

SP 試験をもちいた溶接金属の延性脆性遷移挙動に及ぼす窒素量の影響の評価

横井浩一(工博)*・長尾 護*・三谷宏幸*・池田健一**

*技術開発本部・材料研究所 **阪コベルコ科研

The Influence of Nitrogen on Ductile Brittle Transition Behavior of Weld Metal Characterized by the SP Test

Dr. Koichi Makii・Mamoru Nagao・Hiroyuki Mitani・Kenichi Ikeda

SP (Small Punch) testing was performed to characterize the mechanical properties of welded metals as NDT (non-destructive test). Recently in steel bridges, in-situ welding has started to keep costs down, and therefore it has become necessary to develop NDT sensitive to the mechanical properties of weld metals. The authors discovered a SP parameter useful both to characterize the mechanical properties of weld metals and for correlation with CVN Charpy impact parameter such as vE_0 .

まえがき = 鋼橋のライフサイクルコスト低減のために、合理化橋梁のニーズが高まっており、溶接施工に関しては小数主桁化により現地空中溶接がおこなわれる場合がある^{1),2)}。

現地空中溶接の場合、いったんできた溶接構造物を破壊して靱性評価することはできないために、施工後非破壊のままその溶接部の健全性評価をおこなわなければならない。X線、UT(超音波)探傷試験などのいわゆる非破壊欠陥検査は現在もおこなわれている。しかし、ブローホールなどの溶接欠陥が発生していなくても、シールド不完全、入熱過大などの理由で、溶接部靱性そのものが低下する可能性があり、欠陥検査ではない溶接部靱性を評価できる非破壊検査技術(材質敏感非破壊検査技術)が必要とされている。

そこで、本研究では、とくに、シールドの変化に着目して、微小試験の一つであるSP(Small Punch)試験をもちいて、非破壊で施工後の溶接金属の材質を評価する技術の開発をおこなった。

SP試験は、当初、米国を中心に高速増殖炉、核融合炉材料の使用材料の照射脆化を評価するために開発された³⁾。現在では、原子力分野以外でも、プラント用構造材料の材質劣化診断に利用されている。SP試験は微小試験の中でももっとも試験片の小さい試験であり、構造体をほとんど傷つけることなく、構造材料の劣化診断が可能となる技術である。

SP試験において機械的性質を再現性良く評価するためには、試験片の板厚中に十分な結晶粒の数が存在していなければならないといわれている²⁾。溶接部は、凝固組織であり組織単位が大きく、微小試験で機械的性質を

評価しようとしたときに、機械的な性質を再現性良く評価できるかという判断が困難であった。このために、これまで微小試験では溶接部の評価にはあまり使われてこなかったものと考えられる。しかし、今回、評価しようとする溶接は入熱も大きくなく、実際に溶接金属の粒径を測定しても20~30 μ mであり、母材と同等の結晶粒径をもっているために、微小試験は十分有効であると考え、SP試験による非破壊溶接金属靱性評価試験の可能性の可否について検討をおこなった。

1. 実験方法

1.1 溶接実験

上下フランジは簡易型ロボットでおこない、ウェブは簡易型エレクトロガスアーク溶接機をもちいる工法がとられたことがある。しかし、これまでの現地空中溶接ロボットシステムは大掛かりで、より簡素な現地空中溶接システムが必要とされている。本研究では、現地空中溶接用のロボットシステムとしては、もっとも軽量・コンパクトで、各種溶接姿勢にも対応可能な最新型簡易型ロボットを採用し、現地空中溶接のうち、溶接金属の靱性確保が困難といわれているウェブ上進溶接で、ビード外観、溶接部靱性の確保の可能性を実験的に調査し、本簡易型溶接ロボットの実物件への適用性について検討をおこなった。

もちいた鋼材は第1表に示すように標準的なTMCP-SM490Bで、 vE_0 (0でのシャルピ吸収エネルギー)が227Jと靱性に優れた鋼板である。溶接条件を第2表に示す。もちいた溶材は1.2mmのFCW(フラックス入りワイヤ-)で、開先角度は35度のV型開で、ギャップは5

第1表 供試材の化学組成と機械的性質
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used base metal

Type	Chemical Compositions	Mechanical Properties			
		YP MPa	TS MPa	EI %	vE_0 J
SM490B	0.14%C-0.33%Si-1.26%Mn	446	553	26	227

第2表 溶接条件(GMAW)
Table 2 Welding conditions(GMAW)

Groove		Backing Bar	Shielding		Heat Input
Angle	Gap		Gas	Flow	
35°	5mm	Ceramic(FBB-3)	CO ₂	0.045m ³ /min	28-37kJ/min

mm とした。裏当てにはセラミックス製の FBB-3 (当社製) をもちいた。シールド条件は CO₂ で流量は 0.045m³/min 入熱は 28~37kJ/min とした。

以上の条件の範囲内で、上進溶接をおこない、シールド条件が異なるように試験体を A~D の 4 体作成した。

1.2 標準シャルピ試験と窒素分析

シャルピ試験片は写真 1 の溶接金属断面に示すように、14mm の板厚の中心板厚から V ノッチシャルピ試験片を採取した。ノッチ位置はサイドノッチとした。溶接金属靱性は vE_0 の $n=3$ の平均値で評価した。

窒素量の分析は、溶接金属中央に 3.0mm のドリル穴を開けて、その切削くず中の N 量を分析した。各試験体 4 体のシャルピ衝撃値 vE_0 と窒素量との関係を調査した。シールドの良好なものから順番に、つまり、窒素量の少なかったものから順番に A B C D 材として供試した。

1.3 SP 試験

本研究では、SP 試験の中でも、もっとも試験片形状の小さい 3.0×0.25mm の試験片を使用した。

SP 試験による溶接部の健全性の判断基準作成は以下の考えでおこなった。まず、工業的に広く利用されている JIS 標準 V ノッチシャルピ衝撃試験 (以降、JIS 標準シャルピ試験を CVN と表す) でえられる vE_0 と相関関係のある SP 試験指標を探索する。次に、その SP 試験評価指数が CVN 試験の vE_0 と相関関係があることに対する破壊力学的な考察をおこない、SP 試験による vE_0 推定方法の妥当性を検証する。

SP 試験としては、具体的には、室温での SP エネルギーのワイブル分布と、SP 試験での延性脆性遷移挙動、とくにその遷移温度 (以降、SPDBTT と呼ぶ) との関係性を調査し、CVN 試験での vE_0 とのそれら SP 試験指標との相関関係を評価した。

SP 試験片採取位置の一例を写真 1 中に示す。各試験体 4 体の 1/4 厚さ位置の溶接金属から試験片を採取した。SP 試験装置はインストロン型万能試験機に第 1 図に示すような³⁾⁴⁾ SP 試験治具を組み込んだものである。試験温度範囲は、-196 ~ 室温 (以降、RT と標示) とし、-196 は液体窒素中で、-196 ~ RT は液体窒素を蒸発させたガスを冷媒とし温度管理をおこなった。SP 試験片に直接熱電対を接触させ、各試験温度に 5 分保持できていることを確認し、雰囲気温度と試験温度が安定したことを確認した後に、荷重を負荷して SP 試験をおこなった。

2. 実験結果

2.1 溶接実験結果

2.1.1 ビード外観と溶接金属組織観察結果

シールド条件の異なる 4 体の試験体のうち、もっともビード外観の良好な A 材と、もっともビード外観の良くなかった D 材のビード外観写真を写真 2 に示す。もっともビード外観の良くなかった D 材は外観上でもブローホールが観察された。

A 材の溶接金属のミクロ組織写真を写真 3 に示す。入

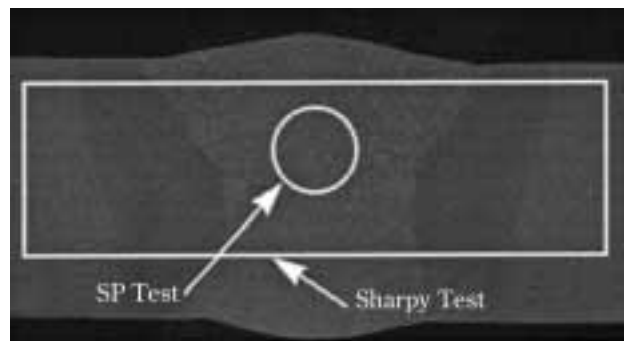
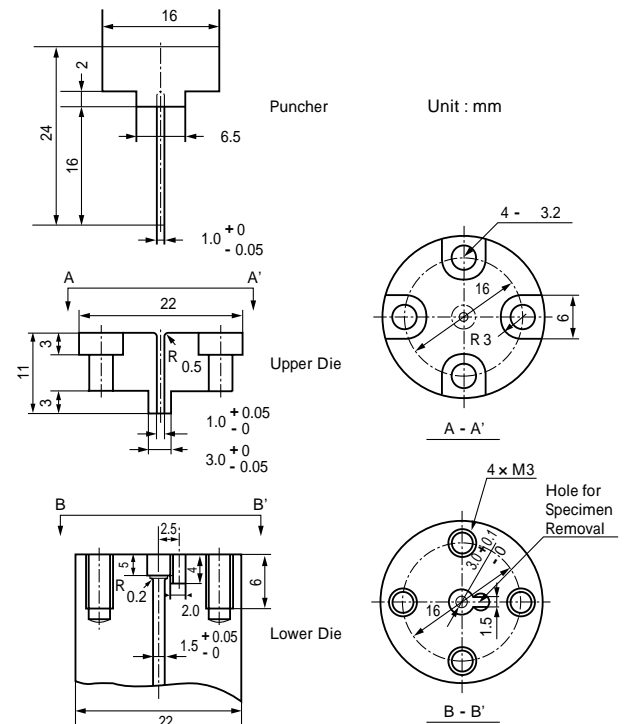


写真 1 溶接部のマクロ写真と CVN シャルピ試験および SP 試験片採取位置

Photo 1 Macrostructure of welding and sampling position in CVN sharpy test and SP test



第 1 図 SP 試験の荷荷治具
Fig. 1 Loading system of SP test²⁾

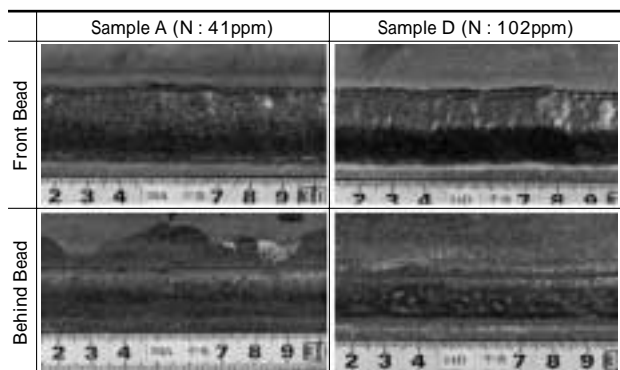
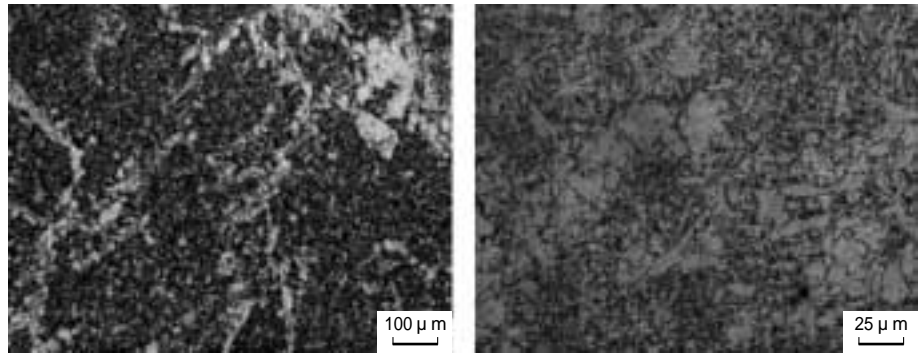


写真 2 溶接ビードとシールド性の関係

Photo 2 Relation between overview of bead and shielding

熱がそれほど大きくないため溶接金属の結晶粒径は A 材~D 材すべて約 20 μm 以下で、試験体による結晶粒径の違いは認められなかった。SP 試験の板厚が 0.25mm (250 μm) であり、板厚中に結晶粒は約 10 個存在することになり、試験片の微小化による機械的性質のばらつ

写真3 溶接金属のミクロ写真(サンプルA)
Photo 3 Microstructure of weld metal
(sample A)



きは無視できる結晶粒径と板厚の関係となっていることから、CVN 試験と SP 試験との相関関係の評価に際しては、結晶粒径の影響は無視している。

2.1.2 標準シャルピ試験による溶接金属靱性と窒素量との関係

シャルピ試験の vE_0 と窒素分析値の関係を第2図に示す。A材つまり、窒素量が41(ppm, 原子等量比で表示, 以降のppmもすべて原子等量比で表示)の場合、溶接金属の vE_0 は125Jと優れた値を示すが、B、C材、つまり、70~90ppmでは約40J、D材の100ppm以上では27Jとなっている。

また、100ppm以上(D材)では、ブローホールが外観上でも観察され、溶接金属のマトリックスの靱性以外に、溶接欠陥による溶接部材としての強度特性に問題が生じるものと考えられる。また、このように、100ppm以上の窒素量ではUT(超音波探傷)などの探傷試験でも十分に欠陥として検出できるレベルの数と大きさのブローホールが存在しているはずで、この窒素レベルでは探傷試験は十分に有効である。

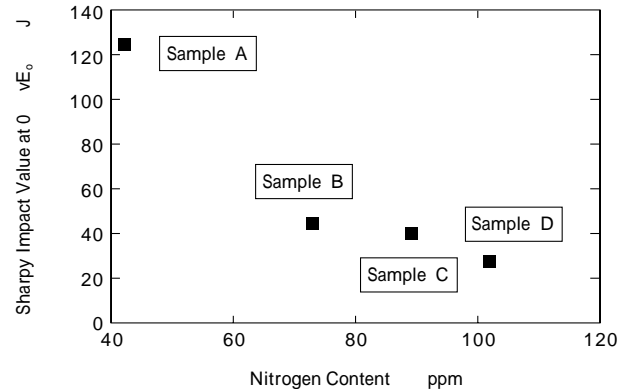
欠陥検査だけで検出できるレベルは道路橋示方書の規格値レベルであり、さらに、高度な溶接部材の非破壊検査技術、保証技術としては、溶接欠陥は発生しないが溶接金属の vE_0 が急激に低下する窒素量の範囲は40~90ppm程度、 vE_0 で見ると40~100J程度を非破壊で検査できる技術が必要といえる。

2.1.3 SP試験結果

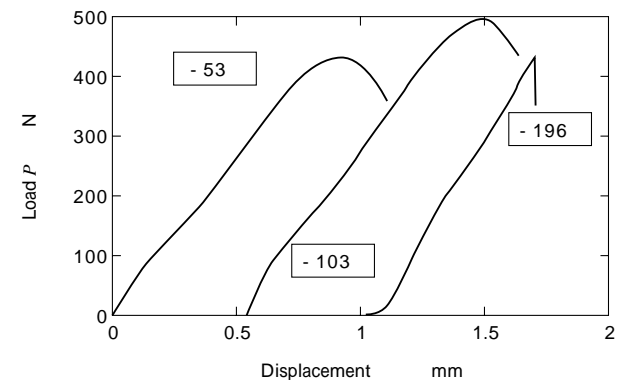
第3図に試験片D材をもちいた場合のSP試験の荷重-変位曲線(以降 P -カーブと呼ぶ)の一例を示す。横軸にクロスヘッド変位(以降、変位を記号 δ で表示する)をもちいて単位(mm)で表示し、縦軸をロードセル荷重(以降、荷重を記号 P で表示する)を単位(N)で示している。なお、試験温度 -53, -103, -196 の三つの例を示している。

-53 試験では、約90Nで P - の直線関係から逸脱し、傾きが低下し、約420N、変位1.9mmで最大荷重に到達し、その後、ネッキングを起こして、徐々に荷重低下し、延性的に破断する。このときの90Nまでの傾きが直線的な部分が弾性変形部分、90N以上の部分が塑性変形部分であり、約90Nの傾きが変わる部分が降伏点にあたる。

-103 の変形では降伏点が110Nまで上昇し、鉄鋼材料固有の現象である低温での変形抵抗の上昇が起きて



第2図 窒素濃度とシャルピ衝撃値 (vE_0) の関係
Fig. 2 Relation between nitrogen content and Charpy impact value (vE_0)



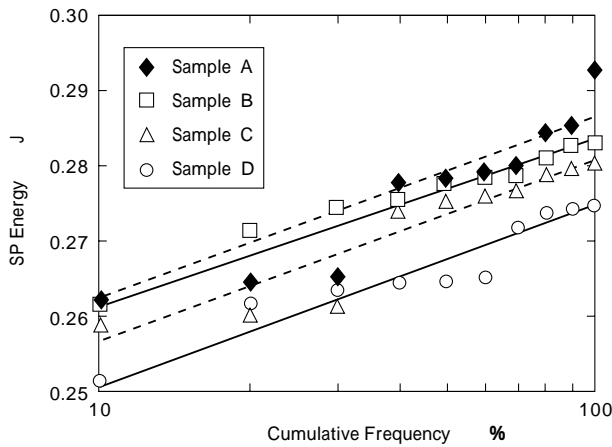
第3図 各温度におけるSP試験時の荷重-変位 (P -) 曲線
Fig. 3 P - curve at various temperatures in SP test

いることを示している。また、最大荷重も上昇し破断変位があまり変化していないことより、歪み吸収エネルギーがより低温側で上昇している。また、-196 ではさらに、降伏荷重が上昇し、約150Nとなっている。塑性変形は示すものの、最大荷重直後に急激な荷重低下、つまり、脆性的破壊が起きたことが特徴的である。この-196は塑性変形はともなうものの、最終的には脆性的な破断を示したことより、-196はこのSP試験における延性脆性遷移温度上にあることがわかる。

2.2 SP試験データとCVN試験データの比較

2.2.1 室温におけるSPエネルギーのワイブル分布と窒素量との関係

2.1節に記述したとおり、 P -カーブをA~Dの4試験体で、試験温度をRTとし、n数10でのSPエネルギーのワイブル分布を調査した。SPエネルギーとは P -カーブの積分値から求められるSP試験の塑性変形エネルギー



第4図 各溶接条件におけるSPエネルギーのワイブルプロット
Fig. 4 Weibull plot of SP energy in various welding conditions

のことである。その結果を、第4図に示す。CVN試験の vE_0 では窒素量の少なかったA材とそれ以外のBからD材には歴然とした差異が認められ、B~D材間の vE_0 の差は小さかった。いっぽう、RTでのSPエネルギーのワイブル分布はA材とB材の差異は非常に小さく、逆に、B、C、D間の差異のほうが大きいくらいであった。RTでのSPエネルギーのワイブル分布と vE_0 の相関関係が認められなかった原因については3章にて考察する。

2.2.2 SP試験における延性脆性遷移挙動と窒素量の関係

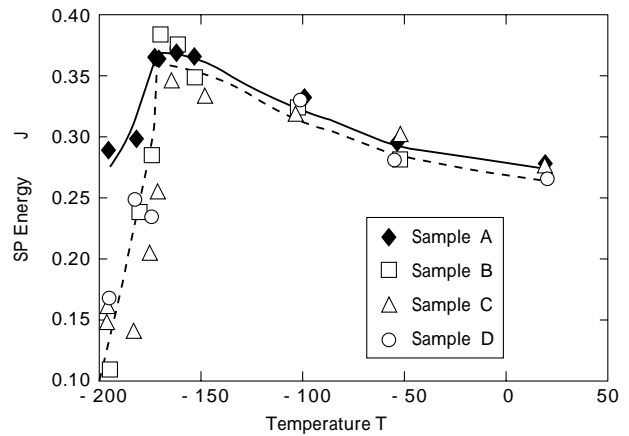
SP試験における-196~RTの温度範囲での延性脆性遷移現象についてA~D材の4鋼種に関して試験をおこなった。その結果を、第5図に示す。A~D材すべてにおいて、-160~RTまでは鋼種の差、つまり、窒素量の差は認められなかった。いっぽう、-196~-160の温度範囲においては、窒素量の少ないA材のみが高いSPエネルギーを示していた。-160~RTまでは延性脆性遷移現象のうち上部棚に相当し、塑性変形機構が主機構となる領域である。なお、-196~-160は延性脆性遷移領域であり、塑性変形と脆性破壊が共存する温度域に相当する。本研究でもちいたA~D材では、脆性破壊が主要因となる下部棚を観察することができなかった。下部棚は-196以下に存在すると考えられるが、-196以下の温度での試験は、液体あるいは冷却ヘリウム中での実験となり、試験手法としての困難さ、煩雑さがともなうので、本研究ではおこなわなかった。

しかし、CVN試験での vE_0 でA材とB~D材で明らかな相違が見られたように、SP試験の延性脆性遷移挙動でも、A材とB~D材では明らかな差異が認められた。この原因についても、次章にて考察する。

3. 考察

3.1 SPエネルギーのワイブル分布と vE_0 の相関関係が認められなかった理由

上部棚は塑性変形が主な変形機構として働き、強度と延性のバランスの優劣が上部棚の高低を支配する。つまり、一般におこなわれる室温での引張試験でいえば、上部棚エネルギーはSSカーブの積分値である歪み吸収エネルギーと相関のある指数である。



第5図 SP試験で測定した溶接金属の延性脆性遷移現象と窒素量の関係

Fig. 5 Ductile-brittle transition behavior and nitrogen content in weld metal characterized by SP test

鋼中のNは室温よりやや高目の温度域で変形中のセレーション、つまり、塑性変形の不安定さを引き起こすことが知られてはいるが、室温近傍以下での塑性変形挙動に与える影響はより少ない⁴⁾。いっぽう、窒素は、脆性破壊を誘発する元素として知られており⁵⁾、延性脆性遷移温度域での吸収エネルギーを急激に低下させる。

CVN試験での vE_0 測定温度である0は、今回と同様の溶接試験から推定するとCVN試験での延性脆性遷移温度(以降、DBTT_{cvn}と標示する)は室温近傍から室温よりやや低温側に存在し、 vE_0 測定温度である0は窒素量の影響をもっとも受ける温度域である。なお、SP試験における室温は、第3図のP-カーブにも示したように、完全塑性域であり、窒素の影響を受けない温度域となっている。つまり、CVN試験の vE_0 の測定温度である0は、窒素の影響を強く受ける温度域であり、SP試験のRTは窒素の影響をあまり受けない温度域である。RTでのSP試験は窒素の影響をあまり受けないのでワイブル分布をとってもほとんど変化せず、窒素の影響を受けている vE_0 と相関関係がないものと考えられる。また、実験的に第5図のSP試験の延性脆性遷移現象から判断して、RTでのSP試験は窒素の影響をほとんど受けない温度域であることが判断できる。

3.2 SP試験の延性脆性遷移現象と vE_0 の相関関係

亀田⁶⁾は、破壊力学的な観点から、以下のようにCVN試験とSP試験の延性脆性遷移現象の相似性を考察し、その相関関係を定量的に記述している。

前述のように上部棚は塑性変形が主な変形機構であり、下部棚は脆性破壊が主な変形機構である。そして、その両変形機構が共存する領域が延性脆性遷移領域であることより、CVN試験とSP試験の延性脆性遷移温度(以降、DBTTと呼ぶ)の相関関係は、CVN試験、SP試験において発生する歪み場、歪み速度、欠陥密度を関数として、破壊力学的に式(1)⁷⁾で記述できるとしている。

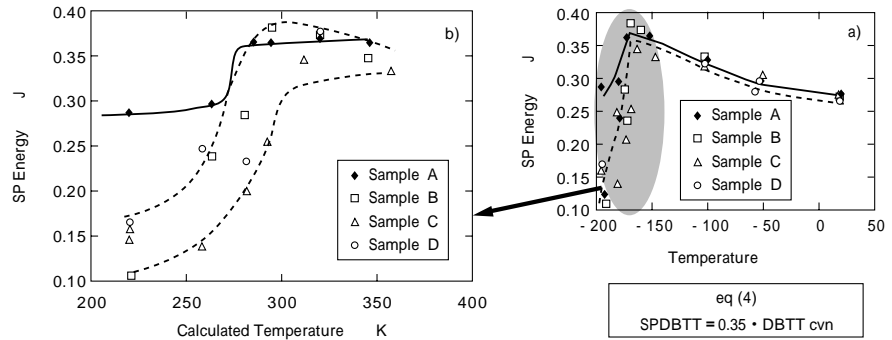
$$SPDBTT = \frac{(\ln((V_s/V_t) \cdot (F_s/F_t) \cdot (t/s))^{cvn})}{(\ln((V_s/V_t) \cdot (F_s/F_t) \cdot (t/s))^{sp})} \times DBTT_{cvn} \dots (1)$$

ここで、

V_s : き裂先端でのせん断変形がおきる体積

V_t : き裂先端での開口変形がおきる体積

第6図 SP試験と式(4)をもちいて評価した溶接金属の延性脆性遷移挙動と窒素量の関係
 Fig. 6 Relation between ductile-brittle transition behavior of weld metal and nitrogen content characterized by SP test and estimated by equation (4)



- F_s : き裂先端でのせん断変形領域での欠陥密度
- F_t : き裂先端での開口変形領域での欠陥密度
- s : き裂先端でのせん断変形領域での歪み速度
- t : き裂先端での開口変形領域での歪み速度
- cvn : JIS 標準 V ノッチシャルビ試験での値という意味
- sp : SP 試験での条件という意味
- DBTTcvn : JIS 標準 V ノッチシャルビ試験での延性脆性遷移温度 (絶対温度)
- SPDBTT : SP 試験での延性脆性遷移温度 (絶対温度)

式(1)の試験条件に起因する $V_s \sim t$ の六つの変数は、試験片形状、試験条件を固定すれば定数化でき、結局、SPDBTT と DBTTcvn の相関関係は $SPDBTT = 0.35 \cdot DBTTcvn$ という定数を使って、式(2)のように記述できる。その 0.35 は、本研究でもちいた実験条件では、式(3)に示すように、 0.35 となることが知られている。つまり、式(4)に示すように、SPDBTT と DBTTcvn は非常に簡便な相関関係を示すことが知られている。

$$SPDBTT = 0.35 \cdot DBTTcvn \dots\dots\dots (2)$$

$$SPDBTT = 0.35 \cdot DBTTcvn \dots\dots\dots (3)$$

$$SPDBTT = 0.35 \cdot DBTTcvn \dots\dots\dots (4)$$

式(4)の関係式をもちいて、第5図の横軸であるSP試験での実際の試験温度を、CVN試験での相当試験温度に変換した図を、第6図b)に示す。第6図b)では、CVN試験相当温度の室温近傍の部分を拡大して示している。SP試験での実温度での延性脆性遷移温度域は、CVNシャルビ試験に換算すると室温近傍となる。今回と同様の溶接条件から推定しても、本溶接の溶接金属のDBTTcvnは室温近傍と考えられ、第6図b)の換算したCVN試験相当温度は妥当な換算関係が成立しているものといえる。CVN試験の vE_0 評価温度である 0 は、延性脆性遷移温度にあたり、窒素量の影響を強く受ける温度域での評価となっている。いっぽう、SP試験の -196

-160 の延性脆性遷移温度域は、CVN試験に換算すると、 0 近傍となる。これもまた、窒素の影響が顕著に現れる延性脆性遷移現象を評価しているという点で、SP試験の $-196 \sim -160$ の挙動は、CVN試験の 0 近傍の挙動を相似的に評価していることになる。

むすび = 簡易型溶接ロボットをもちいて、シールドの異なる試験体を作成し、SP試験により、溶着金属の靱性評価をおこなって以下の知見をえた。

- 1) 簡易型ロボットをもちいて、現地空中溶接の模擬溶接実験をおこなった結果、シールドも良好で、溶接金属靱性も確保できる条件があることを見いだした。
- 2) SP試験の延性脆性遷移挙動と、CVN試験の vE_0 には相関関係があることを見いだした。
- 3) 破壊力学的に推定すると、SP試験の延性脆性遷移挙動とCVNの vE_0 の間には相関関係があるべきことが判明した。
- 4) SPDBTTをより厳密に求めようとした場合には、 -196 以下の極低温実験が必要であり、今後、極低温でのSP試験実験もおこなっていく必要がある。しかしながら、簡易的には溶接金属靱性の優劣を、 -196 以上のSP試験での延性脆性遷移カーブの形状から、定性的には推定できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 日本道路公団, 神戸製鋼所: 備明川橋パンフレット (1996)
- 2) 埴 洋二ほか: 橋梁と基礎, Vol.33, No.1, (1999), p.15.
- 3) 社原子力学会: 微小試験片材料評価技術の進歩, (1992).
- 4) J. Foulds et al.: J. of Eng. Mat. and Tech., Vol.116 (1994), p.457.
- 5) W. C. Leslie: The Physical Metallurgy of Steel (McGraw-Hill), (1981)
- 6) 亀田 純: 日本金属学会会報, Vol.25, No.6, (1986), p.520.
- 7) F. B. Pickering: in Towards Improved Toughness and ductility, Climax Molybdenum Co., Greenwich, Connecticut (1971), p.9.