

	ナカタ ヒロカズ
氏 名	中田 寛二
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第1026号
学位授与の日付	平成28年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	H形鋼梁部材の履歴モデルの提案と骨組の耐震性能評価への応用 (Model of Load-Deformation Relations for H-Shaped Steel Beams and its Application to Evaluation of Seismic Performance of Steel Moment-Resisting Frames)
論文審査委員	主査 教授 井戸田 秀樹 教授 市之瀬 敏勝 准教授 佐藤 篤司 教授 木村 祥裕 (東北大学)

## 論文内容の要旨

鋼構造骨組は、地震に対して十分なエネルギー吸収能力を発揮するために、梁降伏型の崩壊機構を目指して設計されるのが一般的である。したがって、梁に十分な性能を確保することで骨組に確実な耐震安全性が保証されることになる。現行の耐震設計では、許容応力度設計や保有耐力計算に代表されるように、細長比や幅厚比、横補剛間隔を満足することで梁に所定の性能を確保する仕様規定型の設計法が運用されている。しかし、このような仕様規定型の設計法では、これら仕様を満足して設計することに意識を取られ、骨組に目標とする構造性能が確保されているかどうかの把握が疎かになる。1995年の兵庫県南部地震で建築物が甚大な被害を受けたことや、近い将来には巨大地震の発生が予測されている社会的背景から、建築構造技術者には部材応力が降伏応力や全塑性耐力を超え終局限界状態を迎えたときの骨組の耐震安全性を明らかにし、部材および骨組に対して要求される性能を明示することが建築構造技術者に求められている。

現在では、性能明示型設計法である限界状態設計法の整備が進められており、これまで行われてきたような最大耐力やその時の変形などの特定の変形に特化した梁の性能評価ではなく、あらゆる限界状態における梁の性能を把握することが必要となる。このような要求に応えるためには、梁部材の荷重変形関係を梁の性能を決定付けるパラメータに対して履歴モデルとして整

理しておくことが重要と考える。一方で、鋼構造物を対象とした限界状態設計法では、骨組の耐震性能を如何に評価するかが重要である。特に、局部座屈や横座屈などの耐力劣化現象を考慮した静的耐震設計について議論するためには、それら現象による梁部材の挙動を骨組の耐震性能評価に反映させる必要がある。ところが、鋼構造物を対象とした現行の限界状態設計法では、従来の保有水平耐力計算を踏襲した手法が導入されているに過ぎず、骨組の塑性変形能力に応じて必要保有水平耐力を低減する係数として構造特性係数  $k_b$  値が運用されているものの、従来の保有水平耐力計算と同様に確定的な取り扱いに留まっているのが現状である。終局限界状態を含めた骨組の耐震性能をより合理的に評価するためには、 $k_b$  値について、その統計的特性、部材の耐力劣化や骨組の変形限界といった建築物の終局限界性能に直接関わる指標を考慮した系統的な検討を行う必要がある。

このような研究背景に対して、本論文は、終局限界状態における耐力劣化を含めた梁の性能把握を意図して「横座屈細長比、幅厚比に関わらず梁の荷重変形関係を評価できる履歴モデルを構築し」、さらに、横座屈する梁の履歴を応用して「構造特性係数の統計量を呈示し、さらに骨組の層間変形角に対応した構造特性係数を求めることで、これまで十分な議論がなされていない横座屈で耐力が決まる骨組の耐震性能を定量的に明らかにすること」を目的として行った研究を取り纏めたものである。本論文は次に示す全5章で構成されている。

## 第1章 序論

## 第2章 H形鋼梁部材の単調載荷履歴モデルと骨組内の梁の力学的特性

## 第3章 横座屈で耐力が決まるH形鋼梁部材の繰返し載荷履歴モデル

## 第4章 横座屈する梁を含む鋼構造骨組の耐震性能評価

## 第5章 研究の総括と今後の展望

以下に各章の概要を述べる。

第1章では、研究の背景と既往の研究、および研究の目的について詳述している。

第2章では、「細長比に関わらず単調載荷時の梁の履歴を評価する」ことを目的として、H形鋼梁の単調載荷時の荷重変形関係を実験的および解析的手法により検討し、横座屈細長比、幅厚比、モーメント勾配、あるいは素材の降伏比をパラメータとして履歴モデルを簡便な数式で与えている。提案した履歴モデルは、実験結果および有限要素法解析結果の荷重変形関係を比較的良い精度で表現できており、横座屈細長比が比較的小さいH形鋼梁については素材の降伏比が荷重変形関係の耐力上昇域に与える影響についても精度良く追跡できる。さらに、骨組内の梁の性能を把握するため、柱等の周辺部材による材端の面外回転拘束を模擬した梁の有限要素法解析を実施し、その力学的特性について言及し考察を行っている。

第3章、第4章では、横座屈する梁のある骨組の耐震性能が十分に議論されていない現状に

着目し、梁の横座屈に現象を限定した検討を行っている。

第3章では、横座屈で耐力が決まるH形鋼梁の繰返し載荷時の弾塑性挙動を明らかにするとともに、履歴モデルの構築を試みている。横座屈変形の進展に伴って劣化する除荷剛性と面内の累積塑性変形の関係を独自に考察し、横座屈細長比とモーメント勾配の関数として定式化している。繰返し載荷時の荷重変形関係の履歴構成則には、「累積塑性変形に応じて単調載荷時の荷重変形関係を順次消費する」構成則を適用し、その基となる単調載荷時の荷重変形関係には第2章で構築した履歴モデルを適用している。提案した履歴モデルは、実験結果や有限要素法解析結果の荷重変形関係と比較的精度の良い対応を示しており、さらに、適用範囲を横座屈細長比、幅厚比およびモーメント勾配の関係式として明示している。

第4章では、横座屈で耐力が決まる梁を有する鋼構造ラーメン骨組を対象として、限界状態設計法における $k_D$ 値に部材の耐力劣化や骨組の変形限界等の骨組の終局限界性能に関わる指標が反映されていない現状に対し、横座屈する梁の履歴を適用した弾塑性一質点モデルに対して複数の観測地震波を用いた時刻歴地震応答解析を行うことで $k_D$ 値の統計量を取得し、平均値と変動係数を「骨組の耐力に対して梁が負担する耐力の割合」、「骨組の限界塑性率」、「固有周期」の関数として呈示している。さらに、具体的な1層のラーメン骨組について限界層間変形角に対応した構造特性係数を算出し、「規定値としての構造特性係数」と「骨組の最大塑性率」の関係を明らかにすることで、横座屈で耐力が決まる梁を有する骨組の耐震性能について論及している。また、提案した $k_D$ 値の評価式の妥当性を示している。

第5章では、本研究を総括し、得られた知見から本研究の展望と今後検討すべき課題について言及している。今後の課題としては、横座屈細長比が小さい範囲のH形鋼梁についても繰返し履歴モデルを検討すること、柱等の周辺部材が梁の性能に与える影響を設計法の中に合理的に反映させること、 $k_D$ 値に関しては多層骨組への検討の展開などがあることを述べている。

## 論文審査結果の要旨

鋼構造骨組は、地震に対して十分なエネルギー吸収能力を発揮するために、梁降伏型の崩壊機構を目指して設計されるのが一般的である。したがって、梁に十分な性能を確保することで骨組に確実な耐震安全性が保証されることになる。現行の耐震設計では、許容応力度設計や保有耐力計算に代表されるように、細長比や幅厚比、横補剛間隔を満足することで梁に所定の性能を確保する仕様規定型の設計手法が取られているが、このような設計法では、これら仕様を満足して設計することに意識を取られ、部材応力が降伏耐力や最大耐力を迎え、耐力劣化や倒壊といった終局限界状態における骨組の耐震性能を把握することはできない。1995年の兵庫県南部地震で建築物が受けた甚大な被害、あるいは近い将来に発生が予測されている巨大地震、また2000年の建築基準法の改正で建築物の性能明示の必要性が明確に謳われている社会的背景を踏まえると、梁部材および骨組の最大耐力以降の耐力劣化挙動を合理的に考慮して設計することのできる設計手法の確立が不可欠である。

本論文は、梁部材の最大耐力以降の耐力劣化挙動を定量的に評価して荷重変形関係を精緻にモデル化し、耐力劣化域を含めた終局限界状態における骨組の耐震性能評価へと発展させることを目的として行った研究を取り纏めたものであり、上記問題点に対して貢献したものと位置付けられる。本論文は全5章で構成されており、以下に各章の要旨を述べる。

第1章では、研究の背景と既往の研究、および研究の目的について詳述している。

第2章では、「細長比に関わらず単調載荷時の梁の履歴を評価する」ことを目的として、H形鋼梁の単調載荷時の荷重変形関係を実験的および解析的手法により検討し、横座屈細長比、幅厚比、モーメント勾配、および素材の降伏比をパラメータとして履歴モデルを簡便な数式でモデル化している。提案した履歴モデルは、実験結果および有限要素法解析結果の荷重変形関係を比較的良い精度で表現できるものであり、横座屈細長比が比較的小さいH形鋼梁については素材の降伏比が荷重変形関係の耐力上昇域に与える影響についても精度良く追跡できる。さらに、骨組内の梁の性能を把握するため、柱等の周辺部材による材端の面外回転拘束を模擬した梁の有限要素法解析を実施し、その力学的特性について言及し考察を行っている。

第3章、第4章では、横座屈で耐力が決まる梁を含む骨組の耐震性能が十分に議論されていない現状に着目し、梁の横座屈に現象を限定した検討を行っている。

第3章では、横座屈で耐力が決まるH形鋼梁の繰返し載荷時の弾塑性挙動を明らかにするとともに、履歴モデルの構築を試みている。横座屈変形の進展に伴って劣化する除荷剛性と面内の累積塑性変形の関係を独自に考察し、それらを横座屈細長比とモーメント勾配の関数として定式化している。繰返し載荷履歴モデルの構成則については、基となる単調載荷時の荷重変形関係には第2章の提案モデルを用い、さらに提案した除荷剛性式に基づいて新たに構築している。提案した履歴モデルは、実験ならびに有限要素法解析によって得られた荷重変形関係と比較的精度の良い対応を示しており、さらに、適用範囲を横座屈細長比、幅厚比およびモーメント勾配の関係式として明示している。

第4章では、横座屈で耐力が決まる梁を有する鋼構造ラーメン骨組を対象として、限界状態設計法における構造特性係数  $k_D$  値が「確定量として扱われ」なおかつ「部材の耐力劣化や骨組の変形限界等の骨組の終局限界性能に関わる指標が反映されていない」現状に対し、骨組の変形限界に対応した構造特性係数  $k_D$  値の統計量の提案を行っている。まず、横座屈で耐力が決まる梁の履歴を適用した弾塑性一質点モデルに対して複数の観測地震波を用いた時刻歴地震応答解析を行うことで  $k_D$  値の統計量を取得し、平均値と変動係数を「骨組の耐力に対して梁が負担する耐力の割合」、「骨組の限界塑性率」、「固有周期」の関数として呈示している。次に、具体的な1層のラーメン骨組について限界層間変形角に対応した構造特性係数を算出し、「規定値としての構造特性係数」と「骨組の最大塑性率」の関係を明らかにすることで、横座屈で耐力が決まる梁を有する骨組の耐震性能について論及している。また、提案した  $k_D$  値の評価式の妥当性を示している。

第5章では、本研究を総括し、得られた知見から本研究の展望と今後検討すべき課題について言及している。今後の課題としては、横座屈細長比が小さい範囲のH形鋼梁についても繰返し履歴モデルを検討すること、柱等の周辺部材が梁の性能に与える影響を設計法の中に合理的に反映させること、 $k_D$  値に関しては多層骨組への検討の展開などがあることを述べている。

以上、本研究は、H形鋼梁部材を対象として、単調載荷時、繰返し載荷時の荷重変形関係を最大耐力以降の耐力劣化域を含めて大変形領域まで精緻に追跡可能な履歴モデルとして提案し、さらに、梁部材の履歴モデルを応用した骨組の耐震性能評価について、構造特性係数  $k_D$  値の統計量に関して有益な検討を行っており、建築構造工学の学術的な発展に大いに寄与するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分価値があると認められる。