信頼性理論に基づいたクレーン走行ばりの疲労寿命に及ぼす 初期検査の影響に関する考察

EFFECT OF INITIAL INSPECTION FOR FATIGUE LIFE OF CRANE RUNWAY GIRDERS BASED ON RELIABILITY THEORY

見村 博明*, 松島 学**, 小泉 学***, 野瀬 裕介****
Hiroaki MIMURA, Manabu MATSUSHIMA, Manabu KOIZUMI
and Yusuke NOSE

The evaluation of fatigue life of crane runway girders is an important factor to be considered in its design and regular inspection. The fatigue crack propagation life can be computed using fracture mechanics. However, an accuracy of computation is governed by the uncertainty of input parameters such as weld defect, its size and shape.

This paper showed that (1) the method to obtain an occurrence probability of fatigue failure based on reliability theory and fracture mechanics, (2) an accuracy of proposed numerical model is verified by comparing with fatigue life of existing test data and computed value, and (3) fatigue life of crane runway girders that were initially inspected and repaired increased about 1.8 times as compared with non inspected girders.

Keywords: fatigue life, reliability theory, occurrence probability, fracture mechanics, crane runway girder, initial inspection

疲労寿命、信頼性理論、発生確率、破壊力学、クレーン走行ばり、初期検査

1. はじめに

工場や倉庫におけるクレーン走行ばりのように繰返し応力を受ける鋼構造物は、疲労により破壊に至る恐れがある。これら構造物の疲労破壊の殆どは溶接接合部から生じている¹⁾。溶接接合部は溶接による材質劣化や幾何学的形状による応力集中を生じる部位であり、溶接において避け難い種々の欠陥を含む。これらの要素はすべて、疲労破壊にとって負の要因となっている。近年、溶接構造物の疲労寿命の推定に破壊力学の手法を用いることが多い。破壊力学では、き裂の大きさや材料が持つき裂進展特性などから、疲労き裂進展を推定することができる。しかしながら、疲労寿命の予測は、溶接部の欠陥や溶接止端部の形状など、不確定な要因が多数含まれている。それら不確定な要因が持っているばらつきが、疲労寿命に与える影響は大きいと考えられる。

鋼構造物の疲労設計指針・同解説²⁾(以後、疲労設計指針と記す)付録では、破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析法を示している。設計では、ばらつきを考慮し、材料定数 C, m および ΔK_{th} (2節で詳述する)を安全側に設定することで疲労寿命を求めている。しかし、式の精度のばらつきや溶接部の欠陥や溶接止端部の形状などの不確定な要因により推定疲労寿命のばらつきは大きく左右され、設計での特性値を決定することは難しい。山田ら^{3), 4), 5)}は、初期欠陥

のばらつきを定義したモデルを用いた解析から疲労寿命の分布を求め、疲労寿命のばらつきは初期き裂形状に影響されること、特に低応力範囲では初期き裂長さの影響が支配的であることを示しており、初期き裂や各材料定数を一律に安全側に設定することの問題点を指摘している。著者ら^{6), 7), 8), 9)}もクレーン走行ばりの疲労特性のばらつきを考慮し、信頼性理論による疲労寿命予測を行ってきた。しかし、シミュレーションから得られた疲労寿命と実験結果のばらつきを比較した研究は殆どない。

本研究はクレーン走行ばりの疲労寿命を推定するに際し、信頼性理論を用いて解析するための不確定因子として考慮すべき(1)初期き裂、(2)疲労き裂進展則における材料定数、及び(3)クレーン荷重についての数値モデルを提案し、ガセット継手に関してこれらのモデルを用いた解析と既往の実験値との比較を行い、提案モデルの妥当性を示す。さらに、溶接部の目視検査による補修の有無がクレーン走行ばりの疲労寿命に与える影響を提案モデルを用いた信頼性解析により検討したものである。ここで言う目視検査は、日本建築学会の鉄骨工事技術指針¹⁰⁾に規定する溶接部の検査のうち、溶接後における外観及び表面欠陥に対する目視検査を指し、本研究では表面欠陥のうちアンダーカットを対象とした。

* 東京電機大学理工学部建設工学科 教授・工博

** 東電設計(株)技術開発本部 次長・博士(工学)

*** 橋梁センター(株) 工修

**** 東京電機大学理工学研究科建設工学専攻 大学院生

Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering,
Tokyo Denki Univ., Dr. Eng.
Tokyo Electric Power Services Co., Ltd. Advanced Engineering Operation Center,
Dr. Eng.
Bridge & Structural Engineering Center, Co., Ltd., M. Eng.
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering,
Tokyo Denki Univ.

2. 確率論的手法による疲労寿命推定のための数値モデル

(1) 初期き裂の数値モデル

破壊力学を用いて疲労寿命を推定するには、初期き裂の形状寸法を仮定する必要がある。しかし、実際の溶接部の初期き裂の大きさを調べることは難しいため、溶接欠陥の代替因子として補修の対象となるアンダーカット¹⁰⁾の深さを専門技術者のアンケートより求めた。これは、アンダーカットが疲労き裂の起点になること、及びその深さが疲労強度に及ぼす影響が大きい²⁾ことによる。

アンケートは橋梁メーカーなど8社の溶接の品質管理者22人に対し、図1に示す溶接止端部のアンダーカットの深さ(a)及び幅(2b)の最小、最頻および最大値について回答を求めた。深さについては二回アンケートを行った。一回目は、アンケートに答えることで回答を得、二回目はその結果をまとめたものを見せて、再度同じアンケートを取り、アンケート結果の収斂性をねらった。これは、アンダーカットの深さは補修の対象となる¹⁰⁾ことと、品質管理者が一回目のアンケートでは確信をもって回答することが難しく、一回目のアンケート結果を品質管理者に認識させ、より精度の高い結果を得ることを意図したものである。

一回目および二回目のアンケート結果から得られたアンダーカット深さ及び幅の平均値のモデルを三角形分布として図2および図3に示す。本アンケートでは、アンダーカットの深さ(二回目)は0.3mm～1.4mmの範囲にあり、その最頻値は0.6mmであった。アンダーカットの幅は3.3mm～10.0mmにわたり、その最頻値は6.5mmであった。

次に、上記アンケート結果を参考にし、初期き裂の数値モデルを作成する。初期き裂は、アンケート結果による溶接欠陥の1つであるアンダーカットの深さ及び幅を図2、3に示す三角形分布の頻度で存在するものとした。実際の分布は、溶接工はある一定の能力を有していることから溶接欠陥寸法に上限があること、人間の目視能力を考えるとある一定値以下の欠陥を検出できない。従って得られた最頻値でピークをもち、上限、下限で打ち切り分布となると考えられる。本研究では分布形状を把握する程のデータを得ていないことから、打ち切り分布を表し、ピーク値を持っている分布として三角形分布を採用した。この値が施工中に目視検査で検出され、一部補修されるとした。あるき裂深さaが目視検査により検出できる確率を $P_m(a)$ 、検出できない確率を $P_{re}(a)$ とすると全確率は1.0となり、式(1)で表わされる。

$$P_{rm}(a) + P_{re}(a) = 1.0 \quad (1)$$

図1 溶接止端部に生じるアンダーカット

図2 アンケートによるアンダーカットの深さの分布モデル

図3 アンケートによるアンダーカットの長さの分布モデル

図4 初期き裂における目視検査による検出確率と非検出確率の関係

図5 初期き裂深さのモデル

目視検査では0.6mm以上のき裂深さは全て検出でき、0.3mm以下のき裂深さは検出できないと仮定し、その間は直線的に変化すると考えると、目視検査による初期き裂の検出確率 $P_{rm}(a)$ と非検出確率 $P_{re}(a)$ は図4のように表される。さらに、初期き裂が、アンケートで得られたようなアンダーカットとして検出できる割合を P_m 、検出できないような小さな欠陥である割合を P_e と表せば、全発生確率は式(2)で表される。

$$P_m + P_e = 1.0 \quad (2)$$

従来の調査によればアンケート調査で得られたアンダーカットが存在する割合は0.1～0.3程度である。本研究では $P_m=0.3$ とした。

実際の初期き裂の分布を求める。検出できない初期き裂の分布は、 $P_{re}(a)$ の分布に従うと仮定し、その確率密度関数を $f_{re}(a)$ と記述する。検出される初期き裂の分布は、図2、3に示したアンケートから得られるアンダーカットの深さの分布に従うと考え、その確率密度関数を $f_{rm}(a)$ と記述する。従って、初期き裂深さの分布 $f_p(a)$ は、 $f_{re}(a)$ 、 $f_{rm}(a)$ に、 P_m と P_e の重みを考え、式(8)のように求められる。その分布は図5の薄墨の部分で示される。

$$f_p(a) = P_m \cdot f_{rm}(a) + P_e \cdot f_{re}(a) \quad (3)$$

補修後の初期き裂の分布を求める。目視検査により検出できずに残る初期き裂の分布 $f_{r1}(a)$ は、式(3)と図4の検出確率から式(4)のように求められる。

$$f_{r1}(a) = P_{re}(a) \cdot f_p(a) \quad (4)$$

現行の技術指針¹⁰⁾によれば、深さ0.3mm以上のアンダーカットは補修の対象になるとしている。前に示した図4のように目視により検出できるき裂長さの確率を検出確率とした。検査により初期き裂が発見できたならば、その初期き裂についての補修を行い、補修により生じるき裂を0.0～0.3mmに小さくできるとした。本研究では、目視検査で検出したき裂を補修した場合、0.3mm以下のき裂深さに補修できると考え、補修後の初期き裂深さの確率密度関数を図6に示すように仮定した。

検出された初期き裂は、 $f_r(a)$ のき裂深さに補修されると仮定すると、補修後の初期き裂の分布 $f_{r2}(a)$ は、式(5)で表される。

$$f_{r2}(a) = P_r \cdot f_r(a) \quad (5)$$

ここで、 P_r は検出された初期き裂の全確率で、式(6)で表される。

$$P_r = \int_0^{+\infty} P_{rm}(a) \cdot f_p(a) da = \int_0^{+\infty} (1 - P_{re}(a)) \cdot f_p(a) da \quad (6)$$

従って、検査後の補修がなされた初期き裂の分布 $f_A(a)$ は、式(4)と式(5)の足し合わせにより、式(7)のように求められる。

$$f_A(a) = f_{r1}(a) + f_{r2}(a) \quad (7)$$

初期き裂幅も、き裂深さと同様の考え方で数値モデルを求めた。

図6 補修したき裂深さのモデル

図7 補修有無のき裂深さのモデル

図8 材料定数C値の分布(SM490)

図9 材料定数m値の分布(SM490)

図10 材料定数 C 、 m 値の関係(SM490)

尚、検査後の補修がなされた初期き裂深さ及び幅は、アンケート結果の最頻値の比 ($b/a \approx 5.0$) より求めた。即ち、き裂深さが検出された場合にはき裂幅を、き裂幅が検出された場合にはき裂深さを b/a の比から求めた。

式(7)の方法で求められたき裂深さの目視検査前と後の分布特性を図7に示す。

(2) 疲労き裂進展則における材料定数 C, m のモデル

疲労き裂進展速度 (da/dN) は、応力拡大係数範囲 (ΔK) と材料定数 (C, m) を用いた Paris の式として、式(8)²⁾ で表される。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (8)$$

ここで、 ΔK : 応力拡大係数範囲 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

N : 応力繰返し回数

C, m : 材料定数

材料定数 C, m は不確定因子である。ここでは、SM490 鋼に対する既往の疲労き裂進展試験結果 64 例^{13), 16)} のデータを用いて C, m の数値モデル化を行う。 C, m に関する調査結果を図8、図9に示す。図中の μ は平均値を、 σ は標準偏差を示す。 C, m ともに頻度分布は対数正規分布となり、 C の平均値は 1.20×10^{-11} (m/cycle)、 m の平均値は 3.13 であった。これらの値は疲労設計指針²⁾ 値に対し、 C はほぼ等しく m は多少高めの値であった。

次に、 C と m の相関関係を図10に示す。ここで、 C, m はばらつきを有する量として*印を付す(以後、*印は確率変数を意味する)。 C^* - m^* 関係の平均値 $\bar{m}$ の近似曲線は式(9)のように求められた。

$$\bar{m} = 0.508 C^{*-0.0683} \quad (9)$$

解析では任意に発生させた C^* 値を式(9)に代入することにより m^* の平均値 $\bar{m}$ を求める。しかし、図10に示すように実験データでの m^* 値は近似曲線に対し、ばらつきを持っている。各実験データにおける式(9)の近似式に対する誤差を求め、その分布を図11に示す。この図から m^* の誤差は正規分布に近似でき、その誤差を正規分布により発生させ、近似式から求められた平均値 $\bar{m}$ とあわせて m^* 値を求めた。 C^* 値及び m^* 値の決定までの考え方を図12に示す。

図11 材料定数 m 値の分布(SM490) 図12 材料定数 C 及び m 値の分布の求め方

図13 クレーン荷重のモデル

表1 解析モデルの諸量

項目	平均値	標準偏差	分布
C^*	1.20×10^{-11}	2.11×10^{-11}	対数正規分布
$\bar{m}^*$	$m(C^*)$	$0.15m(C^*)$	正規分布
	最小値	最頻値	最大値
初期き裂深さ b_0^* (mm)	0.3	0.6	1.4
初期き裂幅 $2a_0^*$ (mm)	3.3	6.5	10.0
応力分布 $\Delta \sigma^*$ (MPa)	P型分布(図13参照)		

(3) クレーン荷重のモデル

クレーン走行ばりの応力頻度分布は、図13に示す E.Haibach¹⁴⁾ が提唱するP形分布を用いた。P形分布はクレーン荷重を最も良く表現することが知られており¹⁹⁾、その概念は「JIS B 8821; クレーン鋼構造部分の計算基準」¹⁷⁾にも取入られている。図に示すP=0.0の曲線は正規分布を示し、P=1.0の曲線は一定振幅を表している。同図の記号で $\bar{N}$ は単位繰返し回数(10^6 回)、Nは任意応力の繰返し回数、 S_a は $\bar{N}$ における最大応力、 S_{ai} は任意応力レベルを意味する。

3. 信頼性理論を用いた疲労寿命解析

(1) 疲労き裂進展特性

疲労き裂進展解析は、応力拡大係数範囲 ΔK^* (MPa $\cdot$ m^{1/2})と疲労き裂進展速度 da^*/dN (m/Cycle)を関連づけたParisの式で評価するものとした。すなわち、式(10)で表されるものとした。

$$\frac{da^*}{dN} = C^* (\Delta K^* m^* - \Delta K_{th}^* m^*) \quad (10)$$

ここで、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。板幅と板厚方向の応力拡大係数範囲 ΔK_A^* 、 ΔK_B^* は、それぞれ式(11)、(12)により表す。

$$\Delta K_A^* = F_{cA} \cdot F_{sA} \cdot F_{tA} \cdot F_{gA} \Delta \sigma^* \sqrt{\pi b^*} \quad (11)$$

$$\Delta K_B^* = F_{cB} \cdot F_{tB} \cdot F_{gB} \Delta \sigma^* \sqrt{\pi b^*} \quad (12)$$

ここで、 F_{cA} 、 F_{cB} ：き裂形状に対する補正係数²⁾

$$F_{cA} = 1 / \sqrt{1 - 1.464 (b/a)^{1.65}}$$

$$F_{cB} = F_{cA} / \sqrt{b/a}$$

F_{sA} ：表面き裂に対する補正係数²⁾

$$F_{sA} = 1.0 + 0.12(1 - b/a)$$

F_{tA} 、 F_{tB} ：有限板厚、板幅に対する補正係数²⁾

$$F_{tA} = (1 - 0.025\lambda_1^2 + 0.06\lambda_1^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda_1/2)} \quad \lambda_1 = b/B$$

$$F_{tB} = (1 - 0.025\lambda_2^2 + 0.06\lambda_2^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda_2/2)} \quad \lambda_2 = 2a/t_f$$

t_f ：板厚、B：板幅

F_{gA} 、 F_{gB} ：応力集中に対する補正係数¹⁶⁾

$\Delta \sigma^*$ ：応力範囲(MPa)

式(10)から ΔK_{th} が ΔK^* より大きい場合、き裂が進展しないことを示している。 ΔK_{th} はデータ数が少ないため、本研究では安全性を考慮して疲労設計指針²⁾に定める最小値(2.0MPa $\cdot$ m^{1/2})を特性値として採用した。

式(11)、(12)に示す各補正係数は、き裂の大きさやフランジの寸法などにより、応力拡大係数を近似的に表しているものであり、誤差をもっている。しかし、これら各補正係数の誤差をそれぞれ考慮するのは困難なため、式(10)の材料定数 C^* 、 m^* に各補正係数の誤差が含まれているものとして整理した。解析に用いた各モデルの諸元を表1に示す。

a_0^* , b_0^* ：初期き裂長さ

a_j^* , b_j^* ：繰返し回数j回目のき裂深さ及び幅

Δa_j , Δb_j ：j回目のき裂進展量

a_c , b_c ：限界き裂長さ

N_f ：限界き裂長さ時の応力繰返し回数

m_{max} ：最大計算回数

図14 シミュレーションの流れ

図15 溶接止端部に生じるアンダーカットのモデル

図16 実験値と解析値の寿命の比較

図17 耐用期間と破壊確率の関係

(2) 解析手順と不確定因子の決定

本解析手法の流れを図14に示す。記号の説明も同図中に示した。初めに、初期き裂長さの乱数 a_0^* 、 b_0^* を発生させる。初期き裂深さは図5の分布、幅は深さと同様の方法で求めた分布の頻度で存在するものとした。次に、補正係数を計算し、応力範囲 $\Delta\sigma^*$ 及び材料定数 C^* 、 m^* のばらつきを考慮して応力拡大係数 ΔK_A^* 、 ΔK_B^* を計算し、き裂進展量 Δa_j^* 及び Δb_j^* を求める。き裂進展長さ a_j^* 、 b_j^* にき裂進展量 Δa_j^* 、 Δb_j^* を加え a_{j+1}^* 、 b_{j+1}^* を求め、どちらかが限界き裂長さ a_c 、 b_c に達するまで計算を行い、その時点を破壊と定義し破壊時の繰返し回数 N_f を求める。この計算を $m_{\max} = 10000$ 回繰り返し、モンテカルロ・シミュレーション¹⁰⁾により破壊確率¹¹⁾を求めた。限界き裂長さは、 $a_c = 0.8 \times t_f (=17.6\text{mm})$ 、 $b_c = B/4 (=75.0\text{mm})$ とした。限界き裂長さは一般には $a_c = t$ と仮定されることが多い^{3), 5)} が、本研究で対象とするクレーン走行ばりでは下フランジに生じる疲労き裂は重大な事故につながる恐れがあることを考慮^{1), 15)} し、 $a_c = 0.8t$ とした。また、幅方向の限界き裂長さ b_c

図18 実験値と解析値の破壊確率の比較(板厚 22 mm)

図19(a) 経過年数と破壊確率の関係(き裂 1/1、補修なし)

図19(b) 経過年数と破壊確率の関係(き裂 1/1、補修あり)

は楕円き裂形状が $b/a=4 \sim 5$ で進展することを解析から確認し、 $b_c=B/4$ に対応させて仮定したものである。

4. 解析モデルの検証

本節では、前述した解析モデル及び解析方法の検証を行う。解析対象はガセット継手の疲労耐力とした。検証の方法は、ガセット継手の疲労耐力に関する既往の実験値を応力範囲-応力繰返し回数関係図上にプロットし、解析から得られる疲労寿命と破壊確率の関係から、破壊確率10%～50%までの10%毎の破壊確率に対応するS-N線図コンタを同一グラフ上に記入する。このコンタ間に挟まれている実験値が破壊した実際の破壊確率であるため、この割合を調べることで解析値と実験値の比較を行うものである。

本解析に用いた構造物は図15に示すような溶接組立てばりのクレーン走行ばりで、下フランジに付くガセットプレート端部から生じる疲労き裂を対象とした。フランジ板厚は22mm、幅は300mm、ガセットプレート厚は8mm（長さ×幅=210mm×600mm）で、き裂の形状は同図に示すように四半楕円形とした。解析に仮定した初期き裂はアンケートで得られたアンダーカットとし、その深さの分布は図5で与えられたものとした。作用応力範囲は $P=1.0$ とした、いわゆる一定応力範囲とし、50～250MPaまで変化させた。解析における疲労寿命は、き裂が前述した限界き裂長さに進展した時点の応力繰返し回数とした。

既往の実験値と本解析で得られた破壊確率10～50%に対応するS-N線図を図16に示す。図中の●印はモデル試験片の結果²⁾、□印は、はり試験体の結果¹⁵⁾であり、合わせて79個の結果から成る。ここで、モデル試験片とは鋼板面内にガセットプレートを溶接したもので引張り荷重による疲労、またははり試験体とは、プレートガーダーの引張り側フランジ面内にガセットプレートを溶接したもので、曲げ荷重による疲労である。解析のS-N線図の基となった各応力範囲における破壊確率と応力の繰返し回数の関係を図17に示す。

解析値と実験値の比較を図18に示す。同図で1:1の線に解析値が位置すれば、解析値と実験値は一致していることを意味するが、本解析では解析値は実験値に対して、破壊確率が30%以下では約10%程度安全側の評価となったが、概ね良好な相関を示しており、本解析方法の妥当性が検証されたと言える。

5. 初期検査による補修がクレーン走行ばりの疲労寿命に与える影響

(1) 解析方法

解析に用いた初期き裂は、アンケート結果より得られた値(以後モデル1/1と呼ぶ)とそれらの値の半分の値(以後モデル1/2と呼ぶ)とし、目視検査後の補修有り無しの4つのパターンについて破壊確率5%を疲労寿命として解析した。ここで、1/1としたのは、アンダーカット以上の大きな欠陥は存在しないという安全側の判断であり、1/2としたのは著者等の経験的な判断からの初期き裂長さの下限値とした。初期き裂深さ及び幅が目視検査で検出された場合、補修後のき裂形状は、前述したように b/a の比から求めた。アンケート結果の値の半分の初期き裂に対する解析は、アンケート結果によるアンダーカットの大きさは最大値と考えられることと、初期き裂の大きさが変わることにより疲労寿命がどのように変化するかを調べることを目的とした。

図19(c) 経過年数と破壊確率の関係(き裂1/2、補修なし)

図19(d) 経過年数と破壊確率の関係(き裂1/2、補修あり)

図20 5%破壊確率における疲労寿命と荷重分布因子の関係

経過年数は1日におけるクレーンの稼働回数を100回(36500回/年)とし、荷重分布のP値を0.5～1.0まで0.1刻みに変化させて計算した。

(2) 疲労寿命に対する補修の影響

初期き裂の補修がない場合の破壊確率と経過年数の関係を図19(a)に示す。図に見られるように、破壊確率はゆるやかに上昇し、荷重分布の因子Pが大きくなるにつれて破壊確率が増加する割合は高い。図19(b)はモデル1/1の補修がある場合を示している。補修がある場合の破壊確率は、補修なしの場合に比べさらにゆるやかに上昇している。

次に、アンケート結果のアンダーカットの半分の深さの場合、即ち、モデル1/2の初期き裂の計算結果を示す。実際の初期き裂は、モデル1/1とモデル1/2の間にあると考えられる。補修がない場合とある場合の破壊確率と経過年数の関係を図19(c)、図19(d)に示す。この結果を見るとモデル1/2の初期き裂の場合の破壊確率と経過年数の関係は、補修無しの場合にモデル1/1に比べ、よりゆるやかな上昇を示したが、モデル1/2同士の補修の有無による相違は殆ど認められなかった。これは、図5に示すモデルの初期き裂深さを1/2にした場合の数値モデルが、補修後の初期き裂の数値モデルとほぼ等しい結果になったことに起因する。

破壊確率が5%に達するときの疲労寿命と荷重分布の因子Pとの関係を図20に示す。同図より、P値が大きくなるに従って、初期き裂の大小、及び補修の有無の各場合とも疲労寿命は短くなる。P値が増す事は、繰返し応力がより一定振幅に近づくことを意味し、疲労寿命はP値の影響が高いことを示している。

補修を行うことによる疲労寿命の伸びは、初期き裂の大きさが1/1モデルの場合で約1.8倍、半分の初期き裂を仮定したモデル1/2の場合で約1.0倍となり、目視検査とこれによる補修の効果及びその重要性が認められると同時にモデル1/2は初期き裂のほぼ下限値と推定できる。一方、補修なしの場合で、初期き裂の大きさを半分にした場合、即ち補修なしの1/2モデルの補修なし1/1モデルに対する疲労寿命の伸びは約2.1倍であった。また、補修を行う場合には、モデル1/1に対しモデル1/2の疲労寿命の伸びは約1.1倍であった。これは目視検査を行い、その結果により補修を施せば初期き裂の大きさに関係なく疲労寿命は向上することを意味する。

6. まとめ

本研究はクレーン走行ばりの疲労寿命を信頼性理論に基づいた評価方法を確立することを目的としたものである。その第一段階としてSM490鋼を用いたクレーン走行ばり引張りフランジ面内に溶接接合されたガセットプレート端部のアンダーカットから生じる疲労き裂を対象とした考察を行い、以下の事が明らかになった。(1) フランジ面内に溶接されたガセットプレート端部のアンダーカットから生じる疲労破壊に対する信頼性理論を用いた解析値と、実験値の比較から、本研究で示す解析方法の妥当性が示された。解析のための数値モデルとして、i) 初期き裂はアンダーカットの深さとし、式(2)、図5をii) き裂進展における材料定数C,mに対しては式(9)を提案した。

(2) また、iii) クレーン荷重に対してはP分布形を提案した。疲労寿命に対してはP値の影響は大きく、それは実際に存在しえる初期き裂の疲労寿命に与える影響よりも大きい。

(3) 補修を行うことによるクレーン走行ばりの疲労寿命は、モデル1/1では補修なしのそれに対し、約1.8倍の伸びとなった。モデル1/2では補修の有無による疲労寿命に有意な差は無く、モデル1/2は初期き裂の下限値と推定された。

(4) 補修をを行わず、き裂の大きさを初期き裂の半分に仮定した場合の疲労寿命の伸びは、元のクレーン走行ばりに対して約2.1倍であった。

(5) 初期目視検査とこの結果により補修を行う場合は、初期き裂の大きさに関係なく疲労寿命の向上が期待できる。

謝辞

溶接部の初期欠陥のアンケートには橋梁メーカーの多くの方々に協力していただきました。また、データ整理に当たり、三橋忠男君(サンベース株式会社)の協力を得ました。併せて感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 海野三蔵、森田耕次、見村博明他；クレーンガーダーの疲労損傷に関する調査報告、JSSC, Vol.12, No.128, 1976
- 2) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993。
- 3) 山田健太郎、M.A.HIRT：破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析、土木学会論文報告集、第319号、pp.55-64、1982。
- 4) 山田健太郎、重富寿：長寿命域での低荷重振幅疲れ試験結果、構造工学論文集、Vol.35A, pp.961～968、1989.3。
- 5) Kentaro Yamada, Shogo Nagatsu: Evaluation of Scatter in Fatigue Life of Welded Details using Fracture Mechanics, Proc. Of JSCE No.404/I-11, Structural Eng./ Earthquake Eng. Vol.6, No.1, pp.13-21, April, 1989.
- 6) 小泉学、見村博明：クレーン走行ばりの疲労寿命に及ぼす初期検査の影響、日本建築学会大会、1997年9月
- 7) 小泉学、野瀬裕介、見村博明：クレーン走行ばりの余寿命評価に関する研究(その2) モンテカルロ法によるクレーン走行ばりの余寿命評価、日本建築学会大会、1998年9月
- 8) 野瀬裕介、小泉学、見村博明：クレーン走行ばりの余寿命評価に関する研究(その1) 溶接欠陥及びき裂進展則における材料定数の調査、日本建築学会大会、1998年9月
- 9) 野瀬裕介、松島学、見村博明：クレーン走行ばりの確率論的疲労寿命推定のために数値モデル化、鋼構造年次論文集報告集、第6巻、pp.421～426、1998年11月
- 10) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針 - 工場製作編、技報堂出版、1996。
- 11) 伊藤学、亀田弘行共訳：土木・建築のための確率・統計の基礎、丸善株式会社、1988年1月
- 12) 伊藤学、亀田弘行、黒田克彦、藤野陽三共訳：土木・建築のための確率・統計の応用、丸善株式会社、1987年1月。
- 13) 科学技術庁金属材料技術研究所：溶接構造用高張力鋼溶接継手の疲れき裂伝ば特性、1984。
- 14) E.Haibach: The allowable stresses undervariable amplitude loading of welded joints, Proceeding of the Conference on Fatigue of Welded Structures, The Welding Institute, Cambridge, pp.328-339、1970。
- 15) 海野三蔵、見村博明：クレーン走行ばりの疲労損傷に関する研究、日本建築学会論文報告集第333号、1982年11月
- 16) Albrecht, P. and K.Yamada :Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, Proc. of ASCE, vol.103, No. ST 2, pp.377～389, Feb,1977
- 17) JIS B 8821 クレーン鋼構造部分の計算基準、1976
- 18) 森 猛：溶接橋梁部材の疲労き裂進展寿命に関する研究、1987年3月
- 19) 見村博明、梶井伸弘：クレーン走行ばりの応力頻度測定によるクレーンの分類、日本建築学会構造工学論文集、vol.39B, pp.365～372、1993年3月

(1998年12月8日原稿受理、1999年4月2日採用決定)