

複雑な海底地形に設置された長大防波堤の 波力平滑化特性

REDUCUTION OF WAVE FORCE ON A LONG CAISSON OF VERTICAL
PLACED ON THE COMPLICATED SUBMARINE TOPOGRAPHY

福山貴子¹・秋山真吾¹・池谷毅²

Takako FUKUYAMA, Shingo AKIYAMA and Tsuyoshi IKEYA

¹ 正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

² フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

As the length of a caisson becomes long, the wave force per unit length becomes smaller because of the wave phase difference. In this study, we performed hydraulic model test on a long caisson placed on the complicated submarine topography model under various wave conditions in order to investigate the characteristics of wave reduction.

It is found that the wave force on a long caisson placed on the complicated submarine topography is reduced significantly in the case of oblique waves. The reduction ratio for multi-directional random waves is smaller than that for uni-directional random waves due to directional spreading. In the case of head-on waves, wave force per unit length on the long caisson becomes smaller because of the dispersion of the wave height and the phase due to wave refraction.

Key Words : long caisson, wave force reduction, complicated submarine topography, multi-directional random waves, directional spreading, refraction

1. はじめに

防波堤や護岸の設計では、合田式および断面2次元実験により波力の評価が行われている。しかし、断面2次元実験による波力の評価では波の位相差や地形の3次元的影響を考慮できない。そのため、より合理的で経済的な設計を行うためには、波浪、構造物の3次元性を考慮した検討が必要である。

防波堤の延長が長い場合には、作用する波力の法線方向の位相差により、従来の防波堤に比べて単位長さ当たりの波力を低減する効果があり、これを波力の平滑化と呼んでいる。高橋・下迫¹⁾は、長大ケーソンの波力の平滑化について、合田式に基づいた波力の平滑化係数の計算式を与え、直立堤の場合と混成堤の場合の実験データとの比較を行っており、実験値と計算値はほぼ一致することを示している。

本研究では、複雑な海底地形に設置された防波堤に作用する波力の平滑化特性の解明を目的とし、防波堤の長大化に伴う作用波力と波浪条件の関係について検討を行った。波力の平滑化効果に対する地形および波浪条件の影響を考慮するため、水深急変部を有する海底地形模型上に長大防波堤模型を設置し、

波種、波高、周期、波向きを変化させて実験を行い、波力の平滑化係数の実験データを得た。さらに、引き波のピーク値、衝撃波の作用時間の影響を考慮した計算式から波力の平滑化係数を求め、波浪条件と平滑化効果の関係について検討を行った。

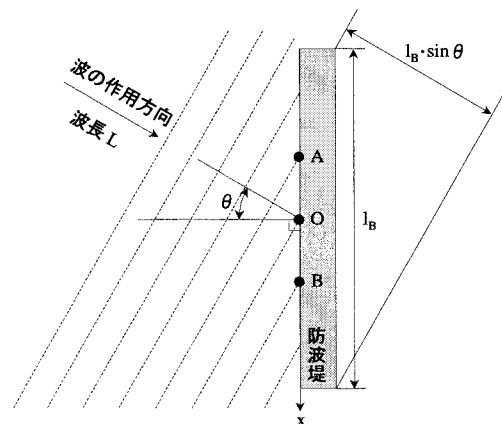


図-1 高橋・下迫¹⁾による波力の平滑化効果概念図

2. 波力の平滑化効果

本研究では高橋・下迫¹⁾による波力の平滑化係数の算出方法に基づき、波力の平滑化特性について検討を行った。

図-1 に高橋・下迫¹⁾による波力の平滑化効果の概念図を示す。波が角度をもって防波堤に作用する場合、波力がピークとなる時間にずれが生じる。このため、防波堤を長大化した場合、ピーク値が防波堤全体に作用すると考えた場合の波力合力よりも、実際に防波堤全体に作用する波力は小さくなる。これにより、防波堤を長大化することによって重量を軽量化することができると考えられる。

波力波形が正弦波形として作用する場合、高橋・明瀬²⁾によると、波力の平滑化係数 δ_B は防波堤の相対長さ $l_B \sin \theta / L$ によって次式で表される。

$$\delta_B = \frac{\sin(\pi l_B \sin \theta / L)}{\pi l_B \sin \theta / L} \quad (l_B \sin \theta / L \leq 1) \quad (1)$$

また、通常、設計波圧としては次の合田式³⁾による直立壁前面の静水面における波圧が用いられる。

$$p = 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D \quad (2)$$

ここで、

ρ_0 水の密度(t/m³)

g 重力加速度(m/s²)

β 波の主方向から±15°の範囲で最も危険な方向と直立壁の法線の垂線が成す角度(°)

H_D 計算に用いる波高(m)

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right\}^2$$

$$\alpha_2 = \frac{h_b - d \left(\frac{H_D}{d} \right)^2}{3h_b} \text{ と } \frac{2d}{H_D} \text{ のうち、いずれか小さい数値}$$

h_b 直立壁の前面から沖側へ有義波高の5倍の距離の地点における水深(m)

d マウンドの根固め工または被覆工の天端のうち、いずれか浅い水深(m)

高橋・下迫¹⁾は、合田式の波力に基づいたより現実に近い波形として、図-2 に示すような α_1 の項を正弦波とし、 α_2 の項を周期 T の $1/20$ の三角波として

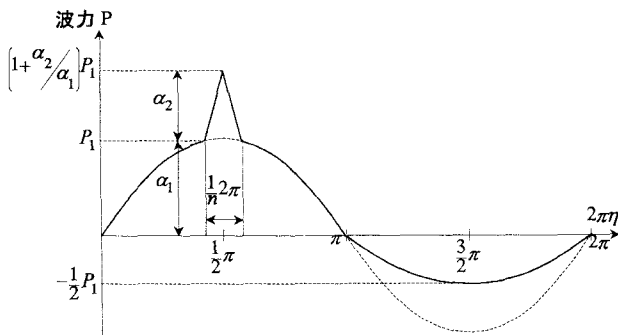


図-2 衝撃波と負の波力を考慮した波力波形
(高橋・下迫¹⁾による波力波形に加筆)

付け加えた波形について平滑化係数 δ_B の計算式を与えている。本研究では、次式(3)で表される、三角波の作用時間を周期 T の $1/n$ とし、負の波力を防波堤前面の水位が $-1/2 H$ だけ低下したときの波力とした波力 P について考えた。このときの平滑化係数 δ_B は次式(4)で表される。

$$P = \begin{cases} P_1 \sin 2\pi\eta & : 0 \leq \eta < 1/4 - 1/2n, 1/4 + 1/2n \leq \eta < 1/2 \\ P_1 \left\{ \sin 2\pi\eta + \alpha_2 / \alpha_1 (1 - 2n|1/4 - \eta|) \right\} & : 1/4 - 1/2n \leq \eta < 1/4 + 1/2n \\ 1/2 P_1 \sin 2\pi\eta & : 1/2 \leq \eta < 1 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

$$\eta = t / T - x \sin \theta / L$$

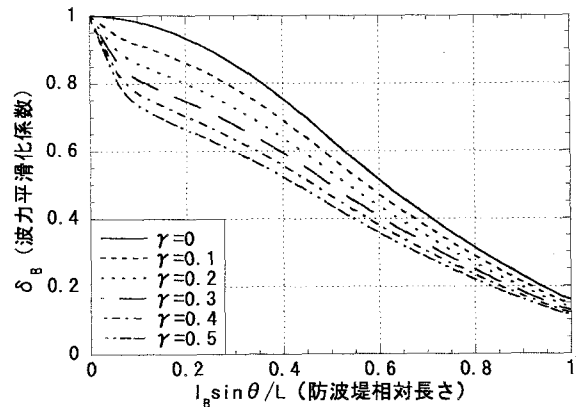
$$\delta_B = (\delta_{B1} + \gamma \delta_{B2}) / (1 + \gamma) \quad (4)$$

ここで、

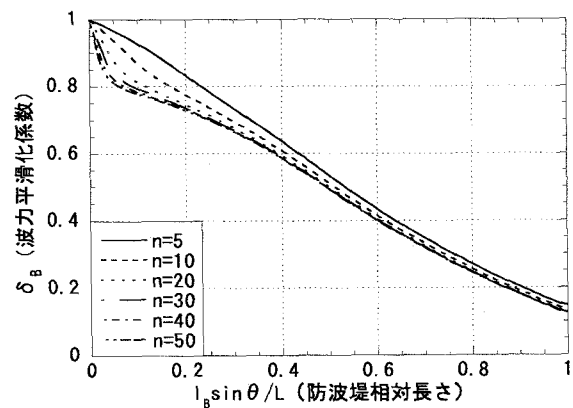
$$\delta_{B1} = \begin{cases} \frac{\sin(\pi l_B \sin \theta / L)}{\pi l_B \sin \theta / L} & : l_B \sin \theta / L \leq 0.5 \\ \frac{1}{2\pi l_B \sin \theta / L} \left\{ 1 - \cos \frac{2\pi}{L} \left(\frac{L}{4} + \frac{l_B}{2} \sin \theta \right) \right\} & : l_B \sin \theta / L > 0.5 \end{cases}$$

$$\delta_{B2} = \begin{cases} L / (2n l_B \sin \theta) & : l_B \sin \theta / L \geq 1/n \\ 1 - (n/2) l_B \sin \theta / L & : l_B \sin \theta / L < 1/n \end{cases}$$

$$\gamma = \alpha_2 \cos^2 \theta / \alpha_1$$



(a) γ の効果 ($n=20$)



(b) n の効果 ($\gamma=0.3$)

図-3 波力平滑化係数

3. 実験方法

Figure 1 is a schematic diagram of the experimental setup. It shows a rectangular channel with a width of 3600 mm and a height of 175 mm. The channel is divided into nine sections, numbered 1 to 9. The distance between the centers of the sections is 400 mm. The sections are labeled '波圧計' (Wave Pressure Gauge) and '防波堤' (Breakwater). The channel is supported by a 'マウンド' (Mound). The diagram also shows the positions of the wave pressure gauges and the breakwaters. The distance between the centers of the gauges is 400 mm. The distance between the centers of the breakwaters is 1200 mm. The distance between the center of a gauge and the center of a breakwater is 2000 mm. The distance between the center of a gauge and the right wall is 2800 mm. The distance between the center of a gauge and the left wall is 3600 mm. The unit is mm.

に示す複雑な海底地形模型上の水深急変部にマウンドを構築し、防波堤模型を設置した。マウンド前面水深は 24cm~40cm 程度で、マウンド上水深は 13cm とした。防波堤模型は鋼製で、高さは 17.5cm、長さは 3.6m であり、延長方向に 40cm 間隔で測線を 9 本設けた(図-5)。1 本の測線には図-6 に示すように鉛直方向に 5 点の小型波圧計を設置し、水平波力はこれらの波圧計で計測された波圧を防波堤の高さで積分したものとした。また、防波堤長さ l_B は、図-5 に示すように測線 No.5 を基準として両側へ延長して 5 種類変化させたものとした。

- 241 -

表-1 実験ケース

CASE	波種	H_0	T_0	波向き
au0811	一方向 不規則波	8.0cm	1.1s	0°
bu0811				15°
cu0811				30°
bm0811	多方向 不規則波	8.0cm	1.1s	15°
cm0811				30°
au0613	一方向 不規則波	6.0cm	1.3s	0°
bu0613				15°
cu0613				30°
bm0613	多方向 不規則波	6.0cm	1.3s	15°
cm0613				30°
au0813	一方向 不規則波	8.0cm	1.3s	0°
bu0813				15°
cu0813				30°
am0813	多方向 不規則波	8.0cm	1.3s	0°
bm0813				15°
cm0813				30°
au1013	一方向 不規則波	10.0cm	1.3s	0°
bu1013				15°
cu1013				30°
am1013	多方向 不規則波	10.0cm	1.3s	0°
bm1013				15°
cm1013				30°
au0817	一方向 不規則波	8.0cm	1.3s	0°
bu0817				15°
cu0817				30°
bm0817	多方向 不規則波	8.0cm	1.3s	15°
cm0817				30°

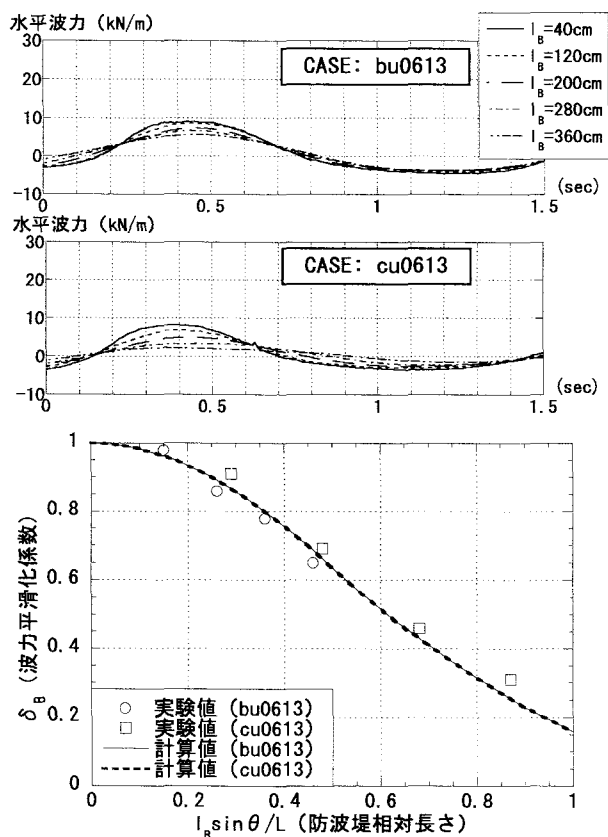
4. 実験結果

(1) 斜め入射による波力平滑特性

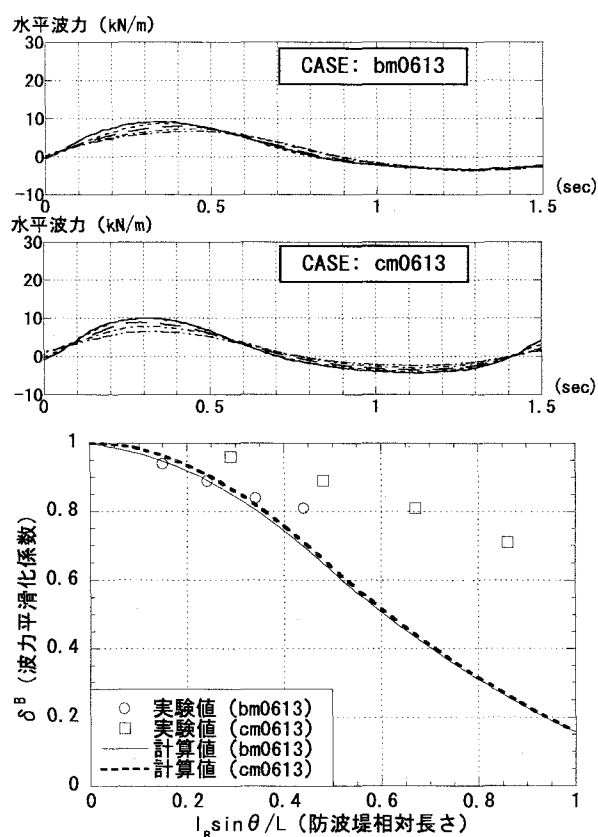
ここでは、波形勾配が小さく波力が正弦波形に近い形状で作用するケース (bu0613, bm0613, cu0613, cm0613) と、波形勾配が大きく防波堤前面で碎波するケース (bu1013, bm1013, cu1013, cm1013), さらに波形勾配が大きく、碎波後の波が防波堤に作用するケース (bu0811, bm0811, cu0811, cm0811) について述べる。

図-7(1)～(3) に、防波堤長さ l_B を変化させ、防波堤全体に作用する波力を平均した平均波力波形および波力の平滑化係数を示す。波力平滑化係数の計算値については、実験データの波力波形から n, α_1, α_2 を読み取り式(4)に代入して得られたものであり、実験値については、防波堤中央部の前面における波高計測結果から、 $H_{1/10}$ 程度の波を選び、各測線に作用する最大水平波力の平均値に対する、対象とした防波堤全体に作用する平均水平波力の最大値の比を求めたものである。ただし多方向不規則波については、防波堤中央部と他の測線における波高のばらつきが大きいため、 $H_{1/10}$ 相当の波を4波選びそれぞれから得られた平滑化係数を平均した値を使用している。

波力が正弦波形に近い形状で作用する場合、一方向不規則波では防波堤長さ l_B が長くなるほど波力の平滑化効果が大きくなっている。また、入射角によらず、実験値と計算値はほぼ一致している。一方、

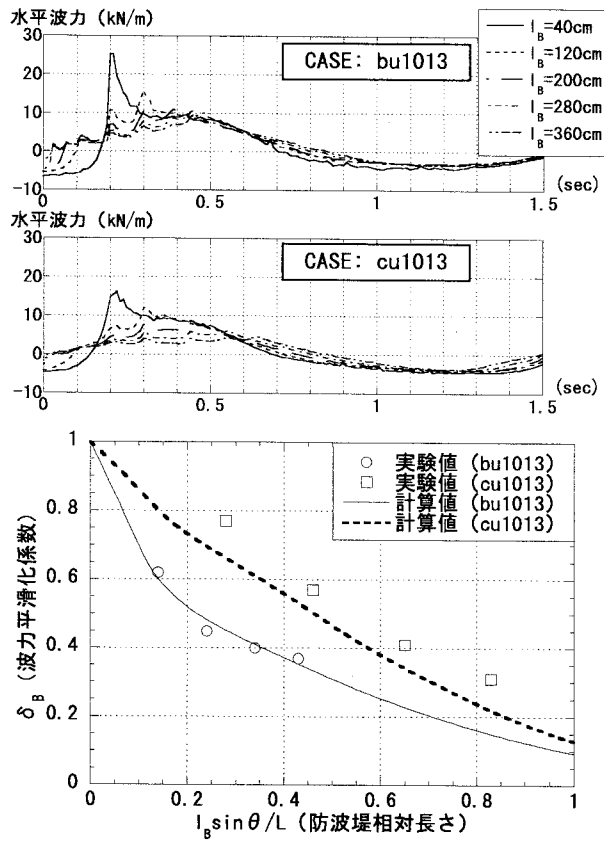


(a) 一方向不規則波

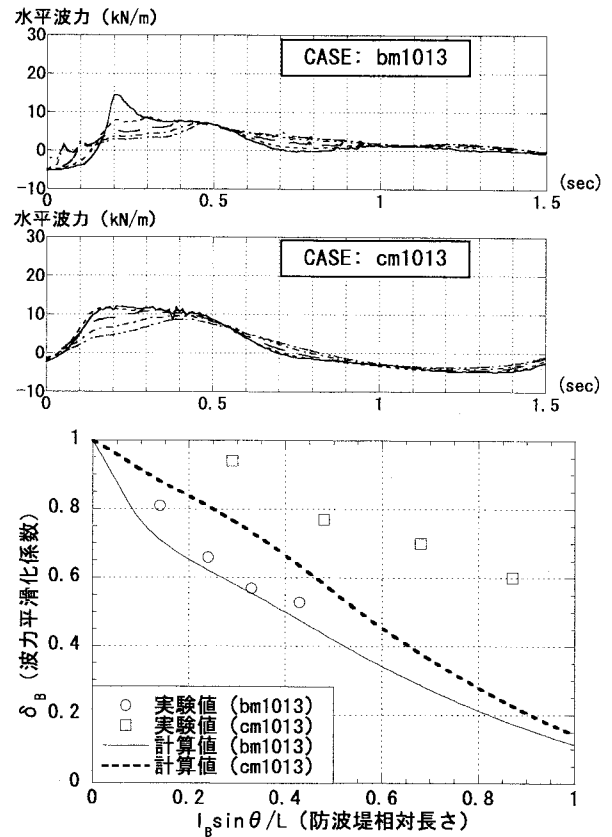


(b) 多方向不規則波

図-7(1) 水平波力の平滑効果 (波高 6.0cm, 周期 1.3s の場合)

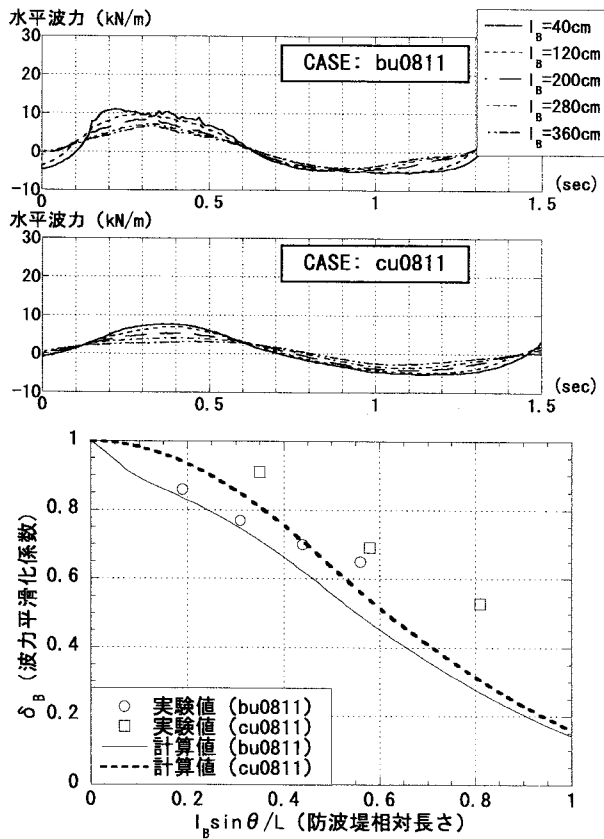


(a) 一方向不規則波

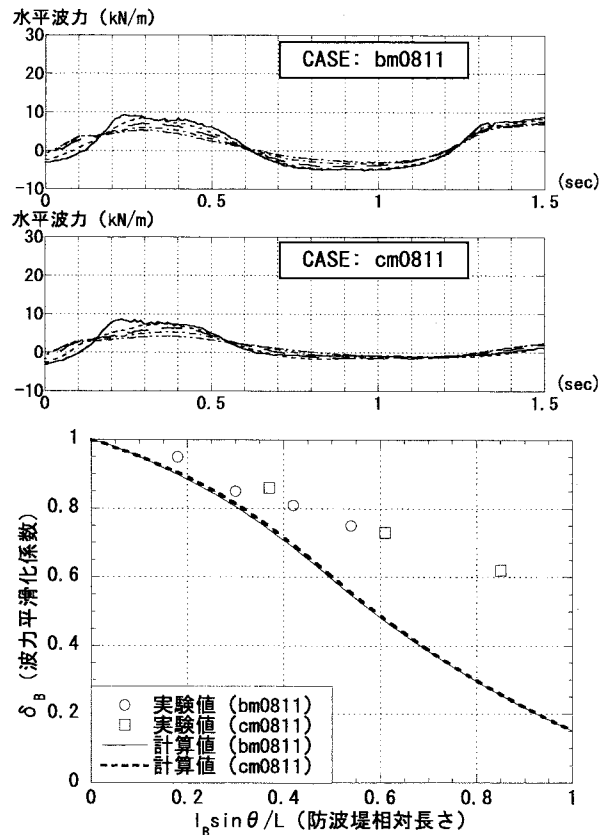


(b) 多方向不規則波

図-7(2) 水平波力の平滑効果 (波高 10.0cm, 周期 1.3s の場合)



(a) 一方向不規則波



(b) 多方向不規則波

図-7(3) 水平波力の平滑効果 (波高 8.0cm, 周期 1.1s の場合)

多方向不規則波についても、防波堤長さ l_B が長くなるほど平滑効果が大きくなっている。入射角が小さいケースでは実験値と計算値が一致しているが、入射角の大きいケースでは計算値よりも実験値が大きくなっている。これは、多方向不規則波については、特に入射角の大きい場合には、海底地形の影響により作用する波力のばらつきが大きく、波力のピークの作用する時間がずれ、さらに作用波力の継続時間が長くなるためであると考えられる。

防波堤前面で砕波するケースでは、一方向不規則波の場合は防波堤長さ l_B が長くなるほど平滑効果が大きくなっており、特に、作用時間の短い衝撃波力が作用するため、他のケースと比較して平滑効果が大きい。加えて入射角が小さく、より衝撃的な波が作用するケースではさらに平滑効果は大きくなっている。また、入射角によらず実験値と計算値はほぼ一致している。多方向不規則波の場合でも、防波堤長さ l_B が長くなるほど、特に入射角の小さい場合に平滑効果が大きい。また、波力が正弦波形に近い形状で作用するケースと同様、入射角の小さい場合は実験値と計算値はほぼ一致しているが、入射角の大きい場合は計算値よりも実験値が大きくなっている。

砕波後の波が作用するケースでは、一方向不規則波の場合、多方向不規則波の場合ともに、防波堤長さ l_B が長くなるほど平滑効果が大きくなっているものの、入射角によらず計算値よりも実際の低減効果が小さい。これは、砕波するために波形が崩れて波力の作用する時間がずれ、さらに作用時間が正弦波形よりも長くなるため、正弦波形を仮定した計算値に比べて波力の平滑効果が小さくなるものと考えられる。

その他の正弦波形に近い波力が作用するケース、および防波堤前面で砕波するケースについても同様であった。

(2) 直角入射による波力平滑特性

図-8 に、直角入射のケースについて、横軸に各測線に作用する最大水平波力の平均値を、縦軸に防波堤が 3.6m としたときの防波堤全体に作用する平均水平波力の最大値をプロットし、両者の相関を求めたものを示す。

直角入射の場合でも、直線よりもプロットが下にあることから、波力の平滑効果があることが分かる。これは、地形による屈折の影響により波力のピークに横断方向で位相差が生じるためであると考えられる。また、同じ周期・波高のケースでも、多方向不規則波の場合には波の分散性の影響が加わり作用する波力そのものが小さくなっていることが分かる。

(3) 波の多方向性の影響

斜め入射の場合、多方向不規則波において波力の平滑効果が計算値よりも大きくなった。直角入射の場合に多方向不規則波では作用する波力が小さくなっていることを考えると、斜め入射の場合にも、多

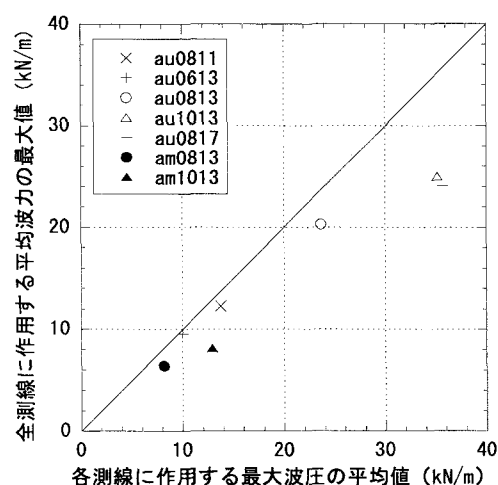


図-8 波力の平滑効果（直角入射の場合）

方向不規則波では波の分散性の影響により各測線に作用する最大波力の平均値が小さくなっていると考えられるため、平滑効果が計算値よりも低くなっているものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 複雑な海底地形上の防波堤に作用する波力は、波の位相差、波浪の分散性の影響により防波堤を長くすることにより平滑化される。
- (2) 負の波力のピーク値の影響、衝撃波の作用時間を考慮することで、斜め入射の波力の平滑化特性を概ね再現できる。
- (3) 斜め入射の場合、衝撃波の作用する波条件（入射角小、一方向不規則波、波形勾配大）ほど波力の平滑効果が大きい。
- (4) 砕波後の波が構造物に作用する条件では、波圧のピークが崩れ波力の作用時間がずれ、さらに継続時間がそれ以外の波よりも長くなるため、正弦波を仮定した計算値に比べ平滑効果が小さい。
- (5) 直角入射の場合でも、地形による屈折の影響により波力のピークに横断方向で位相差が生じ、波力の平滑効果がある。
- (6) 多方向不規則波の場合には波の分散性により計算値よりも実際の波力平滑効果は小さくなる。

今後は、波の多方向性や非線形性を考慮したより現実的な波力のモデル化を行い、波力平滑化特性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋重雄，下迫健一郎：長大ケーソンの波力平滑効果と耐波安定性，港湾技術研究所資料，No.0685，1990。
- 2) 高橋重雄，明瀬一行：波力発電ケーソンの空気出力に及ぼす波向きと平面配置の影響，第33回海岸工学講演会論文集，pp.501-505，1986。
- 3) 運輸省港湾局監修：港湾施設の技術上の基準・同解説（上），日本港湾協会，pp.140-147，1999