

## 耐火材料の製造及び適用技術における熱的・機械的応力解析

## 学位論文内容の要旨

高温下で使用される構造材料としては、温度条件や使用環境により高融点金属や耐火物などが用いられる。本論文では、溶融金属に接する容器やノズル類に適用される耐火物、及び、火災時の構造体保護の目的で用いられる耐火板などの無機材料を主体とする耐火材料の製造及び適用技術における熱的・機械的応力解析に関して述べた。

耐火物の損傷形態としては、磨耗などを含む化学的な溶損と、熱衝撃スポールや鉄皮構造、隣り合う耐火物との押し合いによる外力などによる力学的な破壊または割れである。一般的には、破壊とは亀裂を生じることをいうが、耐火物の場合初めから気孔、空隙が存在しており、大幅な強度低下、高温での過度な変形や亀裂発生、進行と考えた方がよい。耐火物を実際に使用する時、溶損損耗についてはある程度予想がつき扱いやすいが、破壊については、それが発生する位置、タイミング、破壊形態・その程度などを予想するのは難しい。耐火物が破壊すると予想外の大きなトラブルとなり、最悪の場合、人的災害ばかりでなく操業不能に陥る場合もある。その為、破壊現象の要因を事前に解析し、その対策を施すことが重要である。

破壊について解析を行うためには、使用される耐火物の物理的、化学的性質、構造及び操業の条件を正確に把握する必要がある。なぜならば、上述したように、耐火物はそれらの条件が複雑に絡み合い、破壊を起こすからである。そのように複雑な耐火物の破壊挙動を予め調査する方法として、有限要素法解析がきわめて有効である。

本研究では、耐火材料の高温時における熱的、機械的挙動に関して物性測定、模擬実験と併せてコンピュータを利用した有限要素法解析を極めて多くの種類の事例について行い、その製造・施工時ばかりでなく製品として適用される場合において深刻な破壊を起こし難い最適な構造設計条件へと導くことを目的とした。

本論文は全7章から構成されており、各章ごとに得られた結論は以下の通りである。

第1章「緒言」では、耐火材料の分類、製造方法、適用範囲や問題点についてまとめ、本研究の目的と関連分野のこれまでの研究の概要について述べた。

第2章「応力解析の基礎」では、高温に晒される材料の破壊挙動は、高温での材料物性、周囲との熱的・力学的な境界条件などが複雑に絡み合う。そのような条件下では、高温挙動を単純計算では求められず、有限要素法(FEM)などを適用して実際に発生する破壊挙動を解析することが必要である。解析条件は非常に複雑で入力を簡単にするため、また、三次元解析において温度分布、応力分布、最大主応力ベクトルなどを視覚的に評価出来るようにするために、入出力プログラミングを含め独自にシステム開発を行い、それを適用することにより的確かつ迅速な解析が可能になった。また、耐火材料の破壊挙動メカニズムや注目すべき高温特性についても述べた。

第3章「耐火物の製造・施工における熱応力解析」では、耐火物焼成過程において発生する破壊現象に関して、材料特性と加熱過程と冷却スピードの関係を求め、材料に適した焼成条件の求め方について整理した。不定形材料の乾燥工程で発生する危険な爆裂現象に関して、水分の抜け方、発生蒸気圧を実験及びコンピュータシミュレーションによる計算の両面から検討した。その結果、施工体の添加水分量、通気率、厚さ、内外面での伝熱条件そして乾燥温度スケジュールが既知であれ

ば、乾燥時の発生蒸気圧を事前に計算可能である。従って、計算で求めた発生蒸気圧と施工体の材料強度を比較することによって、爆裂を回避できる条件としての発生蒸気圧が材料強度よりも小さくなり、しかも最速である最適乾燥条件を決定することが可能である。また、不定形耐火物の実機での乾燥プロセスにおける伝熱計算を行い、非常に良い精度で発生圧力も計算可能であることも確認した。

第4章「鉄鋼製造用耐火物の適用時の損耗解析」では、溶鋼取鍋に適用される不定形耐火物に関して、使用原料による耐スポーリング性比較、組織緻密化メカニズムの究明を行った。混鉄車受鉄口用耐火物の報告では、緩やかな加熱、冷却条件を結合形態の異なる不定形耐火物に与え、そのマクロ的な破壊挙動を調査した。その結果、FEM解析は評価方法として非常に有効な一手段であること、および、従来の耐スポーリング性評価方法では正確に評価出来ないことも検証した。タンディッシュ堰ブロックについては、堰倒壊現象に対して材料の塑性変形特性が大きく影響することを証明した。ただし、材料の膨張、強度特性との関係もあり、最適な成分構成での実機試験を行い、倒壊および割れなどが発生しない条件を決定した。連続鋳造用上ノズルの内表面への介在物付着抑制を目的として、ノズル内面形状に関して流動解析及び水モデル実験を行い、内面形状の最適化が可能となった。実機試験でも付着改善が認められ、また、下流側に適用される浸漬ノズルでも付着改善効果が確認された。溶鋼連続鋳造工程での耐火物耐用向上、及び、付着により発生するモールド内での偏流も改善されるため、鋼品質の安定化にも多大の貢献するものと期待できる。

第5章「金属との複合構造耐火物における熱応力解析と耐熱衝撃性」では、SNプレートの適用条件は、面圧負荷、れんが押えの影響、摺動などが伴う高温下で、また、急激な温度変化も発生する条件で適用される耐火物としては非常に過酷なものである。このような条件について、熱応力解析と機械応力解析を行い各ファクターが発生応力に与える影響度について計算により検討した。SNプレートの固定方法は、保持、摺動を行うためにメカ内部にれんが押え構造にて固定される。SNプレートを固定する時点でのメカ温度が高温の場合、破壊が発生した。プレート固定時のメカ温度、破壊状態などの実機調査、熱応力解析を行い、最適なプレート固定時メカ温度を決定した。アルミニウムを添加した軽焼タイプのSNプレート材質で、焼成タイプの材質では見られない特異な亀裂が生じた。この損耗原因を調査した結果、高熱膨張率および受鋼時の焼結に起因した、ノズル孔廻りへの応力集中が原因であることが判明した。そこで、低膨張性原料の適用、カーボン増量により、この材質系の低膨張率化、低弾性率化を検討した。その結果、焼成タイプの材質よりも高熱間強度という特徴を有し、耐スポーリング性が良好な材質を開発することが出来た。この材質を実使用したところ、損耗に改善が認められ、工程品の焼成タイプの材質と比較して同等以上の結果が得られた。

第6章「高温気体用耐火材料における熱伝導解析」では、トンネル火災時、構造体を保護する目的で耐火板が適用されている。フルサンドイッチ構造沈埋トンネルの標準断面部を耐火板で保護した場合の耐火性能について、耐火試験と熱伝導解析による検討を行い、耐火板厚さ、設置構造の影響度を検証した。

第7章「結言」では、各章ごとに得られた結論をまとめて述べるとともに、本論文で述べた熱的及び機械的応力解析の手法が高温で使用される各種の耐火材料およびそれらの構造体の製造・施工工程のみならず適用に対して、事故防止や耐用性改善の観点から有効な指針を与えるものであることを述べ、耐火材料の工業と関連する学術の進歩に対する本研究の貢献を明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 黒 川 一 哉 |
| 副 査 | 教 授 | 井 口 学   |
| 副 査 | 教 授 | 松 浦 清 隆 |
| 副 査 | 教 授 | 秋 山 友 宏 |

## 学 位 論 文 題 名

### 耐火材料の製造及び適用技術における熱的・機械的応力解析

高温下で使用される構造材料としては、温度条件や使用環境により高融点金属や耐火物などが適用される。本論文では、熔融金属に接する容器やノズル類に適用される耐火物、及び、火災時の構造体保護の目的で用いられる耐火板などの無機材料を主体とする耐火材料の製造及び適用技術における熱的・機械的応力解析に関して述べた。

耐火物の損傷形態としては、磨耗などを含む化学的な溶損と、熱衝撃スポールや鉄皮構造、隣り合う耐火物との押し合いによる外力などによる力学的な破壊または割れである。一般的には、破壊とは亀裂を生じることというが、耐火物の場合初めから気孔、空隙が存在しており、大幅な強度低下、高温での過度な変形や亀裂発生、進行と考えた方が良い。耐火物を実際に使用する時、溶損損耗についてはある程度予想が付き扱いやすいが、破壊については、それが発生する位置、タイミング、破壊形態・その程度などを予想するのは難しい。耐火物が破壊すると予想外の大きなトラブルとなり、最悪の場合、人的災害ばかりでなく操業不能に陥る場合もある。その為、破壊現象の要因を事前に解析し、その対策を施すことが重要である。

破壊について解析を行うためには、使用される耐火物の物理的、化学的性質、構造及び操業の条件を正確に把握する必要がある。なぜならば、上述したように、耐火物はそれらの条件が複雑に絡み合い、破壊を起こすからである。そのように複雑な耐火物の破壊挙動を予め調査する方法として、有限要素法解析がきわめて有効である。

本研究では、耐火材料の高温時における熱的、機械的挙動に関して物性測定、模擬実験と併せてコンピュータを利用した有限要素法解析を極めて多くの種類の事例について行い、その製造・施工時ばかりでなく製品として適用される場合において深刻な破壊を起こし難い最適な構造設計に対して指針を与えた。

本論文は全7章から構成されており、各章ごとに得られた結論は以下の通りである。

第I章「緒言」では、耐火材料の分類、製造方法、適用範囲や問題点についてまとめ、本研究の目的と関連分野のこれまでの研究の概要について述べた。

第II章「応力解析の基礎」では、高温に晒される材料の破壊挙動は、高温での材料物性、周囲との熱的・力学的な境界条件などが複雑に絡み合う。そのような条件下では、高温挙動を単純計算では求められず、有限要素法(FEM)などを適用して実際に発生する破壊挙動を解析することが必要である。解析条件は非常に複雑で入力を簡単にするため、また、三次元解析において温度分布、応力分布、最大主応力ベクトルなどを視覚的に評価出来るようにするために、入出力プログラミングを含め独自にシステム開発を行い、それを適用することにより的確かつ迅速な解析が可能になった。また、耐火材料の破壊挙動メカニズムや注目すべき高温特性についても示した。

第III章「耐火物の製造・施工における熱応力解析」では、耐火物焼成過程において発生する破壊現象に関して、材料特性と加熱過程と冷却スピードの関係を求め、材料に適した焼成条件の求め方について整理した。不定形材料の乾燥工程で発生する危険な爆裂現象に関して、水分の抜け方、発生蒸気圧を実験及びコンピュータシミュレーションによる計算の両面から検討した。その結果、施工体の添加水分量、通気率、厚さ、内外面での伝熱条件そして乾燥温度スケジュールが既知であ

れば、乾燥時の発生蒸気圧を事前に計算可能である。従って、計算で求めた発生蒸気圧と施工体の材料強度を比較することによって、爆裂を回避できる条件としての発生蒸気圧が材料強度よりも小さくなり、しかも最速である最適乾燥条件を決定することが可能である。また、不定形耐火物の実機での乾燥プロセスにおける伝熱計算を行い、非常に良い精度で発生圧力も計算可能であることも確認した。

第 IV 章「鉄鋼製造用耐火物の適用時の損耗解析」では、溶鋼取鍋に適用される不定形耐火物に関して、使用原料による耐スポーリング性比較、組織緻密化メカニズムの究明を行った。混鉄車受鉄口用耐火物の報告では、緩やかな加熱、冷却条件を結合形態の異なる不定形耐火物に与え、そのマクロ的な破壊挙動を調査した。その結果、FEM 解析は評価方法として非常に有効な一手段であること、および、従来の耐スポーリング性評価方法では正確に評価出来ないことも検証した。タンディッシュ堰ブロックについては、堰倒壊現象に対して材料の塑性変形特性が大きく影響することを証明した。ただし、材料の膨張、強度特性との関係もあり、最適な成分構成での実機試験を行い、倒壊および割れなどが発生しない条件を決定した。連続鑄造用上ノズルの内表面への介在物付着抑制を目的として、ノズル内面形状に関して流動解析及び水モデル実験を行い、内面形状の最適化が可能となった。実機試験でも付着改善が認められ、また、下流側に適用される浸漬ノズルでも付着改善効果が確認された。溶鋼連続鑄造工程での耐火物耐用向上、及び、付着により発生するモールド内での偏流も改善されるため、鋼品質の安定化にも多大の貢献するものと期待できる。

第 V 章「金属との複合構造耐火物における熱応力解析と耐熱衝撃性」では、SN プレートの適用条件は、面圧負荷、れんが押えの影響、摺動などが伴う高温下で、また、急激な温度変化も発生する条件で適用される耐火物としては非常に過酷なものである。このような条件について、熱応力解析と機械応力解析を行い各ファクターが発生応力に与える影響度について計算により検討した。SN プレートの固定方法は、保持、摺動を行うためにメカ内部にれんが押え構造にて固定される。SN プレートを固定する時点でのメカ温度が高温の場合、破壊が発生した。プレート固定時のメカ温度、破壊状態などの実機調査、熱応力解析を行い、最適なプレート固定時メカ温度を決定した。アルミニウムを添加した軽焼タイプの SN プレート材質で、焼成タイプの材質では見られない特異な亀裂が生じた。この損耗原因を調査した結果、高熱膨張率および受鋼時の焼結に起因した、ノズル孔廻りへの応力集中が原因であることを明にした。そこで、低膨張性原料の適用、カーボン増量により、この材質系の低膨張率化、低弾性率化を検討した。その結果、焼成タイプの材質よりも高熱間強度という特徴を有し、耐スポーリング性が良好な材質を開発することが出来た。この材質を実使用したところ、損耗に改善が認められ、工程品の焼成タイプの材質と比較して同等以上の結果が得られた。

第 VI 章「高温気体用耐火材料における熱伝導解析」では、トンネル火災時、構造体を保護する目的で耐火板が適用されている。フルサンドイッチ構造沈埋トンネルの標準断面部を耐火板で保護した場合の耐火性能について、耐火試験と熱伝導解析による検討を行い、耐火板厚さ、設置構造の影響度を検証した。

第 VII 章「結言」では、本論文で得られた結果を総括した。

これを要するに、著者は高温で使用される各種耐火材料およびそれらの構造体の製造・施工工程のみならず適用に対して、熱的及び機械的応力解析の手法が事故防止や耐用性改善の観点から有効な指針を与えるものであることを述べ、耐火材料の工業と関連する学術の進歩に対して多大な貢献を与えた。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認められる。