

## 第1章 はじめに

### 1.1 背景、調査項目及び調査目的

最近の地震動予測研究の進捗により、南海トラフを震源域とする巨大地震等によって、東京、名古屋、大阪などの大都市圏のある大規模堆積平野で長周期地震動が強く励起され、超高層建築物あるいは免震などの長周期構造物に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている。同指摘を鑑み、現在の超高層建築物等の性能評価で用いられている設計用の長周期地震動は、地域や周期によっては、これまでの告示波の2倍程度の速度応答スペクトルとなる場合があり、通常のクライテリア（層間変形角 1/100、塑性率 2）で超高層鉄骨造建築物の設計を行うと、過大な断面が必要となり、設計が困難となる可能性もある。そのため、このような地震動に対して、梁部材や柱部材の限界性能に基づいた設計を行うことで、通常のクライテリアを用いない設計法が要望されている。また、長周期地震動下では梁や柱などの部材が多数回繰返し荷重を受けるため、部材の多数回繰返し性能を把握することが重要である。

通常のクライテリアを用いない設計の場合、建築物の最大層間変形角が現状に比べて大きくなる可能性があるため、それらの骨組性状を把握するとともに倒壊までの余力も検討しておく必要がある。なお、平成 22～24（2010～2012）年度の国土交通省建築基準整備促進事業（以下、「基整促」という）に於ける検討では、一般的な超高層建築物が梁降伏型で設計されていることを念頭に、梁端部の多数回繰返し実験を主に実施し、安全性検証に用いる設計用疲労曲線を提案したが、柱部材については基本性能を把握するに留まっていた。そのため、現状では鉄骨柱部材や CFT（コンクリート充填鋼管）柱部材には設計用疲労曲線が無く、長周期地震動により建築物が大きな応答変形を生じている状態での安全性検証を行う技術的な知見が不十分である。なお、本報告での、「疲労」とは多数回繰返しにより、梁端部の破断、柱部材の局部座屈等により荷重が低下していく現象とする。

これらの問題を解決することを目的として、主に高層鉄骨構造を対象に平成 30(2018)年度から 3 カ年にわたり、基整促として「S29 長周期地震動に対する超高層鉄骨造の安全性検証法に関する検討」の調査研究が実施された。この課題の調査研究項目は、(1)長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の地震応答解析の実施と耐震安全性検証方法の検討、(2)鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討、(3)CFT 柱部材の設計用疲労曲線の検討、の 3 項目である。以下に、これらの調査項目の各年度（平成 30 年度～令和 2 年度）における調査内容を示す。

#### 1.1.1 長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の地震応答解析の実施と耐震安全性検証方法の検討(平成 30 年度～令和 2 年度)

平成 30 年度：長周期地震動下の超高層鉄骨造建物の応答性状の実態を把握することを目的とし、超高層建築物をモデル化した建物モデル（柱：鉄骨および CFT）を作成し、鉄骨梁および柱部材の劣化を考慮した部材特性モデルを用いて、時刻歴応答解析を実施する。部材の劣化としては、鉄骨梁では局部座屈および梁端フランジ破断を、鉄骨柱および CFT 柱に対しては、柱脚部の局部座屈を考慮する。

令和 1 年度：柱部材の設計用疲労曲線の仮設定および柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全

性検証方法の試行と提案を行うことを目的とし、超高層建築物をモデル化した建物モデル（柱：鉄骨および CFT）を作成し、鉄骨梁および柱部材の劣化を考慮した部材特性モデルを用いて、入力レベルを変化させた時刻歴応答解析を実施する。部材の劣化としては、鉄骨梁では局部座屈および梁端フランジ破断を、鉄骨柱および CFT 柱に対しては、柱脚部の局部座屈を考慮する。

令和 2 年度：超高層鉄骨造建築物の地震応答解析に基づく耐震安全性検証法（耐震安全性評価フロー、層間変形クライテリア、柱の損傷評価法）の提案を行うことを目的とし、超高層建築物をモデル化した建物モデル（柱：鉄骨および CFT）を作成し、鉄骨梁および柱部材の劣化を考慮した部材特性モデルを用いて、長周期地震動を係数倍して入力レベルを漸増させた時刻歴応答解析を実施する。部材の劣化としては、鉄骨梁では局部座屈および梁端フランジ破断を、鉄骨柱および CFT 柱に対しては、柱脚部の局部座屈を考慮する。

### 1.1.2 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討(平成 30 年度～令和 2 年度)

平成 30 年度：鉄骨部材の基本的な多数回繰り返し特性を把握することを目的として、鉄骨柱部材に対して、载荷パターンおよび軸力を変化させた多数回繰り返し実験を実施する。载荷パターンとしては振幅一定を、軸力としては軸力比一定を検討する。また、角形鋼管の幅厚比および径高さ比についても検討を行う。

令和 1 年度：鉄骨柱部材の設計用疲労性能曲線を提案することを目的とし、平成 30 年度の実験結果および既往の実験結果を用い、鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討を行う。また、平成 30 年度の実験結果について、有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションを実施し、どのような現象の解析が可能性かの検討を行う。

令和 2 年度：鉄骨柱部材の設計用疲労性能曲線を提案することを目的とし、平成 30 年度と同様の装置を用いて、変動軸力、変動振幅等に関する鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を実施する。また、平成 30 年度の実験結果および既往の実験結果等を用い、鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討を行う。

### 1.1.3 CFT 柱部材の設計用疲労曲線の検討(平成 30 年度～令和 2 年度)

平成 30 年度：一定変位振幅繰り返し载荷を受ける CFT 柱部材の疲労性能曲線式を提案することを目的とし、既往の研究に於ける CFT 柱部材の多数回繰り返し実験のデータについて分析を実施し、既往実験データに基づき CFT 柱部材の設計用疲労曲線式の検討を行う。

令和 1 年度：CFT 柱部材の設計用疲労性能曲線を提案することを目的とし、一定軸力下で载荷パターンを変化させた多数回繰り返し実験を実施する。载荷パターンは一定振幅と変動振幅とし、変動振幅の実験結果から Miner 則の成立性の検討を行う。また、径高さ比についても検討を行う。

令和 2 年度：CFT 柱部材の設計用疲労性能曲線を提案することを目的とし、変動軸力下での多数回繰り返し実験を実施する。振幅は一定振幅とし、変動軸力下での CFT 柱部材の多数回繰り返し特性を把握する。また、設計用疲労曲線の検討を行う。

## 1.2 各調査項目の具体の検討内容

上記に掲げた3つの調査項目について、各年度における具体的な検討内容、パラメータ等を以下に示す。

### 1.2.1 超高層鉄骨造建築物の地震応答解析に基づく耐震安全性検証法の検討

#### (1) 平成30年度

建物および部材モデルの設定と時刻歴応答解析の実施を、主な実施項目とする。

##### 1) 建物のモデル化

超高層建築物をモデル化した建物モデルを、①鉄骨柱および②CFT柱を考慮して設定する。

##### 2) 部材のモデル化

鉄骨梁および柱部材の劣化を考慮した部材特性を、下記①②に着目してモデル化する。

① 鉄骨梁 : 局部座屈、梁端フランジの破断

② 鉄骨柱およびCFT柱 : 柱脚の局部座屈

##### 3) 上記モデルに基づく時刻歴応答解析

鉄骨柱またはCFT柱を有する超高層建築物の建物モデルに対して、各部材の劣化を考慮した部材モデルを用いて、時刻歴応答解析を実施する。

#### (2) 令和1年度

柱部材の設計用疲労曲線の仮設定および柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証方法の試行と提案を実施する。

##### 1) 柱部材の設計用疲労曲線の仮設定

平成30年度実施した実験や既往実験を基に、設計用疲労曲線を仮に設定する。この時を用いるパラメータは地震応答解析により容易に算定できることを念頭に置いて設定する。

##### 2) 柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証方法の試行と提案

仮設定した設計用疲労曲線を用いた安全性検証方法を試行する。この時長周期地震動の入力レベルを変動させ、倒壊・崩壊に至る建物の状態を確認する。

#### (3) 令和2年度

柱部材の設計用疲労曲線を用いた建物健全性の確認、超高層鉄骨建築物の耐震安全性検証法を検討する

##### 1) 柱部材の性能曲線に基づく健全性確認

2年間の検討を通じて設定される柱部材の性能曲線に基づき、建物モデル(S30、CFT32)に於ける柱部材の健全性を確認する。なお、S30は30層の鉄骨造建物、CFT32は32層の柱CFTの建物である。

##### 2) 柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証方法の試行と提案

超高層鉄骨造建築物を構成する構造部材の内、大入力に対して劣化を考慮すべきと考えられる梁および柱について性能曲線を設定し、それに基づき、建物全体としての耐震安全性検証法を検討する。

## 1.2.2 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討

### (1) 平成 30 年度

鉄骨柱部材に対する設計用疲労曲線式の提案を目的として、平成 30 年度は既往知見の調査および下記に示す鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を実施する。

多数回繰り返し実験では、幅厚比、径高さ比、軸力比および载荷パターン等を変化させた実験を実施し、多数回繰り返し载荷時の鉄骨柱部材の変形能力を把握する。

- ・縮 尺：1/5 程度
- ・試験体数：11 体（角形鋼管柱を対象）
- ・実験パラメータ：[部材因子] 幅厚比、径高さ比  
[外力因子] 振幅（一定振幅）、軸力比（一定軸力）

### (2) 令和 1 年度

平成 30 年度の実験結果および既往の実験結果を用い、鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討を実施する。また、平成 30 年度の実験結果のシミュレーションについて、有限要素法（FEM）を用いた解析を行い、局部座屈とき裂発生を併発するような解析が可能かの検討を行う。

### (3) 令和 2 年度

変動軸力、変動振幅等に関する鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験を平成 30 年度と同様の装置にて実施するとともに、設計用疲労曲線の検討を行う。以下に、主な実験パラメータを示す。

- ・縮 尺：1/5 程度
- ・試験体数：7 体（角形鋼管柱を対象）
- ・実験パラメータ：[载荷パターン] 一定振幅（ $R=1/75\sim 1/33$ ）、変動振幅（ $R=1/400\sim 1/33$ ）  
[軸力] 軸力比（一定：0.3、0.6、0.8、変動： $0.3\pm 0.5$ ）

## 1.2.3 CFT 柱部材の設計用疲労曲線の検討

### (1) 平成 30 年度

CFT 柱部材に対する設計用疲労曲線式の提案を目的として、平成 30 年度は既往の研究（平成 25 年度基準整備促進事業 S10、日本鋼構造協会・委員会）による実験データの分析および疲労曲線式の検討を行う。

### (2) 令和 1 年度

主に変動振幅に関する CFT 柱部材による多数回繰り返し実験を実施し、変動振幅の実験結果から Miner 則の成立性の検討を行う。また、令和 1 年度の実験結果および既往の実験結果を用い、CFT 柱部材の設計用疲労曲線の検討を実施する。下記に実験パラメータ等を示す。

- ・縮 尺：1/5～1/8 程度
- ・試験体数：10 体（CFT 柱試験体：角形断面を対象）、1 体（角形中空試験体）
- ・実験パラメータ：[载荷パターン] 一定振幅、変動振幅  
[軸力比] 0.3、0.6（2 水準）  
[座屈長さ・断面せい比] 10、20（2 水準）

### (3) 令和2年度

変動軸力下の CFT 柱部材の多数回繰り返し実験 (5 体) を実施するとともに (鹿島で実施)、JSSC 委員会で提案した評価式を変動振幅および変動軸力に適用できるように設定して CFT 柱部材の設計用疲労曲線の検討を行う。

上記実験では、鉄骨柱と同じ装置を用いて、座屈長さ・断面せい比の比較的大きな試験体 ( $D/Lk=10$ ) を用いて多数回繰り返し実験を実施する。以下に、主な実験パラメータを示す。

- ・縮 尺 : 1/5~1/8 程度
- ・試験体数 : 5 体 (角形鋼管柱を対象)
- ・実験パラメータ : [载荷パターン] 一定振幅 (振幅 : 大、小)  
[軸力] 軸力比 (変動 :  $0.15 \pm 0.35$ 、 $0.3 \pm 0.3$ 、 $0.3 \pm 0.4$ )

### 1.3 本書の構成

本建築研究資料は、前述した建築基準整備促進事業「S29 長周期地震動に対する超高層鉄骨造の安全性検証法に関する検討」における3年間の調査検討の各年度の報告書を、下記の目次構成により整理し、再編集したものである。

第1章「はじめに」には、研究の背景と目的、検討内容、本書の構成、調査体制を示す。

第2章は、「鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討」であり、1.2節「1.2.2 鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討」で示した各年度の検討内容を各節に取りまとめている。内容としては、鉄骨柱部材の基本的な多数回繰り返し特性を把握することを目的として、・载荷パターンおよび軸力を変化させた多数回繰り返し実験による検討、・平成30年度の実験結果および既往の実験結果を用いた鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討、・有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションによる解析の可能性の検討、・変動軸力、変動振幅等に関する鉄骨柱部材の多数回繰り返し実験とこれまでの実験結果等を用いた鉄骨柱部材の設計用疲労曲線の検討、である。

第3章は、「角形CFT柱部材の設計用疲労曲線の検討」であり、1.2節「1.2.3 CFT柱部材の設計用疲労曲線の検討」で示した各年度の検討内容を各節に取りまとめている。内容としては、・CFT柱部材に対する設計用疲労曲線式の提案を目的とした既往の研究による実験データの分析および疲労曲線式の検討、・変動振幅に関するCFT柱部材による多数回繰り返し実験とCFT柱部材の設計用疲労曲線の検討、・変動軸力下のCFT柱部材の多数回繰り返し実験（5体）の実施とCFT柱部材の設計用疲労曲線の検討、である。

第4章は、「超高層鉄骨造建築物の地震応答解析に基づく耐震安全性検証法の検討」であり、1.2節「1.2.1 超高層鉄骨造建築物の地震応答解析に基づく耐震安全性検証法の検討」で示した各年度の検討内容を各節に取りまとめている。内容としては、・長周期地震動下の超高層鉄骨造建築物の応答性状の実態を把握することを目的とした、鉄骨梁および柱部材の劣化を考慮した部材特性モデルを用いた時刻歴応答解析の実施、・柱部材の設計用疲労曲線を用いた耐震安全性検証方法の試行と提案を目的として、入力レベルを変化させた時刻歴応答解析による検討、・超高層鉄骨造建築物の耐震安全性検証法を提案することを目的として、鉄骨梁および柱部材の劣化と設計用疲労曲線による破断を考慮した、建物倒壊までを追跡できる解析モデルを用いた時刻歴応答解析による検討、である。

第5章は、「おわりに」として、本資料のまとめを述べる。

## 1.4 調査体制

図 1.4-1 で示す調査体制にて本調査を実施した。本調査は、鹿島建設株式会社を幹事会社として、株式会社小堀鐸二研究所および公立学校法人北九州市立大学を合わせた 3 社の共同事業として実施した。また、国立研究開発法人建築研究所と事業主体間で共同研究に関する協定書を締結し、共同研究体制の下で当該調査を行った。

事業運営に当たっては、「合同WG」と「委員会」を立上げ、調査業務の円滑かつ適正な推進を図った。「合同WG」は事業主体各社と建築研究所の主要メンバーで構成され、事業主体各社が実施する調査業務の内容詳細について意見交換、相互調整および進捗管理を行う場とした。

「委員会」は、上述の「合同WG」に加えて建築鋼構造を専門とする 4 名の学識経験者に学識委員としての参加を仰ぎ、調査目的、調査対象、調査手法および結果の評価など調査業務全般において、大局的かつ学術的見地から幅広い指導・助言をいただいた。また、国土技術政策総合研究所および日本鋼構造協会を協力委員とした。

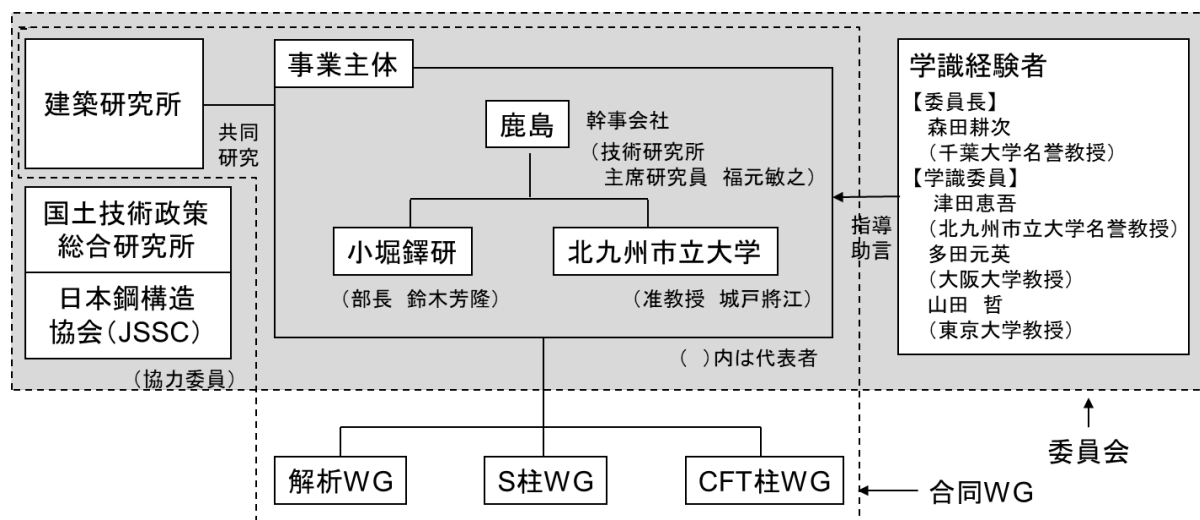


図 1.4-1 調査体制(令和 3 年 3 月時点)

また、平成 30 年度～令和 2 年度の国土交通省建築基準整備促進事業「S29 長周期地震動に対する超高層鉄骨造の安全性検証法に関する検討」を実施するために、事業主体、学識経験者、建築研究所、国土技術政策総合研究所、国土交通省、等で構成される検討委員会（本委員会及び推進委員会）を設置した。以下の表 1.4-1 に、令和 2 年度の検討委員会の委員名簿を示す。

表 1.4-1 「令和 2 年度 長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の  
安全性検証方法に関する検討」研究委員会 委員名簿(令和 3 年 3 月時点)

(順不同、敬称略)

委員長	森田 耕次	千葉大学 名誉教授
委員	津田 恵吾	北九州市立大学 名誉教授
〃	多田 元英	大阪大学大学院 工学研究科 建築工学部門 教授
〃	山田 哲	東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 教授
〃 (事業主体)	福元 敏之	鹿島建設(株)技術研究所 主席研究員
〃 (事業主体)	澤本 佳和	鹿島建設(株)技術研究所 建築構造グループ グループ長
〃 (事業主体)	上瀧 敬太	鹿島建設(株)技術研究所 建築構造グループ研究員
〃 (事業主体)	黒川 泰嗣	鹿島建設(株) 執行役員 建築設計本部 副本部長
〃 (事業主体)	鈴木 芳隆	(株)小堀鐸二研究所 構造研究部 部長
〃 (事業主体)	安本 宏	(株)小堀鐸二研究所 構造研究部 課長代理
〃 (事業主体)	城戸 将江	北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 准教授
〃 (鉄連)		
〃 (鉄連)		
〃 (鉄連)		
〃 (共同研究者)	長谷川 隆	国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員
〃 (共同研究者)	森田 高市	国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員
〃 (共同研究者)	岩田 善裕	国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員
協力委員	福井 武夫	国土交通省 住宅局建築指導課物防災対策室 企画専門官
〃	高舘 祐貴	国土交通省 住宅局建築指導課物防災対策室 構造係長
〃	三木 徳人	国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室 研究官
〃	一戸 康生	一般社団法人日本鋼構造協会 事務局長
〃	窪田 伸	日本製鐵(株) 建材事業部 建材開発技術部 部長
〃	有田 政樹	日本製鐵(株) 鉄鋼研究所鋼構造研究部 主任研究員
〃	植木 卓也	J F E スチール(株) 建材技術部建築技術室 主任部員