

上部斜面スリット防波堤に作用する波圧特性の検討

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF WAVE PRESSURES ON AN INCLINED SLIT WALL CAISSON

江崎慶治¹・高山知司²・荒居祐基¹

Keiji ESAKI, Tomotsuka TAKAYAMA and Masaki ARAI

¹正会員 工修 住友重機械工業(株)鉄構機器事業本部(〒141-8686 東京都品川区北品川 5-9-11)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Many types of breakwater have been developed through the advance of rational design and construction method. Especially an inclined slit wall caisson which has already been employed in some harbors, has been developed to reduce wave pressure effectively by utilizing chamber which is acted the effect of vertical wave force. Therefore the size of an inclined slit wall caisson can dramatically been diminished by comparison with a normal caisson.

The design of the slit wall caisson is made according to the design procedures for existing vertical slit wall caisson. However the inclined slit and wall affect the maximum wave force acting on the slit and wall is affected by the inclined slit and wall, and it differs from the force on existing vertical slit wall caisson.

This paper describes the experimental characteristics of maximum wave force and wave pressure acting on the inclined slit wall caisson.

Key Words : caisson, wave pressures, chamber, slanting perforated wall, inclination

1. はじめに

上部斜面スリット防波堤は、上部斜面防波堤とスリット防波堤を組み合わせた構造で、堤体に作用する波の位相差を利用して堤体に作用する滑動合成波力を低減し、ケーソン全体の安定性を高めることを目的にした防波堤である。ここで、波力設計を考えると、上部斜面スリット堤では、直立消波ケーソンの設計法を準用することが示されている¹⁾²⁾。直立消波ケーソンでは作用する波の位相の違いによって押波時に押波Ⅰ、押波Ⅱa、押波Ⅱbの3つの位相について検討を行うことになっている。しかし、上部斜面スリット堤は、直立消波ケーソンと異なり、スリットおよび後壁が傾斜しているため、堤体に作用する滑動合成波力は、直立消波ケーソンで定義されている3つの位相とは異なると考えられる。また、スリットや遊水室後壁の傾斜角および遊水室幅の組み合わせを考慮した波力算定方法は未だ示されていない。

そこで、本研究では上部斜面スリット防波堤に作用する波圧の算定法を確立することを目的として、スリットおよび遊水室後壁の傾斜角、遊水室幅を変化させた水理実験を実施し、上部斜面スリット防波

堤に作用する波圧特性を調べた。

2. 実験概要

本研究では、上部斜面スリット堤の形状の違いによる波圧を検証するため、図-1に示すスリット傾斜角 60° 、遊水室後壁 60° を基本タイプ(タイプ1)として、その他3つの異なる形状で水理実験を実施した。

上部斜面スリットの開口率は、いずれも30%であり、天端高は一定である。遊水部上のスリットと後壁の連結構造は、揚圧力の影響を避け、堤体を安定化させるように梁構造とし、遊水部内には隔壁を設けていない。また、堤体には底版、フーチング、前壁、スリット部、下床版、および後壁に合計13個の波圧計(図中の黒塗部)を取付けて波圧を計測し、波の作用状況を水路側面よりビデオ撮影した。

表-1に実験条件を示す。実験波は規則波を用いた。いずれのケースもマウンド高さは海底面より30cmとし、周期および波高の違いによる波圧特性を調べることとした。ここに、 d :堤体前面水深、 T :周期、 H :波高、 d' :遊水室の水深である。

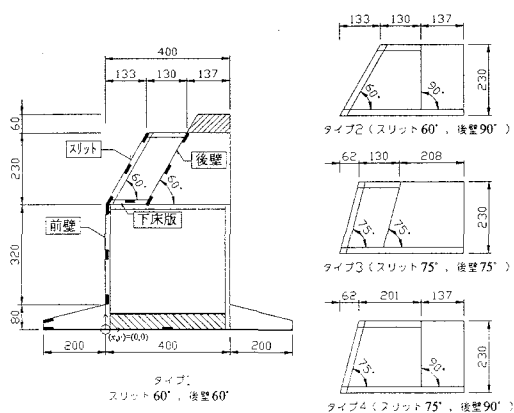


図-1 上部斜面スリットの構造

表-1 実験条件

Case	d (cm)	T (sec)	H (cm)	d' (cm)
S1	45	1.5	6.7	5 or 15
S2		1.5	10.0	
S3	55	2.3	13.3	
S4		2.3	20.0	
S5		2.3	26.7	

3. 実験結果

(1) 波圧の作用高

上部斜面スリット堤に波が作用した際、スリットの開口部の影響により波圧の作用高が減少すると考えられる。本研究においては、スリット構造形式の影響を考慮し、次式で波圧の作用高を算定した。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 \lambda_2 H \quad (1)$$

ここで、 η^* : 波圧の作用高、 λ_1 : スリットの影響特性値、 λ_2 : スリット傾斜角($=\sin\theta$)、 β : 防波堤の壁面に対する垂線と波の主方向とのなす角度($=0^\circ$)である。

λ_1 はビデオ撮影画像により波がスリットに作用する際の波圧の作用高を計測し、式(1)より算定した。 λ_1 を図-2に示す。なお、図-2の λ_1 は各タイプの平均値である。図-2から λ_1 は、前面水深 d が55cmより45cmの方が若干大きく大きな値をとるが、その値はケース間を通じて、ほぼ0.3から0.4の値となるため、設計においては安全側を考慮し、 $\lambda_1=0.4$ を採用することにした。

(2) 滑動合成波力

上部斜面スリット堤に波圧が作用する際、堤体が最も不安定となる時刻、つまり滑動合成波力が最大となる位相を調査した。滑動合成波力は、次式で定義される。

$$F_C = F_H + \mu F_V \quad (2)$$

ここに、 F_C : 滑動合成波力、 F_H : 水平波力、 F_V : 鉛

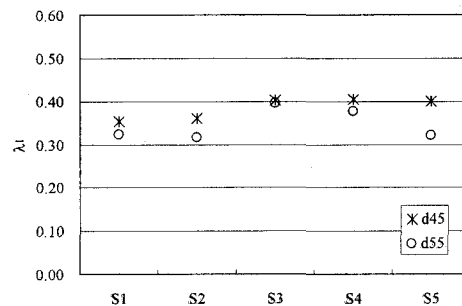
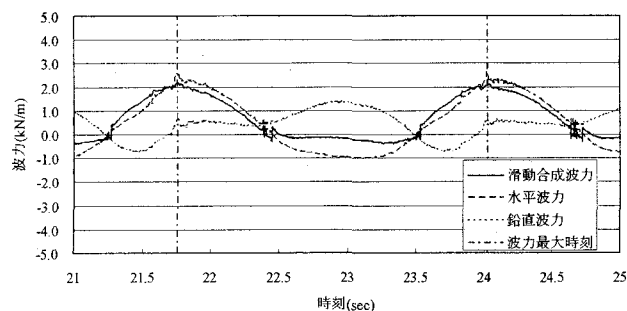
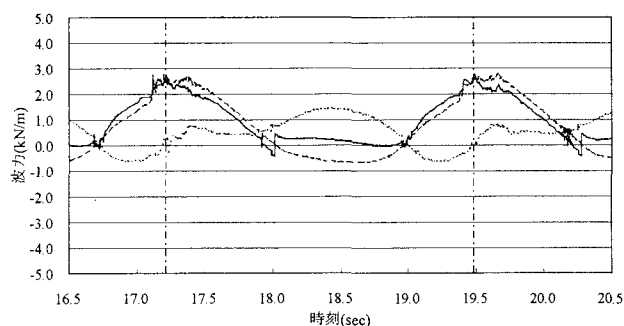


図-2 スリットの影響特性値 λ_1



(a) タイプ1

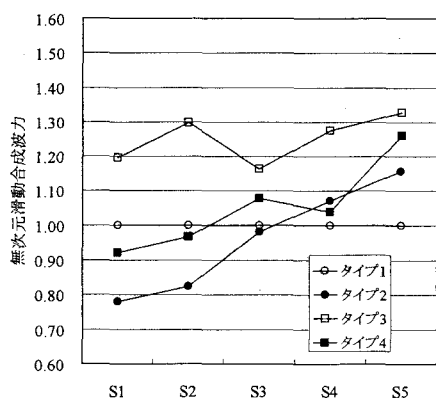


(b) タイプ2

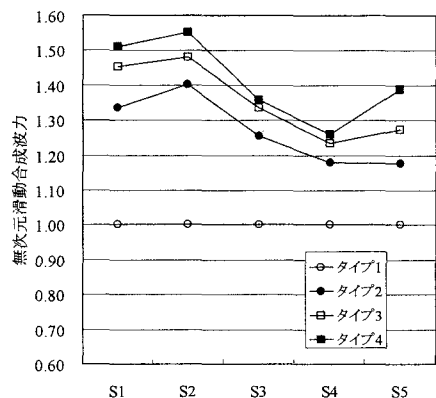
図-3 波力時系列 (S5, $d=45$ cm)

直波力、 μ : 摩擦係数($=0.6$)である。式(2)右辺の符号は、 F_H の正負によって変化する、 $F_H > 0$ の場合は負、 $F_H < 0$ の場合は正である。本研究で用いた模型は図-1に示す様に堤体の港内外にフーチングを取り付けた構造となっている。港外側のフーチングには、著者ら³⁾が示す様に押波時に堤体を押し下げる波力が作用する。そのため、滑動合成波力の算定にあたっては、フーチングに作用する波力も考慮し検討した。滑動合成波力は、各部位毎に以下の方法で算定した。前壁、スリットおよび後壁は、計測データを用いて最小二乗法により各部位の上端および下端の波圧を算出し波力を算定した。スリットは開口率が30%であるため、算定した波力の0.7倍としている。下床版および抑圧力は、計測データを作用面に一様分布とした。揚圧力は計測データとフーチング後趾を0とし最小二乗法によりフーチング前趾の波圧を算出して波力を求めた。

滑動合成波力が最大となる時刻は、水平波力 F_H



(a) $d=45\text{cm}$



(b) $d=55\text{cm}$

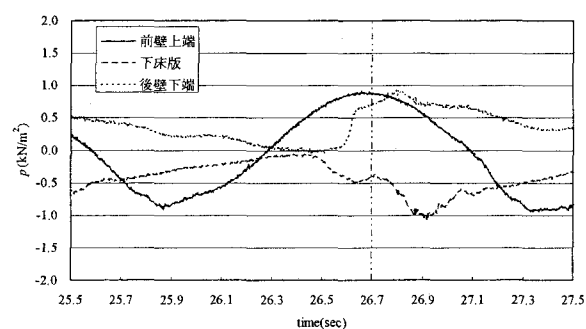
図-4 滑動合成波力の特性

が最大となる位相もしくは、鉛直波力 F_v が 0 となる位相のいずれかである。図-3 に滑動合成波力が最大となる時刻の一例を示す。

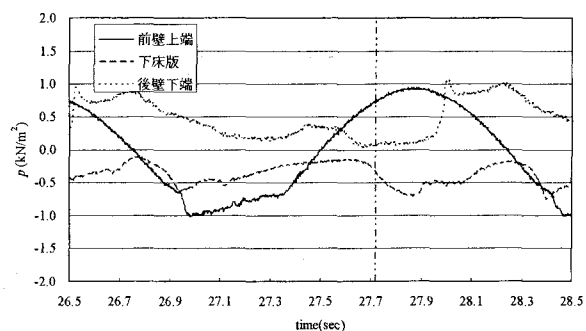
上部斜面スリット構造の 4 タイプにおける滑動合成波力の特性を図-4 に示す。図-4 の縦軸は、タイプ 2~4 の滑動合成波力をタイプ 1 の滑動合成波力で除した無次元滑動合成波力で、横軸は実験ケースである。滑動合成波力は、前述した位相のいずれかのうちで大きい方を採用した。

図-4 よりスリット傾斜角が 60° である方が 75° の場合よりも滑動合成波力が小さく堤体を安定にする傾向があることが分かる。これは、傾斜角が大きいほど水平波力が減少し、鉛直波力が増加するためと考えられる。しかし、前面水深 d の違いにより 4 タイプの滑動合成波力は、異なる分布形状を示す。前面水深 $d=45\text{cm}$ のケースでは、S1 および S2 で滑動合成波力は、後壁 90° の方がタイプ 1 よりも小さくなっているが、S4 と S5 ではタイプ 1 よりも滑動合成波力が大きくなる。一方、前面水深 $d=55\text{cm}$ のケースでは、スリットおよび後壁の傾斜角が大きいほど、常に滑動合成波力が小さくなっている。

遊水室幅の影響を検証するため、図-5 に S1, 前面水深 $d=45\text{cm}$ のタイプ 3 および 4 の前壁上端、下床版および後壁下端位置の波形を示す。図-5 の縦軸は波圧、横軸は時間を示しており、二点鎖線は滑動

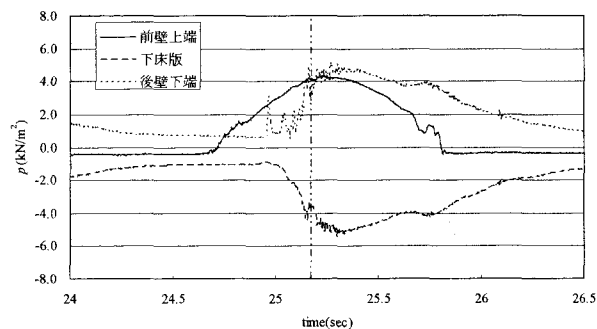


(a) タイプ 3

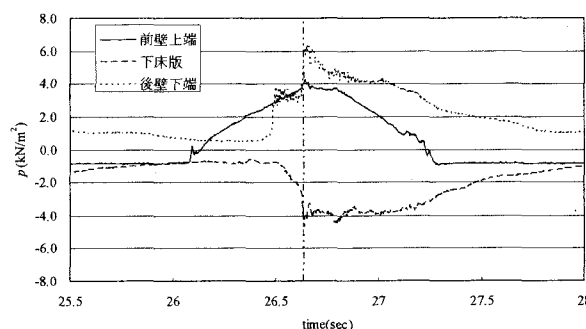


(b) タイプ 4

図-5 波圧の時間的変化 (S1)



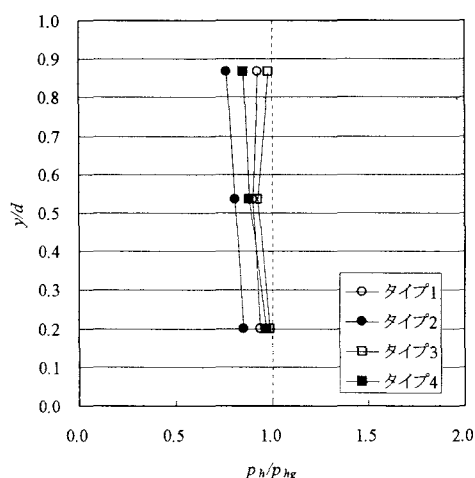
(a) タイプ 3



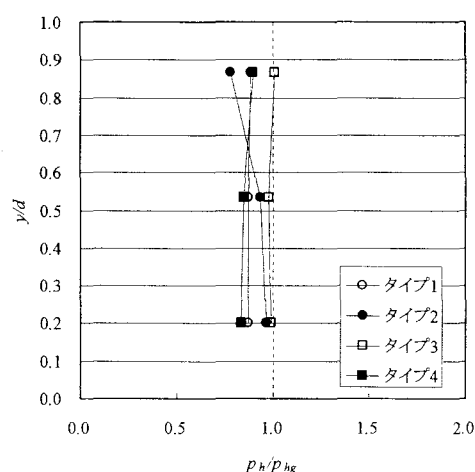
(b) タイプ 4

図-6 波圧の時間的変化 (S5)

合成波力が最大となる時刻である。本検討においては、鉛直上向きを正としているため、下床版が負値をとれば堤体を安定化させる波圧が作用していることとなる。タイプ 3 および 4 の波形を比較すると、タイプ 3 の遊水室幅がタイプ 4 よりも狭いため、タイプ 3 では、前壁の波圧がピーク値をとる際、既に後壁に波圧が作用しているのに対し、タイプ 4 は後壁に波が到達する時刻は、前面の波圧がピーク値と

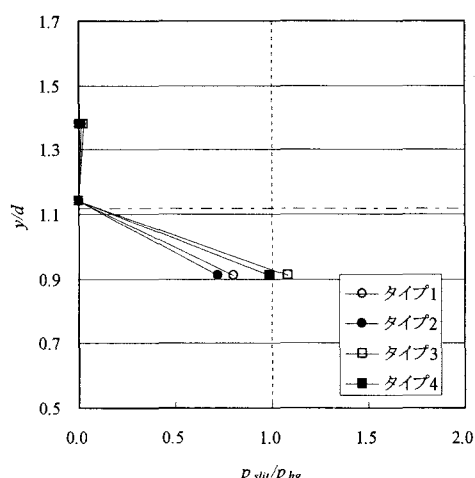


(a) S1

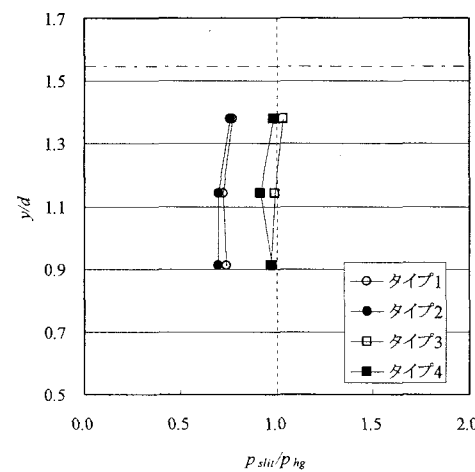


(b) S5

図-7 前面の波圧分布 ($d=45\text{cm}$)



(a) S1



(b) S5

図-8 スリットの水平波圧分布 ($d=45\text{cm}$)

なる時刻よりも 0.03 秒程度遅い。そのためタイプ 3 では、前壁に作用する波圧がピーク値となる位相の近傍で滑動合成波力が最大となる。

一方、タイプ 4 では滑動合成波力が最大となる時刻は下床版に作用する波圧が 0 付近の位相となる。

図-6 にケース S5、前面水深 $d=45\text{cm}$ の波圧の時間的変化を示す。図中の縦横軸ともに図-5 と同様である。タイプ 3 およびタイプ 4 とともに滑動合成波力が最大となる位相は、S1 のタイプ 3 と同様に前壁に作用する波圧が最大となる位相であることがわかる。これは、S5 では波圧の作用高がスリット天端高を越えて生じており、スリット開口部より流入する水に加え、上部の開口部より水が浸入したため、前壁と後壁での波圧のピーク位置に位相差が生じず、前壁に作用する波圧のピーク位置で滑動合成波力が最大となったと考えられる。

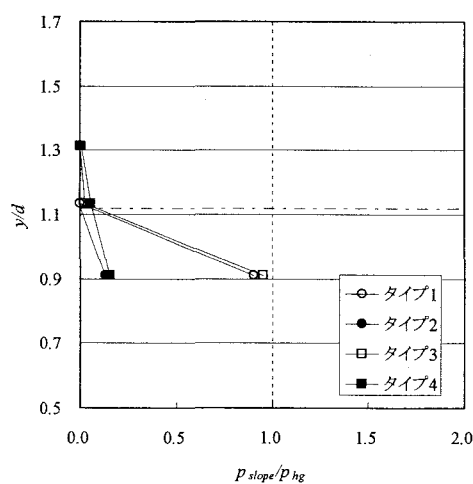
これより、滑動合成波力が最大となる位相は、波圧の作用高がスリット天端高よりも小さい場合、遊水室幅に影響され、下床版に波圧が作用していない位相もしくは前壁に作用する波圧が最大となる位相である。一方、スリット天端高よりも波圧の作用高

が高い場合は、遊水室幅に影響されず前壁に作用する波圧が最大となる位相で、滑動合成波力も最大となることがわかった。

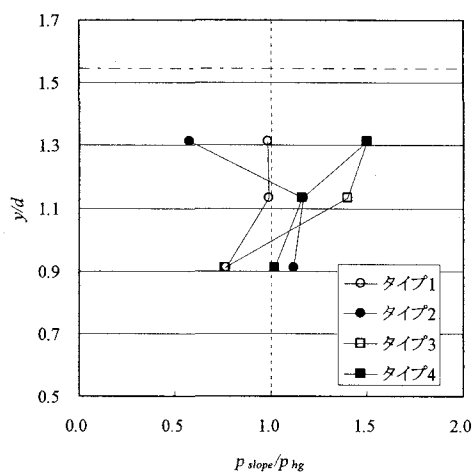
(3) 波圧の作用状況

滑動合成波力が最大となる位相において、上部斜面スリット堤に作用する波圧を検討する。本節では、滑動合成波力が最大となる位相に違いが見られた前面水深 $d=45\text{cm}$ の S1 および S5 の比較を行う。

図-7 に前壁に作用する波圧分布を示す。図中の横軸は実験値 p_h を合田公式⁴⁾より得られる波圧 p_{hg} で、縦軸は計測位置 y を前面水深 d で除した値である。ただし、合田公式中の波圧の作用高としては式(1)で与えている。図-7 の S5 の前壁波圧は、いずれのタイプも合田公式より得られる波圧より若干小さいが、上部形状に関係せず、合田公式とほぼ一致していることが分かる。一方、S1 については、タイプ 2 のものが他の波圧分布よりも小さく、その値は合田公式の 0.8 倍程度であるが、大きな差異が見られないことから、設計上、上部斜面スリット堤の前壁に作用する波圧は、合田公式により算定しても問題ないと考えた。



(a) S1



(b) S5

図-9 後壁の水平波圧分布 ($d=45\text{cm}$)

スリットに作用する水平波圧分布を図-8 に示す。図-7 同様、図中の横軸は、実験値 p_{sli} を合田公式より得られる波圧 p_{hg} で、縦軸は計測位置 y を前面水深 d で除した値であり、一点鎖線は式(1)で得られる波圧の作用高である。なお、スリットに作用する水平波圧は波圧計の応答値にスリットの傾斜角を考慮して算出している。

S1 および S5 のタイプ 1 および 2 のスリットに作用する水平波圧は、合田公式より得られる波圧の 0.8 倍程度であるが、タイプ 3 および 4 は合田公式とほぼ同値となっていることが分かる。これは、スリットに作用する水平波圧が、後壁の形状に影響されずスリット傾斜角によって水平波圧が低減されたためと考えられる。つまり、スリットに対して鉛直に作用する波圧は合田公式と同じ波圧が作用し、スリットに作用する水平成分は傾斜角を考慮することによって算定できる。また、水平波圧が傾斜角に依存することから、鉛直波圧も傾斜角に依存する。

図-9 にケース S1 および S5 の後壁に作用する波圧分布を示す。図中の横軸は、実験値 p_{slope} を合田公式より得られる波圧 p_{hg} で、縦軸は計測位置 y を前面水深 d で除した値である。なお、図中の一点鎖線は、

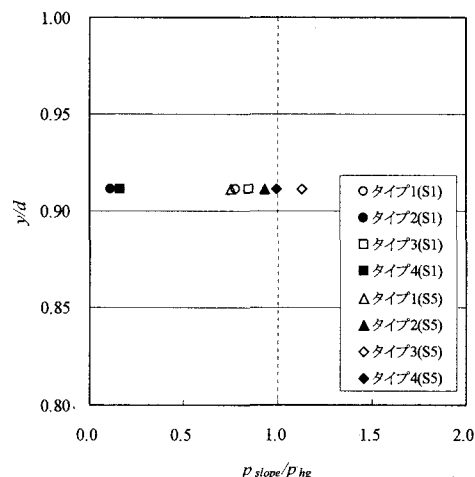


図-10 下床版の波圧

波圧の作用高であり、補正係数 λ_1 は後壁部の波圧の作用高がスリット部と同程度であったため、 $\lambda_1=0.4$ として算定した。

S1 の後壁の波圧分布は、タイプ 2 および 4 の後壁下端で p_{slope}/p_{hg} が 0.1 程度の波圧が作用しているが、波圧の作用高付近より高い計測位置では 0 である。図-5 に示した通りタイプ 2 および 4 の滑動合成波力が最大となる位相は、下床版に作用する波圧が 0 付近であり、後壁にも波はほとんど作用していないと考えられるため、設計上の簡便さを考慮し後壁には波が作用しないとする。一方、タイプ 1 および 3 の後壁下端に取り付けた波圧は、いずれも合田公式と同程度であることが分かる。S5 の後壁の波圧分布は、S1 と異なりばらつきを持った分布となっていることが分かる。これは、本実験で使用した上部斜面スリット堤の遊水室天端が梁構造であるため、波圧の作用高が遊水室天端高を越える際、遊水室天端の開口より水が流入したためと考えられる。しかし、 p_{sli}/p_{hg} は 1 付近のばらつきであるため、傾斜の有無によらず、合田公式で得られる波圧と同程度の波圧が作用するものと考えられる。

図-10 に下床版に作用する波圧を示す。図中の横軸は、下床版に作用する波圧 p_{stage} を計測点と同一高さでの合田公式より得られる波圧 p_{hg} で無次元化し、縦軸は、計測位置 y を前面水深 d で除した値である。S1 のタイプ 2 および 4 は、後壁同様、ほとんど波圧は作用していない。しかし、その他の下床版に作用する波圧は、ばらつきがあるものの p_{stage}/p_{hg} が 1 付近であるため、合田公式より得られる水平波圧と同レベルの波圧が作用していると考えられる。

図-11 にフーチング前趾に作用する波圧を示す。著者ら³⁾はフーチングに作用する波圧を抑圧力と呼び、抑波圧に関し次式の算定方法を提案している。

$$\frac{p_c}{p_{h80}} = \min \left\{ 0.7, 0.7 \exp \left(20 \frac{x}{L} \right) + 0.3 \right\} \quad (3)$$

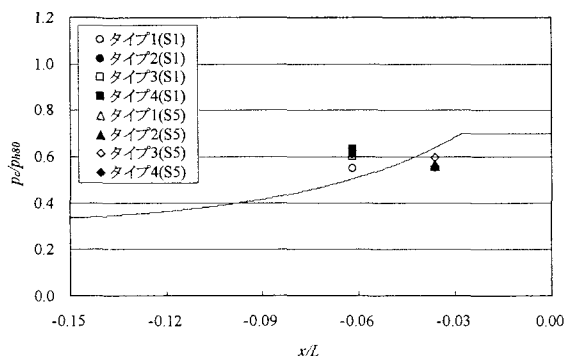


図-11 抑圧力

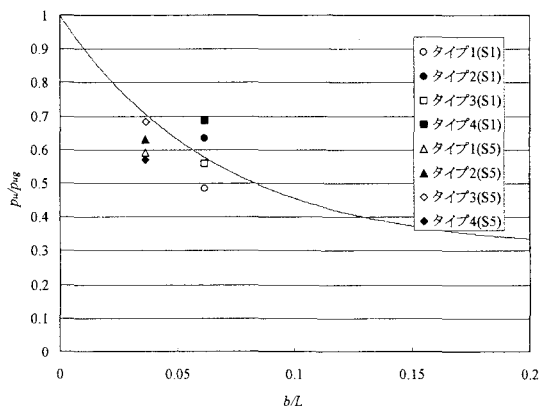


図-12 フーチング先端の揚圧力

ここに、 p_c ：抑圧力、 p_{h80} ：フーチング上面基部の波圧、 x ：任意の計測点、 L ：波長である。

図中の曲線は式(3)で、縦軸は、 p_c を p_{h80} 除した値、横軸は任意計測点を波長で無次元化している。抑圧力の実験値は、式(3)と比較的良好に一致していることがわかる。ここで S1 に着目すると、タイプ 2 および 4 の抑圧力がタイプ 1 および 3 よりも大きくなっていることがわかる。これは、前壁に作用する波圧がピーク値をとる前に滑動合成波力が最大となるためであり、抑圧力も大きくなったと推察できる。一方、S5 の抑圧力は式(3)よりも小さくなっていることが分かる。これも S1 の場合と同様に波の位相差に起因すると考えられる。しかしながら、滑動合成波力が生じる際の位相差は極微小な時間であり、また、図-11 から分かるように式(3)と極めて類似した値をとっていることから抑圧力は式(3)で算定できると考えられる。

図-12 にフーチング先端に取り付けた揚圧力の値を示す。著者ら³⁾は、抑圧力同様に揚圧力についても検証しており、図中の曲線は次式で与えられる。

$$\frac{p_{ue}}{p_{ug}} = 0.7 \exp\left(-15 \frac{b}{L}\right) + 0.3 \quad (4)$$

ここに、 p_{ue} ：フーチング先端の揚圧力、 p_{ug} ：合田公式より得られる揚圧力、 b ：フーチング長である。

図-12 の縦軸は実験より得られた p_{ue} を p_{ug} で、ま

た、横軸はフーチング長 b を波長 L でそれぞれ無次元化したものである。揚圧力は S1 でタイプ 2 および 4 で式(4)より大きく、タイプ 1 および 3 で式(4)よりも小さくなっていることが分かる。また S5 では式(4)より全てのタイプで小さくなっている。この原因として、揚圧力についても抑圧力と同様に位相差により滑動合成波力がピークとなる位相が異なるためと考えられるが、平均的に式(4)と類似しているため、揚圧力の算定にあたっては式(4)より得られる揚圧力を最大とする三角形分布を、フーチングを含む底版全体に分布させることで算定できると考えられる。

4. おわりに

本研究は、上部斜面スリット堤の波圧特性把握および設計手法について水理実験を通じ検証を行った。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- 1) 上部斜面スリット堤に作用する最大滑動合成波力の発生位相は、波圧の作用高と遊水室幅の違いにより、前壁に作用する波圧が最大の位相もしくは下床版に波圧が作用しない位相である。
- 2) 波圧の作用高は、スリットの開口および傾斜角を考慮した式(1)で与えられる。また、合田式による波圧の算定は、すべて式(1)を用いた条件で行ってよい。
- 3) 前壁部に作用する水平波圧は、滑動合成波力が最大となる位相において合田公式で与えることができる。
- 4) スリット部には、合田公式にスリットの傾斜角を考慮した波圧が作用する。
- 5) 後壁部に作用する波圧は、前壁に作用する波圧が最大の位相では、合田公式で波圧を与えることができる。一方、下床版に波圧が作用しない位相では、波が作用していないとする。
- 6) 抑圧力およびフーチング前趾の揚圧力は、(3)式および(4)式で与えることができる。

参考文献

- 1) 高橋重雄，下迫健一郎，佐々木均：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法，港湾技術研究所報告，Vol.30，No.4，pp. 3-34，1991。
- 2) 関口信一郎，渥美洋一，中内勲，宮部秀一，富士昌哉，三輪俊彦：斜面スリットケーソンの開発，第 25 回海洋開発論文集，pp. 487-492，2000。
- 3) 江崎慶治，高山知司，金泰民，荒居祐基：ケーソンのフーチングに作用する抑圧力および揚圧力の検討，第 29 回海洋開発論文集，pp. 73-78，2004。
- 4) Goda, Y. : New wave pressure formulae for composite breakwaters, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, ASCE, pp. 1702-1720, 1974。