

令和元年6月21日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05536

研究課題名(和文) 超大地震動を受ける鋼構造ラーメン骨組の非倒壊設計技術の構築

研究課題名(英文) Construction of Design Method for Collapse Limit State of Steel Moment Frames against Extremely Strong Ground Motion

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) 10,300,000円

研究成果の概要(和文)：超大地震時に鋼構造建物が完全に倒壊するかどうかを判定する技術を確立するため、まず、大変形域に至るまでの破壊性状が未解明な柱脚部(特に、露出柱脚形式および根巻き柱脚形式)の大変形域載荷実験を実施した。また、実験結果に基づいて、柱脚部の特性をモデル化する方法を提案した。さらに、大変形域での耐力劣化を考慮した地震応答解析によって、鋼構造骨組の倒壊挙動について検討した。本解析結果により、設計仕様が倒壊挙動に及ぼす影響について知見が得られ、非倒壊設計技術に資する成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築基準法の想定を大きく上回るような超大地震に対して、建築物は完全に倒壊することが懸念されるが、それを検証するための設計技術は未成熟である。本研究では、鋼構造建物が超大地震時に倒壊する挙動を解明するため、多数の地震応答解析(数値シミュレーション)により倒壊性状について考察した。本研究の成果により、構造技術者が鋼構造建物の倒壊性状をより正確に把握するための解析条件が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is improving design method of collapse limit state for steel moment frames under exceedingly strong ground motion. First, loading tests of steel column bases conducted in the large deformation ranges. Based on the test results, the fracture behaviors were discussed and the analysis models are proposed. Then, seismic response analyses of steel moment frames are conducted with considering degrading properties. The analysis results showed the affects to collapse behaviors by design specification. According to the above results, the design method for higher seismic safety was obtained.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 地震応答解析 倒壊 柱脚 耐力劣化

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

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大規模な修復が必要ない程度の損傷にとどまり、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）が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。現に、Eディフェンス震動台による実大4層鋼構造建物の完全倒壊実験では、兵庫県南部地震で計測された地震動下において現行法に則り設計された建物が倒壊する挙動を確認している。建物の倒壊は、所有者・使用者の被害に留まらず、周辺地域に危害を及ぼし、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。このような観点から、発生する蓋然性が相当低い超大地震に対しては、非倒壊というクライテリアとした設計を行うことが実務設計者らから提案されている。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、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明確にし、それを構造設計技術に反映させることが重要かつ急務である。

2. 研究の目的

建築物の倒壊性状を把握するためには、個々の構成部材の復元力が大幅に低下するような大変形域までの構造特性を適切に把握することが必要不可欠である。既往の検討では、鋼構造建物において耐力劣化する要因として、鋼部材の局部座屈と合成梁のスラブの損傷を考慮していたものの、他に、溶接部の破断・柱脚部の損傷も挙げられ、実際の地震被害においてもこれらの部位の損傷が多く報告されている。そのため、これらの影響も含めた複合的な耐力劣化要因を考慮して、鋼構造骨組の倒壊挙動を明らかにすべきである。鋼構造骨組の柱脚部においては、露出柱脚や根巻柱脚で柱脚の塑性変形を想定した設計も行われており、所定の変形性能を発揮した後いずれ耐力劣化する。しかしながら、柱脚が復元力を喪失するような大変形域に至る挙動は実験的に検討されることがほとんどなく、未解明の部分が多い（図1参照）。既に検討している鋼部材の損傷に加え、柱脚部の損傷などの耐力劣化を考慮することで、中低層の鋼構造ラーメン骨組の倒壊挙動を解明することが本応募課題の目的である。

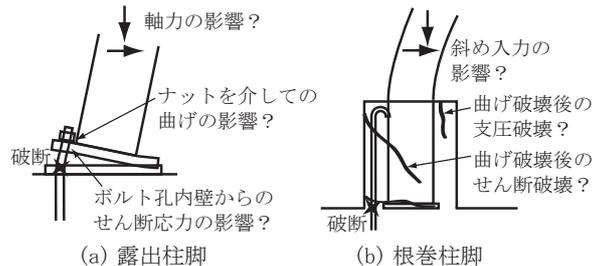


図1 柱脚の耐力劣化

3. 研究の方法

この目的を達成するために以下の3つの具体的課題を検討する。

(1) 露出柱脚の大変形域載荷実験

露出柱脚では、アンカーボルトの破断伸び性能に期待して設計されることが多い。ベースプレートに大きな回転角が生じると、ナットを介する曲げやベースプレートのボルト孔内壁を介するせん断力により、アンカーボルトの伸び性能が低下する懸念があるが、それらの影響が明らかになっていない。そこで、引張軸力と曲げせん断力とともに加える実験により、破断伸び性能を実験的に明らかにする。破断伸び性能に及ぼす種々の影響を把握するために、次の3種類の実験を実施する。①アンカーボルトセットの純引張試験：基本的な性能の把握を目的とし、アンカーボルトの鋼種、ねじ部の長さ、引張長さなどを実験パラメータとする。②アンカーボルトの曲げ引抜き試験：アンカーボルトに作用する曲げせん断の影響を評価することを目的とし（図2参照）、簡易に多数の実験を実施する。アンカーボルトの鋼種、回転中心距離、制御方法などを実験パラメータとする。③露出柱脚形式の繰り返し載荷実験：露出柱脚全体を対象とする実験により、曲げ引抜き試験の知見を検証する。アンカーボルトの鋼種をパラメータとする。

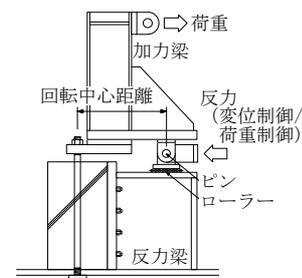


図2 アンカーボルトの曲げ引抜き試験

(2) 根巻柱脚の大変形域載荷実験

根巻柱脚では、根巻部下端のRC断面位置で曲げ破壊が先行する設計（柱脚塑性ヒンジ）が多く採用される。根巻部は、一般のRC柱とは仕様や応力伝達機構など異なる点も多く、耐力を喪

失するほどの大変形域での性状は明らかにされていない。そこで、大変形域載荷実験を通して、鉄筋コンクリート破壊時の耐力劣化性状を把握する。実験パラメータは、根巻き部の設計仕様および載荷履歴である。さらに、支圧破壊のメカニズムや耐力評価方法を検討するため、支圧部分の要素実験を実施する。

(3) 複合的な耐力劣化要因を考慮した倒壊解析

接合部破断に関する既往研究調査に基づき、柱梁接合部における溶接部破断の限界値を規定する。また、上記の実験に基づいて、柱脚の復元力特性をモデル化し、それを既存の骨組解析用プログラムに実装する。これらにより、柱・梁の局部座屈、接合部の破断、柱脚部の損傷による耐力劣化を考慮した鋼構造建物の地震応答解析をパラメトリックに実施する。入力地震動の強さを徐々に増幅し、最初に倒壊した際の結果を対象に、倒壊挙動について考察し、倒壊までに吸収できた地震入力エネルギーの速度換算値 V_{dm} を倒壊余裕度の指標として、その定量的な傾向について分析する。

4. 研究成果

(1) 露出柱脚の大変形域載荷実験

アンカーボルトの純引張試験および曲げ引抜き試験により破断伸び性能について検討したところ、転造ねじ (ABR) の場合、純引張時に 19~23% 程度の破断伸びびで、曲げ引抜き時に 3~4 割程度低下すること、切削細目ねじ (ABM) の場合、純引張時に 7~11% 程度の破断伸びびで、曲げ引抜き時に 1 割程度低下することが、それぞれ実験的に確認された。また、アンカーボルトの機械的性質や回転半径などに基づいて、これらの値を定量的に評価する方法を提案した。ただし、切削細目ねじ (ABM) の場合、シングルナットによる締め付けでは、ねじ山のせん断破断が生じて破断伸び性能が著しく低下することが確認された。また、露出柱脚形式の大変形域載荷実験では上記と概ね同等の破断伸び性能が確認され、結果として 0.15~0.21rad 程度の柱脚回転角で破断した (図 3 参照)。

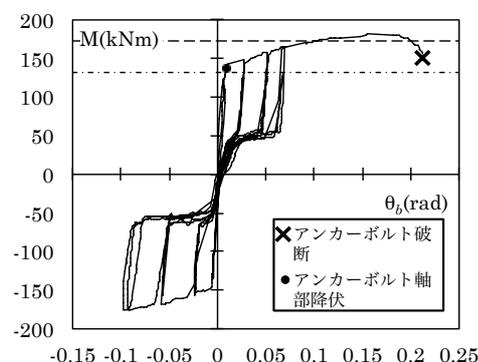


図 3 露出柱脚形式の載荷実験結果

(2) 根巻き柱脚の大変形域載荷実験

曲げ破断が先行するように設計された根巻き柱脚においては、いずれの試験体においても、概ね以下に示すような破壊性状が確認された (図 4 参照)。当初、曲げ破断が先行するもの、それと同時に支圧破断も進行する。支圧破断により曲げ引張側主筋の定着部周辺のコンプライアント効果が失われたことで定着破断が発生し、0.04~0.08rad 程度で最大耐力を迎えた後に耐力劣化した。耐力劣化後、劣化勾配は徐々に緩やかになり、0.2rad 程度の大変形域まで全塑性耐力を保持した。根巻き高さが大きいと、最大耐力が大きくなる傾向が見られたが、それ以外の設計仕様にかかわらず、概ね同様の破壊性状を示した。また、当初は除荷点指向型の履歴性状を示すが、支圧破断と定着破断が併発すると、スリップ型の履歴性状を示した。支圧破断の既往耐力式とは異なる破壊モードが確認されたため、支圧部要素実験に基づいた耐力評価式を提案した。

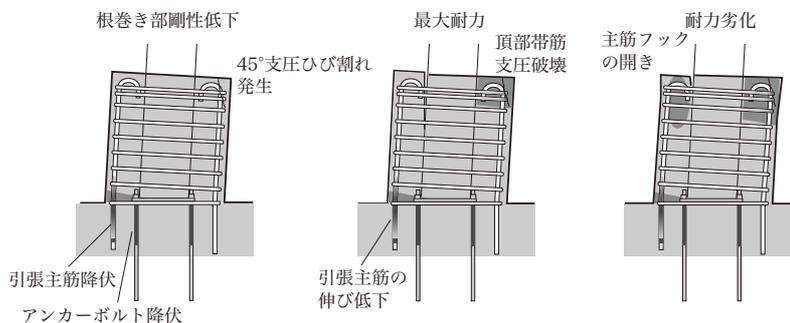


図 4 根巻き柱脚の破壊性状

(3) 複合的な耐力劣化要因を考慮した倒壊解析

梁端接合部の破断に着目した解析によると、純鉄骨梁よりも合成梁は耐力が高く破断が早期に生じ、地震入力エネルギーが大きくなる要因と小さくなる要因が打ち消し合うことで、純鉄骨梁と合成梁が概ね同程度の倒壊余裕度となる。柱脚形式に着目した解析により、根巻き柱脚を適切に考慮した解析骨組と固定柱脚として柱が FA ランクとした解析骨組を比較すると、柱梁耐力比が低い場合を除いて、概ね両者の倒壊余裕度は同程度となった。また、柱脚の履歴性状をスリップ型とした場合と除荷点指向型とした場合では、倒壊余裕度に大きな差は認められなかった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 17 件)

- ① 向出静司, 中川顕輔, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 その4 支圧破壊部の要素実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 1319-1320, 2018.9
- ② 中田雄斗, 向出静司, 村岡良亮, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 (その3 アンカーボルト追加引張試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 953-954, 2017.8
- ③ 村岡良亮, 向出静司, 中田雄斗, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 (その4 露出柱脚の載荷実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 955-956, 2017.8
- ④ 中川顕輔, 向出静司, 佐武莉沙, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 (その3 追加試験体), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 933-934, 2017.8
- ⑤ 中川顕輔, 向出静司, 佐武莉沙, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 (その3 追加試験体および要素実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第57号, 構造系, pp. 181-184, 2017.6
- ⑥ 中田雄斗, 向出静司, 村岡良亮, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 (その3 アンカーボルト追加引張試験および露出柱脚の載荷実験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第57号, 構造系, pp. 177-180, 2017.6
- ⑦ 村上亮介, 向出静司, 多田元英: 根巻き柱脚形式の鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 649-650, 2016.8
- ⑧ 中川顕輔, 向出静司, 佐武莉沙, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 その2 追加試験体, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 1151-1152, 2016.8
- ⑨ 中田雄斗, 向出静司, 村岡良亮, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 その1 アンカーボルトセットの引張試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 1165-1166, 2016.8
- ⑩ 村岡良亮, 向出静司, 中田雄斗, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 その2 曲げ引抜き試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 1167-1168, 2016.8
- ⑪ 西埜裕典, 向出静司, 小里謙一, 多田元英: 合成梁を有する鉄骨造建物の倒壊解析 -その1 解析モデル-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 651-652, 2016.8
- ⑫ 小里謙一, 向出静司, 西埜裕典, 多田元英: 合成梁を有する鉄骨造建物の倒壊解析 -その2 地震応答解析-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, pp. 653-654, 2016.8
- ⑬ 村上亮介, 向出静司, 多田元英: 根巻き柱脚形式の鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号, 構造系, pp. 469-472, 2016.6
- ⑭ 小里謙一, 向出静司, 西埜裕典, 多田元英: 合成梁を有する鉄骨造建物の倒壊解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号, 構造系, pp. 473-476, 2016.6
- ⑮ 中田雄斗, 向出静司, 村岡良亮, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 (その1 アンカーボルトセットの引張試験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号, 構造系, pp. 517-520, 2016.6
- ⑯ 村岡良亮, 向出静司, 中田雄斗, 多田元英: 建築構造用アンカーボルトの破断伸び性能に関する実験的研究 (その2 曲げ引抜き試験), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号, 構造系, pp. 521-524, 2016.6
- ⑰ 中川顕輔, 向出静司, 佐武莉沙, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 (その2 追加試験体), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号, 構造系, pp. 525-528, 2016.6

6. 研究組織

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者
研究協力者氏名: 多田 元英
ローマ字氏名: TADA, Motohide