

津波による施設の被災シナリオに関する検討 —船舶避難に関する検討例—

EXAMINATION ABOUT A DISASTER SCENARIO
OF FACILITIES DUE TO TSUNAMI
- EXAMINATION EXAMPLE ABOUT A SHIP EVACUATION -

川真田桂¹・高岡一章²・藤井裕之³・山木滋⁴
Kei KAWAMATA, Kazuaki TAKAOKA, Hiroyuki FUJII, and Shigeru YAMAKI

¹工修 電源開発株式会社 原子力事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

²正会員 工修 電源開発株式会社 原子力事業部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

³正会員 工修 株式会社アイ・エヌ・エー 海岸部 (〒112-8668 東京都文京区関口1-44-10)

⁴正会員 理修 有限会社シーマス (〒950-3304 新潟県新潟市木崎2235)

Based on documents investigation, we examined a disaster scenario of power plant which hit by tsunami. In addition, we paid our attention to drifting ships due to tsunami and examined an evacuation method of a ship as a part of examination of countermeasures against tsunami disaster for a model harbor.

The disaster scenario and a evacuation flow of a ship which we showed by this report become a help of examination of countermeasures against tsunami disaster.

Key Words : Tsunami disasters, suffering scenario, tsunami countermeasures

1. はじめに

近年, 中央防災会議より, 東海地震, 東南海・南海地震, 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震等を対象とした地震・津波に伴う被害想定が公表され, 各自治体では被害軽減化の対策が検討されつつある。

一方で, 先進国の臨海施設が大津波による被害を受けた事例は無く, 実際にどのような津波被害が生じるのか予想できないのが現状である。

そこで, 臨海部に位置する発電施設を主な対象として, 津波来襲時に発生し得る被災シナリオを策定し, 津波に対する安全対策の検討の一助となることを目的に, 本研究を行った。

ここでは, まず, 発電施設, 漁港, 港湾等の津波による被災事例に関する文献調査を行い, 既往の津波被害に基づき想定される被災項目を抽出し, 発電施設等に想定される津波による被災シナリオを検討した。

続いて, 安全対策上の課題点となる船舶における津波対策の一環として, モデル港湾を対象に船舶の避難等の対応方法について検討を行った。

2. 発電施設等に想定される津波による被災シナリオ

(1) 文献調査に基づく被災事例の整理

被災シナリオを検討する際の基礎資料として, 発電施設, 並びに発電施設の専用港湾と似た地形構造をもつ漁港, 港湾等における津波による被災事例について, 比較的近年に発生し, 被害調査が実施されている表-1に示す13津波を対象とした文献調査^{1)~13)}を行った。

以下に, 主な被災事例を, 施設や被害の種類毎に整理する。

a) 発電施設

1960年チリ地震津波では, 八戸火力発電所において約0.8mの床上浸水が生じたが, 顕著な被害は見られなかった。

1983年日本海中部地震津波では, 酒田共同火力の取水路において循環水ポンプの運転に支障をきたすほどのサージ現象が発生している。

また, 1993年北海道南西沖地震津波では, 奥尻島内のホヤ石川水力発電所において発電所本館が浸水する等の被害が生じ, 定期点検の為, 約3ヶ月間発電を停止した。

表-1 検討対象とする既往津波

No.	発生年	津波名
1	1933年	昭和三陸津波
2	1944年	東南海地震津波
3	1946年	南海地震津波
4	1952年	十勝沖地震津波
5	1960年	チリ地震津波
6	1964年	新潟地震津波
7	1968年	日向灘地震津波
8	1968年	十勝沖（青森県東方沖）地震津波
9	1973年	根室半島沖地震津波
10	1983年	日本海中部地震津波
11	1993年	北海道南西沖地震津波
12	2003年	十勝沖地震津波
13	2004年	スマトラ島沖地震津波

b) 防波堤及び護岸

1983年日本海中部地震津波では、建設中の能代石炭火力発電所において、裏込め捨石が未施工の護岸ケーソンが最大で70mから80m移動するとともに、ケーソンの一部には上半分が破壊され鉄筋が露出しているものも見られた。

また、1993年北海道南西沖地震津波では、奥尻港において、防波堤及び護岸の滑動・転倒、被覆材の散乱、並びに基礎マウンドの洗掘等の被害が生じている。

c) 漂流物（船舶）

過去に発生した津波においては、漁船等の小型船を中心に多数の船舶が転覆・沈没・流出等の被害を受けており、1946年南海地震津波では、和歌山県下津港において漁船が流出し、港湾背後の民家に衝突するという被害が発生している。

また、1,000トン以上の大型船舶の被災事例については、1968年十勝沖地震津波において、室蘭港で港外に避難中の貨物船が港口付近で津波に遭遇し、操船の自由を失い防波堤に衝突し船首部を大破している。同様に、八戸港においても、タンカー及び貨物船の座礁被害が生じている。

d) 火災

1964年新潟地震では、新潟港において石油タンクで火災が発生し、津波の来襲により、タンクから漏れた油が流出した為、港湾周辺の361世帯の民家が延焼するという被害が発生している。

(2) 発電施設等に想定される津波による被災項目

過去の被災事例に基づき整理した、発電施設等に想定される津波による被災項目を表-2に示す。

被災項目の整理に際しては、津波の波力及び浸水による対象施設の直接的な被害の他に、津波による漂流物の衝突、火災及び周辺ライフラインの寸断等、間接的に対象施設に被害を及ぼす事象も考えられることから、それらについても被害項目抽出の対象とした。

また、表-2では、被災項目を発電施設及びその周辺に大別するとともに、対象施設毎に想定される被災形態を

記載している。

なお、近年の急速なIT技術の進展に伴い、施設の運用システムが高度化及びネットワーク化されていることから、新たな種類の被害の発生が考えられるとともに、津波により施設の電気系統及び制御系統が浸水した場合、施設の機能が長期的に停止する可能性もあり、新たな被災項目に留意が必要である。

(3) 発電施設等に想定される津波による被災シナリオ

発電施設等に想定される津波による被災項目に基づき、時系列的に被災状況を整理したフローを図-1に示す。

図-1の横方向は、時間軸であり、左側から順に、地震・津波発生、沿岸へ大きな津波が到達、繰り返し津波が到達、津波収束の時間経過を表している。

なお、現実的には、地震の揺れによって諸設備が被害を受けた後に津波が来襲し被害が拡大するケースも想定されるが、ここでは津波による被害項目を明確にする為、地震の揺れによる被害（建物破損・崩壊、液状化、斜面崩壊等）は考慮しないこととした。

以下に、発電施設等に想定される津波による被災シナリオを、対象施設毎に整理する。

a) 発電施設

直接的に発電所の運転停止を引き起こす項目としては、取放水設備の破損、並びに水深変化及び漂流物の影響による取放水障害、遡上後の津波波力及び漂流物の衝突による設備破損、並びに浸水による設備機能低下に伴う発電障害及び送変電障害が挙げられる。また、貯蔵設備が破損し内容物が流出・拡散し火災が発生した場合は、津波により火災が広がることも想定される。さらに、陸上の車両等も、津波の遡上により流出し、他の構造物と衝突する二次災害が想定される。

次に、発電所運転停止につながる被害のうち、発電燃料の調達障害を引き起こす項目としては、防波堤堤体の滑動・転倒に伴う港内静穏度の低下、防波堤・岸壁・護岸の被覆材の流出、並びに航路・泊地の水深変化及び漂流物の影響による船舶航行障害、岸壁・栈橋・荷役設備の破損による船舶着岸・荷役作業障害が挙げられる。また、港湾内に船舶が停泊している場合は、津波による水位変動により係留索が切断され、漂流物となり他の構造物と衝突する被害等が想定される。

b) 発電施設周辺

発電施設周辺の諸施設の被害のうち、発電所運転停止につながる項目としては、道路・鉄道・ライフライン等の公共施設での津波波力及び漂流物の衝突による設備破損、並びに浸水による設備機能低下に伴う発電施設へのアクセス不能等の交通障害、飲料水等の供給不能等の生活障害が挙げられる。また、発電所施設周辺に、漁港、貯木設備、養殖設備等が存在する場合は、津波により漁船、木材、養殖棚等が流出し、発電施設へ漂着する可能性がある。

(4) 被災シナリオに基づく発電施設等の津波対策

表-2 発電施設等に想定される津波による被災項目

被災項目			被災形態	
大分類	中分類	小分類		
発電施設	港湾設備	防波堤	<ul style="list-style-type: none"> 波力等による堤体の滑動・転倒 流れによる堤体基礎の洗掘、マウンド部被覆材の散乱・流出 	
		岸壁、護岸	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる堤体基礎の洗掘、被覆材の散乱 急激な水位低下による裏込土砂の流出 上記による堤体の滑動・転倒 	
		航路、泊地	<ul style="list-style-type: none"> 流れの運搬堆積作用による水深変化及び漂流物による船舶航行阻害 	
		棧橋	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 	
		荷役設備	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 浸水による機能低下・損失 	
		船舶	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる座礁、沈没、乗り上げ、流出 漂流物や構造物との衝突による船体破損 流出船舶の衝突等による二次災害発生 流出重油類の引火による火災 	
	発電設備	取放水設備	<ul style="list-style-type: none"> 流れの運搬堆積作用による水深変化及び漂流物による取放水障害 	
		建屋（発電所及び関連施設）	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 浸水による機能低下・損失 流出重油類の引火による火災 	
		貯蔵設備（タンク等）、配管	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 内容物の流出・拡散 流出重油類の引火による火災 	
		送变电設備	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 浸水による機能低下・損失 	
	その他	車両	<ul style="list-style-type: none"> 浸水による機能低下・損失 流れによる流出 	
	発電施設周辺	公共施設	道路、鉄道	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる盛土部の洗掘等による設備破壊 漂流物の堆積による交通遮断 浸水による信号系統故障による機能低下
			ライフライン	<ul style="list-style-type: none"> 波力及び漂流物の衝突による設備破壊 浸水による機能低下・損失
産業施設		漁港	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる漁船等小型船の座礁、沈没、乗り上げ、流出 流出船舶の衝突等による二次災害発生 	
		貯木場	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる木材の流出 流出木材の衝突等による二次災害発生 	
		養殖場	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる筏等の流出 流出筏等の衝突による二次災害発生 	

図-1に示す被災シナリオは、港湾部に位置する一般的な発電施設を対象にしたものであり、個別発電施設を対象に被災シナリオを策定する際には、防災対策の検討対象となる津波を適切に想定し、発電施設に襲撃する津波高、遡上範囲及び来襲時間を把握することが重要である。

発電施設に襲撃する津波高等を想定した後は、発電施設の立地条件及び設備の配置条件等を勘案し、図-1に示す被災シナリオから、対象となる被災項目を抽出し被害軽減化対策を施す必要がある。

防波堤等に作用する津波波力に対しては池野ほか¹⁴⁾、陸上の構造物に作用する津波波力に対しては津波避難ビル等に係るガイドライン検討会・内閣府政策統括官（防災担当）¹⁵⁾で検討されている波力評価式を用いて、設備被害の有無を評価し、被害が想定される場合は、設備の補強等を施す必要がある。

設備の浸水については、津波の遡上範囲及び遡上高と、設備配置等とを比較の上、当該設備の被害を想定し、被害が想定される場合は、設備配置の変更、地盤の嵩上げ、防水扉等の設置及び可能な限り高所への電

気設備等の設置・移転等を実施する必要がある。また、火災の原因となる燃料等の貯蔵設備は、津波の遡上域を外れた位置に設置することが望まれる。

復旧対策としては、流出物の撤去等が速やかに実施できるよう事前に対応体制の整備等を行う必要がある。

さらに、表-2及び図-1に示すように津波により流出した船舶、木材、筏等が漂流物となり、他の構造物と衝突する等の二次災害が想定される。津波による漂流物の挙動や衝突による影響等の評価は、研究段階にあり、個別港湾を対象とした検討がなされていないのが現状である。しかし、船舶被害については、早期避難等の事前の対策により被害を軽減化することができると考えられる。発電施設の場合、その多くは専用港湾を有しており、入出港する船舶が限定される為、事前に十分な対策をとることが可能である。

以下では、船舶の津波対策に関する検討の一例として、モデル港湾を対象とした船舶の避難方法の検討例を紹介する。

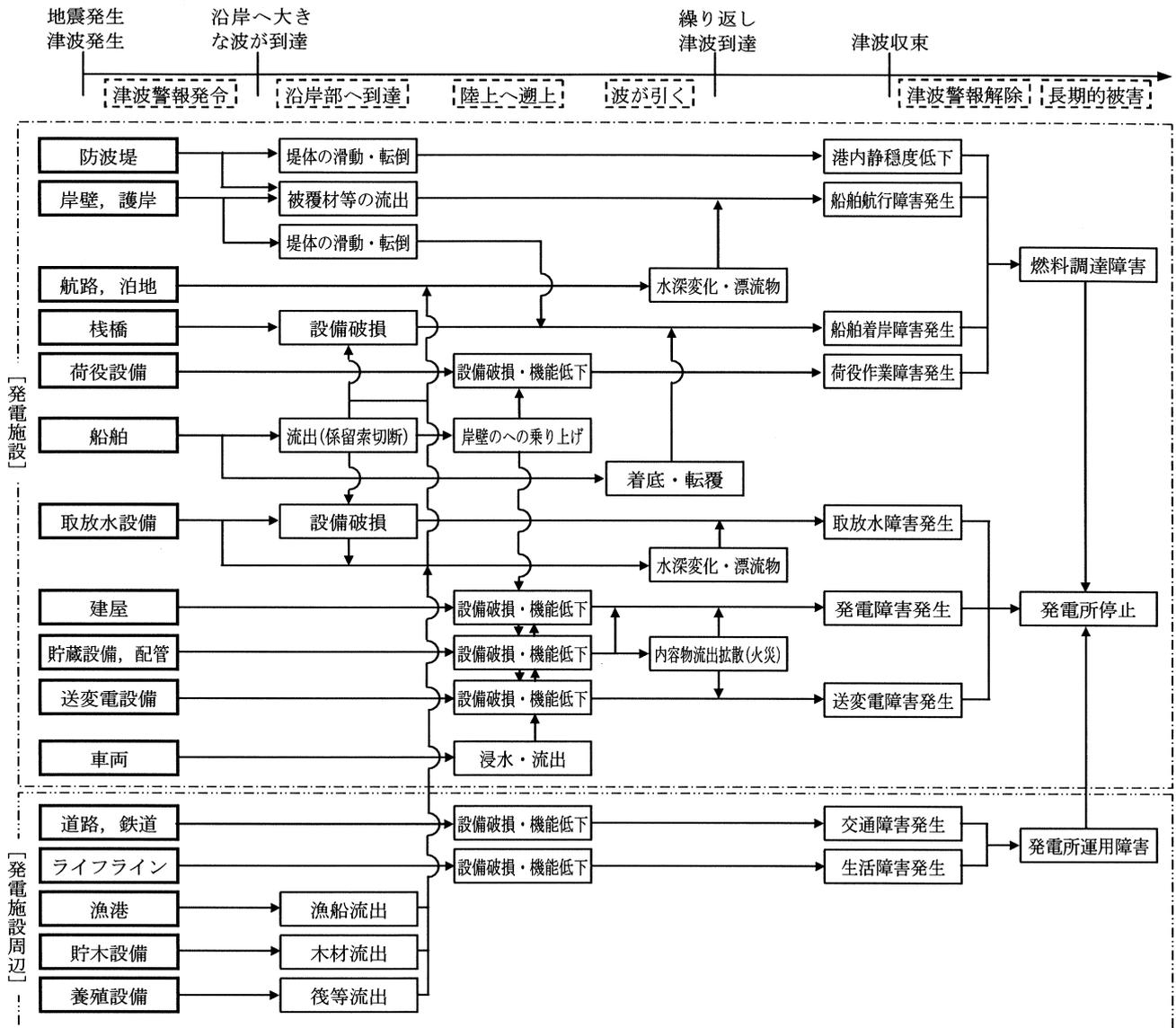


図-1 被災シナリオ

3. 船舶の避難に関する検討

発電所専用港湾内に船舶が停泊している際に津波が発生した場合、船舶は港外へ避難することが原則であるが、港内航行中の船舶は津波の水流量により偏位・偏針するうえ、港内における水流の方向、大きさは複雑で、特に防波堤開口部で水流量は最大となることから、津波来襲時に船舶が港内（特に防波堤開口部付近）を航行することは、極力避けなければならない。

津波来襲時に港湾内の船舶が安全に避難する為には、事前に、津波発生時の船舶の避難手順及び避難に要する時間を整理し把握しておく必要がある。

そこで、モデル港湾内岸壁に停泊している3,000DWT級船舶を対象に、津波来襲時の避難手順及び避難に要する時間について、情報伝達、意思決定及び避難行動の3段階に区分し、文献調査、操船シミュレーション等により検討を行った。

モデル港湾を図-2に、検討結果のフローを図-3に示す。

(1) 情報伝達段階

津波警報等の津波予報は、津波発生の可能性がある場合に地震が発生してから約3分を目安として、気象庁から発表される¹⁷⁾。

(2) 意思決定段階

津波発生時には船舶は港外へ避難することが原則であるが、最終的には、船長が、地震の発生位置・規模、津波の到達時間等を勘案し、港外へ避難するか、港内へ留まるかについて判断することとなる。これらの意思決定に要する時間は、船長経験者からの聞き取りに基づき、約5分と想定した。

(3) 避難行動段階

a) 港外へ避難する場合

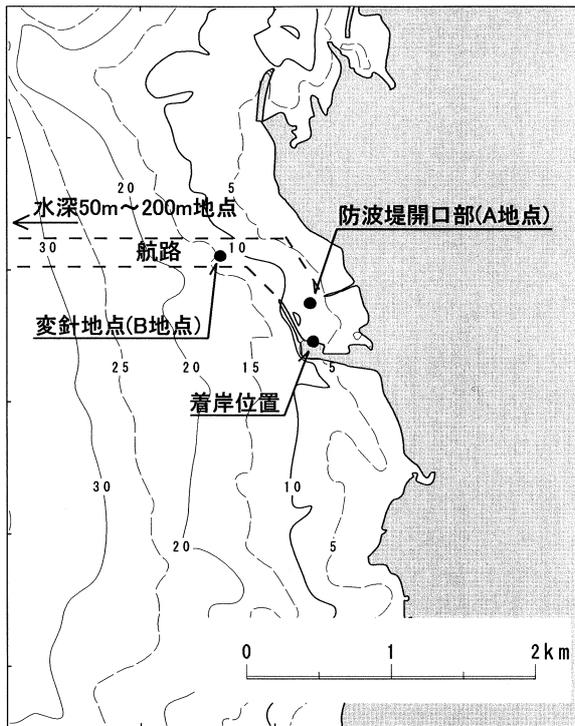


図-2 モデル港湾位置

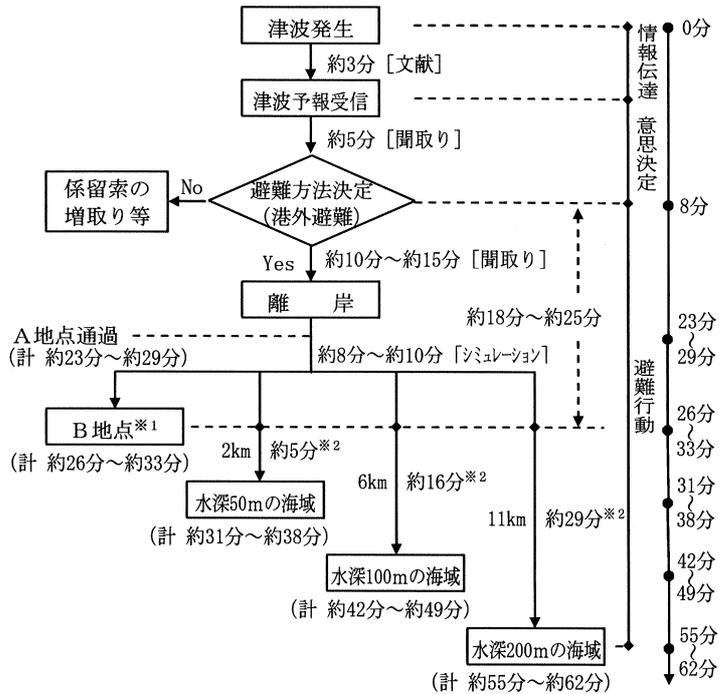


図-3 モデル船舶の港外避難時間

※1 防波堤開口部を抜け西方に回頭した状態を出港完了としている。
 ※2 移動時間は、各海域への移動距離を航海速度12.5ノット (約23 km/h) で除して算出している。

対象船舶が係留状態から離岸し港外へ避難するのに必要な時間を把握する為、聞き取り調査及び操船シミュレーションを実施した。なお、操船シミュレーションは、モデル港湾周辺における風向・風速、潮流、波浪等を考慮して実施した。

その結果、対象船舶が係留状態から離岸するまでに要する時間は、乗組員及びタグボートが揃っている条件下で、船長経験者からの聞き取りに基づき約10分から約15分である。離岸から防波堤開口部 (A地点) を通過するまでに要する時間は、タグボート2隻による曳航を前提とした操船シミュレーション結果に基づき約5分から約6分である。

また、離岸から港外の変針地点 (B地点) までに要する時間は、操船シミュレーション結果に基づき約8分から約10分である。よって、係留状態から港外の変針地点 (B地点) まで到達する時間は、約18分から約25分と想定される。

さらに、港外の変針地点 (B地点) から船舶が水深50mの海域までの避難に要する概略時間は、移動距離を航海速度12.5ノット (約23km/h) で除して約5分、同様に水深100mの海域まで約16分、水深200mの海域まで約29分と算出できる。

以上より、対象船舶が津波発生から防波堤開口部 (A地点) を通過するまでの時間は約23分から約29分であり、同様に、港外の変針地点 (B地点) までの避難に要する時間は約26分から約33分と想定される。さらに、水深の深い海域までの対象船舶の避難に要する時間は、水深50mの海域まで約31分から約

38分、水深100mの海域まで約42分から約49分、水深200mの海域まで約55分から約62分の所要時間が必要である。

モデル港湾に最も大きな影響を与えると想定した津波の数値シミュレーション結果を図-4に示す。検討対象とした津波の波源は、モデル港湾からの海上伝播距離で約140kmの地点に位置する。図-4に示すように、津波第1波の防波堤開口部への到達時間は、地震発生後約42分であることから、モデル港湾においては、対象船舶が係留状態から離岸して防波堤開口部 (A地点) を通過し、港外の水深の深い安全な領域へ避難することは可能と考えられる。

このように、主な船舶に対して図-3のフローを作成するとともに、別途津波の数値シミュレーション等を実施し各水深地点の津波高及び津波到達時間を把握しておけば、津波来襲時に船舶が港外へ避難可能か否か事前に把握することが可能である。また、図-3のフローは、実際に津波の来襲が予測された場合の、避難方法の判断材料としても利用可能である。

b) 港内に留まる場合

一方、対象船舶が港外へ避難する前に津波が到達することが想定されるケース、または予想される津波高が小さいケースにおいては、船長の判断により、対象船舶は港内に留まる場合がある。この場合は、直ちに岸壁での荷役作業を停止し係留索の増取り等を行い津波の来襲に備える必要がある。

津波に伴う水位変動により係留索が切断されるか否かの目安としては、日本海難防止協会¹⁸⁾にて検討

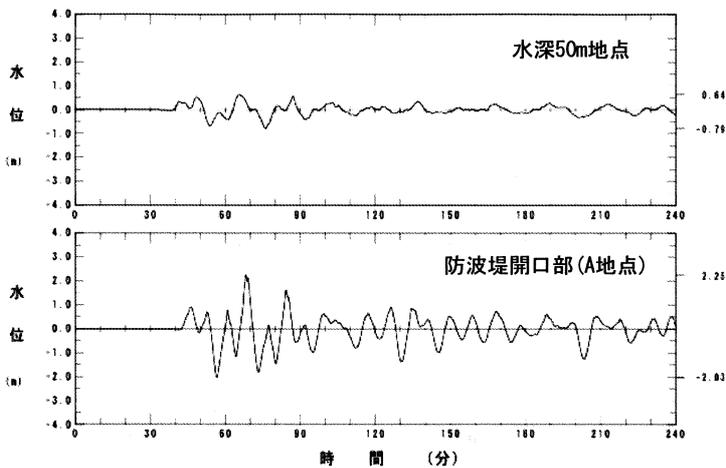


図-4 水位時間波形

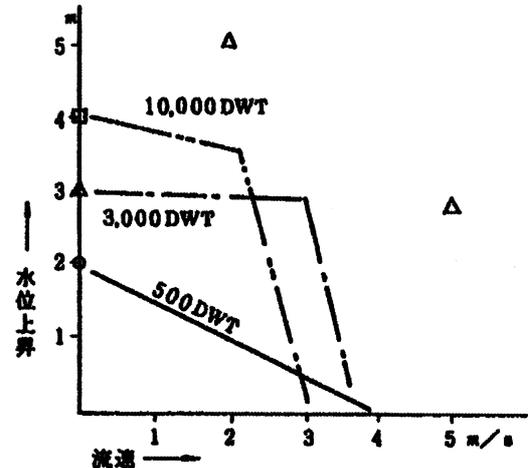


図-5 係留索切断に至る安全限界¹⁸⁾

された図-5により評価することができる。津波の数値シミュレーション結果によると、モデル港湾の岸壁における最大流速は1.2m/s程度、最大水位上昇量は2.6mから2.9m程度であることから、3,000DWT級の対象船舶においては、図-5によると係留索の切断には至らないと判断できる。

また、係留索が切断される可能性がある場合は、船体動揺シミュレーション等を実施することにより係留索及び防舷材等に作用する応力等を明らかにし、その結果に基づき、係留設備の補強等を実施する方法が考えられる。

4. おわりに

本報で得られた成果は、以下の通りである。

- 文献調査等に基づき、発電施設等に想定される津波による被災シナリオを策定できることを示した。これにより津波被害軽減化対策の検討が可能となったが、今後の課題として、被災項目の発生確率及び被害の程度を定量的に示す手法の確立が望まれる。
- 津波対策の課題である船舶の対応について、モデル港湾を対象にした定量的な検討例を紹介した。モデル港湾では、津波来襲前に避難可能との結果が得られたが、実践的な訓練等を継続的に行う必要がある。

参考文献

- 1) チリ津波合同調査班：1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告，丸善，1961.
- 2) 八戸海上保安部：68十勝沖地震・津波に関する総合報告書，1968.
- 3) 第一管区海上保安本部：1968年十勝沖地震調査報告，1968.
- 4) 堀川清司：陸上に氾濫した津波の挙動と津波の流動による被災のメカニズムに関する研究，文部省科学研究

費 自然災害特別研究成果，No.A-58-2，1983.

- 5) 漁港漁村建設技術研究所：日本海中部地震（津波）調査報告書，1985.
- 6) 運輸省第一港湾建設局，第二港湾建設局編：日本海中部地震津波対策調査報告書，昭和59年度国土総合開発事業調査費，1985.
- 7) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会編：1983年日本海中部地震震害調査報告書，土木学会，1986.
- 8) 土木学会耐震工学委員会編：1993年北海道南西沖地震被害調査報告，土木学会，1997.
- 9) 今村文彦：十勝沖地震津波の挙動と被害，月刊地球，号外No. 49，pp. 152-161，2005.
- 10) 日本地震工学会編：2004年12月26日スマトラ島沖地震報告会概要集，日本地震学会，2005.
- 11) 土木学会編：スマトラ沖地震・津波被害調査共同発表会資料，2005.
- 12) 中埜良昭：2004年12月16日スマトラ島沖地震による津波被害を受けた構造物の調査報告，2005.
- 13) 松富英夫，榊山勉，Sindhu Nugroho，都司嘉宣，谷岡勇市郎，西村裕一，鎌滝孝信，村上嘉謙，松山昌史，栗塚一範：Banda Acehと周辺における2004年インド洋津波と被害想定から見た課題，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1366-1370，2005.
- 14) 池野正明，松山昌史，榊山勉，柳沢賢：ソリトン分裂と碎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巻，pp. 751-755，2005.
- 15) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会，内閣府政策統括官（防災担当）：津波避難ビル等に係るガイドライン，2005.
- 16) 永川賢治，今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案，津波工学研究報告，Vol. 17，pp. 79-94，2000
- 17) 内閣府，消防庁，気象庁：緊急防災情報に関する調査報告書，平成15年度災害対策総合推進調整費，2004.
- 18) 日本海難防止協会：平成15年度津波が予測される場合の船舶安全確保に関する調査研究報告書，2004.