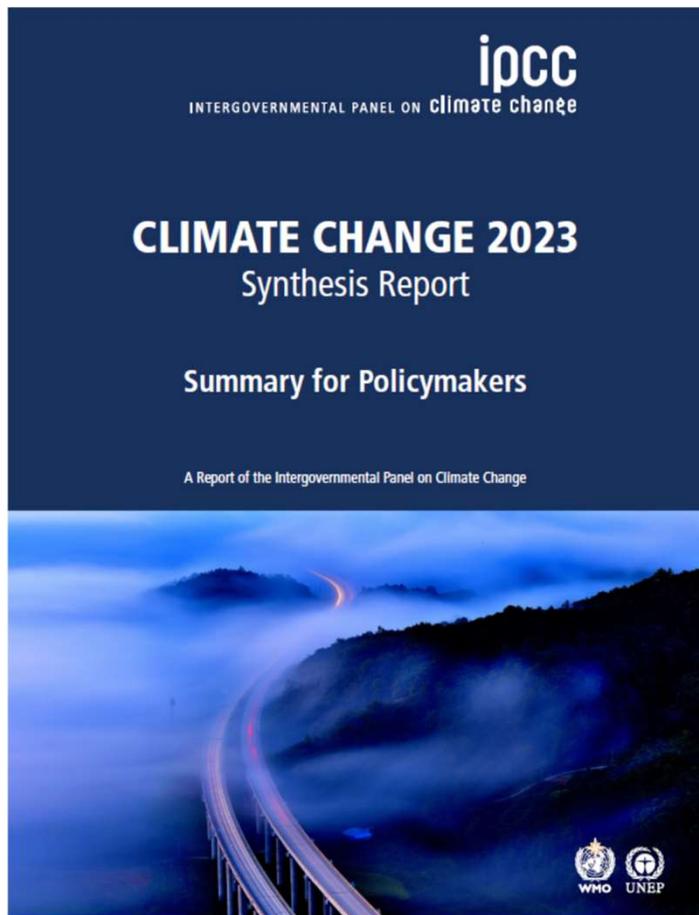


第23回全国漁港漁場整備技術研究発表会

藻場造成型漁港施設である潜堤付き防波堤の 消波機能と設計法

水産技術研究所 大井邦昭

研究の背景



IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

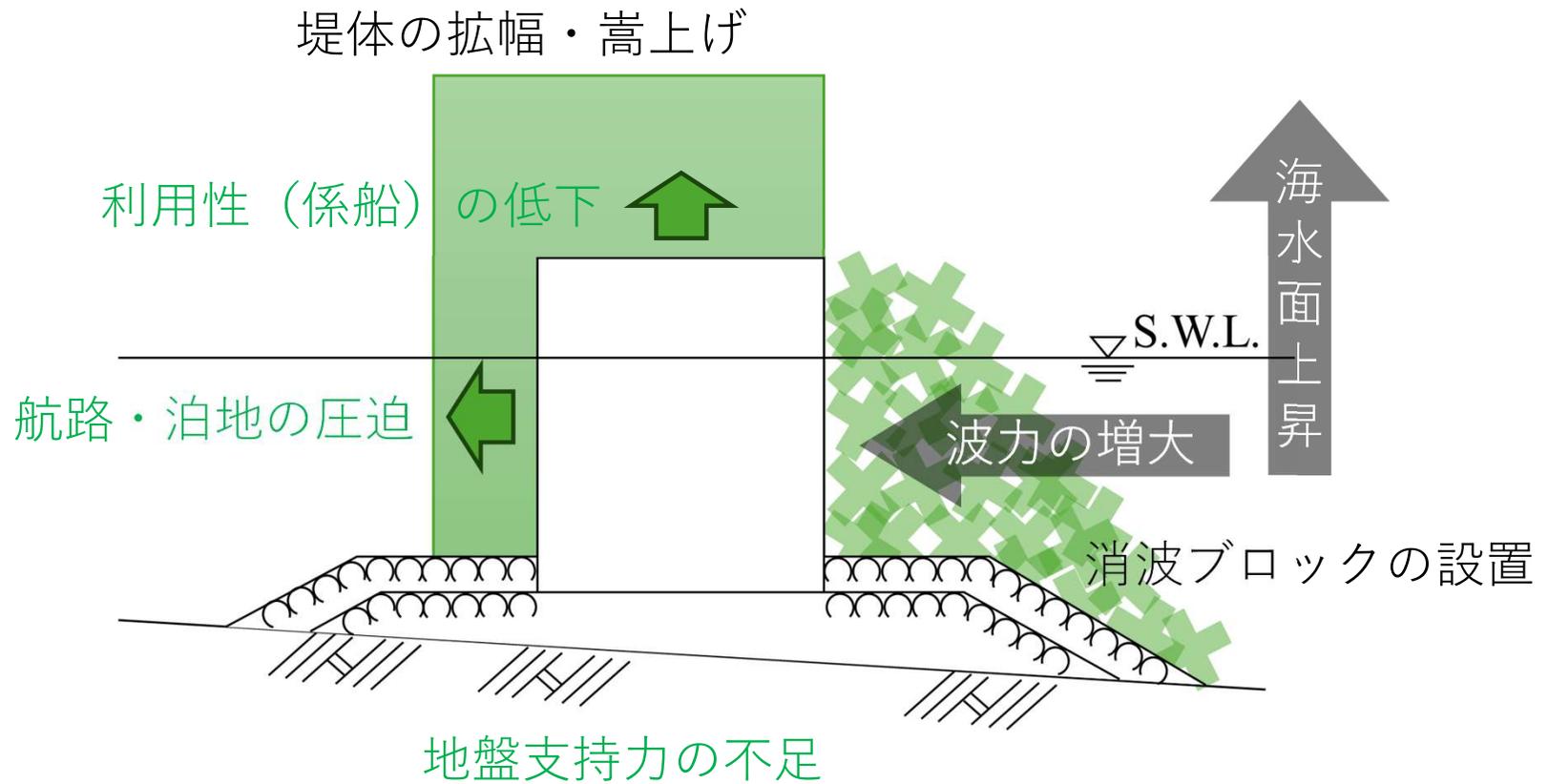
人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない

—IPCC第6次報告書（2023）

- 日本の気候変動2025（文科省、気象庁）
- 漁港施設等における気候変動適応策の設計に係る手引き（水産庁）

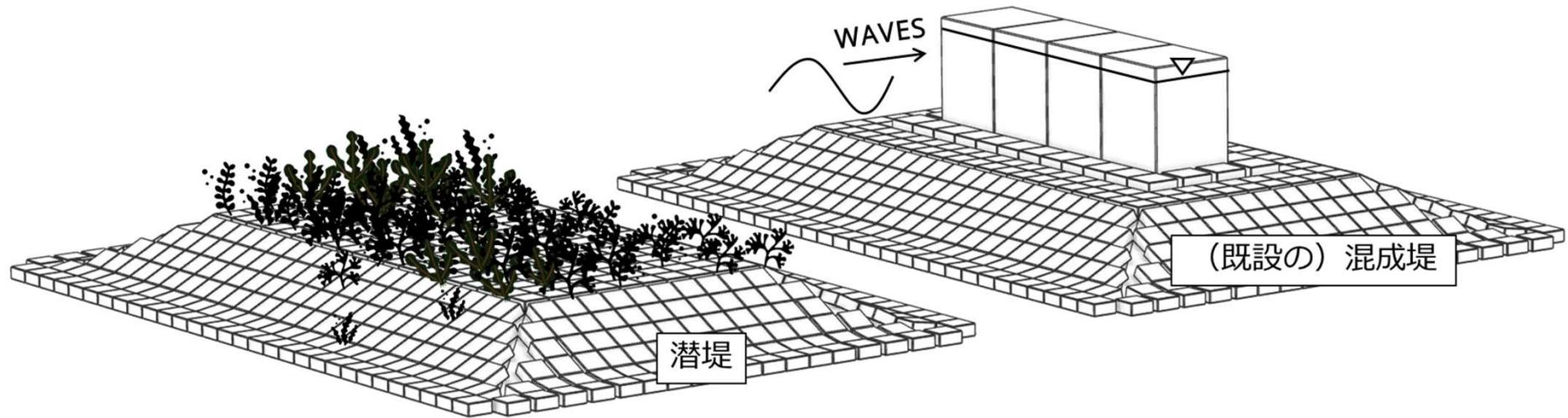
気候変動予測（海面上昇、波浪増大）
を踏まえた施設の改良が可能となった

防波堤の気候変動対策の既往方法とその課題



👉 本体工の直接的な改良を伴わない対策工の開発が必要

「潜堤付き防波堤」の概略と本研究の目的



- 既設防波堤の前面に潜堤を構築する工法。本体工には手を加えないため既往の対策工が抱える課題が生じにくい
- 1990年頃、海水交換を目的とした潜堤付き孔開き防波堤として開発された
- 潜堤で促進される砕波に伴う高流速により磯焼けの要因であるウニの食害を防止する効果が期待される（ガイドラインにも藻場造成型漁港施設として紹介されている）
- 消波性能に関する検証事例、技術資料の整理などに関する取り組みは乏しい

「潜堤付き防波堤」に関する既往の技術情報

中泉昌光，山本正昭，間辺本文：潜堤付き防波堤の波力に関する実験的研究，*海岸工学講演会論文集*，35巻，pp. 632-636，1988.

- 規則波を用いた水理模型実験の実施
- 波力低減効果の検証
- 衝撃碎波圧の作用を避けるための構造条件の提示
- 波力算定式（合田式）の補正係数の評価
- 遊水部（防波堤と潜堤の間）での水位上昇量の整理

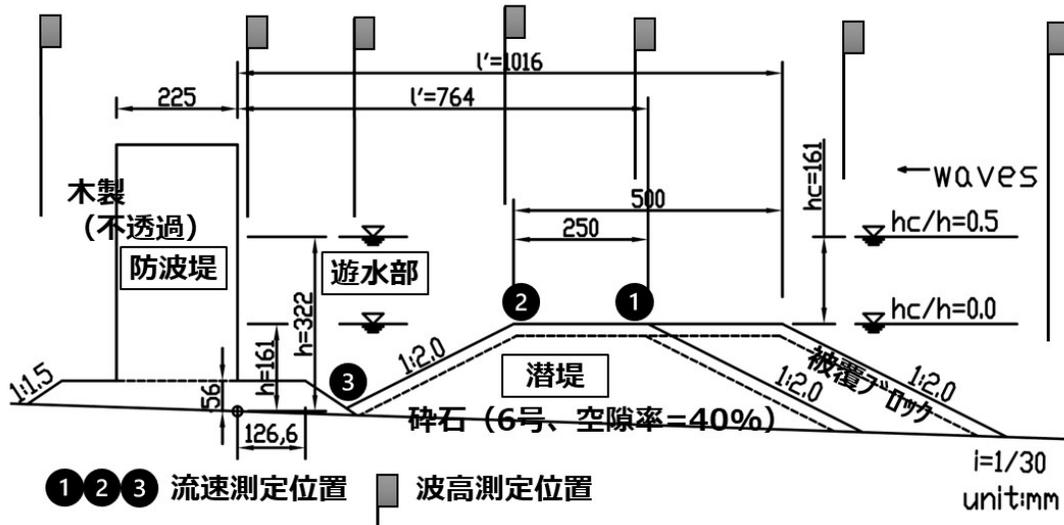
☞ 現行の設計基準に反映されている

本研究で新たに整理する技術情報

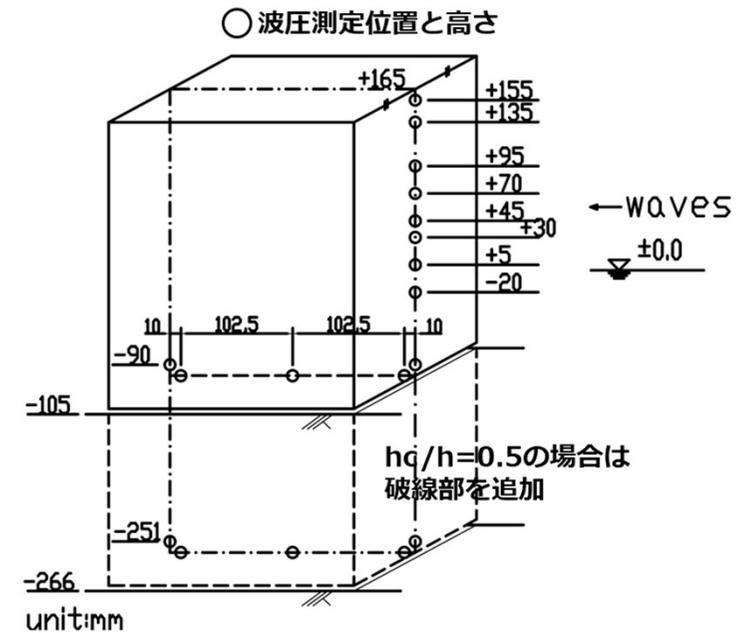
- 不規則波を用いた水理模型実験による消波機能の検証
- 越波流量
- 反射／伝達波高
- （水位上昇量）
- （波高変化）
- 施設周辺で生じる流速の算定方法
- 波力算定式 ※更新

水理模型実験の概略

入射波高測定位置
(無堤時)



沖波高計



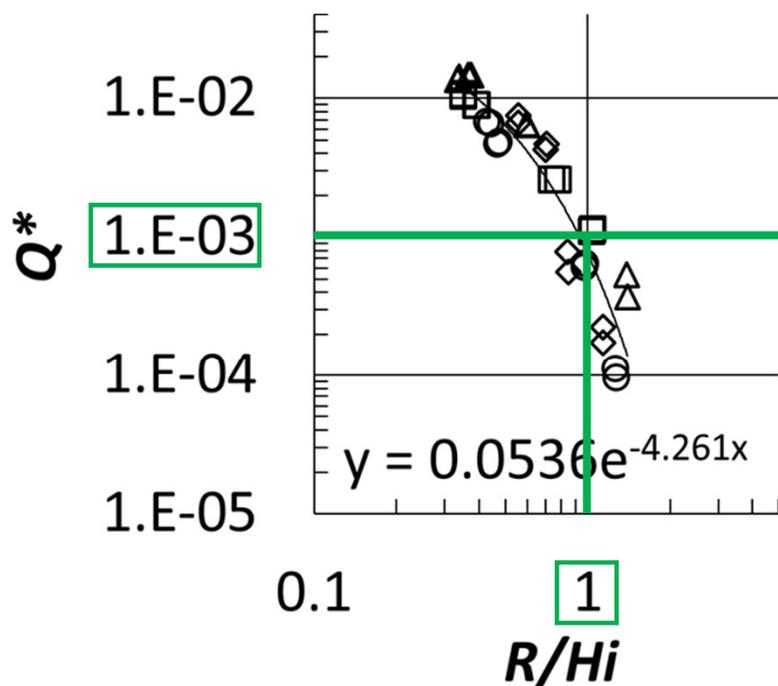
hc/h	l' (cm)	T (s)			
		1.2	1.33	2.00	2.67
		H_0' (cm)			
		4.88~9.05	4.17~12.73	4.17~16.67	2.78~16.67
0.0	76.4 ($B=25$ cm)	$l'/L=0.55$	$l'/L=0.49$	$l'/L=0.31$	$l'/L=0.23$
0.5	76.4 ($B=25$ cm)	$l'/L=0.42$	$l'/L=0.37$	$l'/L=0.23$	$l'/L=0.17$
0.0	101.6 ($B=50$ cm)	$l'/L=0.73$	$l'/L=0.65$	$l'/L=0.42$	$l'/L=0.31$
0.5	101.6 ($B=50$ cm)	$l'/L=0.56$	$l'/L=0.49$	$l'/L=0.30$	$l'/L=0.22$

- 修正BMスペクトルによる不規則波
- 設置水深に対する潜堤高さの比 h_c/h 、潜堤の離岸距離 l' はそれぞれ2種類を実施
- 周期4種、波高2~4種、構造条件4種の延べ56ケースを実施
- 一部のケースの l'/L は現行基準でNGとなるものだが、系統的な研究となるよう敢えて含んで行った

結果と考察 [越波流量]

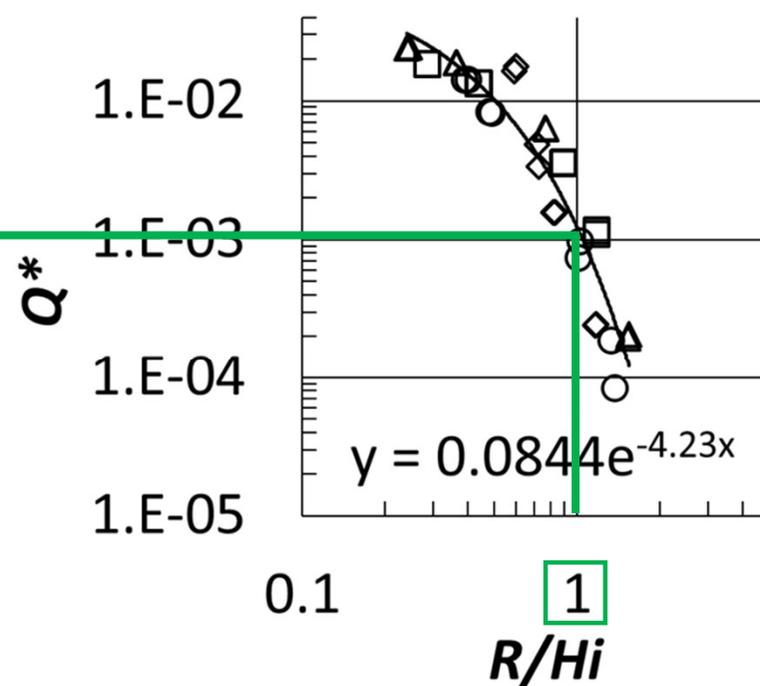
(a) $h_c/h = 0.0$

Δ $l'/L=0.23$ \square $l'/L=0.31$
 \circ $l'/L=0.49$ \diamond $l'/L=0.55$



(b) $h_c/h = 0.5$

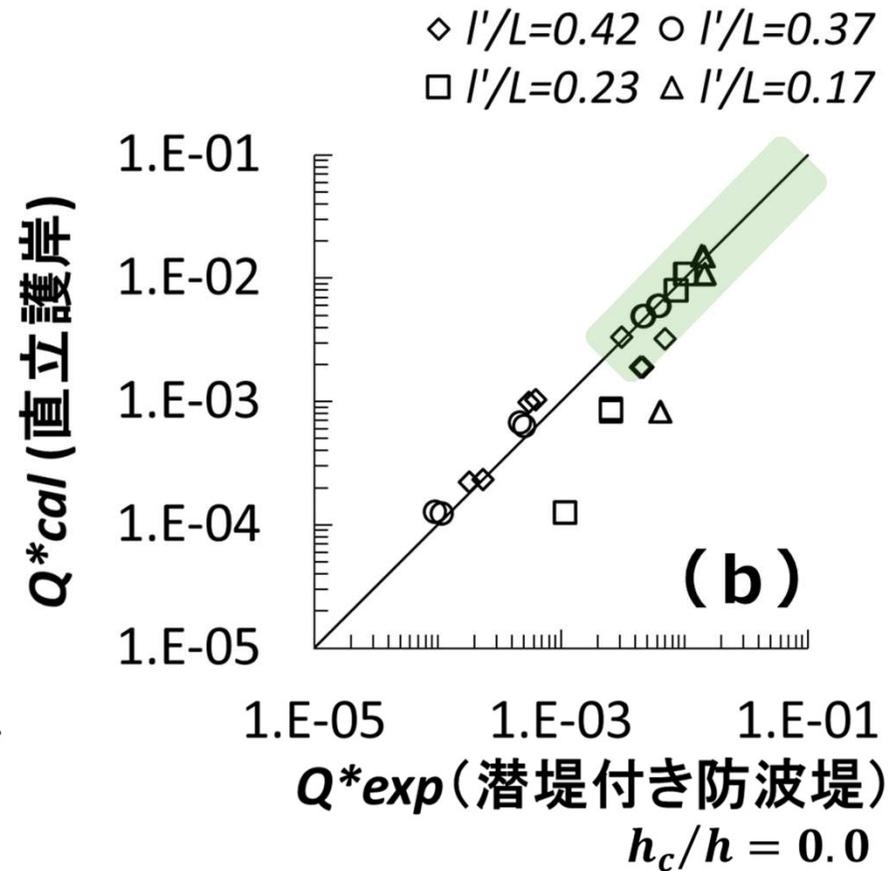
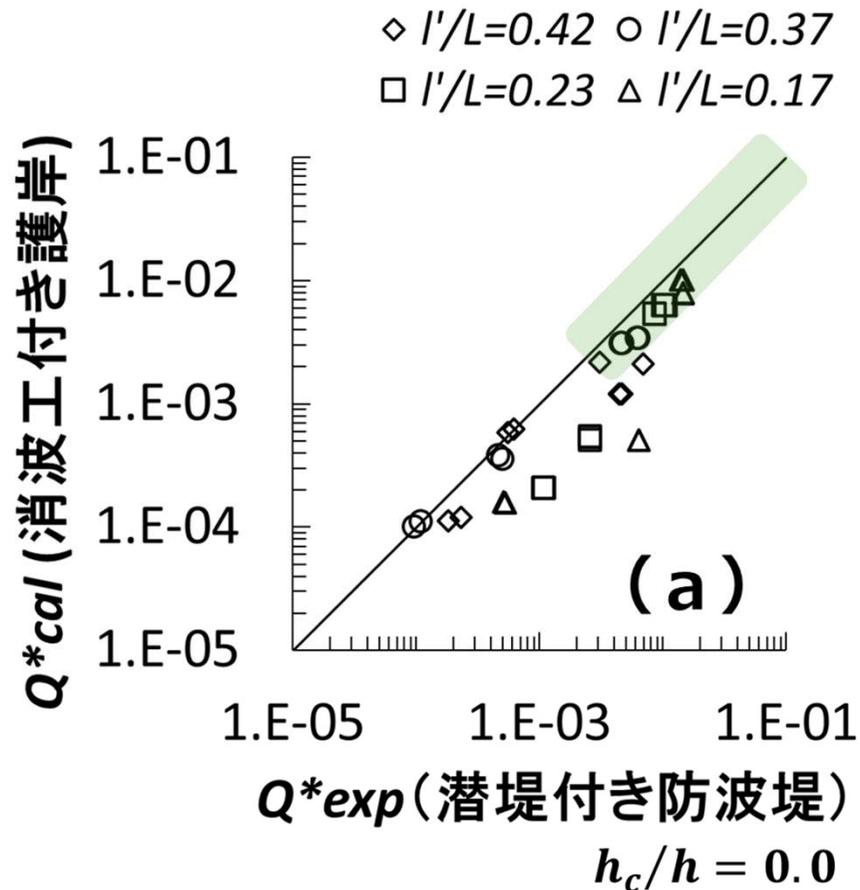
Δ $l'/L=0.17$ \square $l'/L=0.23$
 \circ $l'/L=0.37$ \diamond $l'/L=0.42$



波高に対する防波堤の相対天端高さ (R/H_i) と無次元越波流量 (Q^*) の関係

$l' = 76.4cm$ の場合 ($l' = 101.6cm$ の結果はほぼ同じ)

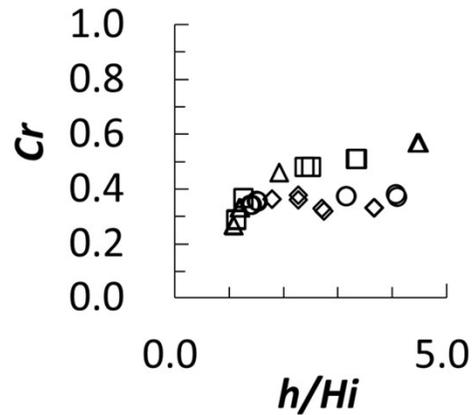
結果と考察 [越波流量 (類似構造との比較)]



結果と考察 [反射率・伝達率]

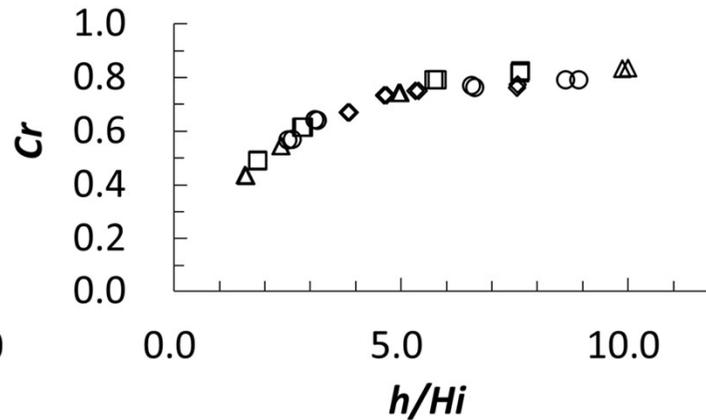
(a) $h_c/h = 0.0$

◇ $l'/L=0.55$ ○ $l'/L=0.49$
□ $l'/L=0.31$ △ $l'/L=0.23$

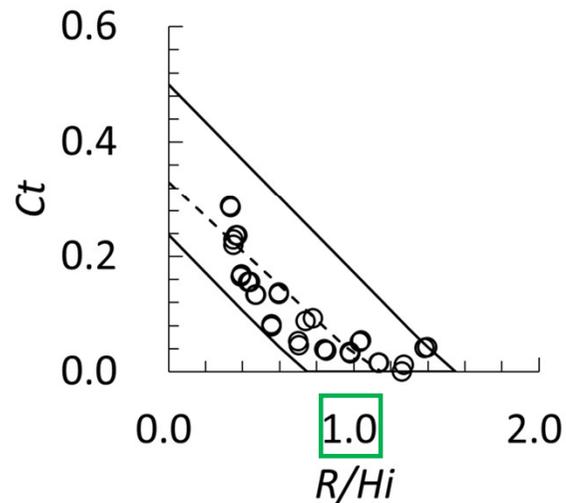


(b) $h_c/h = 0.5$

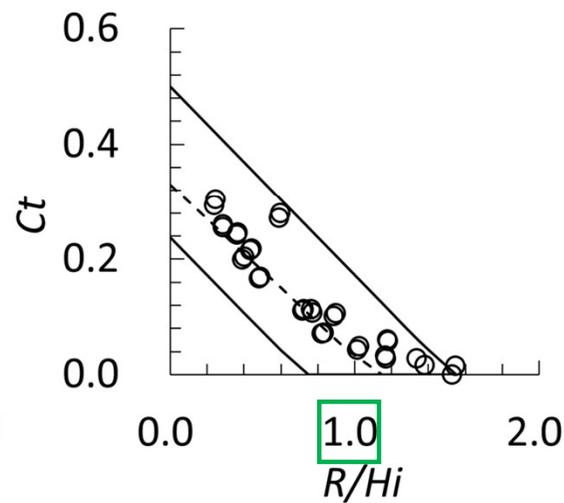
◇ $l'/L=0.42$ ○ $l'/L=0.37$
□ $l'/L=0.23$ △ $l'/L=0.17$



(a) $h_c/h = 0.0$



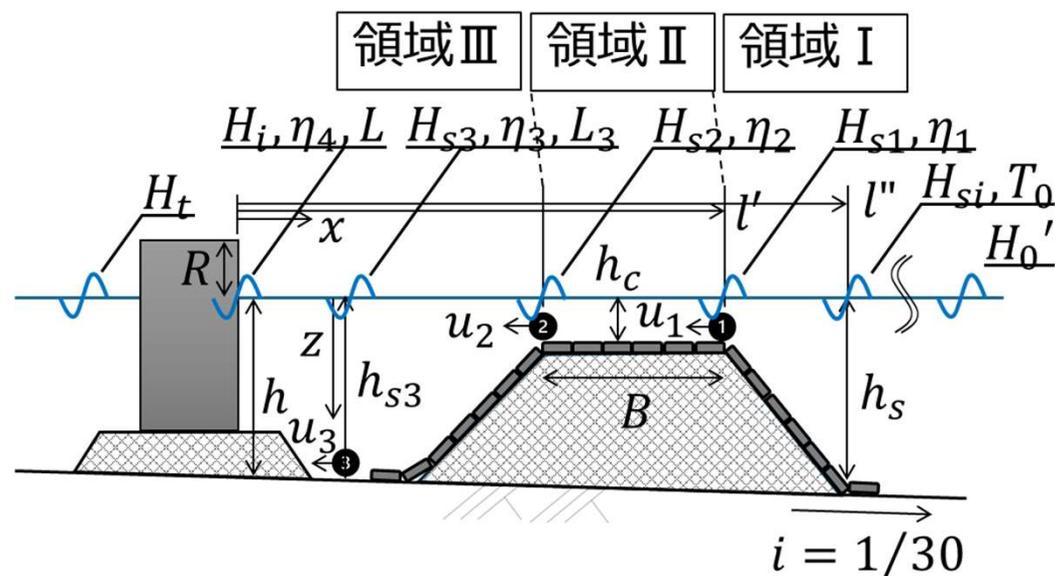
(b) $h_c/h = 0.5$



———— 直立堤の伝達率の上限と下限
----- 消波ブロック被覆堤 (=消波工付き護岸) の伝達率

結果と考察 [水位上昇量・波高変化・流速の算定]

- ウニによる海藻の摂餌限界流速：0.4m/s (kawamata,1997)
- しかし、潜堤付き防波堤の周辺で生じる流速を算定する手法は存在しない（背後に防波堤がない人工リーフにおける流速算定手法はある）
- 本研究では潜堤付き防波堤の周辺で生じる水位上昇量・波高から潜堤天端沖側端・岸側端、および遊水部中央底面における流速を算定する手法を提示する



👉 テクニカルかつ手数が多いので概略のみ

結果と考察 [流速の算定]

- 潜堤天端上 ($h_c/h = 0.5$ の場合)
微小振幅波理論 (極浅海波) より

$$u_{1,2} = 2 \times \frac{H_{S1,2}}{2} \sqrt{\frac{g}{(h_c + \eta_{1,2})}}$$

- 潜堤天端上 ($h_c/h = 0.0$ の場合)
本間の越流公式より

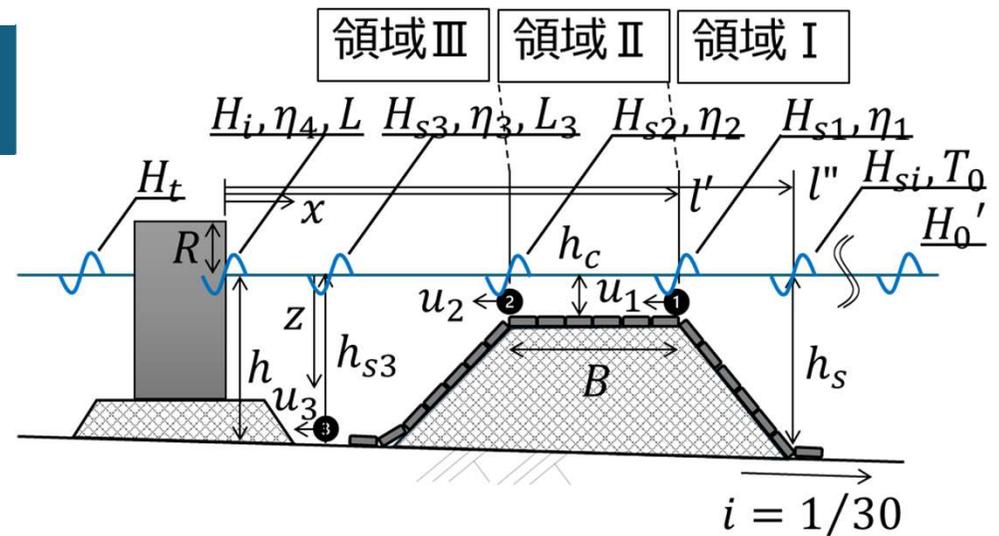
$$u_{1,2} = 2 \times 0.35 \sqrt{2g \left(\frac{H_{S1,2}}{2} + h_c + \eta_{1,2} \right)}$$

- 遊水部
微小振幅波理論 (浅海波) より

$$u'_3 = \frac{\pi H_{S3} \cosh(2\pi(h_{S3} + \eta_3 + z)/L_3)}{T_0 \sinh(2\pi(h_{S3} + \eta_3)/L_3)}$$

($h_c/h = 0.5$ の場合)

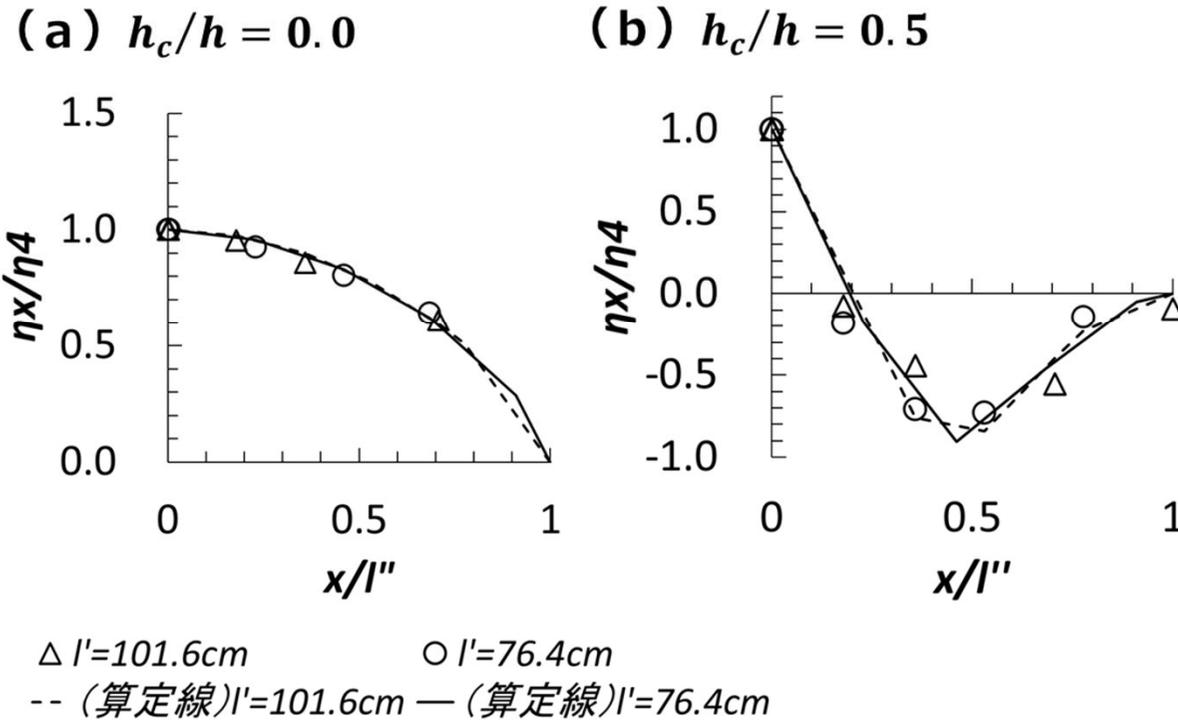
$$u_3 = 5.0 \times 10^{-3} \times u'_3{}^2 + 0.535 \times u'_3$$



($h_c/h = 0.0$ の場合)

$$u_3 = 8.2 \times 10^{-3} \times u'_3{}^2 + 7.73 \times 10^{-2} \times u'_3 + 3.42$$

結果と考察 [水位上昇量 1]

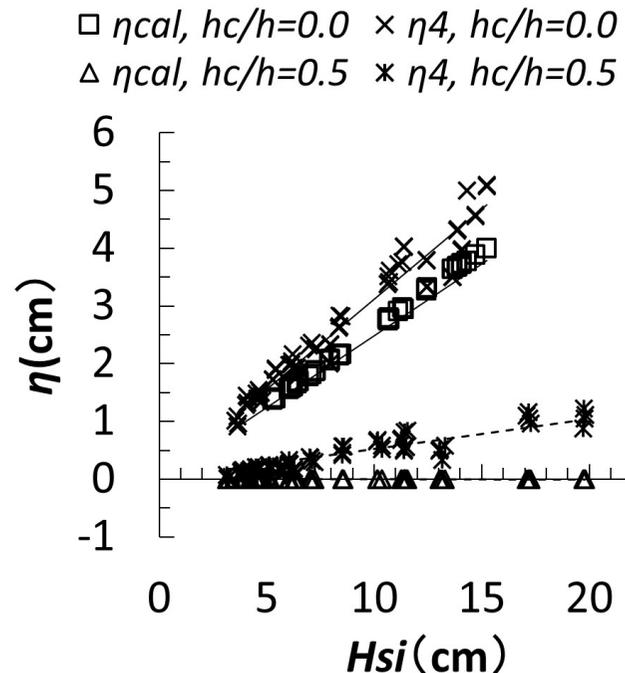


$$(a) \frac{\eta_x}{\eta_4} = \cos\left(2\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{l'''}\right)^{0.638}$$

$$(b) \frac{\eta_x}{\eta_4} = \left(1 - \frac{x}{l'''}\right) \left(\cos\left(2\pi \cdot 1.0 \cdot \frac{x}{l'''}\right) - 1.54 \cdot \frac{x}{l'''}\right)$$

η_x : 任意地点の水位上昇量、 η_4 : 防波堤前面位置での水位上昇量

結果と考察 [水位上昇量 2]



$$\frac{\eta_4}{H_{Si}} = \frac{\eta_{cal}}{H_{Si}} + \alpha$$

$$\alpha = -6.0 \times 10^{-3} \times \frac{h_c}{h} + 6.0 \times 10^{-2}$$

H_{Si} : 潜堤法先位置での波高（設計条件（換算沖波波高 H_0' ）から波高変化図により算定）

η_{cal} : 背後に防波堤がない場合の潜堤通過後の水位上昇量の理論値（中村1991）

計算途中で必要となる“潜堤通過後の波高”は中山ら1994の実験式で設定できる

[中村1991：黒本852p、中山ら1994：黒本p77]

結果と考察 [波高変化]

$$H_{S1} = K_f \cdot H_{Si}$$

$$H_{S2} = K_b \cdot H_{S1} = K_b \cdot K_f \cdot H_{Si}$$

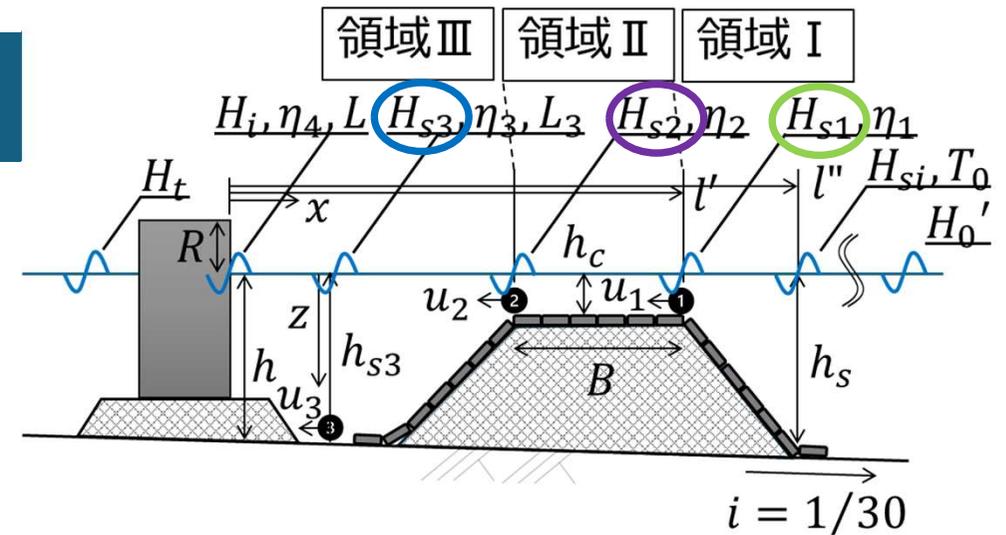
$$H_{S3} = K_e \cdot H_{S2} = K_e \cdot K_b \cdot K_f \cdot H_{Si}$$

K_f, K_b, K_e : 領域 I ~ III の波高伝達率

$$K_f = \begin{cases} 1.30, & K_f > 1.30 \\ 0.179 \times \frac{h_s}{H_{Si}} + 0.537, & 1.30 \geq K_f \geq 0.05 \\ 0.05, & 0.05 > K_f \end{cases}$$

$$K_b = \left\{ \text{Min} \left(-2.96 \times 10^{-3} \times \frac{h_c}{h_s} + 2.49 \times 10^{-3}, 0.0 \right) \cdot \frac{B}{h_s} + 0.194 \frac{h_c}{h_s} - 8.59 \times 10^{-2} \right\} \cdot \frac{h_s}{H_{Si}} \\ + 0.937 + \frac{-4.21 \times 10^{-2}}{\left(4.34 \cdot B/h_s - 5.17 \right)}$$

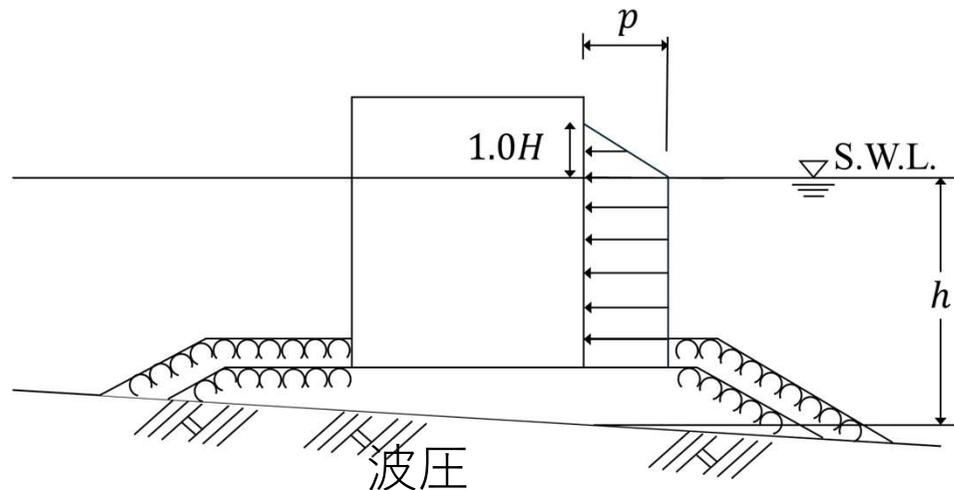
$$K_e = \text{Max} \left(-0.561 \cdot \frac{h_s}{H_{Si}} + 1.84, 1.15 \right)$$



H_{Si} : 潜堤法先位置での波高 (設計条件 (換算沖波波高 H_0') から波高変化図により算定)

結果と考察 [波力] ※既往、および現行の手法

- 中泉ら1988による方法の波圧分布（～黒本2003）



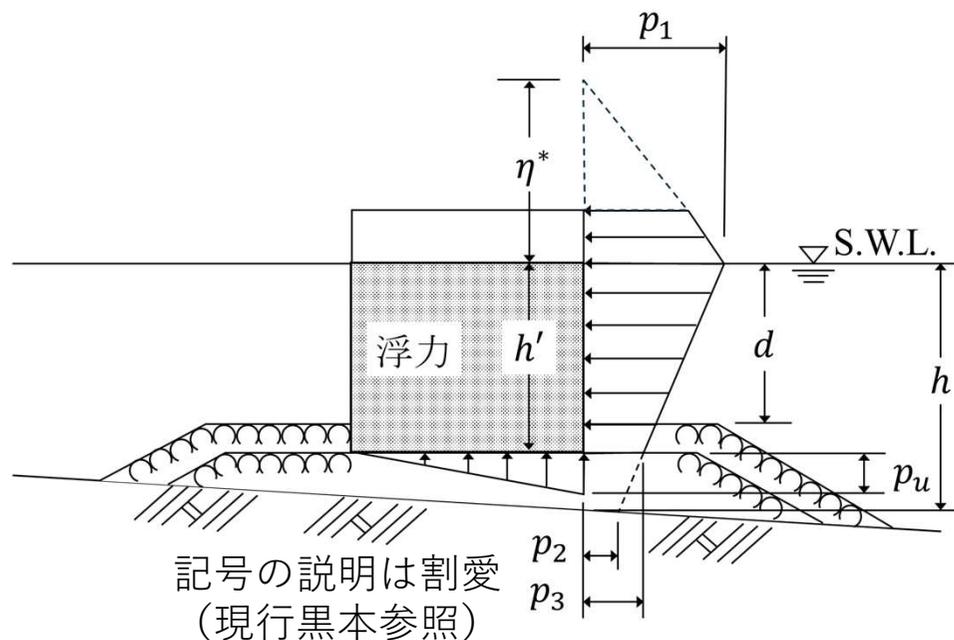
$$p = 1.0\rho_0gH$$

ρ_0 : 海水の密度

g : 重力加速度

h : 壁体前面の水深

H : 壁体前面から5波高沖までの区間の最大有義波高



$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 H_{max}$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \times \rho_0 g H_{max}$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

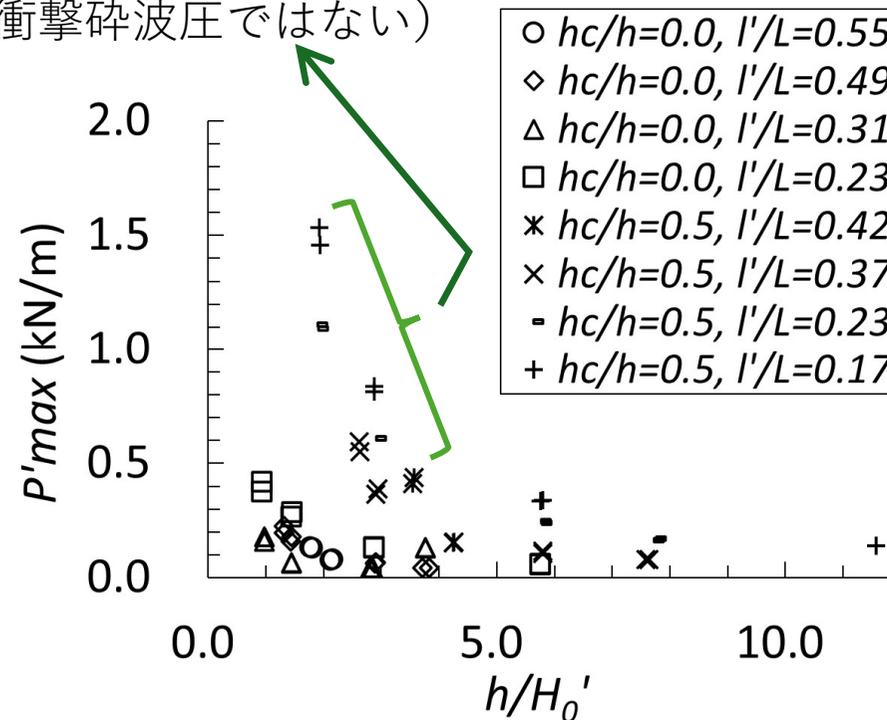
$$p_u = 0.5(1 + \cos \beta)\alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_0 g H_{max}$$

結果と考察 [波力 1]

● 実験波力 P'_{max}

P'_{max} : 衝撃砕波圧の影響を緩和した換算波力 (大井ら2025 [投稿中] 参照)

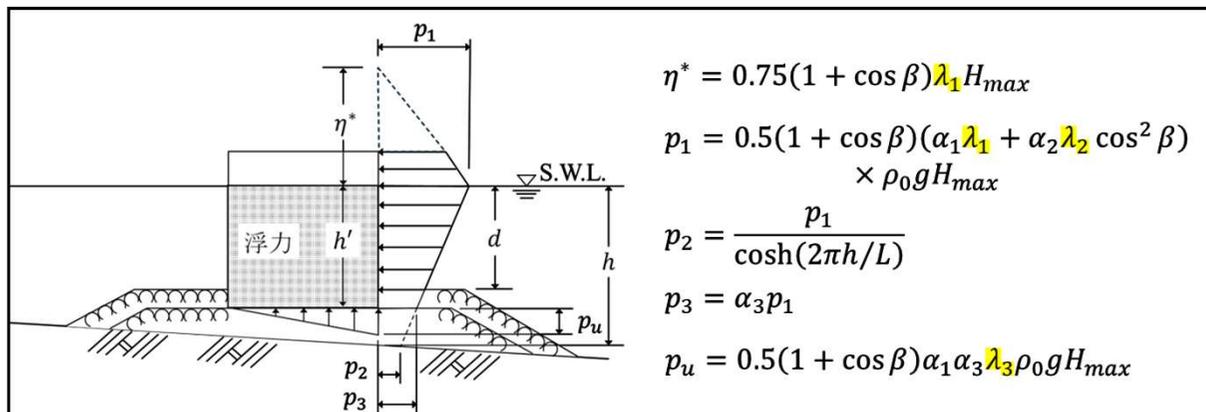
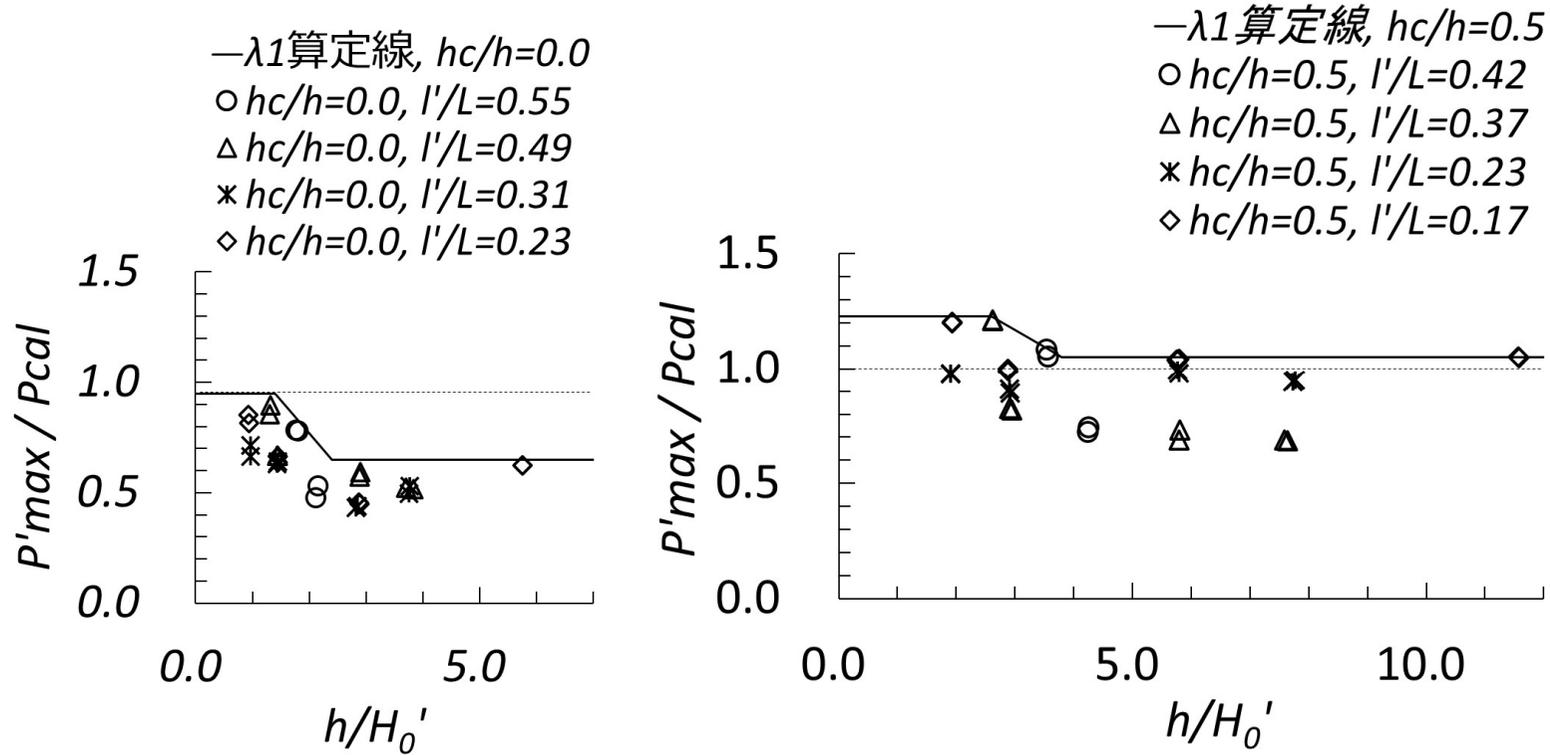
水位上昇などによる波高 (砕波)
の増大により波力が増大している
(必ずしも衝撃砕波圧ではない)



中泉ら1988により、衝撃砕波圧の作用が懸念されるため避けるべきとされた範囲

結果と考察 [波力 2]

- 補正係数 λ_1 の設定 (実験波力 P'_{max} と計算波力 P_{cal} の比較)



P_{cal} は $\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0.0$ (消波工のない直立壁の作用波力)として算定

結果と考察 [潜堤付き防波堤の補正係数]

$h_c/h = 0.0$ の場合

$$\lambda_1 = \begin{cases} 0.95 & \left(0 \leq \frac{h}{H_0'} \leq 1.4\right) \\ -0.3 \left(\frac{h}{H_0'}\right) + 1.37 & \left(1.4 < \frac{h}{H_0'} \leq 2.4\right) \\ 0.65 & \left(2.4 < \frac{h}{H_0'}\right) \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 0.0$$

$$\lambda_3 = \lambda_1$$

$h_c/h = 0.5$ の場合

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.23 & \left(0 \leq \frac{h}{H_0'} \leq 2.6\right) \\ -0.15 \left(\frac{h}{H_0'}\right) + 1.62 & \left(2.6 < \frac{h}{H_0'} \leq 3.8\right) \\ 1.05 & \left(3.8 < \frac{h}{H_0'}\right) \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 0.0$$

$$\lambda_3 = \lambda_1$$

まとめ

- これまで主に藻場造成機能だけが期待されて導入されていた潜堤付き防波堤の防災機能（波浪制御機能）を明らかにした
- 系統的な水理模型実験により、施設の耐波設計に必要な情報（波力、越波量、反射・透過率）を整理するとともに、藻場造成の効果検証に必要な情報（施設周辺で生じる流速の算定方法）を示した
- 従来、気候変動等による外力の増大に対する既設防波堤の補強方法は限られていたが、新たな、しかも地盤支持力不足を回避できる方法を見出した
- これらの成果は「藻場造成型漁港施設の整備ガイドライン」として令和7年5月より水産庁HPで公開されている
(https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_guideline/attach/pdf/index-259.pdf)
- 本報告は水産庁による令和5、6年度水産基盤整備調査委託事業「漁港漁場施設の設計手法の高度化検討調査」の成果をまとめたものである



ご清聴ありがとうございました

Thank you for your attention.