

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04790

研究課題名(和文) 鋼構造建物の完全倒壊挙動の解明と倒壊要因の特定

研究課題名(英文) Complete collapse behavior and collapse factors of steel structural frames

研究代表者

金尾 伊織 (KANAOKA, Iori)

京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・教授

研究者番号：80372564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大地震による建物の倒壊を防ぎ、安全性と経済性を両立するため、建物の完全倒壊挙動と変形性能を明らかにする目的としている。骨組の完全倒壊までの立体的挙動を追跡できる解析プログラムを開発し、倒壊に至るメカニズムの解明を目指した。改良した局部座屈を考慮した応力-歪モデルを導入した骨組解析法が、骨組の完全倒壊振動台実験結果を解析できることを確認した。さらに、水平力を受ける1層1スパン骨組の完全倒壊解析を実施し、柱の幅厚比、軸力比が倒壊挙動に与える影響は大きい、柱梁耐力比の影響は小さいことを示した。また、骨組の耐力が最大耐力の半分まで低下すると、完全倒壊に繋がる可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震による建物被害を抑え、事業継続性を高めるための研究である。鋼構造建物が完全倒壊に倒壊に至るメカニズムの解明を解明し、建物の完全倒壊を誘発する因子を特定することを目指している。倒壊要因の候補として、柱の厚み、建物重量、柱と梁の強度比とし、その影響を解析的に検討した。柱の厚み、建物重量は、倒壊につながる影響を与えるが、柱と梁の強度比の影響は小さいことを示した。また、建物の耐力が最大耐力の半分まで低下すると、完全倒壊に繋がる可能性が高いことを示した。これらのデータを蓄積すれば、倒壊を防ぎ、被害を少なくできる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the complete collapse behavior and deformation capacity of buildings in order to protect them from earthquakes. An analytical program that can trace the complete collapse of frames was developed to clarify the mechanisms. It was confirmed that the improved frame analysis program formulated by a stress-strain model with local buckling, can analyze the shaking table test of complete collapse frame. Furthermore, a complete collapse analysis of a one-story, one-span frame subjected to horizontal forces was conducted, and it was shown that the width-to-thickness ratio and axial force ratio of the columns have a large effect on the collapse behavior, but the effect of the beam-to-column strength ratio is small. It was also shown that a complete collapse may occur when the strength of the frame is reduced to half of the maximum strength.

研究分野：鋼構造 建築構造力学 数値解析

キーワード：応力-歪モデル 局部座屈 劣化勾配 数値解析 線材モデル 繰返し挙動
鋼材

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震や東日本大震災では、現行の耐震基準による建物の耐震性の高さが確認された。しかし、現行の設計基・規準は、部材単体の研究に基づくものであり、強度に重きが置かれ、立体的な挙動特性は考慮されていないのが現状である。近年、大地震による建物被害が増大する中、建物の倒壊を防ぎ、事業継続性の確保が求められ、安全性と経済性の両立が急務の課題である。安全性と経済性を両立させるためには、建物が倒壊するまでのメカニズムと、倒壊までの変形性能を評価することが必要である。個別部材の強度、性能を足し合わせることで、建物全体の性能を評価できないことは明らかであるが、骨組の倒壊に至るまでの大変形挙動を追跡できる立体骨組解析法は少なく、完全倒壊までの骨組の性能を評価している研究もなかった。

2. 研究の目的

安全性と経済性の両立を実現するため、建物が倒壊するまでのメカニズムを明らかにし、倒壊に至るまでの変形性能の情報が必要である。研究代表者は、立体的挙動を把握するという目的で、高精度で大変形領域まで解析可能な梁-柱有限要素法による立体骨組解析法 (FERT) の開発を続けてきた。FERT は、大変形挙動、破断および曲げ座屈、横座屈、局部座屈による不安定挙動を考慮できるところまで開発が進んでおり、完全倒壊挙動の追跡実現まであとわずかの状態であることから、この改良を進め、高精度に完全倒壊挙動を追跡できる数値解析プログラムを作成する。そのプログラムを用いて、立体骨組が倒壊に至るまでのメカニズムを解析的に明らかにする。さらに、幅厚比、軸力比や柱梁耐力比などをパラメータとした立体骨組倒壊解析を実施し、建物崩壊につながる要因を特定し、崩壊までの性能評価指標を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 完全倒壊解析プログラム

建物が崩壊に至るまでの挙動を予測する目的で、森迫ら^{1),2)}は梁-柱有限要素を用いた高精度の立体骨組解析法 (FERT-3P, FERT-3D) を開発し、局部座屈による劣化勾配を有する応力-歪関係を用いて局部座屈を考慮できる解析法を開発を試みている^{3),4)}。高鷲ら³⁾や久保田ら⁴⁾は、軸力と繰返し曲げを受ける柱や繰返し曲げを受ける梁の有限要素解析を実施し、その解析データに基づいて局部座屈を考慮した汎用的な応力-歪関係を提案し、FERT-3D にその応力-歪関係を導入した。しかし、提案した応力-歪関係を用いると、部材の耐力劣化が有限要素解析結果よりも大きい傾向を示し、十分に局部座屈の影響を考慮できなかった。これは、局部座屈による劣化域の判定に問題があると考え、圧縮時に経験した累積歪 (以下、圧縮累積歪、図1) を判定基準として考慮した劣化型応力-歪関係を導入し、プログラムの精度向上を目指した。

① 局部座屈を考慮した角形鋼管柱の応力-歪関係のモデル化

文献3)に準拠し、繰返し変形に対応可能な応力-歪関係を作成する。文献3)では、汎用有限要素プログラム Marc2013 を用いて、軸力比と幅厚比をパラメータにした数値解析を行い、局部座屈の発生が顕著な領域 (以下、局部座屈領域) の平均的な応力-歪関係を作成している。図2(a)に解析モデルの概要を示す。幅厚比 16.7~36.4 に相当する □-200×200×6 から □-800×800×32 の断面に軸力比 $n=0, 0.1, 0.3$ の軸力を与えた計 36 体のモデルを対象に、載荷履歴として振幅を $2\theta_p, 4\theta_p, 6\theta_p$ と 2 回ずつ繰返し、劣化勾配が生じるまで漸増させ解析を行った。これらの解析結果から劣化経路を含む応力-歪関係モデルを作成するために、局部座屈領域を対象に、載荷の最初に圧縮変形を受ける面について応力、歪の解析値を取り出し、平均的な応力-歪関係を作成する。図2(b)に局部座屈領域の詳細を示す。局部座屈領域は柱脚から材軸方向に柱幅の領域とし、図2(b)内の A-A' から B-B' の間に存在する材軸方向の要素について、各ステップのひずみの平均値と応力の最大値を採用した後、材幅方向について各ステップの値を平均化することで平均的な応力-歪関係を得る。上記に従って作成した □-200×200×9, $n=0.1$ の平均的な応力-歪関係を図2(c)に示す。

平均的な応力-歪関係から、劣化経路を含む応力-歪関係モデルを作成する。一般的に用いら

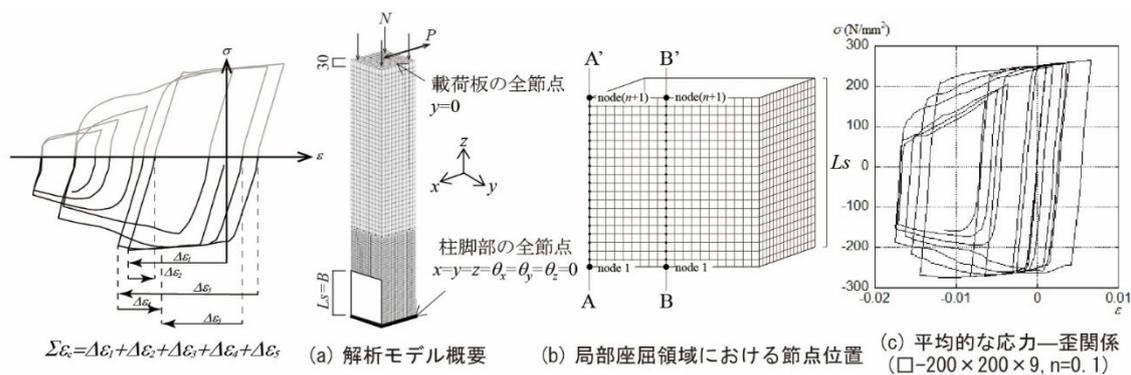


図1 圧縮累積歪の定義

図2 有限要素解析値による平均的な応力-歪関係の作成

れる劣化勾配を考慮した応力-歪モデルは複雑であるが、できるだけ簡略化することを目指す。初期勾配は引張・圧縮共に $E=2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ であり降伏後は $E/100$ で遷移するが、圧縮側については最大応力到達後に低下し始める。その勾配は繰返しを経るごとに緩やかになっていくが、繰返しのサイクル毎に現れる劣化勾配の平均を採用した。ここで解析結果に基づいて定義する値は、圧縮側の最大応力 $S\sigma_y$ 、劣化勾配 h_d 、圧縮累積歪 $\Sigma \varepsilon_c$ である (図3)。

図4に提案した応力-歪関係モデルの構成則を示す。各状態において $(\sigma_0, \varepsilon_0)$ は除荷時の応力と歪、 ε_d は劣化後における圧縮側の降伏開始点の歪の値を示す。劣化開始までは降伏後の接線係数 $E/100$ のバイリニアとする。劣化開始の時期は、圧縮側の最大応力に達するか、圧縮側で経験する歪が圧縮累積歪を超えるか、早い方で判定する。劣化後は圧縮側においては劣化勾配 h_d で遷移し、以後は、直前のサイクルの圧縮側における劣化開始点の歪 ε_d との比較により経路を決定する。 $\varepsilon < \varepsilon_d$ の範囲で除荷する場合 (図4(c-(i))) は、直前のサイクルの劣化経路を進行するが、 ε が ε_d 以上の範囲で除荷する場合、弾性勾配で $2\sigma_y$ だけ応力が下がり、その後劣化勾配 h_d で劣化する。このとき、この劣化勾配開始点の歪を新しい ε_d として再設定する。

② 局部座屈を考慮した応力-歪関係を用いた柱および骨組の解析

提案した応力-歪関係を FERT-3D に導入し、角形鋼管の片持ち柱の解析を行った。表1に解析対象断面および断面性能、図5に解析モデルの概要を示す。○は節点番号、□は部材番号を示しており、解析モデルは2部材で構成され、柱脚部から柱幅分を局部座屈領域として部材1、それ以外を部材2とする。部材1は1要素、部材2は柱幅長になるように材軸方向に等分割する。断面は12の材料線要素からなり、元の断面性能と一致するようにモデル化している。応力-歪関係モデルについては、部材1は局部座屈を考慮した劣化モデル、部材2はバイリニアモデルを採用する。接線弾性係数は $E=2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、降伏応力度 $\sigma_y=235 \text{N/mm}^2$ である。載荷履歴は振幅を $2\theta_p$ 、 $4\theta_p$ 、 $6\theta_p$ と2回ずつ繰返し、劣化勾配が生じるまで漸増させた。

解析結果を図6に示す。図中、太線は FERT-3D、細線は有限要素解析の結果である。局部座屈の大きい断面では最初の劣化を精度よく追跡している。また有限要素解析の段階的な劣化には対応できていないが、劣化の勾配や除荷の開始点についてはいずれもよい対応を示している。

FERT-3D における骨組解析の妥当性の検証の為、文献5)の小型立体骨組の振動台実験の模擬解析を行った。FERT-3D における解析モデルは文献3)に基づき作成し、柱を材軸方向に9等分、柱の局部座屈領域を柱幅の2倍とした。また、減衰定数は実験値である0.9%を採用した。実験結果と解析結果の比較を図7に示す。解析結果は実験結果の耐力低下による鉛直支持能力の損失の様子を追跡しており、局部座屈の影響を考慮できている。

(2) 鋼構造立体骨組の完全倒壊挙動の解析

図8に解析モデル概要を示す。X方向10.5m、Y方向7.2m、Z方向4mの一層一スパンの柱脚完全固定の立体剛接骨組とする。角形鋼管柱とH形鋼梁断面、初期軸力比を変化させた計68のモデルを解析対象とする。軸力比は0、0.1、0.3、0.6となるよう柱頭部の節点に鉛直荷重を与えた。表2に柱と梁の組み合わせを示す。解析モデルでは、柱と梁の端部を局部座屈領域とす

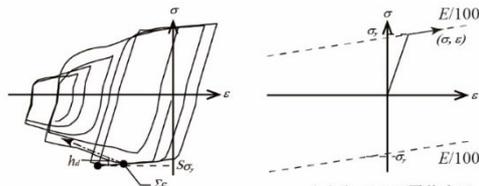


図3 定義する値

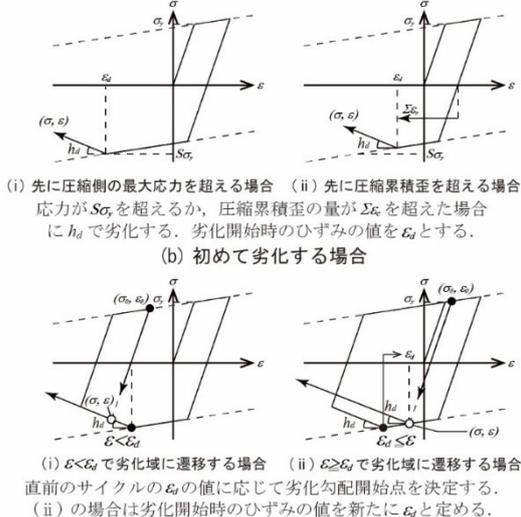


図4 応力-歪関係の構成則

表1 解析断面諸量

断面	B/t	θ_p	L [mm]	A [mm ²]	J [mm ⁴]	Zp [mm ³]	Mp [Nmm]
□-200×200×6	33.3	0.0053	1188	4656	29233472	338832	79625520
□-200×200×9	22.2	0.0053	1170	6876	41900052	492858	115821630
□-200×200×12	16.7	0.0053	1154	9024	53373952	637056	149708160

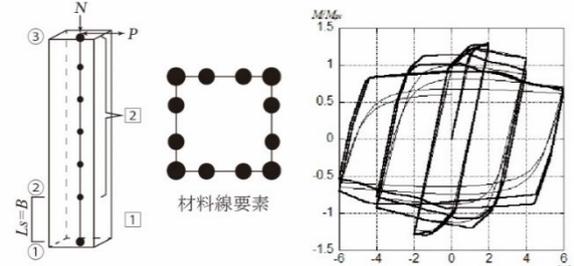


図5 解析モデル概要

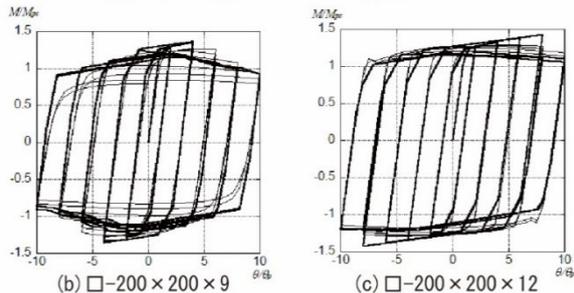


図6 解析結果の比較 (いずれも n=0.1)

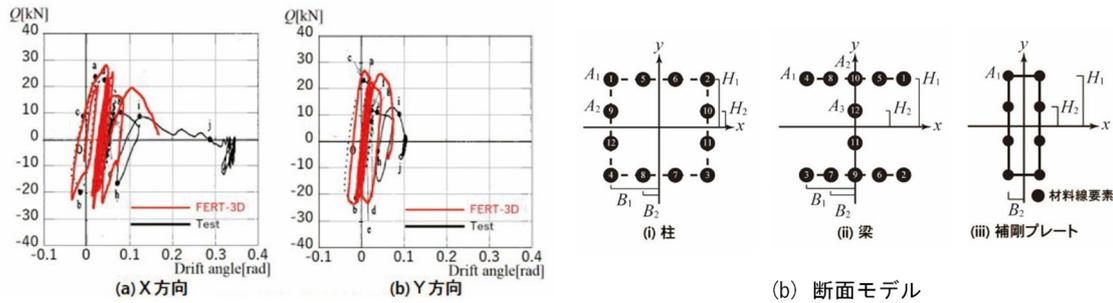


図7 実験結果と解析結果の比較

表2 骨組概要

	M_{pc}/M_{pg}	B/t
H-600×300×12×19	1.00	
H-500×250×9×19	1.55	
□-500×500×12		41.67
H-450×250×9×16	2.01	
H-400×200×9×19	2.43	
H-488×300×11×18	1.01	
□-400×400×14		28.57
H-500×200×10×16	1.49	
H-450×200×9×14	1.93	
H-400×200×8×13	2.43	
H-600×300×12×19	1.01	
□-400×400×25		16.00
H-500×250×9×19	1.52	
H-450×250×9×16	2.03	
H-400×200×9×19	2.48	
□-300×300×16	0.92	18.75
□-350×350×12	0.98	29.17
□-350×350×16	1.28	21.88
□-400×400×19	1.98	21.05
□-450×450×19	2.52	23.68

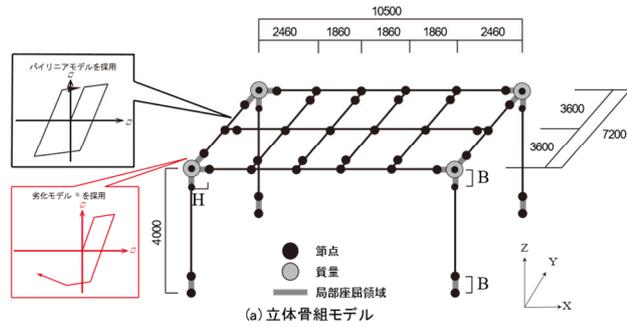


図8 解析モデル概要

る。局部座屈領域は柱幅または梁せいと同じ長さとし、部材要素長は柱幅、梁せい程度となるように分割する。応力-歪関係はバイリニアモデルとし、局部座屈領域の要素のみ劣化モデルを採用する。また、横座屈を防ぐために大梁と同断面の小梁を配置し、その接合部はガセットプレートとしてモデル化する。また、各部材は図8に示すように梁、柱は12本、プレートは8本の材料線要素からなり、断面諸量が等価となるようにモデル化している。

ヤング係数は $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏応力度 $\sigma_y=235 \text{ N/mm}^2$ である。FERT-3Dは動的解析プログラムであり、一方向から加速度を加えることで準静的一方向載荷解析を行い、減衰定数は2%とする。図9に層せん断力-変形角関係の例を示す。(a)は柱の幅厚比が41.67、(b)は柱の幅厚比が28.57であり、いずれも柱梁耐力比は2程度である。幅厚比、軸力比が大きい場合ほど早期に骨組の耐力が失われ、最大耐力以降の耐力低下が急激になる。

各パラメータが骨組の変形性能に与える影響を評価するため、式(1)に示すように、層せん断力が最大となるときの、最大値から2割低下するとき、最大値の半分になるときの、0になるときの塑性変形倍率を用いる。

$$R_{pmax} = \frac{\theta_{pmax}}{\theta_p} - 1, \quad R_{p0.8} = \frac{\theta_{p0.8}}{\theta_p} - 1, \quad R_{p0.5} = \frac{\theta_{p0.5}}{\theta_p} - 1, \quad R_{p0} = \frac{\theta_{p0}}{\theta_p} - 1 \quad (1)$$

塑性変形倍率と幅厚比の関係を示す。図10より幅厚比や軸力比が大きいほど塑性変形倍率が小さくなることわかる。また、 R_{pmax} の値は0~15、 $R_{p0.8}$ の値は0~30程度であるが $R_{p0.5}$ 、 R_{p0} の値は0~70程度でほぼ変化していない。このことから、耐力が最大値の半分まで低下すると、その後は急激に骨組が倒壊に至ると考えられる。なお、柱梁耐力比が大きくなると面外変位が大きくなるが、塑性変形倍率には顕著な影響を与えないことを確認している。

骨組倒壊の特徴を検討するため、柱の幅厚比が16、28.57、41.67の耐力低下が確認できた立体骨組モデルにおいて、層せん断力が最大値の時から0になるまで1割低下するごとの塑性変形倍率を図11に示す。図11より、耐力が最大値の約半分になったタイミングでグラフの勾配が緩やかになり耐力低下が急激になることが確認できる。以上のことから鋼立体骨組は耐力が最大値の半分を下回ると、それ以降は耐力を維持できなくなり、完全倒壊したと判断できる可能

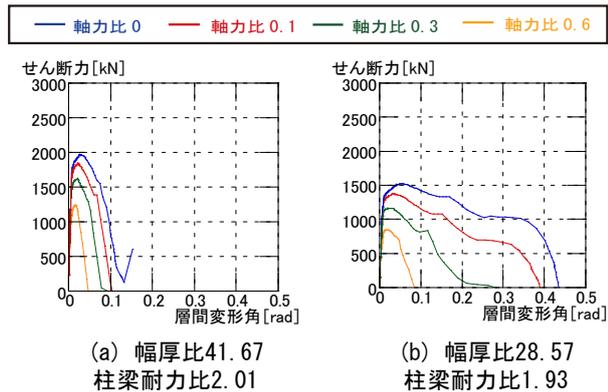


図9 荷重-変位関係

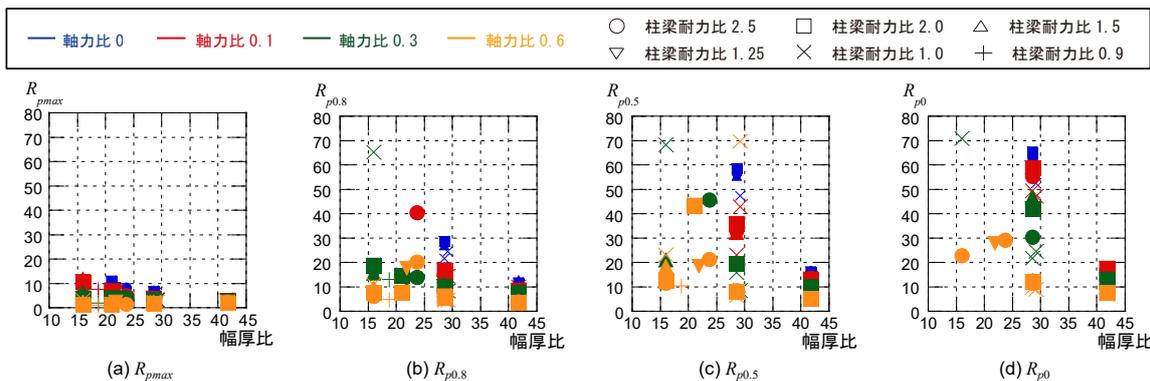


図10 塑性変形倍率—幅厚比関係

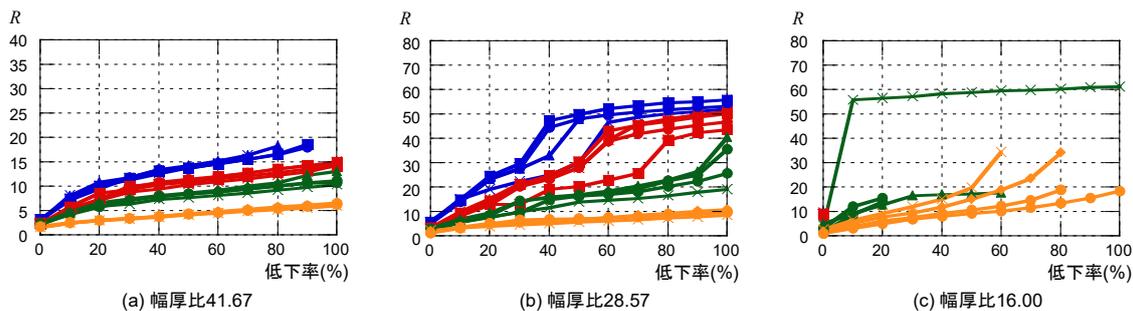


図11 塑性変形倍率—耐力低下関係

性がある。

4. 研究成果

骨組の完全倒壊挙動を追跡できる数値解析プログラムを開発し、そのプログラムを用いて数値解析を実施し、以下の成果を得た。

- (1) 局部座屈を考慮した応力—歪モデルを導入した梁—柱有限要素法による骨組解析法に劣化判断などの判定基準を改良した立体骨組解析法を開発した。その解析法を用いて、骨組の振動台実験を模擬し、高い精度で完全倒壊挙動を追跡できることを示した。
- (2) 改良した立体骨組解析プログラムを用いて1層1スパン骨組を対象とした一方向水平力を受ける完全倒壊解析を実施し、完全倒壊に影響を与える要因を明確にする目的で、最大耐力、変形能力(最大耐力～0時)を指標としてデータを取りまとめ、以下の知見を得た。
 - ① 柱の幅厚比、軸力比が大きくなるほど最大耐力時の変形性能、完全倒壊に至るまでの変形性能が小さくなることを示した。
 - ② 骨組の耐力が最大耐力の半分まで低下した以降、耐力低下が急激になり、変形性能が小さくなることから、骨組の耐力が最大耐力の半分まで低下すると、完全倒壊に繋がる可能性があることを示した。
 - ③ 柱梁耐力比が倒壊挙動に与える影響は比較的少ないことを示した。

より多くのデータを収集することで、完全倒壊が誘発される要因を詳細に特定することができる可能性がある。

参考文献

- 1) 金尾(奥田)伊織, 森迫清貴, 中村武: 一軸材料線要素からなる梁—柱有限要素法を用いた鋼立体ラーメンの弾塑性挙動の解析, 日本建築学会構造系論文集, 第533号, pp.99-106, 2000.7
- 2) 門藤芳樹, 金尾伊織, 森迫清貴: 梁—柱有限要素法による立体弾塑性骨組の動的たわみ解析, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp.105-110, 2003.10
- 3) 高寫優子, 金尾伊織: 局部座屈を考慮した梁—柱有限要素を用いた立体骨組解析法, 構造工学論文集 Vol. 64B, pp.27-35, 2018.3
- 4) 久保田菜帆, 金尾伊織: 累積歪を考慮した局部座屈による劣化挙動を予測するための立体骨組解析法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.299-300, 2019.7
- 5) 島田侑子, 赤澤資貴, 伊藤陽介, 松岡祐一, 山田哲, 吹田啓一郎: 鋼構造小型立体骨組の崩壊挙動に関する振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第620号, pp.125-132, 2007.10
- 6) 国土交通省ほか監修: 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 八木詠都、金尾伊織	4. 巻 構造
2. 論文標題 鋼構造立体骨組の完全倒壊挙動の解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 pp.167-168
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 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 八木詠都、金尾伊織	4. 巻 構造
2. 論文標題 局部座屈を考慮した応力 歪モデルによる角形鋼管柱の解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 pp.255-256
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 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 河合恒典、金尾伊織	4. 巻 構造
2. 論文標題 鋼立体剛接骨組の完全倒壊挙動に影響を与える因子に関する基礎的検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 **
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 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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 八木詠都、金尾伊織
2. 発表標題 鋼構造立体骨組の完全倒壊挙動の解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木詠都、金尾伊織
2. 発表標題 局部座屈を考慮した応力 歪モデルによる角形鋼管柱の解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合恒典、金尾伊織
2. 発表標題 鋼立体剛接骨組の完全倒壊挙動に影響を与える因子に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023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
研究協力者	八木 永都 (YAGI Eito)	京都工芸繊維大学・建築学専攻・元大学院生 (14303)	
研究協力者	河合 恒典 (KAWAI Kosuke)	京都工芸繊維大学・建築学専攻・大学院生 (14303)	

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
---------	---------