

# 津波避難ビルの構造設計法

構造研究グループ 上席研究員	福山 洋
構造研究グループ 上席研究員	奥田 泰雄
構造研究グループ 主任研究員	加藤 博人
国際地震工学センター 主任研究員	石原 直
構造研究グループ 主任研究員	田尻 清太郎
構造研究グループ 研究員	壁谷澤 寿一
東京大学 生産技術研究所 教授	中埜 良昭

## 目次

I	はじめに
II	東日本大震災における建築物の津波被害
	1) 鉄筋コンクリート造建築物
	2) 鉄骨造建築物
III	津波避難ビルの構造設計法
	1) 設計方針と見直しのポイント
	2) 津波避難ビルの構造設計の概要
	3) 津波波圧の算定
	4) 津波波力の算定
	5) 浮力の算定
	6) 漂流物への対処
IV	津波避難ビルに要求される条件
V	おわりに
	参考文献
	付録 「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」(技術的助言)

## I はじめに

2011年東日本大震災による津波被害は未曾有のものであり、多くの尊い人命が失われ、いくつもの街が破壊された。現在、被災地の一刻も早い復興に向け、さまざまな観点からの検討が行われているが、ここでは、その一つである津波避難ビルの構造設計法に関する検討の結果について紹介する。

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。このように、津波避難ビルには高台に

匹敵する十分な構造および避難に関する安全性が求められる。

ここで紹介する内容は、2011年度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、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」<sup>1)</sup>の構造設計法等について、東日本大震災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もので、東京大学生産技術研究所と建築研究所の共同研究として実施されたものである<sup>2)</sup>。ここでは、主に鉄筋コンクリート造(RC造)と鉄骨造(S造)を主な対象として検

討が実施された。

その成果は、2011年11月17日の「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」（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」<sup>3)</sup>

（本論文の付録参照）に反映されている。また、これと技術的にはほぼ同様の内容が、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等に基づく告示「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」（平成23年度国土交通省告示第1318号）に反映されている。

## II 東日本大震災における建築物の津波被害

建築研究所および国土技術政策総合研究所では、岩手県6市町村（宮古市・山田町・大槌町・釜石市・大船渡市・陸前高田市）と宮城県9市町村（気仙沼市・南三陸町・女川町・石巻市・仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）において、津波による建築物の被災状況に関する現地調査を実施した。本被害調査の結果は文献4）に詳しくまとめられているが、そのうち、RC造建築物およびS造建築物の被害をその形態により分類して以下に示す。なお、RC造およびS造に共通してみられた被害形態としては、倒壊、転倒、移動、漂流物の衝突、洗掘が挙げられる。

### 1) 鉄筋コンクリート造建築物

津波波圧を受けた大部分のRC造建築物では、構造躯体に顕著なひび割れも見られず、ほぼ無被害の状態で残存していた。また、多くの建築物ではRC造の非構造壁にも顕著な被害は見られなかった。ただし、そのような建築物においても、津波荷重により開口部の窓ガラスやドアはほとんどが破壊されていた。

津波によるRC造建築物の被害形態は以下のように分類される。

#### ① 倒壊

津波荷重によりRC造建築物が倒壊した事例が確認されている。写真1は、桁行き方向6スパン、張り間方向1スパン、2階建てで柱梁フレーム構造の建築物が、張り間方向に津波荷重を受けて完全に倒壊した事例である。1階柱脚が曲げ破壊していることから、津波により1階に作用したせん断力が1階の保有水平耐力を大きく上回ったものと考えられる。なお、本建築物の柱の主筋は丸鋼であり、新耐震基準以前の旧基準により設計されたものと推測される。また、これまでの調査では、3階建て以上の建築物では倒壊の被害は確認されていない。



写真1 2階建て建築物の倒壊



写真2 2階建て建築物の層崩壊



写真3 残存する3階建て建築物



写真4 3階建て直接基礎建築物の転倒

## ② 1 階の層崩壊

建築物の1階の柱が柱頭・柱脚で曲げ破壊し、層崩壊した事例が2階建ての建築物において複数見られた(写真2)。これらの建築物は柱梁フレーム構造であるが、1階は比較的壁が少なく、2階はコンクリートブロックの壁が多く設けられている。1階が商店、2階が住居として使用されていたものと推測され、構造的には1階の強度や剛性が低いという特徴を有すると思われる。これらの建築物では、2階の開口が大きくないため、2階部分で大きな津波波圧を受け、1階に作用するせん断力が1階の保有水平耐力を上回り倒壊したものと考えられる。

なお、これまでの調査では、3階建て以上の建築物では1階の層崩壊は確認されていない(写真3)。一般的には3階建て以上の建築物では連層の耐力壁が用いられることが多く、1階も壁の存在により耐力が大きかったものと考えられる。よって、3階建て以上で1階が柱のみの建築物については、層崩壊の可能性が無いとは言い切れないと思われる。

## ③ 転倒・移動・流失

建築物の転倒の被害が、4階建てまでの建築物において見られた。転倒した建築物においては、何れも最大浸水深が建築物の高さを上回っている。転倒した建築物は直接基礎のもの(写真4)のみならず、杭基礎のもので杭が引き抜かれているものも見られた(写真5)。また、転倒した建築物は比較的開口が少ないものも多く、同程度の規模の建築物でも開口が大きい場合には転倒が生じていないことから、外壁の開口の大きさが転倒に大きく影響したのと考えられる。なお、最大浸水深が建築物の高さよりも高い2階建て建築物の内部において、2階の開口上端の高さまで津波の水の汚れの痕跡(写真6)があり、それより上の天井までの部分は空気が溜まっていたと見られる事例があった。従って、各階の開口の上端から天井までの長さが長い建築物ほど大きな浮力が働き、転倒が生じやすくなると思われる。転倒は、建築物の自重に浮力を考慮した転倒耐力よりも津波の波圧による転倒モーメントの方が大きい場合に生じると考えられるが、浮力が自重よりも大きくなるような場合には、わずかな水平力でも転倒の可能性がある。

転倒した建築物ではほとんどの建築物で原位置からの移動を伴っており、大きな浮力が働いていたと推測される。写真5の建築物は原位置から70mほど流されているが、地面などに引きずった跡は見られていない。また、写真7は開口の少ない冷凍倉庫であるが、2m程度のコンクリートブロック(CB)塀を壊さずに乗り越えて転倒しており、大きな浮力が作用したことが分かる。一方で、複数の2階建てCB造集合住宅が転倒した地域(写



写真5 4階建て杭基礎建築物の転倒



写真6 建物内部の水の汚れの痕跡



写真7 塀を乗り越えた2階建て建築物



写真8 CB造集合住宅の転倒

真8)では、同じ形状の一部の建築物は流失してしまい移動先が分からなくなった事例があった。この場所は、防潮堤のそばであり、浮力に加えて防潮堤を乗り越えた津波による非常に大きな水平力が作用したと思われる。

#### ④ 洗掘による傾斜

津波が作用した際に、建築物の隅角部に強い水流が作用し、洗掘による大きな穴が開けられた跡が多く見られた(写真9)。直接基礎を有する低層建築物では、洗掘による穴に建築物が倒れ込み傾斜したもの(写真10)や、洗掘に加えて浮力と大きな津波波圧を受け数十メートル流されたものも確認されている(写真11)。な



写真9 洗掘による基礎の露出



写真10 洗掘による2階建て建築物の傾斜



写真11 大きな波圧により流された直接基礎のRC造建築物

お、杭基礎を有する構造物においては、杭頭が露出しても杭および上部構造は健全であるものも多く見られた。

#### ⑤ 壁の面外破壊(開口部の破壊)

建築物の津波の作用面の開口よりも、反対側の水流が抜ける側の開口が小さい場合、小さい開口に水流が一気に集中し、その周辺のRC造非構造壁に大きな圧力を作用させ、コンクリートにひび割れが生じて壁が外側に大きくはらみ、壁端部のシングル配筋の壁筋が破断する事例が見られた(写真12)。

また、2,3階の床が無く支持スパンが10mを超える厚さ300mmの壁(厚さ180mmのダブル配筋の耐力壁の外側に厚さ120mmのふかしを有する壁)が外側からの津波波圧により内側に大きく湾曲している事例があった(写真13左側)。ただし、同一の建築物でも2,3階に床があり支持スパンが大きい部分では、耐震壁が湾曲する被害は見られなかった(写真13右側)。

建築物に作用する津波波力は、津波の作用面となる建築物の面の開口が大きい程低減されると考えられるが、作用面だけでなく水流の出口となる側の開口の大きさも影響を及ぼすと思われる。出口側の開口が小さい場合には、壁を破壊させるほどの水圧が壁に作用することから、開口から入った水をスムーズに流出させるために必要な開口の大きさにも配慮が必要である。



写真12 非構造壁の面外破壊



写真13 2,3階部分に床を持たない連層壁の面外破壊(建築物の奥の部分には2,3階部分に床がある)

## ⑥ 漂流物の衝突

流木（写真14）、自動車、コンテナ、船舶、倒壊した建築物の一部など、さまざまな漂流物が建築物に衝突したと思われる。これらにより、天井、窓ガラス、ベランダの手すりなどの脱落を引き起こした建築物が多数見られた。一方、RC造構躯体に対する明確な被害はあまり見られなかったが、集合住宅の連層壁において衝突により生じたと思われる壁の開口が見られた（写真15）。



写真14 流木の残骸



写真15 漂流物の衝突により生じた壁の開口

## 2) 鉄骨造建築物

津波波圧を受けたS造建築物は、早期に外装材が流され津波の大きな波圧を受けなかったために残存したと考えられるものが多く見られる一方で、崩壊、転倒、移動、流失したのもも相当数確認されている。これらは、外装材が流される以前に大きな波圧を受けたものと推測される。

津波によるS造建築物の被害の形態は、以下の7項目に分類される。①～⑤は人命を失う可能性が高い被害であるが、⑥～⑧は津波の浸水深よりも高さのある建築物の場合には上層階に避難することで人命保護の可能性のある例である。①と②は建築物の行方が不明となるほど大きな移動を伴う被害であり、③以降は基礎上またはその周辺に留まる被害である。



写真16 柱脚部の破断



写真17 柱脚部アンカーボルトの破断により移動したと考えられる建築物



写真18 1階柱の残存



写真19 引き裂かれた梁フランジ

### ① 露出型柱脚の破壊による移動・流失

S造の露出型柱脚部においてアンカーボルト、ベースプレート、もしくは柱とベースプレートとの溶接部の破断により、建築物が移動・流失する被害が見られた(写真16)。敷地には基礎と柱脚部の一部が残されているが、建築物自体は敷地外へ移動して行方が分からないような状態のものが多い(写真17)。

### ② 柱頭接合部の破壊による移動・流失

1階(または2階)の柱頭接合部での破壊により建築物が移動・流失したものが比較的多く見られた(写真18)。根巻き式や埋め込み式柱脚などで柱脚部の耐力が大きい場合にこのタイプの破壊になると考えられる。敷地には基礎と1階(または2階まで)の複数の柱が残されており、建築物の行方を示すかのように同じ方向へと並びしている。下フランジが取り付けダイアフラムと1階柱との溶接部で破壊することで柱の断面が露わになっていたものが多いが、2階床レベルの梁であるH形鋼のフランジが引き裂かれていたものもあった(写真19)。

### ③ 転倒

S造建築物の転倒被害には、(a)基礎が一体のまま生じた建築物全体の転倒と、(b)1階の部分的な崩壊を伴う転倒が見られた。

(a)は一例のみであったが、杭基礎が引き抜け転倒した事例が女川町で見られた(写真20)。本建築物では、外装材のALC版はほとんどが残存している。上階の床スラブと開口部の上端との距離は80cm程度であった。建築物全体が津波に飲み込まれて浸水した状態を想定し、床スラブの下に空間に空気が溜まっていたとすれば、平米当たりの重量が0.8tf程度のS造では浮力によって上部構造の重量がほぼキャンセルされることになるため、基礎の重量と杭の抵抗は残るものの、転倒しやすい状態になっていたものと想像される。

(b)としては、1階柱脚部の引き抜けおよび1階柱の座屈によって大きく傾斜し転倒したと考えられる、写真21のような事例が見られた。

### ④ 崩壊

構造躯体が崩壊した被害例としては、(a)1階の層崩壊、(b)部分的な崩壊、があった。

(a)としては2階建てS造の1階部分が層崩壊したと考えられるもの(写真22)が、(b)としては沿岸にある倉庫で、部分的に崩壊しているもの(写真23)が見られた。

### ⑤ 大きな残留変形

構造躯体のみが残存するS造建築物では、写真24のように若干の傾斜が確認されるものも多い。特に山形ラーメン架構では



写真20 3階建てS造の転倒



写真21 3階建てS造の1階柱脚部の引き抜けおよび1階柱の座屈による転倒



写真22 2階建てS造の1階の崩壊



写真23 部分的な崩壊

大きな残留変形を生じながらも倒壊には至らなかった例が比較的多く見られた(写真25)。

#### ⑥ 全面的な内外装材の破壊・流失

ALC版等の外装材がほぼ全面的に破壊され、流失しているが、構造躯体としてのS造骨組は残存している例が多く見られた(写真26)。津波来襲時に早期に外装材が流失することで、構造躯体に作用する外力が小さくなったことが残存の要因としてあげられる。残存している構造躯体には若干の傾斜や津波作用面での部材の変形、漂流物の衝突によると思われる局所的な損傷なども見られた。

#### ⑦ 開口部回りの損傷・破壊

建築物の内部に津波が侵入し、作用面側と反対側の開口部や妻面が水流の流出口となったために大きく損傷・破壊したと考えられる被害例が見られた(写真27)。

#### ⑧ 波圧や漂流物の衝突による構造躯体および非構造部材の局所的な変形

津波の波圧や漂流物の衝突によると考えられる柱等の構造躯体(写真28, 29)および非構造部材(写真30)の大きな変形が見られた。



写真26 残存するS造建築物



写真27 倉庫(津波の流出口として妻壁および開口部が外側に変形)



写真24 傾斜した重層建築物



写真25 傾斜した山形ラーメン架構



写真28 柱の変形



写真29 柱脚部の移動(コンクリート塊や道路の舗装アスファルト等の漂流物によると思われる)



写真30 間柱等の非構造部材の変形

### III 津波避難ビルの構造設計法

中央防災会議より、2003年5月に東海地震対策大綱、12月に東南海・南海地震対策大綱が出され、津波防災に資する津波避難ビルの必要性が認識されてきた。この状況を踏まえ、(財)日本建築センターでは、2004年度の自主研究として津波避難ビルの構造設計法に関する検討が行われた<sup>5)</sup>・<sup>6)</sup>。その検討の最中の2004年12月に、スマトラ島沖地震によるインド洋大津波の被害が発生した。このような状況の中、内閣府から2005年6月に「津波避難ビル等に係るガイドライン」<sup>1)</sup> (以下、「ガイドライン」という) が示され、その巻末資料②「構造的要件の基本的考え方」に、(財)日本建築センターにおける検討結果が引用された。(財)日本建築センターでは、さらに2005年度にも自主研究を継続し、2004年度の成果の一部見直しや試設計の実施等を行っている<sup>7)</sup>。

2011年度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」における東京大学生産技術研究所と建築研究所の共同研究では、上記の背景とII章で示した津波被害の形態による分類を踏まえ、津波被害を受けた建築物等の計測浸水深と建築物の諸元および被害状況等に基づき、「ガイドライン」に示された津波避難ビルの構造設計法等について、その妥当性の検証および見直しの必要な項目の抽出やその内容に関する検討を行った<sup>2)</sup>。

その成果は、技術的助言(国住指第2570号、2011年11月17日)の別添「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」<sup>3)</sup> (以下、「暫定指針」という) や、告示(H23国交告第1318号、2011年12月27日)「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」等に反映されている。

本論文の付録に、上記技術的助言の別添に示された「暫定指針」を再掲する。

表1 津波避難ビルの構造設計方針

**1) 倒壊しないこと**： 建築物の各層について津波荷重が水平耐力を上回らないことを確認する。

**2) 転倒しないこと**： 津波荷重による転倒モーメントが、浮力を考慮した抵抗モーメントを上回らないことを確認する。

**3) 滑動しないこと**： 水平力が基礎の摩擦力または杭の水平耐力を上回らないことを確認する。なお、別途建築物の水平移動に対する抵抗が期待できる場合にはそれを考慮してよい。

※ 受圧面における耐圧部材は、津波波圧に対して破壊しないことを確認する。

#### 1) 設計方針と見直しのポイント

「ガイドライン」の巻末資料②には、(財)日本建築センターの自主研究の成果に基づき「構造的要件の基本的考え方」が示されている。その目次は、1.1 適用範囲、1.2 用語、1.3 構造計画、1.4 津波荷重算定式、1.5 荷重の組合せ、1.6 受圧面の設計、1.7 構造骨組の設計、1.8 転倒及び滑動の検討、であり、建築物が想定する津波荷重に対して倒壊、転倒および滑動しないことを検証する内容となっている。また、受圧面(津波波圧を直接受ける建築物の面)における耐圧部材が、水平力に対する抵抗能力や鉛直支持能力を失わないよう、波圧により破壊しないことを確認することが求められている。

今回の見直しでは、津波避難ビルの構造設計の方針として上記の考え方は変更せず踏襲する。すなわち、津波避難ビルの設計においては表1の3項目に関する検証を行う。また、受圧面の部材の扱いは、従来通り耐圧部材(津波波圧を直接受け、破壊しないように設計する部材)と非耐圧部材(津波波圧を直接受け、破壊することを許容する部材)に分類し、耐圧部材では津波波圧に対して破壊しないことを確認する。

今回の見直しにより、「暫定指針」において従来の「ガイドライン」から変更された点は、以下のとおりである。

- (1) 設計用浸水深の設定主体が地方公共団体であることを明示した。
- (2) 一部の用語の定義を明確化した。
- (3) 津波波圧は、従来通り設計用浸水深の3倍に相当する静水圧を基本としつつ、津波の勢いが低減される条件では津波波圧も低減できることとし、その条件を提示した。
- (4) 津波波圧から津波波力を算定する場合に、開口の存在によって津波波力が低減できることを明示した。ただし、内壁等の影響を考慮し低減には下限値を設けた。

- (5) ピロティの取り扱いを明確化し、耐圧部材を除くピロティ部分には津波波圧が作用しないとして算定できることとした。
- (6) 浮力を考慮する場合は、従来通り浸水する建築物容積分の浮力を考慮することを基本とするが、開口部からの水の流入や、その場合の垂れ壁部分に相当する空気溜まりの存在などを考慮して算定できることとした。
- (7) 転倒や滑動を防ぐための構造計算において、浮力を考慮することを明示した。
- (8) 今後の検討により不確定条件が明確になった場合や、実験等に基づき津波の局所的な性状が把握された場合には、特別な調査または研究に基づくものとして津波荷重を算定できることとした。その一つとして、フルード数が1.0を十分に下回ることが確認される場合には、水深係数として1.5を採用できることとした。
- (9) 洗掘に対して、上部構造が傾斜しないことを要求した。
- (10) 漂流物の衝突に対して、構造耐力上主要な部分の破壊を防止すること、もしくは、部分的な損傷は許容するが、軸力支持能力を喪失しないことを確かめる等の方法により、構造物が局部崩壊しないことを確認することとした。

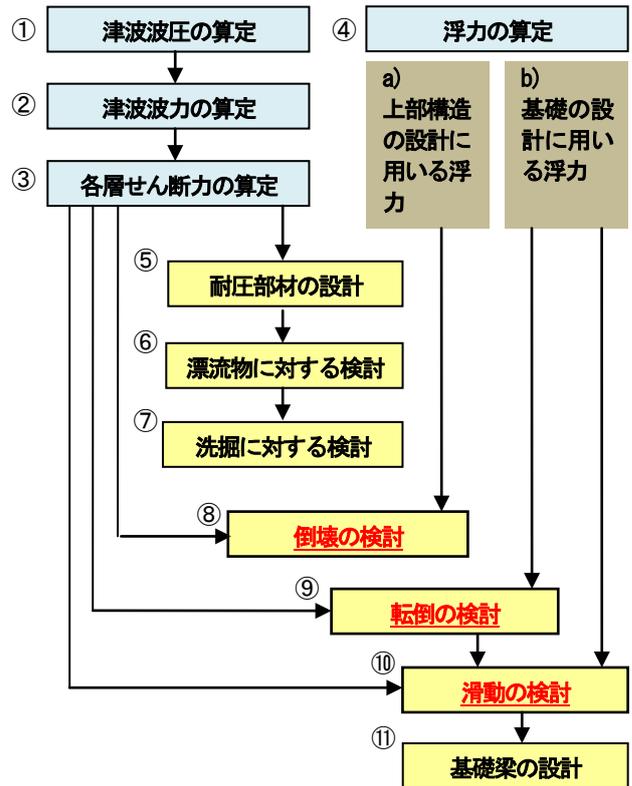


図1 津波避難ビルの構造設計の流れ

## 2) 津波避難ビルの構造設計の概要

図1に設計の流れを模式図で示す。津波避難ビルの構造設計は下記の流れで行う。なお、以下の①については「3) 津波波圧の算定」で、②については「4) 津波波力の算定」で、④については「5) 浮力の算定」で、⑥については「6) 漂流物への対処方法」で詳しく述べる。

### ① 津波波圧の算定

津波波圧を、設計用浸水深に水深係数  $a$  を掛けた高さの静水圧として算定する。

### ② 津波波力の算定

津波波力を、開口による波圧低減効果を考慮しつつ、津波波圧を高さ方向に積分して算定する。なお、建築物各階に作用する津波波力は各階の床位置に集中して働くものとし、下の階の中央高さから当該階の中央高さまでの波圧より算定する。

### ③ 各層せん断力の算定

津波波力による各層のせん断力は、その階よりも上部に作用する全ての津波波力を足し合わせるにより算定する。

### ④ 浮力の算定

以下の2種類の浮力を算定する。

#### a) 上部構造の設計に用いる浮力

倒壊の検討における上部構造の設計に用いる浮力は、一般に各階の開口から浸水深に応じて建築物内部に水が十分に流入した状態のものとし、構造体に働く浸水深以下の躯体体積分の浮力と、床下の空気溜まりによる浮力の和として求める。

#### b) 基礎の設計に用いる浮力

転倒や滑動の検討における基礎の設計に用いる浮力は、一般に建築物容積分の浮力が基礎底に作用するものとして求める。

### ⑤ 耐圧部材の設計

耐圧部材である柱と耐力壁が、作用する波力によって破壊しないことを、波力による曲げモーメントおよびせん断力がそれぞれ当該部材の曲げ耐力、せん断耐力を超えないことにより確認する。

### ⑥ 漂流物に対する検討

漂流物の衝突により建築物が局部崩壊しないことを、外部に面する柱が漂流物により破壊した場合を想定し、その柱軸力が大梁等を介して伝達できることにより確認する。

### ⑦ 洗掘に対する検討

洗掘に対して、上部構造が傾斜しないよう杭基礎とするか、周辺の地盤をコンクリートで固める等の洗掘防止策を検討する。

⑧ 倒壊の検討

各階の津波荷重時の水平耐力を、②の津波波力を外力分布とし④a)の浮力を考慮した荷重増分解析により算定し、③で求めた各層せん断力を上回ることを確認する。

⑨ 転倒の検討

基礎下の各支点反力 (= 杭の軸力) を、②の津波波力を外力分布とする荷重増分解析 (浮力を考慮しない) の支点反力と、④b)の浮力を支配面積で按分した各支点到働く浮力の和として求め、これが引張杭については杭の極限引抜抵抗力 (杭体の引張耐力と杭周面の摩擦力の小さい方とする) 以下に、圧縮杭については杭の極限支持力以下になることを確認する。

⑩ 滑動の検討

⑨の杭の軸力と N-M 相関関係等による杭の水平耐力が、③の杭に作用する津波荷重以上となることを確認する。

⑪ 基礎梁の設計

上部構造による応力に加え、杭による応力を累加した応力に対して、基礎梁を設計する。

3) 津波波圧の算定

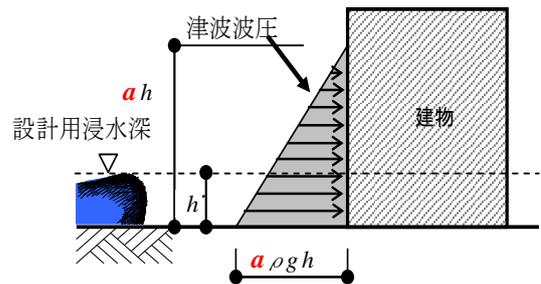
① 津波波圧に関する既往の考え方

「ガイドライン」では、図2に示す水深係数  $a$  を3とし、津波の波圧を設計用浸水深の3倍の静水圧が建築物の片側から掛かるものとして与えている。

これは、直立護岸を越流し陸上に遡上した津波により建築物に作用する津波波圧に関する朝倉ら<sup>8)</sup>の提案であり、波高、周期等の波特性、水路の斜面勾配、構造物の位置などを変化させた模型実験の結果、波圧分布は三角形分布であり、その高さは最大で浸水深のほぼ3倍であったことを踏まえたものである。すなわち、この静水圧による津波波圧算定式には、陰に流速の影響が含まれている。これ以外にも、いくつかの実験や提案式があるが、それらも上記の考え方によってほぼ安全側に包絡できるものと考えられている。また、この考え方は、中埜<sup>9)</sup>により2004年のスマトラ島沖地震による津波被害を受けた構造物のデータを用いて検証され、概ね妥当であることが示されている。

② 現地調査による検討方法

今回の検討においては、現地調査の結果から「ガイドライン」の波圧算定法における「3」が津波の勢いなどによって変化するものと考え、この「3」を「 $a$  (水深係数)」とおき、被害の実態に基づき  $a$  を検証することとした。検証においては、被害を受けた



$a$  : 水深係数、 $h$  : 設計用浸水深(m)、 $\rho$  : 水の単位体積質量( $t/m^3$ )、 $g$  : 重力加速度( $m/s^2$ )

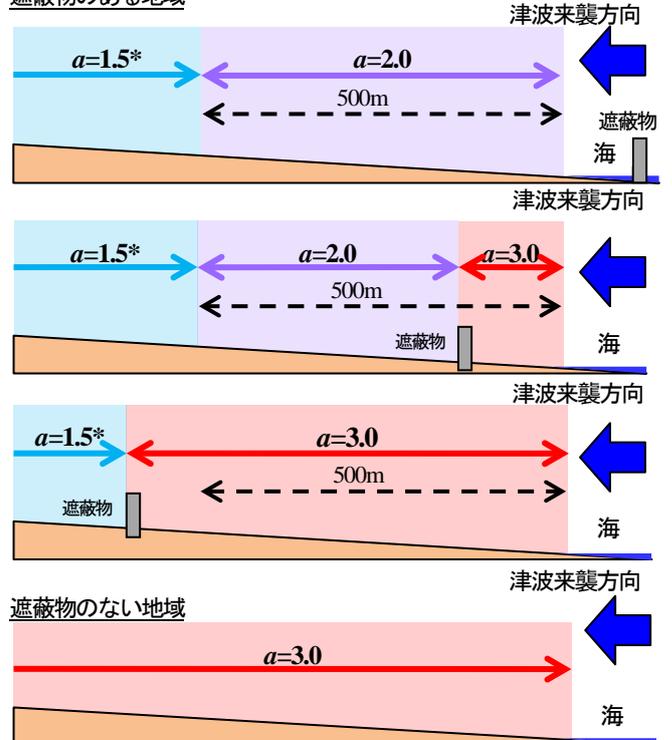
内閣府「津波避難ビル等に係るガイドライン」<sup>1)</sup>では、上図の水深係数  $a$  を3とし、設計用浸水深の3倍の静水圧を与えているが、今回の検討では被害の実態に基づき  $a$  を検証した。

図2 津波波圧の算定法

表2 水深係数  $a$  の設定

	遮蔽物あり		遮蔽物なし
海岸や河川等からの距離	500m 以遠	500m 未満	距離によらず
水深係数 $a$ の設定	1.5	2	3

遮蔽物のある地域



\* $a=1.5$  への低減は津波の流速増加がない地域を対象とする

図3 遮蔽物の有無、海岸等からの距離と水深係数  $a$  の関係

構造物（比較的単純な工作物と建築物）の破壊形式等に応じてその耐力を推定し、静水圧分布を仮定した場合に構造物の耐力と等しくなる水深係数  $a$  を、その場所の計測浸水深を用いて逆算した。

なお、津波の専門家等へのヒアリングの結果、東日本大震災における津波の波圧は必ずしも考えられる最大のものではなく、この被害のみから津波波圧の最大値を修正することは適切ではないとの考えが示された。そこで、従来からの知見である「設計用浸水深の3倍の静水圧」を最大の波圧が作用する場合とし、そこから水深係数  $a$  を低減できる条件を調べることにした。

### ③ 津波波圧算定式

その結果得られた津波波圧算定式を(1) 式に示し、水深係数  $a$  の模式図を図3に示す。また、以下の(1)～(3)に、水深係数に関する検討の詳細を示す。

$$qz = \rho g (ah - z) \text{ ----- (1)}$$

ここに、

$qz$  : 構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : 水の単位体積質量 (t/m<sup>3</sup>)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$h$  : 設計用浸水深 (m)

$z$  : 当該部分の地盤面からの高さ ( $0 \leq z \leq ah$ ) (m)

$a$  : 水深係数で表2による。なお、フルード数  $Fr = u\sqrt{g\eta}$  が 1.0を十分に下回ることが確かめられた場合には、 $a$  を1.5とすることができる。(  $u$  は流速、 $\eta$  は浸水深)

#### (1) 水深係数の検討1 (遮蔽物の影響)

水深係数  $a$  を低減できる条件として、建築物よりも津波の来襲方向に津波の波力を低減できる遮蔽物がある場合を取り上げた。検討では、波力低減を期待しうる遮蔽物として、他の建築物のほか、湾口防波堤や津波高さに対し十分な高さ（津波高さの概ね1/2以上と仮定）を有する防波堤・防潮堤などを考慮した。検討の結果、津波の波力低減を期待しうる遮蔽物がある場合の水深係数  $a$  は無い場合に比べて、概ね1/1.5に低減されることが分かった。よって、津波波力低減を期待できる遮蔽物がある場合には、水深係数  $a$  を3/1.5すなわち「2」にできることとした。

なお、湾口防波堤や防潮堤には破壊されたものもあり、その効果を一般的なものとして定義しづらいことから、波力を低減できる遮蔽物としては、津波避難ビルから見て津波が生じる方向にある施設や建築物を取り上げることとする。

#### (2) 水深係数の検討2 (海岸および河川からの距離の影響)

次に、水深係数  $a$  を低減できる条件として、海岸や河川からの

距離を取り上げた。検討の結果、海岸や河川からの距離に応じて津波の勢い（フルード数  $Fr$ ）が低減され、海岸や河川から500m以上離れた場合には  $a=1.0$  程度と見なせることが分かった。なお、今回の検討では、現地調査で得られたデータに限られること、耐力算定が略算の結果であること、津波シミュレーションに基づく浸水深と計測浸水深にはばらつきが認められること等を勘案し、現地調査の結果に1.5倍程度の余裕度を見込むこととした。そのため、遮蔽物があり、かつ、海岸や河川から500m以上離れた場合の水深係数  $a$  は1.5とすることにした。

なお、当該建築物周辺の地形等に留意し、流れが集中するような建物配置や下り勾配等によって、流速が増加するような要素がないことを確かめる必要がある。

#### (3) 水深係数の検討3 (フルード数による検討)

津波荷重は、水流の中に建築物が置かれている状態を考えると、流体の中の物体が受ける抗力と考えることができる。抗力  $F_D$  は、一般に次の式で表すことができる。

$$F_D = 1/2 \rho C_D u^2 A_D \text{ ----- (2)}$$

ここに、

$F_D$  : 抗力 (kN)

$\rho$  : 流体の密度 (t/m<sup>3</sup>)

$C_D$  : 抗力係数

$u$  : 流速 (m/s)

$A_D$  : 津波進行方向から見た受圧部分の見付面積 (m<sup>2</sup>)

このように、抗力には流速が影響するが、同様に津波の流勢を表すフルード数  $Fr (= u\sqrt{g\eta})$  にも流速が影響するので、単位幅あたりの抗力は  $Fr^2 h^2 \rho g$  と  $Fr$  を用いて表すことができる(なお、 $\eta=h$ ,  $C_D=2$ とする)。この抗力を、(1) 式で表される静水圧の波力分布による単位幅あたりの波力 ( $= 1/2 ah \times \rho gh = a^2 h^2 \rho g / 2$ ) と等しいとすると、浸水係数  $a$  と  $Fr$  の間に、 $a = \sqrt{2} \times Fr$  の関係が得られる。よって、 $Fr$  が 1.0を下回る場合には、水深係数  $a$  を 1.5とした(1) 式で、抗力を安全側に評価することができる。これより、フルード数  $Fr$  が1.0を十分に下回ることが確かめられた場合には、 $a$  を1.5とすることができることとした。

なお、現状における一般的な津波シミュレーションでは、個々の建築物までモデル化されるわけではないため、建築物の配置等が影響するような局所的な流速を十分な精度で推定することは難しく、フルード数の推定も容易ではない。現時点では、過去の津波による実測データが既知の場合や実験に基づく場合、もしくは、個々の建築物の影響等による局所的な流れを別途の解析等によって考慮できる場合などに、上記の条件が利用できると考えられる。

#### 4) 津波波力の算定

ここでは、3) で算定した津波波圧から津波波力を算定する方法と、その際の開口部の取り扱いについて述べる。これらによって算定された津波波力から、建築物各層のせん断力、建築物の支点反力、および、建築物の基礎位置に作用する水平力を算定し、表1に示す方法により、それぞれ倒壊、転倒、滑動しないことを確認する。

また、受圧面の耐圧部材が破壊されないことを確認する際にも、以下の方法により耐圧部材に掛かる波力を算定する。

##### ① 津波波力算定式

津波波力は、(1) 式の津波波圧が同時に生じると仮定し、(3) 式により算定する。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここに、

$Q_z$  : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

$B$  : 当該部分の受圧面の幅 (m)

$z_1$  : 受圧面の最小高さ ( $0 \leq z_1 \leq z_2$ ) (m)

$z_2$  : 受圧面の最高高さ ( $z_1 \leq z_2 \leq ah$ ) (m)

(1) 式で示した津波波圧は単位面積あたりの津波波力を表しており、津波波圧を受圧面積について積分することで津波波力を算定することができる。(3) 式は、受圧面の最小高さが $z_1$ 、最高高さが $z_2$ である場合の津波波力の算定式を表す。

なお、受圧面の幅  $B$  は高さに応じて一定でない場合があるが、この場合、各高さに応じた受圧面の幅を用いて積分を行うことに注意が必要である。

##### ② 開口部の扱い

建築物に津波が作用した場合、受圧面にある窓ガラス等は破壊するため、受圧面が全て耐圧部材である場合に比べて、構造骨組に作用する波力は低減する。すなわち、津波波力は、外壁にある窓、ドア、シャッター等の開口（受圧面にあり破壊することが確認できる非耐圧部材）によって低減することができる。

なお、今回の現地調査では、S造においてALCパネルによる外壁が残存し大きな津波波力を受けて転倒した事例(写真20)が見られたことから、このような鉄骨造の外装材部分は津波波圧を受けるものとして扱うことを原則とする。なお、これらを早期に破壊するとして開口とみなすことは可能であるが、その場合には外装材が確実に破壊もしくは脱落することを慎重に確

認する必要がある。

開口による津波波力低減の方法として、1) 各高さの受圧面の幅から開口部の幅を除外して津波波力を算定する(3) 式の方法と、2) 受圧面の面積から開口部の面積を除外した面積を受圧面の面積で除して得た割合(1-受圧面の開口率)を津波波力に乗じる方法の何れかを採用することができる。これら両者の方法を、開口の面積比が高さ方向に変化する場合について比較したところ、その差は最大でもほぼ1割程度に収まることが確認されており、両者はほぼ同等の低減を与えると考えられる<sup>2)</sup>。

また、開口による波力の低減について、数値シミュレーションにより検討された例によると、開口の割合が大きくなるにつれて波力は低減するが、概ね3割以上になると内壁等が存在するため波力の低減には頭打ちが存在するとされている。この結果を踏まえ、波力は、開口が無い場合の7割程度を下限とすることが望ましいと考えられる<sup>2)</sup>。なお、できるだけ水流の通り道や出口を設けるように留意することが肝要である。

#### 5) 浮力の算定

##### ① 浮力の考え方

II章で述べたように、開口が小さな建築物には大きな浮力が作用し、実際に浮き上がったと思われる事例も確認されている。一般的なS造およびRC造建築物の単位重量は、それぞれ0.8 tf/m<sup>2</sup>および1.3 tf/m<sup>2</sup>程度であることから、各階にそれぞれ80cm、130cm以上の空気の層が存在すると、自重がキャンセルされる。冷凍倉庫のように開口が極端に小さな建築物では、開口部から建築物内部へ水が流入しづらいため、浸水深の増加が早い場合には容易に浮き上がることとなる。なお、転倒が確認されたほとんどの建築物で、外壁の開口率が0.2を下回っていた。

一方、ある程度の開口を有する建築物でも、写真6に示したように、床スラブ下に垂れ壁長さ分の空気溜まりの存在が確認されている。さらに、建築物内部が浸水することにより、骨組等の密度は水の密度(≒1.0)分小さくなる。よって、内部に水が流入した場合でも、この程度の浮力は考慮する必要がある。また、建築物内部に空気の抜け道がない部分(コア等)がある場合には、その容積分の浮力も考慮することが望ましい。

建築物に浮力が働くと、転倒に対して重量による抵抗が小さくなる。また、滑動に対して基礎底の摩擦も小さくなる。さらにRC造の杭や柱では、軸力が減ることから曲げおよびせん断強度が低下する。このように、浮力の影響は極めて大きい。

## ②浮力の算定方法

このような浮力の算定にあたっては開口から水が流入する様子を正確に考慮することが望ましいが、その性状は未だ明らかにされてはいないことから、安全側の仮定として浮力は下記の方法で考慮することとする。

- 1) 倒壊の検討における上部構造の設計において、各層の水平耐力を算定する場合の浮力は、原則として各階の開口から浸水深に応じて建築物内部に水が十分に流入した状態のものとし、構造体に働く浸水深以下の躯体体積分の浮力と、床下の空気溜まりによる浮力の和として求める。
- 2) 転倒や滑動の検討における基礎の設計において、杭に作用する軸力や基礎の摩擦力を算定する場合の浮力は、一般に建築物容積分の浮力が基礎底に作用するものとして求める。

1) に関して、今般の津波で約 15m の最大浸水深を計測した女川町では、最も水位が上昇している時間帯では、6分間で浸水深が 12m (約 30 秒で 1m) 上昇しているが、この程度であれば、ある程度の開口を有する建築物 (例えば、開口率 30%程度) では、浸水深に応じて建築物内部に容易に水が流入すると考えられる<sup>2)</sup>。柱の軸力は、水が内部に十分に流入した状態が最も小さくなるため、RC 造の柱では曲げ強度が小さく算定され、層の水平耐力も小さめに算定されることから、安全側の検討となる。なお、各層の水平耐力を安全側に算定する状態が把握できる場合には、その状態の浮力を用いることができる。

2) について、今般の津波では仙台平野において、最大浸水深に近い深さの津波が一気に押し寄せた事例が確認されている。この場合、建築物の周囲に水が回り込んだ時でも建築物内部へ

の水の流入は少なく、浮力が掛かりやすい状態であったと考えられる。また、開口があまり大きくない建築物では、建築物内部への水の流入が遅れるため、浸水深に応じて内部に水が十分に流入するとは限らない。よって、このような不確定要素を考慮した構造計算上の安全側の配慮として、現時点では建築物容積分の浮力を考えることを原則とする。

## 6) 漂流物への対処方法

津波の際の漂流物としては、流木、自動車、コンテナ、船舶、倒壊した建築物の一部など、さまざまなものが考えられる。これらが建築物に衝突した場合の衝突力を計算する方法はいくつか提案されているが、それらによる計算値は大きくばらついており、また何れも対象とする漂流物が限定されていることから、さまざまな場合に対応できるような統一的な評価方法は未だ確立されていない。また、これまでの提案式で試算してみると、流木やコンテナが衝突した場合には、RC 造の柱でも破壊を免れない場合があると考えられる<sup>2)</sup>。

そこで、ここでは、漂流物が衝突して建築物の構造耐力上主要な部分が一部損傷したとしても、その軸力支持能力を喪失しないことを確認することとした。耐震診断における第2種構造要素の検討と同様な検討である。一般には、衝突によって複数の柱が同時に破壊される状況は考慮しなくて良いが、船舶のような大型の漂流物が考えられる場合には、建築物の外周の柱が破壊しても建築物が倒壊しないことを確認する方法や、漂流物が建築物に衝突しないよう防護設備や施設を設けるといった計画画面からの対策も考えられる。

	浸水深と建築物の階数		
	5m (4F)	10m (5F)	15m (7F)
<b>a=3.0</b> 張間 (長さ 12m) 桁行 (C <sub>B</sub> =0.3)	C <sub>B</sub> -0.97 長さ 40m	C <sub>B</sub> -2.83 長さ 36m (C <sub>B</sub> =1.0)	C <sub>B</sub> -4.56 長さ 54m (C <sub>B</sub> =1.0)
<b>a=2.0</b> 張間 (長さ 12m) 桁行 (C <sub>B</sub> =0.3)	C <sub>B</sub> -0.38 長さ 15m	C <sub>B</sub> -1.44 長さ 60m	C <sub>B</sub> -2.42 長さ 54m (C <sub>B</sub> =0.55)
<b>a=1.5</b> 張間 (長さ 12m) 桁行 (C <sub>B</sub> =0.3)	C <sub>B</sub> -0.3 長さ 9m	C <sub>B</sub> -0.78 長さ 33m	C <sub>B</sub> -1.36 長さ 54m

(赤字の◎は従来の耐震設計による断面や配筋等で対応可能なレベルを、○は強度を高める工夫を要するがほぼ対応可能なレベルを、△は上部構造・杭・基礎等の強度を大きく高めるための特別な工夫を要するレベルを表す)

図4 浸水深ごとに建築物に要求される張間方向の強度 (ベースシヤール係数 C<sub>B</sub>) と桁行方向の長さ

#### IV 津波避難ビルに要求される条件

東日本大震災で計測されたような大きな浸水深に対し、今回見直された津波避難ビルの構造設計法による設計では、建築物にどの程度の強度や大きさが要求されるかについて検討を行った。ここでは、耐震計算ルート3として設計されたRC造集合住宅を対象とし、張間方向は連層耐力壁構造で長さを12m、桁行き方向はフレーム構造で構造特性係数 $D_s$ を0.3と仮定した。そして、水深係数 $a$ を1.5, 2.0, 3.0の3種類、浸水深を5, 10, 15mの3種類とし、それらの組合せに対して、本設計法を満足するための張間方向のベースシヤール係数( $C_B$ )と、桁行き方向の長さを計算した。なお、建築物は各層の高さを3.5m、開口率を0.3とし、建築物の階数は(浸水深+4m)/3.5+1と仮定した。

結果を図4に示す。これより、浸水深が5mの場合は $a=3.0$ でも張間方向の $C_B$ が0.97と、ルート1の計算で満足できる程度であった。次に、浸水深が10mの場合、 $a=1.5$ の張間方向もルート1の設計等で対応できるが、 $a=2.0$ だと張間方向の $C_B=1.44$ 、桁行方向の長さ60mが必要となり、両方向とも、通常の耐震設計よりもかなり強度を上げる必要がある。さらに、 $a=3.0$ の張間方向では、 $C_B=2.83$ の強度が必要とされ、上部構造と共に杭や基礎の強度を高めるために特別な工夫を要すると思われる。浸水深が15mになると、 $a=1.5$ でも通常よりかなり大きな強度が要求され、 $a=2.0$ の場合は上部構造、杭、基礎等の強度を高めるための特別な工夫を要することが分かる。 $a=3.0$ の張間方向は、 $C_B=4.56$ と極めて大きな強度が要求される。

以上は主に倒壊に関する検討であるが、津波避難ビルの構造設計法では基礎や杭にも終局時に対応するいわゆる2次設計を要求していることから、転倒や滑動を考えると、杭には従来の許容応力度計算による設計に比べて、相当大きな水平耐力と引き抜き抵抗力が要求されることになる。

これらを総括したのが図4の◎、○、△であり、◎はほぼ従来の耐震設計で対応できるレベルを、○は通常よりもかなり強度を増すなどの工夫を要するレベルを、△は上部構造、杭、基礎等の強度を大きく高めるための特別な工夫を要するレベルを表している。

#### V おわりに

本論では、2011年度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、内閣府「津波避難ビル等に係るガイドライン」の構造設計法を東日本大震災の津波被害を踏まえて見直し、新たに提案した内容ついで紹介した。本成果は、技術的助言「津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」や、告示「津波に対して安全な構造方法を定める件」に反映されている。

て紹介した。本成果は、技術的助言「津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」や、告示「津波に対して安全な構造方法を定める件」に反映されている。

なお、これらは、2011年度の検討に基づくものであるが、津波避難ビルの構造設計法に関しては、津波の流勢を考慮した津波波圧の算定やその条件の設定、開口の取り扱い、漂流物への対処、洗掘への対処、ピロティの扱い等に関する知見の蓄積など、まだまだ残された課題は多い。建築研究所では、このような現象をより適切に捉えられるような合理的な算定方法を構築するために、今後さらに技術的な検討を進めていく予定である。

米国では、土木学会基準(ASCE7)に津波荷重を盛り込むための検討が行われているが、米国土木学会とは東日本大震災で被害調査を共同で行うなど、共同作業や情報交換を行ってきた。これと、天然資源の有効利用に関する日米会議(UJNR)の耐風・耐震構造専門部会におけるチャンネルを有効に活かし、日米間での協調を諮るとともに世界における津波被害の軽減のために、今後も積極的に情報発信を行っていく予定である。

最後に、本地震で亡くなられた方およびそのご遺族に対し深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心からお見舞い申し上げます。ここに紹介した津波避難ビルの構造設計法が、被災地の一日も早い復興に資することを切に願います。

#### 謝辞

本論文の内容は、平成23年度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」に関する東京大学生産技術研究所と建築研究所の共同研究に基づくものである。耐震改修支援センター(財)日本建築防災協会)に設置された「津波避難ビル等の構造設計法等の検討委員会」の委員の皆様をはじめ、ご協力戴きました関係各位に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 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](http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/tsunami_siryu2.pdf)
- 2) 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(その1)2011.7、<http://www.mlit.go.jp/common/000172791.pdf>、(その2)2011.10、<http://www.mlit.go.jp/common/000172792.pdf>

- 3) 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](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000274.html)、
- 4) 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）、2011.5、国土技術政策総合研究所資料No.636／建築研究資料No.132、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html>
- 5) 岡田恒男、菅野忠、石川忠志、扇丈朗、高井茂光、浜辺千佐子：津波に対する建築物の構造設計法について、－その1：予備検討－、2004.10、－その2：設計法（案）－、2004.11、ビルディングレター
- 6) （財）日本建築センター：平成16年度津波避難ビルに関する調査検討 報告書、2005.3
- 7) （財）日本建築センター：平成17年度津波避難ビルの技術的検討調査 報告書、2006.3
- 8) 朝倉良介、岩瀬浩二、池谷毅、高尾誠、金戸俊道、藤井直樹、大森政則：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、pp.911-915、2000
- 9) 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的设计外力評価、日本建築学会技術報告集、第13巻 第25号、2007.6

## 付録

### 「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」（技術的助言）

以下に、2011年11月17日の「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」（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」を掲載する。

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

ガイドライン巻末資料②「構造的要件の基本的な考え方」をもとに、東日本大震災における津波による建築物被害の調査を踏まえ、津波避難ビル等の構造上の要件について、以下の通り暫定指針をとりまとめた。（下線部がガイドラインからの変更箇所）

なお、本指針は、建築基準整備促進事業による東京大学生産技術研究所及び独立行政法人建築研究所による調査研究を踏まえ、国土交通省住宅局及び国土技術政策総合研究所においてとりまとめたものである。

#### 1. 1 適用範囲

##### (1) 適用の確認

本設計法は、津波避難ビル等の構造設計に適用する。適用においては、地方公共団体によるハザードマップ等に示された想定浸水深により津波の設計用浸水深を設定する。

なお、今後、津波防災地域づくりにおいて、津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水の区域及び水深）が設定された場合には、これを基本に設計用浸水深を設定する。

##### (2) 新築への適用

新築に本設計法を適用する場合、本設計法に示されていない項目は、建築基準法（昭和25年法律第201号。以下「法」という。）その他の関係法令による。

##### (3) 既存建築物への適用

既存建築物への適用は、法上適法であるもののほか、法第3条の適用を受けている既存不適格建築物にあっては、建築物の耐震改修の促進に関する法律（平成7年法律第123号）第8条第3項第1号に基づく基準（平成18年国土交通省告示185号）又は昭和56年6月1日時点の法第20条の規定に適合するものを対象とする。

#### 1. 2 用語

本設計法で用いる用語は、以下のように定義する。

設計用浸水深：敷地に想定される津波の浸水深で建築物が接する地表面までの津波の深さ (m)

津波荷重：津波によって建築物に作用する圧力及び力であり、津波波圧、津波波力及び浮力の総称

津波波圧：津波により建築物の受圧面に作用する水平方向の圧力(kN/m<sup>2</sup>)

津波波力：津波により建築物に作用する水平方向の力(kN)  
 浮力：津波により建築物に作用する鉛直方向上向きの力(kN)  
 受圧面：津波波圧を直接受ける面  
 耐圧部材：津波波圧を直接受け、破壊しないように設計する部材  
 非耐圧部材：津波波圧を直接受け、破壊することを容認する部材  
 構造骨組：受圧面で受けた力を建築物全体から基礎に伝達する架構

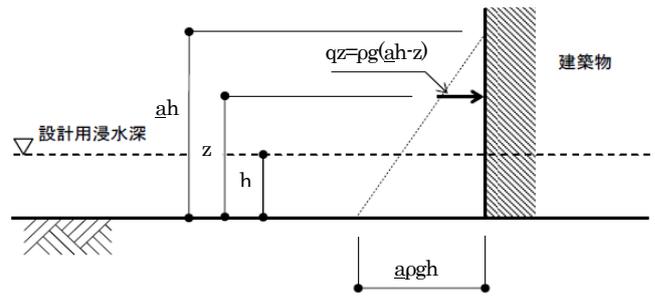


図4-1 4.1式による津波波圧

(2) 津波波力算定式

構造設計用の進行方向の津波波力は、4.1式の津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \quad (4.2)$$

ここに、

$Q_z$ ：構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

$B$ ：当該部分の受圧面の幅 (m)

$z_1$ ：受圧面の最小高さ ( $0 \leq z_1 \leq z_2$ ) (m)

$z_2$ ：受圧面の最高高さ ( $z_1 \leq z_2 \leq ah$ ) (m)

1. 3 構造計画

津波荷重に対する建築物の構造計画では、耐圧部材と非耐圧部材を明確に区分し配置する。

1. 4 津波荷重算定式

(1) 津波波圧算定式

構造設計用の進行方向の津波波圧は下式により算定する。

$$qz = \rho g(ah - z) \quad (4.1)$$

ここに、

$qz$ ：構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$\rho$ ：水の単位体積質量 (t/m<sup>3</sup>)

$g$ ：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$h$ ：設計用浸水深 (m)

$z$ ：当該部分の地盤面からの高さ ( $0 \leq z \leq ah$ ) (m)

$a$ ：水深係数、3とする。ただし、次の表に掲げる要件に該当する場合は、それぞれ  $a$  の値の欄の数値とすることができる。(注：この係数は、建築物等の前面でのせき上げによる津波の水位の上昇の程度を表したものでない。)

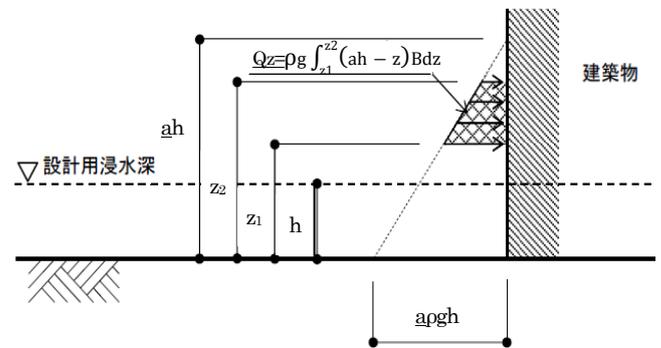


図4-2 4.2式による津波波力

	要件	aの値
(一)	津波避難ビル等から津波が生じる方向に施設又は他の建築物がある場合 (津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る)	2
(二)	(一)の場合で、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から500m以上離れている場合	1.5

(3) 開口による低減

開口部 (津波波圧により破壊するよう設計した非耐圧部材によるものに限る。以下同じ。) における津波波力は、各高さ毎の受圧面の幅から各高さ毎の開口部の幅を除外して津波波力を算定すること、又は受圧面の面積から開口部の面積を除外した面積を受圧面の面積で除して得た割合を津波波力に乗じることにより低減することができる。ただし、原則として、除外する前の津波波力の7割を下回らないこととする。

(4) ピロティの取り扱い

ピロティを有する部分の津波波力は、ピロティ部分（柱・梁等の耐圧部材を除く。）に津波波圧が作用しないこととして、算定することができる。

#### (5) 水平荷重の方向

津波の水平荷重は、すべての方向から生じることを想定する。ただし、津波の進行方向が、シミュレーション等による浸水深の予測分布や海岸線の形状から想定できる場合は、この限りでない。また、実状に応じて引き波を考慮する。

#### (6) 浮力算定式

津波によって生じる浮力は、下式により算定する。

$$Q_z = \rho g V \quad \text{————— (4.3)}$$

ここに

$Q_z$  : 浮力 (kN)

$V$  : 津波に浸かった建築物の体積 ( $m^3$ )

ただし、開口率を勘案して水位上昇に応じた開口部からの水の流入を考慮して算定することができる。

#### (7) 特別な調査又は研究に基づく算出

当該津波避難ビル等の所在地における津波荷重を特別な調査又は研究に基づき算出する場合は、当該数値による。

### 1. 5 荷重の組み合わせ

津波荷重に対する建築物の構造設計では、以下に示す荷重の組み合わせを考慮する。

$G+P+0.35S+T$  (多雪地域)

$G+P+T$  (多雪地域以外の地域) ————— (5.1)

ここに、

G: 固定荷重によって生じる力

P: 積載荷重によって生じる力

S: 積雪荷重によって生じる力

T: 津波荷重によって生じる力

多雪区域は、特別な検討等による場合を除いて、建築基準法施行令(昭和25年政令第338号)の規定に基づき特定行政庁が指定する区域とする。

### 1. 6 受圧面の設計

#### (1) 耐圧部材の設計

耐圧部材は、終局強度以内とし、確実に構造骨組に力を伝達できるようにする。また、必要に応じて止水に配慮する。

#### (2) 非耐圧部材の設計

非耐圧部材は、構造骨組みに損傷を与えることなく壊れることを容認する。

### 1. 7 構造骨組の設計

各方向、各階において、構造骨組みの水平耐力が、津波の水平荷重以上であることを下式により確認する。

$$Q_{ii} \geq Q_i \quad \text{————— (7.1)}$$

$Q_{ii}$  :  $i$  層の津波の水平荷重に対する水平耐力 (材料強度によって計算する各階の水平力に対する耐力等)

$Q_i$  :  $i$  層に生じる津波の水平荷重

また、耐圧部材は、設計した荷重の組み合わせに対して終局強度以内とする。

### 1. 8 転倒及び滑動の検討

建築物が、浮力及び自重を考慮して、津波荷重によって転倒又は滑動しないこと (杭基礎にあつては、杭の引き抜き耐力を超えないこと等) を確かめる。

### 1. 9 その他の構造設計上の配慮

#### (1) 洗掘

洗掘に配慮し、杭基礎とするか又は直接基礎の場合は洗掘により傾斜しないようにする。

#### (2) 漂流物の衝突

漂流物の衝突による損傷を考慮し、衝突により構造耐力上主要な部分が破壊を生じないこと又は柱若しくは耐力壁の一部が損傷しても、建築物全体が崩壊しないことを確かめる。