

第2部 津波に耐える技術

1 はじめに

第二部は、海洋開発委員会技術部会津波対策専門部会内に設置された津波に耐える技術WGでの検討結果を取り纏めたものである。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、これまで営々と津波・高潮対策として築き上げてきた多くの防潮堤、防波堤を易々と乗り越え死者約1万9千人、被害総額16兆円～25兆円という甚大な被害を東北地方のみならず関東地方その他太平洋沿岸地域にも与えた。

この津波被害は、これまでの社会全般にわたる様々な常識を覆したとあっていい。そして現在、多くの分野で新たな考え方が提案されつつある状況にある。特に、建設業においては多くの教訓を我々土木技術者に与え計画・設計・施工の全ての面で、新たな施策や基準が提案されている。

津波に耐える技術WGは、この中でも特に建造物の耐える技術に着目し、東北地方太平洋沖地震津波によって被災を受けた多くの建造物の事例調査結果や、復興会議、中央防災会議の提言を受けて各省庁、団体から発信される情報に基づき、津波に耐える技術について検討し、情報を発信していくことを目的とする。

2 東北地方太平洋沖地震津波による構造物の被災の要因分析

2.1 各構造物の被災調査結果

2.1.1 湾口防波堤

岩手県の久慈、釜石、大船渡及び宮城県の女川の各湾口防波堤の調査を行った。これら4港の被害状況のうち、釜石湾口防波堤と大船渡湾口防波堤の被害状況について以下に示す。

(1) 釜石湾口防波堤

1) 被災状況

本防波堤の断面形状（図 2.2 参照）は波浪時の条件で決定され、津波は支配荷重とはなっていない。今回到達した津波高は約 T.P. +10m で防波堤の計画天端高 T.P. +4.0m を大きく超えるものであった。そのため、北堤をはじめとして堤体延長全域にわたり甚大な被害が発生した。しかしながら、釜石港の津波を数値計算で再現した結果、須賀地区にある釜石港験潮所の津波高さは、湾口防波堤によって 13.7m から 8.0m へ約 4 割低減でき、浸水を 6 分遅らせる減災効果があったとしている¹⁾。

図 2.3 に被災状況の詳細を示す。

北堤：44 函（深部 22 函、浅部 22 函）全長 990m のうち、浅部 3 区付近の 7 函以外はほとんど移動している。浅部に関しては原形をとどめているもの以外はほとんど水面上に姿が見られない。深部についてはわずかに水面上に姿をとどめているものが多いものの、大半が港内側に傾斜している。堤頭函も開口部側へ大きく傾斜している。

南堤：22 函（深部 19 函、浅部 3 函）全長 670m のうち、最深部（開口部側）から 10 函はほとんどそのまま残っている。11 函目が港内側へ大きく傾斜し、12 函目以降は水面上に見られない。

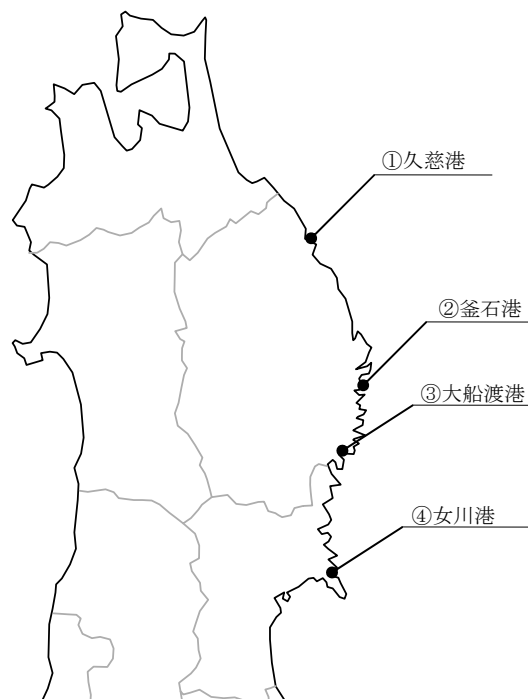


図 2.1 湾口防波堤調査位置図

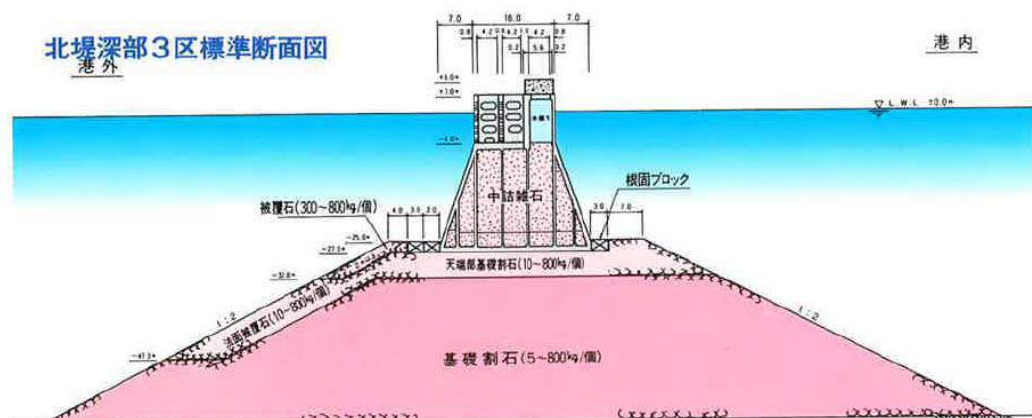


図 2.2 釜石湾口防波堤（北堤堤頭部；深部 3 区）の標準断面図²⁾

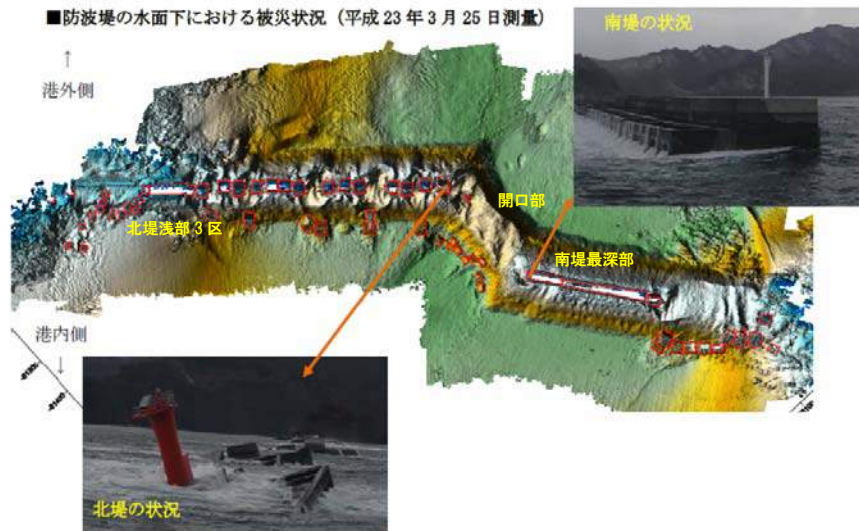


図 2.3 釜石湾口防波堤の被災状況³⁾に加筆

2) 被災原因

「津波の特性と津波による被害（富田、平成 23 年 4 月 8 日）」³⁾によると、ケーソン滑落の主な原因は、防波堤前・背面に大きな水位差が生じたことによる巨大な水圧の発生に加え、ケーソンの隙間（約 30cm）に非常に強い水流が発生し、越流とあいまって背後の捨石マウンドが崩壊したとされている。これらは東北地方整備局が被災要因⁴⁾として示している「越流洗掘型」や「津波波力型」に該当するものである（本章 2.2、表 2.2 参照）。

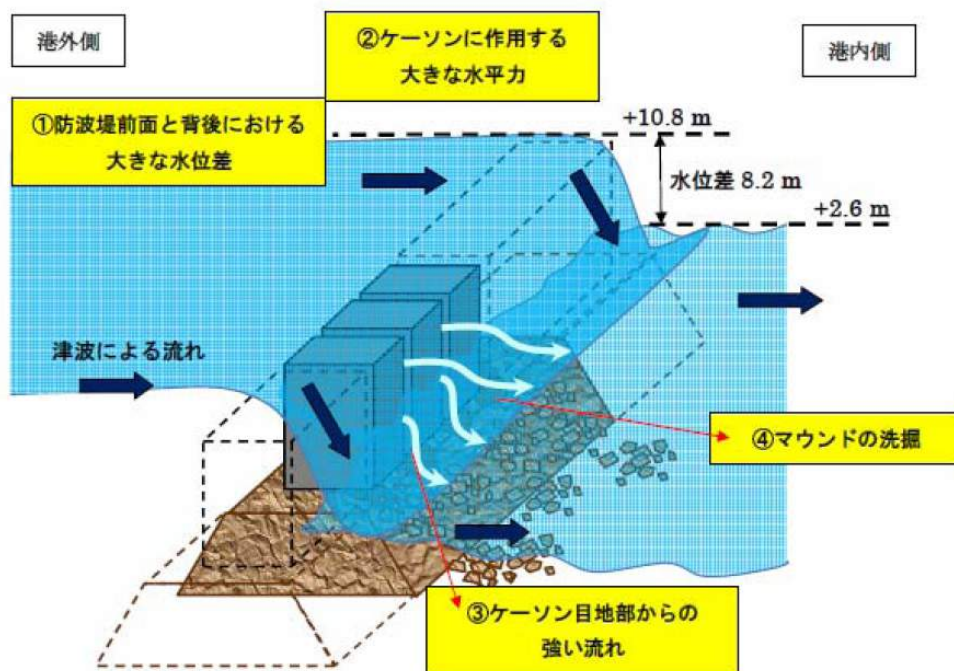


図 2.4 釜石湾口防波堤の被災原因³⁾

(2) 大船渡湾口防波堤

1) 被災状況

防波堤外側の痕跡（遡上）高は約 11m であり、津波は完全に堤体を越流していたと思われ、湾口防波堤（南 27 函 291m、北 21 函 244m）は南側基部の数函を除き完全に水没している。

2) 被災原因

本防波堤の構造は釜石湾口防波堤と同じケーソン式であり、被災原因は釜石湾口防波堤と同じ水流によるマウンドの崩壊と想定外の津波流水圧によるものと考えられる。

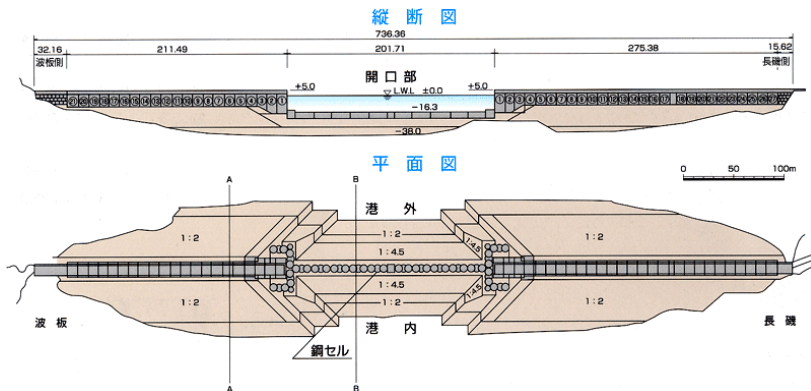


図 2.5 大船渡湾口防波堤の一般図⁵⁾



図 2.6 大船渡湾口防波堤の被災状況⁶⁾

2.1.2 防潮堤（堤防・護岸）

(1) 田老漁港海岸

岩手県宮古市田老地区は、盛岡から約 90km の沿岸部に位置し、人口が約 4400 人の地区である。同地区では、911 人の死者を出した昭和三陸沖津波の後から建設された「田老万里の長城」とよばれる世界最大級の防潮堤がある。

防潮堤の構造は、傾斜型であり、防潮堤高さ：T.P. +10.0m 延長：2.4km の規模である（図 2.7）。防潮堤は、構築年の異なる第 1 防潮堤～第 3 防潮堤から構成され、陸側と海側の中央で交差する X 字の 2 重防御壁になっている（図 2.8）。



図 2.7 被災前の防潮堤⁷⁾



図 2.8 被災防潮堤全体位置図⁸⁾

1) 被災状況

防波堤に到達した津波の波高：14.6m、遡上高：37.9m、浸水域：113ha。

防潮堤を超える津波の影響により、田老地区内3つの防潮堤の内、第2防潮堤は水門や防潮扉など基礎が堅固な構造物を除き全て破壊された(図2.9、図2.10)。防潮堤及び水門の破壊方向から、押し波のみでなく引き波でも破壊したことが推測される。また、第1、第3防潮堤は、破堤を免れたものの、越流した津波により堤内地の低地にあるほとんどの家屋は破壊された。

2) 被災原因

第2防潮堤のみが破堤した理由として、津波の進入角度が直角に近いと推定され、津波の力の作用が大きかったこと、想定を大きく超える津波力に対して、防潮堤自体の強度が不足していたこと等が考えられる。さらに、これまで津波の影響として考慮されていなかった越流および引き波による防潮堤法尻の洗掘や中詰め砂の流出が、防潮堤の破壊に大きく影響したものと推定される。

第2防潮堤と第3防潮堤の堤内地は人家の痕跡もないほど被災しているが、第1防潮堤内地の人家は破壊されたものの、痕跡を留めている(図2.11、図2.12)。これは第3防潮堤と第1防潮堤の二重の防潮堤により津波の力が減衰されたことや、引き波の力が防潮堤により阻害されたことなどが可能性として考えられる。この被災状況から、津波が防潮堤を超えた場合の減災機能の一つとして、二重防護が有効であると考えられる。



図 2.9 第2防潮堤の被災状況(左側が海)⁹⁾



図 2.10 第2防潮堤の被災状況(右側が海)⁹⁾



図 2.11 第1防潮堤内地の被災状況⁹⁾



※写真は被災瓦礫や損傷した車の仮置き状況

図 2.12 第 3 防潮堤内地の被災状況⁸⁾

(2) 岩手県山田町船越漁港

1) 被災状況

擁壁護岸が津波の押し波によりブロック毎に分断され移動・傾斜している（図 2.13）。

2) 被災原因

擁壁形式護岸において設計耐力を超えた津波による外力により全体系として耐えられず、護岸本体が傾斜や移動したと思われる。



図 2.13 護岸の移動・傾斜被災例¹⁰⁾

(3) 福島県いわき市豊間海岸

1) 被災状況

構造部材である護岸上部のパラペットが打継部で切断され倒壊している（図 2.14）。

2) 被災原因

嵩上げパラペットとして、後打ち施工されたと切断面から推定され、打継処理が良好では無い事で津波の外力に耐えられず破壊に至ったと考えられる。



図 2.14 パラペットの被災例¹¹⁾

(4) 福島県相馬市磯辺

1) 被災状況

堤防の被覆材が破壊・引き剥がされ内部が流出し崩壊している（図 2.15）。

2) 被災原因

津波により堤防の被覆材が破壊・引き剥がされ、若しくは、越流により護岸後背部が洗掘された事で内部の土砂が流出し、全体系として破壊に至っている¹³⁾。

破壊に至った過程を図 2.16 に示す。



図 2.15 堤防の被災例¹²⁾

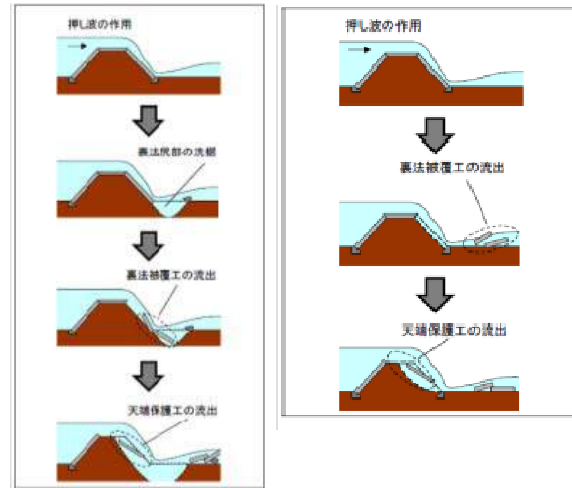


図 2.16 堤防の流出洗掘による破壊イメージ¹³⁾

2.1.3 水門・可動堰

東北地方太平洋沖地震、あるいはこの地震によって発生した津波による水門^{注1)}や可動堰^{注2)}の被害の特徴は、防潮堤や防波堤など、他の沿岸構造物の被害と比較して大きく異なる。水門と可動堰とでは、それぞれの設置目的や運用方法に差はあるが、いずれの施設においても、ゲートの開閉操作を行うための動力装置や制御装置、通信装置などが備えられている。そのため、一言で被災といっても、水門や可動堰においては、通常の防潮堤や防波堤では起こりえない停電や通信異常などの被災も含まれる。ここでは、以下の4つの施設の被災事例を挙げて、それらの特徴について述べる。

(1) 阿武隈大堰

場 所：宮城県岩沼市，阿武隈川の河口から 10.2km

形 式：シェル構造ローラーゲート^{注3)} (W43m×H3.8m) 10 門（うちフラップゲート^{注4)} 付 3 門）

完 工：1983 年

1) 被災状況

この施設の地震による被害は、管理棟の天井や壁面が剥がれて落下したことと、停電により電源設備の常用電源が失われたのみであった。常用電源が復旧したのは、地震発生から3日後の3月14日であったが、予備発電設備が備えられていたため、地震後も、施設を運用する上で必要な機能は保たれていた。北上大堰など、東北地方の太平洋側に河口を持つ他の河川に設けられた可動堰についても、停電によって失われた常用電源が予備発電設備によって補われており、地震によって、施設の運用上重大な問題が引き起こされたケースは少数であったということが後の調査で報告¹³⁾されている。一方、津波による顕著な被害は報告されていない。

2) 被災要因

この周辺の地域における、地震の本震による震度は6弱であった。また、この施設に津波の最大波が到達したのは、地震発生から86分後であり、堰管理用施設水位計において測定された津波の河川痕跡高はT.P.+5.39mであった。このとき、可動堰を構成するすべてのゲートは閉じられていた。到達した津波の流れは、閉じられたゲートの上を乗り越えて河川を遡っていたことが分かっており、ゲートを越える流れの深さは1m程度に達していたと推定されている。この施設の扉体は、図 2.17(b)

に示したように、扉体の底板が河川の下流側に面する構造となっているため、扉体下流側の水位が上昇した場合、扉体には浮力が働く。津波が作用して浮き上がっていた時の扉体の様子を図 2.17 に示す。この施設では、津波の力によって扉体が上下に押し動かされたものの、開閉装置や扉体を引き上げるためのワイヤロープに異常はみられず、その後の運用にも支障はなかった。扉体の浮き上がりの他、津波によって運ばれた小型船が扉体上に打ち上げられたが、これについても、扉体に大きな損傷はなく、表面の塗装が剥がれた程度であった。扉体上に打ち上げられた小型船の様子を図 2.18 に示す。他方、北上大堰でも、阿武隈大堰と同じように、津波の力によって扉体が浮き上がったと報告されている¹⁴⁾。北上大堰に備えられていたゲートの一部は、扉体が急激に押し上げられたことでワイヤロープを損傷し、さらに扉体も左右に傾いてしまったため、開閉操作が行えない状態に至ったものもあった。

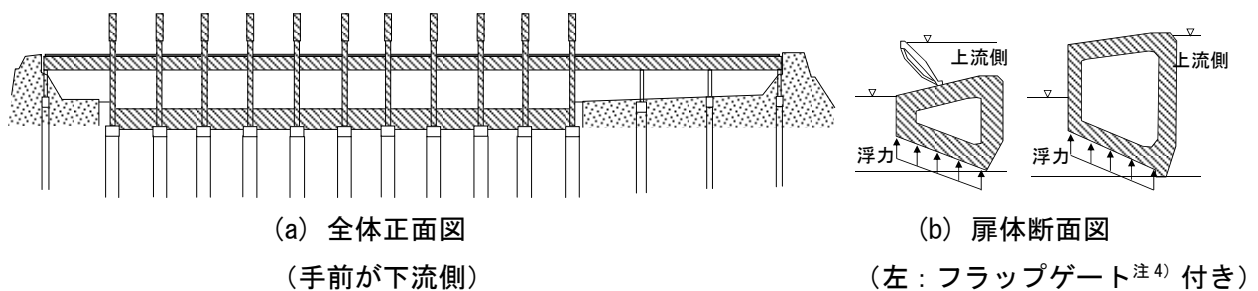


図 2.17 阿武隈大堰の構造を示す概略図¹⁴⁾



図 2.18 浮き上がっている扉体の様子



図 2.19 扉体上に打ち上げられた小型船

出典「国土交通省水管理・国土保全局，第3回東北地方太平洋沖地震津波を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会 資料5」（参考文献14）

(2) 閉上水門

場 所：宮城県名取市，名取川右岸の支川

形 式：桁構造ローラーゲート^{注3)} (W5.49m×H4.8m) 1門

完 工：1962年

1) 被災状況

この施設の地震による被害は、停電により常用電源が失われたことと、遠隔操作のための設備が倒壊したことである。さらに、他の水門施設と同じように、予備発電設備も備えられており、津波の到達までは水門の操作が可能な状態にあったが、津波によってこれらの設備が収められた発電機室が流失したため、結果的に電源は完全に失われている。

2) 被災要因

前述のように、施設を運用する上で重要な設備が地震により倒壊したケースは他の水門においてもあまりみられないが、地震の震度が他の地域と比べて大きかったことが要因と考えられる。この地域における地震の震度は6強であり、津波の最大波は地震の発生から70分後に到達し、この津波による浸水高は8.24m¹⁵⁾と記録されている。

通常、水門施設の周囲には、ゲートと同じ高さの堤防が築かれている。津波はこの堤防の高さを越えて堤内地に進入したため、堤防上に設けられていた発電機室は押し流され、同じ高さに備えられていた手元操作盤についても浸水により使用できない状態となった。一方、扉体や開閉装置には被害は生じておらず、ローラーゲートの扉体を支える門柱の上に設けられた管理棟は浸水を免れたため（図2.20の右下図参照）、仮設の発電設備を設置することで水門の機能は復旧している¹⁴⁾。



図 2.20 関上地区周辺の航空写真¹⁶⁾

(3) 野蒜水門

場 所：宮城県東松島市，東名運河の東端

形 式：マイターゲート^{注5)} (W17.5m×H7.5m) 1 対

完 工：2004 年

1) 被災状況

他の水門や可動堰と同じように、この施設も、地震による停電によって常用電源が失われている。その後、予備発電設備によって電源機能が補われ、遠隔操作により津波到達前にゲートは閉じられていた¹⁴⁾。一方で、この施設の津波による被害については、この地域特有の傾向がみられ、背後から津波の流れを受けて被災したことがわかっている。

2) 被災要因

この地域における地震の震度は6弱であり、津波の最大波は地震から60分後に到達し、この津波による河川の痕跡高はT.P.+7.5mであった。地震が発生した際、この施設のゲートは開かれていた¹⁴⁾。扉体の有効高さも河川の津波痕跡高も共にT.P.+7.5mであり、河川堤防の高さと津波の高さは、同じ程度であった。しかし、図2.21(b)の写真からもわかるように、東名運河周辺の地域は壊滅的な被害を受けている。これらのことから、この地域に進入した津波は、河川堤防からではなく、南側の石巻湾沿いの海岸（図2.22参照）から進入してきたものと考えられている。つまり、野蒜水門を含めた鳴瀬川右岸の防水施設の多くは、背後から津波の流れを受けていたことになる。この水門施設の扉体や開閉装置自体への津波による大きな損傷はないが、扉体の背後に堆積した瓦礫によっ

て、扉体は開閉できない状態となっており、背後からの津波によって被災した様子が伺える。図 2.23 に、重機を用いて水門背後に堆積した瓦礫を取り除いている様子を示す。堤防上に設けられていた操作室は、内部まで浸水したことによって予備電源装置の機能は失われたが、制御装置には異常はなかったと報告されている¹⁴⁾。

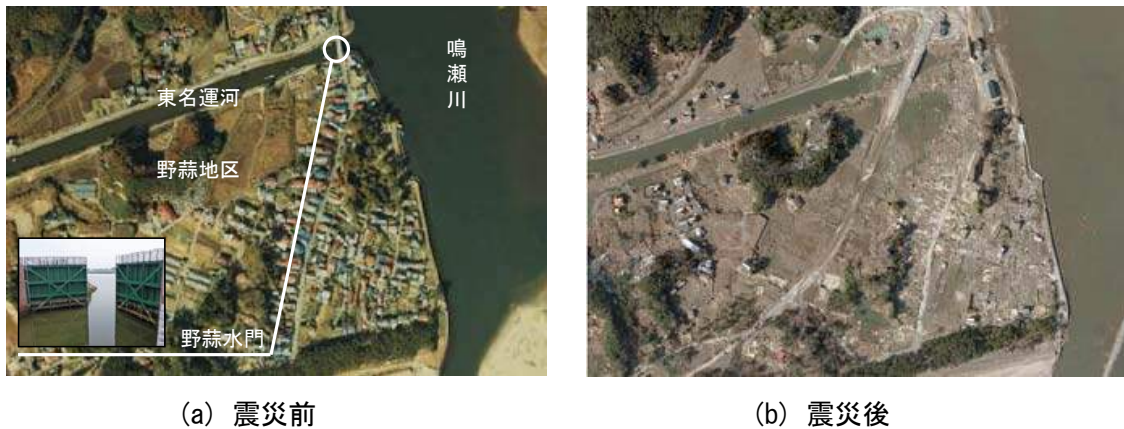


図 2.21 野蒜地区周辺の航空写真¹⁶⁾



図 2.22 東名運河周辺の広域図¹⁷⁾



図 2.23 野蒜水門背後に堆積した瓦礫

(4) 摂待水門

場 所：岩手県宮古市，摂待川の河口から 0.3km

形 式：シェル構造ローラーゲート^{注3)}2 門（水門部の全径間 75m×全高 13.7m）¹⁸⁾

完 工：1966 年頃

1) 被災状況

この施設では、地震による停電によって常用電源は失われており、予備電源設備も動作しなかったとされている。手動でのゲートの閉鎖が試みられたが、津波が到達した時にゲートが完全に閉じられた状態であったかどうかは確認されていない¹⁸⁾。図 2.24 (b) に示したように、この水門は、津波によって完全に押し流されている。普代や両石など、他の地域でも 20m を越える津波高が観測されているが、部分的に設備が損傷したケースがほとんどで、水門そのものが失われたケースは少ない。摂待水門に備えられていた扉体や門柱は、河川の数百 m 上流で見つっている。

2) 被災要因

この地域における地震の震度は 5 弱であったが、津波の高さは 27.9m¹⁵⁾ とされており、三陸海岸特有の入り組んだ地形によって、津波の高さが増幅されたと考えられる。宮古市への津波の最大波

の到達が地震発生から40分後であったことから、この地域への津波の到達も同じ頃であったと思われる。この施設の被害は、他の施設と比べて著しく、その要因は津波による波力と考えられるが、水門全体が押し流されるに至ったメカニズムについては、現時点では検証されていない。



(a) 震災前



(b) 震災後

図 2.24 上流側からみた摂待水門

出典「NPO 法人環境防災総合政策機構，東日本大震災における消防団活動の実態調査報告」（参考文献 19）

注1) 水門とは、高潮や洪水を防御するための施設で、周囲の堤防と同じ高さのゲートが備えられている。高潮や洪水が発生した時には、ゲートを閉じることで海水や河川水が堤内地に進入するのを防ぐ。また、平常時にはゲートを開き、内水を排除したり船舶が通航したりするために利用される。

注2) 可動堰とは、河川を横切るように設置され、潮位が上昇した時に海水が河川を遡るのを防ぐ施設であり、塩害の防止や取水などを目的として設けられる。可動堰に備えられているゲートの運用は、水門のゲートとは異なり、平常時に閉じられ、洪水時には、増水した河川水を放流するために開かれる。

注3) ローラーゲートとは、扉体の左右に設けられたレールに沿って、扉体を上下にスライドすることで開閉操作を行う形式のゲートで、扉体とレールの接触面にローラーが備えられていることで、扉体が水圧を受けている状態でも開閉操作を行うことができる。

注4) フラップゲートとは、流量調整を行うための起伏式のゲートで、阿武隈大堰では、ローラーゲート形式の扉体上にフラップゲート形式の扉体が設けられた構造が採用されている。

注5) マイターゲートとは、両岸に設けられた縦方向の回転軸を中心に扉体が旋回して開閉する両開きの水門で、扉体は外側に向かって開閉される（図 2.21 (a) の左下図参照）。両側の扉体は、中央で角度を持って互いに接触し合うことで外側からの水圧を支える。

2.1.4 防波堤(傾斜堤, 直立堤, 混成堤)

(1) 八戸港八太郎地区

- ・場 所：青森県八戸港
- ・形 式：ケーソン式混成堤



図 2.24 八戸港港湾図²⁰⁾

1) 被災状況

北防波堤では 3,496m のうち 1,870m (被災函数 142 函) が、また、中央防波堤では 2,257m のうち 20.95m (被災函数 1 函) のケーソンが転倒、水没した。



図 2.25 北防波堤の被災状況²¹⁾



図 2.26 中央防波堤の被災状況²¹⁾

2) 被災原因

a) 北防波堤(中央部)

津波の流れや越流に伴う渦等の影響でケーソン背面が洗掘を受け、最終的に堤体の支持力不足によりケーソンが滑動、滑落したものと考えられる²³⁾。

b) 北防波堤(ハネ部)

内外水位差等による直接的な津波力により、ケーソンが不安定となり滑動、転倒、支持力破壊が生じたものと考えられる²³⁾。

c) 中央防波堤

堤頭部周辺の流れにより、基礎マウンドが洗掘を受け、ケーソンの滑落が生じたものと考えられる²³⁾。

(2) 相馬港沖防波堤

- ・場 所：福島県相馬市
- ・形 式：ケーソン式混成堤（前面消波ブロック被覆）

1) 被災状況：

堤頭部の数箇所を除いてほとんどのケーソンが港内側へ2函分（ケーソン幅 15m）程度移動および傾斜しており、移動の大きいものはマウンドから滑落していると思われる（図 2. 26²³⁾～図 2. 28¹⁶⁾）。



図 2. 26 被災後の相馬港全景（奥にあるのが沖防波堤）²³⁾



図 2. 27 沖防波堤の被災状況²⁴⁾

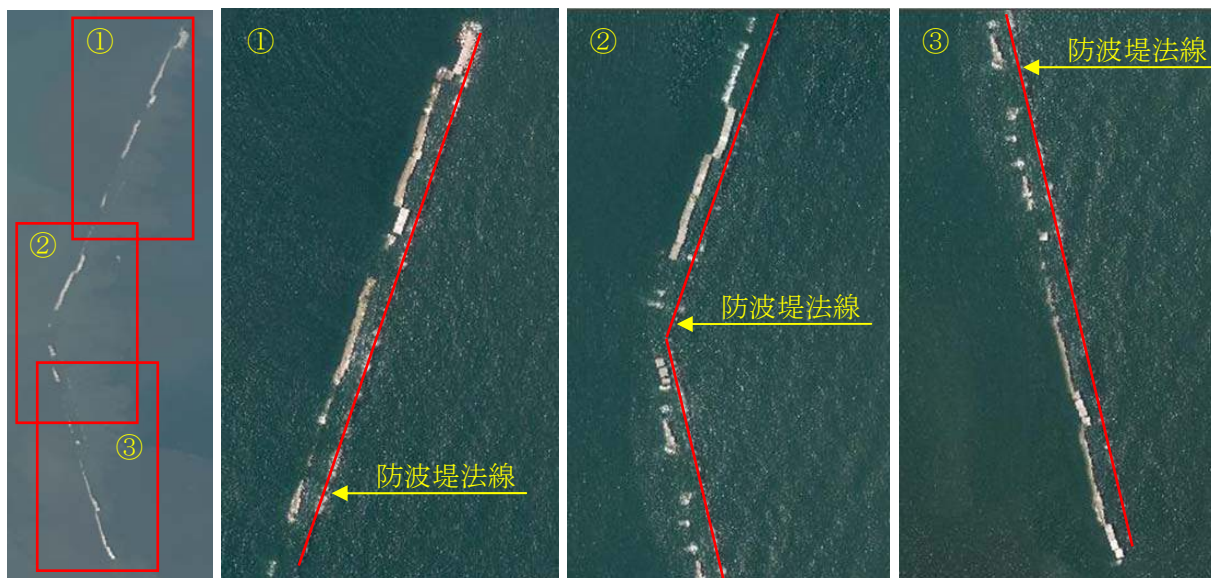


図 2. 28 沖防波堤のケーソン移動状況¹⁶⁾

2) 被災原因

沖防波堤の被災分類は津波波力型とされ、約 10m～14m の津波により以下のように崩壊したと考えられている。(図 2.29)

- ① 津波が越流する高さまで達し、津波波力と水圧によってケーソンが滑動し、マウンドから外れて傾斜・滑落した。
- ② ケーソンが大きく稼働した箇所から流入し、強い流れが発生した。
- ③ 強い流速によりマウンドに局部的な洗掘が発生した。

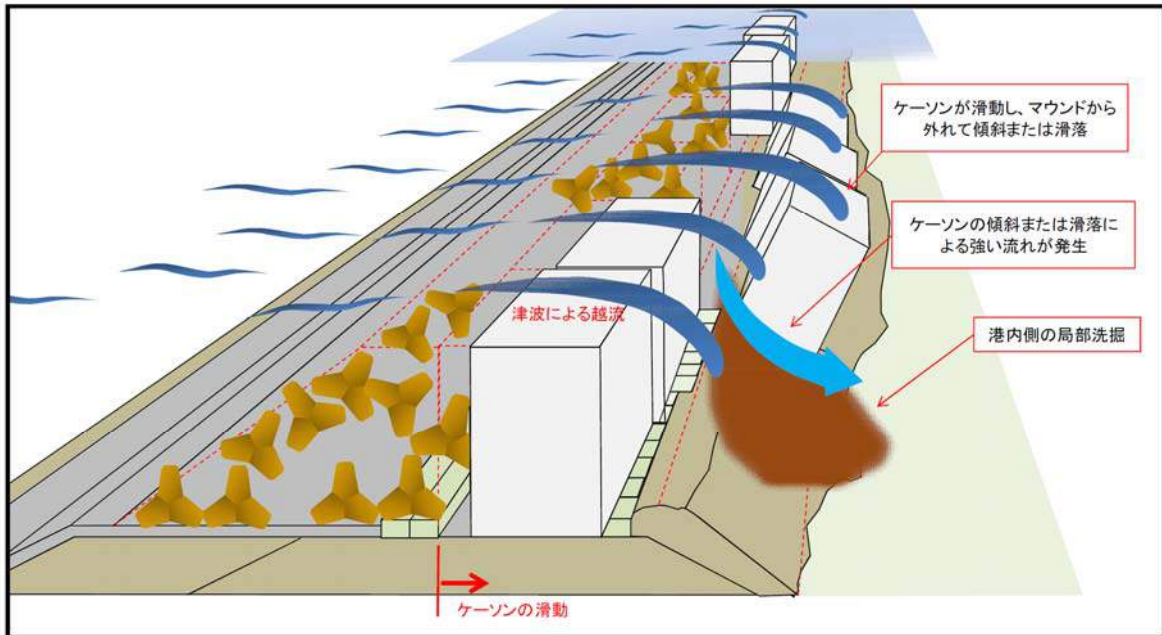


図 2.29 被災原因説明図⁴⁾

2.1.5 岸壁

(1) 青森県八戸港

1) 被災状況

重力式岸壁の隅角部でケーソンブロックが消失し、海へ開放されている部位から内部土砂が失われている(図 2.30)。

2) 被災原因

ケーソン岸壁の隅部前面底部が津波による強い流れで洗掘されてケーソンブロックが海中に転倒し、発生した解放部分から内部土砂が波に浚われ流出して破壊に至った²⁵⁾。



図 2.30 ケーソン岸壁被災例¹⁶⁾

(2) 福島県相馬港(ブロック積式岸壁)

1) 被災状況

岸壁にずれや転倒が生じている。背面土砂が流出しており上部舗装面が陥没している(図 2.31)。

2) 被災原因

ブロック部分が津波の押し引き波で移動・破損した事で内



図 2.31 ブロック積式岸壁被災例¹²⁾

部土砂が浚われ流出し、破壊に至ったと考えられる
(図 2.31)。

(3) 福島県相馬港(矢板式岸壁)

1) 被災状況

矢板が転倒して内背面土砂が流出し、上部舗装面が陥没している(図 2.32)。

2) 被災原因

地震による液状化現象により、矢板背面の土が陥没や変形した事で矢板や舗装が損傷し、津波に内部土砂が浚われ流出し、破壊に至ったと思われる²⁵⁾。



図 2.32 矢板式岸壁被災例²⁵⁾

(4) 宮城県気仙沼港

1) 被災状況

栈橋岸壁において上部工がすべて消失し、鋼管杭のみ残っている(図 2.33)。

2) 被災原因

栈橋上部工が津波の直接的な波力や揚圧力により、破壊消失したものである(図 2.33)。



図 2.33 栈橋式岸壁被災例²⁶⁾

2.1.6 離岸堤・潜堤・浮体

(1) 福島県いわき市永崎海岸(離岸堤)

部分的なブロックの崩れや沈下が見られるが、総じて大きな被災は報告されていない。なお、離岸堤については後述の「2.3 津波に耐えた構造物」でも紹介する(図 2.34)。



図 2.34 離岸堤被災状況²⁷⁾

(2) 福島県いわき市平豊間地区(潜堤)

被災状況が調査された報告は見当たらない。ただ、陸域の目視調査で潜堤箇所背後の護岸、建物等について、「潜堤箇所は若干被害が少ない」と報告されている(図 2.35)。



図 2.35 水面下の潜堤の位置表示²⁸⁾

(3) 宮城県気仙沼漁港浮体

杭で係留された浮栈橋の被災状況が報告されている。杭天端以上の津波の襲来により浮栈橋本体が流出している(図 2.36)。



図 2.36 浮体被災状況²⁶⁾

2.2 被災要因のとりまとめ

2.1 で調査した東北地方太平洋沖地震で津波による被災を受けた構造物について、被災要因を表 2.1 のとおり整理した。なお、表中の赤字は国土交通省東北地方整備局が類型化した被災形態⁴⁾を示したものである。

表 2.1 当WGで整理した東北地方太平洋沖地震津波による構造物別被災要因

構造物	被災要因
湾口防波堤	<ul style="list-style-type: none"> 越流による基礎マウンドの崩壊 津波波力による滑動 <p style="text-align: right;">・ 津波波力型</p>
防潮堤・護岸	<ul style="list-style-type: none"> 越流による裏法部の洗掘、中詰材の吸出しによる崩塊 引き波による洗掘・流水圧により海側に倒壊 押し波による破壊
水門・可動堰	<ul style="list-style-type: none"> 津波波力による破壊、扉体の流失 地震力による損傷
防波堤 (直立堤, 傾斜堤, 混成堤)	<ul style="list-style-type: none"> 越流による基礎マウンドの洗掘 津波波力による滑動 引き波により海側への滑動 <p style="text-align: right;"> ・ 津波波力型 ・ 越流洗掘型 ・ 堤頭部洗掘型 ・ 引波水位差型 </p>
岸 壁	<ul style="list-style-type: none"> 基礎の洗掘 地震力による損傷後、越流・引き波・吸出しにより被害拡大 液状化 <p style="text-align: right;"> ・ 控え工損傷型 ・ 本土工変状型 </p>
離岸堤・潜堤・浮体	<ul style="list-style-type: none"> 津波波力による流失 離岸堤, 潜堤の詳細は不明

赤字：東北地方整備局が類型化した被災形態⁴⁾

また、東北地方整備局(東北港湾における津波・震災対策技術委員会)が分類した防波堤および岸壁の被災パターンを表 2.2、表 2.3 にそれぞれ示す。

表 2.2 東北地整による防波堤の被災パターン別分類⁴⁾

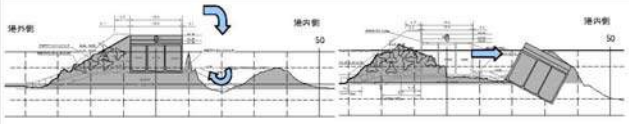
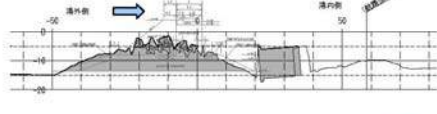


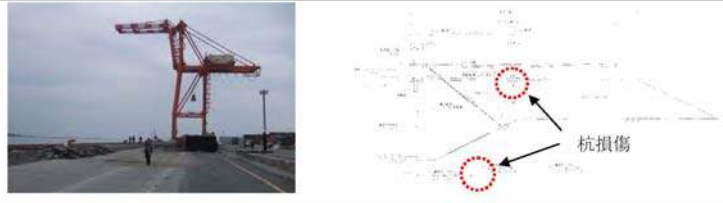
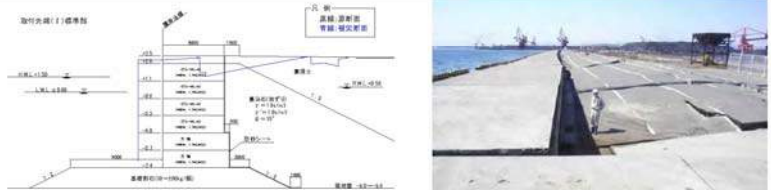
	分類	被災の概要	主な被災施設	被災状況
防波堤	超流洗掘型	内外水位差等による津波力だけでは、ケーソンの安定性に影響を与えるに至らないが、津波の流れや超流に伴う渦等の影響でケーソン背面(港内側)のマウンドまたは地盤面が洗掘を受け、最終的に堤体の支持力不足によりケーソンが滑動、滑落したもの	八戸港八太郎防波堤(中央部)	
	津波波力型	内外水位差等による直接的な津波力により、ケーソンが不安定となり滑動、転倒、支持力破壊が生じたもの	八戸港八太郎防波堤(ハネ部) 釜石港湾口防波堤(北) 大船渡港湾口防波堤 相馬港沖防波堤	
	堤頭部洗掘型	堤頭部周辺の流れにより、基礎マウンドが洗掘を受け、ケーソンの滑落が生じたもの	宮古港竜崎防波堤 宮古港藤原防波堤 八戸港中央防波堤 八戸港第二中央防波堤	
	引波水位差型	第一波の押波時の津波力や超流に伴う洗掘だけでは、不安定までには至らないが、引波時における内外水位差により、ケーソンが不安定となり滑動、転倒、支持力破壊が生じたもの	女川港防波堤	

表 2.3 東北地整による岸壁の被災パターン別分類⁴⁾

	分類	被災の概要	主な被災施設
岸壁	控工損傷型	設計で想定した以上の地震時荷重が作用したことにより、控工が損傷したもの	仙台塩釜港向洋地区 高砂埠頭2号岸壁 -14m
	本體工変状型	設計で想定した以上の地震力が作用したことにより、ケーソン等の本體工、エプロン部に変状が生じたもの	小名浜港7号埠頭 小名浜港5・6号埠頭 2号岸壁、先端護岸 小名浜港4号埠頭 2号岸壁、3号岸壁 小名浜港大剣埠頭 小名浜港藤原埠頭

	被災状況
岸壁	
	

海岸における津波対策検討委員会(国土交通省・農林水産省)では、防潮堤・堤防・護岸の被災パターンについて、表 2.4・図 2.37 のようにそれぞれ分類し、実際にはこれらが複合的に発生するとしている。

表 2.4 海岸における津波対策検討委員会による防潮堤の被災パターン別分類⁴⁾

押し波による裏法尻の洗掘	押し波による天端・裏法肩被覆工の流失	引き波による表法尻の洗掘	押し波の波力による波返工の倒壊
<p>押し波の作用</p> <p>裏法尻部の洗掘</p> <p>裏法被覆工の流出</p> <p>天端保護工の流出</p>	<p>押し波の作用</p> <p>裏法被覆工の流出</p> <p>天端保護工の流出</p>	<p>引き波の作用</p> <p>堤防表法の法尻部を洗掘</p> <p>表法部を被覆工の流失</p> <p>天端部の被覆工の流失</p>	<p>押し波の作用</p> <p>波返工の倒壊</p>

堤防	<p>押し波による被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン① 押し波による裏法尻の洗掘からの被災 ○ 被災パターン② 押し波による天端、裏法肩からの被災(裏法尻の洗掘なし) ○ 被災パターン③ 押し波による波返工の破壊 <p>引き波による被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン④ 引き波による表法尻の洗掘からの被災 ○ 被災パターン⑤ 引き波による波返工の破壊 <p>その他の被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン⑥ その他(直立堤の転倒・滑動、地震動による破壊等) 	<p>被災状況の分類</p> <p>全壊: 被覆工が全て流失し、盛土も残っていない状態(三面張り構造)</p> <p>半壊: 被覆工が一部流失した状態、又は被覆工が全て流失しても堤体土が残っている状態</p> <p>被災なし: 上記の被災が認められない場合</p> <p>【堤防の構造(例)】</p>
	護岸	<p>押し波による被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン① 押し波による波返工の破壊 <p>引き波による被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン② 引き波による表法尻の洗掘からの被災 ○ 被災パターン③ 引き波による波返工の破壊 <p>その他の被災パターン</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 被災パターン④ その他(地震動による破壊等)

図 2.37 海岸における津波対策検討委員会の堤防・護岸の被災パターン²⁹⁾

2.3 津波に耐えた構造物

東北地方太平洋沖地震の津波によって多くの港湾構造物が被災を受けたものの、その津波に耐えた構造物も存在する。ここでは、津波に耐えたもののうち、特徴的なものを抽出して記載する。

(1) 久慈港 湾口防波堤

東北地方太平洋沖地震津波で、久慈港では験潮場での津波高 8.6m³⁰⁾を観測しているにもかかわらず、湾口防波堤では大きな被災が報告されていない。

震災当時、久慈港の湾口防波堤は全延長北堤 2,700m 南堤 1,100mのうち、据付けが完了していたのはその一部(図 2.38)のみであったこと、そして設置済みのケーソンは上部斜面形状を有する新形式の防波堤形状を有していたことが分かっている。この形状は、波力を分散させて水平力を低減するとともに、その一部を自重に追加させることでケーソン本体および基礎マウンドを小さくする効果を狙ったものである(図 2.39)が、津波波力に対する低減効果としても機能した可能性がある。

また、防波堤が整備中であり延長のほとんどが開口部であったため、防波堤ケーソンの前背面での水位差が小さく済んだために、津波波圧が小さくて済んだことも想定される。

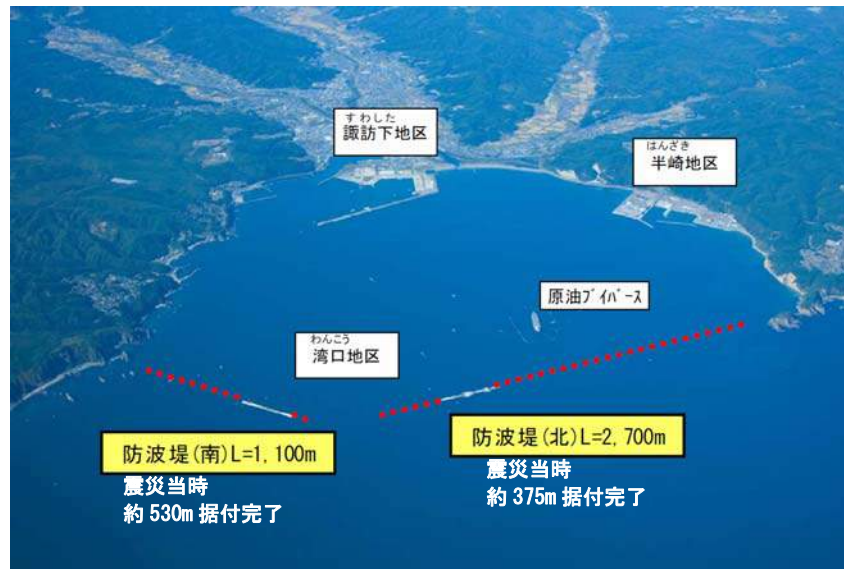
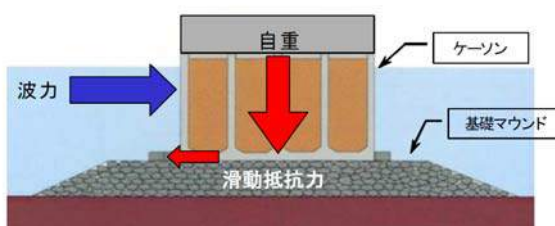


図 2.38 久慈港湾口防波堤全景³¹⁾

◇当初断面

【特徴】
波力に対してケーソン自重のみで安定を保つため、ケーソン本体及び基礎マウンドが大きくなる。



◇新形式防波堤断面

【特徴】
波力の分散により水平波力は低減され、かつ鉛直波力がケーソン自重に加わるため、ケーソン本体及び基礎マウンドを小さく出来る。

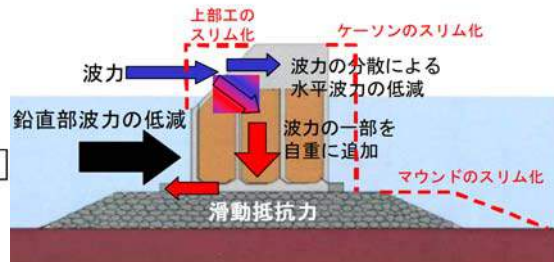


図 2.39 久慈港湾口防波堤ケーソン標準断面³²⁾

(2) 釜石港 湾口防波堤

釜石港では、東北地方太平洋沖地震津波で須賀地区の験潮所での津波高 9.3m³⁰⁾を観測しているが、北堤 44 函(全長 990m)では、浅部 3 区付近の 7 函を除く全てで傾斜または倒壊の被害を受けているのに対し、南堤では 22 函(全長 670m)のうち、最深部(開口部側)から 10 函と、ほぼ半数が残存した(図 2.40)。

この理由として、下記 2 点が挙げられる。

- ① 北堤で位置を維持できた浅部 3 区の 6 函のうち 5 函は摩擦増大マットが敷かれており、これによってねばり強く機能した可能性が考えられる³³⁾。
- ② 南堤では早期に 1~3 区のケーソンが滑落し、その範囲が広い開口となってケーソン内外の水位差が小さくなったことで津波波力を低減できた可能性が考えられる。

なお、釜石湾口防波堤の一部は、後述する小名浜港沖防波堤と同様の台形ケーソンであり、作用する波力の一部を自重に追加させる効果を備えていたが、地盤条件が良好で地盤安定上、底面幅が小名浜よりも小さかったため、波力の一部を自重に追加させる効果が小さかったことが倒壊の原因の 1 つと推測できる。

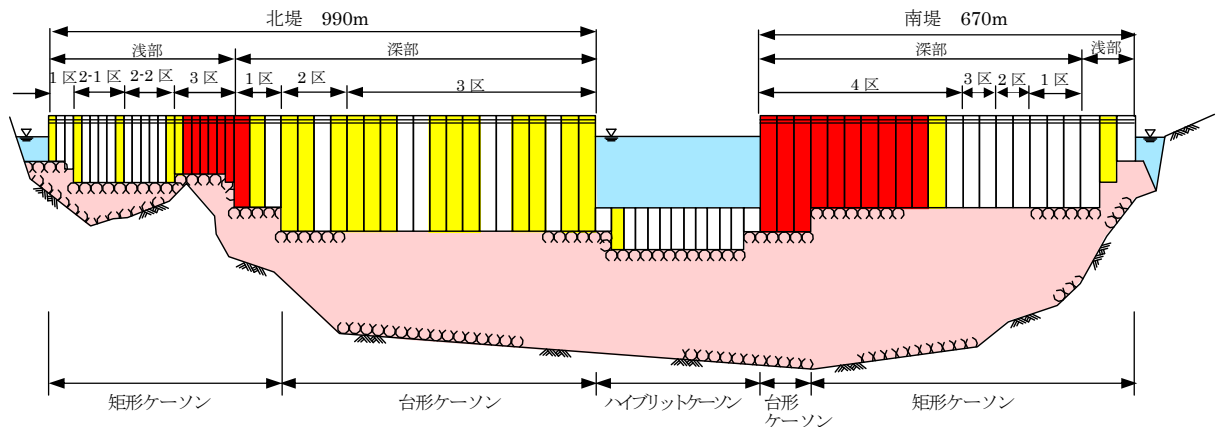


図 2.40 ケーソンの被災状況 (■ : 残存 ■ : 傾斜 □ : 倒壊)³⁴⁾



図 2.41 ケーソンの被災状況⁵⁾

国土交通省国土技術政策総合研究所では、東北地方太平洋沖地震の津波高(北堤前面における津波高 13.64m⁴⁾)で釜石湾口防波堤の滑动に対する安全率の計算を試みている(図 2.42)。

釜石の湾口防波堤は、もともと設計波高 $H_{max}=13.2m$ (風浪波高) において安全率 1.2 を満足できるように設計されていた(明治三陸津波の津波高 $H=8.8m$ では安全率 2.0~3.0 に相当)。ただし、防波堤の両端部(浅部)では設計波高(風浪波高)が小さくなることを考慮し、堤体幅を小さくした経済設計がなされていた。

東北地方太平洋沖地震の津波波力で計算すると、防波堤の両端部(浅部)ではこの小さな堤体幅が弱点となり安全率は 1.0 以下となった。中央部(深部)では設計波高(風浪波高)が大きく堤体幅も大きい、東北地方太平洋沖地震における津波波力での安全率は 1.0 周辺であり倒壊してもおかしくない状況となった。

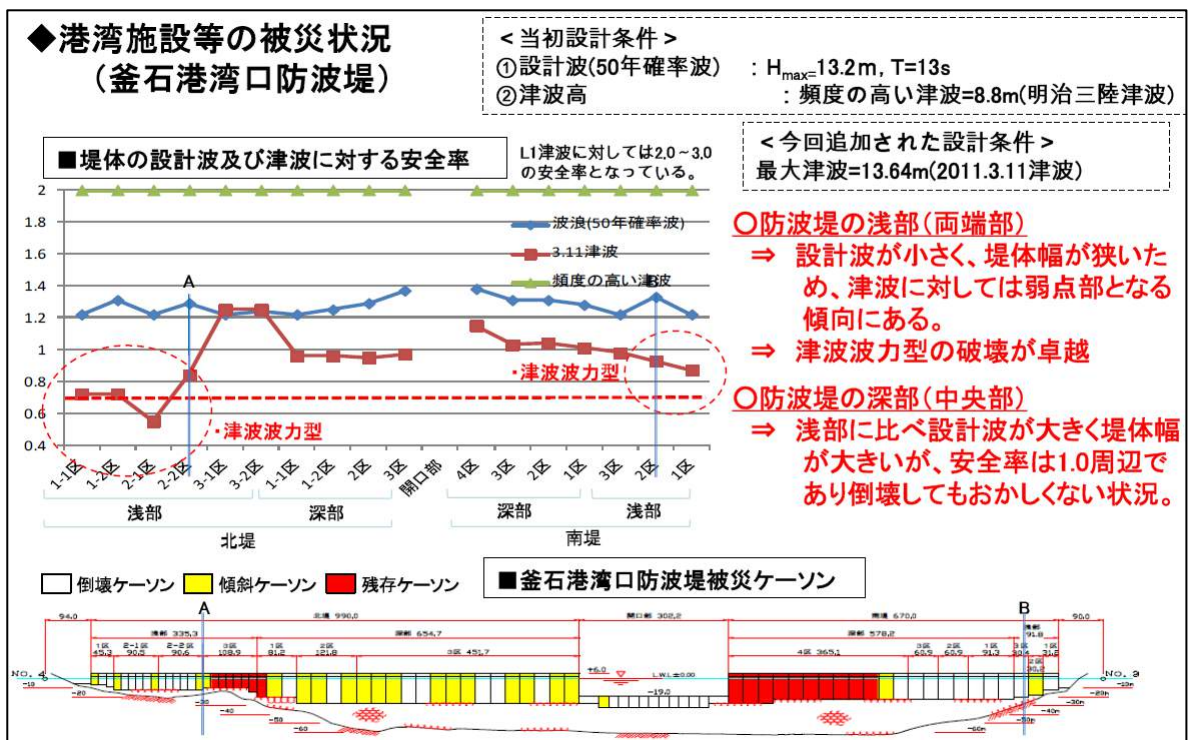
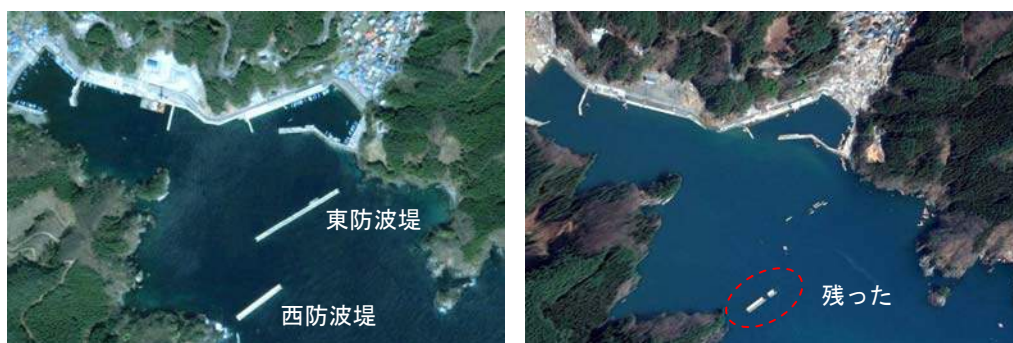


図 2.42 釜石湾口防波堤の東北地方太平洋沖地震における津波での計算結果³⁴⁾

(3) 唐丹漁港防波堤

唐丹(とうに)漁港の防波堤は、平成 16 年に災害を受けて復旧した際に、西防波堤の港内側に 5.5m 厚の捨石被覆を行っていた。

東北地方太平洋沖地震津波で、東防波堤はほぼ全倒壊したのに対し、西防波堤では両端部を除いてねばり強くその場に残存した³⁵⁾。この捨石被覆が、ケーソンの滑動抵抗として有効に働き、ねばり強く耐えたためと考えられる。



(a) 被災前

(b) 被災後

図 2.43 唐丹漁港の防波堤ケーソンの被災状況³⁵⁾

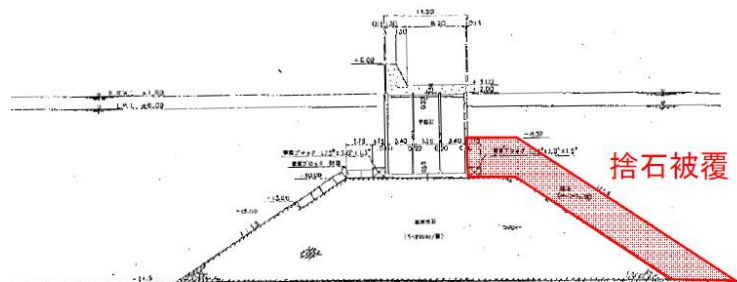


図 2.44 西防波堤の標準断面図³⁵⁾

(4) 相馬港 北防波堤・南防波堤

相馬港では、東北地方太平洋沖地震津波で験潮所観測津波高 8.9m³⁰⁾を受け、沖防波堤は総延長 2,730mのうち北側の堤東部から4函を除いてすべてのケーソンが滑動し、港内側に傾斜またはマウンドから転落して水没していた。また、防波堤前面の消波ブロックも移動し、ほとんどが水面下に没した状態となっていた。

一方、沖防波堤よりも港内側にある北防波堤および南防波堤はほとんど被災していない。これは沖防波堤による津波低減効果があったためと推察されている²⁵⁾。



図 2.45 相馬港防波堤全景¹²⁾



図 2.46 相馬港 沖防波堤の被災状況²⁵⁾

(5) 小名浜港 沖防波堤

小名浜港では、東北地方太平洋沖地震津波で検潮所観測津波高 3.3m³⁰⁾を受けているが、沖防波堤、西防波堤(第一)および西防波堤(第二)には被災がほとんど見られなかった。小名浜港では水深 27m 程度の最深部で軟弱な粘土層が-30m 付近から-60m 付近に堆積しており、地盤安定上、設置圧を小さくするために幅広の底面を有する台形断面ケーソンが採用されている。

この形状は作用する波力の一部を自重に追加させることができ、久慈港の湾口防波堤と同様に、津波波力を分散させて水平力を低減できた可能性が考えられる。



図 2.47 小名浜港 沖防波堤全景³⁶⁾

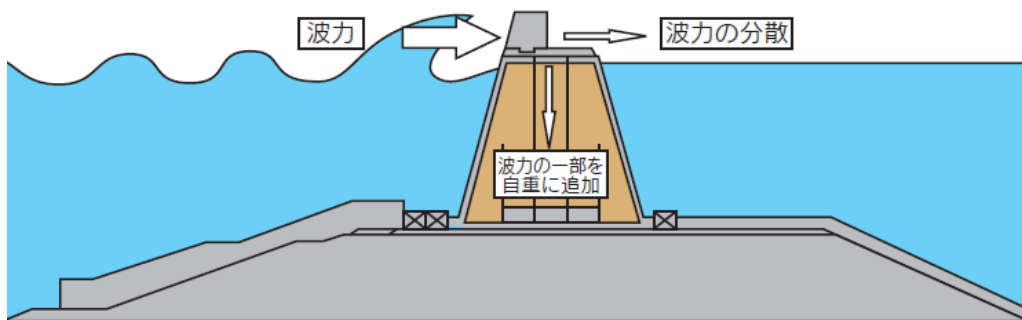


図 2.48 小名浜港 沖防波堤ケーソン標準断面³⁷⁾

(参考) 台形ケーソンは底面幅が 40m と広いので、小名浜港の既存のケーソン製作ヤードの能力の制限を受けて一体製作は不可能であった。このため、台形ケーソンを港外側、港内側に 2 分割して製作し、それぞれ海上に引き出した後、浮遊させたまま 2 函を接合し、PC 鋼棒を用いて緊張することにより 1 函の大型台形ケーソンとする「大型台形ケーソン海上浮上接合法」が採用された³⁸⁾。

(6) 離岸堤

離岸堤については、震災後も大きな被災を受けていないといくつか報告されている。この理由として、ブロックのかみ合わせによって津波波力にねばり強く抵抗した可能性が考えられる。ここでは、離岸堤が大きな被災を受けていない旨の報告例をいくつか紹介する。

1) 石巻港の港外北側

港湾空港技術研究所の調査にて、石巻港の港外北部の離岸堤は「がれきのため海岸からでなく遠方高台からの目視となったものの、離岸堤群の内2基は大きく被災しているようには見えなかった。」⁴⁾と報告されている。



図 2.48 石巻港 港外北部の離岸堤(震災後)¹²⁾

2) 宮城県深沼海水浴場海岸(荒浜海岸)

港湾空港技術研究所の調査にて、深沼海水浴場海岸は「離岸堤のブロックは飛散しておらず、安定している様子であった。」²⁵⁾と報告されている。



図 2.49 深沼海水浴場海岸の離岸堤(震災後)³⁹⁾

3) 久慈港半崎地区の離岸堤

港湾空港技術研究所の調査にて、「半崎地区の沖にある離岸堤は若干の沈下があったように見えたが、天端は海面上に見えた。」²⁵⁾と報告されている。



図 2.50 半崎地区の離岸堤(震災後)²⁵⁾

【参考文献】

- 1) 釜石港における津波被害の数値計算による再現結果, 2011年3月31日, 独立行政法人 港湾空港技術研究所
- 2) わが国の海洋土木技術, 社団法人 日本海洋開発建設協会 海洋工事技術委員会
- 3) 富田孝史, 津波の特性と津波による被害, 東日本大震災特別委員会総合調査団 調査速報会, 2011年4月8日, 公益社団法人 土木学会
- 4) 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 第三回, 2011年9月, 国土交通省 東北地方整備局
- 5) 国土交通省 東北地方整備局 釜石港湾事務所ホームページ
- 6) 釜石港, 大船渡港調査速報, 2011年3月24日, 独立行政法人 港湾空港技術研究所
- 7) 沿岸域の防災対策技術 安全・安心な海辺空間をめざして, 社団法人 日本建設業連合会
- 8) 東日本大震災現地調査報告書, 東京大学工学部社会基盤学専攻橋梁研究室, 横浜国立大学山田・勝地・西尾研究室
- 9) 本大震災(速報)～岩手県宮古市・田老地区の被災状況～, 岩手県立大学総合政策学部教授 元田良孝, 助教 宇佐美誠史
- 10) 能勢鋼材株式会社ホームページ
- 11) 豊間海岸前, フォト蔵みんなの写真
- 12) 宮城県・福島県 津波被害調査, 公益社団法人 土木学会 海洋開発委員会 早稲田大学隊
- 13) 平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方について, 2011年11月16日, 国土交通省 海岸における津波対策検討委員会
- 14) 国土交通省水管理・国土保全局, 第3回東北地方太平洋沖地震津波を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会 資料5
- 15) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ現地調査結果, 公益社団法人 土木学会 海洋開発委員会
- 16) 国土交通省 国土地理院ホームページ, 被災地地域の空中写真(電子国土Webシステム版)
- 17) 国土交通省国土地理院, 数値地図25000(地図画像)『松島』・『小野』・『塩竈』・『宮戸島』
- 18) 土木学会水工学委員会, 東日本大震災調査報告書
- 19) NPO 法人環境防災総合政策機構, 東日本大震災における消防団活動の実態調査報告
- 20) 国土交通省東北地方整備局 八戸港湾空港整備事務所 ホームページ
- 21) 港湾施設及び海岸保全施設の被害状況【八戸港】, 国土交通省東北地方整備局港湾空港部
- 22) 東日本大震災における港湾被害状況及び復旧・復興について, 2011年9月29日, 国土交通省東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所, 第12回新潟技調講演会基調講演要旨
- 23) 相馬港・小名浜港調査報告(速報)【津波グループ】, 調査日;2011.4.5～7, 調査担当部署;独立行政法人 港湾空港技術研究所 港湾研究部, 国土交通省 国土技術政策総合研究所
- 24) 国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所, 2011年4月25日記者発表資料, 「平成23年東北地方太平洋沖地震」による港湾周辺の津波調査を実施
- 25) (独)港湾空港技術研究所資料No.1231, 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速報, 独立行政法人 港湾空港技術研究所
- 26) 事例報告: 東日本大震災地盤工学会中国支部調査団報告 沿岸部の被害状況, 公益社団法人 地

盤工学会

- 27) 東北地方太平洋沖地震被災状況，一般社団法人 全日本建設技術協会
- 28) 広野町～いわき市調査報告，2011年5月7～8日，公益社団法人 日本技術士会 防災支援委員会
- 29) 海岸堤防等の被災状況分析，海岸における津波対策検討委員会 第三回（2011年11月15日開催），資料3，国土交通省・農林水産省
- 30) 報道発表資料 2011年4月5日，気象庁，国土交通省 気象庁
- 31) 港湾事業再評価 久慈港湾口地区防波堤整備事業及び久慈港海岸直轄海岸保全施設整備事業，平成22年度事業評価監視委員会(第3回)資料12-1，国土交通省 東北地方整備局
- 32) 久慈港湾口地区防波堤整備事業及び久慈港海岸直轄海岸保全施設整備事業前回評価後5年経過，国土交通省 東北地方整備局
- 33) (独)港湾空港技術研究所資料 No.1251 釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討—水理特性を中心とした第一報—，独立行政法人 港湾空港技術研究所
- 34) 東日本大震災報告会～港湾の被災による物流等への影響と地震・津波対策～，2012年3月13日，国土技術政策総合研究所(横須賀) 浦辺信一
- 35) 平成23年度水産工学関係研究開発推進会議 水産基盤部会報告書 ～ 東日本大震災からの漁港漁村の復興に向けて ～，2012年3月，独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所
- 36) 国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所ホームページ
- 37) ふくしま浜街道 June.2005.Vol.21，国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所
- 38) プレストレストコンクリート工学会 会誌 Vol.34, No.4, Jul.1992 工事報告「P C鋼棒を用いた台形ケーソンの海上浮遊接合工法の開発（小島朗史）」，公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会
- 39) 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会(第3回)」，内閣府

3 ねばり強い構造物

3.1 ねばり強い構造物に関する各関係機関の考え方

ねばり強い構造物に関して、各関係機関がどのように考えているかを調査した。

3.1.1 内閣府(東日本大震災復興構想会議)

2011年4月23日の第2回東日本大震災復興構想会議¹⁾にて、村井宮城県知事の提出資料に、「施設復旧に当たっては単なる原形復旧にとどまらず被災後も一定の機能を維持するよう十分に配慮するなど、壊滅的なダメージを回避するねばり強い県土の構造となるように整備を進める」とうたわれた。これが、震災後に初めてうたわれた「ねばり強い」である。

これ以降、各関係機関で表現は異なるものの、従来の「設計以上の荷重で耐えられない」構造から新しい「ねばり強い」構造へ見直す必要があることが提言されるようになった。

2011年6月25日の第12回東日本大震災復興構想会議²⁾では、これまでの防波堤・防潮堤等の「線」による防御から、河川、道路、まちづくりも含めた「面」による「多重防御」への転換が必要であり既存の枠組みにとらわれない総合的な対策を進めなければならないとし、道路や鉄道などの公共施設の盛土を防災施設である二線堤として位置付けるべきであること、学校や鉄道の整備にあっても「減災」の観点を組み入れることなどがうたわれた。そして、防波堤・防潮堤については、比較的頻度の高い津波、台風時の高潮・高波などから陸地を守る性能を持ったものとして再建するため、今回のような大津波に際しては、水が乗り越えても倒壊はしないねばり強い構造物とするための技術的再検討が不可欠であるとされた。

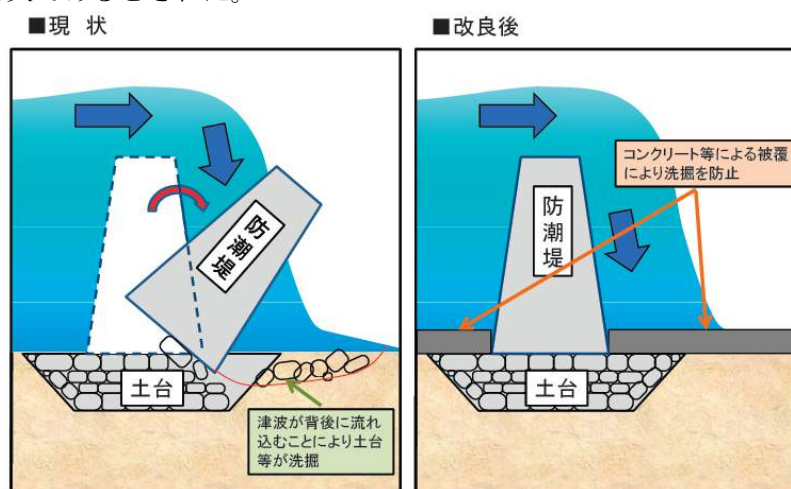


図3.1 復興構想会議で示されたねばり強い防潮堤の案²⁾

3.1.2 内閣府(中央防災会議)

2012年5月28日の中央防災会議「第1回東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」³⁾において、委員等からの意見として、「大津波対策としてレベル1とレベル2に分けて考えなくてはならないが対策を進めるには制度・基準も必要である。また、レベル2に対し、防災施設がねばり強く機能することを求める必要がある。」と示され、2012年6月13日(第2回)⁴⁾では、「想定を超えたときに、全く機能しなくなることがないように、ねばり強い対応をなされることが是非必要である。」とうたわれるなど、ねばり強い構造物が必須であると考えられるようになった。

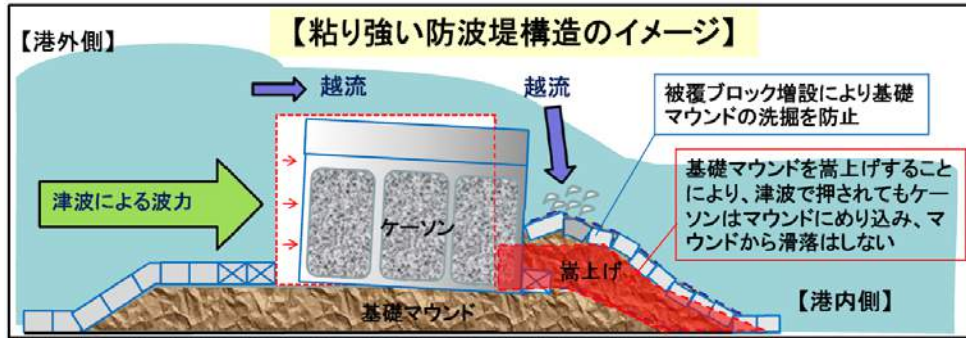


図 3.2 中央防災会議で示されたねばり強い防波堤構造のイメージ⁵⁾

2012年6月26日(第4回)の会議⁶⁾では、「ねばり強く完全には壊れない、形を保てるような構造物にしたい。レベル1の津波に対しては完全に安定な構造物であり、レベル2の津波に対しては、ある程度は破壊されても津波を低減する機能を保持できるようにしたい。」との意見とともに、ねばり強さの具体的な向上手段(図 3.3)が示された。

粘り強さの向上手段

- 波返し: 配筋の強化
- 堤防: 3面被覆の一体化、水たたきの延長、堤体幅の延長
- 護岸: 海側の根固の強化
- 胸壁: 地上接合部の強化
- 防波堤: 根固工による滑動抵抗の増強
- 海岸林: 砂丘の大型化
- 砂浜: 堤防との一体機能を利用
- 二線堤: 津波の減衰との組み合わせが、より効果的

- 高地移転: 避難路の確保による生命の安全性の向上
- 避難ビル: ネットワーク化による避難安全性の向上

図 3.3 中央防災会議で示されたねばり強さの向上手段⁶⁾

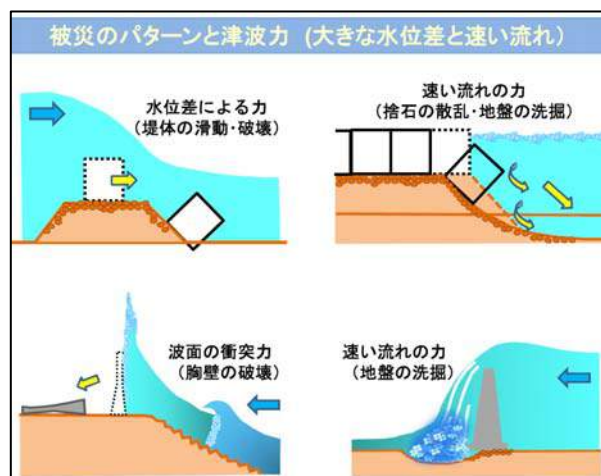


図 3.4 中央防災会議で示された被災のパターンと津波力⁶⁾

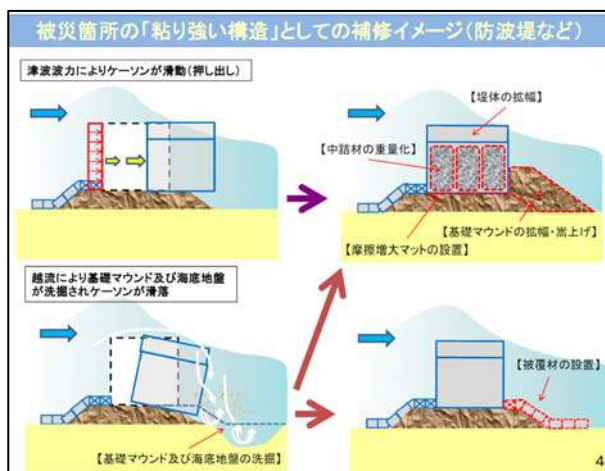


図 3.5 中央防災会議で示された被災のパターンと津波力⁶⁾

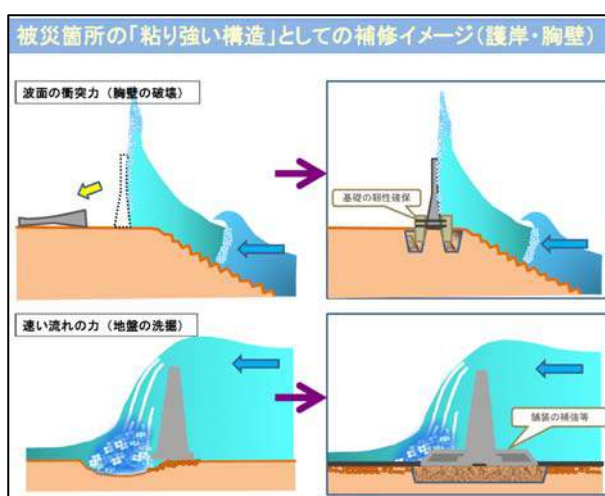


図 3.6 中央防災会議で示された補修イメージ(護岸・胸壁)⁶⁾

2012年9月28日(第12回最終)の会議⁷⁾では、報告(案)要点として整理し、このなかで地震・津波に強いまちづくりとして多重防護と施設整備を取り上げて「津波による浸水被害を軽減し、避難のためのリードタイムを長くするため、ねばり強い海岸保全施設等や多重防護としての道路盛土等交通インフラの活用等による二線堤を整備する」とうたっている。

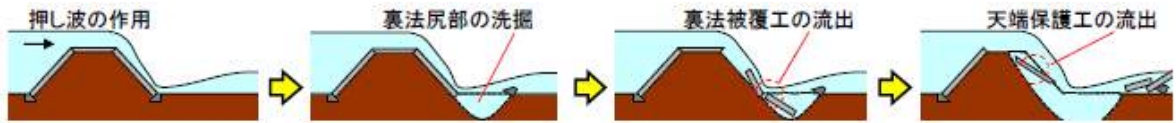
3.1.3 国土交通省・農林水産省(海岸における津波対策検討委員会)

国土交通省・農林水産省「海岸における津波対策検討委員会」⁸⁾では、青森県から千葉県において津波の高さや海岸堤防等の被災状況等を調査し、被災形態の特徴等を整理している。この調査結果を踏まえ、被災メカニズムを想定し、ねばり強く効果を発揮する海岸堤防等の構造として図 3.7 に示す3点を抽出している。

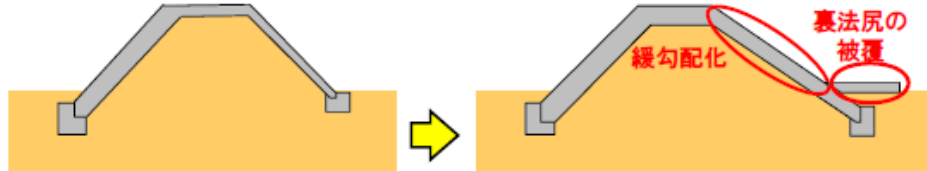
「ねばり強い構造」の基本的な考え方：設計対象の津波高を超え、海岸堤防等の天端を越流した場合でも、施設の破壊、倒壊までの時間を少しでも長くする、あるいは、全壊に至る可能性を少しでも減らすことを目指した構造上の工夫を施すこと。

① 裏法尻部、裏法勾配

被災形態：津波が海岸堤防を越流した後、裏法尻部の地面等を洗掘。これをきっかけに裏法被覆工等の損壊、流失等を引き起こす。

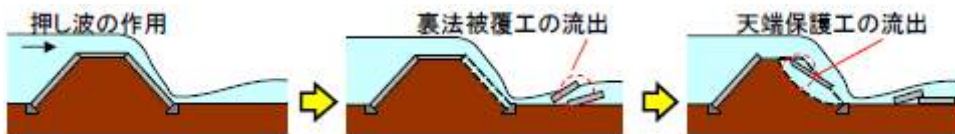


工法：裏法尻部に保護工を設置すること等により被覆。さらに、裏法尻部の被覆に加え、裏法を緩勾配化。

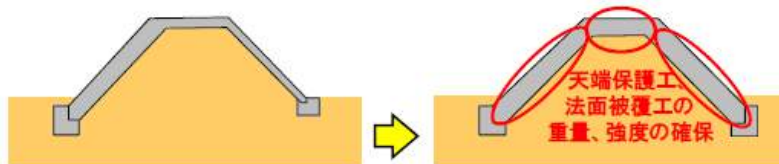


② 天端保護工、裏法被覆工、表法被覆工

被災形態：津波の高速な水流による天端保護工、裏法被覆工の流失や堤体土の吸出し（引き波においても同様の被災形態が考えられる）。

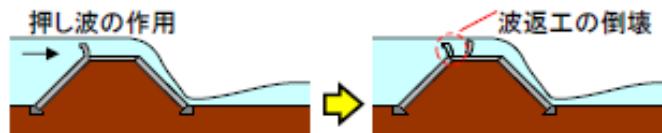


工法：天端保護工や裏法被覆工、表法被覆工の部材厚の確保、部材間の連結（重量や強度の確保）。



③ 波返工

被災形態：津波の波圧の作用による、波返工の倒壊等。



工法：天端まで盛土構造とする工法（海岸堤防の設計外力を高潮でなく津波とする場合）の検討や、波返工を採用する場合、配筋による補強。

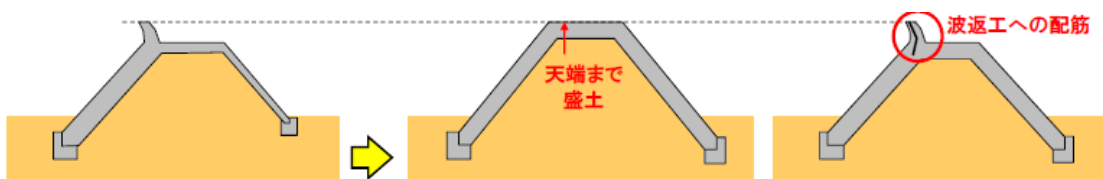


図 3.7 海岸における津波対策検討委員会で示されたねばり強い構造案⁸⁾

なお、国土交通省仙台河川国道事務所では2012年3月13日の海岸堤防復旧工事にて図3.8のねばり強い構造のイメージを提案され、仙台湾南部海岸堤防復旧工事にて実施工が始まっている。

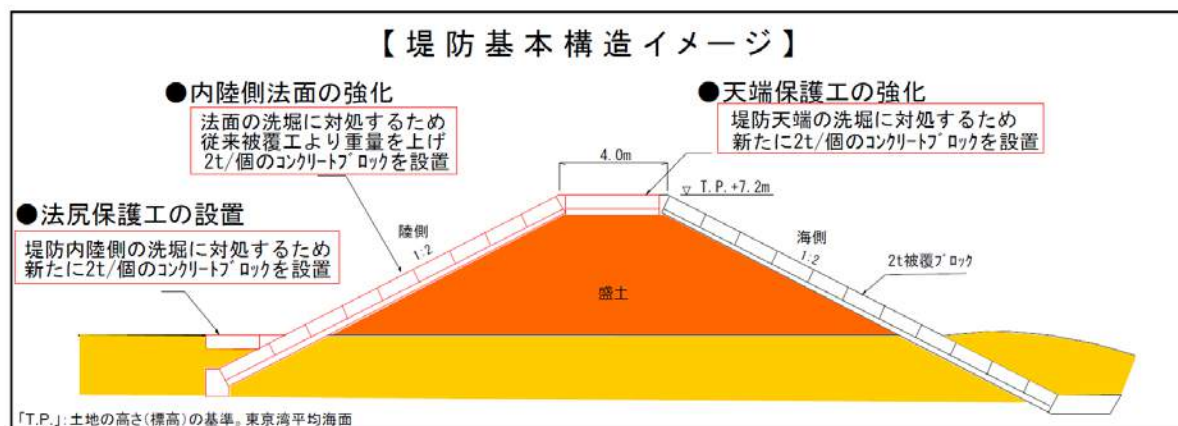


図 3.8 東北地方整備局で示されたねばり強い堤防の基本構造イメージ⁹⁾

3.1.4 土木学会

土木学会「津波特定テーマ委員会(委員長:今村文彦 東北大学教授)」¹⁰⁾では、レベル1(仮称)、すなわち「海岸保全施設の設計で用いる津波の高さで、数十年から百数十年に1度の津波を対象とし、人命及び資産を守るレベル」と、レベル2、すなわち「レベル1をはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル」の2つに分類し、このうえで、海岸保全施設を一定程度超えて越流した場合にも破壊・倒壊しにくい施設設計を検討する必要があることを述べている。

そして、地震時には陸域の広い範囲で沈下や液状化が生じ、その直後に津波が来襲することも設計条件に含める必要があるとしている。

3.1.5 地方自治体

以下、各地方自治体が示す「ねばり強い構造物」に関する考え方を列挙する。

(1) 青森県

青森県復興ビジョン¹¹⁾にて、「防波堤や防潮堤防災のための施設について、最大クラスの津波に対して壊滅的に破壊されないねばり強い構造への強度向上」とうたっている。またこの中で、「ねばり強い構造とは設計対象の津波高を超えた場合でも、施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする、あるいは全壊に至る可能性を少しでも減らすといった減災効果をめざした構造上の工夫を施すこと」としている。

(2) 岩手県

岩手県の東日本大震災津波復興計画 復興基本計画(案)¹²⁾にて、「今回の津波による海岸保全施設の破壊メカニズムについて詳細な検証を実施し、復旧・整備に当たっては、計画規模を超える津波に対しても破壊されにくい構造を検討する。」、また、「本県における津波対策の基本的な考え方として、再び人命が失われることがない多重防災型まちづくりと防災文化を醸成し継承することを目指す。具体的には、被害状況や地理的条件、歴史や文化、産業構造などに応じて、その地域にふさわしい『海岸保全施設』、『まちづくり』、『ソフト対策』を適切に組み合わせた多重防災型まちづくりを進め、被害を出来るだけ最小化するという『減災』の考えにより『安全の確保』を図る」としている。

(3) 宮城県

宮城県震災復興基本方針(素案)¹³⁾にて、「単なる原形復旧にとどまらず、被災後も一定の機能を維持できるように十分に配慮するなど壊滅的なダメージを回避するねばり強い県土の構造となるよう整備を進めます。」としている。

3.1.6 国土交通省 港湾局

国土交通省 港湾局では、「防波堤の耐津波設計ガイドライン 平成 25 年 9 月」および「港湾における防潮堤（胸壁）の耐津波設計ガイドライン 平成 25 年 11 月」が示されており、**図 3.9**¹⁴⁾、**図 3.10**¹⁵⁾の対策が提案されている。

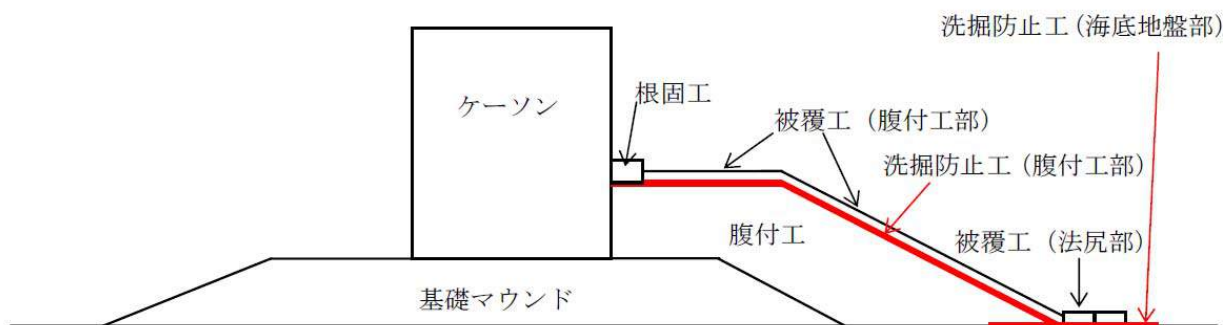


図 3.9 防波堤の越流に対する洗掘対策¹⁴⁾

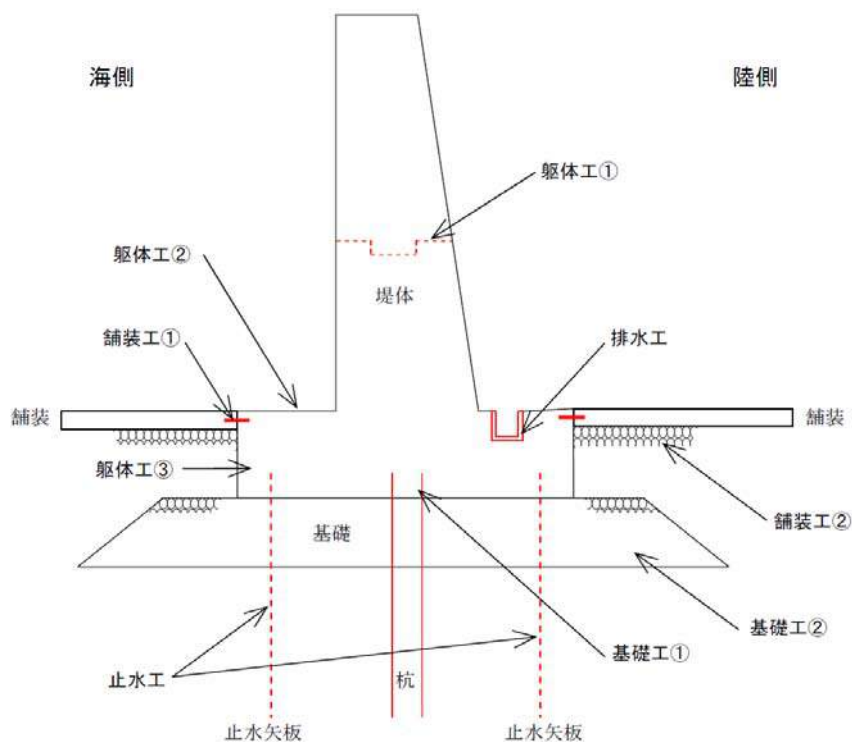


図 3.10 ねばり強い胸壁の断面例¹⁵⁾

3.2 防災と減災の仕分け

早期の復旧・復興を考える上では、巨大津波に対して基本的な方針を定める必要があり、港湾空港技術研究所では、インド洋大津波やハリケーン・カトリーナの大災害以来、通常の設計を超えるような津波や高潮災害に備えることの重要性を指摘していた。表 3.1 は港湾空港技術研究所が東北地方太平洋沖地震を受けて示した最大級の津波に備える考え方である。すなわち、津波の規模を 100 年に一度程度のレベル I と、1000 年に一度程度以上のレベル II とに分け、レベル I に対しては人々の生命はもちろん財産も守り被害を最小限に抑える。さらにレベル II 津波に対しては最低限人命を守り、重要施設の壊滅的被害を防止し甚大な二次災害を防ぐことが必要であると示している。

表 3.1 港湾空港技術研究所で示された最大級の津波の考慮¹⁶⁾

	対象津波	要求性能
レベル I	近代で最大 (100 年に一度程度)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人命を守る ・ 財産を守る ・ 経済活動を守る
レベル II	最大級 (1,000 年に一度程度以上)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人命を守る ・ 経済的損失を軽減する ・ 特に大きな二次災害を引き起こさない ・ 早期復旧を可能とする

その後、2011 年 4 月 23 日に行われた第 2 回東日本大震災復興構想会議¹⁾で、河田委員(関西大学教授)が、「大船渡と釜石の津波防波堤には減災効果はあった」と「減災」という言葉を震災後初めて使用し、その後の中央防災会議(第 4 回, 2011 年 6 月 26 日)⁶⁾で、高橋委員(港湾空港技術研究所)によってレベル I・レベル II 津波にそれぞれ「防災」「減災」の仕分けがなされた。

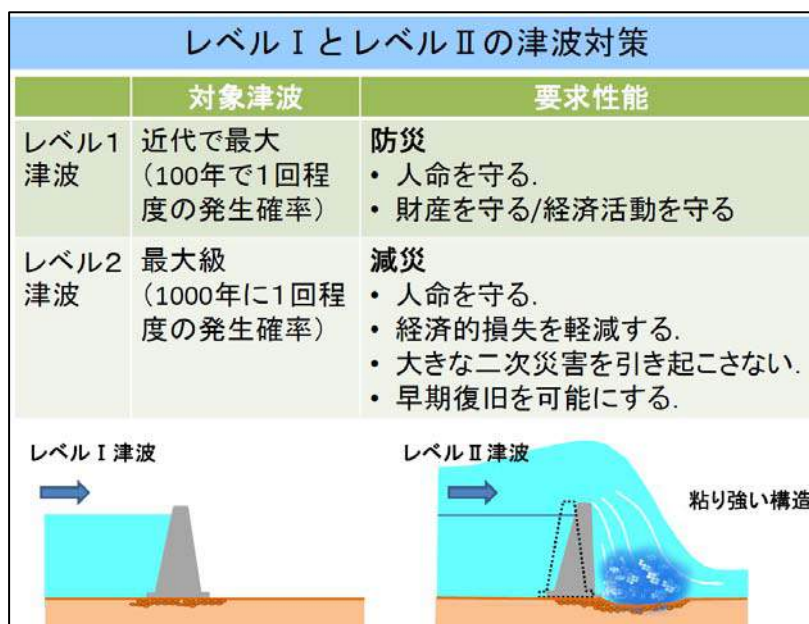


図 3.11 レベル I とレベル II の津波対策⁶⁾

さらに、2011年10月21日に行われた講演会「東日本大震災の津波被害の教訓(主催:地震工学会)」で港湾空港技術研究所の有川上席研究官が表3.2を発表し、計画・設計にまで防災減災が示されるようになった。

表 3.2 港湾空港技術研究所で示された防災・減災¹⁸⁾

	定義	防護目標	計画・設計
津波防護レベル 【防災】	・頻度の高い津波 数十～百数十年 に一回程度の発生 確率	・人命を守る ・財産を守る ・経済活動の継続 ・発災直後に必要な 沿岸部の機能継続	・堤内地の浸水を防止 するよう計画・設計
津波減災レベル 【減災】	・最大クラスの津波 1000年に一回程度 の発生確率	・人命を守る ・経済的損失の軽減 ・大きな二次災害の 防止 ・早期復旧	・堤内地の浸水を許す が、破壊・倒壊をし にくくし、被害が拡大 しないよう計画・ 設計

また、土木学会では2012年4月号の学会誌にて、防災・減災を「津波防護レベル」「津波減災レベル」とし、それぞれに総合的な津波対策を示している。

表 3.3 土木学会で示された総合的津波対策¹⁹⁾

津波レベルの名称	定義	防護目的	総合的津波対策		
			防災施設	土地利用	避難対策
津波防護レベル (L1)	数十年～百 数十年に1回 の頻度で発生 すると考えら れる津波	・人命を守る ・財産を守る ・経済活動の継続 ・発災直後に必要な 港湾機能の継続	堤内地の浸水 を防止するよ う計画・設計	施設などの資 産が被災しな いよう計画	最悪のシナリ オを想定して 計画
津波減災レベル (L2)	津波防護レ ベルをはる かに上回 り、構造物 対策の適用 限界を超過 する津波	・人命を守る ・経済的損失の軽減 ・大きな二次災害の防止 ・早期復旧	堤内地の浸水 を許すが、破 壊・倒壊をし にくくし、被 害が拡大しな いよう計画・ 設計	堤内地の浸水 を前提として 計画	最悪のシナリ オを想定して 計画

3.3 ねばり強さへのアプローチ

3.3.1 ねばり強さを発揮するための考え方

津波に対する構造物のねばり強さとは、一言で言えば、想定を越える外力への対策ということになるであろう。ただし、その対策については多くの考え方が提起されているものの、まだ明確な指針があるわけではなく、今後様々な関係機関によって検討されていくと思われる。

これまで提起されている「ねばり強さを発揮するための考え方」の要点は以下の3点である。

- ① 想定した津波作用を上回る津波が来ても、一気に倒壊しない。
- ② 比較的軽微な構造上の工夫により、想定を越える津波に対してある程度ねばり強く持ちこたえられる。
- ③ ねばり強い構造は、強い構造(最大クラスの津波を対象として設計した構造物)ではない。

また、港湾空港技術研究所等で実施されている検討からどのような工夫でねばり強さを構造物が発揮するかも徐々に明らかにされつつあり、新しい知見も出つつある状況にある。

これらの事を踏まえて本報告では、ねばり強い（巨大津波に対して、存在し続け全壊しない）構造物を最小限のコストで実現するというアプローチを考えることにする。

3.3.2 構造物へのねばり強さの適用

(1) 湾口防波堤

設計津波を超えた場合もねばり強く抵抗する構造に関して、東北地方整備局主催の検討委員会が図 3.12 のような構造案を作成している。

本構造案の基本的な効果は以下のとおりである。

- ① 捨石マウンド嵩上げ（腹付け）によるケーソンの滑動抵抗の増加及び越流による洗掘に対する抵抗力増加
- ② 摩擦増大マットによる滑動抵抗の増加

上記のうち、腹付石は既設でも対応可能だが、摩擦増大マットは新設にのみ対応する。

また、効果的な腹付けの仕様については越流による打込力や水平滑動抵抗増加分の評価を含めた検討方法が確立されていないため、水理模型実験による検討を行う必要がある。このほか、腹付石設置時の基礎地盤支持力の検証も必要である。

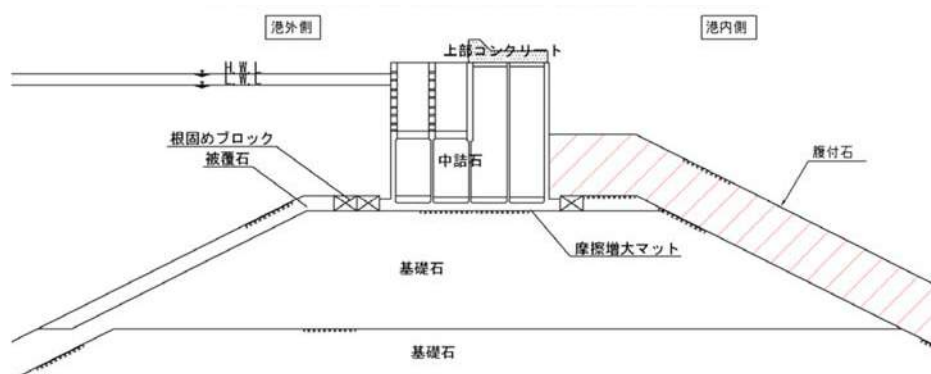


図 3.12 ねばり強い構造のイメージ（湾口防波堤）²⁰⁾

(2) 防潮堤（海岸堤防等）

国土交通省主催の海岸における津波対策検討委員会では、設計対象の津波高さを超えた場合でもねばり強く効果を発揮する海岸堤防等の構造が、基本案として示されている（図 3.13）。また、第 2 波以降の津波に対してもねばり強く効果を発揮するためには、基本案に示すように押し波～越流力に対する裏法側および天端の防護に加え、引き波力に対する表法側の防護も重要となる。

1) 裏法尻部の強化、裏法勾配の緩勾配化

津波の越流時における裏法尻部基礎地盤の洗掘に対して、裏法尻部に保護工を設置すること等により被覆する。裏法尻部の保護工は、大きな流体力による吸い出し等を防止する観点から、裏法被覆工と一体化する等、水密性の高い構造とすることが望ましい。また、裏法尻部の被覆に加え、裏法を緩勾配化することにより、流体力による洗掘の影響を軽減する。

ここで、裏法尻被覆工の構造を検討する上では、裏法を流下してきた越流水の流向を、地盤に突

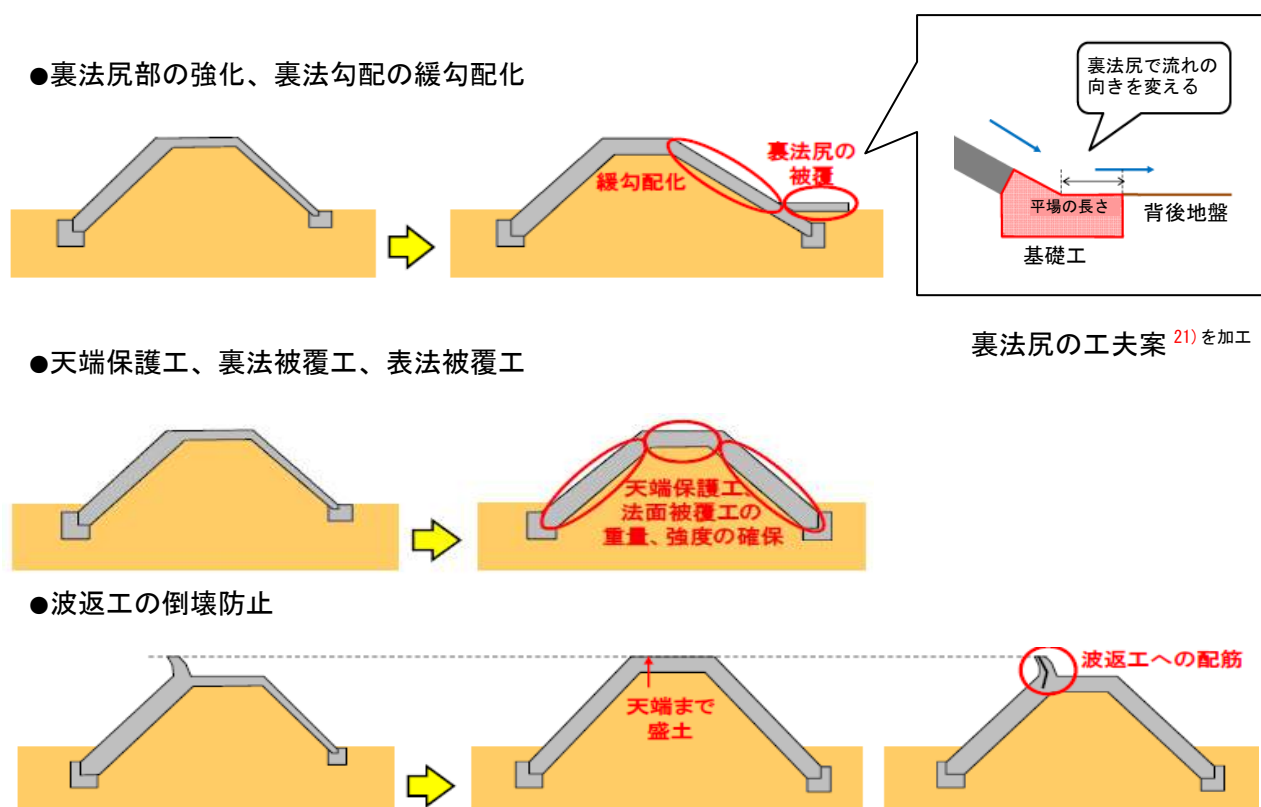
っ込まない向き(水平方向など)に完全に変わることが、洗掘の影響を遠ざける上で重要であること、さらに水脈厚さに対して平場の長さを相対的に長く取る必要があること等が実験的に確認されている²⁰⁾。

2) 天端保護工、裏法被覆工、表法被覆工

押し波および引き波時における津波の高速な水流に対して、天端保護工や裏法被覆工、表法被覆工の部材厚の確保、および部材間の連結(重量や強度の確保)により、一体化を図る。

3) 波返工の倒壊防止

津波の波圧の作用に対して、天端まで盛土構造とする工法(海岸堤防の設計外力を高潮でなく津波とする場合)や、波返工を配筋により一体化補強する。



裏法尻の工夫案²¹⁾を加工

図 3.13 ねばり強い構造の補強イメージ⁸⁾

(3) 水門・可動堰

防波堤や防潮堤のような固定式の沿岸構造物とは異なり、水門や可動堰はゲートの開閉操作を伴う可動式の構造物であるため、ねばり強さに対する考え方も異なる。しかし、最大クラスの津波来襲時においても、ゲートの操作が適切に行えるよう、危機管理上の対応が可能な構造とし、さらに運用の方法も予め定めておくことが求められる。²²⁾ここでは、構造面における対応方針について、主要な構成部材ごとに示す。

1) 扉体

河川を遡った津波によって、シェル構造ローラーゲートの扉体が浮き上がり、開度計のメッセンジャーワイヤの乱巻きや戸当りの変形、開閉装置の損傷が生じ、その後の操作に支障をきたした事例がみられた。既存施設に有効な対策を施すことは難しいため、浮き上がることを前提とした対策を考える必要がある。一方、今後新設させる施設に対しては、浮き上がり防止のための施設設計の考え方を整理しておく必要がある。

2) 戸当り・固定部・支承部

地震動によってローラーゲートの扉体が揺れ、戸当りとその固定部が損傷し、戸当りからローラーが外れたため、開閉操作が不能となった事例がみられた。地震動に対してローラーが戸当たりから外れないよう対策を施すとともに、扉体や門柱のように重要性が高く修繕が難しい部分よりも、戸当り固定部のように修繕が容易な部分が先に損傷するよう、設備や部位毎にレベルを分けて設計を行う考え方を検討する必要がある。

3) 電気・制御設備

予備発電設備や機側操作盤が水没、流失、損傷するなどの事例がみられた。施設画面上の津波に対しては、電気・制御設備の高所設置化や耐水化により水没、流失しない構造とする必要がある。また、最大クラスの津波に対しても、操作が可能となるよう、高所設置化や耐水化に努めることが求められる。

4) 開閉装置

電源の喪失などの要因によりゲートの操作が不能となった水門では、仮設電源と仮設油圧ポンプにより、ゲートの開閉を行った事例がみられた。水門は、津波発生時、確実に扉体を閉鎖できることが基本であり、堤内地の浸水を防止するため、設備に損傷が生じても強制的に閉めることができる機能が求められる。例えば、地震によって電源や制御設備が損傷しても、自重降下によりゲートを確実に閉鎖できるなど、非常用の閉鎖設備を備える必要がある。また、強制的に扉体を閉じた場合の内水排除の方法も併せて検討する必要がある。

5) 遠隔操作設備

遠隔操作を導入していた水門施設であっても、地震による商用電源の停電により、遠隔操作によるゲート操作ができないものもあった。また、光ファイバーケーブルが切断し遠隔操作が不可能になった事例や、監視カメラが流失した事例もみられた。地震に伴って商用電源が失われた場合でも予備発電設備を設けるとともに、その自動起動や遠隔起動等の対策も必要である。遠隔操作に必要なケーブルや監視カメラについては、施設画面上の津波に対して切断されない構造や設置箇所とする必要がある。また、最大クラスの津波も考慮して、遠隔操作については、別系統での二重化を進めることが望ましい。遠隔操作をする際の河川利用者の安全確認の考え方や、そのための設備についても検討する必要がある、自動化を行う場合も同様である。

6) 水門等と堤防の接続部

津波が堤防を越えて堤内地に進入したことで、水門と堤防との接続部分が局所的に破壊された事例があった。構造や材質の違いにより水門等と堤防との接続部が相対的に弱点箇所となるため、接続部における津波流れの挙動を踏まえた堤防の補強が必要である。堰においては、河川を遡る津波を受けた場合の、せき上げによる水位上昇についても留意する必要がある。

(4) 防波堤(傾斜堤、直立堤、混成堤)

防波堤にねばり強さを適用するための基本的な考え方は、前述した 3.3.2(1) 湾口防波堤に準ずるものとする。

3.3.3 なぜねばり強さが必要か

(1) 被災状況

八戸港では、東や北からの波浪に対する静穏度確保のために八太郎北防波堤や中央第一防波堤、中央第二防波堤が整備されていた(図 3.14)が、津波により八太郎北防波堤のケーソン総延長 3496.19m のうち 1869.62m(142 函)が被災を受けた(図 3.15)。このうち、北防波堤ハネ部と呼ばれる 16~19 工区は、消波ブロックで巻かれていた堤頭函のみを残して壊滅した。それ以外の北防波堤も、消波ブロックおよびケーソンが海中に水没するなど、その多くが散乱して海中に没することとなった(図 3.16)。



図 3.14 八戸港の防波堤整備状況(震災前)¹⁶⁾



図 3.15 八太郎北防波堤被災状況¹⁶⁾



図 3.16 八太郎北防波堤の堤頭函周囲の被災状況¹⁶⁾

(2) ねばり強さの必要性

八戸港にて観測された津波による浸水高を図 3.17 に示す。防波堤の外側で港の北側に位置する市川地区工業地帯では、工場内の機械群に残った水跡から、それぞれの浸水高は 8.36m と 8.55m であり、港から南に約 13km 離れた階上町大蛇地区の鉄筋コンクリート造の漁業集落排水処理施設の内壁に残った水跡の浸水高は 8.64m であった。

一方で、防波堤の内側に位置する八戸漁港では鉄筋コンクリート造の建物の内側に残った水跡の浸水高は 5.40m、また八太郎地区第 2 埠頭(コンテナヤード)で上屋の内壁に残った水跡の浸水高は 6.42m であった。

すなわち、八戸港では沖防波堤は被災を受けたものの、ケーソンが存在し続けたことによって防波堤内での津波波高は防波堤外に比べ 6 割程度まで低減できたことから、ねばり強く存在し続けることの必要性が実証された。



図 3.17 八戸港及びその周辺における津波浸水高¹⁷⁾



図 3.18 八戸港の防波堤内外の浸水高²³⁾

なお、防波堤内の検潮所で観測された津波の最大高さは 4.2m(図 3.19)であり、浸水高 5~6m の裏付けとなっている。

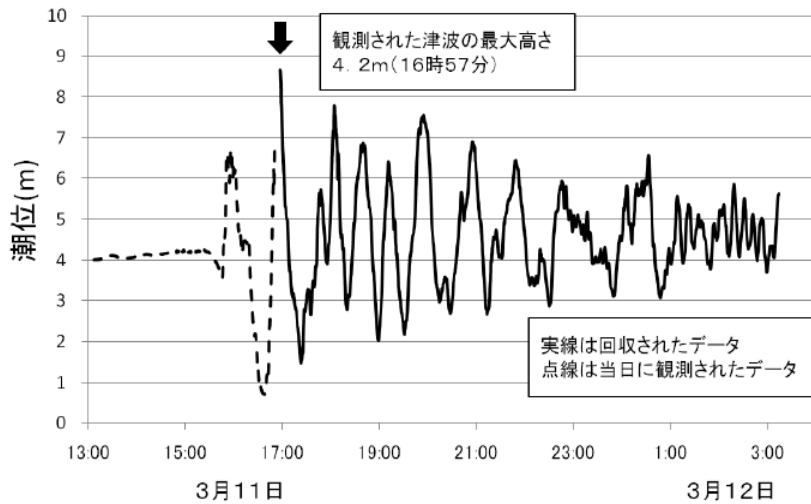


図 3.19 八戸港検潮所で観測された津波の最大高さ²⁴⁾

3.3.4 ねばり強い構造の設計

(1) ねばり強い防波堤の設計

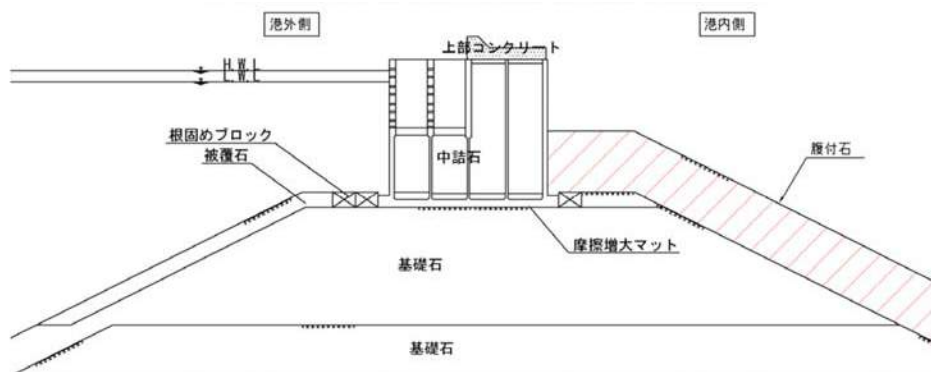


図 3.20 国土交通省東北地方整備局が示すねばり強い防波堤構造の案²⁰⁾

1) 国土交通省が示す「レベル2津波に対応した構造上の課題」

- ・ 静水圧に対し、越流による前面波圧増加及び背面波圧の低下（負圧）が水理模型実験で確認されており、越流時の津波力の定式化が必要である。
- ・ 腹付石によって重量が増加するため、基礎地盤の支持力破壊の検証が必要である。
- ・ 湾内側ではマウンドが高くなるため、越流した水塊、渦による洗堀が起こるが、これを緩和する上部工の形状の選定と洗堀を防止できる腹付石の被覆材仕様を水理模型実験により設定する必要がある。

2) 新たに検討すべきこと

- ・ レベル1(押し波)、レベル2(押し波・引き波)の各津波波高については、水理実験や数値解析に基づき設定する必要がある。
- ・ 従来の設計手法では、津波が越流する状態を考慮していない。そのため、防波堤を越流した津波の防波堤背後の流速分布や、マウンド内浸透流による港内側腹付石に生じる揚圧力、腹付石の安定重量の算定などに水理実験や数値解析が必要である。引き波による越流についても同様である。

- ・マウンド内浸透流を制約するような工法を適用した場合には、防護工に作用する流体力の評価が必要となる。
- ・摩擦増大マットの摩擦力はレベル2だけでなくレベル1でも考慮すべきか定めておく必要がある。なお、既設防波堤には摩擦増大マットの設置は困難である。
- ・防波堤の開口部及び航路近傍部の水深減少によって運航障害が発生する。
- ・ケーソンが沈下した場合の余裕高の確保が必要である。

(2) ねばり強い防潮堤の設計

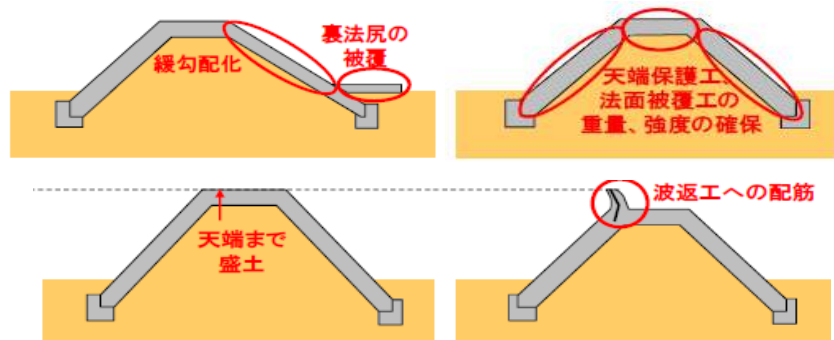


図 3.21 海岸における津波対策委員会(国土交通省・農林水産省)が示す
ねばり強い防潮堤構造の案⁸⁾

1) 国土交通省・農林水産省が示す「本復旧の実施に向けた今後の進め方(案)」⁸⁾

- ・今般の震災において津波が越流した海岸について、堤防等の被災状況（全壊・半壊・被災無し等）と背後地の被害との関連性を調査し、津波が越流したとしても堤防等が全壊せずに機能が一定確保されることによる有効性について分析を進める必要がある。
- ・できるだけその機能を確保するという観点から、有効と考えられる復旧工法の具体的な構造等について検討する必要がある。

2) 新たに検討すべきこと

- ・レベル1(押し波)、レベル2(押し波・引き波)の各津波波高については、水理実験や数値解析に基づき設定する必要がある。
- ・従来の設計手法では、津波が越流する状態を考慮していない。そのため、堤体を越流した津波の流速・揚圧力によって波返し・表裏法・法尻・根固め石・水たたきコンクリートの各部位に作用する流体力(めくり、衝撃)の設定方法と被覆方法が不明である(ダム減勢工の設計手法が参考となる可能性がある)。
- ・基本設計の段階では、ダム減勢工の設計方法等を参考に、水叩きコンクリートや根固め工の仕様を検討することも考えられる。
- ・津波に対する前面消波工の効果が不明である。
- ・堤体幅拡幅時の地盤支持力の検証が必要である。
- ・消波工の設置方法（水深が浅く作業船が使えず、陸上クレーンの設置場所も制限される）
- ・防災を前面に出すと利用面が犠牲となる。
- ・沈下に対する余裕高を確保する必要がある。

3.3.5 粘り強い構造の概念図

3.1で湾口防波堤の粘り強さに関する各機関の考え方を示した。ここでは、本専門部会が考える「湾口防波堤の粘り強さを増強させる構造案」について示す。

図3.22に示す対策案のうち、「④マウンドの嵩上げと腹付け」については東北地方整備局の考え方²⁰⁾と同じであり、本案④が粘り強さの基本構造案と考えられる。本部会ではその他6項目の案を図中に示しているが、以下に概説する。

- ① 中詰材の比重増
中詰材の比重増加(ケーソン重量増)により津波・地震外力に対する水平抵抗を増大させる。
- ② マウンド幅拡張
ケーソン滑落に対する裕度を持たせると同時に、腹付けの幅を確保し水平抵抗を増大させる。
- ③ 根固めブロック補強
重量増により水平抵抗を増大させるとともに、越流時の洗掘に対する抵抗力を高める。
- ④ マウンドの嵩上げと腹付け
基本的対策であり、ケーソン背面の抵抗増大で水平力に抵抗する。
- ⑤ せん断キー(またはアンカー)
せん断キーは道路橋の直接基礎を対象として設計法が明記されている案で、構造物のせん断抵抗を高める効果が期待できる。せん断キーは新設構造物への適用が一般的であるが、アンカーは既設構造物への適用も可能である。
- ⑥ 摩擦増大マット
ケーソン・捨石間にゴムまたはアスファルト製のマットを敷きつめ水平抵抗を増大させる。
- ⑦ 目地の縮小
釜石等のケーソン式防波堤では目地の隙間から高速かつ大量の水塊が港内側に流出し背後の捨石マウンドを洗掘したことが被害を増大させた一因と推定されている。目地の幅を縮小すれば流速は変わらないまま通過流量を減少させることができ、マウンドの連鎖的崩壊の防止に有効と考えられる。

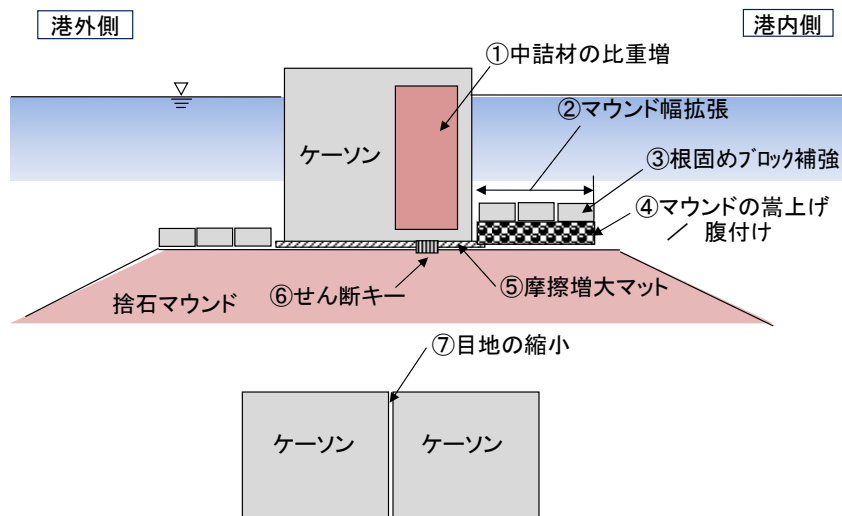


図3.22 粘り強い構造物の概念図

また、図 3.22 の項目に関する今後の検討課題としては以下の項目が挙げられる。

- ・ 「①中詰材」の選定方法
- ・ 「③根固めブロック補強」、「④マウンドの嵩上げ／腹付け」、「⑥せん断キー」の各項目の抵抗力推定方法
- ・ 「③根固めブロック補強」、「④マウンドの嵩上げ／腹付け」の各項目の越流に対する飛散防止対策
- ・ 「⑦目地の縮小」による洗堀防止効果の定量化

【参考文献】

- 1) 内閣府 東日本大震災復興構想会議（第2回），2011年4月23日
- 2) 内閣府 東日本大震災復興構想会議，復興への提言～悲惨のなかの希望～，2011年6月25日
- 3) 内閣府 中央防災会議，「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第1回）」
- 4) 内閣府 中央防災会議，「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第2回）」
- 5) 内閣府 中央防災会議，「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第3回）」
- 6) 内閣府 中央防災会議，「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第4回）」
- 7) 内閣府 中央防災会議，「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（第12回）」
- 8) 国土交通省・農林水産省，海岸における津波対策検討委員会（第3回），2011年11月15日
- 9) 国土交通省仙台河川国道事務所，海岸堤防復旧工事情報（2012.3.13）
- 10) 土木学会，津波特定テーマ委員会 第1回資料，2011年5月10日
- 11) 青森県復興ビジョン，青森県復興対策本部，2011年12月21日
- 12) 岩手県，東日本大震災津波復興計画 復興基本計画（案），2011年
- 13) 宮城県，震災復興基本方針（素案），2011年4月11日
- 14) 国土交通省 港湾局，「防波堤の耐津波設計ガイドライン」，2013年9月
- 15) 国土交通省 港湾局，「港湾における防潮堤（胸壁）の耐津波設計ガイドライン」，2013年11月
- 16) (独)港湾空港技術研究所，港湾空港技術研究所資料 No.1231 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速報，2011.4
- 17) (独)港湾空港技術研究所，八戸・久慈の調査速報，2011.3.24
- 18) 一般社団法人日本地震工学会主催講演会，「東日本大震災の津波被害の教訓」のうち、有川太郎「防災施設への影響」，2011年10月21日
- 19) 土木学会東日本大震災特別委員会報告，土木学会誌（2012.4）
- 20) 国土交通省東北地方整備局，第3回 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会，2011年9月
- 21) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，「国総研技術速報」による新たな情報発信の開始及び技術速報No.1 「ねばり強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討【第1報】」について，2012年5月24日
- 22) 東北地方太平洋沖地震津波を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会，東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について，2011年9月
- 23) 青森県，八戸市HP
- 24) 気象庁，報道発表資料 「八戸」の津波観測点の観測値について，2011年5月27日

4 既設構造物の強化技術

4.1 漂流物の衝撃力に対する既設構造物の補強対策の検討

4.1.1 漂流物の定義

漂流物による被害は、漂流物が衝突することによって生じる被害と、油などの流出による火災の拡大被害が考えられるが、ここでは、特に前者について取り扱う。これまでに、漂流物が建造物に衝突したことで、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確認されている。

国土交通省水管理・国土保全局が実施した津波シミュレーション¹⁾では、表 4.1 に示すように、車両、木材、コンテナ、船舶および養殖資機材を代表的な漂流物として取り扱っている。車両、木材およびコンテナについては、通常、陸上に位置しているため、津波による浸水深が所定の高さを越えた時点でそれらの流出が開始するものと定義し、シミュレーションが行われている。一方、船舶および養殖資機材については、通常、水域に位置するものであるため、津波による流速が所定の値を超えたときに流出が開始するものとして扱われている。また、流出に至った漂流物は、津波の作用時間が十分に長い場合、津波の流速に近い速度で漂流すると考えられている。

津波の最大浸水深および流速は、津波シミュレーションによって算定されるが、津波ハザードマップ等で最大浸水深のみが表示されている場合には、下式が参考となる²⁾。

$$u = F_r \sqrt{gh} \quad \text{式 4.1.1}$$

ここで、 u [m/s]は津波流速、 F_r は流速を算出する係数 ($F_r=0.9$ としても良い)、 g [m/s²]は重力加速度、 h [m]は最大浸水深である。

漂流物の衝突による構造物被害の様子を図 4.1 および図 4.2 に示す。

表 4.1 漂流物の分類と流出条件¹⁾

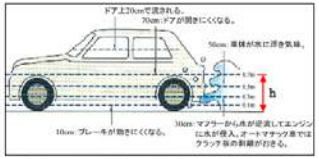

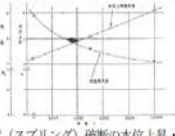

分類	種別	流出条件	分類	種別	流出条件																				
車 両	普通車 トラック	 <p>出典：「利根川の洪水（須賀竜三監修・利根川研究会編、1995年）」</p> <p>「利根川の洪水（須賀竜三監修・利根川研究会編、1995年）」を参考に水位の変化として次のように設定する。</p> <p>流出開始： $h \geq 0.5m$ 停止： $h < 0.5m$</p>	コンテナ	空コンテナ 実入りコンテナ	<table border="1"> <thead> <tr> <th>段積み数</th> <th>空コンテナ</th> <th>実入りコンテナ (国内)</th> <th>実入りコンテナ (国際)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1段積み</td> <td>0.43m</td> <td>0.62m</td> <td>1.20m</td> </tr> <tr> <td>2段積み</td> <td>0.60m</td> <td>0.88m</td> <td>1.70m</td> </tr> <tr> <td>3段積み</td> <td>0.74m</td> <td>1.09m</td> <td>2.08m</td> </tr> <tr> <td>4段積み</td> <td>0.85m</td> <td>1.24m</td> <td>2.40m</td> </tr> </tbody> </table> <p>コンテナの流出条件は、「水谷浩美ほか（2006）、エブロン上のコンテナに作用する津波力と漂流物衝突に関する研究、海岸工学論文集、vol.52、p.p741-745」をもとに算出したコンテナの移動限界を適用する。</p> <p>実入りコンテナについては、平成17年度の仙台湾のコンテナ取扱で外国貿易が全体の64%であることから、国際コンテナを対象とする。コンテナコードにおけるコンテナの段数は空コン、実入りともに3段積みとする。流出後は半積みの条件で停止、再流出するものとする。</p>	段積み数	空コンテナ	実入りコンテナ (国内)	実入りコンテナ (国際)	1段積み	0.43m	0.62m	1.20m	2段積み	0.60m	0.88m	1.70m	3段積み	0.74m	1.09m	2.08m	4段積み	0.85m	1.24m	2.40m
	段積み数	空コンテナ		実入りコンテナ (国内)	実入りコンテナ (国際)																				
1段積み	0.43m	0.62m	1.20m																						
2段積み	0.60m	0.88m	1.70m																						
3段積み	0.74m	1.09m	2.08m																						
4段積み	0.85m	1.24m	2.40m																						
トレーラー、シャーシ	 <p>トレーラー、シャーシの移動は、台車までの高さを1mと設定し、台車の高さにコンテナの流出条件（空コン）を加えたものとする。</p> <p>例）流出開始 $1.00m + 0.43m = 1.43m \leq h$ 停止 $1.00m + 0.43m = 1.43m > h$</p>	船舶	大型船（港湾船舶） 漁船（中・大型漁船） 漁船（小型漁船）	<p>「日本海北部海域における津波発生時の港湾船舶の安全対策に関する調査研究」より、4m/secを超える場合に船舶の係留索破断が始まるものとして、総トン数に応じて流速が4~8m/secで船舶が流出するものとする。</p> <p>また、流出後の停止条件及び再流出条件は水深または水位が噴水以上の場合は移動し、噴水未満となる場合は、移動しないものとする。</p>  <p>係留索（スプリング）破断の水位上昇・流速限界</p>																					
木 材	梱包材（製材）	<p>木材は、仙台湾の梱包材（9cm×9cm角材、13本×8本の梱包製材）を対象とする。また、流出開始条件は、木材の高さ以上となる場合とする。</p> <p>流出開始： $h \geq$ 木材の高さ 停止： $h <$ 木材の高さ</p> 	養殖資機材	養殖槽	<p>「永野裕美ほか（1989）、数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性、海岸工学論文集、vol.36、p.p183-187」より、流速が1m/sec以上となる場合に養殖槽の被害が出始めるものとし、計算における流速値が1m/sec以上となる場合に流出開始とする。</p>																				



図 4.1 開口部からの木材の流入³⁾



図 4.2 漂流物衝突による外壁の破壊³⁾

4.1.2 津波による漂流衝突力

ここでは、コンテナと流木に関する漂流衝突力の計算法を紹介する。

(1) コンテナ

水谷らは、模型実験を通して、陸上を遡上する津波によって漂流するコンテナの漂流衝突力を検討している⁴⁾。そこでは、コンテナの漂流衝突力は、コンテナの長さ依存する傾向が強いと報告されており、この原因は、コンテナ前面が堰き止める海水の質量（付加質量）がコンテナの衝突力に大きく影響しているためと述べられている。コンテナが漂流する速度で、コンテナと海水とが一体となって衝突し、衝突前の運動量がすべて力積として作用したと考えると、コンテナの漂流衝突力 F_m [N] は、式 4.1.2 のように表すことができる。

$$F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt} \right) \quad \text{式 4.1.2}$$

ここで、 dt [s] は衝突時間、 η_m [m] は遡上する津波の水位、 ρ_w [kg/m³] は水の密度、 B_c [m] はコンテナの幅、 V_x [m/s] はコンテナの漂流速度、 W [N] はコンテナの重量、 g [m/s²] は重力加速度を示している。右辺の第1項は海水の付加質量による力積、右辺第2項は漂流物の質量による力積を示す。図 4.3 は、水理模型実験の結果と式 4.1.2 による計算結果（点線）とを比較したものである。ここでは、衝突時間を漂流衝突力の時系列変化の立ち上がりから最大値までの時間として与えている。実験の結果にバラツキはみられるが、式 4.1.2 は、実験結果を表現する近似曲線として良好であると考えられる。

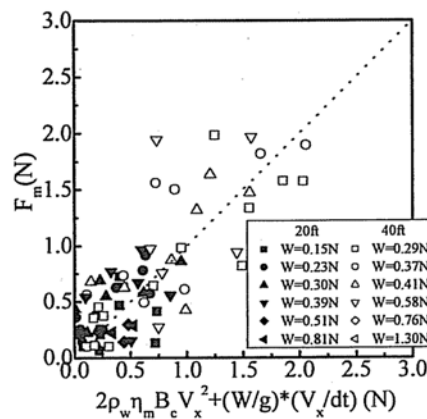


図 4.3 コンテナの漂流衝突力の実験値と計算値⁴⁾

また、有川らは、以下の評価式を提案している⁵⁾。

$$F_m = \gamma_p \chi^{2/5} \left(\frac{5}{4} \tilde{M} \right)^{3/5} V^{6/5} \quad \text{式 4.1.3}$$

$$\chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, \quad k = \frac{1 - \nu^2}{\pi E}, \quad \tilde{M} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad \text{式 4.1.4}$$

ここで、 F_m [N]は漂流物の衝突力、 a [m]は衝突面半径の1/2(コンテナ衝突面の縦横長さの平均の1/4)、 E [Pa]はヤング率(コンクリート版)、 V [m/s]は衝突速度、 ν はポワソン比、 γ_p は塑性によるエネルギー減衰効果(0.25)であり、 M [kg](質量)や k の添え字は、衝突体と被衝突体を示す。

(2) 流木

松富らは、津波による流木の漂流によって発生する二次災害を想定して、気中での木材の衝突実験と水理実験を行っている⁶⁾。気中での実験では、ワイヤーで吊るした木材を鋼板に衝突させることで衝突力を計測し、水理実験では、木材周囲の水がその衝突力にどのような影響を与えるかを検討している。ここでは、流木の漂流衝突力 F_m [N]は式4.1.5のように表されている。

$$F_m / (\rho D^2 L) = 1.6 C_{MA} \left\{ V_{AO} / (gD)^{0.5} \right\}^{1.2} \cdot (\sigma_f / \gamma L)^{0.4} \quad \text{式 4.1.5}$$

ここで、 ρ [kg/m³]は流木の密度、 D [m]は流木の直径、 L [m]は流木の長さ、 V_{AO} [m/s]は流木の速度、 g [m/s²]は重力加速度、 σ_f [Pa]は降伏応力である。また、 C_{MA} は、水の影響を考慮した質量係数であり、津波が段波である場合には1.7、定常流である場合には1.9⁷⁾を用いている。

一方、池野らは、円柱形以外の漂流物を対象として模型実験を行い、漂流物の衝突直前の運動量が同じならば、漂流物の形状によらずほぼ同じ衝突力となることを確認している⁸⁾。ここでは、漂流物の衝突力 F_H [N]は式4.1.6のように表されている。

$$F_H / (gM) = 20 C_{MA} \left\{ V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25}) \right\}^{2.5} \quad \text{式 4.1.6}$$

ここで、 g [m/s²]は重力加速度、 M [kg]は漂流物の質量、 V_H [m/s]は流れの速度、 D [m]は漂流物の代表高さ、 L [m]は漂流物の代表長さである。また、質量係数 C_{MA} は0.5としている。

これらの評価式は、漂流物の緒元を比較的厳密に規定しているが、道路橋示方書・同解説⁹⁾では、流木等の衝突力 P [kN]として、式4.1.7に示す簡易式を提唱している。

$$P = 0.1 \cdot W \cdot v \quad \text{式 4.1.7}$$

ここで、 W [kN]は流送物の重量、 v [m/s]は表面流速であり、この衝突力を水面位置に作用させることを基準としている。

4.1.3 対策案と設計事例

ここでは、構造物による漂流物の対策事例と土地の嵩上げによる対策案について例示する。

(1) 釧路港の事例¹⁰⁾

釧路港では、防波堤のように津波そのものを防御するのではなく、水塊は透過させる一方で、漂流物の漂着や散乱を防ぐ減災技術が実用化されている。この施設の基本構造は、支柱、捕捉スクリーンおよび基礎からなる単支柱構造で、漂着物の衝突エネルギーを各部材の変形により吸収するこ

とができる。各部材の構造および材質は、支柱については鋼材あるいは鉄筋コンクリート等、また、捕捉スクリーンについてはロープ、ネットあるいはベルト等が考えられており、釧路港では、支柱に鋼管、捕捉スクリーンにワイヤロープが採用されている。対策のイメージを図 4.4 に示す。

整備箇所は、図 4.5 に示すように、釧路港東港区の耐震強化岸壁整備予定箇所の対岸に位置する入舟地区港湾施設用地である。この地域は、地震津波の発生時において、整備箇所周辺の駐車車両が津波漂流物となって航路や泊地へ流入するとともに、係留船舶の市街地への流出も懸念されている。

この施設の設計条件は、中央防災会議において設定している防災対策上の対象地震の中から、「根室沖・釧路沖の地震 (M8.3)」を設定している。この地震津波を対象とした津波シミュレーション結果から、整備箇所における浸水深および流速を押し波と引波に分けて整理することで、対象となる漂流物を設定している。これらの条件をもとに漂流物の衝突エネルギーおよび抗力が算定されている。

完成した施設を図 4.6 に示す。また、えりも港や十勝港においても、こうした施設が整備されており、東日本大震災でもその効果が確認されている。これらの施設を図 4.7 および図 4.8 に示す。

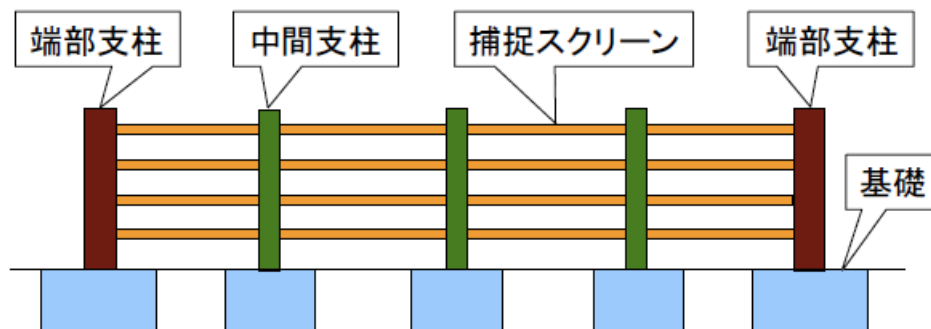


図 4.4 基本構造¹⁰⁾

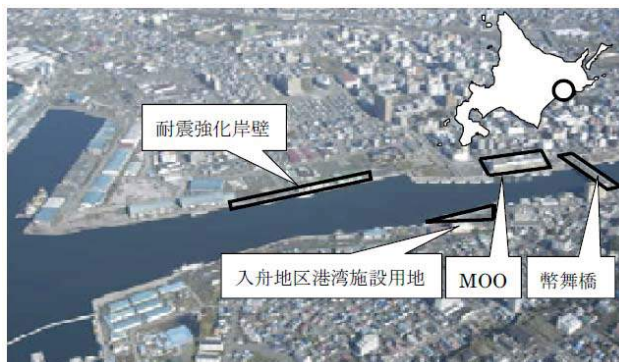


図 4.5 津波漂流物対策施設整備箇所¹⁰⁾



図 4.6 釧路港の漂流物対策施設¹¹⁾



図 4.7 えりも港の事例¹²⁾



図 4.8 十勝港の事例¹²⁾

(2) 須崎港の事例

須崎港には木材工業団地があり、原木が野積みされている。過去の津波では、多くの木材が流出して、建造物の破壊や人的被害を起こしただけでなく、街や港に滞留した流木が復旧活動の支障ともなった。そこで、実証実験として、津波による原木の流出を防ぐ施設（以後、津波バリア）が、設置されている。

津波バリアは、釧路港に設置された施設と同様、鋼管支柱兼杭基礎、捕捉スクリーン（ワイヤロープ）からなる簡易な構造となっている。津波バリアの構造を図 4.9 に、整備された施設を図 4.10 に示す。また、本施設の検討のフローを図 4.11 に示す。津波シミュレーションの結果から構造検討に必要な津波浸水深、流速等を抽出し、外力による抗力と漂流物による衝突エネルギーが算定され、施設の設計条件として用いられている。漂流物の衝突エネルギーは、地盤や杭、スクリーンで吸収されるが、「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（案）」では、経済性に配慮して、これらの塑性変形を許容する塑性変形法が採用されている。この施設では、捕捉漂流物による抗力と漂流物による衝突エネルギーに対して、ほぼ同等の耐力を有するよう設計がなされている。

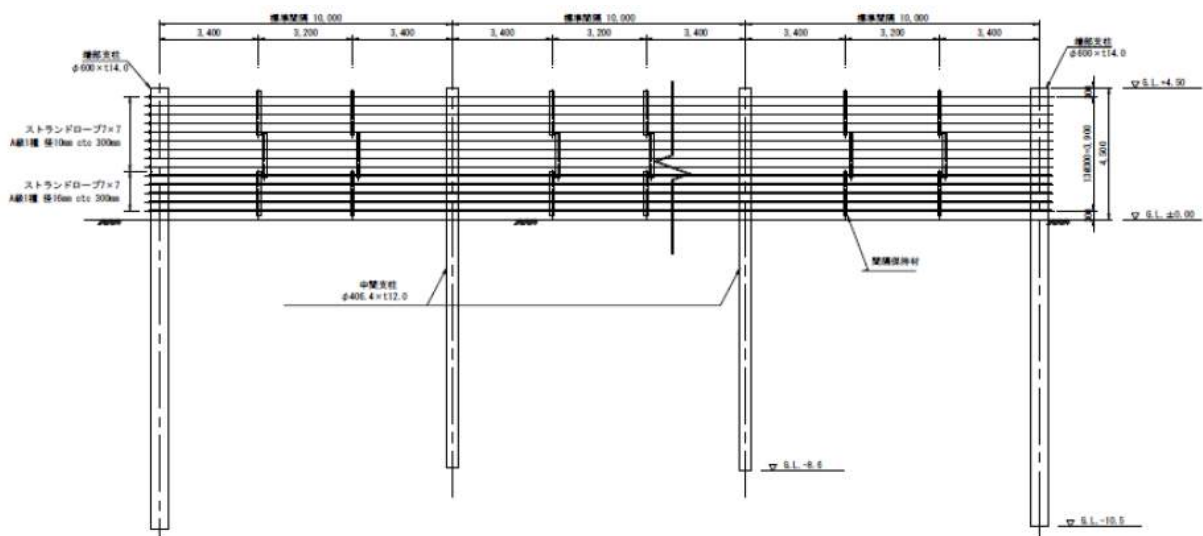


図 4.9 津波バリアの構造¹³⁾



(a) 須崎駅ホーム前面

(b) 燻蒸施設の周囲

図 4.10 津波バリア¹³⁾

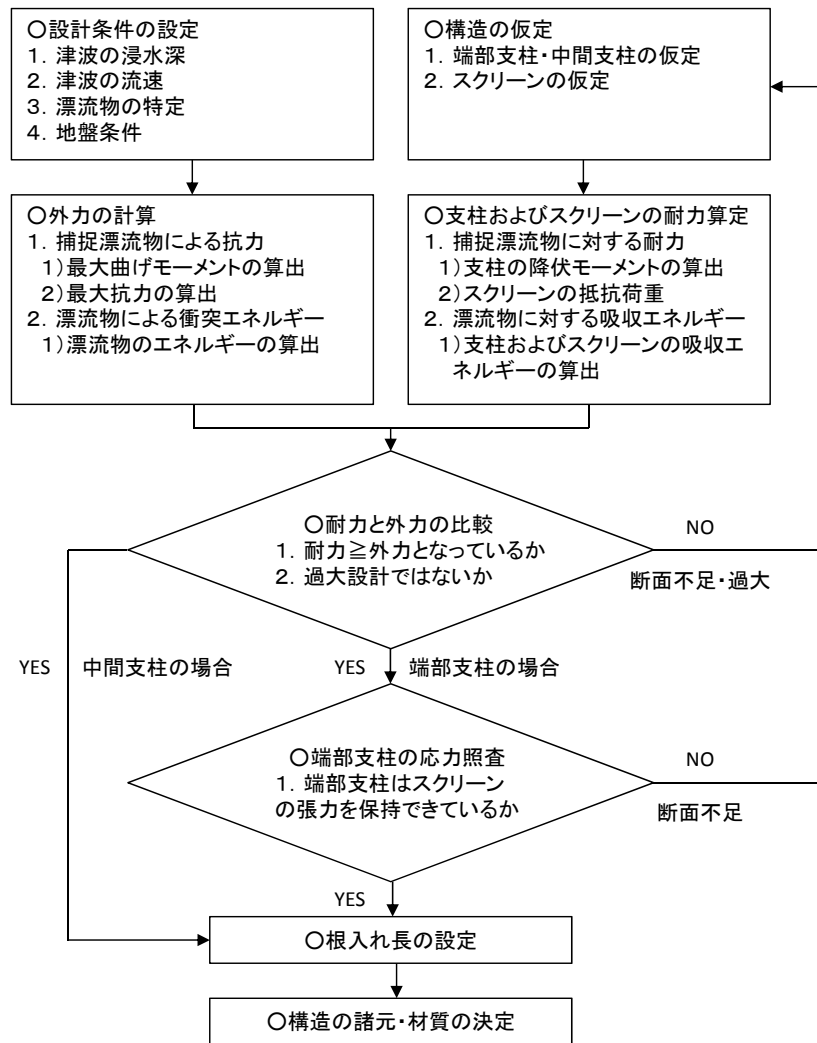


図 4.11 設計フロー¹³⁾

(3) 仙台空港の事例

東日本大震災では、津波による冠水と漂流物の漂着により、仙台空港の機能が喪失したことは記憶に新しい。仙台空港において、こうした被害は、地盤沈下の影響もあって標高が低くなったA滑走路と、A、B滑走路の交差部付近に多く生じたとされている。また、より大きな傾向として、車両等の漂着は、浸水深1.0m~2.0m、木材等の瓦礫は0.5m~1.0mに漂着し、浸水深が深い位置であっても、標高の高い箇所では津波漂流物はほとんどみられていないと報告されている¹⁴⁾。図4.12に仙台空港の浸水深、図4.13に津波漂流物の漂着状況をそれぞれ示す。

仙台空港における冠水の回避と津波漂流物の漂着の低減を目的として、国土交通省東北地方整備局より、B滑走路の嵩上げが対策案の一つとして提案されている。加えて、B滑走路の平行誘導路を嵩上げすることで、A滑走路からB滑走路への漂着物を抑止し、漂着物撤去を含む復旧作業を軽減するとともに、航空機受け入れの早期回復が見込まれるとされている。

交通インフラ等、震災後の早期復旧が必要となる重要施設については、こうした土地の標高差を利用した漂流物対策も有効と考えられ、面として捉えた津波対策の一例といえる。

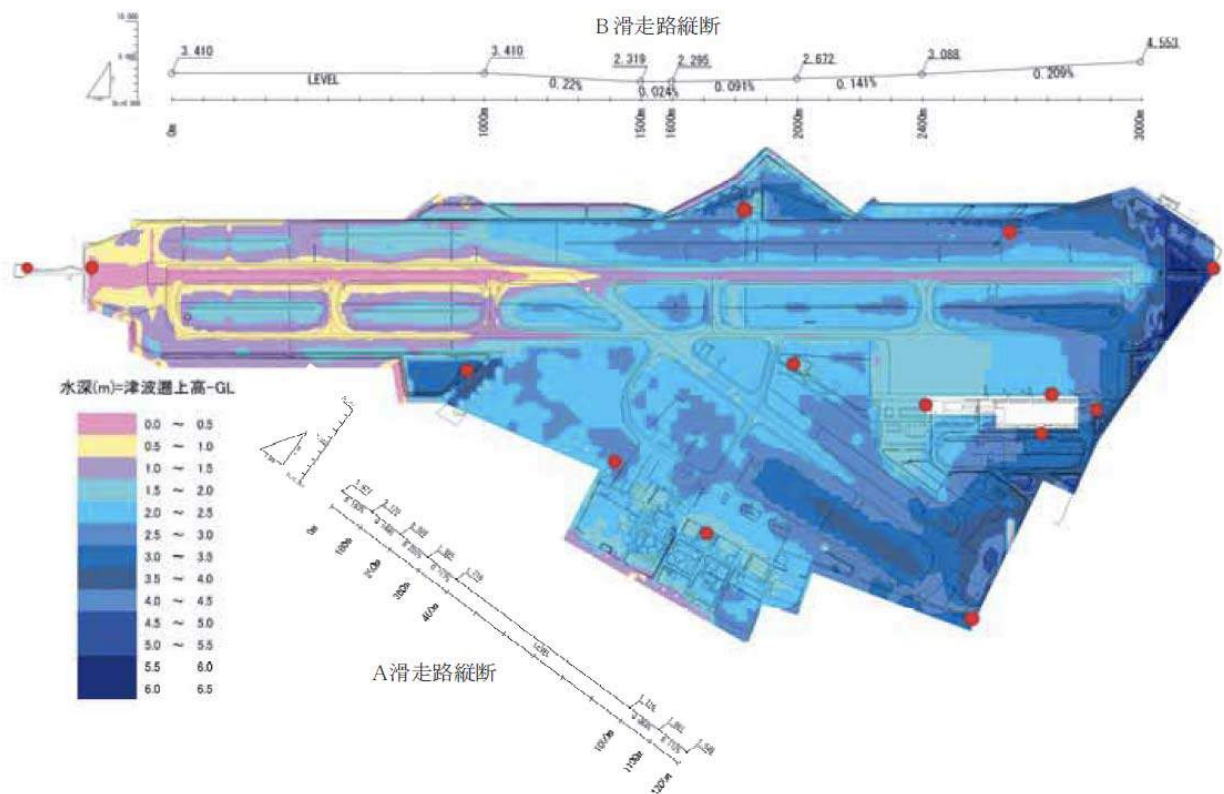


図 4.12 仙台空港における浸水深¹⁴⁾



図 4.13 震災後の仙台空港の津波漂流物の漂着状況¹⁴⁾

4.2 既設構造物の補強方法の検討

ここでは、既設構造物として防波堤、岸壁および堤防・護岸(海岸保全施設)を対象とし、それぞれの構造物に作用する津波外力の算定方法、および補強方法案について整理する。

4.2.1 対象となる外力

(1) 防波堤に作用する津波外力

防波堤に作用する津波外力は、防波堤の耐津波設計ガイドライン(案)国土交通省 港湾局 平成24年6月¹⁵⁾における津波波力を参考とした。

1) 基本事項

ア) 津波波力の算定手順

津波波力の算定方法については、津波シミュレーションの有無、波状段波、越流の発生の有無を考慮して、図4.14に示す算定手順をもとにして適切な波力算定式を用いる。

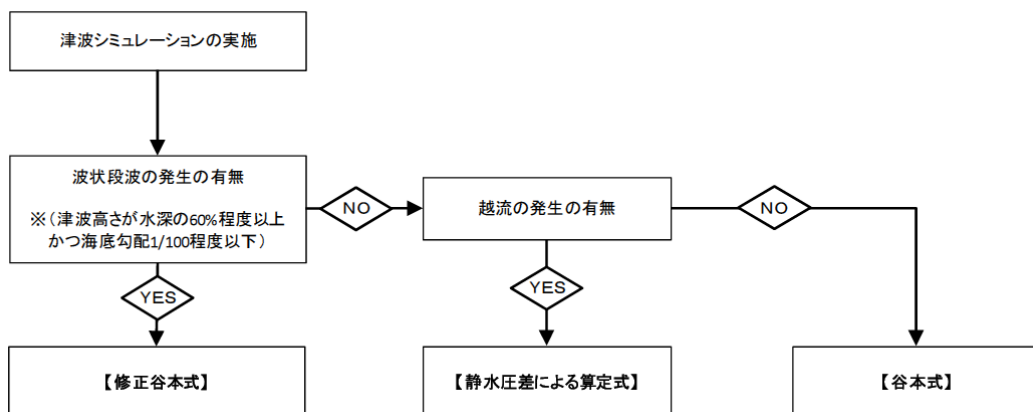


図 4.14 防波堤に対する津波波力算定手順¹⁵⁾

イ) 津波波力式の適用の考え方

①波状段波が発生する場合は、修正谷本式を適用

津波は、まず段波状かそうでないかに分類でき、波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂（ソリトン分裂）しながら段波形状になった波状段波については、衝撃段波波力が極めて大きな値となり、谷本式では明らかに過小評価になるため適用できない。海底勾配が非常に緩やかであると波状段波となり、また、波高水深比（津波高さ／水深）が小さい場合や海底勾配が比較的急な場合には、段波にはならない。

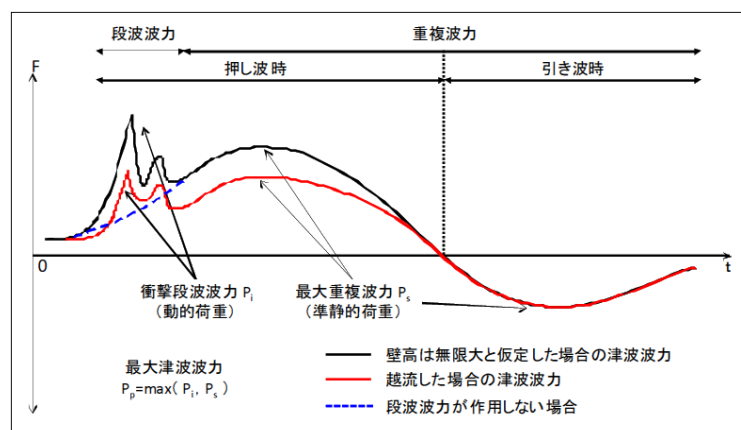


図 4.15 段波波力と重複波力の区分イメージ¹⁵⁾

このため、波状段波が発生する場合には、津波波力が大きくなるため、これに対応した修正した谷本式（修正谷本式）を波力算定に用いる。波状段波波力を考慮する条件は、おおむね入射津波高さが水深の30%以上（シミュレーション等による津波高さが水深の60%以上）で、かつ海底勾配が1/100以下程度の遠浅である場合と考える。

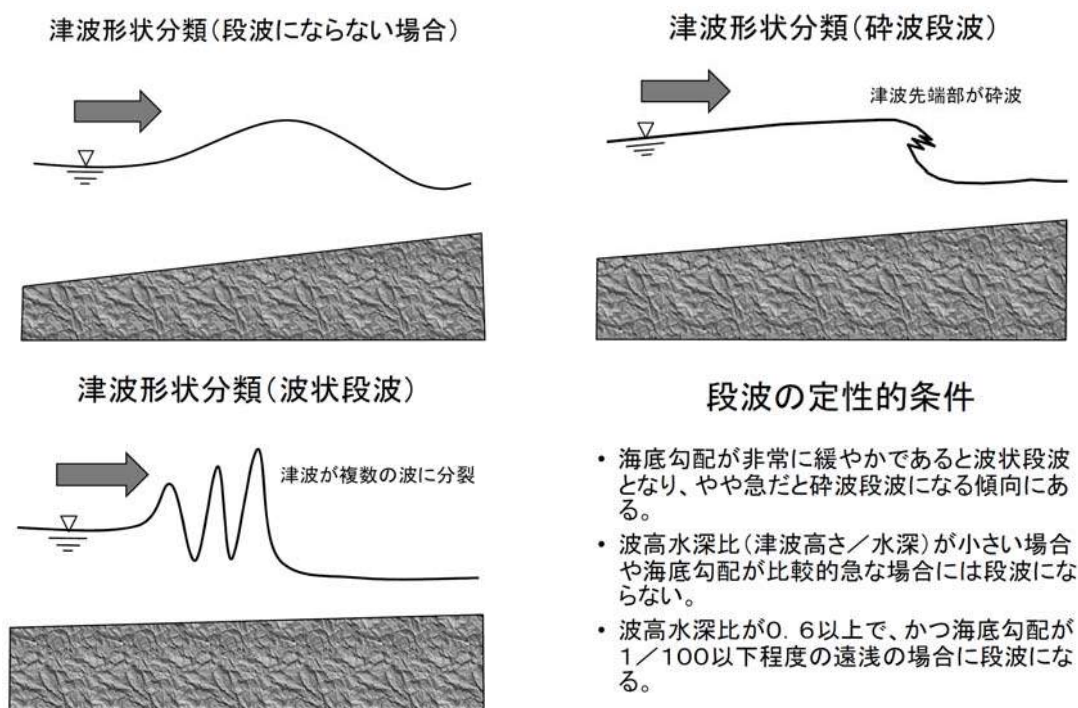


図 4.16 段波概念図と定性的条件¹⁶⁾

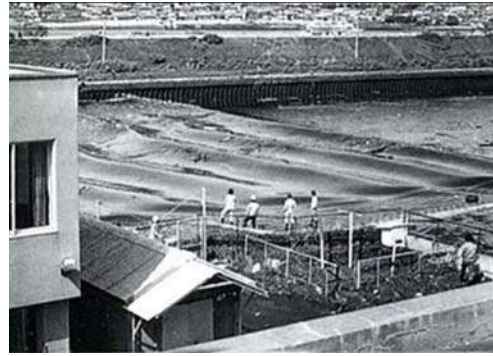
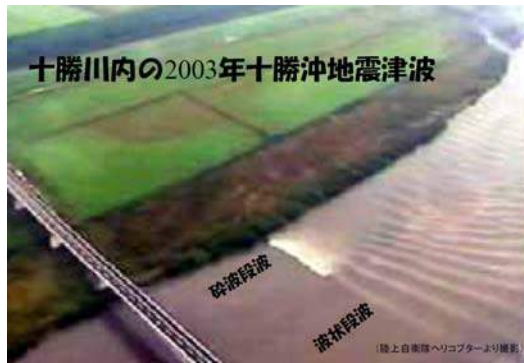


図 4.17 砕波段波と波状段波の発生事例写真 (左写真 17)、右写真 18)

②波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生しない場合は、谷本式を適用

①に示す波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生しない場合には、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成 19 年」に記載されている谷本式を適用する。

③波状段波が発生しない場合で、かつ越流発生の場合は、静水圧差による算定式を適用

①に示す波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生する場合には、ケーソン前面と背面に作用する静水圧差を補正した算定式を適用する。なお、若干越流している状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、それより水位の低い越流直前の状態に谷本式を適用した方が高い波力となる可能性があるため、両者を比較して高い方を採用する必要がある。

ウ) 津波シミュレーションを行う場合の静水面の設定

基準水面は一般的に朔望平均満潮面 (H. W. L.) を基準水面として取り扱う。

エ) 谷本式および修正谷本式における「入射津波の基準面上の高さ」の設定

防波堤に作用する津波波力を求めるための津波高さの算定にあたっては、防波堤を考慮した数値シミュレーションを行うことを原則とする。現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成 19 年では、便宜上防波堤前面における最大津波高さの 1/2 の高さを入射する津波高さとして設定しているが、実際には防波堤前面以外の場所でも防波堤および陸域からの反射の影響を含んでいる。このため、谷本式に用いる a_1 (入射津波の基準面上の高さ) は、数値シミュレーション等による津波高さ (基準水面からの高さ) の 1/2 を入射津波高さとして定義し、波力算定にはこれを用いるものとする。

$$a_1 = \text{シミュレーション等津波高さ (基準面からの高さ) の} 1/2 \quad \text{式 4.2.1}$$

基準面：津波が作用する面において津波高を算定するための基準となる水位

なお、一般に、津波高さという場合には、浸水等の影響を考慮するための水位 (反射波の影響を含む) である。したがって、基本的には、これらの津波高さについても、原則としてその 1/2 の値を入射津波高さ a_1 とする。こうした津波高さは、一般に T. P. 上の水位で表されていることが多いので、設計潮位 (通常は H. W. L.) 上の高さに換算してから 1/2 にする必要がある。

2) 津波波力の算定

ア) 修正谷本式（基準面の無次元強度を 3.0 に割増した谷本式）

谷本式における基準面の波圧に関する係数（無次元波圧強度）を 2.2 から 3.0 に割り増して検討を行う。（池野ら，2005¹⁹⁾）基準面上の波力の作用高さは変わらないものとする。（ $\eta^* = 3.0a_1$ ）

①背面の水位が押し波時に基準面より下がらない場合

$\eta^* = 3.0a_1$	式 4.2.2	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 3.0 \rho_0 g a_1$	式 4.2.3	a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	式 4.2.4	$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
		p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
		p_u : 直立壁前面下端における揚圧力 (kN/m ²)

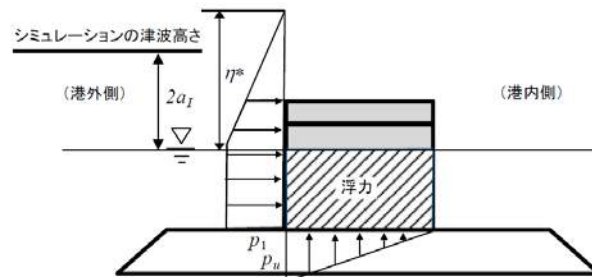


図 4.18 修正谷本式における背面の水位が押し波時に基準面より下がらない場合の算定モデル¹⁵⁾

②背面の水位が押し波時に基準面より下がる場合

背面の水位が押し波時に基準面より下がる場合には（引き波初動時あるいは 2 波目以降に限る）、必要に応じて下がった水位で検討を行う。

$\eta^* = 3.0a_1$	式 4.2.5	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 3.0 \rho_0 g a_1$	式 4.2.6	η_B : 直立壁背面で静水面から下がった水位 (m)
$p_2 = \rho_0 g \eta_B$	式 4.2.7	a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	式 4.2.8	$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
$p_L = p_2$	式 4.2.9	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
		p_2 : 直立壁背面における負圧 (kN/m ²)
		p_u : 直立壁前面下端における揚圧力 (kN/m ²)
		p_L : 直立壁背面下端における揚圧力 (kN/m ²)

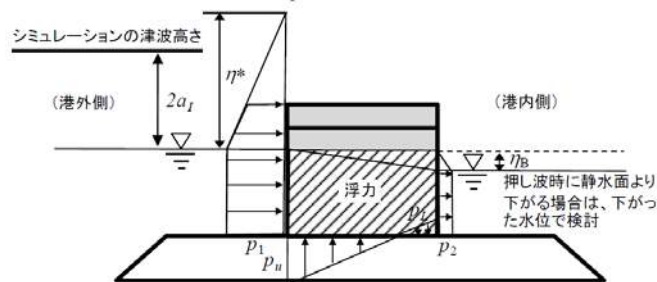


図 4.19 修正谷本式における背面の水位が押し波時に基準面より下がる場合の算定モデル¹⁵⁾

※浮力については前面静水面を背面まで考慮した場合の容積（斜線の部分）として計算すること。

イ) 谷本式 (津波が防波堤を越流しない場合)

①背面の水位が押し波時に静水面より下がらない場合

$\eta^* = 3.0a_1$	式 4.2.10	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 2.2 \rho_0 g a_1$	式 4.2.11	a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	式 4.2.12	$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
		p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
		p_u : 直立壁前面下端における揚圧力 (kN/m ²)

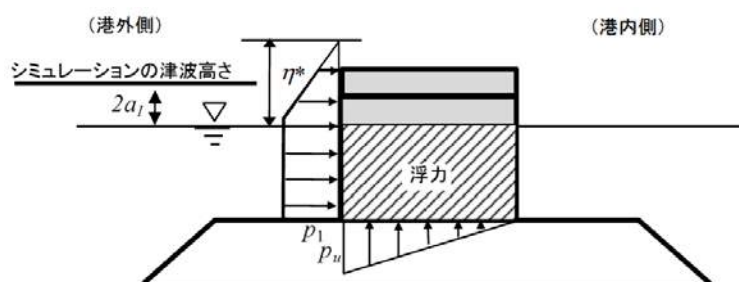


図 4.20 谷本式における背面の水位が押し波時に静水面より下がらない場合の算定モデル¹⁵⁾

②背面の水位が押し波時に静水面より下がる場合

背面の水位が押し波時に静水面より下がる場合には (引き波初動時あるいは2波目以降に限る)、必要に応じて下がった水位で検討を行う。

$\eta^* = 3.0a_1$	式 4.2.13	η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
$p_1 = 2.2 \rho_0 g a_1$	式 4.2.14	η_B : 直立壁背面で静水面から下がった水位 (m)
$p_2 = \rho_0 g \eta_B$	式 4.2.15	a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅) (m)
$p_u = p_1$	式 4.2.16	$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m ³)
$p_L = p_2$	式 4.2.17	p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m ²)
		p_2 : 直立壁背面における負圧 (kN/m ²)
		p_u : 直立壁前面下端における揚圧力 (kN/m ²)
		p_L : 直立壁背面下端における揚圧力 (kN/m ²)

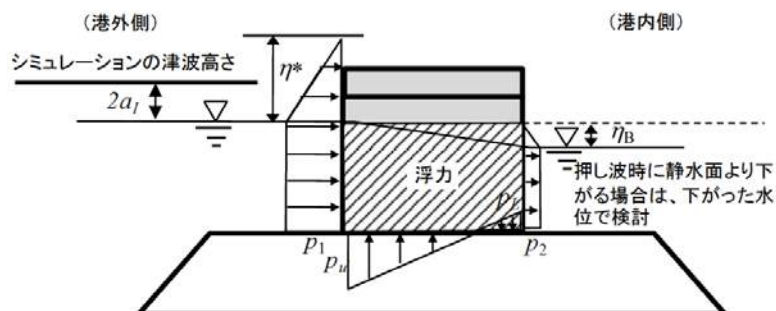


図 4.21 谷本式における背面の水位が押し波時に静水面より下がる場合の算定モデル¹⁵⁾

※浮力については前面静水面を背面まで考慮した場合の容積 (斜線の部分) として計算すること。

ウ) 静水圧差による算定式 (津波が防波堤を越流する場合)

防波堤前面と背面の最大水位差を算出し、防波堤の前背面における静水圧差を用いて防波堤の安定性を確認する。水理模型実験による結果により、現時点では、前面の静水圧に $a_f = 1.05$ 倍、背面の静水圧に $a_r = 0.9$ 倍した静水圧を用いる。

$$p_1 = a_f \rho_0 g (\eta_f + h') \quad \text{式 4.2.18}$$

$$p_2 = \frac{\eta_f - h_c}{\eta_f + h'} p_1 \quad \text{式 4.2.19}$$

$$p_3 = a_r \rho_0 g (\eta_r + h') \quad \text{式 4.2.20}$$

p_1 : 直立壁前面の底面における波圧強度 (kN/m²)

p_2 : 直立壁前面の天端面にける波圧強度 (kN/m²)

p_3 : 直立壁背面の底面における波圧強度 (kN/m²)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

h' : 直立壁の底面の水深 (m)

h_c : 静水面から直立壁天端面までの高さ (m)

η_f : 直立壁前面の静水面からの津波高さ (m)

η_r : 直立壁背面の静水面からの津波高さ (m)

α_f : 直立壁前面の静水圧補正係数

α_r : 直立壁背面の静水圧補正係数

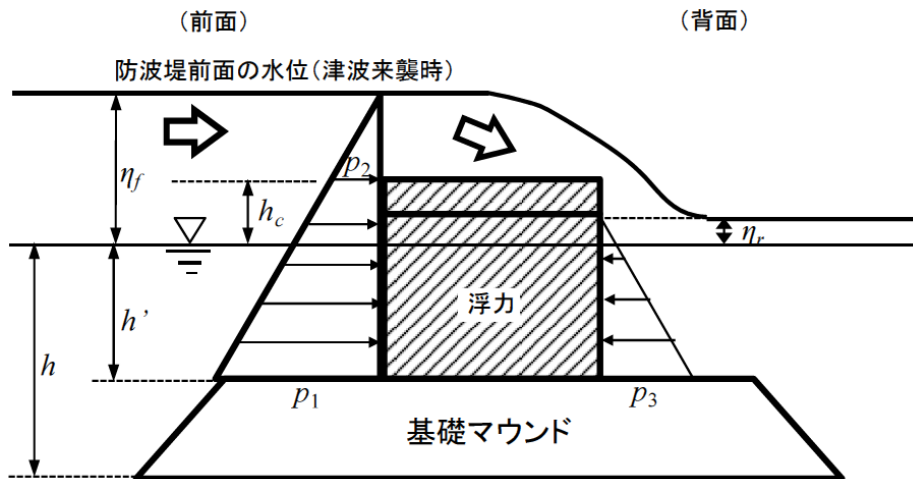


図 4.22 谷本式における静水圧差による算定モデル¹⁵⁾

※浮力については、水没している堤体全体 (前面水位を背面まで考慮した場合の容積: 斜線の部分) として計算すること。揚圧力については考慮しない。

※若干越流した状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、越流直前の状態に谷本式を適用した場合と比較し、堤体の安定性に対して不利となる方を採用する。

(2) 岸壁・護岸に作用する外力

岸壁・護岸に作用する外力は、「水産庁 平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方の改正について 平成 25 年 8 月」²⁰⁾を参考に整理する。

①設計条件の設定方法

岸壁の耐津波強化対策においては、引き波時に前面の水位が最も低くなり、かつ、岸壁背後の残留水位が埋立地盤高と同等となる状態を想定し、安定性照査を行う。津波伝播シミュレーションの

結果を利用する場合には、L.W.L. 時として潮位を考慮することを基本とするが、H.W.L. 時の結果と大きな差がないと判断される場合にはその結果を代用させてもよい。

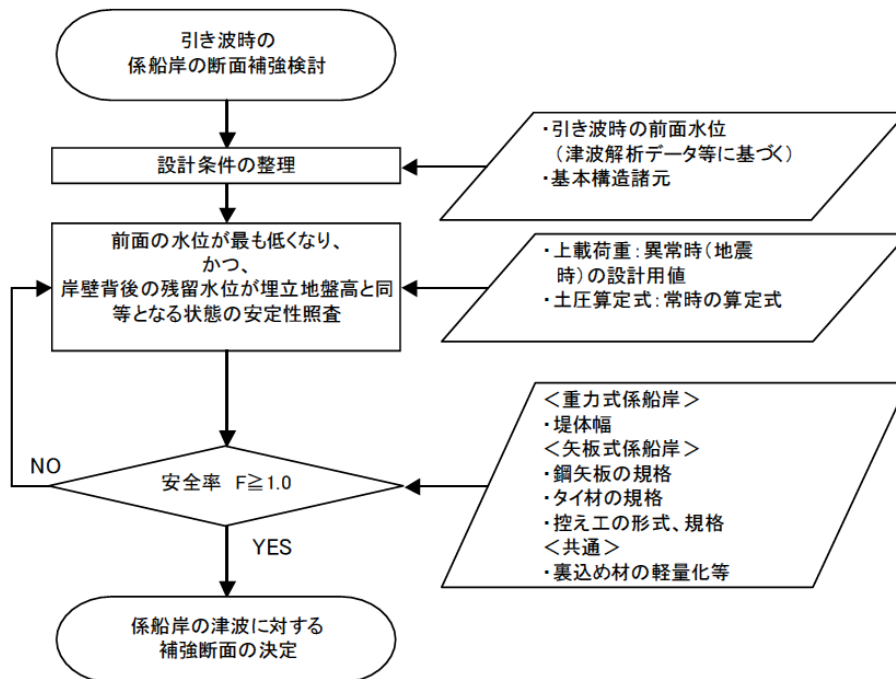


図 4.23 引き波時の安定性照査のフロー²⁰⁾

②設計荷重及び土圧分布の考え方

- ・土圧分布形状は、「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003 年版 p. 111」²¹⁾に基づくものとする。
- ・上載荷重は、異常時であることを考慮して常時の半分、すなわち地震時の設計用値を与える。
(「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003 年版 p. 146～147」²¹⁾より)
- ・土圧分布は、震度を考慮せず、常時の土圧算定式により与える。

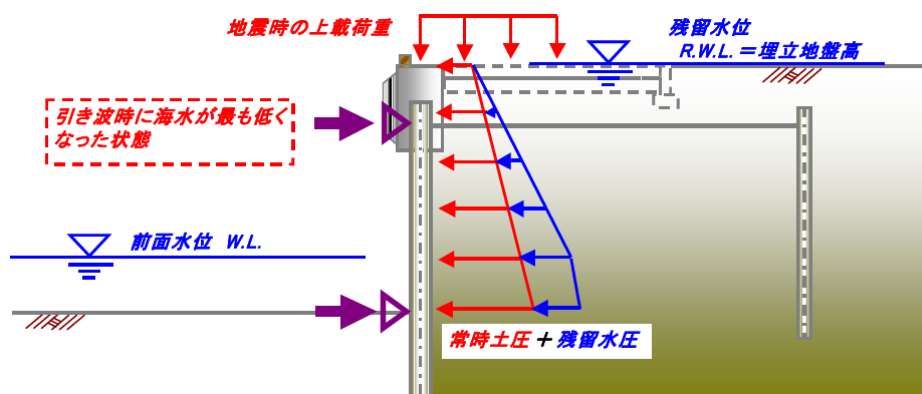


図 4.24 矢板式岸壁の安定性照査のイメージ²⁰⁾

4.2.2 既往補強方法

(1) 防波堤の補強方法

①補強方法例：国土交通省 東北地方整備局

防波堤の粘り強い構造への対応方策として、国土交通省では、津波の作用形態、被災パターン別に以下の越流洗掘型、津波波力型、堤頭部洗掘型、引波水位差型の4分類に整理している。

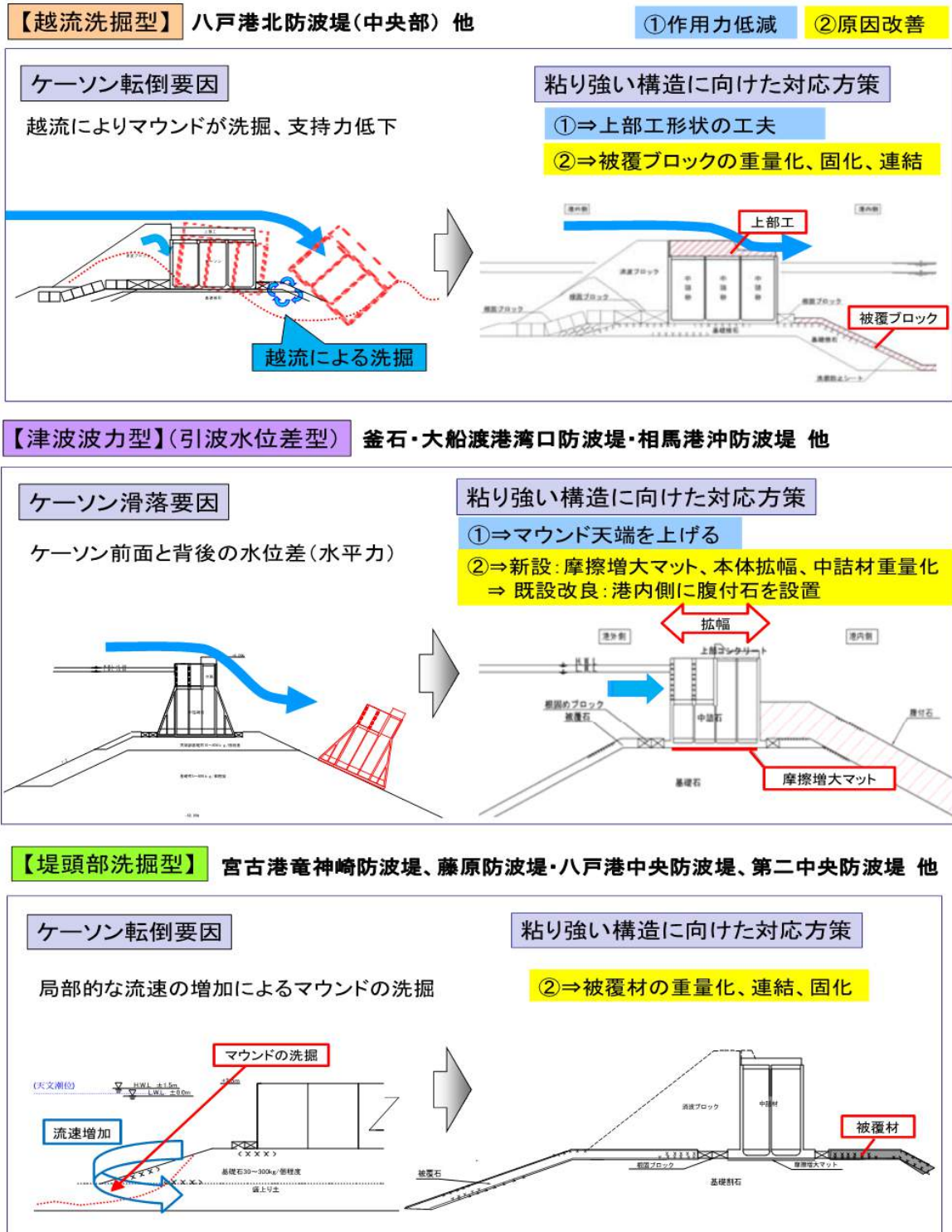


図 4.25 国土交通省東北地方整備局の提案する防波堤の補強方法²²⁾

②補強方法例：水産庁

尚、以下の補強方法例に適用可能と考えられる補強技術を別途資料に示す。

対策の方向性 対応機構メカニズム	液力に対する抵抗力の増加 津波力型／引き波力型	洗掘防止 堤頭部洗掘型／逆流洗掘型
発生頻度の高い津波への対応策	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>	<p>引き波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>
対策の方向性 対応機構メカニズム	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>
発生頻度の低い津波への対応策	<p>土留の根入れ長 土留の根入れ長 土留の根入れ長 押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力</p>	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>
対策の方向性 対応機構メカニズム	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>	<p>押し波等による水圧力 引寄せ等による水圧力 土留の根入れ長</p>

図 4.26 水産庁の提案する防波堤の補強方法²⁰

(2) 岸壁・護岸の補強方法

補強方法例：水産庁

尚、以下の補強方法例に適用可能と考えられる補強技術を別途資料に示す。

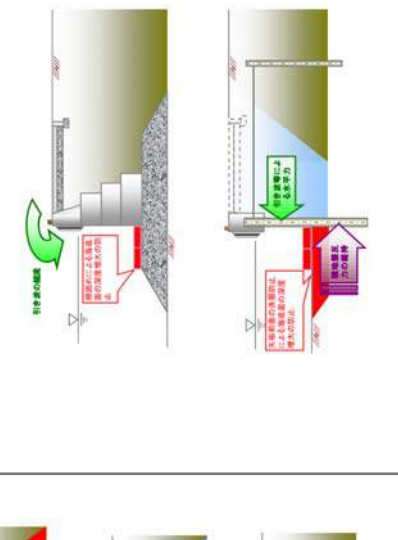
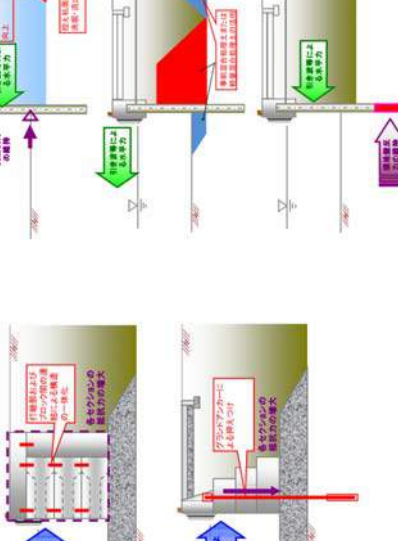
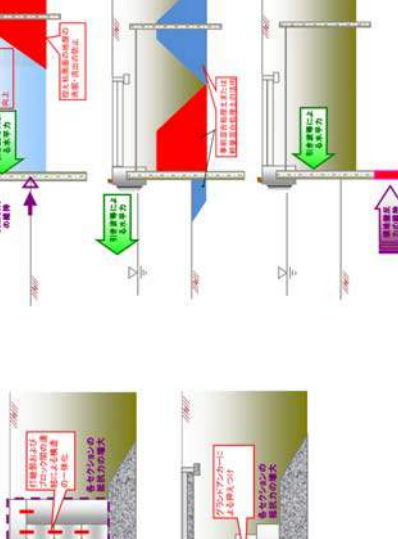
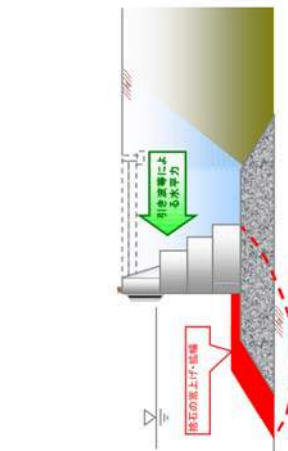
<p>対策の方向性 対応策選メカニズム</p>	<p>波力に対する抵抗力の増加 流速波力型/引き波力型</p>  <p>発生頻度の高い津波への対応策</p>	<p>洗掘防止 裏込材盛出型</p>  <p>■洗掘防止工の設置(補遺材の崩れに対する安定重量を確保する)</p>	<p>対策の方向性 対応策</p>
<p>対策の方向性 対応策</p>	<p>部材強度の向上、単立地盤の事前適合処理または経年適合処理(土圧・水圧)に対し、部材発生強度を基準値以下とする) ■グラウトアンカー・構造の一体化(引き波力等の滑動・転倒等の安全率を基準値以上とする) ■杭・矢板の根入れ長の増大(所要根入れ長の照査)</p>  <p>■部材強度の向上、単立地盤の事前適合処理、エプロンの設置等、上部エプロンとの連動等により、部材が一体化となり、抵抗力を向上させる。</p> <p>■岸壁の打設 埋設部の岸石の設置からの保護</p> <p>■岸壁の打設による抵抗力の増大</p>	<p>■岸壁の打設による抵抗力の増大</p>  <p>■岸壁の打設による抵抗力の増大</p> <p>■岸壁の打設による抵抗力の増大</p>	<p>対策の方向性 対応策</p>

図 4.27 水産庁の提案する岸壁・護岸の補強方法²⁰⁾

(3) 水門の補強方法

水門の補強方法として、宮城県公共土木施設構造検討会において下記の4項目が提案されている。

① 耐力確保

部材の耐力を確保するため堰柱長さを十分確保する。また、コンクリート等により門柱の巻きたてを行う²⁴⁾。

② 操作台に対する対策

操作台下部の形状を工夫することにより、津波作用時の水平力・浮力の低減を図る。さらに、操作台に上屋を設置することで防水・耐水化し、上屋自体の形状を工夫して水平力・浮力を低減する。

③ 排水機能確保

巻上機が損傷してゲートの開閉に支障が生じた場合に備え、ゲートインゲート等の形式を採用することにより排水機能を確保する。

④ 巻上機等設備に対する対策

ラック棒（ギアと咬み合うことで、上下スライド式の扉体を駆動するための歯あるいはピンが設けられた棒材）への漂流物の衝突を防ぐため、防護壁を設置する。

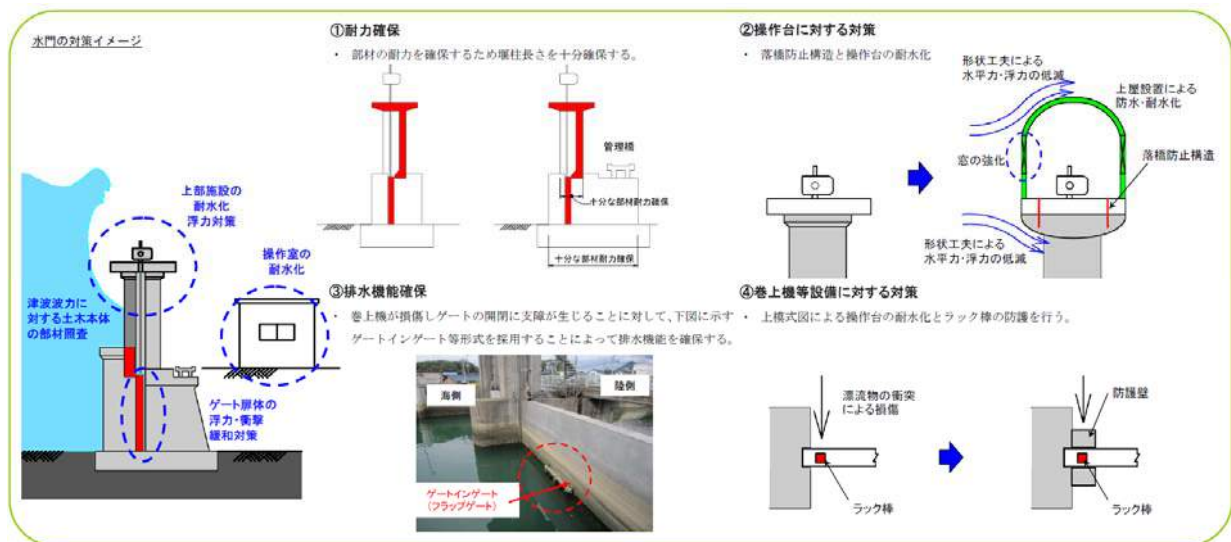


図-4.28 水門の補強方法²³⁾

4.3 既設構造物を活用した二線堤の築造法

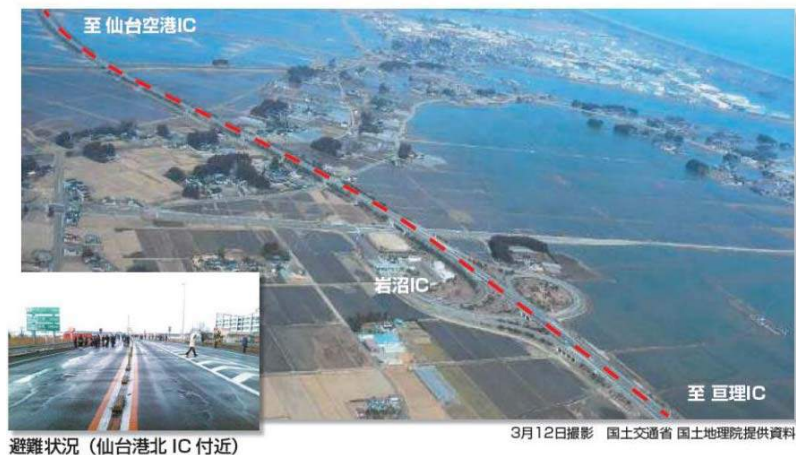
4.3.1 二線堤の果たす役割

(1) 東日本大震災における二線堤の減災効果

東日本大震災では、仙台東部道路や国道6号相馬バイパスなどの道路が防潮堤のような効果を発揮し、市街地への津波・瓦礫の流入を抑制して被害を軽減させた事例が見られた。

①仙台東部道路

海岸から約4kmまで津波が到達したが、仙台東部道路の盛土構造(7m~10m)により市街地への津波・瓦礫の流入を抑制している。



仙台東部道路(宮城県岩沼市)

図 4.29 台東部道路の減災効果事例²⁵⁾

②国道6号相馬バイパス

福島県相馬市では、国道6号相馬バイパスの盛土区間が防潮堤の役割を果たし、津波浸水を防止している。



国道6号相馬バイパス(福島県相馬市)

図 4.30 国道6号バイパスの減災効果事例²⁵⁾

このような東日本大震災の事例を元に、これまでの防波堤・防潮堤による「一線防御」から、ハード・ソフト施策の総動員による「多重防御」への転換が進められており、ハード面での津波防護施設として「二線堤」が重要視されている。

(2) 二線堤とは？

河川構造物としての「二線堤」は、洪水で河川が氾濫した場合、氾濫水による被害を抑制するための第二の堤防のことであり、副堤、控え堤、二重堤ともいう。

海岸構造物としての「二線堤」は、津波や高潮などによる被害を抑制するために、防潮堤よりも陸側の防御を目的とする。例えば、道路や鉄道線路を盛土構造にして堤防の役割を果たすものなどがある。

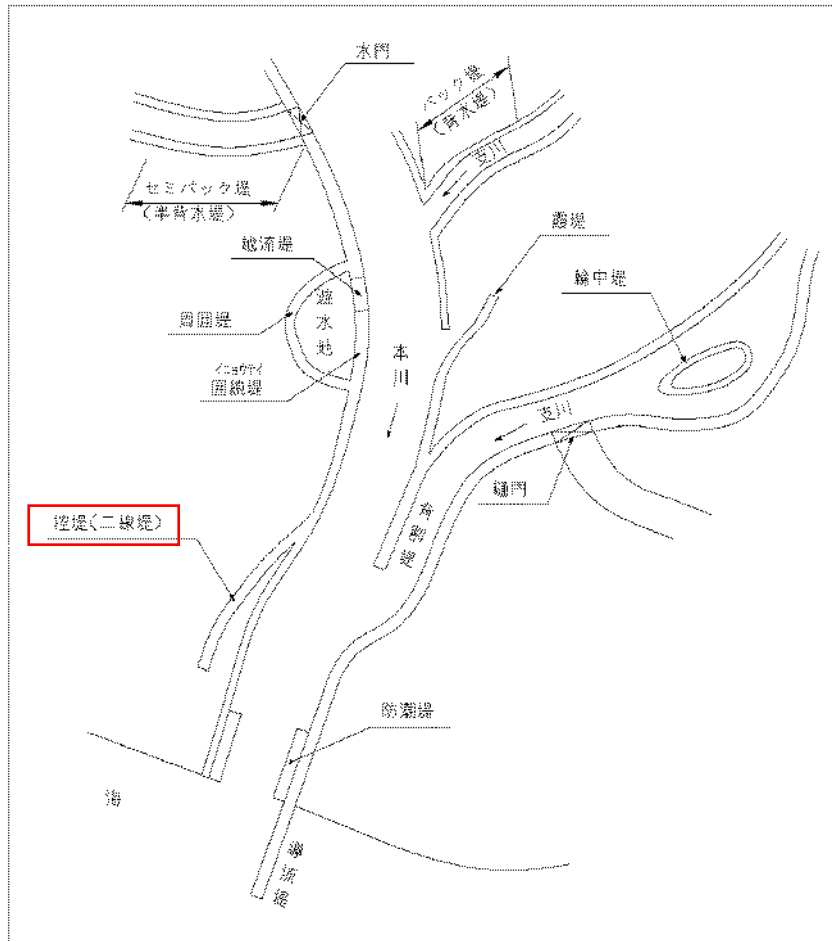


図 4.31 河川堤防の種別²⁶⁾

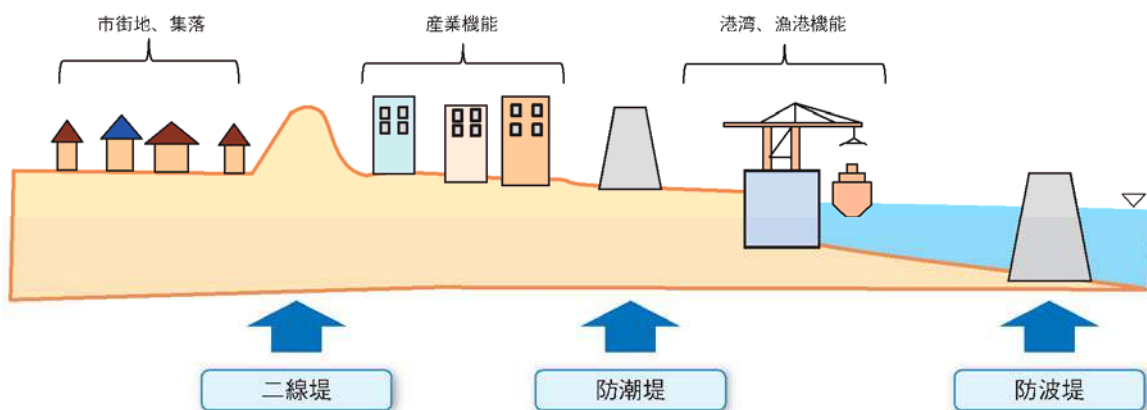


図 4.32 防波堤・防潮堤、二線堤のイメージ²⁷⁾

(3) 全国各地の二線堤の事例

二線堤は、東日本大震災によりその重要性が再認識されたが、わが国において古くから主に河川の洪水対策技術として活用されている。

①河川堤防（荒川流域）

例えば、江戸時代の二線堤として、荒川の日本堤・隅田堤が挙げられる。

日本堤は1693年の築造、隅田堤は16世紀後半の築造で、江戸市街地を洪水から守るために築造されたといわれている。

日本堤と隅田堤が接近する部分は、堤防が漏斗状に狭窄部を形成していることにより、日本堤の上流側を氾濫地帯として下流へ流れる量を制御し、洪水の調整を行っていたと考えられる。

なお、規模の大きな洪水の場合には、右岸側の日本堤よりも左岸側の隅田堤の方が決壊しやすい状況にあったため、1896年の洪水の際には、隅田堤を人工的に決壊させて、東京の市街地が守られた。なお、日本堤は、関東大震災の震災復興や東京オリンピック時期の再開発により撤去された。



図 4.33 日本堤・隅田堤の位置と効用 28)

②河川堤防（吉田川流域）

鳴瀬川と吉田川に挟まれた宮城県鹿島台町、大郷町、松島町は、古くから水害に悩まされてきた。1987年8月の洪水後、建設省は「水害に強いまちづくり事業」をスタートし、当該地域を全国唯一の地域に指定して、鹿島台駅周辺の市街地を水害から守るために、新設バイパス道路や嵩上げ道路などを用いた二線堤が建設された。

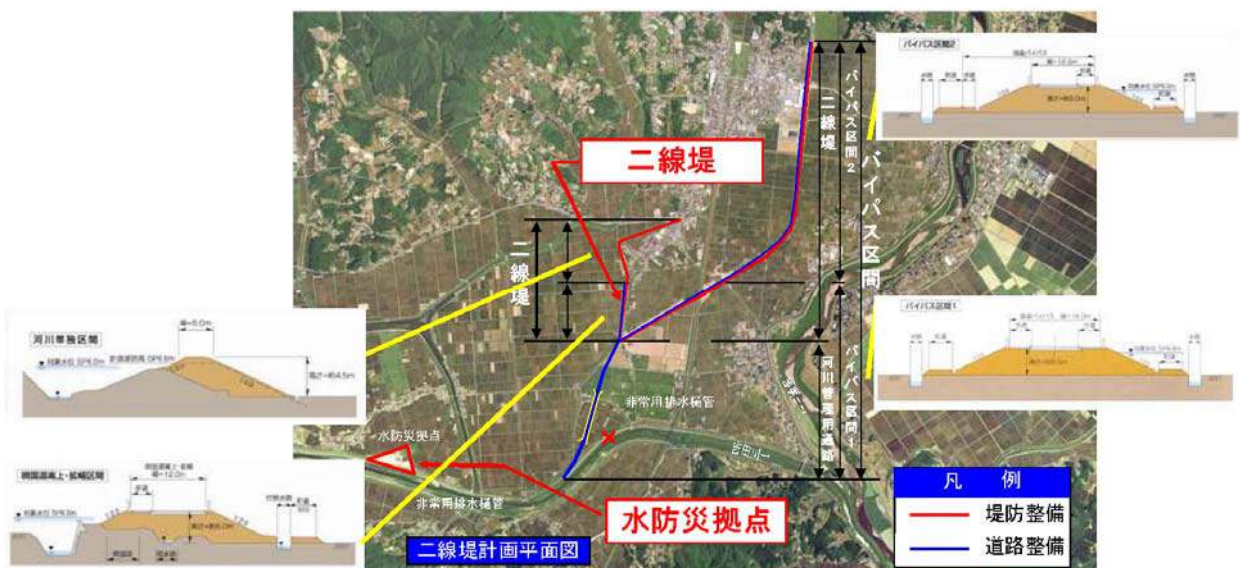


図 4.34 吉田川流域の二線堤計画平面図 29)

③海岸堤防（有明海沿岸）

有明海沿岸に現存する二線堤は干拓地の拡大により内陸に残された堤防で、佐賀市川副町から鹿島市にかけて十数カ所、計 33km にわたって現存している。杵島郡白石町で大雨による浸水の防護壁に使われている例もあるが、ほとんどは役割を終えたコンクリート壁となっており、新しい堤防でも築 50 年以上が経過している。

しかし、東日本大震災で高速道路の盛土構造が津波の拡大を防いだことを受けて、佐賀県に現存する二線堤を防災の面で再評価する方針を佐賀県地域防災計画に盛り込み、二線堤の有効活用について検討されている。

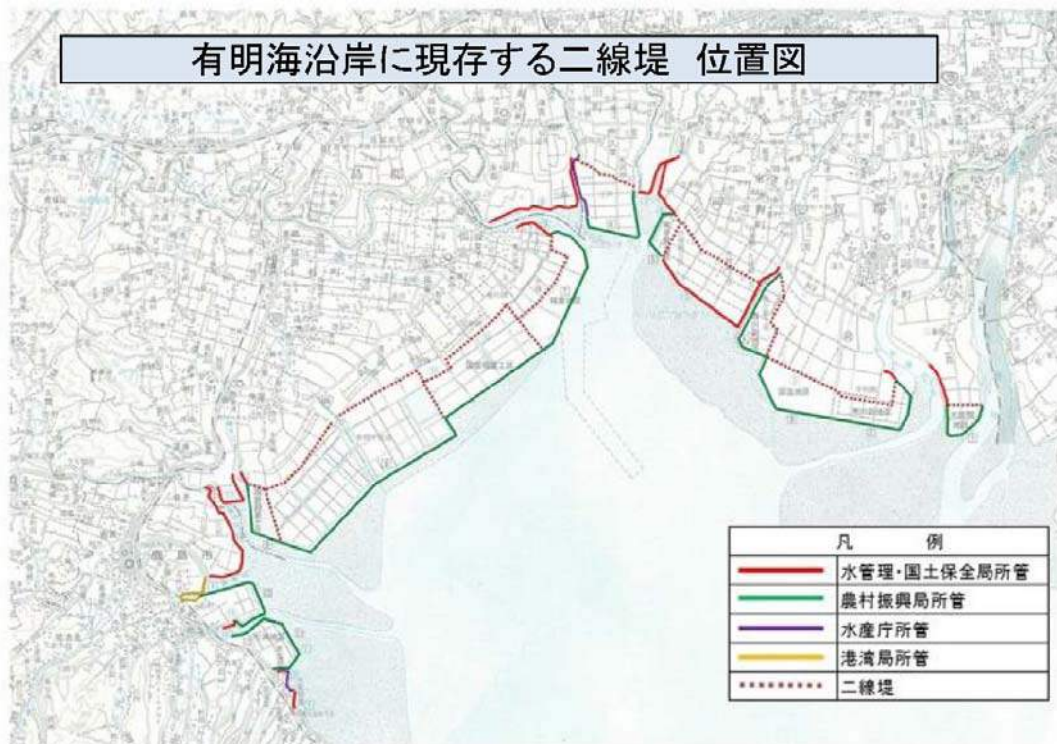


図 4.35 有明海沿岸の二線堤位置図 ³⁰⁾

(4) 今後の津波防災まちづくりについて

国交省は、東日本大震災を教訓とし、「なんとしても人命を守る」という社会資本整備の使命を踏まえ、今後の津波防災まちづくりの考え方について方向性を示している。³¹⁾

これまでの防波堤・防潮堤による「一線防御」から、地域ごとの特性を踏まえたハード・ソフト施策の適切な組み合わせによる「多重防御」への転換が必要であり、海岸保全施設や港湾施設等による防御効果に加え、二線堤、宅地、公共施設の盛土等、津波防護に寄与する施設を「津波防護施設」として積極的に活用するという新しい発想による防災・減災対策がこれからのまちづくり、地域づくりに求められる。³²⁾ 図 4.36 に津波防災地域づくりのイメージを示す。

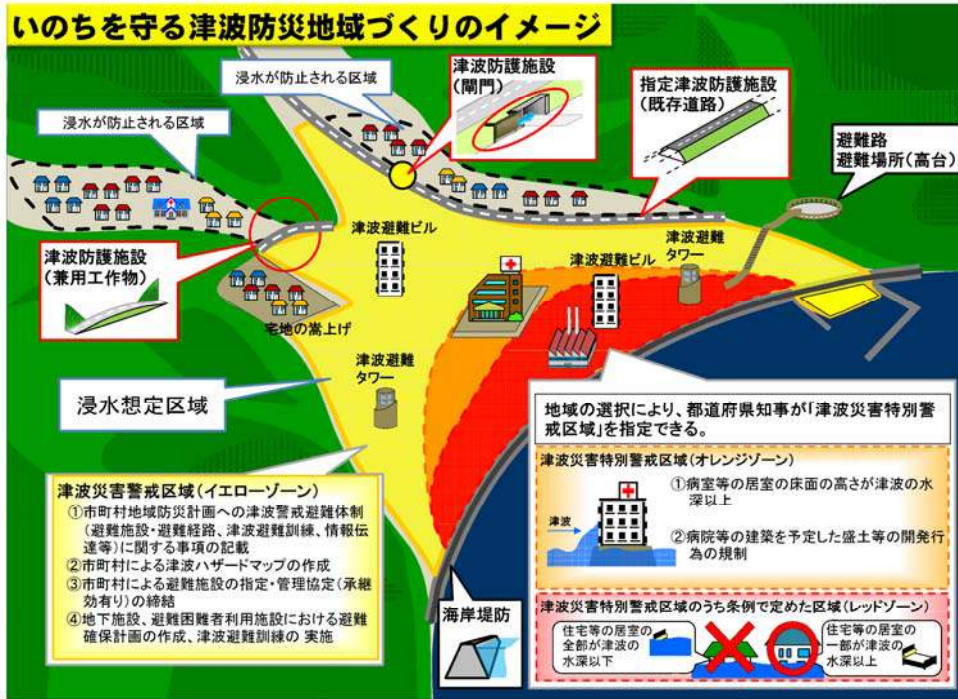


図 4.36 津波防災地域づくりのイメージ³³⁾

このような動向の中で、全国で活用可能な一般的な制度として「津波防災地域づくりに関する法律（平成 23 年法律第 123 号）」が整備され、津波防護施設に関する財政上等の措置として、費用の補助や税制上の控除など、国による地方の津波防災地域づくりのバックアップが進められている。

交付対象は、背後地への津波による浸水を防止するための道路・鉄道と一体となって整備する盛土構造物であり（閘門・胸壁・護岸の設置なども含まれる）、新設または改良を行う津波防護施設整備事業である（図 4.37 参照）。



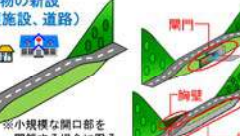
津波防護施設整備事業		社会資本整備総合交付金 交付要綱（H23.12.27）抜粋
1. 交付対象 都道府県又は津波防護施設管理者の指定を受けた市町村		補助率：1/2 事業費下限値：推進計画の総事業費が、 (ア) 都道府県5千万円以上、(イ) 市町村2千5百万円以上
2. 交付対象事業 (1) 津波防護施設整備事業 津波防護施設整備事業は、津波防災地域づくりに関する法律第10条第1項に規定する推進計画に記載され、かつ同法第29条第2項に規定する国土交通省令で定める基準 [*] を満たす津波防護施設の新設又は改良を行う事業のうち、次のいずれかの要件に該当するもの。※津波の浸水防止に必要となる高さや波力等に対して安全な構造等を定める予定		
交付対象事業 ・盛土構造である既存の道路、鉄道を活用しその施設の背後地への津波による浸水を防止するための閘門、胸壁 [*] であり、次の要件に該当するもの。 ※胸壁の整備は一部高さが低い箇所を補うものに限る。その長さは概ね延長500m以内とする。 イ 人家20戸以上 [*] を防護するもの。 ただし、災害時要援護者関連施設又は市町村の地域防災計画に位置づけられている避難所が存在する場合は10戸以上を防護するもの。 ※転入や再建により人家20戸以上と見込まれる場合を含む。	イメージ（道路を例としている） ○既存道路盛土への閘門の設置  ・新たに設置する閘門に限り補助対象とする。 ・既存道路（又は鉄道）盛土は、国土交通省令で定める技術上の基準に準じた構造を持つものに限る。	
・背後地への津波による浸水を防止するための道路、鉄道と一体となって整備する盛土構造物であり、次の全ての要件に該当するもの。 イ 概ね延長500m以内であるもの（津波防災地域づくりに関する法律第29条第2項に規定する国土交通省令で定める基準を満たすために必要となる護岸を含む。必要に応じて設置する胸壁、閘門を含む）。 ロ 人家20戸以上 [*] を防護するもの。 ただし、災害時要援護者関連施設又は市町村の地域防災計画に位置づけられている避難所が存在する場合は10戸以上を防護するもの。 ※転入や再建により人家20戸以上と見込まれる場合を含む。	○既存道路盛土への胸壁の設置  ・新たに設置する胸壁に限り補助対象とする。（概ね500m以内） ・既存道路（又は鉄道）盛土は、国土交通省令で定める技術上の基準に準じた構造を持つものに限る。	
・背後地への津波による浸水を防止するための道路、鉄道と一体となって整備する盛土構造物であり、次の全ての要件に該当するもの。 イ 概ね延長500m以内であるもの（津波防災地域づくりに関する法律第29条第2項に規定する国土交通省令で定める基準を満たすために必要となる護岸を含む。必要に応じて設置する胸壁、閘門を含む）。 ロ 人家20戸以上 [*] を防護するもの。 ただし、災害時要援護者関連施設又は市町村の地域防災計画に位置づけられている避難所が存在する場合は10戸以上を防護するもの。 ※転入や再建により人家20戸以上と見込まれる場合を含む。	○兼用工作物の新設（津波防護施設、道路）  ・小規模な開口部を閉鎖する場合は限り、道路、鉄道との兼用の盛土構造物を補助対象とする。（概ね500m以内、災害時要援護者施設等を防護） ・必要に応じて設置する閘門、胸壁、護岸も補助の対象を含む。	

図 4.37 津波防護施設整備の交付対象事業³³⁾

4.3.2 既設構造物の被災想定及び対策

既設構造物（二線堤）の被災想定及び対策については、「津波防災地域づくりに係る技術検討報告書」2012年1月27日 津波防災地域づくりに係る技術検討会³⁴⁾を参考として、以下に記述する。

(1) 既設構造物における津波浸水深

図4.38に示すように、最大クラスの津波（L2津波）が海岸堤防を越えて侵入した場合の既設構造物（二線堤）周辺の浸水深は、「津波浸水シミュレーション」により想定することができる。

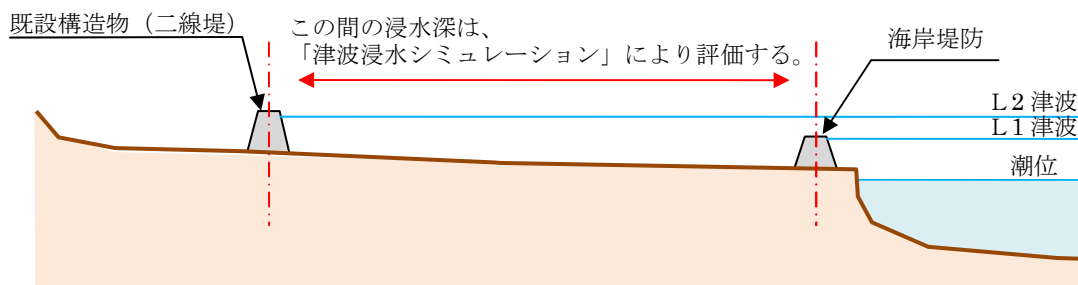


図 4.38 既設構造物（二線堤）の浸水深の想定

(2) 想定する盛土・切土及びその周辺における被災想定

盛土・切土及びその周辺における津波の挙動は、遡上した津波が盛土・切土の海側のがけ面に達し、その前面で水位が上昇することや、盛土・切土のがけ面に沿って、その背後に回り込むような流れが発生すること、津波の周期が数十分程度であるため、がけの浸水継続時間は同程度以下であることを想定する。

遡上した津波による被災形態を想定し、盛土・切土の検討事項を図4.39の4種類に整理する。

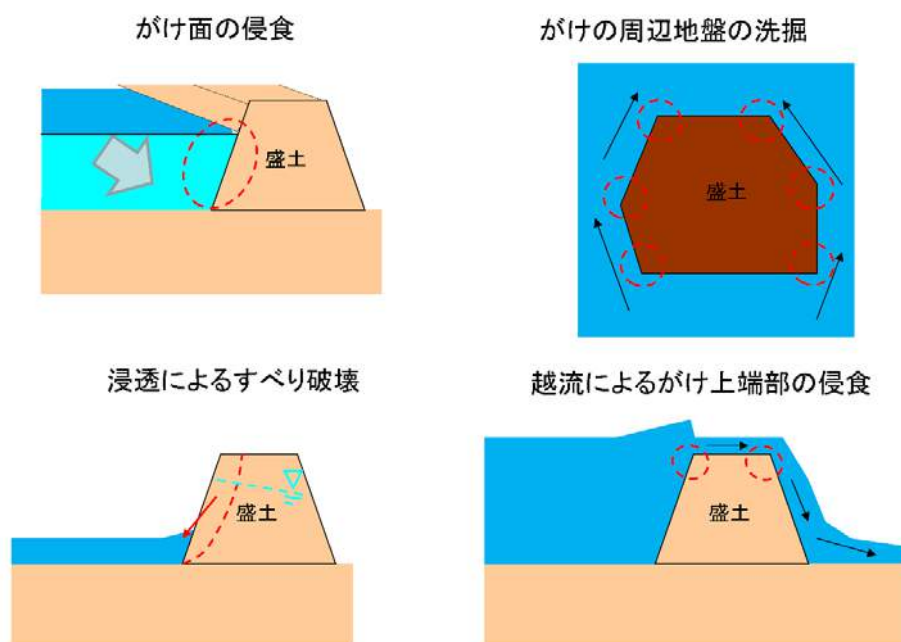


図 4.39 盛土切土の被災形態³⁴⁾

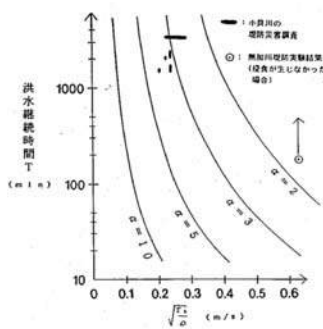
(3) がけ面の侵食

盛土・切土により生ずるがけ面については、切土をした土地の部分に生ずるがけの土質や勾配等の一定の要件を満たす場合を除き、擁壁によりがけ面を覆うことを基本とするが、がけ面が擁壁で被覆されていない場合には、流水のせん断力により、がけ面が侵食され、これが進行するとすべり破壊の発生が懸念される。このため、津波浸水シミュレーションを用いて、津波の流況からがけ面の侵食深さを算出した結果を踏まえ、モルタル吹付けによらず、芝張りによりがけ面を保護することとする。

1) がけ面の侵食に関する既往知見

がけ面の侵食に関する既往知見としては、**図 4.40** がある。津波は流速の時間的変化が大きいため、その変化を考慮できる方法の検討が必要となる。

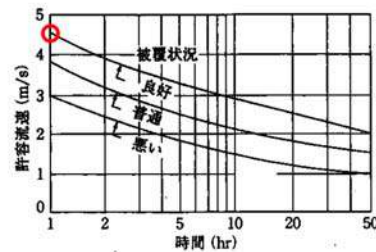
○福岡らのノシバの侵食限界判定図



→ 定常的な洪水の継続時間と摩擦速度との関係を整理したもの

○Hewlettらの許容流速

(侵食防止・抑制が可能と判断される最大の流速)



→ 植生による被覆状況に応じた、継続時間が1時間を超える定常的な流れによる耐久性を整理したもの

図 4.40 がけ面の侵食に関する既往知見³⁴⁾

2) 侵食深の算定方法および試算

土木研究所資料第 3489 号「洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動」では、がけ面の侵食深は次式で算定できる。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha u_{*b}}{\ln(10)} \exp\left(-\frac{\ln(10)}{\alpha u_{*b}} z\right) \quad u_{*b} = 0.87u_{*f} \quad \dots\dots\dots \text{式 4.3.1}$$

z : 侵食深(cm)

t : 時間 (分)

u_{*b} : がけ面上に作用する摩擦速度 (m/s)

u_{*f} : 堤防のり尻部近傍の高水敷上に作用する摩擦速度 (m/s)

u_{*f} は次式 (Manning 則) で算出することができる

$$u_{*f} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = g^{1/2} n v h^{-1/6} \quad \dots\dots\dots \text{式 4.3.2}$$

- α : 植生の侵食耐力を表すパラメータ
本試算では、 $\alpha=9$ (良好ではない被覆状態) を想定した。
- n : 植生の侵食耐力を表すパラメータ
本試算では、 $n=0.04$ を想定した。
- h : 5~10m (浸水深)
- h_v : 50cm 程度 (管理が悪い場合の植生の高さ)

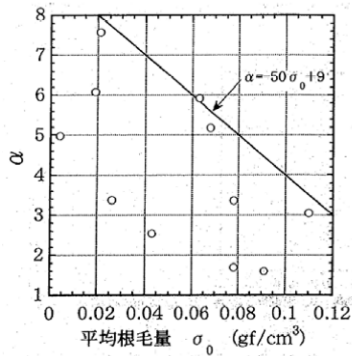
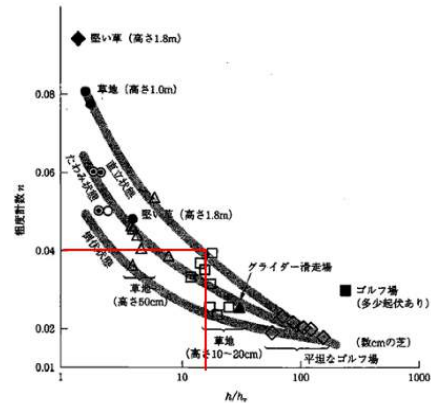


図 4.41 植生の侵食耐力パラメータ³⁴⁾



(出典: 河道計画検討の手引き)

図 4.42 粗度係数³⁴⁾

3) 侵食深の閾値

土木研究所資料第 3489 号「洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動」では、**図 4.43**のように侵食深 2cm を境にして、最大侵食深さが小さい側に A タイプ、大きい側に B タイプ、C タイプの侵食形態が集中していると考えられることから、許容侵食深を 2cm としている。

一方、**図 4.44**に示したように、シバの根毛量は地表面から 5cm 程度まで一定量あることが確認されている。

シバがある程度残っていればがけ面全体の破壊には及ばないと考えられることから、侵食深 z が 5cm を越えると植生では耐えられないとする (侵食深の閾値とする)。

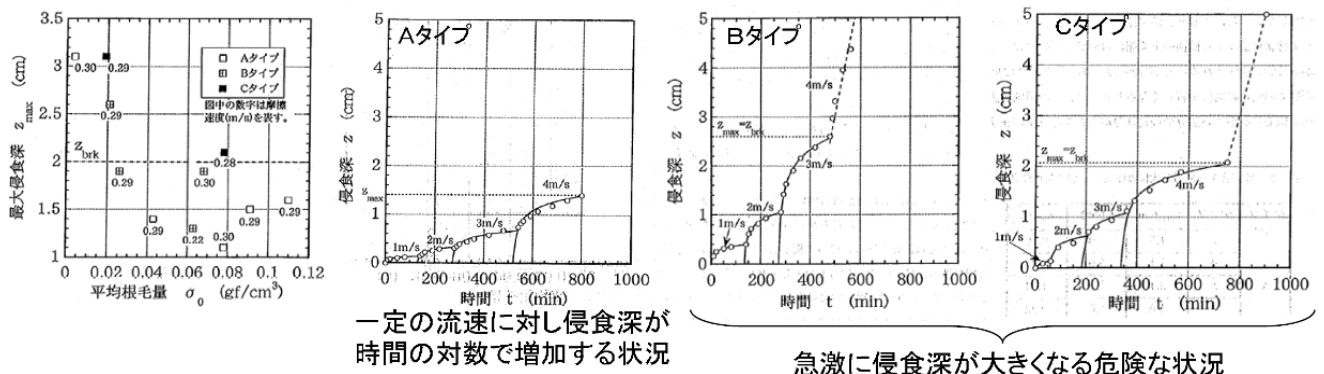


図 4.43 タイプ別侵食深の揭示変化³⁴⁾

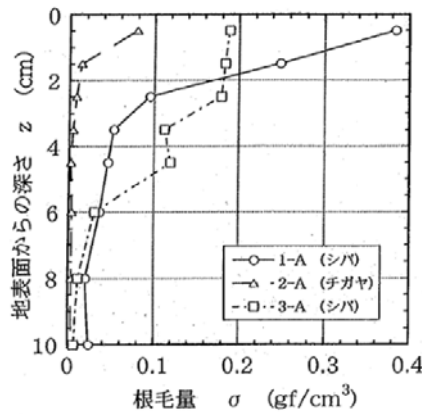


図 4.44 毛根量の深さ方向分布³⁴⁾

4) 侵食深の試算結果

植生の管理がよくない状態を想定した侵食深の試算結果において、侵食深の閾値以下となった(図 4.45 を参照)。これより、がけ面の植生を管理することで、津波の流水によるがけ面の侵食を軽微に留めることができると考えられる。

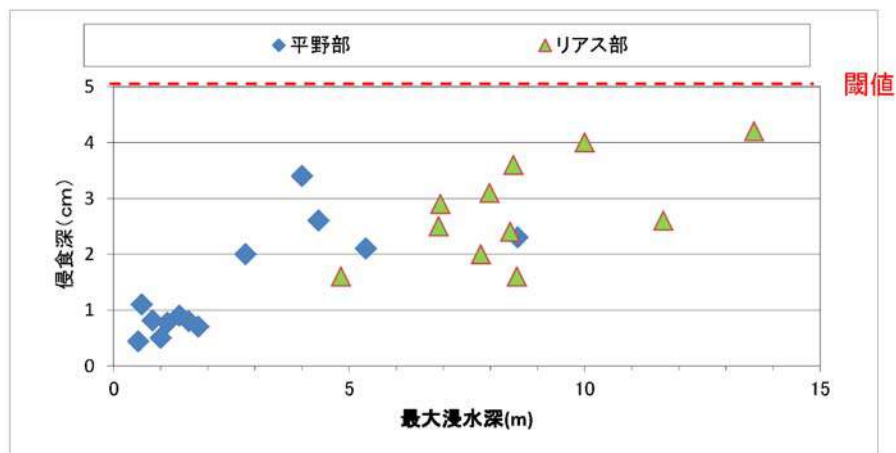


図 4.45 侵食深の試算結果³⁴⁾

(4) がけの周辺地盤の洗掘

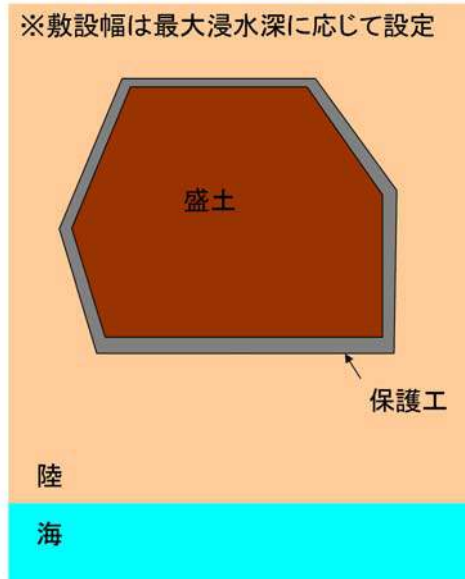
盛土・切土により生ずるがけの隅角部では流水が集中するため、そこから洗掘が進み、がけ面のすべり破壊や擁壁の倒壊が懸念される。また、津波の波源域の位置や押し波と引き波とで津波の流れの向きが大きく異なることがあるため、全てのがけの法尻において洗掘対策を必要とすることを基本とするが、津波浸水シミュレーション等によって洗掘を考慮しなくても良い箇所を設定することも可能とする。

1) がけ面の法尻における洗掘について

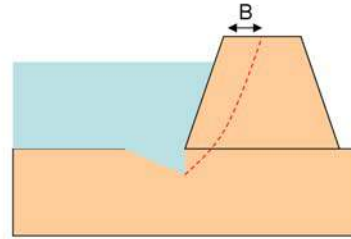
がけ面の法尻における洗掘対策は、想定される最大洗掘深を考慮した上で、円弧すべりによる安定解析を行い、安全率が 1.0 を上回るかどうか評価し、その結果に基づいて、保護工の設置(各種根固め等)による洗掘対策、又は洗掘を前提とした盛土・切土のセットバックを行うこととする(図 4.46)。

○保護工を敷設するイメージ

※敷設幅は最大浸水深に応じて設定



○建築制限(セットバック幅)を設定するイメージ



最大洗掘深を見込んだ円弧すべり計算を行う。
 (最小安全率が1以上の場合)
 新たなセットバックは不要
 (最小安全率が1未満の場合)
 安全率が1未満となるすべり面の中から最大の
 セットバック幅Bを求める。

図 4.46 洗掘対策のイメージ³⁴⁾

保護工の必要幅は、FEMA (Federal Emergency Management Agency of the United States : アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁) ガイドラインを用いて最大浸水深から最大洗掘深を想定し、さらに河川砂防技術基準の根固工の必要敷設幅に係る規定を用いて設定する(図 4.47~図 4.49)。なお、保護工として、各種根固め等によるほか、同規模の道路舗装工(簡易舗装は除く)によることも可能とする(図 4.50~図 4.52)。

また、セットバックにより対応する場合のその幅は、円弧すべりによる安定解析から設定することとする(図 4.46)。

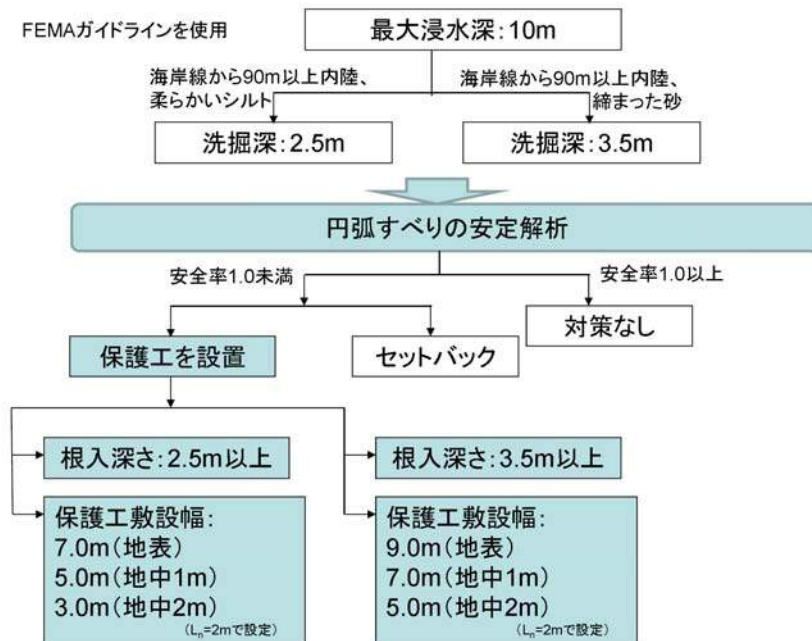


図 4.47 保護工の必要幅の試算例³⁴⁾

FEMA(2008): Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis

Table 7-1 Approximate Scour Depth as a Percentage of Flow Depth, d (Dames and Moore, 1980)

Soil Type	Scour depth (% of d) (Shoreline Distance < 300 feet)	Scour depth (% of d) (Shoreline Distance > 300 feet)
緩い砂 Loose sand	80	60
締まった砂 Dense sand	50	35
柔らかいシルト Soft silt	50	25
固いシルト Stiff silt	25	15
柔らかい粘土 Soft clay	25	15
固い粘土 Stiff clay	10	5

海岸線からの距離 90m未満 90m以上

海岸線から90m以上内陸、堤脚が柔らかいシルト、最大浸水深10mの場合
→洗掘深2.5m

$$(h=10m, Z_s=h \times 25/100)$$

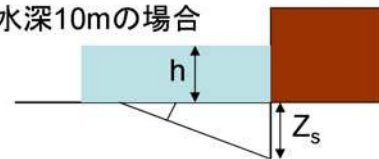


図 4. 48 FEMA 津波避難構造物設計ガイドラインにおける洗掘深と浸水深との関係³⁴⁾

<河川砂防技術基準設計編 根固工>

周辺の河床低下や洗掘が予想される区間では、護岸基礎前面の河床が低下しない敷設幅を確保する必要がある。

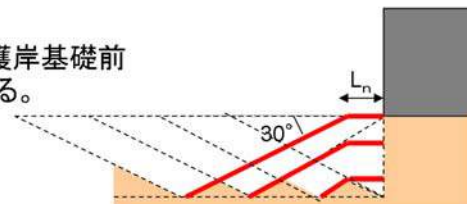
$$B=L_n+\Delta Z/\sin\theta$$

B: 敷設幅

L_n : 護岸前面の平坦幅(ブロック1列もしくは2m程度以上)

ΔZ : 根固工敷設高から最深河床高の評価高までの高低差

θ : 斜面勾配(30°)



これを用いて

たとえば、2.5mの洗掘深が見込まれる場合、洗掘部が30°で安定と仮定すると、

保護工を表面に設置→敷設幅7.0m

保護工を地中1mに設置→敷設幅5.0m

保護工を地中2mに設置→敷設幅3.0m ($L_n=2m$ で設定)

図 4. 49 保護工の必要幅³⁴⁾

①「道路内の流水による舗装面の破壊(土研資料3226号)」の結果

・実験結果から、ひび割れが全面に入るなどの大きな破損が無い限り、流水に対する舗装面の耐力は十分あると考えられる。

【高流速侵食試験装置による実験】

- ・アスファルト舗装(細粒度アスファルト)を対象。
- ・舗装厚(表層+基層)を最小値5cmとする。
- ・上層路盤を粒調砕石(M-40)で層厚15cmとする。
- ・下層路盤はクラッシャーランとする。
- ・流速は3~8cm/sで水深17cmとする。

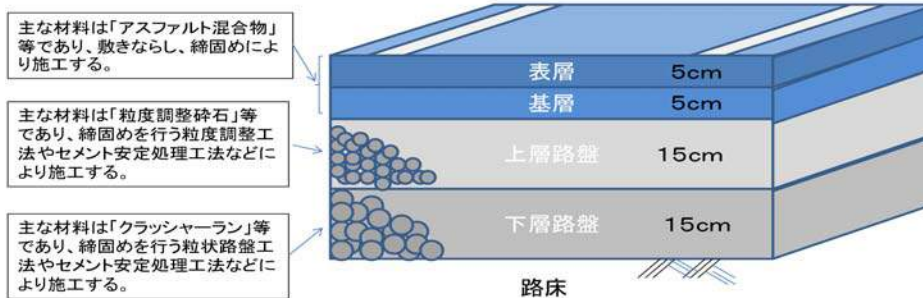
【結果】

- ・通常の状態では、流速8m/sを一時間流しても、道路舗装は剥離しなかった。
- ・ただし、舗装厚と同じ5cmの深さまでひび割れが舗装面全面に入った場合は、流速が7~8m/sの時、数分で剥離した。原因は揚圧力と推定された。

図 4.50 道路舗装工の洗掘防止効果について(1)³⁴⁾

②一般的な道路舗装工の構造について

・道路舗装工は表層、基層及び路盤の多層構造となっており、それぞれが必要な支持力を有している。
 ・このため、仮に表層が剥がれても一体として津波による洗掘を防止する効果があると考えられる。



注1) 舗装設計施工指針(社団法人 日本道路協会)を参考に作成。
 注2) 層厚は一般的道路の一例。歩道の場合は層厚が薄くなる。

図 4.51 道路舗装工の洗掘防止効果について(2)³⁴⁾



○海岸付近

I 地区集落排水処理場付近

- ・一般的な道路舗装部においては路盤までの厚さが25~40cmあるのに対し、簡易舗装部では5cm程度であり、表層が剥がれた後、洗掘が進行している。

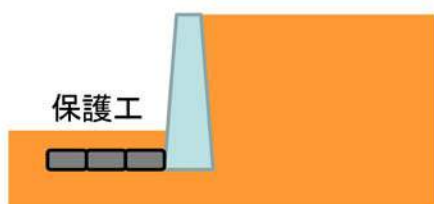
図 4.52 簡易舗装部の洗掘状況³⁴⁾

2) 擁壁で覆われているがけ面の法尻の洗掘について

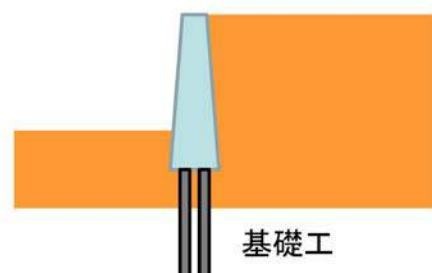
洗掘により擁壁の転倒が懸念される場合には、その対策として、想定される最大洗掘深に応じ、転倒防止対策工の設置（図 4.53）による洗掘対策、又は洗掘を前提とした盛土・切土のセットバックを行うこととする。なお、各種転倒防止工のうち保護工については、同規模の道路舗装工（簡易舗装は除く）によることも可能とする（図 4.50～図 4.52）。

また、セットバックにより対応する場合のその幅は、円弧すべりによる安定解析から設定することとする（図 4.46）。

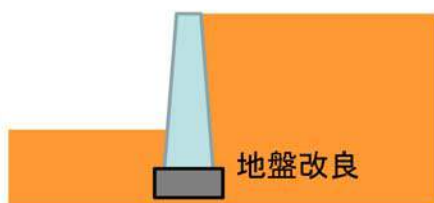
(1) 保護工の設置(各種根固め等)



(2) 基礎工の設置



(3) 地盤改良



(4) 補強土壁



図 4.53 擁壁等の転倒防止対策工のイメージ³⁴⁾

3) 越流した津波の落下によるがけ面の法尻の洗掘について

越流した津波の落下によりがけ面の法尻で洗掘が生じる可能性については、海と反対側においては津波が盛土を回り込むことによりウォータークッションの形成が想定されることから、そのための保護は必要としないことを基本とする。

なお、谷埋め盛土のような場合において、引き波の際にがけ下にウォータークッションが形成されない恐れがある箇所については、1) 又は 2) の保護工によって対応する。

(5) 浸透によるすべり破壊

浸透によるすべり破壊に対しては、盛土をする場合に宅地防災マニュアルに準拠して盛土全体の安定性の検討を行うことで、基本的には安全な構造とすることができる。

ただし、粗粒砂や小礫など締め固めてもせん断強度が小さく浸透しやすい盛土材料で盛土を行った場合等においては、津波来襲時に浸潤線が高くなることから、水位低下時の盛土材の流出やがけ面のすべり破壊の発生も否定はできない。このため、せん断強度が小さく浸透しやすい盛土材料で盛土を行った場合等には、津波による浸透を考慮した条件下で、円弧すべりによる安定解析を行う。

円弧すべりの安全率が 1.0 を上回るかどうか評価し、その結果に基づき、必要があれば対策を講ずることとする (図 4.54)。

なお、対策としては、

- ① 盛土内への浸透抑制対策 (盛土表層への浸透抑制層の設置等)
- ② 盛土内に浸透した水を排水する措置 (排水工の設置等) をした上での盛土補強対策 (盛土材の流出に留意)

のいずれか、又は浸透によるすべり破壊を前提とした盛土のセットバックを行う。

また、セットバックにより対応する場合のその幅は、円弧すべりによる安定解析から設定することとする。

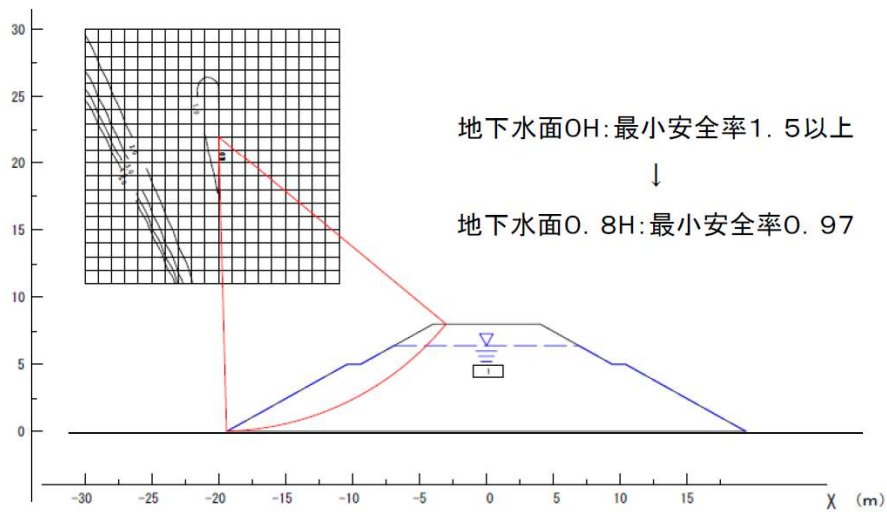


図 4.54 浸透により危険となる場合³⁴⁾

(6) 越流によるがけ上端部の侵食³⁵⁾

がけの上端部では津波の越流により侵食が生じることが考えられることから、河川管理施設における低水護岸の天端工の規定を活用し、対策を行うこととする。

低水護岸は流水により裏側から侵食されることを防止するため、必要に応じて天端工・天端保護工を設けるものとする (天端工の幅は 1~2m 程度)。

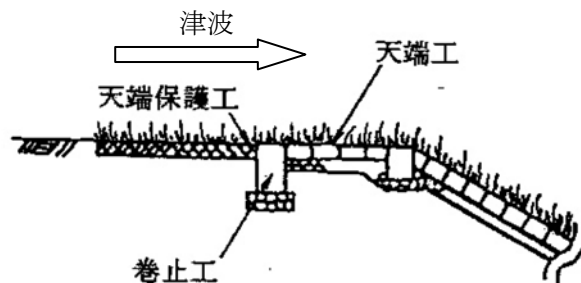


図 4.55 がけ上端部の侵食に対する保護工の幅

出典「建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 設計編 [1]」(参考文献 35))

4.3.3 二線堤の設計

二線堤（津波防護施設）の設計については、「津波防災地域づくりに係る技術検討報告書」平成24年1月27日 津波防災地域づくりに係る技術検討会³⁴⁾を参考として、以下に記述する。

(1) 目的と機能、施設形態

二線堤（津波防護施設）は防潮堤の陸側に設置し、最大クラスの津波に対して人命を守ることを目的とする。二線堤の構造は、内陸部において後背市街地への津波による浸水を防止する機能を有する盛土構造物・護岸、胸壁、閘門である。また、既設の道路や鉄道等を利用することも想定する。

二線堤は発生頻度がまれな最大クラスの津波による浸水の拡大を防止するため越流しない設計となっている。したがって、陸域に遡上して一定程度進行した後の津波の挙動を把握する必要がある。

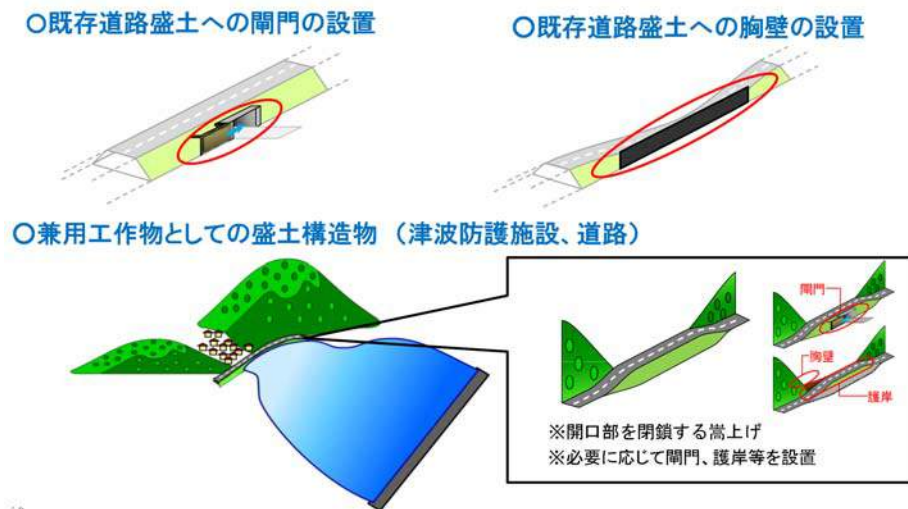


図 4.56 津波防護施設³⁴⁾

(2) 要求性能

1) 目的達成性能

天端高は、津波浸水想定に定める水深にせき上げによる水位の上昇等を加えた値以上とする。

2) 安全性能

地形、地質、地盤の変動等の状況を考慮し、自重、水圧及び波力並びに地震の発生、漂流物の衝突等による振動及び衝撃に対して安全な構造とする。なお、漂流物としては、陸域に存在し、所有者が不特定である自動車及び流木（木造家屋由来のもの）等を対象とする。

また、近傍の土地利用状況や洪水時及び内水氾濫時を考慮し、排水等に支障が無いようにする。

(3) 二線堤（津波防護施設）の技術上の基準の方針

盛土構造物・護岸については、道路や鉄道等の施設を活用できる場合に、当該施設管理者の協力を得ながら、これらの施設を活用していくことが想定されることから、既存の技術基準を参照し（資料-1）、津波の挙動に対して安全な構造とするために必要な事項を加えて、津波防護施設の技術上の基準とする。胸壁及び閘門については、同様の施設形態に関する規定がある「海岸保全施設の技術上の基準」を参照し、海岸部とでは想定する津波の挙動が異なることを考慮しつつ、津波防護施設の技術上の基準とする。

(4) 盛土構造物・護岸

1) 照査において考慮すべき条件（留意点）

以下の津波による作用を盛土構造物・護岸の型式や諸元の決定に当たって考慮すべき条件とする。

- ①水位、流れ：天端高の決定、法面の保護、法尻の保護
- ②地形、地質、自重、地盤の変動、地震の発生：道路や鉄道の盛土構造物として考慮済み
- ③水圧、波力、漂流物の衝突等による振動及び衝撃：考慮不要（圧縮力に盛土は強いいため）

2) 照査方法のイメージ

盛土構造物の天端高が、津波浸水想定に定める水深にせき上げによる水位の上昇等を加えた値以上であることを、津波浸水シミュレーションを用いて照査する。

また、津波の流れにより、盛土構造物の法面が侵食されたり、法尻で洗掘が生じて法面がすべったりする可能性があることから、安全性能として、護岸や洗掘対策の必要性を照査する方法を以下に示す。

①護岸の必要性の照査

- ・のり面が芝張りの場合には原則照査は不要
- ・必要に応じ津波浸水シミュレーションで得られる浸水深及び流速の時系列データを用いて、のり面侵食深を計算

②洗掘対策の必要性の照査

- ・FEMA津波避難構造物設計ガイドラインを用いて、津波浸水シミュレーションで得られる最大浸水深から最大洗掘深を計算
- ・河川砂防技術基準設計編の根固工の規定を活用して、最大洗掘深から根固工の必要幅を計算

(5) 胸壁

1) 照査において考慮すべき条件（留意点）

以下の津波による作用を胸壁の型式や諸元の決定に当たって考慮すべき条件とする。

- ①水位、流れ：天端高の決定
- ②水圧、波力、地形、地質、自重、地盤の変動、地震の発生、漂流物の衝突等による振動及び衝撃：海岸保全施設の技術上の基準と同等に扱う。

2) 照査方法のイメージ

胸壁の天端高が、津波浸水想定に定める水深にせき上げによる水位の上昇等を加えた値以上であることを、津波浸水シミュレーションを用いて照査する。

(6) 閘門

1) 照査において考慮すべき条件（留意点）

以下の津波による作用を閘門の型式や諸元の決定に当たって考慮すべき条件とする。

- ①水位、流れ：天端高の決定
- ②水圧、波力、地形、地質、自重、地盤の変動、地震の発生、漂流物の衝突等による振動及び衝撃：海岸保全施設の技術上の基準と同等に扱う。ただし、発生頻度がまれであることから、経済性や操作性、維持管理等を考慮した上で、具体的な設計（水密性や材質など）を行う。

2) 照査方法のイメージ

閘門の天端高が、津波浸水想定に定める水深にせき上げによる水位の上昇等を加えた値以上であることを、津波浸水シミュレーションを用いて照査する。

【参考文献】

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局, 津波シミュレーションを踏まえた被害軽減方策～海岸保全施設について～
- 2) 国土交通省港湾局, 港湾の津波避難施設的设计ガイドライン
- 3) 独立行政法人建築研究所, 津波避難ビルの構造設計法
- 4) 水谷法美ら: エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp. 741-745, 2005
- 5) 有川太郎ら: 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第 54 卷, pp. 846-850, 2007
- 6) 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集Ⅱ, 第 621 卷, Ⅱ-47 号, pp. 111-127, 1999
- 7) 後藤智明ら: 津波による木材の流動, 海岸工学論文集, 第 29 卷, pp. 491-495, 1982
- 8) 池野ら: 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp. 846-850, 2001
- 9) 社団法人日本道路協会, 道路橋示方書・同解説
- 10) 北海道開発局釧路開発建設部, 釧路港湾事務所第 1 工事課, 釧路港における津波漂流物対策の取り組みについて
- 11) 中央防災会議, 災害時の避難に関する専門調査会, 津波防災に関するワーキンググループ, 津波対策の現状と課題
- 12) 北海道開発局, 津波からまちを守る津波漂流物対策
- 13) 一般財団法人沿岸技術研究センター, 須崎港津波漂流対策施設の検討
- 14) 国土交通省東北地方整備局港湾空港部, 仙台空港復旧・復興のあり方検討委員会, 第 2 回委員会資料
- 15) 国土交通省港湾局, 防波堤の耐津波設計ガイドライン (案)
- 16) 国土交通省北海道開発局, 平成 23 年港湾防災対策会議資料
- 17) 海洋政策研究財団, 平成 23 年海洋フォーラム資料
- 18) 全国地質調査業協会連合会「技術フォーラム 2013」長野資料
- 19) 池野ら: ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp. 751-755, 2005
- 20) 水産庁, 平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方
- 21) 漁港・漁場の施設の設計の手引 2003 年版
- 22) 国土交通省東北地方整備局, 防波堤の津波低減効果と粘り強い構造に向けて, H24
- 23) 宮城県, 公共土木施設構造検討会, 検討会報告書
- 24) 東京都建設局・港湾局・下水道局, 地震・津波に伴う水害対策に関する都の基本方針
- 25) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 津波避難対策検討ワーキンググループ, 津波避難対策検討ワーキンググループ報告 参考資料集, 2012. 7
- 26) 北海道ホームページ
- 27) 東日本大震災復興構想会議, 復興への提言～悲惨の中の希望～, 2011. 6. 25
- 28) 国土交通省関東地方整備局, 荒川下流河川事務所, 荒川放水路変遷誌

- 29) 国土交通省東北地方整備局，河川事業再評価鳴瀬川直轄河川改修事業（鳴瀬川水系河川整備計画（大臣管理区間）），2010.6.17
- 30) 佐賀県県土づくり本部，平成24年度6月補正予算に係る事業評価
- 31) 国土交通省，社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会計画部会，緊急提言「津波防災まちづくりの考え方」，2011.7.6
- 32) 国土交通省，資料2-4国土交通省提出資料「津波防災まちづくりについて」，2011.7.31
- 33) 国土交通省，地方公共団体等説明会資料「津波防災地域づくりに関する法律について」，2012.3
- 34) 津波防災地域づくりに係る技術検討会，「津波防災地域づくりに係る技術検討報告書」，2012年1月27日
- 35) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編，建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編 [1]，1997年

5 新設構造物の減災技術

5.1 粘り強い構造物の設計・施工技術

5.1.1 設計

(1) 防波堤の耐津波設計ガイドライン（案） 国土交通省港湾局¹⁾

本ガイドラインは2012年6月13日に取り纏められた「港湾における地震・津波対策のあり方（答申）」に記載された「発生頻度の高い津波」並びに「最大クラスの津波」の内、「発生頻度の高い津波」を超える規模の津波に対し粘り強い防波堤を設計する為の基本的考え方を取り纏めた物として提示された。

1) 防波堤の耐津波設計

防波堤の設計にあたり「設計津波」を超過する津波に対しても、防波堤に求められる機能が可能な限り維持されるように「粘り強い構造」を目指すとしている。この為、「設計津波」が作用しても機能が損なわれない断面諸元を設定すると共に、後背施設等の諸特性を考慮し費用対効果等も踏まえて付加的な対策を施す事で、倒壊しにくい「粘り強い構造」とする事としている。特に「粘り強い構造」の検討にあたっては、水理模型実験や数値解析を活用し、その効果を検証していくことが重要と述べている。

性能照査においては、防波堤の全体安定性（直立部の滑動、転倒、基礎支持力に対する安定性、津波の流れに対する基礎マウンド・海底地盤の安定性）について損傷の程度が限界値以下であることを確認するとともに、津波に先行する地震動、地殻変動他に対しても設定を適切に取り扱う事で、影響を評価するとしている。

2) 「設計津波」を超える規模の津波に対する「粘り強い構造」の検討

波浪及び「設計津波」に対して設定された断面に対し、「設計津波」を超過する津波が段階的に大きくなっていくことを想定して津波の規模に応じた防波堤の破壊形態と構造上の弱点について十分な検討を行い、施設の重要度や費用対効果等も踏まえて付加的な対策を施す事で、「設計津波」を超過する津波へも変形しつつも倒壊しない「粘り強い構造」として、可能な限り全体安定性が損なわれぬ様にするとしている。

3) 防波堤の「粘り強い構造」の効果の確認

「粘り強い構造」の効果については、実際の変形モードを適切に評価した上で、防波堤の変形に対する安定性について確認する必要がある。特に、直立部と基礎マウンドについては、「腹付工を施した場合」、「浸透流の影響がある場合」、「鋼管杭等により構造的な補強を施した場合」、「摩擦増大マット等により捨石を抱き込んだ場合」等々の様々な状況下で変形モードを適切に評価する必要がある。しかし現時点では、そのような安定性を適切かつ定量的に評価することは難しく、簡便的・間接的な手法として、直立部の滑動・転倒や基礎の支持力の照査式にて、腹付工からの受動抵抗等を加味した形で津波波力に対して滑動安全率等が1.0を上回るレベルで有る事が「粘り強さ」の一つの目安とする事を考えている。ただし、このような「粘り強さ」の確認には洗掘対策の効果の確認を含め、水理模型実験による具体的な有効性の確認での検討が必要とされている。

(2) 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 国土交通省 国土技術政策総合研究所²⁾

国土技術政策総合研究所が『設計津波』を超過する津波が海岸堤防等の天端を越流しても『破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする』『全壊に至る可能性を少しでも減らす』等の『粘り強さ』を発揮できる様な構造上の工夫および施工上の留意点を模型実験や解析等により、その成果を報告し

たものである。

1) 高流速による裏法尻での洗掘と対策

裏法での洗掘に対し裏法尻を保護し越流水を跳ねさせ、裏法尻の洗掘を堤防本体からなるべく遠ざけ洗掘を遮断もしくは遅らせる。

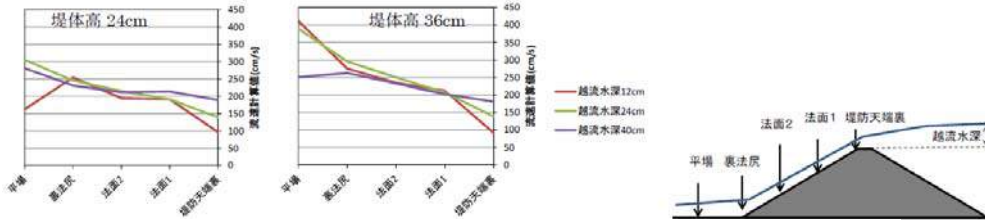


図 5.1 裏法面および裏法尻での流速（裏法勾配 1:2）

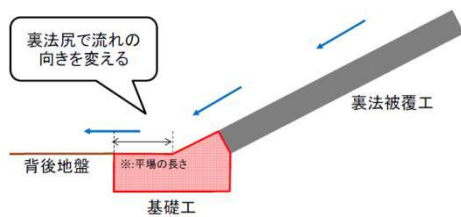


図 5.2 裏法尻の工夫案

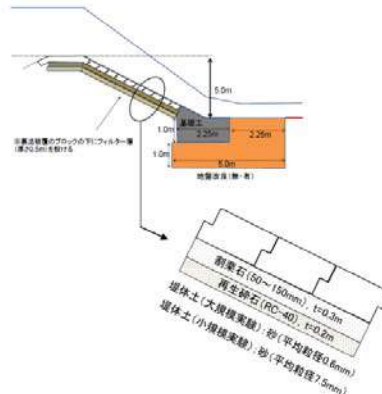


図 5.3 模型実験の構造断面（寸法は現地換算値）

2) 流れの中に置かれた構造物の不陸による構造物の不安定化とその対策

裏法被覆工の凹凸（図 5.4）は流れによる力を受け、越流により作用する力が大きくなるほど不安定化する閾値を下げる。ただし、不陸ができて逆段差（図 5.5）では流体力をまともに受けない。

その工夫の一例として、上端と下端に切り欠けを設けたブロック（図 5.6）をかみ合わせて、下のブロックが突出しにくくすることが考えられる。

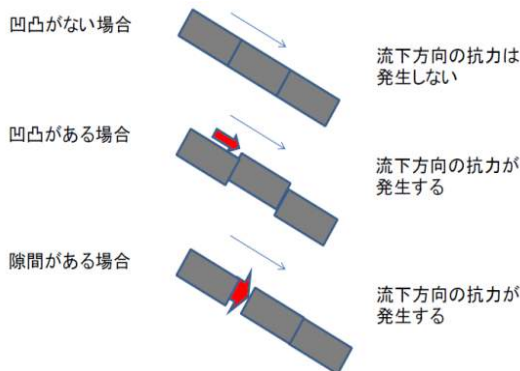


図 5.4 不陸による抗力の発生

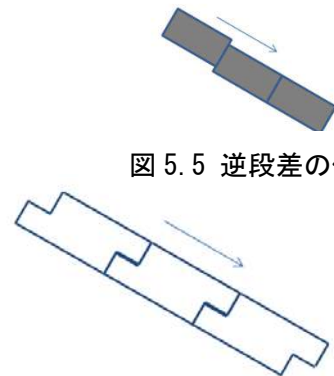


図 5.5 逆段差の例

図 5.6 ブロック形状の工夫の一例案

3) 揚圧力への対応の必要性

津波が襲来して海側の水位が上昇すると、その水位上昇に連動して堤体下の浸潤面が上昇し、堤体下部に達する（図 5.7）ことになる。被覆工を不透過・不透気構造にした場合、被覆工と浸潤面の間で上昇する浸潤面の作用から封入された空気の圧力が上昇し、被覆工に対して危険なレベルの揚圧力が作用する状況となる。被覆工の不安定化へつながらる浸潤面上昇に対し、排気可能な透過・透気性を

保持する被覆工への検討と工夫が重要である。

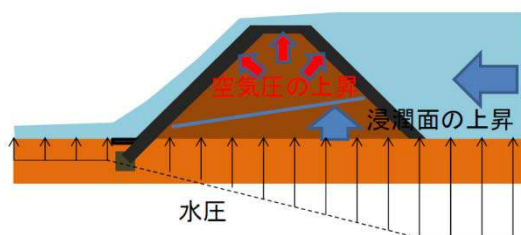


図 5.7 空気による揚圧力

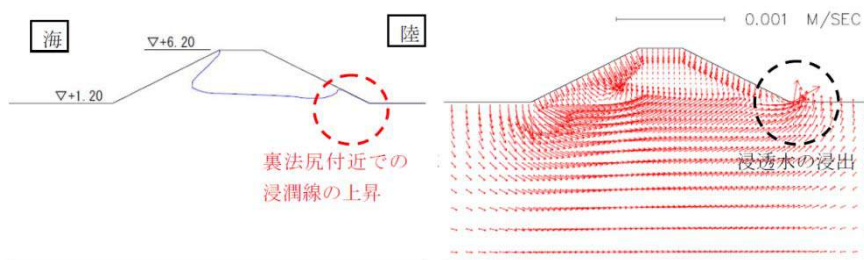


図 5.8 跳水に伴う水位差による揚圧力

また裏法戻の保護工に水密性材料を用いる場合には、保護工直上より陸側の水位が高く（図5.8）、水圧差が揚圧力として作用して保護工が流失する可能性からこの事への考慮も必要となる。

4) 浸透水に対する堤防裏法戻での対応

短期間ではあるが、津波の越流水位が堤防天端まで降下した時点で、裏法戻付近の浸潤線が高くなり、浸透水が裏法戻付近から浸出する状況が考えられる（図5.9、図5.10、図5.11）。この場合、この付近が泥状となり裏法被覆工が被災する。このような現象の可能性を踏まえ、浸潤線上昇を低減させる対策の検討が必要となる。ただし、裏法戻における洗掘影響の低下を目的とする基礎工周りの土壌改良等による浸透性低下から、前述の事象が強調される可能性が高くなる事も考えられ、ある目的のための工夫が他方面に対し負の効果と成らぬよう、検証が必要である。



（堤体高 5m、越流水深 8m、越流継続時間 7 分、透水係数：堤体土 0.01 cm/s、基礎地盤 0.1 cm/s）

図 5.9 浸透流計算で得られた越流終了直後の浸潤線及び浸透流ベクトル



図 5.10 残留水位による裏法戻からの吸い出し

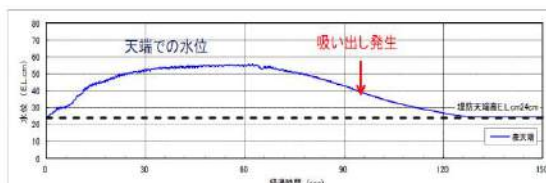


図 5.11 吸い出しが発生した際の天端での水位

5) 負圧への対応

津波の堤防越流時には、裏法肩付近の被覆工接合部では、越流水脈による静水圧の大幅な低下、または負圧による影響対策が必要となる。（図5.12）

裏法肩の負圧対策の一つとして、図5.13のような裏法肩と天端の一体化構造が考えられる。これは周辺との連続、ブロック単位の拡大により負圧領域外との集合体とすることで、不安定化条件が緩和されるが、一体的構造範囲が拡大される事により被覆工構造への簡易な修正が難しい状況になってし

まう可能性がある。

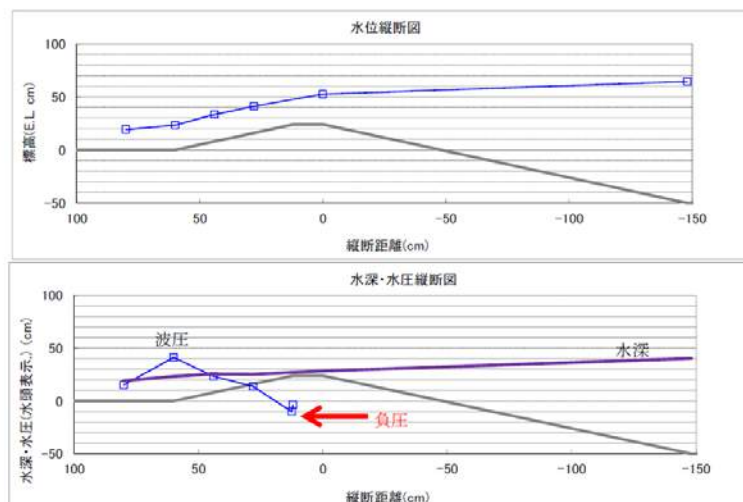


図 5.12 模型実験における水位・水圧の岸沖方向分布(堤体高 24 cm、越流水深 40 cm)

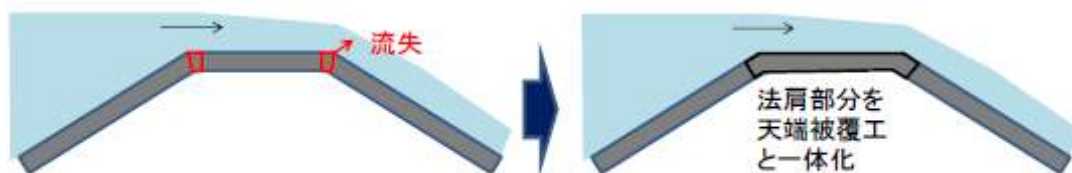


図 5.13 负压に対する法肩部分の工夫案

5.1.2 施工技術

(1) 国土交通省東北地方整備局仙台湾南部海岸堤防復旧プロジェクト施工事例³⁾

仙台湾南部海岸(宮城県仙台市～福島県境)において被災に有った海岸施設を2013年現在国が一部宮城県管理部分も含み復旧対応している所である。本復旧において採用されている「粘り強い海岸堤防」を以下に記載する。

図 5.14 に示すように工夫された点は以下の4点である。

- ①陸側法面被覆ブロックを噛み合せ構造とする事で、津波時にブロックを浮き上がりにくくした。
- ②天端被覆工に空気抜き孔(砕石詰め)を設置する事で津波時に堤防内部の有害な空気圧を抜く事とした。
- ③法面勾配変化点を陸側法留コンクリートと一体化する事で補強を行った。
- ④陸側法尻部分に地盤改良を施す事で補強を図った。

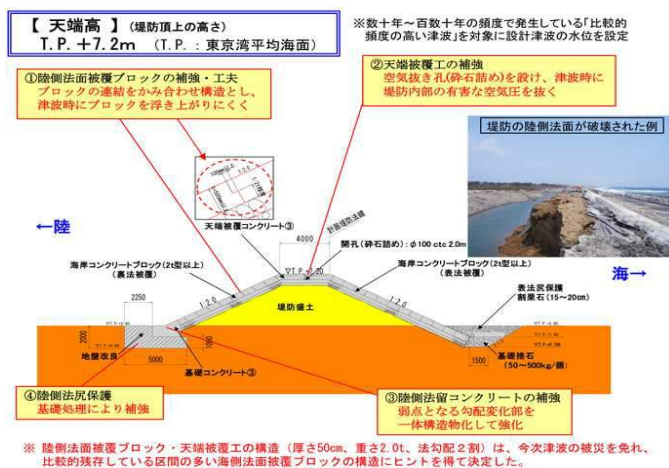


図 5.14 粘り強い海岸堤防の施工事例(南部海岸)

(2) 東日本大震災からの復旧・復興事業(宮城県土木部)の例⁴⁾

a) 白浜地区海岸

対策工

- ① 新たに設定した海岸堤防高で復旧。
整備・堤防の嵩上げ (TP+4.5m→TP+8.4m)
- ② 津波堤防越流後の流失・裏法尻部洗掘防止。
擁壁背後裏法の緩勾配化
- ③ 津波の高速な水流による施設の流失防止。
各部材の重量・強度の確保等 (t=50cm)

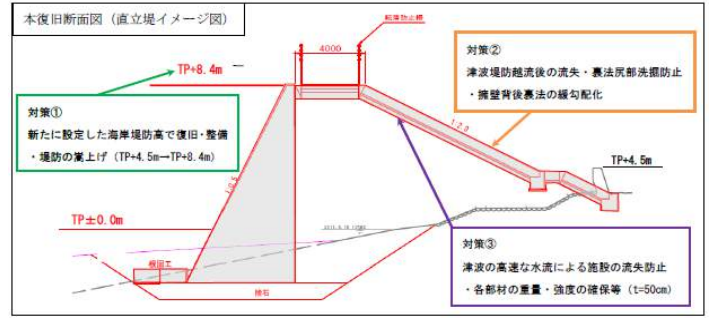


図 5.15 粘り強い海岸堤防の施工事例 (白浜)

b) 菖蒲田浜地区海岸

対策工

- ① 新たに設定した海岸堤防高で復旧・整備。
堤防の嵩上げ (TP+4.2m→TP+6.8m)
- ② 津波堤防越流後の流失・裏法尻部洗掘防止。
裏法の緩勾配化, 鋼矢板の打込み等
- ③ 津波の高速な水流による施設の流失防止。
各部材の重量・強度の確保等 (t=50cm)

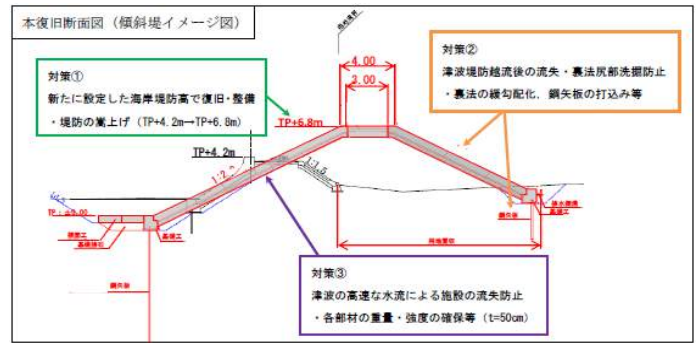


図 5.16 粘り強い海岸堤防の施工事例 (菖蒲田浜)

(3) 粘り強い海岸保全施設の構造について (堤防・護岸) (改訂版) 福島県⁵⁾

福島県が2012年5月31日に提示した物である。本編は「河川・海岸構造物の復旧における景観配慮の手引き」(2011年11月 国土交通省 水管理・国土保全局)の内容を積極的に採用し景観配慮に考慮する事を述べ、下記一覧表のように具体的内容について提示している。

a) 構造一覧

構造	構造図例		
パラベットの嵩上げ	①-1 既設パラベットが残っている場合(裏法覆付け) 0.5m程度 新旧コンクリートの付着補強差筋 コンクリート厚 20cm以上	①-2 既設パラベットが残っている場合(表法覆付け) 押し波・引き波對抗鉄筋 0.5m程度 覆付けコンクリート 縦筋系カプセル型接合部による定着 差筋 コンクリート厚 20cm以上	② 既設パラベットが倒壊・流出している場合(裏法覆付け) 0.5m程度 コンクリート厚 20cm以上 新旧コンクリートの付着補強差筋
天端工	天端幅 3.0m以上 1.0m 裏法被覆工 コンクリート舗装 t=50cm 捨コン t=10cm		
裏法構造	コンクリート被覆 t=50cm 捨てコンクリート t=10cm 裏法目地処理 目地材 止水板 裏法被覆コンクリート スリッパ		
裏法根入れ	1) 裏法根入れ案 1:2.0 根入れ深さ1m 洗掘孔	2) 裏法止め鋼矢板案 1:2.0	

図 5.17 構造一覧図

b) CSG 工法+盛土

CSG工法による堤防の前面、背面に盛土、植林を行い、津波が越流した場合でも堤防法尻からの洗掘を防止する。

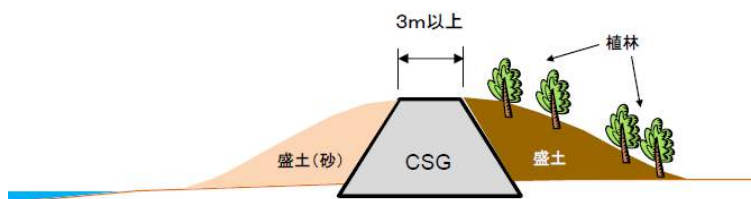


図 5.18 CSG 工法断面図

※CSG工法

Cemented Sand and Gravelの頭文字をとった名称で直訳では「セメントで固めた砂礫」砂礫に水、セメントを混合した材料 (CSG) を敷き均し、転圧し堤体として築造する。

(4) 民間の新設技術

民間各社による新設技術の詳細を資料-1に示す。

5.2 構造物の引き波対策

東北地方太平洋沖地震の津波では押波だけでなく引き波時にも大きな被害が発生した。ここでは、防波堤、海岸堤防、岸壁を例に取り、引き波現象の特徴とその対策について述べる。

5.2.1 防波堤

(1) 被災例

防波堤が引き波により被災したと思われる数少ない事例として女川港防波堤が挙げられる。ここでは、国土交通省東北地方整備局が示す被災要因を示す。

女川港は港口部に南・北防波堤があるが、このうち南防波堤のケーソンはそのほとんどが港外側に滑落していた(図 5.20)。



図 5.19 女川港

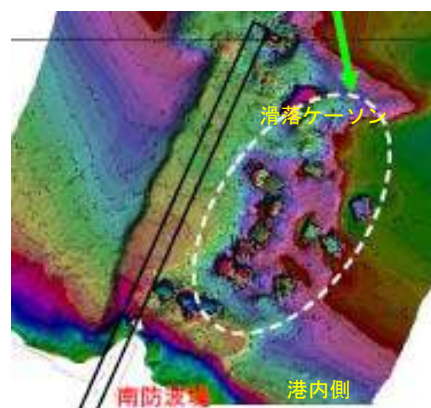


図 5.20 南防波堤の被災状況⁶⁾に加筆

これは明らかに引き波作用による被害であり、その原因は以下のように考えられる。本港は押し波時に港内側に溜まった海水が排出されにくい形状になっており、事後の津波シミュレーションによると、引き波時に港内・外水位差が最大で 12.9m 生じていた。このとき作用する水圧差でマウンドの支持力が不足し、ケーソンがマウンドから滑落したと考えられる。

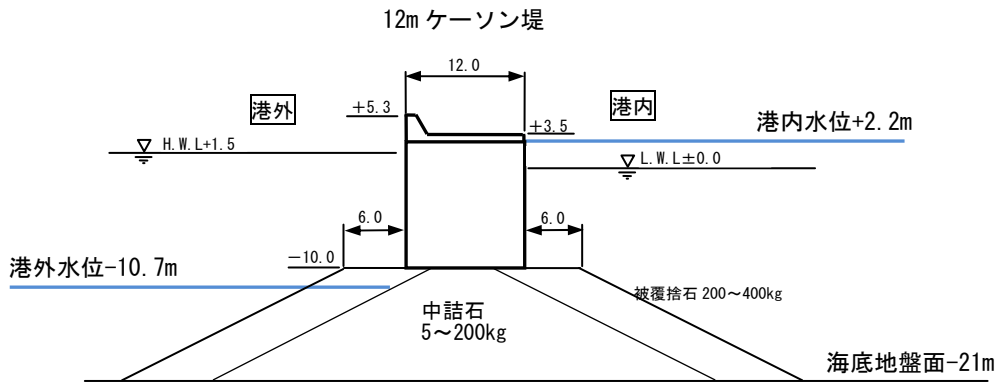


図 5.21 引き波時の港内外の水位 ⁶⁾を加工)

(2) 引き波対策

押波時の滑動抵抗増強対策である被覆ブロックを港外側にも腹付けする。その他、被覆ブロック下の基礎マウンドをアスファルトマシチックで固結する方法やマットなどを設置する方法がある。なお、被覆ブロックを港外側に設置した場合はマウンド水深が浅くなり、波圧の増大に繋がる恐れがあるので留意が必要である。

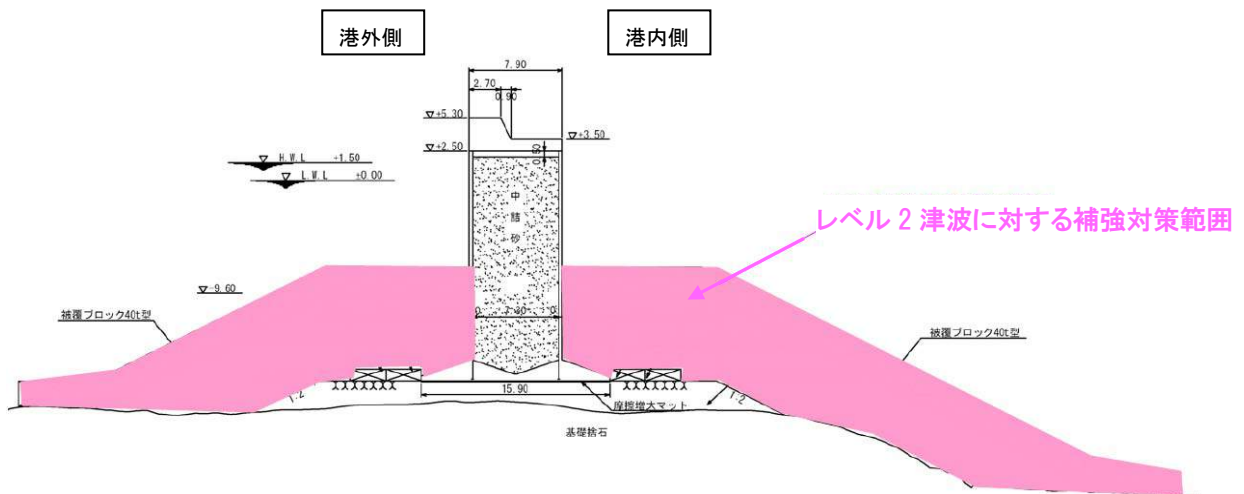


図 5.22 防波堤の引き波対策案

5.2.2 海岸堤防⁷⁾

(1) 被災原因

陸上に遡上した津波の水塊が海側に逆流するときに生じる強い引き波により表法部に洗掘が生じ、被覆工の破損・流出から堤体の全体崩壊に至った。

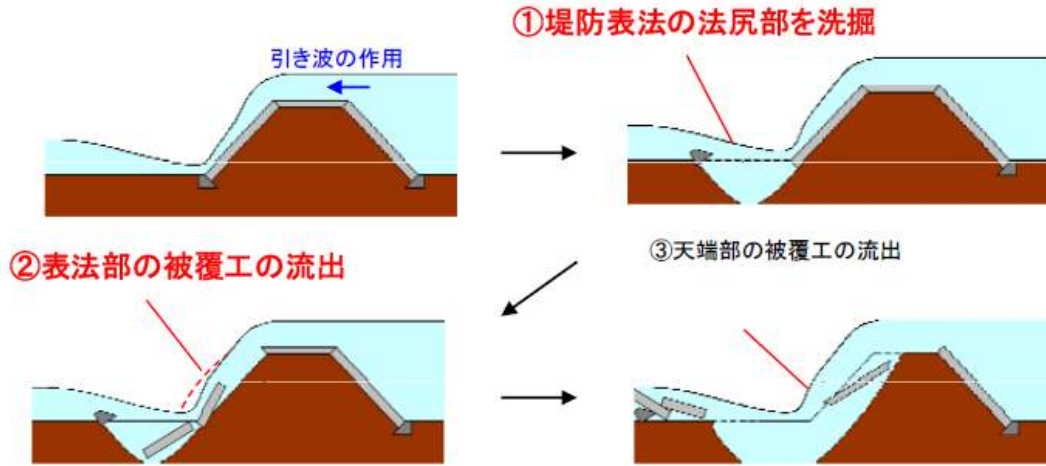


図 5.23 引き波による表法尻部洗掘からの被災模式図

(2) 対策

堤体の表法部には通常の波浪や高潮対策としての根固工が設置されているが、引き波対策として消波工を併設する。また、天端幅を広く取ることが引き波対策に有効であるとされている。なお、今回の東北地方太平洋沖地震津波では、消波工のある堤体には被害が確認されておらず、天端幅 5m 以上では全壊が確認されていない。

また、表法部に消波工を設置した場合は、波浪時の越波量も少なくなるという利点がある。

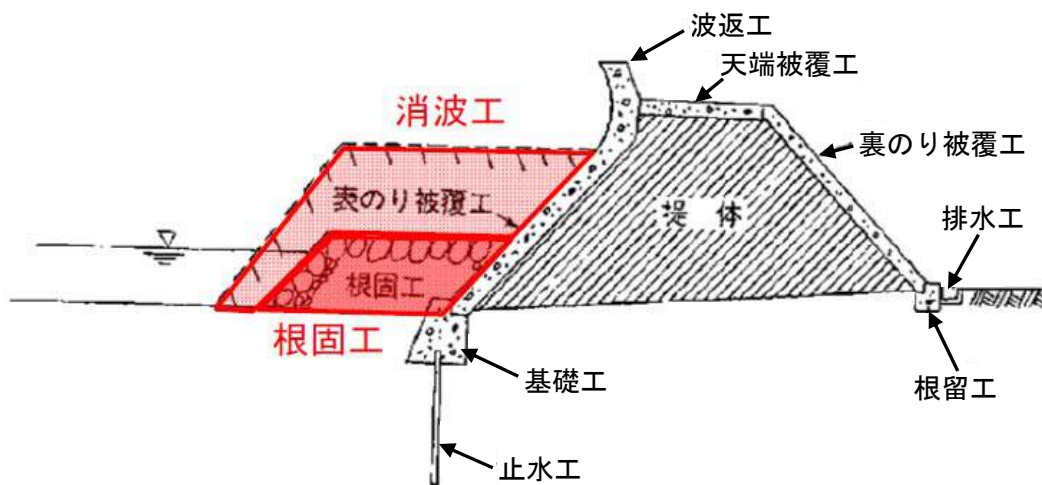


図 5.24 海岸堤防の引き波対策案

5.2.3 岸壁⁸⁾

岸壁の耐津波強化対策においては、引き波時に前面の水位が最も低くなり、かつ、岸壁背後の残留水位が埋立地盤高と同等となる状態を想定し、安定性照査を行う。

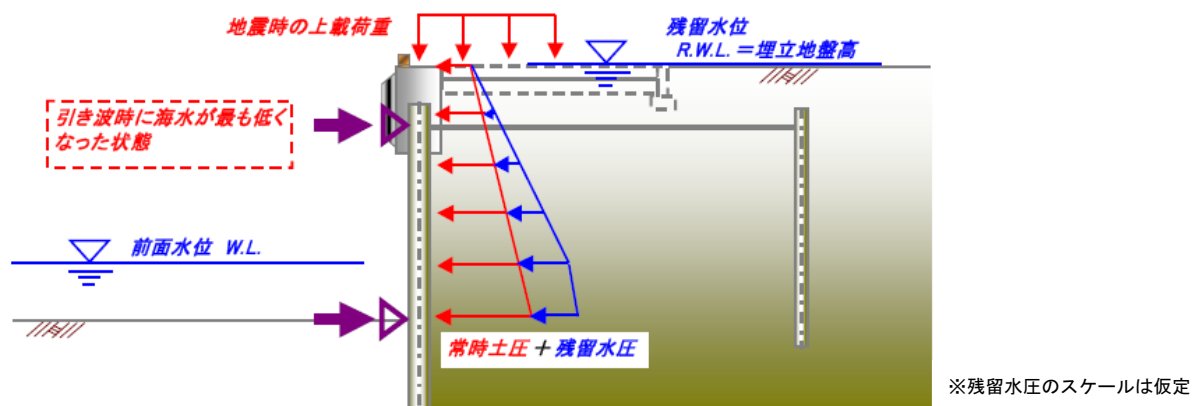


図 5.25 矢板式岸壁の安定性照査のイメージ

5.2.4 地震と津波（引き波）の複合被害⁹⁾

東北地方太平洋沖地震では、液状化と津波の複合的被害が数多く確認されている。右図は、矢板舗装面が液状化により損傷した後、エプロン部が津波により損傷し、さらに引き波時の水圧差・波圧により被害が拡大した例である。これらの複合被害の詳しいメカニズムは解析・実験等により各研究機関で解明中であるが、粘り強い構造とするためにも、安全性評価手法の早期確立が望まれる。



図 5.26 相馬港の1号埠頭の被害状況
(矢板継手・タイロッド破損、エプロン陥没等)

【参考文献】

- 1) 国土交通省港湾局, 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成 25 年 9 月
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討
- 3) 国土交通省仙台河川国道事務所, 国土交通省東北地方整備局仙台南部海岸堤防復旧プロジェクト
- 4) 宮城県土木部, 東日本大震災からの復旧・復興事業
- 5) 福島県, 粘り強い海岸保全施設の構造について (堤防・護岸) (改訂版)
- 6) 国土交通省東北地方整備局, 第 3 回東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会 東北港湾における津波・震災対策について, 2011 年 9 月
- 7) 国土交通省, 第 2 回海岸における津波対策検討委員会 (2011 年 6 月 27 日) 海岸堤防・護岸の復旧方法の検討について
- 8) 水産庁, 「平成 23 年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方」の改正について (2013 年 8 月 30 日)
- 9) (独) 港湾空港技術研究所, 菅野高弘, 港湾・空港施設被害の現地調査結果

6 事例検討

6.1 事例検討の概要

この章では、これまで得られた知見をもとに津波に耐える技術を実際に適用した場合の検討を行う。そのため、モデル港湾を想定しねばり強い構造を持つ防波堤、防潮堤を適用した場合の津波に対する効果を、数値解析手法を用いて検討する。

対象となる港湾については、実際に現地調査を行い港湾や防波堤の状況、防潮堤の状況を確認し地形データを作成した。ただし、本検討はあくまで津波に耐える技術の適用性を検討するものであり、実際の地形は利用しているが防波堤その他の構造形式はかなり自由に設定しており、実際の港湾に対する検討ではないことをお断りしておきたい。

6.2 現地調査

現地調査は、2013年8月28日から8月29日の2日間にかけて、A漁港およびその周辺の海岸構造物について実施した。写真6.1～写真6.9にその概要を示す。



写真 6.1 泊地内



写真 6.2 泊地から沖防波堤を望む



写真 6.3 沖防波堤(東側)



写真 6.4 沖防波堤(西側)



写真 6.5 沖防波堤(西側)



写真 6.6 沖防波堤(東側)



写真 6.7 A 漁港周辺の防潮堤



写真 6.8 防潮堤



写真 6.9 防潮堤に設置された陸閘

(1) 防波堤

A漁港の沖防波堤は、直立ケーソン堤と混成堤からなり一部消波ブロックによる被覆工がされている。

(2) 岸壁

A漁港の港内泊地周辺の護岸は、一部直立消波が設置されているものの、ほとんどが直立岸壁である。

(3) 防潮堤

A漁港周辺には防潮堤が設置され、また砂浜へのアクセス部分に陸閘が設置されている。これらの陸閘は、すべてモーターによる開閉が可能となっている。

6.3 モデル港湾

現地調査によって得られたA漁港を含む周辺海域を基礎としてその地形および構造物をモデル化し、津波解析が可能のように地形データを作成する。

図 6.1 に A 漁港を中心とした周辺海域の格子データを示す。図は、格子間隔 10m で作成されている。海底地形は複雑な形状を示し、また A 漁港周辺では陸上部分は比較的平坦な地形となっており A 漁港の背後地は人口の密集した地帯が広がっている。

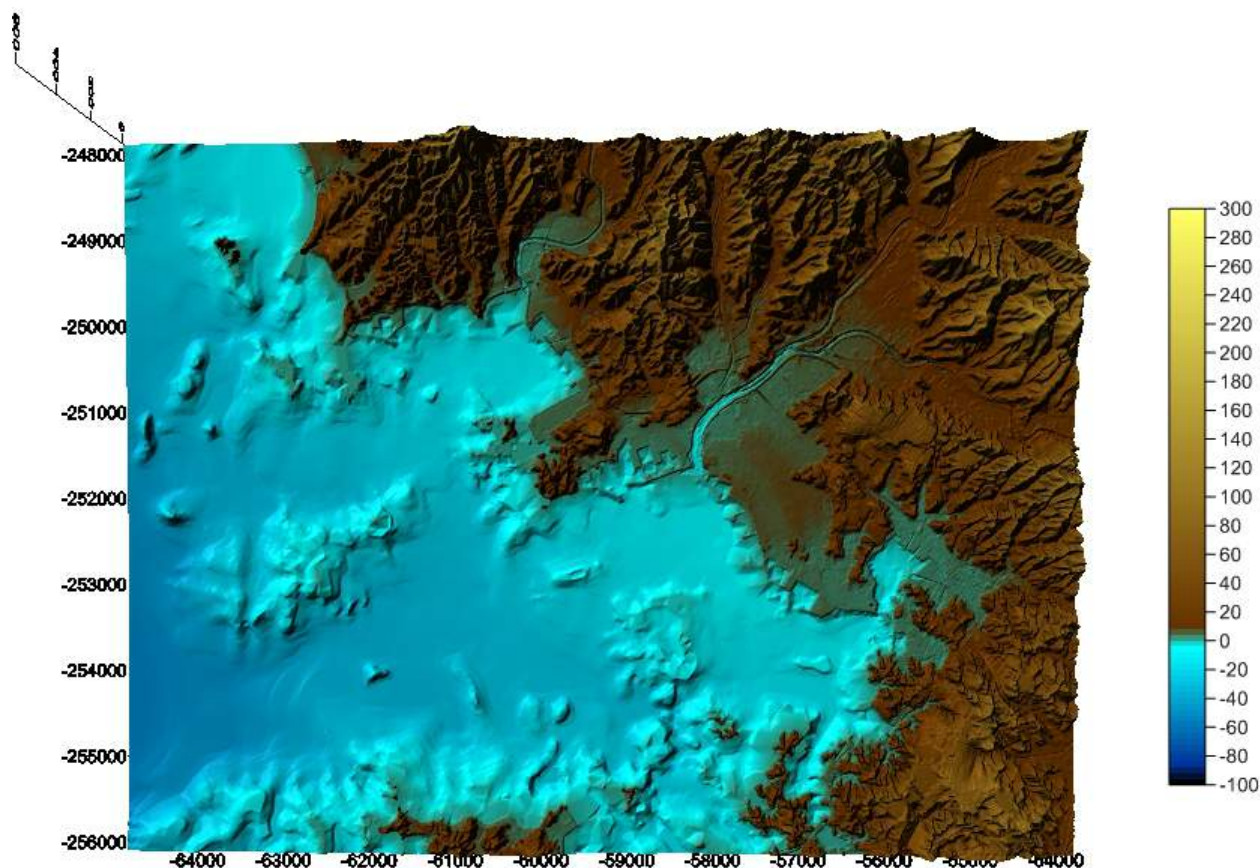


図 6.1 A 漁港周辺海域の地形

6.4 事例検討の流れ

6.4.1 検討フロー

通常、津波浸水解析は図 6.2¹⁾に示すようなフローで検討が実施される。ただし、今回の事例検討では港湾および海岸に津波に耐える構造物を想定して、その効果を検証するというのが目的であるため、本事例検討の津波解析では津波波源モデルの構築は行わず、ある限られた領域での津波波形に対する浸水特性を検討することとする。そのため、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」²⁾等で厳密に設定される「設計津波」や「最大クラスの津波」の設定は行わず、対象となる A 漁港に対して適当な津波波形を設定した上で津波特性を検討し、防波堤、防潮堤、水門等がねばり強く機能した場合の検証を行う(図-6.3)。

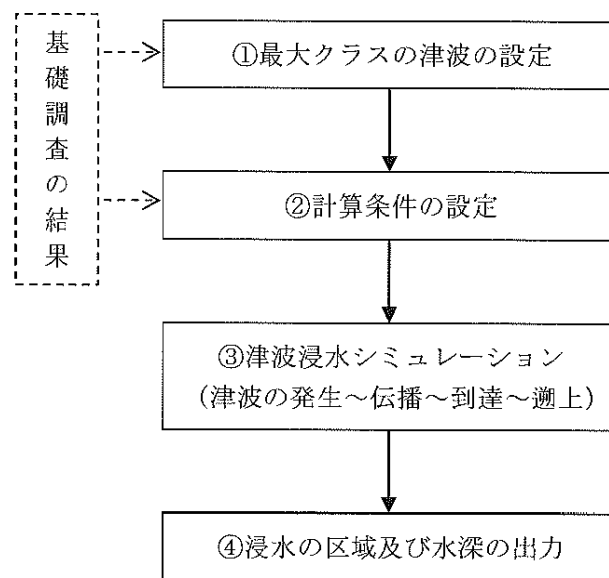


図 6.2 津波浸水解析の検討フロー¹⁾

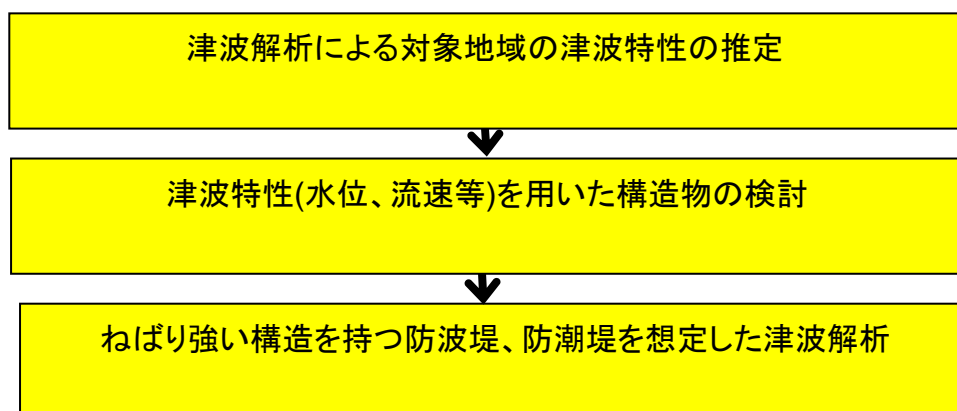


図 6.3 事例検討における津波浸水解析の検討フロー

6.4.2 津波数値解析

津波数値解析は、「津波浸水想定の設定の手引き」¹⁾に準じて実施する。

すなわち、外洋から沿岸への津波の伝播・到達、沿岸から陸上への津波の遡上の一連の過程を連続して数値計算するものである。津波浸水解析は、海底での摩擦及び移流項を考慮した非線形長波理論（浅水理論）を用いる。また、計算格子は図 6.1 に示すように海域・陸域共に 10m とし、粗度係数は陸域での設定は困難であるため、陸域、海域共に 0.025¹⁾の一定値とした。

6.4.3 ねばり強い構造の付加

本事例検討では極端ではあるが、従来の沿岸構造物が地震および津波によって被災を受けてすべて倒壊あるいは破壊されるという前提で検討を行う。

そのため、ねばり強い構造は、すべての沿岸構造物に付加するように設定する。

6.5 津波解析

6.5.1 津波入力波形

入力値となる津波波形は、南海道地震津波の波源モデルから得られた津波波形を基礎にして、若干の試行錯誤的な検討から得られたものである。図 6.4 はその津波波形であり、この波形を入力値とした解析を実施する。津波の継続時間は、約 2 時間 30 分である。

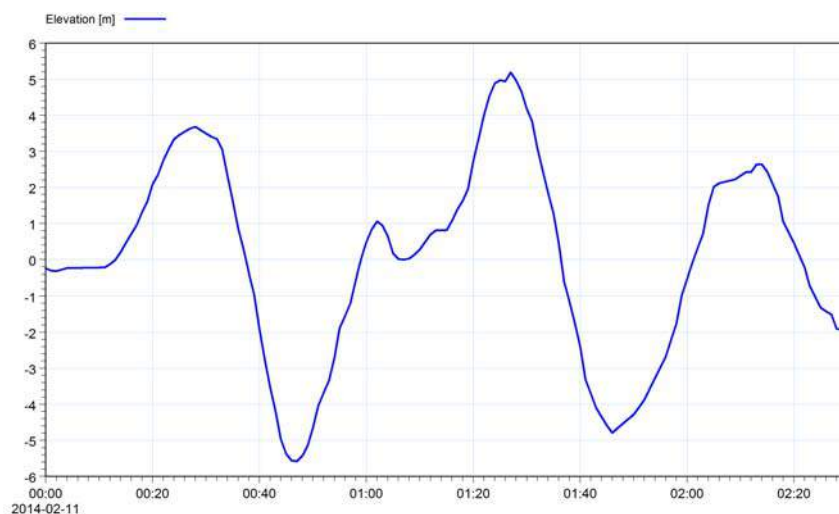


図 6.4 事例検討で用いる津波波形

6.5.2 ねばり強い構造による津波対策

A 漁港に対して、津波対策を実施する。基本は、沖側防波堤をねばり強い構造とすることである。また、近傍には河川や海岸が存在するため、水門や防潮堤についてもねばり強い構造を持たせる必要がある。図 6.5 に A 漁港周辺で対象となる構造物を示す。

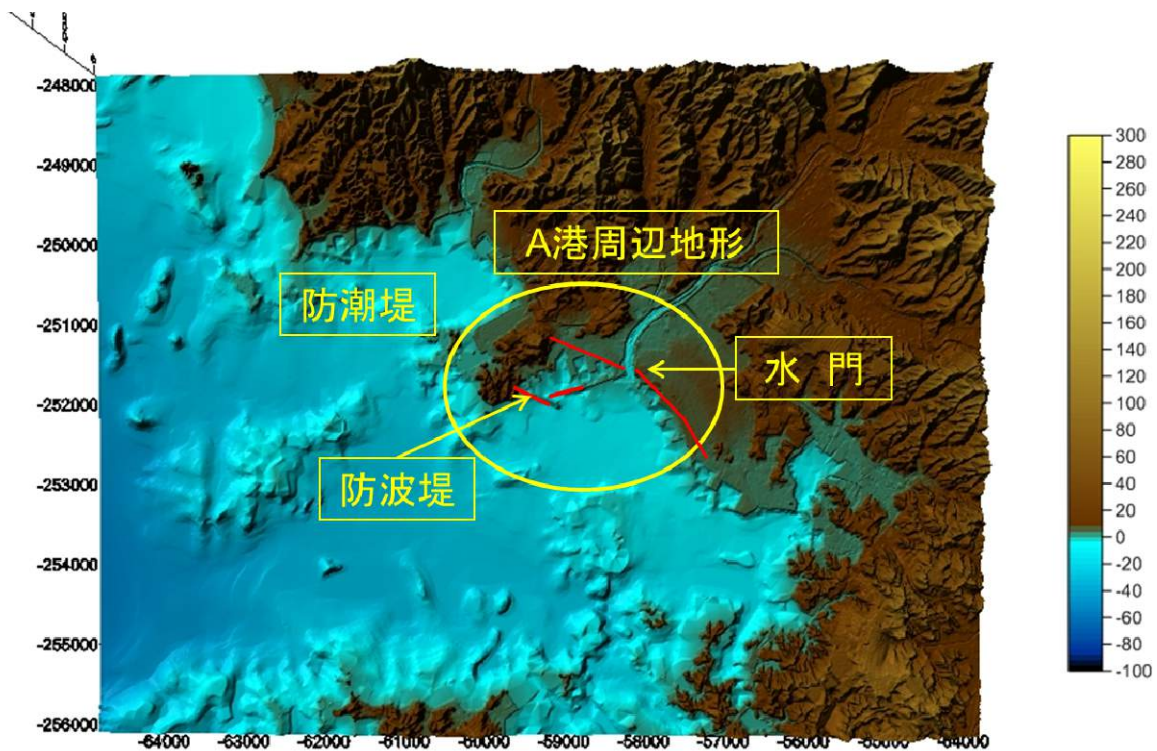


図 6.5 津波対策施設

6.5.3 ねばり強い構造の付加

本報告書では、第4章と既設構造物の強化技術、また第5章で新設構造物の減殺技術についてとりまとめている。また、第3章でねばり強い構造の概念について検討を行い、図3-22(第3章)に示すような防波堤にねばり強さを付加する技術を取りまとめている。

防潮堤についても、図3.13や図3.21(第3章)に示すような補強によってねばり強さが付加される技術を紹介している。また、このような技術を基礎に、様々な津波対策技術が紹介されている(添付資料-1)。

本事例検討では、防波堤に対するねばり強さの付加として腹付け構造、また防潮堤については、基礎の補強、裏法尻部の補強、消波工の設置等を考慮した。また水門については、ねばり強い構造という形では明確になっていないが、津波の来襲前にゲートが閉鎖可能となるような電気設備を整備するという形にした。

6.5.4 解析結果

(1) ねばり強い構造による津波対策効果

津波解析結果の一例を図6.6～図6.10に示す。左側が防波堤を含め全て被災して機能しなくなった状態を示し、右側がねばり強い構造によって全て性能を発揮している状態を表している。

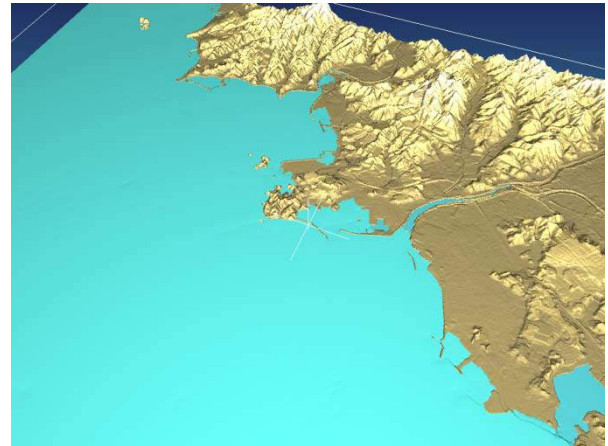
時間的には、津波来襲後28分から42分までを3次元の鳥瞰図形式で示している。これらの結果を見ると、防波堤、防潮堤、水門が機能することにより、陸上への遡上開始が遅れていることが確認できる(図6.6～図6.8)。特にA漁港背後の領域はかなり顕著である。ただし、平面的に全ての領域で防波堤、防潮堤が整備されないと図6.10に示すように他の地域からの浸水で平面的にはあまり

変化のない結果となっている。ただし、後述するように浸水深については、ねばり強い構造によって低減されている。

また、構造物は、津波がそれぞれの天端に達するまでは浸水をよく防ぐが、越波すると短時間に浸水していくことが分かる(図 6. 10)。

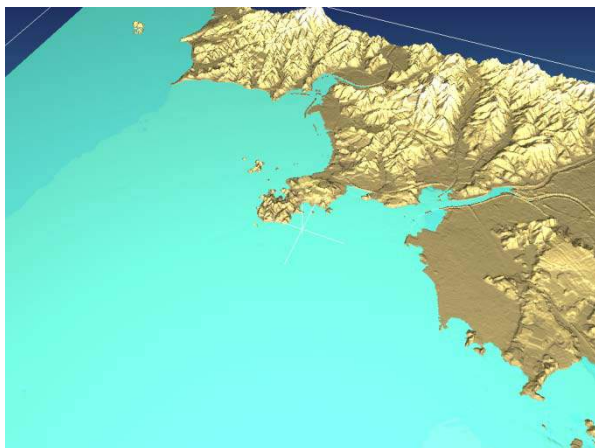


(1) 構造物全て被災



(2) ねばり強い構造を付加

図 6. 6 津波解析結果(28分後)

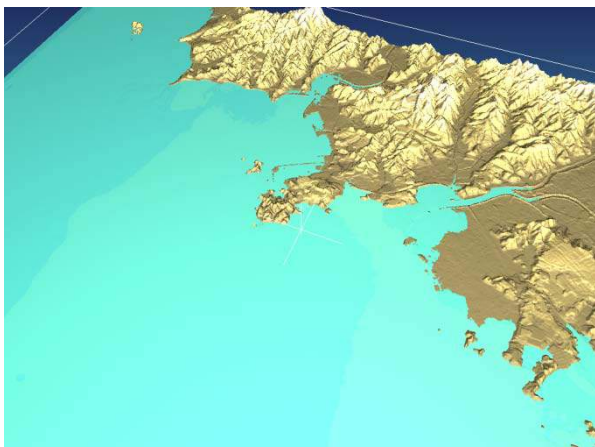


(1) 構造物全て被災

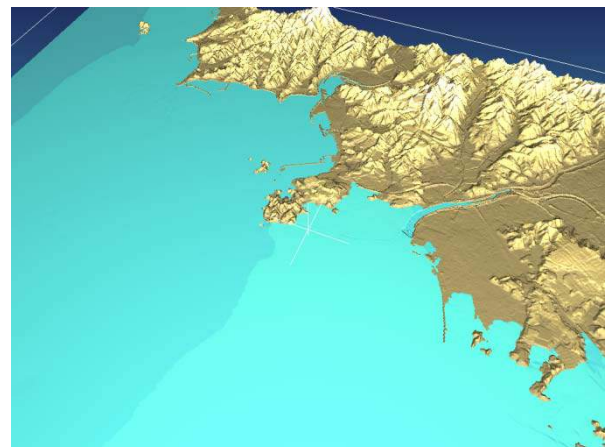


(2) ねばり強い構造を付加

図 6. 7 津波解析結果(32分後)

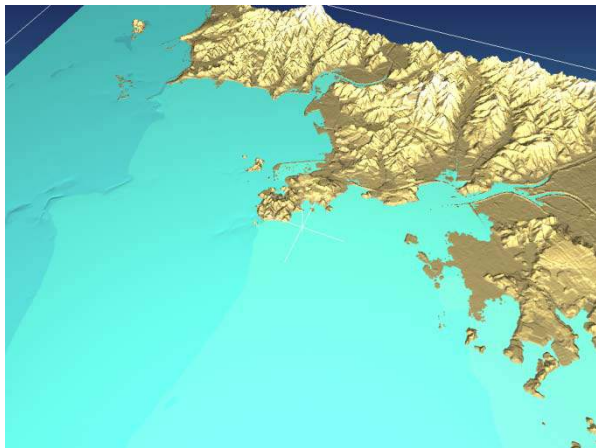


(1) 構造物全て被災

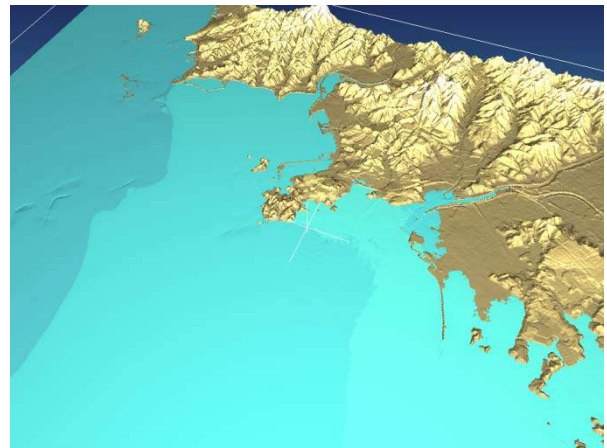


(2) ねばり強い構造を付加

図 6. 8 津波解析結果(35分後)

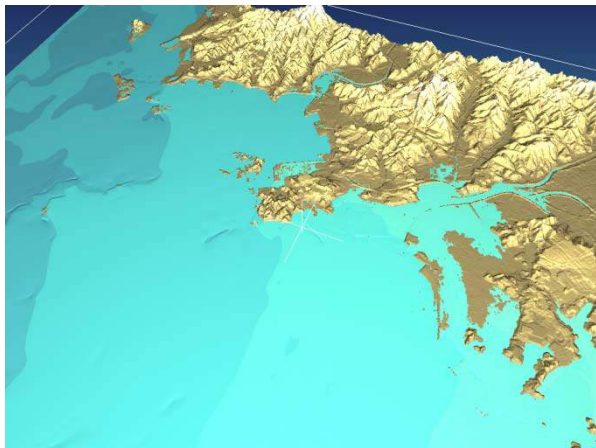


(1) 構造物全て被災

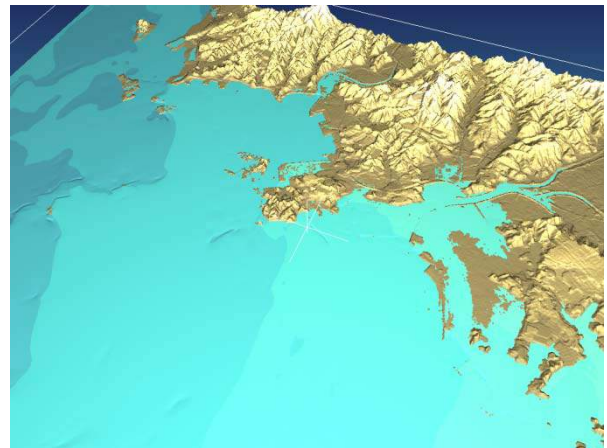


(2) ねばり強い構造を付加

図 6.9 津波解析結果(39分後)



(1) 構造物全て被災



(2) ねばり強い構造を付加

図 6.10 津波解析結果(42分後)

(2) 天端かさ上げによる効果

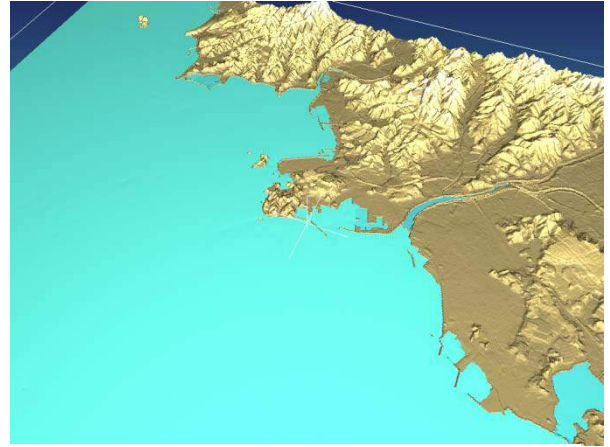
ねばり強い構造を付加することにより、防波堤、水門、護岸はその性能を発揮することが確認できたが、津波が越流を開始すると浸水深は低下するものの、遡上範囲はそれなりに存在してしまう。そこで、天端高をかさ上げすることによる効果を確認した。

図 6.11～図 6.15 は、防波堤、防潮堤、水門、および河川堤防の高さを 1m かさ上げした場合の津波解析結果を示したものである。

来襲する津波の高さによりその効果は当然変動するが、構造物の天端高をかさ上げする効果は解析結果から見て取れる。特に図 6.15 では、浸水域がかなり低減されていることが確認できる。

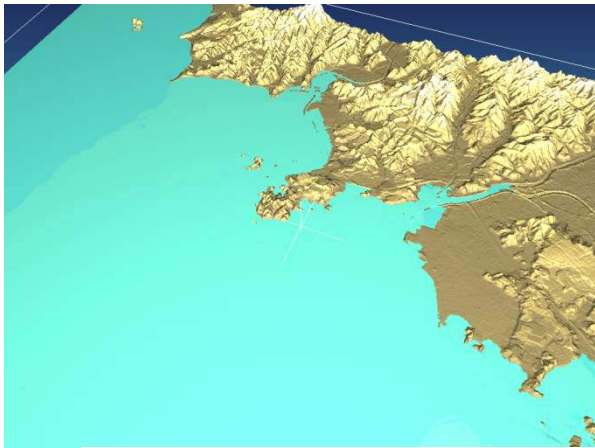


(1) 構造物全て被災



(2) ねばり強い構造を付加(1mかさ上げ)

図 6.11 津波解析結果(28分後)

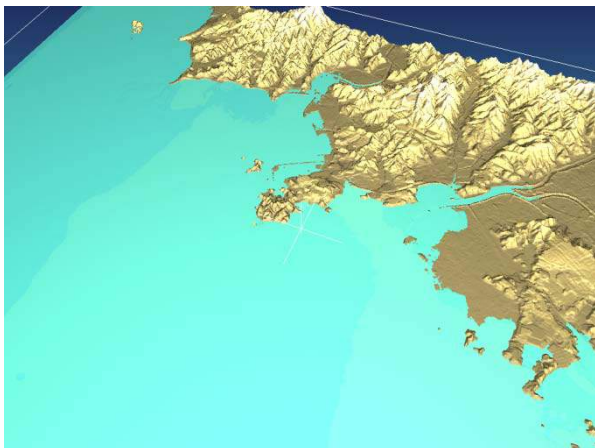


(1) 構造物全て被災

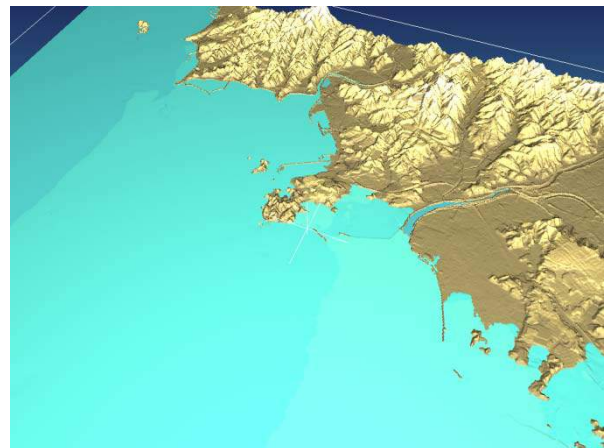


(2) ねばり強い構造を付加(1mかさ上げ)

図 6.12 津波解析結果(32分後)

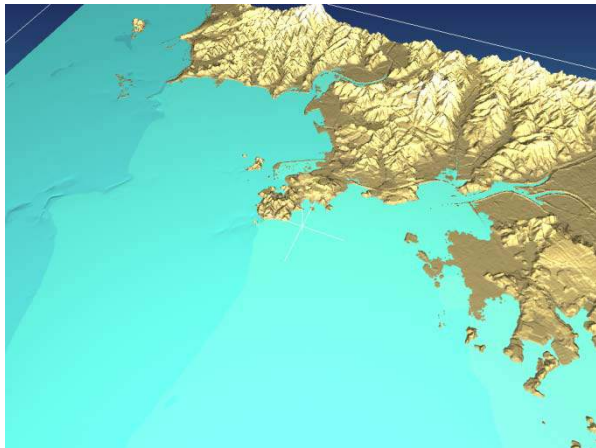


(1) 構造物全て被災

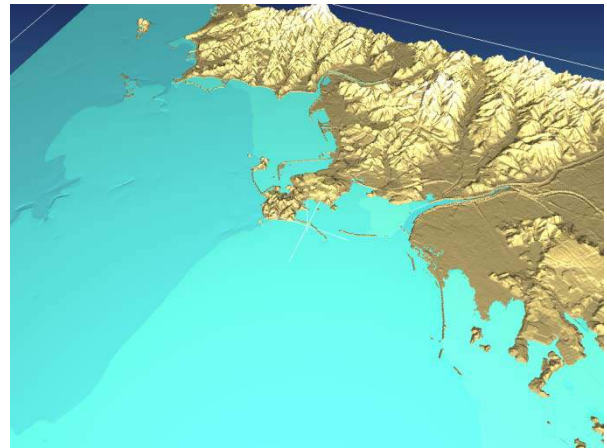


(2) ねばり強い構造を付加(1mかさ上げ)

図 6.13 津波解析結果(35分後)

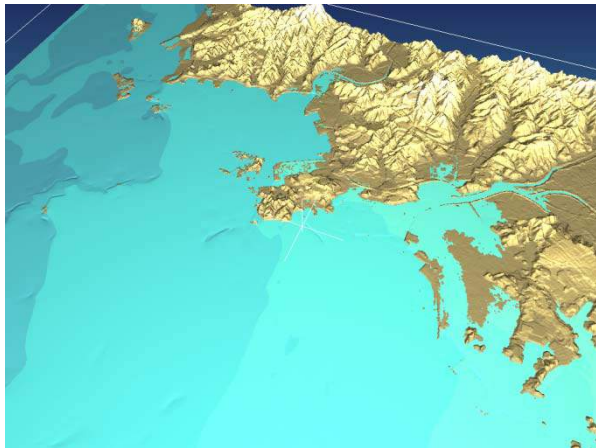


(1) 構造物全て被災

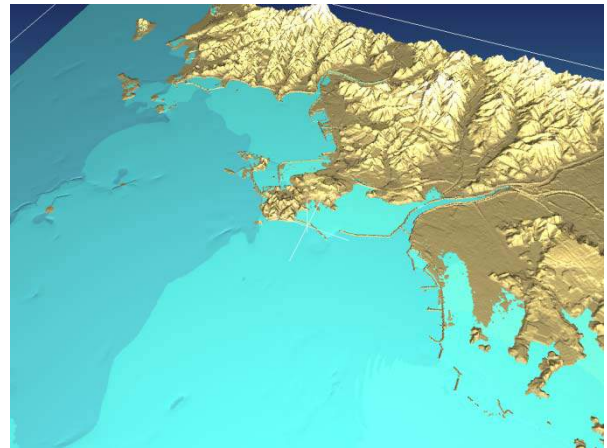


(2) ねばり強い構造を付加(1mかさ上げ)

図 6.14 津波解析結果(39分後)



(1) 構造物全て被災



(2) ねばり強い構造を付加(1mかさ上げ)

図 6.15 津波解析結果(42分後)

6.5.5 津波に対する効果の検証

これらの検討結果から、全体としての評価を行う。図 6.16 は、各地点での津波遡上高の時間変化を示したものである。黒線は、全て被災をうけて性能発揮できない場合、青線はねばり強い構造を付加して津波に対して性能が発揮できる場合であり、赤線はさらに天端高を 1m かさ上げた場合の結果である。

A 漁港背後地では、津波遡上高の最大値に大きな変化はない。ただし、津波が遡上してくるまでには時間差が発生しているのが確認できる。これは、A 漁港の大きさが一般港湾等に比較して小さいため、津波減殺効果があまりないことが考えられる。またその他の地点では、遡上高は、ねばり強い構造が存在することにより大きく減衰していることが確認できる。また、かさ上げの効果もかなりあることが確認できる。

図 6.17～図 6.18 は、それぞれ対策前、ねばり強い構造を付加、かさ上げを 1m とした場合の最大遡上高の分布を示したものである。図中の色塗りしてある部分が遡上域を表し、色の違いで高さの違いを表現している。図中の茶色部分は(T.P. 30m 以上)を表し、白い部分は、計算上での遡上可能領域(T.P. 30m 以下)を示している。防波堤、防潮堤、水門が機能すれば、ある程度の浸水に対して

遡上を制御する効果があることが確認できる。また、かさ上げによりさらに遡上高が減少し、一部浸水しない区域が発生しているのも確認できる。

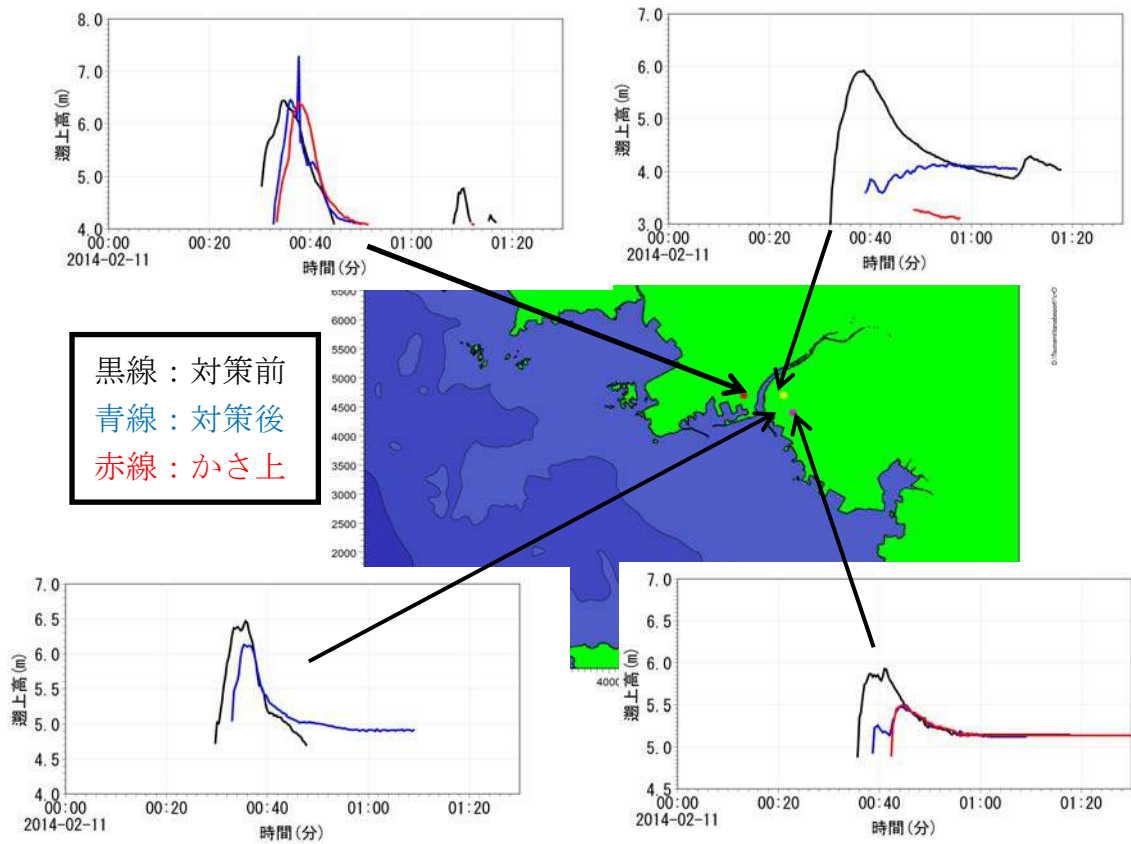


図 6.16 各地点での津波遡上高

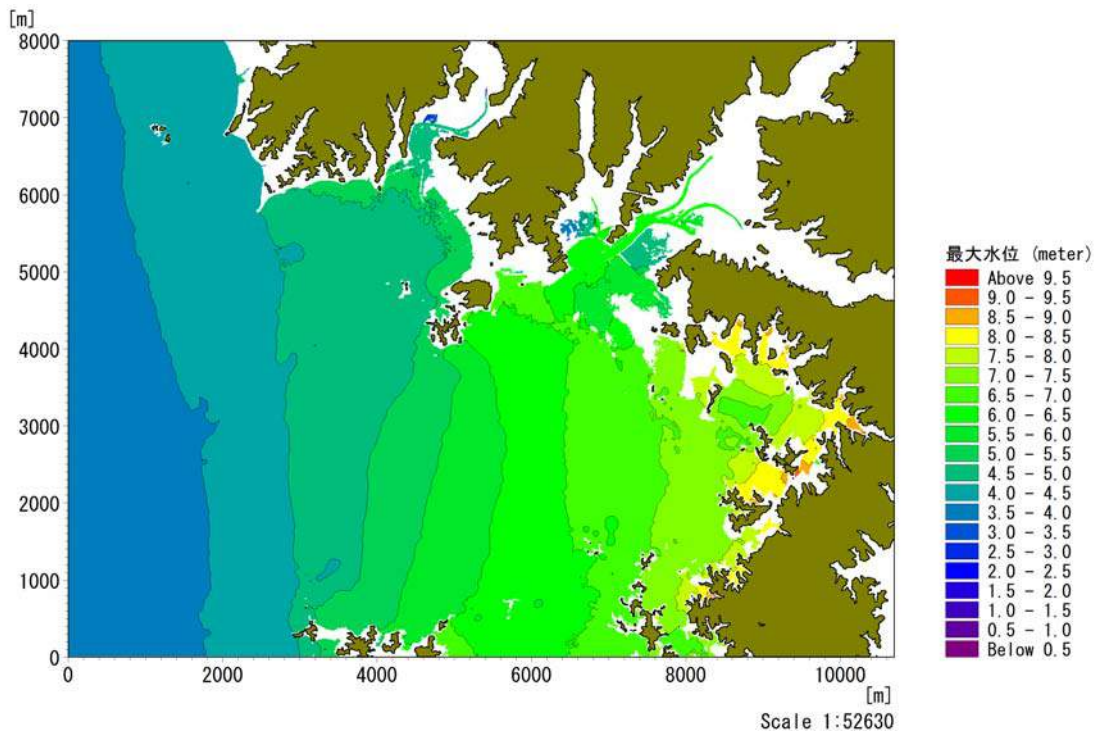


図 6.17 津波遡上高の分布(対策前)

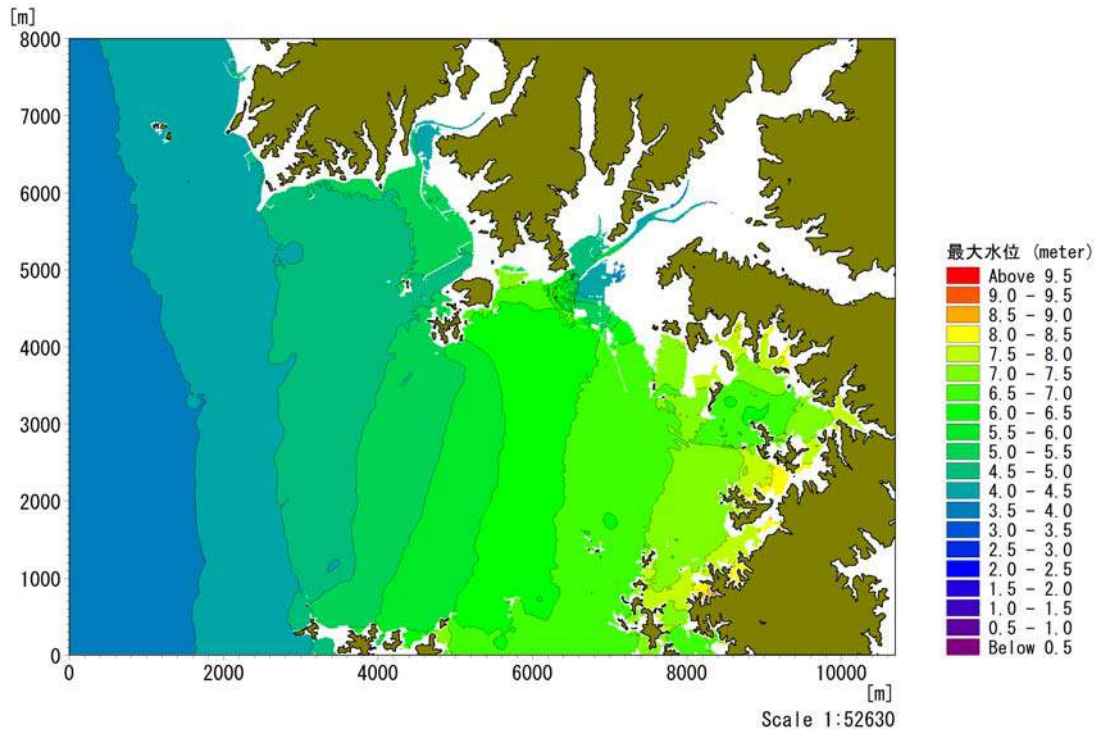


図 6.18 津波遡上高の分布 (対策後)

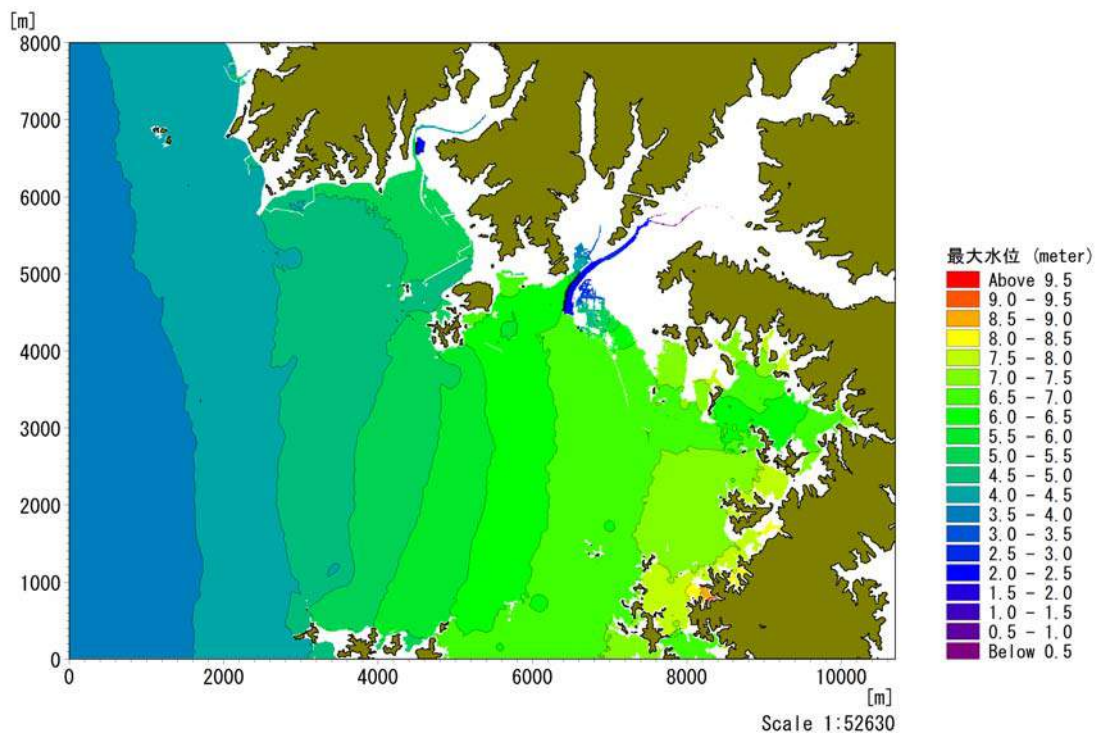


図 6.19 津波遡上高の分布 (かさ上げ 1m)

6.6 結論

本章では事例検討によって、津波対策の効果を検討した。沿岸の構造物がねばり強さを持つことにより、津波の遡上に対して効果があることが確認できた。

- ①津波の遡上に対して、時間差が発生し脱出する時間を稼ぐことが可能となる。
- ②ねばり強さを持たせることにより遡上高そのものに対して効果があり、人命や財産の保全に対しても寄与できる。
- ③対象となる津波高さによりその効果は変動すると考えられるが、かさ上げによる効果はかなりあることが確認できた。
- ④ただし、津波が越流する場合、完全に防ぐことは難しく内陸部での二次、三次的な対策を含む複合的な対策が重要である。

【参考文献】

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室，津波浸水想定の設定の手引き，2012年10月
- 2) 国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドライン（案），2013年9月

7 まとめ

第2部の津波に耐える技術は、(社)日本建設業連合会海洋開発委員会の扱うテーマとしては最も取り扱いやすいものであったといえるが、それだけに苦勞の多い作業であったといえる。

3年間にわたり、津波に耐える技術について検討を実施し、その成果をとりまとめた。

東北地方太平洋沖地震津波によって被災した多くの構造物に対する考察と、被災要因の分析を通じて、津波に耐える構造物とは何かを考えた3年間であった。

津波に対してねばり強く耐える構造に関する様々な機関での提案や解析を基礎に、ねばり強さへのアプローチを考察し防波堤についての提案を実施し、また、様々な組織で提案された津波対策手法や検討方法を紹介してきた。また、(社)日本建設業連合会の加盟各社にアンケートを実施して津波対策工法の紹介も行った。このような資料は今後多くの同様な検討で役立つものになったと思う。

また事例検討を行い、沿岸の構造物がねばり強さを持つことにより、津波の遡上に対して効果(時間差が発生し脱出する時間を稼ぐ、浸水深、遡上高を減少させる)があることが確認でき、かさ上げによる効果もかなりあることも確認できた。

津波が越流する場合、完全に防ぐことは難しく内陸部での二次、三次的な対策を含む複合的な対策が重要であることも確認できた。

最後に、第2部のまとめとして以下のことを強調しておきたい。

津波に対して避難することが第一に優先されるが、技術者にとって津波を知ること、そして、津波に耐える技術を持つことが、多くの人命を救う上で重要となる。