

1. 緒 論

橋内 良雄*

1. Introduction

by Yoshio KITSUNAI*

Abstract; The fatigue life of overhead travelling cranes in general has been designed based on the strength of the stress range at 2×10^6 cycles for the components. Recently the operation rate of cranes has remarkably increased year by year due to economical request. For example, according to a report in a steelworks, the recent operation rate per year of overhead travelling cranes reaches about 10 times as compared to 20 years ago. As a result, some of cranes constructed in the 1960's have already reached the design life. So that the fatigue cracks are often found at highly stressed regions such as weld toe of gusset plate and of rib plate. Once the fatigue cracks are initiated, they continue to grow slowly in the early stage of the fatigue crack growth life. As long as crack growth occurs, the potential for more serious distress exists. Therefore the cracks must be repaired at an early stage before the cracks grow up to the critical crack size. Rational methods of maintenance as well as of design are required to achieve an optimum structure throughout its service life and to secure safety for workers.

In view of the potential seriousness of cranes cracking associated with accumulation of fatigue damage and degradation of the materials, an extensive study of the problem was planned. The objectives of the study are to determine fatigue properties of welded joints used in overhead travelling cranes under service loading, to estimate how much time does it require for a small crack to grow into a serious crack and to determine the best welding procedures to repair the cracks.

The first phase of the study includes survey of damage in overhead travelling cranes to obtain information on causes of the cracking. For the application of damage tolerance concepts, loading variables such as amplitude, frequency and sequence are important. Therefore monitoring of stresses acting on the members in an overhead travelling crane was performed under the service conditions, and rain flow method was used as a stress counting technique. The main causes of fatigue damage in cranes are related with the stress concentrations at the toe of terminating fillet welds and the welding residual stresses. To establish the basic concept for evaluating the fatigue crack growth life of the welded crane components with residual stresses under service loading, the fatigue crack growth behavior of welded joints subjected to a two-step program loading was evaluated using fracture mechanics approaches. The fatigue initiation and the propagation lives of gusset plates which tend to be the origin of fatigue cracking were examined under the program loading which was determined based on the stress measurement of the crane. The prediction of fatigue crack growth life of the gusset plate under the program loading was carried out using fracture mechanics, and the results were compared with the experimental results. To determine a minimum requirement for the quality of the repair welding, the fatigue strength of several kinds of repair weld specimens was examined under the program loading, and was compared. Based on the test results, a procedure for the repair weld for cracking in existing cranes was proposed.

Keywords; Overhead travelling crane, Fatigue strength, Fatigue crack, Repair weld, Gusset welded joint, Life prediction, Program loading, Residual stress, Fracture mechanics

1. 緒 言

ある製鋼工場におけるレールクレーンやストリッパークレーンの使用頻度についての調査報告¹⁾によれば、昭和40年頃には29,000回/年であったが、昭和60年代には216,000回/年に増加している。このような増加傾向は他業種のクレーンにおいても同様であって、設計時には予想もしなかった頻度で使用されていることから、設計寿命にすでに到達しているクレーンも出現している。このような使用環境の変化を反映して、クレーン本体(メインガーダ)やクレーン走行支持架橋(ランウェイガーダ)に疲労による損傷や倒壊等の事故が報告されている^{2)~5)}。クレーンの設計寿命としては $10^6 \sim 10^7$ 回の繰返し数が用いられているが、たとえ設計寿命に到達したとしても生産設備の中心になっていることや大規模施設であることから、簡単に交換することは困難であって、半永久的に使用されているのが実状である。さらに、経済効率が今後益々要求されることから、製造や物流の中心となるクレーンは、一層高速化・大型化すると推定され、疲労に起因する損傷は今日以上に増加することが予想される。このため、点検期間の見直しやメンテナンス方法の検討なども含めて、クレーンの耐疲労強度の向上を図ることが安定な操業を継続するためにも、また作業者の安全性を確保する上からも重要になっている。

しかし、新設クレーンに対しては細部までの設計基準^{6), 7)}や構造規格⁸⁾が定められているが、損傷が生じた場合の補修方法や補修後の強度評価法は定められていないため、溶接等の補修により溶接欠陥や高応力集中部が導入され、寿命を著しく低下させて重大な災害を招いている場合も見受けられる。経年クレーンを新規クレーンに交換することが必ずしも容易でない現状や、経年クレーンが今後増加すると予想されることを考慮すると、クレーンの補修方法や補修後の余寿命評価法を確立することが重要である。特に、点検事項は定められているが、異常が発見された場合の対処方法については定められていないため、運用基準の作成が必要である。

2. クレーンの設計基準・構造規格の制定の経緯と最近の動向

わが国において、クレーンの設計基準は昭和37年(1962年)以前までは制定されておらず、各社がDIN120やANSIを参考にして、独自の設計を行って

いた。昭和33年頃から機械学会荷役・運搬機械部門委員会が中心となり、メインガーダを対象にして設計基準の検討が行われ、昭和37年12月に「クレーンをはがね構造部分計算基準⁶⁾」として発刊された。この基準を基に日本工業標準調査会がクレーン鋼構造部分の計算基準⁷⁾を作成し、JIS B 8821-1976として昭和51年5月に制定された。労働省では昭和37年10月にクレーン構造規格(労働省告示第53号)、移動式クレーン構造規格(労働省告示第54号)、デリック構造規格(労働省告示第55号)を制定し⁸⁾、その後昭和51年8月に全面的な改定が加えられ、さらにISO等の国際規格との整合を図るため、並びに技術的な進歩を考慮して平成7年12月に大幅な見直しがなされている。

以上の基準や規格は主にメインガーダについて規定したものであるが、建造物の色彩の濃いランウェイガーダについてはJISには規定されておらず、建築学会・鋼構造設計基準²⁵⁾を用いた設計がなされている。

外国においてはヨーロッパ荷役協会(FEM)が荷役装置の基準²⁶⁾を1970年に制定し、ドイツではDIN 120を改訂したDIN 15018²⁷⁾が1974に示された。イギリスにおいてもクレーンの許容応力と設計基準がBS 2573²⁸⁾として1977年に制定された。前記したように、わが国においてはランウェイガーダについてのJISは定められていないが、ドイツではDIN 4132²⁹⁾として基準化されている。

以上の基準や規格の他に、アメリカ合衆国(AISI, CMAA, ANSI, ANSI/ASME, ANSI/SIA, ANSI/SAE)、フランス(NF)、カナダ(CSA)、オーストラリア(AS)等の多くの国で独自の基準や規格を制定している。このように多様な基準の整合を図るため、ISOでは各種のクレーンや関連製品について規格の統一を図るための検討がなされている。この規格はこれまでの許容応力基準に代わって、確率論的に設計を行おうとするもので、材料の強度破壊確率並びにクレーンが受ける荷重の大きさと頻度を考慮した限界状態設計法が骨子となっている。

3. クレーンの等級別分類と設計基準

3.1 クレーンの等級別分類

JIS B 8821によれば、作業時間率と荷重率との組み合わせによって、クレーン(メインガーダ)をI~IV群に分類している。

Table 1において、荷重率が「中」のクレーンは通

Table 1 Classification of overhead travelling crane.
天井クレーンの分類

時間率	小	中	大	超大
荷重率	10 ⁵ 未満	10 ⁵ ~6×10 ⁵	6×10 ⁵ ~2×10 ⁶	2×10 ⁶ 以上
軽	I	I	II	III
中	I	II	III	IV
重	II	III	IV	IV

常定格荷重の1/3~2/3以下の荷重を吊り、ときどき定格荷重を吊るもので、「重」は定格荷重を吊るクレーンである。I~IV群にどのような用途のクレーンが属しているかについて天井クレーンの場合について見ると、I群は発電所用のクレーンのように長い休止期間を伴うクレーンであり、IIおよびIII群は一般産業用クレーンや機械組立工場用クレーンが、IV群はバケット付きクレーンやレードルクレーン等が属している。

3.2 クレーンの設計基準

クレーンは、巻き上げ荷重 W_L 、自重 W_G 、水平荷重 W_H 、風荷重 W_w 、熱による荷重 W_q 、衝撃荷重 W_s 等の荷重を受けており、さらにクレーン群によって使用環境（過酷度）が異なっている。基本的にクレーンの部材に作用する荷重の算定には、上記の荷重状態を考慮した式(1)が用いられる。この場合、荷重は最も不利な位置に作用する部材を対象にする。

$$W = M [\psi \cdot W_L + W_G + W_H] + W_q \quad (1)$$

ここで、 W は算定した荷重、 M はクレーンの作業条件やクレーンの重要性を考慮するための係数であって、クレーン群Iでは1.0、IIでは1.05、IIIでは1.1、IVでは1.2とJIS B 8821に定められている。 ψ は衝撃係数であって、クレーン群別に群Iでは1.1、IIでは1.25、IIIでは1.4、IVでは1.6とする。応力の算定時に使用する断面は、引張りを受ける部材に対しては純断面積（最小断面積）を、圧縮やせん断の場合は総断面積を用いる。

基本許容応力は、材料の降伏点あるいは引張り強さを安全率で除した値とする。なお、降伏点に対する安全率は1.5、引張り強さに対しては1.8とし、いずれか小さい方の値を採用する。

3.3 クレーンの疲労設計基準

JIS B 8821では疲労強度に対する応力算定法として、応力比法と振幅法が用いられている。このうち応

力比法は、クレーンの群別、溶接継手の種類や仕上げの状態によって定まる切欠き類別および応力比（最小応力 σ_{\min} と最大応力 σ_{\max} ）等により異なる疲労許容応力を、図を用いて求める方法である。振幅法は疲労許容応力 σ_d が式(2)を満足するように定めている。

$$(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / (F_J \cdot F_L) \leq \sigma_d \quad (2)$$

ここで、 σ_{\max} は最大応力、 σ_{\min} は最小応力、 F_J は継手係数、 F_L は寿命係数である。なお、 F_J は継手の切欠き効果の程度を示す係数であって、a, b, c, dの4種類に分類されており、それぞれの値は1.6, 1.3, 1.0, 0.7と決められている。また、 F_L は応力の繰返し数を考慮したもので、クレーン群と切欠きの種類とによって値が決められる。たとえば、クレーン群Iに対して切欠きの種類がaあるいはbの場合は1.3、cあるいはdでは1.7である。

4. クレーンの経年損傷状況調査の現状

クレーンが数十年以上の長期にわたって使用されていることや、大型・高速化すると同時に使用頻度が著しく増加していることから、疲労による損傷がしばしば問題になっている。

このような背景から、クレーンの経年損傷に対する調査や対策が使用条件の厳しい製鉄工場のクレーンを対象として検討されている。たとえば、日本鋼構造協会天井クレーン走行ばり懇談会では、製鉄工場のクレーンランウェイガーダ（走行支持架橋）とその支持部の損傷について、アンケート方式による調査を行っている²⁾。日本クレーン協会では天井クレーンおよび移動式クレーンの経年損傷調査を実施している。志村と宇野³⁾は、自社で使用しているクレーンのランウェイガーダの経年損傷状況について、山田⁴⁾は経年劣化に起因するクレーンの疲労破壊例について示している。これらの実態調査の多くはランウェイガーダを対象にしている場合が多く、ランウェイガーダよりも過酷な荷重を受けるメインガーダについての調査報告はあまり散見されない。特に、天井走行クレーンでは多種の業界で最も多く使用されており、使用条件もかなり過酷であるにもかかわらず、経年損傷についての調査は少ない。設備投資が以前に比べて鈍化している現状から、老朽化したクレーンは今後益々増加すると予想され、その対策が重要と考えられる。

5. クレーン構造部分の経年損傷対策研究の現状

クレーン構造部分、とりわけランウェイガーダに発見される経年損傷としては、疲労き裂、腐食、磨耗等

であり、中でも溶接止端部等の高応力集中箇所に見られる疲労き裂が最も多い。ランウェイガーダでは2章で述べるように、下フランジのガセット取り付け部、上フランジとウェブの溶接箇所、スティフナーやリブの回し溶接箇所等に損傷が発生するケースが多い。損傷対策の研究では、損部位を模擬した試験体を作製し、ランウェイが受ける荷重を実測あるいは想定した荷重パターンを試験体に負荷して疲労試験を行い、疲労寿命の予測や特定定期検査期間の決定に役立てている。たとえば、種田ら^{9) 10)}は供用下のレードルクレーンガーダに対して荷重計測を行い、計測結果をモデル化した荷重波形を溶接止端部を模擬した切り欠き試験片に負荷することにより、ガーダの疲労強度を求めている。

Yamada ら¹¹⁾はランウェイガーダを模擬した2種類の梁に補修を想定したガセットまたはカバープレートを溶接した試験体を作製して曲げ疲労試験を行い、補修の効果について調べている。また、発生したき裂に対してストップホールの効果についても調査している。ストップホールの効果については必ずしもクレーンを対象にしているわけではないが、引っ張り荷重下のき裂に対しては、山田ら¹²⁾や森¹³⁾によって有効性が確認されている。志村と宇野¹⁾は下フランジに溶接されたガセットの止端に損傷が多いことから、模擬ガセット試験体を用いて疲労強度を求めると共に、下フランジガセット部の補修方法について検討している。

6. 鋼構造物の経年損傷の実態と対策

従来鋼構造物は応力腐食割れや遅れ破壊などの環境破壊が重視されてきたが、軽量化や使用条件の過酷化、さらには鋼橋の損壊事例等から、1970年頃から鋼構造物の経年損傷について注目されるようになってきた。鋼構造物のうち鉄道橋では、供用下での繰り返し荷重を考慮した設計や保守がなされていたが、道路橋では疲労に対する配慮があまり払われていなかった。1967年にオハイオ州のシルバー橋でアイバーが疲労き裂を起点として脆性破壊を起こして55人の死傷者と75台の車が損壊する事故が発生し、橋梁の疲労損傷が注目されるきっかけとなった。わが国では、昭和30年~40年代のいわゆる高度経済成長期に作られた溶接橋に昭和50年代になってき裂が発見されるようになり¹⁴⁾、橋梁に対する設計や保守のあり方について検討がなされるようになった。幸いわが国では疲労に起因する大規模な橋梁の崩壊は生じていないが、韓国では1994年10月21日にソウル市の漢江にかかる聖水大橋が落下し、48名死亡、23名負傷した事故は、溶接欠陥からの疲労破壊が疑われている²³⁾。

以上のような背景から鋼構造物に対する経年損傷の実態調査や補修対策は、鉄道橋や道路橋等のいわゆる公共構造物を中心に報告^{14)~20), 22)}がなされている。溶接欠陥を除いてこれらの報告で見られる損傷要因の共通点は、構造物のディテール(細部形状)とそこに発生する応力および応力の繰り返し回数である。すなわち、フランジの切り欠き部、カバープレート端のすみ肉溶接止端部、スティフナーあるいはウェブとフランジ溶接部、桁端のウェブ、補剛桁とガセットプレート溶接部等断面急変箇所に損傷が集中して発生している。これらの損傷に対して、対策や補修法の検討が行われている。特に鉄道総合技術研究所では、鉄道橋に生じる損傷を形態別に分類し、損傷の状況、対策の基本的な考え方、補修方法、作業手順、対策を施した場合の図や写真を示して、鋼構造物補修・補強・改造の手引き²²⁾としてまとめ出版している。また、日本鋼構造協会では、鋼橋の疲労評価法や補修した部材の疲労強度について指針²⁴⁾を示している。これらの研究成果や手引き書は、クレーンの経年損傷対策にも有効に活用できると考えられる。特にランウェイガーダは橋梁の桁に相当することから、ディテールは橋梁と類似している場合が多い。

7. 本研究の目的と本報告の構成

現状における天井クレーンの設計寿命は最大でも 10^7 回程度であるが、近年の物流活動の著しい発展から設置後比較的早い機会に設計寿命に到達してしまうクレーンも少なくない。しかし、生産設備の中心となっているクレーンを交換することは容易でないことから、ほぼ半永久的に使用されているのが実状のようである。このため、応力集中部に疲労き裂が発生する場合があり、しばしば溶接等による補修が行われている。しかし、補修方法についての標準的手法が定められていないため、補修によって欠陥や高応力集中箇所が作られ、かえって寿命を低下させている場合があり、ときには補修箇所が起点となってクレーンが損壊し、重大災害を招いている場合も見受けられる。また、クレーンに対して日常や月例点検が義務付けられているが、損傷が発見された場合の技術的対応については定められていない。クレーンが半永久的な構造物として使用されている現状や、物流活動が活性化の一途をたどっていること等から、クレーンの損傷は今後増加すると予想され、クレーンの保全あるいは運用についての技術的方法について検討することが、生産性を高める上からも、作業者の安全確保状からも、また経費の削減と資源の有効利用の観点からも重要と考えられる。そこで本研究では、クレーンの損傷実態調査、クレーン

に作用する実働荷重の測定、模擬溶接部材による疲労強度評価、溶接補修方法等について検討し、クレーンの補修方法やクレーンの運用基準作成のための基礎資料を得ることを目的としている。

本研究は7章から構成されている。1章は「緒論」であり、研究の背景を示す。2章は「クレーンの経年損傷状況」であって、実地調査や文献を参照して損傷部位や損傷発生年数、および損傷例について述べる。3章は「天井クレーンの実働荷重測定」として、当所に設置された天井クレーンの部材が稼働中に受ける応力の測定結果を中心に、クレーンに作用する荷重について示す。4章は「変動荷重を受けるHT80鋼溶接継手の疲労き裂伝ば挙動評価」であって、溶接継手の疲労寿命がき裂の発生よりも欠陥あるいは高応力集中箇所を起点としてき裂の進展寿命に支配されることから、溶接が多用されるクレーン部材が変動荷重を受ける場合の寿命評価を行うための基礎的知見を得るために、溶接試験片にプログラム荷重を負荷して疲労き裂進展試験結果とその評価法について述べる。5章の「ガセット溶接継手の疲労強度と寿命評価」では、クレーン部材として多用されかつ損傷起点となりやすいガセットを模擬した試験体を作製し、クレーンが受ける荷重と類似の荷重を試験体に負荷して、疲労寿命を評価した結果について示す。6章は「補修溶接疲労強度」であって、数種の溶接補修した試験片を用いて疲労強度の比較、並びに文献を参照して補修の最適化について示した。7章は「総括」であり、結果をまとめて示した。

参考文献

- 1) 志村保美, 宇野暢芳, 新日本製鐵におけるクレーンランウェイガーダーの疲労破損対策技術, カラム, No.100,(1986), pp.89-96.
- 2) 日本鋼構造協会天井クレーン走行ばり懇談会, クレーンガーダーの疲労損傷に関する調査報告, 日本鋼構造協会論文集, Vol.12(1976), pp.9-22.
- 3) H.S. Reemsnyder and D. A. Demo., Iron and Steel Engineer, April(1978), pp.52-58.
- 4) 山田健太郎, クレーン走行ばりに発生する疲れ亀裂の評価と対策, 第29回構造工学シンポジウム, (1983),pp.1-7.
- 5) K. N. Baker, D. R. Meager and R. W. Taylor, Fatigue Damage to Large Electric Overhead Travelling Crane, 1st. National Structural Eng. Conf.,(1987), pp.372-376.
- 6) 日本機械学会, クレーンがね構造部分計算基準, (1962).
- 7) 日本工業標準調査会, クレーン鋼構造部分の計算基準, JIS B 8821, (1976)
- 8) 労働省労働基準局安全衛生部安全課, クレーン等各構造規格の解説, (1976)
- 9) 種田元治, 鯉淵興二, 赤津利雄, 福渡一郎, レードルクレーンガーダの実働荷重と疲れ強さ, 日立評論創刊50周年記念論文集, (1968), pp.32-35.
- 10) 種田元治, 鯉淵興二, 松川安広, クレーン構造物の実働荷重と疲れ設計, 日本機械学会誌, Vol.73, No.621,(1970),pp.1375-1381.
- 11) K. Yamada, Y. Sakai, A. Kondo and Y. Kikuchi, Weld Repair of Cracked Beams and Residual Fatigue Life, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.3, No. 2,(1986), pp.373s-382s.
- 12) 山田健太郎, 酒井吉永, 菊池洋一, ガセットを溶接した引っ張り材の疲れ強さとストップホールの効果, 土木学会論文報告集, 第341号, (1984), pp.129~136.
- 13) 森 猛, ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修効果, 構造工学論文集, Vol.35A, (1989),
- 14) 西川和廣, 道路橋における疲労問題と補修・補強橋梁と基礎, Vo.17, No.8, (1983), pp.19-23.
- 15) 阿部英彦, 谷口紀久, 阿部 允, 鋼鉄道橋における疲労問題と補修・補強, 橋梁と基礎, Vo.17, No.8, (1983), pp.24-29.
- 16) 堀川浩甫, 橋梁の損傷と補修—溶接構造物の損傷とその防止II—3, 溶接学会誌, Vol.52, No.7, (1983), pp. 13-22.
- 17) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会, 鋼橋の疲労変状調査, 土木学会論文集, 第368号/I-5, (1986), pp.1-12.
- 18) 三木千寿, J. W. Fisher, 西川和廣, 鋼橋の疲労損傷とその検査, 橋梁と基礎, Vo.20, No.5, (1986), pp.17-21.
- 19) 谷口紀久, 阿部 允, 阿部英彦, 鋼鉄道橋の疲労変状—垂直補剛材下端—, 構造工学論文集, Vol.32A,(1986), pp.41-48.
- 20) 飯野忠雄, 山田 実, 岩崎雅紀, 鋼橋の疲労損傷に対する予防保全の検討, 構造工学論文集, Vol.36A, (1990), pp.985-994.
- 21) 日本鋼構造協会既存鋼構造物の補修・補強検討小委員会, 供用下にある鋼構造物の溶接による補強・補修指針(案), JSSCレポート, No.8, (1988).
- 22) 鉄道総合技術研究所, 鋼構造物補修・補強・改造の手引き, 研友社, (1992).
- 23) 朝日新聞, 1994年11月3日, 14版.

- 24) 日本鋼構造協会, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, (1993).
- 25) 日本建築学会, 鋼構造設計基準, (1970).
- 26) FEM, Rules for the Design of Hoisting Appliance, (1970).
- 27) DIN 15018, Krane; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnung, (1974).
- 28) BS 2573, Specification for Permissible Stress in Cranes and Design Rules, Part 1, Structures, (1977).
- 29) DIN 4132, Kranbahnen Stahltragwerke, (1980).

(平成 8 年 3 月 20 日受理)