

鋼部材点検時に検出された亀裂の限界寸法設定に関する一考察

日本エジ(株) ○川井 豊 日大生産工 木田 哲量
日大生産工 阿部 忠 日大生産工 水口 和彦

1. はじめに

木曽川橋トラス斜材破断¹⁾やミネアポリス橋落橋事故²⁾等を契機に、道路施設や港湾施設等の社会資本ストックの維持管理の重要性が再認識され、構造物の長寿命化を目的とした技術開発の必要性が強まっている。鋼橋をはじめとする鋼構造物の強度劣化原因の大半は腐食による部材断面の減少と考えられるが、設計荷重に近い繰り返し荷重が作用する構造物においては疲労損傷も重要な耐久性阻害要因となる。そのため、点検では腐食と亀裂の存在が主要対象となる。

疲労損傷に関しては、点検により疲労亀裂が検出された場合、亀裂の発生部位、亀裂形状・寸法、部材応力状態等を勘案して補修・補強の必要性およびその緊急性を敏速に判断する必要がある。即ち、検出後次回点検までの供用に対して亀裂の進展を想定したうえで、①延性破断、②脆性破壊、について発生の可能性を検討し、対策の緊急性を判断することになる。

一般的には、過去の損傷例からも図-1¹⁾に示すように②の破壊モードが先行することが多いことから、脆性破壊発生限界亀裂寸法を推算し、検出された亀裂寸法と比較することにより補修補強までの猶予期間を求めることが必要となる。

本研究は、鋼材の韌性値の実績値をベースに脆性破壊発生限界亀裂長の推算を行うことにより、点検時に検出された亀裂の許容限界寸法の設定方法についての提案を行うものである。



図-1 鋼橋の脆性破壊例 (The Hoan Bridge)³⁾

2. 脆性破壊限界亀裂寸法

検出された疲労亀裂が部材の脆性破壊に移行するか否かの判定には、新規製作構造物で検出された溶接欠陥に対し、許容・非許容を判定する Engineering Critical Assessment;ECA⁴⁾ の手法と基本的には同じ手法を用いることができると考えられる。ECAは、照査用部材応力（作用）と使用鋼材の韌性値（抵抗）から破壊力学の手法を用いて構造物供用後の荷重繰返し（疲労）による欠陥の成長を考慮して判定するもので、これを点検時許容限界寸法の評価に適用する場合の評価手順を図-2に示す。

点検により亀裂が目視検出された場合、近接可能な場合には亀裂の発生部位及び検出亀裂の寸法、形状に関する情報が収集される。この検出亀裂に関する情報を ECA における初期欠陥情報と見做し、次回の点検までに繰返し荷重により進展（安定成長）し脆性破壊（不安定成長）を生じないか否かを、使用鋼材・溶接部の韌性値と部材応力の作用条件から脆性破壊発生亀裂長を推算し判定するものである。

多数の鋼構造物に対する点検業務を想定する場合、新規構造物の溶接欠陥に対する ECA の適用とは異なり、使用鋼材・溶接部の韌性値が不明なことが多い、これを調査した後判定するのは緊急性と反する。そのため、予め種々の鋼種ごとに代表的な値を設定しておき、限界亀裂寸法を示すことが有効と考えられる。

3. 使用鋼材の破壊韌性値評価

一般的には使用鋼材の脆性破壊に対する抵抗値として、JIS Z2202、JIS Z2242 に規定されるシャルピー吸収エネルギー； vE が用いられる。シャルピー衝撃試験は、工業的小型試験方法であることから、過去からのデータの蓄積が多く、鋼材の延性-脆性遷移現象を能率よく捉えることが可能である。しかし、ECA の基本的考え方である破壊力学的な扱いにより不安定破壊が開始する破壊韌性を決定するための直接的情報を与えない。ECAにおいて必要な材料

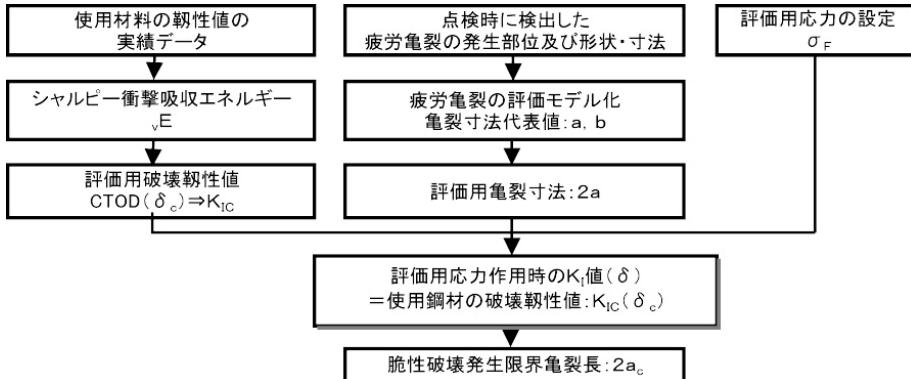


図-2 ECA 手法に基づく脆性破壊発生限界亀裂長の推算手順

特性値の評価試験法はいわゆる破壊革性試験である。破壊革性試験には、 K_{IC} （平面ひずみ破壊革性）試験、CTOD（き裂開口変位）試験、 J_{IC} 試験、等があるがいずれも試験方法は複雑で工業的に一般化されていないことから、過去の実績データが少ないので最大の欠点である。そのため、構造物に用いられた鋼材の革性に関し入手が容易な特性値であるシャルピー衝撃吸収エネルギーを用いて限界亀裂寸法を推算できれば大きなメリットとなると考えられる。

ここでは、過去の実績調査データがある $v_E(T)$ を用い K_{IC} 値および δ_c 値に換算し評価用破壊革性値を得ることとした。

$v_E(T)$ から破壊革性値を推定する換算手法は WES3003⁵⁾ 及び WES2805⁶⁾ に記載があるが、使用温度が比較的低い場合を想定したものであることから、ここでは、これらの換算式を関東地方での実用的最低温度($T=-10^{\circ}\text{C}$ 程度)を勘案して再整理し適用することとした。

① 主に母材・・WES3003

$$\delta_c(T) = 0.001 \times v_E(T + \Delta T) \quad (1)$$

$$\Delta T = 133 - 0.125 \sigma_{Y0} - 6\sqrt{t} \quad (2)$$

② 多層溶接熱影響部 ($t/4, 2t/4, 3t/4$ の位置における平均シャルピー吸収エネルギーをベース)

$$\delta_c(T) = \alpha_v [v_E(T + \Delta T_M)/9.807]^{\beta_v} / \sigma_{Y0}(T) \quad (3)$$

$\delta_c(T)$: 温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における CTOD 値(mm)、 $v_E(T + \Delta T_M)$: 温度 $T + \Delta T(^{\circ}\text{C})$ におけるシャルピー吸収エネルギー(J)、

α_v, β_v : 材料の降伏応力 σ_{Y0} の関数

$$\alpha_v = 104.9 - 0.27 \sigma_{Y0} \quad \sigma_{Y0} \leq 353 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$9.807 \quad \sigma_{Y0} > 353 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\beta_v = -0.54 + 4.64 \times 10^{-3} \sigma_{Y0} \quad \sigma_{Y0} \leq 353 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$1.1 \quad \sigma_{Y0} > 353 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\Delta T_M = 8 - 6\sqrt{t} \quad t \leq 75 \text{ mm} \quad (6)$$

$$-44 \quad t > 75 \text{ mm}$$

σ_{Y0} : 室温における材料の降伏応力あるいは

0.2%耐力 (MPa) t : 材料の板厚 (mm)

WES2805 を用いた脆性破壊発生の可能性検討では、評価用破壊革性値として CTOD 試験により得られた限界 CTOD 値; δ_c を用いることが推奨されている。ここでは、三木らの鋼製橋脚を対象とした疲労亀裂の管理限界評価方法⁷⁾を踏襲し K_{IC} 値を用いることとし、 δ_c を (7) を用いて評価用 K_{IC} 値として求めることとした。 δ_c から K 値の換算には、

$$\delta = (1 - v^2) K^2 / 2E \cdot \sigma_{Y0} \quad (7)$$

なる関係を用いた。

図-3 に、上記換算式の変換精度を検証するため、600MPa 級高張力鋼の δ_c の実績値と v_E の実績データ⁸⁾ から求めた δ_c 換算値をプロットして示す。同図から、母材式 (1) (×印) は -60°C 以下の低温領域ではほぼ精度良く変換できているが、それ以上の温度領域では過小な変換値を与えることが分かる。同図には、元来適用対象外ではあるが、多層溶接熱を無視して準用した場合の変換 δ_c をプロット (○印) して示したが、比較的 CTOD 試験による δ_c の下限に近い値となることが分かる。 $v_E(T=0^{\circ}\text{C})$ のデータから使用最低温度 ; $T=-10^{\circ}\text{C}$ での δ_c の換算には WES2805 の多層溶接熱影響部に対する換算式を準用する方が良い換算精度が得られることが分る。

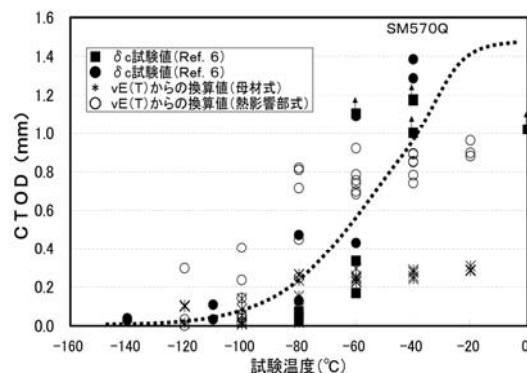


図-3 δ_c の換算値と実測値

図-4には、各種構造用鋼材の、Eデータ⁹⁾を換算式により変換した破壊靱性値；K_{IC}の〔平均値-2×標準偏差〕及びデータ最小値を示す。

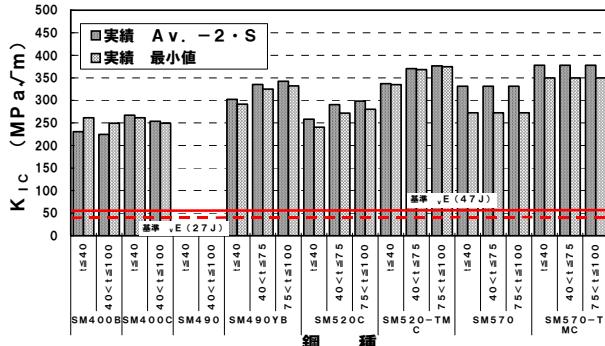


図-4 各種構造用鋼の換算破壊靱性値；K_{IC}

4. 検出疲労亀裂の評価モデル

理想的には、各種非破壊検査を含む詳細な損傷状況の調査と原因究明を行った上で、対策の緊急性を判断することが望ましいが、その作業には多くの時間と費用を要する。そのため、疲労損傷が目視で検出された場合、発生部位、亀裂形状・寸法等の点検情報を基に、ある程度の精度で損傷レベルを評価し対策の緊急性について速やかに判断することが望まれる。接近目視による点検では、亀裂の始点の位置に拘わらず点検側の可視限界以上の表面亀裂長のみが評価用亀裂モデルに関する情報となる。

4.1 点検側に疲労亀裂の始点がある場合

点検側の溶接止端部等に始点をもつ疲労亀裂は、板幅方向および板厚方向に低速で進展し、板厚貫通した後に急速に進展速度を上げる。塗膜上からの点検では亀裂長 20mm 以上で疲労亀裂として認識可能と言われている¹⁰⁾ことから比較的厚肉のフランジでは表面亀裂の段階での脆性破壊の可能性は低いと考えられる。一方、フランジ突合せ溶接の内部欠陥等、溶接内部傷を始点とする疲労亀裂では、板厚貫通時点には板幅方向にも進展が進むことから、検出時亀裂長が点検限界長を大巾に超えて検出されることがある。そのため、ここでは板厚貫通後の亀裂を対象に、脆性破壊発生限界亀裂長を前記で求めた破壊靱性値；K_{IC}と照査用応力；σ_Fを元に推算し、対策を講じるまでの余裕期間の有無から点検時許容限界亀裂長を求める。

(1) 評価用破壊靱性値(図-4)に示す下限値を参考に評価用K_{IC}値を以下のように設定する。
K_{IC}=200MPa \sqrt{m} (SM400B)、

$$240 \text{ MPa}\sqrt{m} \text{ (SM490YB, SM520C),} \\ 270 \text{ MPa}\sqrt{m} \text{ (SM570)} \quad (8)$$

(2) 評価用照査応力

① σ_F = σ_{YO} … 亀裂検出から補修・補強までの猶予期間内に地震により着目部材に降伏応力が作用（生起確率は低い）

② σ_F = σ_{a1} … 亀裂検出から補修・補強までの猶予期間内に使用鋼材の許容応力が作用

③ σ_F = σ_d … 通常の供用条件下

(3) 評価用応力拡大係数

亀裂長；2a の亀裂先端における応力拡大係数；Kは次式で与えられる。

$$K = F_t \cdot \sigma_F \cdot \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

ここに、F_t；引張応力に対する形状補正係数
脆性破壊発生限界寸法；a_cは、応力拡大係数；Kが破壊靱性値；K_{IC}に達した時とおくことにより、下式で得られる。

$$a_c = [K_{IC}/F_t \cdot \sigma_F]^{2/\pi} \quad (9)$$

図-5には、1,100mm×76mm のフランジを有する大型鋼桁を対象に、フランジ首溶接から発生した疲労亀裂を想定した板厚貫通亀裂を例に、下式による亀裂進展解析結果を、亀裂長；2a と K 値の関係として示す。

$$a = \int C (\Delta K)^m dN \quad (10)$$

ここに、N；繰返し回数(回)、ΔK；応力拡大係数変動範囲、C, m；材料定数

(9) 式により脆性破壊の発生判定を行い、破壊靱性値が高い最近の鋼材を用いた鋼構造物では、SM490 以上の高張力鋼において地震時想定評価応力 (σ_F = σ_{YO}) に対してのみ脆性破壊の可能性があり、SM490Y 級鋼で 2a_c = 280mm、SM570 級鋼で 2a_c = 220mm が点検時限界亀裂長と推算された。

点検時に部材・部位ごとに使用鋼材の鋼種を識別するのは煩雑であることから、限界亀裂長の最小値をまるめ、2a_c = 200mm を緊急対策を必要とする亀裂長、補修補強対策検討の必要限界亀裂長として上記の半長 2a_c' = 100mm、さらにその半長 2a_c'' = 50mm を要監視限界亀裂長とすることが一方法と考えられる。

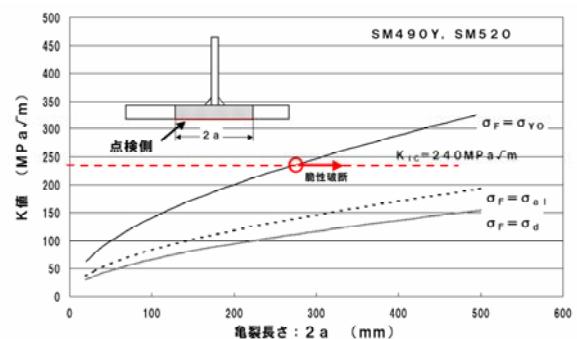


図-5 フランジ貫通亀裂の進展解析例と K 値

4.2 点検側に疲労亀裂の始点がない場合

道路橋上フランジの如く、その上面に床版が設置される場合等は、上面の直接目視は不可能となる。この場合には、上フランジ上面の付加物溶接（スラブアンカー、スタッド等）に亀裂の始点を有する疲労損傷では、亀裂がある程度進展し板厚を貫通し下面に到達した時点で始めて目視で検出されることになる。

そのため、ここでは目視で検出された時点での脆性破壊移行の可能性について検討し、目視点検情報のみでの判断可否について検証した。

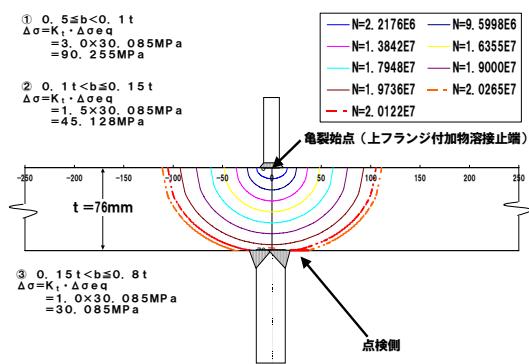


図-6 上フランジ始点疲労亀裂進展解析例

図-6には、連続桁中間支点上を想定した負曲げモーメント領域での上フランジ上面付加物（ズレ止め、等）取り付け溶接止端から発生する疲労亀裂の進展解析結果の一例を示す。負曲げモーメント域では荷重の繰返しにともない板厚方向・板幅方向にほぼ同速度で進展しほぼ半円形に近い進展挙動となる。板厚を貫通、点検側で検出した時点（フランジとウエブの首溶接部に到達時）では、上面の表面亀裂長さは板厚の2.7倍程度となる（板厚78mmで $2a=210mm$ ）。図-7には、次回点検までの亀裂進展に伴うK値の増加曲線を示す。次回点検時には脆性破壊発生限界亀裂長に近い寸法となる可能性が高いことから、当該損傷は検出時点で安全をみて緊急対策を行うことが良いと考えられる。

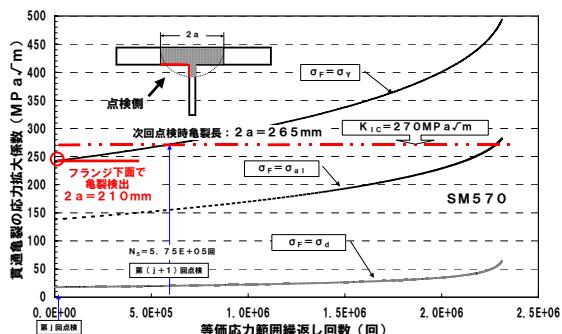


図-7 フランジ貫通後の疲労亀裂進展解析例

5. まとめ

点検時に検出された亀裂が次回点検までに脆性破壊を発生しないことを条件としたECAに基づく点検時許容限界亀裂長の一つの設定方法を提案した。しかし、ここで用いた破壊靭性値の実績値は、比較的最近製造された靭性の高い鋼材を用いた鋼構造物に関するものであることから、製鋼法などを異にする旧い鋼材を使用した鋼構造物に対しては、別途破壊靭性値を求めて本手法を適用する必要がある。

参考文献

- 宮崎幸雄、徳永剛平、鋼トラス・アーチ橋の緊急点検結果報告、平成20年度近畿地方整備局研究発表会論文集
- 米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査団米国、ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告、平成19年10月
- J.W.Fisher, et.al,"HOAN Bridge Forensic Investigation Failure Analysis"; ATLSS Center, Lehigh Univ., FHWA Eng.for Wisconsin D.O.T. and the FHWA, June 2001
- BSI, BS7910: Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in structures, 1997
- WES3003: 低温用圧延鋼板判定基準、日本溶接協会(1995)
- WES2805: 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法、(社)日本溶接協会(2007)
- 森河、下里、三木、市川、箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策、土木学会論文集, No.703/I-59(2002)177-183
- (社)日本溶接協会 鉄鋼部会LD F委員会資料
- 南邦明、堀川秀信、三木千壽、橋梁用鋼材の機械的性質の現状調査、土木学会第59回年次学術講演会(平成16年9月)
- 名倉・坂野・堀江・小林・川地・沼田、塗膜による鋼橋部材の高サイクル疲労損傷度評価、土木学会第55回年次学術講演会(平成12年), I-A73