

名瀬港防波堤（沖）の 災害対策の設計について

金城 和希¹・甲斐 信治¹・鬼童 孝¹・石橋 悟朗¹・安武 輝征¹

¹九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室
(〒750-0025 山口県下関市竹崎町4-6-1 下関地方合同庁舎2階)。

名瀬港立神地区防波堤（沖）は、2018年の台風24号により被災し、一部のケーソンに滑動や上部工の損傷が見られた。これを受けて一般財団法人が開発したカムインズを用いて堤前波を推算し、被災の原因究明を行った。その後、対策断面の設計としてケーソンが滑動して基礎マウンド外にあるもの、滑動しているがマウンド内にあるもの、上部工の損傷のみのものに区分して、それぞれ腹付工やスリット部間詰め施工の検討を行い、復旧断面の提案を行った。

キーワード 名瀬港、災害復旧、防波堤、2018年台風24号、カムインズ

1. はじめに

(1) 台風24号の経路及び規模について

2018年、非常に強い台風24号は、マーシャル諸島付近で発生後、西北西に進みながら発達し、9月29日午前9時頃より北東へ進路を変え、沖縄本島や奄美地方を暴風域に巻き込み、そのまま北東方向へ進みながら和歌山県に上陸し、日本列島の広範囲を縦断して、東北地方から太平洋へ抜けた。台風24号の経路図を図-1に示す。

奄美地方北部は、28日頃から波が強まり午後6時には強風域、翌29日午後14時に暴風域に入り、風は30日の未明、波は29日の夜にピークに達し、30日の早朝までうねりの非常に強い状態が続いた。

名瀬港測候所では、30日0時26分に最大風速18.2m/s（南南東）、同日0時17分に最大瞬間風速40.0m/s（南東）を記録した。海上保安部の名瀬港検潮所では、29日21時35分に最大潮位+247cmを記録し、平均満潮位+200cmを大きく超える値であった。

【台風経路図】

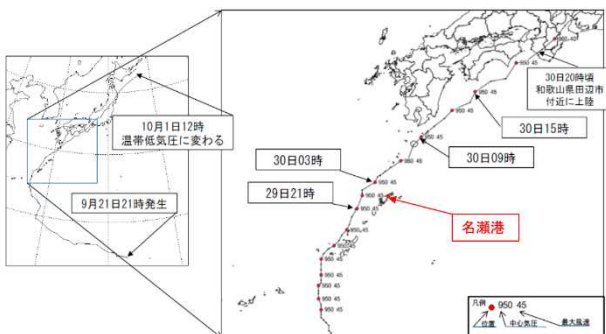


図-1 台風24号の進路

(2) 名瀬港立神地区防波堤（沖）について

名瀬港は奄美大島にとって生活物資を輸送する重要な役割を担っており、重要度が非常に高い港である。立神地区の防波堤（沖）（以下防波堤（沖））は名瀬港における港内静穏度確保及び航行船舶の安全性向上のために整備していたところ、2018年の台風24号により一部が被災した。

2. 被災施設の状況

(1) 被災施設の概況

台風24号により被災した防波堤（沖）の写真を図-2に示す。東側延伸部のケーソンNo.1～3、及び1工区のケーソンNo.4～8、4工区のケーソンNo.23～25にて滑動及びケーソン、上部工の損傷が確認された。ケーソンNo.2、No.3が大きく滑動し、特にケーソンNo.3は完全に水没している状況であった。



図-2 名瀬港防波堤（沖）の2018年被災状況写真

(2) ケーソンNo.1～3（東側延伸部）及びケーソンNo.4～8（1工区）の被災状況

東側延伸部では、ケーソンNo.1は上部工に損傷が生じてはいたものの、滑動は確認できなかった。ケーソンNo.2は港内側に約19m滑動し、基礎マウンドが崩壊していた。ケーソンNo.3に至っては港内側に約37m滑動し、完全に水没していた。ケーソンNo.3の被災時の断面図を図-3に示す。

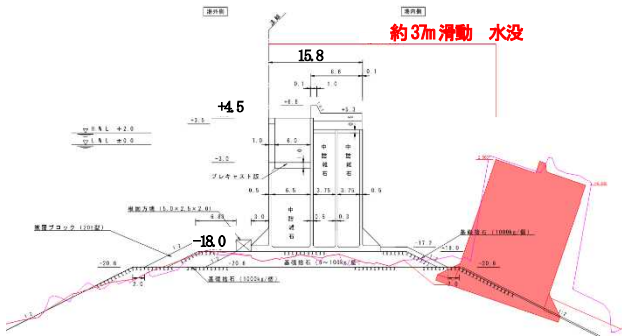


図-3 被災時断面図（ケーソンNo.3）

1工区においては、ケーソンNo.4～7で0.5m～8.8mの滑動が生じており、特にケーソンNo.5では本体工に損傷、鉄筋の露出が見られた。ケーソンNo.5の被災時の写真を図-4に断面を図-5に示す。ケーソンNo.4, No.8では、上部工に損傷が見られた。



図-4 ケーソンNo.5の鉄筋露出写真

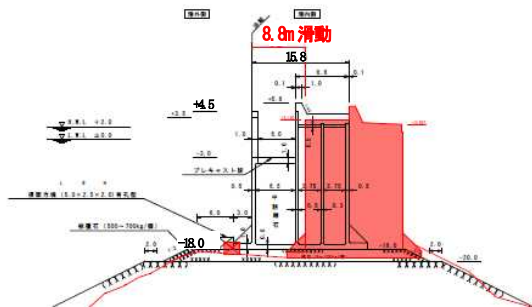


図-5 被災時断面図（ケーソンNo.5）

(3) ケーソンNo.23～25（4工区）の被災状況

4工区のケーソンNo.23では、上部工の損傷は見られたものの滑動は見られなかった。ケーソンNo.24, 及びNo.25は上部工の損傷は見られなかったものの、それぞれ港内側に1.01m, 2.06mの滑動が見られた。ケーソン

No.25の被災時の断面図を図-6に示す。

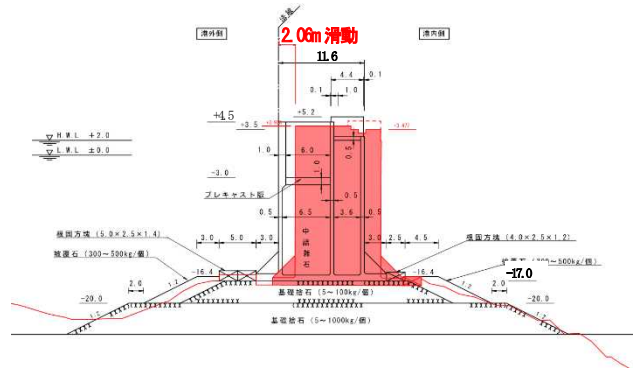


図-6 被災時断面図（ケーソンNo.25）

3. カムインズによる被災時波浪の推算

(1) カムインズとは

名瀬港には波高計が設置されているが、2018年台風24号襲来時には欠測となっていたため、波浪推算を行なった。被災時の波浪推算には、(財)沿岸技術センターの開発した沿岸気象海象情報配信システム（以下、カムインズ）を使用した。カムインズは港湾局の波浪観測データである全国港湾海洋波浪情報網（以下、ナウファス）の波浪データを用いて波浪推算を行うことができるシステムである。

(2) カムインズによる波浪推算

a) 過去の台風を用いた補正値の算出

カムインズによる推算値が、実際の沖波とよく整合しているかを確認するため、過去の台風の波高計（ナウファス）の観測記録とカムインズの推算値を用いてキャリブレーション（補正）を行った。

キャリブレーションには、2018年台風24号と経路が近く、周辺に観測記録の存在する2017年台風5号を使用した。2017年台風5号における有義波の波高 H_o と周期 T_o の観測値を推算値で除し、補正値（観測値）/（推算値）を算出したところ、波高 H_o は1.0521、周期 T_o は1.0511の結果となった（図-7）。それぞれの補正値が1.00に近い、すなわち推算値が観測値に近い値であることから、精度よく波浪を推算できていることが確認できる。

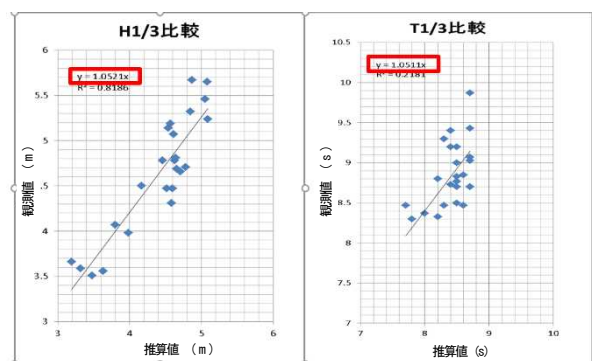


図-7 推算値と観測値の比

波向きを補正については、ばらつきが大きく、統計的な比較に適していないため、安全側として、最大値である45°を補正值とした。波向の差を表-1に示す。

表-1 観測値と推算値の波向差

2017年		観測値			推算値			波向差
日時	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	波向	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	波向		
8月5日	9:00	5.46	8.80	319	5.05	8.20	311.4	7.6
	10:00	5.32	8.77	323	4.85	8.50	310.2	12.8
	11:00	5.65	9.00	331	5.08	8.50	308.9	22.1
	12:00	5.24	8.83	331	5.09	8.50	306.8	24.2
	13:00	5.67	8.85	311	4.87	8.60	307.1	3.9
	14:00	4.71	8.70	344	4.78	8.70	308.6	35.4
	15:00	4.66	8.47	282	4.71	8.60	308.0	-26.0
	16:00	4.78	8.70	欠測	4.63	8.50	303.9	-
	17:00	4.31	8.73	344	4.58	8.40	298.7	45.3
	18:00	4.47	9.30	欠測	4.60	8.30	294.9	-
	19:00	5.07	9.20	282	4.61	8.40	296.1	-14.1
	20:00	4.47	9.20	282	4.52	8.50	299.5	-17.5
	21:00	4.81	9.40	290	4.64	8.40	301.1	-11.1

b) 推算値の補正

推算に使用する波浪は、名瀬港沖合の9月30日8時のカムインズのデータを使用した。使用した沖波の推算値を表-2に、沖波地点を図-8に示す。

表-2 カムインズによる推算値

擾乱名	沖波		
	波高 H ₀	周期 T ₀	波向
T 1 8 2 4	11.97m	12.0s	N-297°

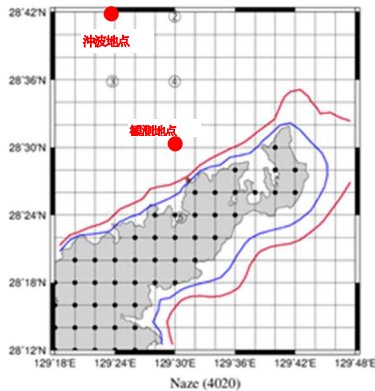


図-8 カムインズ予測データ (名瀬港沖波地点)

2017年台風5号の観測値と推算値から算出した補正值(波高:1.0521倍、周期:1.0511倍)を2018年台風24号の推算値に乗じた。波向の補正最大値45°については防波堤に直交となるように沖波の向きを補正した。補正後の沖波の諸元を表-3に示す。

表-3 補正後の沖波諸元

	波高 H ₀	周期 T ₀	波向
補正後沖波	12.59m	12.6s	N-342°

4. 設計波の算出

(1) 堤前波高・波向の算出

補正後の沖波から、被災時の堤前波を算出するため、エネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行った。求めた波向図を図-9に示す。図中の赤枠内の黒字は補正後の沖波の入射角N-342°を基準に何度傾いているか、赤字は防波堤の各工区が真北から何度傾いているかを示す。これらの数値から防波堤直交方向に対する堤前波の角度を計算したものが表-4である。算出した堤前波の角度は防波堤直交方向に±15°の補正が必要であるので、補正值と補正後の堤前波の角度も記載している。

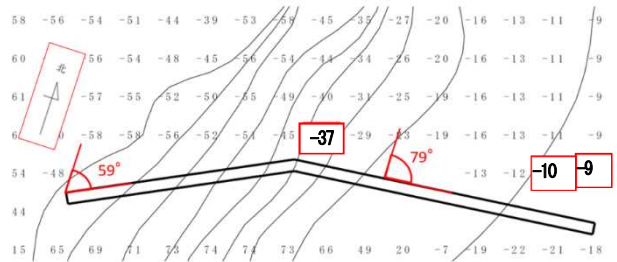


図-9 エネルギー平衡方程式による波向図

表-4 波向の波浪変形計算

入射波の角度	工区名	波浪変形結果	防波堤の真北からの角度	堤前波の角度(未補正)	補正值	堤前波の角度(補正後)
N-342°	東側延伸部	-9°	79°	2°	±15°	0°
	1工区	-10°	79°	3°	±15°	0°
	4工区	-37°	59°	50°	±15°	35°

波浪変形計算によって求められた波高図が図-10である。東側延伸部、1工区、4工区の堤前波(有義波高H_{1/3})はそれぞれ7.75m、7.64m、5.68mとなった。

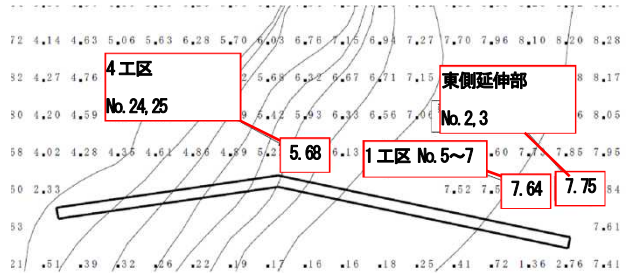


図-10 エネルギー平衡方程式による波高図

(2) 最大波高の設定

港湾基準では、最高波高H_{max}は有義波高H_{1/3}の1.6~2.0倍と設定してもよいと記載されており、本施設の当初設計では最高波高H_{max}は有義波高H_{1/3}の1.8倍に設定している。今回の被災において、当初設計の想定以上の波が襲来したと考えられることから、H_{max}の値を1.8H_{1/3}と2.0H_{1/3}とで比較を行った。その結果H_{max}=1.8H_{1/3}の場合は

表-5 各工区の堤前波と安定計算結果

Hmax	工区名		ケーソンNo.	堤前波				安全率		底面反力 (kN/m ²)
				H _{1/3} (m)	H _{max} (m)	T1/3(m)	β(°)	滑動	転倒	
1.8H _{1/3}	東側延伸部	標準函	No.2, No.3	7.75	13.95	12.6	0	1.13	1.68	650.3
		旧堤頭函	No.4	7.64	13.75	〃	〃	1.03	1.48	750.0
	1工区	標準函	No.5~7	〃	〃	〃	〃	1.08	1.64	576.2
		標準函	No.24, No.25	5.68	10.22	〃	35	1.11	1.45	724.6
2.0H _{1/3}	東側延伸部	標準函	No.2, No.3	7.75	15.5	12.6	0	0.98	1.45	804.8
		旧堤頭函	No.4	7.64	15.28	〃	〃	0.88	1.26	1145.8
	1工区	標準函	No.5~7	〃	〃	〃	〃	0.94	1.42	746.8
		標準函	No.24, No.25	5.68	11.36	〃	35	0.96	1.27	949.4

安全率が1を超え、安定する一方で、Hmax=2.0H_{1/3}の場合は安全率が1.0未満で、ケーソンの滑動が生じることから、2.0H_{1/3}が状況を反映していると言える。各工区の安定計算結果を表-5に示す。

4. 災害原因について

ケーソンNo.2~7及びケーソンNo.24, No.25が滑動していることから、災害原因は、設計波を大きく超える波が襲来し、構造物に大きな波力が作用したことが考えられる。また、ケーソンNo.2が滑動したことで、ケーソンNo.1に接触し、上部工が損傷した。同様に、ケーソンNo.23とNo.24の接触でケーソンNo.23の上部工が損傷している。ケーソンNo.8についても、ケーソンNo.7が滑動したことで、上部工が損傷した。

5. 復旧断面の検討

(1) 復旧方針について

復旧の考え方として、①滑動量・傾斜量が著しくマウンド外まで移動したケーソン、②滑動量、傾斜量が比較的小さいケーソン、③上部工のみ損傷したケーソンの3つに分類した。①については、ケーソンNo.2, No.3が該当し、原型復旧を行う。ケーソンの滑動量が大きく、被災ケーソンの再利用は難しいのでケーソンの新規製作・据付を行う。災害直後の写真を図-11に示す。なお、滑動したケーソンの中詰材は再利用した。③上部工のみ損傷したケーソンであるNo.1, No.8については、損傷箇所を撤去後に復旧した。②は残りのケーソンであり、No.4には腹付工を施し、残りのNo.5~7, No.24, No.25は腹付工に加えてスリット間詰めを行う。

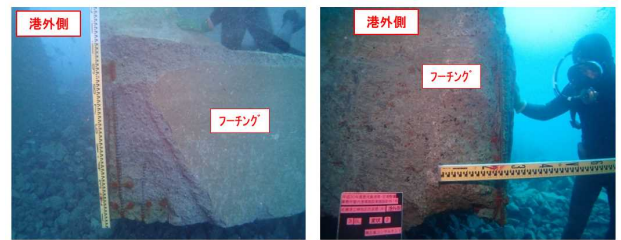


図-11 ケーソンNo. 3のフーチング角に損傷・鉄筋露出

(2) 東側延伸部 (No.2, No.3) の延長の設定

東側延伸部は当初はケーソンNo.4側から順次施工されており、施工延長は30.3mであった。しかし、ケーソンNo.4が東側に移動しており、ケーソンNo.1とNo.4の間隔が短くなっていたため、ケーソンNo.2とNo.3の延長を図-12のように再設定した。

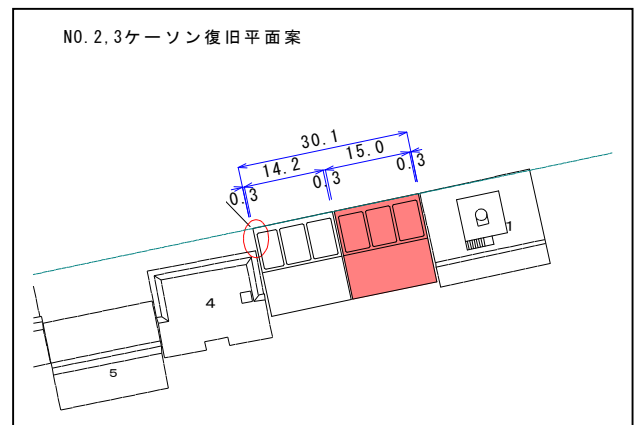


図-12 東側延伸部 (No. 2とNo. 3) の延長設定

(3) 復旧断面に使用する波高

原型復旧で使用する堤前波は、通常、当初設計時と同じ波を使用する。しかし、1工区と4工区については、ケーソンが滑動により法線のズレが生じているため、波高増大を考慮した波を設定しなければならない。

一般に、法線が不連続な場合には、波の反射及び回折効果などにより法線に沿う波高の分布は一様ではなくなる。法線形の影響を考慮した波力の算定方法については十分な成果を得るに至ってはいないが、波力の増大は法線形による波高の増大とかなり対応することから、法線形の影響を考慮した波力は、法線形の影響を考慮しない時の波高に波高増大率を乗じた値となる。この波高増大率 K_c は、壁面での波高 H_s と、入射波高 H_T に反射率 K_R による増大を考慮した値の比、すなわち以下の式(1a)で表される。

$$K_C = H_S / \{H_T(1+K_R)\} \quad (1a)$$

1工区（ケーソンNo.4~7）は、被災により法線にズレが約8.8m生じていた。法線のズレは不連続ではあるが、最大のズレ位置を頂点とした隅角部を考えると、図-13のように隅角部の角度は162°となる。

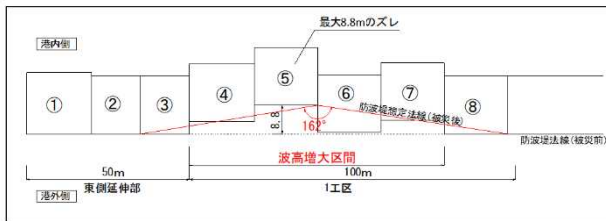


図-13 1工区の法線のズレと角度

図-14は隅角部の角度が165°に近い構造物に不規則波を入射した時の隅角部壁面での堤前波と入射波の波高比 K_d の分布図である。xは隅角点からの距離を表し、隅角点ではx=0であるため、壁面での波高比 K_d は2.2となる。よって1工区の壁面での最大波高 H_s は、設計時の最大波高である11.1mに2.2を乗じた24.42mとなる。

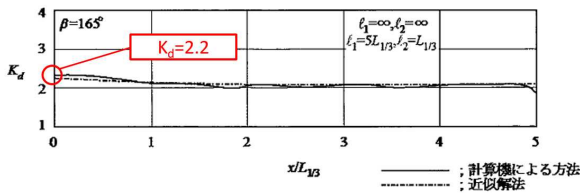


図-14 隅角部での堤前波と入射波の波高比分布図

この値を (1a) に当てはめることで、波高増大率 $K_c = 24.42 / \{11.1(1+0.85)\} = 1.2$ となる。反射率 K_R は港湾基準から直立構造の平均値を使用した。したがって、設計波の最大波高は11.1mに1.2を乗じた13.3mとなる。有義波も同様に、設計時の6.2mに波高増大率1.2を乗じ、7.4とした。

4工区では、隅角部の角度は172°であった。1工区と同様に、壁面での波高比 K_d は2.2であり、波高増大率 K_c は1.2となるため、設計時の有義波5.2mと最高波高9.4mにそれぞれ1.2を乗じて被災後の有義波と最高波高はそれぞれ6.2mと11.3mとなった。

以上のことから災害時と今回設計の設計波を表-6に示す。この設計波に対して安定する堤体を以て災害復旧の断面とした。

表-6 台風24号襲来時設計波と復旧設計時設計波

項	目	堤前波			
		H1/3	Hmax	T1/3	β
台風襲来時	東側延伸部	7.75m	15.5m	12.6s	0°
	1工区	7.64m	15.28m	〃	〃
	4工区	5.68m	11.36m	〃	35°
復旧時	東側延伸部	7.6m	13.7m	12.1s	0°
	1工区	7.4m	13.3m	13.6s	〃
	4工区	6.2m	11.3m	12.1s	24.5°
当初	1工区	6.2m	11.1m	13.6s	0°
	4工区	5.2m	9.4m	12.1s	24.5°

(4) 水中ドローンによるケーソンNo.5の再利用の検討

水中ドローンで被災したケーソン等の施設が再利用可否の調査を行った。水中ドローンはPower Vision社製のPower Rayを使用した。使用した機器の性能を図-15に、操作状況と機体カメラの映像の写真を図-16示す。



水中ドローン性能

機体名 : Power Ray
 サイズ : 465×270×126mm
 ケーブル長 : 70m
 最大前進速度 : 1.5m/s (静水中)
 最大深度 : 30m
 レンズ : FOV95°
 静止画解像度 : 4000x3000
 ビデオ解像度 : 4000x3000

図-15 使用した水中ドローン写真と性能



図-16 水中ドローン操作状況と機体カメラ映像

ケーソンNo.2, No.3以外で最も滑動量の大きいケーソンであるNo.5を対象に、水中ドローンによる蓋コンクリート等の状況確認及び撮影を行った。

蓋コンクリートにおいては、割れは見られなかつ

た。また、蓋コンクリートや側壁において付着物の剥がれや擦り傷が見られなかったため、蓋コンクリートは動いていないと考えられる。

水中ドローンによる蓋コンクリートの複数の写真を合成した全体写真と、近接写真を図-17に示す。



図-17 ケーソンNo.5蓋コンクリートの全体写真と近接写真

(5) 腹付工の形状及び必要質量

当初設計時から設計波高が増大したため、腹付工を考慮する。腹付工の高さは、直立部の1/3とし、幅は高さと同程度とした。必要質量については、混成堤マウンド（港外側）の被覆石の必要質量の1/2以上の規格の石材を使用する。1工区と4工区の被覆石の必要質量はそれぞれ756kg、692kgであるため、これらの1/2以上の規格である500～700kgの石材を使用する。

以上のことから決定した東側延伸部（ケーソンNo.3）1工区（ケーソンNo.5）、4工区（ケーソンNo.25）の復旧断面を図-18～図20に示す。

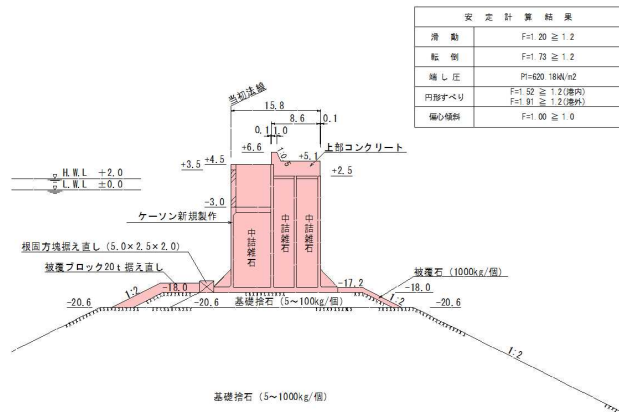


図-18 東側延伸部（ケーソンNo.3）の復旧断面図

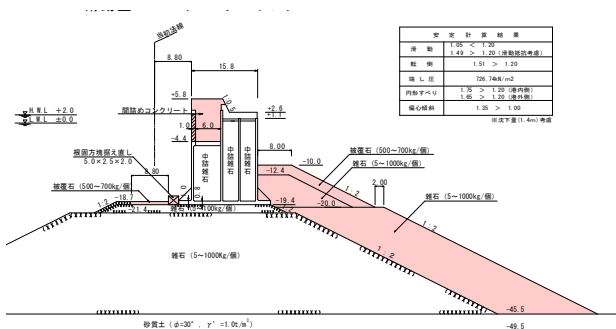


図-19 1工区（ケーソンNo.5）の復旧断面図

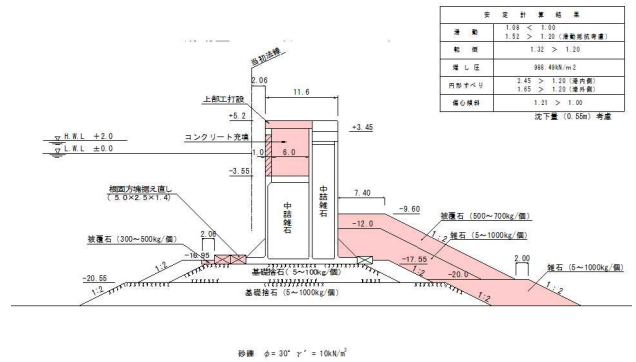


図-20 4工区（ケーソンNo.25）の復旧断面図

6. おわりに

本設計では、2018年台風24号によって被災した名瀬港立神地区の防波堤（沖）の災害復旧を行った。被災時の波浪を推算するため、波高と周期、波向をカムインズで推算し、経路の近い2017年台風5号のカムインズによる推算値とナウファスによる観測値を用いて補正を行った。その後、補正後の沖波から、エネルギー平衡方程式を用いて堤前波の有義波高と周期を設定し、最大波高は有義波高の2.0倍とした。これらの結果から、被災原因は設計波を大きく超える波が襲来し、構造物に大きな波力が作用したと結論づけた。

復旧の考え方は被災で法線がズレていたことから、当初の設計波に波高増大率 $K_c=1.2$ を乗じて復旧断面の設計波を設定した。また、ケーソンの健全度の確認を水中ドローンを使って行ったところ、ケーソンNo.5は蓋コンクリート、港内側フーチング共に異常は見られなかった。これにより、滑動量がケーソンNo.5以下のケーソン堤体は再利用できると考えられる。再利用したケーソンには腹付工を行った。

以上のように、災害時に観測記録が欠測となったとしても、カムインズを使用することで、設計波を推算し、復旧断面を設計する知見を得ることができた。我が国は、特に夏から秋にかけて台風が襲来し、多くの被害を受けている。これらの被害を完全に防ぐことは難しく、対策を重ねても被害を避けられないのが現実である。本検討は、これらの被害を受けた後に、いち早く災害原因を究明し、施設を復旧することの一助となる。今後とも災害復旧に関する検討を続けることで、より迅速に、より経済的に我が国の経済活動を取り戻すことができると考える。