

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00274

研究課題名(和文) 超高層の耐震設計に死角はないか？ 漸増ねじれ倒壊とそのカラクリ

研究課題名(英文) Possible blind spot in the seismic design of tall buildings - Incremental torsional collapse and its mechanism -

研究代表者

荒木 慶一 (Yoshikazu, Araki)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：50324653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で得られた主な成果は以下の通りである。(1)現象を再現できる必要最低限の形状と大きさの試験体を対象とした準静的実験を振動台実験を用いて行うことで、漸増ねじれ倒壊の危険性を示すシミュレーション結果の妥当性を例証した。(2)本質を失わない範囲で可能な限り単純化したモデルを用いて理論的考察を行うことで、漸増ねじれ現象が発生するメカニズムを明らかにした。(3)漸増ねじれ倒壊を回避するための手法についてシミュレーションによるケーススタディを重ね、現実的かつ効率的な冗長性向上策を提案し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

骨組の臨界挙動とそれに至るまでの過程を明らかにすることは、建築物の限界性能を把握し倒壊に至るような極限状態に対する安全余裕度を評価するうえで必要不可欠であり、建築構造工学における重要な研究課題の一つである。超高層建築物の倒壊は、人命の観点のもとより、経済的影響、ひいては建設技術への信頼といった観点からも避けなければならない。

研究成果の概要(英文)：The main results obtained in this study are as follows. (1) The validity of the simulation results showing the danger of incremental torsional collapse was verified by conducting static experiments using a shaking table on the specimens of the minimum shape and size necessary to reproduce the phenomenon (2) The mechanism of the incremental torsional collapse phenomenon was demonstrated through theoretical discussions using a model that was simplified as much as possible without losing the essence of the phenomenon. (3) We conducted a series of simulation case studies on methods to avoid gradual torsional collapse, and proposed realistic and efficient measures to improve redundancy.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：超高層 ねじれ 材料非線形 幾何非線形

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

骨組の臨界挙動とそれに至るまでの過程を明らかにすることは、建築物の限界性能を把握し倒壊に至るような極限状態に対する安全余裕度を評価するうえで必要不可欠であり、建築構造学における重要な研究課題の一つである。最近、従来知られていなかった超高層骨組の倒壊挙動が本研究課題代表者の荒木らによって報告された。検討建物は、1980年代後期において設計用地震動の入力レベルを地動最大速度で0.4m/sに基準化していた地域の設計基準を満足している。この検討建物モデルでは各層の偏心率が小さく捩れ振動が励起されにくいと考えられた。しかし、重力の作用による幾何学的非線形効果(P Δ 効果)を考慮し、建物主軸に対して45°方向に大振幅地震動を入力すると、長辺と短辺の両方向の梁端部に同時に降伏ヒンジが発生することで全体捩れ変形が誘発された。本研究では、このような現象を漸増捩れ倒壊と呼ぶ。この結果は直ちに既存の超高層建物の危険性を示唆するものではないが、超高層建物の安全余裕度がこれまでの想定よりも小さい可能性があることを示唆している。このような現象発生の可能性を設計段階で予測するためには、次の3要素を考慮した数値解析が必要である。立体骨組での解析、斜め方向の地震動入射、P Δ 効果の考慮。超高層建築物の倒壊は、人命の観点のもとより、経済的影響、ひいては建設技術への信頼といった観点からも避けなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、従来知られていなかった漸増ねじれ倒壊のメカニズム解明を通じて、リスクを定量的に評価するための基礎的検討とリスクを小さくする技術の提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

1. 現象を再現できる必要最低限の大きさの試験体を用いて実験を行うことで、漸増ねじれ倒壊の危険性を示すシミュレーション結果の妥当性を検証する。
2. 本質を失わない範囲で可能な限り単純化したモデルを用いて理論的考察を行うことで、漸増ねじれ現象が発生するメカニズムを検討する。
3. 漸増ねじれ倒壊を回避するための手法についてシミュレーションによるケーススタディを重ね、現実的かつ効率的な冗長性向上策を提案する。

4. 研究成果

4 - 1. 実験によるシミュレーション結果の妥当性の検討

まず、単純化した1層1スパン無偏心架構に対し、数値計算により主軸45度方向の準静的繰返し載荷を行い、以下の結論を得た。

- (1) 鉛直荷重が大きく、部材が塑性化するまで変形を与える場合のみで漸増ねじれ挙動が発生することを確認した。
- (2) 漸増ねじれが生じる場合、正対する構面に配したブレースの軸変形-軸力関係が非対称となることを確認した。すなわち、各構面の層せん断力-層間変形角において、負荷・除荷・中立状態の非対称性が生じるとねじれが一方向に累積する。この非対称性はP Δ 効果を考慮した場合にのみ生じる。

次に、シミュレーションと同じ単純化した1層1スパン無偏心架構に対し、振動台を用いた試験体に対する実載荷試験により、主軸45度方向の準静的繰返し載荷を行い、以下の結論を得た。

- (3) シミュレーション結果と絶対値は異なるものの、傾向およびメカニズムは定性的に一致する実験結果が得られた。
- (4) 絶対値が異なるのは、各構面の層せん断力-層間変形角を摩擦機構によりモデル化するにあたって、静摩擦の影響が大きく挙動に少なからず影響を与えているためと考えられ、その影響を無視できる試験体上の工夫が必要である。これらのモデル化をおこなったうえでの追解析により同等の結果が得られると考えられるが、今後、確認が必要である。
- (5) 漸増ねじれが生じる場合、正対する構面に配したブレースの軸変形-軸力関係が逆対称となり、予備解析結果から想定したメカニズムと一致する挙動が確認できた。

4 - 2. 現象のメカニズムの検討

偏心や劣化等がない理想的な単純立体骨組に斜め一方向漸増載荷を与えた時に塑性捩れ分岐が発生する臨界柱荷重と、分岐後挙動を予測する理論を構築した。導出された塑性捩れ分岐現象が発生する臨界柱荷重の予測式の物理的意味の解釈から、作用する柱荷重が一定ならば、梁端部の剛性低下後も骨組全体の捩れ剛性を正值に保つことが塑性捩れ分岐現象を抑制する上で重要であるという現象の本質の一つが明らかになった。梁端部の耐力(もしくはそれに応じて決まる全塑性モーメント)を向上させることで本現象の発生を遅らせることは可能と考えられるが、現象を本質的に回避することは不可能といえる。さらに、載荷方向軸で2組に分けられる構面の片方1組の2構面の梁端部の弾塑性回転ばねに分岐発生直後から除荷が発生して、分岐後の釣合状態がどの釣合点でも常に安定となる条件を明らかにした。また、分岐後に水平荷重と捩れ変形が満足する方程式を導出し、分岐後の釣合状態がどの釣合点でも常に安定であれば、載荷する水

平荷重の増加に伴って捩れ変位が漸増するという現象の本質の一つを明らかにした。

国際的に広く利用されている複合非線形骨組解析プログラム OpenSees を用いた非線形数値解析によって一方向載荷時の単純立体骨組の塑性捩れ分岐現象を再現し、結果を前述の理論と付き合わせることでその有効性を明らかにした。また、理論で仮定した条件よりもさらに進んだ条件で行われた数値解析例を2つ示し、理論の補完を行った。本数値解析では理論検証のために捩れの発生しやすい諸元が選定されていることに注意する必要があるが、次の4点を検証した結果から、塑性捩れ分岐理論は有効であると言える。まず、今回仮定した諸元を基に理論予測式から推定された塑性捩れ分岐現象が生じる臨界柱荷重値は数値解析結果と一致した。次に、柱荷重が臨界柱荷重値より大きいケースで捩れが急速に増加するときに、載荷方向軸で2組に分けられる構面の片方1組の梁端部弾塑性回転ばねでのみ降伏負荷状態が維持されることを確認した。さらに、分岐後に水平荷重と分岐後捩れ変形が満たす関係式は数値解析結果と一致し、正しく分岐後挙動を予測した。最後に、幾何学的非線形効果を無視すると塑性捩れ分岐現象を数値的に追跡できないことを確認した。さらに、今後さらなる検証が必要とはなるが、理論を補完する数値解析例の一つとして、梁端部弾塑性回転ばねの降伏モーメントに導入された初期不整に対する臨界柱荷重値の感度をパラメトリックスタディによって定性的に検討した。この検討により、今回用いた単純立体骨組の載荷方向軸で2組に分けられる構面の片方1組の梁端降伏モーメントを初期不整として低下させると、塑性捩れ分岐現象が生じる臨界柱荷重値が理論値よりも低下することを示した。また、理論を補完するもう一つの数値解析例として、今回用いた単純立体骨組に正負交番繰り返し水平載荷を与える数値解析を行った。こちらも今後さらなる検証が必要であるが、一方向載荷を仮定して導出した塑性捩れ分岐現象が生じる臨界荷重値より柱荷重が大きいときに繰り返し載荷を与えると、捩れが一方向に累積することが示された。また、捩れが累積する時は、載荷方向の逆転毎に直前に未降伏だった2構面の梁が降伏し、載荷方向が逆転するまでその状態が維持されるという過程が繰り返されることが明らかになった。

4 - 3. 冗長性向上策の検討

大地震を想定したレベル2地震動に対して最大層間変形角が概ね1/100以下となる25階建ての高層鉄骨造制振構造建物を対象に、冗長性の向上を目的に、梁の塑性化後に建物と一体となり作用するフレームを設け水平剛性が大きく低下する層に新たな水平剛性を付与する構造システム：フェイルセーフシステム (Fail Safe System; FSS) を考案し、地震応答解析によりこの構造システムの有効性について検討を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

応答低減効果：制振構造において最大層間変形角が1/30や1/20程度生じる過大入力に対してFSSを付与することにより特定層の変形集中現象を抑制することが可能である。FSSフレームがフィーレンディールタイプの場合、制振構造の最大層間変形角が1/30程度となる入力地震動倍率時では8~33%、制振構造の最大層間変形角が1/20程度となる入力地震動倍率時では17~45%最大層間変形角を低減する効果が認められる。主体架構の最大層間変形角が大きくなるほどFSSによる応答低減効果は大きい。また、高次モードが卓越する地震波に対しても応答低減効果が認められる。一方、比較的層間変形角が小さい上層や下層部はFSSフレームの負担せん断力が主体架構に伝達され最大層間変形角や梁部材塑性率が大きくなる。また、FSSを付与することにより、制振構造において最大層間変形角が大きい層の層間変形を低減する一方比較的層間変形角が小さい層の変形増大および上層部の未塑性化梁端部が塑性化することにより入力地震エネルギーを消費し、全層の梁端に塑性ヒンジを形成する全体崩壊形に近づける効果が認められる。

フレームの剛性の違いが応答結果に及ぼす影響：FSSフレームがフィーレンディールタイプの場合、FSSフレームの水平剛性は主体架構の固有周期から算出した建物剛性の1/2.76倍程度である。フィーレンディールタイプの0.57倍の水平剛性を有するラーメンタイプでは主体架構の最大層間変形角が1/30以上になると応答低減効果が認められ、フィーレンディールタイプでは最大層間変形角が1/40以上になると応答低減効果が認められる。また、フィーレンディールタイプに比べ約3.0倍の水平剛性を有するブレースタイプでは主体架構の最大層間変形角が1/50程度においても応答低減効果が認められる。

フレームの設置範囲 or 連結バネの設置量、作用距離、作用距離分布形が応答結果に及ぼす影響：FSSを付与しない制振構造においてレベル2地震動に対する最大層間変形角が概ね1/135以下の層にFSSフレームを主体架構と接合することにより応答低減効果を得ることができる。また、FSSの連結バネ設置量を1層おきや2層おきに減らした場合においても全層にFSSを設けた場合と同等の応答低減効果がある。さらに、連結バネの作用距離、作用距離分布が応答結果に及ぼす影響はほとんどない。FSSフレーム断面および主体架構との接合部に関する一例を提示した。最大層間変形角は入力地震動レベル：1/30, 1/20倍率において最大層間変形角分布形は地震波ごとに概ね近似し、FSSフレームは主体架構の変形に応じて作用することよりFSSフレームの変形は主体架構の変形と概ね同一となる推察する。これらのことより、主体架構の変形分布形を推定することができれば目標性能に応じたFSSフレームおよび接合部の設計が可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 福田伊織、五十子幸樹	4. 巻 67B
2. 論文標題 主軸斜め45度一方向入力を受ける立体骨組の塑性分岐挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 413-426
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NISHIMURA Katsuhisa, KOGA Shingo, YOSHIMURA Taichi	4. 巻 69B
2. 論文標題 SUGGESTION AND EFFECT OF STRUCTURAL SYSTEM FOR IMPROVEMENT OF REDUNDANCY	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering B	6. 最初と最後の頁 361 ~ 370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijse.69B.0_361	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fukuda Iori, Ikago Kohju, Araki Yoshikazu, Wagg David J.	4. 巻 10
2. 論文標題 Inelastic torsional buckling of simple three-dimensional moment resisting frame	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbui.2024.1333949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 前田 貴仁、西本 篤史、荒木 慶一、福田 伊織、五十子 幸樹	4. 巻 66
2. 論文標題 幾何非線形効果の定式化が弾塑性三次元立体骨組の応答予測に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理論応用力学講演会 講演論文集	6. 最初と最後の頁 47 ~ 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11345/japanntam.66.0_47	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hong Huanpeng, Gencturk Bora, Kise Sumio, Araki Yoshikazu, Jain Amit, Saiedi M. Saied, Uruma Kenji	4. 巻 424
2. 論文標題 Headed coupling behavior of large diameter Cu-Al-Mn shape memory alloy bars: Mechanical testing and microstructural analyses	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 135862 ~ 135862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2024.135862	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 I. Fukuda, K. Ikago
2. 発表標題 Inelastic Torsional Buckling Analysis of a Single-Story Cubic Frame
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I. Fukuda, K. Ikago, T. Maeda, A. Nishimoto, Y. Araki
2. 発表標題 INELASTIC TORSIONAL BUCKLING OF A SYMMETRIC THREE-DIMENSIONAL MOMENT-RESISTING FRAME SUBJECTED TO HORIZONTAL FORCE IN THE DIAGONAL DIRECTION
3. 学会等名 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田貴仁、荒木慶一、西本篤史、五十子幸樹、福田伊織、鶴田圭祐
2. 発表標題 主軸 45 度方向の準静的繰返し载荷を受ける単純骨組モデルの漸増ねじれ挙動(その1:予備解析)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西本篤史、荒木慶一、五十子幸樹、福田伊織、前田貴仁、鶴田圭祐
2. 発表標題 主軸45度方向の準静的繰返し載荷を受ける単純骨組モデルの漸増ねじれ挙動(その2: 実証実験)
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 辻航平、荒木慶一、西本篤史、福田伊織
2. 発表標題 主軸45度静的繰返し載荷を受ける履歴型制振ブレース付骨組の変形累積現象
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 古河 真伍、西村 勝尚
2. 発表標題 冗長性の向上を目的とした構造システムの耐震性能に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古河真伍、西村勝尚
2. 発表標題 P 効果と捩れ変形に関する一考察
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古河真伍、西村勝尚
2. 発表標題 P 効果と捩れ変形に関する一考察
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田伊織、五十子幸樹
2. 発表標題 複合非線形効果を考慮した主軸斜め45度方向入力を受ける単純立体骨組の塑性分岐挙動
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田伊織、富澤康平、五十子幸樹
2. 発表標題 複合非線形効果を考慮した主軸斜め45度方向入力を受ける単純立体骨組の塑性分岐座屈解析 その1：概要と経路パラメータの再定義
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富澤康平、福田伊織、五十子幸樹
2. 発表標題 複合非線形効果を考慮した主軸斜め45度方向入力を受ける単純立体骨組の塑性分岐座屈解析 その2：塑性分岐座屈理論の再構築と数値解析による検証
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富家大地、荒木慶一、西本篤史
2. 発表標題 幾何非線形効果の扱いが準静的載荷を受ける超高層建物の応答予測に与える影響 その1：一方向載荷に対する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西本篤史、荒木慶一、富家大地
2. 発表標題 幾何非線形効果の扱いが準静的載荷を受ける超高層建物の応答予測に与える影響 その2：繰り返し載荷に対する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富家 大地、荒木 慶一、西本 篤史、前田 宜浩、程 竜
2. 発表標題 想定南海トラフ地震動に対する超高層鋼構造骨組の漸増ねじれ倒壊
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 程 竜、荒木 慶一、西本 篤史、前田 宜浩、富家 大地
2. 発表標題 2方向入力による位相差を考慮した想定南海トラフ地震動に対する超高層鋼構造骨組の漸増ねじれ倒壊危険度評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田伊織、五十子幸樹
2. 発表標題 立体単純骨組の捩れを伴う全体塑性座屈解析 その3：載荷直交方向を固定した数値解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田 伊織、安田 良河、五十子 幸樹
2. 発表標題 ダイナミック・マスによる超高層鋼構造建築物の下層部変形集中現象抑制効果
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田伊織、五十子幸樹
2. 発表標題 単純立体骨組の捩れを伴う全体塑性座屈解析 - その2 一般的な場合における解の唯一性と分岐解 -
3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村 勝尚 / 古河 真伍
2. 発表標題 斜め方向入力が高層鉄骨造建物の耐震性能に与える影響に関する研究 その1：捩れ変形に関する検討方法と静的弾塑性解析結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古河 真伍 / 西村 勝尚
2. 発表標題 斜め方向入力が高層鉄骨造建物の耐震性能に与える影響に関する研究 その2：捩れ変形に関する弾塑性地震応答解析による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古河 真伍 / 西村 勝尚
2. 発表標題 斜め方向入力が高層鉄骨造建物の耐震性能に与える影響に関する解析的研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	五十子 幸樹 (Ikago Kohju) (20521983)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	
研究分担者	長江 拓也 (Nagae Takuya) (90402932)	名古屋大学・減災連携研究センター・准教授 (13901)	
研究分担者	西村 勝尚 (Nishimura Katsuhisa) (90826207)	摂南大学・理工学部・教授 (34428)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	前田 宜浩 (Maeda Takahiro) (00594160)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・マルチハザードリスク評価研究部門・主任研究員 (82102)	
研究分担者	S a n j a y P A R E E K (Sanjay Pareek) (20287593)	日本大学・工学部・教授 (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	The University of Sheffield			
米国	University of Southern California	University of Nevada		