からみた 溶接金属と母材の適合性に関する一考察*

佐藤 邦彦** 豊田 政男**

Matching between Base Metal and Weld Metal on viewpoint of Reliability of Welded Joints on Static Tensile Strength*

by Kunihiro Satoh** and Masao Toyoda**

Abstract

Mechanical properties of steels and welding rods are usually random variables, so mechanical properties of welded joints which are made using those materials are also them. In this report, it is pointed out that the reliability of welded joints on static tensile strength must be considered in discussion about matching between base metal and weld metal. The average tensile strength $\bar{\sigma}_w^W$ of weld metal is dependent upon the reliability of welded joints, the form of frequency histogram of their strength and the parameter r which decides the lowest required strength of weld metal. A few calculations about the average tensile strength $\bar{\sigma}_w^W$ of weld metal were done and the effects of the reliability, r -value and frequency distributions on strength were considered. On these calculation results, the problem of matching was discussed in relation to the reliability.

1. 緒 言

溶接継手の継手性能をじゅう分に保証するために必要な溶接金属の最低強度を定めることは重要ではあるが、困難な問題点も多い。前報¹⁾においては、母材と同等の継手強度と延性を保証するのに必要な軟質度について明らかにしてきた。ところで通常の鋼材や溶接金属はその材料としての保証強度は満足されるように作製されているが、それらの強度はバラツキをもっているのが普通である。このように強度にバラツキをもつ母材と溶接金属の組合せで作られた溶接継手の強度にもバラツキがみられるはずである。したがって、溶接継手の強度が溶接構造物の性能上必要な強度を越える確率、すなわち強度に関する継手の信頼性は母材および溶接金属の引張強さの頻度分布や溶接金属の必要最低強度に依存することになる。

これまで、継手強度の信頼性を考えた母材と溶接金属の適合性に関する考察はなされておらず、さらに信頼性値をいくらにとるべきか、あるいはいくらにとって溶接材料を作製しているのかなどについても明らかな情報がない。溶接金属の必要最低強度を定めることの必要性和

ともに継手強度の信頼性をじゅう分に保証するためには溶接材料の作製にあたって、その強度たとえば溶接金属の引張強さの平均値としていくらを目標とすべきかなどは重要な問題である。

本報においては溶接継手の静的引張（延性）強度に注目し、それに関する信頼性を考慮した場合の母材と溶接金属の引張強さの適合性についての計算例を示し、現実の溶接材料を用いた場合の継手の信頼性や、溶接金属の必要最低強度に関する問題提起を行なう。

2. 母材および溶接金属の引張強さの バラツキと継手強度の信頼性

2.1 母材および溶接金属の引張強さのバラツキ

通常の鋼材および溶接材料の機械的性質は一定の基準（たとえば規格）が満足されるように製作されているが、それらの値はバラツキを持っているのが普通である。本論文で問題としている引張強さに関してもバラツキがみられ、Fig. 1 は一例として日本溶接協会 Q T 委員会²⁾の調査による HT60, HT70, HT80 の鋼材の引張強さの頻度分布を示したものである。同じく Fig. 2 は HT80 用の溶接金属（全溶着金属試験片）の引張強さの頻度分布についてすでに発表されている論文を調査した結果を示したものである。一般に、鋼材の引張強さは材料の設計の基準となる強度（保証強度）を満足し、そ

* 原稿受付 昭和48年 9月17日 (48年度春季全国大会に発表)

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka University.

Fig. 1 Frequency histograms of tensile strength
(a) HT60, (b) HT70, (c) HT80

Fig. 2 Frequency histogram of tensile strength of HT80 weld metal

Table 1 Average tensile strength $\bar{\sigma}_u$ and standard deviation s for various kinds of steel and weld metal

	$\bar{\sigma}_u$ kg/mm ²	s kg/mm ²	$s/\bar{\sigma}_u$
HT 80 ($t=6\sim12$)	85.4	2.87	0.036
HT 80 ($t=13\sim29$)	84.4	1.97	0.025
HT 80 ($t=30\sim$)	85.1	2.03	0.025
HT 80 (weld m.)	85.2	2.36	0.030
HT 70	75.7	2.18	0.031
HT 60	64.3	2.80	0.047

s : standard deviation

れよりも幾分大きな引張強さを平均値とするような分布をもっている。Table 1 に調査された範囲における引張強さの平均値 $\bar{\sigma}_u$ および標準偏差 s を示してある。

ここでは、母材および溶接金属の引張強さの頻度分布

を Table 1 に示す平均引張強さと標準偏差をもつ正規分布と仮想し、次のような密度関数で与えられるとする。

母材の引張強さ σ_u^B :

$$f(\sigma_u^B) = \frac{1}{s^B \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_u^B - \bar{\sigma}_u^B}{s^B} \right)^2 \right]$$

溶接金属の引張強さ σ_u^W :

$$f(\sigma_u^W) = \frac{1}{s^W \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_u^W - \bar{\sigma}_u^W}{s^W} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ただし

$\bar{\sigma}_u^B, \bar{\sigma}_u^W$: 平均引張強さ

s^B, s^W : 標準偏差

Fig. 3 は HT80 鋼材に対する調査された頻度分布 (Fig. 1 (c) の全調査結果のまとめ) と本論文において (1) 式のように仮想した正規分布とを比較したもので、図中の点線が (1) 式より計算した正規分布である。実際

Fig. 3 Frequency histogram of tensile strength of HT80 steel

の鋼材の引張強さのパラッキも、ほぼ正規分布で表わされるようである。

2.2 溶接継手の静的引張強度の信頼性

前項の (1) 式に示したような引張強さの密度分布をもつ母材と溶接金属で作製した溶接継手の信頼性について考える。

ここで考えている溶接金属の強度は実際に溶接継手を作製した場合の溶接金属における強度をさし、母材、開先形状、溶接方法などによって、多少全溶着試験片 (例えば J I S 法などによる) で得られる強度とは異なる。以下の計算にあたって溶接金属の強度は継手における溶接金属の強度とする。

いま、溶接継手の使用性能を十分に保証するのに必要な溶接金属の引張強さを $r \times$ (母材の引張強さ) とする。ここで r は継手として要求される性能などによって定ま

る値である。従来の overmatching の原則に立つとき $r \geq 1.0$ ということになる。このような r を導入するとき、溶接継手の信頼性は溶接金属の引張強さが溶接金属として必要とされる引張強さを越える確率で与えられる。

ここで、

$$X \equiv \sigma_u^W - r \sigma_u^B \quad (2)$$

とおくと、 X の密度関数 $f(x)$ は $f(\sigma_u^W)$ と $f(r\sigma_u^B)$ の差の密度として次式のようにになる。つまり

$$f(X) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}}{sX} \right)^2 \right] \quad (3)$$

なる密度関数をもつ正規分布となり、 $\bar{X}$, sX は

$$\bar{X} = \bar{\sigma}_u^W - r \bar{\sigma}_u^B \quad (4)$$

$$sX = \sqrt{(s^W)^2 + (rs^B)^2} \quad (5)$$

である。溶接継手の信頼性は X が正となる確率で与えられる。確率 $P(X > 0)$ は

$$P(X > 0) = \frac{1}{sX\sqrt{2\pi}} \times \int_0^\infty \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - \bar{X}}{sX} \right)^2 \right] dX \quad (6)$$

となる。ここで $z = \frac{X - \bar{X}}{sX}$ とおくと

$$P(X > 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\bar{X}/sX} \exp \left(-\frac{z^2}{2} \right) dz \quad (7)$$

ここで

$$\frac{\bar{X}}{sX} = \frac{\bar{\sigma}_u^W - r \bar{\sigma}_u^B}{\sqrt{(s^W)^2 + (rs^B)^2}} \quad (8)$$

$P = P_0$ になる z を z_0 とすると、(8) 式より溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ は

$$\bar{\sigma}_u^W = r \bar{\sigma}_u^B + z_0 \sqrt{(s^W)^2 + (rs^B)^2} \quad (9)$$

$s^W = s^B$ のときには $\bar{\sigma}_u^W = r \bar{\sigma}_u^B + z_0 \sqrt{1 + r^2} s^B$ (10)

母材の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^B$ がその母材の保証強度 σ_u^D に対して

$$\bar{\sigma}_u^B = \sigma_u^D + a \cdot s^B \quad (11)$$

であるとする、(9) 式より

$$\frac{\bar{\sigma}_u^W}{\sigma_u^D} = r + \frac{s^B}{\sigma_u^D} \left\{ a \cdot r + z_0 \sqrt{\left(\frac{s^W}{s^B} \right)^2 + r^2} \right\} \quad (12)$$

となる。

(12) 式に示すように、溶接金属の必要平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ は溶接継手の信頼性 P_0 (あるいは z_0)、溶接金属の最低必要引張強さを決める r 値および材料の強度のバラツキを示す標準偏差 s などに依存する。逆に信頼性 P_0 は $\bar{\sigma}_u^W$, r , および s に依存して決まる。

3. 継手の信頼性を考えた溶接金属の平均引張強さの計算例

3.1 信頼性と溶接金属の平均引張強さ

まず、溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と継手の信頼性の関係についての計算例を示す。母材や溶接金属の引張強さの分布は例えば Table 1 に示すような平均値と標準偏差をもっているが、本項ではそれらの代表値として

$$s^B/\sigma_u^D = s^W/\sigma_u^D = 0.025, a = 2.5 \quad (13)$$

を選び $\bar{\sigma}_u^W$ についての計算を行なう。

溶接金属の平均引張強さと信頼性の関係には前項にも示したように、 r 値が影響を与える。Fig. 4 は溶接金属の引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と r 値の関係をいろいろな信頼性 P_0 に対して示したものである。 $\bar{\sigma}_u^W$ は r 値および信頼性 P_0 が大きくなるほど当然大きくなる。Fig. 5 は同じ計算結果を溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と信頼性 P_0 の関係に書きなおしたもので、 r 値の代表値として $r = 0.9$ と $r = 1.0$ の場合について示してある。 $\bar{\sigma}_u^W$ は P_0 が大きく

Fig. 4 Effect of reliability on relationship between average tensile strength of weld metal $\bar{\sigma}_u^W/\sigma_u^D$ and r -value

Fig. 5 Relationships between $\bar{\sigma}_u^W/\sigma_u^D$ and reliability P_0

Table 2 Effect of reliability on average tensile strength of weld metal
 $\sigma_u^B = 85 \text{ kg/mm}^2$, $s^B = 2 \text{ kg/mm}^2$

P_0	$\bar{\sigma}_u^W \text{ kg/mm}^2$	
	$r=1.0$	$r=0.9$
0.90	88.7	80.0
0.92	89.0	80.2
0.95	89.5	80.8
0.97	90.4	81.6
0.99	91.8	83.0
0.999	93.5	84.6
6 0.9...9	96.3	87.3

なるほど大きくなるが、 P_0 が 1.0 に近づくと急に上昇する。

Figs. 4, 5 からわかるように、従来の overmatching の考え方すなわち $r \geq 1.0$ とすれば、溶接金属の平均引張強さはかなり大きくする必要があることがわかる。Table 2 は一例として HT80 ($\sigma_u^B = 80 \text{ kg/mm}^2$) で (13) 式の引張強さ分布の場合、すなわち $\sigma_u^B = 85 \text{ kg/mm}^2$, $s^B = s^W = 2 \text{ kg/mm}^2$ の場合の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と P_0 の関係を示したもので、 $r=1.0$ の立場に立てば $P_0=0.99$ で $\bar{\sigma}_u^W = 88.7 \text{ kg/mm}^2$ とかなり大きく $P_0=0.90$ でさえ、 $\bar{\sigma}_u^W = 88.7 \text{ kg/mm}^2$ と σ_u^B よりもかなり大きいことがわかる。

3.2 母材および溶接金属の引張強さのパラツキの影響

Figs. 4, 5 に示したような溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と信頼性 P_0 および必要 r 値との関係は、母材や溶接金属の引張強さのパラツキすなわち標準偏差の影響をうけることが当然考えられる。ここでは一例として $P_0=0.999$, $a=2.5$ の場合について計算し、 s^B , s^W の影響をみる。

Fig. 6 Relationships between $\bar{\sigma}_u^W / \sigma_u^B$ and s^W / s^B for various r -values

Fig. 6 は溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ と溶接金属および母材の標準偏差の比 s^W / s^B の関係を $s^B / \sigma_u^B = 0.025$ とした場合のいろいろな r 値に対して示したものである。いずれの r の場合も s^W / s^B が大きくなると多少 $\bar{\sigma}_u^W$ が大きくなるが、 s^W / s^B が変化しても $\bar{\sigma}_u^W / \sigma_u^B$ の値はそれほど大きく変化しない。実際 s^W / s^B が 1.0 のまわりに、それほど大きく変化することがないことを考えれば、 $\bar{\sigma}_u^W$ は $s^B = \sigma_u^B$ の値によって、ほぼ定まると考えられる。

Fig. 7 は $s^W = s^B$ の場合について $\bar{\sigma}_u^W / \sigma_u^B$ と s^B / σ_u^B の関係をいろいろな r 値に対して示したものである。溶接金属の平均引張強さは s^B / σ_u^B が大きくなるほど大きくなる。つまり母材および溶接金属の引張強さのパラツキが大きい場合、同じ信頼性を得るにはより大きな平均引張強さをもつ溶接金属を選ぶ必要があることがわかる。

Fig. 7 Relationships between $\bar{\sigma}_u^W / \sigma_u^B$ and s^B / σ_u^B for various r -values

4. 溶接金属の必要引張強さと軟質溶接継手の信頼性

4.1 溶接金属の必要引張強さと信頼性の関係および適合性に対する問題点

継手性能を保証するのに必要な溶接金属の引張強さ、すなわち r 値の決定については設計の基本思想や対象とする構造物によって異なり、一意的に定めることが困難である。また、継手性能として何を主たる対象にするかによっても異なった結果が得られる。一方、前項までに示したように r 値をいくらにとるかは溶接金属の平均引張強さ $\bar{\sigma}_u^W$ や継手の信頼性に大きな影響を与える。すなわち、 r 値をいくらにとるべきかは溶接金属と母材の適合性を考える上において重要な因子となる。

従来、溶接金属の強度は母材と同等以上にすることが常識とされており、いわゆる overmatching の原則に立つべきだとされていた。確かに平均的には溶接金属の引張強さは母材の引張強さと同等以上になっている

Fig. 8 Relationship between r -value and s^B/s_u^D when reliability P_0 is a constant

(Table 1 参照). しかし, その場合にどれだけの信頼性があり, また, いくらの信頼性を持たすべきなのかなどについての情報はいまだに明らかにされておらず, それは不明のままに何となく overmatching というのが現状のようにも思える.

そこで, 従来のように継手の信頼性 P_0 に対しては不明のままとし, 母材および溶接金属の引張強さ分布が与えられたとき, 信頼性を適当にとればどのような立場に立った matching (適合性) を考えていることになるかについて考察を行なう. Fig. 8 は母材と溶接金属の引張強さの分布がまったく同じ, すなわち $\sigma_u^W = \sigma_u^B$, $s^W = s^B$ のとき, それらの組合せによって作製した溶接継手が一定の P_0 という信頼性をもつとすれば, そのときの r 値と s^B/s_u^D の関係を示したものである. 言換えれば, この母材と溶接金属を用いて信頼性 P_0 を得るにはある s^B/s_u^D のとき, 図から求められる r 値で決まる溶接金属の引張強さが必要であるという立場に立たねばならないことを示している. たとえば, $s^B/s_u^D = 0.025$ とすれば $P_0 = 0.999$ のとき, $r = 0.905$ でありまったく同じ引張強さ分布 ($s^B/s_u^D = 0.025$) をもつ溶接金属と母材で作製された溶接継手で信頼性, $P_0 = 0.999$ を保証するには必然的に $r = 0.9$ 程度の undermatching の立場に立たなければならないことを示している. もし, $r \geq 1$ の overmatching の立場を守るなら Table 2 にも示したように σ_u^W を非常に大きくする必要があるわけである. Table 1 にも示すように現在の溶接材料は σ_u^W と σ_u^B はそれほどにも差がなく, また s^B/s_u^D が 0.02~0.05 程度の範囲内にあることを考えると $r \geq 1$ の立場に立つ限り, 溶接継手の静的引張強さに関しては十分な信頼性が得られていないことになる.

4.2 継手性能を考えた溶接金属の必要平均引張強さと軟質溶接継手の信頼性

Fig. 9 Relationship between r -value and σ_u^B/s_u^D

これまでの議論においては溶接金属の必要引張強さをすなわち必要 r 値については, 単に overmatching や undermatching という議論のみで, 継手の性能を考えた場合に値はいくらであればよいかについてはふれてこなかった. 前述のように最低必要 r 値を決めることは, 設計の基本思想や対象構造物によって大きく影響を受ける. ところで前報^{1), 3)}に示したようにそのような基本思想には立ち入ることなく, 継手性能の評価基準として

$$\begin{cases} \text{溶接継手の引張強さ } \sigma_u \geq \sigma_u^D \text{ (母材の保証強度)} \\ \text{溶接継手の一様伸び } \epsilon_u \geq (\text{母材の一様伸び } \epsilon_u^B) \times 0.8 \end{cases}$$

なる 2 つを考えると, この基準を満足する溶接金属の軟質度 (r 値と同じ定義) は実験により Fig. 9 の点線 ①, ②のように求められている. 全軟質継手では $r = 0.9$ である. このような継手性能に関する 2 つの評価基準を考えると $r = 0.9$ の undermatching で十分であり, このような立場に立つときの溶接金属の必要平均引張強さと信頼性の関係は Fig. 5 や Table 2 に示すとおりである. 前報において溶接棒を設計する場合の溶接金属の必要平均引張強さを定める基準として

$$\sigma_u^W - 2s^W = r\sigma_u^B \quad (14)$$

を提示した. このように“溶接金属の最低強度が母材の平均強度の r 倍”なる基準に立つとき, $s^B = 2 \text{ kg/mm}^2$, $r = 0.9$ なる前報の計算結果によると信頼性は 0.933 程度となる. 80 キロ高張力鋼を対象にすると, この程度の信頼性に対しては Table 2 に示すように $\sigma_u^W \approx \sigma_u^D$ とすれば得られる. また, 現実の 80 キロ高張力鋼では Table 1 に例示したように $\sigma_u^W \approx \sigma_u^B$ であり, このような溶接金属と母材の組合せで作製された溶接継手は, 前記の 2 つの継手性能評価基準を満足する $r = 0.9$ の undermatching の立場に立てば 0.999 程度の高い信頼性が得られていることになる.

5. 結 論

通常の鋼材や溶接材料はその機械的特性にバラツキをもつことを考慮し、そのようなバラツキをもつ母材と溶接材料を用いて作製した溶接継手の静的引張強さに関する信頼性について考察を行なった。さらに信頼性を考慮した母材と溶接金属の適合性について考察した結果、次のような結論が得られた。

(1) 溶接金属の必要平均引張強さ σ_u^W は溶接継手の信頼性、溶接金属の最低必要強度を決める r 値および材料のバラツキに依存する。 σ_u^W は信頼性、 r 値を大きくとるほど大きくする必要があり、またバラツキが大きいほど σ_u^W も大きくすることが必要である。

(2) 溶接金属の強度は母材と同等以上にすべきであるといういわゆる overmatching の立場 ($r \geq 1$) に立つとき

0.9 程度の信頼性を得るためにも溶接金属の平均引張強さは非常に大きくする必要がある(例えば, HT80 に対して $\sigma_u^W \geq 90 \text{ kg/mm}^2$)。

(3) 溶接継手の強度が母材の保証強度をもち、かつ母材と同等の伸び特性をもつには $r \geq 0.9$ であればよく、このような undermatching の立場に立てば、現在の溶接材料と母材の組合せで作製した溶接継手では 0.999 程度の信頼性が得られている。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦彦, 豊田政男: “継手強度の見地からみた溶接金属と母材の適合性に関する一考察”
溶接学会誌, 第42巻(昭48), 第6号, 72—81
- 2) 日本溶接協会 Q T 委員会資料
- 3) 佐藤邦彦, 豊田政男, 藤井英輔: “軟質溶接継手の静的引張強度に関する研究”
日本造船学会論文集, 第132号(昭47), 381

おねがい

投稿論文ページ数について

用紙の供給状況が窮迫しておりますので、当分の間、投稿論文のページ数を刷り上がり8ページを厳守してください。やむを得ない事情がある場合でも10ページを超過すると推定されるものについては受理いたしませんので、あらかじめ十分ご注意の上投稿されることをお願い致します。

溶接学会 編集委員会