

## 7. 総 括

橋内 良雄\*

## 7. Concluding Remarks

by Yoshio KITSUNAI\*

**Abstract;** In this study, survey of failure of cranes, monitoring of stress spectrum acting on components in a girder of a crane, fatigue crack initiation and propagation lives of welded joints, estimation of fatigue crack growth life, and weld repair method were examined to prevent failure of overhead travelling cranes due to damages associated with fatigue and degradation of materials. The results are summarized as follows:

- (1) Fatigue occupies almost fifty percent of damage causes of cranes and others are abrasion, corrosion etc. The damages of crane initiate to appear after three to four years service, and most of the cranes have been damaged after fifteen years service. The initiation life of the damages tends to decrease with increasing hoisting capacity of crane.
- (2) The location of damages in runway girder is concentrated at highly stressed region such as the throat of the top flange to the web or to the stiffener, the welded joints between a bottom flange and attached members and the terminations of stiffeners. The damage locations of the main girder are essentially the same as those of the runway girder.
- (3) As a result of stress monitoring of a main girder under service, the majority of the stresses is occupied by relatively low stress ranges below 20 MPa. However, relatively high stresses acted on the main girder when the lowering was stopped abruptly by braking. Moreover, the component located in the middle of the main girder was subjected to the stresses reaching around 30 MPa, when the crab trolley traversed from one side to the opposite side on the main girder.
- (4) The stress spectrum monitored for the main girder under service can be approximately expressed by Weibull distribution.
- (5) The crack opening stress intensity factor,  $K_{op}$ , in the welded joints subjected to a two-step program loading is found to be almost the same in each block and is governed by the maximum stress intensity factor in the block.
- (6) The fatigue crack growth rate,  $da/dN$ , of welded joint subjected to the two-step program loading is correlated with an effective stress intensity factor range estimated based on linear accumulation of the stress intensity factor range which is defined as  $K_{iRmax} - K_{op}$ , where  $K_{iRmax}$  is the maximum stress intensity factor which takes into account the residual stress at each step in a block.
- (7) The stress concentration factor of the gusset welded specimens tested takes around 2.4. The fatigue strength of the gusset welded specimens under the program loading determined based on monitoring of stresses acting on components of an overhead travelling crane has roughly 90 MPa regardless of specimen size. The fatigue life of the gusset welded specimens is dominated by the crack initiation rather than the crack propagation life.
- (8) The  $da/dN$  of the gusset welded specimens under the program loading is correlated with an effective stress intensity factor range,  $\Delta K_{Rem}$ , estimated based on linear accumulation of the stress intensity

factor range which takes into account residual stress at each step in a block.

(9) The prediction of fatigue propagation life of the gusset welded joints using  $\Delta K_{Rem}$  agrees with the experimental results in the range of error within 15 %, when the crack length is less than 20 mm.

(10) The fatigue strength of the repair welded gusset plate specimens is somewhat higher than that of as-welded ones because of release of residual stress arising from reheating during the repair weld and reduction of stress concentration of the weld toe.

(11) The fatigue strength of the repair weld specimens with partial-penetration of weld metal decreases with increasing the initial crack length. In case of the one-surface repaired specimens with partial penetration of weld metal, it is difficult to obtain the enough fatigue strength, while the both surfaces repaired specimens satisfies the requirement of the design code of overhead travelling crane.

(12) In case of cover plate repair specimens, the fatigue strength markedly reduces due to high stress concentration at the side fillet weld. Therefore the cover plate is an inadequate repair method, and is inapplicable to cranes subjected to cyclic loadings.

(13) The following repair method for crane members may be recommended: removing the crack from the damaged component by machining or air-arc gouging and making a groove, filling the groove completely from both surfaces of the component by welding, and finally finishing by grinding to reduce the stress concentration.

**Keywords;** Overhead travelling crane, Survey, Damage, Fatigue, Degradation, Failure analysis, Fatigue strength, Fatigue crack, Stress monitoring, Service stress, Rain-flow method, Repair weld, Gusset welded joint, Residual stress, Program loading, Fracture mechanics, Superposition, Life prediction,

## 1. 結 論

近年の経済活動の活性化に伴い物流や生産設備の中核となっているクレーンは、一層高速化や大型化が進められており、比較的短期間に設計寿命に到達する場合も少なくない。また、大型化に伴い十分な設計裕度を確保することが次第に困難になっている。このような状況を反映して、経年クレーンでは高応力集中部に疲労き裂が発生することがあり、時には倒壊等の重大災害を誘発している場合もある。クレーンが生産や物流設備の中心となっていることや、ランウェイガード等では建造物の一部となっていること等から、たとえばかなりの損傷が発見されても新規クレーンへの交換は困難な場合が多く、従って適切な補修方法とその後の強度評価法を確立することが安定な操業を継続するためにも、また作業者に対する安全を確保する上からも重要と考えられる。しかし、経年クレーンに対する補修・補強対策や補修後の余寿命評価法についてはあまり検討されていない。

本研究ではクレーンの補修法や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、まず天井クレーンの経年損傷について、文献調査や幾つかの企業の協力を得て実態調査を実施した。また、当所に設置されている定格 49kN のパイプ構造の天井クレーンの各部

にひずみゲージ貼り、稼働状態において各部に作用する応力をレインフロー法により調べた。クレーンでは溶接が多用されており、溶接欠陥や溶接による高応力集中箇所がしばしば疲労破壊の起点となる。溶接欠陥が起点となる場合、疲労寿命はき裂の発生寿命よりも進展寿命に支配されることが知られているので、高い残留応力を有する部材が複雑な変動荷重を受ける場合のき裂進展寿命を評価する方法について明らかにするために、溶接試験片に2段のプログラム荷重を負荷して疲労き裂進展特性を調べた。次に、クレーン構造部材のうちで疲労損傷が発生しやすいガセット溶接継手を模擬したガセット試験片を作製し、これに天井クレーンの実働荷重の測定結果を基に定めた1ブロックが5段の応力範囲から構成されるプログラム荷重を負荷して疲労試験を行い、ガセット溶接継手の疲労強度、疲労き裂進展特性および疲労寿命の予測法について検討した。さらに、溶接補修した場合の部材の疲労強度について明らかにするために、数種の方法で補修した試験片を準備し、クレーンが稼働時に受ける変動荷重と類似のプログラム荷重を負荷して疲労試験を行い、補修方法と疲労強度の関係について調べた。また、補修時の留意点について検討した。これらの結果は各章の結論に記されているが、それらをさらに要約すれば以下のようになる。

(1) ランウェイガーダの損傷部は上フランジとウェブの接合部、リブ端部のウェブ、ガセットプレート近傍、上フランジとスティフナ接合部近傍等に発生しやすい。メインガーダの損傷箇所もランウェイのそれと類似している。メインガーダでは構造部分の他に巻き上げ、走行・横行装置のトラブルも多い。

(2) 損傷が発見されるまでの使用年数を見ると、調査したクレーンの約半数に損傷が発見され、15年経つと70%程度のクレーンに何らかの損傷が生じている。

(3) 定格荷重と損傷件数との関係を見ると、定格荷重の大きいクレーン程損傷件数が多く、しかも比較的早い時期から損傷が生じる傾向が見られることから、大型のクレーン程設計裕度が低く押さえられているようである。

(4) 天井クレーンの部材に作用する応力は、荷の巻き上げや走行時よりも、巻き下げの急停止時に大きな応力振幅が発生する。また、横行時に荷がスパンの中央付近に位置するときに、部材に比較的大きな応力振幅が生じる。しかし、それらの公称応力範囲は30MPa程度であって比較的小さい。

(5) 溶接残留応力を有する部材が変動荷重を受けて、欠陥から疲労き裂が進展する際の挙動を破壊力学を用いて評価するための方法について検討するために、溶接試験片に1ブロックが2段(2ステップ)からなる変動荷重を負荷して疲労試験を行った。その結果、き裂の進展速度を支配するき裂開口応力拡大係数  $K_{op}$  は1ブロック中ではほぼ一定であって、1ブロック中の最大荷重によって支配されていた。

(6) 残留応力を有する3種のタイプの溶接試験片の疲労き裂進展速度は、残留応力を考慮した各ステップの最大応力拡大係数からき裂開口応力拡大係数を減じてステップ毎の応力拡大係数を算出し、この応力拡大係数を単位ブロック中で  $m$  乗重み平均した有効応力拡大係数  $\Delta K_{Rem}$  を用いて評価することができる。

(7) 実験に用いたガセット溶接試験片の応力集中係数  $K_t$  を赤外線応力画像解析システムを用いて測定した結果、 $K_t$  は2.4程度の値をとる場合が多い。また、クレーンが受ける変動荷重を模擬したプログラム荷重下で調べた本ガセット溶接継手の200万回疲労強度は、90MPa程度である。

(8) クレーンが受ける変動荷重を模擬したプログラム荷重を受けるガセット溶接試験片の疲労き裂進展速度は、有効応力拡大係数  $\Delta K_{Rem}$  とよい相関が認められる。

(9)  $\Delta K_{Rem}$  を用いてガセット溶接試験片の疲労き裂進展寿命を比較的高精度で予測することができる。

(10) ガセット止端近傍のき裂を板の両表面から補修溶

接した場合には、補修時の余盛による断面増加、補修溶接熱によるSR(応力除去焼鈍)効果による初期残留応力の解放、および初期止端形状の変化に伴う応力集中係数の改善等の理由により、疲労強度が新製のガセット溶接試験片のそれよりも向上する。

(11) 長さが部材断面の半分に達するようなき裂を一方の表面側だけから補修溶接しても、補修箇所の板厚方向にき裂が残るため、補修効果は期待できない。

しかし、き裂を両表面から補修溶接によって完全に埋めた場合には、かなり疲労強度が改善される。

(12) 完全に破断した部材に片側からカバープレートを隅肉溶接したときには、部材間(き裂面間)にできる隙間近傍の補修溶接金属のど部から、かなり低い応力でき裂が発生する。したがって、このような方法は補修には適さない。

(13) 文献や本実験データを基にクレーン部材の補修方法について検討した結果、き裂を機械加工あるいはガウジングによって除去後開先加工を行い、両面溶接する。溶接後グラインダ等により表面加工を行い、応力集中の軽減を図る。以上の処理によりある程度の補修効果が期待できると思われる。

## 2. 今後の課題

クレーン構造部分の損傷は高所でしかも狭隘な箇所に発生する場合が多く、また塵埃や油等にまみれていることもあり、点検や損傷の検出の傷害となっている。海浜やメッキ工場のクレーンのように腐食環境で使用されるものを除けば、クレーンの損傷は疲労が関与している場合が多い。疲労き裂は通常発生初期には緩慢に進展するが、時間の経過と共に指数関数的に急激に増加する。このため初期の段階でき裂の検出に努めることが肝要であるが、前記したように点検作業環境が極めて悪いことから、見逃す場合も少なくないように思われる。このような見逃しを少なくするために、損傷事例(損傷箇所、損傷発生までの使用期間、損傷部の構造等)に関するデータベース化が必要と考えられる。すなわち、データベースに基づき予め危険箇所を検査員に教示しておけば、見逃し率が減少する。実際、航空機ではこのような試みがなされている。点検や検査は人間の技量や経験に負うところが大きいことから、それらによらないモニタリングシステムや損傷度表示塗料等の新たな視点からの損傷検出法の開発が必要である。

損傷を補修した場合に、補修・補強対策、およびその後の追跡調査結果のデータベース化も必要である。補修・補強に関して十分なデータが蓄積されていない現状では、このようなデータベース化はクレーンの維

持管理に対して有効な情報の提供源となると考えられる。

補修・補強には、溶接による以外にき裂の先端に円孔をあけて応力集中を緩和するストップホール法や、高力ボルト接合による補修方法も橋梁等では実施されているので、それらを損傷クレーンに適用する場合の有効性についても今後検討する必要がある。

損傷の形態はクレーンの構造や使用環境によって異なることから、損傷状況に適切に対処するため、ならびに不適切な補修に起因する損傷の再発を防ぐために、補修・補強対策の基準化を図ると同時にマニュアルの作成が必要と考えられる。

(平成8年3月20日受理)