

今でしょ！那覇港における防波堤の耐津波対策

金城 信之¹・椎原 康友²

^{1,2}沖縄総合事務局 開発建設部 港湾計画課 （〒900-0006 那覇市おもろまち2-2-1）

平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震によって、防波堤等の港湾構造物の多くが被災した。その後、平成25年1月に国土交通省港湾局より「防波堤の耐津波設計ガイドライン（案）¹⁾」が公表された。それを受けて那覇港を対象として検討した耐津波対策を実施する。これまで、津波シミュレーションや防波堤の耐津波設計に関する検討会を実施した中で、当港の第一線防波堤で越流の生じるのが新港第一防波堤であることが判明し今回の対象とした。

キーワード 津波、津波伝搬、防波堤、津波対策

1. はじめに

那覇港新港第1防波堤は、昭和49年度から整備を開始し、昭和58年度まで整備し、改良事業を昭和55年度～平成7年度に実施している。

一方、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震によって、防波堤等の港湾構造物の多くが被災した。原因としては、防波堤に作用した巨大な水平力に加え、防波堤の天端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり基礎マウンドや海底地盤を洗掘して防波堤の安定性を低下させたものと考えられる。上記を踏まえ、平成25年1月に防波堤の耐津波設計ガイドライン（案）が公表された。

また、平成24年度には「沖縄地方の港湾における防波堤の耐津波性能評価検討会」を開催し、防波堤に対する津波外力及び耐津波性能評価に関して技術的指導・助言を得た。

本報告では上記を踏まえ、那覇港新港第一防波堤を対象に、「発生頻度の高い津波（L1津波）」に対する防災対策に関する設計条件（津波条件、沈下量）、防波堤の安定性照査、対策工の検討について報告するものがある。図-1に検討対象施設位置図を示す。

2. 設計条件の設定

(1) 検討対象施設

新港第一防波堤は、那覇港の西側の沖合に位置する防波堤であり、全延長3,380mである。

防波堤の設計は昭和50年に南側ハネ部500mと中央部200mから着手しており、築造後30年以上経過した防波堤である。なお、防波堤は大きく分けて3種類の構造形式がある。

- ・傾斜堤タイプ
- ・ケーソン式混成堤タイプ
- ・消波ブロック被覆ケーソン式混成堤タイプ

第一線の防波堤において傾斜堤タイプが採用されている理由としては、防波堤設置位置がリーフの縁に位置し、干ノ瀬リーフ（I, II区延長300m）及び自謝加瀬リーフ（V, W工区延長680m）の区間は水深が浅いためである。

一方、水深が深い区間に関しては、混成堤タイプとなっている。図-2に設計対象施設の工区割を示す。

また、対象施設の代表的な断面を図-3に示す。



図-1 検討対象施設位置（那覇港）

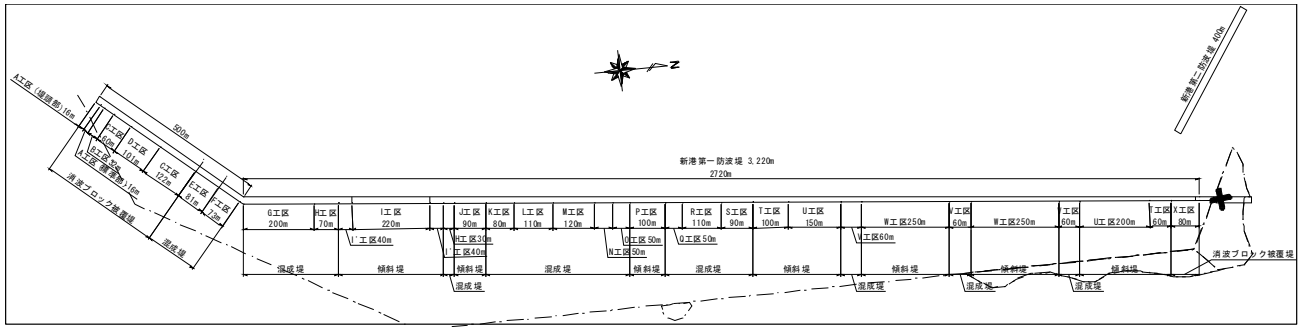


図-2 設計対象施設の工区割

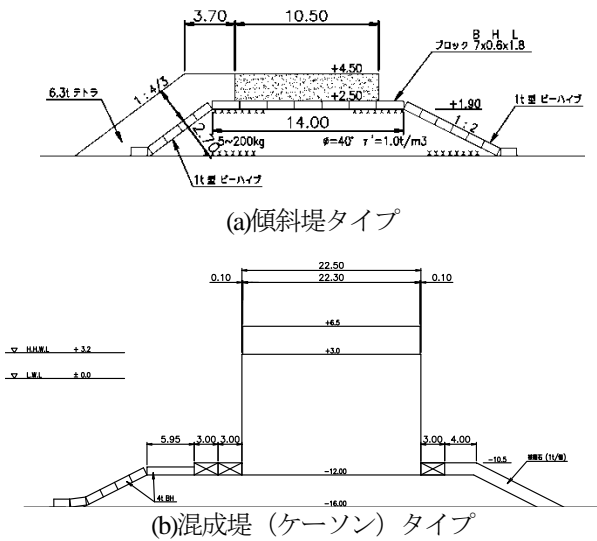


図-3 既設防波堤断面図

(2) 震源及び津波の伝搬計算

那覇港に影響があると想定される震源は4か所であり、那覇港に最も影響のある「発生頻度の高い津波」を発生させる地震の震源は、沖縄トラフ型（B04E・Mw7.8）である（図-4参照）。

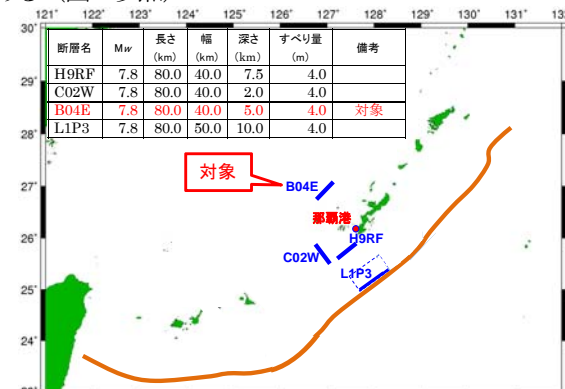


図-4 震源と那覇港の位置関係

津波の伝搬計算の範囲を図-5に示す。震源から検討対象地までの津波の伝搬計算は、（独）港湾空港技術研究所開発の高潮津波シミュレータ（STOC）²⁾³⁾を用いた。STOCによる津波シミュレーションモデルは、静水圧モ

デルと非静水圧モデル（以下、3次元モデル）で構成され、静水圧モデルでは水深方向に次元を持たない平均流が算定され、3次元モデルでは、水深方向に層を設定した計算を行うため、各層の流速が算定される。本検討においては、3次元モデルによる詳細計算を防波堤周辺に適用し、防波堤マウンドの被覆工検討に必要な流速値を算定した。3次元モデルの適用範囲は、図-5に示す5m格子領域とした。

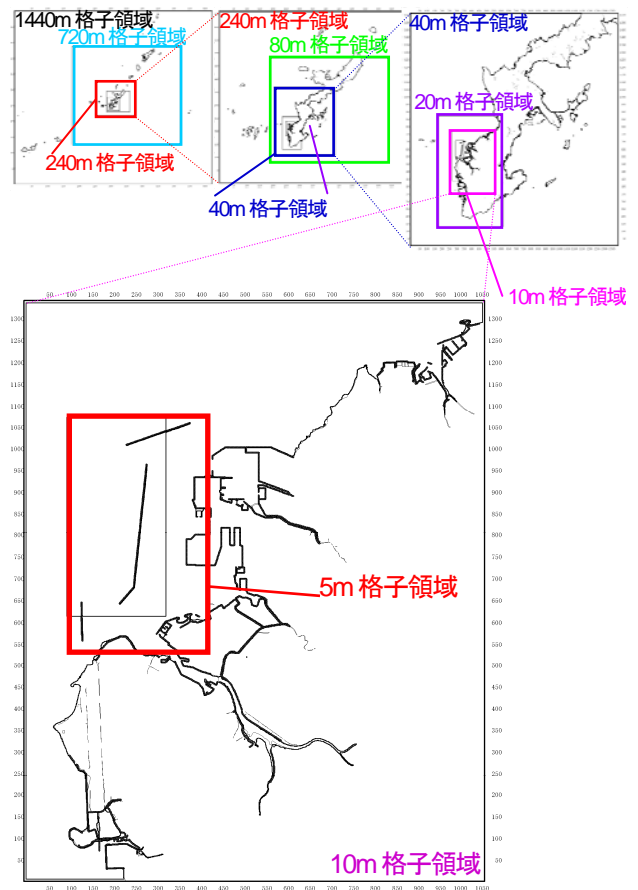


図-5 STOC3次元の領域の構成

(3) 防波堤前面の津波高及び発生流速

図-6は、防波堤前面及び背後の津波水位の分布図を示す。近隣の浦添第一防波堤及び那覇防波堤が越流しないのに比べ、新港第一防波堤は越流区間があることが分か

る。これは、新港第一防波堤が他の防波堤に比べ比較的設計波高が小さいため、現況天端高が低いためである。

なお、検討にあたっては、図-7に示す防波堤の前面水深、地震による防波堤の沈下を考慮した天端高、構造形式、津波高についての整理し、越流状況を踏まえ津波外力の工区区分を4区間とした。港内流速も津波高と同様に、3次元STOCによる計算結果から各工区区分での最大値を図-8のように設定した。

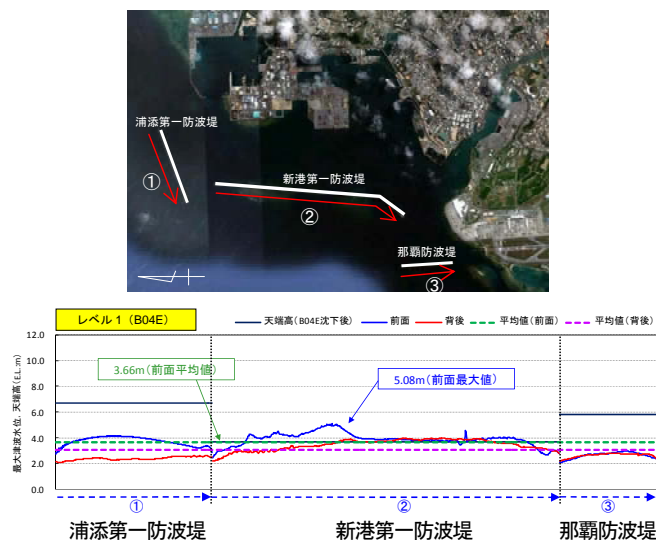


図-6 防波堤前面及び背後の津波水位分布

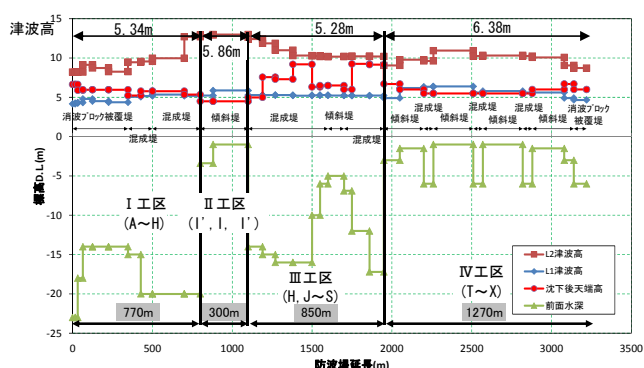


図-7 津波外力の工区区分

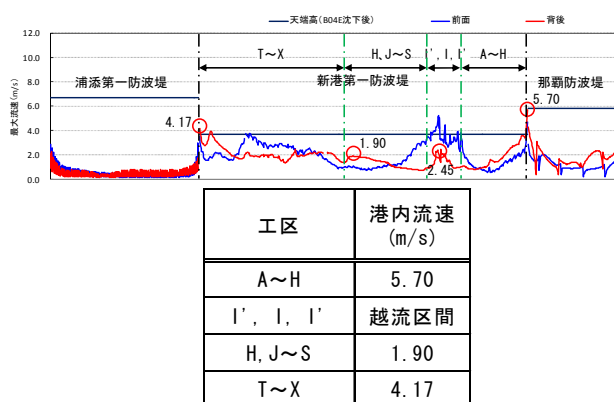


図-8 防波堤の港内側マウンド付近の流速分布

表-1に各工区の越流判定結果を示す。比較的、天端高の低いH~J工区及び、津波高の高い北側のU~X工区で津波が防波堤天端を越流することが分かる。

表-1 越流判定結果

工区	構造形式	沈下前天端高 D.L.(m)	沈下後天端高 D.L.(m)	津波高 D.L.(m)	越流判定
A(堤頭部)	ケーソン	7.50	6.63	5.34	越流せず
A(標準部)	ケーソン	7.50	6.63	5.34	越流せず
B工区	ケーソン	6.50	5.88	5.34	越流せず
C工区	ケーソン	6.50	6.46	5.34	越流せず
D工区	ケーソン	6.50	6.46	5.34	越流せず
C工区1	ケーソン	6.50	6.46	5.34	越流せず
E工区	ケーソン	7.00	6.10	5.34	越流せず
F工区	ケーソン	7.50	6.69	5.34	越流せず
G工区	ケーソン	6.50	5.78	5.34	越流せず
H工区	ケーソン	5.00	4.93	5.34	越流
I'工区	方塊	4.50	4.49	5.86	越流
I工区	場所打ち	4.50	4.49	5.86	越流
J工区	ケーソン	5.00	4.99	5.28	越流
K工区	ケーソン	6.50	5.95	5.28	越流せず
L工区	ケーソン	6.50	5.76	5.28	越流せず
M工区	ケーソン	7.50	6.66	5.28	越流せず
N工区	ケーソン	6.50	6.49	5.28	越流せず
O工区	ケーソン	6.50	6.49	5.28	越流せず
P工区	方塊	6.50	6.49	5.28	越流せず
Q工区	ケーソン	6.00	5.99	5.28	越流せず
R工区	ケーソン	6.00	5.84	5.28	越流せず
S工区	ケーソン	6.00	5.76	5.28	越流せず
T工区	方塊	6.70	6.69	6.38	越流せず
U工区1	場所打ち	6.00	5.99	6.38	越流
V工区1	ケーソン	5.50	5.49	6.38	越流
W工区1	場所打ち	5.50	5.49	6.38	越流
V工区	ケーソン	5.50	5.49	6.38	越流
W工区	場所打ち	5.50	5.49	6.38	越流
V工区	ケーソン	5.50	5.49	6.38	越流
U工区	場所打ち	6.00	5.99	6.38	越流
T工区	方塊	6.00	5.99	6.38	越流
X工区	ケーソン	6.00	5.99	6.38	越流

(4) 越流区間の港内側流速

越流するI, I'工区(傾斜堤構造)を対象に、STOC3次元計算から得られた防波堤越流部の最大水位(越流水深)をもとに、STOCモデルでは再現できない港内側の流速の解析をCADMAS-SURF⁴⁾により実施した。

検討においては、流量Qを数ケース変化させたテスト計算から得られる目標水位Hから得られるQ-Hの相関図をもとに、目標となる防波堤前面水位(防波堤法線の数メッシュ前における水位)を再現する流量Qを設定し、計算を実施した。目標流量の検定計算の概要を図-9に示す。

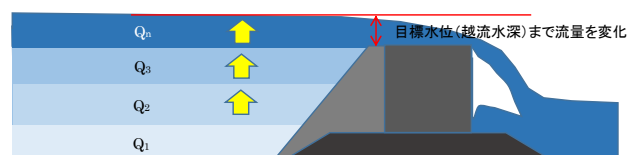


図-9 検定計算の概要

目標の水位を得るための流量は、沖側境界格子の境界条件として設定する流速設定値により変化させる。つまり、検定計算を実施することにより、設定する流速設定

値と津波水位の関係を求め、目標の水位を得るための流速設定値を設定した。解析モデルを図-10に、越流区間の流速と津波水位の関係を図-11に示す。



図-10 CADMAS-SURF 解析モデル

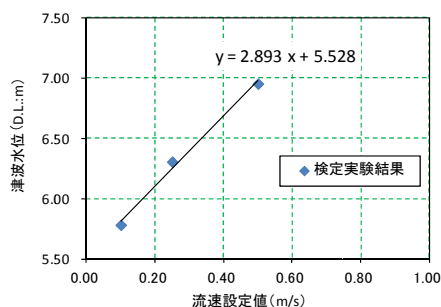


図-11 越流区間の流速と津波水位の関係

防波堤越流部における港内側津波流速の解析結果を図-12に示す。この結果によると、マウンド水平面に比べ、マウンド法面で大きな流速が発生していることが分かる。

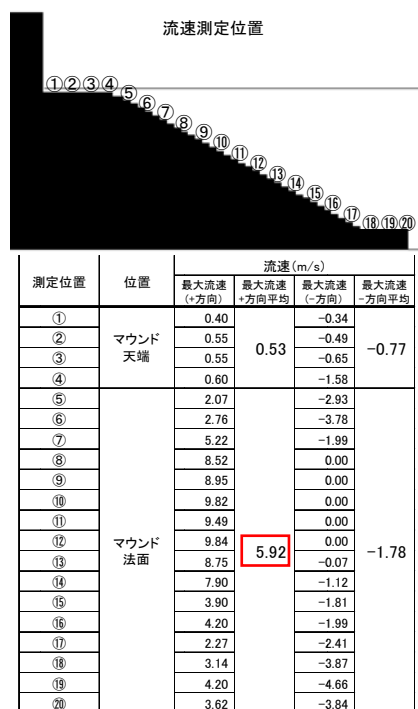
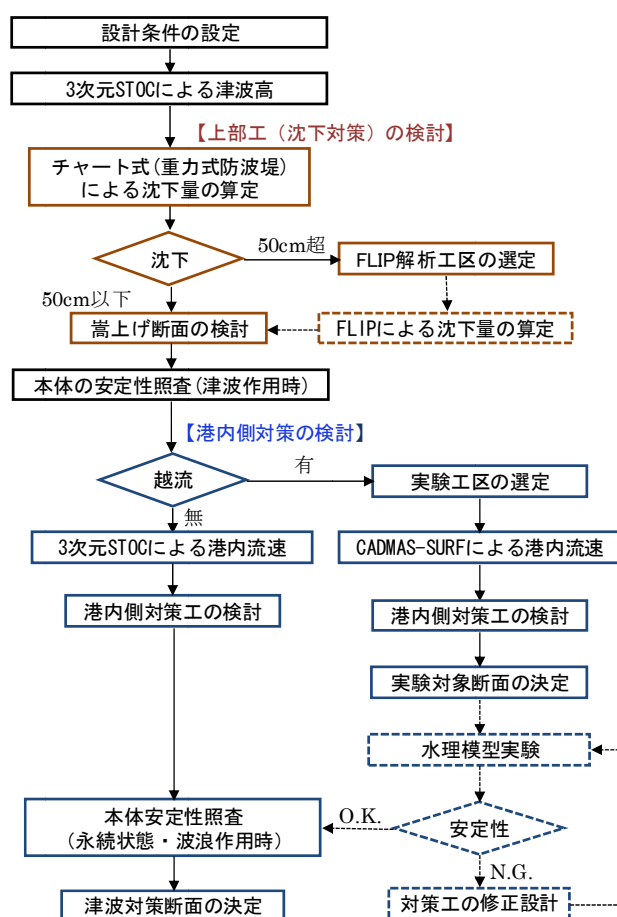


図-12 港内側の津波流速の解析結果

3. 津波に対する防波堤の安定性照査

(1) 照査方法

津波に対する防波堤の安定性照査は、防波堤の耐津波設計ガイドライン（案）に準じて行った。本検討での照査手順を図-13に示す。



※点線部分については本報告の対象としない。

図-13 本検討での防波堤の耐津波安定性照査の手順

表-2 チャート式（重力式防波堤）による防波堤沈下量

工区	本体工	堤体幅 (m)	マウンド 天端高 D.L.(m)	Bor.No.	液状化 対象層厚 (m)	地盤の 等価N値	沈下量 (cm)	対策
A(堤頭部)	ケーソン	21.0	-15.0	Bor-1	18	20.4	87	FLIPで 再照査
A(標準部)	ケーソン	21.0	-15.0	Bor-1	18	20.4	87	
B工区	ケーソン	21.0	-11.0	Bor-1	18	20.4	62	不要
C工区	ケーソン	12.5	-8.0	Bor-2	18	29.0	4	
C工区1	ケーソン	12.5	-8.0	Bor-3	18	29.0	4	FLIPで 再照査
D工区	ケーソン	12.5	-8.0	Bor-2	18	29.0	4	
E工区	ケーソン	21.0	-11.0	Bor-4	20	18.6	90	不要
F工区	ケーソン	19.0	-14.0	Bor-5	22	20.5	81	
G工区	ケーソン	21.0	-14.0	Bor-5	22	20.5	72	FLIPで 再照査
H工区	ケーソン	19.5	-12.0	No.7	18	24.0	7	
I'工区	方塊	9.0	0.0	No.8	22	40.2	1	不要
I工区	方塊	10.5	1.9	No.8	22	40.2	1	
J工区	ケーソン	19.5	-12.0	No.8	22	40.2	1	FLIPで 再照査
K工区	ケーソン	19.5	-12.0	No.12	10	19.2	55	
L工区	ケーソン	22.5	-12.0	No.12	10	19.2	74	不要
M工区	ケーソン	22.5	-12.0	No.12	10	19.2	84	
N工区	ケーソン	17.0	-6.0	No.13	20	44.4	1	50cm 嵩上
O工区	ケーソン	17.0	-4.0	No.13	20	44.4	1	
P工区	方塊	10.0	0.0	No.13	20	44.4	1	不要
Q工区	ケーソン	11.0	-4.0	No.13	20	44.4	1	
R工区	ケーソン	18.5	-9.0	No.14	8	22.3	16	不要
S工区	ケーソン	21.0	-14.0	No.14	8	22.3	24	
T'工区	方塊	12.4	-1.0	No.23	14	41.4	1	不要
U工区1	方塊	11.4	1.9	No.23	14	41.4	1	
V工区1	ケーソン	20.0	-4.5	No.6	4	42.4	1	不要
W工区1	方塊	10.5	1.9	No.6	4	42.4	1	
V工区	ケーソン	20.0	-4.5	No.5	4	32.8	1	不要
W工区	方塊	10.5	1.9	No.4	5	53.0	1	
V工区	ケーソン	20.0	-4.5	No.4	5	53.0	1	不要
U工区	方塊	11.4	1.9	No.4	5	53.0	1	
T工区	方塊	12.4	-1.0	No.3	5	56.7	1	不要
X工区	ケーソン	12.0	-4.0	No.3	5	56.7	1	

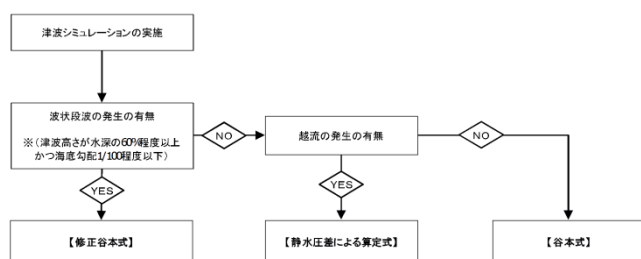
(2) 防波堤の沈下量

防波堤は津波に先行する地震動により沈下する。港湾基準p.914には防波堤の沈下量の算定手法として、FLIPが示されているが、対象とする防波堤のすべての工区でFLIPによる変形照査を実施することは、費用及び時間の面で効率的ではない。そこで、本検討では沈下対策のスクリーニングを行うことを目的に、平成24年3月に神戸技調で開発されたチャート式（重力式防波堤）を用いて防波堤の沈下量を算出した。なお、チャート式（重力式防波堤）は堤体下の土質条件（液状化層厚及び等価N値）、堤体の形状等を反映した沈下量の算出が可能である。防波堤の沈下量算出結果を表-2に示す。

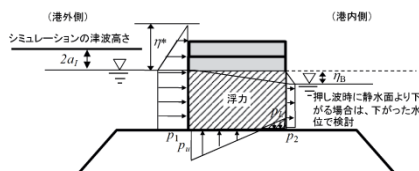
対象地の地盤は等価N値が20～50程度と高く、沈下量は最大でも90cm程度であった。

(3) 本体の安定性照査（津波作用時）

防波堤の安定性照査の防波堤本体工については図-14に示す波力算定フローに従い津波波力を評価し、滑動、転倒、基礎の支持力に対する安定性照査を行った。



【谷本式】



【静水圧差による算定式】

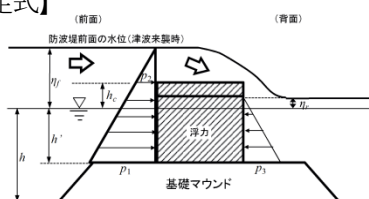


図-14 防波堤に作用する津波波力算定手順及びイメージ

表-3に津波に対する安定性照査結果を示す。安定性照査の結果、全ての断面について「発生頻度の高い津波」に対する安定性が確保できていることを確認した。

(4) 港内側被覆工の安定性照査

港内側被覆工の安定性照査は図-15に示す手順に従って行った。その結果を表-4に示す。

表-3 津波に対する防波堤の安定性照査結果

工区	津波波力算定式	滑動耐力作用比			転倒耐力作用比			地盤支持力 (Bishop法)		
A堤頭	谷本式-②	2.65	>	1.0 O.K.	5.20	>	1.0 O.K.	2.00	>	1.0 O.K.
A標準	谷本式-②	2.65	>	1.0 O.K.	5.20	>	1.0 O.K.	2.00	>	1.0 O.K.
B	谷本式-②	2.97	>	1.0 O.K.	7.54	>	1.0 O.K.	2.38	>	1.0 O.K.
C	谷本式-②	2.02	>	1.0 O.K.	3.40	>	1.0 O.K.	2.27	>	1.0 O.K.
D	谷本式-②	2.02	>	1.0 O.K.	3.40	>	1.0 O.K.	2.27	>	1.0 O.K.
E	谷本式-②	3.02	>	1.0 O.K.	7.51	>	1.0 O.K.	3.35	>	1.0 O.K.
F	谷本式-②	2.73	>	1.0 O.K.	5.53	>	1.0 O.K.	2.41	>	1.0 O.K.
G	谷本式-②	2.99	>	1.0 O.K.	6.58	>	1.0 O.K.	2.17	>	1.0 O.K.
H	静水圧式	2.03	>	1.0 O.K.	4.66	>	1.0 O.K.	2.35	>	1.0 O.K.
I'	静水圧式	1.36	>	1.0 O.K.	5.66	>	1.0 O.K.	2.98	>	1.0 O.K.
I	静水圧式	2.73	>	1.0 O.K.	26.13	>	1.0 O.K.	5.04	>	1.0 O.K.
J	静水圧式	2.07	>	1.0 O.K.	4.77	>	1.0 O.K.	2.38	>	1.0 O.K.
K	谷本式-②	2.79	>	1.0 O.K.	6.29	>	1.0 O.K.	3.19	>	1.0 O.K.
L	谷本式-②	3.11	>	1.0 O.K.	6.90	>	1.0 O.K.	2.46	>	1.0 O.K.
M	谷本式-②	3.36	>	1.0 O.K.	7.38	>	1.0 O.K.	2.33	>	1.0 O.K.
N	谷本式-②	2.88	>	1.0 O.K.	7.68	>	1.0 O.K.	2.39	>	1.0 O.K.
O	谷本式-②	3.36	>	1.0 O.K.	11.39	>	1.0 O.K.	3.17	>	1.0 O.K.
P	谷本式-②	3.21	>	1.0 O.K.	11.05	>	1.0 O.K.	2.42	>	1.0 O.K.
Q	谷本式-②	2.02	>	1.0 O.K.	4.46	>	1.0 O.K.	1.97	>	1.0 O.K.
R	谷本式-②	3.13	>	1.0 O.K.	7.71	>	1.0 O.K.	2.48	>	1.0 O.K.
S	谷本式-②	3.18	>	1.0 O.K.	7.30	>	1.0 O.K.	2.71	>	1.0 O.K.
T	静水圧式	1.97	>	1.0 O.K.	7.98	>	1.0 O.K.	2.63	>	1.0 O.K.
T'	谷本式-②	2.40	>	1.0 O.K.	7.54	>	1.0 O.K.	2.36	>	1.0 O.K.
U	静水圧式	3.30	>	1.0 O.K.	17.79	>	1.0 O.K.	4.35	>	1.0 O.K.
V	静水圧式	1.94	>	1.0 O.K.	8.07	>	1.0 O.K.	3.40	>	1.0 O.K.
W	静水圧式	3.09	>	1.0 O.K.	16.97	>	1.0 O.K.	1.85	>	1.0 O.K.
X	静水圧式	1.46	>	1.0 O.K.	3.77	>	1.0 O.K.	1.93	>	1.0 O.K.

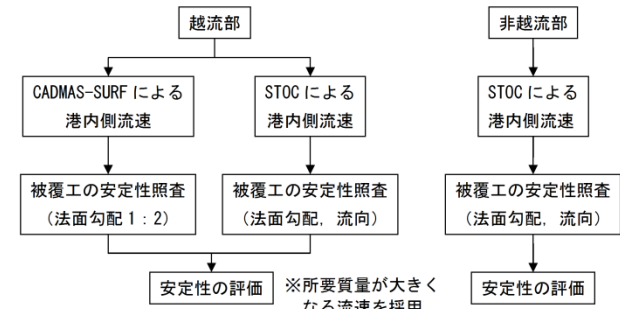


図-15 港内側被覆工の安定性照査手順

被覆ブロック（被覆石）の安定質量は、イスバッシュの式（港湾基準p.561）を適用して安定性照査を行った。混成堤工区においては、津波外力工区ⅠとⅣで既設被覆材が安定しない工区があることを確認した。

傾斜堤工区においては、越流工区で既設被覆材が安定しない結果となった。特にⅠ、Ⅰ'工区は既設被覆ブロック1tに対して、所要重量が25.8tとなった。

表-4 港内側被覆工の安定性照査結果

工区名	既設被覆工	U_d (m/s)	ρ_r (t/m ³)	γ_d	S_r	θ	W(t)	判定
A(堤頭部)	ビーハイブ8t	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 8.0 O.K.
A(標準部)	ビーハイブ4t	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 4.0 O.K.
B	被覆石1t/個	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
C	ビーハイブ2t	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
D	ビーハイブ2t	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
E	被覆石1t/個	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
F	被覆石1t/個	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
G	被覆石1t/個	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
H	被覆石1t/個	5.70	2.3	1.08	2.23	11.6	2.4	< 3.0 (ブロック3t型)
I'	ビーハイブ1t	5.92	2.3	1.08	2.23	2.0	25.8	< 30.0 (ブロック30t型)
I	ビーハイブ1t	5.92	2.3	1.08	2.23	2.0	25.8	< 30.0 (ブロック30t型)
J	被覆石1t/個	2.45	2.7	0.86	2.57	2.0	0.3	< 1.0 O.K.
K	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
L	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
M	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
N	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
O	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
P	ビーハイブ2t	1.90	2.3	1.08	2.23	15.8	0.0	< 2.0 O.K.
Q	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
R	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
S	被覆石1t/個	1.90	2.7	0.86	2.57	15.8	0.0	< 1.0 O.K.
T'	ビーハイブ2t	4.17	2.3	1.08	2.23	6.3	0.5	< 2.0 O.K.
V	ビーハイブ1t	4.17	2.3	1.08	2.23	15.8	0.3	< 1.0 O.K.
X	被覆石1t/個	4.17	2.7	0.86	2.57	6.3	1.1	> 1.0 N.G.
			2.3	1.08	2.23	6.3	0.0	< 1.0 (ブロック1t型)

4. 対策工の検討

(1) 嵩上げ対策断面の検討

地震による防波堤の沈下に対しては、上部工を嵩上げすることとした。なお、嵩上げは沈下量に応じて以下の方針で行うこととした。

- 沈下量 10cm 未満；構造上影響がないものと判断し対策を行わない。
- 沈下量 10cm 以上 50cm 以下；一律 50cm（無筋コンクリートの最低厚）の嵩上を行う。
- 沈下量 50cm 以上；2次元地震応答解析（FLIP）で沈下量を再照査する。

地震による沈下に対する対策断面を図-16に示す。なお、嵩上げ部の幅は、設計波に対する滑動安定必要幅を確保するものとした。

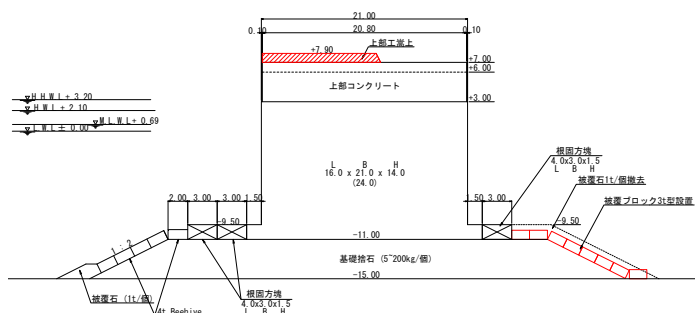


図-16 地震による沈下に対する対策断面

(2) 港内側被覆工対策断面の検討

既設被覆材の安定性照査の結果、不安定となった工区は津波による沿い波と越流による流速に対する所要重量を満たすブロックに置き換えて改良することとした。

被覆工の規格決定にあたっては、所要質量の直近上位のトン型に加え2ランク上までの規格との経済比較を行い、経済的なブロックを採用した。傾斜堤工区における被覆工の経済比較結果を表-5に示す。比較の結果、直近上位の規格である30t型が経済的であった。対策断面を図-17に示す。

表-5 傾斜堤工区 港内側被覆工経済比較結果

工 区	30t型	35t型	40t型
I'	1.00	1.07	1.16
I	1.00	1.06	1.14

※30t 型の概算工費を 1.00 とした場合の比率

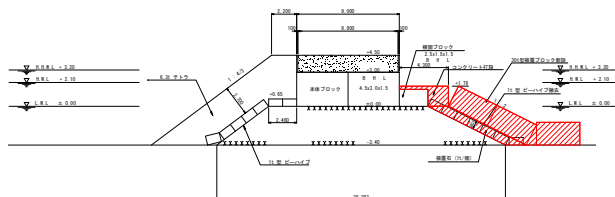


図-17 傾斜堤区間の港内側対策（模型実験）断面

なお、傾斜堤越流区間（I, I'工区）については、越流区間のうち越流水深が最大であるため、今後水理模型実験で港内側流速及び被覆材の所要質量の妥当性を確認することとし、その結果を他の越流区間における対策の参考とすることとした。

混成堤工区については、越流区間においても港内側被覆工の設置水深が深く、越流による被覆材への影響が小さいとして、非越流区間とも港内沿い波の対策のみとした。対策工の決定にあたっては、表-5と同様に経済比較を経て決定した。

5. まとめ

本検討の結論と今後の課題を以下に示す。

- ① 那覇港新港第一防波堤において、「発生頻度の高い津波」を対象に、STOC3次元により津波外力を設定した。津波外力は、防波堤の天端高、構造形式を整理したうえで、防波堤を4工区に分けそれぞれの区間の設計津波外力を最大値で設定した。
- ② 傾斜堤工区については越流区間を対象にCADMAS-SURFによる港内流速の評価を行った。港内側流速はマウンド法面で速く、5.9m/sとなった。この流速に対する被覆材の所要質量は30t/個であり、経済比較を経て決定した。
- ③ 混成堤工区については、越流区間においても港内側被覆工の設置水深が深く越流による被覆材への影響が小さいとして、非越流区間とも港内沿い波の対策のみとした。対策工の選定にあたっては、経済比較を経て決定した。
- ④ 津波に先行する地震による防波堤の沈下量をチャート式により算出したところ、50cmを超える区間があった。このような区間に対しては、今後FLIPによる地震応答解析を実施することにより、より現実的な嵩上げ断面を検討する。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局(2013)：防波堤の耐津波設計ガイドライン(案)，35p。
- 2) 富田孝史・柿沼太郎(2005)：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用，港湾空港技術研究所報告，第44巻，第2号，pp.83-98。
- 3) 富田孝史ら(2008)：臨海部における津波解析への3次元非静水圧流動モデルの適用，海岸工学論文集，第55巻，pp.231-235。
- 4) (財)沿岸技術研究センター(2001)：数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリーNo.12，457p。