防波堤腹付工の設計法構築と 断面形状の感度分析

佐藤 健彦¹・宮田 正史²・竹信 正寛³・高橋 英紀⁴

¹国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: satoh-t92y2@mlit.go.jp

²正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: miyata-m92y2@ysk.nilim.go.jp

³正会員 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: takenobu-m83ab@ysk.nilim.go.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: takahashi-h@pari.go.jp

腹付工に関する現在の設計法には、腹付耐力を過小評価する等の課題がある。本研究では既往の研究で得られた知見を活用し、腹付工に関する新たな設計法を構築した。主な特徴は、①腹付耐力の算定方法を変更、②堤体から作用する全荷重が基礎マウンドと腹付工で分担されることを考慮、③腹付工の最小規定を見直した点にある。この設計法で計算される腹付工は、現行の設計法より小さな腹付形状であるが、模型実験の結果と比較すると十分安全側のものであることを確認した。また、腹付工の断面形状に関する感度分析結果から、滑動破壊に対しては腹付工の高さを高くすること、支持力破壊に対しては腹付工の幅を拡げることが効果的であることがわかった。これらの特性を把握しながら本研究の設計法を用いることで、より合理的な腹付工の設計が可能となる。

Key Words : breakwater, reinforcing embankment, design method, circular slip, sensitivity analysis

1. はじめに

港内を静穏な状態に保ち、高い波から背後地を守る防波堤は、港湾施設として重要な役割を担っている。しかし、高波浪の影響による防波堤の被害に関する報告が後を絶たないことや、従来考慮していなかったうねり性波浪への対応等によって、防波堤に作用する設計波の見直しの必要性も高まっている。また、既存防波堤の津波への有効な補強対策も求められている。設計条件を見直した場合、既存防波堤には補強が必要となる場合があるが、補強方法の一つとして、堤体の港内側に石材を盛って補強した腹付工(図-1)が用いられている。

平成 11 年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾(以下、H11 基準という)には、腹付工を有する防波堤の検討方法について、腹付工の滑動抵抗

力を算定する式が示され、現在の設計法(以下、現行法という)の基本となっている。しかし、この算定式は実際の破壊メカニズムに基づいて作られた式ではなく、40 年程前に赤塚ら²⁾によって採用された暫定的な設計法であり、この設計法による計算結果は、当時から安全側過ぎることが認識されている。また、支持力に関しては具体的な照査方法が示されていない。一方、腹付工に関する既往の研究において、菊池ら³⁾は腹付工を有する防波堤を対象とした大型模型載荷試験を実施した結果から、ケーソン後趾およびケーソン下部を始点とする、2 種類の円弧すべり面を仮定して腹付工を有する防波堤の全体安定性の照査ができることを提案している。高橋ら⁴⁾は遠心模型実験でこの 2 種類の円弧すべり面の発現を確認し、簡易ビショップ法を用いた検討手法を提案している。

本研究では現行法の課題に対し、既往の研究成果で得られた知見を活用し、設計対象の作用が波浪の場合の腹付工に関する設計法(以下、提案法という)を構築するとともに、腹付工の断面形状の変化が設計計算の結果に及ぼす影響について感度分析を実施し、合理的な腹付工を設計するための手掛かりを提示することを目的とする。

図-1 本研究で対象とする腹付工

2. 現行法の課題

(1) 腹付工の滑動抵抗力

H11 基準では、腹付工を有する防波堤の滑動照査式として式(1)および式(2)が与えられているが、この式を用いた現行法(図-2)は、腹付工の滑動抵抗力を過小評価し、必要以上に大きい腹付工を要求してしまう。これは、腹付工と堤体背面の間の壁面摩擦を考慮していない点や、腹付工のせん断強度が一般的な割石と割石の摩擦係数から設定されている点が大きな要因と考えられる。

$$\frac{\mu W + R}{P} \geq 1.2 \quad (1)$$

$$R = W_s \cdot \tan(\theta + \phi) \quad (2)$$

ここで、 P : 堤体に作用する水平波力、 W : 堤体の静水中の水中重量－揚圧力、 μ : 堤体と基礎マウンドの摩擦係数、 R : 腹付工の滑動抵抗力、 W_s : 最上層の被覆層を除いた滑り面より上の石材の水中重量、 θ : 滑り面の傾斜角、 ϕ : $\phi = \tan^{-1} \mu_2$ (μ_2 は割石と割石の摩擦係数、 $\mu_2 = 0.8$) である。

(2) 腹付工を有する場合の支持力照査

H11 基準では、腹付工を有する防波堤の支持力照査についての記載がなく、照査方法が不明である。

(3) 腹付工の最小規定

H11 基準では、腹付工の高さ a は堤体の高さ H の 1/3 以上、上幅 b は高さ a と同程度以上であることが望ましいと記されており、実務上は $a \geq H/3$ かつ $b \geq a$ が腹付工の最小規定となっている(図-2)。このため、腹付工の高さが高い場合は、腹付工の幅も合わせて広がってしまい、必要以上の腹付工を要求する懸念がある。

3. 設計法の構築

(1) 既往の研究による知見

高橋ら⁴⁾は、石材などをケーソン直背後に設置したケーソン式防波堤模型に対して、遠心力場で水平载荷を行

図-2 滑動照査方法（現行法）

い、腹付工の抵抗メカニズムと耐力増加特性を調べている。腹付工が有る場合には、腹付工が無い場合と同様に深いすべりが生じるが、それ以外に、堤体後趾から伸びる浅いすべりも発生することが観察され(図-3)、深いすべりが支持力破壊、浅いすべりが滑動破壊に相当する。そのため、マウンドと腹付工が複合する地盤の耐力評価には、菊池ら³⁾も提案するとおり、深いすべりと浅いすべりの2種類のすべりを考慮する必要性が示されている。

高橋ら⁴⁾はこれに加えて、遠心模型実験で確認された深いすべりと浅いすべりに対し、円弧すべりを仮定した簡易ビショップ法を用いて検証を行っている(図-4)。土質条件に別途実施した三軸圧縮試験から求めたせん断強度を用い、堤体の壁面摩擦を考慮した条件では、実験で得られた極限荷重を精度良く再現できることが確認された。当該実験結果においては、すべり面の位置は再現できなかったが、高橋ら⁴⁾による別の実験においては、深いすべりも浅いすべりも再現でき、円弧すべりを仮定した簡易ビショップ法を、安定性評価手法として利用できると示されている。また、高橋ら⁴⁾は腹付工の形状を変えた模型実験で得られた、ケーソンがある変位量のときの水平荷重の大小関係を整理している。これによると、模型実験を実物換算した断面に対して、提案法で計算して得られた滑動抵抗力の大小関係は、模型実験と概ね同じ傾向となることを確認している。

(2) 提案法の特徴

(1)の既往の研究成果を用いて、腹付工を有する防波堤の設計法を構築した(提案法)。提案法の特徴を、現行法との違いを明確にして整理する。提案法の主な特徴は、以下に示す5点である。

① 腹付工の滑動抵抗力の算定方法の変更(図-4参照)

滑動抵抗力の計算において、現行法では直線すべりを仮定しているが、提案法では円弧すべりを仮定した簡易

図-3 水平载荷後の地盤の変形状況⁴⁾ご加筆修正

図-4 滑動照査方法（提案法）

ビショップ法を用いる。

② 堤体と腹付工の間の壁面摩擦の考慮 (図-4 参照)

現行法で考慮していない堤体の壁面摩擦 ($\delta=15^\circ$) を、提案法では考慮する。これにより、堤体からの全作用が堤体から基礎マウンドのみに対して伝達していたものが、作用の一部が腹付工を介して基礎マウンドに伝達するようになる。

③ 腹付工のせん断強度の変更 (図-4 参照)

現行法では、割石と割石の摩擦抵抗 $f=0.8$ を用いて、腹付工のせん断抵抗角約 $\phi=39^\circ$ を設定しているが、提案法では仮想的な粘着力を見込んだせん断強度を設定する ($c=20.0\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$)。ここで、仮想的な粘着力を見込んだせん断強度は、港湾設計における基礎マウンドのせん断強度として、簡易ビショップ法を適用する際に一般的に用いられている値であり、腹付工に対してもこの値を適用する。仮想的な粘着力は、石材の強度の拘束圧依存性を、実用的な弾・完全塑性モデルに反映させるための役割を持つ。これらの値は、砕石の大型三軸圧縮試験の結果からやや安全側に求めた値⁷⁾であり、通常の捨石に対する標準的な強度定数として使用実績が多く妥当とされる値である。

④ 支持力照査における荷重分担比の導入 (図-5 参照)

堤体が作用を受ける時、支持力照査において、現行法

図-5 作用分担の概要

図-6 高橋らの遠心模型実験断面⁴⁾に加筆修正

図-8 新舎らの遠心模型実験断面⁸⁾に加筆修正

では水平荷重は堤体を介して全て基礎マウンドに直接伝達すると仮定する。一方、提案法では式(3)、式(4)に示す荷重分担比 r を導入することで、腹付工にも荷重分担比に応じた水平荷重の伝達を考慮して支持力照査を行う。

$$P_{H1} = r \cdot P_H \quad (3)$$

$$P_{H2} = (1-r) \cdot P_H \quad (4)$$

ここで、 P_H ：堤体に作用する水平波力、 P_{H1} ：堤体から基礎マウンドへの作用、 P_{H2} ：堤体から腹付工への作用、 r ：荷重分担比（原則 $r=0.5$ ）⁴⁾、である。

⑤ 腹付工の最小規定の見直し (図-5 参照)

現行法では、腹付工の高さ a は堤体の高さ H の $1/3$ 以上で、腹付工の上幅 b は高さ a と同等以上であることを求めているが、提案法では腹付工の高さ a と上幅 b はそれぞれ、堤体高さ H の $1/3$ 以上とする。

(3) 提案法による算定値の妥当性

a) 腹付工を含む基礎地盤の抵抗力

礫材はひずみ硬化する性質を有するため、安全側のせん断抵抗角を用いた極限平衡法である提案法では、実験から得られる極限值を再現することはできない。そこで、既往の研究成果である2つの遠心模型実験との比較することで、提案法で算定される抵抗力（深いすべりと浅いすべりのうち先に生じる方の抵抗力）の位置づけについて考察する。

高橋ら⁴⁾によって行われた遠心模型実験の断面を図-6に、ケーソン変位量と水平載荷荷重の関係を図-7に示す。この断面を実物換算し提案法を用いると、腹付工の極限耐力 2000kN/m が計算され、これは、模型実験において実物換算で 30cm 程度の水平変位が生じたときの水平載

図-7 高橋らの遠心模型実験結果との比較⁴⁾に加筆修正

図-9 新舎らの遠心模型実験結果との比較⁸⁾に加筆修正

荷荷重であつた.

新舎ら⁸⁾によって行われた遠心模型実験の断面を図-8に示す。ここでは、ケース1、ケース2、ケース2W、ケース3を検証の対象とする。新舎ら⁸⁾の実験から得られた、ケーソン変位と載荷重の関係を図-9に示す。これらの断面を実物換算し提案法を用いて算定された腹付工の極限耐力を図-9に併せて示す。提案法で計算された抵抗力は、模型実験において、いずれのケースでも実物換算で30cm程度以下の水平変位が生じたときの水平載荷荷重であった。

2つの遠心模型実験の結果を用いた検証から、提案法を用いて算定される腹付工の抵抗力は、堤体の水平変位が実物換算で大きくても 30cm 程度で発現する抵抗力であることがわかった。変動状態であるレベル1地震時の検討に用いる照査用震度は、防波堤の標準的な変位量の許容値を 30cm として算定される。また、防波堤の災害判定は一般に 30cm で判断されること等を考慮すると、30cm 程度の変位量は変動波浪に対して許容される変位量である。

以上より、提案法で計算される腹付工の抵抗力は、現行法で計算される腹付工の抵抗力より大きくなるが、実験結果と比較すると、堤体の水平変位が 30cm 程度以下で発現する抵抗力であること、および実験で得られる極限抵抗力に比べて小さいことから、十分に安全側の設定であり、極限平衡法を用いた設計法に用いる抵抗力として妥当であることが確認できた。

b) 荷重分担比

高橋ら⁴⁾は、異なる形状の腹付工を対象とした有限要素法による解析を実施し、ケーソンに載荷する水平荷重に対し、基礎マウンドや腹付工が破壊状態に達していない場合、底面摩擦力と腹付工からの反力の比は、ばらつきはあるものの、おおよそ 1:1 であることを示した。以下、荷重分担比が支持力耐力作用比に及ぼす影響を確認する。

図-10 に示す基本断面において、腹付工の高さと幅を変化させた断面を対象として、荷重分担比を変化させて支持力照査を行った。その結果、支持力耐力作用比に対する荷重分担比の感度は小さく、これは腹付形状に依ら

図-10 比較検討用基本断面

ず同じ傾向となることが確認された(図-11)。この理由は、荷重分担比が異なっても、基礎マウンドと腹付工の複合地盤に作用する荷重の合計は同じであるためである。すなわち、荷重が基礎マウンドと腹付工に配分されて作用することにより、各作用までのすべり円弧の中心からの距離が変わり、起動モーメントに違いが生じる。しかし、すべり円弧の半径は非常に大きいため、円弧中心からの距離が若干異なっても、起動モーメントが大きく異なることはないため、支持力耐力作用比に対する感度が小さくなる。

以上より、荷重分担比にはばらつきがあることと、荷重分担比の支持力耐力作用比に対する感度が小さいことから、荷重分担比を $r=0.5$ としてもよいと判断した。

c) 腹付工の形状

後述する腹付形状を変化させた比較検討において、腹付工の高さのみを変化させた場合においても、腹付工の上幅 b を高さ a と同等以上としなくても、腹付工を設置する効果が見られた。廣木ら⁹⁾は、形状の異なる腹付工を有する防波堤に対して、波浪を作用させた水理模型実験を行い、腹付工の大きさと変位の関係について整理し、腹付工の高さは $a \geq H/3$ 、腹付工の幅が $b \geq H/3$ で安定することを確認している。以上から、腹付工の最小規定を $a \geq H/3$ 、 $b \geq H/3$ とすることは妥当であることが確認できた。

(4) 提案法を用いる効果

提案法を用いた場合の、計算結果への影響を確認するため、検討用のモデル断面を設定する。腹付工の高さおよび上幅を堤体高さの 1/3 とした腹付形状を基本断面（図-10）とし、腹付工の大きさを変化させた断面を設定した。同じ滑動抵抗力および同じ支持力耐力作用比とするために、現行法と提案法で必要な腹付体積を比較した結果を図-12 に、深いすべりおよび浅いすべりにおけ

図-11 荷重分担比の感度

図-12 現行法と提案法の腹付体積の比較

るすべり面形状の違いを図-13に示す。

浅いすべりの場合、両設計法によるすべり面の位置に大きな違いはない。ただし、本検討モデルにおいて同じ滑動抵抗力を発揮するために必要な腹付量は、提案法では現行法に比べて平均的に40%程度削減できることがわかり、図-2に示される現行法が、腹付工の耐力を過小評価するという課題を改善していることが確認できた。

深いすべりの場合、両設計法によるすべり面の発生位置が大きく異なる。腹付工が荷重を分担すると、堤体から基礎マウンドに伝達する荷重の偏心量が少なくなり、すべり面の起点が堤体中心側へ移動することで、すべり面の発生位置が深くなる。これにより、すべり面より上の腹付重量が増え、すべり面位置での地盤の有効拘束圧が増加し、せん断抵抗が増す効果と、すべり面が延びることによってせん断抵抗が増す効果等で、支持力耐力作用比が大きく算定される。そのため、腹付工による荷重分担を考慮すると、本検討モデルにおいて同じ支持力耐力作用比となるために必要な腹付量は、平均的に25%程度削減できることがわかり、荷重分担比を導入することで、腹付工が有ることによる支持力の評価が改善されることが確認できた。

4. 断面形状の感度分析

断面形状の感度分析は、腹付工の大きさのみが異なるモデル断面を対象に実施する。検討用のモデル断面として、図-10に示す基本断面に対して、腹付工の高さのみ、

図-13 現行法と提案法のすべり面の比較

図-14 腹付形状とすべり面および耐力作用比の比較

または上幅のみを変化させた断面を設定した。分析結果を以下に示す。

(1) 腹付工の形状と耐力の関係

図-14に、腹付工の幅を拡げた場合と高さを高くした場合におけるすべり面の比較と、この時の腹付工の体積（以下、腹付体積という）と滑動および支持力の耐力作用比の関係を示す。滑動耐力作用比については、腹付工の大きさがある程度までは、腹付工の高さを高くした場合と、腹付工の幅を拡げた場合に大きな違いは見られず、両者とも腹付工の体積にほぼ比例して滑動耐力作用比が増加した。しかし、腹付工の幅については滑動耐力作用比の増加に上限がある。これは、腹付工の幅を広げるとすべり面が腹付工天端に向かって生じるようになり、すべり面の外側に腹付工を増やしても効果が無いためである。支持力耐力作用比についても滑動抵抗と同じ傾向となり、支持力耐力作用比に上限が見られた。

(2) 同じ抵抗力を有する腹付工形状

図-15は、同じ滑動抵抗力を発揮する腹付工の形状と腹付体積を比較したものである。本モデル断面では、腹付工の高さが高い方が、必要な腹付材料が少ないことがわかった。滑動のすべり面は、ほぼ水平方向もしくは腹付天端へ向かって発生するため、腹付工を高くした分はせん断抵抗が増加する側に寄与する。そのため、腹付工の幅を広げてせん断抵抗面を長くするよりも、腹付工を高く盛ってせん断抵抗を増した方が効果的となる。

図-16は、同じ支持力耐力作用比を有する腹付工の形

図-15 同じ滑動抵抗力を有する腹付形状と腹付体積

図-16 同じ支持力耐力作用比を有する腹付形状と腹付体積

状と腹付体積を比較したものである。本モデル断面では、腹付工の幅が広い方が、必要な腹付材料が少ないことがわかった。支持力のすべり面は腹付工の法尻へ向かって発生するため、腹付工を高くした場合はすべり面のせん断抵抗を増す側と、すべりを発生させる荷重側の両方に寄与する。一方、腹付工の幅を広げた場合は、すべりを発生させる荷重を増やさずに、せん断抵抗のみを増加できる。そのため、腹付工を高く盛るより、腹付工の幅を広げる方が効果的となる。

(3) まとめ

提案法を用いた感度分析の結果、同じ滑動抵抗力、あるいは、同じ支持力耐力作用比でも、様々な腹付形状を選択できることがわかった。今回の検討条件下では、滑動破壊（浅いすべり）に対しては腹付工を高くした方が少ない材料で効果が得られ、支持力破壊（深いすべり）に対しては腹付工の幅を広げた方が少ない材料で効果が得られた。これらのことを考慮し、腹付工の設計を行うことで、合理的な設計が可能となる。

5. おわりに

既往の研究成果を活用し、防波堤の補強対策として利用される腹付工に関する設計法を構築した。この設計法が要求する腹付工は、現行の設計法より小さな腹付形状であるが、既往の遠心模型実験の結果と比較すると十分安全側であることを示した。また、新たな設計法を用いた腹付工の断面形状に関する感度分析の結果から、滑動破壊に対しては腹付工の高さを高くし、支持力破壊に対しては腹付工の幅を広げる方が効果的であることを示し

た、以上の結果から、提案法を用いることにより、腹付工の規模は小さくすることができ、かつ腹付工の断面形状を探索できるようになった。これにより、現地状況に応じた自由度の高い腹付工の設計が可能となった。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1181p，1999.
- 2) 赤塚雄三，竹田英章，蓮見隆：混成堤の堤体背後に設置したコンクリート方塊あるいは割石の滑動抵抗，第22回海岸工学講演会論文集，pp.421-425，1975.
- 3) 菊池喜昭，新舎博，江口信也：ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果，港湾技術研究所報告，第37巻，第2号，pp.29-58，1998.
- 4) 高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，渡部要一，高野大樹：津波に対するケーソン式防波堤マウンドと腹付工の安定性，港湾空港技術研究所報告，第54巻，第2号，pp.21-50，2015.
- 5) 高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，丸山憲治：腹付工を含むケーソン式防波堤マウンドの安定性評価手法の検討，第51回地盤工学研究発表会講演集，pp.1071-1072，2016.
- 6) 高橋英紀，佐々真志，森川嘉之，丸山憲治：ケーソン滑動時における防波堤背後の腹付工の耐力発現特性，第52回地盤工学研究発表会講演集，2017。（印刷中）
- 7) 小林正樹，寺師昌明，高橋邦夫，中島謙二郎，小谷拓：捨石マウンドの支持力の新しい計算法，港湾技術研究所報告第26巻第2号，pp.371-411，1987.
- 8) 新舎博，海野寿康，菊池喜昭，森川嘉之：砂地盤上の裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性検討，地盤工学ジャーナル，pp.103-117，2014.
- 9) 廣木智秀，中川洋一，山下裕之，河野真典，柏原裕彦，中村秀一，小林邦夫，国栖広志：補強体を有する防波堤の安定性に関する実験的研究，土木学会論文誌 B2（海岸工学），pp.801-805，2011.

(2017.2.2 受付)

DESIGN METHOD OF REINFORCING EMBANKMENT FOR BREAKWATERS AND SENSITIVITY ANALYSIS BY ITS SCALE

Takehiko SATO, Masafumi MIYATA, Masahiro TAKENOBU
and Hidenori TAKAHASHI

It is well known that the current method designing a reinforcing embankment for a caisson type breakwater has some problems such as underestimating the load bearing capacity of the embankment. Thus, the present study established a new design method for the reinforcing embankment, based on the past research results. There are three features of the proposed method: 1) a new calculation method for load bearing capacity of the embankment, 2) introducing load distribution effects exerted by the embankment, and 3) relaxation of the present prescribed minimum size of the embankment. The size of embankment calculated by the proposed method would be smaller than one by the current method, and it was confirmed that it was sufficiently safe compared with model experiment results. Additionally, sensitivity analyses were conducted to understand the effect of the embankment shape change on the bearing capacity. Those showed that the increment of the height and width of the embankment were effective for the failures of sliding and bearing capacity, respectively. By employing the proposed method and understanding the results of sensitivity analysis, it would enable a more rational design of the reinforcing embankment.