

# 「極大地震に対する鋼構造建築物の倒壊防止に関する設計・評価技術の開発」(令和1年度～令和3年度) 評価書 (終了時)

令和4年4月6日(水)  
建築研究所研究評価委員会  
構造分科会長 田才 晃

## 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。現在、相模トラフ沿いの地震についての検討が行われており、そこで想定される地震動は、1～2秒程度の短周期領域での速度応答スペクトルが、地域によっては現状の耐震基準の数倍程度のレベルになることが予想されている。このような地震動に対して、現状の耐震基準で設計されている中低層建築物には大きな損傷が生じることが予想され、建築物の倒壊や崩壊の危険性も考えられるレベルである。このような、現行基準法の極稀地震のレベルを超えるような極大地震動に対して、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の解明と倒壊防止のための評価法、設計法の確立が急務である。

このような極大地震動に対する鋼構造建築物の倒壊、崩壊挙動では、梁端部の破断とともに柱にもヒンジが発生して、最終的には柱の座屈や破断による耐力低下によって建築物が崩壊すると考えられる。鋼構造建築物の倒壊、崩壊を防止するためには、柱の局部座屈や破断に伴う耐力劣化現象を解明し、それを評価する方法が必要となる。前年度までの課題では、梁端部破断までの疲労限界性能とそれを用いた評価法を検討した。そこで本研究課題では、鋼構造建築物の倒壊や崩壊を防止するために、鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討を行うとともに、柱の耐力劣化による建築物の倒壊を防止するための評価法や設計法を確立することを目的として、実験的、解析的検討を行う。

また、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、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。前年度までに実施した梁端部の損傷検知手法のうち、実用化の可能性が高いと判断された手法について、外装材等の非構造部材や床スラブなどがある場合の影響を調べるための実験的検討を行う。

相模トラフ沿いの地震については、近々に、内閣府等から情報が公表されると考えられる。それに対して、建築物がどのような応答になるか等を適切に評価し、倒壊や崩壊を防止する方法を確立することは、建築研として重要な任務と考えられる。

### (2) 研究開発の概要

本研究課題では、鋼構造建築物の柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討を行うとともに、柱部材の耐力劣化による建築物の倒壊を防止する評価法や設計法を確立することを目的として、実験的、解析的検討を行う。また、地震後の梁端部等の破断等の損傷検知手法に関しては、実用化の可能性が高いと考えられる手法を対象にして、外装材等の非構造部材の影響を調べるための検討を行う。

### 1) 鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討

鋼構造建築物の柱部材に関して、繰り返し変形に対する柱の破断や局部座屈による耐力劣化までの限界繰り返し性能を明らかにするために、一定振幅での多数回繰り返し载荷による実験を行い、柱の疲労限界性能曲線を検討する。

### 2) 柱部材の破断等を伴う鋼構造建築物の倒壊を防止するための評価法と設計法の検討

柱の破断や局部座屈に伴う耐力劣化による建築物の倒壊を防止するための評価法や設計法を確立することを目的として、振動台実験や相模トラフ沿いの巨大地震で想定される地震動による地震応答解析等を行う。また、柱の疲労限界性能曲線を考慮した評価法としてエネルギー法による評価法について検討し、建築物の倒壊を防止するための設計法を検討する。

### 3) 地震後の鋼構造建築物の梁端部破断等の推定のための非構造部材等の影響を考慮した実用的な損傷検知手法の検討

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、前年度までの検討で実用化の可能性が高いと判断された手法（地震計の加速度の積分、スマホによる被災度評価、ピエゾセンサによる破断検知、等）について、外装材等の非構造部材等がセンサの検知に及ぼす影響を調べるための実験的検討を行う。

## (3) 達成すべき目標

- 1) 鋼構造建築物の柱部材の破断や局部座屈による耐力低下を考慮した疲労限界性能曲線式の提示。
- 2) 柱部材の破断等による鋼構造建築物の倒壊までの評価法と倒壊防止に関する設計法に関する技術資料の提示。
- 3) 実建物の地震後の梁端部の破断の発生の推定が可能な実用化も考慮した手法に関する技術資料の提示。

## (4) 達成状況

### 1) 鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討

繰り返し変形に対する鉄骨柱の破断や局部座屈による耐力劣化までの限界繰り返し性能を把握するために、鋼管柱 (BCR295) 試験体の多数回繰り返し载荷による実験を行った。実験パラメータは、幅厚比、軸力比、せん断スパン比、载荷履歴（単調载荷、漸増载荷、一定振幅、変動振幅）であり、合計 48 体の実験結果について、柱部材の限界繰り返し性能に関するデータ整理と分析を行った。幅厚比や履歴振幅によって、終局状態は局部座屈または破断に分類され、それらの限界繰り返し性能に関する評価式を検討し、提案した。

### 2) 柱部材の破断等を伴う鋼構造建築物の倒壊を防止するための評価法と設計法の検討

建築基準法の極希地震よりも大きな極大地震動（大きな速度応答スペクトルや大きなエネルギースペクトル）に対して、建物の倒壊や崩壊を防止するための設計法を検討するために、このような入力地震動や柱、梁部材の限界性能評価式を考慮できる方法として、エネルギー法による安全性検証方法を検討し、提案した。提案した検証方法を用いて、5 つの試設計建物（4 層事務所、8 層事務所、9 層事務所、12 層事務所、4 層物流倉庫）を対象に検討を行い、基準法の極希地震、長継続時間地震、直下地震に対する設計検討を行った。

一般に、梁崩壊形で設計されている建物でも 1 階柱の柱脚にはヒンジが生じ、この部位も含めた安全性検証方法が必要と考えられるため、柱部材の限界変形を、柱部材の等価な繰り返し回数と柱の限界性能評価式から算定する方法を検討し、提案した。この方法で計算した結果、1 階の柱に幅厚比 20~22 程度の角形鋼管柱が使われる場合、梁端部で決まる限界層間変形よりも柱部材で決まる限界層間変形の方が大きくなり、角形鋼管柱の幅厚比が 30 程度の場合には、鋼管柱の限界層間変形角の方が小さくなる可能性が高いことが

わかった。

既往の研究における角形鋼管柱の一定振幅での静的載荷実験の地震動応答下での妥当性を検証するために、地震動特性、柱の幅厚比、軸力比をパラメータとした振動台実験を行なった。2019年度と2021年度に実施した合計18体の角形鋼管柱の振動台実験結果について、実験から得られた柱の塑性率の時刻歴データを使って、レインフロー法とマイナー則の適用によって各柱試験体の限界性能評価式を計算し、それと既往の静的載荷実験の結果を比較した。その結果、静的実験と動の実験の結果はどちらも幅厚比によって分類することができ、両者は概ね同程度の性能になっていることがわかった。

### 3) 地震後の鋼構造建築物の梁端部破断等の推定のための非構造部材等の影響を考慮した実用的な損傷検知手法の検討

本研究で開発した地震計の加速度記録の積分から梁端部の損傷度Dを計算して、建物の損傷を検知する手法に関する実用化技術の検討として、2つの鉄骨造事務所建物（川崎南労働基準監督署（7階建て建物）、千葉県庁本庁舎（20階建て建物））に地震計を設置し、被災状態を表示するシステムを導入して、実際に観測を開始した。

川崎南労働基準監督署の建物は、鉄骨ラーメン構造の建物であり、1996年より建築研の強震観測（1F、2F、7Fに地震計設置）を開始している建物である。今回、新たに建物の屋上を含めた全階に無線式地震計を設置し、事務室に被災状況表示用PCを設置した。2021年10月7日の地震（震度5強）を、設置した地震計で観測しており、今回導入したシステムによる計算の結果、全階が損傷度D=0で緑色表示（無被害、軽微）となっていた。この地震で観測された加速度記録から計算した各層の層せん断力-層間変形角関係から、第1層と6、7層の層剛性が、設計図書に基づく計算の層剛性に比べてかなり高いことがわかり、これらの層で非構造部材の影響が大きい可能性が考えられ、今後のさらなる検討が必要と考えられる。

千葉県庁の建物は、超高層鉄骨ラーメン構造の建物（1996年竣工）である。2014年より建築研の強震観測（B1F、8F、19Fに地震計設置）を開始している。今回、新たに4Fと14Fに地震計を追加し、それにより高次モードの観測が可能となり、地震時には、これまでの地震計も含めた5台の地震計から、建物全層の加速度時刻歴を推定し、それらにより建物全層の梁端部の損傷度Dを計算し、各階の被災状況の推定が可能となっている。

## 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）研究開発の成果

- ① 十分に得られていると考えます。
- ② 3つの検討項目いずれにおいても目指した目標を達成できたと思います。
- ③ 鋼構造の倒壊に至る耐震性能の限界状態として鋼部材の破断と局部座屈に焦点を当て、評価方法と設計法を確立した。また、鋼部材の損傷検知システムを考案・検証し、実装を開始した。

### （2）研究成果の発表状況、外部機関との連携等

- ④ 十分な発表が行われており、大学等との連携も申し分ないと考えます。
- ⑤ 研究成果は主に建築学会の支部の報告集や建築学会の大会梗概集として数多く発表されており、広く活用されるよう努力している。
- ⑥ 多数の論文を建築学会などで発表している。また、基準整備促進事業へ参画しつつ、鋼構造に特に明るい大学・民間企業との連携を図って実施している。

### （3）総合所見

- ⑦ 是非、成果のアウトリーチ活動に尽力いただきたいと思います。（特に、地震観測による被災状況の把握）。
- ⑧ 鉄骨造建物で、極大地震時に大きな損傷を受けると予想される、各階梁端の損傷と1階柱脚の損傷に注目し、その終局状態に至る性能を定量的に評価しており、今後の設計に非常に有益な資料を提供してい

る。また、地震計を用いた建物の損傷を検知する手法に関しては、2 建物へ地震計を設置しての実証実験まで行っており、実用化の段階まで来っていると評価できるが、実証実験はまだ建物に損傷がない状況の結果にとどまっており、引き続きの検証を行うことが望ましいと考える。

- ⑨ 南海トラフ地震や首都直下地震などによる強震動予測においては、現在の耐震基準を超える地震入力が議論されており、終局限界状態をより意識した耐震設計を行う必要がある。この研究は鋼構造の終局限界状態として部材の破断と局部座屈に焦点を当て、多数の精力的な実験を行った。この実験結果に基づいて、どのような部材がどの程度の地震作用によってこれらの終局限界状態に至るかを評価する方法を提案した。さらに、多数回の繰り返し作用を考慮できるエネルギー法の枠組みにこの評価方法を入れ込んだ設計方法を確立し、試設計にて有用な知見を得た。さらに、累積損傷について振動台実験と静的載荷実験の対応状況も確認し、研究成果の妥当性をより高めた。振動台実験結果を利用して鋼構造の損傷検知システムの可能性を検討し、実建物にこのシステムを設置して観測を開始した。ただし、有益な知見が蓄積されている段階であり、社会実装が完了しているわけではない。一般の建築構造設計者に普及を図るべく、この研究課題の意義を PR するとともに成果のより平易な実務者のレベルに合わせた使い方を検討していただきたい。また、損傷検知システムは一般の認知度が高いとは言えないので、被害地震における有効性を確認し、広く PR できるまで運用を続けていただきたい。

(参考) 建築研究所としての対応内容

・ 所見⑦への対応

ご指摘いただきましたとおり、地震観測による建築物の被災状況の把握のための手法など、ここで得られた研究内容や成果を一般の方々にもわかりやすい言葉で伝え、それを社会実装していくことは、極めて重要と思いますので、今後、様々な方法でそのような活動を進めていきたいと思っております。

・ 所見⑧への対応

地震計を設置した 2 棟の建物の実証実験につきましては、この研究課題が終了しても、引き続き観測を継続し、有益な成果が得られるように対応していきたいと思っております。

・ 所見⑨への対応

本研究課題の成果である部材の限界性能評価式を利用したエネルギー法による耐震安全性評価方法につきましては、一般の構造設計技術者に、その意義や成果などをわかりやすく伝えるとともに、ご理解、ご使用いただけるよう、建築研究資料などで公表し、Excel などの簡易な計算ツールの提供なども検討したいと思います。また、地震時の損傷検知システムにつきましては、実際の地震時での有効性などを提示できるよう引き続き実建物での観測を続けるとともに、PR 活動なども行っていきたいと思っております。

### 3. 評価結果

- A 本研究で目指した目標を達成できた。
- B 本研究で目指した目標を概ね達成できた。
- C 本研究で目指した目標を達成できなかった。