

大規模災害に備える津波 BCP

伊藤一教

大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所
水域・環境研究室 海洋水理チーム チームリーダー



2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震津波による甚大な被災を受けて、臨海部の産業施設における事業継続性計画（BCP）が注目されている。本稿では臨海施設の津波を対象とした検討項目として津波による内水氾濫、漂流物対策を考慮した津波避難ビルと津波波力の関係、津波対策ビルについて述べる。

キーワード：津波，事業継続性計画，BCP，内水氾濫，津波シェルター，T-Buffer

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、臨海部の産業施設に甚大な被害をもたらした¹⁾。東日本大震災は津波想定が容易ではないこと、産業施設の防災対策や事業継続計画（BCP）を考える上で、起こりうる災害事象を抽出し、あらかじめ検討し対策を講じることがいかに重要であるかを改めて示した。

本稿では、まず、臨海部に立地する産業施設を対象にした津波に対する BCP 策定に資する検討の一つとして、津波による内水氾濫に着目し、内水氾濫が産業施設に与えるリスクについて述べる。

次に、2012年8月29日には、内閣府より南海トラフで発生する巨大津波の被害想定²⁾が発表された。その中で、最悪のシナリオの場合32万人の死者が発生すると推定された。津波から人命を守る社会資本施設として津波避難ビル、いわゆる津波シェルターがある。津波シェルターは想定避難者数に対して設置されるものであるため、津波による漂流物の多少にかかわらず立地される。ここでは、津波シェルターと漂流物対策について言及する。

最後に、従来、建築物は津波外力を想定した設計はなされてこなかった。しかし、臨海部に建設する建築物については、津波外力を考慮した建築物が求められる。そこで、津波に対して効率的に耐える建築対策ビル T-Buffer について述べる。

2. 津波 BCP について

2.1 津波 BCP の概略検討フロー

津波を対象とした事業継続性計画すなわち津波 BCP

の考え方を図-1に示す。津波 BCP を考える上で、立地条件、周辺環境、設備・装置の種類や配置、資器材の調達・輸送方法など個々の産業施設には特有の制約条件があり、この制約条件により BCP の内容が多様化することは一般的である。そのような BCP の多様性を念頭に置きつつも、出来るだけ簡素に津波 BCP のアウトラインを示したのが図-1である。

まず、想定津波を設定し対象とする施設に有意な規模の津波が到達するか否かを判断する。その結果、大きな津波が到達しないと判断される場合には、施設周辺の被災状況を考慮し、対象施設に必要な調達・輸送に関するサプライチェーンの確保を検討することになる。施設周辺の被災状況とは、地震・津波による道路・鉄道などの被災状況である。

一方、対象施設に被災を伴うような津波が到達すると判断された場合には、遡上津波による浸水規模の確認が必要となる。浸水規模が無視しうるほどの小規模な場合にはサプライチェーンの検討へ進むことになるが、浸水規模が大きいと判断される場合には、対策検討へ進む。産業施設に概ね共通する対策検討項目は、施設内にいる人々を対象とした人命確保の観点から避難場所・施設の確保、避難場所・施設までの避難経路の確保といった項目である。ついで、遡上津波による浸水に伴う物的損傷リスクの評価である。具体例としては、屋外にある電気施設の損傷や建屋内への浸水リスクを挙げることができる。また、浸水規模が極めて大きい場合には、建屋の損壊リスクも検討項目となる。さらには、早期復旧性にかかわる内容も対策項目の一つであろう。ここで言う早期復旧性とは、津波による土砂や漂流物が施設内に堆積・集積した状況を想定した場合に、それらをいかに早く撤去するかが事業再開

に向けた要点になることを指している。この場合には、対象となる土砂量や漂流物量をあらかじめ推定し、瓦礫の仮置場所を確保する計画等といったソフト面での検討項目である。

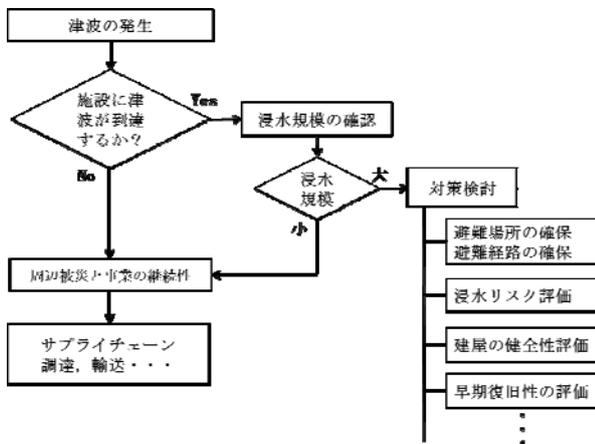


図-1 津波 BCP の概略検討フロー

2.2 津波 BCP と津波による内水氾濫

ここでは、本稿で対象とする津波の内水氾濫について説明する。臨海部に位置する産業施設を津波による浸水から防御する方法は、適切な防潮壁で施設全体を囲う方法と、施設内への浸水を許容しても重要な建物・設備・装置だけでは浸水対策を講じる個別対策に大別される。

施設全体を囲い込む方法において、想定した津波に対して適切な高さや強度を有する防潮壁等が設置されているならば、津波の規模が想定範囲内である限りは防潮壁等で津波の遡上を防止することができる。しかし、臨海部に位置し海水を生産活動で利用する施設には取放水路が存在するため、海域と陸域は地下の取放水路により連通していることになる。また、施設内に埋設された雨水排水路等でも海域と陸域が連通している場合がある。護岸を越流する津波遡上の浸水は防潮壁等で防ぐことができる。しかし、取放水路や雨水排水路を津波が逆流し施設内に溢水する現象が想定でき、この現象が津波による内水氾濫である。

取放水路や排水路を介して施設内に海水が溢水する内水氾濫が生じると、溢水による機械・電気設備の損傷、建物への浸水被害だけでなく避難経路の喪失といった問題が発生する可能性がある。一般に、内水氾濫による溢水は、水路に設置した逆止蓋や角落としにより防止できるが、大規模な津波を伴う地震時には、適時に逆止蓋や角落を操作することが容易でないと予測できる。それ故、津波による内水氾濫を物理的に抑止するハード対策と、内水氾濫により施設内に溢水した場合の避難方法といったソフト対策の両面から対応することが必要と考えられる。

津波による内水氾濫に関しては、2010年のチリ津波

来襲時に護岸からの遡上より先に排水路からの逆流による内水氾濫が確認された報告³⁾がある。また、東北地方太平洋沖地震津波の来襲時にも、内水氾濫が発生していたことが報道された⁴⁾。この報道は、避難中のある市民が撮影した映像にマンホールから噴出する溢水現象がおさめられていたものである。したがって、津波による内水氾濫は、事業継続性の観点から一つの対策事象であると考えられる。

2.3 津波避難ビル

「津波避難ビル」とは津波による被害が想定される地域の中でも、地震発生から津波到達までの時間的猶予や、地形的条件等の理由により、津波からの避難が特に困難と想定される地域に対し、やむを得ず適用される緊急的・一時的な避難施設である。その構造的要件や緊急時の利用方法等は津波避難ビル等に係るガイドライン⁵⁾により定義されている。

津波に対する安全性を確認する方法として、ガイドラインでは「構造的要件の基本的な考え方」が定められており、浸水深に応じて「津波荷重」の想定により受圧面（外壁、窓等）・構造骨組（柱、梁、耐力壁等）を設計することが求められており、その結果「地震」と「津波」に強い「津波避難ビル」を実現することが可能となる。

津波避難ビルの立地計画は、津波浸水予想区域における人々の避難を可能とするため、以下の①～④のステップによりその建設地を設定することとなる（図-2）。

①建設地の想定

津波浸水予想区域内に津波避難ビルの位置を想定する。

②避難可能範囲の推定

津波の到達までに歩行により避難可能な範囲が推定される。具体的には津波避難ビルを中心に、津波到達時間内に徒歩で移動できる距離を半径とした海側の半円形を避難可能範囲として設定する。

③収容可能な範囲の推定（収容人数の推定）

津波避難ビルの収容人数は、当該地域の人口密度と②で設定する範囲により、決定することとなる。

④カバーエリアの決定後、カバーされない範囲の避難計画を立案

②、③により推定した避難可能範囲がカバーエリアとなる。以降カバーエリア以外の範囲において①～④の操作を繰り返し、建設地点および収容人数を設定していく。

津波避難ビルの一形式として図-3に津波シェルターを示す。その特徴は、避難フロアを多層化することで小さな敷地でも多くの避難者を収容でき、津波来襲方向に起因する津波波力の指向性を除去することと波力低減をはかる円筒形を採用していることが挙げられる。もちろん、形状については円筒形に限らず、敷地等の

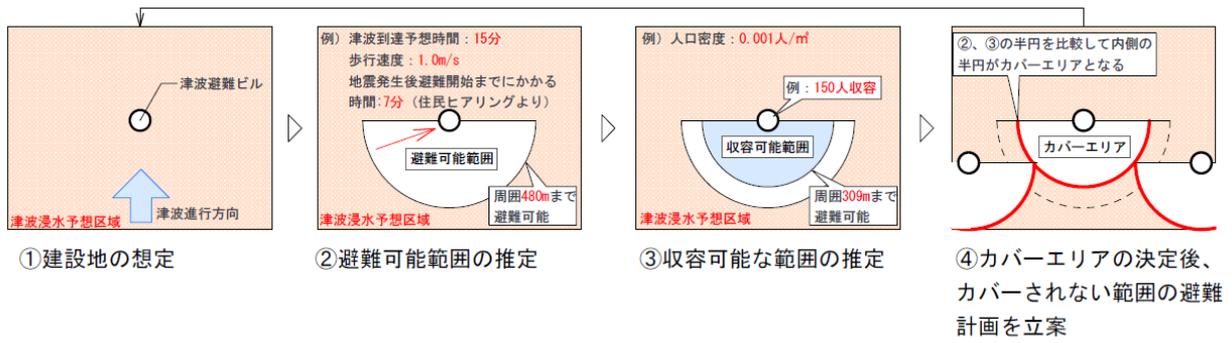


図-2 津波シェルターの立地計画検討フロー例

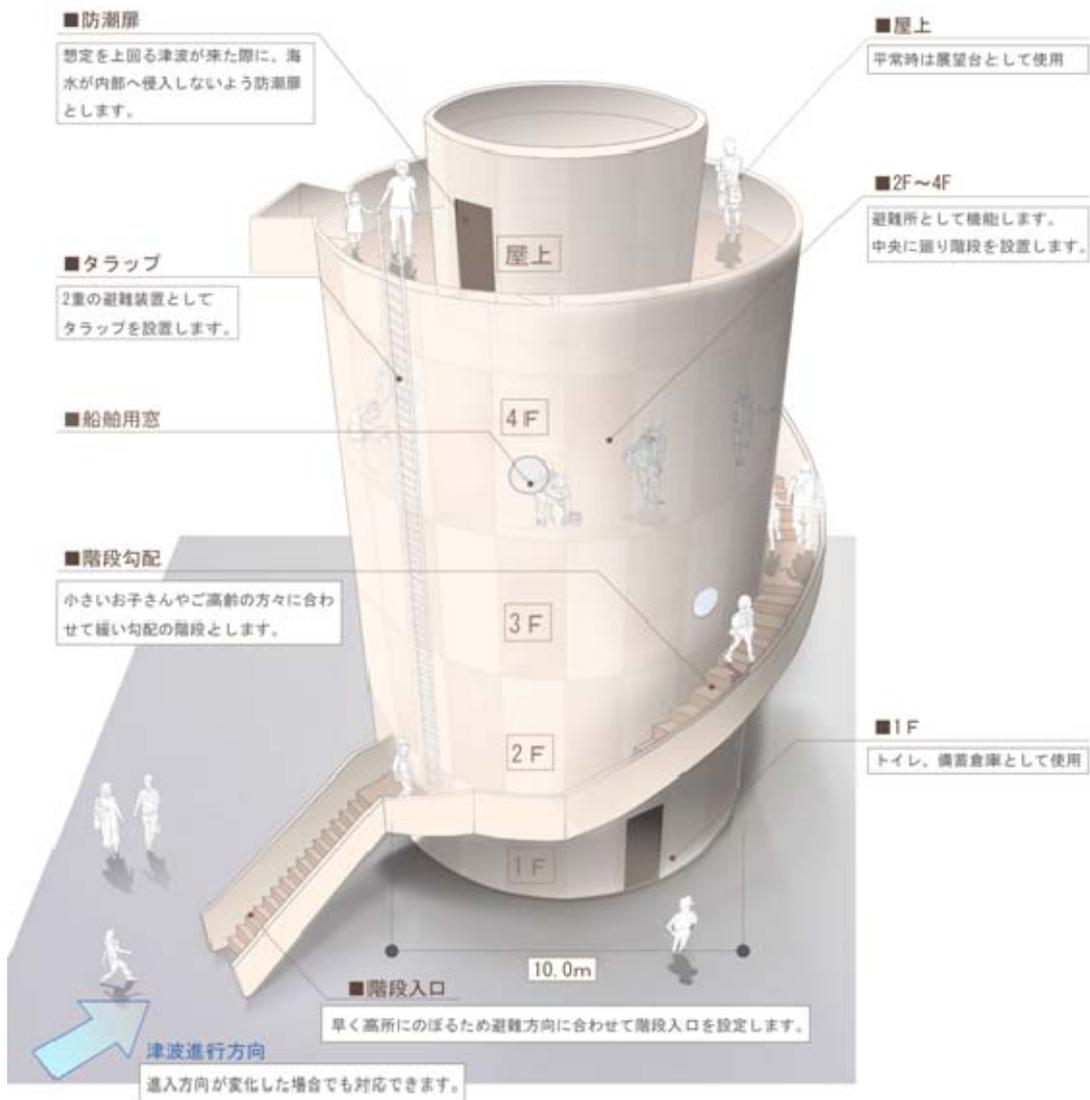


図-3 津波シェルターの説明図

制約条件に合わせて適正化を図ることが可能である。さらに、RC造耐火構造による内部避難型のシェルターにより、万一の津波火災の発生時にも避難の安全性を高めている。また、避難者にとって高いフロアに上る動線が分かりやすいよう、避難経路となる階段を外部に設置したり、高齢者等に配慮したゆるやかな階段

形状を採用するなど、さまざまな人々が避難しやすい施設の実現をコンセプトとしている。

3. 津波による内水氾濫とそのリスク

ここでは、模型実験と比較することで津波の内水氾

濫シミュレーションの解析精度について述べる。次に、より一般的な雨水排水路を対象とした津波の内水氾濫シミュレーション結果に基づき、リスク特性に言及する⁶⁾⁷⁾。

3.1 実験に基づく内水氾濫の特徴とシミュレーション

図-4は実験装置を示す。長さ47m幅0.8mの二次元水槽内に海底地形と護岸の模型を設置し、水路端部の造波により津波を模擬した規則波を発生させ内水氾濫実験を行った。海域と陸域を結ぶ水路は、地下部に水平水路があり5本の立坑(図中①～⑤)が等間隔に配置されている。水路の直径は31mm、水平延長は2.5mである。護岸からの遡上をなくすために護岸際には十分に高い防潮堤を配置した。造波した波は周期20秒で、護岸前面の最高水位が約7cmである。実験を再現するために用いた数値解析は、連続式とナビア・ストークス方程式を基礎方程式とした気液二相乱流解析⁸⁾である。具体的には有限体積法を基本とした。自由表面にはVOF法を、乱流モデルには標準k-εモデルを適用した。解析格子は非構造格子を用いた。

立坑からの溢水量について、実験結果と解析結果の比較を図-5に示す。図より、解析の良好な再現性が確認できる。溢水量は陸側の立坑⑤で多く、ついで海側の立坑①となっている。溢水量が少ない立坑②③に比べて立坑⑤の溢水量は1オーダー大きいことが特徴といえる。

津波BCPの観点から特筆すべきことは、内水氾濫による溢水量が最も陸側の立坑⑤で多いことである。仮に本実験の水路を取水路と仮定するならば、取水ポンプは取水路の陸側端部に設置されると考えられ、それに付随する電気施設も近傍に配備される場合が多いと

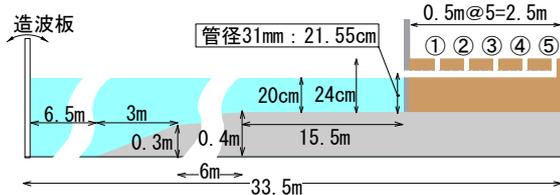


図-4 津波の内水氾濫を対象とした実験例

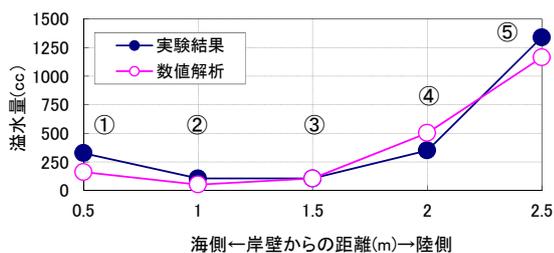


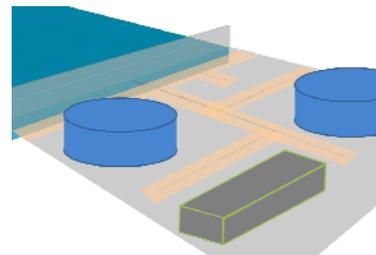
図-5 溢水量の比較

考えられる。その場合、仮にポンプ近傍に維持管理用の立坑等があるならば、電気施設近傍で多くの溢水が発生し、電気施設に作用する可能性がある。それ故、津波による内水氾濫はBCP策定において注意すべき項目と考えられる。

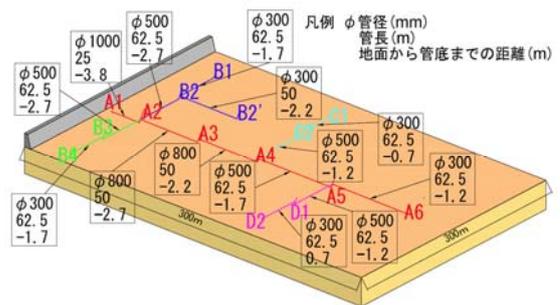
3.2 排水路網を対象としたケーススタディー

ここでは、図-6(a)に示す300m×300m規模の施設を対象に、雨水等の排水路網を対象に解析した内水氾濫の結果を示す。排水路網の緒元は、下水道施設計画・設計指針⁹⁾に準拠し図-6(b)のように設定した。解析手法は前出の気液二相乱流解析であり、図-6(c)にマンホール部における解析メッシュを例示した。また、津波は護岸前面で7mの条件とした。

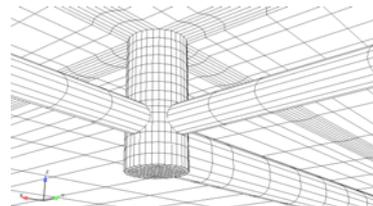
図-7に解析結果を示す。図-4および図-5の実験結果では陸側立坑⑤からの溢水量が最も多かったが、排水路網では海側マンホールからの溢水量が最も多い結果となった。図-5と差異が生じた理由は、排水路の場合、管径の変化やマンホールでの分岐合流など形状が複雑であるため、損失が大きいことに起因していると考えられる。しかしながら、津波の繰り返しの来襲によって最も陸側に位置するマンホールからの溢水も確認できた。



(a) 排水路網を有する産業施設のイメージ

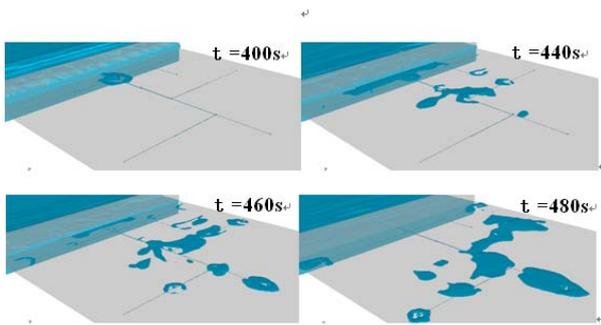


(b) 排水路網の設定値

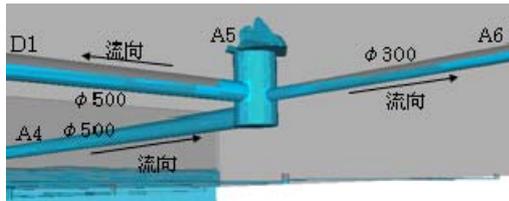


(c) マンホール部の解析格子例

図-6 排水路網の設定



(a) 地状における溢水状況



(b) 地下の逆流業況 (t=415s)

図-7 津波水位と立坑からの溢水状況

ここで、雨水排水路網からの溢水についてBCPの観点から考察を試みる。複雑な形状を有する雨水排水路の場合、海側に位置するマンホールからの溢水量に比べて陸側に位置するマンホールからの溢水量は小さい。仮に溢水が多い防潮壁近傍のマンホール付近に電気設備などがある場合には、機器損傷のリスクが高いことは容易に想定できる。一方、溢水量が少ない陸側マンホールであっても、近傍に電気設備などがあるならば機器損傷のリスクがある。また、施設内の人々が陸側に向かって避難している状況を想定するならば、避難先の方向に位置するマンホールから溢水が発生している状況にあつては、避難行動に影響を及ぼすことが懸念される。その場合、例えば小規模の溢水であっても避難の障害となり得る。BCP策定において重要なことは、出来る限り災害事象を抽出しハードとソフトの両面から対策を講じることであることから、小規模な内水氾濫であっても注意を要すると考えられる。

4. 津波シェルターと津波対策ビル

ここでは、津波シェルターに作用する津波の流況解析を示すとともに、漂流物対策を施した津波シェルターの特徴について述べる¹⁰⁾。

また、津波に対して効率的に耐える建築構造 T-Buffer について述べる。

4.1 漂流物対策を考慮した津波シェルターのシミュレーションと津波波力の関係

解析対象とした津波シェルターは、図-8に示す円筒形の構造物である。構造物は直径13m、高さ18.6mの円筒形建物の外周に螺旋階段が付帯している形状で

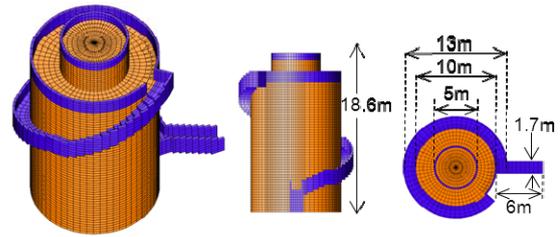
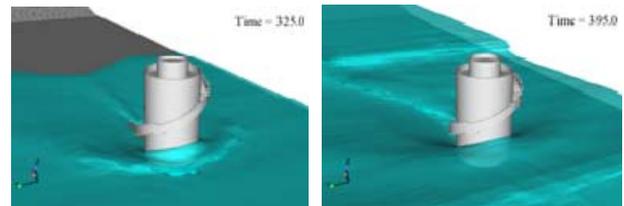


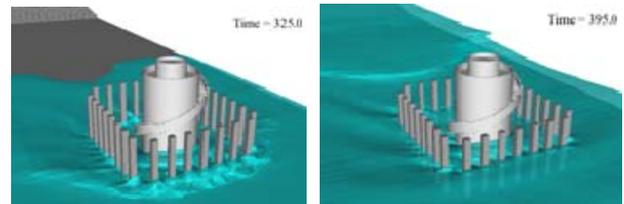
図-8 津波シェルターの形状



(a)t=325s

(b)t=395s

図-9 津波作用時の津波シェルター周辺の流況



(a)t=325s

(b)t=395s

図-10 防衛工を配置した津波シェルター周辺の流況

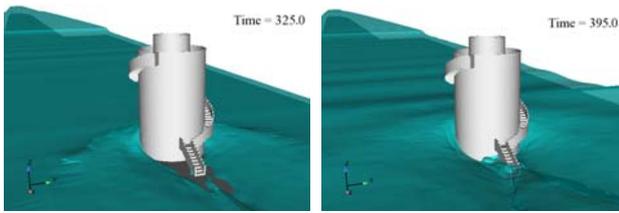
ある。図-8には後述する数値解析に用いた解析格子も例示した。

図-9は津波作用時の津波シェルター周辺の流況を解析した結果である。

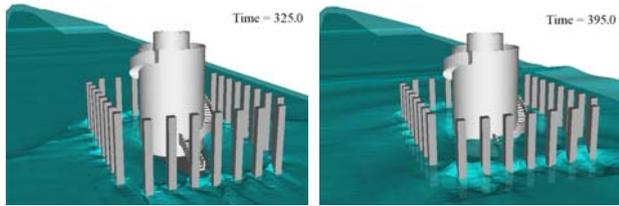
津波シェルターの立地計画では、市民活動すなわち対象地域の居住人口・就労人口と津波避難施設の収容人数および所要避難時間によって、設置数や設置箇所が決まる。それ故、漂流物の発生しない場所に限定した立地を考えることは難しく、例えば漂流物が多く発生する可能性がある地点であっても立地場所となるケースがある。したがって、津波避難施設を考える上で漂流物対策も一つの設計上の課題である。そこで、杭式構造の漂流物対策工、すなわち防衛工を配置した津波シェルターを対象に解析した結果が図-10である。

図-10に示した防衛工を配置した津波シェルターでは、1m×1mの杭を防衛工として周囲に配置し、開口間隔は自動車の漂流・衝突を防止することを想定し2mとした。

図-9および図-10は、海側から津波シェルターを見た結果であるが、両者に顕著な差異は認められない。しかしながら、図-11および図-12に示す陸側から見た流況には明確な差異がある。両者ともt=325sでは階段部に津波が回り込んでいない。しかし、t=395sでは防



(a)t=325s (b)t=395s
図-11 津波シェルター陸側の流況



(a)t=325s (b)t=395s

図-12 防衛工を配置した津波シェルター陸側の流況

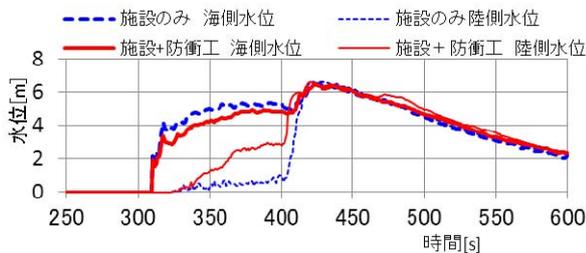


図-13 津波シェルターに作用する津波水位

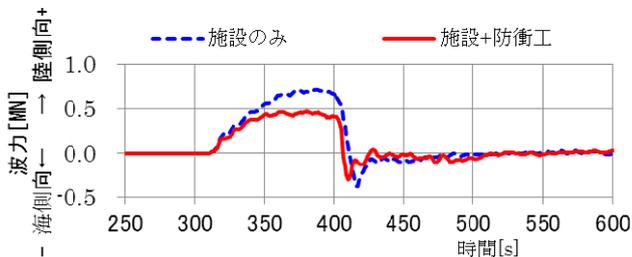


図-14 津波シェルターに作用する津波の水平波力

衝工がないケースで階段が没水していないのに対し、防衛工がある場合には階段が没水しており、陸側水位に顕著な差異が認められる。このことは図-13 に示す水位の時系列変化にも表れている。防衛工がある場合には、その抵抗によって下流側の流れがせき止められ、陸側すなわち下流側水位の上昇が速い。すなわち、防衛工がない場合には津波シェルターの上下流で大きな水位差が発生するのに対し、防衛工がある場合には水位差が小さくなることを示している。その結果として、図-14 に示すように津波シェルターに作用する水平波力も防衛工がある場合には小さくなる。ここで示したケースでは 2/3 まで波力が低減されている。防衛工は漂流物対策として設置されるものであるが、波力を低減することにも寄与することがわかる。

津波シェルターは津波から人命を守るため施設であ

り、津波作用中に発生する漂流物の衝突からシェルターの損傷を防止しなければならない。津波が引いた後を想定すると、漂流物が津波シェルター周辺に集積する可能性がある。集積した漂流物を自動車と想定するならば、自動車は燃料の流出などの危険性を有しており、津波後の火災原因とも言われている。防衛工がなく、津波シェルター周辺で火災が起きたならば、人命にかかわる甚大な二次災害が発生することが容易に想定される。したがって、津波シェルターに対して適切な離隔距離を有する防衛工は、津波シェルターの二次災害防止にも役立つと言える。

4.2 津波対策ビル T-Buffer の提案

ここでは、津波に対して効率的に対抗でき復旧性の高い津波対策ビル「T-Buffer」を提案する。図-15 に示す津波対策ビル「T-Buffer」は、津波による波圧及び漂流物の衝突力に対して、地震力を負担する建物中央の耐震壁の外周部に緩衝柱（Buffer Zone）を設けることで、耐力壁の致命的な損傷を防ぎ、津波後の建物機能の早期復旧を目指すコンセプトである。万一、波圧及び漂流物の衝突などにより 1 階外周柱が損傷しても、長期軸力は、上階外周部に配置したベルトトラス及び最上階の吊り材が建物を支持する構造を採用する（図-15(b)）。また、壁開口部に防水戸などを使い、上階への避難通路や避難シェルターの機能を持たせることで、人命と建物を津波から守る「津波対策ビル」を可能とするものである。

モデル建物の概要を示す。図-15(a)は、津波の発生する可能性がある地域に計画された 1 階に店舗 2~4 階に事務所を配置した事務所ビルである。各階階高は、1 階が津波高さ 5.0m を想定し 6.0m、2~4 階は 4.0m とする。事務所部分の最大スパンは 9.6m とし、ELV・階段・便所等はコア部に配置する。本計画は建物内にいる人の避難のみを想定し、コア内に階段を設けているが、地域住民の津波避難ビルとして計画する場合は、外部階段を設ける事も可能である。

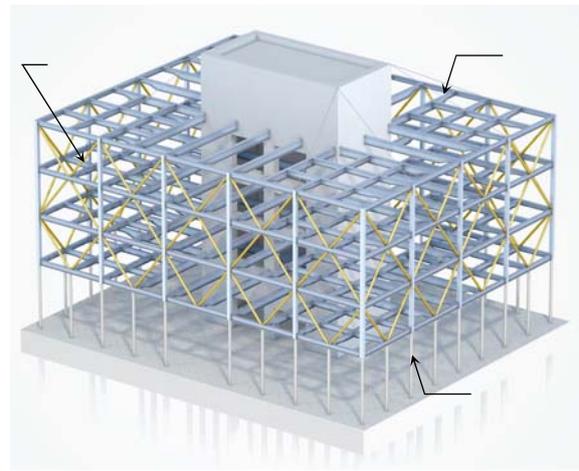
構造計画の概要を以下に示す。構造種別は鉄骨造（外周部）+RC 造（コア部）であり、構造形式は耐震壁+外周ブレース構造を考える。部材断面のイメージとしては、コア耐震壁 $t=600\text{mm}$ 、2~4 階外周柱 $H-350 \times 350$ 、2~4 階トラス $H-350 \times 350$ 、R 階吊り材 $\phi 250$ 、1 階外周柱 FB または円形鋼管が概要である。ただし、各緒元は津波高さ等により各々決定されることに留意頂きたい。

耐震要素は、中央コア部の耐力壁とし、2~4 階のベルトトラスは各階重量を R 階の吊り材に伝えるために配置している。1 階外周柱には軸力を負担させず、CW 受材及び上階床の振動を抑えるための支持材として使う。基礎は杭基礎とし、洗掘に耐えるようにマットスラブ形式とする。

図-16 に T-Buffer の機能説明図を示す。津波発生時

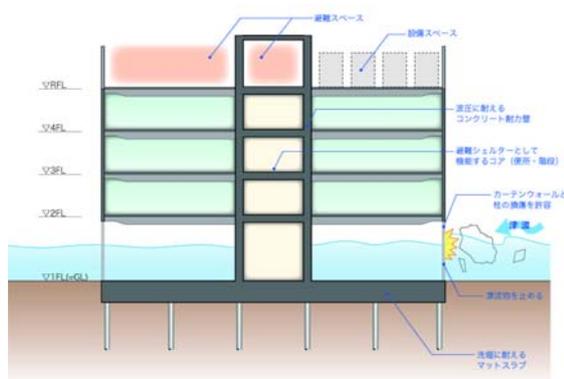


(a) 概観パース

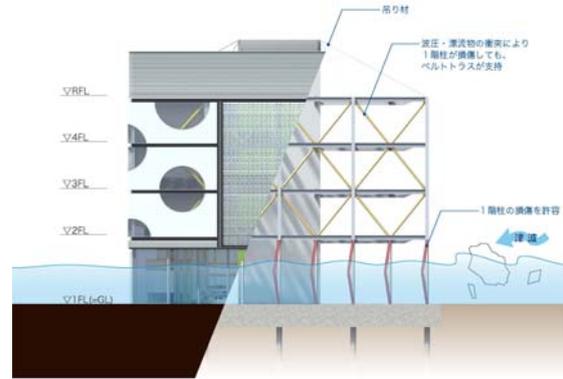


(b) 構造モデル

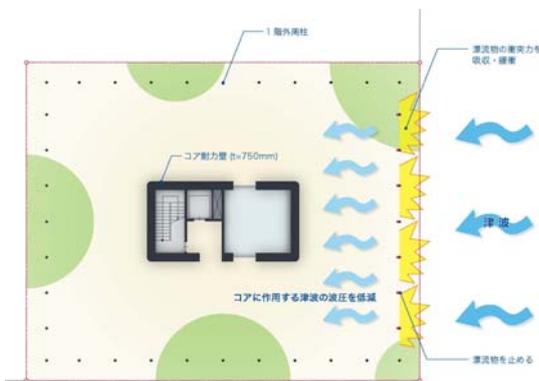
図-15 津波対策ビル T-Buffer の概念図



(a) 断面図



(b) 立体図



(c) 平面図

図-16 津波対策ビル T-Buffer の説明図

には、1階外周柱が津波による波圧及び漂流物の衝撃力により損傷することで、中央のコア耐力壁の損傷を防ぐ。津波高さが1階階高を超える場合は2階以上も1階と同様の様式とする。

津波対策ビル T-Buffer は、津波による1階部の損傷を許容する代わりに、災害後に建物機能の早期復旧を達成するものである。

5. まとめ

本稿では、大規模な津波を対象とした事業継続性 (BCP) を念頭に、津波対策とそれに伴うリスクについて述べた。具体的には、取放水路や雨水排水路を介して海域と陸域が連通している施設の場合、施設を適切な防潮壁で囲い込んでも、津波による内水氾濫によって場内に溢水が発生することを示した。そして、溢水は場内の装置・設備の損傷リスクを高めること、避難時には避難経路の喪失につながることを述べた。

次に、津波避難ビルとして円筒形の津波シェルターを対象とし、津波作用時のシミュレーションを実施した。さらに津波避難ビルは漂流物の多い場所においても設置されることを考慮し、漂流物対策工がある場合とない場合の解析を実施した。漂流物対策工は杭式の防衝工とした。その結果、防衝工は津波の波力を低減する効果があることを示した。

最後に、津波による1階部の損傷を許容する代わりに、災害後に建物機能の早期復旧を達成する津波対策ビルとして T-Buffer を提案した。

参考文献

- 1)高橋重雄ら:2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査報告,港湾空港技術研究所資料, No.1231., 2011.
- 2)中央防災会議: 南海トラフ巨大地震の被害想定について(一次報告), 2012,
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_nankaitrough/pdf/20120829_higai.pdf
- 3)橋本貴之,今村文彦: 2010年チリ津波による被害に関する気仙沼での現地調査報告, 東北大学, 津波工学研究報告, 第27号, pp.91-95. 2010
- 4)日本放送協会: <http://www.nhk.or.jp/ohayou/closeup/20111206.html>
- 5)津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官(防災担当): 津波避難ビル等に係るガイドライン平成17年, 2005,
<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/guideline.pdf>.
- 6)伊藤一教, 織田幸伸, 高山百合子, 古田敦史: 津波来襲時の水路を介した溢水現象に関する基礎検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 66, No.1, pp.941-945, 2010
- 7)古田敦史, 伊藤一教, 織田幸伸(2011): 津波による内水氾濫のシミュレーション, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 67, No.1, pp.206-210
- 8) CD-adapco: METHODOLOGY STAR-CD VERSION.4.14, CD-adapco., 2010
- 9)(社)日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説 2001年版, 2001
- 10)伊藤一教, 横田華奈子, 橋本貴之, 今村文彦: 津波避難施設の立地計画及び設計に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 68, No.1, 印刷中, 2012