

今後期待される構造設計の方向性

構造研究グループ長 福山 洋

目 次

- I はじめに
- II 東日本大震災等による教訓とそれらに対する建築研究所の取り組み
 - 1) 津波による建築物の被害
 - 2) 天井やエスカレーターの落下被害
 - 3) 地盤の液状化による被害
 - 4) 長周期地震動による超高層建築物や免震建築物の共振
 - 5) 庁舎・避難所等の地震被害による機能停止
 - 6) 今後発生が予想される大地震による被害
 - 7) 竜巻による被害
- III 今後期待される構造設計の方向性
 - 1) 性能設計の推進
 - ①性能設計に関する経緯と課題
 - ② 災害後の機能継続を目的とした構造設計（当面の取り組み）
 - 2) 余裕のある設計の推奨
 - ① 東日本大震災でも明らかとなっていない今後の課題
 - ② 想定外の事象への配慮
- IV おわりに
- 参考文献

I はじめに

1995年兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災では、1981年施行の新耐震基準よりも前の基準に基づいて設計された建築物に倒壊等の大きな被害が集中したことから、このような建築物を対象として「建築物の耐震改修の促進に関する法律（1995年10月27日法律第123号）」が制定された。新耐震基準については、その地震力のレベルは概ね妥当と評価された¹⁾が、設計や施工に起因する被害が見られたことから、告示の改正や技術基準解説書の改訂による設計上の留意事項の提示等が行われてきた^{2)、3)}。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震は「1000年に一度の巨大地震」と言われるが、建築物の振動被害の観点からは、建築物の倒壊等に大きな影響を及ぼす周期帯（約1～2秒）のパワー

は、1995年兵庫県南部地震の時ほど大きくはなかった⁴⁾。被害調査の印象からも、阪神・淡路大震災（1995）に比べると、東日本大震災（2011）では大破や倒壊に至った建築物の割合はかなり小さかったように思われる。RC造建築物に関するこれら2つの地震被害の比較によると、東日本大震災（2011）の被害形態は、概ね阪神・淡路大震災（1995）で見られた被害形態の範囲にとどまっている^{3)、5)}。阪神・淡路大震災（1995）で見られた被害については、その後の告示改正や技術基準解説書の改訂等により対処されてきたことから、一般建築物の構造耐力上主要な部分の構造安全性について、東日本大震災（2011）では新たな課題は指摘されていない。

世の中では、「マグニチュード9.0の地震で大丈夫であった建築物は、今後の大地震に対しても大丈夫」との、誤った考えが

浸透していると聞く。東日本大震災（2011）の地震動は、建築物にとって決して最大級の厳しいものではなかったことや、そのため今後の大地震に対するよりいっそうの備えが必要であることを伝え続けていかなければならない。

とはいうものの、東日本大震災（2011）では、津波による被害、天井の落下、地盤の液状化が、従来に比べ広い範囲で大規模に見られ、さらにエスカレーターの落下、長周期地震動による超高層建築物の共振による非構造部材の被害、庁舎や避難所の損傷による機能停止、等も発生した。

津波は、これまで必ずしも注視されていなかった最大級の事象による大被害であるが、一方、天井落下は、これまでに同様な被害が何度も見られていたにも拘わらず、人命保護の観点からの対策が実務面において必ずしも十分には取られてこなかった事象である。地盤の液状化も、これまでに同様な被害は見られていたが、それが液状化の可能性が指摘される地域の居住者の理解にまで結びつかず、そのため実務においても十分な対処が行われてこなかった事象と言えよう。また、長周期地震動に対する超高層建築物や免震建築物の共振現象は、地震前から注目され対策のための検討も行われていたが、過去の超高層建築物や免震建築物の技術開発や設計において、検討課題として認識されてはなかった事象と言える。庁舎や避難所の機能停止は、阪神淡路大震災（1995）や、新潟県中越地震（2004）等でも経験してきており、内閣府より業務継続計画の推進^{6）、7）}等が求められている事象である。

本稿では、東日本大震災（2011）の位置づけに関する以上のような認識に基づき、まず第二章において、東日本大震災（2011）で顕在化した課題への対応状況と残された今後の課題について整理するとともに、今後発生が予想される大地震の被害想定や、2012年につくば市で発生した竜巻被害に係る課題を示し、さらに、第三章において、これまでの構造分野の動向と合わせて、今後期待される構造設計の方向性について考えてみる。

なお、今後の構造設計において、既存建築物のリニューアル改修等、既存ストック対策も重要な課題ではあるが、これについては以前に一度報告している^{8）}ことから、本稿においては割愛する。

II 東日本大震災等による教訓とそれらに対する建築研究所の取り組み

本章では、東日本大震災（2011）等の貴重な教訓を今後の構造設計に活かすために、1）津波による建築物の被害、2）天

井やエスカレーターの落下被害、3）地盤の液状化による被害、4）長周期地震動による超高層建築物や免震建築物の共振、5）庁舎・避難所等の損傷による建築物の機能停止、6）今後発生が予想される大地震による被害、7）竜巻による被害、を取り上げ、これらの事象における課題と建築研究所が実施している（またはこれから実施予定の）取り組みについて紹介する。ここでは、特に各取り組みにおける考え方に焦点を当てる。



図1 津波による転倒

1) 津波による建築物の被害

① 被害の概要とこれまでの対応

東日本大震災（2011）は、耐震設計された RC 造や鉄骨造等多くの近代建築物が極めて強い流勢の津波を受け、倒壊や転倒（図1）等の甚大な被害を被った初めてのケースである。津波の浸水深は、地域によっては15mにも達した。

このような事象に対し、建築研究所と東京大学生産技術研究所は、2011年の建築基準整備促進事業40番「津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」において、被災地の復興や各地における今後の津波防災に資するために、津波避難ビルの構造設計法に関する検討を実施した。そこでは、内閣府から2005年に示された「津波避難ビル等に係るガイドライン」^{9）}の構造設計法等について、東日本大震災（2011）の津波被害を踏まえ、妥当性の検証および見直しの必要な項目・内容の検討を行った^{10）}。そこでの具体的な検討項目は、津波波圧の算定法、開口の影響を考慮した津波波力の算定法、浮力の算定法、構造耐力上主要な部分の破壊防止のための検討方法、漂流物への対処法、洗掘への対処法、倒壊防止の検討方法、転倒防止の検討方法、滑動防止の検討方法、であった。

その成果は、建築基準法第 39 条の災害危険区域の指定に際し参考とすべき事項を示した通知「風水害による建築物の災害の防止について（1959 年発住第 42 号）」に追加的知見の提供を行う技術的助言「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る技術的助言（2011 年 11 月 17 日国住指第 2570 号）」の別添に示された「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針¹⁾」に反映された。1959 年 第 42 号通知により、多人数を収容する公共建築物等は堅ろうな建築物とすることが定められているが、それには上記暫定指針により、津波に対する構造耐力上の安全性が確認されたものが該当すること、等が示されている。

また、上記暫定指針と技術的にほぼ同様の内容が、2011 年 12 月 27 日に施行された「津波防災地域づくりに関する法律（2011 年法律第 123 号）」の施行規則に基づく告示「津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法を定める件」（2011 年国土交通省告示第 1318 号）に反映されている。

これら取り組みの基本的な考え方は以下の通りである。

従来、津波来襲時には高台への避難が大原則であるが、避難できる高台が近くに無い場合には、津波避難ビルが高台避難の代替として人命を守る。よって、津波避難ビルには高台に匹敵する十分な構造安全性が求められる。上記の、技術的助言（2011 年国住指第 2570 号）や告示（2011 年国交告第 1318 号）では、この目的のために必要な技術基準が定められたものである。なお、これらの技術基準については、その詳細な解説が設計例とともにまとめられ公開されている¹⁾²⁾。

② これからの対応方針

①に記載したこれまでの対応は、津波による被害の痕跡から事象を推定する方法によってとりまとめられたものであるが、実際にどのような現象が生じたかについては、必ずしも詳細に理解されたわけではない。すなわち、被害に至るメカニズムはまだよく分かってはいない。そのような中での津波荷重の設定では、今回の津波被害の結果のみならず既往の水利実験の結果やインド洋津波（2004）の情報も勘案し、現時点で得られた技術的知見に鑑み、安全側に定められたものである。よって、今後、実際の挙動をより的確に捉えられるような合理的な評価法へ改善していくことが望まれる。

そこで、2012 年度より、建築研究所は、東京大学生産技術研究所、(株) 鹿島建設、(一社) 建築性能基準推進協会と共同で、建築基準整備促進事業 49 番「津波避難ビルの構造基準の合理化

に資する検討」において、開口からの水の流入の様子を踏まえた津波荷重の低減や、浮力の算定に関する検討を行うために、水利実験やシミュレーションによる検討を実施している。なお、2011 年にとりまとめられた津波荷重の設定では、浸水深の水深係数への影響は考慮されていないが、調査データからは浸水深が 10m を超えると水深係数は徐々に小さくなる傾向も示されている。これについても、津波の流勢を表す指標であるフルード数 ($Fr = u\sqrt{g\eta}$)、ここで u は流速、 g は重力加速度、 η は浸水深) や流速の情報等を用いて、津波荷重のより合理的な設定方法について検討を進めていく予定である。

なお、米国では、津波に対する設計ガイドライン（FEMA P646）が近々改訂され、漂流物による荷重の算定法等が改善される。さらに、この津波荷重算定法が、米国の荷重に関する基準である ASCE 7 に 2016 年に取り込まれる予定で、現在検討が進められている。FEMA P646 では主として抗力の考え方に基づく津波荷重が与えられているが、日本では津波の動的な作用に等価な静水圧に基づく津波荷重が設定されている。

日本における上記のような荷重設定の理由は次の通りである。設計者が利用できるハザードマップには、浸水深は示されるが抗力を求めるために必要な流速の情報は得られない。また、ハザードマップを構築するための現状の解析では個々の建築物までは再現されず、建築物の影響は地表の粗度で表す等の手法がとられていることもあり、その解析から得られる流速の情報は、必ずしも局所の実情を再現するものとはいえない。よって、現状では抗力に基づく手法を採用することは難しいことから、津波の動的な効果に等価な静水圧に基づく方法を採用し、浸水深の 3 倍の高さの静水圧が建築物の片側から作用することを基本としつつ、津波の流勢に応じて低減させる方法が提案されている。この手法は、今後の技術的知見の蓄積や解析技術の高度化に伴い、合理化されていくべきであろう。また、津波遡上シミュレーションについても、敷地での流速と浸水深（すなわちフルード数）の時系列的变化を再現できるような、精度の高い解析技術の開発が望まれる。

さらに、今後検討が必要な課題として、「設計に考慮されている遮蔽物の要件整理」、「ピロティ建築物に作用する津波外力の合理的な評価」、「非構造壁等の取り付け方法と建築物が受ける津波波圧との関係」、「漂流物による衝突荷重評価」、等が挙げられ、大規模な水路実験やシミュレーション等による検討が求められる。

2) 天井やエスカレーターの落下被害

① 被害の概要とこれまでの対応

i) 天井の落下

2001年の芸予地震における体育館等大空間を構成する建築物の天井落下、2003年の十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の落下、2005年の宮城県沖の地震におけるスポーツ施設の天井の落下等、過去、数次の地震において天井落下の被害が報告されたことを踏まえ、これまで国土交通省では、振れ止めの設置、クリアランスの確保等について技術的助言（2001年国住指第357号、2003年国住指第2402号、2005年国住指第1427号）を发出する等により、大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策を進めてきた。

しかしながら、東日本大震災（2011）においては、体育館（図2）、音楽ホール等の多数の建築物において天井が落下し、かつてない規模で甚大な被害（人的被害は死者5名、負傷者72名以上）¹³⁾が生じた。

これを踏まえて、建築研究所と（一社）建築性能基準推進協会は、2011年度の建築基準整備促進事業41番「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」にて、被害状況の整理・分類と被害状況を踏まえた基準のあり方の検討を行った。国土交通省は、この調査研究等に基づき、「建築物における天井脱落対策試案」をとりまとめ、2012年7月31日～9月15日に任意の意見募集（パブリックコメント）を行った¹⁴⁾。なお、建築研究所は、このうちの天井脱落対策に係る技術原案について、国土技術政策総合研究所における検討と取りまとめに協力を行った。

対策試案では、その適用範囲とする天井の条件を、6m以上の高さにある面積200m²以上の吊り天井と定めた上で、耐震性等を考慮した天井の仕様を定める方法（仕様ルート）と天井の耐震性等を計算で検証する方法（計算ルート）、および高度な計算等の特別な手段によって天井の耐震性等を検証する方法（特殊検証ルート）が提示されている。仕様ルートや計算ルートは、既往の振動実験等の知見が活用されている。また、これらに加えて、天井面が外れても下まで落ちないような工夫を講じる方法も、主として既存建築物への対策方法の一つとして示されている。

その後、上記の意見募集の結果を踏まえた対策案について詳細な検討が行われており、引き続き建築研究所も技術面からの協力を行っている。

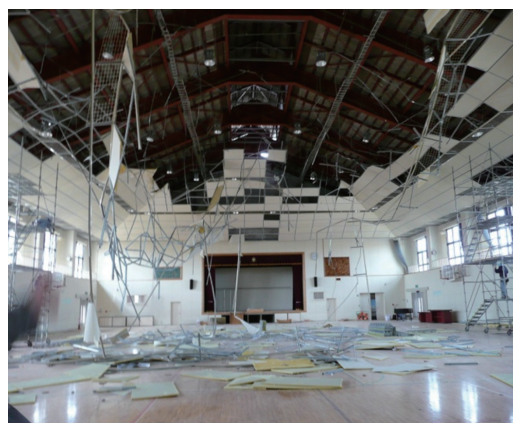


図2 天井の落下



図3 エスカレーターの落下¹⁶⁾

ii) エスカレーターの落下

地震時におけるエスカレーターの落下防止対策は、現行の建築基準法令には規定されていない。一方、阪神・淡路大震災後1998年に導入された業界指針「昇降機耐震設計・施工指針」¹⁵⁾では、大規模地震時にエスカレーターが落下しない耐震性能の確保を目標として、建築物に生ずる層間変形角を1/100と想定した上で、当該変形に追従する「かかり代」の確保が求められている。

しかしながら、東日本大震災（2011）およびその余震において、ショッピングセンターに設置されていたエスカレーターが落下する被害が複数発生した（図3）。

これに対して国土交通省は、（一社）建築性能基準推進協会による建築基準整備促進事業45番「昇降機に係る地震安全対策に関する検討」の調査研究等を踏まえ、「エスカレーターの落下防止対策試案」をとりまとめ、2012年7月31日～9月15日に任意の意見募集（パブリックコメント）を行った¹⁶⁾。

対策試案では、落下防止のための十分な「かかり代」として、特に検討しない場合は（昇降高さ×1/40+20mm以上）を確保

することとし、さらに、この数値は構造計算により緩和できることとしている。また、既存のエスカレーターに対して、ワイヤロープ等による落下防止措置を設ける対策方法も示されている。

② これからの対応方針

i) 天井の落下

2013年2月中旬より3月中旬まで、天井脱落対策の告示案について行政手続法に基づく意見募集（パブリックコメント）が行われているが、今後、その意見に対する技術面からの対応に加え、技術基準解説書等に反映できるような、技術的知見の検討と取りまとめが行われる予定である。

なお、昨年度の意見募集においては、天井外周にクリアランスを設けることに対する意見が多く寄せられた。これは、その部分での衝突による天井の落下被害を避けるための一つの考え方であるが、技術的には、クリアランスを設けずに天井面に発生する慣性力等を天井面の面内力として外周部に安全に伝達できることを確かめる方法も考えられる。今後、この考えを成り立たせるための各部分の仕様や、安全性確保のためのその他の方法についての検討が望まれる。

天井の落下対策を構造計算で行う難しさは、建築物に入力した地震動は各層で増幅されるが、その各層の床スラブから吊り下げられる天井においてはさらに大きく増幅されることにある。建築物の構造耐力上主要な部分が弾性範囲にあり、天井の各部分も弾性挙動の範囲に留まっていれば、床と天井を2つの質点に置き換えることで、天井の応答を予測することは可能である。しかしながら、構造耐力上主要な部分が塑性化した場合や、天井面の各部分が弾性挙動から外れ、すべりやはずれ等が生じた場合においては、その応答がある精度を持って予測することは極めて困難である。

そのため、対策案では、稀に発生する地震（中地震）を超える地震時のクライテリアの設定は困難であるとの認識に立ち、中地震時における損傷を防止することにより、天井が有する余力をもって、中地震を超える一定の範囲内の地震時においても、天井落下の低減を図るとの考え方が採用されている。すなわち、一次設計で、地震荷重により天井部分に発生する応力が、（今後設定される）天井各部の許容耐力を超えないことを確認するというものである。

天井各部の許容耐力の定め方にもよるが、「脆性的な材料やシステムでは試験により得られる耐力の2/3」との従来からの慣習

に従い、かつ、天井は脆性的なシステムとして扱うこととし、さらに試験の耐力には弾性限を用いることとすると、許容耐力の1.5倍の荷重までは弾性挙動で抵抗できることとなる。これは、中地震の1.5倍程度の荷重、すなわち、建築物の標準せん断力係数 C_0 が0.3までは抵抗できることを示すが、それを超える地震に対する挙動は正確には分からず、大地震に対して常に天井の落下が防止できるとは言えない。

従って、構造耐力上主要な部分や天井部分の塑性化後の挙動を推定できるような検証法の開発が望まれるが、そのためには塑性化後の安定した挙動が期待出来るようシステム自体の見直しも必要であろう。まずは、許容耐力に対して十分な余裕を持って設計することや、既存建築物については、落下しても床の位置まで落下しないようにネット等で支持するといった対処が推奨される。

なお、このようにしっかりと構造設計を行って天井落下に対する安全性を検討する他に、そもそも落下しない、もしくは、落下しても問題のない天井システムを開発するという方向性も十分に推奨される。ここしばらくは、天井システムの変革がすすむと予想されることから、産学官が丸となって世の中が求めるような天井システムの構築に力を注いでいきたい。

ii) エスカレーターの落下

エスカレーターの落下防止には、層間変位に基づき、引っ張られる際のかかり代や押される際の衝突までの余裕に関する検討が必要である。しかしながら、そもそも保有水平耐力計算をはじめとする耐震計算ルート1, 2, 3による計算では、地震時の応答変位は計算で得られないという背景がある。この場合、時刻歴応答解析や限界耐力計算を採用して応答変位を計算し、それに基づいてかかり代を設けるという方法もあるが、そうでなくとも、対象建築物が大地震時にどの程度の層間変位を生ずるかを想定し、それに基づき十分安全側にかかり代を設定する必要がある。これを確実なものとするためには、変形を直接算定しない従来の構造計算方法においても、応答変位を十分な精度を持って推定できるような手法の開発が望まれる。

3) 地盤の液状化による被害

① 被害の概要とこれまでの対応

東日本大震災（2011）では、東北地方のみならず、震源から数百 km 離れた首都圏においても、広範囲に地盤の液状化被害が発生し、戸建て住宅において構造的な被害はほとんどないものの、健康的被害を生じ得る傾斜を生じた建築物が続出した（図



図4 液状化による傾斜

4)。関東地方における液状化の発生は、東京湾岸の埋め立て地や利根川流域に集中し、茨城県内陸地域にも点在している。これらの液状化発生地域の大半は、地下水位の高い低地の造成地盤といえる。

これを踏まえ、建築研究所と（株）東京ソイルリサーチは、2011年度の建築基準整備促進事業43番「住宅の液状化に関する情報の表示に係る基準の整備に資する検討」において、現在の液状化評価法を検証し、課題の抽出を行った。その結果、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」¹⁷⁾に示されている液状化予測手法（FL法）は、東日本大震災（2011）においても適用可能であることが確認されたが、戸建て住宅等の小規模な建築物における簡便な地盤調査結果から液状化を予測する手法については、まだ十分に確立した方法はないことが明らかとなった。そこで、2012年度の建築基準整備促進事業47番「小規模建築物に適用する簡易な液状化判定手法の検討」では、標準貫入試験に替えてスウェーデン式サウンディング（SWS）試験を行うことを想定し、標準貫入試験のN値への換算に加えて、細粒分含有率や粘性土・砂質土の判定および地下水位の確認を行うことにより、適切かつ安全側に評価できるような手法について検討を行っている。

これまでのところ、SWS試験の試験穴から土質試料を採取する方法と、試験穴を用いて地下水位を計測する方法が、実用的な方法として提案されている。

② これからの対応方針

震災における宅地の大規模な液状化被害受け、大畠国土交通大臣（当時）は2011年7月7日の参議院予算委員会で、今後の必要な対策として、1) 液状化の恐れのある地域の周知、2)

簡便かつ低コストの液状化対策手法、3) 住宅性能表示等を通じた情報提供、を挙げた。

①に記載した検討は、主として上記のうち1)と3)に関する検討である。今後、様々な地点における検証を経て、早期に実用に供されることが求められる。

一方、実務においては2)に関する技術開発も大いに期待されており、産学官が一丸となって取り組むべき優先度の高い課題である。

なお、液状化判定においては、国土交通省に設けられた「液状化対策技術検討会議」の検討において、代表的な液状化判定法であるFL法は直ちに見直す必要性は低いが、一方で液状化の発生を推定したが、実際には発生しなかった地点もあったことから、造成年代や地震動の継続時間等に着目した研究等により、液状化判定のさらなる高度化に向けた取り組みの必要性が示されている¹⁸⁾。このような取り組みや地盤特性のさらに詳細な把握等を進め、今後の液状化マップの見直しに反映される必要がある。

道路・下水道等の公共施設と隣接宅地を対象に、一体的に液状化対策を推進する「液状化対策推進事業」制度¹⁹⁾が創設されている。事業が大規模となることから、今後これらに関する革新的な技術の開発に期待したい。

4) 長周期地震動による超高層建築物や免震建築物の共振

① 課題の概要とこれまでの対応

長周期地震動については、2003年の十勝沖地震の際に震央から約250km離れた苫小牧市内で、石油タンクがスロッシングを起し火災が発生した原因の一つとして注目された。2004年新潟県中越地震では、震度3であったため地震時管制運転装置が作動しなかった東京都港区の高層建築物でエレベーターの損傷（ケーブルの切断等）が生じ、2007年新潟県中越沖地震では、震源から200km以上離れ震度3だった東京都心で周期7秒程度の揺れが約3分間続いた。2009年には、地震調査研究推進本部（以下、「地震本部」と略記）から、想定東海地震、東南海地震および宮城県沖地震を対象地震とした「長周期地震動予測地図」2009年試作版が公表されており、周期3.5秒以上の成分を対象とした長周期地震動が示された。

これらに対し、建築研究所は2003年度より、（社）日本建築構造技術者協会とともに、長周期地震動による建築物への影響と対策技術について、建築研究所の観測記録等を基に検討を行ってきた。

また、2008年度より3年間、建築基準整備促進事業1番「超高層建築物等の安全対策に関する検討」において、建築物を対象とした既往の観測地震記録に基づく長周期地震動の評価手法の検討と、それを踏まえた長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法の検討を、(株)大崎総合研究所および(財)日本建築防災協会と行った。本検討の結果、建築物へ影響を与える0.1～10秒の幅広い周期成分を含めた設計用長周期地震動の作成手法がまとめられた。

国土交通省は、上記の調査研究等を踏まえて「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」を取りまとめ、2010年12月21日～2011年2月28日に任意の意見募集(パブリックコメント)を行った²⁰⁾。建築研究所は、対策試案中の「観測データに基づく設計用長周期地震動の作成手法」について国土技術政策総合研究所の取りまとめに協力した。なお、対策試案では、地震本部が2009年9月に公表した「長周期地震動予測地図」試作版において、発生確率が高く、かつ発生した場合に大きな被害が予想されるとしている3つの海溝型地震(想定東海地震(Mw8.0)、東南海地震(Mw8.1)、宮城県沖地震(Mw7.6))が対象とされた。

パブリックコメントとして寄せられた意見は、「長周期地震動に対して何らかに対応すべきという方向性には賛成」、「南海地震や連動型地震等を対象地震に追加すべき」、「入力だけではなく、クライテリアもあわせて提示すべき」、「既存建築物への遡及は厳しく、緩和措置、補助等が必要」等が主なものであった²¹⁾。

この意見募集の直後に発生した2011年東北地方太平洋沖地震では地震記録が多数観測されたことから、建築研究所は2011年度と2012年度に、これらによる対策試案の検証と見直しを、建築基準整備促進事業42番「超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討」において、(株)大崎総合研究所と共同で実施した。

そこでは、地震が太平洋プレート側で発生するか、フィリピン海プレート側で発生するかで長周期地震動の卓越の度合いが異なることが明らかとなったことから、震源の位置と地震波の伝達経路に応じた統計処理が行われ、長周期地震動の作成に用いる経験式が改良された。また、改良された長周期地震動の作成手法に基づき、南海トラフの3連動地震等による主要地点の長周期地震動を作成するとともに、超高層建築物等の地震応答計算が行われた。さまざまな種類や高さの超高層建築物について計算した結果、最も大きな層間変位の予想値は、1/48 rad.に達した²²⁾。

また、これと平行して、限界値に関する検討を2010年度～2012年度の3カ年、建築基準整備促進事業27-1番「長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討」、27-2番「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」、27-3番「長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」において実施した。ここでは、構造部材の多数回繰り返し載荷実験や、大型架構の震動実験等を、事業担当者との共同研究により実施した^{22)、23)}。事業担当者は、27-1番が(株)大林組、鹿島建設(株)、(株)小堀澤二研究所、清水建設(株)、大成建設(株)、(株)竹中工務店、27-2番が鹿島建設(株)、(株)大林組、清水建設(株)、大成建設(株)、(株)竹中工務店、(株)小堀澤二研究所、27-3番が大成建設(株)、鹿島建設(株)、清水建設(株)、(株)竹中工務店である。

鉄筋コンクリート造については、柱・梁・柱梁接合部・柱梁を含む立体および平面部分架構の多数回静的繰り返し載荷実験に加え、縮尺1/4、高さ15mの20層フレーム構造建築物に長周期地震動を入力する震動実験(図5)を実施し、1/35 rad.という大変形までの挙動が捉えられた。本実験では、1/35 rad.に至

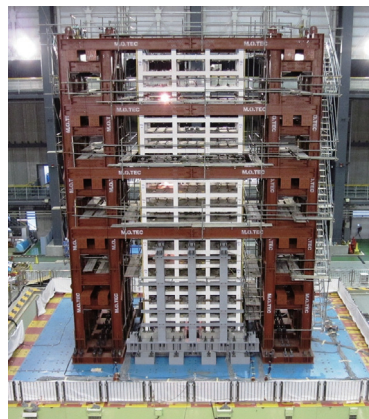


図5 RC造20層建築物の長周期地震動による震動実験



図6 鉄骨造建築物の多数回繰り返し加力実験

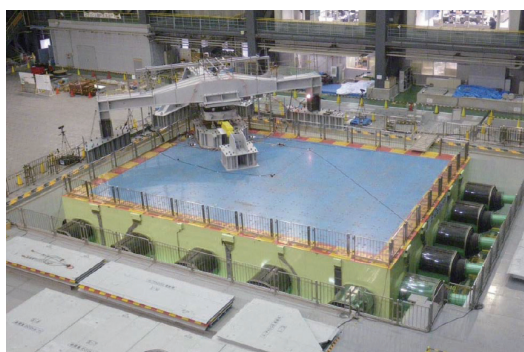


図7 実大免震装置の多数回繰返し載荷実験

るまで安定した挙動が観測され、最終崩壊形には至らなかった。

この震動台実験の結果報告は近々公表されるが、その貴重な実験データについても 2014 年には全世界に向けて公開される予定であり、シミュレーション技術を始めさまざまな観点からの研究に寄与することが期待されている。

鉄骨造については、鉄骨造超高層建築物の実態調査、梁・柱・柱梁接合部パネルの部材や端部接合部を対象とした多数回繰返し静的載荷実験に加え、実大部分架構を用いた多数回繰返し静的載荷実験(図6)が行われ、接合部の破断に至るまでの挙動が再現された。

免震については、縮小および実大免震部材の多数回繰返し加力実験(図7)により、温度上昇や疲労等の要因による履歴特性の変化と限界性能に関するデータが得られた。

ところで、東日本大震災では、地震規模が大きかったことから震源から 770km 離れた大阪湾岸にまで到達した地震動が深部地盤の増幅を受け、その地盤周期が 55 階建て鉄骨造の超高層建築物の固有周期に近かったことから、共振により最上階の応答変位が最大で片側 137cm に達し、かつ大きな揺れが長時間続いた。これにより、エレベーターの閉じ込めや、非構造部材の損傷等の被害が生じた⁵⁾。

これはまさに長周期地震動に対して懸念されていた超高層建築物の共振現象であった。なお、関東エリアの RC 造超高層建築物において、地震後に 1 次固有周期が 1.4 倍程度に伸びたものも見られた。

② これからの対応方針

これまでの検討により取りまとめた設計用長周期地震動の作成方法を用い、様々な地点での長周期地震動特性を把握するとともに、それによる多様な超高層建築物や免震建築物の応答性状を、これまでに検討を行ってきた限界値に関する知見を用い

て調べ、今後発生が懸念される地震への対策等に結びつけていく必要がある。そこには、一昨年末に内閣府から出された南海トラフ巨大震源モデルによる地震動や、今後、内閣府や地震本部が検討する長周期地震動等も含める必要があろう。なお、東日本大震災を踏まえた長周期地震動対策については現在検討中であるが、長周期地震動は、基本的に時刻歴告示(H12 建告第 1461 号)のサイト波に準じた扱いとする方針が提案されている^{2 4)}。

今後、どの震源モデルの地震動によって、どの地域に、どの程度の長周期地震動が発生し、そこに存在する超高層建築物等にどのような応答が生じ、それによりどのような状態が生じ得るかについての検討が待たれる。なお、この検討については、必ずしも倒壊の防止を対象とするのではなく、より高い性能として修復が可能なレベルやさらには機能継続等、個々の超高層建築物への要求に応じた状態を対象とすべきであり、そのためには、構造実験等から各部材や架構の変形と(損傷)状態の関係を的確に把握しておく必要がある。

一方、限界値に関するこれまでの検討から以下のような課題が指摘されている^{2 5)}。

鉄筋コンクリート造については、現行の設計範囲である最大層間変形角 1/100rad.までは、慣行の解析手法で試験体挙動を十分に追跡できたが、それを超える大変形領域では慣行の解析結果と実験結果との差が顕著であった。特に、強度の差が大きいことから、床スラブの効果や梁の拘束による軸力の効果等が原因として考えられている。設計では、スラブ効果についてはスパン長さの 0.1 倍の協力幅を考慮し、梁の軸力は無視する等の安全側の仮定が用いられるが、実際の応答値を検討するためには、今後、応答解析に用いられる履歴モデルや減衰モデルに関するさらなる検討が必要であり、それらモデルの高度化が応答推定精度の向上に不可欠である。

鉄骨造については、梁端接合部の仕様の違いにより、破断に至る繰返し回数異なること等が明らかとなったが、今後さらに、ノンスラップやハンチ梁端部、および CFT 柱等で塑性化が想定される部材の限界繰返し性能に関する疲労曲線についての検討が必要である。

免震については、実大の高減衰積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムでは繰返しに伴う温度上昇の特性が異なり、それがエネルギー吸収性能にも影響を及ぼす場合があること等が分かってきた。今後さらに、免震用の鋼材ダンパーや鉛ダンパー等の動的多数回繰返し実験を行い、そのエネルギー吸収や温度依存

性を明らかにする必要がある。

今後、これらの検討結果を取り入れ、パブリックコメントに寄せられた意見も参考にしながら、対策のとりまとめに向けた検討が行われる予定である。これらは、性能評価機関の業務方法書やそれを補足する資料集として活用されるであろう。

なお、実務や審査へ適用されることと、現状の応答解析の精度等を考えると、ある周期だけ応答値が突出するような長周期地震動の作成は望ましくなく、スペクトルに基づくスムーズ化等何らかの工学的な判断による提案も必要と思われる。



(a)柱のせん断破壊や損傷 (b)梁や柱梁接合部の損傷

図8 1995年兵庫県南部地震により倒壊は免れたが大きな損傷を受けた新耐震設計の建築物

5) 庁舎・避難所等の地震被害による機能停止

①これまでの課題と対応

建築物の構造設計において、災害時における人命の安全は最も重要な目標であり、最低基準である建築基準法にもそのために遵守すべき規定が設けられている。しかしながら、近年の地震災害では、居住や活動の場である建築物が損傷を受けてその機能が失われ、それが生活や事業の継続困難を引き起こす事態が生じており、大きな問題として認識されるようになってきた。そのため、設計においては、「建築物の機能を如何に維持するか」、もしくは、「低下した機能を如何に迅速に回復させるか」という観点が、安全性の観点に加えて必要であるとの認識がなされるようになってきた。

1995年兵庫県南部地震では、多数の建築物が倒壊して多くの人命が失われただけでなく、さまざまな都市機能が麻痺するとともに避難所等自宅外での生活が長期間強いられる結果となった。これは、住宅建築物の多くが構造部材や非構造部材、設備・機器等に大きな損傷を受け、また、電気・ガス・水道等のイン

フラが損傷を受けた結果として、倒壊を免れた多くの建築物においても「すまい」としての機能が失われたからである。さらに、新耐震基準に基づいて設計された建築物において、法律の要求通りに倒壊を免れ人命は守ったが、構造躯体の損傷が激しくその修復費用が極めて高額であったことから、結局は取り壊され新しく建て直されるというケースも少なからず見られた（例えば図8）。この事例は、設計において損傷制御や機能回復という観点を持つことの重要性を示し、大きなインパクトを与えた。

2005年の福岡県西方沖地震では、集合住宅の柱・梁等の構造耐力上主要な部分は無被害であるが、非構造壁に大きなひび割れが発生し、また、ドアが変形して開閉不能となるような建具の被害等が生じ、住宅としての機能の喪失によって被災後の継続的な供用が困難になることが問題として指摘された。しかしながら、このような被災後の機能喪失については、1978年宮城県沖地震や1995年兵庫県南部地震の際にも指摘されていたことではあるが、残念ながら適切な対応はなされてこなかった。

さらに、2004年新潟県中越地震では、半導体工場等の生産設備の多くが被害を受け、設備等の物理的損失だけでなくサプライチェーンにより製品を供給している他企業への影響が甚大となる事態も見られた。この新潟県中越地震の経験から、2005年に内閣府中央防災会議が「事業継続ガイドライン第1版」²⁶⁾を公表し、大地震による事業停止等の影響を最小限に留めるために、被災した建築物の復旧見通し等を考慮した事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）の策定を各企業に求めることとなった。このBCPと耐震化率の向上とにより、想定される東海地震、東南海・南海地震、および首都直下地震等による死者数と被害額をほぼ半減させることが期待されている。なお、この後の2007年に発生した新潟県中越沖地震においても、自動車エンジンの精密機械工場が被災し、その部品を供給されている国内の自動車生産ラインが全てストップするという事態が見られたことから、BCPの必要性がさらに認識されることとなった。

これらのような、近年発生した地震による建築物の被害事例からは、建築物の所有者や使用者が災害時に生じる状況を想定できておらず、そのため災害後の対策も立てられていない実態が浮き彫りとなってきた。そこで、建築研究所では個別重点課題「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発（2007-09）」を実施し、機能継続や早期回復のための構造設計フロー、そこに必要となるデータベースの

フォーマットの構築、および一般向けの情報提供手段等について検討を行い、2011年1月にその成果を公表した²⁷⁾。

その直後に発生した東日本大震災（2011）においても、これらと同様な被害が見られたが、さらに、地震直後からの機能継続が求められる建築物において、以下のような事例が見られた。

- ・被災後の対策拠点となる庁舎10棟以上において構造部材や非構造部材が損傷し（図9）、立ち入り禁止措置が採られたことから、地震後の活動に支障を来した⁵⁾。何れも旧基準により設計された建築物であるが、構造部材の損傷の程度は大破から小破まで様々であったことから、構造部材のみならず非構造部材等の損傷も使用禁止措置の判断に大きく影響したことが分かる。
- ・地震後に避難施設として利用されることが想定されていた多数の体育館において、鉄骨造の屋根架構と下部RC構造との接合部の破壊（図10）、天井の落下、および非構造部材の損傷・落下等が見られ⁵⁾、避難住民を受け入れることができなかった。
- ・耐震補強された学校において、杭が大破し（図11）上部構造物が傾斜したため、使用できなくなり結果的に取り壊された²⁸⁾。
- ・新耐震基準に基づき設計された、もしくは耐震補強された、共同住宅のRC造の非構造壁等が大破した⁵⁾（図12）ことから、地震後長期間にわたり「すまい」として使用できなくなり、多くの住民が避難所に押し寄せることとなった。

② これからの対応方針

新築において現行基準（法の最低基準）を満足することや、耐震改修において現行基準の要求レベルを確保するだけでは、地震後の建築物の継続使用性は必ずしも確保されない。特に、災害対応拠点となる庁舎や避難者を受け入れる避難施設のように、地震直後からの使用性が求められる建築物にとっては、これらは早急に解決すべき課題である。

そこで建築研究所では、2013年度から新たな個別重点研究「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築（2013-15）」を開始し、地震後の継続使用性を確保するための耐震性評価手法を提案し、新築建築物の設計や既存建築物の耐震補強設計に役立つ技術資料を取りまとめるとともに、それを適用した評価例を示す予定である。例えば、機能継続に支障を来すような、構造部材、非構造部材、設備等の損傷を防止する設計手法を構築するために、東日本大震災で使用



図9 庁舎の被害



図10 体育館の被害



図11 杭の被害

（首都大学東京北山和宏教授提供）

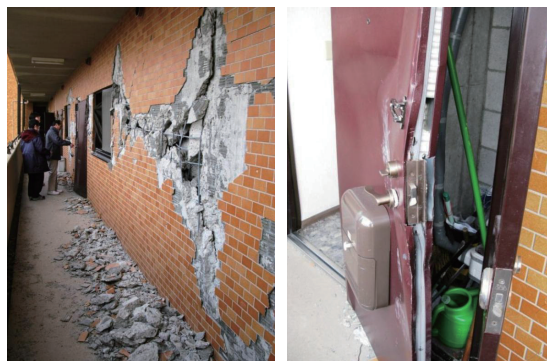


図12 RC造非構造壁とドアの損傷

禁止となった庁舎建築物のある構面を再現し、載荷試験により損傷の過程を詳細に調べることや、置き屋根構造の体育館を対象に、鉄骨造とRC造の接合部の挙動を構造実験により検討すること等を計画している。また、杭の損傷による建築物の傾斜を防止するため、いわゆる杭の二次設計について、現状の評価法の妥当性の検証等も含めて検討する予定である。

この課題では、地震後も高い継続使用性が求められる建築物のうち東日本大震災（2011）で使用禁止とされた建築物を対象に、建築物の機能が継続されなかった原因を調べ、その情報から機能継続のために必要となる設計目標を取りまとめることが一つの特徴である。これは東日本大震災の経験を活かすために、今やらなければならない。

6) 今後発生が予想される大地震による被害

① 背景

2012年8月に、内閣府から「南海トラフの巨大地震による被害想定（第一次報告）」²⁹⁾が発表され（図13）、東海地方が大きく被災するケースでは、全壊および焼失棟数が約95万～238万棟、死者が約8万～32万人と、極めて大きな被害の数値が示された。これは、最大クラスの地震・津波に対する被害の全体像を明らかにすることにより防災対策の必要性を国民に周知するために、主として広域的な防災対策を検討するためのマクロの被害の想定を行ったものであり、今後、各地方公共団体による詳細な検討を行う必要がある、としている。

今後、個々の建築物について検討を行う際には、当該建築物が地震によりどのような状況になるかを示す必要があるが、南海トラフの巨大地震では建築基準法が想定する地震動を上回る地域が存在することも十分に予想される。

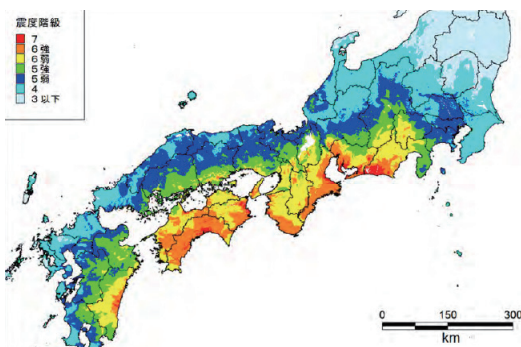


図13 南海トラフ巨大地震（陸側ケース）による震度分布予測²⁹⁾

一方、近年実際に発生した地震においても、地震観測技術の向上と観測点数の増加も相まって、告示「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」（2000年国土交通省告示第1461号）に示されるスペクトルを上回る地震動が数多く観測されている。しかしながら、阪神淡路大震災（1995）においても、地震観測点近傍に建つ、新耐震基準で設計された建築物には倒壊等の大きな被害は見られていない。

その原因として、建築物への入力地震動は、動的相互作用効果等により地表面の地震動よりも短周期成分が低減される場合があること、建築物が有する各層の保有水平耐力は、床スラブの効果、材料強度の余裕、強度評価式の余裕等によって、設計慣習による予測値よりもかなり向上する傾向があることが考えられる。これは、図5に示す震動実験と応答解析との比較から認識されてきた。一方、保有水平耐力が向上し、各構造部分に作用する応力が増加すると、保証設計の仮定が崩れることから、崩壊形が変化する懸念もある。

② これからの対応方針

そこで建築研究所では、2013年度から新たな個別重点研究「巨大地震等に対する建築物の応答推定精度向上に資する入力および構造解析モデルの研究（2013-15）」を開始し、設計においては安全側として無視されてきた余裕度（正の効果）や、崩壊形の変化（負の効果）等について、定量的な評価が可能な精緻な応答解析モデルを用いて入力と応答の両面から検討を行い、今後発生が予想される大地震動に対する建築物の応答をできるだけ精度良く予測する手法を提示する計画である。特に、告示を上回るような巨大地震に対する建築物の応答状態を、ある程度の確からしさで予測できるような手法を検討するところに特徴がある。

この成果は、個々の建築物の耐震性能を詳細に評価し、防災対策の選択的・効率的な実施を可能にするとともに、機能維持が求められる建築物等の高精度な応答評価等も可能とする。従って、今後の発生が想定される東海・東南海・南海の連動地震や首都直下地震等の対策にも直接反映できるものであり、その緊急性は高い。また、この耐震性能を詳細に予測する手法は、耐震診断手法の高度化、住宅性能表示制度の耐震等級を明示的に説明するツール、地震被害想定を精緻化（被害関数の改良）、巨大地震対策が必要な建築物の選別による地震対策の効率化、等への反映も期待される。

7) 竜巻による被害

① 被害の概要とこれまでの対応

2012年5月6日に、北関東地方を中心に複数の竜巻が発生し、つくば市内でもフジタスケール F3 規模の竜巻によって、住家等の被害が、居宅で全壊 89 棟、大規模半壊 38 棟、半壊 153 棟、一部損壊が 382 棟、居宅以外で全壊 120 棟、大規模半壊 12 棟、半壊 55 棟、一部損壊が 259 棟に達し、また、工業団地における工場等の被害が、全壊 3 棟、大規模半壊 2 棟、半壊 11 棟、一部損壊が 25 棟に達した³⁰⁾。この竜巻は、被害の甚大さとともに、発生の要因がわが国では初めてのスーパーセルによるとされ、社会的にもインパクトを与えた。

建築研究所は、国土技術政策総合研究所とともに、速やかに被害調査を行い被害概要の報告を行った³¹⁾。現地調査の結果、屋根の飛散等、これまでも見られた典型的な被害形態が見られた一方で、過去の調査では見られなかった、基礎を伴う木造住宅の転倒や、5階建て RC 壁式構造集合住宅における建具等の大規模な損壊(図14)が、新たな被害形態として明らかにされた。また、竜巻による転倒が確認された木造建築物について、水平方向の旋回流や急激な気圧降下によって生じる力、建築物の転倒メカニズム、建築物重量等のいくつかの計算上の仮定に基づき、建築物の基礎の風上端が浮き上がり始める風速の推定を行った³²⁾。

また、上記以外の特徴的な被害事例として、工業団地において高機能化が図られた複数の事業所施設で、突風や飛来物による屋根材や開口部の被害が広範囲に発生し、屋内空間の甚大な被害につながった。これらの施設では、構造躯体が健全である一方で内外装材や設備、什器の被害が甚大であり、建築物の機能が失われ事業が継続できなくなるとともに、多大な経済的損失が生じた事例も見られた。

② これからの対応方針

上記の、風速の推定においては、さまざまな仮定が用いられているが、これらは必ずしも実験等により確認されたものではない。そのため、竜巻による突風荷重が建築物に作用する状況を実験的に再現した上で、当該荷重下での被害発生メカニズムを解明する必要がある。そこで、建築研究所では、基盤研究「建築物の竜巻による被害発生メカニズムの解明(2012-13)」において、竜巻による被害発生メカニズムの解明、建築物の耐衝撃性能の検討、および、竜巻被害が被災後の建築物の機能に及ぼす影響、等について検討を行っている。



図 14 竜巻による被害



図 15 竜巻発生装置

被害発生メカニズムの解明に関して、竜巻通過時には、横向き力だけでなく上向き力も働くが、このことが建築物の転倒や屋根の被害等に影響していると考えられることから、竜巻発生装置(図15)を活用した実験で、そのメカニズムの解明を図ることとしている。

なお竜巻は、局地的な自然現象であり、個々の建築物が竜巻等の突風被害の領域に入る確率は極めて低く、通常の建築物の設計対象とするのは経済的に合理的ではないことから、建築基準法ではこれを対象とした構造計算は課されていない。しかしながら、ガスタンクのような危険物を有する建築物等においては、突風や飛来物による損傷が大被害につながる危険性もあり、予め何らかの検討を行う必要性も指摘される。また、内閣府中央防災会議の防災基本計画では、2008年の修正の際に、企業防災の進展に伴い、竜巻等突風に対しても事業継続計画(BCP)策定支援等の高度なニーズに応えられる条件整備が求められている³³⁾。従って、上記施設の被害事例を踏まえ、人命・財産保護の観点から被災後の影響が極めて大きい施設等を対象に、通常の耐風設計での性能検証クライテリアを超えた竜巻に対する性能検証の考え方を整備することは、これら施設の竜巻による被害軽減や機能継続をはかる上で不可欠である。本課題は、このような問題意識の下に、知見の蓄積を行うものである。

Ⅲ 今後期待される構造設計の方向性

第Ⅱ章での東日本大震災等に関わる議論に加え、これまでの基準の変遷や研究の動向、さらに世の中の情勢等も勘案し、これからの構造設計の方向性について考えてみる。ここでは、それを「性能設計の推進」と「余裕のある設計の推奨」の2つの観点から示す。

1) 性能設計の推進

① 性能設計に関する経緯と課題

20世紀後半の高度成長期を経て、社会・経済がだんだん成熟してくると、世の中は画一性から多様性を求めるようになってきた。それに符合して建築構造も、超高層建築物・免震・制振等のさまざまな技術開発が、活発に行われてきた。このような背景において、1990年代初頭から、性能設計に関する研究や提案が見られるようになってきた。建築研究所も、法律で定める最低水準を下回らない範囲での自由な性能の設定を念頭に置き、そのために必要な目標水準設定の考え方、性能評価の体系およびこれらをサポートする社会システムのあるべき姿について検討するために、1995年度から1997年度まで建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」を実施した³⁴⁾。

このプロジェクトでは性能評価に基づく望ましい構造設計体系として、a) 建築主と構造設計者の合意の基に当該建築物が保有すべき構造性能を設定し、b) 構造設計者はその構造の特性等に応じて適切な設計・計算法を選択して架構、部材等を仮定し、c) これが設定した構造性能を保有していることを確かめる、という姿を想定した。すなわち、要求性能を明確化し、その性能を満たすことを基本として、要求性能を達成するための設計の手法や仕様の詳細は構造設計者の判断に委ねるという、自由度と信頼性の高い構造設計が可能となる体系である。

一方、建築基準法は、1998年に性能規定化を目的とした改正が行われ、2000年に施行された。そのきっかけは、1996年2月の日米首脳会談（橋本—クリントン会談）において、日米貿易摩擦の緩和に資する非関税障壁の除去のために、建築基準の性能規定化を約束したことであったが、この性能規定は、上記の性能評価に基づく望ましい構造設計体系を制度的に後押しするものとして期待された。本改定では、耐震性能を評価するために、新たに限界耐力計算が盛り込まれた。これは、建築物の地震時の応答値を求め、その応答値が意味する状態を推定し、構造物の損傷等を許容される状態に留める設計を可能とするものである。応答値を直接求める方法としては、時刻歴応答解析に

よる方法がそれまでも存在したが、これは地震波の選定によって結果が異なることや、国土交通大臣の認定を要する特別な設計ルートであることから、より汎用的な応答の推定手法が必要であった。最近では、保有水平耐力計算においてもほとんどのケースで非線形増分解析が用いられているが、この計算方法は応答値を求めるものではないことから、一般の建築確認ルートに、応答値を算定できる限界耐力計算法が規定されたことは、特筆すべき事項であった。さらに、2005年にはエネルギー法の告示も施行された。

しかしながら、現在、性能に基づく構造設計が活発に行われているとは言えない。その理由はいくつか考えられるが、一般市民に、建築構造に関する性能設計の意義が十分に理解されていないことが、最大の要因であろう。当初は、自動車やコンピュータの購入時のように、性能とコストを比較して自らの要求に最も合致する構造性能が選択されることを想定していた。しかし実際には、このような性能の選択ではなく、むしろ一部の開発業者が、精度の高い限界耐力計算を、保有水平耐力計算よりも断面を小さくしコストを削減できる手法として用いることがほとんどであった。

また、最近では、限界耐力計算自体がほとんど使われなくなったが、その要因として、2007年の告示（2000年建設省告示第1457号）改正により、工学的基盤の傾斜の確認が盛り込まれたが、その確認が容易ではないこと等の影響が考えられる。しかしそれ以上に、耐震偽装事件の際の報道等に基づく一般市民らの誤解が基も影響を及ぼしているようである。それは、「一般的に適用されている保有水平耐力計算よりも低い強度の建築物の設計を可能とするいかにわしい計算法」との認識である。これに関しては、我々技術者の側から、限界耐力計算は、時刻歴応答解析の結果に近い応答を与える精度の高い構造計算方法であるとの、正しい情報を分かり易く提供し続けなければならない。

このように考えると、2000年に目指した性能設計の方向性自体に問題があるわけではなく、それへの理解度と限界耐力計算の使い勝手に問題が集約されるようである。理解に関しては、これまでの地震被害による建築物の機能停止等を例に、構造性能のレベルが地震後の生活や活動に及ぼす影響の違い等を、丁寧に説明していく必要がある。

一方、使い勝手にに関しては、主要な構造種別を対象に、限界耐力計算の実施に不可欠なモデル化や限界値等に関する技術情報を、構造実験等を通して蓄積し、利用しやすい解説書等を充

実していく必要がある。

このように技術解説書等が求められる背景として、2000年の法改正の際に同時に建築確認の民間開放が行われ、誰もが同じ判断をする必要性から、規定の明確化が求められたことが挙げられる。そこで問題は、規定の明確化と性能規定がなかなか相容れない関係にあることである。例えば、性能規定では、要求性能を満たせば仕様は問わないことが原則であるが、規定の明確化は、要求性能に合致する仕様等を求める。

もともと、性能規定では、性能と仕様の関係は設計者が技術資料に基づいて適切に設定することが想定され、そのような技術資料は徐々に蓄積されると期待されていた。しかしながら、当初期待したような法律の最低を上回る目標性能を設定する設計があまり見られず、そのため、このような技術資料の蓄積も行われてこなかった。そこに、耐震偽装事件以降、さらに強く規定の明確化が求められるようになり、設計における判断の“よりどころ”が求められるようになった。

これが、技術資料の蓄積が求められる理由である。先に述べた、工学的基盤の傾斜の確認方法は、現在改訂作業が進められている、2013年版建築物の構造関係技術基準解説書において、示される予定である。このような技術情報を、引き続き充実させていく必要がある。

なお、保有水平耐力計算は、各階でDsを算定する点や、部材種別のクライテリアが示されていないこと等、技術的に理論との整合が取りにくい面があり、技術情報を蓄積してこの構造計算法自体を精緻化していくことには限界があると思われる。そのため、保有水平耐力計算については、この計算法を精緻化するという姿勢よりも、応答を直接算定できる限界耐力計算の推進に必要な技術検討を進めていくという方向性の方が望ましいと思われる。保有水平耐力計算は、ルート1、2と同様に応答を算定しない簡易な設計法の一つとして位置付けると、上記のような性能設計への方向性が理解しやすい。

「性能に基づく構造設計」の実現に向け、もう一度、限界耐力計算に必要な技術検討を推進させたい。

② 災害後の機能継続を目的とした構造設計（当面の取り組み）

第Ⅱ章の「5）庁舎・避難所等の地震被害による機能停止」と「7）竜巻による被害」でも述べたが、最近の災害において、建築物が被害を受けることによりその機能が阻害され使用できなくなる事態が生じており、災害対策拠点となる庁舎や避難所となる体育館等、災害後直ちに使用される建築物を対象に、災

害後においてもその機能が継続できることを保証するための構造設計法やその普及が強く求められている。この実現のためには、まず、これまでの災害で建築物の機能を阻害したさまざまな原因を特定し、その上で機能継続のための構造設計法や、構造技術の開発に取り組む必要がある。機能停止は必ずしも構造耐力上主要な部分の破壊のみで決まるものではなく、非構造部材や設備の損傷も大きな影響を及ぼす。東日本大震災の教訓を後世に伝えるためにも、上記に関する丁寧な調査が求められる。

なお、地震後の機能に影響を及ぼすような被害を避けるために、建築基準法を改正すべきとの意見を聞くことがある。ここで、建築基準法と機能継続との関係について整理しておこう。

建築基準法は、憲法第29条で保障される財産権を公共の福祉の観点から制約するものであり、そのため最低のみが定められている。すなわち、私有財産である建築物はどのように造られても良く、つまり、原則はどのような構造性能を持たせても良い。しかしながら、建築物が極端に弱く造られたために地震で倒壊し、そこに居合わせた他者や近隣の方々の生命に危険が及ぶような事態は許容できない。そのため、公共の福祉の観点から必要な制限を加えるのが建築基準法であり、必要な構造強度等を規定している。

このことからわかるように、建築基準法は最低基準のみ定めることができるものであり、逆にそれ以上のことを定めることは、憲法が保障する基本的人権を侵害することになる。

従って、機能継続のような、建築基準法の要求よりも高いレベルの構造性能が要求される場合の構造設計については、建築基準法とは別の位置づけでガイドライン等が示される必要がある。例えばその一つとして、2003年に定められた「官庁施設の総合耐震計画基準」がある。この基準は、現在「東日本大震災を踏まえた官庁施設の機能確保に関する検討会」において必要な見直しを行うための検討が行われている³⁵⁾が、機能継続が求められるあらゆる建築物の設計に参考となる。

災害後の対策拠点となる庁舎、避難所、病院、警察署、消防署等では、災害直後からの機能継続が求められるが、一般の建築物にはいつも機能継続が求められるわけではない。機能継続は最低よりも高い構造性能であり、その実現にはそれに見合うコストを要することから、企業等においてもコストに見合う便益(B/C)の観点から、建築物ごとに要求する耐震性能のレベルを定める例が見られる。今後、このような考え方が社会一般に普及すれば、構造に関しても、消費者が車やコンピュータの購入と同様に、性能とコストの関係メニューを参考に自らの

要求を決定していくことができる。

そのためには、災害により個々の人々の生活や活動にどのような影響が及ぶかについて、自らが考えられるような情報の提供や啓蒙が必要であろう。すなわち、建築物のどの部分に、どの程度の被害が生じ、それにより建築物機能がどの程度喪失され、人々の生活や活動にどのような影響を及ぼすかという、災害シナリオの理解が必要である。

また、それとともに、災害発生時の状態をできるだけ確からしく予測できるような、構造設計法の構築とそのための技術情報の蓄積が強く求められる。

図16に示すように、性能に基づく構造設計における目標性能の設定は、地震後も無被害でそのまま使い続けられる「機能継続」の状態から、倒壊は防ぎ人命は守るが、修復に多くの時間と費用を要する「倒壊直前」の状態まで、多岐にわたる。その中でも、まず、最も高い性能である、地震後も無被害でそのまま使い続けられる「機能継続」の状態を対象に、出来るだけ早く検討を行い、次なる大地震に備えることが重要と考えた。これが、この節のタイトルに（当面の取り組み）と書いた理由である。

一方、損傷限界を超え、損傷が生じるために修復が必要となる状態「修復性」に関する検討については、建築研究所の個別重点課題「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発（2007-09）」²⁷⁾において、機能継続や早期回復のための構造設計フロー（図17）³⁶⁾とそこに必要となるデータベースのフォーマットを構築した。今後、この考え方を基に、ある程度の時間を掛けて必要な技術情報を蓄積していくこととなる。なお、安全限界は、倒壊直前であり、安全性に直結する最低限確保すべき性能と言える。

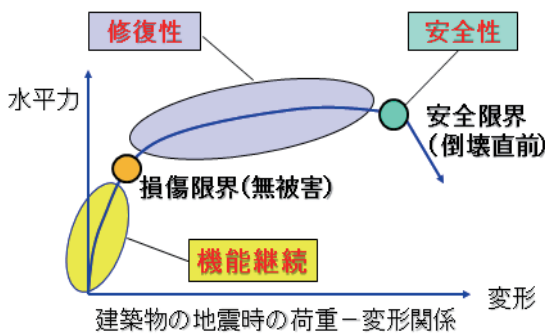


図16 安全性と修復性および損傷限界（無被害）の関係

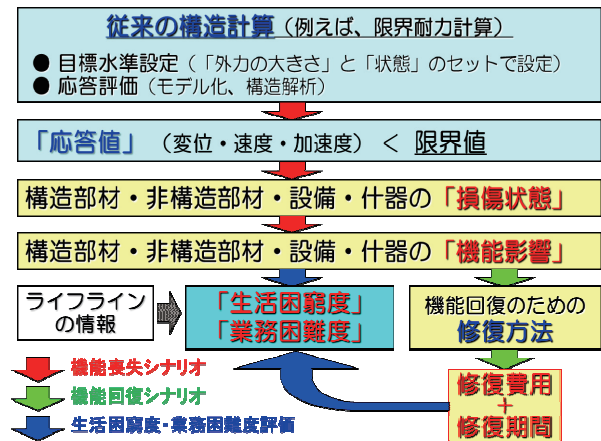


図17 「機能継続・早期回復」の評価フロー

2) 余裕のある設計の推奨

① 東日本大震災でも明らかとなっていない今後の課題

改正以来約30年が経過した新耐震基準は、最初の15年については阪神・淡路大震災（1995）の被害調査からその挙動が概ね確認され、必要な告示改正等が行われてきた。しかしながら、それ以降の15年については、2011年東北地方太平洋沖地震が必ずしも最大級の入力地震動ではなかったことから、阪神・淡路大震災（1995）以降に普及してきた、耐震、免震、制振、耐震改修等に関するさまざまな構造技術や関連する技術基準は、まだ地震の経験によってその技術内容が十分に検証されたとは言えない。

さらに、阪神・淡路大震災（1995）以降に普及してきた技術に一貫構造計算プログラムを利用した設計が挙げられる。これは、解析モデルや解析上の仮定等について設計者の適切な判断が求められるが、このような技術と人の関係についても、その検証は今後の課題であろう。

以上のように、建築構造設計においては、全てのことが十分に理解されているというわけではないのが実情である。我々は、この事実を謙虚に受け止め、そのことを常に考慮した判断を行っていく責任がある。

② 想定外の事象への配慮

昔の工学は経験に基づくものであったが、現在は、コンピュータシミュレーション等のさまざまな技術ツールにより、想定する事象へのきめ細やかな対応が可能となってきている。しかしながら、設計においては、依然として十分には理解されていない事象や、現時点では考えが及ばないような事象が存在する

ことを常に意識した、総合的な判断が求められる。構造設計は、このような「判断」の積み重ねであり、構造計算は判断に基づき解を出すための手段と位置づけられる。

一般に、未知や未経験の事象に対処することは極めて困難であるが、このような unknown な事象に対する工学的な対処方法のひとつに、「余裕」の付与がある。構造設計においては、「余裕を持った設計」ということになる。よく分からないことがあるからこそ、それへの備えとして「余裕」を確保しておくという考えである。例えば、発生の可能性が極めて少ない爆発、衝突、テロ等については、構造計算による検討は求められていないが、一旦その事象が発生した場合の崩壊に対する一定の redundancy (冗長性) を確保するために、柱をあまり細くはしないと配慮も、「余裕」を用いたひとつの解である。

一方、考えている事象に対する設計のみ精緻化し、それ以外の事象に対する工学的な配慮が欠けるのでは適切な判断とは言えない。最近では、さまざまな先進的な機構や設計手法を駆使することで、構造部材を極端にまでスリム化するような風潮も一部には見られる。また、無駄を省く観点から、削れるところではできるだけ削るという風潮もある。特に後者では、冗長性に関わる余裕等はその直接的な効果が説明しにくいことから、真っ先に削られる恐れがある。しかしながら、それらは想定外への備えを自ら放棄していることになる。

長谷川英祐氏の著書「働かないアリに意義がある」³⁷⁾では、「働き者と思われているアリの中にも働かないものがある、それは外敵の侵入等の非常事態への備えである。一旦、非日常的な事態が生じると、働かなかったアリたちが立ち上がりそれに対処する。これは、アリのコロニーを長期間存続させるために、「想定外の事象への備え」として自然界が身につけた“余力”という解決策である」ということが書かれている。

対象は違うが、建築物にも想定外の非常事態に対する「余力」が無ければ、その事象が作用した途端に崩壊するかも知れない。建築物を、様々な外乱から守るための知恵として、自然界にも存在する「余力」を大切に考えたい。

一方、建築基準法は、憲法が定める基本的人権に対する制限であることから、最低限の要求が定められている。そこに、どの程度の事象までを考慮すべきかについては社会的な議論を要するが、少なくとも、考えられる全ての事象を基準で考慮しなければならないということではない。すなわち、基準法の最低限の要求と、それを上回る要求は分けて考えるべきであり、最低限を上回るような事象への要求があれば、それに対して適切

な解を提示するのが、設計に関わる者の役割であろう。

余裕のある設計は設計者のセンスによるところが大きい。どのような余裕をどの程度付与させるべきか等、工学に携わるものの考え方が問われており、これが今後の建築を変える力にもなる。

IV おわりに

本稿では、まず、第 I 章で、東日本大震災 (2011) の位置づけを整理し、それに基づき第 II 章において、東日本大震災 (2011) 等で顕在化した課題への対応状況と残された今後の課題について整理した。さらに、第 III 章において、これまでの構造分野の動向と合わせて、今後の構造設計に期待される方向性についてまとめた。

これらに示した、今後の課題や方向性をまとめると以下のようになる。何れの課題についても、今後の構造設計に向け、東日本大震災 (2011) 等の経験を最大限に活かす必要がある。

I-1) 津波による建築物の被害

津波避難ビルに関するこれまでの検討は、津波による被害の痕跡から事象を推定する方法によってとりまとめられたものであるが、実際にどのような現象が生じたかについては、必ずしも詳細に理解されたわけではない。よって、今後、実際の挙動をよりの確に捉えられるような合理的な評価法へ改善していくことが望まれる。特に、波力や浮力の算定における開口の扱いや、津波波圧算定への浸水深の影響等が当面の課題である。

なお、抗力に基づく津波波圧の算定も、津波波圧算定を合理化していく一つの方策と考えられるが、そのためには、流速等の情報が必要となるため、津波遡上シミュレーションに関しても、敷地での流速と浸水深の時系列的変化を再現できるような、精度の高い解析技術の開発が望まれる。

さらに、今後検討が必要な課題として、「設計に考慮されている遮蔽物の要件整理」、「ピロティ建築物に作用する津波外力の合理的な評価」、「非構造壁等の取り付け方法と建築物が受ける津波波圧との関係」「漂流物による衝突荷重評価」等が挙げられる。

I-2) 天井やエスカレーターの落下被害

天井の落下対策を構造計算で行う難しさは、建築物に入力した地震動は各層で増幅されるが、その各層の床スラブから吊り下げられる天井においてはさらに大きく増幅されることにある。

現状では、構造耐力上主要な部分や天井部分の塑性化後の挙動を十分な精度を持って推定することは難しく、そのような検証法の開発が望まれる。しかしながら、そのためには塑性化後の安定した挙動が期待出来るようなシステム自体の見直しも必要であろう。まずは、許容耐力に対して十分な余裕を持って設計することや、既存建築物については、落下しても床の位置まで落下しないようにネット等で支持するといった対処が強く推奨される。

また、構造設計を行って天井落下に対する安全性を検討する他に、そもそも落下しない、もしくは、落下しても問題のない天井システムを開発するという方向性も十分に推奨される。

エスカレーターの落下対策には、建築物が大地震時にどの程度の層間変位を生ずるかを想定し、それに基づき十分安全側にかかり代等を設定する必要がある。これを確実なものとするためには、変形を直接算定しない従来の構造計算方法においても、応答変位を十分な精度を持って推定できるような手法の開発が望まれる。

I-3) 地盤の液状化による被害

地盤の液状化に対しては、液状化の恐れのある地域の周知と住宅性能表示等を通じた情報提供が求められており、そのためには、戸建て住宅等の小規模な建築物における簡便な地盤調査結果から液状化を予測する手法の構築・実用化が不可欠である。また、簡便かつ低コストの液状化対策手法についても、産学官が丸となって取り組むべき課題である。革新的な技術開発に期待したい。

I-4) 長周期地震動による超高層建築物や免震建築物の共振

入力地震動の設定に関しては、入力に係る推定精度の検証や、固有周期のばらつきに対する考え方の構築等が求められる。

一方、応答解析や限界値に関しては、1) RC造では、応答推定精度の向上のために、応答解析に用いられる履歴モデルや減衰モデルの高度化、2) 鉄骨造では、ノンスカラップやハンチ梁端部、およびCFT柱等で塑性化が想定される部材の限界繰返し性能に関する疲労曲線についての検討、3) 免震では、免震用の鋼材ダンパーや鉛ダンパー等の動的多数繰返し実験による、エネルギー吸収や温度依存性の明確化、等の検討が残されている。

さらに、これらの成果を踏まえ、どの震源モデルの地震動によって、どの地域にどの程度の長周期地震動が発生し、そこに

存在する超高層建築物等にどのような応答が生じ、それによりどのような状態が生じ得るかを世の中に示すための検討も求められる。

I-5) 庁舎・避難所等の損傷による建築物の機能停止

地震後の継続使用性を確保するための耐震性評価手法を提案するとともに、機能継続を目的とした新築建築物の設計や既存建築物の耐震補強設計に用いる設計限界値等の技術資料を取りまとめる。また、それらを適用した評価例を示す必要がある。

そのためには、東日本大震災(2011)で使用禁止とされた建築物を対象に、建築物の機能が継続されなかった原因を調べ、そこから機能継続のために必要となる設計目標を取りまとめる必要がある。

I-6) 今後発生が予想される大地震による被害

設計において安全側として無視されてきた余裕度(正の効果:例えば、建築物への入力地震動の短周期成分の低減、床スラブの効果・材料強度の余裕・強度評価式の余裕等による保有水平耐力の増大等)や、崩壊形の変化(負の効果)等について、定量的な評価が可能な精緻な応答解析モデルを用いて入力と応答の両面から検討を行い、今後発生が予想される大地震動に対する建築物の応答をできるだけ精度良く予測する手法を提示する必要がある。

I-7) 竜巻による被害

人命・財産保護の観点から被災後の影響が極めて大きい施設等を対象に、通常の耐風設計での性能検証クライテリアを超えた竜巻に対する性能検証の考え方を整備する必要がある。これは、竜巻による被害軽減や機能継続をはかるためであり、竜巻による被害発生メカニズムの解明、建築物の耐衝撃性能の検討、竜巻被害が被災後の建築物の機能に及ぼす影響に関する検討等が求められる。

II-1) 性能設計の推進

災害により個々の人々の生活や活動にどのような影響が及ぶかについて、自らが考えられるような情報の提供や啓蒙が必要である。

このような性能設計を進めるためには、災害発生時の建築物の状態や不具合を予測できる、構造設計法の構築が求められる。これには、建築物各部分の変形等の工学量から損傷等の状態を

推定し、さらに建築物の機能への影響を予測する必要があるが、その一つとして、限界耐力計算が挙げられる。今後、応答値が直接算定できる限界耐力計算の普及に向け、必要な技術的検討を推進させる必要がある。

II-2) 余裕のある設計の推奨

建築構造設計においては、まだ十分には理解できていない事象や、現時点では考えが及ばない事象が存在することを常に意識した、総合的な判断が求められる。余裕のある設計は、それらへのひとつの対応方針といえ、そのための技術面からの知見の蓄積も求められる。

余裕のある設計は設計者のセンスによるところが大きい。どのような余裕をどの程度付与させるべきか等、工学に携わるものの考え方が問われており、これが今後の建築を変える力にもなる。

参考文献

- 1) 平成7年阪神・淡路大震災 建築震災調査委員会最終報告書、1995.12
- 2) 建築物の構造規定—建築基準法施行令第3章の解説と運用—1997年版、(財)日本建築センター、1997.12
- 3) 福山洋：技術基準と地震被害、2011年日本建築学会大会構造部門(鉄筋コンクリート構造)パネルディスカッション「鉄筋コンクリート造建物の保有水平耐力計算と地震被害」資料、pp.50-60、2011.8
- 4) 境有紀：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性—建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標—、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第683号、pp.35-40、2013.1
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)建築研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告、国総研資料第674号、建築研究資料第136号、2012.3
- 6) 内閣府防災担当：中央省庁業務継続ガイドライン 第1版～首都直下地震への対応を中心として～、2007.6
- 7) 内閣府防災担当：地震震災時における地方公共団体の業務継続の手引きとその解説 第1版、2010.4
- 8) 福山洋：既存建築物の再生・活用(その2)～空間拡大における構造上の課題とそれを解決するための技術開発～、平成22年度独立行政法人建築研究所講演会テキスト、pp.71-80、2011.3
- 9) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン、2005.6、http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/tsunami_siryu2.pdf
- 10) 福山洋、奥田泰雄、加藤博人、石原直、田尻清太郎、壁谷澤寿一、中埜良昭：津波避難ビルの構造設計法、平成23年度独立行政法人建築研究所講演会テキスト、pp.39-55、2012.3
- 11) 国土交通省：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について、2011.11.17、http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000274.html
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所、一般社団法人建築性能基準推進協会編、独立行政法人建築研究所協力：津波避難ビル等の構造上の要件の解説、2012.2、http://www.kenchiku-bosai.or.jp/seismic/tsunami_text.html
- 13) 国土交通省報道発表資料：「建築物における天井脱落対策試案」について・参考資料、2012.7.31、<http://www.mlit.go.jp/common/000219511.pdf>
- 14) 国土交通省報道発表資料：「建築物における天井脱落対策試案」に関するご意見募集について、2012.7.31、http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000332.html
- 15) 国土交通省住宅局建築指導課監修、財団法人日本建築設備・昇降機センター編集：昇降機耐震設計・施工指針、2009
- 16) 国土交通省報道発表資料：「エスカレーター落下防止対策試案」に関するご意見募集について、2012.7.31、http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000333.html
- 17) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001.10
- 18) 国土交通省報道発表資料：「液状化対策技術検討会議」の検討成果について、平成23年8月31日、http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000154.html
- 19) 国土交通省都市局市街地整備課、液状化対策推進事業について、2011.11、<http://www.mlit.go.jp/common/000184390.pdf>
- 20) 国土交通省報道発表資料：「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について、2010.12.21、http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html
- 21) 西山功：東日本大震災を踏まえた建築分野の研究の展開、国土技術政策総合研究所、国土交通省国総研講演会資料、2011.12、<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2011/happyou/07.pdf>
- 22) 国土交通省：平成23年度建築基準整備促進事業 成果概要一覧、2012.4、http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000047.html

- 23) 国土交通省：平成22年度建築基準整備促進事業 成果概要一覽、2011.4、http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_fr_000024_1.html
- 24) 国土交通省国土技術政策総合研究所：建築基準検討委員会第3回資料2、2011.10、<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/iinkai/20111013pdf/siryou2.pdf>
- 25) (独) 建築研究所第8回記者懇談会資料1：長周期地震動を受ける超高層建築物（RC造・S造）および免震建築物の構造安全性に関する大型実験について、2012.11、<http://www.kenken.go.jp/japanese/information/information/press/20121130/1.pdf>
- 26) 内閣府防災担当、企業評価・業務継続ワーキンググループ：事業継続ガイドライン第一版—わが国企業の減災と災害対応の向上のために—、2005.8
- 27) 向井智久、福山洋、森田高市、斉藤大樹、加藤博人：災害後の建築物の機能継続・早期回復のための構造性能評価システムの開発報告書、建築研究所プロシーディングスNo.20、2011.1
- 28) 北山和宏：東北地方太平洋沖地震による耐震補強済み RC 建築物の地震被害、2012 年日本建築学会大会構造部門（鉄筋コンクリート構造）パネルディスカッション「東日本大震災における鉄筋コンクリート建物の被害と分析」資料、日本建築学会、pp.11-19、2012.9
- 29) 内閣府報道発表資料：南海トラフの巨大地震に関する津波高、浸水域、被害想定公表について、2012.08.29、http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html
- 30) つくば市災害対策本部：5月6日に発生した竜巻による被害と復旧状況について、2012.12.12、https://www.city.tsukuba.ibaraki.jp/dbps_data/_material/_localhost/kou002/tatsumaki/No231.pdf
- 31) 国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所：平成24年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報）、2012.6.13、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf>
- 32) 国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所：転倒した木造建築物に作用した風速の推定について -平成24 年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害の考察-、2013.1.9、http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/201205-fiususoku_suitei.pdf
- 33) 中央防災会議：防災基本計画、pp.78-79、2008.2、http://www.bousai.go.jp/keikaku/090218_basic_plan.pdf
- 34) 建設省大臣官房技術調査室監修、(社) 建築研究振興協会編：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト—仕様から性能へ—、技報堂出版、2000.8
- 35) 国土交通省官庁営繕：東日本大震災を踏まえた官庁施設の機能確保、http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_kinoukakuho_kentoukai.html
- 36) 福山洋：機能回復性を考慮した構造設計、日本建築構造技術者協会、Structure、No. 114、2010.4
- 37) 長谷川英祐：働かないアリに意義がある、メディアファクトリー新書、2010.12