6.2 調査内容

6.2.1 現地調査

6.2.1.1 調査地域の概要

調査地域は図6.2.1-1及び表6.2.1-1に示す岩手県から宮城県の沿岸部の14市町である。表6.2.1-1の市町村の人口は各市町村関連のWebsiteから収集し、被害の状況は消防庁Website（平成23年4月20日）から入手したものである。津波被害の甚大さや福島第1原子力発電所の事故のために、被災後1ヶ月以上経過した時点でも調査中や不明となっている項目が多く、正確な数字ではない項目も含まれている。

調査対象地域は津波被災地域が非常に広範囲であることから、現地調査（第1班）では都市の規模、地形や津波の高さや浸水深等の情報、地図情報の準備状況等を考慮して、当初は岩手県陸前高田市、宮城県南三陸町、同石巻市および同名取市及び複数のRC造建築物の転倒が報道されていた宮城県女川町の5地域に絞っていた。しかし現地調査を実施すると建築物の被害に地域差があることが分かり、被害の全体像を把握するためにできる限り広範囲な地域について現地調査を実施することになった。そこで現地調査（第2班）は岩手県陸前高田市以北の地域、現地調査（第3班）は宮城県名取市以南の地域を中心に調査を実施することになり、6.3現地調査は岩手県山田町から宮城県山元町に至る14市町に及ぶ地域における報告となっている。しかしながら、これらの現地調査は比較的短期間の調査であることから、これらの調査では市町村毎の悉皆調査ではなく代表的な被害事例の収集を心掛けた。また、立ち入り規制等で調査ができなかった地域、落橋等で現地に到達できなかった地域などもあり、調査地域によっては不十分な情報しか提供できない地域もある。なお、本章では津波浸水域内で発生した津波による建築物の被害を対象としているが、これらの建築物の地震被害と津波被害を区別することが困難な場合も含まれている。

図 6.2.1-1　調査地域地図

表 6.2.1-1　調査地域

			人口	死者	行方不明	負傷者	全壊	半壊	一部損壊	火災
			（人）	（人）	（人）	（人）	（棟）	（棟）	（棟）	（棟）
青森県	八戸市		237,212	1	1	17	217	910		2
	階上町		14,699				12	8	1	
岩手県	洋野町		17,868				26			
	久慈市		36,600	2	2	8	238			
	野田村		4,633	38		17	200			1
	普代村		3,077		1	1	172			
	田野畑村		3,831	14	24	8	209	29	18	
	宮古市		59,012	402	682	33	3,669	1,006		6
	山田町		18,688	535	378	調査中	2,513			2
	大槌町		15,256	647	1,007	調査中	多数			2
	釜石市		39,174	735	593	調査中	3,188	535		
	大船渡市		40,753	294	194	調査中	3,629			2
	陸前高田市		23,197	1,308	1,117	調査中	3,600			
宮城県	気仙沼市		73,343	765	1,266	調査中	調査中			23
	南三陸町		17,393	473	647	調査中	3,877	調査中		2
	女川町		9,980	434	1,035	2	3,021	46	86	4
	石巻市		160,496	2,806	2,770	調査中	28,000	調査中		16
	東松島市		42,861	964	776	調査中	2,133	4,190	調査中	0
	松島町		15,035	2	7	64	46	59	15	2
	利府町		34,180	1	2	1	調査中		70	
	塩竈市		56,383	21	2	10	358	1,390	325	6
	七ヶ浜町		20,396	61	12	調査中	調査中			2
	多賀城市		62,938	182	9	調査中	300	3,500	調査中	15
	仙台市	宮城野区	190,827	613	210	2,240	3,190	調査中		66
		若林区	132,121							
	名取市		73,520	882	1,000	調査中	調査中			27
	岩沼市		44,170	170	14	調査中	調査中			2
	亘理町		34,794	246	36	44	1,000	1,000	調査中	3
	山元町		16,651	641	131	90	1,158	375	5	2
福島県	新地町		8,182	91	27	3	501			
	相馬市		37,720	388	99	71	4			
	南相馬市		70,877	477	997	48	1,800			
	浪江町		20,872	3	183					
	双葉町		6,889	17	16	1	58	5		
	大熊町		11,578	16	8	不明	30			
	富岡町		15,970	3	8					
	楢葉町		7,689	4	10	5	50			
	広野町		5,397	2	1		90			
	いわき市		341,853	296	82	4	33			3
茨城県	北茨城市		47,074	5	1	188	160	742	2,224	3
	高萩市		30,992	1		19	62	345	2,068	
	日立市		192,353			166	118	684	1,689	4
	東海村		37,381	4		5	1			2
	ひたちなか市		156,854	2		26	83	310	1,057	1
	大洗町		18,356	1		6	1	14	814	
	鉾田市		50,098			15	9		5,397	3
	鹿嶋市		66,186	1			46	115	2,567	4
	神栖市		94,710			6	103	61	245	3
千葉県	銚子市		69,253			7	9	17	2,020	

＊被害の状況は平成 23 年 4 月 20 日消防庁調べ

網掛の地域が調査地域

6.2.1.2　調査対象建築物の特定

3 月 11 日の地震により発生した津波は岩手県、宮城県、福島県の太平洋沿岸を襲い、海に面した多くの市街地が壊滅的な被害を受けた。被災地域が広範囲に及ぶことや被災直後には現地の状況を把握することが極めて困難であることから、津波の来襲時の報道映像や被災後の衛星写真、航空写真等を予め収集し、それらをもとに調査対象地域を絞り込む作業を行った。とくに、津波避難ビルの検討が重要であることから、津波によりほとんどの住宅が流失した地域を対象に、残存している建築物や津波避難ビルとして指定されている建築物の情報を収集した。これらの情報は、最初の現地調査の計画を立てる際に極めて役に立った。

① 画像情報に基づく残存建築物の特定作業

津波被災地に残存する建築物の同定には、インターネットで入手可能な衛星写真や航空写真を利用した。以下に、国土地理院の Web サイトにおいて公開された「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による被災地の空中写真」を使用した例を示す。国土地理院では、表 6.2.1-2 に示す地区について、被災前後を比較した航空写真を掲載している。これらの写真から残存していると考えられる建築物を特定し、さらに地図情報や報道情報等から建築物の名称、構造諸元、被災時の状況などを整理する作業を行った。宮城県南三陸町周辺を例に、作業手順をまとめたものを図 6.2.1-2 に示す。

表 6.2.1-2　国土地理院から公開された被災状況（新旧画像）の地区リスト

岩手県	宮城県	福島県
・宮古市田老地区周辺 ・宮古市周辺 ・大船渡市三陸町綾里周辺 ・大船渡周辺 ・陸前高田市大野湾周辺 ・陸前高田周辺 ・釜石市箱崎白浜周辺 ・釜石港地区周辺 ・山田町周辺 ・田野畑村平井賀周辺	・仙台市若林区荒浜周辺 ・石巻市石巻駅周辺 ・石巻市南浜町周辺 ・塩竈市港町周辺 ・気仙沼市周辺 ・仙台空港周辺 ・東松島市野蒜海岸周辺 ・南三陸町周辺	・相馬市周辺

② 被災地における津波避難ビルのリスト

津波により被災した地域の自治体の多くでは、予め津波避難ビルを指定して、実際に運用を行っている。それらのほとんどが、既存の施設（民間施設、公共施設）を津波避難ビルとして指定したものである。津波避難ビルの住所、建物名、構造諸元等の情報は、

・自治体のホームページの防災情報

・「津波避難ビル等に係るガイドライン」（内閣府、2005 年 6 月）の巻末資料

・「災害に強い漁業地域づくりガイドライン」（水産庁、2005 年 3 月）の巻末資料

などから入手した。なお、役所等が被災したために、自治体のホームページに接続できないケースもあった。

作業１）被災後の画像情報の収集

作業２）残存建築物の特定

作業３）残存建築物の情報整理

① 公立志津川病院
- 鉄筋コンクリート造、5 階建て
- 東棟は昭和 49 年度に建築、平成 17 年度に耐震補強
- 津波の際には職員を含め 220 名が避難との報道あり

② 結婚式場
- 鉄筋コンクリート造、4 階建て
- 津波の際には 440 名が避難との報道あり

③ 町営住宅

④ …

図 6.2.1-2　残存建築物の特定作業手順の概要

6.2.1.3　津波に関する用語

津波に関する用語について文献調査を行い、本章で用いる用語を以下のように定義し、できるかぎり統一するように心がけた。

① 浸水深

地面や建築物等が水に覆われている状態を浸水といい、地表面から水面までの高さを浸水深と呼ぶ。津波被害の現地調査では、建築物等に残された津波の痕跡から推定される津波水面の地表面からの高さ。なお、「○○深」とは地表面からの高さであり、「○○高」とは基準面（一般に津波がない時の潮位）からの高さである。

② 最大浸水深

現地調査では 1 つの調査建築物の周辺で複数の浸水深を計測する場合があり、計測された浸水深の最大値をいう。6.3-6.5 および付録では、建築物等に作用する津波波圧をこの最大浸水深の静水圧分布で与えた。なお、津波避難ビルのガイドラインでは、設計用浸水深を敷地に想定される設計用の津波の深さと定義しており、最大浸水深と設計用浸水深との関係は 6.5 に示した。

③ 津波の作用方向

建築物等については津波の作用方向とし、寄せ波の作用方向、引き波の作用方向と使う。なお、津波の入射方向は一般に海岸に対して用いられている。

④ 津波荷重

津波波圧、津波波力、浮力、漂流物の衝突力等の総称。

⑤ 津波波圧

建築物等の表面に作用する津波の圧力。

⑥ 津波波力

建築物等に作用する津波の力。

⑦ 浮力

建築物に作用する鉛直上向きの力。建築物の室内が浸水し天井下等に空気溜りがある場合、アルキメデスの原理より空気溜りの体積と同じ水の重量に相当する浮力が、建築物の自重を打ち消す方向に建築物に作用する。

⑧ 漂流物

津波によって流されたもの。津波の被害では漂流物が建築物に衝突することで、外壁に大きな開口が生じることや構造躯体に大きな損傷を与えることがある。

＊痕跡高は浸水高と遡上高を含めた総称なので、本報告では用いないようにした。

6.2.1.4　津波の作用方向・浸水深の推定方法

現地調査においては、対象とする建築物に対して想定される津波の作用方向を把握するとともに、当該建築物やその周辺での浸水深をその痕跡や損傷状況等から適切に推定することが求められる。

(1) 津波の作用方向の推定方法

通常の場合、津波は海側から作用すると考えればよいが、特に入江がある場合等の海岸線が複雑な場合は適切に作用方向を確認する必要がある。その場合は、対象とする建築物付近にある電柱その他の棒状の工作物や樹木の折損方向から推定した（写真 6.2.1-1～6.2.1-2）。これらの工作物や樹木がない場合は、対象とする建築物等の破損状況や漂流物の残存状況から推定している（写真 6.2.1-3～6.2.1-4）。また、引き波の作用が損傷や破壊に及ぼす影響を無視できない場合は、陸側から海側に向かって損傷や変形したと思われる状況についても必要に応じて確認した（写真 6.2.1-5）。

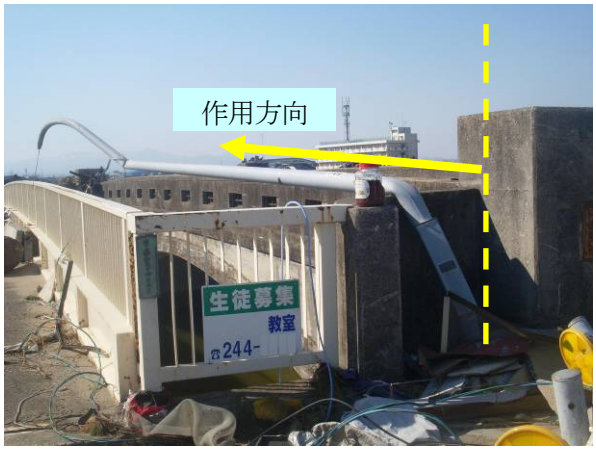


写真 6.2.1-1　棒状の工作物の津波による折損状況

写真 6.2.1-2　手すりの津波による折損状況

写真 6.2.1-3　漂流物（バス）の残存状況

写真 6.2.1-4　漂流物の残存状況

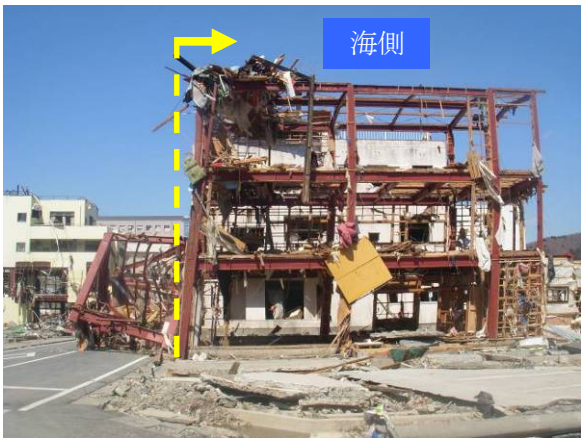


写真 6.2.1-5　引き波の作用によると思われる海側への傾斜

(2) 調査建築物における浸水深の推定

各々の建築物において浸水深を推定する際に、海水が達した高さでみられる痕跡（線）があれば地上から当該痕跡高さまでを浸水深とした（写真 6.2.1-6）。しかし、必ずしも全ての建築物でそのような痕跡があるとは限らず、その場合は建築物各部の損傷状況から概ねの浸水深を推定した。表 6.2.1-3 に、代表的な損傷状況とそれに対応した浸水深の推定の考え方をまとめる。ただし、この場合は写真 6.2.1-6 のように線状に明確に高さが判るわけではないので、推定値に幅があることに留意が必要である。

写真 6.2.1-6　海水が達した高さでみられる痕跡の例

表 6.2.1-3　調査建築物における浸水深の推定方法の例

被害箇所等	被害の状況	浸水深の推定方法
(1) 開口部等		ベランダ手すりと開口部が1階で著しく損壊しており、2階でも一部損壊している。3階以上では外観上被害は認められない。 この場合の浸水深は、2階の天井高さ相当と推定した。
(2) 外装材		2 階の窓ガラスに破損は認められないが、窓サッシの下枠まで外装材が損傷している（1階の外装材は流失）。 この場合の浸水深は、2階窓サッシの下枠高さ相当と推定した。
(3) 内外装材		屋上の手すりやペントハウスの窓は破損しているが、ペントハウスの壁に取り付くアンテナやペントハウス屋内の天井仕上げは外観上損傷が認められなかった。 この場合の浸水深は、ペントハウスの窓の上枠高さ相当と推定した。

(4) 外壁等と漂流物		1 階の外壁と開口部が破壊・流失している。屋根の破風に外観上被害は認められないが、屋根上に漂流した構成部材が残存している。 この場合の浸水深は、屋根上での漂流物の残存高さ相当と推定した。
(5) 開口部等と漂流物		3 階までの開口部が破壊しており、屋根スラブ上には漂流した乗用車が残存している。 この場合の浸水深は、屋根スラブ高さ以上と推定した。
(6) 漂流物		水門自体に外見上損傷は認められないが、階段踊り場の海側の手すりに水草と思われる漂流物が引っ掛かっている。 この場合の浸水深は、漂流物の残存高さ以上と推定した。(この例の場合は、陸側の地面からの高さと海水面からの高さの 2 通りを測定した)

また、同一の建築物のなかでも推定した浸水深が場所によって異なる場合があり、その場合は両浸水深を記録した。写真 6.2.1-7 の例は、海側の浸水深 h_1=9.5m、陸側の浸水深 h_2=4m となり、両数値の比率 h_1/h_2=2.4 である。

写真 6.2.1-7　同一の建築物のなかで浸水深が異なる場合の例

(3) 調査建築物の周辺における浸水深の推定

現地調査の際には、調査建築物だけでなく、その付近にある工作物に残った痕跡や損傷状況から浸水深が推定できる場合がある（写真 6.2.1-8～6.2.1-9）。

写真 6.2.1-8　広告塔の支柱に残った痕跡

写真 6.2.1-9　広告塔の損傷状況

6.2.2　津波に関する文献・映像等調査

6.2.2.1　津波避難ビルに関する我が国のガイドライン

2004 年スマトラ沖地震によるインド洋大津波の被害を受けて、2005 年 6 月に内閣府から「津波避難ビル等に係るガイドライン」[6-1)]が公開された。ガイドラインは、津波からの避難が困難な地域における津波避難ビル等の普及を促進すべく、津波避難ビル等が満たすべき構造的要件、位置的用件、指定や運用にあたっての留意点等を取りまとめたものである。とくに技術的な検討結果は、日本建築センターのビルディングレター（2004 年 10 月、11 月）および同センターの報告書「平成 17 年度　津波避難ビルの技術的検討結果」（2006 年 3 月）に詳しくまとめられている。

以下、内閣府のガイドラインにおける津波波力の計算法を抜粋する。

① 津波波圧算定式

設計に用いる津波波圧分布は設計用浸水深の 3 倍の高さに達する静水圧分布とする。3 倍という数値は護岸に近い構造物を想定した水理模型実験結果[6-5)]から得られた値である。このとき、進行方向の津波波圧は、下式により算定する。

$$q_Z = \rho g(3h - z) \qquad (6.2.2\text{-}1)$$

ここに、q_Z ： 構造設計用の進行方向の津波波圧(kN/m^2)

ρ ： 水の単位体積質量(t/m^3)

g： 重力加速度(m/s^2)

h： 設計用浸水深(m)

z： 当該部分の地盤面からの高さ（0≦z≦3h）(m)

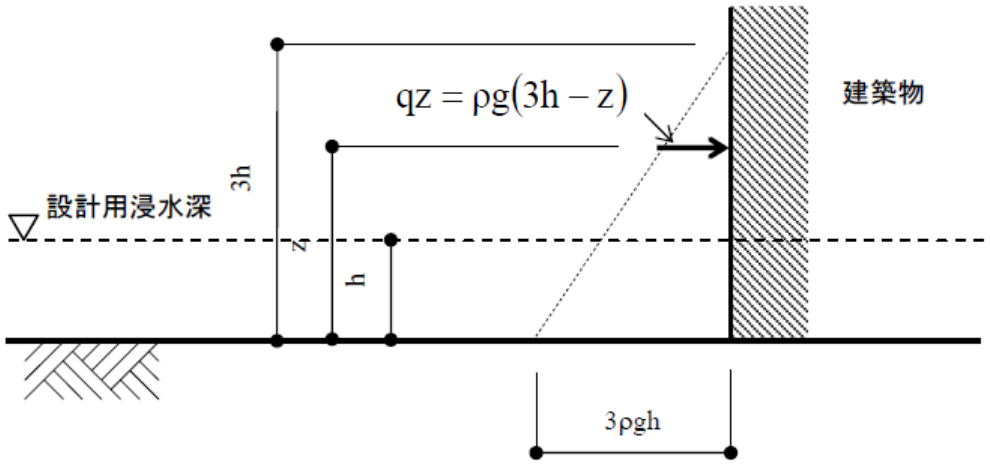


図 6.2.2-1　津波波圧の算定式（内閣府ガイドライン[6-1)]より）

② 津波波力算定式

進行方向の津波波力は、(6.2.2-1)式で規定した三角形分布の津波の圧力が構造物に働くと仮定して、受圧面の面積で積分した次式の値とする。

$$Q_Z = B\int_{Z_1}^{Z_2} q_Z\,dz = \rho g B\int_{Z_1}^{Z_2}(3h - z)dz = \frac{1}{2}\rho g B\left\{\left(6\eta z_2 - z_2^2\right) - \left(6\eta z_1 - z_1^2\right)\right\} \qquad (6.2.2\text{-}2)$$

ここに、Q_Z ：構造設計用の進行方向の津波波力(kN)

B：当該部分の幅(m)

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

z_2：受圧面の最高高さ（$z_1 \leqq z_2 \leqq 3h$）（m）

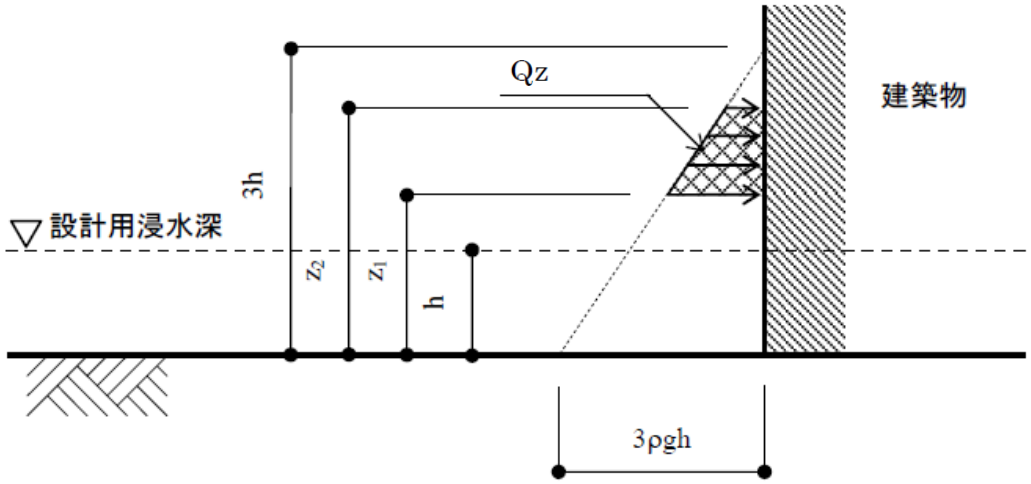


図 6.2.2-2　津波波力の算定式（内閣府ガイドライン[6-1)]より）

津波荷重（津波波圧、津波波力）は、遡上域における障害物の状況に応じて低減できる。また、津波荷重は構造物に対して全ての方向から作用することを想定する。ただし、津波の進行方向が想定できる場合にはこの限りではない。さらに、実状に応じて引き波を考慮するとされている。

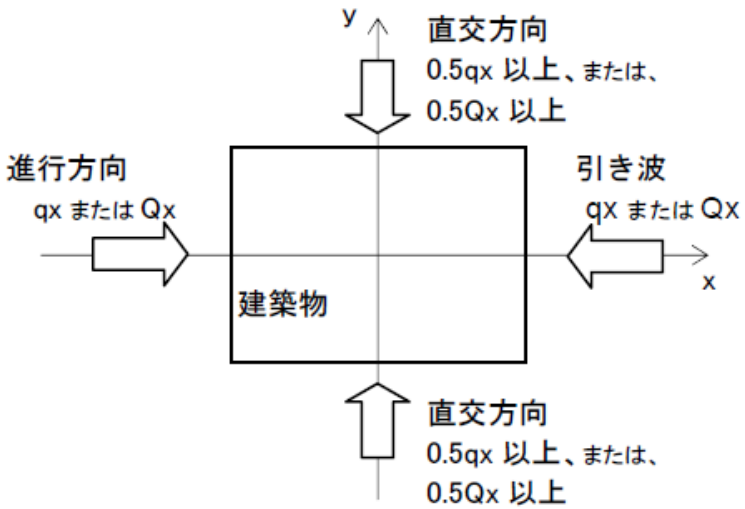


図 6.2.2-3　津波荷重の方向（内閣府ガイドライン[6-1)]より）

なお､津波荷重は受圧面に作用するため､受圧面の形状によって波圧の作用の仕方は異なってくる。建物の形状をいくつか想定し、それぞれの津波荷重の考え方を図 6.2.2-4 に示す。

実際の建物では、受圧面に窓等の開口部があると波力は建物内に抜けてしまうと考えられる。しかし、このような面に作用する津波波力に関して検討を行った例は少ない。窓ガラスの平均破壊強度をw_nとしたときの等価な波圧分布は図 6.2.2-5 のように与えるものとする。

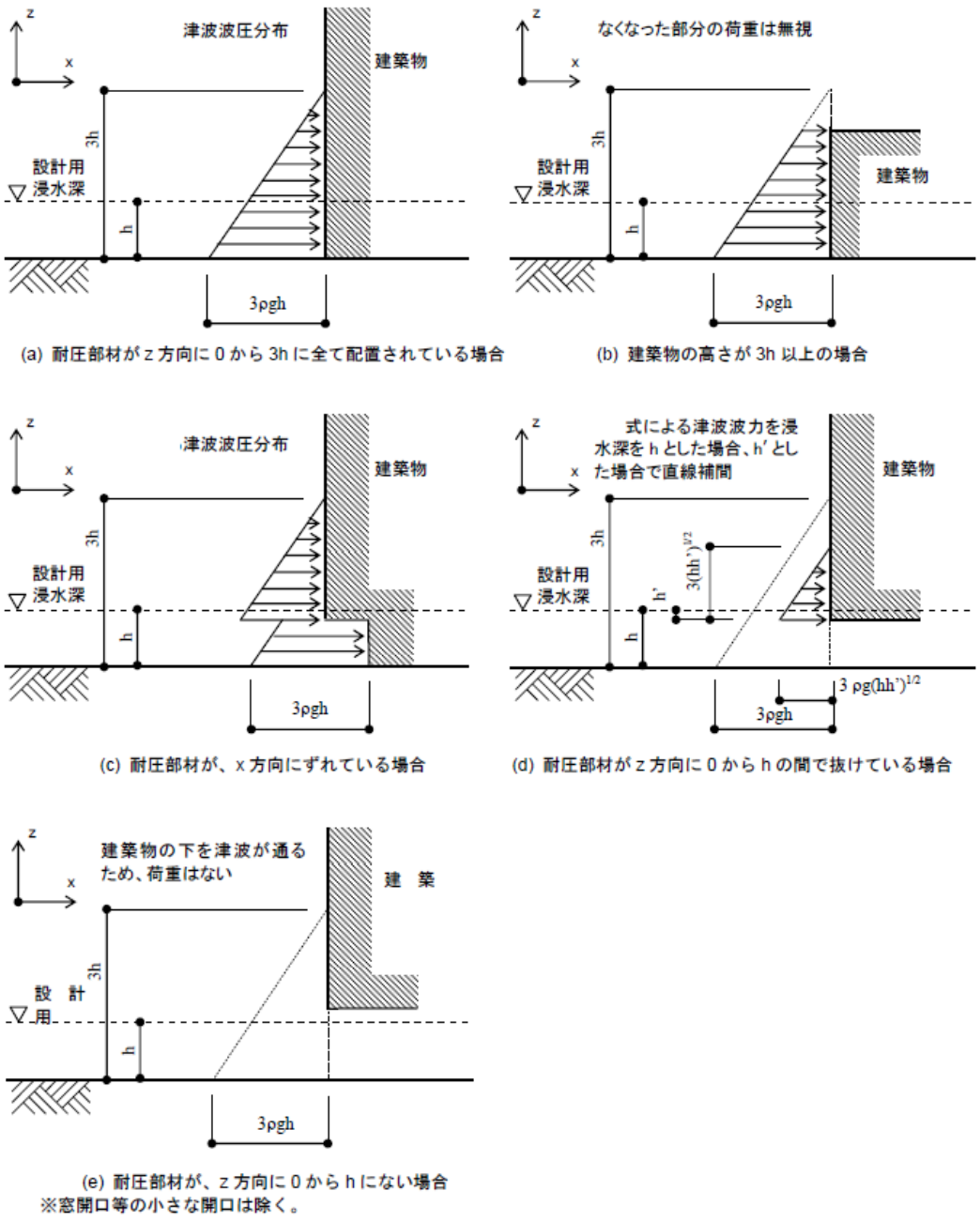


図 6.2.2-4　建物形状による津波波圧分布（内閣府ガイドライン[6-1)]より）

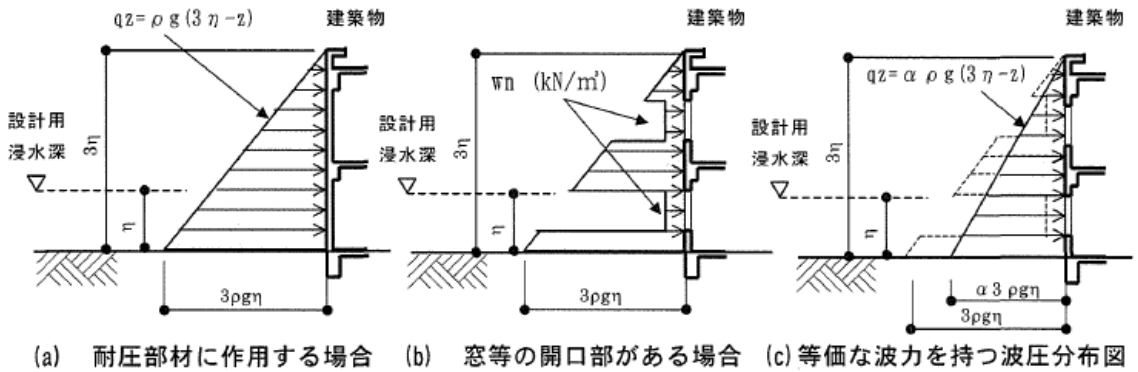


図 6.2.2-5　窓等の開口部がある場合の等価な波力分布算定の概念図（内閣府ガイドライン[6-1)]より）

③浮力算定式

津波によって生じる浮力は、次式により算定する。

$$Q_V = \rho g V \qquad (6.2.2\text{-}3)$$

ここに、Q_V ：浮力(kN)

Ｖ：津波に浸かった建築物の体積(m^3)

④構造骨組の設計

津波荷重に対して、各方向、各階において、構造骨組の保有水平耐力が津波の水平荷重以上であることを次式により確かめる。

$$Q_{ui} = Q_i \qquad (6.2.2\text{-}4)$$

ここに、Q_{ui} ：i 層の津波の水平荷重に対する保有水平耐力（kN）

Q_i ：i 層に生じる津波の水平荷重（kN）

このほか、ガイドラインには以下のような項目が規定されている。

- 津波荷重と地震荷重の組み合せは考慮せず、固定荷重と組み合わせて考慮する。
- 全ての受圧面を耐圧部材として設計するのは技術的・経済的に困難であることから、設計では耐圧部材と非耐圧部材（たとえば窓ガラスが外装材など）に明確に区分する。
- 耐圧部材は、津波荷重に対して終局強度以内とし、確実に構造骨組に力を伝達できるようにする。非耐圧部材は構造骨組に損傷を与えることなく壊れることを容認する。なお、浸水に対して建築物の機能を損なわないように配慮する。
- 建築物が津波荷重によって転倒や滑動しないことを確かめる

6.2.2.2 津波荷重に関する米国 FEMA のガイドライン概要

アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency of the United States、略称：FEMA）では、2004 年 12 月のスマトラ島沖地震により発生した大津波を契機に、津波防災に関わるガイドライン「津波からの避難のための構造物の設計ガイドライン（Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis）（FEMA P646）[6-2)]」を 2008 月 6 月に発行した。本章では、ガイドラインの第 6 章「荷重の決定と構造設計クライテリア（Load Determination and Structural Design Criteria)」から、建築構造物に働く津波荷重について概要をまとめる。

① 静水力学による荷重（Hydrostatic Force）

ゆっくりとした水の流れが構造物に当たる場合に働く荷重で、構造物の反対側と水の高さが大きく異なる場合に作用する。水がすぐに回り込むような小さい構造体には該当しない。

このとき、構造物に働く荷重は次式により与える。

$$F_h = \rho_c A_W = \frac{1}{2}\rho_s g b h_{\max}^2 \qquad (6.2.2\text{-}5)$$

ここに、ρ_c：静水圧、A_W：水を受ける壁面積、ρ_s：堆積物を含んだ流体の比重（1,200kg/m^3)、g：重力加速度、b：壁の幅、$h_{\max}$：壁に当たる部分の津波高さである。

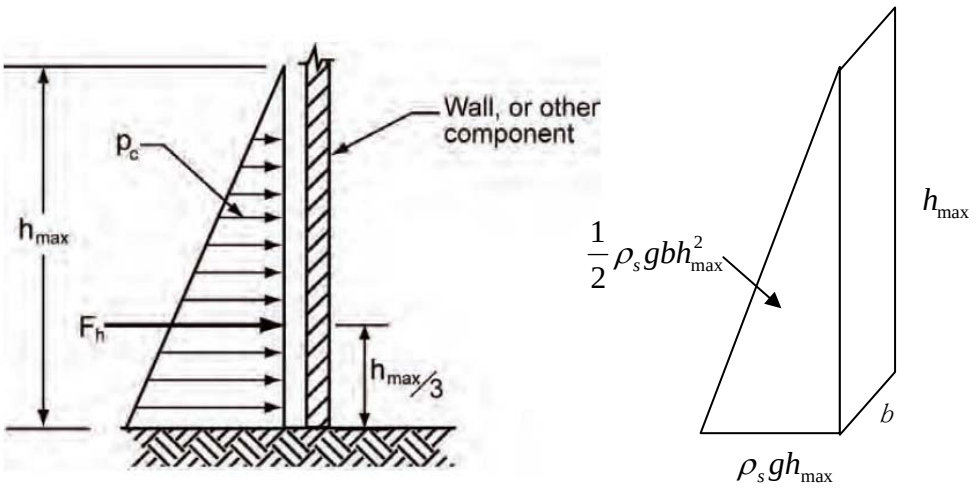


図 6.2.2-6 静水力学による荷重(FEMA P646 [6-2)] より)

津波高さが壁の高さh_wを超える場合には、台形分布の水圧を考えることになり、荷重は

$$F_h = \rho_c A_W = \rho_s g\left(h_{\max} - \frac{h_w}{2}\right) b h_{\max} \qquad (6.2.2\text{-}6)$$

となる。津波高さは、津波の遡上高さRと壁位置の標高z_wとの差であり、次式で与える。

$$h_{\max} = 1.3R^* - z_W = R - z_W \qquad (6.2.2\text{-}7)$$

ここに、R^*は数値シミュレーションや津波浸水マップ等から求められる最大浸水深である。

② 浮力による荷重（Buoyant Force）

津波の際に、構造物の一部または全体が水に沈んでいる場合に、構造物が押しやった水の体積分の浮力が働く。とくに、自重の軽い木造建物やタンク等に対して考慮すべき荷重である。

このとき、浮力は次式により与える。

$$F_b = \rho_S g V \tag{6.2.2-8}$$

ここに、V：構造物が押しやった水の体積である。

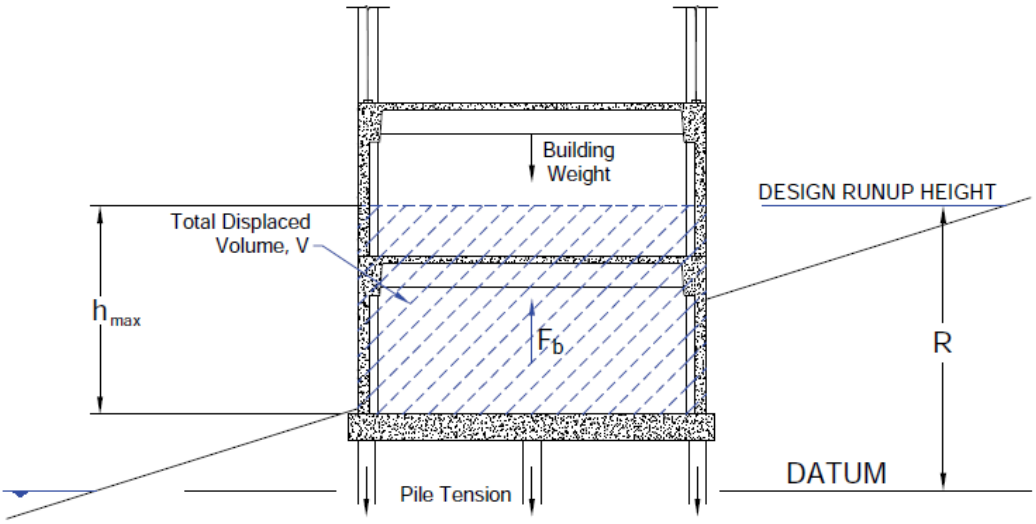


図 6.2.2-7　浮力による荷重(FEMA P646 [6-2] より)

③ 流体力学による荷重（Hydrodynamic Force）

比較的早い水の流れが構造物に当たる際に働く荷重であり、水による圧力と構造物側との摩擦による抗力（drag force）からなる。たとえば構造物が円柱のような場合には、抗力が小さくなる。

このとき、構造物に働く荷重は次式により与える。

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B\left(hu^2\right)_{\max} \tag{6.2.2-9}$$

ここに、C_d：抗力係数（$C_d = 2.0$ が推奨される）、B：流れが当たる部分の構造物の幅、h：流れの高さ、u：流れ速度、$\left(hu^2\right)$は流束運動量（momentum flux）である。なお、$\left(hu^2\right)_{\max}$ は$\left(h_{\max}u^2_{\max}\right)$とは違うことに注意する。つまり、津波高さの最大値と速度の最大値は同時には生じない。数値シミュレーション等から求められるものであるが、近似的に次式を用いることができる。

$$\left(hu^2\right)_{\max} = gR^2\left(0.125 - 0.235\frac{z}{R} + 0.11\left(\frac{z}{R}\right)^2\right) \tag{6.2.2-10}$$

ここに、R：津波の遡上高さ、z：建物がある地面の高さ（海抜）である。先に述べたように、R は津波の最大浸水高さ（R^*）の 1.3 倍と考えてよい。R^* は浸水マップ等から求めることができる。

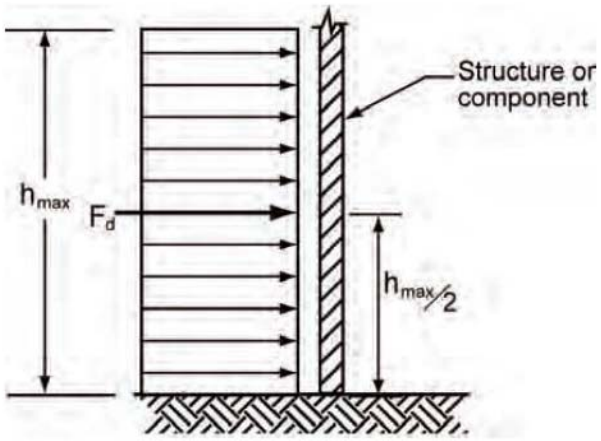


図 6.2.2-8　流体力学による荷重(FEMA P646 [6-2] より)

④ 衝撃による荷重（Impulse Force）

波の先端が構造物にぶつかることによる力である。実験によれば、最大の荷重は定常な流れによる荷重F_dの 1.5 倍程度であることが分かっている。従って、安全側の評価として、衝撃による荷重を次式で与える。

$$F_S = 1.5F_d \tag{6.2.2-11}$$

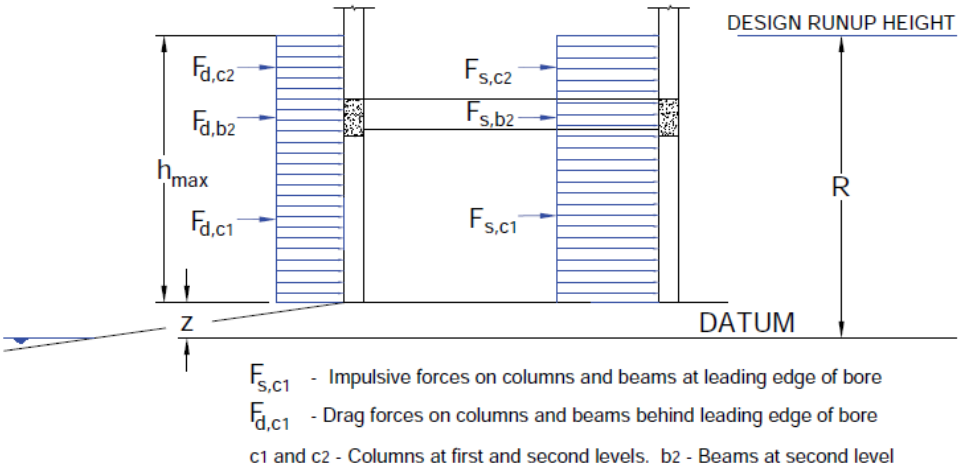


図 6.2.2-9　衝撃による荷重(FEMA P646 [6-2] より)

⑤ 漂流物による衝撃力（Debris Impact Force）

漂流物（丸太、船舶など）が構造物に衝突する力で、損傷を与える主要な原因になるが、正確に求めることは難しい。他の荷重と異なり、構造物に衝突する部分にのみ作用する。

漂流物による衝撃力は、次式により与える。

$$F_i = C_m u_{\max} \sqrt{km} \tag{6.2.2-12}$$

ここに、C_m：付加荷重係数（$C_m = 2.0$ が推奨される）、$u_{\max}$：漂流物の速度、m, k：漂流物の質量と有効剛性である。

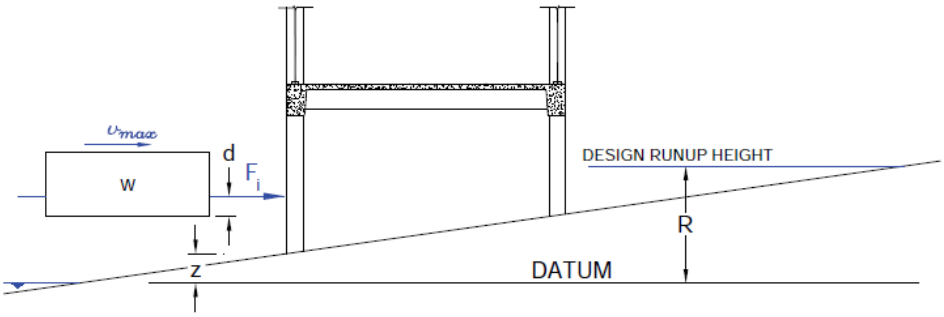


図 6.2.2-10　漂流物による衝撃力(FEMA P646 [6-2] より)

FEMA P646 では、例として漂流物の質量と有効剛性を以下の表で与えている。

表 6.2.2-1　漂流物の質量と有効剛性の例(FEMA P646 [6-2] より)

Mass and Stiffness Properties of Common Waterborne Debris

Location of Source	*Mass (m) in kg*	*Effective stiffness (k) in N/m*
Lumber or Wood Log	450	2.4×10^6
40-ft Standard Shipping Container	3800 (empty)	6.5×10^8
20-ft Standard Shipping Container	2200 (empty)	1.5×10^9
20-ft Heavy Shipping Container	2400 (empty)	1.7×10^9

漂流物の速度$u_{\max}$は、一様傾斜の場合、近似的に次式で与えられる。

$$u_{\max} = \sqrt{2gR\left(1-\frac{z}{R}\right)} \tag{6.2.2-13}$$

⑥ 漂流物が構造物でせき止められて働く力 (Damming of Waterborne Debris)

流体力学による荷重として次式で与える。

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d B_d \left(hu^2\right)_{\max} \tag{6.2.2-14}$$

ただし、B_d ：流れが当たる部分の漂流物の幅である。

⑦床スラブに作用する浮力 (Uplift Forces on Elevated Floors)

建物内において床の水のレベルが外部よりも下にある場合に、床スラブには局所的に浮力が働く。このときの浮力は次式で与えられる。

$$F_b = \rho_s g A_f h_b \tag{6.2.2-15}$$

ここに、A_f ：床面積、h_b ：床部分から外部の水面までの高さである。

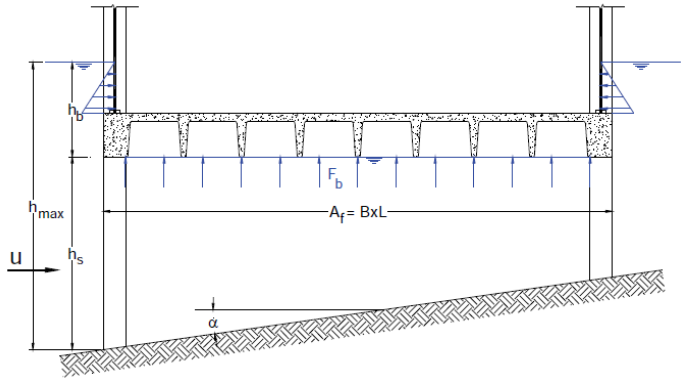


図 6.2.2-11　床スラブに作用する浮力(FEMA P646 [6-2)] より)

なお、壁や柱によって妨げられた水の流れによって、床スラブを持ち上げる力が働くことが分かっている。この力は近似的に次式で与える。

$$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho_s A_f u_V^2 \tag{6.2.2-16}$$

ここに、係数C_uは3.0とする。また、u_Vは水が上昇する鉛直方向の速度である。

⑧貯まった水による床荷重の増加（Additional Gravity Loads on Elevated Floors）

床に貯まった水による鉛直荷重の増加を次式により考慮する。

$$F_r = \rho_s g A_f h_r \tag{6.2.2-17}$$

ここに、h_r ：床に貯まっている水の深さである。

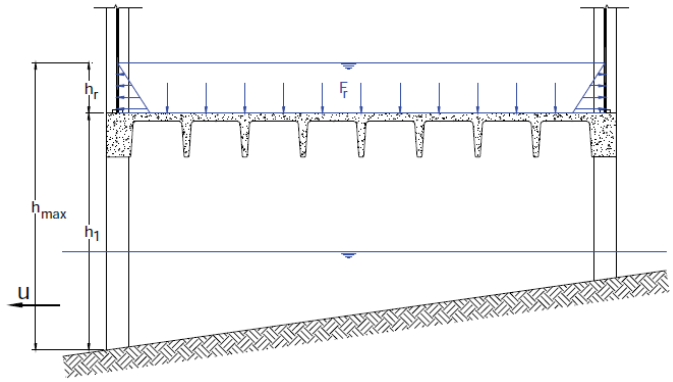


図 6.2.2-12　貯まった水による床荷重の増加(FEMA P646 [6-2)] より)

例題　　津波避難ビルの設計

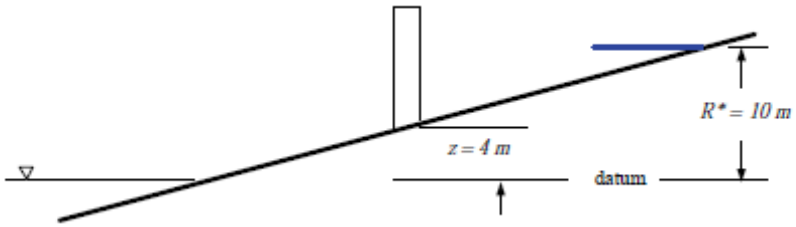


図 6.2.2-13　例題(FEMA P646 [6-2] より)

1)　津波避難ビルの位置：　海から 200m の位置に、幅 10m の津波避難ビルを建設する。土地の勾配を 1/50 とすると、建物位置では 4m の海抜高さとなる。

2)　津波の最大遡上高さ(the maximum runup elevation)：津浪浸水マップより、海から 500m の位置で R* = 10m とする。

3)　漂流物：　　長さ 8.53m、直径 0.35m、重さ 450kg の丸太
　　長さ 12.2m、幅 2.44m、高さ 2.59m、重さ 30tom の船

1)　避難場所の高さの計算

設計遡上高さ R は、マップから求まる最大遡上高さ R*の 1.3 倍より、

R = 13m

したがって、建物位置での地面からの津波の高さは 9m となる。

避難のため 3m の余裕をもたせて避難場所の高さは 12m とすると、４階建てビルの屋上に相当する。

2)　静水圧 (Hydrostatic Force) による荷重

１階部分の幅 b=4m、高さ hw=3m の壁に働く静水圧は、壁の地面からの高さを Δz=0.5m とすると、(6.2.2-6)式より

$$F_h = \rho_s g\left(R-(z+\Delta z)-\frac{h_W}{2}\right)h_W b$$

$$= (1200\,kg/m^3)(9.81\,m/\sec^2)\left(1.3\times 10\,m-(4\,m+0.5\,m)-\frac{3m}{2}\right)(3m)(4\,m)$$

$$= 989\,kN$$

3)　流体力学 (Hydrodynamic Force) による荷重

建物全体で考える。

まず、流束運動量 (momentum flux) は、(6.2.2-10)式より、

$$(hu^2)_{\max} = gR^2\left(0.125-0.235\frac{z}{R}+0.11\left(\frac{z}{R}\right)^2\right) = 105\,m^3/\sec^2$$

従って、荷重は

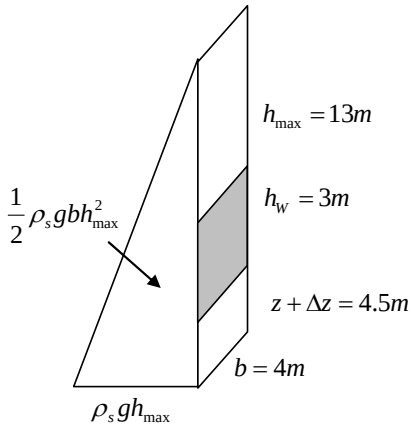


図 6.2.2-14　静水圧による荷重

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_s C_d (hu^2)_{\max}$$
$$= \frac{1}{2}(1200kg/m^3)(2.0)(10m)(105m^3/\sec^2)$$
$$= 1260kN$$

波の先端がぶつかる衝撃力を加味しても、

$$F_s = 1.5F_d = 1890\,kN$$

4) 漂流物による衝撃力（Debris Impact Force）

丸太の場合

(6.2.2-13)式より、最大流速$u_{\max}$および衝撃力Ftは、

$$u_{\max} = \sqrt{2gR\left(1-\frac{z}{R}\right)}$$
$$= \sqrt{2g(13m)\left(1-\frac{4m}{13m}\right)} = 13.3\,m/\sec.$$

$$F_t = C_m u_{\max}\sqrt{km}$$
$$= 2.0(13.3\,m/\sec)\sqrt{(2.4\times10^6\,N/m)(450\,kg)}$$
$$= 874\,kN$$

流体力学による荷重と足し合わせると、

Ft（衝撃荷重）＋ Fd（流体力学による荷重） =874 + 1260 = 2134 kN

船の場合

細かい計算は省略　衝撃力　Ft = 1290 kN　、流体力学による荷重と足し合わせると、

Ft + Fd = 1290 + 1260 = 2550 kN

6.2.2.3 ASCE が定める浸水荷重の概要

米国土木学会(American Society of Civil Engineering, 略称:ASCE)の定める Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-05, 2006 年)では、第 5 章に浸水荷重 Flood Loads[6-3)]が規定されている。本規定は浸水ハザードマップに定められている浸水危険区域での建築物その他の構造物に適用されるものであり、前節で紹介した「津波からの避難のための構造物の設計ガイドライン (Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis) (FEMA P646)[6-2)]」のなかでも引用されている。なお、ここで浸水の要因となる事象としては、津波だけでなく潮汐や高潮等も対象としている。

本節では ASCE-7 の浸水荷重に係る規定の概要をまとめる。

（1）用語の定義

第 5 章 5.2 節では、浸水荷重に係る一連の用語が定義されている。以下に主な用語をまとめる。

Base Flood (基本浸水):所与の期間中で超過確率が 1%の浸水。

Base Flood Elevation (BFE) (基本浸水高さ):所与の期間中で超過確率が 1%の浸水の高さ (波高も含む)。

Breakaway Wall (分離壁):浸水の作用を直接受ける壁のうち、非耐力壁に相当するもの (not required to provide structural support)。基本浸水又はそれ以下の浸水のもとで、水の流れを妨げないよう、かつ、上部構造や基礎に損傷を与えないように壊れるよう設計施工された壁をさす。

Coastal A-Zone (湾岸 A 区域):特別浸水危険区域内のうち、V 区域の内陸側又は開けた湾の内陸側をさす。A 区域に指定されるためには浸水の発生源が潮汐、高潮、入江での静振、津波であることが必要で、想定される波高が基本浸水時に 0.46m (1.5ft) 以上であること。

Coastal High Hazard Area (V-Zone) (湾岸高危険区域(V 区域)):特別浸水危険区域内のうち、沖合から砂浜の範囲、さらに暴風や地震によって引き起こされる速い速度の波の作用を直接受ける区域をさす。この区域は浸水保険料率マップ (Flood Insurance Rate Maps) で V, VE, VO, V1-30 と指定されている。

Design Flood (設計浸水):以下の 2 つの浸水事象のうち大きい方。(1) 浸水保険料率マップ上で指定された区域での基本浸水、(2) 当該地域の浸水危険区域として指定された区域での浸水。

Design Flood Elevation (DFE) (設計浸水高さ):設計浸水の高さ (波高 wave height を含む) を表し、地域の浸水危険度マップのデータに対応する。

Flood Hazard Area (浸水危険区域):基本浸水時に浸水の危険性のある区域。

Flood Hazard Map (浸水危険度マップ):行政が採用した浸水危険区域を表すマップ。

Flood Insurance Rate Map (FIRM) (浸水保険料率マップ):連邦保険減災本部 (Federal Insurance and Mitigation Administration) が特別浸水危険区域とリスク割増地区とした範囲の公式マップ。

Special Flood Hazard Area (特別浸水危険区域):所与の期間中で浸水を受ける確率が 1%以上の区域。この区域は浸水保険料率マップで A 区域又は V 区域として定められている。

（2）設計要件

浸水時を想定した設計に当たっては、5.3.2 節で浸水事象によって地面が浸食される影響 (G.L.の減少) や局部的に洗掘される影響を荷重算定時に考慮することとされている。

また分離壁 Breakaway Wall は、構造体との接合部も含めた壁が浸水作用時に分離するよう、以下の

荷重の最大値を用いて設計しなければならない（5.3.3 節)。

1. ASCE7 の第 6 章に定める風荷重
2. ASCE7 の第 9 章に定める地震荷重
3. 0.48kN/m^2

（3）浸水荷重の算定

浸水危険区域での建築物の構造設計は設計用浸水に基づくこととされており、5.4 節で浸水時の荷重算定の方法が定められている。以下にその概要をまとめる。

1）静水力学による荷重 Hydrostatic Loads（5.4.2 節）

DFE レベルまでに達する水深による静水圧は全面で考慮すること。引抜き力や水平力の低減は、浸水の出入りがある場合のみ適用される。

2）流体力学による荷重 Hydrodynamic Loads（5.4.3 節）

水流の動的効果は流体力学に基づく解析を通して検討すること。ただし、速度が 3.05m/s 以下の場合は、次式に示す等価割増し深さ dh を上流側の壁での DFE に加えることによって、静水力学による荷重と等価な荷重とすることができる。

$$d_h = \frac{aV^2}{2g} \qquad (6.2.2\text{-}18)$$

ここで、V: 平均流速、a : 抗力係数（＞1.25)。ここで得た等価荷重は、水の流れる方向に直交する壁に対して高さ方向に一様に分布させる。一方、水の流れる方向に並行する壁に対しては DFE までの高さの静水力学による荷重を分布させる。

3）波浪荷重 Wave Load（5.4.4 節）

波浪荷重は以下のいずれかの方法で計算しなければならない。

(1) 本節に定める方法
(2) 数値解析（数値モデル）
(3) 実験（物理モデル）

波浪荷重は波が水面を伝播して構造物に当たることによって生ずるもの。波浪荷重を受ける建築物の設計に当たっては、建築物各部での砕波(breaking wave)、浅瀬での揚力、建築物各部への遡上波、抗力や慣性力、摩擦力を考慮しなければならない。波浪荷重は V 区域と A 区域で考慮され、V 区域での波高は 0.91m 以上、V 区域より陸側での波高は 0.91m 未満とする。

砕波以外の波浪又は砕けた後の波浪は、5.4.2～5.4.3 節に定める静水力学又は流体力学による荷重を用いて計算すること。砕波による荷重は 5.4.4.1～5.4.4.4 節に定める手順によって計算し、砕波高は(6.2.2-19)～(6.2.2-20)式によって計算すること。

$$H_b = 0.78 d_s \qquad (6.2.2\text{-}19)$$

ここで、H_b : 砕波高、d_s : 局所的な静水深 local still water depth である。

局所的な静水深はより高度な解析や実験によるほか、(6.2.2-20)式で計算すること。

$$d_s = 0.65\left(BFE - G\right) \qquad (6.2.2\text{-}20)$$

ここで、*BFE*：基本浸水高さ、*G*：地上レベルである。

4）鉛直な壁に作用する砕波荷重 Breaking Wave Loads（5.4.4.2 節）

鉛直な壁に作用する最大波圧及び最大波力は次式で算出すること。

$$P_{\max} = C_p \gamma_w d_s + 1.2\gamma_w d_s \qquad (6.2.2\text{-}21)$$

$$F_t = 1.1C_p \gamma_w {d_s}^2 + 2.4\gamma_w {d_s}^2 \qquad (6.2.2\text{-}22)$$

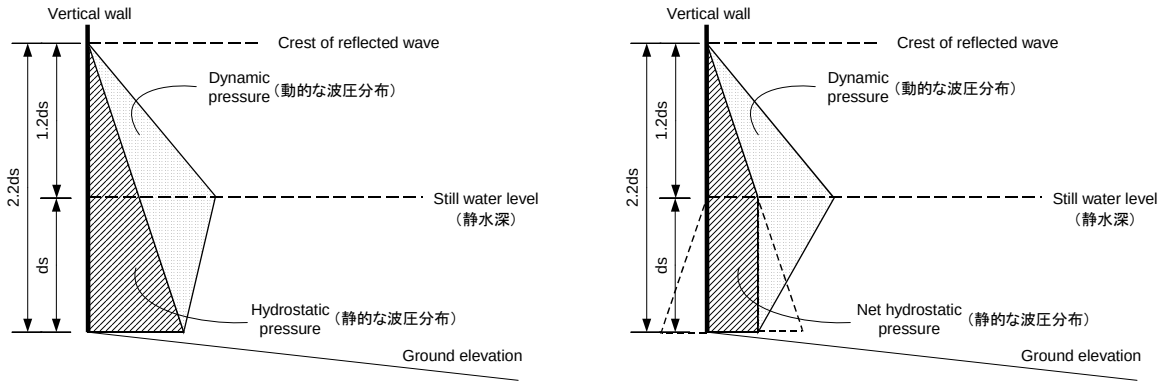
ここで、P_{max}：動的な波圧$C_p \gamma_w d_s$と静的な波圧$1.2\gamma_w d_s$との和の最大値（shock pressure とも言う）、

F_t：静水深付近で作用する単位長さ当たりの波力（shock, impulse, or wave impact force とも言う）、C_p：動圧係数 dynamic pressure coefficient（1.6＜Cp＜3.5）、γ_w：水の単位重量、d_s：砕波地点での静水深である。

この方法は、壁の前面で波が反射又は波立ち、その際に静水深レベルから 1.2ds の高さまで波頭が達することを想定したものである。したがって壁に対する波圧分布は図 6.2.2-15(a)のようになる。

さらにこの方法は、壁の背面では水が回り込まないこととしている。したがって、壁の背面に自由流れがある場合は、同図(b)のように壁の前後で静水圧がキャンセルされるので波力は次式で算出される。

$$F_t = 1.1C_p \gamma_w {d_s}^2 + 1.9\gamma_w {d_s}^2 \qquad (6.2.2\text{-}23)$$



(a)壁の背面に浸水しない場合　　(b)壁の背面にも浸水する場合

図 6.2.2-15　鉛直な壁に作用する砕波荷重

5）衝撃荷重 Impact Loads（5.4.5 節）

衝撃荷重は、漂流物が建築物に衝突する際の荷重である。衝撃荷重は適切な方法によって、DFE 以下の高さの最もクリティカルな箇所での「集中荷重」として算出しなければならない。

6.2.2.4　津波映像からの流速推定

津波による建築物の被害を検討する上で、陸に遡上してからの津波の流速は重要な要素の一つとなり得る。そこで津波時のビデオ映像をもとに、陸域での津波の流速計測を試みた。計測にあたっては、具体的な場所及び目印となる建築物・道路等を特定する必要があるため、計測に利用出来るビデオ映像は限定される。

以下、現時点で測定出来た宮城県の名取川左岸地区での事例について示す。

(1)対象地区と計測方法

ＮＨＫで放送されたビデオ映像のうち、場所や目印となる建築物・道路等を航空写真と照合することが出来た名取川上空からのビデオ映像を用いた。

津波の流速を計測した箇所は名取川左岸地区（仙台市若林区藤塚周辺）であり、海岸線から約 1km ほど内陸での計測を試みた（図 6.2.2-16）。

計測方法は、ビデオ映像から津波の位置が特定出来る２つの計測点（概ね津波の進行方向上と平行）を目視で抽出した上で、距離及び時間を下記により求めて速度を計測した。

図 6.2.2-16　津波の流速を計測した地区

距離：２点間の距離を GIS 上で計測

時間：海側の計測点に津波が到達した時刻を０秒とし、陸側の計測点に津波が到達した時刻をビデオのタイムカウンタから取得

(2)計測結果

海岸線から約 1km 陸側での名取川左岸地区での津波の流速は、計測点間の距離が約 268m、海側の計測点から陸側の計測点に津波が到達に要した時間は約 38.5 秒であることから、268m／38.5 秒＝約 7m／秒（約 25km／時）と推定された（写真 6.2.2-1）。

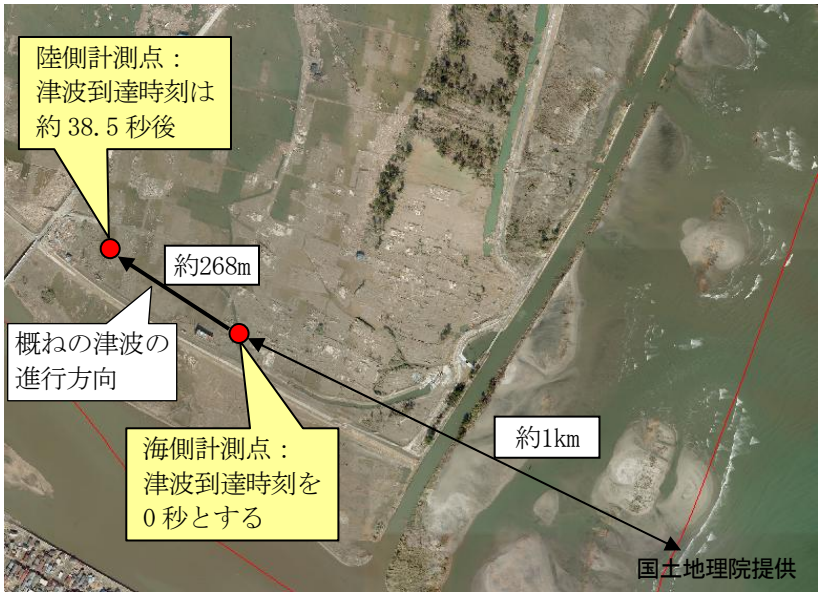


写真 6.2.2-1　名取川左岸地区での津波の流速計測