



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Dynamic Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Considering Panel Zone Yielding, Local Stiffening due to Bracing Connections, Beam Local Buckling and Fracture [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	LI, Jionghui
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16126号
Issue Date	2024-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93635
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Li_Jionghui_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 LI Jionghui

審査担当者 主 査 教 授 岡崎 太一郎

副 査 教 授 菊地 優

副 査 准教授 高井 伸雄

学位論文題名

Dynamic Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Considering Panel Zone Yielding, Local Stiffening due to Bracing Connections, Beam Local Buckling and Fracture

(パネルゾーンの降伏、ブレース接合部の局部補剛効果、梁の局部座屈と破断を考慮した鋼構造ラーメンの動的応答解析)

建築鋼構造物の構造解析において、柱や梁などの部材の非線形応答を表現する方法として、精密性と計算効率を兼ね備えるファイバ要素の活用範囲が広がってきている。しかし、解析手法の優秀さに関わらず、あるいは解析手法が優秀であればあるほど、その解析結果の有用性は、ファイバ要素の分割方法や積分則・積分点の設定、材料モデルの選択と設定、接合部の表現法をはじめとした、モデル作成の良し悪しに大きく左右される。モデル化が難しく、いまだ未確立な部位の例として、柱パネルが挙げられる。日本の鋼構造の場合、柱に角形鋼管を用いるので、柱と同様に、柱パネルも軸力と二次曲げの影響を無視できない。鉄筋コンクリート床スラブ、ブレース接合部、梁の段違いなどの影響も無視できない。また、極大地震によって鋼構造が倒壊に至るまでの大変形挙動を追跡する目的では、柱や梁に生じる局部座屈による剛性と耐力の劣化、極低サイクル载荷による梁端の亀裂と破断を表現することが必須である。

以上の観点から、本研究は、特に、柱パネルの挙動と、梁の局部座屈や亀裂を表現するモデル化手法を課題に据えている。構造実験や振動台実験で得た実データを分析し、それをなるべく忠実に再現できるモデル化手法を検証している。数値解析に汎用解析ソフト OpenSees を用い、特に、柱と梁に、柔性法で定式化されたファイバ要素が使用されている。中心課題は、ファイバ要素の設定と、ファイバ要素に付与する材料モデルの選択であった。

本論文は、全 8 章で構成されている。

第 1 章は、研究の背景と目的、論文の全体構成を述べている。

第 2 章は、柱パネルの履歴挙動と、梁の局部座屈や亀裂を表現するモデル化手法に関連して、既往文献に述べられる知見を整理し、現状の問題点を抽出している。

第 3 章は、柱パネルの挙動を把握する実験計画を述べている。E-ディフェンスの振動台実験に参画したもので、一部で座屈拘束ブレースを用いた 10 層鋼構造建物に、1995 年兵庫県南部地震で収録された神戸海洋気象台記録 (JMA 神戸) を 25% から 100% に増幅した三次元振動が入力された。下層部の内柱が、その上下端とパネルで降伏することが予測されたので、一本の内柱を、1 層と 3 層で、周囲の部材を含めて集中的に計測した。それぞれの部材や要素の連成、全体系の応答との関係を把握する目的で、柱と柱パネル、梁、座屈拘束ブレースに生じる力と変形を測定した。

第 4 章は、振動台実験の結果を述べている。100% 加振で、実験建物は 1 層から 8 層まで広く降

伏し、2層で最大0.02 ラジアン²の層変形角を生じ、内柱と内柱パネルの弾塑性履歴挙動を記録できた。柱梁接合部まわりの釣合条件から、合成スラブの寄与とブレース接合部の補剛効果を除いて、柱パネルに生じるせん断力を評価することに成功した。柱パネルの耐力は、直交2方向のせん断力と軸力の連成を考慮した塑性理論によって説明できることが確認された。

第5章は、振動台実験を再現した数値解析を述べている。OpenSeesを用いて、10層鋼構造建物の直交2方向の挙動を、2つの2次元モデルで表現した。柱梁接合部に方杖型に配置した弾性トラスを配置して、合成スラブとブレース接合部が柱パネルに及ぼす影響をモデル化した。柱の曲げモーメント分布と柱パネルの耐力が、実験結果と整合するように、トラスの剛性を逆算した。方杖トラスと柱パネルを付加した場合と、柱パネルとその周囲を剛とした場合について、時刻歴応答解析を実施すると、全体系の応答に大きな違いはなく、いずれも実験結果とよく整合したが、後者は当然ながら柱パネルの降伏を検出できなかった。方杖トラスの特性を一般化する課題が残されているが、ここで提案するモデル化手法が、解析精度の向上に寄与することが示されている。

第6章は、梁の局部座屈と梁端の破断を表現するモデル化手法を述べている。梁を、長さの半分を占める弾性梁要素と、端部を含むファイバ要素2つに分割した。OpenSeesに装備される材料モデルを用いて、繰返し载荷を経た局部座屈を表現した。引張側のバイリニア則を、引張試験で特定した応力ひずみ関係に一致させ、圧縮側の剛性・耐力劣化則を、梁の繰返し载荷実験と整合するように較正した。さらに、Manson-Coffin 則にしたがう疲労則を、同じ実験と整合するように較正した。亀裂発生と耐力劣化の過程が整合するように、ファイバ要素の分割則を調整した。こうして較正した梁モデルは、完全な破断に至るまでの梁の挙動を、忠実に再現することができた。

第7章は、第6章で確立したモデルを用いた時刻歴応答解析の有効性を述べている。特に、第6章の較正に用いた実験と同じ梁で構成された、縮尺2/5の4層2スパン鋼構造の振動台実験を、どこまで正確に再現できるかを検証した。柱と梁をファイバ要素で、柱パネルを弾塑性バネで表現し、梁要素には、6章で較正した材料則を付与した。実験と同じく、1995年兵庫県南部地震で記録された、神戸海洋気象台記録のNS成分を、10%から100%まで増幅した地震動を、連続で入力した。解析モデルは、設計基準を2倍以上超える100%入力を受けて、層変形角0.15 ラジアンを生じた応答も忠実に再現し、一箇所目の梁破断の位置まで実験と整合した。しかし、梁破断のタイミングが異なり、梁破断を生じたのちは実験結果と徐々に乖離した。亀裂や破断とは、不確実性に支配される現象であり、本研究が示すモデル化が、数値解析の一つの限界を示すと考えられる。

第8章は、研究の結論、その結論の適用範囲、今後の検討課題を整理している。

これを要するに、本論文は、建築鋼構造物の数値解析技術について、曖昧に残されていたモデル化方法に対して一つの解決策を提示し、倒壊に至るまでの挙動を追跡するためのモデル化方法を提示する。一つ一つの方法は、実験データによって確度を裏付けられた技術であり、数値解析の正確性と信頼性を確保するための新しい技術である。これらの知見は、建築鋼構造の耐震安全性と信頼性、経済性に寄与し、構造工学と耐震工学に対して貢献するところ大なるものがある。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る。