

ハイブリッドケーソンのフーチングに作用する波圧の評価式の検証

住友重機械工業（株） 正会員 ○江崎 慶治
 京都大学防災研究所 フェロー 高山 知司
 京都大学防災研究所 正会員 安田 誠宏

1. 目的

ハイブリッドケーソンは、フーチングを有することを最大の特徴とするケーソンで転倒抵抗性の増大や底面反力の低減を期待して安定計算が行われる。一方、波圧設計では、ハイブリッドケーソンに作用する波圧はフーチングを無視したケーソン本体に作用する波圧と大差ないと仮定され¹⁾、フーチングに作用する波圧は考慮されない。しかしながら、フーチングが沖側に張り出した場合、押波時、フーチング上面には鉛直下向きに波力が作用し、さらに波の位相差によりフーチング前趾に作用する揚圧力が減少すると考えられる。著者ら²⁾はフーチングに作用する波圧について規則波実験を行い、フーチングに作用する波力が滑動安定性を高めることを確かめ波力評価式を提案している。そこで、本研究では不規則波実験および数値波動水路 CSMAS-SURF を用いて波圧評価式の妥当性を確認した。

2. 不規則波実験および数値波動水路の概要

本研究は、不規則波実験及び数値波動水路によりフーチングに作用する波圧を検証した。

2.1 不規則波実験

不規則波実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの多目的造波水路を用いて実施した。表-1の左に波浪条件、図-1に不規則波実験で使用する模型形状と波圧計の取付け位置を示す。模型は造波機より水路下流側に約40m離れた位置に設置した。模型に取り付けたフーチング長は20cmである。また、地形勾配は1/10、マウンド厚は10cmである。

不規則波実験は、同一ケースに対し異なる波速で3回実施した。1回当たりの波の数は500波である。実験解析に用いる波の数は3回の実験の変動性を抑えるために、全てのケースにおいて波圧計の変動係数が10%以下となる20波とした。さらに式(1)で滑動合成波力を算出して500波中の上位20波の平均値を設計計算と比較した。

$$F_C = F_H \mu \mu F_V \quad (1)$$

ここに、 F_C : 滑動合成波力、 F_H : 水平波力、 F_V : 鉛直波力、 μ : 摩擦係数(=0.6)である。

設計計算に用いる設計波高 H_D は、波高分布をレーリー分布と仮定し500波中上位20波の波高の平均値 $H_{1/25}$ を用いた。上位20波の波高が出現する確率は次式である。

$$H_{1/25} = 1.46 H_{1/3} \quad (2)$$

ここに、 $H_{1/3}$: 有義波高である。

なお、以降の検討では、図-1中の黒丸印を原点 $(x,y)=(0,0)$ とし、水路下手方向を正とした。

表-1 波浪条件（左：実験，右：数値計算）

CASE	h (m)	H_0 (m)	T_0 (sec)	CASE	h (m)	H_0 (m)	T_0 (sec)
I52-1	0.52	0.15	1.30	C55-1	0.55	0.20	1.50
I52-2		0.20	2.00	C55-2			2.00
I52-3		0.20		C55-3			2.50
I52-4		0.25		C55-4		0.25	1.50
I52-5		0.20	2.50	C55-5		0.25	2.00
				C55-6			2.50

h : 直立壁前面での水深、 H_0 : 波高、 T_0 : 周期

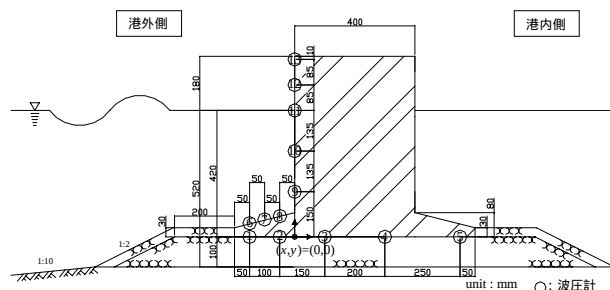


図-1 波圧計取付け位置図

2.2 数値波動水路

計算モデルは、造波境界から水路長手方向に約22mの位置に堤体、マウンドおよび被覆石を設置し、開境界を放射境界としている。地形勾配は1/20である。堤体のモデル化は、本体幅を0.4m、フーチング長を0.0m、0.2m、0.4mの3つとした。入射波は規則波である。計算時間は造波開始より25秒である。表-1の右に数値波動水路の波浪条件を示す。波圧の検討に用いる波は、波が堤体に作用し始めてから3波以降の4波を抜き出し、滑動合成波力が最大のとなる時刻と同時刻の波圧を抽出した。

キーワード 防波堤、フーチング、揚圧力、抑圧力、不規則波実験、数値波動水路

連絡先 〒799-1393 愛媛県西条市今在家1501 住友重機械工業（株）愛媛製造所西条工場 TEL0898-64-6917

3. 不規則波実験および数値波動水路の結果

3.1 揚圧力

不規則波実験 I52-1 の揚圧力分布を図-2 に示す．図中の縦軸は揚圧力 p_u ，横軸は任意の計測点 x である．図中のプロットは不規則波実験結果，実線は合田公式³⁾より得られる揚圧力分布，破線は(3)式で前趾揚圧力，後趾を0とした揚圧力分布である．

$$p_u / p_{ug} = 0.7 \exp(-15b/L) + 0.3 \quad (3)$$

ここに， p_u ：揚圧力， p_{ug} ：合田公式の揚圧力， b ：フーチング長， L ：波長である．

図-2 より揚圧力は，フーチングを含む底版全体に作用し前趾揚圧力を最大値，後趾揚圧力を0とする三角形分布となる．これよりフーチングを有するケーソンの揚圧力の合力は前趾揚圧力に依存するといえる．ここで，前趾揚圧力の大きさに着目すると，不規則波実験値は波の位相差の影響により合田公式の前趾揚圧力よりも小さくなっていることが分かる．一方，式(3)と比較すると，不規則波実験値の前趾揚圧力は式(3)よりも若干大きな値である．そこで，図-3 に不規則波実験，数値波動水路の前趾揚圧力を示す．図-3 には規則波実験の結果もあわせて表示した．図中の実線は式(3)である．なお，縦軸は不規則波実験，数値波動水路から得られた前趾揚圧力 p_u を合田公式の揚圧力 p_{ug} で，横軸はフーチング長 b を波長 L で無次元化した．(3)式，規則波実験の結果と比較すると，数値波動水路の前趾揚圧力は良好な一致でとなるが，不規則波実験の前趾揚圧力は大きくなっている．そのため，これらの結果を考慮し，前趾揚圧力の算定式を式(4)で提案する．

$$p_u / p_{ug} = 0.7 \exp(-11b/L) + 0.3 \quad (4)$$

3.2 抑圧力

図-4 に抑圧力分布を示す．縦軸は抑圧力 p_c を合田公式より得られるフーチング基部の水平波圧 p_{h80} で除した値を示し，横軸は任意の計測点 x を波長 L で無次元化している．プロットは抑圧力で，図-3 同様，規則波実験の結果もあわせて表示した．また，実線および破線は，次に示す式(5)および式(6)である．

$$p_c / p_{h80} = \min\{0.7, 0.7 \exp(20x/L) + 0.3\} \quad (5)$$

$$p_c / p_{h80} = \cos(2\pi x/L) \quad (6)$$

ここに， p_c ：抑圧力， p_{h80} ：フーチング基部の水平波圧， x ：フーチング上での任意の点である．

図-4 より不規則波実験，数値波動水路から得られた抑圧力は，堤体前面からフーチング端に近づくにしたがい急激に減少している．この傾向は，規則波実験結果と同様である．ここで，図-4 の抑圧力の大きさに着目すると，フーチング基部付近において抑圧力は不規則波実験，数値波動水路ともに式(5)と式

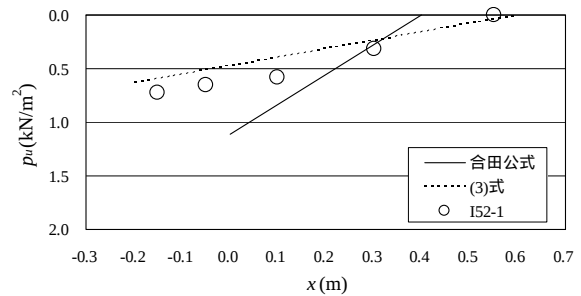


図-2 揚圧力分布

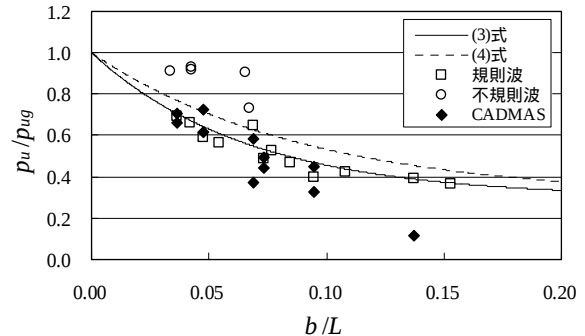


図-3 前趾揚圧力

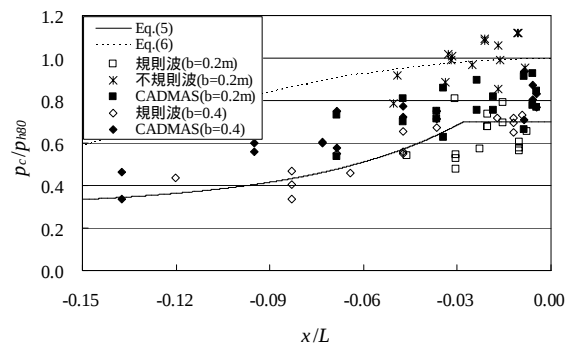


図-4 抑圧力分布

(6)の中間に，また，フーチング端付近では平均的に式(5)に近づく．抑圧力は，押波時，堤体を安定化させる力となるため，式(6)で抑圧力を与えると堤体重量を過小評価する恐れがある．一方，式(5)は不規則波実験，数値波動水路から得られた抑圧力よりも小さな値となるが，分布形状も比較的一致しており，堤体重量を十分に安全に表現できると考えられる．

本研究では，ハイブリッドケーソンのフーチングに作用する波圧の算定式を不規則波実験および数値波動水路を用いて検証した．その結果，前趾揚圧力は修正を加えた式(4)，抑圧力は，規則波実験同様の式(5)で算定可能であることが分かった．

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），1999.
- 2) Esaki, K., Takayama, T. and Kim, T.-M.: Effect of long footing on sliding stability of a hybrid caisson, *Proc. of 29th Inter. conf. on coastal eng.*, Lisbon, ASCE, pp.3775-3786, 2004.
- 3) Goda, Y.: New wave pressure formulae for composite breakwaters, *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng.*, Copenhagen, ASCE, pp. 1702-1720, 1974.