

厚板耐候性鋼材の低温下での靱性能に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西弘明、今野久志、岡田慎哉、表真也

【要旨】

昨今、建設コスト削減を目的として、耐候性鋼材を用いた合理化橋梁が多数建設されており、少数主桁橋などでは厚板鋼材も使用されている。道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編）¹⁾では、気温が著しく低下する地方に架設される橋においては、低温靱性に注意して鋼種の選定を行わなければならないとされている。しかしながら、耐候性鋼材の低温下の靱性指標は示されていない。本研究では、厚板耐候性鋼材を対象に溶接部に対してシャルピー衝撃試験を行い、低温下の靱性能を確認した。

キーワード：シャルピー衝撃試験、靱性評価、厚鋼板、耐候性鋼材

1. はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾では、気温が著しく低下する地方に架設される鋼橋は、低温靱性に注意して鋼種の選定を行わなければならないと、引張力を受ける重要な溶接構造部材として使用する鋼材は、その地方における最低気温を考慮し、適切な靱性を確保することが望ましいとされている。さらに厚板部材については一般に、内部の応力状態が複雑になることや、製造上や溶接上の問題も生じやすいため、より靱性の高い鋼材が要求されている。

このようなことから、厚鋼板の低温下での靱性が実験的に確認されており、その結果から 40mm を超える厚鋼板同士の開先溶接継手部の構造については板厚に制約が設けられ、その鋼種選定方法^{2~4)}が提案されている。しかしながら、耐候性鋼材については低温下での靱性は検討がなされていない。

一方、現在、建設コストの削減を主な目的として、耐候性鋼材を用いた合理化橋梁が建設されており、少数主桁橋では厚板鋼材も使用されている。

これより、本研究では低温下における、厚板耐候性鋼材の使用温度を確認するため、溶接部に対してシャルピー衝撃試験を行い、低温下での靱性能を確認したものである。

2. 背景

2.1 現状における鋼材の靱性指標

道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編）では、使用鋼材が JIS 規格品であれば、靱性を含めた機械的性質も満足するものとされているが、厚鋼板に対する低温下での靱性

指標は特に規定されていない。また、溶接部は溶接施工試験の項における判定基準はシャルピー衝撃試験においてシャルピー吸収エネルギーが母材の規格値以上と設定されているが、同じく具体的な指標は規定されていない。日本工業規格（JIS）では、鋼材の靱性指標はシャルピー吸収エネルギー値で評価され、SMA490CW 材で板厚 40mm 以上の鋼板は、試験温度 0°C で 47J 以上が要求されている。

2.2 シャルピー吸収エネルギー設定の背景

第 2 次世界大戦中、輸送船舶の急造のため、全溶接による貨物船(リバティ船)が多数建造された。しかしながら、リバティ船は多数の損傷・事故が報告され、一部の船舶は瞬時の折損事故を起こした(写真-1)。そのため、英国船級協会ロイドは(以下、ロイド協会)、第二次世界大戦後、溶接船の脆性破壊事故の調査を実施すると共に、シャルピー衝撃試験を行った。

脆性破壊の発生が確認された船舶に使用されていた鋼板のシャルピー衝撃試験結果を図-1 に示す⁵⁾。横軸は吸収エネルギー、縦軸は延性破面率である。図中のシンボルは破壊様式を示しており、○印は脆性破壊、あるいは、き裂が停止した鋼板、●印は延性破壊した鋼板、×印は両者の中間的な破壊様式を呈していたことを表す。なお、試験温度は 0~20°C を中心に実施されており、0°C 以下は極めて少ない。

シャルピー吸収エネルギー値 47J 以下および延性破面率 30% 以下の場合、脆性破壊が発生する可能性が高いとロイド協会は判定した。現在においても、この試験結果

を基本として、0℃においてシャルピー吸収エネルギー値 47J 以上を有することが、脆性破壊しない靱性保証の簡便な指標として適用されている。

2. 3 耐候性鋼材

耐候性鋼材とは、鋼表面に保護性錆を形成するように設計された鋼材で、橋梁のライフサイクルコスト(LCC)の低減が図られることなどから、1970年代後半から鋼橋の部材に用いられている。

北海道においても1975年以降、順次採用されており、現在、約500橋程度の施工実績がある⁷⁾。

3. 厚板耐候性鋼板を用いた低温下でのシャルピー衝撃試験

3. 1 シャルピー衝撃試験

本研究ではシャルピー衝撃試験方法 (JIS Z2242) に基づき試験を実施する。

写真-2 には、試験機および高温下と低温下で実施した試験片の破断面の例を示す。

シャルピー衝撃試験 (Charpy impact test) は、破壊に要した試験片の吸収エネルギーから靱性を簡便に評価するものである。なお、シャルピー衝撃試験は、切り欠きを挿入した角柱状の試験片 (試験片:長さ L=55mm、幅=厚さ=10mm、中央に深さ 2mm の 45 度 V 字溝) を設置し、切り欠きのある部分の反対側に振子を衝突させ、試験片を破壊し、破断に要したエネルギーを求める試験である。吸収エネルギーの大きいものほど、粘り強く高い靱性を有することが知られている。また、多くの金属材料の吸収エネルギーは、試験温度によって変化するため、試験は指定された温度で行う。この際に、試験温度が室温と異なる場合には、試験片を加熱または冷却して行うこととされている。

3. 2 使用温度の算出概要

適宜設定した温度でシャルピー試験を実施し、吸収エネルギーと温度の関係より、エネルギー遷移温度を求める。この遷移温度⁶⁾とは、延性破壊から脆性破壊に破壊形態が変わる変曲点温度で、シャルピー衝撃試験から求められる温度であり、この温度よりも高温側では脆性破壊しないことを示している。

遷移温度 (試験温度) より、溶接部の最低使用温度を算出するため、下記の WES3003⁷⁾ の母材の要求遷移温度式を援用した。

$$vT_E = T + 166.3 - 0.13\sigma_{y0} \sqrt{t} - \frac{17976}{\sigma_{y0}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{y0}} + 0.6 \right)$$

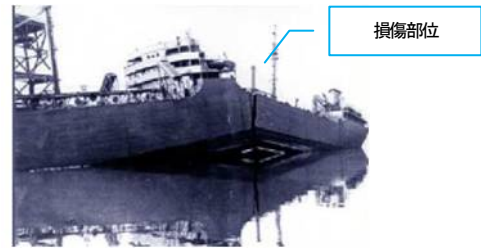
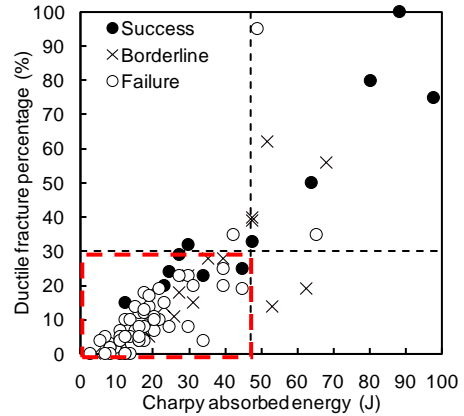


写真-1 溶接船 (リバティール) の脆性破壊事故



(試験温度: 0℃~+20℃を中心に実施)

図-1 ロイド協会によるシャルピー衝撃試験結果¹⁾

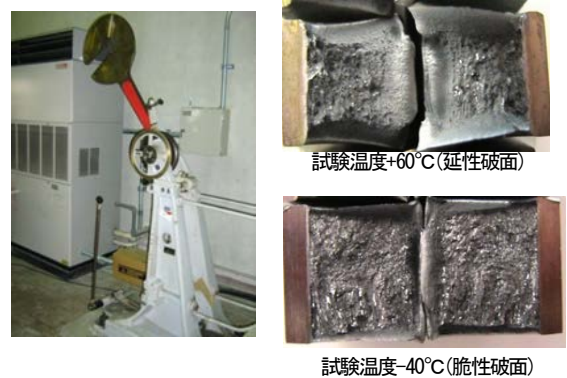


写真-2 シャルピー試験機および試験片の破断面の例

$$: \sigma_{y0} \leq 390 \text{ N/mm}^2$$

$$vT_E = T + 166.3 - 0.13\sigma_{y0} \sqrt{t} - 0.45\sigma_{y0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{y0}} + 0.6 \right) \exp\left(-\frac{\sigma_{y0}}{294}\right)$$

$$: \sigma_{y0} > 390 \text{ N/mm}^2 \quad \text{式 (1)}$$

ここに、

vT_E : エネルギー遷移温度 (℃)

T : 最低使用温度 (℃)

t : 板厚(mm)

σ_{y0} : 鋼材の降伏点または耐力の保障値 (N/mm²)

σ : 使用応力度 (N/mm²)

3. 3 溶接継手部の評価位置検討

図-2 には溶接継手部の概要を示す。図のように、溶接継ぎ手部は母材部 (BM)、熱影響部 (HAZ)、ボンド部および溶接金属部 (Depo) の3つに分けられる。図-3 には、この3つの部位別のエネルギー遷移温度と使用温度の一例を示す。図のように、使用温度が最も低くなるのは母材部 (BM) であり、最も高くなるのは溶接金属部 (Depo) である。そのため、本検討においては溶接金属部 (Depo) を対象に靱性評価を行うこととした。

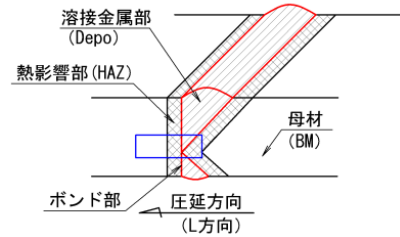


図-2 溶接継手部概要 (K形開先の例)

3. 4 試験の対象鋼材および対象部位

本試験では、耐候性鋼材を用いた合理化橋梁に用いられる厚板として、使用頻度の高い溶接構造用鋼材 SMA490CW-H を試験対象鋼材とした。試験片の採取は、母材と溶接金属部の2箇所とした。また、1つの試験温度に対する試験片は JIS Z2242 に準じ、3本としている。

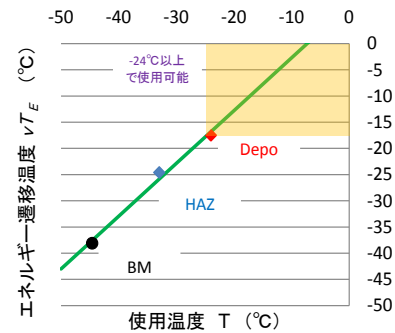


図-3 部位ごとの最低使用温度

3. 5 溶接条件

表-1 に溶接条件を示す。溶接は、完全溶け込み溶接で、標準的な溶接条件で施工した。

表-1 溶接条件

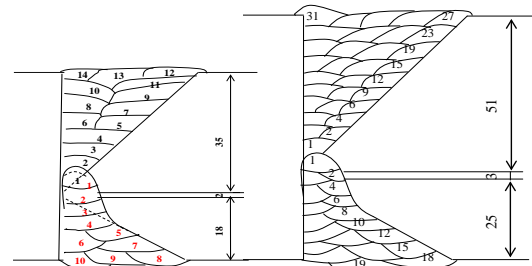
| 項目 | 55mm | 55mm | 79mm |
|-------------------|--------|------------------------|-----------|
| 予熱温度 | なし | 80°C | 50°C |
| 溶接法 | なし | CO ₂ -MAG溶接 | |
| 開先 | なし | K型 40, 55 | K型 45, 60 |
| 形状 | ルートキップ | 0 | 0 |
| ルートキップ幅 | mm | 2 | 3 |
| パス間温度 | なし | 150°C以下 | |
| ワイヤー径 | mm | φ1.2 | |
| CO ₂ 量 | l/m | 25 | |
| 電流 | A | 290 | |
| 電圧 | V | 35 | |
| 溶接速度 | mm/min | 180~500 | |
| 入熱量 | J/mm | 1218~3383 | |
| パス回数(上側) | 回 | 14 | |
| パス回数(下側) | 回 | 10 | |

開先条件は各溶接部を採取しやすいK形開先とし、溶接は、CO₂-MAG溶接とした。溶接材料には、耐候性鋼材用溶接材料 (JIS Z 3320 YFA-50W) の標準溶材を用いた。図-4 には実際の溶接積層図を示す。溶接積層図に示すように表層を溶接した後、裏面からガウジング処理を施し、裏面を溶接している。

表-2 には溶接記録を示す。表より本試験体を製作した際の溶接は、道路橋示方書に記載されている1パスの入熱量制限の7000J/mm以下であることが確認できる。

3. 6 試験ケース

表-3 には試験ケースを示す。本試験では、板厚55mmと79mmの2つの鋼材を用いて試験を実施し、低温下における靱性能について検討を行った。板厚55mmについては、耐候性鋼材の溶接割れ感受性組成 (以下、P_{CM}) を求めた結果0.22%であり、道路橋示方書・同解説では予熱を必要としない鋼材と判別される。ここでは予熱の影響を検討することを目的として、予熱の有無をパラメータとして試験を行った。なお、板厚79mmの鋼材については、P_{CM}は0.25%であり、予熱を行う必要がある鋼材と判別される。



(a) 55mm 予熱なし (b) 79mm 予熱有り

図-4 積層図

3. 7 マクロ試験結果

試験片溶接部の品質確認として、道路橋示方書・同解説(II鋼橋編)に示されるマクロ試験 (JIS G0553) を実施した。写真-3 には、代表的な溶接部の写真を示す。写真より、溶接欠陥はなく適切に溶接がされていたことが確認できる。

表-2 溶接記録

| 溶接条件 | 55mm 予熱なし | | 55mm 予熱有り | | 79mm 予熱有り | |
|---------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 入熱 | パス間温度 | 入熱 | パス間温度 | 入熱 | パス間温度 |
| 単位 | J/mm | °C | J/mm | °C | J/mm | °C |
| パス数(上側) | 14 | | 13 | | 31 | |
| 最大 | 2699 | 147 | 2904 | 148 | 2250 | 149 |
| 最少 | 1016 | 14 | 1296 | 82 | 12.1 | 40 |
| 平均値 | 1579 | 104 | 1814 | 132 | 1780 | 99 |
| パス数(下側) | 10 | | 13 | | 19 | |
| 最大 | 2674 | 143 | 2924 | 149 | 2230 | 144 |
| 最少 | 925 | 81 | 1168 | 81 | 11.2 | 53 |
| 平均値 | 1613 | 127 | 1639 | 137 | 1360 | 105 |

表-3 試験ケース

| 使用鋼材 | SMA490CH-W | | | | |
|--------|---------------|----------|---------|---------------|--|
| | 板厚 | 55mm | | 79mm | |
| 溶材 | DW-50W (普通溶材) | | - | DW-50W (普通溶材) | |
| 開先形状 | K開先 | | - | K開先 | |
| 予熱 | 無し | 有り(80°C) | - | 有り(50°C) | |
| 評価部 | 溶接金属部 (Depo) | | 母材 (BM) | 溶接金属部 (Depo) | |
| 試験片サイズ | 標準試験片 | | | | |
| 試験温度 | 6温度 | | | | |
| 試験体数 | 6温度×3本+予備2本 | | | | |



写真-3 溶接部の写真

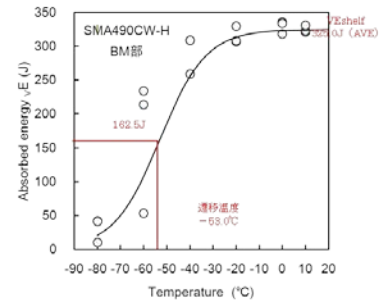


図-5 板厚55mm (母材)の
吸収エネルギー-遷移曲線

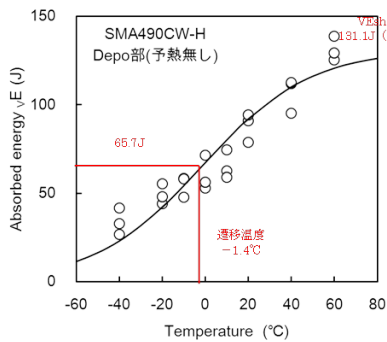


図-6 板厚55mmの
吸収エネルギー-遷移曲線
(予熱なし)

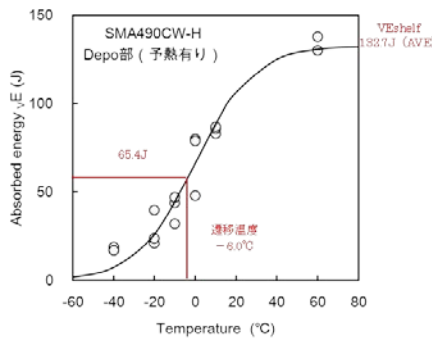


図-7 板厚55mmの
吸収エネルギー-遷移曲線
(予熱有り)

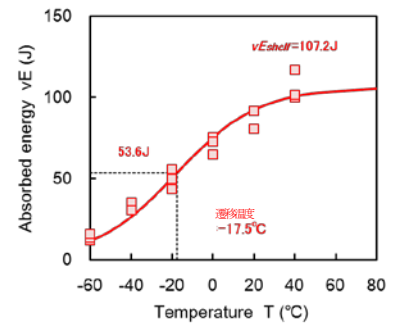


図-8 板厚79mmの
吸収エネルギー-遷移曲線
(予熱有り)

3. 8 シャルピー衝撃試験結果

本検討では、前述のとおり耐候性鋼材の溶接継手部に有するエネルギー遷移温度に着目することとした。

図-5には、SMA490CW-Hの母材(BM)の遷移温度曲線を示す。図より、試験結果の遷移温度は -53.0°C となった。

図-6~8には同じく溶接金属部の結果を示す。図より、遷移温度は、板厚55mmは -1.4°C (予熱なし)、 -6.0°C (予熱有り)、板厚79mmは -17.5°C (予熱有り)となった。

3. 9 耐候性鋼板の使用温度

シャルピー衝撃試験より得られたエネルギー遷移温度を用いて、WES3003式より最低使用温度を算出した結果、母材であるSMA490CW-Hの最低使用温度は -67.8°C となり、北海道の最低気温よりも低温側にあるため、北海道での使用に問題がないと判断される。一方、Depo部試験体については、板厚55mmの予熱無しで、最低使用温度は -16.2°C 、予熱有りでは -20.8°C となり、予熱による若干の靱性能の改善が見られた。また、板厚79mmでは -24.0°C となった。

4. まとめ

耐候性鋼材の使用温度域は、安全側に評価すると、本試験では溶接金属部の最も高い温度が使用温度と考えられる。本結果から耐候性鋼材(SMA490CW-H)自体の使用は問題がないと判断されるが、標準溶材を用いて開先溶接継手を行った場合は、**板厚55mm程度以上では、 -20°C 前後が最低使用温度であると判断される。**

低温環境下で厚板の耐候性鋼材を用いた主要部材に溶接継ぎ手を設ける場合、WES3003式(1)により最低使用温度を確認する。これを満たさない場合の対策として、継手位置の変更、低温域で高靱性を有する溶接材料の選定、溶接施工試験により、施工条件を再設定するなど脆性破壊に対して安全性の検証を十分行ったうえで施工することが必要である。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書(II 鋼橋編)・同解説、pp.113-124, 452-453、1956
- 2) 表真也、三田村浩、廣畑幹人、松縄秀範、金裕哲、日本道路協会：寒冷地における鋼材選定法に関する

一提案、土木学会北海道支部、2012

- 3) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会、北海道における鋼道路の設計及び施工指針（第1編）設計・施工編、2012
- 4) 北海道開発局 道路設計要領 第3集 橋梁、第1編、第1章_総則 p3-1-16~19、2012.
- 5) J. Hodgson and G. M. Boyd : Brittle Fracture in Welded Ships, The Institution of Naval Architects, Quarterly Transactions, 100-3, pp. 141-180, 1958.6
- 6) 日本工業規格、Z2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法、2005
- 7) 社団法人 日本溶接協会、WES3003 低温用圧延鋼板判定基準、1995.

STUDY ON THE TOUGHNESS OF WEATHER RESISTANT STEEL PLATE AT LOW TEMPERATURES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2013

Research Team : Structures Research Team and

Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

OKADA Shinya

OMOTE Shinya

Abstract : Recently, rationalized bridges using Weather resistant steel have often been constructed to reduce construction costs. *Specifications for Highway Bridges Part II Steel Bridges* notes that for bridges constructed in areas where extremely low temperatures are expected, the steel types should be selected with careful attention to toughness of the steel at low temperatures. However, the steel toughness index at low temperatures is not indicated in the specifications. This study clarified the toughness of Weather resistant steel plate at low temperatures by conducting Charpy impact tests on the welded parts of the plates. The tests revealed that the welded parts of Weather resistant steel plates did not satisfy the required toughness at low temperatures.

Key words : Charpy impact test, toughness evaluation, steel plate, Weather resistant steel