

氏名・（国籍）	栗 ^リ 文 ^{ウェン} 彬 ^{ビン} （中華人民共和国）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	工博甲第330号
学位授与の日付	平成24年 3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	焼嵌め接合からなる大型円筒セラミックス構造物の強度設計及び 解体に関する研究
論文主査委員	主 査 教 授 野 田 尚 昭 〃 松 田 健 次 〃 宮 崎 康 次 〃 幸 左 賢 二 支援研究員 佐 野 義 一（アステック入江）

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

セラミックスは熱や腐食に対して優れた性質を備えているが、一方では鋼に対比して靱性が小さく、応力集中部から破壊につながる欠点がある。加えて、成形や加工が困難で、高価なため構造物としての実用化が限られている。特に、数百 mm を超える大型構造物の製品例は少なく、それらは外力や熱衝撃の低い、搬送用ローラーや成形ロール等で使われているのみである。このように、大型構造物でのセラミックス化が進まない原因の一つに、信頼性が低いにもかかわらず、その対応技術や研究の遅れが考えられる。

そこで本研究では連続熔融金属めっき用ロールや搬送用ローラーなどの大型セラミックス構造物の強度設計に関する問題に取り組む。具体的な課題としては、焼嵌め接合部において、使用中に生じる熱衝撃や曲げの繰り返しに対する強度設計について有限要素法と有限体積法を用いて考察した。また、ロール・ローラーが長期間使用されて、耐用寿命に到った後に、保守整備がなされるが、その際に必要な接合部の解体についても、解析を行った。

本論文は、全6章から構成されている。

まず、第1章では、ファインセラミックスの特徴及び構造用セラミックス開発の歴史について述べた。そして、大型セラミックス構造物の強度信頼性の向上、メンテナンス時の効率の向上を目標として焼嵌め接合からなる構造物を研究する必要性を述べた。

第2章では、胴部スリーブとシャフトとを焼嵌め接合にて組立てたセラミックス製シンクロールを熔融亜鉛溶槽に浸漬する際に生じる熱応力を解析することを目的とした。そのために必要な熱伝達係数も併せて解析し、その特徴を考察した。①ロールを熔融亜鉛に浸

漬する過程において、シャフトとスリーブとの焼嵌め接合部は、浸漬が進行するにつれて浸漬が先行するスリーブ下部から分離していき、全体が浸漬すると、スリーブの膨張により、50%以上が非接触状態になる。さらに浸漬が続くとシャフトも膨張するため、接触状態が回復していく。②焼嵌めロールのスリーブに生じる浸漬時の最大応力は162.7MPaで、セラミックスの設計強さ333MPa(安全率:1.5)より小さく、熱割れに対して安全である。③単体スリーブの焼嵌め接合部を断熱した場合、最大応力は焼嵌めロールの応力値とほぼ一致する。このことから、単体スリーブの解析により、焼嵌めロールのスリーブ部の応力状態を安全側で予測できることが分かった。

第3章では連続酸洗設備用ロールに用いられる小径軸付大径ロールに注目して、セラミックス製スリーブの両端にセラミックス製スペーサーリングと鋼製軸を焼嵌めで接合する構造を考え、疲労を中心とする強度について検討した。まず強度設計上注目すべき焼嵌め部の焼嵌め応力を解析した。スリーブの最大応力はスリーブが厚い場合は内面に生じるが、薄い場合は外面に生じる。このように薄い場合には設計上注意を要することが分かった。焼嵌め率 δ/d を大きくすると、曲げ負荷が加わっても片当りが生じ難くなり、スリーブとスペーサーリングが接触部全域にわたって良好な接触状態(固着状態)になる。また、曲げによるスリーブの応力 $\sigma_{\theta\theta}$ が一定になりはじめる限界の と有効接触面積比(接触面積/見かけ上の接触面積)が1となる がほぼ一致することが確かめられた。焼嵌め率、スリーブ厚さ h を大きくすると、片当りによる応力集中の効果が回避できるので、瞬時破壊や疲労による破壊を防ぐことができる。したがって、スリーブが薄い場合でも、焼嵌め率を大きくした方が疲労に対して安全側となるという、予想外の結果が得られた。

第4章と第5章ではセラミックス製スリーブの両端に鋼製軸を焼嵌めで接合する搬送用ローラーを対象として、消耗の早い鋼製軸の嵌め替え時に必要な軸の取外しとその際の熱応力について検討した。

第4章では、搬送用セラミックス製ローラーを対象として、軸交換するための焼外しの条件について検討した。スリーブ外側から加熱し、軸内側を水冷することによって内孔の小さい場合は分離不可能であるが、内孔を大きくした軸部肉厚の小さい場合は分離可能である。雰囲気温度の上昇が速く、焼嵌め率を小さく、スリーブ外径 D を大きく、軸嵌め込み厚さ h を小さく、セラミックス製スリーブを低熱伝導率にすると、いずれの場合も分離時間が短縮できる。スリーブとシャフトの両端を固定する二重円筒モデルについて、スリーブとシャフトの両方が鋼製、あるいはセラミックス製の場合は分離できる。しかし、スリーブがセラミックス製、シャフトが鋼製の場合は分離できない。一端を固定、別の一端が自由の二重円筒モデルについて、実体モデルの境界条件と同様にセラミックス製スリーブの左端部と鋼製シャフトの右端部を固定した場合、スリーブとシャフトの左端部を固定した場合より分離しやすい。

第5章では、搬送用ローラーについて、焼外す場合の熱応力等について解析した。スリーブに生じる最大応力はスリーブ内側に発生する円周方向応力である。最大応力は温度差

が最大になる分離時ではなく、その少し前に生じる。嵌め率を小さく、スリーブ外径 D を大きく、軸嵌め込み厚さ h を小さく、セラミックス製スリーブを低熱伝導率にすると、いずれの場合も熱応力が低減する。これは焼外し時間が短くなることと一致する。二重円筒モデルとローラーモデルの結果は、同じように、未分離域と分離域の境界付近で応力に凸起が見られるところは注目される。

第6章では本研究で得られた主要な結論をまとめた。

学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

セラミックスは熱や腐食に対して優れた性質を備えているが、一方では鋼に対比して靱性が小さく、応力集中部から破壊につながる欠点がある。加えて、成形や加工が困難で、高価なため構造物としての実用化が限られている。特に、数百 mm を超える大型構造物の製品例が少ないことから、本研究では、連続溶融金属めっき用ロールや搬送用ローラーなどの大型セラミックス構造物の強度設計に関する問題に取り組んでいる。具体的には、焼嵌め接合部から成る構造を考え、使用中に生じる熱衝撃や曲げの繰り返しに対する強度設計について考察している。さらに、ロールやローラーの保守整備の際の接合部の解体についても、解析を行っている。

本論文は、全6章から構成されている。

まず、第1章では、ファインセラミックスの特徴及び構造用セラミックス開発の歴史について述べている。大型セラミックス構造物の強度信頼性の向上を目標として、焼嵌め接合からなる構造物を研究する必要性を説明している。

第2章では、焼嵌め接合で組立てたセラミックス製シンクロールを溶融亜鉛浴槽に浸漬する際に生じる熱応力を、熱伝達係数も併せて解析し研究している。その結果、①ロールを浸漬する過程において、焼嵌め接合部が一時的に分離することや、時間の経過とともに、接触状態が回復していくこと、②浸漬時の最大熱応力はセラミックスの設計強さより小さく、熱割れに対して安全であること、③単体スリーブの焼嵌め接合部を断熱した解析により、焼嵌めロールのスリーブ部の応力状態を安全側で予測できること、などを明らかにしている。

第3章では連続酸洗設備用ロールに用いられる小径軸付大径ロールに注目している。セラミックス製スリーブ、セラミックス製スペーサーリング、鋼製シャフトの3つの部分を焼嵌めで接合する構造を考え、疲労を中心とする強度について検討している。その結果、①スリーブが薄い場合は、通常の焼嵌めと異なり、スリーブ外面に最大応力が生じるので設計上の注意が必要なことを指摘するとともに、②スリーブが薄い場合でも焼嵌め率をむしろ大きくすることで、瞬時破壊や疲労破壊防止に有効であることを、焼嵌め部の接触状態から説明している。

第4章では、搬送用セラミックス製ローラーを対象として、線膨張係数の大きい鋼製シ

シャフトを交換するための焼外しの条件を検討している。まず、スリーブ外側から加熱し、軸内側を水冷することによって、実体モデルが分離可能であることを示している。そして、雰囲気温度の上昇が速く、焼嵌め率を小さく、スリーブ外径を大きく、軸嵌め込み厚さを小さく、セラミックス製スリーブを低熱伝導率にすることで、いずれの場合も分離時間が短縮できることを示している。さらに、外円筒と内円筒の長さを揃えた単純なモデルで、どのような境界条件下で分離が容易になるかを議論している。その結果、実体モデルと似た条件下では、スリーブとシャフトの熱変形が異なるため分離し易いことを明らかにしている。

第5章では、搬送用ローラーを解体する場合の熱応力等について議論している。スリーブに生じる最大応力は、スリーブ内側の円周方向応力として生じ、温度差が最大になる分離時ではなく、その少し前に生じることを示している。そして、嵌め率を小さく、スリーブ外径を大きく、軸嵌め込み厚さを小さく、セラミックス製スリーブを低熱伝導率にすることで、いずれの場合も熱応力が低減することを述べている。また、これらの条件は焼外し時間が短くなる条件と一致することや、最大熱応力がセラミックスの設計強さより小さく、熱割れに対して安全であることを説明している。

第6章では、本研究で得られた主要な結論をまとめている。

以上要するに、本論文は連続溶融金属めっき用ロールや搬送用ローラーなどの大型セラミックス構造物の強度設計に関する問題に取り組んだものである。具体的には、焼嵌め接合された構造物を対象にして、使用中に生じる熱衝撃や曲げの繰り返しに対する強度について、有限要素法と有限体積法を用いて考察を行い、設計上、いくつかの重要な知見が示されている。さらに、ロール・ローラーが長期間使用され保守整備がなされる際の、接合部の解体についても詳しく議論している。よって、本論文は、機械工学上寄与するところが大きく、博士（工学）の学位論文に値するものと認められる。

なお、本論文に関し、審査委員並びに公聴会出席者からは、有限要素解析の境界条件の与え方、接合部の接触状態、接合部の接触疲労の影響、研究の目的と背景などについて種々の質問がなされたが、いずれも適切な回答がなされた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。