腹付工を含むケーソン式防波堤マウンドの 支持力に関する実験と解析

高橋 英紀¹・佐々 真志²・森川 嘉之²・
高野 大樹²・橋爪 秀夫³・丸山 憲治³

¹ 正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
E-mail: takahashi-h@pari.go.jp

² 正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³ 正会員 ジオデザイン 技術部 (〒108-0023 東京都港区芝浦 3-20-6)

ケーソン式防波堤に津波が来襲する場合、ケーソン側面に大きな波力が、底面に揚圧力が作用する。現在、ケーソン直背後に石材による腹付工を設置する補強方法が検討されているが、マウンドと腹付工が複合した地盤の抵抗メカニズムは明らかになっていない。そこで本研究では、実物スケールの応力を再現できる遠心力場で防波堤模型に対して水平載荷実験を行い、その変形・破壊特性を調べた。破壊モードを可視化するために細砂を用いた載荷実験を実施し、2種類のすべりを伴う破壊モードの観察に成功した。砕石を用いたケースでも、載荷に対して同様の抵抗メカニズムであると考えられた。また、円弧すべり計算によって、実験結果の再現を試みた。すべり面の位置に関しては課題が残ったが、限界荷重については精度よく再現できた。

Key Words : breakwater mound, embankment, bearing capacity, centrifuge, circular slip analysis

1. はじめに

ケーソン式防波堤に津波が来襲する場合、ケーソン側面に大きな波力が、底面に揚圧力が作用する。東日本大震災においても、来襲した津波によって多くのケーソン式防波堤が被害を受けた。このため、ケーソンの直背後に石材による腹付工を設置する補強方法が検討されている(図-1参照)。今までも、高波対策として腹付工が適用された事例もあるが、マウンドと腹付工が複合した地盤の抵抗メカニズムは十分には明らかになっておらず、安定性評価手法も確立されていない。

菊池ら¹⁾は、腹付工を有する防波堤ケーソンに対して、大型の模型載荷実験を行い、ケーソン後趾端部を始点とするすべり面が発現することを示した。また、ケーソン

後趾端部と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た計算を行うことを提案している。ただし、この研究の実験では、ケーソン下部を始点とする円弧すべり面が発現していないため、2種類の円弧すべり面を仮定する方法の妥当性は検証されていない。高橋ら²⁾は、腹付工を有する防波堤ケーソンに対して、遠心力場で載荷実験を実施した。実験では、腹付工の形状や卓越させる破壊モードを変化させて、腹付工の効果を調べている。

この研究によって、腹付工の効果がより明確にはなったが、用いたマウンドと腹付工の石材の粒径が実物の比に相当する大きなものであったため、すべり面が発現せず、耐力の評価方法の検討までには至っていない。新倉ら³⁾も、遠心力場で載荷実験を実施しており、ケーソン後趾端部を始点とするすべり面が発現することを示し、有限要素法解析と円弧すべり計算の精度検証を行っている。ただし、ケーソン下部を始点とする円弧すべり面は発現していない。

本研究では、腹付工を含むケーソン式防波堤模型に対して、遠心力場で水平載荷実験を行い、その変形・破壊特性を調べた。そこでは、すべり面の発現をより明確に観察できるように、実物の比に相当する粒径の石材だけでなく、細砂(硅砂7号)を用いた載荷実験も実施した。細砂を用いることでひずみが局所化しやすく、すべり面

図-1 ケーソン式防波堤での腹付工

が発達する。なお、マウンドや腹付工などの地盤の変形・破壊特性は地盤内応力に大きく依存するため、遠心模型実験手法を利用し、実物スケールの応力を再現した。また、模型実験で発現したすべり面に基いて、円弧すべり計算を実施し、腹付工を含むケーソン式防波堤マウンドの安定性に対する円弧すべり計算の妥当性を検証した。

2. 遠心模型実験

(1) 実験模型の作製方法

模型の概略断面図を図-2に示す。模型ケーソンを載荷装置で静的に水平載荷し、破壊モードを観察するとともに、水平載荷荷重とケーソンの水平変位の関係を求めた。模型に作用させる遠心加速度は50g (g : 重力加速度)としたので、図に示した寸法の50倍の大きさの実物スケールの防波堤を再現したことになる。

マウンドと腹付工には、順に3種類の地盤材料を適用し、載荷実験を行った。実験ケースの一覧を表-1に示し、地盤材料を図-3に示す。3種類の材料は、平均粒径が10mm 碎石と宇部硅砂1号A、飯豊硅砂7号であり、それらの基本的な物性を表-2に示している。表に示すように、10mm 碎石1つあたりの平均的な質量は1.26gであり、実物寸法換算した重量は158kgとなる。また、実物寸法に換算すると27~73cmとなり、現場で用いられるマウ

表-1 実験ケース一覧

ケース名	地盤材料	腹付工
L0	10 mm 碎石	無し
L1		有り
M0	宇部硅砂	無し
M1		有り
S0	飯豊硅砂	無し
S1		有り

(a) 10mm 碎石 (b) 宇部硅砂 (c) 飯豊硅砂

図-3 用いた地盤材料

表-2 地盤の基本的な物性

	粒径	1粒の質量	乾燥密度
10 mm 碎石	5.4~14.5 mm	1.26 g	1.59 g/cm ³
宇部硅砂	1.7~4.8 mm	0.037 g	1.49 g/cm ³
飯豊硅砂	0.1~0.85 mm	—	1.59 g/cm ³

ンド材と同様の重量と寸法を持つ碎石と言える。実際のマウンドと腹付工のせん断特性、特にひずみの局所化する特性を模型実験で再現するためには、模型全体と石材の各寸法比を合わせる必要があり、この碎石の寸法が適当である。一方、宇部硅砂の重量と寸法は実物換算で4.6kgと8.5~24cmであり、現場のマウンド材よりも多少小さい。また、飯豊硅砂の実物換算の寸法は、0.5~4.3cmであり、現場のマウンド材よりもかなり小さい。ただし、硅砂を実験に使うことによって、すべり面を明確に観察することが可能となる。

模型地盤の作製方法は以下の通りである。初めに、グリースを塗布したメンブレンを試料容器側面に貼り付けた。これは、碎石と試料容器側面間の摩擦を極力減らすためである。次に、碎石を投入して3~4cmの厚さに堆積させ、碎石間の噛み合わせをよくするために軽くタッピングした。これを繰り返して地表面の高さまで碎石を積み上げた。この方法で作製した地盤の乾燥密度は表-2に示すとおりである。別途実施した最大・最小密度試験の結果から、実験での密度はおおよそ中程度の詰まり具合であった。また、地表面を極力平面的になるように均し、特にケーソン模型を設置する個所については慎重に均した。

マウンド上に設置するケーソンとしては、アクリル板を貼り合わせて作製した箱に砂と鉛玉を詰め(図-4参照)、模型ケーソンの底面には硅砂を貼って摩擦力を増した。

図4 模型ケーソン

図5 水圧シリンダ式水平载荷装置

硅砂を貼り付けたアクリル板と碎石の摩擦試験の結果から、摩擦係数は $\mu=0.58\sim0.68$ であった。

(2) 遠心模型実験方法

実験に使用した遠心模型実験装置は港湾空港技術研究所が所有する装置 Mark II⁴⁾であり、最大搭載重量は2,760 kg と大型のものである。相似則については文献⁵⁾を参照されたい。地盤模型を含んだ試料容器を遠心模型実験装置のプラットフォームに設置し、水平载荷装置と水平変位計を取り付けた。水平载荷装置は、水圧シリンダ式のものであり、最大载荷可能ストロークは75 mm (実物換算値 37.5 m)、最大载荷可能荷重は7.4 kN (実物換算値 18.5 MN) である(図-5 参照)。さらに、地盤変形を観察するためのデジタルカメラを試料容器脇に設置した。設置した模型に遠心力を加え、一定速度で水平载荷を行った。水平载荷速度は模型スケールで0.158 mm/sec とした。

(3) 模型実験結果

a) 破壊モードの観察

ケーソンを载荷点位置で2 m 以上(実物換算値、ケーソン幅に対して18%)と大きく水平変位させて、地盤を十分に変形させた地盤の様子を図-6 に示す。すべり面が発現したケース S0 と S1 の飯豊硅砂での結果を見ると、腹付工が無い場合にはケーソン下部に主働くさびが形成され、その主働くさびに対してその脇のマウンドが受働抵抗し、変位している。これは過去の知見⁶⁾でも明らかになっている一般的な破壊モードであり、現行の港湾技術基準⁷⁾では円弧すべり解析でこのモードでの安定性を評価することになっている。一方、腹付工が有る場合には、腹付工が無い場合と同様に主働くさびが形成されるが、それ以外に、ケーソン後趾端部から伸びるすべり面が観察される。つまり、ケーソン後趾下部の主働くさびおよびそれに抵抗する受働領域と、ケーソン後趾端部からのすべり面が同時に発生した。菊池ら⁸⁾が指摘するよ

(a) ケース L0 : 10 mm 碎石, 腹付工無し

(b) ケース L1 : 10 mm 碎石, 腹付工有り

(c) ケース M0 : 宇部硅砂, 腹付工無し

(d) ケース M1 : 宇部硅砂, 腹付工有り

(e) ケース S0 : 飯豊硅砂, 腹付工無し

(f) ケース S1 : 飯豊硅砂, 腹付工有り

図-6 水平载荷後の地盤の変形状況

うに、腹付工が有る場合には、この2つの破壊モードを考慮して耐力を評価する必要があることが分かった。

地盤材料の粒径が大きい他のケース L0, L1, M0, M1 では、マウンドと腹付工においては、すべり面が観察できない。これは粒径が大きいため、この程度の変位量ではひずみの局所化が進まないためである。マウンドと腹付工は極限状態に達していないとも言える。ただし、水平载荷に対してケーソン後趾下部の地盤が沈下し、その領域とケーソンに対して脇のマウンドや腹付工が受働抵抗して、変位している。つまり、水平载荷に対する抵抗

図-7 荷重～変位関係

メカニズムはケース S0 と S1 と同じと言える。なお、ケーソンは 2 m 以上と大きく変位しており、構造物としては被災したと言えるレベルである。このことから、2 つの破壊モードで耐力を評価するとしても、極限状態でのせん断強度を見込まないことが必要である。

b) 荷重～変位関係

荷重実験におけるケーソンへの載荷荷重と水平変位量の関係を図-7 に示す。図-7(a)に示した 10 mm 碎石のケース L0 と L1 の結果を見ると、腹付工が無い場合にはケーソンの変位量が 1.5 m 程度で載荷荷重はピーク値に達し、マウンドが限界状態に達した。一方、腹付工が有る場合には、変位量の増大とともに載荷荷重は増え続け、ピーク値に達していなかった。ただし、腹付工を設置することで耐力が大幅に増していることが分かる。図-7(b)に示した宇部硅砂のケース M0 と M1 でも同様の傾向で

あった。なお、1.0 m を超えると急減に荷重が小さくなっているが、これはケーソンへの載荷荷重が大きくなり、転倒モードが卓越したためと考えられる。

図-7(c)に示した飯豊硅砂のケース S0 と S1 では、腹付工が無い場合にケーソンの変位量が 0.8 m 程度の時点で載荷荷重はピーク値となり、マウンドが限界状態に達していた。また、腹付工が有る場合、変位量が 0.8 m 程度でピーク値となっていた。これらの変位に達した時点で、マウンドや腹付工にすべり面が発現しており、荷重～変位関係においても、地盤が限界状態に達していたことが分かった。

3. 円弧すべり計算

(1) 計算方法

遠心模型実験を円弧すべり計算で再現し、その妥当性を検証した。円弧すべり計算の方法は、現行の港湾技術基準⁷⁾に倣って簡易ビショップ法とした。計算は、対象断面を短冊状に分割することによって行った。腹付工が無い場合は、港湾技術基準⁷⁾に従って、マウンドに作用する分布荷重と水平力を求め、円弧すべりの外力条件を設定することができる。一方、腹付工が有る場合、港湾技術基準⁷⁾の方法をそのまま用いることはできない。そこで、腹付工を有する防波堤の計算は以下のように考えた。仮定する円弧すべり面を図-8 に示す。遠心模型実験によると、ケーソン底面からのすべり面とケーソン後趾端部からのすべり面の 2 つのすべり面が発現していた。これに基づいて、図に示すように、Slip-A と Slip-B の 2 つのすべり面を仮定した計算を行い、円弧すべり計算の妥当性を検証した。なお、実際にはすべり面の形状は円弧では無いが、計算の簡便性から円弧すべり計算で安定性を照査した。

図-8 に示すように、水圧差によって生じる水平力は、ケーソンの底面摩擦力 P_a と腹付工への水平力 P_b に分担される。腹付工への水平力は、腹付工側面の midpoint に作用すると仮定した。また、揚圧力を差し引いたケーソンの水中重量は、マウンドへの載荷荷重 P_q (作用位置はケーソン後趾端部から b' とする) と腹付工側面に作用する摩擦力 P_v に分担される。腹付工側面の鉛直方向の摩擦力は、水平力に摩擦抵抗角 $\tan \delta$ を掛け合わせたものとした。 P_a, P_b, P_q, P_v, b' の 5 つのパラメータに対して、ケーソンの鉛直・水平・モーメントのつり合い式と P_b と P_v の関係式の 4 つの式しかなく、式が 1 つ足りない。Slip-B が卓越する場合、 P_b が決まるために、他のパラメータも決まる。一方、Slip-A が卓越する場合、何かしらの仮定が必要になる。例えば、水平力に対するマウンドと腹付工の荷重分担比 (P_a と P_b の比) を仮定する方法が挙げられる。これによ

図-8 円弧すべり面と荷重

表-3 計算に用いた土質パラメータ

	水中単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
マウンド	9.7	0	44.7
腹付工	9.7	0	44.7
基礎	10.4	0	45.0

って5つのパラメータを定めて、円弧すべり計算の外力条件を設定でき、計算を行える。なお、再現を試みる遠心模型実験ケース S1 においては Slip-B が発現しており、 P_b が決まるために、荷重分担比を定める必要は無い。

計算断面は、遠心模型実験ケース S0 (腹付工無し) と S1 (腹付工有り) での断面に対して、実物スケールに換算して用いた。計算に用いた土質パラメータは表-3 のものである。水中単位体積重量は模型実験で計測したものである。マウンドおよび腹付工に与えるせん断強度には、飯豊砂に対して別途実施した三軸圧縮 CD 試験結果を用いた。基礎のせん断強度は仮定したものである。

(2) 計算結果

円弧すべり計算において、耐力作用比が 1.0 となるすべり面は図-9 のようになった。図には、実験ケース S0 と S1 で得られたすべり面も描いている。腹付工が無い場合、計算と実験のすべり面の位置は整合していた。腹付工が有る場合、Slip-B については腹付工とマウンド境界面に位置し、実験で得られたすべり面は深部に位置していた。また、Slip-A については、円弧すべり面は実験でのすべり面よりも浅く位置していた。この差異の原因は不明であるが、実験ではケーソンが傾斜し始めており、より大きな鉛直力が腹付工に作用した可能性も考えられる。また、計算条件での仮定が結果に影響を与えた可能性も考えられる。なお、模型実験での主働くさびの形成とそれに対する受働抵抗という支持力破壊モードに対して、円弧すべり計算で単純化しているため、この差異については大きな問題ではないと考えた。

円弧すべり計算において耐力作用比が 1.0 となる水平荷重を求め、実験結果と併せて示したものが図-10 である。これは、実験ケース S0 と S1 の荷重～変位関係に、円弧すべり計算での限界荷重を描き足したものである。また、腹付工を有する断面で Slip-B が発現する水平荷重

(a) 腹付工が無い場合 (実験ケース S0)

(b) 腹付工が有る場合 (実験ケース S1)

図-9 計算と実験で得られた円弧すべり面

図-10 計算と実験で得られた限界荷重

も示している。図に示すように、円弧すべり計算は、腹付工が無い場合も有る場合も実験結果を精度よく再現できていた。また、腹付工が有る場合、Slip-A と Slip-B の限界荷重はかなり近い値である。このため、遠心模型実験では、Slip-A と Slip-B のどちらかだけが卓越して発現するのではなく、両方のすべり面が現れたと考えられる。これらのことから、腹付工を含むケーソン式防波堤マウンドの安定性評価において、円弧すべり計算の精度は高いと言える。ただし、マウンドと腹付工の地盤材料が石材の場合、大きな変位が生じてから限界荷重に達する。このため、円弧すべり計算で与えるせん断強度については慎重な検討が必要である。

(3) 円弧すべり計算による安定性照査

上述のように、円弧すべり計算によって、腹付工を含む防波堤マウンドの安定性を評価できることが分かった。荷重分担比を利用して、円弧すべり計算を用いた安定性を評価する照査フローの例として図-11 のものが挙げられる。始めに、断面や土質定数、ケーソンへ働く水平力と鉛直力を設定する。続いて、Slip-B の照査へ進む。こ

4. おわりに

本研究では、腹付工を含むケーソン式防波堤模型に対して、遠心力場で水平載荷実験を行い、その変形・破壊特性を調べた。その結果、細砂を地盤材料として使うケースでは、2種類のすべりを伴う破壊モードの観察に成功した。ケーソン下部に主働くさびと受働抵抗部が形成されるモードと、ケーソン後趾端部から伸びるすべり面が形成される破壊モードである。砕石を地盤材料としたケースでも、載荷に対して同様の抵抗メカニズムであると考えられた。また、円弧すべり計算によって、実験結果の再現を試みた。すべり面の位置に関しては再現が難しかったが、限界荷重については精度よく再現できていた。このため、腹付工を含む防波堤マウンドの安定性評価に円弧すべり計算は有用であると考えられた。

参考文献

- 1) 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, Vol. 37, No. 2, pp.29-58, 1986.
- 2) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹, 青木亮介, 丸山憲治: ケーソン式防波堤の腹付工による耐力増加に関する遠心模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2 pp. L_870-L_875, 2014.
- 3) 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, Vol.9, No.2, pp. 103-117, 2014.
- 4) 北詰昌樹: 新遠心模型実験装置の開発と研究への適用, 港湾技術研究所資料, No. 812, 35 p., 1995.
- 5) 寺師昌明: 遠心力載荷装置の開発とその適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 24, No. 3, pp. 73-122, 1985.
- 6) 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方法, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, pp. 371-411, 1987.
- 7) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp. 831-833, 2007.

図-11 円弧すべり計算を用いた安定性照査フロー

ここでは、ケーソンへ作用する水平力が、円弧すべり計算で得られる腹付工から反力とケーソンの底面摩擦力の合力を超えないかを照査する。超えないことが確認できれば、Slip-A の照査に進む。ここでは、荷重分担比を設定し、腹付工とマウンドに作用する荷重を求め、円弧すべり計算によって耐力作用比を求める。これが 1.0 を満たすならば、安定性が保てると判断することができる。この安定性照査フローに関しては、今後種々の断面に対して、妥当性を検証していく必要がある。

MODEL TESTS AND ANALYSES ON BEARING CAPACITY OF CAISSON-TYPE BREAKWATER MOUND CONTAINING REINFORCING EMBANKMENT

Hiddenori TAKAHASHI, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA, Daiki TAKANO,
Hideo HASHIZUME and Kenji MARUYAMA

Caisson-type breakwaters attacked by tsunami have large wave force on the side and uplift force on the bottom. One of the reinforcement methods is to pile up rocks behind the caisson, and the resistance mechanism, however, has not been clarified yet. The present study investigated the deformation and failure characteristics of a breakwater subjected to a horizontal load by using the centrifuge technique, which can simulate the prototype scale stress. Fine sand was utilized to visualize a failure mode, and two modes could be seen in the tests. The resistance mechanism in the case of rocks would be thought to be the same as one of sand. In addition, the study conducted circular slip analyses. Although the location of the slip surface had some problems, it could accurately simulate the limit load.