

京都大学	博士（工学）	氏名	劉 媛
論文題目	Development of Structural Steel Components Partially Strengthened by Induction Heating (誘導加熱によって高強度化された鋼構造部材の開発)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>鋼構造建築物においては、水平力に対する耐力と剛性を高めるためにブレースが利用される。従来のブレースは、圧縮力に対しては座屈し、また、局部座屈がブレースの破断につながることもある。これらの性状を改善するため、座屈拘束ブレース、曲線状ブレースなどが開発され、利用されている。</p> <p>鋼材に熱処理を行うことにより、強さ、硬さ、靱性、耐衝撃性などを変化させることができる。熱処理方法のひとつとして高周波誘導加熱(Induction Heating, IH)がある。IHは、鋼材に誘導電流を流すことにより、この渦電流と鋼材の電気抵抗によりジュール熱を生成させ、鋼材を急速に自己発熱させる方法である。IHは制御が容易であり、鋼材に局所的に適用でき、そのため、鋼材を部分的に高強度化することが可能である。</p> <p>本研究は、H形鋼に部分的に高周波誘導加熱処理を施し、高強度化することにより力学特性を改善した、従来のブレース(Conventional Buckling Brace, CBB)に代わる新たなブレースを開発するために行われた研究である。IHにより部分的に高強度化し、その高強度部分を弾性に留め、普通強度部分を塑性化させることにより降伏後に剛性低下するものの大きな剛性を保持できる、曲線状部分高強度化ブレース(Induction-Heated Curved Brace, IHCB)を提案した。論文は以下の7章から構成される。</p> <p>第1章では、研究背景および目的についてまとめている。</p> <p>第2章では、IHCBとCBBに対する載荷試験について記している。3種類のIHCB試験体を作製した。ブレース断面において、片側フランジのみを幅40mmに渡り高強度化したIHCB-F40、両側フランジを30mmずつ高強度化したIHCB-2F60、および、片側フランジのみ40mmとウェブ60mmを高強度化したIHCB-F40W60である。このような部分高強度化によって、各試験体は弱軸回りに中央部の初期たわみで40mm程度湾曲することが確認された。IH処理により、処理前と比べて、フランジは平均2.2倍、ウェブは平均2.6倍の降伏強度および引張強度を持つことが、試験体から採取した試験片に対する引張試験により確認された。</p> <p>これらのIHCBとCBBに対する載荷実験を実施し、耐力、変形性能、ひずみ分布、履歴エネルギー消費能力などのデータを得た。IHCBとCBBの比較から特に以下のことが明らかとなった。IHCBはCBBと比較して、初期剛性は約58%低く、降伏後剛性は13~18倍となった。圧縮側で座屈は見られず、曲げ挙動が支配的な滑らかな荷重-変形曲線となった。最大圧縮耐力に対する座屈後安定耐力の比は、0.87~0.91となった。さらに、材軸直交方向の変形は、CBBにおいて材軸方向中央付近に集中するのに対して、IHCBでは部材全長にわたり滑らかな曲線を描いた。実験結果は、IHCBが目標性能を満足し、1/100程度の層間変形まで大きな降伏後剛性を保つことが示された。また、IHCBに要求される初期剛性、降伏後剛性、圧縮時挙動、および、引張耐力などの目標性能を提示した。</p>			

第3章では、IHCBの数値解析シミュレーションを行っている。FEM解析コードであるABAQUSを用いて第2章での実験試験体をモデル化し、実験を追跡し、モデルの妥当性を示した。まず、曲線状のブレース形状が初期剛性を低下させ、圧縮挙動を安定化し、荷重-変形関係を滑らかにすることが示された。一方、局部高強度化は耐力全般を引き上げるのに寄与する。また、第2章で示された目標構造性能を満足するには、曲線率（ブレース中央部での初期変形と部材全長との比）は2.3~2.7%、IHによる強度上昇比率は、2.2~3.5の範囲でなければならないことが示された。

第4章では、IHCBの設計式を誘導し、提案している。耐力算定には、部材をsin曲線に、剛性算定には、部材を円弧の一部と仮定している。初期剛性、降伏後剛性、降伏耐力、最大引張耐力、座屈後安定耐力が、材料特性、曲線率、IH処理パターンに基づいて設計式として与えられている。第2章で報告した実験結果との比較により、IHCBの挙動を高い精度で評価できることが示された。

第5章では、IHCBを配置した1層1スパン門形骨組の数値解析シミュレーション結果が示されている。ここでもABAQUSを用いている。ブレース単体でのIHCBの効果が骨組にブレースを設置した場合にも現れることが確認できた。

第6章では、IH処理した鋼材試験片に対する低サイクルおよび高サイクル疲労試験について述べている。载荷制御には3Dスキャナーの非接触変形測定機能で測定したひずみを用いている。別のモーションキャプチャーシステムによる精度検証も行っている。IHCBのIH処理部とIH非処理部から切り出した試験片の疲労寿命は、Manson-Coffin則により定式化でき、Mansonによって提案されたmodified universal slope methodsで予測された曲線と一致することを示した。IH処理されていない試験片は、ひずみが大きな範囲において若干疲労寿命が増大し、IH処理された試験片は、ひずみが小さな範囲で疲労寿命が増大した。繰り返し応力-ひずみ曲線は、Ramberg-Osgood則でモデル化された。IH処理した鋼材は、単調载荷時の応力-ひずみ関係と比較して応力が低下する軟化（繰り返し軟化）を生じ、IH処理していない試験片は逆に繰り返し载荷により硬化した。

第7章では、上記の研究をまとめるとともに、今後の研究の方向性について述べている。

氏名	劉媛
----	----

(論文審査の結果の要旨)

鋼構造建築物において従来利用されてきたブレースは、圧縮時には座屈し、また、局部座屈がブレースの破断につながることもある。これらの性状を改善するため、座屈拘束ブレース、曲線状ブレースなどが開発され、利用されている。

鋼材の熱処理方法のひとつとして高周波誘導加熱(Induction Heating, IH)がある。IHは制御が容易であり、局所的に適用でき、そのため、鋼材を部分的に高強度化することが可能である。

本研究は、H形鋼に部分的に高周波誘導加熱処理を施し高強度化し、力学特性を改善した、従来のブレース(Conventional Buckling Brace, CBB)に代わる新たなブレース材を開発するために行われた研究である。得られた主な成果を以下に記す。

1. IHにより部分高強度化することにより、部材の降伏後も高強度部分を弾性に留めて降伏後の剛性低下を低減し、かつ、曲線形状とすることにより圧縮時の急激な耐力低下を抑えた、新しいブレース(Induction-Heated Curved Brace, IHCB)を提案した。
2. IHCBとCBBに対する載荷実験を実施し、耐力、変形性能、ひずみ分布、履歴エネルギー消費能力などのデータを得、IHCBの力学特性を明らかにした。得られた力学特性は、第2章で設定した目標構造性能を満足することを示した。
3. IHCBに対してFEMによる数値解析シミュレーションを行い、上記載荷実験を精度よく追跡できることから、モデル化の妥当性を確認した後、曲線状のブレース形状が初期剛性を低下させ、圧縮挙動を安定化させ、荷重-変形関係を滑らかにすること、局部高強度化は耐力全般を引き上げるのに寄与すること、を示した。
4. 本論で設定した目標構造性能を満足するには、曲線率(ブレース中央部での初期たわみと部材全長の比)は2.3~2.7%、IH処理による強度上昇比率は2.2~3.5でなければならないことを示した。
5. IHCBをsin曲線、あるいは、円弧の一部とモデル化し、初期剛性、降伏後剛性、降伏耐力、最大耐力、および、座屈後安定耐力を与える設計式を提案した。
6. IHCBを配置した1層1スパン門形骨組のFEM解析を行い、ブレース単体でのIHCBの効果が骨組にブレースを設置した場合にも現れることを確認した。
7. IHにより高強度化された鋼材の低サイクルおよび高サイクル疲労試験を実施し、疲労特性に関するデータを得、疲労寿命がManson-Coffin則で定式化できることを示した。

本論文は、これまでにない、誘導加熱により部分的に高強度化された曲線ブレース部材を開発しようとするもので、載荷実験と数値解析シミュレーションにより、基礎的力学特性から設計法までを提案しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。