

平面形状による防波堤に作用する波力の評価について

八尋明彦*・加藤博敏*・菅原邦彦*
黒澤忠男**・南将人***

1. 目的

近年の海洋性レクリエーションに対する人々の関心が著しく高まり、マリーナ計画を中心に、防波堤形状に曲線を取り入れる法線形が多用されるようになってきている。その理由として、港湾建設局を対象としたアンケート調査（1993）によると、呉港、宮崎港等に見られるように視覚的および利用上の観点から用いる場合が最も多く、八戸港のように隅角点を避けて堤体の安定性を高める場合もある。後者の場合は比較的長大な防波堤に多く見られ、特に、凹型の隅角部に曲線形状を有するものは、隅角部での波の集中をできるだけ少なくし、堤体の安定性を高めることを目的としている。

しかし、このように長大かつ隅角部を有する場合には、両側の防波堤による反射波によって隅角部および反対側の防波堤で波高が増大することが予想され、設計の際には、波高の増大率を考慮する必要があるとされているものの、曲線形状については、現在のところ直線に近似して波高の増大を推定している。

また、長大な防波堤の建設には10年以上の長期間を必要とし、施工途中の防波堤形状は島堤となり、端部では回折波によって局所的に波高が増大することや、施工途中で消波工が不連続部を避けられない場合があり、その時には、消波工によって碎波が促進されて波力が増大し、消波工の散乱、強いてはケーソンの滑動が懸念される。

このように、長大かつ隅角部を有する防波堤では、防波堤の平面形状に関わる種々の問題があり、特に、それが大規模な防波堤であると、水深変化に加えて、防波堤の平面形状の影響も大きく、また、その平面形状自体が長い施工期間の間に変化していくために、問題を複雑にしている。

例えば、図-1に示した八戸港中央第二防波堤は、長さ1670mであり、一函が17m×15m×14mの全109函で構成されており、途中に開角角度102度の曲線の隅角部を有する形状である。この防波堤の完成には15年程度の

年月が必要であり、現在、第1施工段階の第2工区が施工中である。

この防波堤は、途中で曲線を有しているために施工途中および完成時にどの程度の波力が作用するかが断面設計の際に重要な項目である。また、この防波堤は第1施工段階の施工途中で、北側端部の消波工不連続部において、1992年2月17日の低気圧により推定沖波 $H_0=8.3$ mの波浪を受けてケーソンの滑動、消波ブロックの散乱等の被災を受けており、工事進行における端部の消波工の処理が検討項目となっている。

本研究は、長大かつ隅角部が曲線形状を有する防波堤の断面設計に必要な波力および波高を平面実験によって測定し、施工途中と完成時の隅角部および端部に作用する波力の算定方法について検討したものである。

2. 波高増大による波力の算定

2.1 設計における波力増大の取扱い

通常使用している波圧の計算式は、延長が十分に長い直線状の構造物を対象としている。そのため、防波堤の先端や凹型隅角部の周辺等で見られる回折波や反射波の影響によって局所的に波力が増大する現象を考慮するには、場所的な波高の増大率を勘案して、合田式に用いる波高に乗じている。例えば、図-1に示す八戸港中央第二防波堤の断面設計のための波力の算定は、第3工区の曲線形状の隅角部を図中の点線に示すように直線と見なし、波向別に増大率を算定して、工区毎に算定した堤前

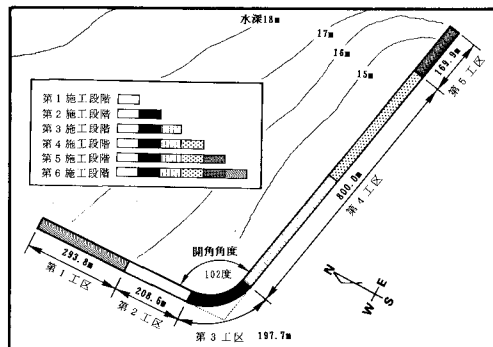


図-1 八戸港中央第二防波堤形状

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

*** 正会員 株式会社エコー 第一技術部

波高に、その増大率を乗じて合田式に入力している。

すなわち、式(1)のように設計計算に用いる波高を割増して、一般の算定式に基づき波力の算定を行っている。

$$H_b = \min\{K_c H_b, K_{cb} H_b\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_b ：法線形の影響を考慮した波力の算定に用いる波高 (m)、 K_c ：法線形の影響による波高増大率 (≥ 1.0) K_{cb} ：砕波限界波高の増大率の限界値、 H_b ：法線形の影響を考慮しないときの波力の算定に用いる波高 (m)、 H_b ：進行波として有義波高の5倍の距離だけ沖側の地点における砕波限界波高 (m)を示す。砕波限界波高の増大率の限界 (K_{cb}) については第二港湾建設局で実施された模型実験より1.4を上限としている。

ただし、防波堤の形状が途中で変化する場合には、波の反射や回折等によって波高の分布は一様とはならず、特に波向に対して凹型の隅角部を形成する法線形状の場合に顕著となるので、波力の算定にはこれを考慮する必要があるとされているものの、実際には、対象防波堤ごとに模型実験を実施して波力を確認している。

2.2 曲線を有する隅角部の波高の算定

防波堤の港外側に凹型を形成するような法線形は、伊藤・谷本 (1971) によると、開角角度と入射波向によって、収れん、沿い波、干渉の3形態に分類され、最後の場合、隅角部自体における波の集中のほか、法線各部からの反射波の重ね合わせに基づく波高の増大が周辺にも生じる。これに起因すると考えられる被災例もあるので法線形の決定および安定計算ではそれらの増大を考慮する必要があるとされている。通常、隅角部が直線の場合には、開角角度によって隅角部の波高増大率と極値の間隔が算出されるが、曲線形状については十分な算出方法がなく、直線近似して算定している。

本研究では隅角部が曲線を有しているために、波高測定によって波高の増大率を検討し、数値計算によって隅角部前面領域の波高分布を直線形状と曲線形状とで比較した。また、隅角部の波力測定結果と合田式による波力を比較した。

3. 平面実験の方法

3.1 実験水槽と測定方法

縦35m、横47m、深さ1.1mの大きさの平面水槽を用いて、不規則波実験を実施した。この水槽内への模型の配置を図-2に示す。実験では、現地35mピッチに格子状に容量式波高によって波高分布を測定した。また、図-1に示した施工段階毎の端部と隅角部において (図中の記号P)、3台の分力計を用いてそれぞれ3箇のケーソンに作用する波力を測定した。

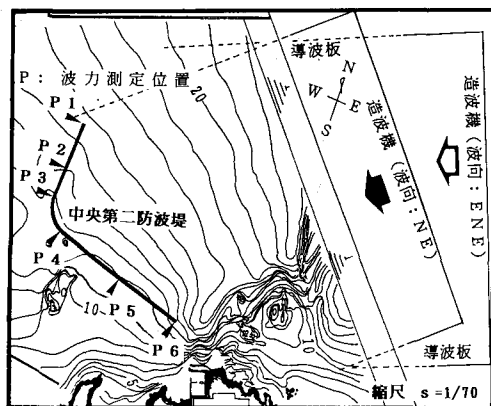


図-2 模型配置図

3.2 防波堤の形状

防波堤の断面は消波ブロック被覆堤であり、図-1に示した通り、第2工区を始めに南に向かって防波堤が延長され、最後に最北部の第1工区の施工まで、全6施工段階で計画されている。

実験に用いた形状は、被災時 (第1施工段階)、施工途中の3法線 (第2, 3, 5)、完成時 (第6) の全5種類とした。

また、完成時の防波堤形状で、隅角部が直線と曲線の二つの形状について波高を測定した。

3.3 波浪条件

実験に用いた波高は、50年確率波 (設計波) と10年確率波の2種類とした。周期は、設計波周期13sを用いた。波向は、工区毎に作用する波力の大きさを算定して、最大波力となるNE (第1, 2工区) とENE (第3~5工区) の2種類とした。

3.4 合成波力の算定

分力計により測定された波力 (水平成分と鉛直成分) を用いて、式(2)に示す合成波力 (K_f) を算定した。

$$K_f = S.F. \cdot F_H + \mu \cdot F_V \dots\dots\dots (2)$$

ここに、S.F.：滑動安全率 (=1.0)、 F_H ：水平波力、 F_V ：鉛直波力、 μ ：底面摩擦係数 (=0.6) を示す。

4. 隅角部の影響

4.1 測定波高分布の結果

図-3に完成時における消波ブロック法先より沖側での平面波高分布の測定結果を示す。これは、隅角部に対しほぼ正面となる波向NEの場合の、防波堤の有無による波高比の算定結果である。防波堤が有る場合は前面を消波ブロックで被覆している。図より波高が増大している領域は、隅角部周辺および防波堤端部であり、北側端部 (図中A) では南側防波堤からの反射波によって波高が増大しているものと考えられる。

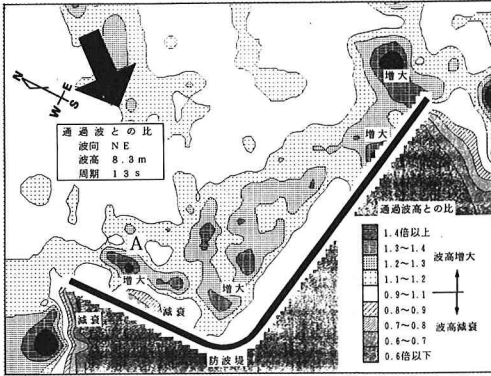


図-3 防波堤有無による波高比分布 (波高 NE)

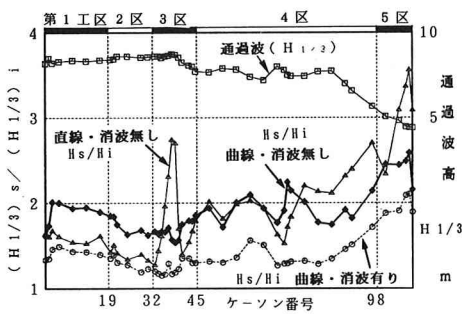


図-4 防波堤沿いの波高分布

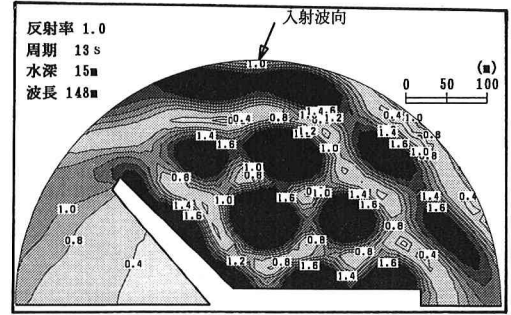


図-5 前面波高分布 (直線形状)

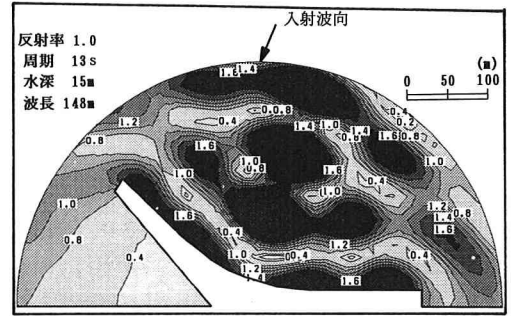


図-6 前面波高分布 (曲線形状)

図-4に防波堤前面の波高測定結果を示す。図中の□印が通過波高の測定結果(実波高:m)で、波高測定結果はこの通過波高との比で示した。防波堤の凹型隅角部(ケ-ソン番号32~45の範囲)では、直線形状より曲線形状とした場合に波の集中が少なくなり、波高が小さくなっていることが分かる。消波工が無い場合、無堤状態の波高と比較して直線形状の隅角部では波高が2.8倍に増大されるのに対し、曲線形状では1.7倍の増大率となった。

また、直線形状では隅角部において跳波現象が観測されたのに対し、曲線では観測されず、波力低減に形状が大きく利いていることが分かる。

4.2 数値計算による波高増大率

隅角部の形状が直線であるか曲線かによって波の場がどのように変わるか、数値計算によって分布を比較した。波高比分布の計算は緩勾配方程式を有限要素法を用いて解き、等波高比分布図を作成した。その際、反射波による分布の違いを検討するために水深一定とし、屈折・回折を考慮しないものとした。

図-5に直線形状の場合を、図-6に曲線形状の結果を示す。直線形状では各法線からの反射波によってほぼ格子状に分布するのに対し、曲線形状では円弧状に近くなり、隅角部の形状によって前面の分布に差異が生じている。また、隅角部の波高の増大率を式(3)で算定する

と $K\beta=3.5$ 、直線の場合の数値計算結果では2.9倍となる。直線形状では局所的に波高比が大きくなることが分かる。

$$K\beta=2\pi/\beta \dots\dots\dots (3)$$

ここに $K\beta$:隅角部の増大率、 β :開角角度を示す。それに対し、曲線形状の場合には、2.3倍となり分布の特性の差異に加え、波高の増大率が小さくなっている。

4.3 隅角部の波力

図-7に、合田式と実験波力との比較結果を示す。防波堤の延長によって隅角部への反射波の影響が異なると考えられるため横軸には施工段階を用い、縦軸には式(4)で定義した合成波力比 (W_R)を用いた。

$$W_R = \frac{(F_H + \mu \cdot F_V)_E}{(F_H + \mu \cdot F_V)_G} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 F_H :水平波力、 F_V :鉛直波力、添字E:実験結果、添字G:合田式による波力算定結果を示す。

合田式の波力算定では、エネルギー平衡方程式により波高を求めたが、隅角部の波高増大率は考慮していない。図-7によると、曲線形状とすることによって波高増大率が直線形状より小さくなるため、波圧低減率 λ を考慮し、かつ隅角部の波高増大を考慮しない合田式で、実験波力は安全側となっている。また、施工段階による波力比の違いもほとんど見られず、防波堤延長による反射波の隅角部に及ぼす影響はほとんど見られない。

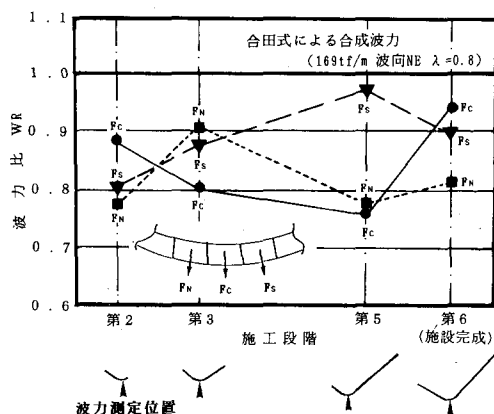


図-7 隅角部の波力測定結果

5. 端部に作用する波力

5.1 作用波力と消波工の形状

施工途中の端部で見られるような消波工の被覆が不連続な場合には、ブロック上で碎波が促進され、合田式を上回る衝撃的な波力が作用するものと考えられている。

なお、衝撃的な波力の作用する場合には、滑動実験によってもケーソンの滑動が再現され、予想以上の波力が作用したことが確認されている。この大きさを推定するために、高橋ら (1992) は式 (5) に示す衝撃波力係数 (α_1) を提案しており、この係数を用いた波力と実験結果とを比較した。

$$p_1 = (\alpha_1 + \alpha^* \cos^2 \beta) w_0 H_D$$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_2, \alpha_1\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 p_1 : 静水面での波圧, α_1 : 重複波圧的な成分を示す波圧係数, α_2 : 碎波による波圧成分を示す係数, β : 波向, w_0 : 水の単位体積重量, H_D : 設計波高を示す。

また、このような衝撃的な波力の低減のための対策工について比較検討した。消波工の形状を図-8 に示す。消波ブロックが端部の側面まで達している形状を先端巻き止め方式、ケーソンの背後まで達し円弧状を呈しているものを先端巻き込み方式と呼んでいる。

5.2 波力の結果

長大な防波堤の施工途中における端部での波力の測定結果を図-9 に示す。

第一施工段階の合田式による波力の算定結果 ($\lambda = 0.8$) と比較すると、被災を受けた時の不連続部では約1.2倍の波力増大であった。

式 (5) の α^* の算定において、 α_2 と α_1 を算定すると、それぞれ0.55と1.55となり、消波工不連続部の水面付近の波圧は、波圧低減率を考慮した合田式の3倍程度となった。また、八尋ら (1993) はケーソン前面に作用する波圧分布を測定して、堤端部に不連続部を生じる場合

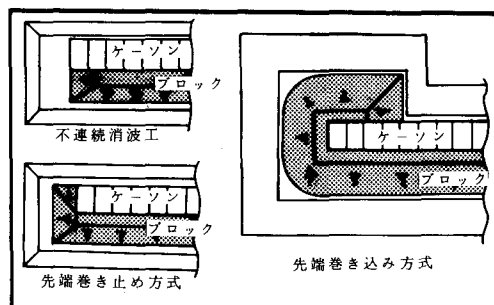


図-8 消波工の形状

の波圧は実験結果と衝撃波力係数を用いた算定値とはほぼ一致するが、水面下にはブロックが存在するために、波圧が小さくなることを確かめている。この波圧分布を積分して合成波力を算定すると、波圧分布を直線とした結果のほぼ1/2となり、本研究の場合、衝撃波力係数を用いて算定した合成波力は400 tf/mとなるが、波圧分布を考慮すると200 tf/mとなり、波力実験によって得られた不連続消波工部の合成波力とほぼ一致する。

次に、衝撃的な波力の低減のための対策工として、消波工端部の処理を巻き止め方式と巻き込み方式とした場合について比較した。前述の第1施工段階の波力の算定結果と比較すると、前者は0.75倍、後者は0.68倍と、いずれも波力低減率 $\lambda = 0.8$ とした合成波力より小さかった。すなわち、衝撃碎波力の発生を防ぎケーソンの安定性を高める対策として、十分に消波ブロックを被覆することが妥当であることが分かった。なお、別途実施した滑動実験からも、消波工不連続部で現地相当3m程度の滑動量であったのに対し、端部を十分に消波工で被覆し

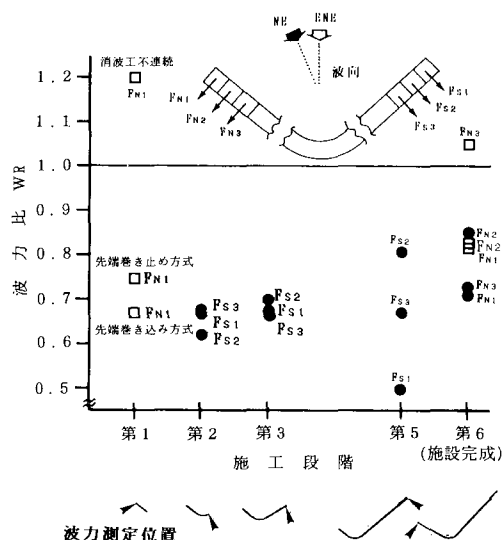


図-9 施工途中の端部の合成波力

た場合には、ケーソンの滑動は生じなかった。

以上の結果より、長期に渡る施工における消波工端部の処理は先端巻き止め方式とし、完成時を巻き込み方式として検討を進めた。図-9に示すように南側への延長である第5施工段階までは端部の合成波力は合田式による値を越えることはないが、第6施工段階では完全に消波した場合でも合田式を上回る波力が作用し、滑動実験でも波力増大を裏付ける滑動が認められた。

これは、図-3でも見られた様に、長大な延長側である防波堤南側からの反射波の影響が考えられる。そこで、防波堤の南側からの反射波による波高増大率(1.09)を考慮し、合田式で波力比較を行うと安全側となった。

従って、本研究のように長大な防波堤の堤頭部付近では反射波の影響を考慮することが必要である。

6. あとがき

八戸港中央第二防波堤を対象に、長大かつ隅角部に曲線を有する防波堤を対象に、施工途中と完成時の端部および隅角部の波高と波力について検討した。その結果を以下に列記する。

- ① 消波工が無く、隅角部が凹型の曲線形状を有する防波堤では、直線形状で見られた跳波現象が見られなかった。また、隅角部が直線形状の場合、波高増大が2.8倍となるのに対し、曲線の場合には1.7倍であった。

- ② 曲線形状での隅角部の波力は、隅角点の波高増大を考慮せず、かつ波圧低減率 $\lambda=0.8$ を用いた合田式よりも小さくなった。

- ③ 端部の消波工不連続部の波力は、波圧低減率 $\lambda=0.8$ とした値では過小評価となるが、衝撃波力係数を用い、波圧分布を考慮するとほぼ一致する。

- ④ 端部の消波工が不連続部の場合には、完全に被覆した場合より大きな波力が作用することがあり、この対策として、端部ケーソンの側面まで被覆(先端巻き止め方式)することで、波圧低減率 $\lambda=0.8$ とした波力以下にすることが可能である。

最後に、本研究を進めるにあたり、終始御指導頂きました運輸省港湾技術研究所水工部高橋耐波研究室長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 伊藤喜行・谷本勝利 (1971): 混成防波堤の蛇行災害, 港研資料, No. 112, 13 p.
- 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 (1993): 曲線防波堤技術検討調査報告書, 54 p.
- 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波力係数の提案, 第39回海講論文集, pp. 676-680.
- 八尋明彦・菅原邦彦・黒澤忠男・宮崎和行・永松宏一 (1993): 混成堤消波工不連続部の波力に関する実験的研究, 第18回海洋開発シンポジウム, pp. 289-294.