

期待滑動量に資する混成堤の滑動安定性に関する実験的研究

Experimental Study of Composite Breakwater's Sliding Stability For Expected Sliding Distance

宮島正悟¹・堀井義一²・河合尚男²・長谷川雅弘³・中出浩靖³・森川高德⁴・奥田純生⁵

Shogo MIYAJIMA, Yoshikazu HORII, Takao KAWAI, Masahiro HASEGAWA
Hiroyasu NAKADE, Takanori MORIKAWA and Sumio OKUDA

The design standard of breakwater has been renewed in this year, which adopts the reliability design method and permits sliding. However, the relationship between wave force and sliding distance is not clarified enough so far, constituting a bottleneck in applying new design method. In this study, a series of hydraulic model experiments for breakwaters in relatively calm sea area were conducted to elucidate the characteristics of caisson's sliding in various sliding safety factor. Experimental results are expected to be adopted for new breakwater design based on sliding distance.

1. はじめに

設計の性能規定化の一環として、防波堤を含む港湾の施設の技術上の基準（以降、技術基準と呼ぶ）が改定され、今年度に施行された。防波堤の滑動については、これまで、所要の安全率に対し、変位が発生しないことの検証が主であり、波高、滑動安全率にあたるケーソン質量および変位量の関係が明らかにされた事例はそれほど多くなく、新技術基準を適用して設計するうえでの課題となる。

以上を踏まえ、本研究は、内湾に設置されるケーソン式混成堤を想定し、滑動安全率を各種変化させた場合のケーソンの滑動特性およびその際の波圧特性を不規則波による水理模型実験にて把握し、技術基準に基づく設計に資する基礎資料を得るとともに、実験結果より、任意の波高およびケーソン質量に対し概算変位量を推定する図の作成を試みたものである。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験で使用した断面二次元水路の諸元は、長さ 30 m、幅 1.0 m、深さ 1.2 m で、ピストン型単方向不規則波造波装置（吸収制御タイプ）が設置されている（図-1 参照）。

(2) 実験条件

模型縮尺は 1/40、潮位は H.H.W.L および H.W.L に相当する +4.5 m および +2.3 m の 2 種類で実施した。実験に用いた波は、両潮位とも、想定防波堤の設計波相当である $H_{1/3}=4.48$ m, $T_{1/3}=7.8$ s (以降、代表波と呼ぶ) を中心として、 $H_{1/3}=3.0 \sim 6.0$ m, $T_{1/3}=7.0 \sim 9.0$ s 内外の範囲で変化させた合計 13 種類の不規則波（波形勾配 $H_o/L_o=0.05$ 程度）を用い、周波数スペクトルは、いずれも、プレットシュナイダー・光易型を目標とした（表-1 参照）。なお、各波とも、原則として、波群を 3 種類変化さ

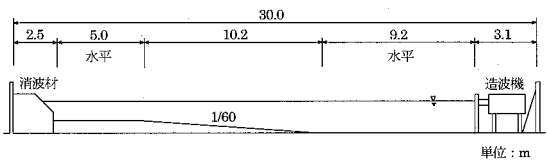


図-1 実験水路

表-1 実験対象波

潮位	波の種類	波高	周期	備考
		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
+ 4.5	不規則波	2.98	7.1	
		3.48	7.3	
		3.98	7.5	
		4.48	7.8	代表波
		4.98	8.1	
		5.48	8.5	
+ 2.3	不規則波	6.28	8.8	
		2.98	7.1	
		3.48	7.3	
		3.98	7.5	
		4.48	7.8	代表波
		4.98	8.1	
		5.75	8.5	

1 正会員 工修 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所長
2 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設計室
3 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環境課
4 正会員 玉野総合コンサルタント(株)建設技術部
5 玉野総合コンサルタント(株)建設技術部

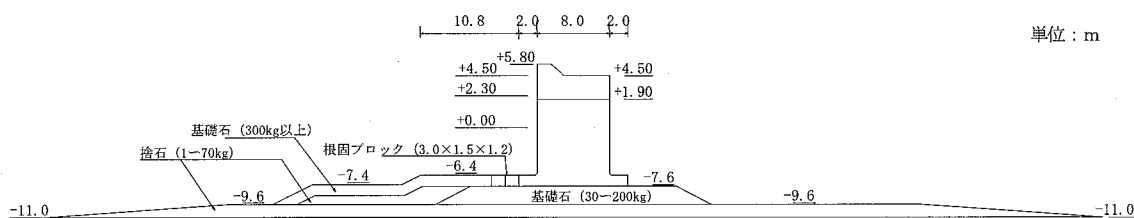


図-2 実験で対象としたケーソン式混成堤

せた。ここに、1波群当りの波数は、250波強である。実験対象とした防波堤は、図-2に示すケーソン式混成堤であり、天端高+5.8m、前面水深 $h=-11.0$ m、マウンド水深 $h=-7.6$ mである。なお、海底勾配は、実験水路が持つ約1/60である。

(3) 実験方法

実験では、滑動特性と波圧特性を同時に把握するため、幅27.5cmのケーソン模型2函を、造波板から21.5m地点の水路(幅1.0m)中央部寄りに設置して、滑動および波圧用の模型とし、両端にダミー模型を設置した。なお、ケーソン模型間には、接触による滑動への支障を避けるため0.5cm程度の隙間を設けた。

滑動用模型は、本体が合板製、上部工がアクリル製であり、底面部にモルタルを敷設してマウンドとの摩擦係数がおよそ0.6となる条件を再現した。

ケーソンの滑動安全率(以降、安全率と呼ぶ)を変化させた場合の滑動特性を把握するため、合田(1973)の式を用いて、潮位毎に代表波の最高波高に対する安全率が0.46, 0.55, 0.7, 0.8, 0.9となるケーソン質量を求め、各々、模型スケール上で質量を変化させた。ここに、模型質量は模型内のおもりの量を変化させることで調節し、重心が現地と近似するよう、模型内には柵を設けた。変位量は、ケーソン模型の背後中央下部(現地-5.8m付近)に設置した変位計で測定した(図-3参照)。

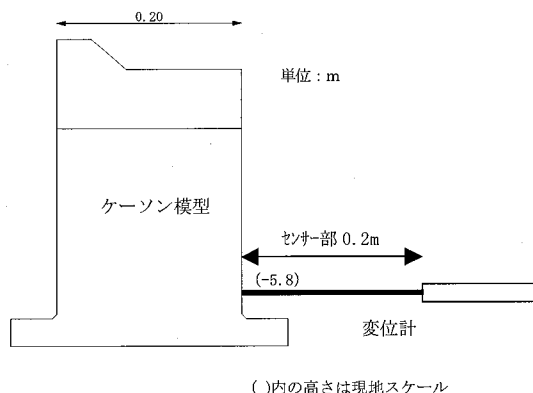


図-3 滑動用ケーソン模型への変位計設置概況

波圧用模型は、滑動用模型と同じく合板およびアクリル製であり、滑動を引き起こす波力特性を把握するため、図-4に示すとおり、ケーソン前面および底面に波圧計を設置して、隣接する滑動用ケーソンの変位と同時に波圧強度を測定した。なお、波圧模型内には、おもりを充填し、変位が生じないようにした。

実験は、波高の小さいケースから大きいケースへ向けて順次行い、基本的に、一番大きな波高のケースが終了するまでケーソンの変位は戻さないこととした。ただし、実験途中で変位計の許容範囲(20cm)を超えた場合、あるいは、隣接ケーソンに接触して明らかに変位が止められていると判断される場合は、一旦、ケーソンを元の位置に戻し、当該ケースから再度やり直した。

(4) 解析方法

解析では、各ケース毎に不規則波中の1波1波の波力と変位量の関係を検討した。さらに、1つの擾乱に相当する250波の不規則波全体を通じた累計変位量を対象として、任意の波高、ケーソン質量に対し概算変位量を推定できる図表の作成を試みた。

3. 実験結果および考察

(1) 滑動合成波力および変位の時系列特性

図-5は、安全率0.7のケーソン質量に対し、潮位+2.3m、 $H_{1/3}=4.98$ m、 $T_{1/3}=8.1$ sの不規則波を作用

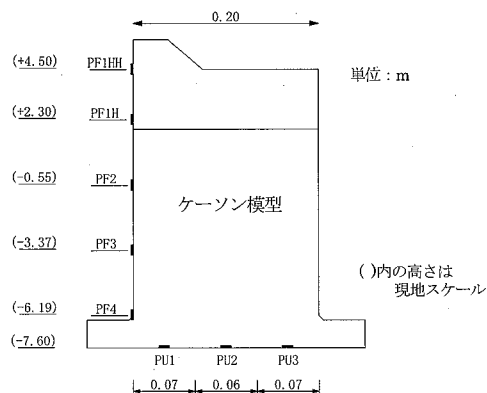


図-4 波圧用ケーソン模型への波圧計設置概況

させた場合の、滑動合成波力 P_s (= 実験水平波力 P_h + 実験鉛直波力 $P_v \times$ 摩擦係数 0.6) と変位量の時系列 20 波程度を示したものである。図中には、計算より求めた滑動限界値 (= ケーソンの水中質量 $W \times$ 摩擦係数 0.6) も併記している。

これをみると、ケーソンの変位は、 P_s が限界値を超えた時刻で発生していることがわかる。

図-6 は、図-5 中の丸囲みの時点に着目し、 P_s と変位量の関係を詳細に示したものである。変位は、滑動合成波力 P_s が限界値を超える前から始まり、 P_s がピークを過ぎ、限界値を下回った後も継続して発生している。

下迫・高橋 (1998) によれば、ケーソンの変位には、「滑動による変位」のほか、マウンドがバネのような働きをすることによって生じる「バネ変位」も含まれるとされている。

変位が開始する部分を詳細にみると、変位の勾配が急変化する時点がある。この時刻は、 P_s が限界値を突破した直後であることから、ケーソンの滑動は、この時刻付近から発生し、それより前の動きはバネ変位によるもの

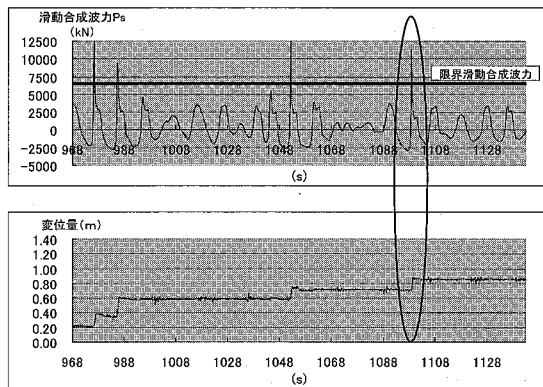


図-5 滑動合成波力と変位量の時系列：概況
(安全率 0.7 潮位 +2.3m, $H_{1/3} = 4.98\text{m}$, $T_{1/3} = 8.1\text{s}$)

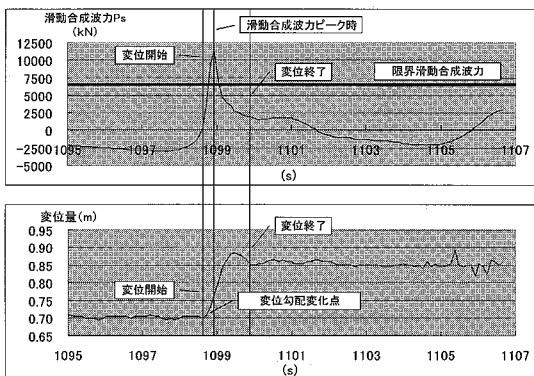


図-6 滑動合成波力と変位量の時系列：詳細
(安全率 0.7 潮位 +2.3m, $H_{1/3} = 4.98\text{m}$, $T_{1/3} = 8.1\text{s}$)

のと推測される。一方、変位は P_s が限界値を下回った時点以降にも発生していることから、ケーソンには慣性力が作用し、限界値を過ぎて以降、摩擦抵抗力によって徐々に止まるものと推測される。

なお、変位はピークを迎えた後に一旦低下しているが、これは、波力が低下したことで、マウンドのバネ変位が元に戻ったことによるものと考えられる。

(2) 滑動安全率と1波毎の変位量との関係

図-7、図-8 は、各ケースにおける1波毎の変位量を任意に抽出し、そのときの計測波力より算出された安全率との関係を潮位別にプロットしたものである。これをみると、変位量は、いずれの潮位も安全率の増加に伴って減少する傾向にあるものの、同じ安全率であって変位量のばらつきは大きい。また、潮位 +4.5m のケースでは、安全率が 0.9 以上でも +2.3m のケースに比べて大きな変位量の場合がみられる。

図-9 は、図-7 中で、安全率が 0.5 程度であって、変位量に明瞭な差がある2つの結果①、②に着目し、その時点での滑動合成波力 P_s および変位量の関係を時系列で示したものである。

これをみると、 P_s は①、②とも同水準にあるが、 P_s が限界値を超えている時間は②の方が長く、力積 ($P_s \times$ 時間) にすると 1.7 倍以上となる。先述のとおり、

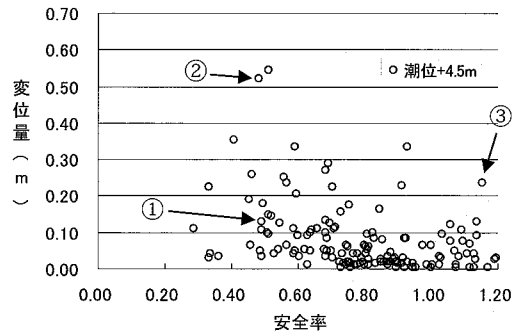


図-7 不規則波1波毎の安全率と変位量の関係
(潮位 +4.5m)

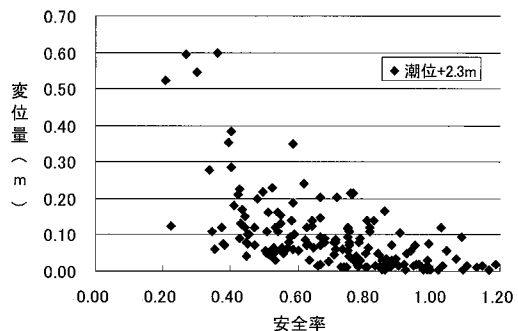
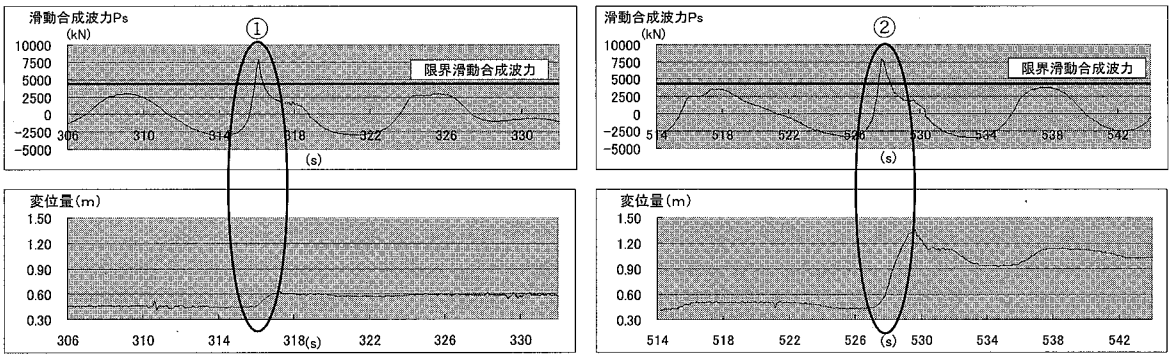


図-8 不規則波1波毎の安全率と変位量の関係
(潮位 +2.3m)



＜①限界を超える波力の作用時間が相対的に短い条件＞

＜②限界を超える波力の作用時間が相対的に長い条件＞

図-9 波力の作用時間と変位量の関係(安全率 0.46 潮位 +4.5m, $H_{1/3}=4.48\text{m}$, $T_{1/3}=7.8\text{s}$)

P_s がピークを過ぎて限界値を下回った後も、その慣性力によってケーソン変位が継続することが確認されており、限界値を超える時間帯が長いほどその後の継続時間も長くなることが予想される。よって、同じ安全率でも変位量が異なる一要因は波力の作用時間の違いにあるものと推測される。

次いで、図-10 は、先の図-7 中の③の結果に着目し、その時点での滑動合成波力 P_s と変位量の関係を時系列で示したものである。図中の実線で囲んだ引き波によって約 0.6 m の大きな逆変位が発生した数波後に、波線で囲んだ波によって約 0.2 m の正変位が発生している。正変位の発生した時点では P_s は限界値に近い値であるものの限界値を超えていないことから、逆変位の後に比較的大きな波圧が作用する場合には正変位が増大しやすくなるものと考えられる。

要因については今後詳細な検討が必要であるが、逆変位が発生し、ケーソンがマウンド上のある区間を一往復

したことによって、当該区間の表面が滑りやすくなる、すなわち、摩擦係数が低下することも想定される。この場合、計算上、摩擦係数 0.6 として滑動合成波力の限界値を算出しているが、逆変位が発生した後の実質的な限界値はさらに低い水準になっていることを意味する。

以上述べたとおり、安全率が同程度の場合であっても、引き波による顕著な逆変位が発生すると変位量を増大させる一要因となることがわかった。

安全率に対し、変位量がばらつくその他の要因としては、後部フーチングのマウンドへのめり込みが考えられる。波圧は、ケーソンの重心より高い静水面の位置で最も強く作用するため、大きな波力が断続的に作用すると、ケーソンはロッキングを起こしながら変位する。したがって、水平方向の滑動のみならず、マウンドへの鉛直方向の力も加わることになる。写真-1 は、大きな変位が発生した後のマウンドの状況を示したもので、マウンド

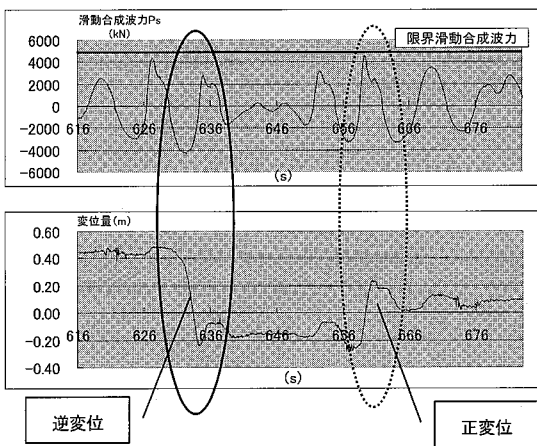


図-10 引き波による逆変位後の正変位
(安全率 0.55 潮位 +4.5m, $H_{1/3}=5.48\text{m}$, $T_{1/3}=8.5\text{s}$)

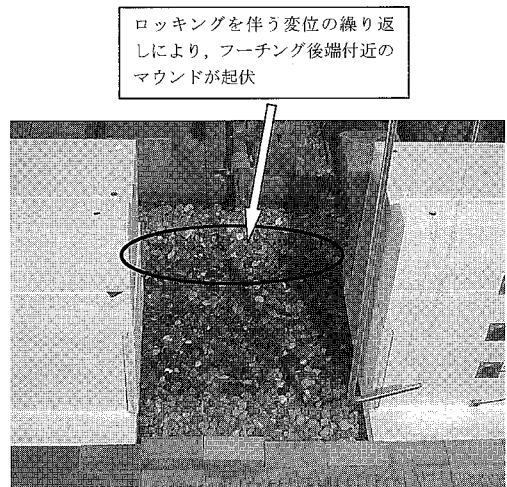


写真-1 変位後の後部フーチング周辺のマウンドの状況

水深方向への力の作用により、後部フーチング付近の基礎石が盛り上がっている（丸囲み部）。このことは、変位にブレーキをかけることになり、その結果として、安全率の割に変位量が小さくなる要因の一つになるものと考えられる。

(3) 不規則波全体としての累計変位量

1つの擾乱に相当する250波の不規則波全体を対象に、1波毎の変位量が積み重なった累計変位量を図-11および図-12に示した。図では、各潮位における相対波高 $H_{1/3}/H_c$ と累計変位量の関係を示している。ここに H_c は、実験で使用した各ケーソン質量に対し、合田(1973)の式を用いて求めた安全率が1.0となる限界波高である。なお、顕著な逆変位が発生したケースについては、累計変位が計測不能なことから、本図では割愛してある。

本図より、いずれの潮位においても、相対波高が増大すると累計変位量が急激に増加する傾向があることがわかる。また、前述の検討のとおり、同じ安全率であって

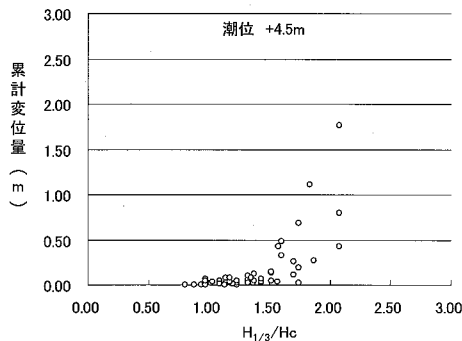


図-11 相対波高と累計変位量の関係（潮位 +4.5m）

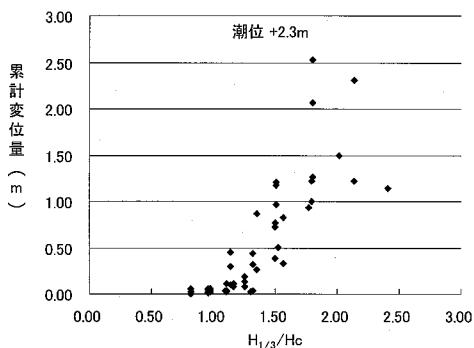


図-12 相対波高と累計変位量の関係（潮位 +2.3m）

も1波毎の変位にばらつきがあるため、累計変位量についてはばらつきが累積することも考えられる。

なお、図-11および図-12を比較すると、相対波高が1.0～1.5程度の範囲で潮位+2.3mの場合に累計変位量がやや大きい傾向が見られる。この要因についてはさらに詳細な検討が必要であるが、潮位の低下によって波力の作用点が重心位置に近づいたため、ケーソンの滑動が生じやすくなったことも、一因として想定される。

今後検討すべき事項は残るものの、図-11および図-12より、今回の実験条件の範囲内において任意のケーソン質量、任意の波高に対する1擾乱での概算累計変位量を想定することができる。50年間に発生する個々の高波を設定することで、概算の期待滑動量を試算することが可能になるものとする。なお、前述のとおり、累計変位量は大きなばらつきを有することから、安全側の観点から、実務的には期待滑動量には高めの値を選択することが望ましいものとする。

4. 主要な結論

本研究の主要な結論は、以下のとおりである。

- ①ケーソンの変位は、滑動合成波力 P_s が限界値を下回った後も継続して発生することがわかった。これは、ケーソンに作用する慣性力によるものと考えられる。
- ②同じ安全率でも変位量に生じるばらつきは大きい。これは、1波毎の波力作用時間、逆変位の発生、マウンドとケーソン底面の接触状況等によるものと推測され、不規則中の1波1波の変位量は変動性強いことがわかった。
- ③実験結果を基に、本実験条件内での任意の波高、ケーソン質量に対する1つの擾乱での概算累計変位量推定図を作成した。

本研究を遂行するに当たり、貴重な助言を頂いた(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 耐波研究室 下迫健一郎室長に謝意を表します。

参考文献

- 合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
- 下迫健一郎・高橋重雄(1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技研報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.