

Epistula

えびすたら



国立研究開発法人建築研究所
Building Research Institute
Vol.83 発行：2020.7

特集

極大地震動に対する鉄骨造建築物の耐震対策

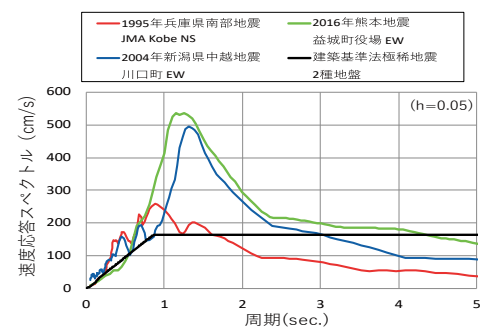
はじめに

近年の大地震では、耐震基準上の想定よりも大きな速度応答スペクトルの地震動（図1）や東北地方太平洋沖地震で生じたような継続時間の長い地震動（図2）が観測されています。今後、発生が懸念されている首都直下地震や巨大海溝型地震などでも、これらと同等以上の大きな地震が発生する可能性があります。現在、相模トラフ沿いの巨大地震について検討が行われており、地域によっては現状の耐震基準を上回るレベルの地震動（極大地震動）が予想されています^{文献1}。このような地震動によって建築物は大きな被害が生じる可能性があるため、建築物の終局限界状態（部材の破断や局部座屈によって水平抵抗力が低下する状態）の挙動を明らかにして、その評価法や設計法を確立しておく必要があります。特に、鉄骨造建築物では、継続時間の長い地震動で鉄骨部材が繰り返し変形することによって疲労的に破断する可能性があります。そのような現象への対策が急務と考えられています。

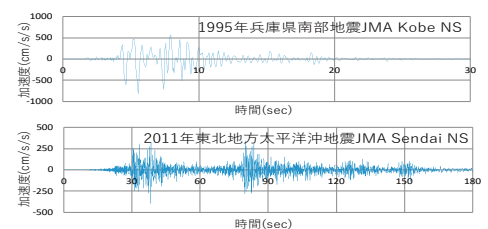
また、鉄骨造建築物では構造躯体が内外装材や耐火被覆に覆われているために、地震が発生した後に柱や梁などの構造部材の被害状況を直接確認できないという問題があります。建築物管理者の迅速で適切な判断や居住者の安全を確保するためには、建築物の梁部材等の被害の可能性や損傷箇所を即座に検知する手法が必要と考えられます。ここでは、このような問題に対する建築研究所の研究成果と現在実施中の研究内容について紹介します。

長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震対策

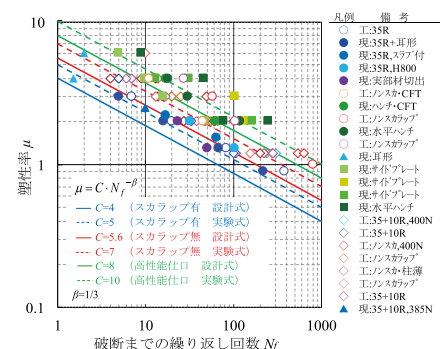
2003年に発生した十勝沖地震を契機として長周期地震動への社会的関心が高まり、2011年3月の東北地方太平洋沖地震により、都心の高層建築物が長時間揺れ続けたことはまだ私たちの記憶にも新しいところです。南海トラフを震源域とする巨大地震により、東京、名古屋、大阪などの大都市圏で長周期地震動が励起され、免震や超高層建築物などの長周期が卓越する構造物に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されました。このような長周期地震動は、継続時間が長いことも特徴であり、超高層鉄骨造建築物の部材、接合部、骨組がこれまで想定されていない多くの繰り返し変形によって、どの程度まで構造性能を発揮するか十分な知見がありませんでした。そのため、国土交通省建築基準準備促進事業の検討課題として「長周期地震動に対する鉄骨造建築物の安全性検証方法に関する検討（2010～2012年度）」が実施され、建築研究所では、「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化（2011～2012年度）」の研究課題の中で、共同研究として検討を行いました。



■ 図1 過去の地震の観測波の速度応答スペクトル



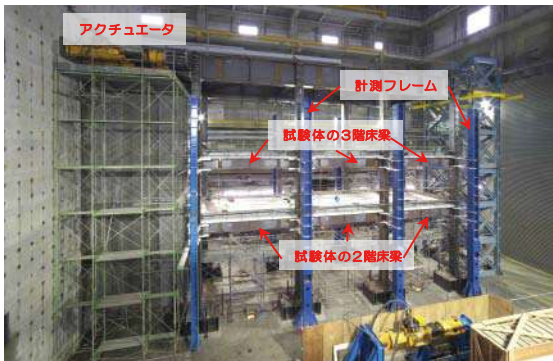
■ 図2 観測された地震波の時刻歴



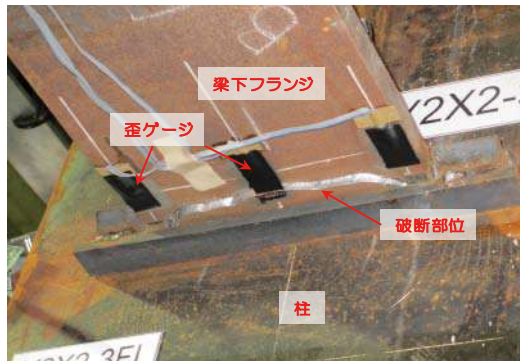
■ 図3 様々な仕様の梁端部の破断までの繰り返し回数と疲労性能評価式

この検討課題では、鉄骨造の梁部材、柱部材、梁端接合部、実大骨組等に対して、多数回繰り返し変形を与える載荷実験が行われました。特に地震時における建築物の主要なエネルギー吸収部材である梁部材については、図3に示すように、既往の研究も含めた様々な仕様の梁端部の繰り返し載荷実験の結果に基づいて、3種類の仕様（スカラップ有、スカラップ無、高性能仕口）^{注1}に対する設計用の疲労性能評価式とそれを用いた梁の損傷度D値の計算方法が提案されました。また、この疲労性能評価式の妥当性は、超高層建築物の中間階の挙動を模擬した実大3層鉄骨架構試験体（写真1）を用いて、梁端部が破断（写真2）するまで載荷した実験によって検証されました^{文献2}。

この疲労性能評価式を用いて梁の損傷度D値を計算（1.0未満であることを確認）することによる超高層鉄骨造建築物の長周期地震動に対する安全性検証方法は、2017年4月に建築研究所のホームページの長周期地震動対策（<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/512.pdf>）で公開され、指定性能評価機関における性能評定において、長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性の検証方法として参照され、実務で使われています。



■写真1 建築研究所で行われた実大3層鉄骨架構の実験



■写真2 実験後の梁端部下フランジの破断の状況

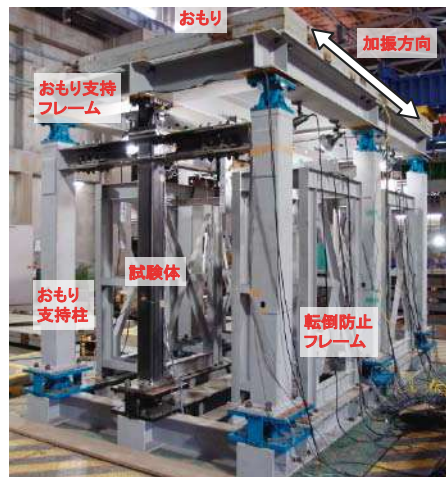
中 低層鉄骨造建築物の梁端部の耐震性能と安全性検証法

超高層鉄骨造建築物は長周期地震動対策として提示された上記の方法によって、想定される地震動に対する安全性が確認されますが、中低層鉄骨造建築物についても、継続時間が長い地震動に対しては同様に梁端部が破断する可能性があると考えられます。そこで、中低層鉄骨造建築物の梁端部（通しダイアフラム形式）^{注2}の耐震性能に関しても、上記の超高層建築物の梁端部（内ダイアフラム形式）^{注2}の疲労性能評価式が適用可能か振動台実験により検討が行われました^{文献3}（写真3）。その結果、図3に示した梁端部（スカラップ有）の静的載荷実験のプロットと写真3の鉄骨造骨組の振動台実験の梁端部が破断するまでの性能で計算した疲労曲線の結果が概ね一致し、超高層鉄骨造建築物の梁端部の疲労性能評価式が、中低層鉄骨造建築物の梁端部の評価にも適用可能であることが示されました。

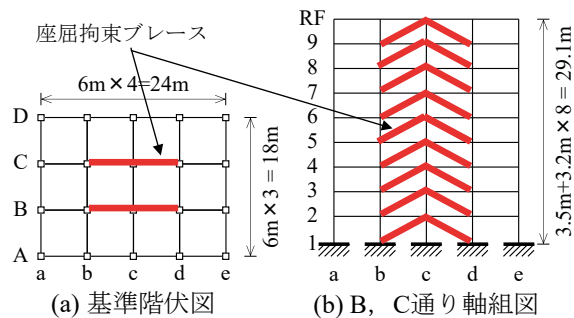
超高層建築物では耐震安全性の確認として地震応答解析を行いますので、応答解析から梁部材の損傷が得られ、それと疲労性能評価式から建築物の耐震安全性が検証できます。一方、中低層建築物の耐震安全性の確認として行われている保有水平耐力等の計算では、繰り返し変形による梁部材の損傷が直接は得られないため、このような繰り返し変形による部材の損傷をより適切に評価できる方法として、エネルギー法告示^{注3}の計算への適用が検討されました。

エネルギー法告示の計算では、各層の保有性能の算定には鉄骨部材の局部座屈を考慮した評価式が用いられています。ここでは、各層の保有性能の算定として梁端部の疲労性能評価式を用いる方法が検討され、疲労性能評価式から各層の保有エネルギー（または限界層間変形角）を計算する方法が提案されました。また、継続時間が長い地震動を考慮する方法として、継続時間が長い地震動に適用する入力エネルギーの増加係数が提案されました。

例題として、提案された検証方法を用いて図4に示す9層の試設計建築物を対象に、地震動、入力レベル、梁端部仕様、ダンパーの有無などを变化させた5つのケース（表1）を設定して、各ケースの耐震安全性の検証を行いました。図5には検討した5つのケースの検証結果が示されています。地震動の特性や大きさ、梁端部仕様、ダンパーの有無に応じて、建築物の梁端部の破断を防止して耐震安全性が確保できるかどうかは、全層で保有エネルギーが必要エネルギーより大きくなっていることによって確認されます^{注4}。各ケースで耐震安全性が確保されているかどうかの結果は表1の右欄に示されています。構造設計者は、このエネルギー法告示の計算による検証方法によって、極大地震動を考慮して地震動特性や入力レベルを設定し、それに対して鉄骨部材に破断等が生じないようにする設計を容易に検討できるようになります。なお、これらの検討は、建築研究所の指定課題「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（2016～2018年度）」で実施したものです。



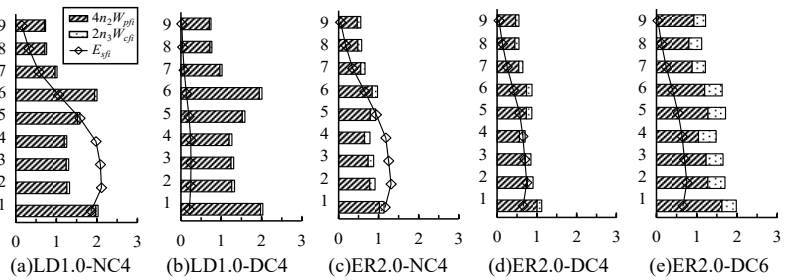
■写真3 鉄骨造骨組の振動台実験



■図4 9層試設計建築物

■表1 検討したケース

ケース名	地震動	入力レベル	梁端部仕様	ダンパーの有無	検証結果
(a) LD1.0-NC4	長継続時間	1.0倍	スカラップ	無	×
(b) LD1.0-DC4				有	○
(c) ER2.0-NC4	極稀	2.0倍	ノンスカラップ	無	×
(d) ER2.0-DC4				有	○
(e) ER2.0-DC6				有	○

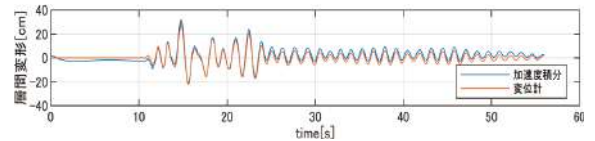


■図5 各層の保有エネルギー（棒グラフ）と必要エネルギー（◇）の比較

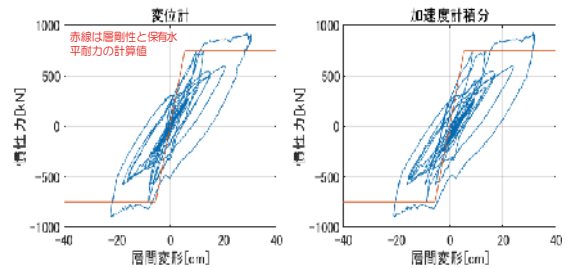
疲労性能評価式を用いた地震後の損傷検知

一般的な鉄骨造事務所建築物等では、構造躯体が内外装材や耐火被覆で覆われているため、地震後の建築物の安全性を即座に判断することが困難な場合があります。そこで、地震後の鉄骨造建築物の梁端部の損傷の有無を検知する手法として、前述の超高層鉄骨造建築物の安全性検証方法として提案された疲労性能評価式と梁の損傷度D値を用いる方法について、現在実施中の建築研究所の指定課題「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（2019～2021年度）」の中で検討しました。この方法では、建築物の各階に設置した地震計の加速度記録を用いてそれを積分して層間変形時刻歴を作成し、各層の損傷の情報と疲労性能評価式を用いて梁の損傷度D値を計算します。この値が1以上の場合、当該層の梁端部が破断している可能性があることを意味します。

この損傷検知手法を、E-ディフェンス^{注5}で行われた実大3層鉄骨造建築物の振動台実験のデータ^{文献4}に適用し、その妥当性を検討しました。この振動台実験のJR鷹取波100%^{注6}の加振では、3層の実大試験体の1層（2階梁端部）と2層（3階梁端部）の梁下フランジで破断が観察されています。ここでは、このJR鷹取波100%の加振実験に、この手法を適用した結果を示します。図6は、加速度記録の積分から得られた1層の層間変形時刻歴を変位計で計測された時刻歴と比較したものです。また、図7は1層の慣性力-層間変形関係を比較したものです。加速度記録の積分は、変位計の結果とほぼ一致していることがわかります。これらの2種類の層間変形から得られるこの試験体の1層と2層の層の損傷の指標値（最大塑性率と累積塑性変形倍率）とそれらに基づいて計算した梁の損傷度D値を表2に示します。層の最大塑性率と累積塑性変形倍率の値を精度よく推定し、それらから計算される梁の損傷度D値も概ね同じ値が推定されており、その値は梁端部が破断している可能性があることを意味する1を上回る7～27程度の大きな値となりました。一方、この実験のJR鷹取波80%^{注6}の加振実験では、梁端部に亀裂は生じましたが、破断しておらず、計算されたD値は0.2～0.6でした。梁端部が破断したJR鷹取波100%の加振のD値が、損傷状況に応じて上述の通り大きな値となっていることから、この損傷検知手法が、地震後の鉄骨造建築物の梁端部の損傷状況（破断、亀裂発生、等）の推定に有効である可能性が示されました。



■図6 層間変形時刻歴の比較



■図7 慣性力-層間変形関係の比較

■表2 層の損傷及び梁の損傷度D値の比較

	使用記録	層の最大塑性率	層の累積塑性変形倍率	梁の損傷度D値	梁の損傷度D値(累積)	損傷状況
1層	レーザー変位計	5.5	19.0	23.7	24.2	梁フランジ破断
	加速度積分	5.8	18.3	26.6	27.2	
2層	レーザー変位計	4.3	16.5	10.1	10.4	梁フランジ破断
	加速度積分	4.1	14.5	7.6	7.8	

おわりに

極大地震動に対する鉄骨造建築物の耐震対策への取り組みとして、超高層鉄骨造建築物の耐震安全性検証方法に梁端部の疲労性能評価式を用いる方法を紹介しました。また、この疲労性能評価式が、中低層鉄骨造建築物の梁端部の評価や地震後の損傷検知にも有効となる可能性があることが示されました。これまでも、履歴型ダンパーなどでは疲労性能評価式等を用いた損傷評価は行われていましたが、これらの研究から、鉄骨造の梁部材や柱部材の評価にも有効であることがわかってきました。地震に対する鉄骨造建築物の安全性の向上のために、このような耐震安全性評価の研究が今後さらに発展することが期待されています。

<注・参考文献>

- 注1 スカラップとは、鉄骨接合部の溶接線が交差する場合にどちらかの溶接線を通すために設ける孔のことです。鉄骨造建築物の梁端接合部では、梁にスカラップを設ける接合方法（スカラップ有）と、スカラップを設けない接合方法（スカラップ無）があります。高性能仕口は、梁端部の断面を一般部分の梁断面に比べて大きくした梁端接合部のことです。
- 注2 ダイアフラムは、柱と梁の応力伝達を補うための厚板で、一般的に中低層建築物の接合部には通しダイアフラム（柱を梁の上下フランジ位置で切断してそこにダイアフラムを入れる）形式が使われ、超高層建築物には内ダイアフラム（柱内部の梁の上下フランジ位置にダイアフラムを入れる）形式が使われます。
- 注3 平成17年国土交通省告示第631号「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算等の構造計算を定める件」。
- 注4 建築物の各層の保有エネルギーは各層の保有水平耐力と限界層間変形までの塑性変形量との積で計算され、各層の必要エネルギーは地震により建築物の各層に生じる塑性歪みエネルギーとして計算されます。設計された建築物の全ての層で保有エネルギーが必要エネルギーより大きい場合に当該建築物の耐震安全性が確保されます。
- 注5 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設。
- 注6 1995年兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で観測された地震波で、100%は観測された地震波の原波を入力、80%は振幅を原波の80%とした地震波の入力です。
- 文献1 地震本部：長周期地震動評価 2016年試作版-相模トラフ巨大地震の検討、https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshmm/16_choshuki/
- 文献2 長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する検討、建築研究資料No.160、2014.7
- 文献3 廣嶋哲、他：梁端破断を伴う鉄骨造2スパン骨組の地震応答性状に関する振動台実験、構造工学論文集Vol.65B、pp.443-450、2019.3
- 文献4 国立研究開発法人防災科学技術研究所：「ASEBI」<https://www.edgrid.jp> より、課題名「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」

スマートフォンによる大規模施設内の避難誘導

スマートフォン（スマホ）の普及や通信環境の発達によって、動画など膨大な情報がどこでも即座にやり取りできるようになってきています。そこで、地下街などの複雑な大規模施設で火災などの災害が発生したときに、リアルタイムでスマホの画面に非常口までの避難経路をわかりやすく示して誘導する方法（写真1）を研究しています。

まずその可能性を検討するために、実験上の安全確保を前提に、スマホの使い方が歩行速度に及ぼす影響を建築研究所の廊下や階段を使って実験しました（写真2）。実験に参加した成人男女12名が、通常の歩行のほかに、前方の視野を表示させたスマホの画面を見ながら歩く場合（「視野付きながら」と、スマホの画面で文字を打ちながら歩く場合（「文字打ちながら」）について、それぞれ廊下や階段を歩く速度を測定しました。

その結果、例えば「文字打ちながら」の場合の歩行速度は、通常の歩行速度より約15～30%低下しましたが、「視野付きながら」の場合、廊下を歩く速度については7%の低下であり、通常歩行に対して速度低下の幅が最も小さいことがわかりました。

これは大規模施設内の廊下などの水平方向の避難誘導に、前方の視野をスマホの画面に表示させて避難誘導する技術の見通しをつけるものと考えられ、引き続き具体的な誘導方法などについて研究を行っています。

詳細は専門紙記者懇談会「スマホによる災害時の避難誘導方法（階段・廊下）の検討」をご覧ください。

<https://www.kenken.go.jp/japanese/information/information/press/2019/index.html>



写真1 スマホによる避難誘導のイメージ



写真2 建築研究所での歩行実験の様子

出版のご案内

■建築研究資料

- No.190 各種空調設備システムの潜熱負荷処理メカニズムを踏まえたエネルギー消費量評価法に関する検討（2019.4）
- No.191 業務用コージェネレーション設備の性能評価手法の高度化に関する研究（2019.4）
- No.194 2017年9月19日メキシコ中部地震建築物被害調査報告（2019.4）
- No.195 大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造的な性能評価に関する研究（2019.10）
- No.196 空き家の改修による高齢者の居場所づくりの手引き（2020.3）
- No.197 実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証（2020年版）（2020.3）

編集後記

今回のえびすとらでは、構造研究グループの活動から、極大地震動に対する鉄骨造建築物の耐震安全性に関する研究成果を紹介しました。

1995年兵庫県南部地震の時期を境にして、我が国の地震環境は活動期に入ったと言われていいます。それに対応して、国内の地盤上の強震観測網は格段の進展を遂げてきました。とくに近年の大地震では、建築基準法の2次設計レベル（建築物が倒壊・崩壊等しないことを確認するための設計用地震動レベル）を大きく超える振幅の強震記録が少なからず得られています。また、かつての設計法では想定されていなかった長周期の地震動や長時間の（繰返し回数の多い）地震動も観測されています。

その一方で、社会的に重要度の高い建築物などでは、大地震の後でも地震の前と変わらず継続して使用できる性能が求められる場合も増えてきました。耐力が高く、粘り強い鉄骨造建築物においても、これらの地震外力に対して、要求性能を満たすべく、終局状態を適切に評価した上で耐震設計を行うことが求められていると言えるでしょう。（H.A.）

建築研究所の紹介動画公開のご案内

建築研究所の業務を広く知っていただくことを目的として、動画共有サービスYouTubeに「国立研究開発法人建築研究所BRI Channel」を開設しました。

現在、建築研究所の紹介動画「国立研究開発法人建築研究所～その使命と最近のトピック～」を公開しています。

今後も建築研究所の研究等について分かりやすく紹介した動画や、英語版の動画を公開していく予定です。

建築研究所ホームページ（<http://www.kenken.go.jp/>）や、以下のQRコードからアクセスできます。是非ご覧ください。

このバナーが目印です！



業者の皆様へ 「調達情報メールサービス」をご利用下さい！！

建築研究所では、一般競争や企画競争に関する情報のメール配信サービスを提供しています。ご登録いただきますと、新たな調達案件の公告(公示)開始と同時にメールが配信され、弊所のホームページを見ることなくタイムリーに情報を入手することができます。

是非ご利用下さい。詳しくは、建築研究所ホームページをご覧ください。（<http://www.kenken.go.jp/cyoutatsu-ml/index.html>）

このバナーが目印です！



- バックナンバーは、ホームページでご覧になれます。
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/epistula.html>



- えびすとらに関するご意見、ご感想はこちらまで。
epistula@kenken.go.jp



第83号 令和2年7月発行
編集：えびすとら編集委員会
発行：国立研究開発法人 建築研究所
〒305-0802 茨城県つくば市立原1
tel. 029-864-2151
fax. 029-879-0627