

## 高層鉄骨造建物の地震直後の健全度評価

### Evaluation of the Structural Soundness of High-Rise Steel Buildings Immediately After an Earthquake

久保田 淳      高橋 元美      清川 貴世<sup>1)</sup>  
澤本 佳和      鈴木 芳隆<sup>2)</sup>      小鹿 紀英<sup>2)</sup>

#### 要 約

近い将来にも発生が予想される南海トラフを震源域とする巨大地震や首都直下地震に対する一番の課題は、首都圏をはじめとする都市部の災害への対策である。都市部における高層建物は市民の生活と事業の基盤をなす重要な施設であり、これらの建物の事業継続性判断や早期復旧のための被災直後の建物の健全度評価法が求められている。高層鉄骨造建物に対して、従来行われてきた構造技術者による目視主体の応急危険度判定を実施することは困難が予想されるため、本研究では、建物内センサーによる客観的データに基づく建物の健全度評価法を提案し、本研究内で実施した振動台実験の結果を用いて妥当性を検証した。検証の結果、振動台実験と本評価法のそれぞれで評価した安全限界は概ね良い対応を示すことが分かった。さらに、振動台実験応答値に対して、健全度判定の試行を実施した。

#### 目 次

- I. はじめに
- II. 振動台実験における崩壊過程
- III. 健全度評価法の概要
- IV. 健全度評価法の検証・試行
- V. おわりに

#### I. はじめに

未曾有の被害をもたらした東北地方太平洋沖地震や熊本地震は、想定を超える地震、長時間にわたる長周期地震動、繰り返し起こる大規模な余震に対する対処の重要性を我々に再認識させた。近い将来にも発生が予想される南海トラフを震源域とする巨大地震や首都直下地震に対して、一番の課題として挙げられるのは首都圏をはじめとする都市部の災害への対策である。現行の基準法に沿った設計で耐震安全性を担保するに留まらず、設計段階から激甚災害を意識し、想定を超える地震力に対する設計を行う重要性が増しており、部材や接合部の累積損傷を考慮した設計法が必要とされている。また、近年の地震被害から、事業継続性判断や早期復旧に向けての被災直後における建物の健全度評価の重要性が再認識されている。

内閣府の報告<sup>1)</sup>の中では、南海トラフを震源域とする巨大地震による長周期地震動に対して、地震後対応力向上のために、建物内に設置したセンサーによる建物挙動のリアルタイムモニタリングの必要性が挙げられている。また、建物管理者には、地震後の限られた時間の中で建物の安全確認を行い、建物内滞在者の滞在可否および被災者・帰宅困難者の受け入れ可否を判断できる体制を構築することが求められている<sup>2)</sup>。

一方、これまで地震により被災した建物の健全性を直後に判定す

る方法として応急危険度判定<sup>3)</sup>が、地震後の恒久的使用の可否や復旧に向けての構造的補強の要否判定に被災区分判定<sup>4)</sup>が用いられてきた。しかし、前者は10階以上の建物が適用範囲外、後者は高さ45m以下が適用範囲とされており、高層建物に適用できるものとなっていない。また、鉄骨造建物の場合、健全性を判断する上で重要となる部材の損傷として、破断や局部座屈などが挙げられるが、現状では、主として高度な専門知識を持つ構造技術者が目視により確認する方法しかない。しかし、長期荷重を支持する部材には耐火被覆が施されており、容易に目視確認できる状態には無く、また都市部に多数集中する高層鉄骨造建物に対して、数の限られた構造技術者で応急危険度判定を行うと相当な時間を要することになる。

以上より、高層鉄骨造建物において、地震後にできるだけ速やかに建物の健全性を判断するためには、従来行われてきた構造技術者による目視主体の応急危険度判定ではなく、建物内に設置したセンサーから得られた客観的データによる建物健全度の評価法が必要と考える。

そこで、本研究では、高層鉄骨造建物の構造躯体を対象として、長周期地震動を用いた大型振動台実験を実施し、部材損傷の進展と骨組の崩壊過程を明らかにした<sup>5)</sup>。そして、この実験結果を踏まえ、健全性を定量化する指標、安全限界の定義、余震に対する安全性を含めた健全度区分を設定し、地震後にセンサーから得られた建物応答値との比較による健全度評価法を提案した。また、本評価法により安全限界を設定し、実験結果と比較することで妥当性の検証を行うとともに、健全度区分を設定し、実験時の試験体の応答から健全度判定を試行した。本報では、本評価法の概要、妥当性検証および健全度判定の試行結果と今後の課題について報告する。

1) 技術研究所 (当時)      Kajima Technical Research Institute

2) 小堀鐸二研究所      Kobori Research Complex Inc.

**キーワード:** 高層建物, 健全度評価, 振動台実験, 崩壊挙動

**Keywords:** high-rise building, evaluation of structural soundness, shaking table test, collapse behavior

II. 振動台実験における崩壊過程<sup>5)</sup>

本研究では、1/3縮尺の18層鉄骨造骨組を対象に長周期地震動を用いた大型振動台実験を行い、崩壊に至るまでの部材の損傷進展状況と崩壊までの過程を明らかにした。ここで、入力は一方向とし、入力振幅を係数倍して徐々に大きくすることで崩壊に至らしめた (Table 1, Photo 1, 2)。実験により確認した損傷開始から崩壊に至るまでの過程を以下に示す (表中の番号と下記番号が対応)。

- ① 下層階の梁の曲げ降伏
- ② 梁曲げ降伏範囲の拡大と1階柱脚の降伏
- ③ 下層階の梁端下フランジのスカラップ底近傍での亀裂発生および亀裂進展による破断発生
- ④ 下層階から上層階への梁端下フランジ破断範囲の拡大と梁端上フランジの破断発生
- ⑤ 下層階柱の長柱化と柱の負担せん断力の低下
- ⑥ 下層階骨組の水平抵抗力の低下
- ⑦ 長柱化した柱の上下端での破壊発生による崩壊

本評価法では、後述のとおり、地震により損傷を受けて地震後に継続使用できない状態を安全限界と定義しており、ここでは振動台実験の結果でその評価を試みた。この観点で試験体の損傷と全体挙動を確認すると、pSv300cm/sで2FLおよび3FLを構成するほぼ全ての梁の下フランジが破断し、層せん断力と層間変形の関係で明瞭な劣化が始まっていること、pSv340cm/s\_1回目では、確認できた2FLから4FLまでの全ての梁の上下フランジが破断していること、併せて層せん断力と層間変形の関係では顕著な劣化が生じていることが分かる (Fig.1,2)。今回の実験では一方向入力としたため、梁の損傷は一方向に限定され、床は健全な直交梁に支持されて落下することはなかった。しかし、実際の地震入力を想定した場合、上フランジの破断は梁の長期荷重支持能力の喪失を意味し、床板の落下につながる重大な損傷である。よって、pSv300 cm/sを安全限界以内、pSv340cm/s\_1回目を安全限界超過と判断した。

III. 健全度評価法の概要

1. 健全度評価と判定フロー

健全度評価の概要を Fig.3 に示す。縦軸は建物に作用する地震力、横軸は建物の変形を表す。建物の応答を無損傷の弾性範囲 (~①)、部材の塑性化の発生から最大耐力に至る範囲 (①~②、設計レベル)、部材の損傷劣化により建物が継続使用できない状態に達する範囲 (②~③)、最終的に自立できない状態に達する範囲 (③~④) に分け、自立できない状態となる前に、耐震安全性の観点から地震後に継続使用できない状態を安全限界と定義して③を設定している。

健全度判定のフローを Fig.4 に示す。地震発生前において、健全度評価用解析モデルを用いた地震応答解析に基づき建物の保有耐震性能を表すスケルトンカーブ (層せん断力と層間変形角の関係) と安全限界を設定し、健全度区分を決定しておく。地震発生後には、モニタリング結果に基づき、地震時に経験した最大応答点を特定した上で健全度判定を行う。

2. 健全度評価用解析モデル

解析モデルは、梁の破断を考慮した部材レベルの立体骨組モデル<sup>6)</sup>を原則とする。高層建物の場合、地震時の高次モードの影響が無視できない。また、鉄骨造建物が崩壊に至る過程における劣化挙動

Table 1 加振スケジュール (Vibration Schedule)

加振レベル	想定レベル	損傷
pSv40cm/s	設計レベル1	—
pSv81cm/s	設計レベル2	①
pSv110cm/s	長周期平均	②
pSv110cm/s		
pSv180cm/s	長周期最大	③
pSv180cm/s		
pSv220cm/s	長周期最大超	④ ↓ ⑤ ↓ ⑥ ↓ ⑦
pSv250cm/s		
pSv300cm/s		
pSv340cm/s		
pSv340cm/s		
pSv420cm/s		
pSv420cm/s		

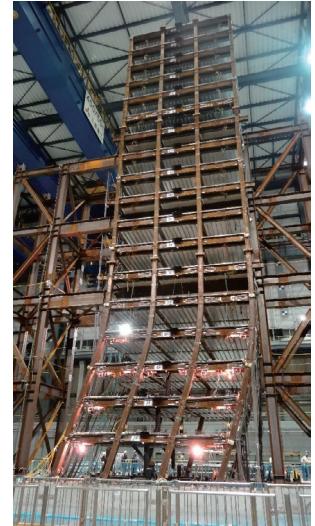


Photo 1 下層階の崩壊状況<sup>5)</sup> (Collapse of Lower Stories)



Photo 2 梁および柱の破壊状況<sup>5)</sup> (Fracture of Beam and Column)

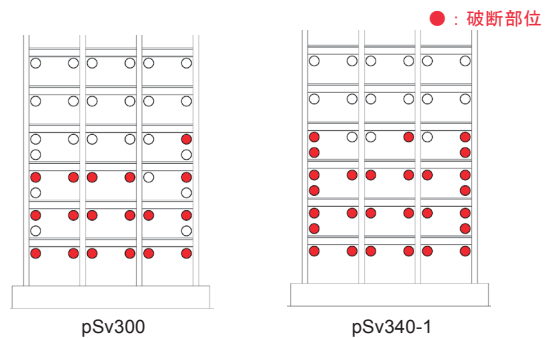


Fig.1 梁部材の損傷状況<sup>5)</sup> (Distribution of Damage to Beams)

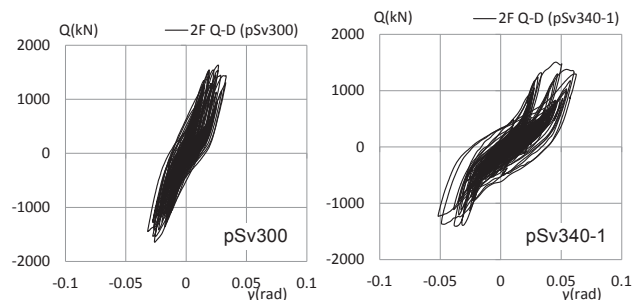


Fig.2 層せん断力-層間変形角関係 (2階)<sup>5)</sup> (Story Shear Force – Drift Angle Relationship of Second Story)

の主要因として、振動台実験でも確認された繰り返し塑性変形を受けることによって生じる梁端下フランジの破断が挙げられる。いずれの点においても繰り返しの影響が無視できないことから、本評価法では、地震応答解析を行うことで両者の影響を考慮する。なお、柱の局部座屈は、その劣化特性評価法が研究段階であること、振動台実験において試験体の劣化の主要因とはならなかったことから、ここでは考慮しない。

### 3. 地震応答解析

解析の目的は、建物の保有耐震性能を表すスケルトンカーブおよび安全限界の設定と健全度の区分である。入力地震動について、ある程度包括的な地震に対する建物の保有性能を評価する上では設計波を、特定された地震に対する建物の保有性能を評価する場合はサイト波を用いる。高層建物の場合には、その応答に大きな影響を及ぼすと考えられる長周期地震動についても検討が必要である。スケルトンカーブを設定するためには、入力レベルを変化させた解析を実施する。また、余震を考慮した健全度区分のためには、余震の影響を採り入れた解析が必要になる。ここでは、余震を本震と同一の地震として、2連続の解析を小さい加速度レベルから順次レベルを漸増させて独立に行う方法について、その考え方を Fig.5 に示す。

### 4. スケルトンカーブと安全限界

地震応答解析の結果に基づき、スケルトンカーブと安全限界を設定する。建物の崩壊メカニズムとしては、層崩壊あるいは部分崩壊形と、全体崩壊形が考えられるが、ここでは Fig.6 に示すような前者についての方法を示す。健全性を定量化する指標は、後述する着目層における層間変形角とする。スケルトンカーブの設定は、特定の層（着目層）の層せん断力と層間変形角の関係を用いて行う。この場合、入力レベルが上がり、応答最大層間変形角が増大・集中する層を着目層とするが、着目層が複数になることもある。着目層について、地震応答解析を行ったすべての入力レベルの層せん断力と層間変形角の関係を重ね描く。それぞれの入力レベルにおける荷重ピーク点を結んだ包絡線からスケルトンカーブを設定する。以上の方法により設定したスケルトンカーブの例を Fig.7 に示す。建物の弱点となる層の保有耐力と変形性能の両面から構造特性が把握できる点で、スケルトンカーブを作成することは重要である。また、後述する応答点との比較により、入力地震動に対する建物応答の妥当性の検証を行う。

安全限界は、地震直後において建物が構造的損傷を受け、耐震安全性の観点で継続使用できない限界状態と定義する。ここで、鉄骨造建物の解析で考慮する主な損傷は、梁の降伏と塑性化進展による破断、柱と柱梁接合部の降伏であり、このうち、構造的不安定に結び付く損傷は劣化を伴う梁端の破断である。ここでは、振れ挙動などを起こさず、比較的平面内で破断が均一に生じるような骨組を対象とし、着目層の全梁端が破断に至る時を安全限界とする。この梁端全箇所破断の状態は、建物倒壊までは至っていないと考えられるが、構造的には著しい劣化を伴った不安定な状態であるとともに、床スラブの落下に結び付く可能性があるため、継続使用できない状態と考える。梁端の破断が進展してこのような状態に至るまでに、応答最大層間変形角の高さ方向の分布において、当該層の変位が集中して大きくなる。また、当該層の層せん断力と層間変形角の関係において、履歴性状が紡錘形からスリップ型に移行し、層剛性の著

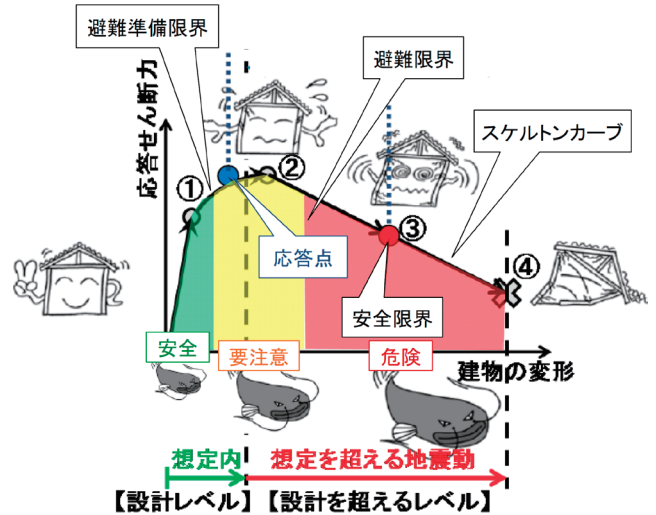


Fig.3 健全度評価の概要  
(Outline of Evaluation of Structural Soundness)

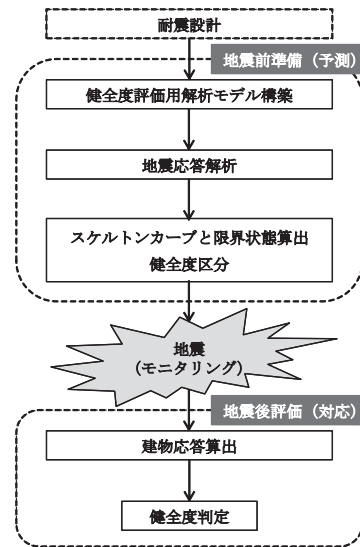


Fig.4 健全度判定のフロー  
(Flow of Evaluation of Structural Soundness)

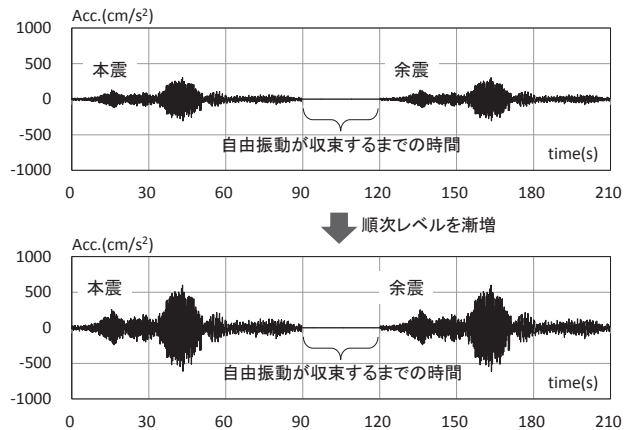


Fig.5 入力地震動の考え方  
(Setting Method of Input Ground Motion)

しい低下や履歴面積の減少といった層の性能劣化が現れる (Fig.8 ~10)。なお、安全側の評価をする場合には、破断箇所数が層全体の 50%超などといった破断の程度での安全限界の設定方法も考えられる。

5. 健全度区分

地震応答解析の結果に基づき、健全度区分を行う。区分は Fig.3 に示したとおり、以下の3つである。なお、これらは、一般的な応急危険度判定と同様の考え方のもとに設定している。

①安全 (軽微損傷以下) : 無損傷から一部損傷の範囲にあり、建物を継続使用できる状態である。ここでの損傷とは梁端の曲げ降伏のことであり、塑性率 2 以下程度で、塑性変形能力がまだ十分にあり、除荷剛性がほぼ弾性剛性を維持している状態である。一部損傷とは、当該層の全梁端が曲げ降伏する手前の状態を示しており、目安として、当該層の全梁端の 50%未満の降伏が考えられる。変動軸力が大きくなる 1 階の側柱脚部の曲げ降伏もこの一部損傷に含まれる。

②要注意 (健全度低下) : 一部の部材に劣化を伴う損傷が生じる状態までであり、地震活動がある程度収束した時点で専門家による調査を行い、継続使用や補修要否について検討する必要がある。この状態では、大多数の梁端と 1 階柱脚が曲げ降伏しており、一部の梁端、特に下フランジのスカラップ底に亀裂や破断が生じている。これら亀裂や破断は、部材の剛性・耐力を劣化させるものであり、建物の崩壊を引き起こす要因となる。前述したように、安全限界は当該層の全梁端が破断した状態であり、一部損傷とは、その手前の状態である。変動軸力が大きくなる 1 階側柱脚部における顕著な残留変形を伴わない局部座屈もこの一部損傷に含まれる。この状態の下限 (①安全と②要注意の境界) を「避難準備限界」と呼ぶこととする。

③危険 (余震により崩壊に達する危険性あり) : 「要注意 (健全度低下)」からさらに損傷が進んで、余震により安全限界に達する可能性がある状態である。この状態では、建物使用者に対して、建物外に退避することを勧告し、地震活動がある程度収束した時点で専門家による調査を実施する。この状態の下限 (②要注意と③危険の境界) は、「避難限界」と呼ぶこととする。これは、前述したように最大余震を本震と同じ地震として、同じ加速度レベルの地震動を 2 回連続で入力した地震応答解析において、2 回目の解析で着目層の層間変形 (変形角) が安全限界と判断される場合の 1 回目の解析で得られる層間変形角とする。

6. 応答点と健全度判定

応答点は、建物内に設置してあるセンサーの情報をもとに評価する。直接層間変形を計測している場合はその計測値を用いて、床の応答加速度を計測している場合は、前述の地震応答解析において仮定した各階質量にこれに乗じることにより応答層せん断力を算定し、2 回積分することによって応答層間変形角が算定できる。応答点は、応答層間変形角が最大となる点とする。なお、加速度を積分して変位を算定する場合、残留変位が評価されないことがあるので、特に大入力時には注意を要する。

健全度判定において、判断を行う際の指標は応答最大層間変形角とし、あらかじめ地震応答解析によって設定した健全度区分の閾値

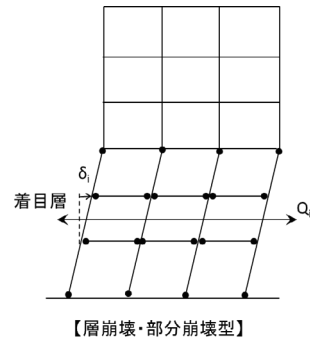


Fig.6 崩壊メカニズム (Mechanism of Collapse)

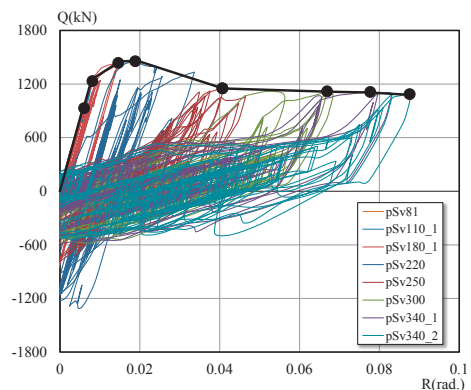


Fig.7 スケルトンカーブ (Skeletal Curve)

と応答点を比較することにより判定する。

IV. 健全度評価法の検証

評価対象を振動台実験時の試験体とし、本評価法により安全限界を設定し、実験結果と比較することで妥当性の検証を行うとともに、健全度区分を行い、実験時の試験体の応答から健全度判定を試行した。地震応答解析における入力地震動は振動台実験時の入力加振波とし、入力方向は 1 方向入力とした。余震を考慮した評価を行うため、Fig.5 に示した余震を本震と同一と仮定して 2 連続解析を行う方法で解析を実施した。pSv300 および pSv340cm/s での部材の損傷状況を Fig.8 に、応答最大層間変形角の分布を Fig.9 に、層せん断力と層間変形角の関係を Fig.10 に、各入力レベルの層せん断力と層間変形角の関係を重ね描いて作成した 2 階のスケルトンカーブを Fig.11 に示す。

応答最大層間変形角の分布より、特に pSv340cm/s の 2 回目で変形角が増大している 2 階および 12 階を着目層とし、梁端の破断状況を確認すると、pSv340cm/s の 2 回目において 2 階では半数程度の梁端が、12 階では全梁端が破断しており、この影響で層せん断力と層間変形角の関係において層剛性が低下している。また、この時の最大層間変形角はいずれも 1/25rad 程度となっている。以上より、安全限界を pSv340cm/s の 2 回目入力後と判断すると、2 階および 12 階ともにスケルトンカーブ上の層間変形角で約 1/25rad に安全限界が設定される。II 章で振動台実験結果から評価した安全限界は

pSv300cm/s と pSv340cm/s の 1 回目の間にあり、それぞれの 2 階の最大層間変形角が 1/30rad と 1/16rad であったことから、実験結果と評価法により評価された安全限界は概ね良い対応を示していることが分かる。

続いて、振動台実験で損傷が大きかった 2 階について、本評価法で健全度区分を行った結果を Fig.11 に併せて示す。避難準備限界は層間変形角で  $R=1/100\text{rad}$  とした。また、安全限界は pSv340cm/s の 2 回目入力後としたので、避難限界は 1 回目の入力時の最大層間変形角である  $R=1/50\text{rad}$  となる。振動台実験結果を実際の地震に対する応答と考えると、その応答値を Fig.11 に示した。添字は入力レベルである。これより、長周期地震動の平均レベルである pSv110cm/s では  $R=1/90\text{rad}$  程度で「要注意」の範囲に入り、長周期想定超えレベルの pSv250cm/s では  $R=1/45\text{rad}$  程度で、避難限界を超えて「危険」の範囲となっていることが分かる。

V. おわりに

本研究では、高層鉄骨造建物を対象として実施した大型振動台実験の結果を踏まえ、健全性を定量化する指標、安全限界の定義、余震に対する安全性を含めた健全度区分を設定し、地震後に得られた建物応答値との比較による健全度評価法を提案した。また、振動台実験試験体を対象に本評価法により設定した安全限界値と、振動台実験結果から得られた安全限界値を比較した結果、両者は良い対応を示すことが分かった。さらに、実験の各入力レベルの応答値を本評価法で設定した健全度区分と比較することで、健全度判定の試行を行った。

本報では、柱と梁によって構成される整形なラーメン構造で、建物の劣化挙動が梁に支配される振動台実験試験体を対象に検証を行ったが、ブレース、壁、制振装置など現在の高層建物に取り付け部材に対しては、既往の研究成果を踏まえて、その特性を適切に解析

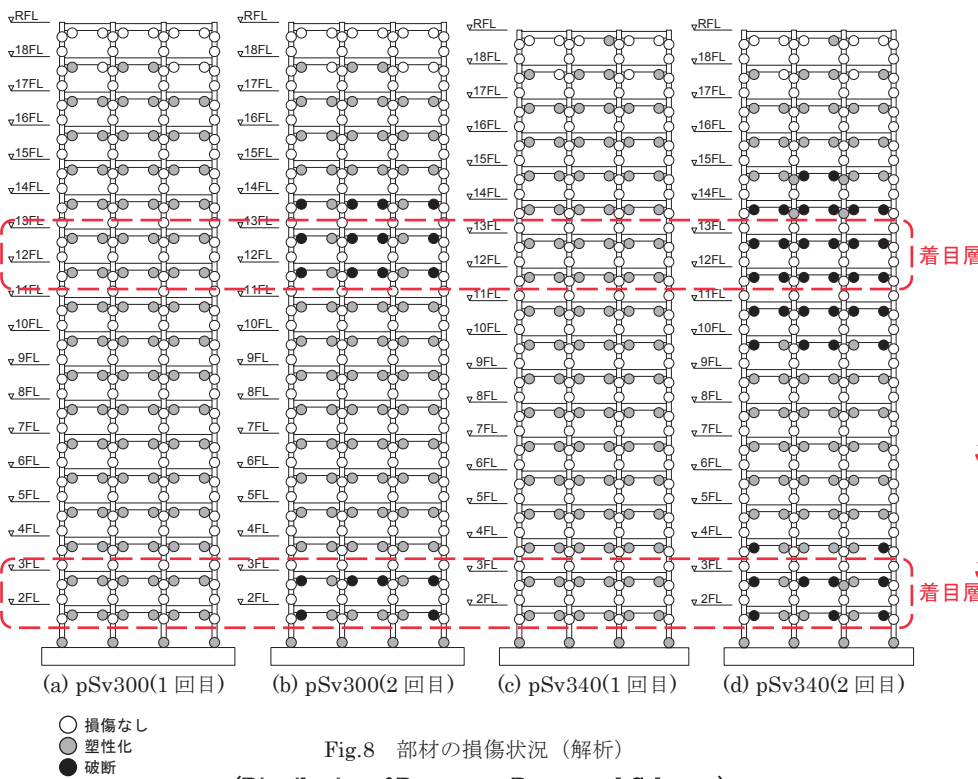


Fig.8 部材の損傷状況 (解析)

(Distribution of Damage to Beams and Columns)

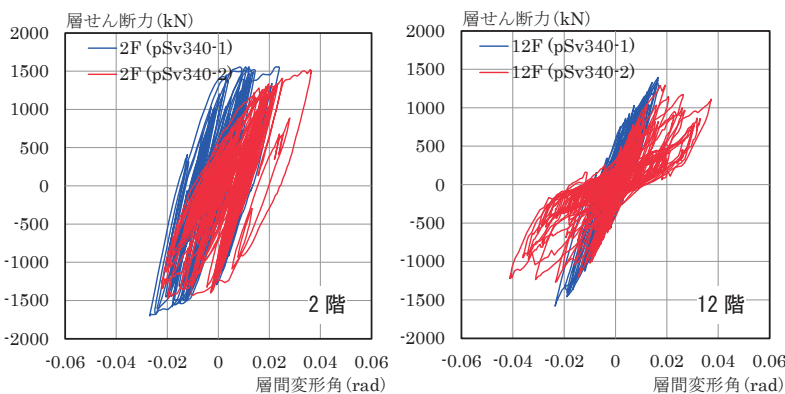


Fig.10 層せん断力-層間変形角関係 (解析)

(Story Shear Force – Drift Angle Relationship)

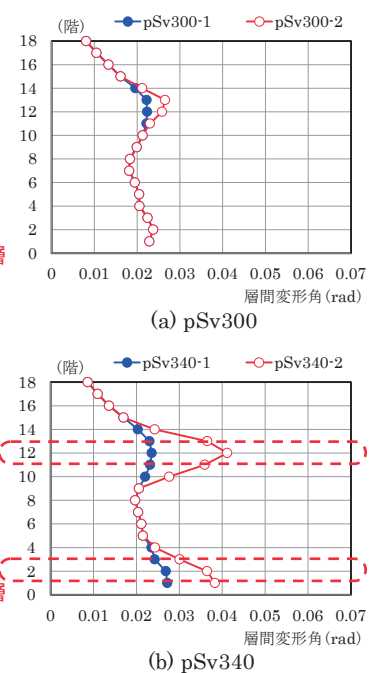


Fig.9 応答最大層間変形角 (解析)

(Maximum Response Distribution of Story Drift Angle)

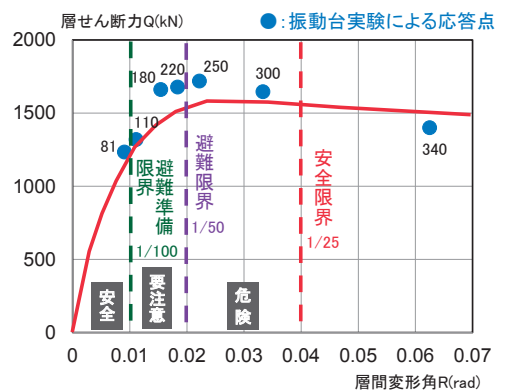


Fig.11 スケルトンカーブと健全度区分

(Skeletal curve and Classification of Soundness)

モデルに取り込むことで本評価法の準用・拡張が可能である。

今後の課題として、柱端部で生じる局部座屈に関する性能評価法の構築を挙げる。また、崩壊挙動の部材の損傷度を直接計測できる手法の確立が必要である。これにより、即時かつ客観的に精度良く建物の損傷状況が把握でき、実測された建物の応答と併せ見ることにより、より確度の高い健全度評価が可能となる。また、建物の総合的な健全度を評価する上で、非構造部材や設備機器などを対象とした同様の評価法の整備が必要である。

#### 謝 辞

本研究は、文部科学省委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト ②都市機能の維持・回復に関する調査研究」の一部として行われたものです。

#### 参考文献

- 1) 内閣府；南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告，2015.12.
  - 2) 内閣府（防災担当）；大規模地震発生直後における施設管理者等による建物の緊急点検に係る指針，2015.2.
  - 3) 日本建築防災協会；被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998.1.
  - 4) 日本建築防災協会；震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針，2016.6.
  - 5) 文部科学省；建物の崩壊余裕度評価のための技術資料－高層鉄骨造建物編－，2017.3.
  - 6) 鈴木芳隆ほか；振動台実験のための梁端破断を考慮した事前解析，一鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発(その6)－，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp1239-1240，2014.9.
- 1) 内閣府；南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する

## Evaluation of the Structural Soundness of High-Rise Steel Buildings Immediately After an Earthquake

*Jun Kubota, Motomi Takahashi Takatoki Kiyokawa<sup>1)</sup>,  
Yoshikazu Sawamoto, Yoshitaka Suzuki<sup>2)</sup> and Norihide Koshika<sup>2)</sup>*

With a gigantic Nankai Trough earthquake and a Tokyo inland earthquake expected in the near future, the most important issue is provision against disasters in metropolises and other urban areas. Since high-rise buildings in urban areas are the basis of civic and business life, methods of evaluating their structural soundness which enable an immediate judgment of the prospect of business continuity and the early recovery of such buildings after the disaster are required. However, quick inspection of damaged high-rise steel buildings based on conventional visual observation by structural engineers immediately after an earthquake is expected to be difficult. This paper proposes evaluation methods for the structural soundness of buildings based on objective data obtained using sensors set in the buildings and shows the validity of these methods using the results of shaking table tests. The structural soundness as evaluated using the proposed method was found to agree approximately with that found using the results of the shaking table tests.