

1 章 津波避難ビル等の構造上の 要件の解説

1 章. 津波避難ビル等の構造上の要件の解説

第1章では、津波避難ビル等（工作物を含む。以下同じ）の指定を検討する際の、建築物の選定基準（構造的要件）の基本的な考え方として、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「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」（平成23年11月17日付国住指第2570号）における「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」（以下、「新ガイドライン」という）の内容について解説する。

また、これを基に、平成23年12月7日に制定された津波防災地域づくりに関する法律（平成23年法律第123号）（以下、「津波防災地域づくり法」という）において指定避難施設の構造上の技術基準（津波防災地域づくりに関する法律施行規則（平成23年国土交通省省令第99号）（以下、「津波防災地域づくり法施行規則」という）第31条第一号及び第二号の規定に基づき「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等を定める件」（平成23年国土交通省告示第1318号）（以下、「津波防災地域づくり法告示」という））が定められており、この内容とその解説についても合わせて示した^{注1}。

本章に示す解説の内容は、国土交通省の平成23年度建築基準整備促進事業において設置された、津波避難ビル等の構造設計法等の検討委員会（委員長：中埜良昭東京大学生産技術研究所教授）において、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てとりまとめられた中間報告¹及び中間報告その2²の内容や、(財)日本建築センターの津波に対する建築物の構造設計法に係る自主研究^{3,4}及びこの構造設計法を参照している内閣府の「津波避難ビル等に係るガイドライン」⁵（以下、「旧ガイドライン」という）を参考に、必要な修正、加筆をしたものである。

なお、津波防災地域づくり法において、管理方法に関する基準に適合すること、また、避難スペースの設置にあたっては、同法の規定に従って建築物等への衝突による津波の水位の上昇が考慮された基準水位が定められ、これ以上の高さに避難上有効な場所を設けることとされているので、これらについて別途検討が必要である。

参考① 津波防災地域づくり法における指定避難施設の要件について

津波防災地域づくり法における指定避難施設の指定にあたっては、津波災害警戒区域内において、以下の要件に適合するものについて、市町村長が指定することができるとされている。

1. 構造上の要件（津波に対して安全な構造方法等とすること。）
2. 避難上の要件（避難上有効な場所の配置、かつ、当該場所までの経路の確保。）
3. 管理上の要件（津波発生時に住民等に開放されること等。）

また、上記1、2の要件を満たす施設について、市町村と当該施設の所有者等が管理協定を締結することにより、市町村自ら当該施設の避難用部分の管理を行うことも可能である。

なお、指定避難施設の指定にあたり、建築主事を置かない市町村の市町村長においては、あらかじめ、都道府県知事と協議しなければならないとされている。協議を受けた都道府県知事は、主として上記1の要件に適合しているかどうかを確認することとなる。

^{注1} 新ガイドラインと津波防災地域づくり法告示は、各施行時点における整理状況等により一部書きぶりに異なる点が見られるが、両者については基本的に同趣旨のものであると理解してよい。

1-1. 適用範囲

新ガイドライン

(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表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項第一号に基づく基準（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。

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法（抄）】

（津波浸水想定）

第8条 都道府県知事は、基本指針に基づき、かつ、基礎調査の結果を踏まえ、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をいう。以下同じ。）を設定するものとする。

（以下、略）

（指定避難施設の指定）

第56条 市町村長は、警戒区域において津波の発生時における円滑かつ迅速な避難の確保を図るため、警戒区域内に存する施設（当該市町村が管理する施設を除く。）であって次に掲げる基準に適合するものを指定避難施設として指定することができる。

- 一 当該施設が津波に対して安全な構造のものとして国土交通省令で定める技術的基準に適合するものであること。（以下、略）

【津波防災地域づくり法施行規則（抄）】

（指定避難施設の技術的基準）

第31条 建築物その他の工作物である指定避難施設に関する法第56条第1項第一号の国土交通省令で定める技術的基準は、次に掲げるものとする。

- 一 津波浸水想定を設定する際に想定した津波の作用に対して安全なものとして国土交通大臣が定める構造方法を用いるものであること。
- 二 地震に対する安全性に係る建築基準法（昭和25年法律第201号）並びにこれに基づく命令及び条例の規定又は地震に対する安全上これらに準ずるものとして国土交通大臣が定める基準に適合するものであること。

【津波防災地域づくり法告示（抄）】

第二 施行規則第 31 条第二号に規定する地震に対する安全上地震に対する安全性に係る建築基準法並びにこれに基づく命令及び条例の規定に準ずる基準は、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 4 条第 2 項第三号に掲げる建築物の耐震診断及び耐震改修の実施について技術上の指針となるべき事項に定めるところにより耐震診断を行った結果、地震に対して安全な構造であることが確かめられることとする。

I. 基準の趣旨

新ガイドラインに示す設計法（以下、「本設計法」という）は、津波避難ビル等の指定を検討する際の、建築物の選定基準（構造的要件）の基本的な考え方及び構造設計の手順をまとめたものである。

設計用浸水深の設定については、旧ガイドラインにおいては数値シミュレーション等をもとに設定することとされていたが、新ガイドラインにおいては、多くの自治体においてハザードマップの整備が進められてきたこと等を受け、設計用浸水深を、ハザードマップ等に表示された想定浸水深に基づき設定すること、また、津波防災地域づくり法に基づいて津波避難施設が指定される場合については、同法第 8 条の規定に基づき都道府県知事により定められる津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水の区域及び水深）に定める水深とすることを明示した。

本設計法の流れを図 1.1.1 に示す。既存の建築物に適用する場合は、地震に対する耐震安全性を確保するために、現行の建築基準法（昭和 25 年法律第 201 号）（以下、「法」という）の規定に適合するもののほか、同法第 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 項第一号に基づく基準（地震に対する安全上耐震関係規定に準ずるものとして定める基準（平成 18 年国土交通省告示 185 号）。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（同法第 4 条第 2 項第三号に掲げる建築物の耐震診断及び耐震改修の実施について技術上の指針となるべき事項に定めるところにより耐震診断を行った結果、地震に対して安全な構造であるもの）を含む。）に適合するものであることを確認の上、新ガイドライン等に準拠した設計を行うこととなる。なお、本設計法に示されていない項目については、建築基準法や、その他の関係法令に従うこととする。

なお、本設計法では、前述のとおり工作物も対象となるが、以下の解説は基本的に建築物を想定して記述している。特殊な形状の工作物については、別途検討が必要と考えられるので留意されたい。

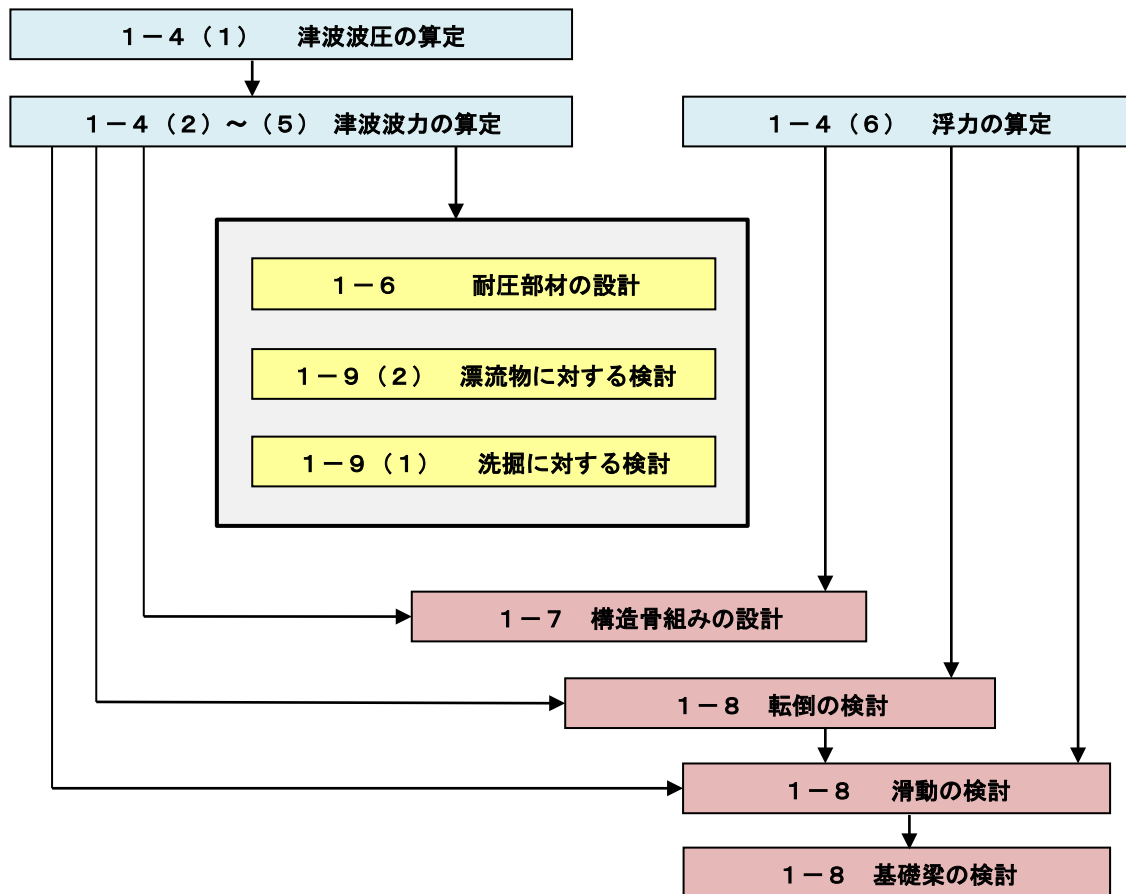


図 1.1.1 本設計法で想定する設計の流れ

1－2. 用語

新ガイドライン（津波防災地域づくり法告示等に規定なし）	
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 ²)
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
構造骨組み	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

I. 基準の趣旨

ここでは、本設計法の本文に使用する用語のうち一般的でないものや定義を明確にしておくべきものについてまとめている。

旧ガイドラインからの主な変更点は、設計用浸水深の定義を、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として明示したことである。

なお、津波波力に対する構造計算上、建築物の耐力算定に用いる受圧面の部材のうち、構造耐力上主要な部分は耐圧部材として設計する（津波波圧により破壊しないことを確かめる）必要がある。非耐圧部材のうち、津波波圧により破壊することが確認される部材による開口部は、津波波圧を受圧しないものとして波力を低減することが可能であるが、その他の非耐圧部材は、津波波圧に耐えることを確かめることは要しない（破壊することを容認する）ものの、この場合も波圧を受圧するものとして、津波波力を算定することが原則である。なお、「受圧面」「耐圧部材」「非耐圧部材」については「1－4.（3）開口部による低減」を参照されたい。

1－3．構造計画

新ガイドライン（津波防災地域づくり法告示等に規定なし）

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。

I．基準の趣旨

津波荷重は、設計用浸水深が深くなるにつれて大きくなり、設計用浸水深によっては、風荷重や地震荷重と比較して大きな荷重となる場合がある。

耐力壁は地震時に面内方向に荷重を負担するが、津波時には面外方向にも荷重を負担する。津波荷重に対する建築物の構造設計では、荷重方向によって耐圧部材と非耐圧部材を明確に区分し、各階に生じる津波の水平荷重を明らかにしなければならない。また、特に壁等の受圧面積の大きい耐圧部材の配置を工夫することで、建築物の構造骨組み全体に生じる津波荷重を小さくすることができる。

津波荷重が小さくなる構造形式としてピロティ形式があるが、十分な耐震性能を確保するためには設計上十分な配慮が必要とされている。津波避難ビルには、十分な耐震性能が求められるため、耐震設計と耐津波設計の両面を考慮した構造計画が必要である。

1-4. 津波荷重算定式

(1) 津波波圧算定式

新ガイドライン

(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。

$$qz = \rho g(ah - z) \quad \text{—————(4.1)}$$

ここに、

qz : 構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m²)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

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。)

	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

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法告示 (抄)】

第1第一号ロ 津波による波圧は、津波浸水想定に定める水深に次の式に掲げる水深係数を乗じた高さ以下の部分に作用し、次の式により計算するものとしなければならない。

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

この式において、 qz 、 ρ 、 g 、 h 、 z 及び a は、それぞれ次の数値を表すものとする。

qz 津波による波圧 (単位1平方メートルにつきキロニュートン)

ρ 水の単位体積質量 (単位1立方メートルにつきトン)

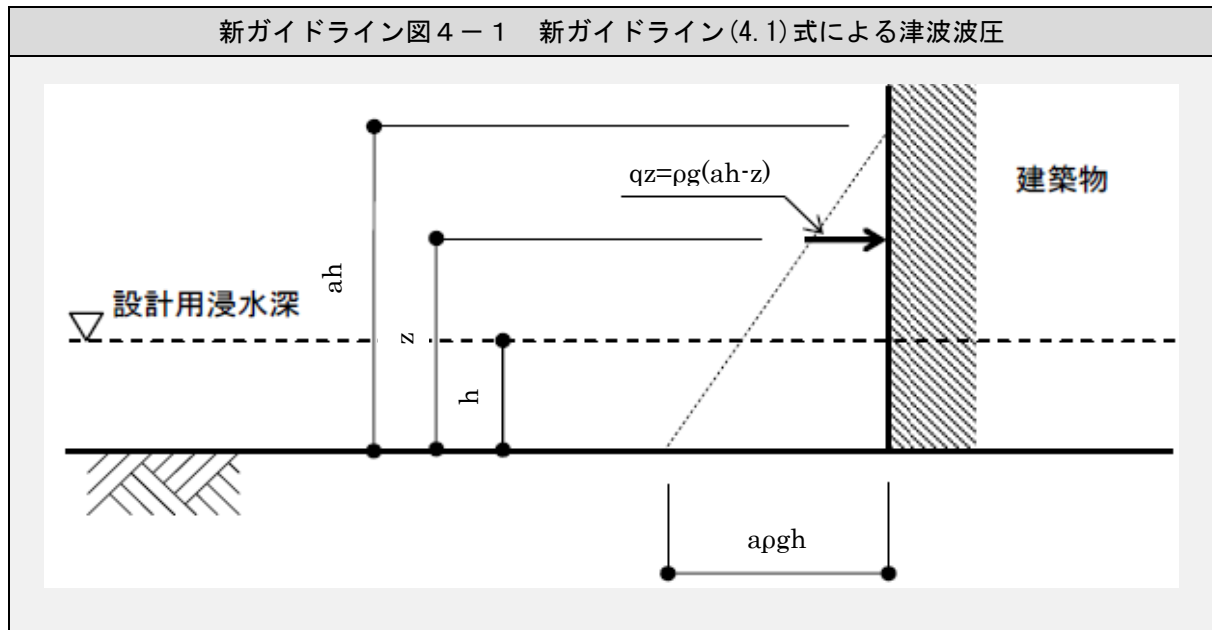
g 重力加速度 (単位メートル毎秒毎秒)

h 津波浸水想定に定める水深 (単位メートル)

z 建築物等の各部分の高さ (単位メートル)

a 水深係数 (3とする。ただし、他の施設等により津波による波圧の軽減が見込まれる場合にあっては、海岸及び河川から500メートル以上離れているものについては1.5と、これ以外のものについては2とする。)

新ガイドライン図4-1 新ガイドライン(4.1)式による津波波圧

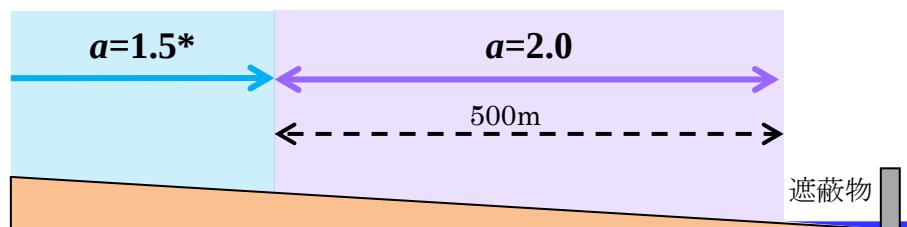


I. 基準の趣旨

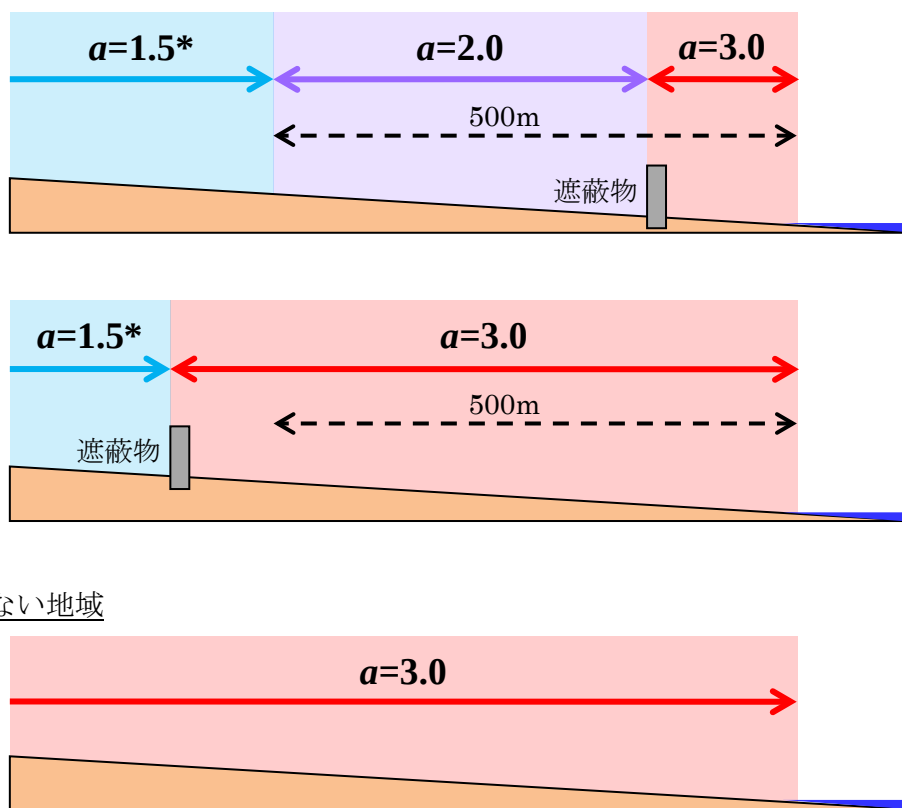
旧ガイドラインでは朝倉ら⁶の研究に基づき、設計用浸水深の3倍に相当する静水圧を津波波圧とする算定式が示されていたが、東日本大震災の津波被害地域における被害調査結果に基づいた旧ガイドラインの算定式の検証²を踏まえ、算定式の見直しを行った。

その結果、設計用浸水深の3倍に相当する静水圧を基本としながらも^{注2}、津波の勢いが軽減されることが見込まれる場合には、この倍率（新ガイドライン及び津波防災地域づくり法告示において、新たに水深係数 a と定義）を低減できることとしている。具体的には、津波避難ビル等から津波が来襲する方向に施設又は他の建築物等の遮蔽物がある場合（津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る）について水深係数を3.0から2.0に、さらにそのうち、津波避難ビル等の位置が津波が来襲する方向で海岸及び河川から500m以上離れている場合について当該2.0を1.5まで低減できることとした。（図1.4.1参照）

遮蔽物のある地域



注2 東日本大震災の津波被害においては設計用浸水深の3倍に匹敵する静水圧に相当する津波波圧は確認されなかったものの、実験やスマトラ島の津波被害においては確認されているため、津波の流速次第では生じる津波波圧として、設計用浸水深の3倍の静水圧を基本とした。従って、当該静水圧は、津波流速の影響も考慮して設定されたものである。



* $a=1.5$ への低減は津波の流速増加がない地域を対象とする

図 1.4.1 水深係数 a の模式図

Ⅱ. 技術解説・事例

文献 2 によると、東日本大震災における津波被害調査結果を受け、①海側に波力低減を期待する遮蔽物^{注3}が有る場合、②海岸や河川等からの距離が 500m 以遠の場合、水深係数が一定程度低減できることとしており、これを踏まえ、図 1.4.1 に示すような水深係数の設定ができている。なお、500m 近傍においては当該建築物周辺の地形（流勢が増大するような下り勾配となっていないか）や建築物の配置（流れが集中する位置に立地していないか）等を勘案し安全側に設定することが望ましい。

なお、 a の数値は、東日本大地震における被害調査から得られた限られたデータに基づく検討であり、津波シミュレーションの精度、過去の実験・被害調査結果等の不確定要素や津波避難ビルの重要性等を考慮した設定としている。そのため、「1－4.（7）特別な調査又は研究に基づく算出」に示す特別な調査・研究に基づき津波荷重を算出する場合にも、同様の配慮が必要である。

注3 文献 2 では、釜石市、大船渡市、女川町に設置された湾口防波堤と、陸前高田市、石巻市、仙台市、山元町などに見られる津波高さに対し十分な高さを有すると考えられる防波堤・防潮堤を想定しており、また、気仙沼湾の内部に來襲した津波は、蜂ヶ崎地区を通過し波力が低減されていると考えられるため、蜂ヶ崎地区も遮蔽物と想定している。

(2) 津波波力算定式

新ガイドライン

(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。

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

ここに、

Q_z : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

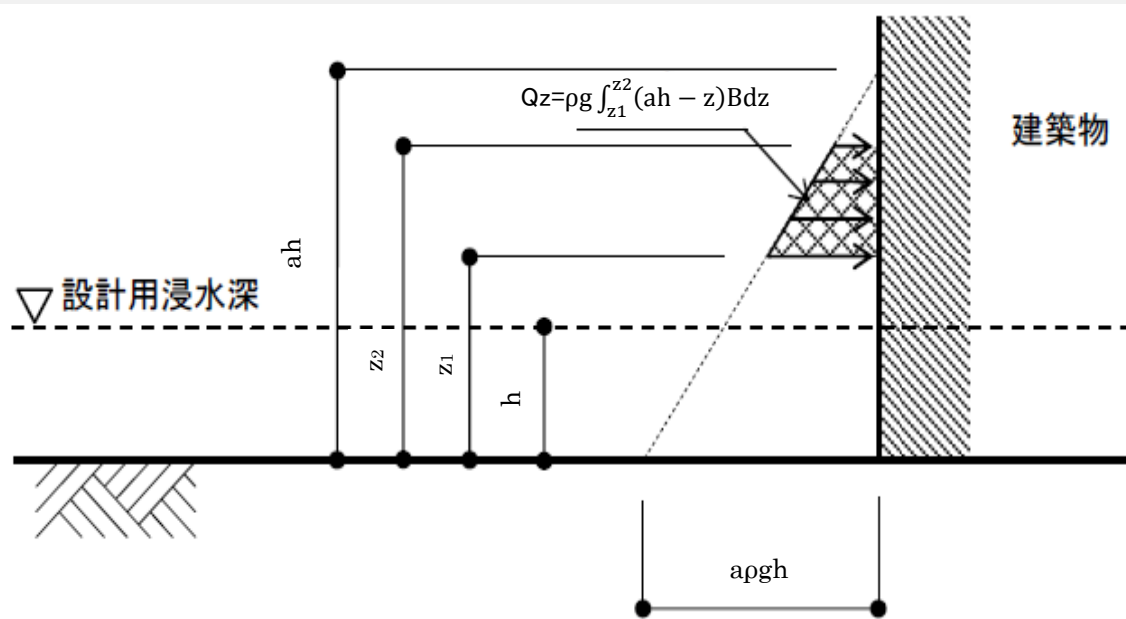
B : 当該部分の受圧面の幅 (m)

$$z_1$$
 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_1 \leq z_2$) (m)
$$z_2 : \text{受圧面の最高高さ} \quad (z_1 \leq z_2 \leq ah) \quad (\text{m})$$

津波防災地域づくり法告示等

※【津波防災地域づくり法告示】では、第1第一号ニの開口部を有する建築物等における津波波力低減方法に係る記載部分において、津波波力算定式に関する記述が見られるが、当該箇所については次項「1－4.（3）開口部による低減」において掲載している。

新ガイドライン図 4-3 新ガイドライン(4.2)式による津波波力



I. 基準の趣旨

「1-4. (1) 津波波圧算定式」に示した津波波圧は単位面積あたりの津波波力を表していることから、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。新ガイドライン(4.2)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示している。

旧ガイドラインからの変更点は、高さに応じて受圧面の幅が異なる建築物を想定し、新ガイドライン(4.2)式について受圧面の幅 B を含めて積分を行うとしたことである。

Ⅱ．技術解説・事例

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する必要がある。例えば、図 1.4.2 のように、高さ z_1 から z_3 ($< z_2$) までの受圧面の幅が B_1 、高さ z_3 ($> z_1$) から z_2 までの受圧面の幅が B_2 である場合、当該受圧面に作用する津波波力 Q_z は以下のように計算できる。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z)B \cdot dz = \rho g B_1 \int_{z_1}^{z_3} (ah - z) \cdot dz + \rho g B_2 \int_{z_3}^{z_2} (ah - z) \cdot dz$$

また、受圧面の幅 B が高さによらず一定の場合、以下のように計算できる。

$$Q_z = \frac{1}{2} \rho g B \{ (2ahz_2 - z_2^2) - (2ahz_1 - z_1^2) \}$$

本ガイドラインでは「1－7．構造骨組みの設計」において各層に生じる津波の水平荷重と各層の水平耐力を比較することとなっている。ここで、 i 層に生じる津波の水平荷重 Q_i は、以下のように算定することができる。

$$Q_i = \rho g \int_{z_i}^{z_{\max}} (ah - z)B \cdot dz$$

ここで、 z_i は i 層の中央高さ、 $z_{\max}$ は受圧面の最高高さ (ah と建築物の高さ H のうち小さい方) である。

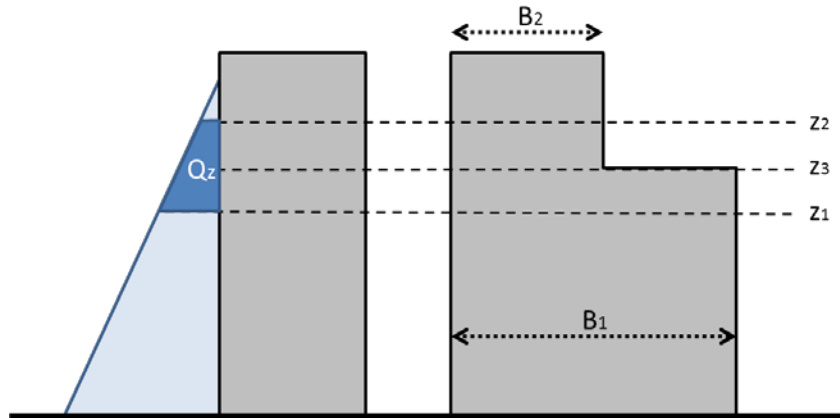


図 1.4.2 津波波力 Q_z

(3) 開口部による低減

新ガイドライン
(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乘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。
津波防災地域づくり法告示等
【津波防災地域づくり法告示（抄）】 第1第一号ニ 開口部（常時開放されたもの又は津波による波圧により破壊され、当該破壊により建築物等の構造耐力上主要な部分に構造耐力上支障のある変形、破壊その他の損傷を生じないものに限り、開放部分を除く。以下この号において同じ。）を有する建築物等について、建築物等の各部分の高さにおける津波による波圧が作用する建築物等の部分の幅（以下この号において「津波作用幅」という。）に口の式により計算した津波による波圧を乗じた数値の総和（以下この号において「津波による波力」という。）を用いてイの表の津波による波圧によって生ずる力を計算する場合における当該津波による波力を計算するに当たっては、次の(1)又は(2)に定めるところによることができる。この場合において、これらにより計算した当該津波による波力を用いてイの表の津波による波圧によって生ずる力を計算するに当たっては、建築物等の実況を考慮することとする。 (1) 津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算すること。ただし、津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算した津波による波力を、津波作用幅により計算した津波による波力で除して得た数値が0.7を下回るときは、当該数値が0.7となるように津波作用幅から除く開口部の幅の総和に当該数値に応じた割合を乗じて計算することとする。 (2) 津波による波圧が作用する建築物等の部分の面積（以下この号において「津波作用面積」という。）から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値を乗じて計算すること。ただし、当該数値が0.7を下回るときは、当該数値を0.7として計算することとする。

I. 基準の趣旨

開口部による津波波力の低減効果に関して、東日本大震災における津波被害調査結果等を受け、除外する前の津波波力の7割を下回らないことを原則として、開口部における津波波力が算定除外とできる旨を明示することとした。

ここでいう「開口部」とは、構造骨組みの設計に用いる津波荷重算定に当たり、受圧面にあり、破壊することが確認できる非耐圧部材を想定している。具体的には、外壁にある窓、ドア、シャッター等のことである。開口部は外壁のみを対象とし、内壁を対象としないが、内部で大きな波圧を受けることのないよう、水流の通り道や出口となるような部分が内部や受圧面の反対側の外壁等にも存在することを想定している。なお、第1構面に開口部があっても、流入する水の逃げ



写真 1.4.1 3階建て鉄骨造の転倒

道がない構造であるような場合は、開口部として取り扱わないことが適当である。また、一例のみではあるが、ALC パネルによる外壁がほぼ残ったまま津波により転倒した被害が東日本大震災において発生していた（写真 1.4.1）ことを踏まえると、鉄骨造の外装材部分については、外装材の下地材（2 次部材）や外壁に直交して取り付く内壁の配置等を考慮して外壁の耐力を評価する等開口部とみなせるか否かについて慎重に検討する必要があると考えられる。

津波防災地域づくり法告示においては、さらに具体的に、開口部について「常時開放されたもの又は津波による波圧により破壊され、当該破壊により建築物等の構造耐力上主要な部分に構造耐力上支障のある変形、破壊その他の損傷を生じないものに限る」こと、「開放部分を除く」とことと明確化された（図 1.4.3 参照）。なお、ここでいう「開放部分」の定義については、「1－4.（4）開放部分の取り扱い」を参照されたい。

また、波力低減の方法については、以下のように明確化されている。

（1）津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する

各層ごとに津波作用幅から開口部の幅の総和を除外して計算する。この場合、開口部の幅の総和を除外して計算した波力が、津波作用幅により計算した波力の 7 割を下回る場合は、当該割合が 7 割となるような開口部の幅の総和を調整する係数を求め、波力を計算する。なお、当該調整計算の結果得られた当該建築物全体に作用する波力は、津波作用幅を基に計算した当該建築物全体に作用する波力の 7 割と同値である（p.I-15「参考②」参照）。

（2）津波作用面積から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値（以下、「開口率」という）を乗じて計算する

（低減率）＝ $1 - (\text{開口部面積の総和} / \text{津波作用面積})$ を波力に乘じる。この場合、当該低減率は 0.7 を下回らないものとする。

なお、低減率の下限値については、内壁等が存在する場合には、波力の低減効果が小さくなるとされていることから設定されている。したがって、内壁等が存在しない等の特殊な場合に、特別な調査又は研究によりさらに低減することは排除されない。

さらに、津波による波圧が作用する建築物等の受圧部分が著しく偏在し、当該津波による波圧の作用により建築物等にねじれが生じるおそれがあるなど、建築物等の実況を考慮する必要がある場合は、当該ねじれによる影響を踏まえて安全性を確認することが適当である。

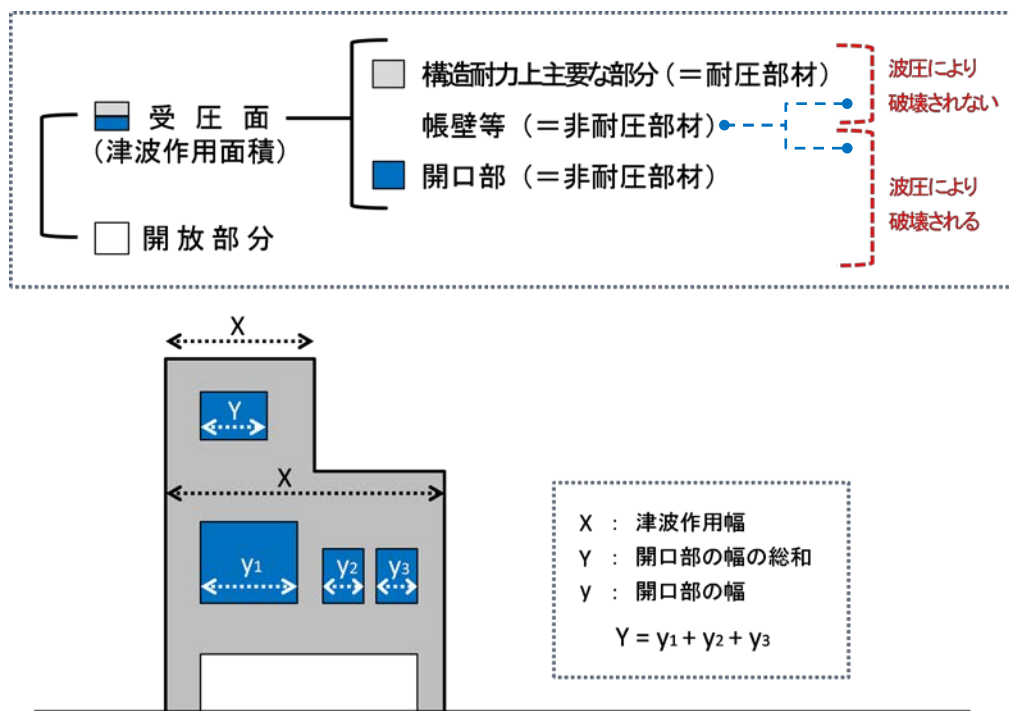


図 1.4.3 受圧面及び開放部分

Ⅱ. 技術解説・事例

建築物に津波が作用した場合、受圧面（津波波圧を受ける外壁）にある窓ガラス等は早期に破壊するため、受圧面が全て耐圧部材である場合に比べて、構造骨組みに作用する波力は低減すると考えられる。すなわち、開口部によって津波波力は低減しうる。東日本大震災における津波の被害調査においても、受圧面にある窓ガラス等は概ね破壊していた。

なお、開口部による波力の低減については、数値シミュレーションにより検討された例⁷によれば、開口部の割合が大きくなるにつれて波力は低減することが分かるが、概ね3割以上になると内壁等が存在するために波力の低減は小さくなるとされている（図 1.4.4 参照）。すなわち開口部による波力低減には一定の限度があり、内壁を有する通常の建築計画を前提にすると、7割程度を下限とすることが現時点では望ましいと考えられたことがガイドライン等に反映されている。

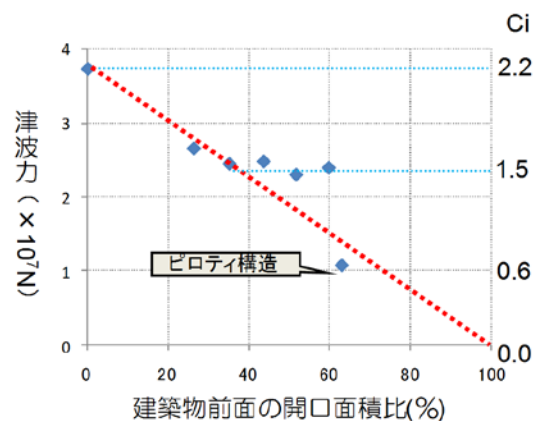
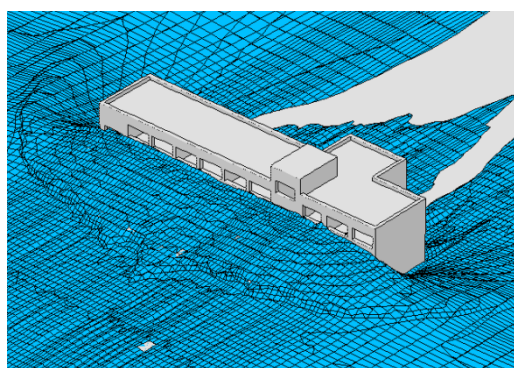


図 1.4.4 開口部による波力の低減に関するシミュレーション結果⁷

参考② 「(1) 津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する方法」の計算事例

「(1) 津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する方法」について、以下に示す。(図 1.4.5)

ここに、 Q_z : 開口部の幅の総和を除外して計算した波力 (γ による調整後)、 Q_z' : 開口部の幅の総和を除外して計算した波力 (γ による調整前)、 Q_z'' : 津波作用幅により計算した波力とする。

$$\begin{aligned} Q_z' &= \rho g \int_0^{z_{\max}} (ah - z) B \cdot dz \\ &= \rho g(B - W) \int_0^{z_1} (ah - z) \cdot dz + \rho g B \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) \cdot dz + \rho g(B - w) \int_{z_2}^{z_3} (ah - z) \cdot dz + \rho g B \int_{z_3}^{z_{\max}} (ah - z) \cdot dz \\ &= \rho g(B - W)X_1 + \rho g B X_2 + \rho g(B - w)X_3 + \rho g B X_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_z'' &= \rho g B \int_0^{z_{\max}} (ah - z) \cdot dz \\ &= \rho g B X_{\text{all}} \end{aligned}$$

$$\left(\int_0^{z_1} (ah - z) \cdot dz = X_1, \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) \cdot dz = X_2, \int_{z_2}^{z_3} (ah - z) \cdot dz = X_3, \int_{z_3}^{z_{\max}} (ah - z) \cdot dz = X_4, \int_0^{z_{\max}} (ah - z) \cdot dz = X_{\text{all}} \right)$$

(i) $Q_z' / Q_z'' \geq 0.7$ の場合

$$Q_z = Q_z' = \rho g(B - W)X_1 + \rho g B X_2 + \rho g(B - w)X_3 + \rho g B X_4$$

(ii) $Q_z' / Q_z'' < 0.7$ の場合

$$Q_z = 0.7 Q_z'' = 0.7 \rho g B X_{\text{all}}$$

ここで、 γ : 開口部の幅の総和を除外して計算した波力 (調整後) (Q_z) を津波作用幅により計算した波力 (Q_z'') で除した値が 0.7 となるように、津波作用幅から除く開口部の幅の総和を調整する係数」とすると、

$$0.7 \rho g B X_{\text{all}} = \rho g(B - \gamma W)X_1 + \rho g B X_2 + \rho g(B - \gamma w)X_3 + \rho g B X_4$$

$$\begin{aligned} \therefore \gamma &= \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 - 0.7 X_{\text{all}})B}{W X_1 + w X_3} \\ &= \frac{0.3 X_{\text{all}} B}{W X_1 + w X_3} \end{aligned}$$

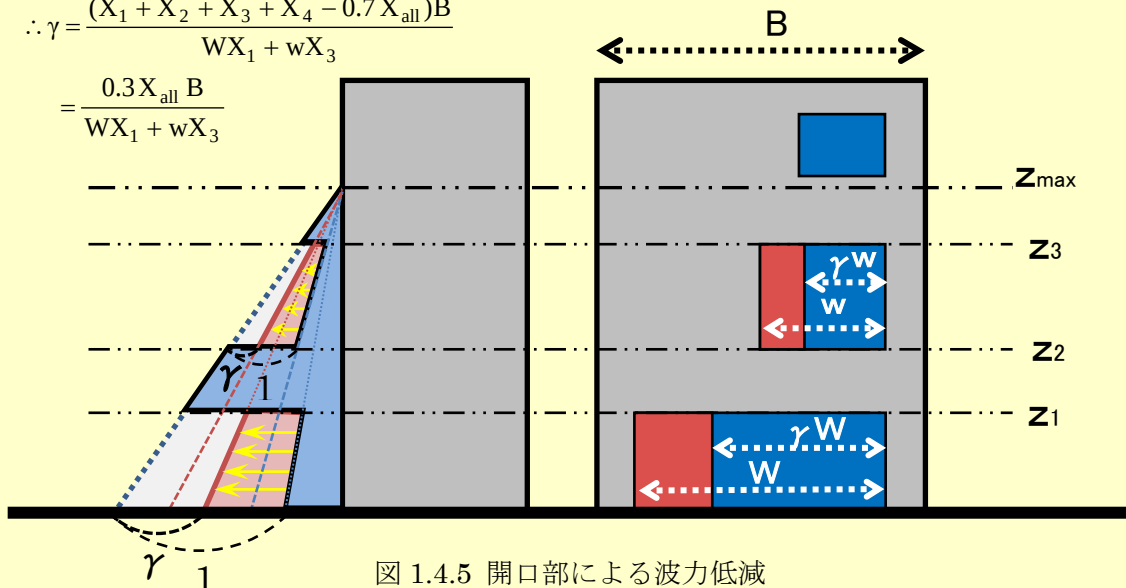


図 1.4.5 開口部による波力低減

（４）開放部分の取り扱い

新ガイドライン
（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。
津波防災地域づくり法告示等
【津波防災地域づくり法告示（抄）】 第1第一号ハ ピロティその他の高い開放性を有する構造（津波が通り抜けることにより建築物等の部分に津波が作用しない構造のものに限る。）の部分（以下この号において「開放部分」という。）を有する建築物等については、当該開放部分に津波による波圧は作用しないものとして算定することができる。

I. 基準の趣旨

ピロティの取扱に関して、開口部と同様にピロティ部分の津波波力が算定除外とできる旨を明示することとした。なお、ピロティ部分については、開口部と異なり低減率の下限を設けないこととした。

また、津波防災地域づくり法告示においては、上記の低減率の下限を設けずに算定除外が出来る対象を、ピロティその他の高い開放性を有する構造のうち、津波が通り抜けることにより建築物等の部分に津波が作用しない構造の部分と明示し、当該部分を「開放部分」とした。

なお、ピロティの内部に壁があるような場合は、その壁が津波波圧を受圧するものとして算定する必要がある。

II. 技術解説・事例

ピロティの場合では通常の窓等の開口部とは異なり、波力を大きく低減することができるが、ピロティ部分の柱梁等に対する波圧を考慮することを前提とすれば開口部と同様に扱えると考えられる。その際、ピロティ部分については低減の限度を設ける必要はない。

(5) 水平荷重の方向

新ガイドライン（津波防災地域づくり法告示等に規定なし）

(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。

※ 津波防災地域づくり法告示において、津波の方向性の直接の記述はないが、津波の進行方向が、シミュレーション等による浸水想定予測分布や海岸線の形状から想定できる場合を除き、実状に応じて引き波も考慮し、すべての方向から生じることとする。

I. 基準の趣旨

津波の水平荷重は、特に河口付近や港湾付近は地形が複雑であり、全ての方向から生じることを想定する。この場合、津波の進行方向（X 方向）及び直交方向（Y 方向）とも同じ大きさの荷重を想定することが原則である。また、引き波についても同じ荷重を見込むことが適当である。ただし、平坦な地形等で、数値シミュレーション結果等を適切に活用することにより、津波の進行方向を想定できる場合はこの限りでないが、そのような場合でも、数値シミュレーションの解析仮定、周辺構造物の配置等によって、津波の進行方向は想定と異なる場合も考えられるため、慎重な検討が必要である。

(6) 浮力算定式

新ガイドライン（津波防災地域づくり法告示等に規定なし）	
(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。	
$Q_z = \rho g V$	(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。	

I. 基準の趣旨

津波の水位上昇速度が大きい場合には、建築物内部への津波の流入が必ずしも期待できないため、水没した建物体積（内部空間の容積を含む）に相当する浮力を考慮することとした。ただし、建築物に流入する水の体積（浸水体積）を算定できる場合については、その体積分を浮力から差し引くことができる。なお、この場合、構造躯体そのものの体積分の浮力についても考慮する必要がある。

また、水没した層の梁または垂れ壁と上階スラブに囲まれた空間は浸水しないと判断できるため、必ず浮力を考慮する。また、エレベータホールやコア壁等に囲まれ、開口部が十分に設けられていないなどの浸水しない区画についても浮力を考慮する。

なお、建築物内部への津波の流入が不明確な場合は、後述の「1-7. 構造骨組みの設計」の際には建築物内部に水が流入することとして算定した浮力を、「1-8. 転倒及び滑動の検討」の際には水没した建物体積（内部空間の容積を含む）に相当する浮力を考慮することで、安全側の設計とすることが望ましい。

II. 技術解説・事例

(1) 建築物に作用する浮力の算定法

建築物に作用する浮力は、建築物に流入する水の体積（浸水体積）により大きく変化する。したがって、孤立波（1つの峰を持った波）が建築物に衝突する場合など、水位の上昇速度がきわめて速い場合は建築物内部の浸水が期待できず、水没した建物体積（内部空間の容積を含む）に相当する浮力を考慮する必要がある。一方で津波の水位上昇速度（もしくはその上限値）が仮定できる場合には建物の浸水程度を 1m 水位上昇あたりの時間と開口面積および位置から推定することができる。算定方法の詳細については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」中間報告その2²の参考資料を参照されたい。

(2) 層に流入する水の上限

東日本大震災の津波被害建物の調査において、完全に水没した建築物の垂れ壁と上階スラブとの間に水痕が残っており、はり下または垂れ壁より高い部分に空気溜まりが出来たことが確認さ

れている。したがって、層内の水位がはり下または垂れ壁高さまで達した時点で、それ以上には当該層には水は流入できないものとする。また、エレベータホールやコア壁などで囲まれた部分についても水は流入しないものとするのが望ましい。

(3) 東日本大震災における転倒被害

前述した参考資料で提案されている方法では津波荷重作用面および側面の開口率、水位の上昇速度、建築物形状から各層に順次水が流入したと見なしうるかを判断する。東日本大震災で転倒した建築物 8 棟は津波荷重作用面および側面の開口率と建築物形状について調査されている。そこで、これらのデータを用いて、転倒した各建築物について各層に順次水が流入したと見なしうるための 1m 水位上昇当りの時間の上限値 $T(s)$ を逆算した。算定結果を図 1.4.6 に示す。

津波荷重作用面および側面の開口率が低い建築物では T が大きく、参考④で後述する宮城県女川町で観測された 30 秒間で 1 m ずつ水位が上昇するような場合には各層に順次水が流入したと判断できるが、水位の上昇が速い地域において同様に各層に順次水が流入したと断定することは困難である。したがって、これらの建築物では水没した建築物体積（内部空間の容積を含む）に比較的近い浮力が生じていたと考えられる。一方、転倒が確認された建築物は 8 棟であるが、これらの開口率 ζ はいずれも 0.3 以下に留まっている。したがって、安全側の設計的配慮として津波荷重作用面および側面の開口率は 0.3 以上設けることが望ましい。

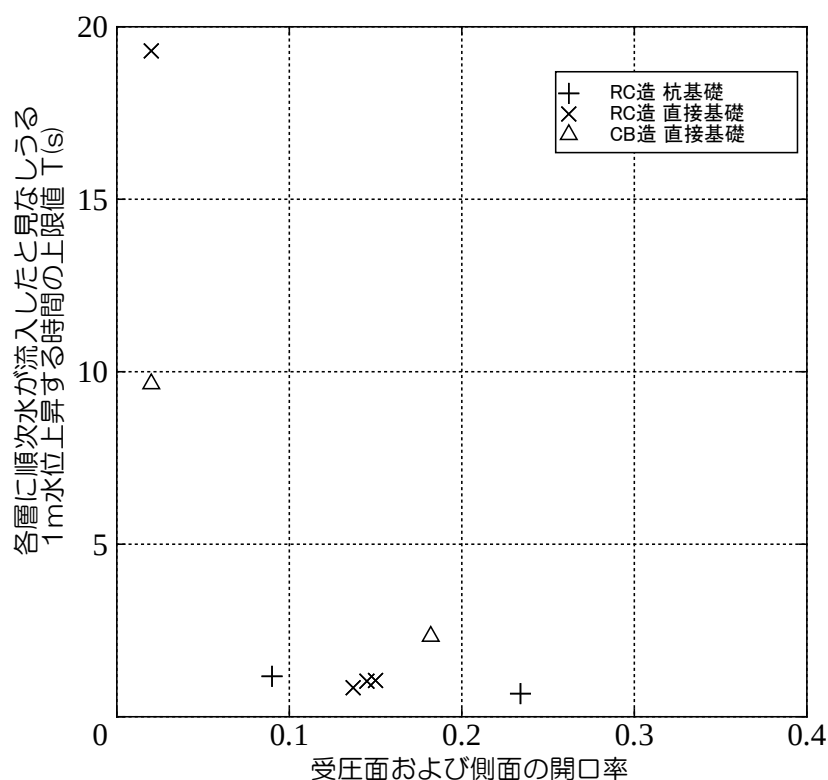


図 1.4.6 調査建築物の 1m 水位上昇当りの時間 T と開口率 ζ の関係

(7) 特別な調査又は研究に基づく算出

新ガイドライン
(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。
津波防災地域づくり法告示等
【津波防災地域づくり法告示（抄）】 第1 （前略）特別な調査又は研究の結果に基づき津波の作用に対して安全であることが確かめられた場合にあっては、これによらないことができる。 (以下、略)

I. 基準の趣旨

詳細な津波シミュレーション等により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ことができる場合、「1-4. (1)」～「1-4. (6)」で示した津波荷重によらず当該数値を津波荷重として用いることができる旨を明示することとした。

参考③ フルード数に応じた水深係数の低減

特別な調査又は研究に基づき津波荷重を算出する具体的な方法としては、中間報告その2²で示されている、フルード数(※1)が一定以下の場合に a を低減するといったことが想定される。

新ガイドライン(4.1)式では流勢を低減させる効果に応じて a の値を低減できることとしているが、中間報告その2²で示されているように、流勢を表す指標であるフルード数 F_r に応じて低減することが考えられる。 F_r に応じた抗力と新ガイドライン(4.1)式による水平荷重を比較すると、 $F_r < 1$ の場合、 $a=1.5$ とした新ガイドライン(4.1)式で抗力を安全側に評価できる。流速は周辺の構造物の配置や地形等の局所的な影響を受けるため、それを正確に評価する上で現段階では技術的な問題も残されているが、津波浸水シミュレーションに基づき適切にフルード数 F_r が設定され、かつ $F_r < 1$ の場合には、水深係数 a を 1.5 とした新ガイドライン(4.1)式を津波波圧算定式とすることができるといえる。

※1 フルード数： $F_r = u/\sqrt{g\eta}$ ここに、 u :流速(m/s)、 g :重力加速度(m/s²)、 η :浸水深(m)である。フルード数は流速 u と波速 $\sqrt{g\eta}$ の比で上式のように定義され、フルード数が大きいと流勢が強い流れと言える。津波防災地域づくりに係る技術検討報告書⁸では、基準水位の算定に当たって用いるフルード数は比エネルギー E_b (※2)が最大となる時点のものとしている。また、中間報告その2²では、フルード数は同一地点において時々刻々変化し、必ずしも最大浸水深と最大流速が同時に発生する訳ではないが、朝倉ら⁶と同様、 $F_r = u_{\max}/\sqrt{g\eta_{\max}}$ （ここに、 $\eta_{\max}$ は最大浸水深、 $u_{\max}$ は最大流速である。）で表されるものと考えている。

※2 比エネルギー： $E_b = h_b(1 + F_r^2/2)$ ここに、 h_b :浸水深(m)である。比エネルギーは地盤面を基準とし、エネルギーを水頭で表したものであり、速度水頭（運動エネルギーに対応）と水深（位置エネルギーと圧力エネルギーとの和に対応）との和で上式のように定義される。

1-5. 荷重の組み合わせ

新ガイドライン

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。

$G+P+0.35S+T$ (多雪区域)

$G+P+T$ (多雪区域以外の区域) ——— (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。

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法告示（抄）】

第1第一号イ 津波の作用時に、建築物等の構造耐力上主要な部分に生ずる力を次の表に掲げる式によって計算し、当該構造耐力上主要な部分に生ずる力が、それぞれ建築基準法施行令（昭和25年政令第338号）第3章第8節第4款の規定による材料強度によって計算した当該構造耐力上主要な部分の耐力を超えないことを確かめること。ただし、これと同等以上に安全性を確かめることができるときは、この限りでない。

荷重及び外力について 想定する状態	一般の場合	建築基準法施行令第86条第2項ただし書の規定により特定行政庁（建築基準法第2条第35号に規定する特定行政庁をいう。）が指定する多雪区域における場合	備考
津波の作用時	$G+P+T$	$G+P+0.35S+T$	建築物等の転倒、滑動等を検討する場合においては、津波による浮力の影響その他の事情を勘案することとする。
		$G+P+T$	

この表において、G、P、S及びTは、それぞれ次の力（軸方向力、曲げモーメント、せん断力等をいう。）を表すものとする。

G 建築基準法施行令第84条に規定する固定荷重によって生ずる力

P 建築基準法施行令第85条に規定する積載荷重によって生ずる力

S 建築基準法施行令第86条に規定する積雪荷重によって生ずる力

T ロに規定する津波による波圧によって生ずる力

I. 基準の趣旨

本設計法では、津波荷重と地震力の組み合わせは考慮せず、固定荷重等と組み合わせて考慮することとしている。

II. 技術解説・事例

G は建築基準法施行令（以下、「令」という）第 84 条に規定する固定荷重、P は令第 85 条に規定する積載荷重、S は令第 86 条に規定する積雪荷重、T は「1－4. 津波荷重算定式」で示した津波荷重（津波波圧、津波波力、浮力）によって生ずる力を用いる。

荷重組み合わせの表中では、構造計算にあたって浮力を適切に考慮することとされているが、その他にも津波による部材等の流失によって、固定荷重・積載荷重が大きく低減し、建築物の転倒、柱の引き抜き等の検討に及ぼす影響が大きいと考えられる場合は、同様にその低減分を考慮する必要がある。

多雪区域では津波と同時に作用する積雪荷重について、令第 82 条の一般的な構造計算と同様に荷重の確率的な組み合わせ効果を考慮して令第 86 条に規定する積雪荷重の 0.35 倍の力を考慮することとなっているが、建築物の転倒、柱の引き抜き等の検討においては積雪荷重の存在が危険側となることを考慮して、積雪荷重 S を除く $G+P+T$ の組み合わせとして検討することとしている。

津波防災地域づくり法告示において、津波の作用時に構造耐力上主要な部分が破壊を生じないことを確かめるに当たっては、津波による浮力による影響等も適切に考慮する必要がある。これより、津波防災地域づくり法告示においても、新ガイドラインと同様、浮力の影響等を受ける建築物の各層の水平耐力の算定にあたっては浮力を考慮する必要がある。

1-6. 受圧面の設計

新ガイドライン

(1) 耐圧部材の設計

耐圧部材は、終局強度以内とし、確実に構造骨組み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。

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法告示（抄：再掲）】

第1第一号イ 津波の作用時に、建築物等の構造耐力上主要な部分に生ずる力を次の表に掲げる式によって計算し、当該構造耐力上主要な部分に生ずる力が、それぞれ建築基準法施行令（昭和25年政令第338号）第3章第8節第4款の規定による材料強度によって計算した当該構造耐力上主要な部分の耐力を超えないことを確かめること。ただし、これと同等以上に安全性を確かめることができるときは、この限りでない。（以下、略）

I. 基準の趣旨

以下、「耐圧部材」「非耐圧部材」「受圧面」等の定義については、「1-2. 用語」を参照されたい。

津波荷重は、設計用浸水深が深くなるにつれて大きくなる。例えば、設計用浸水深1mの場合、波圧が $3\rho gh$ とすると、最大の津波波圧は 29.4 kN/m^2 となり、風圧力作用時の10倍のオーダーになる。したがって、受圧面の部材全てを破壊しないようにすることは、技術的にも経済的にも困難である。そこで、本設計法では受圧面の部材を耐圧部材と非耐圧部材とに明確に区分し、耐圧部材についてのみ波圧により破壊しないことを確認することとしている。

なお、旧ガイドラインには、非耐圧部材について「浸水に対して建築物の機能を損なわないよう配慮する」旨明示されていたが、機能が維持されることは要求していないため、当該記述を削除した。

II. 技術解説・事例

建築物に津波荷重が作用した時、各部材には非常に大きな圧力が作用するため、設計者は耐圧部材、非耐圧部材を適切に設定しなければならない。ここで、耐圧部材として扱う必要のある部材は受圧面において水平耐力の算定に考慮している部材（柱、耐力壁など）であり、非耐圧部材とはそれ以外の部材となる（図 1.4.3）。耐圧部材を受圧面の部材に限定したのは、津波が直接作用しない構面では、前面や側面に位置する開口部などから流入した波力が作用するが、受圧面に比べて弱まっていることが想定されるためであり、そのような部材については、耐圧部材としての検討を行わなくてもよいこととした。

耐圧部材については波圧および浮力を考慮して破壊しないことを確認する必要がある。津波荷重により発生する部材応力が終局強度以内であることを確認する方法としては日本建築センター

の報告書等⁹を参照するとよい。例えば、この報告書では各部材（柱および壁）の終局耐力については基準解説書¹⁰によるほか、RC 壁面の面外終局曲げ耐力は梁曲げ終局耐力と同様に算定し、面外終局せん断耐力はコンクリートのせん断応力度が短期許容せん断応力度以内となるように設計することとしている。

同報告書ではこれらのほか、外装材に用いるガラスや軽量気泡コンクリート（ALC）パネルを用いる場合について、ガラスの許容耐力は平成 12 年 建設省告示第 1458 号に、ALC パネルの曲げ耐力は JIS A 5416「軽量気泡コンクリートパネル」に規定されている「パネルの曲げ試験」の載荷方法による曲げ強度試験の結果に基づき算出することとし、ALC パネルの曲げ強度試験の結果については、材料メーカーの設計資料より引用している。

1-7. 構造骨組みの設計

新ガイドライン

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。

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

Q_{ui} : 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。

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法告示（抄：再掲）】

第1第一号イ 津波の作用時に、建築物等の構造耐力上主要な部分に生ずる力を次の表に掲げる式によって計算し、当該構造耐力上主要な部分に生ずる力が、それぞれ建築基準法施行令（昭和25年政令第338号）第3章第8節第4款の規定による材料強度によって計算した当該構造耐力上主要な部分の耐力を超えないことを確かめること。ただし、これと同等以上に安全性を確かめることができるときは、この限りでない。（以下、略）

I. 基準の趣旨

各方向、各階について構造骨組みの水平耐力が津波波力を上回ることを確認する。

増分解析時の外力分布は新ガイドライン図4-1（p. I-8）のような津波波圧分布とし、増分外力と波圧の最大高さを同じとしてよい。

津波防災地域づくり法告示における具体的な構造計算の方法としては、保有水平耐力の検証と同様に、津波による波力によって計算した各階に生ずる力が、当該建築物等の水平耐力を超えないことを確かめる方法等を用いて安全性を確かめることとする。この場合においても、外壁等の津波による波圧が直接作用する構造耐力上主要な部分が破壊を生じないことを確かめることが必要である。ただし、同等以上に安全性を確かめる構造計算の方法として、例えば、後述する鉄筋コンクリート造建築物におけるルート1およびルート2に示される終局耐力算定式によることもできる。

II. 技術解説・事例

具体の構造骨組みの終局耐力（水平耐力）を算定する方法としては増分解析による方法が挙げられる。一般的に増分解析は構造計算プログラム等を用いて計算することが多い。実際の津波荷重は浸水深の増加に伴って徐々に大きくなると考えられるが、津波荷重が最大値に達するまでに波圧分布がどのように変化するかについてはほとんど知見が得られていない。そこで、増分解析における津波波圧の高さ方向の分布は三角形または台形分布とし、波圧の最大高さを設計用浸水深に水深係数 a を乗じた数値または建築物高さのいずれか小さい方（越流する部分の波圧は考慮しない）により一定としてよいこととしている。図 1.7.1 に示すようなセットバックしている建築物については津波作用方向から奥まった構面についても津波荷重が直接作用するものとして扱

うこととする。ペントハウスについては建築物の通常階とは異なるため、津波荷重が作用する構面として扱わなくてもよいが、当該部分に作用する津波波力を別途計算し、最上階の水平耐力の計算にあたって加算するなど安全側に設計することが望ましい。

各部材のモデル化等については基準解説書¹⁾に従うこととする。ただし、各部材に作用する鉛直荷重に関して、水没している部分の躯体の重量については水中におけるコンクリート密度に基づいて算定し、さらに各層の空気溜りによる浮力を考慮しなければならない。増分解析において各階床位置に作用させる津波荷重は図 1.7.1 のとおり上階中央高さから下階中央高さまでの波圧を積分した値となる。この時、津波波圧は開口部を考慮して適切に低減することができる。また、地震と異なり津波荷重は長時間一方向から作用する状態となることを考慮すると、増分解析に基づき建築物の水平耐力を計算する際には建築物剛性がある程度確保されている時点の値を採用することが望ましい。なお、浸水深が小さい場合は1階階高の下半分に作用する波力も考慮するなど、波力の算定において慎重な検討が望まれる。

鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計ルート1およびルート2においては、各階の必要耐力が式として示されており、これを当該階の骨組みの必要耐力の算定式として略算的に用いることができる。ただし、これらの式を用いる場合には、建築物はそれぞれの耐震設計としてのルートも満足することを確認する必要がある。なお、新耐震基準を満たし設計されている建築物であれば、必ずしも耐震設計と耐津波設計における計算方法が一致しなければならないということではない。（例えば耐震設計は許容応力度計算だが、耐津波設計は増分解析による等）

ルート1	$Q_u = \sum 2.5\alpha A_w + \sum 0.7\alpha A_c$	($\geq ZW A_i$ かつ 高さ 20m 以下)
ルート2-1	$Q_u = \sum 2.5\alpha A_w + \sum 0.7\alpha A_c$	($\geq 0.75ZW A_i$ かつ 高さ 31m 以下)
ルート2-2	$Q_u = \sum 1.35\alpha A_w + \sum 1.35\alpha A_c$	($\geq 0.75ZW A_i$ かつ 高さ 31m 以下)

ここで、 A_c :当該階の柱の水平断面積及び耐力壁以外の壁の水平断面積、 A_w :当該階の耐力壁の水平断面積、 α :コンクリートの設計基準強度による割り増し係数、 Z :地震地域係数、 W :当該階が支える部分の固定荷重と積載荷重との和、 A_i :地震層せん断力の高さ方向の分布を表す係数とする

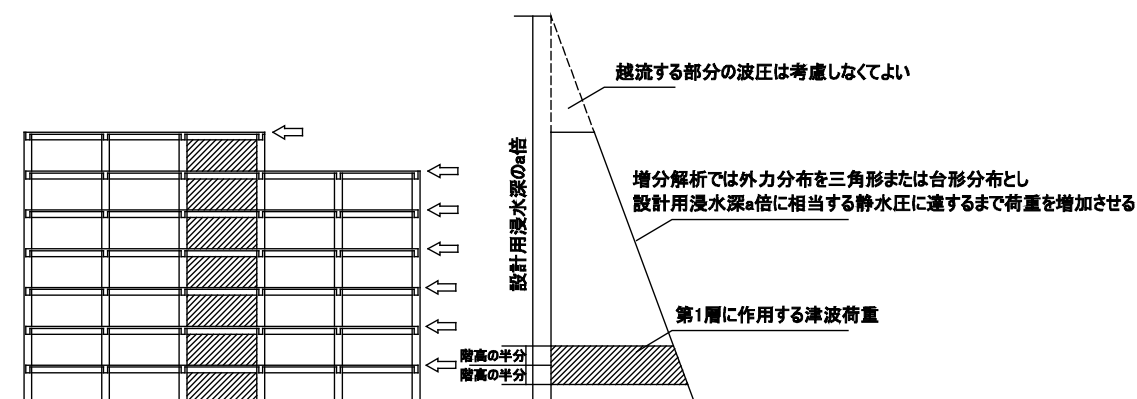


図 1.7.1 津波に対する水平耐力の計算方法

1-8. 転倒及び滑動の検討

新ガイドライン

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（杭基礎にあっては、杭の引き抜き耐力を超えないこと等）を確かめる。

津波防災地域づくり法告示等

【津波防災地域づくり法告示（抄）】

第1第二号イ（前略）津波の作用時に、津波による浮力の影響その他の事情を勘案し、建築物等が転倒し、又は滑動しないことが確かめられた構造方法を用いるものとする。ただし、地盤の改良その他の安全上必要な措置を講じた場合において、建築物等が転倒し、又は滑動しないことが確かめられたときは、この限りでない。

I. 基準の趣旨

建築物の転倒を防ぐため、津波荷重により発生する転倒モーメントが基礎重量を含んだ自重および杭の引き抜き耐力による抵抗モーメントを上回らないこと等を確認することが必要である。この場合、浮力を考慮する必要がある。

また、建築物の滑動を防ぐため、津波荷重により杭に作用する水平力が杭の終局せん断耐力（浮力及び転倒時の引抜きによる軸力の低減を考慮する）の総和を上回らないことを確認することが必要である。

津波防災地域づくり法告示においては、基礎ぐいを用いる構造の場合、構造耐力上主要な部分である基礎ぐい自体が破壊を生じないことを確かめるほか、転倒モーメントによる力が基礎ぐいの引き抜き耐力を超えないことなどを確かめることとする。ただし、地盤改良等を行うことにより建築物等が転倒し、又は滑動しないことが確かめられたときは、この限りではない。

II. 技術解説・事例

津波避難ビルでは避難者の安全性を確保するために建築物の転倒および滑動に対する検討を行わなくてはならない。

(1) 転倒に対する検討

津波が建築物に作用する時、転倒の検討で算定を行う必要があるモーメントを図 1.8.1 に示す。これらは①津波荷重による転倒モーメント、②自重による抵抗モーメント、③浮力による転倒モーメント、④杭の引き抜き耐力による抵抗モーメント（基礎ぐいを用いる場合）となる。転倒においては基礎固定時の支点反力が杭の引き抜き耐力を超えないことを確かめる。この場合、引き抜き方向の力として作用する浮力を考慮することとし、杭の引き抜き耐力は杭自重および杭周面摩擦力の和とする。ただし、杭周面摩擦力は、平成 13 年国土交通省告示 1113 号に示される短期許容支持力の 1.5 倍として算定してよいが、杭主筋の引張荷重などに基づく杭の引張方向の終局耐力がこれを下回る場合は、当該終局耐力の数値としなければならない。なお、直接基礎である場合は、支点の引抜き方向の抵抗力は 0 として扱う。

(2) 滑動に対する検討

津波が建築物に作用する時、滑動の検討で算定を行う必要がある各力を図 1.8.2 に示す。この時、圧縮側および引張側の杭の終局せん断耐力の総和および終局曲げせん断耐力の総和が津波荷重を上回ることを確認する。杭に作用する軸力については津波波力、自重、浮力による応力状態を適切に考慮して定めなければならない。

転倒や滑動の検討における浮力は、後述する設計例に示す水没した建築物体積（内部空間の容積を含む）を考慮する方法が望ましいが、最大の転倒モーメントが作用する時に各層に水が流入していることが解析・実験等により確かめられた場合や、被害調査等の結果から流入を十分に考慮できると考えられる場合には、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。

(3) 基礎梁に対する検討

基礎梁には杭および上部構造から伝達される応力（モーメント・せん断力）が作用する。基礎梁心位置での応力を算定し、さらに柱フェイス位置に換算した値が梁部材の終局耐力を超えていないことを確認することが必要である。

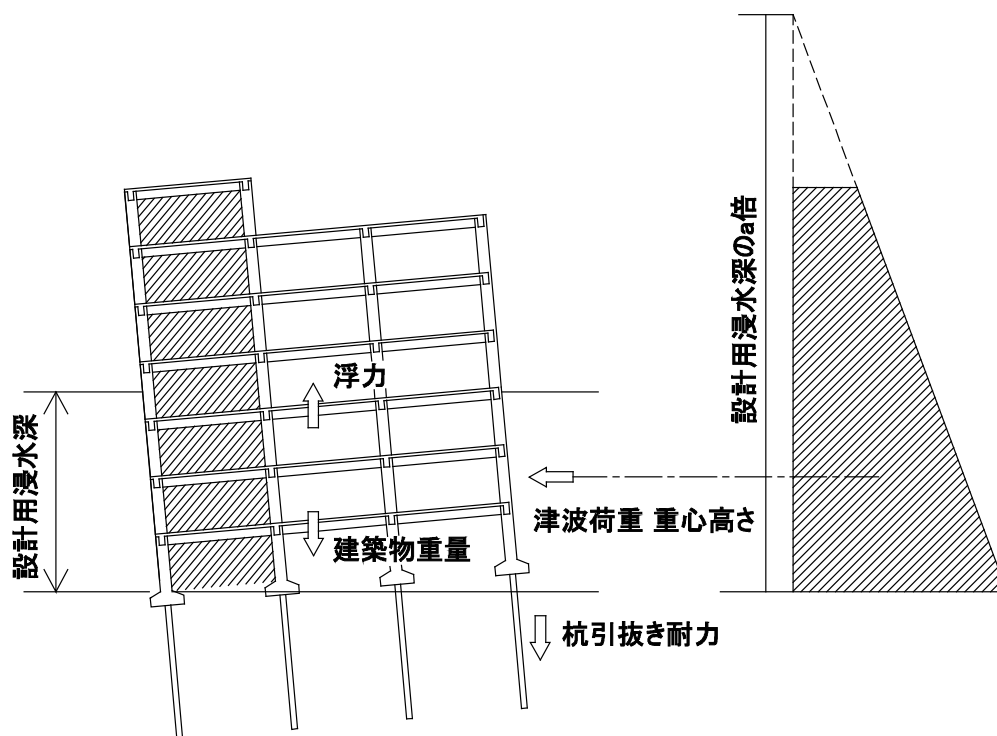


図 1.8.1 建築物の転倒に対する考え方

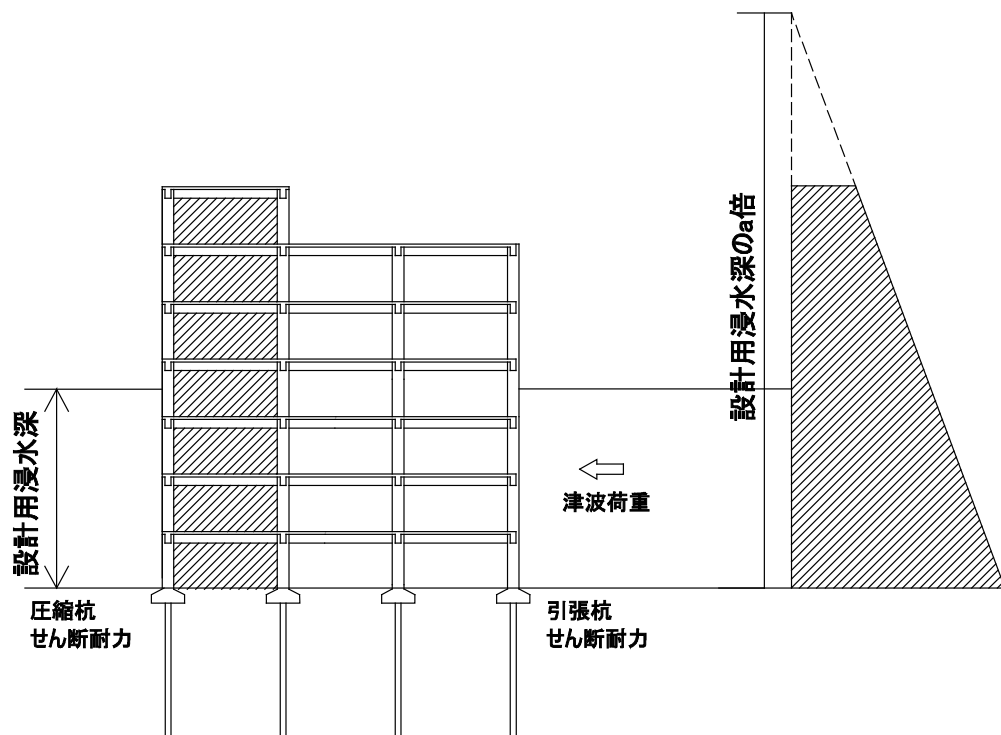


図 1.8.2 建築物の滑動に対する考え方

参考④ 宮城県女川町において転倒した鉄筋コンクリート造建築物に関する検討

転倒に関する検討として、具体的な方法の一例を以下に紹介する。

(なお、ここでは参考として、第2章に示す設計例よりも詳細な方法により検討を行っている。)

宮城県女川町において津波被害を受けて転倒した4階建て鉄筋コンクリート造建築物(写真1.8.1)について、転倒および滑動に関する検討を行った。本解析では受圧面および側面の開口部から流入する水量を計算し、建物内部の浸水状態から得られる浮力を算定している。

(1) 建築物の概要

1) 本建築物は津波により張り間方向に転倒した床平面4×6m、4階建て杭基礎建築物である。

建築物高さは12m、階高は3mであるが、最上階は張り間方向に1mセットバックしている。

2) 単位床面積当りの建築物重量 ω_1 は、詳細不明のため基礎も含め 14 kN/m^2 とした。

なお、設計では仕上げ重量や積載荷重を考慮するが、本検討では無視している。

3) 受圧面の開口率 ζ_0 、受圧面および側面の開口率 ζ は実測より 0.052、0.092 であった。(図1.8.3)

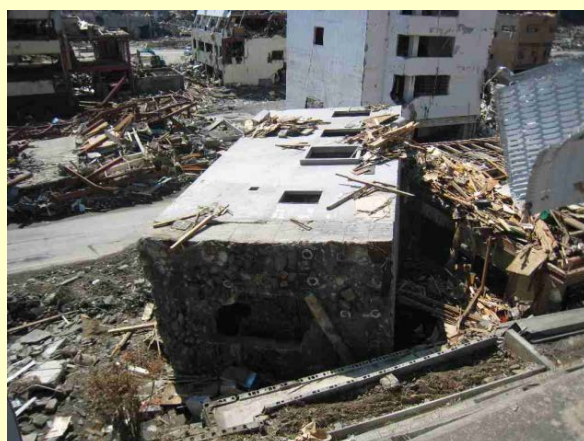


写真 1.8.1 転倒した鉄筋コンクリート造建築物 (OG-01)

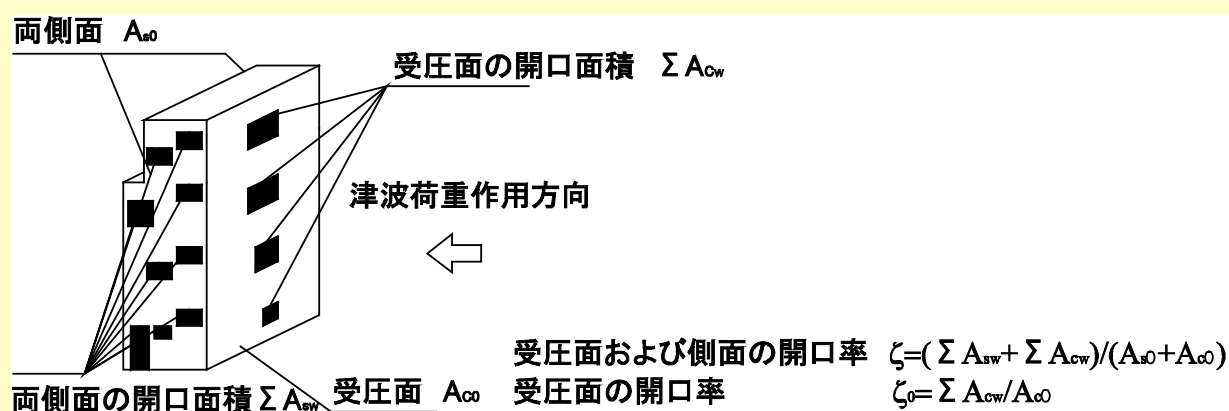


図 1.8.3 本建築物における開口率の算定方法

(2) 浮力の算定方法 (図 1.8.4 参照)

1) 浮力算定方法として i) 開口部からの水の流入を考慮する方法, ii) 水没した建築物体積 (内部空間の容積を含む) を考慮する方法を示す。

i) 開口部からの水の流入を考慮する方法

水中では構造躯体に働く浮力のため鉄筋コンクリート単位体積重量は 24 kN/m^3 から 14 kN/m^3 に低下する。本検討では仕上り重量や積載荷重の影響を無視しており、この比率に応じて重量が低下すると考えると、単位床面積当りの建築物重量 ω_2 は本建築物では 8.17 kN/m^2 となる。各階の開口部上端から床スラブ下端までの高さには空気が溜るため、各層にはこれらに床面積を乗じた体積相当の浮力が生じる。なお、現地調査において確認された 1 階床スラブと基礎底部の内部空間 (基礎梁高さ 0.9 m) にも空気が溜まると仮定している。同様に EV やコア壁など十分な開口部が設けられていない空間にも空気が溜まると考える。上記の仮定から算定された重量および浮力に基づき各節点の鉛直荷重を算定し部材耐力を検討する。

なお、基礎滑動や杭耐力の算定においては ii) 水没した建築物体積 (内部空間の容積を含む) を考慮する方法で浮力を計算することが望ましいが、転倒力最大作用時に各層に水が流入していることが解析・実験等により確かめられた場合や、被害調査等の結果から流入を十分に考慮できると考えられる場合には、本手法により各節点の鉛直荷重を算定することができる。例えば東日

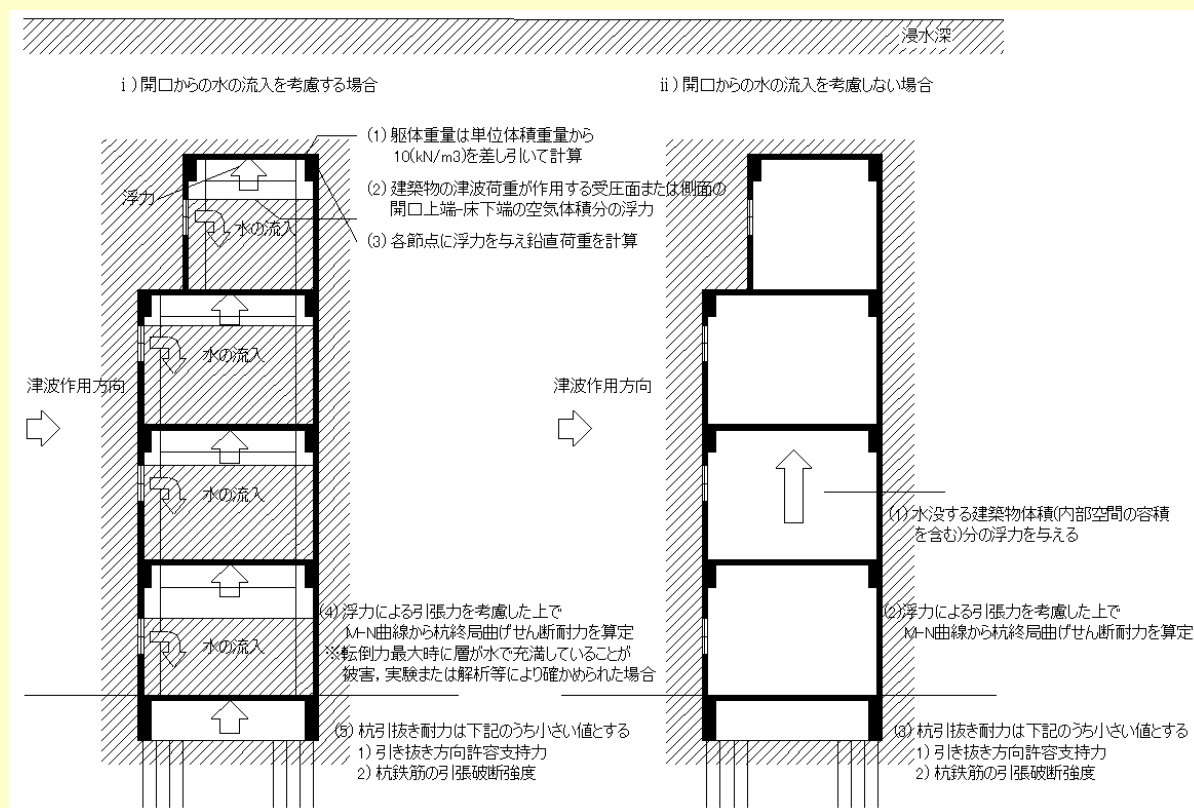


図 1.8.4 浮力および杭引き抜き抵抗力の考え方

本大震災における女川町の市街地での水位の変動については、現地住民の方が撮影したビデオ映像から東北大学 越村研究室が推定しており¹²⁾、これによると、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12 m上昇している(0.03 m/sの速さで上昇している)。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」中間報告その2²⁾の参考資料 2.6 節(9)式にもとづき、本建築物の形状、開口率から逆算すると、建築物各層に順次水が流入したと判断できる建築物周囲の水位上昇速度は1.25 m/s以下($T=0.8s/m$ 以上)となる。したがって、実際の建築物周囲の水位昇速度(0.03m/s)はこれより小さいため、本建築物では各層に順次水が流入したと見なしうる。

ii) 水没した建築物体積(内部空間の容積を含む)を考慮する方法

建築物の水没した体積(内部空間の容積を含む)相当の浮力を考慮する。本建築物では水没している部分の建築物体積(内部空間の容積を含む)が342 m³であるため、建築物全体としては3354 kNの浮力が生じる。

(3) 転倒に関する検討

本建築物は径300mm、杭鉄筋6φ7(PC鋼線A種)のPC杭を32本有している。杭の設計条件が不明であるため周辺建築物の杭長(10m)および標準貫入試験結果を参考に諸数値を設定して計算した結果、平成13年国土交通省告示1113号に基づく杭の引き抜き方向の極限支持力より杭鉄筋の破断強度に基づき計算した数値が下回ったことから、杭の引き抜き耐力としては後者の数値を採用し、杭1本あたりの引き抜き耐力を350 kNとした。さらに、転倒時に引張となる杭本数は12本、圧縮側の杭重心から引張側の杭重心間の距離は3.5mである。したがって、杭引き抜き耐力による抵抗モーメント M_p は(1.8.1)式より14700 kN mと算定される。また、表1.8.1より建築物重量は浮力とほぼ相殺しているため(表1.8.1における躯体重量(水中)および浮力i)、建築物重量による抵抗モーメント M_b は期待できない((1.8.2)式)。水深係数 $a=1.0$ とした時の津波荷重による転倒モーメント M_w (ここでは現象解明を目的とするため、設計上の安全率($a=1.5, 2.0$ ないし 3.0)を考慮していない)は(1.8.3)式より28108 kN mである。したがって、本建築物の抵抗モーメントは転倒

表 1.8.1 建築物の諸元

階	床面積 A_w	躯体重量 (空気中) $A_w O_1$	躯体重量 (水中) $A_w O_2$	階高 H_0	開口部上端 スラブ間高さ H_1	スラブ厚 t_w	浮力i) 水流入を考慮 $-pgA_w(H_1-t_w)$	浮力ii) 建築物の容積 $-pgA_w H_0$
4F	18 m ²	216 kN	126 kN	3.0 m	1.0 m	0.15 m	-150 kN	-530 kN
3F	24 m ²	288 kN	168 kN	3.0 m	0.9 m	0.15 m	-177 kN	-706 kN
2F	24 m ²	288 kN	168 kN	3.0 m	0.8 m	0.15 m	-153 kN	-706 kN
1F	24 m ²	288 kN	168 kN	3.0 m	1.3 m	0.15 m	-271 kN	-706 kN
基礎	24 m ²	288 kN	168 kN	3.0 m	0.9 m	0.15 m	-177 kN	-706 kN
合計		1368 kN	931 kN				-928 kN	-3354 kN

※浸水深15m時、水密度 $\rho=1.0 \text{ ton/m}^3$ 、重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ とする

モーメントの約 52%程度であり、転倒に対して十分な耐力を保有していない。

(4) 滑動に関する検討

無軸力下におけるPC杭の終局曲げモーメントは既往の実験結果を参照し¹³、48.5 kN・mである。杭長 10m、平均N値は 21、杭体を弾性支承梁と仮定した解析において杭頭モーメントがこの値に達する時のせん断力 Q_{mu} は 83 kNであり、これは無軸力下の同PC杭のせん断耐力 Q_{su} (157 kN)より小さい値となっている。変動軸力の影響を無視すると、杭水平耐力 Q_{pu} は (1.8.4) 式より 2656 kN (n=32 本) と算定される。水深係数 $a=1.0$ とした時の津波水平荷重 Q_w (転倒に関する検討と同様設計上の安全率は考慮していない) は (1.8.5) 式より 6023 kNである。したがって、本建築物の杭水平抵抗力は津波水平荷重の 44%程度であり、滑動に対して十分な耐力を保有していない。

$$M_p = n_t \times P_t \times d_e \quad (1.8.1)$$

$$M_b = W_b \times (D/2) \quad (1.8.2)$$

$$M_w = \int_0^H ((1 - \zeta_0) \times \rho g (h_w - x) \times B) dx \quad (1.8.3)$$

$$Q_{pu} = \sum_1^n \min(Q_{su}, Q_{mu}) \quad (1.8.4)$$

$$Q_w = \int_0^H ((1 - \zeta_0) \times \rho g (h_w - x) \times B) dx \quad (1.8.5)$$

ここに、 W_b :建築物重量、 D :建築物奥行、 B :建物幅、 n_t :引張側の杭本数、 n :全杭本数、 P_t :杭の引き抜き耐力、 d_e :転倒回転中心から引張側の杭重心間距離、 H :建築物高さ、 ζ_0 :受圧面及び側面における開口率とする。

1-9. その他の構造設計上の配慮

(1) 洗掘

新ガイドライン
(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。
津波防災地域づくり法告示等
【津波防災地域づくり法告示（抄）】 第1第二号ロ 津波により洗掘のおそれがある場合にあっては、基礎ぐいを使用するものとする。ただし、地盤の改良その他の安全上必要な措置を講じた場合において、建築物等が転倒し、滑動し、又は著しく沈下しないことが確かめられたときは、この限りでない。

I. 基準の趣旨

津波による流勢によって建築物の基礎部分や周辺部に地盤洗掘が発生し、沈降、傾斜などの被害が発生する可能性がある。津波による直接的な建築物の転倒に対する検討方法は「1-8. 転倒及び滑動の検討」に示されているが、本項では地盤洗掘による被害発生を防止することを目的として、設計上配慮すべき事項について示している。

津波防災地域づくり法告示においては、津波により洗掘のおそれがある場合にあっては、基礎ぐいを使用するものとすることを規定している。ただし、地下室の設置や十分な深さの基礎根入を行うこと、建築物等より下部の地盤改良や周辺部の舗装等を行うことにより建築物等が転倒し、滑動し、又は著しく沈下しないことが確かめられたときは、この限りではない。

II. 技術解説・事例

建築物の基礎部や周辺部において津波による著しい地盤洗掘が発生し、沈降、傾斜などの建築物の被害原因となっている（写真 1.9.1）。一方、写真 1.9.2 に示すように比較的建築年代が新しい建築物（杭基礎が多い）では、洗掘が発生しても構造的被害を受けることなく残存したものの多数確認されている。地盤洗掘の状況を見ると、津波が作用した建築物隅角部から側面にかけて激しく洗掘されている事例が多い。また、引き波によって洗掘が生じた事例も見られた。

海岸護岸や河川橋脚、港湾建築物等については、洗掘の評価手法や対策工法も提案されている^{14,15,16}。しかしながら、建築物の周辺地盤を対象にして洗掘の程度等を評価する手法は確立されておらず、今回の被害状況についても定量的な評価を行うことは難しい。したがって、設計において洗掘の影響を予め評価することは現状では難しい状況にあるが、津波避難ビル周辺の地盤洗掘に対する対処法としては、次のような方法が有効であると考えられる。

(1) 杭基礎構造の採用

建築物の重量を杭が安全に支持し、沈降や傾斜を防止できることを確認する。津波避難ビルでは、ある程度の建築物高さや規模が求められることになるので、新築の場合は杭基礎構造を用いるのが現実的であろう。

(2) その他の方法

1) 直接基礎構造

地下階や十分な深さの基礎根入によって、洗掘による沈降、傾斜を防止できるようにする。

2) 周辺地盤の強化

津波による洗掘を防止できるように、建築物下部の地盤改良や周辺部を津波によって剥離しないような舗装を行う。また、建築物の周囲をシートパイルや地中連続壁で囲って地盤の流出を防ぐような対策も有効であろう。



(山田町)



(女川町)

写真 1.9.1 地盤洗掘による建築物の沈降、傾斜



(釜石市)



(陸前高田市)



(南三陸町)



(山元町)

写真 1.9.2 残存建築物周囲の洗掘状況

(2) 漂流物の衝突

新ガイドライン
(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。
津波防災地域づくり法告示等
【津波防災地域づくり法告示（抄）】 第1第二号ハ 漂流物の衝突により想定される衝撃が作用した場合においても建築物等が容易に倒壊、崩壊等するおそれのないことが確かめられた構造方法を用いるものとする。

I. 基準の趣旨

漂流物の衝突に関して、新ガイドラインでは漂流物の衝突による建築物全体の崩壊が生じないよう、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旨を明示することとした。

東日本大震災における津波では、漂流物の衝突により外壁に局部的損傷が生じたと推測される建築物が見られている。また、既往の研究を踏まえた検討からも、漂流物の衝突の条件によっては部材が破壊する可能性が示されている²。そこで、構造耐力上主要な部分の破壊は建築物全体の崩壊を招くおそれがあることを考慮し、漂流物の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とした。また、衝突する漂流物によっては、柱や耐力壁のような鉛直部材の一部が破壊することを防止するのが困難である場合もあるため、柱や耐力壁の一部が破壊しても、それに伴い建築物全体が崩壊することがないことを確認すれば良いこととした。

そのほか、建築物に漂流物が直接衝突しないよう、建築物の周囲に防護設備・施設等を設けるといった計画も有効な方法として考えられる。

津波防災地域づくり法告示においては、漂流物の衝突により想定される衝撃が作用した場合においても建築物等が容易に倒壊、崩壊等するおそれのないことが確かめられた構造方法を用いるものとするを規定している。当該規定については、上記と同様、あらゆる漂流物に対し部材が損傷しないことを確かめることは困難であることから、漂流物の衝撃によって、一部の柱等が破壊しても、当該柱等が支持していた鉛直荷重を他の柱等で負担することにより、建築物等が容易に倒壊、崩壊等しないことを確かめることなどを想定している。

II. 設計法・技術解説・事例

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を確かめるためには種々の方法が考えられ、例えば漂流物の衝突時に瞬間的に作用する最大の衝突力が被衝突物の耐力以下であることを確かめるといった方法が挙げられる。しかし、漂流物による建築物への衝突力の評価については研究途上であり、あらゆる漂流物について衝突力を精度よく計算するのは現状困難である。なお、文献²には漂流物による衝突力に関する既往の研究を取りまとめているので適宜参考とされたい。

また、漂流物の衝突により破壊を生じないことを確かめるためには、建築物に衝突する漂流物

の種類、量、大きさ、形状、重量、剛性、衝突時速度、衝突時の向き、衝突部位等を想定する必要がある、これは一般に困難であることが多い。一方、文献²等を踏まえて総合的に判断すると、漂流物の衝突によって部材が破壊しないとは言い難い。

以上を踏まえると、漂流物の衝突により破壊しない検討を行わない場合は、少なくとも漂流物により部材が破壊した場合を想定し、その場合にも建築物が容易に倒壊することがないことを確認する必要がある。例えば漂流物の衝突によりいずれかの外柱が破壊することを想定した場合に、建築物が容易に倒壊しないことを確認する方法としては、文献¹⁷の第二種構造要素の検討のように、当該柱が負担していた長期軸力を隣接する柱等の鉛直支持部材に伝達可能であることを確認し、かつ、当該鉛直支持部材が伝達後の軸力を負担可能であることを確認する方法等が考えられる。なお、本方法において、耐力壁が付帯する柱が破壊する場合には、付帯する耐力壁が軸力を負担するものとし、上述の検討を省略することも可能と考えられる。

参考

- ¹ 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、<http://www.mlit.go.jp/common/000172791.pdf>、2011.8
- 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 2)、<http://www.mlit.go.jp/common/000172792.pdf>、2011.10
- ³ 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－、ビルディングレター、2004.10
- ⁴ 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 2：設計法(案)－、ビルディングレター、2004.11
- ⁵ 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会（内閣府）：津波避難ビル等に係るガイドライン（巻末資料②）、http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/tsunami_hinan.html、2005.6
- ⁶ 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)、pp.911-915
- ⁷ 奥田泰雄：建築物に作用する津波荷重のシミュレーション、国土技術研究会（ポスター）、2010
- ⁸ 津波防災地域づくりに係る技術検討会（国土交通省）：津波防災地域づくりに係る技術検討報告書、http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tsunamibousaitiiki/houkokusyo_120127.pdf、2012.1
- ⁹ (財)日本建築センター：平成 16 年度 津波避難ビルの技術的検討調査報告書、2005
- ¹⁰ 国土交通省 住宅局建築指導課 監修：2001 年度 建築物の構造関係技術基準解説書、2001.3
- ¹¹ 国土交通省 住宅局建築指導課 監修：2007 年度 建築物の構造関係技術基準解説書、2007.8
- ¹² 東北大学 越村研究室：東北地方を襲った津波の流況と建物被害(PDF)、東北大学による東日本大震災 3 ヶ月後報告会、2011
- ¹³ 松尾俊之、倉橋修雄、城攻、柴田拓二、大野和男：PC 杭の曲げ剪断抵抗性状について（軸力 $\sigma_0=0$ の場合）、北海道支部研究報告集、No.54、pp.60-63、日本建築学会、1981.3
- ¹⁴ 国土技術政策総合研究所：公共土木施設の地震・津波災害想定マニュアル（案）、国総研資料第 485 号、2008 年 7 月
- ¹⁵ 野口賢二、佐藤慎司、田中茂信：津波遡上による護岸越流および前面洗掘の大規模模型実験、海洋工学論文集、第 44 巻、pp.296-300、1997
- ¹⁶ 中村友昭、倉光泰樹、水谷法美：陸上遡上津波による矩形構造物周辺の洗掘と地盤応力の変動に関する研究、海洋工学論文集、第 53 巻、pp.521-525、2006
- ¹⁷ (財)日本建築防災協会：鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、2001

