

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04083

研究課題名(和文) 終局限界に対する余裕度評価と外乱の不確定性を考慮したロバスト設計法の構築

研究課題名(英文) Robust design method considering margin evaluation to ultimate limit state and uncertainty in the excitation

研究代表者

上谷 宏二 (Uetani, Koji)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：40026349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：現行の設計体系において、第1の課題は、倒壊・崩壊と言った終局限界に対する安全余裕度の評価であり、第2の課題は、地震など自然外乱の持つ不確定性である。課題解決のために、弾塑性不安定現象、複合非線形解析、構造物の劣化挙動、不確定性を含むシステムの最適設計に関する複数分野間で密接な連携をとり研究を進めた。本研究課題を通じて、変形集中現象の発生、および抑止法について多くの理論的、実験的成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In the current design system, there are two important problems to be solved. The one is evaluation of a margin of safety to the ultimate limit state as collapsing or overturning. The other is considering uncertainty in the natural disturbance as earthquakes. To solve the problems, we studied with close cooperation about (i) elasto-plastic instability, (ii) combined geometric and material nonlinear analysis, (iii) degradation behavior of structures, and (iv) robust design optimization under uncertainty. We obtained theoretical and experimental results about deformation concentration phenomena and its suppression methods.

研究分野：建築構造学

キーワード：耐震設計 終局限界 下層部変形集中 ロバスト性 補修・補強 立体骨組構造 心棒架構 変位制御

1. 研究開始当初の背景

近年、現行の法令で定められたレベルを超える地震動の発生、危険性が指摘され、慣用されてきた設計用地震動と観測地震動・予測地震動との乖離が懸念されている。建築構造設計の最も重要な役割は、人命・人身の安全を確保することである。安全確保の重要度は、機能保全や修復可能性などと言った他の役割と比べて格段に高い。この観点から見ると、現行の設計体系には次の2大課題が存在していることが分かる。第1の課題は、倒壊・崩壊と言った終局限界に対する安全余裕度の評価であり、第2の課題は、地震など自然外乱の持つ不確定性である。世界最悪の地震国である我国にとって、この2大課題の解決は必要不可欠な要件である。

都市・建築の耐震安全性を考えるにあたり最も危惧すべき現象に、超高層建築物の下層部変形集中現象がある。これは、梁降伏型の崩壊機構を想定して設計された骨組でも、下層部に変形が集中する現象である。下層部変形集中現象は、一種の弾塑性座屈であり、幾何非線形性を考慮した解析でなければ捕捉不能な現象である。この現象に対しては、幾何非線形性を適切に考慮し、十分な倍率の安全率を確保する設計が求められる。以上のように、複合非線形性を適切に考慮した過大入力時の崩壊解析および設計荷重に対する余裕度把握の重要性が認識されている。

2. 研究の目的

現行設計体系の2大課題である 1)倒壊・崩壊と言った終局限界に対する安全余裕度評価、2)地震など自然外乱の持つ不確定性に対し、解決に必要な学術的基盤を構築することを本研究課題の目的とする。この達成のためには、弾塑性不安定現象、複合非線形解析、構造物の劣化挙動、不確定性を含むシステムの最適設計、などに関する複数分野間の密接な連携が必須である。具体的な個別課題を以下のように設定する。

(1) 高層骨組構造の下層部変形現象抑止：変形集中現象を的確に評価できる縮約モデルの開発と解析コードへの実装を行い、安全率評価クライテリアを整備する。さらに、既存骨組の負担力増加の制約の下で安全度を効率的に高めるための補修設計法の指針を得る。

(2) 立体骨組構造の崩壊解析・耐荷性能安全率評価：大規模地震・豪雪・強風時の過大入力に対し、供用年数と崩壊防止の観点から終局性能評価法を提示する。

(3) 耐力劣化部材の補強・補修効果：当初想定した以上の過大入力に鋼構造建物に生じた場合に、局部座屈・亀裂などの劣化要因が構造物の応答に及ぼす影響について、部分骨組実験に基づく耐力劣化部材の定量的評価を行い、補強・補修計画のための基礎データを整備する。

(4) 不確定性解析に基づくロバスト最適設

計：多峰性・非平滑性の強い複合非線形性を考慮した応答制約問題に適しており、かつ不確定な状況下での安全率を定量的に扱える手法を提案し、耐震ロバスト性の高い構造物が有する特徴を分析する。

3. 研究の方法

超高層建築物を倒壊に導く下層部変形集中現象とねじれ倒壊現象は共に建物規模で生じる塑性座屈現象であり、これらの現象の発生を抑止する決め手は剛性を高めること、すなわち補剛にある。現象を理論的に解明し、有効な対策法を提案するため、つぎのように研究を行う。

単純モデルの解析による現象の理論的解明を試みる。1次元連続体モデルの座屈微分方程式から、下層部変形集中高さの閉経解を導き、抑止効果の定量的把握を行う。

心棒トラスを付設した超高層鋼構造骨組の時刻歴応答解析を部材レベルで行う。解析では、P 効果や、梁端の局部座屈を考慮した。断層近傍の大振幅地震動を矩形波で模擬し、地震動の大きさや周期をパラメタとして解析を実施する。

魚骨モデルにおいて、超高層骨組の全体曲げの影響を的確に評価できる手法について理論的な検討を行う。理論的検討結果を踏まえて新しい縮約モデルを提案し、フルモデルとの比較により挙動の予測精度を検討する。

変位制御型ブレースを有する20層鋼構造骨組を設定し、ブレースの剛性と耐力、ブレース作用開始点、地震動の種類、地震動の規模などを解析パラメタとして地震応答解析を行い、大規模地震動をうける多層骨組に対する変位制御型ブレースの効果を詳細に分析する。特に、ブレース作用開始点を変化させることにより、最大層間変形角、柱の軸力、塑性ヒンジ分布、各層の応答加速度などがどのように変動するかに着目する。

立体骨組構造の静的弾塑性挙動と動的弾塑性挙動を比較考察して、静的弾塑性挙動の情報から動的な保有性能すなわち耐震性能を予測する方法を検討する。立体骨組として2層立体ラチスシリンダー、平行弦ラチス梁、単層ラチスドームを対象とする。

震災鉄骨骨組の終局耐震限界状態と、損傷した骨組や部材の補修法、ならびに補修後の耐震性能を検討する。はじめに、過去の地震被害を整理し、耐力劣化した損傷部材に対して補修工法を提案する(図1)。さらに、補修工法の有効性・適用性について、鉄骨部材ならびに部分骨組試験体の載荷実験を行い、実験的な検討を行う(図2)。また、実験で検出が困難な耐力発現機構について、有限要素法解析により検討する。実験結果と合わせて、補修した鉄骨骨組の解析手法の提案を試みる。

構造システムにおける不確定要因として、制振構造において制振装置、および取付部材の損傷が構造物へ与える影響を定量的に調

べる。

順序統計量に基づく不確定性解析法を開発し、構造最適化法へ適用することにより、耐震ロバスト性の高い設計解を安定して提示できる手法を開発する。開発した手法に基づき、耐震ロバスト性の高い構造物が有する特徴を分析する。

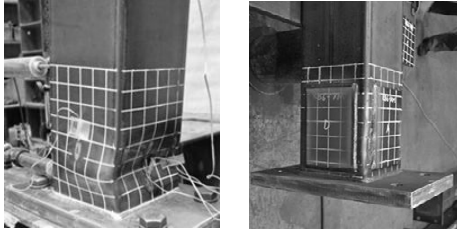


図1 損傷した鉄骨部材と補修の様子



図2 部分骨組試験体の実験

4. 研究成果

柱の回転に対する抵抗モーメントを均等に分布させた1次元連続体モデルを定義し、間柱による抑止効果を座屈微分方程式で示した。単純モデルの解析により、補剛モデルの下層部変形集中高さの閉経解を導き、間柱補剛によって変形集中現象が効果的に抑止でき、抑止効果が十分な変形域まで保持できることを示した。また、余裕度が不十分な既存建物の層間剛性を高める方法として、摩擦接合法の利点を活用した間柱補剛を提案した。

多数の骨組モデルの時刻歴応答解析を行い、心棒トラスを付設することにより、変形の局所化の回避や応答低減を効率的に行えることを例証し、心棒トラスによる倒壊制御の有効性を調べた。

倒壊挙動を予測可能な縮約モデルの開発のために、多数の地震動に対して、P効果や梁端の局部座屈を考慮したフルモデルの倒壊解析と、提案縮約モデルを用いた倒壊解析結果を実施し、これらの結果を比較することで提案モデルの予測精度を検証した。

大規模地震動を受ける20層鋼構造骨組に生じる変形増大を、テンションロッドを用いた変位制御型ブレースにより効果的に抑止できることを確認した。限られたケースであるが、変位制御型ブレースの剛性、耐力、作用開始点の適切な設定方法について有益な知見を得た。

二層形式の立体ラチス屋根と平面ラチスアーチについて、静解析による初期降伏時のひずみエネルギー速度換算値と、地震応答初

期降伏時の入力地震動の速度応答スペクトルより見積る速度値がほぼ等しいことに着目し、限界変形に達する地震動レベルを構造物のひずみエネルギーより算出する方法を検討した。次に平面ラチス梁を対象として、静的な荷重変形関係と地震入力加速度を漸増させた場合の動的応答結果を調べて、限界指標に至る地震動の最大入力加速度の推定が、提案した静的特性係数 j と動的特性係数 q の関係を用いて可能であることを示した。そして例題として単層ラチスドームを対象として、鉛直荷重下で地震動の強度特性と q/j の関係より限界指標に至る地震動加速度の推定方法を検証し提案した。

損傷した鉄骨部材に対して補修工法を提案した。実験結果より、最大耐力とエネルギー吸収能力が上昇し、また十分な塑性変形能力を有することを確認した。部分骨組模型の実験について、元の骨組の卓越崩壊モード（梁崩壊、パネル崩壊）に対し、損傷部位を補修すると崩壊モードが変わるケースを示し、その条件を整理した。また、立体骨組における直交梁の影響を検討した。実験結果と有限要素法解析より、補修した鉄骨骨組の解析法を提案した（図3）。解析結果より、目標崩壊機構の形成を保証するための評価法としての有効性を示した。

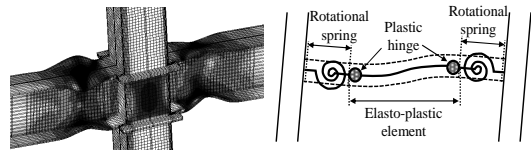


図3 有限要素法解析と骨組力学モデル

オイルダンパー付き多層建物において、オイルダンパーおよび取付部材の損傷が生じる場合の最大層間変位やその分布への影響を、記録地震波入力に対する数値解析的検討により明らかにした。

不確定性解析に基づくロバスト最適設計法を提案し、地震動の位相スペクトル、地盤特性に不確定性がある場合の設計問題に適用し、応答の変動量が小さくなる、すなわちロバスト性の高い設計解を求められることを示した。また、変位制御型PC鋼棒ブレースと制振機構を一体化したデュアルダンパーを用いた構造物の設計問題に構造最適化手法を適用し、過大入力に対する応答低減への有効性を示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

大野正人、橋本直樹、荒木慶二、速度依存型ダンパー付超高層鋼構造骨組の魚骨形縮約モデル、構造工学論文集、査読有、

Vol.64B、2018、採択決定
牛米歩、伊藤拓海、森健士郎、荒木慶一、塑性崩壊した鉄骨骨組の補修後耐震挙動に関する部分骨組実験と補修法の解析的検討、鋼構造論文集、査読有、第25巻、第97号、pp.23-37、2018
Hiroshi Tagawa and Katsuto Inooka, Prevention of story drift amplification in a 20 story steel frame structure by tension rod displacement - restraint bracing, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 査読有, 27(2), e1411, 2018, pp.1-16, <https://doi.org/10.1002/tal.1411>
谷口与史也、松井知也、吉中進、鉛直荷重下单層ラチスドームの静的および動的応答における弾塑性挙動の比較、日本建築学会構造系論文集、査読有、第83巻、第747号、2018、pp.709-716
Araki, Y., Ohno, M., Mukai, I., Hashimoto, N., Consistent DOF reduction of tall steel frames, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, Vol.46, 2017, pp.1581-1597
荒木慶一、大野正人、古田理恵、岡遼悟、心棒トラスによる鋼構造高層骨組の崩壊機構制御と断層近傍地震動に対する応答低減、鋼構造論文集、査読有、第23巻、第91号、2016、pp.43-52
森健士郎、伊藤拓海、宗村大翔、布施拓、崔彰訓、局部座屈が生じた角形鋼管部材の補修方法と補修後性能に関する実験的研究、日本建築学会技術報告集、査読有、第22巻、第52号、pp.971-976、2016.10
谷口与史也、徳田研多、平面ラチス構造の静的および動的応答における弾塑性挙動の比較考察、日本建築学会構造系論文集、査読有、第81巻、第723号、2016、pp.859-869
朝川剛、高嶋伸明、山川誠、田川浩、変位制御型 PC 鋼棒ブレースを用いた鋼構造建物の応答制御設計、鋼構造年次論文報告集、査読有、日本鋼構造協会、第24巻、2016、pp.874-881
山川誠、大崎純、順序統計量を用いて地震動特性のパラメータ変動を考慮したロバスト最適設計、構造工学論文集、査読有、日本建築学会、Vol.62B、pp.381-386、2016

[学会発表](計19件)

上谷宏二、建物規模で生じる塑性座屈現象とその抑止法 その1 総論、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018
上村心人、上谷宏二、建物規模で生じる塑性座屈現象とその抑止法 その2 単純モデルを用いたねじれ倒壊現象の特性解明、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018
杉原直人、上谷宏二、建物規模で生じる塑性座屈現象とその抑止法 その3 単純モデルを用いた下層部 変形集中現象の特性解明、日本建築学会大会学術講演梗概集、

2018
森井輝、上谷宏二、建物規模で生じる塑性座屈現象とその抑止法 その4 間柱付加による補剛設計、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018
大西隼人、上谷宏二、建物規模で生じる塑性座屈現象とその抑止法 その5 回転摩擦溶接法を活用した間柱補剛法、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018
Kana Watanabe, Makoto Yamakawa, Kazuhiko Yamada, Makoto Ohsaki, Robust design optimization of moment-resisting steel frame considering uncertain properties of surface ground based on order statistics, The Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Dalian, China, A030071, 2018
Ayumu Ushigome, Takumi Ito, Kenjiro Mori, Tomoe Onoda, Study on Ultimate Seismic Behavior and Repair Method of Damaged Steel Frames, 4th World Congress on Construction & Steel Structure, 2017
牛米歩、小野田智恵、森健士郎、伊藤拓海、荒木慶一、損傷した鉄骨骨組の補修方法と補修後の崩壊モードに関する研究、その1 十字形部分鉄骨骨組の実験概要、日本建築学会大会学術講演会、2017
小野田智恵、牛米歩、森健士郎、伊藤拓海、荒木慶一、損傷した鉄骨骨組の補修方法と補修後の崩壊モードに関する研究、その2 十字形部分鉄骨骨組の実験結果と考察、日本建築学会大会学術講演会、2017
Takeshi Asakawa, Makoto Yamakawa, Koji Uetani, Optimum design of displacement-restraint pc steel bar brace for moment-resisting steel frames, Proc. of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Albufeira, Portugal, pp.897-904, 2017
渡邊佳菜、山川誠、山田和彦、順序統計量による鋼構造骨組の表層地盤増幅を考慮した最悪地震時応答予測、第64回理論応用力学講演会、0S5-01-02、2017
高嶋伸明、山川誠、朝川剛、鋼構造骨組における変位制御型 PC 鋼棒ブレースの最適初期変位決定、第64回理論応用力学講演会、0S5-02-02、2017
Takumi Ito, Kenjiro Mori, Repair method of damaged steel framed structures and ultimate seismic state of repaired steel frames, 2nd World Congress and Exhibition on Construction & Steel Structure, 2016
柏木里美、伊藤拓海、森健士郎、宗村大翔、布施拓、崔彰訓、局部座屈が生じた角形鋼管部材の補修法と補修後性能に関する、研究その1 補修工法と補修後骨組の概要ならびに実験結果、日本建築学会関東支部研究発表会、2016
猪岡活人、田川浩、変位制御型ブレースの作用開始点が鋼構造多層骨組の地震応

答に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2016、pp681-682
上谷宏二、超高層建物における下層部変形集中現象の座屈解析による解明(その1) 概説、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2015、pp269-270
丁野泰誓、上谷宏二、超高層建物における下層部変形集中現象の座屈解析による解明(その2)単純モデルの理論解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2015、pp271-272
森安章人、家永尚明、丁野泰誓、上谷宏二、超高層建物における下層部変形集中現象の座屈解析による解明(その3)骨組モデルの数値挙動解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2015、pp273-274
家永尚明、森安章人、丁野泰誓、上谷宏二、超高層建物における下層部変形集中現象の座屈解析による解明(その4)骨組モデルのパラメトリック分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造、2015、pp275-276

〔図書〕(計0件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

出願状況(計0件)
該当なし

取得状況(計0件)
該当なし

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

上谷 宏二 (UETANI, Koji)
摂南大学・理工学部・教授
研究者番号：40026349

(2)研究分担者

荒木 慶一 (ARAKI, Yoshikazu)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号：50324653

伊藤 拓海 (ITO, Takumi)
東京理科大学・工学部建築学科・准教授
研究者番号：50376498

田川 浩 (TAGAWA, Hiroshi)
広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70283629

谷口 与史也 (TANIGUCHI, Yoshiya)
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30254387

辻 聖晃 (TSUJI, Masaaki)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00243121

山川 誠 (YAMAKAWA, Makoto)
東京電機大学・未来科学部・教授
研究者番号：50378816

(3)連携研究者
該当なし

(4)研究協力者
該当なし