

圧子押し込み法による鋼および鋼溶接部の 力学的特性推定法の検討

Study on Mechanical Characterization of Steel and Its Welds through Instrumented Indentation Technique

大阪大学大学院	岡野 成威	Shigetaka OKANO	Member
大阪大学大学院	竹内 周平	Shuhei TAKEUCHI	
大阪大学大学院	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member

In this study, a semi-nondestructive procedure for stress – strain curve estimation was developed using instrumented indentation technique. Additionally, to estimate local stress – strain curve in the welds with mechanical heterogeneity, a relation between spherical indentation size and measuring range of mechanical property was quantified by using finite element analysis of spherical indentation technique. The developed technique was applied to estimate mechanical properties of low alloy steel and its welds. To obtain mechanical heterogeneity in welds, two pass welding was performed on the surface of material with a certain level of transverse distance. With appropriate indentation size, distinguished stress – strain curve was successfully obtained at each position, such as weld metal, heat affected zone and base metal. Thus, it was concluded that the developed technique was useful to estimate mechanical heterogeneity in the welds with a high degree of accuracy through simple process.

Keywords: Instrumented indentation technique, Spherical indenter, Stress – strain curve, Mechanical heterogeneity, Low alloy steel welds

1. 緒言

原子炉圧力容器等を構成する低合金鋼の溶接部では、熱影響に伴って金属組織の変化やそれによる硬化・脆化などが生じ得るため、溶接後熱処理 (Post Weld Heat Treatment, PWHT) などによって適切にその特性を制御している。取替・補修時には、溶接による多重熱サイクルを利用した組織改善が可能であるテンパービード溶接工法なども採用されている。以上のように、低合金鋼溶接部における組織や硬さ・靱性は、その不均質な分布が構造物としての強度特性に及ぼす影響も含めて、十分に把握した上で適切に制御すべき因子である。

圧子押し込み法は、材料の硬さを評価する材料試験法として古くから利用されており、降伏強度や引張強さなどとの相関を利用した材料強度評価にも応用されている^[1]。近年ではさらに、圧子押し込み時の負荷過程・除荷過程に

おける押し込み荷重-深さ曲線を取得し、これを用いて応力-ひずみ曲線などのより詳細な機械的性質を推定しようとする試みもなされている^[2,3]。

本検討では、球圧子を用いた圧子押し込み法の有限要素解析モデルを構築し、応力-ひずみ曲線の推定法を高度化するとともに、圧子押し込み条件と測定領域寸法の関係の定式化を行った。その上で、本手法を低合金鋼 A533B 溶接部に適用し検証した。なお、溶接試験体の作製の際には、溶接金属部および母材部に加えてその幅が比較的狭い熱影響部における推定を試みるために、2パスの溶接ビードを置くことでこれを実現した。

2. 圧子押し込み法の概要

2.1 押し込み荷重-深さ曲線

材料の表面に圧子を押し込む際の負荷過程および除荷過程において要する押し込み荷重と圧子の侵入量 (押し込み深さ) を連続的に測定することによって、Fig. 1 に示すような押し込み荷重-深さ曲線を取得することができる。現在、Oliver らによって提案された材料特性の解析手法を基本

連絡先: 岡野成威、〒565-0871 大阪府吹田市山田丘
2-1、大阪大学大学院工学研究科、
E-mail: okano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

とした真応力-真ひずみ曲線の推定法が種々提案されている^[4]。

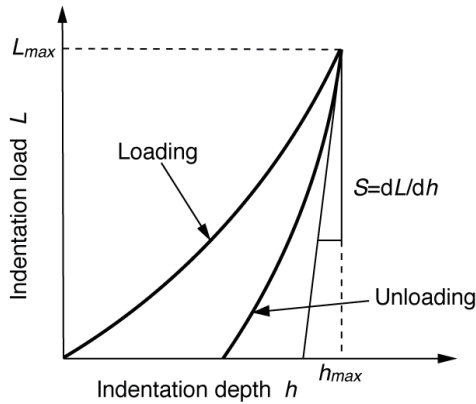


Fig.1 Indentation load – depth curve

2.2 応力-ひずみ曲線の推定法

球圧子を用いた押し込み試験により真応力-真ひずみ曲線を取得するには、複数の押し込み深さで部分的に除荷を行い、各押し込み深さにおける真応力-真ひずみ関係を算出する。しかし、球圧子の押し込みによって材料内部に生じる応力やひずみの分布は非一様で複雑であるため、平均的な指標である代表応力 σ_R 、代表ひずみ ϵ_R を次の式(1)および(2)のように定義する。

$$\sigma_R = (1/\Psi) (L/\pi a^2) \quad (1)$$

$$\epsilon_R = \alpha \{1/[1-(a/R)^2]^{1/2}\} (a/R) \quad (2)$$

ここで、 Ψ : 塑性拘束係数 (完全塑性状態では 3.0)、 L : 押し込み荷重、 a : 接触半径、 α : 比例係数 (0.10 あるいは 0.14 とされている)、 R : 圧子半径、である。なお、圧子押し込み深さとの幾何学的な関係から求まる“公称”接触半径は、押し込む圧子が材料と接触する位置を 0 としてそこから侵入した深さをを用いて求めたものである。一方で、一般に圧子を材料表面に押し込むと、圧子と材料の接触している縁で Fig. 2 に示すような pile-up あるいは sink-in といった変形が生じる。そのため、上式(1)あるいは(2)において用いる接触半径には、公称接触半径ではなく、これらの変形挙動を考慮した“真実”接触半径を用いる必要がある。これらの pile-up あるいは sink-in の影響を考慮に入れた真実接触半径の算定式もこれまでに提案されている。以上の手順で球圧子を用いた圧子押し込み試験から材料の真応力-真ひずみ曲線を推定する際のフローを Fig. 3

に示す。本手法では、材料の硬化則として n 乗硬化則を想定しており、各圧子押し込み深さで算出される代表応力-代表ひずみ関係を n 乗硬化則で近似し、 n 値が許容値まで収束するまで繰り返し最終的に算出された代表応力-代表ひずみ関係をプロットすることで真応力-真ひずみ関係を推定する。

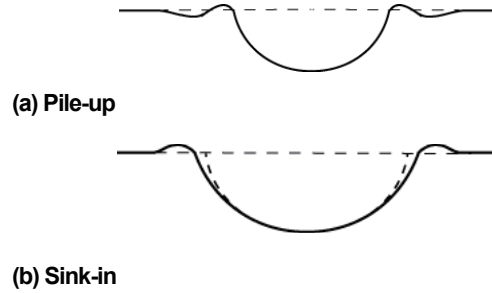


Fig. 2 Deformation of material around spherical indenter

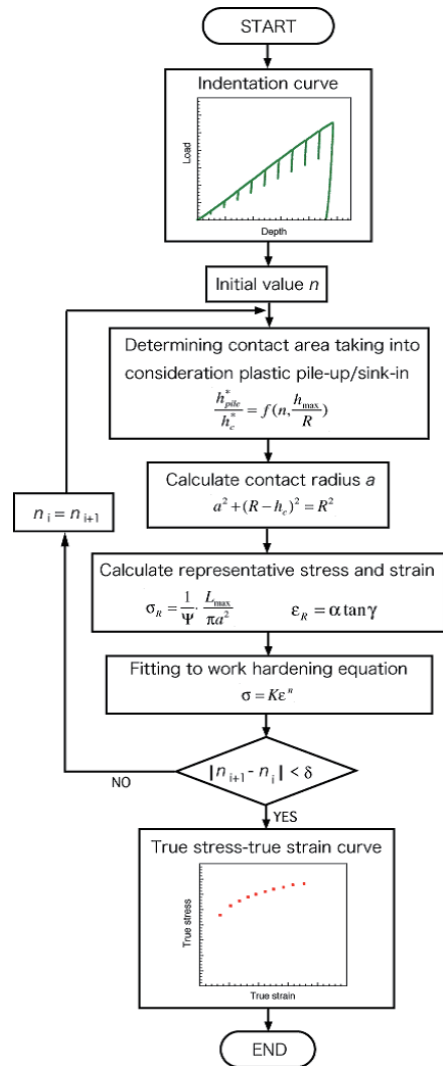


Fig. 3 Flow of the stress-strain curve estimation

2.3 代表応力・代表ひずみの算出

本検討では、前節で述べた応力-ひずみ曲線の推定法を基礎として、代表応力・代表ひずみを求める際の真実接触半径 a の算出式に以下の式(3)を用いる。

$$a = \{(5/2)[(2-n)/(4+n)]\}^{1/2} [0.991 + 0.039 \log(h/R)] (2Rh - h^2) \quad (3)$$

ここで、 n : 加工硬化指数、 h : 圧子押し込み深さ、 R : 圧子半径、である。本式は、公称接触半径と圧子押し込み深さとの幾何学的関係および真実接触半径と公称接触半径の補正項を用いて、圧子押し込み条件（押し込み深さと圧子半径）から真実接触半径を求めるものである。また、代表ひずみを求める式(2)における比例係数 α には有限要素解析に基づいて求めた 0.175 を用いることとする。以上のように、本検討で用いる球圧子押し込み法による応力-ひずみ曲線推定法は、従来までの方法を基礎としてその高精度化に向けた改良^[5]を加えたものである。

3. 球圧子押し込み法による測定領域の検討

3.1 球圧子押し込み法の有限要素解析

本章では、球圧子押し込み法による応力-ひずみ曲線推定法を強度不均質を有する溶接部の評価に適用するために必要となる測定領域の定量化に向けた検討を有限要素解析を用いて行う。検討に用いる有限要素解析モデルの一例を Fig. 4 に示す。軸対称モデルとしており、押し込み対象となる材料の寸法は半径 2mm、板厚 2mm である。図には圧子半径 0.25mm のものを示している。

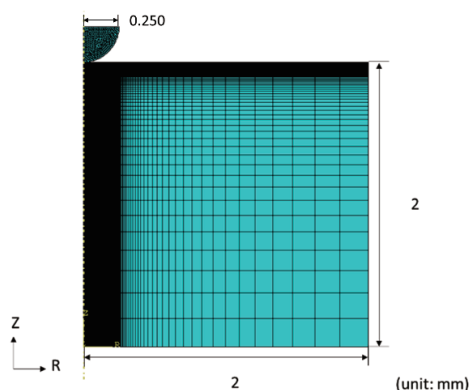


Fig. 4 Finite element model of spherical indentation

本モデル内部に、Fig. 5 に示す幅方向（半径方向）に強度不均質を有する 2 層を設定し、強度の違いとその領域寸法（幅）が圧子押し込み特性に及ぼす影響を検討した。

圧子直下（中央部）の材料特性を有する領域幅を 0（全領域が周囲の特性で一様）、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、2.0（全領域が中央部の特性で一様）mm の 6 条件とし、材料強度の違いとして Fig. 6 に示す圧子直下（中央部）の特性（図中の M）を基準に、より高い強度（図中の H）とより低い強度（図中の L）を周囲に有するモデルを設定した。

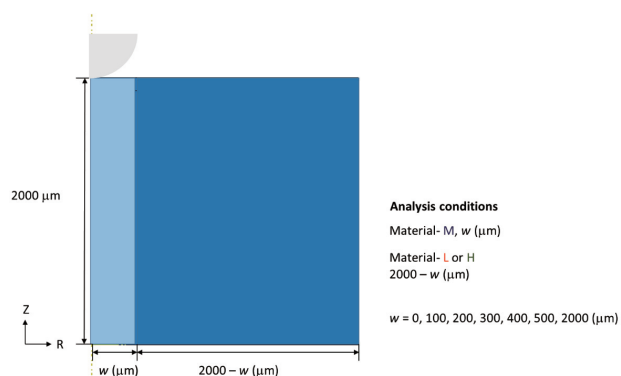
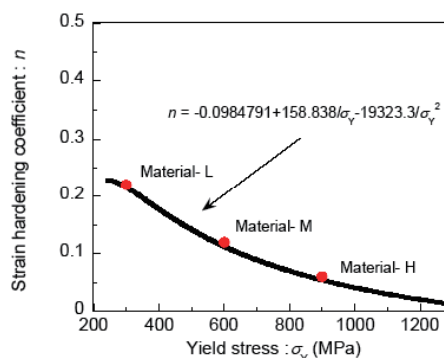
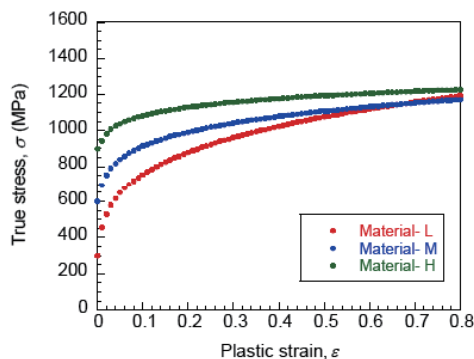


Fig. 5 Width-directional heterogeneous layer model



(a) Selected points



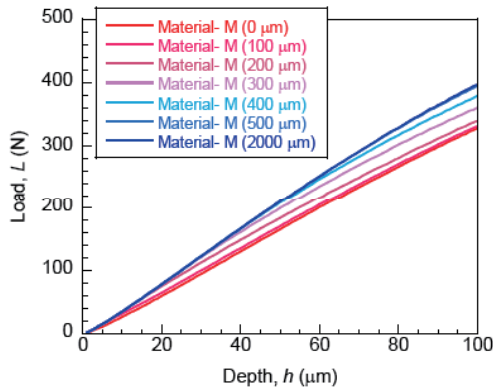
(b) Stress - strain curve used

Fig. 6 Stress - strain curve used for different strength layer

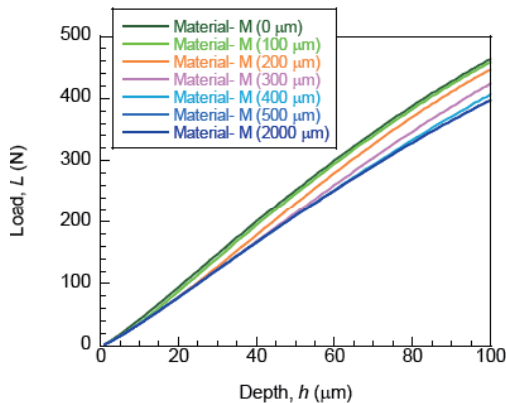
3.2 圧子押し込み特性に及ぼす強度不均質の影響

前節で示した強度不均質を有するモデルに球圧子を押し込んで得られる押し込み荷重-深さ曲線を Fig. 7 に示す。そ

れぞれ、圧子直下よりも周囲で強度が(a)低い場合と(b)高い場合である。圧子直下と周囲の強度の比が等しいにも関わらず、中央部の領域幅が異なると得られる押し込み荷重-深さ曲線も異なってくるのがわかる。圧子を押込むにつれて（押し込み深さが大きくなるにつれて）、周囲の強度特性の影響が表れはじめ、その深さは中央部の領域幅によって異なっている。



(a) Material M (center) & Material L (circumference)

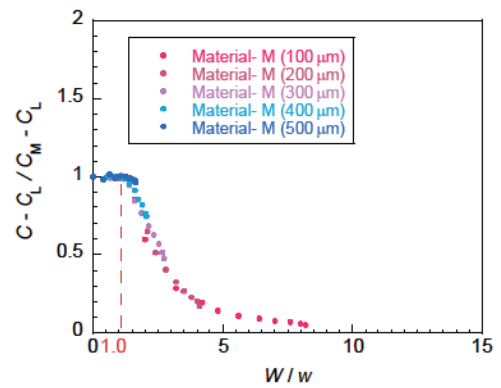


(b) Material M (center) & Material H (circumference)

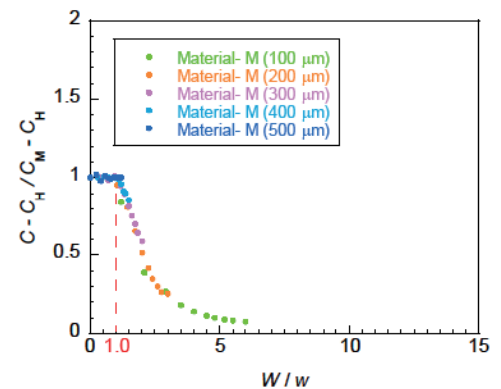
Fig. 7 Effect of mechanical heterogeneity on indentation load – depth curve

これを統一的に整理するために、押し込み荷重と押し込み深さから求まる押し込み荷重係数 ($C=L/h^2$) を正規化した $(C-C^*)/(C_M-C^*)$ を縦軸にとり（ここで下付き添字*は周囲の特性に応じて H あるいは L とする）、各押し込み深さで生じた塑性域幅 W を中央部の領域幅 w で除した W/w を横軸にとったものを Fig. 8 に示す。これらの図を見て分かるように、中央部の領域幅が異なるそれぞれの条件で得られた圧子押し込み特性（正規化された押し込み荷重係数）は W/w に対して単一の曲線傾向を示しており、統一的な評価が可能であることがわかる。また、横軸 W/w の値が

1 よりも大きくなると縦軸 $(C-C^*)/(C_M-C^*)$ の値が変化し始めており、周囲の特性の影響を受け始めていることがわかる。すなわち、本検討のように、ヤング率が一定で降伏強度ならびに塑性特性が変化しているような場合には、圧子押し込み特性に及ぼす影響とその程度は塑性域の拡がりに関連付けて評価できることが示された。



(a) Material M (center) & Material L (circumference)



(b) Material M (center) & Material H (circumference)

Fig. 8 Relation between normalized indentation load factor and W/w

ここで、球圧子を押込んだ際の塑性域の拡がりを圧子半径および押し込み深さと関連づけて定量化する。Fig. 9 は、これまでに示した 3 種類の強度特性をそれぞれ一様に有するモデルに対して、半径 0.25mm および 0.125mm の圧子を押込んだ際の塑性域幅を押し込み深さに対してプロットしたものである。これを見ると、それぞれの寸法を圧子半径で無次元化したものは、圧子半径によらず同様のプロットの傾向を示しており、圧子半径によって無次元化された塑性域幅と押し込み深さには統一的な関係が見出せる。また、それらの間の定量的な関係には、当然の事ながら、材料の強度レベルの影響が見てとれる。

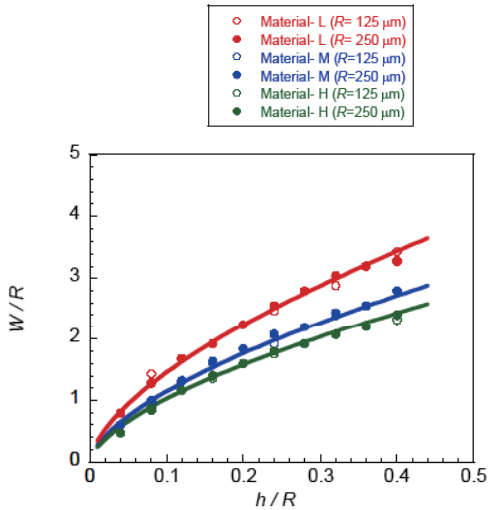


Fig. 9 Relation between plastic region and penetration depth

3.3 球圧子押し込み法の測定領域の定式化

以上の検討に基づいて、球圧子押し込み法における測定領域の“幅”を w_m とし、圧子押し込み条件と材料強度レベルとの関係を以下のように定式化した。

$$w_m/R = 9.1(h/R)^{0.62} n^{0.27} \quad (4)$$

ただし、 $n = -0.0984791 + 158.838/\sigma_Y - 19323.3/\sigma_Y^2$ の関係を前提としている。この定式化された関係によれば、例えば、応力-ひずみ曲線推定において圧子押し込み深さを最大でも $h/R=0.4$ 程度までとすると、圧子半径 R と測定領域幅 w_m の関係は Fig. 10 のように求まり、測定したい領域の寸法や材料強度レベルに応じた圧子寸法の選定が可能となる。

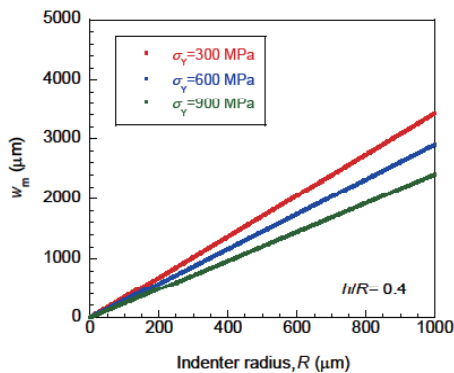


Fig. 10 Relation between plastic region and indenter size

4. 低合金鋼溶接部への適用

4.1 測定対象および圧子押し込み試験条件

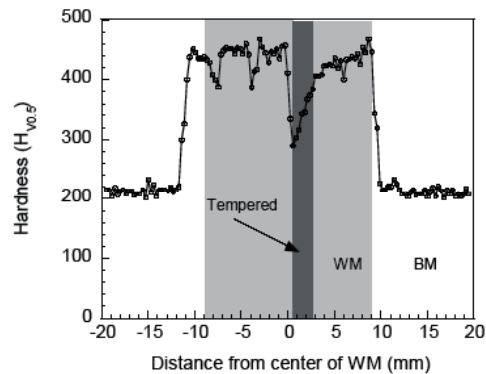
前章までに構築した球圧子を用いた押し込み試験による応力-ひずみ曲線推定法と測定領域寸法に応じた圧子寸法の適正化指針を踏まえて、本章では低合金鋼溶接部の応力-ひずみ曲線の推定に適用し検証する。供試材料は低合金鋼 A533B であり、その化学組成は Table 1 に示す通りである。試験体の寸法は、板長 100mm、板幅 80mm、板厚 30mm であり、溶接電流 180A、溶接速度 1.33mm/s の条件で 10、15mm の間隔をあけて 2 パスのビードオンプレート溶接を行い、2 種類の溶接試験体を作製した。

Table 1 Chemical composition of low alloy steel

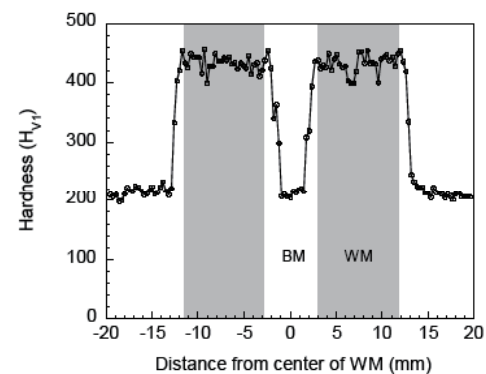
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Al	Fe
0.12	0.26	1.43	0.006	0.002	0.53	0.02	0.01	0.51	0.038	Bal.

4.2 溶接部の硬さ分布

作製した溶接試験体の中央断面におけるビッカース硬さ試験を実施し、2 パス溶接部の硬さ分布を評価した。それらの結果を Fig. 11 に示す。



(a) Distance between two weld beads is 10 mm



(b) Distance between two weld beads is 15 mm

Fig. 11 Vickers hardness distribution in welds

2パスの溶接ビード間の距離に応じて硬さ分布が異なっていることが確認できる。距離が15mmの場合(b)では2つの溶接ビードによる熱影響部はほぼ独立して生じているのに対して、距離が10mmの場合(a)では部分的に焼き戻された領域が存在しており、溶接金属部と母材部の中間的な硬さとなっている。また、この熱影響部の幅は数mm程度と狭く、硬さは一様ではない。すなわち、圧子押し込み法によってこの熱影響部の特性を取得するためには適切な圧子半径を選択する必要があることが示唆される。

4.3 圧子押し込み法による応力-ひずみ曲線推定

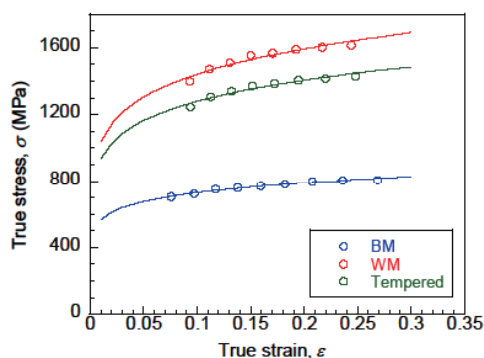
2パスの溶接ビード間の距離が10mmの場合の熱影響部のみ圧子半径0.125mmとし、それ以外の箇所では圧子半径0.25mmとした球圧子を用いて応力-ひずみ曲線を推定した結果をFig. 12に示す。なお、本評価では、各領域に対して3回の押し込み試験を行った結果の平均値を推定結果として用いている。熱影響部では押し込んだ位置の僅かな違いに応じて推定される応力-ひずみ曲線はじやっかん異なっていたが、ここではこれらの平均値を示している。結果を見ると、距離が15mmの場合(b)では2パスの溶接ビード間の箇所での応力-ひずみ曲線は母材部のそれとほぼ同等であるのに対して、距離が10mmの場合(a)では溶接金属部と母材部のそれとの中間的な値となっており、溶接金属部のそれにより近い結果となっている。ビッカース硬さはひずみレベル3%程度における変形抵抗(応力)に対応することから必ずしも適切な比較ではないが、前節で求めたビッカース硬さの違いとここで推定された応力-ひずみ曲線の違いは定量的にもおよそ対応がとれたものとなっているといえる。

4. 結言

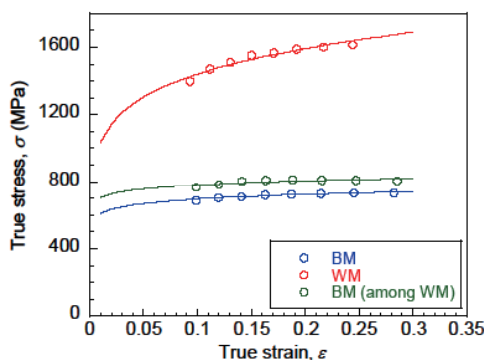
本検討では、球圧子押し込み試験の有限要素解析を実施し、測定領域の寸法(幅)に応じた圧子寸法の適正な選定指針を提示した。そして、球圧子押し込み法による応力-ひずみ曲線の推定法を低合金鋼溶接部に実際に適用し、強度不均質を有する溶接熱影響部の各領域での応力-ひずみ曲線の推定が可能であることを示した。

参考文献

[1] D.Tabor, "The Hardness of Metals", Clarendon Press, 1951.



(a) Distance between two weld beads is 10 mm



(b) Distance between two weld beads is 15 mm

Fig. 12 Estimated stress – strain curve

- [2] Y. Cao and J.Lu, "A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve", *Acta Materialia*, Vol. 52, 2004, pp. 4023-4032.
- [3] J. Ahn and D. Kwon, "Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations : Examination of strain definition and pileup effect", *Journal of Materials Research*, Vol. 16, 2001, pp. 3170-3178.
- [4] W.C.Oliver and G.M.Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *Journal of Materials Research*, Vol. 7, 1992, pp. 1564-1583.
- [5] 岡野成威、植屋皓太、望月正人, "圧子形状・寸法効果を利用したインデンテーション法による応力-ひずみ曲線推定法の検討", *M&M2016 材料力学カンファレンス 講演論文集 (2016)*, pp. 285-286.