

「過大入力地震に対する鋼構造建築物の終局状態の評価手法と損傷検知に関する研究」(平成28年度～平成30年度) 評価書(終了時)

平成31年 3月 13日(水)

建築研究所研究評価委員会

構造分科会長 林 静雄

1. 研究課題の概要

(1) 背景及び目的・必要性

今後、発生が懸念される首都直下地震や巨大海溝型地震などでは、これまでの設計の想定よりも大きな速度応答スペクトルの地震動や長い継続時間の地震動(大きなエネルギー・スペクトルの地震動)が建築物に作用する可能性がある。このような過大入力地震に対して、鋼構造建築物の倒壊、崩壊を防止するためには、建築物の最大耐力以後の終局状態の挙動(梁端部の破断や局部座屈発生後の挙動)の解明やその評価手法を確立しておく必要が有る。

現在、国土交通省で検討されている長周期地震動に対する対策においても、検討中の設計用長周期地震動のレベルは、地域によってはこれまでの設計用地震動の2倍程度の擬似速度応答スペクトルであり、このような地震動に対する超高層鉄骨造建築物の地震応答解析では、 $1/50\text{rad}$ 程度の最大層間変形角になり、梁端部にも破断が生じることが予想されている。しかしながら、現状の一般的な地震応答解析では梁端部の破断を考慮できないため、実際の建物応答を反映できていないと考えられる。また、予測地震動がかなり大きい場合には、経済性の観点から現状のクライテリアに収めるような設計が困難な場合もあり、そのためにも建築物の最大耐力以後の終局状態の評価は、今まで以上に必要になると考えられる。

一方で、鋼構造建築物では、構造躯体が内外装材に覆われているために、大地震後に梁端部等で破断が生じているかどうか容易に確認できない。このような場合、建物管理者の迅速で適切な判断や居住者の安全を確保するためには、建物の梁端破断の可能性やその部位等を即座に推定する手法が必要となる。

本研究課題では、このような過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部の破断や局部座屈発生、及び、その後の建築物の倒壊までの終局状態の挙動を評価するための手法を提示することを目的として、実験的、解析的検討を行う。また、地震後に実建物の梁端部等に破断が生じているかどうか観測記録等を用いて推定するための手法を提示することを目的として、実験的、解析的検討を行う。

今後、内閣府等からこれまでの設計の地震動レベルよりも大きな地震動が公表される可能性があり、それに対して、現行規定で設計されている建築物がどのような応答になるか等を適切に評価できる手法を確立することは建築研として重要と考えられる。

(2) 研究開発の概要

本研究課題では、過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部の破断等と、その後の建築物の崩壊までの終局状態を評価するために、梁端部の限界繰返し性能を把握するための実験的検討を行うとともに、同一層内の梁の連続的な破断現象等を明らかにするための実験的、解析的検討を行う。また、地震後に内外装材に覆われている建物の梁端部等に破断が生じているかどうかを推定するために、地震計等の観測記録を用いて鋼構造建築物の梁破断を検知するための実験的、解析的検討を行う。これらの2つの項目の具体的な研究計画を以下に示す。

(1) 過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部の破断等による終局状態の評価手法の検討

過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部の破断や局部座屈の発生から建築物が崩壊に至るまでの終局状態を評価するために、以下の実験的、解析的検討を行う。1) 一般的な鋼構造建築物の梁端部に関して、繰返し変形による梁端部の破断等による限界繰返し性能を明らかにするために、継続時間が長い地震を想定した小振幅による塑性変形性能と首都直下地震を想定した大振幅での塑性変形性能を実験的に明らかにし、設計用の性能曲線を提示する。2) 建築物の梁端部の破断や局部座屈発生後、建築物が崩壊に至るまでの終局状態の評価手法を構築することを目的として、同一層内で梁端部が連続的に破断する場合の挙動等を実験的に明らかにする。また、このような梁端部の破断や柱の座屈等を考慮した解析方法の検討やエネルギー法による評価について検討する。

(2) 地震後の鋼構造建築物の梁端部破断の推定のための観測記録等を用いた破断検知手法の検討

地震後に梁端部の破断が容易に確認できないと考えられる鋼構造建築物の安全性確保を目的として、実建物において梁端部の破断部位を即座に推定するための手法として、地震計等の観測記録を用いる方法や層間変形の履歴を記録できるような手法等について実験的、解析的検討を行う。

(3) 達成すべき目標

- 1) 過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部破断等の設計用の性能（疲労）曲線式と梁破断等を考慮した建物崩壊までの解析方法や評価手法に関する技術資料の提示。
- 2) 実建物の地震後の梁端部の破断の発生やその位置の推定が可能となる手法に関する技術資料の提示。

(4) 目標の達成状況

目標 1) 過大入力地震に対する鋼構造建築物の梁端部破断等の設計用の性能（疲労）曲線式と梁破断等を考慮した建物崩壊までの解析方法や評価手法に関する技術資料の提示。

梁端部破断までの限界繰返し性能に関する検討として、梁端部が破断するまでの一定振幅の多数回繰返し繰り返し載荷実験として、合計 40 体の実験を行った。これらの実験から、梁端塑性率と限界繰返し性能の関係を明らかにし、スカラップ梁、ノンスカラップ梁の限界繰返し性能が、既往の超高層鉄骨造梁端部（内ダイアフラム形式）の性能曲線式を用いることで、概ね安全側に評価できることがわかった（30 年度床スラブ付きのプロットは床スラブの剛性を考慮した塑性率で評価すると安全側で評価される）。

本研究課題で実施した鉄骨造骨組の振動台実験から得られた梁端部破断までの限界繰返し性能を、超高層鉄骨造梁端部の静的実験から得た性能曲線と比較したところ、両者が精度よく対応することがわかり、現状の超高層鉄骨造梁端部の疲労限界性能曲線式を用いて、長周期地震動だけでなく直下型地震に対しても梁端部破断の評価が可能であることを確認した。

梁端部の破断と局部座屈を考慮した地震応答解析プログラムを用いて、鉄骨試験体が崩壊するまでの応答解析を行った。塑性率と累積塑性変形倍率を用いた簡略的な方法で梁破断の判定を行う場合には、振動台実験結果よりも早期に破断する結果となった。今後の課題として、レインフロー法とマイナー則により精緻に判定する手法で、破断判定をした応答解析を行う必要がある。

梁端部の疲労限界性能曲線式を用いた建物の耐震安全性の評価として、エネルギー法告示を用いる方法について検討し、提案した。この方法は、地震応答解析を行わずに、梁端部の損傷や最大層間変形角を Excel シートを用いて計算するものである。この方法では、入力地震動の速度応答スペクトルと入力エネルギーを別々に任意に設定することができる。また、最大耐力以降に、層耐力が劣化する領域も含めた評価が可能である。この評価方法を用いて、4 層、9 層の試設計建物について、耐震安全性評価を

行い、その適用性を確認した。

目標2) 実建物の地震後の梁端部の破断の発生やその位置の推定が可能となる手法に関する技術資料の提示。

本課題で、28～30年度に実施した振動台実験の試験体に様々なセンサ（ひずみゲージ式加速度センサ、サーボ型加速度センサ、スマートフォン内臓のMEMS加速度センサ、塑性ひずみゲージ、半導体ゲージ、ピエゾセンサ）を取り付け、地震後の鉄骨建物の梁端部の破断や局部座屈などの発生の検知が可能な手法について検討を行った。

検討の結果、サーボ型加速度センサを用いて、加速度記録を積分する方法では、残留変形が生じるS造骨組の梁端部の損傷を、比較的精度よく予測する方法を提示することができた。スマートフォン内臓のMEMS加速度センサで計測される加速度記録により、地震動の継続時間中の振動数の変化を計算することで、骨組の最大変形が概ね予測できることを明らかにし、その情報と振動台実験から得られた最大変形と損傷の関係から、建物の被災度を判定する方法を提案した。試験体に添付した半導体ひずみゲージやピエゾセンサによって、地震後の骨組の微動観測から得られる情報によって、梁端部の破断の発生の有無を判定することが可能であることを明らかにした。ただし、この方法では、梁の局部座屈の発生は検知できない。梁端部に塑性ひずみを添付し、地震後にその残留ひずみから破断の有無を判断する手法について検討したが、地震動特性により残留ひずみがかなり異なるため、現状では、この手法で破断の有無を適切に判断するのは困難である。

本課題で検討した手法の中で、地震後の梁端部の損傷検知が可能と判断された手法については、外装材等の非構造部材が取り付けられる場合の影響やスラブの影響など、今後、実用化に向けた検討がさらに必要になると考えられる。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見（担当分科会名：構造分科会）

- 1) 外部機関との共同研究も積極的に行われており、論文発表も多数行われている。研究終了から発表までは時間が必要なので、最終年度の研究成果はこれから発表されるものと期待します。
- 2) 今期は、梁部材に焦点が当てられており、エネルギー法を用いた簡便な設計法も提案されている。被災後の建物についての梁端の損傷の検出についても検討が進められているが、梁の局部的な損傷と構造物としての被災度との関係についてさらなる検討を期待します。
- 3) 成果として提案している疲労限界性能曲線をベースにしたエネルギー法による耐震安全性の評価については、今後さらに実用性を強化していくことを期待したい。特に、性能設計と関連付けて評価できるようにしてほしい。
- 4) 過大入力地震動は、建築基準法のレベルを超えた地震動であると理解しています。最低水準を規定する建築基準法で要求している（エネルギー法などの）設計法を、過大入力地震動を対象として提案することには、混乱を生じる可能性があります。提案するエネルギー法の利活用の仕方を、わかりやすく理解できるように記載しておくと思います。
- 5) 鋼構造年次論文報告集を、査読論文としてカウントするには違和感を持ちました。
- 6) 本研究成果が活かされるよう、次フェーズ（設計、評価技術の開発）にも期待します。
- 7) 建築学会等での学会発表が多数の共同研究者との共著で行われている。一方、査読付き学術論文の出版数を今後増やすようにする等、成果の普及のために論文の取りまとめと出版を期待します。
- 8) 建物の損傷を地震直後に判定する上で安価なMEMSセンサ等を使った常時ヘルスマニタリングは重要な技術開発項目として、今後研究を進展させていただけたらと思います。

参考：建築研究所としての対応内容

- 1)、5)、7) 今後、得られた成果を、建築研究資料や査読付きの論文などに、随時、発表して成果の普及に努めたいと思います。

- 2) 梁の損傷が地震動特性や梁端部のディテールによってかなり異なることが明らかになったので、今後、梁の損傷と構造物としての被災度との関係について検討を行い、地震後の建築物の被災度区分判定に有益な資料を作成していきたいと思います。
- 3) 成果として提案しているエネルギー法による耐震性能評価方法については、建築物の倒壊や崩壊を判定するための手法として提案していますが、実験から得られた損傷状況を整理することで、性能設計と関連付けた評価も可能ですので、そのような方向での検討も進めていきたいと思います。
- 4) 現在の耐震設計レベルを超える巨大地震に対して、設計者が、鋼構造建築物の倒壊防止策を検討したいと考えた場合に、ここで提案するエネルギー法による評価法を用いることで、容易に検討できるようにすることが最終的な目標です。このような趣旨や提示する評価法の利活用の方法などについても、今後、わかりやすく説明していきたいと思います。
- 6) 本研究で得られた梁の性能評価方法の研究成果を踏まえて、後継の研究課題では、柱の性能評価方法についての検討を行って、巨大地震に対する建築物の倒壊防止のための設計、評価技術を提示したいと思います。
- 8) 安価な MEMS センサ等を使った損傷検知手法についても、今後、実用性を考慮した検討を行っていききたいと思います。

3. 評価結果

- A 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができる。
- B 研究開発課題として、目標の達成を概ね見込むことができる。
- C 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができない。