グラウンドアンカーによるケーソン式防波堤 の滑動防止工法に関する水理実験

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS ON SLIDING STABILITY OF CAISSON BREAKWATER WITH GROUND ANCHOR FOR REINFORCEMENT

吉田誠¹・清宮理²・田代聡一³・合田和哉⁴・竹家宏治⁵

Makoto YOSHIDA, Osamu KIYOMIYA, Soichi TASHIRO, Kazuya GOUDA and Koji TAKEYA

¹正会員 修(工) 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学術院創造理工学部社会環境工学科
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³正会員 農修 東亜建設工業株式会社 土木事業本部
(〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー31F)

⁴正会員 博(工) 東洋建設株式会社 土木事業本部
(〒135-0064 東京都江東区青海2-4-24 青海フロンティアビル)

⁵正会員 株式会社エスイー 営業統轄本部
(〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-3-1 新宿アイランドウイング)

The rise of sea levels and the increase of wave forces which has been caused by global warming will cause the failure of breakwaters. The ground anchor for reinforcement is proposed as an anti-sliding method of caisson breakwaters. In this study, we conducted hydraulic model experiments with a scale of 1 to 30 model in order to investigate the sliding stability of caisson breakwaters with the ground anchor for reinforcement against wave forces. The results show that the caisson breakwater with the ground anchor for reinforcement increases the sliding resistance and reduces the sliding distance, and the larger the initial tension of the anchor is, the more effective as an anti-sliding method.

Key Words : *Ground anchor, Caisson breakwater, Wave force, Sliding stability, Rubble mound, Hydraulic model experiment*

1. はじめに

人間活動に伴う温室効果ガス濃度の増大に起因する地球温暖化は気象・海象の変化を引き起こし、今後、自然災害の増加などが懸念されている。ICPP(Intergovernmental Panel on Climate Change)のレポートによると、CO₂排出量の最も多いシナリオでは、100年後の世界の平均気温は約4度上昇すると予測されている。気温上昇による地球温暖化は、海面上昇や台風の巨大化による水深の増加、波力増大などを引き起こし、防波堤の安定性や機能が損なわれる可能性が指摘されており¹⁾、防波堤の滑動防止対策などが必要とされている。わが国で多く採用されているケーソン式防波堤の滑動防止対策についてみると、被災後復旧時の対策として、ケーソン幅の拡張や裏込材によるカウンターを設置などの事例がある。

一方、グラウンドアンカーによる滑動防止対策が

提案されている。これは、ケーソンと直下の原地盤の間にアンカーを設置し、アンカーに初期緊張力を導入してケーソン底面の摩擦力を増加させることにより、ケーソンの滑動安全率の向上、滑動量の低減を図るとともに、ケーソンの流失や転倒を防止する工法である。しかし、アンカーによる滑動防止効果は十分には明らかにされていない。本研究では、アンカーで補強したケーソン式防波堤の水理実験を実施し、アンカーによる滑動防止効果に関する基礎的な検討を行った。

2. アンカーによる滑動防止対策工法の概要

ケーソン式防波堤にアンカーによる滑動防止対策工法を適用した場合の概念を図-1に示す。図-1ではケーソン1函あたりアンカー3本を設置する例を示している。アンカーは、ケーソンの幅方向の中心位置

The diagram illustrates a pile foundation system with two views:

- 平面図 (Plan View):** Shows a rectangular pile cap with a width labeled "幅". Three red dots within the cap represent the locations of the "アンカー" (anchors).
- 断面図 (Cross-section View):** Shows the vertical arrangement of components from top to bottom:
 - 上部工 (Superstructure):** The top part of the foundation.
 - ケーソン (Caisson):** The main body of the pile.
 - 中詰砂 (Internal Filling Sand):** Sand filling the space between the caissons.
 - 捨石マウンド (Gravel Mound):** A layer of gravel below the caisson.
 - アンカー (Anchor):** A red line extending from the cap through the mound and into the "原地盤" (Original Ground).
 - アンカー体 (Anchor Body):** The lower part of the anchor in the ground.

A blue line with a triangle symbol on the left indicates the water level.

図-3 安全率算定モデル

計測器として波圧計，変位計および張力計を使用し，ケーソン前面および底面に作用する波圧，ケーソンの水平・鉛直変位，アンカーとして使用したワイヤに作用する張力を計測した．また，波高計によりケーソン付近の波高を計測した．図-4に計測器設置位置を示す．

図-4 計測器設置位置

4. 実験結果

(1) 作用波力について

図-5に，計測波圧から求めた水平波力および揚圧力の時刻歴をCASE1およびCASE5について示す．水平波力および揚圧力は，両ケースとも同様の波形を示していることから，アンカーの有無や初期張力の違いが波力に及ぼす影響は小さいと判断される．波力の経時変化に着目すると，20秒付近まで振幅が一定割合で増加し，その後3,4波は定常状態となるが，30秒付近から波力の振幅および平均値が増加し約37秒の時点で波力がピークに達している．30秒付近で波力の振幅が増加したのは，ケーソンで反射した波を造波機で完全には吸収制御できなかったためと考えられる．一方，波力の平均値が増加したのは，越波水量が還流ポンプの排水能力を超えたことにより水位が2cm程度上昇したためと推察される．

図-6に，37秒付近における水平波力および揚圧力の最大値を全ケースについて示す．図中には合田式による値も併せて示している．水平波力，揚圧力とも各ケースの最大値に有意な差は認められない．揚圧力は合田式と良い対応を示しているが，水平波力

(a) 水平波力

(b) 揚圧力

図-5 水平波力および揚圧力時刻歴

図-6 水平波力および揚圧力の最大値

図-7 波力最大時の波圧分布

は合田式に対して2～3割小さくなった．

水平波力最大時におけるケーソン前面および底面に作用する波圧分布を図-7に示す．図中には合田式

から算定した波圧分布も併せて示している。CASE3ではケーソン前趾の底面波圧が小さな値を示しているが、それ以外の波圧は各ケースとも同様の分布形状を示している。CASE3でケーソン前趾の底面波圧が小さくなったのは、波圧計の受圧面が捨石マウンドの碎石によって塞がれてしまったためと考えられる。実際の値は、他のケースと同様にケーソン前趾における前面波圧とほぼ等しくなると考えられ、約 2kN/m^2 であったと推測される。実験による前面波圧分布は合田式と良く似た形状を示しているが、その値は1～5割小さい。この原因として、合田式が波圧を大きめに推定する傾向にあることが挙げられる³⁾。また、中田ら⁴⁾によると低天端の場合には合田式と比較して波力が小さくなることが指摘されており、本実験のケーソンも天端高が低い(相対天端高0.31)、同様の現象が生じたと考えられる。

(2) ケーソンの変位特性

計測変位から求めたケーソン中心の水平・鉛直変位および回転角の時刻歴を図-8に示す。ただし、水平、鉛直変位はそれぞれ港内側および下向きを正とし、回転角はケーソンが港内側へ倒れる方向を正としている。なお、時刻歴波形にはノイズと思われる高周波成分が多く含まれていたため、5Hzローパスフィルターによる平滑化処理を行った。ケーソンは主に2度大きく変位しており、1度目は8～21秒の間(「変位段階Ⅰ」と定義)、2度目は28～40秒の間(「変位段階Ⅱ」と定義)である。ケーソンの変位は、変位段階Ⅰでは波力振幅の増加中に、変位段階Ⅱでは波力の振幅と平均値の増加中に生じており、波力が定常状態あるいはピークに達したときに変位が停止する結果が示されている。このことは、滑動後にケーソンの安定性が向上していることを示唆している。宮田ら⁵⁾によると、ケーソンは捨石マウンドの表層碎石を引きずりながら変位することが指摘されており、捨石マウンドの剛性や強度がケーソンの滑動安定性に影響することを示唆している。このため、本実験ではケーソンのロッキング運動にともなう捨石マウンドの締めめや、碎石がケーソンに引きずられて捨石マウンド表層の一部が密になることで捨石マウンドの剛性や強度が増加し、ケーソンの滑動安定性が向上していたと推察される。変位段階Ⅰと変位段階Ⅱのケーソンの水平変位を比較すると、後者の方が増加量が大きくなっている。これは、変位段階Ⅱでは波力が大きいこと、水位上昇によってケーソンの浮力が増加したことによると考えられる。40秒以降についてみると、CASE1およびCASE2における水平変位は概ね一定値に収束しているが、CASE3～5ではわずかに減少する傾向を示している。ケーソンの鉛直変位時刻歴によると、波力が作用し始めてからピークに達する40秒付近まで、概ね一定の傾きで増加しており、水平変位とやや異なる挙動を示していることから、ケーソンの沈下はいわゆる

図-8 ケーソンの水平・鉛直変位および回転角の時刻歴

図-9 ケーソン水平変位時刻歴の各ケースの比較

る支持力破壊ではなく、ケーソンのロッキング運動に起因する捨石マウンドの締固めが主な原因であると推察される。回転角も概ね一定の傾きで増加しておりケーソンは港内側へ倒れるように変位しているが、その値は最大でも0.6度と小さいことからケーソンの変位モードは滑動が卓越していたと判断される。40秒を過ぎてから、鉛直変位はやや増加傾向にあり、その増加量はアンカー張力が大きいケースほど小さくなる傾向を示している。回転角はわずかに減少傾向を示しているがその値は小さい。

ケーソンの変位時の挙動を各ケースで比較するため、ケーソン水平変位時刻歴の各ケースの比較を図-9に示す。各変位段階における変位発生時刻は、無対策の場合(CASE1)と比べてアンカーありの場合(CASE2～5)では2,3秒遅れており、アンカーによる補強でケーソンの滑動抵抗が増加したと判断される。また、CASE5では変位終了時刻が他のケースと比較して大幅に早くなっており、アンカー張力が大きい場合、滑動抵抗がさらに増加することを示している。各変位段階における変位増加量や変位継続時間は、アンカー初期張力が大きいケースほど小さくなる傾向が認められることから、アンカーによる補強でケーソンの滑動量が抑えられ、かつ初期張力が大きいほどその効果も大きくなることがわかる。

ケーソン中心の水平および鉛直変位の最大値を図-10に示す。ケーソン水平変位は、アンカー初期張力が大きいケースほど小さくなっており、アンカーによるケーソンの滑動防止対策が有効である結果が示されている。図-10をアンカー初期張力と最大変位の関係と見た場合、初期張力が0.1kN増加したときのケーソン水平変位の減少量が最も大きいのはCASE1とCASE2の間(約6mm)であることから、初期張力が小さい場合でもアンカーによる補強がケーソンの滑動防止対策として有効であると考えられる。ケーソンの鉛直変位もアンカー初期張力が大きいケースほど小さくなっている。これは、アンカー初期張力により捨石マウンドの拘束圧が増えて剛性が増した結果、締固めによる捨石マウンドの沈下が抑制されたためと推察される。

(3) アンカーの張力特性

アンカー張力の時刻歴を図-11に示す。張力は8秒付近から減少し始め、時間を追うごとに減少割合が低下する傾向を示している。一方、波力1波ごとの挙動をみると、ケーソンの変位振幅に対応してアンカー張力も増減しており、この傾向は波力が大きくなる30～40秒で顕著である。このことは、アンカーがケーソンの滑動抑制に寄与していることを示唆している。

アンカー張力の減少原因を調べるため、図-12にケーソン鉛直変位とアンカー張力低減量の履歴を示す。同図によると、CASE4およびCASE5において両者の間に線形的な関係が認められる。CASE2およびCASE3についても張力低減量がそれぞれ初期張力の約半分の0.05kNおよび0.1kNになるまでは線

注) 括弧内の数字は、アンカー初期張力の値

図-10 ケーソンの水平および鉛直変位の最大値

図-11 アンカー張力時刻歴

図-12 ケーソン鉛直変位とアンカー張力低減量の履歴

図-13 アンカー張力の低減量最大値および低減率

形関係が認められる。このことから、アンカー張力の減少原因は、主にケーソンの沈下であると判断される。上記の線形関係について図-12中に近似線を示すが、各ケースの近似線の傾きは0.10～0.13の範囲内にありお互いに近い値を示している。このこと

は、ケーソン鉛直変位とアンカー張力低減量の関係が、アンカー初期張力とは関係なしに堤体条件等その他の条件により一義的に決まる可能性があることを示している。CASE2およびCASE3では、アンカー張力減少量が初期張力の約半分に達した後に増加しにくくなる傾向を示している。これはケーソン水平変位が急増しアンカーが緩みにくくなったためと推察される。

アンカー張力の低減量最大値および低減率(低減量最大値／初期張力)を図-13に示す。張力の低減率は、初期張力が大きいケースほど小さくなる傾向を示している。一方、張力の最大低減量を見ると、CASE2では実験後に張力を完全に失ったため最大低減量は初期張力と同じ0.1kNとなっているが、実験後に張力が残留したCASE3～5では各ケースとも概ね同じ約0.2kNとなった。これは、前述したように、アンカー初期張力が大きい場合にはケーソンの沈下量が低減されることで張力の低減量も小さくなり、初期張力が小さい場合にもケーソンの沈下量は増加するが水平変位量も大きくなるためアンカーはそれほど緩まずに張力の低減量が小さくなり、結果的にCASE3～5で張力の低減量が同じになったと推察される。

5. まとめ

二次元造波水路による水理実験を実施し、グラウンドアンカーによるケーソン式防波堤の滑動防止対策効果に関する基礎的な検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1)ケーソンの水平変位最大値は、アンカーの初期張力が大きいケースほど小さくなっており、鉛直変位最大値についても同様の結果が示された。また、ケーソンの変位開始時刻は、無対策の場合(CASE1)と比べてアンカーありの場合(CASE2～5)で2.3秒遅れており、さらに初期張力が最も大きいCASE5では滑動停止時刻が他のケースと比較して大幅に早くなっていた。以上のことから、アンカーによるケーソンの滑動防止対策が有効であり、アンカーの初期張力が大きいほど対策効果が大きくなることを確認した。
- (2)ケーソンは波力の振幅や平均値の増加中に大きく水平変位しており、波力が定常状態あるいはピークに達したときに変位が停止する結果が示されている。このことは、滑動後にケーソンの安定性が向上していることを示唆しており、これはケーソンのロッキング運動にともなう捨石マウンドの締固めや、砕石がケーソンに引き

ずられて捨石マウンド表層の一部が密になることで捨石マウンドの剛性や強度が増加したためと推察される。

- (3)アンカー初期張力が大きいケースほどケーソンの鉛直変位最大値が小さくなっているのは、初期張力により捨石マウンドの拘束圧が増えて剛性が増した結果、締固めによる捨石マウンドの沈下が抑制されたためと推察される。
- (4)アンカー張力は波力作用中に減少しており、時間を追うごとに減少割合が低下する傾向を示している。アンカー張力の減少量はケーソンの鉛直変位と相関性があることから、張力の減少原因は主にケーソンの沈下に依るものと判断される。
- (5)アンカー張力の最大低減量がCASE3～5で概ね同じ値になったのは、アンカー初期張力が大きい場合にはケーソンの沈下量が低減されることで張力の低減量も小さくなり、初期張力が小さい場合にもケーソンの沈下量は大きいものの水平変位も大きいためアンカーがそれほど緩まずに張力の低減量が小さくなったことによると推察される。
- (6)ケーソンに作用する水平波力および揚圧力は、各ケースとも同様の時刻歴波形を示しており、最大値に有意な差は認められないことから、アンカーの有無や初期張力の違いが波力に及ぼす影響は小さいと判断される。

謝辞：本研究は早稲田大学、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)および(株)エスイーの5機関による産学共同研究の一部として実施したものです。実験の計画、実施および評価にあたり、東亜建設工業(株)の永友久信氏、青野利夫氏、東洋建設(株)の前田涼一氏には、多大なご協力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会海岸工学委員会編：地球温暖化の沿岸影響，土木学会，1994。
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 3) 合田良實：耐波工学，鹿島出版会，p.110，2008。
- 4) 中田邦夫，寺内潔，西田仁志，梅木功：低天端混成堤の諸特性について，海岸工学論文集，第31巻，pp.543-536，1984。
- 5) 宮田正史，吉田誠，安野浩一郎，三好俊康，三藤正明，熊谷健蔵：偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.65，No.1，pp.886-890，2009。