溶接 HAZ 軟化を考慮した細粒鋼継手における静的強度の予測*

— 細粒鋼溶接継手の変形ならびに強度特性に関する研究 (第2報) —

新富 達也**, 竹士伊知郎***, 橋本 義和****, 望月 正人*****, 豊田 政男*****

Prediction of Tensile Strength of Welded Joints for Fine Grain Steel with Softened HAZ*

— Studies on Deformation and Strength in Welded Joints of Fine Grain Steel (Report 2) —

by SHINTOMI Tatsuya**, CHIKUSHI Ichiro***, HASHIMOTO Yoshikazu****, MOCHIZUKI Masahito*****
and TOYODA Masao*****

It has well known that mechanical and geometrical heterogeneity are naturally contained in weld parts. Development of the production on fine grained steel that has high strength by refining the grain size has recently become active, but the fine grain size is coarsened and its heat-affected-zone (HAZ) is softened by weld heat input. The heterogeneity in welds is affected by the steel compositions and the welding conditions. It is important for actual use and design to know tensile strength of HAZ softening joint with consideration to heterogeneous effect. The predicting equation of tensile strength of the HAZ softening joint with fine grained steel is proposed in this paper. The effects of mechanical and geometrical heterogeneity are considered in the equation, and it is found that the equation precisely predicts tensile strength of the HAZ softening joint.

Key Words: Fine grain steel, Weld HAZ softening, Undermatched joint, Evenmatched joint, Overmatched joint, Finite-element analysis, Heterogeneity, Predicting equation

1. 結 言

大圧下圧延や温度制御を最大限に利用することで結晶粒径の微細化を図り、強度向上に作用する元素の添加に頼らずに高強度化したフェライト細粒鋼の開発が盛んである¹⁻³⁾。この細粒鋼は添加元素量の少なさから、良好な溶接性をもつ高強度鋼材である。しかし、溶接などの熱履歴によって高強度効果を生み出している細粒組織が粗大化する結果として溶接 HAZ では軟化を生じ、継手強度が低下することが考えられる⁴⁻⁶⁾。結晶粒微細化による強度向上の寄与が大きい材料ほど、継手の特性保持が困難になる。

溶接継手部はその狭隘な領域の中に様々な特性をもつ不均質材であり、不均質性がもたらす様々な問題の検討が古くから行われてきた⁷⁻¹²⁾。細粒鋼の溶接 HAZ 軟化と不均質性が類似した研究としては、溶接割れの回避¹³⁾や予熱温度の低減¹⁴⁾を目的に低強度溶接金属を用いた軟質溶接継手

(Undermatched joint) や、大入熱溶接で HAZ 軟化を生じる高張力鋼継手¹⁵⁾の引張強度特性など数多く研究がなされている。しかし、溶接金属層や HAZ の強度や幅、さらにその相関関係が継手に及ぼす影響を詳細に検討した例は見あたらない。その上、鋼材性能的に細粒鋼は HAZ 軟化の程度が大きく (HAZ 強度が低下しやすく)、さらに鋼材開発が進展すると、従来の考え方の直接適用はさらに困難になると予想されることに考慮が必要である。

前報⁶⁾では、溶接 HAZ 軟化をおこす細粒鋼継手の静的強度に影響を及ぼす不均質因子の把握を行い、実際の施工条件下において、継手の強度特性を保持できる見通しを得た。しかし、溶接条件が不均質因子に与える影響は複雑なうえ、様々な用途への適用が期待される細粒鋼ではその溶接条件も広範囲にわたり、さらに、鋼材性能や継手の幾何学的形状から、溶接金属の存在をも考慮する必要があると考えられることから、継手の強度特性を保証するために、不均質因子のより詳細な検討が必要であると考えられる。そこで、本報では、従来の軟質溶接継手の強度評価式¹⁶⁻¹⁸⁾の考え方をもとに、細粒鋼をはじめとする溶接 HAZ 軟化をおこす継手の不均質因子が継手の強度特性に与える影響を整理し、溶接金属層の影響や各層の相関関係を加味した溶接 HAZ 軟化継手の静的強度を簡便かつ実用的な精度で予測する計算式を考案した。

*原稿受付 平成 14 年 5 月 22 日 平成 13 年度春季全国大会で発表, 平成 14 年 3 月第 153 回溶接構造研究委員会

**正 員 ㈱中山製鋼所 Member, NAKAYAMA STEEL WORKS, Ltd.

*** ㈱中山製鋼所 NAKAYAMA STEEL WORKS, Ltd.
**** 大阪大学大学院工学研究科(現: 東京ガス㈱)
Graduate School of Engineering, Osaka University
(Present Address: TOKYO GAS CO., LTD.)

*****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

2. 軟質溶接継手の静的強度評価式

これまでの研究^{16,17)}で、軟質部を含む平板継手を溶接線と垂直方向に引張った際、先行して塑性変形する軟質部が隣接する高強度材による塑性拘束の影響を受けて多軸応力状態となり、断面内平均ひずみに対する公称応力は軟質材そのものよりも高くなる。これはいくつかの仮定のもとで理論的に考察され、実験的にも確かめられている。

塑性拘束に影響を及ぼす因子としては次の 3 つがあげられ、

- ① 軟質部の相対厚さ X (= 軟質部幅 H /平板継手の厚さ h)
- ② 継手の幅厚比 W/h (= 板幅 W /板厚 h)
- ③ 軟質度 Sr (= 軟質部の引張強さ σ_T^S /母材の引張強さ σ_T^B)

このうち、幅厚比が十分に大きな継手に関しては、継手の応力・ひずみ関係は軟質部の相対厚さに依存して、いわゆる相似則が成り立ち、実験結果の回帰をもとにした軟質溶接継手の強度評価式¹⁸⁾が提唱されている。

$$\sigma_T^J = \sigma_T^S \times \left[\frac{1}{3.86} \cdot \frac{1}{X^{0.8}} + 1.0 \right] \quad (X > X_2) \quad \cdots(1)$$

$$X_2 = 2 \left\{ \frac{1}{3.86(1/Sr - 1.0)} \right\}^{1/0.8} \quad \cdots(2)$$

$$\sigma_T^J = \sigma_T^S \times \left[\frac{1}{3.86} \cdot \frac{1}{\left(\frac{X + X_2}{2} \right)^{0.8}} + 1.0 \right] \quad (X \leq X_2) \quad \cdots(3)$$

$$X_{eq} = \frac{1}{2} X + X_{eq}^0 \quad \cdots(4)$$

軟質溶接継手の強度評価式を整理すると、母材(高強度材)を剛体とみなして理論考察をしたものに、実験結果の回帰を行い得られた評価式が(1)式である。(1)式は相対厚さが大きいときなどの塑性拘束が比較的小さい場合に利用できる式である。ここで σ_T^J は継手の引張強度を表している。また(2)式の X_2 は相対厚さが小さくなり母材と軟質部の境界面に働く剪断力のために、境界付近の母材を剛体と見なせなくなる条件を実験結果の回帰から定めたもので、 $X \leq X_2$ の場合、実験結果の回帰をもとに(1)式を補正した(3)式を継手強度評価式とすることができる。ここで、実験で得られた継手強度と等しい引張強度となる剛体と仮定した場合の理論展開式((1)式)における相対厚さを、その継手の等価相対厚さ X_{eq} と定義すると、広幅の平板継手では(4)式のように工学的に近似されている。 X_{eq}^0 は剛体と仮定した場合の理論展開式((1)式)で母材強度に対応する等価相対厚さを表し、(2)式の X_2 は実験値の回帰を行うことで求まる X_{eq}^0 を、工学的に求め 2 倍したものと考えることができる。

3. HAZ 軟化継手の静的強度予測のための数値解析

前報⁹⁾と同様に、細粒鋼実溶接継手に照らして、Fig. 1 に示すように幅厚比 10、平板形状の溶接金属・HAZ・母材の 3 層からなる HAZ 軟化継手モデルを作成し、様々な不均質条件の細粒鋼突合せ継手の引張強度を、汎用 FEM コード ABAQUS ver. 5.8¹⁹⁾を用いて、弾塑性有限要素解析により求めた。

対象鋼材は降伏応力 $\sigma_Y = 600$ MPa、引張強さ $\sigma_T = 650$ MPa、一様伸び $\epsilon_T = 12$ %の細粒鋼を想定し、他の層は降伏比一定のもと、強度を変化させた値を用い、一様伸びは 12 %を使用した。なお、HAZ 軟化継手の強度予測式の検証計算として、一部、同じ降伏比で引張強さ $\sigma_T = 780$ MPa の細粒鋼も母材として用いた。

注目する継手強度影響因子は前報同様、HAZ 強度を母材強度で除した HAZ 軟化度 $(Sr)_{HAZ}$ 、溶接金属強度を母材強度で除したオーバーマッチ度 $(Sr)_{WM}$ 、HAZ 幅(引張方向)を板厚で除した HAZ 相対厚さ X_{HAZ} および溶接金属の幅を板厚で除した溶接金属相対厚さ X_{WM} の 4 つである。影響因子の範囲は前報と同じく実溶接条件に基づいた $0.7 \leq (Sr)_{HAZ} < 1.0$ 、 $1.0 \leq (Sr)_{WM} \leq 1.2$ 、 $X_{HAZ} \leq 1$ 、 $X_{WM} \leq 1$ の範囲を用い、一部、予測式検証用として、 $0.5 \leq (Sr)_{HAZ} < 1.0$ 、 $1.0 \leq (Sr)_{WM} \leq 1.5$ 、 $X_{WM} \leq 5$ に範囲を拡張した。なお、本文中では溶接金属強度が母材強度と等しい HAZ 軟化モデル継手をイーブンマッチ継手(図中 EM)、溶接金属が母材より高強度の HAZ 軟化モデル継手をオーバーマッチ継手(図中 OM)と呼ぶことにする。なお、本研究における力学的な検討上、母材より軟化している部分を HAZ、HAZ には含まれた部分を溶接金属部と本文中では呼ぶことにし、以下の記述はこれに従うことにする。

Fig. 1 Model and analytical parameters used for FE-analysis.

4. HAZ 軟化継手の静的強度に影響する因子の把握

前報⁶⁾で報告した継手強度に及ぼす因子の影響の整理結果をもとに、オーバーマッチ継手も含めた HAZ 軟化継手の強度予測を確立すべく、評価方法の考察を行った。すなわち、従来の軟質継手の静的強度評価式((1)~(3)式)を、HAZ 軟化継手の数値解析計算結果に適用して、軟質継手では考慮されていない溶接金属層の継手強度に及ぼす影響を考慮することで、その適用範囲の拡大を図り、主に細粒鋼を対象とする HAZ 軟化を生じる鋼材を扱う溶接技術者ならびに設計者などが、数値解析を行わなくとも簡便かつ実用的な精度で利用できる、HAZ 軟化継手の強度予測式を構築する。

4.1 軟質溶接継手の強度評価式との対応（イーブンマッチ継手の強度予測式）

まず、軟質溶接継手に不均質特性が類似していると考えられるイーブンマッチ継手強度の数値解析結果と、軟質溶接継手の強度評価式の計算値との関係を、実際のアーク溶接などの条件に合わせて $X_{WM}=1.0$ で、HAZ 強度を 455 MPa、母材強度を 650 MPa および 780 MPa（母材強度 650 MPa に対して $(Sr)_{HAZ}=0.7$ ）の場合を一例として計算したものを Fig. 2 に示す。図中 Eq. (1)ならびに Eq. (3)は前述の軟質溶接継手（図中：UM）の強度評価式の X , Sr に、ここで扱うイーブンマ

ッチ継手の X_{HAZ} , $(Sr)_{HAZ}$ を代入して求めた計算値である。低強度部である HAZ の相対厚さが小さいほど、HAZ 軟化継手では低強度部の不均質性が類似する軟質溶接継手より強度が大きくなる傾向が認められる。そこで本研究では、細粒鋼を主対象としたオーバーマッチ継手まで含めた HAZ 軟化継手の強度予測を行うにあたり、まず、軟質溶接継手の強度評価式をもとに、イーブンマッチ継手の強度予測式を構築する。HAZ 相対厚さが小さい範囲では、継手強度に影響を及ぼす塑性拘束が軟質溶接継手と比べて異なると考えられることから、軟質溶接継手の考察¹⁶⁾にならい、等価相対厚さ X_{eq} の概念を導入した。軟質溶接継手では(4)式の形で整理されている。イーブンマッチ継手では、HAZ 相対厚さの影響を勘案し、指数曲線を用いて解析値による回帰を行った。

$$X_{eq} = aX^b + X_{eq}^0 \quad \dots(5)$$

このようにして、 $X_{WM}=1.0$ の HAZ 軟化継手を代表として、イーブンマッチ継手の強度予測式(6)~(8)式を作成した。Fig. 3 には、継手強度の解析値とともに、(6)~(8)式の計算値を示した。(6)~(8)式は軟質溶接継手における強度評価式(1)~(3)に対応するもので、継手に引張荷重がかかる際、高強度の母材および溶接金属が、剛体と考えても差し支えない程度の変形となる場合の強度予測式が(6)式、先行して変形する HAZ 近傍の母材および溶接金属において、剛体と見なせなくなる変形状態を想定した式が(8)式である。なお、(7)式は溶接 HAZ 軟化継手において、母材強度に対応する等価相対厚さを工学的に求める式である。(6)から(8)式をまとめてイーブンマッチ継手の強度予測式と呼ぶことにする。

Fig. 2 Comparison between tensile strength obtained by FE-analyses and that calculated with undermatched joints.

Fig. 3 Regression line of tensile strength for HAZ softening evenmatched joints.

$$\sigma_T^J = \sigma_T^{HAZ} \times \left[\frac{1}{4.36} \cdot \frac{1}{(X_{HAZ})^{0.92}} + 1.0 \right] \quad \cdots(6)$$

$$X_{eq}^0 = \left[\frac{1}{4.36 \{1/(Sr)_{HAZ} - 1.0\}} \right]^{1/0.92} \quad \cdots(7)$$

$$\sigma_T^J = \sigma_T^{HAZ} \times \left[\frac{1}{4.36} \cdot \frac{1}{\{0.73(X_{HAZ})^{1.8} + X_{eq}^0\}^{0.92}} + 1.0 \right] \quad \cdots(8)$$

4.2 溶接金属のオーバーマッチ度が継手強度に及ぼす影響の検討 (オーバーマッチ継手の強度予測式)

各層の相対厚さなどの形状的不均質因子を変えることなく、溶接金属のオーバーマッチ度を上昇させると、前報⁶⁾で示したように継手強度はほぼ線形的に上昇することがわかっていて、また、前節で説明した Fig. 3 にはオーバーマッチ継手 ($(Sr)_{HAZ}=0.7$, $(Sr)_{WM}=1.2$) の継手の数値解析結果もプロットしているが、イーブンマッチ継手の強度予測式ではオーバーマッチの効果を統一的に評価できないことは明らかである。この節では、溶接金属のオーバーマッチ度が継手強度に及ぼす影響を考察する。

ここで、Fig. 4 に示すように溶接金属のオーバーマッチ度を逆に HAZ 強度まで軟化させた継手を考えると、便宜的に従来の軟質溶接継手の強度評価式を利用できることから、溶接金属のオーバーマッチのみを変化させた HAZ 軟化継手の強度を予測する方法を考える。ここでは、新しいパラメータ $\{(Sr)_{WM} \cdot X_{WM} / ((Sr)_{HAZ} \cdot X_{HAZ})\}$ を導入して、形状条件 (X_{HAZ} , X_{WM}) が同じ HAZ 軟化継手における溶接金属のオーバーマッチ度と継手強度の関係を整理した。図中●印は軟質溶接継手評価式 ((1)~(3)式) および先ほどのイーブンマッチ継手

の強度予測式 ((6)~(8)式) により求めた計算値である。HAZ 軟化度が同じ 2 つの継手 (UM, EM) を考えることで得られる直線の延長線と、軟質溶接継手の計算値 ((1)~(3)式) を基準としてイーブンマッチ継手の計算値 ((6)~(8)式) の増分を 1 としたときに、溶接金属のオーバーマッチ度分をかけた数値で表される $(Sr)_{WM}=1.1$, $(Sr)_{WM}=1.2$ を表す曲線と交わる交点がオーバーマッチ継手の強度予測値であり、数値解析で求められたオーバーマッチ継手の強度 (図中□印) と良い一致を示している。Fig. 4 では一例として $X_{WM}=1.0$, $X_{HAZ}=0.4$ の継手を示しているが、 $X_{WM}=1.0$, $X_{HAZ}<1.0$ の条件では、いずれの場合においても同様の関係を満足することを確認している。

この関係を利用すると、オーバーマッチ継手の予測強度は、(9)式となる。ここで添字の OM, EM, UM はそれぞれオーバーマッチ継手、イーブンマッチ継手、軟質溶接継手を表している。

$$\left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{OM} = \left\{ \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{EM} - \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{UM} \right\} \times \frac{\{(Sr)_{HAZ}\}_{EM} \cdot \{X_{HAZ}\}_{EM}}{\{(Sr)_{WM}\}_{EM} \cdot \{X_{WM}\}_{EM}} \cdot \frac{\{(Sr)_{WM}\}_{OM} \cdot \{X_{WM}\}_{OM}}{\{(Sr)_{HAZ}\}_{OM} \cdot \{X_{HAZ}\}_{OM}} + \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{UM} \quad \cdots(9)$$

Fig. 4 は HAZ 軟化度が同じかつ同一形状の継手の関係を示しているので、

$$\left. \begin{aligned} \{(Sr)_{HAZ}\}_{OM} &= \{(Sr)_{HAZ}\}_{EM} \\ \{X_{HAZ}\}_{OM} &= \{X_{HAZ}\}_{EM} \\ \{X_{WM}\}_{OM} &= \{X_{WM}\}_{EM} \\ \{(Sr)_{WM}\}_{EM} &= 1.0 \end{aligned} \right\} \quad \cdots(10)$$

Fig. 4 Effect of overmatched weld metal on tensile strength of HAZ softening joint.

の関係が成り立ち、(9)式は、

$$\left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{OM} = \left\{ (Sr)_{WM} \right\}_{OM} \left\{ \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{EM} - \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{UM} \right\} + \left(\frac{\sigma_T^J}{\sigma_T^{BM}} \right)_{UM} \quad \cdots(11)$$

と簡単な形に整理できる。

すなわち、溶接金属のオーバーマッチ度を従来の軟質溶接継手の形まで包含して考えることで、溶接金属の強度的不均質と継手強度の関係に拡張することが可能となった。

この関係を継手強度-HAZ 相対厚さの関係に図示すると Fig. 5 のように説明できる。溶接金属の強度を HAZ と等しくすることで、模式的に軟質溶接継手 (UM) とみなせる継手は、溶接金属部と両側の HAZ を計算上、HAZ と考える必要がある。イーブンマッチ継手 (EM) と計算に用いる HAZ 相対厚さが異なる。Fig. 5 に示すようにイーブンマッチ継手の強度予測値を表す実線 $((\sigma_T^J)_{EM-cal.})$ の横軸 X_{HAZ} と、軟質溶接継手の強度評価式の計算値を表す点線 $((\sigma_T^J)_{UM-cal.})$ の横軸 $(X_{HAZ})_{UM}$ を対応させ、 $(\sigma_T^J)_{UM-cal.}$ を基準とした場合、次の(12)式でオーバーマッチ継手の計算値 (点線・ $(\sigma_T^J)_{OM-cal.})$ を求めると、数値解析で求めたオーバーマッチ継手の数値解析値 (図中▲印) と非常によく一致していることがわかる。

$$(\sigma_T^J)_{OM} = \left\{ (Sr)_{WM} \right\}_{OM} \left\{ (\sigma_T^J)_{EM} - (\sigma_T^J)_{UM} \right\} + (\sigma_T^J)_{UM} \quad \cdots(12)$$

つまり Fig. 5 より、イーブンマッチ継手においても継手強度が大きく保たれる HAZ 相対厚さが小さい継手、換言すれば、低強度部の塑性拘束が大きい継手では、 $(\sigma_T^J)_{EM-cal.}$ と

Fig. 5 Relationship between relative thickness of HAZ and tensile strength in overmatched joints and undermatched joints.

$(\sigma_T^J)_{UM-cal.}$ の差が大きいことから、オーバーマッチ効果による継手強度の上昇も大きく期待できることが理解される。

4.3 溶接金属相対厚さが継手強度に及ぼす影響の検討

最後に継手強度影響因子として溶接金属相対厚さの関係を Fig. 6 に考える。Fig. 6 は HAZ 強度 $\sigma_T^{HAZ}=455$ MPa で母材強度 σ_T^{BM} が 650 および 780 MPa のイーブンマッチ継手 ($X_{HAZ}=0.5$) の溶接金属相対厚さを変化させた数値解析値を示している。Fig. 6 からわかるように、溶接金属相対厚さが過度に大きい場合は、継手強度は溶接金属相対厚さにほとんど影響を受けず、他の 3 つの影響因子 (X_{HAZ} , $(Sr)_{HAZ}$, $(Sr)_{WM}$) で決定される。一義的に $0.5 \leq X_{WM}$ の範囲内にある場合、実質的な HAZ 軟化継手としては、ほぼ同強度であると見なし、これまでの HAZ 軟化継手の強度予測式 ($X_{WM}=1.0$, (6)~(8), (12)式) の値を代表値として採用することにする。なお、今回の解析範囲内では、次の(13)式を満たしていることから、HAZ 軟化継手の強度予測値としては実用的な精度を有しているものと考えられる。

$$\frac{(\sigma_T^J)_{cal.} - (\sigma_T^J)_{FEM}}{\sigma_T^{BM} - \sigma_T^{HAZ}} \leq \pm 5\% \quad X_{WM} \geq 0.5 \quad \cdots(13)$$

また、溶接金属相対厚さが極端に小さくなると、継手強度に影響する塑性拘束効果が小さくなり、継手強度は低下する。ここで極限まで溶接金属相対厚さが小さくなると図中にあるように軟質溶接継手と見なせることから、軟質溶接継手評価式の計算値および $X_{WM}=0.5$ のイーブンマッチ継手の計算値 (計算上は $X_{WM}=1.0$; (6)~(8), (12)式で求める) をもとに直線近似によって補間したところ、不均質因子の想定範囲内で十分に精度良く評価できていることが明らかになった。

$$\sigma_T^J = 2 \cdot \left[(\sigma_T^J)_{X_{WM}=1.0} - (\sigma_T^J)_{UM} \right] \cdot X_{WM} + (\sigma_T^J)_{UM}$$

Fig. 6 Definition of estimation of the effect of relative thickness of weld metal on the tensile strength of joints.

$$X_{WM} < 0.5 \quad \cdots(14)$$

これまでに説明した手順をもとに、溶接金属相対厚さが継手強度に及ぼす影響を考慮した計算値を、Fig. 6 に示すと実線のように表される。簡便な方法によって、溶接金属相対厚さの影響まで考慮した、精度のよい評価が可能になったと考えられる。

5. HAZ 軟化継手の静的強度予測法

これまでに得られた(6)~(14)式の関係を用いることによって、HAZ 軟化継手の強度予測法を Fig. 7 のような手順で示すことができる。イーブンマッチ継手の強度予測式を基準として、溶接金属のオーバーマッチ度を軟質溶接継手との線形関係により求め、最後に溶接金属相対厚さによる影響を補正し、計算継手強度が母材強度を上回る場合は母材強度に丸める方法である。

Fig. 8 にこの HAZ 軟化継手の強度予測法を用いた計算値と、有限要素解析で求められた解析値を比較する。図中にあるように母材強度 650 もしくは 780 MPa の鋼材が $0.5 \leq$

Fig. 8 Comparison between calculated and FE-analysed tensile strength of HAZ softening joints.

$(Sr)_{HAZ} < 1.0$, $1.0 \leq (Sr)_{WM} \leq 1.5$, $X_{HAZ} \leq 1$, $X_{WM} \leq 5$ の条件のもとで、非常に良い対応がとれていることがわかる。

この HAZ 軟化継手の強度予測式を用いて、実際の広幅継手の継手強度を予測することが可能となる。実際の HAZ や溶接金属の硬さは部位によってばらつきがあり、また、継手形状も単純な突合せ形状でないことが多いが、今回のモデルのように、領域内の硬さ分布を平均化した平均硬さから相対強度を求めることで、従来の軟質溶接継手の評価式が幅広い評価対象に適用できた事例^{12-14,16-18)}と同様に、実用的には十分に評価可能な値を与えることができると考えられる。

6. 結 言

結晶粒を微細化することで高強度化を得た細粒鋼では、溶接などの熱履歴によって軟化部が生じる可能性がある。

HAZ・溶接金属各層の強度および幅などの形状の因子を代入することで、工業的に利用しうる主に細粒鋼を対象とした HAZ 軟化継手の溶接金属のオーバーマッチ度、HAZ の軟化度の双方を考慮できる強度予測式を作成した。すなわち、

- ① 軟質溶接継手の強度評価式をベースとしたイーブンマッチ HAZ 軟化継手の強度予測式を作成する。
- ② 溶接金属のオーバーマッチ度による継手強度上昇分を計算して、①で求めた値に加算する。
- ③ 溶接金属の幅が継手強度に与える影響を考慮して、条件に応じて補正を行う。

本研究で構築した強度予測式を用いることで、従来の軟質溶接継手を対象とした予測式では困難であった、HAZ 軟化継手の目標強度を保持する継手作製条件を勘案した設計が、簡便かつ実用的な精度でできる見通しを得た。

Fig. 7 Flow of estimation of tensile strength of HAZ Softening joints.

参 考 文 献

- 1) S.Torizuka, K.Nagai and A.Sato : STX-21 プロジェクトにおける 800 MPa 鋼創製研究の現状, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 42 (2001), 287-292.
- 2) S. Aihara : Present Status and Future Prospect of the Ferrous Super Metal Project, Proceedings of the fourth symposium on super metal (2001), 17-26.
- 3) R. Kurahashi, I. Chikushi, T. Morimoto and J. Yanagimoto : Microstructure control in tandem hot strip rolling with heavy reductions-A present situation and future development, CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1157-1160.
- 4) R. Ito, N. Kaneko, Y. Kawaguchi, K. Hiraoka and C. Shiga : Characteristics of HAZ microstructures of ultra fine-grained steels for ultra narrow-gap GMA welding. Fifth workshop on the ultra-steel (2001), 216-217.
- 5) H. Qiu, Y. Kawaguchi and C. Shiga : Mechanical properties of the welded joints of ultra-fine grained steels : Fifth workshop on the ultra-steel (2001), 228-229.
- 6) T. Shintomi, I. Chikushi, Y. Hashimoto, M. Ohata, M. Mochizuki and M. Toyoda : The Effect of Weld HAZ Softening on tensile strength-Studies on Tensile Strength of Welded Joints for Fine Grain Steel (Report 1), Quar. J. JWS, to be published.
- 7) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (I) Heterogeneous Materials and Their Mechanical Fundamentals, J. JWS, 58-2 (1989), 99-105.
- 8) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (II) Mechanical Analysis of Deformation Behaviors of Heterogeneous Materials, J. JWS, 58-4 (1989), 240-246.
- 9) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (III) Thermal/Residual Stresses in Bonded Joints of Dissimilar Materials, J. JWS, 58-8 (1989), 532-537.
- 10) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (IV) Strength Characteristics of Heterogeneous Materials, J. JWS, 59-2 (1990), 78-83.
- 11) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (V) Fracture Strength of Welded joints with Mechanical Heterogeneity, J. JWS, 59-3 (1990), 166-172.
- 12) M. Toyoda : Mechanics for Heterogeneous Materials (VI) On Strength of Interface of Bonded Joints of Dissimilar Materials, J. JWS, 59-4 (1990), 246-252.
- 13) K. Satoh, M. Toyoda, K. Ukita, R. Shimoda, A. Nakamura and T. Matsuura : Applicability of Undermatching Electrode to Circumferential Welded Joint of HT80 Penstock (2nd Report) —On Joint Performance—, J. JWS, 47 (1978), 697-704.
- 14) T. Matsumoto, H. Satoh, S. Kiriara and F. Hataya : Investigations on Static Strength of Undermatching Welded Joint of HT60 Steel Plates, Quar. J. JWS, 4 (1986), 429-435.
- 15) H. Nitoh, D. Sakai, H. Yajima, Y. Inoue, Y. Sogo, K. Satoh and M. Toyoda : Tensile Strength of Welded Joints for TMCP Type 50 kgf/mm²-Class High Tensile Steel Plates, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 157 (1985), 304-311.
- 16) 豊田政男 : 低強度溶接金属をもつ溶接継手の静的引張特性に関する研究, 大阪大学提出学位論文 (1973).
- 17) K. Satoh and M. Toyoda : Effect of Mechanical Heterogeneity on the Static Tensile Strength of Welded Joints, J. JWS, 40-9 (1971), 885-900.
- 18) 日本溶接協会 鉄鋼部会 SJ 委員会 : 軟質溶接継手の力学的挙動と強度に関する研究, SJ 委員会総合報告書 (1975).
- 19) Hibitt, arlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8, Vols. 1 to 3 (1998).