

氏名	リュウ 劉	タイ 大	イ 偉
学位(専攻分野)	博士(工学)		
学位記番号	工博第2218号		
学位授与の日付	平成15年3月24日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科・専攻	工学研究科建築学専攻		
学位論文題目	大変形繰返し荷重下における鋼構造部材の塑性変形能力と完全破壊性		

論文調査委員 (主査) 教授 中島正愛 教授 井上一朗 教授 上谷宏二

### 論文内容の要旨

建築構造物に甚大な被害をもたらした1995年の兵庫県南部地震の教訓として、災害因子の頻度や大きさに応じて建築物が持つべき性能レベルを明示する性能設計が提唱されている。この性能設計を実現するためには、人命に関わる安全限界を定量化することが必要で、またその基礎情報として、骨組やそれを構成する部材が耐力を完全に失う状態に至るまでの挙動を明らかにしなければならない。また、近年の地震で記録された強震動が、現行の耐震設計で想定する地震動を遙かに超すことを考えれば、骨組部材に十分な塑性変形能力を確保するための要件を再吟味する必要もある。地震工学におけるこれら今日的課題を念頭に、本論文では、以下の2点において定量的な情報を提示することを目的としている。

- ① 鋼梁・鋼柱が完全破壊するまでの挙動を実験室で再現し、実験結果詳細を提示するとともに、弾塑性有限要素法解析結果と実験結果の照合によって、完全破壊予測に対して数値解析がもつ解析精度と限界を検討する。
- ② 構造部材により高い塑性変形能力を付与するために、部材の耐力劣化要因である横座屈や局部座屈を抑止するための条件を再評価するとともに、耐震設計実践にも供しうる設計情報を提供する。本論文は1章から8章で構成されている。第1章では、本論文の目的、背景、関連研究、論文の構成を示している。

第2章では、構造部材の完全破壊再現実験システムの詳細を述べている。構造部材が完全破壊に至るほどの大きな変形に追従するために、超ロングストローク載荷ジャッキ、高精度デジタル変位計測器、制御計測監視用PC群など含む実験システムを構築している。この実験システムでは、システム各要素間をオンラインケーブルで結び、変位や荷重など計測情報の相互伝達を図りつつ、任意の荷重履歴に対して、自動加力、自動制御、自動計測を保証している。

第3章では、2章で述べた実験システムを用い、地震力を模擬した逆対称繰返し曲げを受けるH形鋼標準梁とRBS梁が完全破壊に至るまでの実験情報を提示している。既往の研究や現行の耐震設計が想定してきた大変形もしくはそれをやや超える変形までの挙動と、それを遙かに超して完全に破壊するまでの超大変形時の挙動には顕著な違いがあることを同定したうえで、次の所見を得ている。耐力劣化防止対策とされる横補剛とRBS工法を採用した梁では、歪集中が誘発され、完全破断までの変形能力は必ずしも大きくない。また、超大変形域では、骨組に組み込まれた梁に引張軸力が生じることによって“ピンチング効果”が現れ、骨組としての耐力が上昇する。さらに、弾塑性有限要素法解析を用いて実験から得られた挙動を追跡し、それを実験結果と比べることから、数値解析は、材料・幾何学的強非線形性を適切に考慮できるが、亀裂や破断などのトポロジー変化に対しては限界をもつことを明らかにしている。

第4、5章では、鋼梁の塑性変形能力確保を念頭において、現行の耐震設計規準類が定める規定を再評価するとともに、より大きな塑性変形能力を確保するための要件を、横座屈と局部座屈で代表される鋼梁の不安定という視点から考察している。4章では、弾塑性有限要素法解析を用いて、梁回転角にして0.045rad程度までの繰返し載荷を受けるH形鋼梁が十分な塑性変形能力を保持するために必要な横補剛条件を、耐震設計に直接供しうる簡便な補剛間隔式として提示している。5章では、弾塑性有限要素法解析を用いて、局部座屈が耐力劣化に及ぼす影響を検討し、横座屈と局部座屈の連成特性を明ら

かにするとともに、鋼梁に付与すべき幅厚比制限値を提案している。

第6章では、2章で述べた実験システムを用い、一定鉛直荷重と繰返し水平変位を受ける角形鋼管柱を対象として、柱が自重保持能力を完全に喪失する（完全破壊）までの挙動に関する実験情報を獲得している。適度な軸圧縮力の存在は亀裂を抑制し、完全破壊に至るまでの変形能力を増大させること、最大耐力到達後の耐力劣化の主要因は、大変形域では局部座屈、超大変形域では  $P-\Delta$  効果であることを明らかにしている。また弾塑性有限要素法解析を用いて実験から得られた挙動を追跡し、それを実験結果と比べることから、局部座屈が極端に進展し、互いの管壁が接触するほどのトポロジー変化に対して数値解析が限界を呈することを示している。

第7章では、角形鋼管柱の塑性変形能力確保を念頭において、現行の耐震設計規準類が定める規定を再評価するとともに、より大きな塑性変形能力を確保するための要件を、主として局部座屈による鋼柱の不安定という視点から、一連の数値解析結果を参照しつつ検討している。また、幅厚比、軸力比、細長比を主たる変数として、それぞれの組み合わせによって期待できる塑性変形能力の予測式を提案している。

第8章は結論であり、本論文から得られた成果を、各章毎に得られた知見としてまとめている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、機能保持、損傷制御、人命保護に代表される多様な性能要求に的確に対処しうる建築耐震設計の確立を主題に、(1)人命保護を支配する安全限界の定量化をめざし、建築鋼構造骨組の主要構成要素である鋼梁と鋼柱が破断などによって抵抗力を完全に消失する機構を分析し、(2)鋼梁や鋼柱の不安定挙動を誘発する因子とその影響度を定量化したうえで、より高い塑性変形能力をこれら部材に付与するための条件を明示したものであり、得られた主な研究成果は以下のとおりである。

- 1) 鋼梁や鋼柱が完全に破壊するまでの挙動を実験室で再現するために、微小変形から超大変形領域にわたる載荷を精度よく実現しうる、コンピュータ制御による載荷・制御・計測一貫システムを新たに開発した。次いでこのシステムを用い、漸増繰返し載荷を受ける状態下で、鋼梁が完全に破断するまでの挙動と、鋼柱が鉛直載荷能力を完全に失い圧壊するまでの挙動を、縮小鋼梁・鋼柱模型試験体を用いて再現した。
- 2) 1)の実験から得られた詳細データの分析と、材料・幾何学的非線形性を考慮した有限要素法数値解析を通じて、超大変形下における鋼梁と鋼柱の挙動を支配する要因を分析するとともに、数値解析が完全破壊に対して有する精度と適用範囲を考察した。
- 3) 鋼梁の塑性変形能力を支配する横ねじれ不安定と局部座屈に着目し、地震荷重特有の繰返し変形下における、横ねじれ座屈と座屈後の構面外不安定挙動、局部座屈による耐力劣化挙動、横ねじれ座屈と局部座屈の連成による構面外不安定挙動の促進を、1)の実験結果と一連の数値解析から明らかにした。また、所定の塑性変形能力を確保するために必要となる鋼梁の横補剛間隔と幅厚比制限について、耐震設計に供しうる設計式を提示した。
- 4) 鋼構造骨組に多用される角形鋼管柱の塑性変形能力を支配する、鉛直荷重の存在に伴う付加曲げと局部座屈に着目し、地震荷重特有の繰返し変形下における鋼柱の耐力劣化挙動を、1)の実験結果と一連の数値解析から明らかにした。さらに、鉛直荷重、細長比、鋼管幅厚比の関数として、鋼柱に期待できる塑性変形能力を予測する式を導いた。

以上、本論文は、詳細な実験と解析を通じて、建築鋼構造骨組が完全崩壊に至るまでに有する耐震能力を分析するとともに、これら骨組に十分な耐震安全性を保有させるために、その主要構成部材である鋼梁と鋼柱に付与すべき耐震設計要件を明示したものであり、学術上、実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、平成15年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。