

# 東日本大震災を踏まえた建築分野の研究の展開

建築研究部長

西山 功

# 東日本大震災を踏まえた建築分野の研究の展開

建築研究部長 西山 功

## 1. はじめに

本年3月11日午後2時46分頃、三陸沖を震源として発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)は、東北地方から関東地方の広い地域において、甚大な人的被害に加え、地震動や津波による建築物被害など未曾有の大災害(東日本大震災)(以下では、「今回の地震」と呼ぶ)をもたらした。

本講演では、今回の地震における建築物の地震動及び津波被害の概要、建築物被害を踏まえた技術基準等の研究への取り組み状況(非構造部材特に天井落下防止のための構造計算法、設計用長周期地震動の提案、住宅の地盤液状化対策の表示方法、耐津波設計法の提案)について紹介し、今後の災害に備えた建築物の安全性確保の方策についての展望について解説する。なお、建築物被害の概要については、国土技術政策総合研究所と建築研究所が共同調査により作成した速報等<sup>1) 2)</sup>(写真1)を多くの箇所で参考にさせて頂いている。

## 2. 東北地方太平洋沖地震の概要

今回の地震は、日本列島の東北地方をのせている北アメリカプレートと太平洋プレートとの境界で発生した逆断層型の地震であり、日本における観測史上最大、1900年以降では世界4番目の規模<sup>3)</sup>である。気象庁気象研究所による震源モデル<sup>4)</sup>(図1)では、岩手、宮城、福島、茨城の各県沖合で、海岸線にほぼ並行に、南北方向の長さ約450km、東西方向の幅約150kmの区域が震源域とされている。各県から断層面までの直線距離はほぼ同じであるので、東北地方から関東地方の広い地域で気象庁震度階6程度を記録している。宮城県栗原市では最大震度7を記録しているが、この観測点では建築物の被害実態に比べて大きな震度が以前より記録されてきており、観測点が小さな崖状の地形の縁に位置する点や計測震度は倒壊など重大な建築物被害との相関が必ずしもよくない点は周知<sup>5)</sup>のところである。

警察庁公表資料<sup>6)</sup>(表1)より今回の地震のマクロな被害を見ると、8月28日現在、死者は15,741人であり、平成7年(1995年)兵庫県南部地震<sup>7)</sup>の約2.4倍であるのに対し、住宅等の全壊(流失を含む)は115,674戸で、こちらは約0.6倍となっている。他方、国土交通省都市局の第1次報告<sup>8)</sup>によれば、津波浸水区域での全壊の建築物棟数は約12万棟とされ、警察庁公表資料における住宅等の全壊のほとんどは津波によるものとなり、単位が「戸」「世帯」「棟」と異なる点に注意を要するが、今回の地震による被害のほとんどは津波によるものと言え、現地調査の実感とも一致している。

## 3. 建築物の被災状況

今回の地震の発生翌日から福島第一原子力発電所の事故により立ち入り禁止となっ

た福島県浜通り地区を除き、被災地のほぼ全域<sup>1)</sup> (図 2) で建築物全般の被災状況を現地調査した。建築物の地震動被害について被害の全容を把握するとの方針の下、各地区における調査の詳細さはやや低くても、これら全域の調査を幅広く実施した。地盤の液状化による住宅被害については利根川流域 (潮来市、神栖市) や東京湾岸 (浦安市) で、また、津波被害については、岩手県から宮城県にかけてリアス式海岸と仙台平野で、調査を実施した。以下では、速報等<sup>1) 2)</sup> に示された調査結果を引用しつつ解説する。

### 3. 1 地震動被害

建築物の地震動被害に関しては、過去の地震では観察されてこなかったような特殊なパターンの破壊は現在までのところ報告されていない。しかし、技術基準等において対応すべき課題はいくつかあり、それぞれの取り組み状況については次章で解説する。以下では、構造毎に観察された典型的な破壊パターンを列記し解説する。

#### 3. 1. 1 木造住宅

木造住宅の被害としては、1) 地盤変状に伴う破損 (写真 2)、2) 店舗併用住宅等大きな開口を有する 1 層部分での層崩壊 (写真 3)、3) やや珍しい 2 層部分での一部崩壊 (写真 4)、4) 柱の生物劣化 (写真 5) 及びモルタル外壁の落下、5) 土蔵における外壁や屋根瓦の落下 (写真 6) などがあげられる。特に、瓦の落下については、過去に多くの地震被害を受けてきた宮城県に比べて、福島県や茨城県における被害が多いと言われており、事実、建物の一部損壊数 (総務省消防庁) とも対応している。

#### 3. 1. 2 鉄骨造建築物

鉄骨造建築物の被害については、外装材に何らかの被害が発生していないと構造躯体が損傷しているかどうかを調査することは難しい。以下では、どのように調査を実施したかを含めて少々詳しく解説する。

まず、ストックが多く、また、震央から近くて地震動レベルも大きいと見られた仙台市を中心に外観調査を実施した。倒壊のような重大な被害はほぼ見られず、被害と言えばほとんどは非構造部材の脱落 (写真 7) などであった。構造躯体の被害としては、1) 自走式駐車場の柱脚の破壊 (写真 8) 及びブレースの座屈、2) ブレース付き間柱接合部の変形 (写真 9)、など過去の地震においても数多い被害であった。兵庫県南部地震において問題となった梁端フランジのスカラップ近傍での破断 (写真 10) のような被害は、現時点まで確認されていないが、民間建物において建物内部を含めた調査結果が公表されていないので単に把握できていないだけなのかも知れない。

以上のような事情であるので、実際の被害実態をより正確に把握するため、建物所有 (管理) 者の理解が得やすい公共建物である学校体育館を対象として、建物内部の調査を重点的に実施した。学校体育館は、構造形式としては工場や倉庫の類型であり、被害実態の把握されていないこれら建築物の被害実態を知る上でも役立つ。調査は茨

城県内の 65 棟で実施し、内訳としては、新耐震基準によるもの 5 棟、旧耐震基準によるもの 60 棟、その内、耐震改修済み 5 棟である。

典型的な被害は、1) 鉛直ブレースの座屈と接合部の破断、2) ラチス柱の斜材の座屈 (写真 11)、3) 鉄筋コンクリート (以下、RC) 造柱と屋根との接続部 (支承部) の損傷 (写真 12)、4) 屋根面水平ブレースのたわみ、座屈、破断 (写真 13)、5) 柱脚コンクリートのひび割れ、等である。また、仙台市での外観調査でも観察された非構造部材の脱落、特に天井落下 (写真 14) が数多く観察された。その一方で、新耐震基準及び耐震改修済みの建物では、構造躯体の被害だけでなく、非構造部材の被害についても軽減される傾向が見られ、既存ストックの更なる耐震化が求められる。

過去の地震被害に比べて特筆すべき被害としては、RC 造柱と鉄骨屋根構造部分との接続部 (支承部) の損傷があげられるが、非構造部材の被害である天井落下については、鉄骨造ではないが亡くなられた方がでた九段会館、構造躯体は最新の耐震設計技術により建設された川崎シンフォニーホールにおいて天井落下しており、技術基準等における明確な落下防止対策 (検討概要については次章で解説) が急がれる。地震動の短周期成分が卓越し異種構造間の接続部に局所的な力が作用したと考えられる点、巨大地震のため地震動の継続時間が長く、繰り返し回数が過去の地震とは比べものにならない程多かった点などとこれらの被害との関連については検討する価値があろう。

### 3. 1. 3 鉄筋コンクリート造建築物

RC 造建築物の被害については、1) 1 層部分での層崩壊、2) 中間層での層崩壊 (写真 15)、3) 柱のせん断破壊 (写真 16)、4) 連層耐震壁の脚部の曲げ破壊 (写真 17)、5) 連層耐震壁の境界梁の付着破壊 (写真 18)、6) ペントハウスの傾斜、7) 集合住宅のドアまわりの非構造壁の被害 (写真 19)、8) 外装材の落下などがあげられる。

新耐震基準で設計された建築物では、兵庫県南部地震でも実証されたように被害が大きく軽減された一方で、耐震改修された建物も概して良好な耐震性能を発揮したが中には一部被害 (写真 20) を受けた建物も見られた。耐震改修では、新たに設置される耐震要素と既存建物との剛性の大小に注意することが肝要であろう。

### 3. 1. 4 その他の建築物

その他の建築物としては、超高層建築物や免震建築物がある。いくつかの建築物において本震とともに余震での強震波形が記録され、それらの一部については既に公表されている。

超高層建築物の代表例としては、大阪府咲洲庁舎があげられる。偶然とも言われるが、実は、地道な努力による必然により、建築研究所により強震観測<sup>9)</sup>が行われ、震源から 700km 以上も離れたこの建築物が長周期地震動に共振し、片振幅で最大 1.4m もの揺れが 10 分間以上も継続 (図 3) したことが明らかにされた。大阪府は、地震発生後 2 か月という短期間で今後の対策方針まで検討を行い、その結果を公表<sup>10)</sup>している。このような迅速な検討が可能となったのは強震記録が存在したからこそであり、

これを期に、強震観測の有用性が超高層建築物の所有者や管理者などに広く理解され、より普及していくことを望みたい。

長周期地震動対策については、今回の地震の発生前の昨年末に、対策試案<sup>1 1)</sup> <sup>1 2)</sup>を国土交通本省と連携して公表しパブリックコメントに付しており、多くの意見も受け取っている。現在、対策試案の成案化に向け今回の地震で観測・記録されたデータも含めた検証を行っている。概要については次章で解説する。

免震建築物については、構造躯体の被害はほとんど報告されていない。いくつかの建築物において、鉛ダンパーの亀裂（写真 21）や鋼材ダンパーの降伏（写真 22）などが見られたが、地震による入力エネルギーを吸収するのがダンパーの役割なので当然の損傷とも言える。ただし、鉛ダンパーの亀裂については、小振幅の多数回繰り返し荷重を受けると発生するものだということが地震後に指摘されるなど、鉛ダンパーの取り替えが必要かどうかの判断基準の検討が急がれる。鉛プラグ入りダンパーの中の鉛ダンパーについても同様の問題が考えられるので、こちらも早急の検討が必要となる。

現地調査<sup>2)</sup> <sup>1 3)</sup>した 17 棟の免震建築物において、3 棟では強震観測が、8 棟ではけがき式変位計測（写真 23）が実施されており、これらのデータを用いた詳細な検討が待たれるが、最大変位 40cm と免震表示された建築物において、今回の地震において最大片振幅 40cm 程度となっている場合が見られ、免震建築物の応答変位の算定法についての検証も必要と考えられる。

構造躯体の損傷ではないが、数多くの免震建築物においてエキスパンションジョイントの損傷（写真 24）が見られた他、家具の転倒（写真 25）なども観察された。エキスパンションジョイントについては、改善がなされるべきであろう。

### 3. 1. 5 宅地・地盤の被害

宅地・地盤の被害については、過去の地震同様、1) 地盤破壊による基礎の破壊（写真 2）、2) 擁壁の被害による住宅の移動（写真 26）、3) 液状化による住宅の沈下や傾斜（写真 27）が見られた。

液状化については、東京湾岸の埋立地や利根川流域の地域を中心に、過去に類がないほどの規模で発生した。強震記録によれば、これら地域での加速度はそれ程大きくはなく、今回の地震が巨大であったために継続時間が非常に長いことから間隙水圧が徐々に高まって液状化が発生したと考えられたが、その後の国土交通省「液状化対策技術検討会議」<sup>1 4)</sup>による検討から、代表的な液状化判定法である FL 法において、地震動の継続時間を考慮する係数（プレート境界型の大規模な地震に対する補正係数）により概ね今回の地震による液状化の発生が説明できることが報告されている。建築物、特に住宅の液状化対策を考えた場合、より簡易な判定法の適用性についての検討が必要と考えられる。現在、住宅の性能表示制度を用い、特に戸建住宅を対象にした地盤の液状化に対する情報を表示する手法について検討を行っており、その概要については次章で解説する。

### 3. 2 津波被害

今回の地震では、「想定外」という言葉が地震学、土木、原子力工学の各分野の専門家からマスコミを通して多く発せられたが、建築分野でも RC 造のような剛強な建築物が津波の力によって転倒（写真 28）したことには驚かされた。前述の国土交通省都市局の第 1 次報告<sup>8)</sup>では、津波被災地全体を現地踏査で調査し、浸水区域を特定している。浸水区域面積は 535km<sup>2</sup>に達し、その 4 割強が浸水深 2m 以上の地域で、これらの地域ではほとんどの建物が再使用困難な損壊を受けていると報告されている。今後の復旧・復興においては、このような地域のまちづくりをどのように行うかが問題であり、各種提言<sup>15)</sup>もなされているが、津波による建築物被害の調査結果に基づき津波に耐える建築物の要件（津波の荷重効果の評価）を明らかにすることがすべての基本となることに異論はなからう。

津波による荷重効果には、1) 津波波圧、2) 洗掘、3) 浮力、4) 漂流物の衝突などが考えられる。津波波圧による被害例としては、RC 造壁体に絵に描いたような降伏メカニズムが形成（写真 29）された例、鉄骨造建築物の柱脚溶接部が破断（写真 30）した例などがあげられる。津波の流れによる洗掘の被害としては、基礎周囲が大きく掘られ、掘られた穴に建物全体が倒れ込んだ（写真 31）例がある。浮力の明確な影響例としては、隣接する RC 造塀を跳び越えるように流された建物（写真 32）があげられる。また、漂流物の衝突例としては、自動車衝突したかにも見える建物（写真 33）、鉄骨柱の残留変形の状況から漂流物衝突（写真 34）が明らかと見られる例がある。

鉄骨造建築物では、津波波圧によりまず外装材が流されてしまうので、その後は津波波圧が減少し、構造躯体の流失を免れるケースが多かったようにも思われる。また、洗掘され傾斜した建物が少ないのは、被害調査として検証はされていないが、洗掘されると建物直下から押し上げる力によりかえって流失してしまうからとも理解できる。浮力により建物が浮き上がるためには、外装材が破壊せずに残っていて建物内部に空気だまりが形成される必要があるが、上述のように外装材はそれ程強くないので、浮いて転倒した事例（写真 35）はごく限られている。

既往の模型水路実験<sup>16)</sup>の結果などに基づいて策定された内閣府ガイドライン<sup>17)</sup>（図 4）に示されている設計浸水深の 3 倍（この数値を「水深係数」と呼ぶ）の高さの仮想的な静水圧が建物の片面からのみ作用するものとして津波水平力を評価する手法の妥当性検証のため、現地調査から層崩壊や流失した建築物やそのような被害を免れた建築物等についてのデータベース<sup>1)</sup>を作成するなどして検討を行っている。その概要については次章で解説する。

### 4. 技術基準等の研究への取り組み

今回の地震において技術基準等における対応が必要と考えられる課題を、上記の解説において出てきた順に並べると、以下の 4 つとなる。これらの課題については、住宅局と連携し、建築基準整備促進事業<sup>18)</sup>を活用して具体的検討作業を進めると共に、その成果は、国土技術政策総合研究所（事務局 建築研究部）に設置した建築構造基

準委員会<sup>1 9)</sup> (図 5) で審議した上で技術基準等の原案として提案することとなっている。

- 1) 非構造部材特に天井落下防止のための構造計算法
- 2) 設計用長周期地震動の提案
- 3) 住宅の地盤液状化対策の表示方法
- 4) 耐津波設計法の提案

#### 4. 1 非構造部材特に天井落下防止のための構造計算法

平成 13 年 (2001 年) 芸予地震において、安芸灘を挟む対岸に位置する広島県と愛媛県において音楽ホールや体育館などの天井や内装材が落下する被害が発生し、これを期に、大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策のための技術的助言<sup>2 0)</sup> (図 6) が、国土交通省住宅局建築指導課長より都道府県建築行政担当部長等宛に送付された。

技術的助言の趣旨は、在来工法天井 (吊り天井) においては、天井が周囲の構造躯体に衝突するなど局所的な力が天井に作用するとこれが落下開始の原因となり、ひとたび、落下が開始すると連鎖的に大空間の天井がすべて落下してしまうので、振れ止めなどを適切に配置することにより天井の揺れ変形を小さくするとともに、それに見合う寸法のクリアランスを天井と周囲の構造躯体との間や天井相互の間に設けることにより、局所的な力を発生させないことを意図したものである。また、吊り天井を構成するクリップと呼ばれる金物など極端に強度が低い部分については、出来るだけ補強しようというものである。

技術的助言の送付の後、大学やゼネコン研究所の他、天井下地メーカーなどで精力的な実験や解析が行われたが、有効な対策として幅広くは実施されてはいない。今回の地震では、前述したように現行耐震基準に従って設計された建物においても多くの天井落下 (映画館やショッピングセンターが地震後に一部閉鎖されたのも天井落下が原因と考えられる) が見られる。このため、従来、建築基準法施行令第 39 条に基づく精神規定的であったものを、今回の地震における天井落下被害の実態調査に基づき技術的助言をレビューするとともに、近年実施されてきた各種研究をとりまとめることにより、実施可能で現実的な天井の構造計算法やより具体的に仕様を定める方法について検討を進め、落下防止対策としてネットを張るなどのフェイルセーフとの併用の可能性も含め、前述の建築基準整備促進事業の 1 課題として検討を進めている。

#### 4. 2 設計用長周期地震動の提案

前述の長周期地震動対策試案<sup>1 1)</sup> では、地震調査研究推進本部より公表されている長周期地震動予測地図において震源モデルが提示されている想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震の 3 地震を対象としていたが、パブリックコメントにおいて、今後想定される南海地震や 2 連動、3 連動地震<sup>2 1)</sup> (図 7) についても対象に含めるべきという意見を受け取っている。また、今回の地震において、数多くの強震データが得られており、対策試案の基本となる「観測データに基づく方法」<sup>1 2)</sup> の検証をより深め

るため、やはり建築基準整備促進事業の1課題として検討を進めている。

これと並行して、建築構造基準委員会の下、長周期地震動対策検討WGにおいて技術基準として具体的な対策を打ち出す上での課題（どのように法体系にのせるのか、どのようにレベル2地震よりも大きな地震を位置づけるのか、どのように地震動の予測誤差を考えるか、どのように予測地震動を地点間で面的に補間するのかなど）について検討を進めている。

#### 4.3 住宅の地盤液状化対策の表示方法

建築物は、建築基準法施行令によって地盤及び基礎の許容応力度の検討により構造計算が義務づけられており、その中で、建築物の自重による沈下などが生じないことを確かめることとされており、液状化に対しては一定の性能が確保されている。これに対して、戸建住宅では、このような検討は義務づけられていない。新たにこのような検討を義務づけることは、地盤調査など過剰な要求となることから、地盤の液状化に関する情報が住宅の取得者に確実に提供されるべく、住宅の性能表示において液状化対策の有無などを表示する方法について建築基準整備促進事業の1課題として検討を開始した。

具体的には、液状化予測手法の妥当性についての検討、地盤の液状化に関する情報表示についての検討、液状化予測や対策に係る関連調査・技術開発等についての知見収集・情報整理であるが、液状化予測手法にスウェーデン式サウンディング試験のように簡易な地盤調査法が適用できるかどうかなどの検討を予定している。

#### 4.4 耐津波設計法の提案

現地調査で作成したデータベース<sup>1)</sup>の他、建築基準整備促進事業の中で主として工作物について調査したデータベースを加えて、内閣府ガイドライン<sup>17)</sup>に示されている設計浸水深の3倍の高さの仮想的な静水圧が建物の片面のみに作用するものとして津波水平力を評価する手法の妥当性検証が行われている。中間報告(その1)<sup>22)</sup>では、遮蔽物がある場合と遮蔽物がない場合について2枚の図<sup>22)</sup>(図8)が示されている。

今回の地震における東北地方の津波浸水地域では、遮蔽物がない場合には、設計浸水深の約1.5倍までは工作物が中心であるが津波により破壊していることがわかる。これに対して、遮蔽物の有る場合には、浸水深が10m以下と浅い場合には水深係数が約1.0倍となるが、浸水深がより深くなると、水深係数は約0.5倍程度となっていることが読み取れる。

中間報告(その2)<sup>23)</sup>を受けて10月13日に開催された建築構造基準委員会<sup>19)</sup>において、水深係数として図9が提案された。遮蔽物が無く、津波の流速が大きくなると考えられる場合には、水深係数を模型水路試験の結果<sup>16)</sup>やスマトラ地震津波による現地調査結果<sup>24)</sup>に従って3としている。これに対して、遮蔽物が有る場合には、遮蔽物がない場合に比べて水深係数が2(1.0)対3(1.5)となることから、水深係数を2としている。今回の地震における津波による建築物等の被害より求めた破壊と非

破壊との境界の水深係数は、遮蔽物の有る場合で 1.0 であるのにも関わらず、2.0 と 2 倍の水深係数が要求されているのは、津波遡上シミュレーションによる浸水深や流速などの算定誤差や建築物の耐力に対する安全率などを加味したものであるが、別途の実験等により浸水深や流速をより精度よく評価できる場合は、必要とされる水深係数は低減できよう。

## 5. 復旧・復興に向けて

今回の地震で津波被害を受けた多くの地域では、明治三陸大津波や昭和三陸地震津波などを経験している。その際にも、多くの住宅が流失し、尊い命が失われている。復旧・復興においては、これまでの教訓がきちんと生かされる計画の策定が望まれる。高地移転は勿論有力であるが、前述の国土交通省都市局の第 1 次調査<sup>8)</sup>でも明らかのように、単純計算では 200km<sup>2</sup>以上の土地が浸水深 2m 以上で居住に適さないということになってしまう点も考慮すると、これまでの各種提言と同様、ハードとソフトを適切に組み合わせた現実的な解の探索が肝要と考えられるが、実際の検討もそのような方向へ進みつつあるようである。

既に、宮城県や石巻市では、建築基準法第 84 条の規定に基づき、建築制限区域等を指定し、建築物の建築の制限を実施している。また、相馬市や南相馬市等では建築基準法第 39 条に基づき、災害危険区域の指定及び建築制限に関する条例を制定している。これらは、特定行政庁や地方公共団体が、復旧・復興において津波に対して安心・安全なまちづくりを目指すのだという明確な意思を表示したものである。これらの地域では、建築が許されるための条件として、津波に耐える建築物（容易に避難できる環境にある建築物を含む）の要件についてのより精度の高い技術情報が早急に必要であり、前述の耐津波設計法の提案に期待するところは大きい。

## 6. おわりに

本講演では、東北地方太平洋沖地震による建築物の地震動被害及び津波被害の概要について解説した。また、これら被害を踏まえた技術基準等の研究への取り組み状況を、天井、長周期地震動、液状化、津波の 4 課題について紹介し、今後の災害に備えた建築物の安全性確保の方策について展望した。

最後になるが、東北地方太平洋沖地震で被災した多くの皆さまにお悔やみを申し上げますとともに、早期の復旧・復興を望みたい。

## 参考文献

1. 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）（東日本大震災）、平成 23 年 5 月、国土技術政策総合研究所資料第 636 号、建築研究資料第 132 号
2. National Institute for Land & Infrastructure Management, Building Research Institute：Summary of the Field Survey and Research on “The 2011 off the

- Pacific coast of Tohoku Earthquake” (the Great East Japan Earthquake), September 2011, Technical Note of NILIM No. 647, BRI Research Paper No. 150
3. U. S. Geological Survey (USGS): Historic World Earthquakes, Earthquake Hazards Program
  4. 気象庁気象研究所:「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定—近地強震波形を用いた解析—、平成 23 年 4 月 26 日更新
  5. 国土交通省気象庁、総務省消防庁:震度に関する検討会報告書、平成 21 年 3 月
  6. 国土交通省:東日本大震災(88 報)、人的被害(警察庁情報 8 月 28 日現在)、平成 23 年 8 月 29 日 10:00 作成
  7. 消防庁:阪神・淡路大震災について(確定報)、平成 18 年 5 月 19 日
  8. 国土交通省都市局:東日本大震災による被災現況調査結果について(第 1 次報告)、平成 23 年 8 月 4 日
  9. Building Research Institute (BRI): BRI Strong Motion Observation (<http://smo.kenken.go.jp/ja/smdb/drawwave/201103111446SKS/52FN>)
  10. 大阪府総務部:咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、平成 23 年 5 月
  11. 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、平成 22 年 12 月 21 日
  12. 独立行政法人建築研究所:長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討、平成 22 年 12 月、建築研究資料第 127 号
  13. 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所:平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第 1 次調査 宮城県・山形県における免震建築物の状況(速報)、平成 23 年 8 月 1 日  
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/pdf/20110311saigai-013.pdf>)
  14. 国土交通省液状化対策技術検討会議:「液状化対策技術検討会議」検討成果、平成 23 年 8 月 31 日
  15. 例えば、国土交通省:津波防災まちづくりの考え方、平成 23 年 7 月 6 日
  16. 朝倉良介ほか:護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 47 巻、2000 年
  17. 内閣府:津波避難ビル等に係るガイドライン、平成 17 年 6 月
  18. 国土交通省報道発表資料:平成 23 年度建築基準整備促進事業の事業主体の募集について、  
([http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku\\_house\\_fr\\_000037.html](http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000037.html))
  19. 国土交通省国土技術政策総合研究所:建築構造基準委員会  
(<http://www.nilim.go.jp/japanese/organization/kenchiku/iinkai/iinkai.htm>)
  20. 「芸予地震被害調査報告の送付について(技術的助言)」(平成 13 年 6 月 1 日に国住指第 357 号で都道府県建築行政担当部長あて通知)、「大規模空間を持つ建築物

の天井の崩落対策について（技術的助言）」（平成 15 年 10 月 15 日に国住指第 2402 号で都道府県建築行政担当部長あて通知）

21. 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図—地図を見て私の街の揺れを知る—手引・解説編 2010 年版（解説：地震カテゴリー）、平成 22 年（2010 年）5 月、

[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10\\_yosokuchizu/tebiki\\_kaisetsuhen.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10_yosokuchizu/tebiki_kaisetsuhen.pdf)

22. 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書（抄）、平成 23 年 7 月、  
<http://www.nilim.go.jp/japanese/organization/kenchiku/iinkai/20110818pdf/siryoul.pdf>

23. 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書 2（抄）、平成 23 年 11 月、  
<http://www.nilim.go.jp/japanese/organization/kenchiku/iinkai/iinkai.htm>

24. 中埜良昭：スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設の設計外力評価、日本建築学会技術報告集、第 13 巻、第 25 号、2007 年 6 月

表 1 人的被害と住宅等の被害<sup>6)、7)</sup>

	人的被害（人）			住宅等の被害	
	死者	行方不明	負傷者	全壊（流失を含む）	半壊
東北地方太平洋沖地震	15,741	4,467	5,924	115,674（戸）	156,567（戸）
兵庫県南部地震	6,434	3	43,792	186,175（世帯）	274,181（世帯）

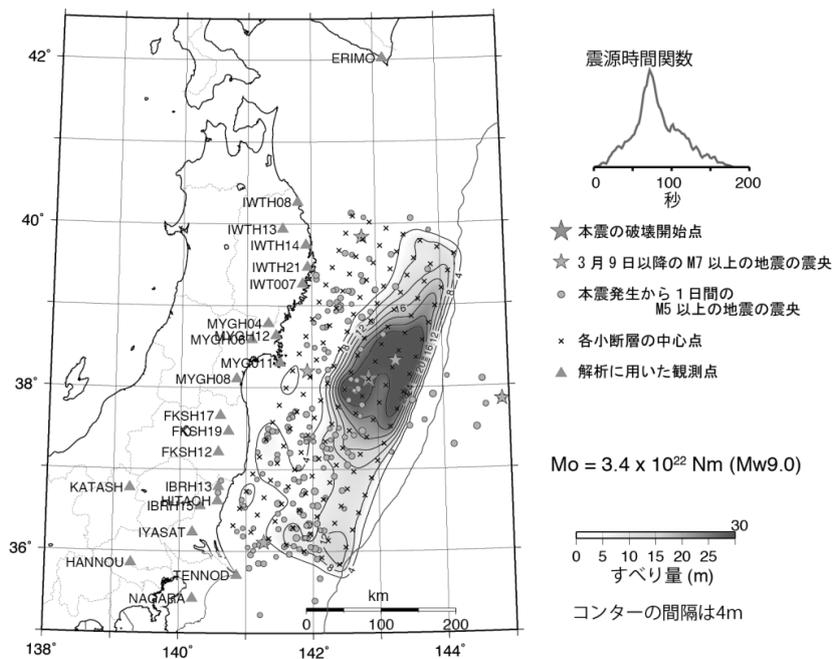


図 1 気象庁気象研究所による震源モデル<sup>4)</sup>

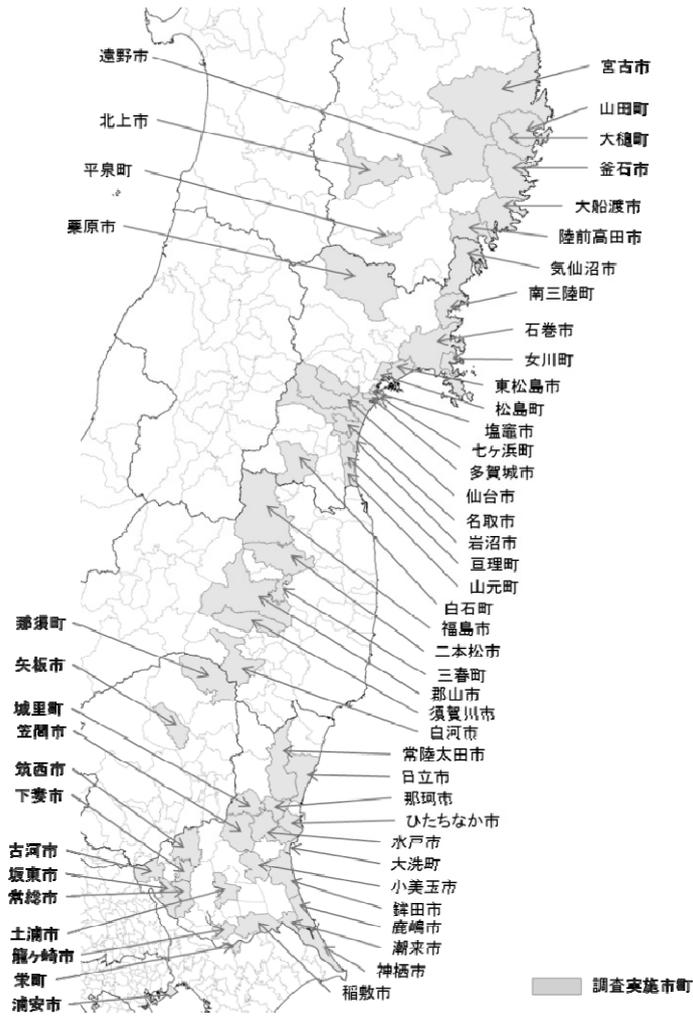


図2 現地調査を実施した地域<sup>1)</sup>

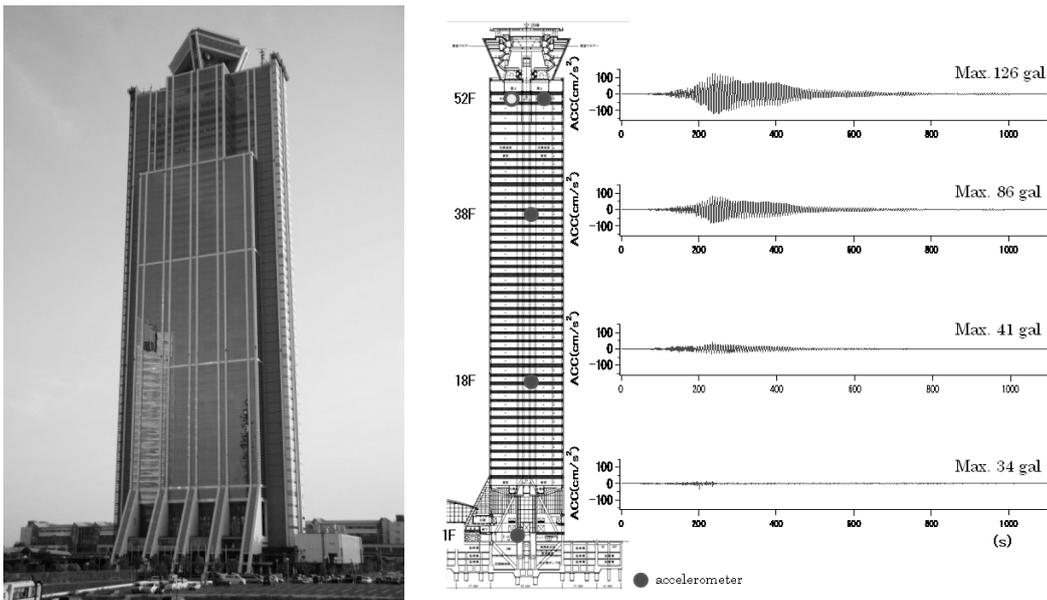


図3 長周期地震動により共振した大阪府咲洲庁舎<sup>9)</sup>

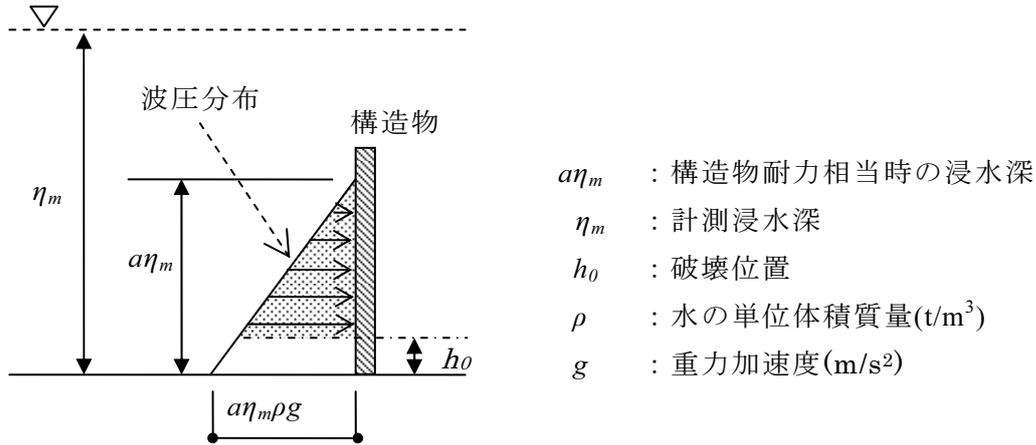


図4 内閣府ガイドラインによる津波波圧の算定法<sup>17)</sup>

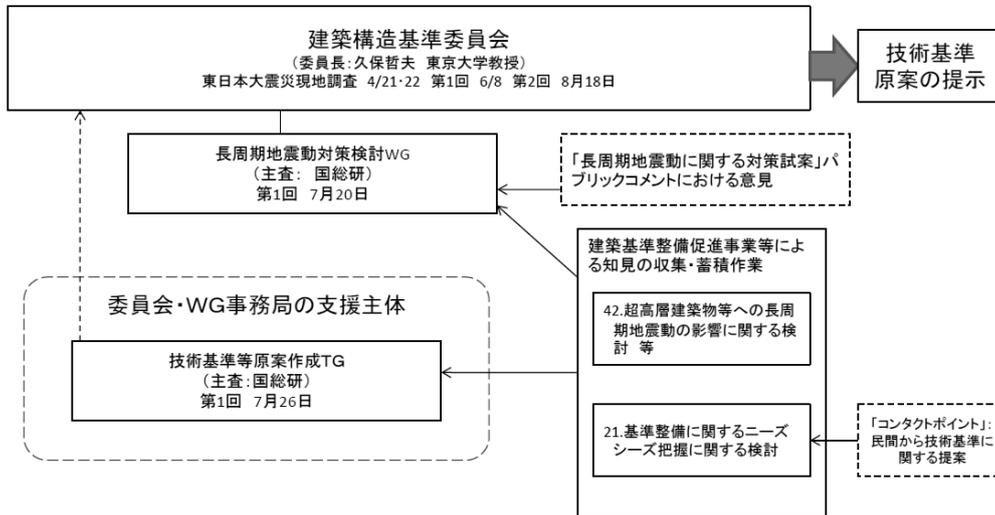


図5 建築構造基準委員会による技術基準策定プロセス<sup>19)</sup>

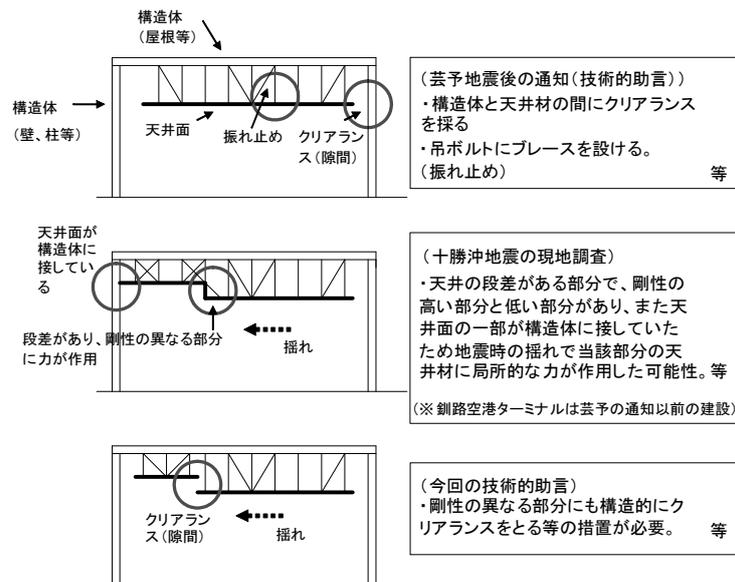
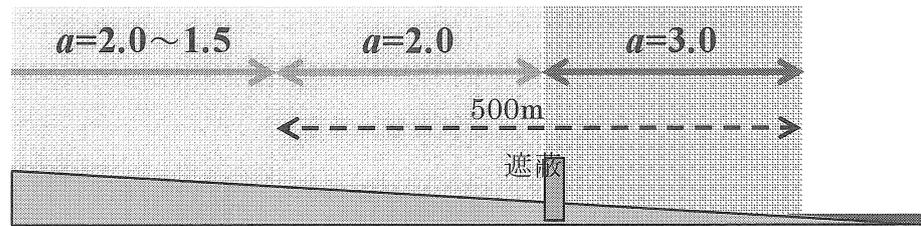


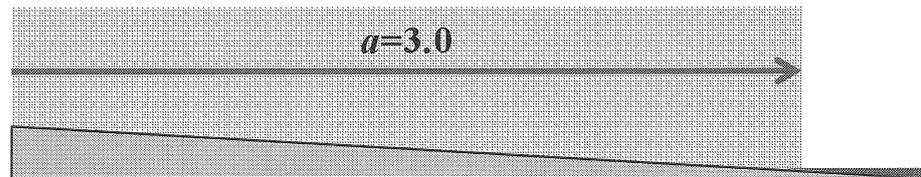
図6 大空間を持つ建築物の天井落下防止のための技術的助言<sup>20)</sup>



遮蔽物のある地域



遮蔽物のない地域



※別途、水深と流速より定まるフルード数など特別な調査研究により水深係数を定めることができる。

注意：フルード数とは、流体の慣性力と重力の比を表す無次元数で、浸水深と流速から定まる。フルード数が1未満では常流と呼ばれ、流速が波の伝播速度よりも遅い流れを言い、フルード数が1以上では射流と呼ばれる。

図9 水深係数(a)の設定案と模式図<sup>23)</sup>



和文



英文

写真1 東北地方太平洋沖地震調査研究レポート<sup>1) 2)</sup>



写真2 地盤変状に伴う住宅基礎の破壊



写真3 1層部分の層崩壊



写真 4 2層部分の一部崩壊



写真 5 柱材の生物劣化



写真 6 土蔵屋根の落下



写真 7 非構造部材の脱落



写真 8 柱脚の破壊



写真 9 間柱接合部の変形



写真 10 兵庫県南部地震では多数発生した梁端フランジの破断例



写真 11 ラチス柱斜材の座屈

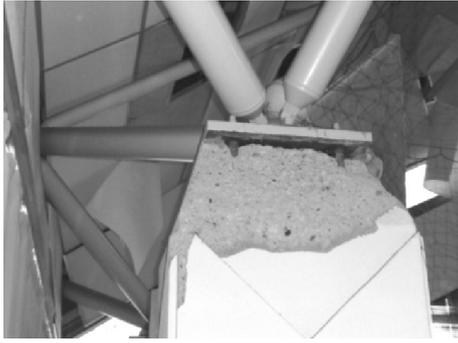


写真 12 支承部の損傷



写真 13 屋根面水平ブレースの破断



写真 14 鉄骨造体育館の天井落下



写真 15 RC造の中間層での層崩壊



写真 16 RC柱のせん断破壊



写真 17 RC造連層耐震壁脚部の曲げ破壊



写真 18 RC造連層耐震壁境界梁の破壊



写真 19 RC造集合住宅ドアまわりの非構造壁の破損



写真 20 耐震改修 RC 造建物の  
柱の損傷



写真 21 免震建築物の鉛ダンパーに発生した亀裂



写真 22 免震建築物の鋼材ダンパーの  
降伏による塗装の剥落

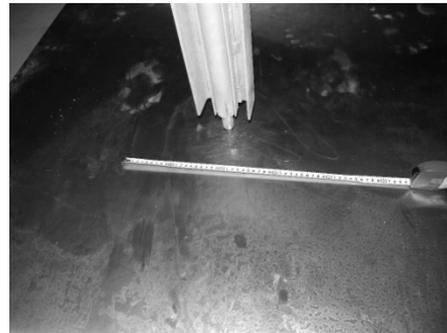


写真 23 免震建築物における  
けがき変位計測



写真 24 エキスパンションジョイント  
の破損



写真 25 免震建築物における転倒した家具



写真 26 擁壁被害による住宅の移動



写真 27 液状化による住宅の沈下・傾斜



写真 28 RC 造建築物の転倒



写真 29 RC 造壁体に形成された  
降伏メカニズム



写真 30 柱脚溶接部の破断



写真 31 洗掘で傾斜した RC 造



写真 32 浮き上がって隣接する  
RC 造塀を跳び越えた建物



写真 33 漂流物衝突による損傷



写真 34 漂流物衝突による損傷



写真 35 浮いて転倒した鉄骨造建築物