実用講座

低温割れを防止するために

国内における予熱温度決定方法と 今後の課題*

糟谷 正**

Methods to Determine Necessary Preheat Temperature in
Japan and the Future Issues*

by KASUYA Tadashi**

キーワード 低温割れ, 炭素当量, 拡散性水素量, 予熱温度決定方法, 熱影響部

1. はじめに

溶接部に生じる低温割れは構造物の信頼性に重大な影響を及ぼすため、それを防ぐために必要な溶接施工条件の決定方法については、国内外を問わず多くの報告がある。そのほとんどは割れを防止するために必要な最低予熱温度を決定する方法である。もちろん、入力データとしての鋼材情報や溶材水素量などを変えることにより、予熱温度が与えられたときどのような材料選択をすべきであるか、という利用も可能である。しかし、基本的には予熱温度以外の条件が与えられたとき、割れを防ぐためには予熱温度をいくらにすべきであるか、を推定する方法である。

本講座では、まず溶接部の低温割れについてその特徴を概説し、国内各産業分野における割れ防止の考え方について、例題を交えながら比較を試みる。そして、最後に、今後の課題と方向性について検討を加えてみたい。

2. 低温割れの特徴

低温割れとは、溶接部に導入された水素と残留応力により引き起こされ、溶接部が100℃以下という比較的低温まで冷却してから発生するため“低温”割れと呼ばれている。割れの中には、溶接部が高温な状態で発生するものもあり、これらは“高温”割れと呼ばれ、低温割れと区別されている。以下に、低温割れの要因について述べてみたい。

2.1 炭素当量

低温割れは、水素と引張り残留応力が存在すれば必ず生じるというものではない。鋼材によって割れやすい場

合と割れにくい場合があり、そのため各鋼材の割れ感受性を表現するための指標が考えられてきた。これがいわゆる炭素当量であり、その歴史は60年以上と長い。なお、本講座では、鋼材成分の1次式で表されるものは全て炭素当量と呼ぶことにしている。炭素“当量”と呼ばれる理由は、Cについてはその係数が1であることから、C以外の元素の働きをC（すなわち炭素）に換算していることからくる。

初めて炭素当量が発表されたのは1940年のDearden & O’Niellの論文¹⁾であった。このとき初めて鋼材成分の1次式を用いて割れ感受性を比較できるようになった。水素と残留応力の条件が同じでも炭素当量の値によっては割れたり割れなかったりする。そこで、炭素当量がある値以下ならば割れは発生しない、という限界値をあらかじめ定めることにより、低温割れ試験を実施しなくても鋼材を選択することができるようになる。これはきわめて実用的なことである。なお、Dearden & O’Niellの炭素当量は、後のIIW炭素当量(CE (IIW))²⁾の基礎となった。

一方、鋼材の成分も、当時のものから変化してきており、それにとまって炭素当量式も修正・変更されてきた。例えば、国内でよく用いられている割れ感受性指標であるPcm（これも、Cの係数が1となっているため炭素当量式と考えることができる）は³⁾、合金元素の係数が小さい。PcmとCE (IIW)は、

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

$$CE (IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo}{5} \quad (2)$$

と表されている。また、日本溶接協会の炭素当量CE (WES)⁴⁾もあり、これは(2)に似た炭素当量ということもできる。

*原稿受付 平成18年2月28日

**正 員 新日本製鐵(株) Member, Nippon Steel Corp.

$$CE (WES) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (3)$$

(1), (2) 式で, 例えば Mn の係数は, それぞれ 1/20, 1/6 であり, 大きさとしては 3 倍以上の差がある. (3) は, 比較的 (2) に似ている. これは, 主として各炭素当量が得意とする成分範囲が異なるため, と考えられるが, 現在の鋼材では Pcm のほうが適切である場合が多い. いずれにしても, Pcm や CE (IIW) の元素の係数は全てプラスなので, 合金元素添加は割れ感受性を増加させる傾向にある. なお, C が高い領域では CE (IIW) に, C が低い領域では Pcm に近づくように合金元素の係数を C の関数としている CEN (後述)⁹⁾ という割れ感受性指標もある.

2.2 水素量

次に, 低温割れの 2 番目の特徴として, 水素を取り上げる. 溶接部の水素量は, JIS Z 3118 で定義されているように, 溶接直後の溶着金属 100 g 中の水素量であり, 45℃ 72 時間に出てくる水素を 0℃ 1 気圧にしたときの体積で表現する. 水素量が 5 ml というときには, 溶着金属 100 g 中に 0℃ 1 気圧で 5 ml の水素量が入っていたことを意味する. なお, この 5 ml の水素量は, 45℃ 72 時間で試験片の外に拡散して出てきたものであるため, “拡散性” 水素と呼ばれている.

溶接金属中に含まれている水素量のおもな発生源は, 溶接材料, 大気中の湿度, あるいは開先内に付着している油や水分などである. これらが溶接アークにより分解され, 水素として溶融プール内へ侵入していく. ここで注意したいのは, 溶接直後の水素量が例えば 5 ml あるとしても, 実際の継手に 5 ml の水素が残留しているわけではないという点である. JIS Z 3118 では, 溶接終了 5 秒後に試験片を急冷することになるが, 実継手ではこのような急冷は実施しない. 実継手では, 冷却過程でかなりの割合の水素量が拡散して継手の外へ出て行く. 低温割れに寄与する水素量は, 冷却終了後の水素量 (正確には, 若干ながら冷却終了後でも水素は拡散する. しかし, この拡散が進展する前に低温割れが発生するとすれば発生するため, 残留する水素としては冷却終了直後の水素量と考えてよからう.) であり, 溶接部に導入された全水素量ではない. このことは, たとえ導入された水素量 (これが JIS Z 3118 で測定される水素量になる) が多くても, 冷却過程で継手外に逃げてくれれば割れが発生しないことを意味する. そのためには, まず, 継手が高温領域, すなわち 100℃ 以上に滞留している時間を長くすることである. これは, 水素の拡散を促進させることを意味する. すなわち, 100℃ 以上という低温割れが生じない温度領域の時間をかせぎ, かつ, 水素の拡散係数が大きい温度領域に継手を保持するという 2 つの効果を利用する方法である. 一般に, 拡散距離は時間 (t) と拡散係数 (D) の積, Dt で評価できるが, 100℃ 以上に滞留している時間を長くすることは t と D の両方を大きくすることである. これを実現する最も効果的な方法は予熱を行なうことである. すなわち, 予熱は Dt をかせぎ, 冷却後の残留水素量を減らすことにより割れを防ごうというものである.

2.3 残留応力

次に溶接部の残留応力について述べてみたい.

低温割れは水素が起因で生じるが, 割れが発生するところは, 引張り残留応力が存在しているところである. この残留応力が大きいほど割れの危険は高まる.

残留応力は, 高温加熱された溶接部が冷却中に熱収縮する際, 周囲からの拘束により自由に収縮できないために生じる. そのため, 周囲からどれだけ強く拘束されているかどうかで発生する残留応力も異なると考えられる. このため, 残留応力の代わりに拘束度 (どれだけ拘束されているかを示すパラメータ) で割れ性を評価することもできる.

拘束度は, 開先を 1 mm 縮める (狭くする) ために必要な開先 1 mm あたりに加える力で定義される⁹⁾. 代表的な割れ試験方法である y 形溶接割れ試験では, 拘束度は板厚に比例 (但し, 厚くなるとほぼ一定になり文献⁷では 50 mm 以上ではほぼ一定と見なしでよい, と記述されている) するため, 厚手の試験体ほど割れ防止限界予熱温度が高くなる. 一方, ヒール割れ試験のように, ほとんど拘束がない場合でも割れが観察される場合がある. ヒール割れ試験の場合は, 垂直板の縦曲がり変形が原因で引張り応力が発生すると考えられる. そのため, 拘束度が低くても残留応力が大きくなる場合があることに注意すべきである.

2.4 予熱温度

この章の最後として, 予熱について述べてみたい.

予熱の目的は, 水素のところで述べたように, 水素拡散を促進させ, 継手が冷却する前に有害な水素をできるだけ外に逃がしてやることである. これは, 鋼中水素の拡散係数が温度に強く依存し, 高温ほど D が大きく, かつ 100℃ 以下になると水素トラップの影響により D がきわめて小さくなる傾向があることによる.

しかし, 局部予熱を実施する場合は, 予熱温度が同じであっても冷却過程も同じになるとは必ずしも言い切れない. それは, 局部予熱の場合, 溶接部が必ずしも均一に加熱されるとは限らず, 部分的には設定予熱温度までに達していない領域が存在するためである. この場合, 冷却時間が期待した場合より短くなる可能性もあり, 割れを防げない危険があることに注意したい. このような場合は, 予熱温度に加え, 100℃ までに冷却する時間も検討対象とすることが望ましい. 100℃ で冷却過程を区切る理由は, この温度以下で顕著になる水素トラップ効果を考慮したものであろう. そのため, 一部の割れ評価方法では, この 100℃ までに冷却するまでの時間, t₁₀₀ をパラメータに採用している^{7, 8)}.

なお, これまで発表された低温割れ評価方法は, ほとんどが, 鋼材や溶材などの材料, 水素量, 拘束度の情報が与えられたときの必要予熱温度を推定するものである. これは, ①鋼材の炭素当量については, 鋼材そのものの特性を確保するためには, 割れの観点からだけで選択することができない, ②構造物の都合上, どうしても拘束度が高くなる場合がある, ③水素量に対しても, 例えばきわめて水素量が低い TIG のような溶接方法は施工効率が低く採用しにくい, などの問題があるためであろう.

つまり、炭素当量、水素量、拘束度は、割れ防止の観点からだけ決定することができない場合が多いということである。このような背景から、これまでの低温割れ評価方法は、これら①～③を前提として、割れを防ぐ必要予熱温度を推定するという形になってきたのであろう。

3. 代表的な低温割れ評価方法

国内の予熱温度決定基準を考える前に、それ以外で、かつこれまで報告されてきている代表的な低温割れ評価方法について述べてみたい。

ここで紹介する評価方法は、BS 方式（英国規格、BS5135）⁹⁾、AWS 方式（米国溶接学会、AWS D1.1）¹⁰⁾、そして鋼構造協会方式⁷⁾（以降、JSSC 方式と記述）、CEN チャート方式⁹⁾である。これら方法には、それぞれ特徴があり、前章で述べた割れ要因ごとにその特徴をまとめてみたい。

炭素当量

BS 方式は CE (IIW)、AWS 方式と JSSC 方式は Pcm を用いている。AWS 方式では、C>0.12% 以上で、CE (IIW) にはほぼ近い、しかし Si の項を追加した形の炭素当量も併用している。CEN チャート方式は、CEN という以下の炭素当量を用いている。

$$CEN = C + A(C) \left(\frac{Si}{30} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right)$$

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh \{20(C - 0.12)\}$$

この式は鋼材成分の 1 次式とはなっていないが、広い意味で炭素当量とみなした。

拘束度

BS 方式は拘束度に関する入力はなく、通常の拘束の場合のみ扱っている。AWS 方式は、拘束度を、高、中、低と 3 水準に分けて、それぞれ利用者が選択するようになっている。JSSC 方式は、拘束度そのものを入力データとしている。CEN チャート方式は 2 段階に分かれていて、最初に拘束度が非常に高い y 形溶接割れ試験に対し、板厚ごとに予熱温度を推定し、その後通常の拘束度の場合と、捕集溶接など拘束が比較的高い場合で予熱温度を修正する。

水素量

水素量に関しては、全ての方法で考慮している。しかし、その扱いは 2 つに分かれている。すなわち、水素量の影響を直線的に扱うか、対数的に扱うか、である。直線的という意味は、水素量が 5 ml から 10 ml へ増加したときの影響と 10 ml から 15 ml へ増加したときの影響が同じと見る（どちらも 5 ml の増加）ことである。一方、対数的というのは、水素量が 5 ml から 10 ml へ増加したときの影響と 10 ml から 20 ml へ増加したときの影響が同じと見る（どちらも 2 倍の増加）ことである。直線的に扱っているものとして BS 方式と JSSC 方式が、対数的に扱っているものとして AWS 方式と CEN チャート方式がある。

以上のように、外国でも比較的良好に用いられている低温割れ評価方法においても、評価方法自体に差が見られるのが現状である。これら評価方法は長年使用されてき

たという経緯もあり、その修正はすぐには無理かもしれないが、上記に見られるような差異を統一する方向で今後改められていくことが望ましい。

4. 国内における予熱温度決定方法

本章で、国内における予熱温度決定方法について、その現状を概観してみたい。

まず、低温割れを防止するために必要な予熱温度を決定する基準として以下のものを紹介したい。

- ①道路橋示方書・同解説（日本道路協会、土木分野）
- ②日本鋼船工作法精度標準（日本海事協会、造船分野）
- ③鉄骨工事技術指針工事現場施工編（日本建築学会、建築分野）
- ④高張力鋼使用基準（高圧ガス保安協会、高圧ガス貯槽分野）

上記基準は、いずれも鋼板の炭素当量、板厚、水素量などで必要予熱温度推定できるようになっている。産業分野ごとに使いやすい形に設定されていると思われるが、課題がないわけではない。なお、予熱温度決定といっても、電気事業法のように後熱処理を省略できる予熱温度を定めるような場合、本講座の目的である低温割れ防止の趣旨にはそぐわないので省略している。

まず、具体的成分を例題として、実際に予熱温度を算出してみよう。

表 1 は、鋼 I をベースとし、鋼 II では C を増加させ、鋼 III では Ni を増加させ、鋼 VI では Cr を増加させた場合である。なお、このとき、鋼 II～VI で CE (IIW) が同じになるように C、Ni および Cr 増加量を調整している。表 1 以外の成分は 0 と仮定した。上記 1)～4) で推定するためには、鋼材成分以外にも、板厚、水素量が必要である。これらは、それぞれ 30 mm と 3.5 ml（グリセリン法）とする。

予熱温度計算の前に、まず表 1 で気がつくことを述べてみたい。

鋼 II と鋼 III では、CE (IIW) が同じになるように C と Ni の増加量を調節したが、Pcm は大きく異なることがわかる。これは、CE (IIW) と Pcm の各合金元素の係数が異なることからくるが、両者とも鋼材特有の割れ感受性を表現している指標であり、鋼材間の相対比較で違いが発生するのは好ましいことではない。CE (IIW) では、鋼 II、鋼 III は同等と判断されても、Pcm では鋼 III のほうが耐割れ性が優れているということになるからである。低温割れは、自然現象であるため、このような差異が生じることは好ましくなく、将来的には統一されることが望ましい。

表 1 比較に用いた鋼材成分値

鋼材	成 分					CE (IIW) (%)	CE (WES) (%)	Pcm (%)
	C	Si	Mn	Ni	Mo			
I	0.10	0.3	1.4	0	0	0.33	0.35	0.18
II	0.21	0.3	1.4	0	0	0.44	0.46	0.29
III	0.10	0.3	1.4	1.6	0	0.44	0.39	0.21
IV	0.10	0.3	1.4	0	0.53	0.44	0.48	0.22

なお、CE (WES) と Pcm の増加量の差異は、CE (IIW) と Pcm の増加量の差異ほど大きくはない。これは、CE (WES) の Ni の係数が Pcm と CE (IIW) のそれらの中間に位置するからであるが、いずれにしろ、割れ感受性評価は一致しない。

一方、CE (WES) の Mo の係数は、3 炭素当量の中で最も大きいため、CE (WES) では、鋼 IV が最も割れ感受性が高いと評価される。この評価結果は、Pcm および CE (IIW) の結果とも異なる。このように、鋼材間の相対的な割れ感受性が異なることは好ましいことではない。

次に、予熱温度がどの程度になるか見積もってみる。そのためには、水素量や拘束度が同じ場合について見積もる必要があるが、各基準の前提が必ずしも一致しないため、多少注意を要する。

まず、水素量であるが、道路橋示方書のように Pw という指標で任意の数値が入力できる場合は良いが、他は必ずしもそうっていない。そこで、日本鋼船工作法精度標準にあわせ、グリセリン法で測定したときの 3.5 ml を用いることとした。これは低水素系溶接棒に対応する。鉄骨工事技術指針工事現場施工編では、溶接方法ごとに予熱温度を定めているため、低水素系被覆アーク溶接の予熱温度を採用した。鉄骨工事技術指針工事現場施工編では、鋼板強度ごとに予熱温度を決めているので、表 2 には 490、520 MPa 級鋼材としたときの予熱温度を載せた。570 MPa 級鋼材と見なす場合は、全て 50℃ 予熱となる。高張力鋼使用基準では、鋼材が 60 キロ級と 80 キロ級の 2 種類しかないため 60 キロ級鋼材の予熱温度を適用した。道路橋示方書が採用している Pw は、拘束度も必要であるが、これは板厚 (mm) × 40 × 9.8 (N/mm²) とした。以上で予熱温度を見積もることができる。その結果を表 2 に示した。

以上のように予熱温度推定の前提を必ずしも一致させることができないため、推定値の値そのものを直接比較することは難しい。しかし、鋼 I をベースとし、鋼 II、III の予熱温度がどれだけ高くなっているか、その増加量は鋼材成分の影響のみによるため、この点だけでも比較を実施してみたい。

道路橋示方書で評価した場合、鋼 II と鋼 III では、Pcm が高い鋼 II で予熱温度も高くなっている。それに対して、日本鋼船工作法精度標準では鋼 II と鋼 III では同じ予熱温度になっている。表 2 では、予熱温度が 70～150℃ となっているが、これは、実構造物の拘束度等のばらつきを考慮して、予熱温度の範囲を定めているのであろう。CE (IIW) の値が同じである以上、同じ推定値と考えることができる。鉄骨工事技術指針工事現場施工編によれば、鋼 II と鋼 IV の CE (WES) が 0.44% を上まわっているため、予熱を別途検討しなければならないことになり、このため表 2 では 50℃ 予熱とした。この方法は、予熱温度を鋼種にしたがって決定するが、同じ鋼種でも CE (WES) が 0.44% を上まわれば予熱を検討することとなる。なお、鋼 I～VI を 60 キロ鋼材と見なすと、炭素当量にかかわらず予熱は全て 50℃ になる。高張力鋼使用基準は、60 キロ鋼材、80 キロ鋼材しか扱っておらず、とりあえずは 60 キロ鋼材の予熱温度を表 2 に示した。また、Pcm が 0.20%

表 2 割れ防止予熱温度推定結果

鋼材	道路橋示方書	日本鋼船工作法 精度標準 ^{*)}	鉄骨工事技術指針 工事現場施工編 ^{**)}	高張力鋼使用 基準 ^{***)}
I	20℃	70℃	20℃	20℃
II	100℃	70～150℃	50℃	75℃
III	20℃	70～150℃	20℃	75℃
IV	20℃	70～150℃	50℃	75℃

^{*)} 17kJ/cm の入熱量に対する予熱温度を適用した。
^{**)} 490-520MPa 級鋼材に対する予熱を適用し、鋼 II については、CE (WES) > 0.44% となっているので、予熱を仮定した。570MPa と見なす場合は、全て 50℃ 予熱となる。
^{***)} 60 キロ級鋼材用の予熱を適用した。鋼 I については、Pcm が 0.20% 以下となっているので推定値より 50℃ 低い値を採用した。

以下のときは、50℃ 低い予熱温度にしてよいとあり、かつ、その時の予熱温度が 50℃ 未満となる場合は予熱を行なわなくてもよいとあるため、鋼 I のみ予熱無しの 20℃ という結果になる。

以上のように、鋼 I をベースとし、鋼 II～IV を比較してみると、

- 1) 道路橋示方書では、鋼 II が最も割れ感受性が高いと判断され、かつ予熱温度が最も高い。他の鋼材は、予熱無しでよい。
- 2) 日本鋼船工作法精度標準では、鋼 II～IV は同じ割れ感受性と判断され、同じ予熱温度をすることとなる。
- 3) 鉄骨工事技術指針工事現場施工編では、鋼 II および鋼 IV で予熱が必要となる。これら鋼材では、CE (WES) がこの基準が定める値を上まわるため予熱を検討しなければならない。CE (IIW) は鋼 II～IV で同じ値でも、CE (WES) では異なる値となるため、このような現象が生じる。
- 4) 高張力鋼使用基準では、鋼 I のみ予熱無しとなる。この基準は道路橋示方書と同じ Pcm を使用しているが、予熱温度が道路橋示方書と異なっているのは、Pcm の値が 0.20% 以下かどうかという点のみで予熱温度を修正しているためで、この場合、鋼 II～鋼 IV は同じ扱いになるためである。

既に述べたように、各基準の前提を同じに設定することができないため、その比較は定性的にならざるを得ない。しかし、表 1 の結果を見ると、炭素当量以外の低温割れ要因を統一できたとしても、評価結果が異なることは容易に想像できる。

5. 今後の課題

前章で比較した必要予熱温度は、前提とする水素量や拘束度などを必ずしも一致させることができないため予熱温度そのものの比較は難しい。しかし、用いられている炭素当量が異なれば、たとえ炭素当量以外の割れ要因を一致させることができたとしても推定予熱温度も異なってくる。今回取り上げた低温割れ評価方法では、少なくとも鋼材成分が同じ場合であっても推定結果が異なってくるのがわかる。鋼材そのものが持つ割れ感受性は、現在では炭素当量のみで評価されるので、将来的には統一することが望ましい。そこで、これら炭素当量について若干の考察を加えたい。

炭素当量, (1)~(3) は, 発表当時は鋼材の割れ感受性を効率よく評価できた。しかし, 一つの炭素当量が発表された後にも鋼材の開発が進められ, それに合う新たな炭素当量が作成されたという経緯から, 現在のように数種の炭素当量が用いられているものと思われる。一般に, 低温割れは熱影響部 (HAZ) の最高硬さとの相関がよい。そこで, 硬さ曲線を用いてこれら炭素当量の考察をしてみたい。

図1は, 最高硬さ曲線の概念図である。ここで, 硬さ曲線における各元素の影響をしてみる。図1の実線を基準鋼材Aの硬さ曲線として, この鋼材にCのみを添加したとき, およびC以外の合金元素を添加したとき, 硬さ曲線がどう変化するかをしてみる。硬さ曲線において, 最も重要な点は, 図中の☆で示された点である。この点は, HAZ組織が硬いマルテンサイトのみになる点で, これより冷却時間が短い場合はHAZ組織が100%マルテンサイトになり, したがって硬さ変化があまりない領域である。なお, 図1には横軸に冷却時間を採用しているが, 一般には, 溶接後の冷却過程における800℃から500℃までの時間を対数でプロットする。図の☆より冷却時間が長い領域 (図1では☆の右側) では, マルテンサイト以外の組織が開始するので硬さ変化が大きい。さて, この基準鋼材Aに元素添加した場合, 基準鋼材Aの☆がどのように移動するのかを考える。Cのみ添加する場合は, ☆の位置は, 縦軸と横軸の両方向 (プラス方向) にシフトする。特に, 縦軸方向への移動は, Cでほとんどが決まる。そのため, ☆は▽へ移動する。一方, C以外の合金元素を添加する場合は, ☆を横軸方向のみへシフトするため, ★へ移動する。このように, Cとそれ以外の合金元素の働きが異なることに注意していただきたい。

図1の基準鋼材Aでは, ☆の位置が, 低温割れが問題となる溶接条件範囲のかなり左側, すなわち冷却時間が短い領域にある。図1で, 基準鋼材AにCを添加した場合 (☆→▽の変化) とC以外の合金元素を添加した場合 (☆→★の変化) と比較すると, 溶接条件によっては硬さ変化が, 合金元素添加の場合の方が大きいこともありえることが理解できる。つまり, 合金元素の影響は比較的大きい。次に, 既にある程度合金元素が添加されている鋼材を基準鋼材としたときを考える。図2の基準鋼材Bがそれに対応する。この場合, 合金元素を添加させ☆を

★に移動させても, 図2の溶接条件範囲内に限れば硬さ変化は図1の場合ほど大きくはならない。硬さ変化が大きくなるのは, 冷却時間がより長い領域である。一方, Cを添加させた場合は☆が▽に移動するが, この場合は硬さ変化相対的に大きくなる。つまり, 図2ではCの影響が大きいといえる。

図1と図2を比較すると, 図1の場合は合金元素の影響を大きく評価するCE (IIW) やCE (WES) が, 図2の場合はCの影響を大きく評価 (または, 合金元素の影響を大きく評価) するPcmが適切と理解できる。炭素当量にこの傾向が反映されているとすると, 合金元素の係数の大小に反映されるはずで, そのため, (1) と (2), (3) 式の違いが生じてくる。ここで問題になるのは, 現状の鋼材と低温割れが問題となる溶接条件との相対的位置関係がどうなっているかということである。現状の鋼材については, 図2の場合が多いようである。

以上のように, 炭素当量の各係数がそれぞれ異なっているのは, 鋼材と溶接条件の相対関係, およびCとそれ以外の合金元素の働きが違うことによると考えられる。現状の鋼材成分範囲を踏まえ, 今後は統一されていくべきものであろう。

水素量についても, 今後の課題が存在する。

水素量の影響が対数的か直線的かという議論は, 特に低水素領域で影響が大きい。水素量の影響を直線的に扱い場合は, 割れ指標は, 以下のように炭素当量に水素量の項を追加する形で表されている。

$$\text{割れ指標 } 1 = CE + A \times H_d \quad (4)$$

一方, 水素量の影響を対数的と捉える場合は,

$$\text{割れ指標 } 2 = CE + B \times \log (H_d) \quad (5)$$

となる。ここに, CEは(1)~(3)などの炭素当量, AとBは定数で, H_d は拡散性水素量である。いずれの場合も水素量増加とともに割れ指標が増加するため割れ感受性が高くなる。しかし, (4)式では問題も生じる。例えば, (4)では炭素当量の値によっては水素量が0でも予熱が必要であるという場合が生じてしまう。これは, 割れ指標としてあまり好ましいことではない。一方, (5)では, 水素量が0に近づくに従い $-\infty$ になるため, どんな炭素当

図1 硬さ曲線におけるCと合金元素の影響
(基準鋼材中の合金元素が少なくCが多い場合)

図2 硬さ曲線におけるCと合金元素の影響
(基準鋼材中にある程度合金元素添加されている場合)

量値であっても低水素化は割れ防止という観点からはきわめて有効であることを表している。

では、実際は (4), (5) 式のどちらなのであろうか。(4) の不都合は低水素領域の場合だけで、それ以外は問題ないのであろうか。著者の経験では、(5) 式のほうがより適切である。図 3 は、y 形溶接割れ試験での割れ防止限界予熱温度を、水素量を変えて調査した結果である。図 3 は横軸を通常のプロットで試験結果を表したものである。図 3 からわかるように、低水素領域で、予熱温度が急激に低くなることが読み取れる。図 4 は、図 3 のデータを、横軸を対数にして整理したものである。図 3 に比べ図 4 のほうが、水素量と予熱温度の関係がより直線的である、つまり、相関がよい。これは (4) より (5) のほうが適切であることを示している。本講座で紹介した国内予熱温度決定方法では、水素量の影響を対数的に扱っているものはない。今後は、この点も考慮されるべきであると考えられる。なお、水素量の影響が対数的であるという点に関しては、図 3, 4 のような実験結果からだけでなく、定性的な考察からも結論を得ることができる。詳しくは、前回の実用講座を参照いただきたい¹⁰⁾。

水素量に関しては、上記以外にも、グリセリン法での測定値を採用している、低水素系として一括扱いされて

いる、などの問題がある。低水素量領域での予熱温度推定を、より精度よくするためには水素量ごとの推定ができることが望ましい。さらには、その水素量の測定方法であるが、これはガスクロマトグラフ法に今後変更していくことが望ましい。グリセリン法では、水素がグリセリン中に溶けていくため、どうしても低水素側での誤差が大きくなってしまう。JIS Z 3118 によれば、グリセリン法での水素量 (H_{GL}) とガスクロマトグラフ法での水素量 (H_{DM}) の関係は、以下の式で与えられる。

$$H_{GL} = 0.79H_{DM} - 1.73 \quad (6)$$

この式によれば、 $H_{DM} < 2.19$ で H_{GL} がマイナスになり不合理である。そのためには、今後はガスクロマトグラフ法での値で予熱温度が決定できるようになることが望ましい。少なくとも、低水素系と一括扱いするのではなく、低水素系でも複数段階に区分けして扱うことが望ましい。

6. おわりに

本講座では、国内の低温割れ防止予熱温度の決定方法を選択し、それらの比較と今後の検討すべき課題について議論を加えた。決定方法はここで取り上げたものが全てではないが、同じ低温割れという現象を扱っていないがその評価方法はまだ統一されていないという課題については理解していただけたものと思う。溶接施工において、予熱の実施は大きな問題で、現状の決定方法がどのようになっているか、またどのような相違があるか、を理解することは、低温割れそのものを理解することにもつながる。

低温割れは構造物の信頼性に直接かかわる重要な問題であるが、材料開発が進み耐割れ性が向上してきたため、以前ほど注目されていない傾向にあるようである。しかし、現在の耐割れ性が優れた鋼材でも、どのような条件で溶接しても割れが発生しない、ということではない。そのためには、低温割れに関する理解と予熱決定方法への正しい理解が必要である。本講座がこれら理解の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) J. Dearden and H. O'Niell: Trans. Inst. Weld., Vol.3 (1940), 203.
- 2) IIW-Doc. IIW-382-71, "Guide to the weldable of C-Mn steels and C-Mn microalloyed steels", 1971.
- 3) 伊藤慶典, 別所清: 溶接学会誌, Vol.38 (1968), No.9, 983.
- 4) WES3001: 「溶接用高張力鋼板」
- 5) N. Yurioka and T. Kasuya: 溶接学会論文集, Vol.13 (1995), No.3, 347.
- 6) 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男: 「溶接工学」, 理工学社, 1979, 110.
- 7) JSSC 溶接割れ研究班: JSSC, Vol.8 (1972), No.80, 22.
- 8) N. Yurioka, H. Suzuki, S. Ohshita and S. Saito: Welding Journal, Vol.62 (1983), No.6, 147s.
- 9) BS5135 "Specification for process of arc welding of carbon and carbon manganese steels", 1987, British Standard Institution.
- 10) AWS-D1.1-90-Appendix XI "Guideline on alternative methods for determining preheat", 1990, American Welding Society.
- 11) 糟谷 正: 溶接学会誌, Vol.70, No.6, 650.

図 3 y 形溶接割れ試験における割れ防止限界予熱温度と水素量の関係 (水素量を直線プロットした場合)

図 4 y 形溶接割れ試験における割れ防止限界予熱温度と水素量の関係 (水素量を対数プロットした場合, 試験データは図 3 と同じ)