下田港防波堤における水理模型実験による 波力及び波圧の特性の把握について

松永洋明1·栫浩太1·榎本葵1

1名古屋港湾空港技術調査事務所 設計課 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵ヱ町1丁目57-3)

急角度入射波を受ける下田港防波堤では、沿い波による波高及び波力増大の懸念があり、 構造の安定検討を水理模型実験にて実施した.水理模型実験の結果より、施工段階の構造 は、低天端消波工を含む不連続部において、相対質量I(実験質量/ハドソン式による計算 質量)=2.7以上である100tドロスIIを採用した構造が最も被災度が低く、概ね許容被災度 以下の結果となった.以上の結果から、既往検討結果の妥当性及び施工段階を含めた設計 の妥当性を確認した.

キーワード:防波堤,水理模型実験,急角度入射波,低天端消波工

1. はじめに

下田港は伊豆半島南部に位置し、須崎半島と赤根島と の間に深く入り込んだ地形を生かし、古来より東西海上 交通の要衝として港町が形成されてきた.

一方、下田港周辺は厳しい海象条件による海難事故が 多発する海域でもあり、古くから避難港としても利用さ れてきた.避難船舶の増加に伴い、既設防波堤(東防波 堤)内の避泊面積では避難船舶の収容が難しくなったこ とから、避泊面積を拡大すべく、須崎半島と赤根島との 間約1km、水深約60mのV字谷に防波堤整備を実施して いる.(図1,図2)

一般的な防波堤は、防波堤法線に対して、入射波が直 角(0度)方向から45度程度の範囲で最適な配置を検討 することが多いが、下田港防波堤は、入り組んだ地形に 避泊面積を確保する必要があり、防波堤(西)に対し 61.6度の入射波となる配置となり、沿い波による波高及 び波力増大が懸念された. (図3) また,高波浪の防波 堤構造では「消波ブロック被覆堤」が優位となるが,下 田港防波堤(西)では,大水深かつ狭隘な開口部で,港 内の静穏度と航路幅を確保する必要があり,堤頭部には 「消波ブロック内蔵双胴型ケーソン」を配置した.堤頭 部西側には,港外側の反射波低減効果を目的に「消波ブ ロック被覆堤」を配置したため,複数の構造形式からな る防波堤となっている. (図2)



図1 下田港配置図



本論文では、構造計算のみでは困難な不連続部が生じ る防波堤設計にあたり、水理模型実験により急角度入射 波の波力及び波圧特性を明らかにし、施工段階における 消波ブロック及び堤体(ケーソン)の安定検討結果を報 告する.



図3 実験における沿い波発生状況

2. 実験実施の背景

基本設計では、完成断面における急角度入射波と沿い 波の合成波に対する影響評価を行うため、ブシネスクモ デルによる平面特性とCADMAS-SURF(3D)による流速特 性の再現を実施し、構造形式(案)を決定した.(図4)



図4 構造形式(案)平面図

基本設計にて選定した「消波ブロック被覆堤(図5)」 と「消波ブロック内蔵双胴型ケーソン(図6)」との接 続部には防波堤前面の消波ブロックに不連続部(図4中 赤丸)が生じる.このような不連続部が生じる防波堤で 急角度入射波が当たる消波ブロックの規格及び配置につ いては、基準¹⁾及び既往論文等で明確な知見がなく、完 成断面における消波ブロックの規格及び配置についても、 水理模型実験を行い決定した.²⁾

しかし、施工段階においては、消波ブロックを段階的 に設置していくことから、消波ブロック未設置区間によ る沿い波発達距離が長くなり、波力増大の恐れがある. 基本設計では、施工段階の影響評価は実施されていない ため、水理模型実験により、以下の実験を行う.

- ・施工段階における消波ブロックの安定実験
- ・施工段階における堤体(ケーソン)の安定実験







図6 消波ブロック内蔵双胴型ケーソン断面図

3. 実験

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所伊勢湾水理環境実験センターにある長さ 30m,幅19m,深さ1.2mからなる単一方向不規則波造波 装置(位置制御)が設置された平面水槽のうち,導波板 で仕切った幅約12.5m分において実施した.(図7)



図7 実験平面水槽

(2) 実験条件

実験は、総延長500mの防波堤(西)を、縮尺1/60にて 再現し、表1の10年確率波が61.6度の急角度で入射する 配置に設置した.

また,技術基準¹⁾に基づき,不規則波は,1ケースあたり1000波以上の波群を3種類,規則波は,1ケースあたり3波以上の波を3回作用させた.

表1 実験波の諸元

波の種類		潮位(m)		波高(m)	周期(s)	波高(m)	周期(s)
				Hmax	Т	H1/3	T1/3
10年確率波	不規則波	H.W.L	1.7	_	_	6.5	15.9
		L.W.L	0.0	_	_	6.1	15.9
	規則波	H.W.L	1.7	11.7	15.9	-	—
		L.W.L	0.0	11	15.9	-	-

4. 施工段階における消波ブロックの安定実験

(1) 実験概要

実験は、以下のケース1~3の計3ケースについて検討 した. (図9)

現況の施工状況は、図8のとおりであるが、14号函 ケーソンを設置するにあたり、既設消波ブロック(50t テトラポッド)を撤去する必要がある.既設消波ブロッ ク(50tテトラポッド)を撤去した場合、消波ブロック に不連続部が生じることになるが、既往検討³では不連 続部の消波ブロック質量は相対質量I(実験質量/ハド ソン式による計算質量)2.7以上必要とされている.

しかし、基本設計構造にて施工する場合、既設消波 ブロック(50t テトラポッド)(図 8 中緑箇所)を撤去 した後の不連続部の相対質量が、2.7 以上を担保できな いため、実験全ケースにおいて、11 号函前面まで50t テ トラポッドを撤去し、消波ブロック不連続部に100t ド ロスIIを被覆することで、相対質量を確保することとし た.(図 9)また、実験ケースの詳細は以下の通りであ る.



図9 実験ケース断面図及び平面図

- ケース1: 沿い波発達距離を短くしたケース 12 号函まで完成天端で消波ブロックを設置 し,さらに 13~15 号函前面に 50t テトラ ポッドで低天端消波工を設置する.
- ケース 2: 低天端消波工の安定性を向上させた上で,沿い波発達距離を短くし,かつ,完成天端上での砕波効果も高めたケース(ケース1の対策型1)
 13 号函まで完成天端で消波ブロックを設置し,低天端消波工を50t テトラポッドから100t ドロスIIにブロック規格を変更し,かつ,ケース1 と同じ長さ分の低天端消波工を14~16 号函前面に設置する.
- ケース3:発達距離を分断し、沿い波の影響を低減した ケース(ケース1の対策型2)
 - ケース1に設置している低天端消波工を無く し、16~20号函前面に島状の消波ブロック 被覆堤(以降、「島状ブロック」と呼ぶ) を設置する.島状ブロックは、50tテトラ ポッドを100tドロスIIで被覆する構造とする.

実験では、防波堤前面に波高計を取り付け、波高を計 測したほか、目視観察やビデオ撮影により、被害状況の 詳細を把握した.消波ブロックの被害は、3種類の不規 則波の波群の平均結果を被災度として整理し、消波ブ ロックの許容被災度0.3を指標に各種消波ブロックの安 定性および被災特性を確認した.

(2)実験結果

a) ケース1およびケース2

図10は, H.W.L.時のケース1及び2における防波堤前面の波高比分布及び消波ブロックの被災度を示したものである.

被災度をみると、ケース1では低天端消波工の50t型テ トラポッド(I=1.5<2.7)が許容被災度を大きく超えた. また、100t型ドロスⅡ(I=5.8>2.7)も12号函で許容被 災度を大きく超えた.

100tドロスⅡでも被害が生じた要因は、完成断面に比べ150m程度(約7函分)沿い波発達距離が長くなったことと、低天端消波工の被災が100tドロスⅡの被災度を高めたと考えられる.

これに対し、ケース2の被災度では50t型テトラポッド、 12~13号函の100t型ドロスIIともにケース1より被災度 が低下した.波高比の分布形状からも消波工の無い16~ 20号函付近までは、両ケースとも理論値に近似した変化 を示しているが、値自体は概ねケース2が低くなってい ることが確認できる.

100t型ドロスⅡの被災度が低下した理由は、沿い波発達

距離が短くなったことと、低天端消波工の安定性が高 まったこと、低天端消波工の天端上による砕波効果が高 まったためと考えられる.また、50t型テトラポッドの 被災度が低下した理由は、100t型ドロスIIの完成天端の 設置距離が延びたことで、天端上での砕波効果が高まっ たためと考えられる.

被災度 H1/3=6.5m、H.W.L.、1函別 2.6 × 2.4 2.0 2.2 r + × + 2.0 1.8 1.6 1.2 許容被步度 03 4 0.60 0.80 1.20 1.60 消波ブロ: 双胴型り 13 14 15 16 17 18 19 20 50t型テトラボッド 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 21 22 23 24 43-17.68 50t型テトラボッド (Kd値:83 比重:23) 50t型テトラボッド (Kd値:83 比重:2.3) (Ad値:13 比重:2.3) (ログ50型テトラボッド) 波高計設置位置 ケース1 消波ブロック内蔵 双胴型ケーソン 有波ブロック被覆堤(箱形ケーソン 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 ダミー区間 50t型テトラボッド (Kd値:8.3 比重:2.3) (Kd値:13 比重:1 (ヤフちの型チトラボッド) 被災度(ケース1(100tドロスⅡ)) =-☆= 被災度(ケース2(100tドロスⅡ)) 被災度(ケース1(50tテトラポッド)) - ---- 被災度(ケース2(50tテトラポッド)) + 波高比(ケース2(実験値)) 波高比(ケース1(実験値)) 波高比(理論値(H.W.L. Hi=6.5m)) 図10 波高比及び被災度(ケース1,ケース2)⁶⁾

b) ケース3

図11は、H.W.L.時のケース1及び3における防波堤前 面の波高比分布及び消波ブロックの被災度を示したもの である.

波高比分布をみると、ケース3では島状ブロックの西 側にあたる17号函より西側の波高比が、ケース1に比べ 概ね低い傾向を示しており、沿い波の分断と島状ブロッ クでの砕波効果による波高減衰が現れている(図11中赤 丸).次いで、被災度をみると、ケース3では、50t型テ トラポッドがケース1の結果を大幅に下回り、許容値以 内に収まる結果となった.これは、島状ブロックによっ て沿い波の距離が縮小したことと、島状ブロックの天端 上の砕波による波力の減衰効果が現れたことによると考 えられる.

ただし、ケース3では、島状ブロックの西側の法肩部 を中心に100t型ドロスII(I=5.1>2.7)の被害が許容値 を大幅に超える被害が発生した.

これは、不連続部の嵩上げ効果により波高増大した波 が、島状ブロックの天端延長では砕波が不十分なまま天 端上を進行し、西側法肩付近に激しく衝突したことと、 斜め入射波が16号函付近で回折波となって回り込むこと により、消波ブロックの噛み合わせが崩れ、背後側に支 えがないことで転落被害が発生しやすくなるためである. このことより、島状ブロックを配置することで、完成 天端の消波ブロックの被害が軽減されるが、島状ブロッ クの西側法肩部ではI=5.1 (>2.7)であっても安定性を 確保できないことが判明した.



5. 施工段階における堤体(ケーソン)の安定実

験

(1)実験概要

実験は、4.(2)施工段階における消波ブロックの安 定実験において最も安定性を確保できたケース2につい て検討した.



技術基準¹によれば、消波ブロックをケーソン前面に 設置すると、波力低減効果が高まるが、消波工天端高が 直立部(ケーソン壁)天端高より低すぎる場合(低天端 消波工の場合)、疑似的なマウンドの役割(=高マウン ド)を果たし、直立部(ケーソン壁)に衝撃砕波圧が作 用するおそれがあることが指摘されている⁵⁾ため、低天 端消波工が設置される14~16号函のケーソン前面に法線 方向各3列(L1~9)、鉛直方向各5列(PF1~5)に波圧計を取 り付け、規則波に対する波力および波圧を計測した. (図12)

(2) 実験結果

a)波圧

図13は、 H.W.L.時の16号函を代表に、波圧が高くな りやすい「静水面位置(+1.7m) (図13中赤四角枠)」 及び水深の深い低天端消波工の「消波ブロック際(4.7 ~12m) (図13中赤丸)」の部位における波圧時系列を 示したものである.



「静水面位置」での波圧時系列をみると、数か所でや や衝撃的な波圧が作用しているものの、一般に「衝撃砕 波圧」と呼ばれるような「腰掛部の5~10倍に至る強大 な波圧」はみられない.実験で衝撃砕波圧がみられな かった要因は、波の入射角が61.6度と直立部(ケーソン 壁)に対し急角度で入射するためと考えられる.

一方,水深の深い「消波ブロック際」での波圧時系列 をみると,静水面位置よりも顕著な衝撃的な波形が各所 で確認され,腰掛部でも静水面位置と同程度の波圧と なっていることが分かる.L8ラインの衝撃波形部は腰掛 部の1.5倍程度の波圧で,静水面の波力を大きく超えて いる(図13中緑丸).

消波ブロック際で波圧が高まったこと及び、衝撃的な 波形が発生した要因は、急角度の入射波が作用するため、 波作用時に消波ブロックとケーソン壁の間の空間で激し い擾乱(「隅角部に作用する波圧」に近似したエネル ギーの圧縮)が発生するためと考えられる.

b)波圧合力

図14は、H.W.L.時の16号函を代表に、ケーソン直 立壁に位置するPF1~PF5部位の同時刻波圧を合計した 波圧合力の時系列である.図14中の黒線は16号函の最も 東側となるL9における各波の合力ピーク時刻を示してい る.



図14 波圧合力時系列(16号函:H.W.L.)

図13で顕著に表れていた衝撃的な波形は、消波ブロック際の波圧と比べ、波圧合力では各ラインとも小さくなっている.これは、衝撃的な波圧はごく限られた部位で発生していることを示している.また、衝撃的な波形がみられても、波圧合力のピーク時刻と一致することはほとんどないことから、「低天端消波工がピーク時刻の波圧合力へもたらす影響」は非常に軽微であると判断できる.

なお、波圧合力のピーク時刻をみると、L9ラインか らL7ラインに向かうに従い、徐々に遅くなる傾向がみら れる(図14中赤矢印).この要因は、波が61.6度の急角 度で入射することで法線方向における波圧の作用時間が ずれるためであり、ケーソン全体に作用する波力の平滑 化(ピーク波力の抑制)にもつながり、「斜め入射波が 持つ優位性」と判断できる.

6. 終わりに

水理模型実験結果より、下田港防波堤(西)の施工段 階の構造は、低天端消波工を含む不連続部において、既 往検討²⁾結果の相対質量I=2.7以上である100tドロスIIを 採用した構造(ケース2)が最も被災度が低く、概ね許 容被災度以下の結果となった.以上の結果から、既往検 討²⁾結果の妥当性及び施工段階を含めた設計の妥当性を 確認した.

ただし、11号函より西側の50tテトラポッドについて は、許容被災度を超える結果となったため、施工段階に おいては、復旧工事を含めた施工が必要となる可能性が ある.

また,水理模型実験より,下田港防波堤(西)は急角 度入射波の影響を受けるため,低天端消波工の消波ブ ロックとケーソン壁間の空間での激しい擾乱による直立 部(ケーソン壁)での波圧増大が生じることが確認でき た. なお,低天端消波工付近で生じた波圧増大及び衝撃 砕波圧は,波圧合力のピークへの影響が非常に軽微であ ることが確認できた.

謝辞:本報告の作成にあたり、ご指導・ご協力を頂いた 関係者の方々に深く感謝し、御礼申し上げます.

参考文献

- 1)港湾施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会 (2018).
- 2) 小椋進,鬼頭孝明,富田健,森川高徳,池尾進:急角度入射 波に対する消波ブロックの安定特性に関する実験的研究,海 岸工学論文集,第72巻,pp.1105-1110,2016.
- 3) Hudson, R.Y.: Laboratory investingation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE., Vol. 85, W.W.3., pp. 93-121, 1959.
- 4)高橋重雄、半沢稔、佐藤弘和、五明美智男、下迫健一郎、寺 内潔、高山知司、谷本勝利:期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量ー消波ブロック被覆堤の設計法の再検討、 第1報一、港湾技術研究所報告,第37巻,第1号,pp.3-32,1998.
- 5) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992): 混 成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集,第39巻,pp676~680.
- 6)合田良実,吉村知司,伊藤正彦:島堤による波の回折および 反射に関する研究,港湾技術研究所報告,第10巻,第2号,pp.3-52,1971