

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04363

研究課題名(和文) 極大地震を受ける鋼構造ラーメン立体骨組の非倒壊設計技術の構築

研究課題名(英文) Design Technology to Prevent Complete Collapse of Steel Moment Resisting Frames Subjected to Extreme Earthquakes

研究代表者

向出 静司 (Mukaide, Seiji)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20423204

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造建築物で多用される合成梁(コンクリート床スラブと鉄骨梁を一体化した梁)を対象に、水平2方向の地震動を受けることを想定した大変形域載荷実験を実施した。本実験により、水平1方向の場合に比べ、水平2方向の荷重を受ける方が、早期に耐力劣化することを確認した。また、このような挙動を評価できる解析モデルを提案し、それを用いた場合の鋼構造建築物の地震応答解析(シミュレーション)を通じて、従来の解析モデルより、早期に建築物が倒壊する傾向を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

耐震設計で想定される地震動を上回る地震動に対して、鋼構造建築物が倒壊するまでにどの程度の余裕を持っているのか把握することは重要である。本研究成果に基づいて、地震応答解析のためのモデルを構築することで、鉄骨柱や鉄骨梁の局部座屈だけでなく、合成梁の耐力劣化を考慮することで、より高精度に鋼構造建築物の倒壊挙動を把握するためのシミュレーションが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Large deformation loading tests were conducted on composite beams (beams integrating concrete floor slabs and steel beams), which are often used in steel structural buildings, under the assumption that they are subjected to earthquake motion in two horizontal directions. This experiment confirmed that the bearing capacity deteriorates earlier when subjected to loads in two horizontal directions than when subjected to loads in one horizontal direction. An analytical model that can evaluate such behavior was proposed, and through seismic response analysis of steel-structured buildings using the proposed model, it was confirmed that the buildings tend to collapse earlier than conventional analytical models.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 倒壊 合成梁 地震応答解析

1. 研究開始当初の背景

建築基準法においては、稀に発生する地震に対して建物が許容応力度以下に収まり、極めて稀に発生する地震(大地震)に対して建物が損傷を受けても人命が損なわれるような壊れ方をしないことを目指している。それに対し、兵庫県南部地震で被った甚大な被害を教訓に、近年では施主と構造技術者の対話と合意に基づいて建物の構造性能を設定するような性能設計に向けての技術整備が徐々に進み、事業継続性や修復性などの目標性能に対し様々な地震レベルに対応させた検討がなされ、一部の実務設計に反映されている。

一方、近年の地震工学の成果として、法が想定する大地震よりもさらに強い地震(超大地震)に近い将来発生する可能性が指摘されるとともに、そのような入力レベルの地震動の観測例が増えつつある。超大地震時には、建築物が一定の水平耐力を保持できる領域を超え、完全な倒壊に至る懸念がある。建物の倒壊は、使用者・所有者の人命被害や損害に留まらず、建物周辺に危害を及ぼし、都市機能(交通網・ライフライン)をも損傷させ避難・救助・復旧の障害にもつながる。このような建物の極限状態がどのような地震動とどの程度の構造性能の下で生じるのか、設計者が把握することは重要であろう。このような観点から、発生する蓋然性が低いながらも建築基準法の想定を大幅に超える大地震に対する地震応答解析を行い、非倒壊というクライテリアを用いた設計指針が日本建築構造技術者協会から示されている^①。しかしながら、非倒壊をクライテリアとした設計を行うには現状の技術レベルは不十分であり、特に、地震応答解析を行わない建物(超高層・免震を除くほとんどの建物)においては、想定する地震動での変形さえ把握していないことが通例で、保有水平耐力到達後に最終的な倒壊がどのように発生するかを把握することも技術的に困難であり、一般の構造設計技術に反映できていないのが現状である。

2. 研究の目的

倒壊挙動を解明するためには、建物が倒壊するほどの超大変形域までを解析的に扱う必要がある。この際、構成部材の耐力劣化特性を適切にモデル化することが肝要である。研究代表者は、広範な設計条件を持つ実建物の倒壊性状を把握するために、様々な耐力劣化要因を考慮した平面骨組のパラメトリックスタディを数多く実施している^②など(図1参照)。これに対し、立体骨組の倒壊挙動に関しては、いくつかのケーススタディに基づく検討に限られているのが現状である。複雑な立体挙動を多数扱う際、精度と利便性を兼ね備えた解析モデルが必要となる。ただし、鋼構造ラーメン立体骨組の構成要素のうち、合成梁の耐力劣化性状について既往研究の成果が十分とはいえない。近年、合成梁におけるスラブの合成効果に着目した研究は盛んであり、梁の下フランジで溶接部破断するような実験例や2方向入力時の実験例も見られるが、破断に先行して局部座屈が生じて超大変形域に至る合成梁の実験事例は研究代表者によるものに限られている^③など。その知見の一つとして、超大変形域における合成梁の耐力劣化特性は、直交2構面で独立ではなく、両構面の損傷が相関することを示唆している(図2参照)。

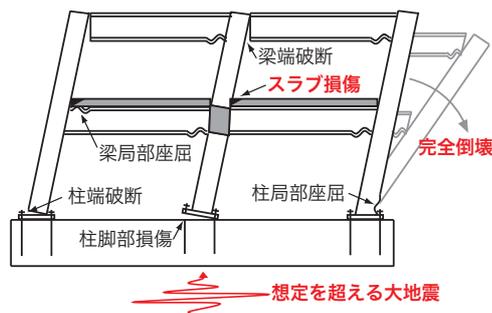


図1 鋼構造骨組の倒壊挙動

以上の既往研究に基づき、本研究課題においては、梁端が早期に破断しない設計条件(ノンスカラップ形式)の合成梁を対象に水平2方向を受けて超大変形域に至るまでの載荷実験を実施し、この成果に基づき合成梁の立体解析モデルを構築する。さらに、鋼構造骨組の立体骨組を用いたパラメトリックスタディにより、立体的な倒壊挙動を解明し、その倒壊余裕度の定量的評価方法を構築することを目的とする。

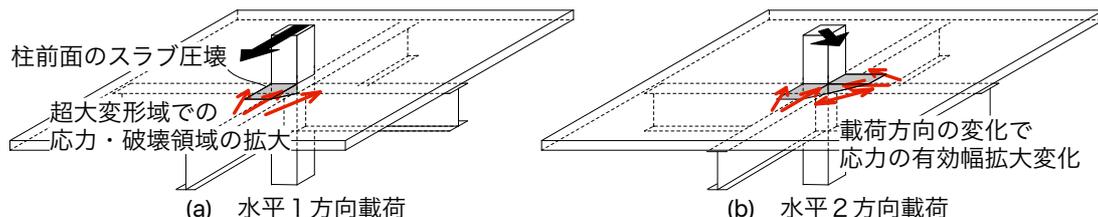


図2 鋼構造骨組の倒壊挙動

3. 研究の方法

(1) 合成梁の超大変形域水平2方向載荷実験

本実験では、ノンスカラップ形式の合成梁を有した部分架構試験体を用いた超大変形域(1/4

程度)の水平2方向載荷実験を実施することにより、主に、コンクリートスラブの破壊性状が合成梁全体の復元力特性に及ぼす影響を検討する。実験パラメータは、載荷履歴と載荷方向(水平1方向載荷、45度方向載荷、0度→90度方向載荷)とスタッドの量(完全合成梁、不完全合成梁)で、計5体を実施する。鉄骨梁に局部屈曲が生じながらコンクリートスラブの破壊が進展する破壊モード(図2参照)が想定されるが、どの程度の変形域でどのようにスラブの破壊が進むのか、水平2方向からの載荷による影響をどのように受けるのか、既往の研究事例が皆無であることから、実験を通じて考察する。

(2) 合成梁の解析モデルの提案

前述(1)の実験結果に基づき、立体解析モデルに適用するための力学モデルを提案する。力学モデル自体は、コンクリートスラブを軸ばねとしてモデル化する簡易なものを想定している(図3参照)。構面平行方向以外の斜め方向載荷の実験結果から、直交2構面の合成梁が独立な軸ばねとして挙動せず互いに影響する場合には、斜め方向にも軸ばねを追加することで、任意方向の耐力相関を考慮した力学モデルを構築する。

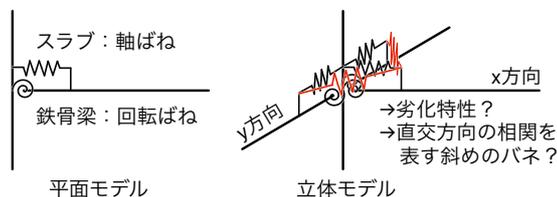


図3 提案解析モデル

(3) 立体骨組によるパラメトリックスタディならびに耐倒壊性能の評価

柱および合成梁の耐力劣化域まで考慮した立体解析モデルを用いて、鋼構造ラーメン骨組が完全に倒壊するまでの挙動を解明すべく、パラメトリックな地震応答解析を実施する。解析パラメータは、合成梁の解析モデル(従来モデル、提案モデル)、入力地震動とする。ただし、ここでの従来モデルは、正曲げ側の耐力劣化性状(直交方向の損傷の影響も含む)を考慮できないものである。これらパラメータの違いに応じて、倒壊層に変化が生じ、倒壊に至るまでに建物が吸収できる履歴エネルギーに大幅に変動することが予想されるため、その定性的傾向と定量的評価のための考察を行う。また、立体骨組においては、倒壊に至るまでに吸収されたエネルギー量を倒壊余裕度の指標として、設計パラメータに基づいて定量的に評価する方法を研究代表者が提案しており⁴⁾、これを用いて耐倒壊性能を評価する。

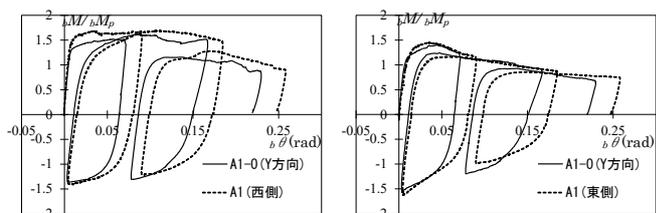
4. 研究成果

(1) 合成梁の超大変形域水平2方向載荷実験

本実験では、合成梁を持つ鋼構造部分架構の水平2方向載荷実験により、大変形域における合成梁の荷重-変形関係およびその破壊性状を把握した。主な知見を以下に示す。

直交2方向載荷試験体では一度構面方向に載荷した後、構面直交方向で載荷した時(図4の黒線)の耐力は、既に損傷が生じている分、一方向載荷試験体(図4の灰色線)よりも劣る。このような傾向は、負曲げ側よりも正曲げ側でより顕著であった。

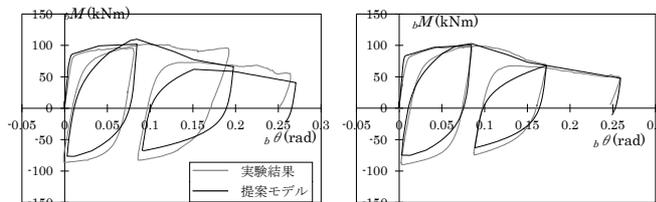
斜め45度方向載荷では圧壊領域がX・Y方向構面で重なることで、一方向載荷時よりも早く柱前面のコンクリートスラブが圧壊を起こし、合成効果がより早く失われることにより正曲げ側の耐力が低下した。



(a) 正加力時正曲げ側の梁 (b) 正加力時負曲げ側の梁
図4 水平1方向載荷と水平2方向載荷の比較

(2) 合成梁の解析モデルの提案

二方向載荷試験体正曲げ側の解析結果と実験結果の比較を図5に示す。正曲げ側では斜めバネを設けることで、二方向荷重下において耐力が低下することを概ね表現できている。負曲げ側では一部実験結果を過大評価している解析結果もあるが、実験結果と概ね良い対応を示している。



(a) 正加力時正曲げ側の梁 (b) 正加力時負曲げ側の梁
図5 解析モデルの実験結果の比較

(3) 立体骨組によるパラメトリックスタディならびに耐倒壊性能の評価

コンクリートスラブ損傷による耐力劣化を考慮した提案モデルを用いて既往研究の従来モデ

ルとの比較を行った。従来モデルでは、正曲げ側は塑性化後に一定の耐力を保持する完全弾塑性型としていたのに対し、提案モデルは、スラブ損傷による耐力劣化を考慮したモデルとなっているため、従来モデルに比べて提案モデルはエネルギー吸収量が減少する。このため、図6に示すように、従来モデルを用いると骨組全体の耐倒壊性能 $V_{dmA}(\phi_e)$ を過大評価することが確認できた。

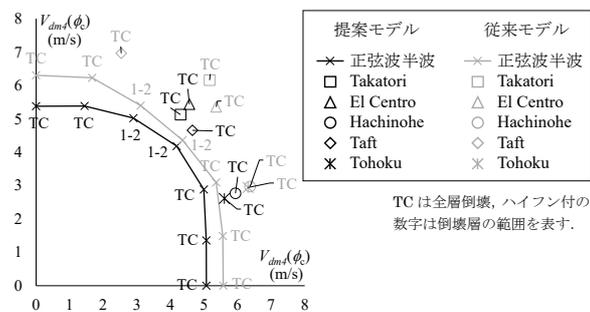


図6 耐倒壊性能 $V_{dmA}(\phi_e)$ の比較

<引用文献>

- ① 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，日本建築構造技術者協会関西支部，2011.11
- ② 向出静司，村上友規，多田元英：魚骨形骨組による鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第690号，pp.1523-1532，2013.8
- ③ 向出静司，潘成馬：合成梁を持つ部分架構の大変形域載荷実験 その1 実験計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1分冊，pp.1073-1074，2019.9
- ④ 森前直樹，向出静司，多田元英：様々な地震動に対して鋼構造立体骨組が倒壊するときのエネルギー吸収性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1分冊，pp.1039-1040，2014.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 岩崎清佳, 向出静司 |
| 2. 発表標題 鋼構造立体ラーメン骨組における合成梁のスラブ損傷による耐力劣化が耐倒壊性能に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 佐伯海都, 山本大貴, 向出静司 |
| 2. 発表標題 完全合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐伯海都, 山本大貴, 向出静司 |
| 2. 発表標題 合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験（その3 完全合成梁と不完全合成梁の比較） |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山本大貴, 佐伯海都, 向出静司 |
| 2. 発表標題 合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験（その4 解析モデルの提案） |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 永田弘哉, 山本大貴, 向出静司 |
| 2. 発表標題 合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験 その1 実験計画 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山本大貴, 永田弘哉, 向出静司 |
| 2. 発表標題 合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験 その2 実験結果および考察 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 山本大貴, 永田弘哉, 向出静司 |
| 2. 発表標題 合成梁を持つ部分架構の水平二方向大変形域載荷実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究報告会 |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|