

漁港施設の耐津波性能検討とその課題

農業水産部 水産課 ○一政 悟
長谷 一矢

水産庁は、これまで蓄積した漁港施設の設計に係る新たな知見を反映した技術的実務書「漁港・漁場の施設の設計参考図書」を平成27年に公表し、その中で防波堤等の耐津波の強化対策に関する設計の考え方を示した。今般、この考え方を適用するにあたり、モデル漁港において耐津波性能照査を実施するとともに“粘り強い構造”の設計津波として防波堤の安定限界津波水位を適用した場合の検討結果とその課題について報告する。

キーワード：防災・減災、津波、粘り強い構造、耐津波性能、外郭施設、係留施設

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、我が国に未曾有の被害をもたらし、水産関係の被害総額は 1 兆 2 千億円を超え、その内、漁港施設の被害額は 8,230 億円と全体の 65.1%¹⁾を占めた。

この大震災を受けて開催された中央防災会議「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」報告では、想定津波を整理（表-1）して津波対策を構築する際の考え方を示している。水産庁は、漁港施設の設計にあたっての技術的実務書である漁港・漁場の施設の設計参考図書（以下、設計参考図書と表記）を平成 27 年に公表し、設計津波、耐震・耐津波性能の強化を行う施設等、耐津波の強化対策に関する設計の考え方を提示した。

表-1 想定津波の考え方

津波レベル	発生頻度	整備・対策の考え方
発生頻度の高い津波	発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波	人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、海岸保全施設等を整備
最大クラスの津波	発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波	住民等の生命を守ることを最優先とし、住民の避難を軸に、とりうる手段を尽くした総合的な津波対策を確立

上記を踏まえ、今後の北海道における第3種、第4種漁港の外郭施設、係留施設等に耐津波強化対策に関する設計の考え方を適用するにあたり、既存の外郭施設、係留施設の耐津波性能照査を実施するとともに、倒壊しづらい「粘り強い構造」に関する一考察と今後の課題について報告するものである。

2. 耐津波性能照査

2.1 耐津波性能照査の検討手順及び照査対象施設

Satoru Ichimasa, Kazuya Hase

検討対象とするモデル漁港は、図-1に示す北海道の太平洋沿岸に位置するA漁港とした。図-2に耐津波性能照査の検討手順を示す。なお、照査対象施設は図-3に示す外郭施設2施設、係留施設2施設とした。



図-1 モデル漁港



図-2 耐津波性能照査の検討手順

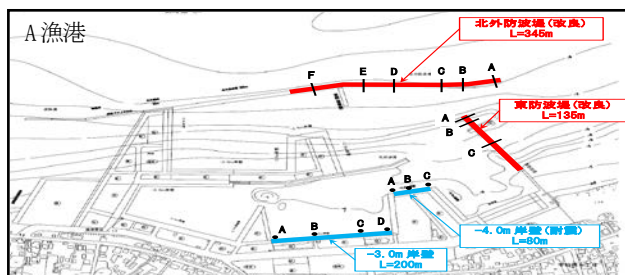


図-3 照査対象施設

2.2 津波シミュレーションの実施

(1) 対象津波の設定

対象とする津波は、発生頻度の高い津波(以下、L1津波と表記)については、「太平洋沿岸における海岸保全施設等の設計に用いる津波の水位について」²⁾を参考に、A漁港周辺海岸への影響の大きい「1896年明治三陸地震」及び「【想定】三陸沖北部地震」とした。また、最大クラスの津波(以下、L2津波と表記)については、「太平洋沿岸に係る津波浸水予測図作成業務 報告書」³⁾に示されるL2津波を設定することとし、これらを整理すると表-2に示すとおりである。

表-2 対象津波

津波の規模	対象津波	モルト マグニチュードM	発生確率 P
発生頻度の高い津波(L1津波)	1896年明治三陸地震	8.2	1/137
	【想定】三陸沖北部地震	8.4	1/97
最大クラスの津波(L2津波)	最大クラスの津波	9.1	1/1000

※最大クラスの津波の発生確率は未公表のため、1/1000と仮定

(2) 津波シミュレーションの手法及び条件

津波シミュレーション手法は、「津波浸水想定の設定の手引き ver.2.00」⁴⁾等を参考に「非線形長波方程式モデル」を採用した。また、計算内容は表-3に示すとおりであり、漁港周辺の計算格子サイズは、設計参考図書を参考に5m格子とした。地盤高・構造物高の基準面は、T.M.S.L(以下、TP.と表記)と設定した。また、津波水位は基準面 (TP.) からの高さ、津波高は静水面(H.W.L)からの高さとし、外郭施設の安定照査に用いる入射津波高 a_I は、津波シミュレーション結果の津波高における外郭施設の反射影響等を考慮して「 $a_I = \text{津波高} \div 2$ 」で定義した。

表-3 津波シミュレーションの検討内容

	検討内容
数値モデル	非線形長波方程式モデル(越流計算は「本間公式」、遡上計算は「小谷らの方法」による)
数値解法	スタaggerド・リーブフロッグ法(差分法)
計算格子サイズ	2430m、810m、270m、90m、30m、10m、5m(1次～7次領域でネスティング遡上計算は30m、10、5mの領域を対象)
波 源	初期水位変動量 = 地盤変動量の鉛直成分(地盤変動量は「マンシンハ・スマイリーの方法」及び「OKADAの方法」により算定)
潮 位	朔望平均満潮位(各漁港のHWL)
データの基準	平面方向は、平面直角座標系(第11系)を採用 鉛直方向は東京湾中等潮位(TMSL=18TP.)を基準

(3) 津波シミュレーション結果

津波シミュレーション結果の内、各津波の最大浸水深分布を図-4～図-6に、港口付近における津波水位時系列を図-7に示す。同図より、L1津波である「1896年明治三陸地震」及び「【想定】三陸沖北部地震」は同程度の規模であり、港口の津波水位はT.P.+1.5m程度、漁港内の浸水深は1.0m未満である。一方、L2津波は、港口の津波水位がT.P.+6.0m程度、漁港内は全域が5m以上の浸水となり、非常に規模の大きい津波であることがわかる。



図-4 最大浸水深分布(1896年明治三陸)



図-5 最大浸水深分布(【想定】三陸沖北部)



図-6 最大浸水深分布(最大クラス)

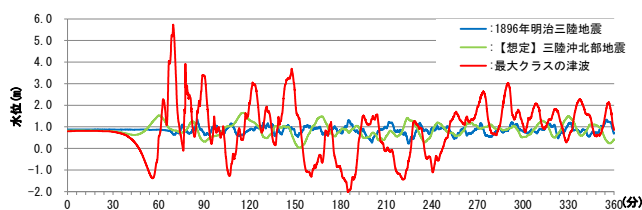


図-7 港口の津波水位時系列図

2.3 設計津波水位・津波流速の設定

(1) 外郭施設の設計津波水位・流速の設定

外郭施設の耐津波性能照査に用いる設計津波水位は、津波シミュレーション結果の水位の時刻歴波形データより設定する。ここで、水位の時刻歴波形データは、図-3に示した外郭施設の照査対象施設について先端部・標準部・隅角部等の断面変化を踏まえた代表点を設定し、図-8に示す様に港外・港内の水位を抽出した。抽出した水

位の時刻歴波形データは図-9に示すとおりであり、時々刻々の水位から港外・港内の水位差、越流の有無等を判定して作用波圧式(越流時:水工研式、非越流時:谷本式、波状段波が発生する場合:修正谷本式)を選定し、図-10のとおり水平方向の波圧合力を求めた。同図から、堤体に作用する波圧は作用波圧の形態や押し・引きの作用方向が時々刻々と変化していることがわかる。このため、外郭施設の耐津波性能照査に用いる設計津波水位は、押し波時・引き波時それぞれの最大値の発生時刻における水位条件を採用することとした。

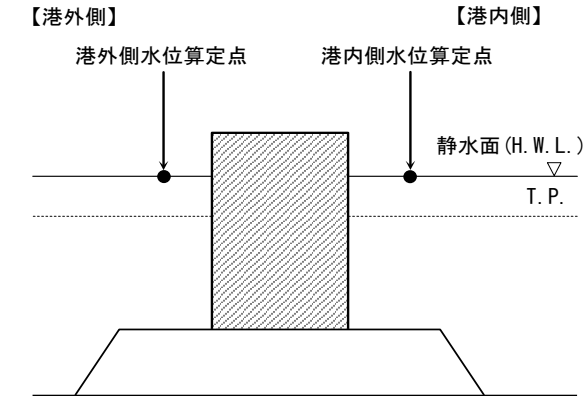


図-8 水位抽出点のイメージ

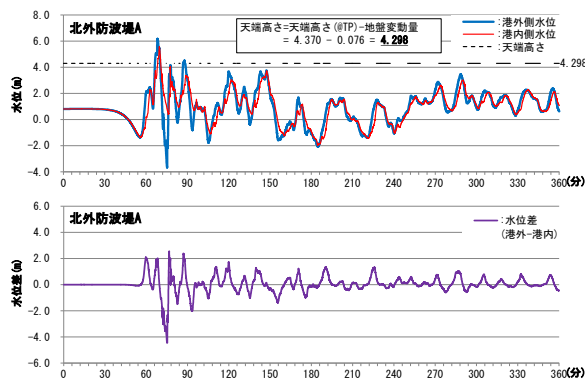
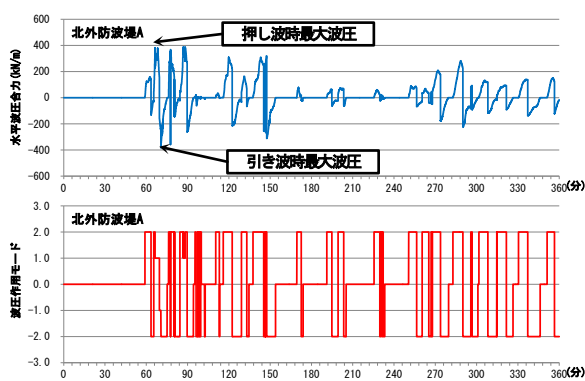


図-9 水位・水位差の時刻歴波形



モード1:越流時(水工研式) モード2:非越流時(谷本式)
モード3:波状段波発生時(修正谷本式)
※プラスが押し方向、マイナスが引き方向に波圧が作用

図-10 作用波圧の時刻歴波形

また、耐津波性能照査を実施する断面は、上述の水平方向の波圧合力の作用状況を図-11に示すとおり比較し、断面形状を勘案して北外防波堤C部、東防波堤C部とした。

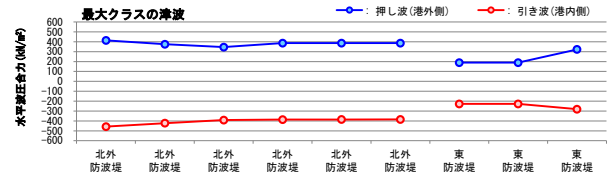


図-11 断面毎の水平波圧合力の比較

一方、津波流速については、津波シミュレーション結果により得られる最大流速を基に、図-12に示すとおり照査断面毎に港外側・港内側の最大流速を抽出した。

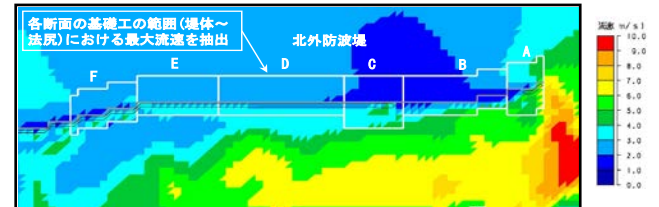


図-12 最大流速分布の例

以上の結果を整理した外郭施設の耐津波性能照査に用いる設計津波水位・流速は、表-4及び表-5に示すとおりである。

表-4 外郭施設の耐津波性能照査に用いる津波水位

施設名	対象津波	作用方向	港外側		港内側		水位差 (m)	水平波 圧合力 (kN)	波圧 算定式	
			水位 (m)	津波高 (m)	水位 (m)	津波高 (m)				
北外防波堤	C部	1896年 明治三陸地震	押し	1.38	0.50	1.08	0.20	0.30	45.59	谷本
			引き	1.28	0.41	1.43	0.56	-0.15	-50.92	谷本
		【想定】 三陸中北部地震	押し	1.60	0.73	1.60	0.73	0.00	67.74	谷本
			引き	1.59	0.71	1.72	0.84	-0.13	-79.42	谷本
		最大クラス の津波	押し	4.30	3.42	2.00	1.13	2.30	386.45	谷本
			引き	1.42	0.55	4.30	3.42	-2.87	-386.31	谷本
東防波堤	C部	1896年 明治三陸地震	押し	1.52	0.65	1.20	0.32	0.33	43.14	谷本
			引き	1.30	0.43	1.55	0.67	-0.25	-44.82	谷本
		【想定】 三陸中北部地震	押し	1.68	0.81	1.68	0.80	0.01	55.38	谷本
			引き	1.62	0.75	1.76	0.89	-0.14	-61.29	谷本
		最大クラス の津波	押し	4.93	4.06	1.74	0.87	3.19	322.20	水工研
			引き	1.05	0.18	4.12	3.24	-3.06	-281.44	水工研

表-5 外郭施設の耐津波性能照査に用いる流速

施設名	最大流速 (m/s)					
	1896年明治三陸地震		【想定】三陸中北部地震		最大クラスの津波	
	港外側	港内側	港外側	港内側	港外側	港内側
北外防波堤	A 1.2	2.1	1.0	1.5	4.7	6.6
	B 0.7	2.0	0.6	1.4	2.9	5.5
	C 0.4	1.5	0.4	1.2	2.1	4.3
	D 0.3	1.2	0.3	1.0	2.5	3.7
	E 0.4	0.8	0.4	0.7	3.2	3.2
	F 0.4	0.6	0.4	0.3	3.2	5.4
東防波堤	A 2.2	1.3	1.8	1.0	5.2	5.7
	B 2.7	0.8	2.1	0.5	6.4	4.7
	C 0.8	0.4	0.5	0.5	4.6	5.8

(2) 係留施設の設計津波水位の設定

係留施設の耐津波性能照査は、引き波時を対象とすることから、係留施設前面における津波シミュレーション結果の水位の時刻歴波形データを基に、図-13に示すとおり最低水位となる状況を想定する。しかし、津波シミュレーションはH.W.L.での計算であるため、設計津波水位は「L.W.L.-水位低下」として表-6のとおり設定した。

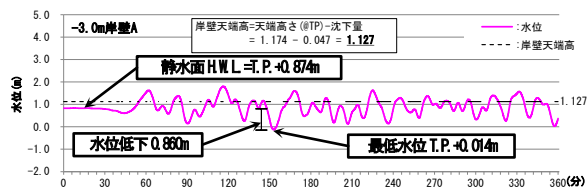


図-13 係留施設前面の水位時刻歴波形

表-6 係留施設の耐津波性能照査に用いる津波水位

地震	施設名	天端高 (@TP) (m)	沈下量 (m)	沈下後 天端高 (@TP) (m)	HWL (@TP) (m)	最高 水位 (m)	最低 水位 (m)	水位 低下 (m)	引き波時 照査用水位 (m)
1896年 明治三陸 地震	-3.0m 岸壁	1.174	0.000	1.174	0.874	1.599	0.014	-0.860	LWL-0.860
	-4.0m 岸壁 (耐震)	1.174	0.000	1.174	0.874	1.487	0.122	-0.752	LWL-0.752
【想定】 三陸沖 北部地震	-3.0m 岸壁	1.174	0.047	1.127	0.874	1.805	-0.128	-1.002	LWL-1.002
	-4.0m 岸壁 (耐震)	1.174	0.047	1.127	0.874	1.775	-0.099	-0.973	LWL-0.973

※最高水位の赤字は岸壁を越流することを示す。
※水位低下は「水位低下=最低水位HWL」で算定。(静水面からの水面低下を意味する)

2.4 耐津波性能照査の結果

A漁港を対象とした耐津波性能照査は、外郭施設については堤体に作用する波圧を基に、滑動・転倒に対する安全率(1.2)の確保状況により評価するとともに、流速に対しては式-1に示すイスバッシュ式により求められる所要重量との比較により安定性を評価した。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad \dots \text{式-1}$$

ここに、 M : 安定質量(t)
 ρ_r : 捨石等の密度(t/m^3)
 U : 捨石等の上面における水の流れの速度(m/s)
 g : 重力加速度(m/s^2)
 y : イスバッシュの定数
 S_r : 捨石等の水に対する比重
 θ : 水路床の軸方向の斜面の勾配($^\circ$)

一方、係留施設については、L1津波の引き波時のみを対象に、滑動・転倒に対する安全率(1.2)の確保状況により評価を行った。

耐津波性能照査の結果をまとめると図-14に示すとおりである。同図のとおり、外郭施設の内、北外防波堤についてはL1津波に対して安定性が確保されるが、L2津波に対しては港内側の基礎工(洗掘防止工)の損壊が懸念される。また、東防波堤においては、L1津波に対しては安定性が確保されるものの、L2津波に対しては押し波時の滑動、ならびに基礎工(港外側:洗掘防止工、港内側:被覆ブロック)の損壊が懸念される結果となった。

また、係留施設については、-4.0m岸壁は滑動・転倒、-3.0m岸壁は滑動に対して安定性が確保されない結果となった。これは、津波が岸壁を越流するため、残留水位が岸壁天端高と同一と仮定する非常に厳しい条件での照査のためと考えられる。

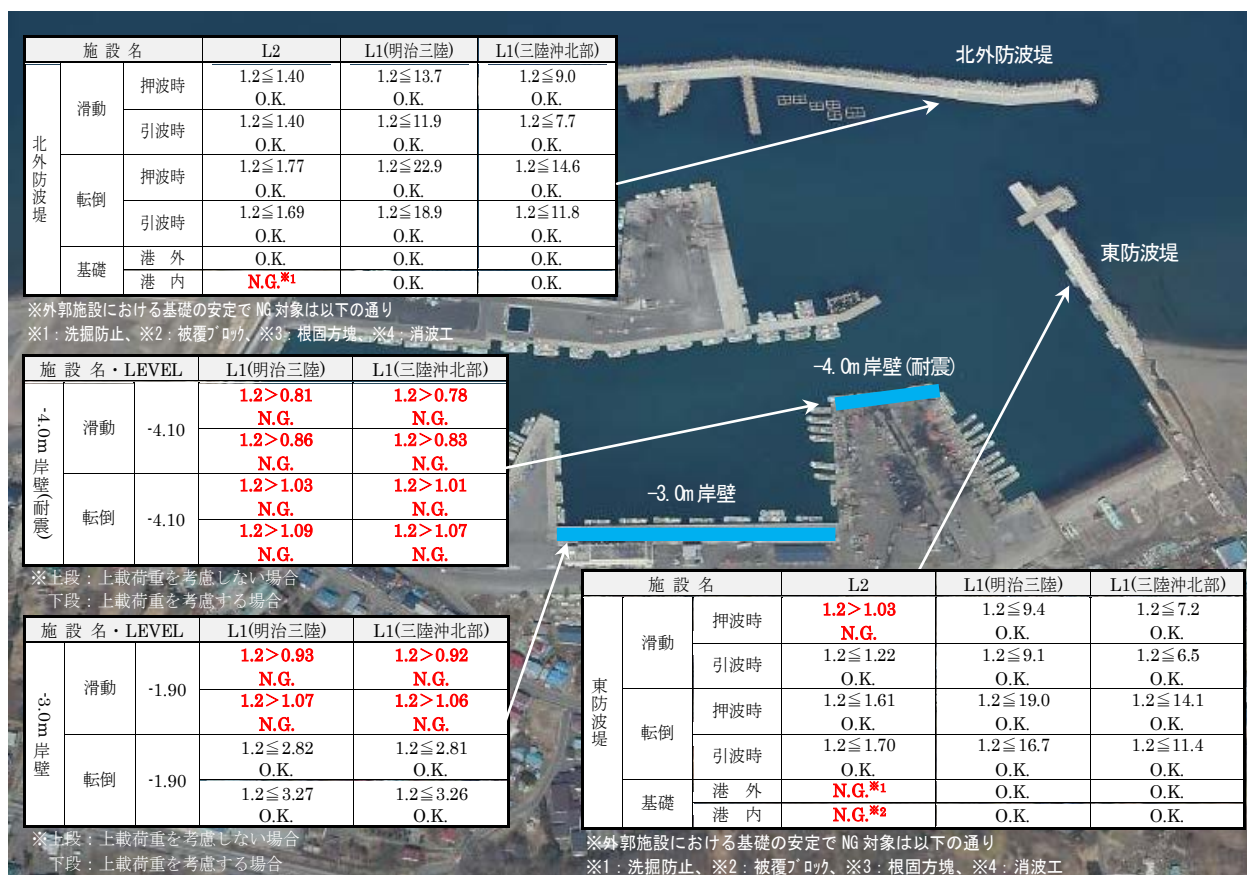


図-14 耐津波性能照査結果の一覧

2.5 耐津波性能照査における課題

外郭施設の耐津波性能照査においては、津波シミュレーション結果の時々刻々の津波水位を基に、越流の有無、波圧の作用方向、波圧の作用式の変化を考慮して安定照査を行った。しかしながら、基礎工の照査に用いる津波流速は、津波シミュレーション結果より得られる最大流速を用いているが、水産庁の基本的な考え方⁵⁾では、越流現象が考慮されず適正な流速とならない場合が多いと報告されている。

このため、粘り強い構造を付与する際の設計にあたっては、越流による打ち込み流速について、水理模型実験、CADMAS-SURF等の数値実験により詳細検討を行う必要があると言える。

一方、係留施設の耐津波性能照査においては、岸壁への越流の有無、水位低下を津波シミュレーション結果より求め、引き波時の安定照査を行った。しかし、越流時の残留水位の設定において岸壁背後の透水性を考慮していないことや、固化改良等の効果を考慮する方法が確立していないことから、今後、照査方法のさらなる高度化が必要である。

3. 粘り強さに関する一考察

(1) 防波堤の「粘り強い構造」

東日本大震災において、倒壊を免れた防波堤は、津波来襲時において、浸水時間遅延による避難時間の確保、津波の防波堤背後への流入量の低減による漁港施設被害の軽減、第2波以降の津波に対する減災等の効果の他、漁港の暫定的な利用再開時における港内の静穏度の確保、台風・高潮等に対する二次被害の防止といった一定の機能を発揮した。一方、倒壊した防波堤は、こうした効果が低いことが確認されている。また、施設の復旧までに長時間を要することから漁港利用に支障を生じ、漁業活動再開の遅れによる地域経済への影響だけでなく全国的な食料供給に多大な影響を及ぼした。

こうした経験を踏まえ、設計参考図書にて、主要な防波堤※⁶⁾にあつては、L1 津波を超える津波に対して、倒壊しにくい「粘り強い構造」について検討し、必要に応じて対策を講じることとしている。

※耐震強化岸壁、耐震強化岸壁に準じる岸壁前面の泊地や航路の安全な利用を確保するために必要な防波堤

(2) 安定限界津波水位の定義と検討手順

本検討結果において、A 漁港の主要な防波堤である東防波堤は、L1 津波に対しては滑動等の安定性は確保されているが、L2 津波に対しては押し波時の滑動において所要の安全率 1.2 を下回り、安定性が確保されていないことが明らかとなった。他の太平洋沿岸の第3種、第4種漁港においても同様に、波浪によって防波堤に作用する水平力は設計津波による波力より大きく、L2 津波

による津波波力よりは小さいことが確認されている。

東防波堤が倒壊すると、漁港施設の被害及び漁業活動再開の遅れによる地域経済の影響が生じる恐れがあることから「粘り強い構造」について、今後、検討する必要がある。しかしながら、「粘り強い構造」を検討するにあたり、設計対象とする津波（L1 津波を超える津波）の設定が課題となった。

ここでは、L1 津波と L2 津波の規模の間に東防波堤が安定する限界の津波水位（以下、安定限界津波水位と表記）が存在すると仮定し、以下のとおり検討を進めた。

安定限界津波水位は、図-15に示すとおり押し波時を想定した場合、港外側(前面)は「L1津波の最高水位」～「L2津波の最高水位」の間に存在し、さらに、港内側(背後)の水位は、実際には時々刻々と変化するものであるが、本検討においては①H.W.L時(津波シミュレーションの静水面)、②L.W.L時、③L1津波の最低水位、④L2津波の最低水位の4条件を仮定することとした。

以上の仮定に基づき、港内側の水位4条件の場合について、港外側の津波水位を「L1津波の最高水位」～「L2津波の最高水位」の間で変化させ、繰り返し計算により安定限界津波水位を算出することを試みた。

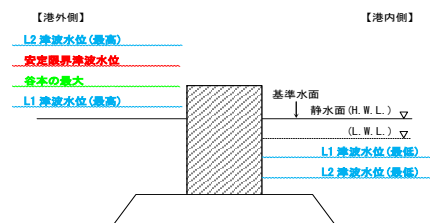


図-15 安定限界の津波水位の概念図

(3) 安定限界津波水位の算定

安定限界津波水位の算定にあたり、まず、図-16に示す津波シミュレーション結果の時刻歴波形を基に、港外側及び港内側の最高水位・最低水位を表-7に示すとおり抽出した。これらの条件により、港内側の水位4条件における押し波時の作用波圧を「水工研式」により求め、滑動安全率を求めると図-17に示すとおりである。同図から、港内側の水位が低いL2津波最低水位時、及びL.W.L時においては港外側の水位TP.+3.8程度で安全率1.2を下回り、天端高がTP.+4.07mであることから越流が生じる前に安定限界となることがわかる。一方、港内側の水位がH.W.L.及びL1津波の最低水位(L.W.L.時よりも水位が高い)においては、越流が生じた後、TP.+4.2m～4.3m程度で安定限界となった。なお、参考として港内側がH.W.L.の場合における谷本式の最大(すなわち、港外側の水位が天端高と同一)における安全率を算定すると1.28となり、安定限界には至らないことがわかる。

以上の結果を基に、安定限界津波水位を整理すると表-8に示すとおりTP.+3.8m～4.3mとなり、L1津波の最高水位とL2津波の最高水位間に安定限界津波水位が存在することが確認された。

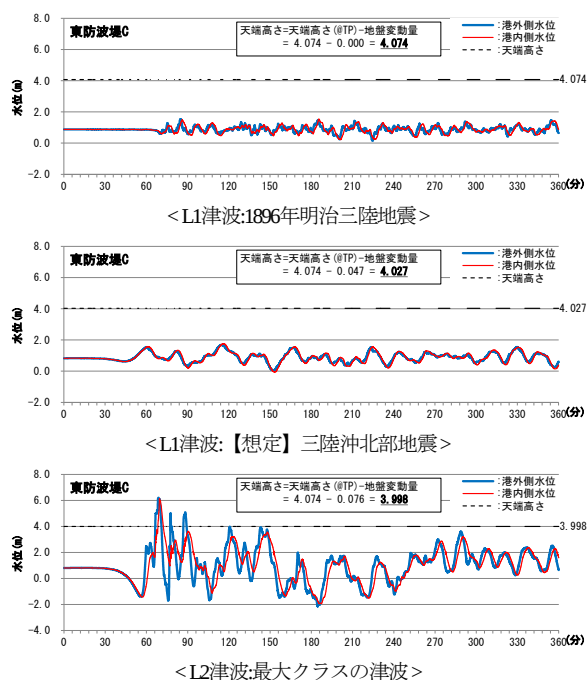


図-16 津波シミュレーション結果(東防波堤C部)

表-7 津波諸元(T.P.基準、東防波堤C部)

対象津波	港外側		港内側		地盤 変動量 (沈下量) (m)
	最高 水位 (m)	最低 水位 (m)	最高 水位 (m)	最低 水位 (m)	
1896年明治三陸地震	2.396	1.029	2.420	1.089	0.000
【想定】三陸沖北部地震	2.558	0.904	2.636	0.817	0.047
最大クラスの津波	7.081	-1.268	7.019	-1.064	0.076

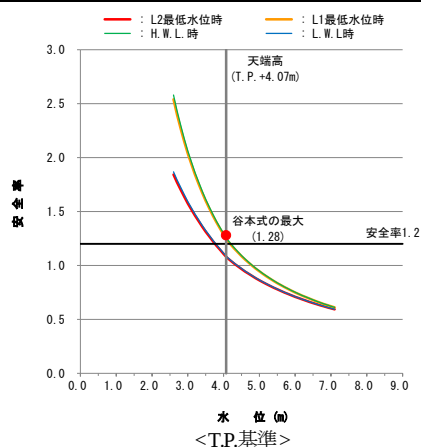


図-17 安定限界の結果(東防波堤C部)

表-8 安定限界津波水位

施設名	堤体背面の水位条件	安定限界津波水位(m)	
		TP.基準	D.L.基準
東防波堤	L1 津波最低水位時	4.2	5.1
	L2 津波最低水位時	3.8	4.7
	H.W.L.時	4.3	5.2
	L.W.L.時	3.8	4.7

このことから、北海道の第3種、第4種漁港における主要な防波堤の耐津波設計の検討にあたっては、防波堤による静穏度の確保や津波を低減する効果を踏まえた上で、安定限界津波水位時の津波波力や越流等に対しても、可能な限り安定が保たれる構造上の工夫を施し、津波に対して倒壊しにくい「粘り強い構造」となるよう検討することが望ましいと考える。

(4) 粘り強い構造（腹付工）の一例と留意点

東日本大震災の被災事例の検証結果から防波堤港内側の基礎マウンドが越流した津波により洗掘され、防波堤本体の崩壊につながった事例が数多く報告されている。

津波波力に対して、直立部が倒壊しにくく、かつ基礎マウンドが洗掘しにくくするために、水産庁の基本的な考え方⁵⁾では、腹付工を「粘り強い構造」の一例として提案している。しかしながら、腹付工の天端は、直立部背後で越流水塊の影響を受け易くなることから、被覆工によって防護する必要があることに注意が必要である。このため、被覆工の算定は、水理模型実験にて所要重量を確認することが望ましいが、被覆工の所要質量の算定に必要な安定数を容易にするために編纂されたマニュアル⁶⁾の適用範囲内であれば利用も可能と思われる。

なお、水理模型実験及びマニュアル⁶⁾に使用する越流水深は上記(3)から安定限界津波水位を用いることを想定し、現在、マニュアル⁶⁾で算定した被覆工の越流水塊に対する安定性を確認する水理模型実験を行っており、その結果を次年度以降に報告する予定である。

4. おわりに

得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 設計参考図書に基づき、北海道第3種・第4種漁港のうち、太平洋沿岸のA漁港をモデル漁港として、津波シミュレーション結果に基づく外郭施設・係留施設の耐津波性能照査を実施した。
- 2) その結果、外郭施設の耐津波性能照査においては、津波水位、波圧の作用方向、作用形態(作用波圧式)は時々刻々変化するため、設計津波水位は港外側の水位の大小のみでは定まらず、時々刻々の作用波圧が最大となる時点の水位条件とすることが有効との結論に至った。
- 3) 「粘り強い構造」を検討する際の対象津波（越流する水位）について、安定限界津波水位を提唱した。また、「粘り強い構造」の一例である腹付工を採用する場合の割石の飛散を防止する被覆工について安定限界津波水位による模型実験を進めており、その結果について次年度以降に報告を予定している。

参考文献

- 1) 水産庁：「平成23年度水産の動向」
- 2) 北海道：「太平洋沿岸における海岸保全施設等の設計に用いる津波の水位について」、平成25年3月
- 3) 北海道：「太平洋沿岸に係る津波浸水予測図作成業務 報告書」、平成24年3月
- 4) 国土交通省：津波浸水想定の設定の手引き Ver.200、平成24年10月
- 5) 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」、平成26年1月23日改正
- 6) 一般社団法人漁港漁場新技術研究会：「津波越流に対する防波堤腹付マウンド被覆ブロックの所要算定マニュアル」、平成26年9月