

論文の要旨

題目：火力発電ボイラの構造評価手法に関する研究
(Research on structural evaluation methods for thermal power boilers)

氏名 村上 英治

エネルギー資源に乏しい我が国では、地球環境に配慮し、経済性と長期安定性を両立した電力供給を実現することが極めて重要である。発電方式は、水力、火力、原子力、太陽光など多様であり、本論文が対象とした石炭焚き火力発電は、我が国及び世界の総発電量の約 30%を占めている。2030 年における石炭焚き火力の発電量は、現在と同等と予想されており、石炭焚き火力発電は将来にわたって重要な電力供給源である。

CO₂ 排出量削減のため、石炭焚き火力発電プラントの高温高压化による効率向上が図られ、高温配管にはクリープ強度に優れた高クロム鋼(9Cr 鋼, 12Cr 鋼)が採用されている。しかし、高クロム鋼の溶接熱影響部は母材に比べてクリープ寿命が短いため、溶接熱影響部からの漏洩事故が発生している。クリープ現象が進むと結晶粒界にクリープボイドと呼ばれる空孔が発生し、ボイドが連結するとき裂になる。漏洩を未然に防ぐためには、実機の複雑応力下でのクリープボイドの発生予測が重要であり、いくつかの手法が提案されている。しかし、これらの手法は複雑であり、プラントの設計や保守に携わる現場技術者が活用することは難しい。そのため、より簡便な予測手法の開発が望まれている。

石炭焚き火力発電プラント 1 基あたりの発電量の増加に伴ってプラントも大型化し、出力 1,000MW(100 万 kW)のプラントでは、ボイラを支持するための鉄骨高さが約 80m にも達する。ボイラを支持する鉄骨は十分な耐震性を有するように設計されているが、東日本大震災において、ボイラが被害を受けた例が報告されており、更なる耐震性の向上が望まれている。設計者は、鉄骨の柱、梁及びブレース(筋交い)の断面積や配置を変化させて、最小コストで必要な耐震性を確保できる構造をトライアル・アンド・エラーで決定する必要があるため、設計に時間を要している。そのため、耐震性と経済性を両立できる効率的な鉄骨骨組み構造の設計手法の実用化が望まれている。

以上の背景の下、本論文では、火力発電ボイラの信頼性向上や電力の安定供給に貢献することを目的として、解決が望まれている構造評価に関する研究課題である、高クロム鋼溶接熱影響部クリープボイド分布の簡易予測手法の開発、及びボイラ鉄骨の耐震性と経済性を両立できる最適設計手法の実用化に取り組んだ。

第 1 章「緒論」では、背景と目的を述べ、高クロム鋼溶接熱影響部のクリープボイ

ド分布予測手法，及び骨組み構造の配置・断面積の最適設計手法について，従来の研究例を示し，研究課題を明らかにした。

第2章「高クロム鋼溶接熱影響部細粒域のクリープボイド個数密度分布の簡易予測手法の開発」では，9Cr 鋼溶接熱影響部細粒域のクリープボイド分布を予測するための新しい簡易予測手法を開発した。熱影響部細粒域のクリープボイド分布及びボイド個数密度の増加挙動を明らかにするため，長手溶接のある管状試験体の内圧クリープ試験を実施した。また，試験体の溶接熱影響部の応力状態を明らかにするため，有限要素法(FEM:Finite Element Method)による応力解析を実施した。その結果，内圧クリープ試験により明らかにしたクリープボイド個数密度の平均増加速度は，最大主応力と応力多軸度係数を組み合わせたパラメータと良い相関が認められた。本相関に基づいて，熱影響部細粒域のクリープボイド分布の簡易予測手法を提案した。本手法は市販の FEM 解析プログラムを用いてクリープボイド分布を予測することができ，専用プログラムの開発や複雑なパラメータの設定が不要である。

提案手法の検証のため，まず拡散シミュレーションによりクリープボイド分布が求められているエルボー配管長手溶接部に提案手法を適用した。予測したクリープボイドの増加挙動は，ボイド個数密度が小さい領域では拡散シミュレーションの結果と良く一致した。両者の最大ボイド個数密度に到達する時間の差異は約 30%であった。

更に，提案手法を実機火力発電プラントで約 8 万時間使用されたエルボー配管の長手溶接部に適用した。提案手法で予測したボイド個数密度の最大値及びその発生位置は，実測結果と良く一致した。

以上の結果より，提案手法により，実機火力発電プラントの溶接熱影響部細粒域のクリープボイド分布を実用上十分な精度で予測できるものと考えられる。

第3章「クリープボイド個数密度分布予測手法の 12Cr 鋼への応用」では，前章で開発したクリープボイド個数密度分布の簡易予測手法を 12Cr 鋼へ応用するため，長手溶接がある 12Cr 鋼製管状試験体の内圧クリープ試験及び FEM 応力解析を実施し，12Cr 鋼のクリープボイド個数密度の平均増加速度と最大主応力，及び応力多軸度係数を組み合わせたパラメータの相関関係を求めた。

12Cr 鋼熱影響部細粒域のクリープボイド個数密度の平均増加速度は，9Cr 鋼と同様に，最大主応力と応力多軸度係数を組み合わせた多軸応力場の強さを表すパラメータと良い相関が認められた。本関係を用いて，提案手法を 12Cr 鋼の内圧クリープ試験体に適用した。その結果，提案手法で予測したクリープボイド個数密度変化と実測値は良く一致した。以上の結果より，提案手法を 12Cr 鋼溶接熱影響部細粒域のクリープボイド分布の予測にも適用可能と考えられる。

第4章「火力発電ボイラ鉄骨構造の効率的な配置最適化手法」では，小規模構造で検証されている骨組み構造の部材配置と断面積の同時最適化手法を，大規模骨組み構

造であるボイラ鉄骨のブレース配置最適化問題へ応用した。

従来の骨組み構造の配置最適化手法に関する研究は、設計変数が数十程度の小規模な問題に対して有効性が示されているが、設計変数が数百にもなる大規模な骨組み構造への適用性についての研究は見当たらない。本研究では、探索的手法で部材配置を、部材に作用する荷重値から断面積を決定(全応力法)する部材配置と断面積の同時最適化手法を、総質量が数千 ton となる火力発電ボイラ鉄骨構造のブレース配置最適化問題に適用した。その結果、設計変数が約 250 の大規模問題においても、数百ステップ程度の返し計算で実用最適解を得ることができ、本手法が大規模骨組み構造の配置最適化問題に適用できることを検証した。

部材配置の最適化を行うと部材本数が増加する傾向があるが、本数が増加すると製作コストが増加するため、部材本数は少ない方がコスト的に有利である。本研究では、配置する部材本数を制限する機能を新たに追加し、部材本数を制限した最適化計算も実施した。その結果、部材本数の制限の有無に関わらず、両者の実用最適解を得ることができた。

得られた最適ブレース配置による鉄骨全体の質量低減効果は、地震層せん断力係数が大きい程、また配置するブレース数を増加する程大きくなった。地震層せん断力係数が 0.2G の場合、約 17%の質量低減効果が得られ、本手法が骨組み構造の質量低減に有効であることが確認できた。

最適化計算によって得られた実用最適解のブレース配置は、鉄骨構造の側面側及び基礎側に配置される傾向が認められた。このように配置することによって、地震水平力に対して、鉄骨構造の剛性を効率的に向上できるためと考えられる。

第 5 章「今後の研究課題」では、本研究の今後の課題について述べた。第 2 章及び第 3 章で提案した高クロム鋼溶接熱影響部のクリープボイド個数密度分布の予測手法については、1)提案手法の実機配管への適用による精度検証例の蓄積、2)材料特性のばらつきを考慮した予測手法の確立が今後の課題である。鉄骨構造の配置最適化手法については、1)建設コスト評価の精度向上を図り、建設コストと材料コストの合計を最小化できる手法の確立、2)ブレース配置に加えて、鉄骨の柱間隔等その他の構造パラメータの最適化が今後の課題である。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめた。本論文では、高クロム鋼溶接熱影響部細粒域の破壊を未然に防止するためのクリープ損傷予測手法を開発すると共に、耐震性向上のための経済的なボイラ鉄骨の最適設計手法を確立した。本結果を石炭焚き火力発電ボイラに適用することにより、石炭焚き火力発電ボイラの信頼性向上及び電力の安定供給に貢献することができる。