

重要臨海施設の津波対策工に関する一提案

高梨和光¹・荻原洋聡²・藤間功司³・佐藤紘志⁴

¹正会員 工博 清水建設株式会社 土木技術本部 主任 (〒105-8007東京都港区芝浦1-2-3)
²海上自衛隊 厚木航空基地隊 管理隊長 2等海佐 (〒252-1101神奈川県綾瀬市無番地)
³正会員 工博 防衛大学校 建設環境工学科 教授 (〒239-8686神奈川県横須賀市走水1-10-20)
⁴正会員 工博 元防衛大学校 建設環境工学科 教授 (〒239-0808神奈川県横須賀市桜ヶ丘1-8-2)

2004年インド洋大津波の被害分析から、重要臨海施設の津波に対する十分な抗堪性だけでなく、経済性と即応性も兼ね備えた、簡易な津波対策の手順と簡便な津波対策工システムを提案するものである。この簡易な津波対策の手順は「甚大な津波関連被害を軽減する。」との観点からの基本的な考え方を示し、簡便な津波対策工システムは応急対策と同時に恒久対策を速やかに実施することとし、恒久対策に係る基本的な考え方としては、津波関連被害の拡大を抑止する対策を基本とした津波防災戦略の基に、全体防御としての津波防護壁、拠点防御としての津波避難施設を組み合わせた被害対策の効果が有効であることを提案している。

キーワード：津波、津波被害、津波対策工、津波防護壁、津波避難施設

1. はじめに

2004年インド洋大津波は死者、行方不明者約32万人を出した津波である。津波被害は、インド洋沿岸のインドネシア、スリランカ、タイ、インド、マレーシアやモルディブ諸国に及んだ。この津波は浸水による被害だけではなく、構造物の破壊や漂流物の衝突等の被害も多数確認できた。¹⁾日本でも、東海、東南海や南海地域での津波来襲が想定されており、これらの沿岸地域には図-1に示す重要港湾施設がある。



図-1 日本における沿岸地域の重要港湾施設

重要港湾施設周辺には、空港、電力施設、生産施設、エネルギー関連施設等の重要臨海施設がある。これらの重要臨海施設も津波の浸水被害だけでなく、破壊力のある津波波力に対しても十分に対抗できる性能を有する津波防護対策が必要である。これらの重要臨海施設は単独施設の場合だけでなく、複合施設やライフラインのようにネットワーク施設の場合もある。また、上・下水道のような河川や海岸に入口や出口のあるライフラインや沿岸付近にある道路、鉄道、電力、ガス等のライフラインへの地震・津波による二重被害の可能性が想定されている。津波発生後の早急な施設やライフラインの回復や災害派遣・復旧・復興からも重要臨海施設の津波関連被害（津波による直接被害や津波に先立ち発生する地震による被害）を最小限に抑える必要がある。

本研究は重要臨海施設の津波被害軽減のために、2004年インド洋大津波の被害分析等から、重要臨海施設における津波対策での基本戦略を示し、津波防護対策の一助とし、津波に対する十分な抗堪性だけでなく、経済性と即応性も兼ね備えた、簡易な津波対策の手順と簡便な津波対策工システムを提案するものである。

2. 被害津波の特徴

インド洋大津波が有史以来最大の死者約 21 万人、行方不明者約 11 万人、犠牲者の合計約 32 万人を出した災害である。このインド洋大津波の地震・津波の規模をメリカリ震度と津波高さとして図-2，インドネシアに遡上した津波写真を写真-1 に示す。津波が遠浅の沿岸や島嶼付近に達し押し寄せ、津波先端部は激しく乱れ、あたかも流れの様な挙動を示している。

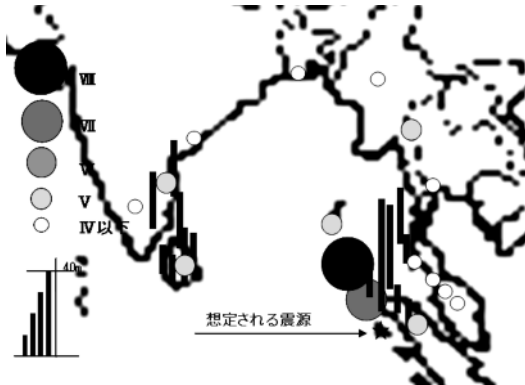


図-2 メリカリ震度と津波高さ



写真-1 漂流物を伴い遡上する津波



写真-2 石油ターミナルでの貯油タンクの漂流



写真-3 港湾施設の地震・津波の二重被害



写真-4 モルディブでのマレ国際空港の冠水

3. 津波被害の特徴

インド洋大津波では道路、鉄道、港湾、発電所、工場、石油配送ターミナル、浄水施設や通信・情報機器の被害が発生した。写真-2 はインドネシアでの石油配送ターミナルの貯油タンクの漂流被害，写真-3 インドの港湾施設での防波堤や護岸の倒壊，写真-4 は滑走路が冠水被害で空港機能が停止したモルディブのマレ国際空港，写真-5 はスリランカ海洋資源研究所の通信・情報機器の被害写真である。



写真-5 スリランカ海洋資源研究所の機器被害

これらの被害写真から、津波先端部での流れの様な挙動が貯油タンク等の構造物に浸水や損傷を与えるだけでなく、漂流をも誘発していることが確認できる。このため、津波の規模を波高、遡上高さや浸水深さだけでなく、波圧や流速も考慮しなければならない。

この津波の波圧が静水圧よりも大きくなることは、粒子法による津波解析や津波水槽による実験からも確認されている。図-3 は津波が構造物に衝突直後の結果とそのときの波圧分布²⁾を示したものである。津波が構造物に衝突し、反射して舞い上がった波が後方に巻き込み、波圧が静水圧の 2～3 倍程度になることがわかる。圧力分布は上部より下部が大きく膨らんだ壺のような形状の重複波圧が作用しており、スクレーパーのように構造物基礎を削ぎ落とすような津波の破壊力が発生していることが確認できる。このように、津波被害は津波波力に起因するので、津波が重要施設に衝突しない対策を施せば良いことがわかる。さらに、津波による冠水被害での設備機能の停止は機械化、電氣化、情報化した都市や重要臨海施設に共通した、今後の日本でも十分に注意しなければならない津波被害と考えられる。

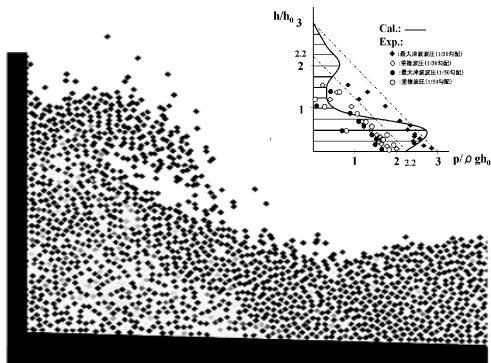


図-3 津波の構造物への衝突挙動解析

4. ライフラインの地震・津波被害の予測

ライフラインに対する地震・津波被害の予測として、写真-6 に示す中島浄化センターで地震・津波被害の予測³⁾を行なう。広域避難場として指定され、この浄化センター周辺は 1854 年安政東海地震・津波で浸水を受けている。中島浄化センターは昭和 55 年に建設され、約 2～2.5m の盛土があり、海拔 4.5m 程度となっている。周辺地域は当時の標高であり、海拔 2.5m 程度と低くなっている。

ここでは、この地点に想定東海地震・津波が来襲してきた時の災害を予測し、参考の為に、想定東海モデルの初期水位を 2 倍とした時の津波被害も併せて想定する。さらに、津波が来襲する前に地震動が伝播してくるので、地震動による構造物の損傷状況を検討する。



写真-6 中島浄化センター全景

(1) 地震被害の検討

中島浄化センターの反応タンクの横断面を検討対象とし、東海地震により想定される当該地域での地震動⁴⁾に対して、非線形地震応答解析を実施し、構造物の地震被害を予測する。中島浄化センターに設置されている反応タンクの耐震検討に用いる地震動としては、①野津波 SZ0014 静岡 4 波（破壊開始点 S1, S2, 方向 NS, EW）基盤引き戻し波 1）、②中央防災会議の地震動 9 波（東海地震 S1, 東海地震 S2, 東海・東南海・南海地震, 方向 NS, EW）を比較・検討し、対象構造物に最も影響の大きい野津波 S2(EW)を検討用地震動波形として選定し、図-4 に野津波 S2(EW)と東海 S2(EW)波形の地表面加速度応答スペクトルと野津波 S2(EW)の地震波形を示す。

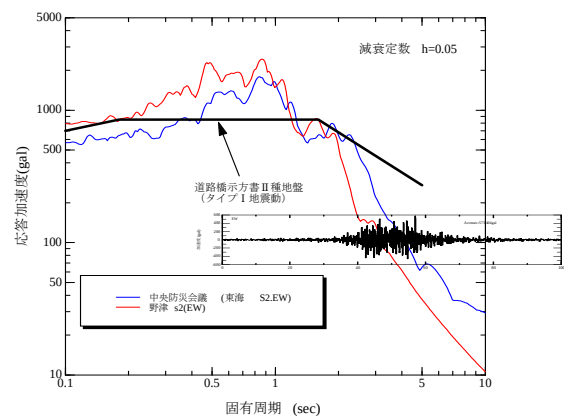


図-4 地表面の応答スペクトルと野津波 S2 (EW)

野津波 S2(EW)を入力した地震応答解析を実施した。解析結果として、反応タンクの損傷状況を図-5に示す。全ての部材での応答局率は終局曲率以下、地震時のせん断力は全ての部材においてせん断耐力以下である。したがって、本水処理施設は耐震性能Ⅱ2を満足すると判定される。本構造物は想定される東海地震によって構造物全体が崩壊することではなく、地震後に機能が短期間で回復できるが、スロッシングには注意を要する。

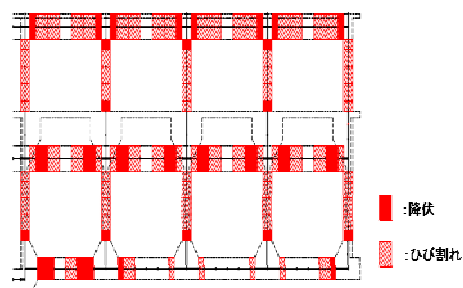


図-5 反応タンクの損傷状況

(2) 津波被害の検討

想定東海地震による津波が中島浄化センターに襲する被災シナリオについて、津波シミュレーションを実施する。下水処理場の津波による被害を詳細に検討するため、従来よりも高精度な浸水評価を構造物単位としたレーザープロファイラー (LiDAR) を用いた測量法で作成した地形モデルを使用し、被災シナリオの1つとして地盤の液状化によって、堤防が沈下した場合の津波被害に及ぼす影響について検討した。波源として内閣府・中央防災会議の想定による東海地震モデル（以下、想定東海モデル）を採用し、2時間の再現時間として津波の伝播・遡上計算を行った。想定東海モデルにおける地盤変動分布と検討対象地域の位置関係を図-6に示す。

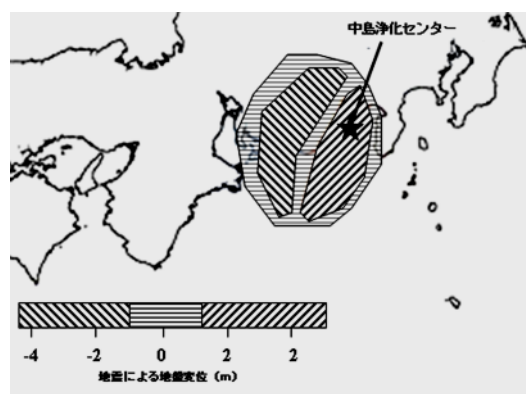


図-6 想定東海モデルによる地盤変動の分布

支配方程式は非線形長波理論とし、底面摩擦の Manning 粗度は $n=0.025$ を採用した。地震発生時の潮位は朔望平均満潮位 (T.P. +0.86m) とした。地形データはネスティングにより空間格子間隔を 1350m から 2m まで細分化し、1350m~50m 格子には内閣府の公開データを、最も細かい 2m 格子には LiDAR による地形データを使用し、図-7に中島浄化センター付近の地形モデル (2m 格子) を示す。

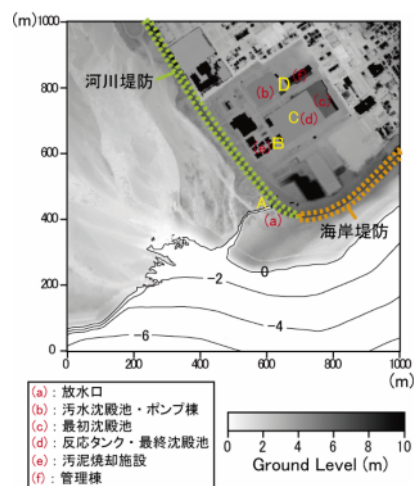


図-7 中島浄化センター付近の地形データ

図-8に想定東海モデルの初期水位を2倍ほど大きく見積もって検討した結果を示す。津波の初期水位を2倍にして見積もったが、浄化センターの機能停止の可能性はあるものの敷地内の浸水深は1m未満、津波により構造物の柱・梁が破損する可能性は低いものと想定される。このとき、津波が海岸堤防を越流するのは地震発生から約20分後の第2波目であることが確認されたので、本施設を津波来襲時における緊急避難施設として使用することができるものと考えられる。

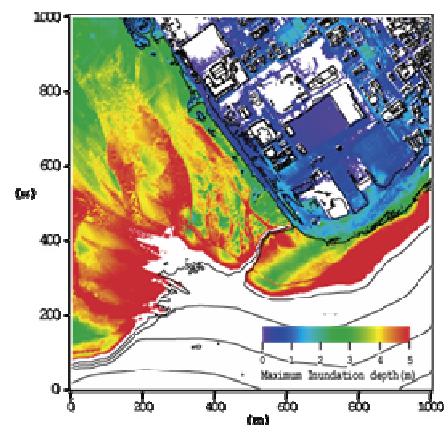


図-8 最大浸水深分布（堤防沈下あり）

5. 津波フラジリティー曲線での被害の定量化

津波フラジリティー曲線（津波被害関数）は津波高さ（浸水深）による構造物や部材の損傷率，地域での同一被害の構造物の割合をグラフにしたものである．この津波フラジリティー曲線を用いて津波被害分析や津波対策に対する費用対効果の検討や対策の優先順位の検討できる．本研究では 2004 年インド洋大津波の津波フラジリティー曲線から重要臨海施設での設備を含んだ被害パターンの分析を行なう．図-9 に 2004 年インド洋大津波で被害を受けたバンダ・アチェ市街地の津波氾濫と被害評価⁵⁾を再整理した津波フラジリティー曲線を示す．

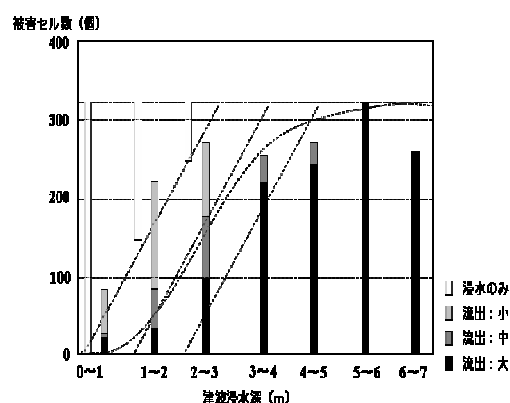


図-9 バンダ・アチェ市街地の被害評価

図-10 は中埜らの調査⁶⁾から求めた津波フラジリティー曲線である．白色の柱部分は入射した津波に対抗できる保有耐力を津波高さ（浸水深）で表したもので，灰色の柱部分は構造物に入射した津波に対する余裕分の保有耐力を津波高さ（浸水深）で表した破壊されなかった構造物，黒色の柱部分は構造物に入射した津波に対して欠落していた耐力を津波高さ（浸水深）で表した損傷または破壊された構造物を示している．

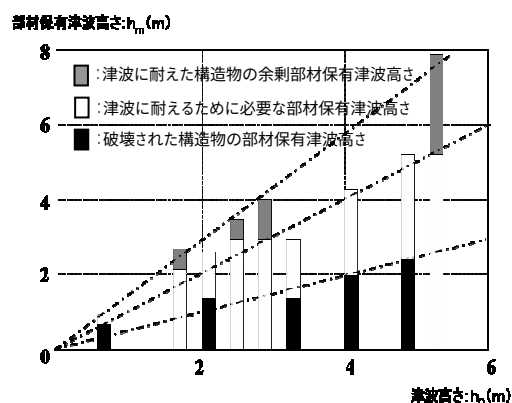


図-10 津波フラジリティー曲線

この図-10 の津波フラジリティー曲線から，①RC構造物の津波被害が保有耐力の不足に起因していること．②構造物内外の設備が構造物被害を助長していないという「被害の独立性」が確認できる．③「耐力」があるものは残り，「耐力」が極端に少ないもの（50%以下）は破壊するということが確かめられ，「被害の適者生存」が確認できる．この「被害の独立性」を構造物と設備の津波被害に適応することによって，プラント構造物の津波フラジリティー曲線を求めることができる．

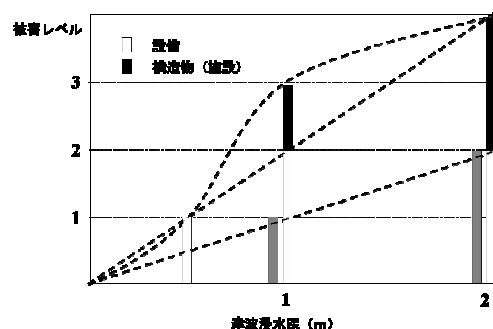


図-11 設備被害を考慮した津波フラジリティー曲線

図-11 は「被害の独立性」を考慮した設備被害も考慮した津波フラジリティー曲線である．津波による浸水被害で設備被害が発生した後に構造物被害が生じて，津波被害を拡大させていくことが確認できる．津波高さ（浸水深）がある閾値を超えると急激に被害が大きくなりことが説明できる．

(1) 重要臨海施設における津波対策の基本概念

重要臨海施設では，津波防護壁，耐震土堰堤や津波避難施設の設置が必要である．津波関連被害は広範囲に及ぶので，地域との連携も考慮して，総合的に評価しなければならず，津波に対する抗堪性だけでなく，速やかな津波対策の施設整備を考慮すると，経済性と即応性も重要臨海施設の津波対策では必要である．以上のことを，重要臨海施設での津波対策での基本概念として表-1 に示す．

表-1 津波対策における基本概念

①全体防御，拠点防御：

全体防御と拠点防御の複合防御

②抗堪性，経済性，即応性：

バランスのとれた津波対策

③地域との連携：

重要臨海施設と周辺地域との津波対策

(2) 津波対策の手順

図-12 の「被害の連鎖」に示すように、津波被害は、直接被害（1次被害）にとどまらず、設備の被害や道路の寸断等（2次被害）、救助活動の停滞や地域社会・経済活動への大きな影響（3次被害）が懸念されるので、被害の拡大を防止するためには、1次被害の拡大防止が非常に重要になる。

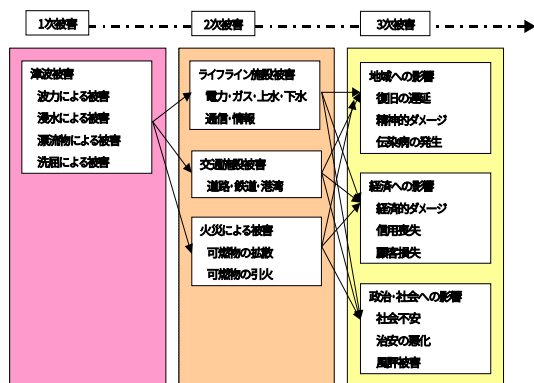


図-12 津波における被害の連鎖

「被害の連鎖」による被害の拡大で、多くの被災事例が発生し、思考回路の混乱が生じる。これを防ぐための方法として、図-13 に示す防災戦略を策定し、図-14 の津波性能マトリクスを用いるのが良い。

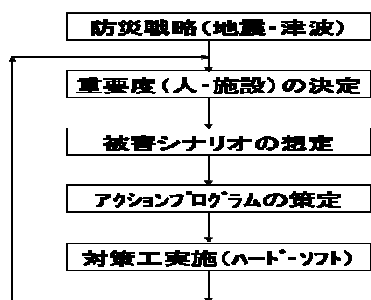


図-13 津波防災戦略の概略フロー

	耐津波性能1 （人命安全 完全使用可能）	耐津波性能2 （人命安全 部分的に使用可能）	耐津波性能3 （人命安全 補機類損傷）
津波	○	△	△
大津波 ^{※1} （10年に1回程度）	◇	○	△
巨大津波 ^{※2} （50～100年 に1回程度）	◇	○	△

重要度で左下に移動する

◇：大規模な自衛防施設
○：中規模な自衛防施設
△：小規模な自衛防施設

図-14 津波性能マトリクスと重要度の関係

津波対策では、全ての施設や構造物に対して津波被害を防御する対策工を実施することは現実的に難しい場合があるので、津波性能マトリクスや施設や構造物の重要度を考慮した防災戦略を立案し、津波対策費用に応じた防災対策工を実施するのが津波対策への第1歩になり、表-2 に示す津波対策の手順は、津波対策での基本概念を基に構築されている。

表-2 津波対策の手順

- ①津波被害危険性の認識
- ②設定津波
- ③津波関連被害の把握
- ④津波防災戦略の策定
- ⑤津波対策上必要な措置
- ⑥応急対策の基本的な考え方
- ⑦恒久対策の基本的な考え方

この津波対策の手順の各内容は津波が地震に比べて認知度が低く、津波波高のように地震の震度（加速度）のような単一の指標で津波の規模を表現することが難しいことを考慮している。

- ① 津波被害危険性の認識：津波の認知度が低いので、津波の危険性への理解を深める。
- ② 設定津波：波高、遡上高さや浸水深さだけでなく、波圧や流速も考慮する。
- ③ 津波関連被害の把握：施設の被害のみならず設備に対する被害も考慮した上で想定する。
- ④ 津波防災戦略の策定：津波対策工システムと施設の重要度、施設に襲撃する津波ランク、施設の被害レベルや施設や設備の津波脆弱性曲線を導入する。
- ⑤ 津波対策上必要な措置：策定した津波防災戦略に基づき、運用及び訓練を含めた施設の津波対策、避難計画、被害復旧計画を考慮し、また地域との連携を踏まえ、応急対策及び恒久対策を検討し、適宜実施可能なものから速やかに実施する。
- ⑥ 応急対策の基本的な考え方：策定した津波防災戦略に基づき、速やかに応急対策を実施するが、応急対策の基本的な考え方は甚大な津波関連被害を軽減し、速やかに実施可能なものとする。
- ⑦ 恒久対策の基本的な考え方：応急対策と同時に恒久対策も速やかに検討するものとする。

ここで紹介する津波対策工システムは図-15 に示す全体防御としての津波防護壁、津波防護壁を補完する耐震土堰堤、拠点防御として高い剛性と津波波力に対して転倒しない十分な安定性を有する受水槽を活用した津波避難施設からなる津波対策工をいう。

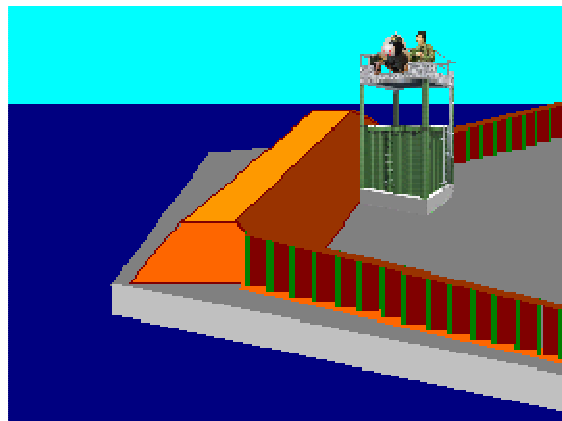


図-15 津波対策工システム

6. モデル工場での津波被害の評価と対策

図-16 に示すモデル工場での津波被害の評価と対策を行なう。モデル工場は生産施設、原材料や製品を扱う輸送施設、原材料を貯蔵する貯蔵施設 1 と 2、生産施設等に電気を供給する制御施設、生産施設等を管理する管理施設より構成され、海と川に囲まれているものとする。

図-17 は図-16 のモデル工場が津波で襲われた状況で、津波は海、川、排水口、取水口、地盤の低い所から来襲し、道路や管路を「津波の通り道」としている。電気系統は海水でショートして使用不能になり、電気を供給されている施設も使えなくなり、モデル工場全体で大きな被害が想定される。図-18 は図-16 のモデル工場に図-15 に示す津波対策工システムを設置したものである。図-19 は図-18 の津波対策を施したモデル工場が津波で襲われた状況で、耐震土堰堤で津波の侵入を防げるので、モデル工場全体で大きな被害が受けないものと想定される。

図-20 は図-18 の津波対策を施したモデル工場が震度 6 強の地震を受けて耐震土堰堤の一部が破損し、そこから津波が侵入した場合を想定したものである。道路や管路を「津波の通り道」となり、モデル工場全体が浸水被害を受け、輸送施設が一時使用不能になるものの、津波防護壁で各施設の浸水被害が免れ、津波避難施設で従業員が安全な高所に避難できるので、モデル工場では致命的な被害にはならないものと想定される。

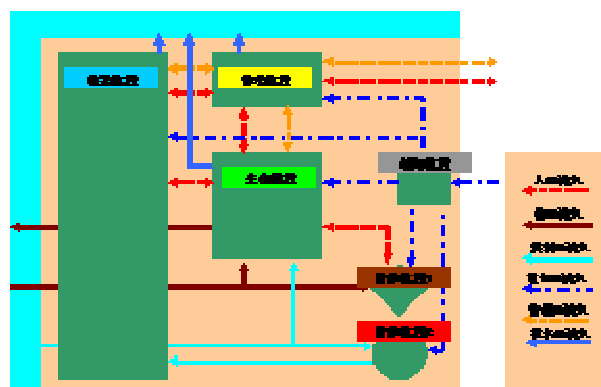


図-16 モデル工場（重要臨海施設）

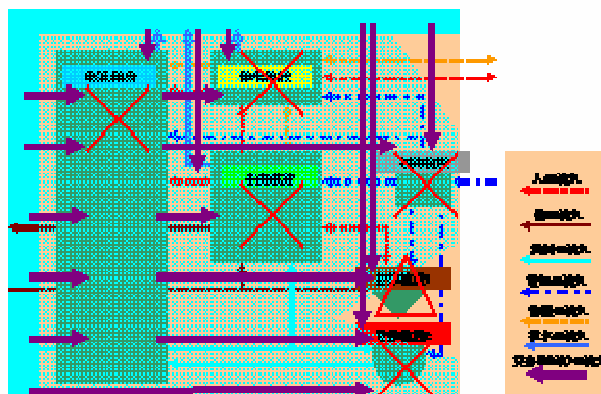


図-17 津波の来襲を受けたモデル工場

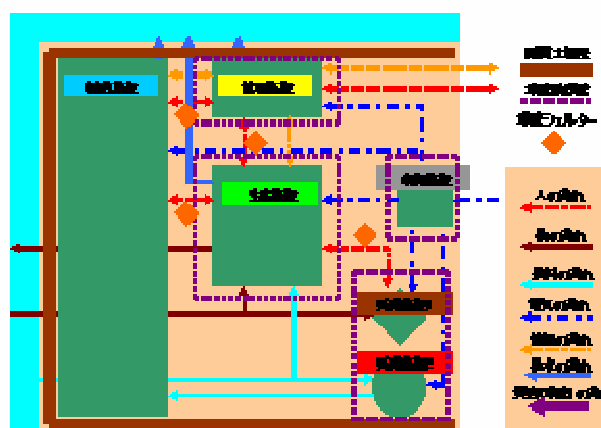


図-18 津波対策を施したモデル工場

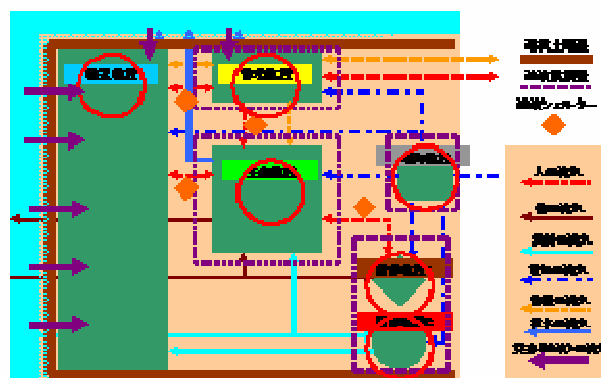


図-19 津波対策のあるモデル工場での被災状況

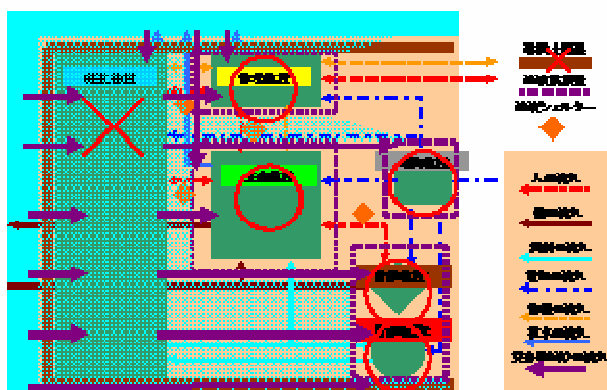


図-20 耐震土堰堤が破損した津波被災状況

7. おわりに

2004年インド洋大津波の被害分析から道路、鉄道、港湾、発電所、工場、石油配送ターミナル、浄水施設や通信・情報機器等の被害の他、空港閉鎖といった機能不全という被害から重要臨海施設の教訓を抽出し、津波対策を検討した。重要臨海施設でのプラント構造物の津波被害の程度を調べるために、津波脆弱性曲線を示し、津波高さ（浸水深）がある閾値を超えると急激に被害が大きくなることを確認した。これらの教訓から重要臨海施設のような重要施設に対して、津波に対する十分な抗堪性だけでなく、経済性と即応性も兼ね備えた簡易な津波対策の手順と簡便な津波対策工システムを提案した。

この津波対策工システムは、全体防御としての津波防護壁、津波防護壁を補完する耐震土堰堤や拠点防御としての高い剛性と津波波力に対して転倒しない十分な安定性を有する受水槽を活用した津波避難施設である。モデル工場で津波被害検討を行い、その有効性を確認した。

参考文献

- 1) 高梨和光：インド洋大津波の被害分析に基づく今後の津波防災への一提案，2004年12月26日スマトラ島沖地震報告会梗概集，日本地震工学会，2005。
- 2) 高梨和光他：インド洋大津波の被害分析に基づく防衛施設の緩衝型津波防護壁の一提案，防衛施設学会誌，pp61～72，第5号，2007。
- 3) 藤間功司他：静岡市中島浄化センターの東海地震・津波来襲時の被害予測について，地震工学論文集，土木学会，2007。
- 4) 野津厚：経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例，海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集，pp. 99～106，2005。
- 5) 大家隆行他：2004年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価，第53回海岸工学論文集，pp. 221-225，2006。
- 6) 中埜 良昭：第20 回海洋工学シンポジウム，日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会，2008。