

氏 名	星 井 勤
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 51 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学第二 専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	クレーン構造物の強度評価技術の改善に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 阿部 博之 東北大学助教授 横堀 寿光

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近年のクレーン大型化・高速化に伴い、クレーン構造物の合理的な構造強度評価法による安全性の確保の重要性が増している。クレーン構造物の強度設計は、労働省告示のクレーン構造規格や JIS「クレーン鋼構造部分の計算基準」等の設計基準に従って行われている。クレーン構造物の強度評価については、早くから設計基準を整備する努力がなされており、古くは昭和21年の機械工学便覧やドイツの DIN 120 (1936年)がある。クレーン構造物の強度設計は、本来は設計基準に従って円滑に行われるべきである。しかし、設計実務において現行の設計基準を適用する際に、設計者が疑問を抱く点がある。本論文では、このような点について重要な問題を取上げ、それらを実用的な見地から解決することを目的とした。クレーンの強度設計の手順から解決すべき課題を整理すると、次の2つの因子に大別できる。

- (1) 荷重条件の評価法において改善術期因子
- (2) 構造要素の強度評価法において改善すべき因子

先ず、因子(1)に関する最重要課題は、クレーンに作用する荷重の中で強度設計上最も重要な巻上荷重のばらつきを定量的に取扱う手法を確立することである。現行の設計基準では巻上荷重の頻度分布の定義が定性的な表現や実状に合わない分布形状が用いられているため、巻上荷重の頻度分布形状を設計で使い易い確率密度関数によって表示することが課題となっている。また、因子(1)のうちひとつの重要かつ緊急な課題はクレーンに対する地震荷重の評価法の確立である。クレーンに特

有な地震時の車輪とクレーンのすべり条件の把握とそれを合理的に考慮できる動解析手法が問題となっている。この他の荷重条件も重要なものであるが、それらは既存の研究やクレーン以外の分野での荷重条件の評価法を設計実務において参考にできる。そこで、本論文においては、因子(1)における上述の2つの重要課題に対して、それぞれ第2章と第3章において検討し実用的な提案を行った。

次に、因子(2)に関する重要な課題は、強度設計上重要な構造要素について応力計算の方法とそれに対応する許容応力の明示を行うことである。現行の設計基準での応力計算の方法は、「静力学・動力学及び材料力学の既知の法則に適合すること」とされ、設計基準に明示されていないのが普通である。しかし、設計基準に応力計算の方法とそれに対応する許容応力の明示がなければ、設計者が十分な強度評価を行うことができないクレーンに特有でありかつ重要な構造要素がある。クレーン構造部材の接合部に多用されているピン継手およびクレーン用ロープ車がその代表例である。両者とも、力の流れが複雑な構造要素であり、未だその応力の計算方法を含む強度評価法は明確にされていない。本論文では、この2つの重要な構造要素について因子(1)の改善成果を反映させた合理的な強度評価法の確立を目的として、それぞれ第4章と第5章において検討し実用的な提案を行った。因子(1)の地震荷重の評価法の改善を具体的に反映させた検討を第6章において行い、緊急かつ重要な課題となっている原子炉建屋クレーンガーダの耐震強度評価法を提案した。

本論文では、以上のようなクレーン設計者が現状で直面している構造強度評価上の特に重要な問題を各章で取上げ、設計工学的な観点からの研究を実施して設計実務上直接に役立つ有用な提案を行った。

第2章 クレーンの巻上荷重に関する評価法の改善

本章は、クレーンに作用する荷重のうち強度設計で最も重要な巻上荷重の定量的評価法を検討した。まず、定格巻上荷重を超える頻度の取扱いが課題となっている大型アンローダの巻上荷重を測定し、その結果から現状の設計基準を適用する場合の問題点を明らかにした。次に、これを解決するために巻上荷重の頻度分布をベータ分布によって近似し、巻上荷重の平均値、標準偏差、最大値から荷重スペクトル係数を求める手法を提案した。さらに、ISOで将来の課題とされている巻上荷重の設計用頻度分布形状を、大型アンローダについて連続的な確率密度関数によって表示した。また、この定量的評価手法は他のクレーンの巻上荷重についても適用できることを造船所用ジブクレーンおよびコンテナクレーンについて確認した。続いて、この巻上荷重を定量化して表示した成果をクレーン構造部材に生じる応力範囲の頻度分布の推定に反映させる方法について検討した。応力範囲の頻度分布は巻上荷重とクレーンの動作および構造に関係する複数の確率変数により決定され、一次近似法とベータ分布とを組合わせた推定法が実用的且つ有用な方法であることを示した。また、設計実務で応力範囲の頻度分布を定量的に取扱うために応力スペクトル係数の導入を提案した。

第3章 クレーンの地震荷重に関する評価法の改善

第2章がクレーンに作用する主荷重に関する最重要課題の検討であるのに対して、本章ではクレー

ンの短期荷重に関する最重要課題となっている地震荷重の評価法を検討した。クレーンに特有の条件である地震時の車輪とレールのすべり挙動を観察できる試験体を用いて静的加力実験、模擬地震波加震実験を実施した。その結果に数値計算を含む設計工学的な考察を加え、クーロンの摩擦条件を実用的なすべり条件として適用できること、数値計算により車輪とレールの基本的なすべり挙動が模擬できること、および摩擦係数はレール上の繰返しすべりの影響により増大することを明らかにした。そして、クレーンに対する地震荷重を合理的に求めるための車輪とレールのすべり条件およびクレーン構造物の振動特性を考慮した数値解析モデルを提案し、その適用計算から従来の車輪とレールのすべりを考慮した地震荷重の評価法は設計的に危険側になる可能性があることを明らかにした。さらに合理的な耐震強度評価法の確立のためには、対象とするクレーンの構造物の振動特性を考慮した実験的研究が必要であることを示した。

第4章 クレーン用ピン継手の強度に関する評価法の改善

第2、3章がクレーンの荷重条件の評価法の改善についての検討であるのに対して、本章ではクレーンの重要な構造要素の強度評価法の改善について検討した。本章では主要構造物の接合部に多用されているピン継手の強度評価法を確立することを目的として、実機での使用範囲で外径比（ピン継手外径とピン穴径との比）の異なるピン継手の試験体を用いた実験を実施した。試験体の伸びおよび各部のひずみの変化から、ピン継手の降伏はピン穴側面の応力集中部が継手素材の降伏強度に達する引張荷重のほぼ2.3倍で生じること、継手の破断形式は外径比により異なるものであること、継手の降伏比は継手素材である軟鋼の降伏比より小さいので強度設計では継手降伏強度により強度評価ができることを明らかにした。また、ピン継手の降伏はピン穴側面からの降伏域と継手先端からの降伏域が結合する引張荷重で生じること、有限要素法による弾塑性解析から明らかにした。以上の検討結果に設計工学的な考察を加えて、降伏強度を支配する形状パラメータと継手素材の降伏強度を用いた合理的な強度評価式を提案した。さらに、第2章の巻上荷重を定量化した成果を取入れた従来に無い実用的かつ合理的なピン継手の強度評価法を提案した。

第5章 クレーン用ロープ車の強度に関する評価法の改善

第4章に続いて、本章ではクレーンに特有でありかつ安全上重要な構造要素でありながら未だ応力状態が明らかにされていなかったロープ車の強度評価法を確立することを目的として、第2章で得られた荷重評価法の成果を反映させた疲労強度評価法を検討した。まず、ロープ車の応力状態を明らかにするため、実機に取付けたロープ車試験体の応力測定と有限要素法による応力解析を実施した。この結果から、ロープ車の最大応力は半径方向応力がボスの狭い角度範囲で集中しているボスとウェブの溶接部に生じること、この応力はロープ車の回転に伴い繰返し応力として溶接継手に作用すること、ロープ車の回転に伴う繰返し応力範囲の設計過程での計算にはボス内部のころ軸受のすきまの影響を考慮した非線形の拘束条件が必要であることを示した。次に、ロープ車の溶接部に作用する応力範囲の頻度分布の決定要因を実働荷重条件下の測定値から明らかにすると共に応力範囲決定式として表示し、第2章の巻上荷重を定量化した成果および構造部材に生じる応力範囲頻

度分布の推定法を適用して、実用的なロープ車の疲労強度評価法を提案した。

第6章 クレーンガーダの耐震強度に関する評価法の改善

本章では、第3章で得られた地震荷重の評価法を具体的に原子炉建屋クレーンに適用して、緊急の課題となっている原子炉建屋クレーンガーダの耐震強度評価法の検討を行った。まず、このクレーンの実機実験を行って構造物の振動特性を把握して、クレーンガーダの耐震強度評価には1次と2次の振動モードを考慮する必要があることを明らかにした。次に、この実機実験および第3章の検討結果をふまえた車輪とレールのすべり条件に構造物の振動特性を付加した縮小模型試験体を製作した。この試験体を用いた正弦波加振実験および模擬地震波加振実験から、クレーンガーダの地震時の応答加速度の大きさおよび車輪とレールの摩擦係数を把握した。また、吊荷の応答および緩衝器との衝突荷重は耐震強度評価に考慮する必要がないことを実験から明らかにした。これらの実験結果に数値解析を含む設計工学的な考察を加えて、クレーンガーダの耐震強度評価に適用できる車輪とレールのすべりを考慮した2質点系数値解析モデルとその計算条件を提案した。以上により、従来に無い合理的な原子炉建屋クレーンガーダの耐震強度評価が可能となった。

第7章 結 論

本使用は本研究の総括であり、各章の末尾で述べたまとめを簡潔に要約したものである。

審査結果の要旨

クレーンは大形の移動構造物であるために安全設計法の確立は重要な問題である。しかし荷重の大きさは様々に変化し、地震の多発国では地震荷重も考慮しなければならなくなる。

本論文は、荷重の適正な推定と主要な要素の強度評価に対する研究結果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、クレーンに作用する外力の中で最も重要な巻き上げ荷重について、大形アンローダに作用する荷重を測定して荷重の頻度分布係数を求める手法を提案している。この方法はジブクレーン及びコンテナクレーンに対しても適用出来ることを確認し、一次近似法とベータ分布との組合せによる表示が実用的に有効であることを示している。また、設計実務上便利な応力スペクトル係数を用いている。

これらは複雑な実働荷重を適正に推定して設計に反映させる手法として重要な意義を持つものといえる。

第3章では、地震荷重に対する試験体の車輪のすべりを観測して数値解析のモデル化を行い、車輪とレール間の摩擦係数は地震による摩擦の繰り返しによって増大することを明らかにしている。その結果、従来の評価では危険側に設計される恐れがあることを指摘している。これはクレーンの安全設計上重要な知見である。

第4章では、クレーンの各部を連結するピン継手の強度評価のため実機試験と有限要素法による弾塑性応力解析を行い、その強度及び破断の様相がピン継手の形状の影響をうけることを明らかにして継手材料の降伏強度と形状のパラメータを用いた強度評価式を提案している。

第5章では、クレーン特有の要素であり、安全作業上も重要なロープ車の強度評価のために実機試験と応力の数値解析を行い、最大応力はボスとウェブの狭い範囲の溶接部に繰り返し作用することを明かにし、軸受のすきまを考慮した非線形拘束条件を考慮すべきことを指摘している。その上で、第2章の方法で評価した応力範囲頻度分布の推定結果を適用して、ロープ車の疲労強度評価法を提案している。

第6章では、地震荷重の評価に基づいて原子炉建室用クレーン・ガーダの耐震強度の評価を行っている。小型試験体による実験と数値解析とにより、振動モード、吊荷の応答、緩衝器の効用等について検討し、レールのすべりを考慮した2質点系モデルが有効であることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、クレーンの安全設計法を確立するために巻き上げ荷重及び地震荷重の定量的評価方法を提案し、その結果に基づきクレーン特有の要素の強度評価法に対して設計実務上有用な改善策を提示したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。