

水産基盤整備調査委託事業報告書

I. 課題名

「漁港漁場施設の性能規定化等技術検討」のうち
(2) 防波堤（外郭施設）の設計手法

II. 実施機関名、部局名及び担当者名

独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部水産基盤グループ	八木 宏 大村智宏 杉松宏一
株式会社アルファ水工コンサルタンツ 東京本部 技術部	奥野正洋 佐藤勝弘
国際気象海洋株式会社 技術部	小林 学 野地雅貴

III. 調査実施年度

平成 24～26 年度

IV. 緒言

漁港・漁場の施設の設計において、防波堤に作用する波力の算定は、有義波を指標として水深の大きさにより重複波と砕波に領域を区分し算定式を使い分けている¹⁾が、これらの遷移領域での波力は不連続となり、当該領域の防波堤において被災した事例が散見された。このため、平成 23 年度までに重複波領域から砕波領域にかけて連続的に適用が可能な波圧算定式の検討を行ない、合田式²⁾³⁾⁴⁾をベースにした波圧算定式が提示されているが、砕波領域や海底勾配が急な場合の適用性、消波工の砕波領域での効果、及び入射波向の影響等を検証し、設計法の確立を図る必要がある。

このため本調査においては、水理模型実験および事例分析等による波圧算定式の検証により、設計波圧、設計波高の評価方法を確立することを目的とする。

V. 方法

漁港防波堤の被災事例を分析し、設計手法に関する技術的課題を整理・検討した上で、不足している水深や勾配、消波工有無等の条件下における水理模型実験を行い、波圧算定式の精査を行った。また事例分析等により波圧算定式の検証を行い、設計波圧、設計波高の評価方法の確立を図った。

1) 既往の知見及び提案を踏まえた設計手法に関する技術的課題の整理・検討

過去の被災事例に対する考察を整理した上で、提示波圧式の妥当性を検討した。また、波圧算定の精度向上と密接な関係にある波高算定の方法について検討を行った。

2) 水理模型実験による波圧算定式の高度化

断面実験により砕波帯内の浅水域や被災事例の多い水深域、急海底勾配、並びに消波工で被覆された堤体への波力評価を行うとともに、平面実験により入射波向の影響を検証し、波圧算定式の適用性を検証した。また水深による波高変化の計測を行い、設計波高の算定手法の検討を行った。

3) 事例分析等による波圧算定式の検証

各波圧式による設計波の事例検証を行うとともに、実在構造物を対象とした防波堤の基本断面の変化とコストの増加傾向について事例分析を行い、設計法の適用性の検証を行った。

VI. 結果及び考察

1. 既往の知見及び提案を踏まえた設計手法に関する技術的課題の整理・検討（平成24年度）

過去の被災に対する考察を整理した上で、平成23年度の提示波圧式の妥当性を検討した。また、波圧算定の精度向上と密接な関係にある波高算定の方法についても検討を行った。

1. 1 過去の被災事例

(1) 被災事例の検証

被災事例は、平成16年災及び18年災のうち、波力により滑動、転倒が生じている計39施設を分析対象とした。既往の防波堤整備事例として、平成14年度から平成16年度に整備された全国の重力式防波堤686施設も対象とした。以上より、対象施設数の合計725、被災した施設数39となる。

(2) 事例の考察

1) 波圧算定式別の被災率

図1.1.1に、波圧算定式別の被災率を示す。重複波式を適用した場合の被災率が9.0%あり、他式（砕波式4.1%、消波工付砕波式4.8%）に比べて2倍程度高い。なお、本図に示される合田式の統計については、『漁港の技術指針（1999年版）』⁵⁾により「水深がかなり深いところにおいて周期の長い波が入射する」条件下で一時的に適用の対象となっていたことから含めるものとした。

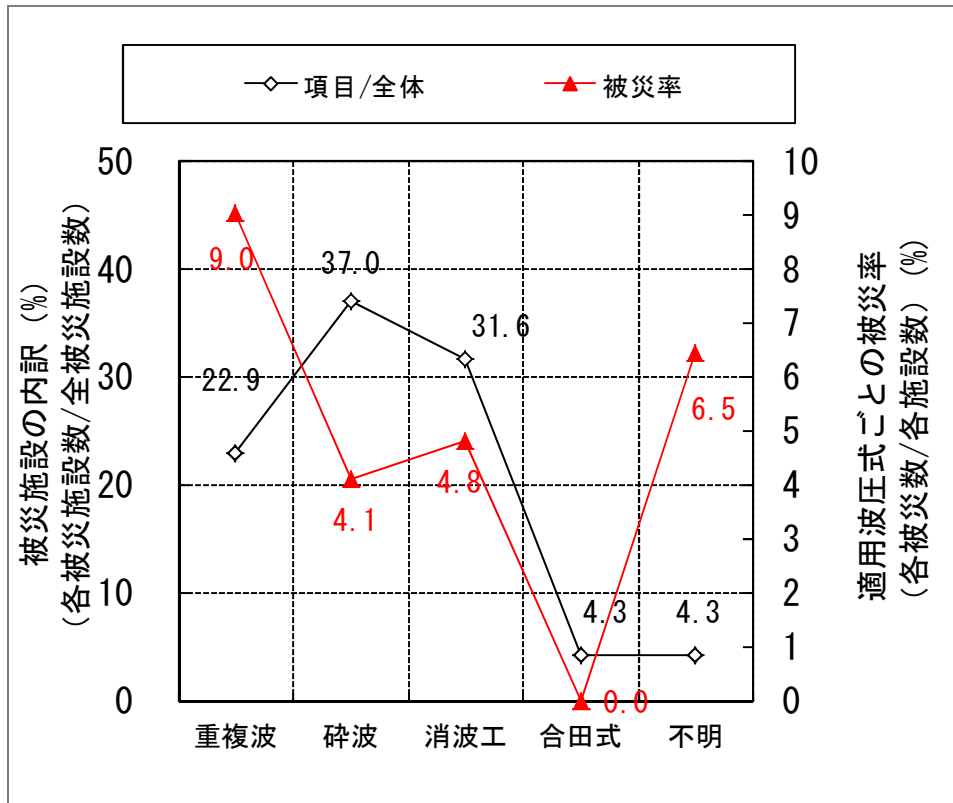


図 1.1.1 波圧算定式別の被災率

表 1.1.1 重複波と碎波の区分

表 2-4-1 重複波と碎波の区分

条 件	区 分
$h > 2H$	重複波 (部分碎波)
$h \leq 2H$	碎 波

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.60 より引用)

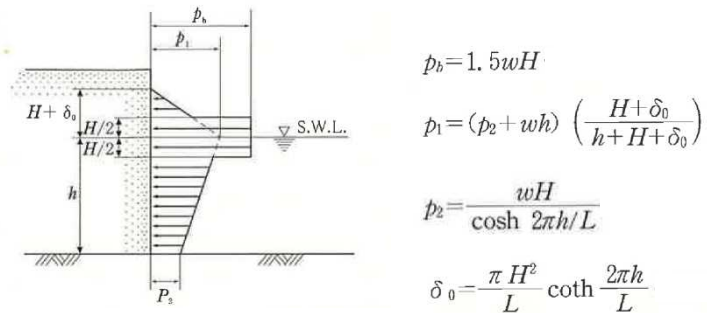


図 1.1.2 重複波式の波圧分布

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.60～61 より引用)

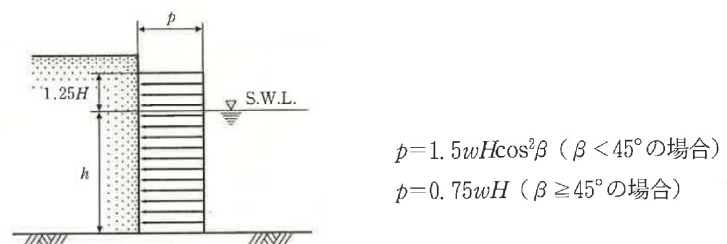


図 1.1.3 碎波式の波圧分布

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.61～62 より引用)

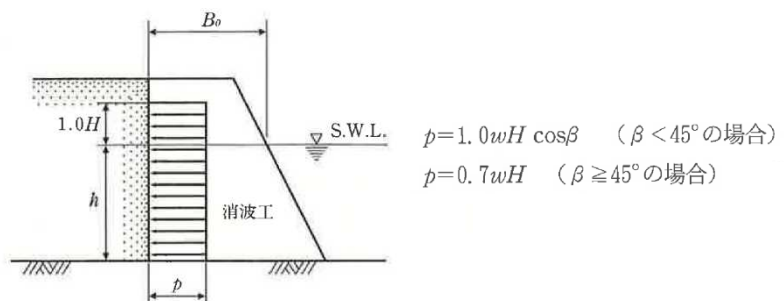


図 1.1.4 消波工付碎波式の波圧分布

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.65～66 より引用)

2) 相対水深（マウンド上水深／堤前有義波高の比： $d/H_{1/3}$ ）による被災率
 相対水深による被災率は概ね以下のとおりである。

(a) $d/H_{1/3}=0.0\sim 2.0$ (図 1.1.5 ①)

- ・ 砕波式を適用する領域である。 $d/H_{1/3}=1.0$ 付近で被災率が高い要因として、波圧強度が大きいことに加え、高マウンド等により衝撃砕波力の影響を受けている可能性が考えられる。

(b) $d/H_{1/3}=2.0\sim 4.0$ (図 1.1.5 ②)

- ・ 重複波式を適用する領域である。砕波領域に比べて波圧強度が小さくなるのに対して、被災率は砕波領域と同程度で推移している。このことから、波圧を過小評価している可能性が考えられる。

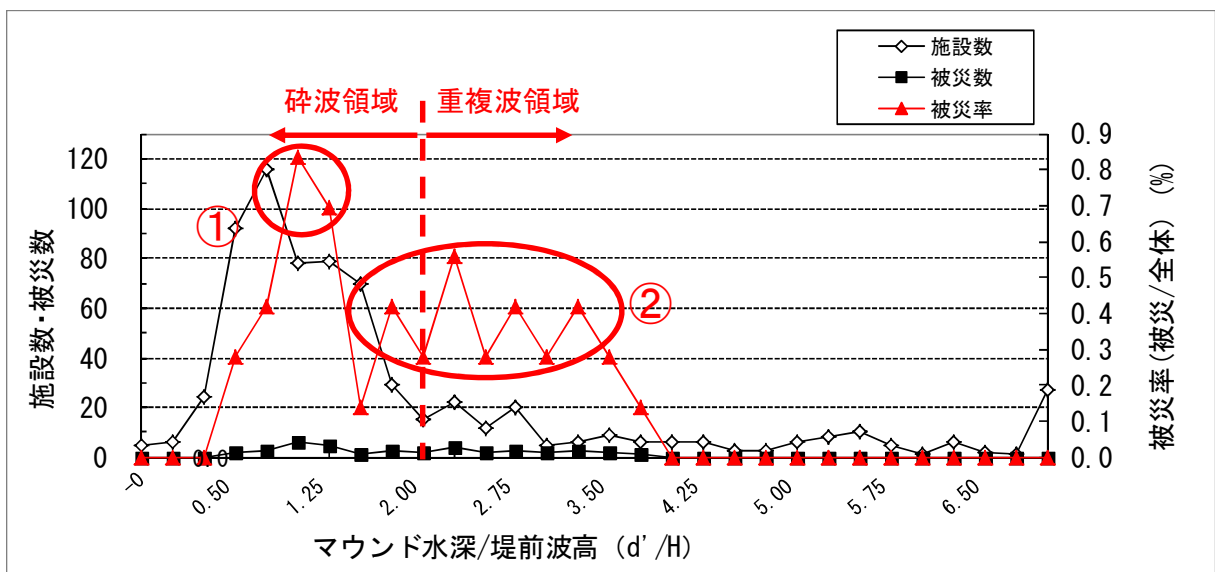


図 1.1.5 相対水深（マウンド上水深／堤前有義波高の比： $d/H_{1/3}$ ）による被災率

3) 海底勾配と設計波の波形勾配別の被災事例数

海底勾配と設計波の波形勾配別の被災事例数は概ね以下のとおりである。

- 海底勾配 1/50 が最多で、次いで 1/20 で 1/30 と 1/10 が同程度であった。
- 波形勾配は 0.02 を中心に被災が多かった。

表 1.1.2 海底勾配と設計波の波形勾配別の被災事例数

		波形勾配(H_0'/L_0)				計
		<0.015	0.015 ~0.025	0.025 ~0.035	0.035<	
海底 勾配	1/50	3	9	1	1	14
	1/30	1	4	1	1	7
	1/20	2	3	4	2	11
	1/10	2	1	1	2	6
	計	8	17	7	6	38
	平均値	0.008	0.020	0.029	0.048	0.023

4) 相対水深と被災事例数の関係

相対水深と被災事例数の関係は概ね以下のとおりである。

- 相対水深で見ると被災は $h/H_0'=2$ 付近、又は 4~5 の域に多い。
- 相対マウンド高は 0.5~0.7 の範囲が多い。

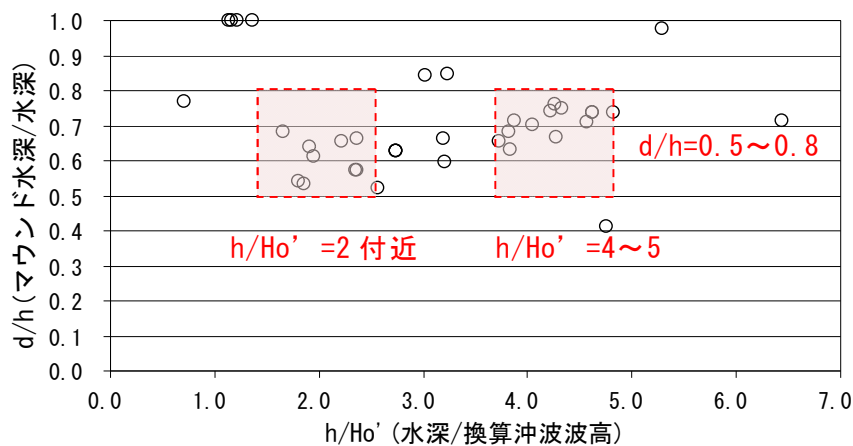


図 1.1.6 相対水深と被災事例数の関係

(3) 事例の考察を踏まえた課題

以上を踏まえ、防波堤の設計にかかる課題を以下に記す。

- 重複波領域と砕波領域の間の波圧の不連続性を解消する。
- 砕波領域での安全性のさらなる向上を図るための波圧の評価方法を検討する。
- 重複波領域での波圧の過小評価を改善する。
- 波圧式の精度は、波高算定の精度とも密接に関係することから、併せて検討する。

1. 2 波圧算定式の検討

(1) 波圧算定式の提案

平成 23 年度の調査結果を踏まえ、以下に新たな波圧算定式の提案を行う。

1) 合田式 (修正)

平成 23 年度に提案された合田式 (修正) の内容は以下のとおりである。

- 重複波帯での設計の実績がある合田式²⁾³⁾⁴⁾を基本とする。
- 代表波高には従来の漁港基準との連続性を考慮し有義波高 $H_{1/3}$ を採用する。
- 最高波高と有義波高の関係は、 $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ をベースとする。

提案波圧式は以下の通りである。

$$p_{1cal} = (\alpha'_1 + \alpha'_2) w_0 H_{1/3}$$
$$\alpha'_1 = 1.8 \cdot \left(0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \right)$$
$$\alpha'_2 = 1.8 \cdot \left(\min \left\{ 1.08 \cdot \frac{h_b - d}{h_b} \left(\frac{H_{1/3}}{d} \right)^2, 1.11 \cdot \frac{d}{H_{1/3}} \right\} \right)$$

図 1.2.1 に示すように、 $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ の関係を単純に適用した場合、碎波領域で過大評価となる可能性がある。

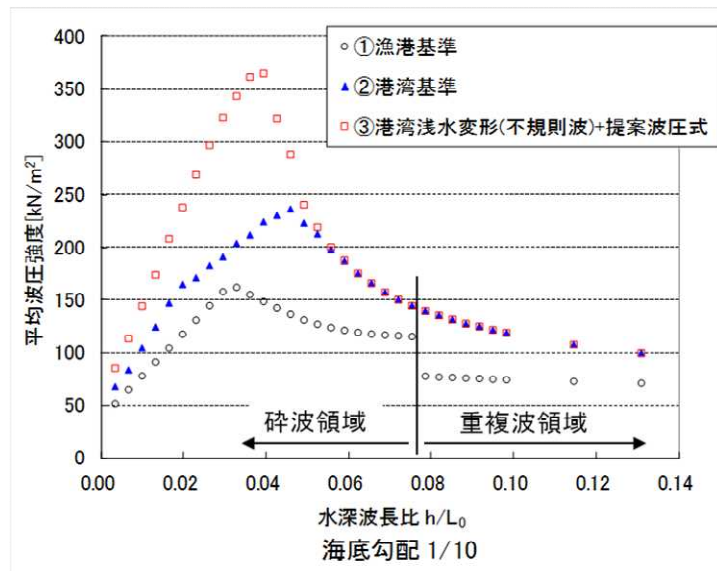
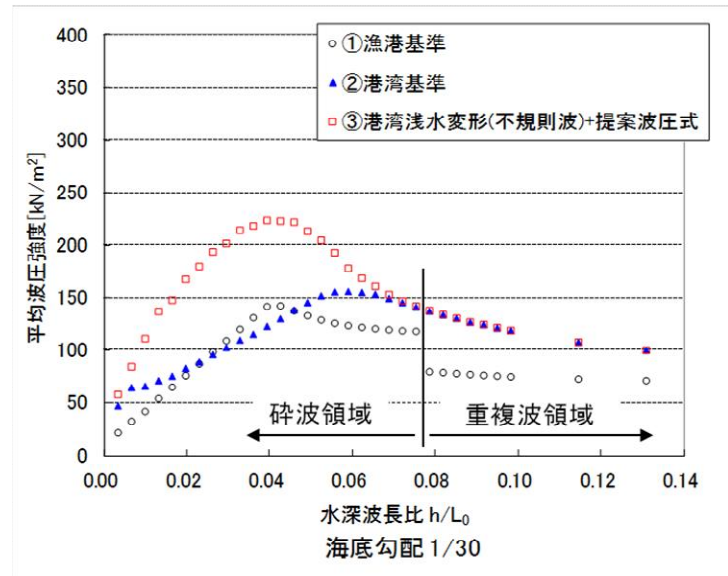


図 1.2.1 波圧算定式による波圧強度の比較

$H_{\max}=1.8H_{1/3}$ とする最高波の与え方は、砕波領域で過大評価となることから、より適正な最高波を与えるために、有義波 $H_{1/3}$ との関係を、 $x=h/H_0'$ を変数とする 3 次式で仮定した。

(a) $x < x_b$ の場合

$$H_{\max}/H_{1/3}=a_0+a_1 \cdot x+a_2 \cdot x^2+a_3 \cdot x^3$$

$$x_b=(h/H_0')_{R=1.8}=b_{40}+b_{41} \cdot x+b_{42} \cdot x^2+b_{43} \cdot x^3$$

ここに、

$$x=h/H_0'$$

$a_0, \dots, a_3, b_{40}, \dots, b_{43}$ は H_0'/L_0 と $\tan \theta$ により定まる定数

$$R = H_{\max}/H_{1/3} = a_0 + a_1(h/H_0') + a_2(h/H_0')^2 + a_3(h/H_0')^3 \quad : h/H_0' < (h/H_0')_{up}$$

$$R = 1.8 \quad : h/H_0' \geq (h/H_0')_{up}$$

$$(h/H_0')_{up} = a_4$$

$$a_i = b_{i0} + b_{i1}x + b_{i2}x^2 + b_{i3}x^3 \quad ; i = 0, 1, 2, 3, 4 \quad : x = \ln(H_0'/L_0)$$

$$b_{ij} = c_{ij0} + c_{ij1}y + c_{ij2}y^2 + c_{ij3}y^3 \quad ; j = 0, 1, 2, 3 \quad : y = \ln(\tan \theta)$$

ここに、

H_0' : 換算沖波の波高、 L_0 : 深水波の波長、 h : 水深、 $\tan \theta$: 海底勾配

係数 c_{ijk} は下表のとおり。

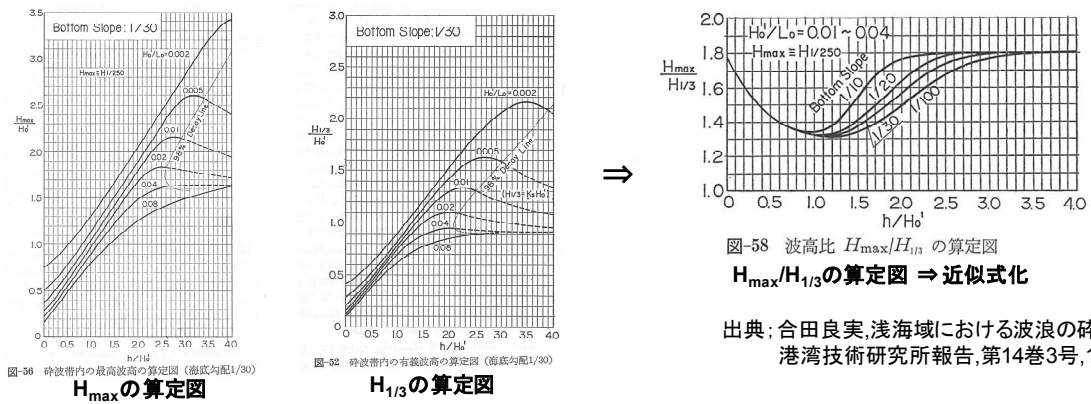
係数 c_{ijk} の値

i	j \ k	0	1	2	3
0	0	10.817885	7.321613	1.554013	0.112158
	1	6.147007	4.897682	1.060417	0.078037
	2	1.267130	1.010853	0.221385	0.016467
	3	0.083637	0.067581	0.014940	0.001121
1	0	-55.593403	-47.260658	-11.514619	-0.939158
	1	-33.887848	-30.095148	-7.439910	-0.613598
	2	-6.772209	-6.154511	-1.537690	-0.127827
	3	-0.443714	-0.410135	-0.103366	-0.008648
2	0	65.235649	57.417633	14.899113	1.276432
	1	37.391830	34.756603	9.179257	0.796022
	2	7.089776	6.869189	1.840074	0.161103
	3	0.444549	0.445736	0.120844	0.010665
3	0	-20.642269	-18.119476	-4.844585	-0.424820
	1	-11.659152	-10.739316	-2.923935	-0.259534
	2	-2.148612	-2.069575	-0.572870	-0.051401
	3	-0.130068	-0.130764	-0.036757	-0.003331
4	0	-31.321739	-25.585157	-2.688334	-0.013990
	1	-18.315683	-14.492140	-1.483056	-0.003441
	2	-3.623236	-2.873962	-0.293050	-0.000686
	3	-0.234442	-0.179548	-0.017232	0.000097

(b) $x \geq x_b$ の場合

$$H_{\max}/H_{1/3}=1.8$$

図 1.2.6 の試算例に示すように、上記の近似式で算定した最大波高（図中の●で示す）と不規則波の碎波帯内の最高波高の算定図から求められる最高波高（図中の●）との整合性を得ることができた。



出典: 合田良実, 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻3号, 1975

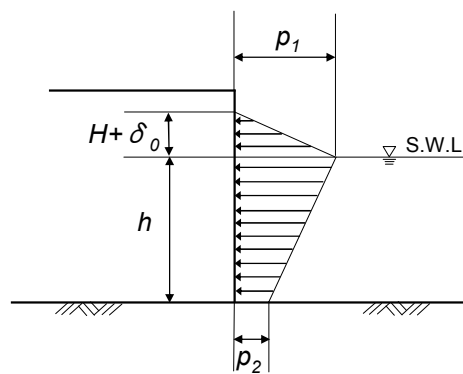
図 1.2.2 不規則波の碎波帯内の最高波高及び有義波高の算定図⁶⁾

2) サンプル式 (修正)

平成 23 年度に提案されたサンプル式 (修正) の内容は以下のとおりである。

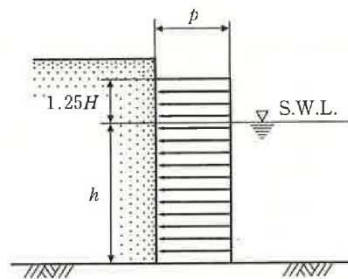
- 提案 1 : 重複波領域で、設計波高を $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ として、サンプル+部分碎波式に採用する。
- 提案 2 : 重複波領域で、設計波高を $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ として、本来のサンプルに採用する。(部分碎波による矩形部分は削除する。)

上記のうち、提案 2 を採用する場合、碎波領域 (現行基準) と重複波領域はほぼ連続する。



重複波領域：
波高 H と部分碎波
(矩形部分) の見直し

※波高 H は $1.8H_{1/3}$ とする



碎波領域：
現行基準のとおり

図 2 - 4 - 5 碎波の波圧分布

図 1. 2. 3 各領域の算定式の使い分け

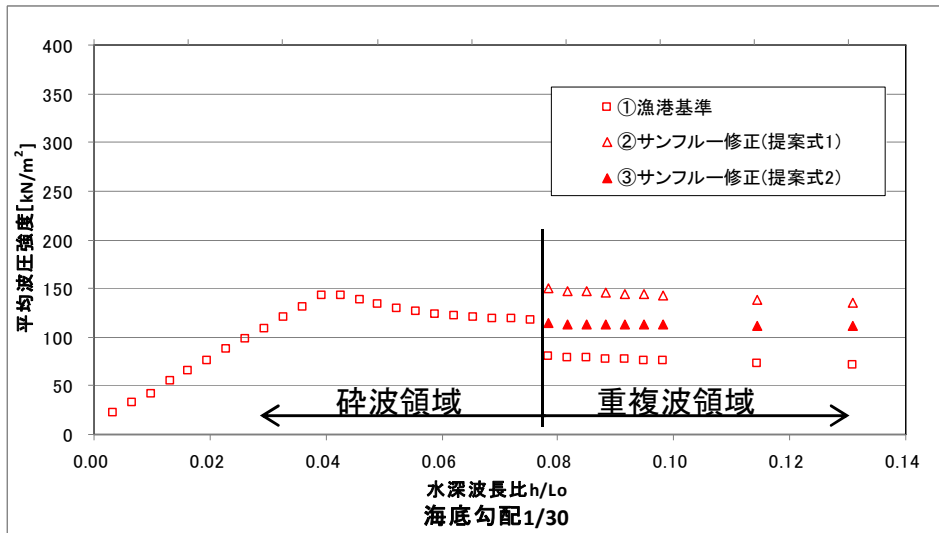


図 1.2.4 現行基準及びサンプルー式（修正）による波圧強度と水深の関係
 （計算条件： $H_0'=8.0\text{m}$, $T_0=14\text{s}$, $H_0'/L_0=0.026$, $\tan\theta=1/30$ ）

上記 2 つの提案のうち、提案 2 の、重複波領域で、設計波高を $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ として本来のサンプルーに採用する方法の方が、砕波領域とのギャップを抑えられるものとみられることから、これ以降の検討は、提案 2 を比較検討案とした。

(2) 波圧算定式の比較検討

1) 検討ケース

上記で提案した波圧算定式について、比較検討を行った。

検討方法として、以下の4つの波圧算定式について波圧強度を比較した。

- ① 合田式 (港湾基準⁴⁾)
- ② 合田式 (修正)
- ③ 広井式 (不規則波使用) + サンプル式 (修正)
- ④ 従前の波圧式 (漁港基準¹⁾)

2) 検討条件

海底勾配は、1/10、1/20、1/30、1/50の4ケースとした。

波浪条件は、 $H_0' = 8.0\text{m}$ 、 $T_0 = 14.0\text{s}$ とした。

3) 検討結果

海底勾配 1/10 では、浅水深域 ($h/H_0' = 1.0$ 付近) から碎波開始域 ($h/H_0' = 4.0$ 付近) において、合田式 (修正) が広井式 (不規則波 H_{\max} 使用) 及び従前の波圧式 (漁港基準) よりも安全側の波圧を与える。

それ以外の海底勾配では、式間の差が小さくなり、海底勾配が 1/30、1/50 では、従前の波圧式 (漁港基準) の方が安全側の波圧を与える。

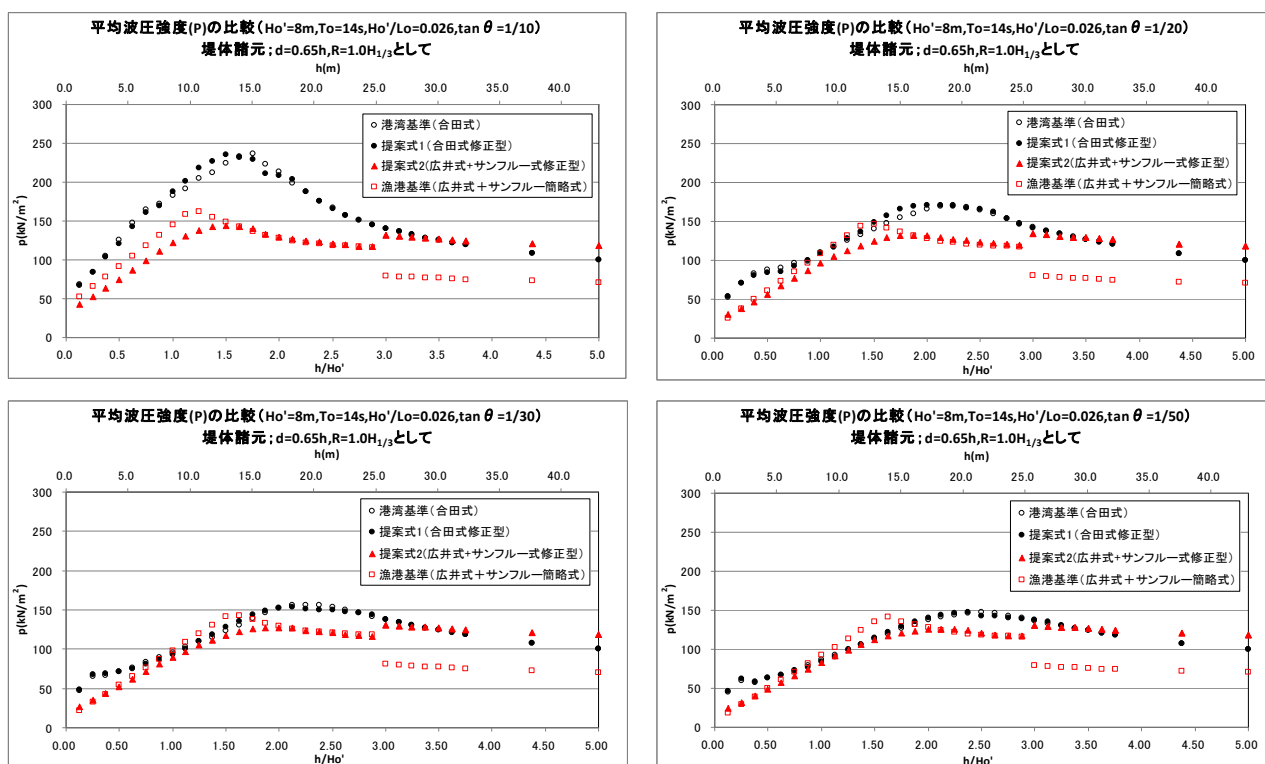


図 1.2.5 各波圧算定式の平均波圧強度の比較
($H_0' = 8.0\text{m}$, $T_0 = 14.0\text{s}$)

なお、上記の各波圧算定において与える波高は、以下のように各基準に基づくものである。

- | | |
|-----------------------------|--|
| ① 合田式 (港湾基準) | ⇒合田による算定図(1975) ⁶⁾ |
| ② 合田式 (修正) | ⇒近似式 ($x=h/H_0'$ の 3 次式) |
| ③ 広井式 (不規則波使用) + サンプル式 (修正) | ⇒合田(1975) ⁶⁾ + 漁港基準 ¹⁾ |
| ④ 従前の波圧式 (漁港基準) | ⇒漁港基準 ¹⁾ による算定 |

以下に示すように、各算定方法による波高を比較すると、合田による算定図(1975)⁶⁾と近似式 ($x=h/H_0'$ の 3 次式) の最高波高は概ね一致する。一方、合田による有義波高と漁港基準による有義波高は、砕波領域のピーク付近において差が生じている。

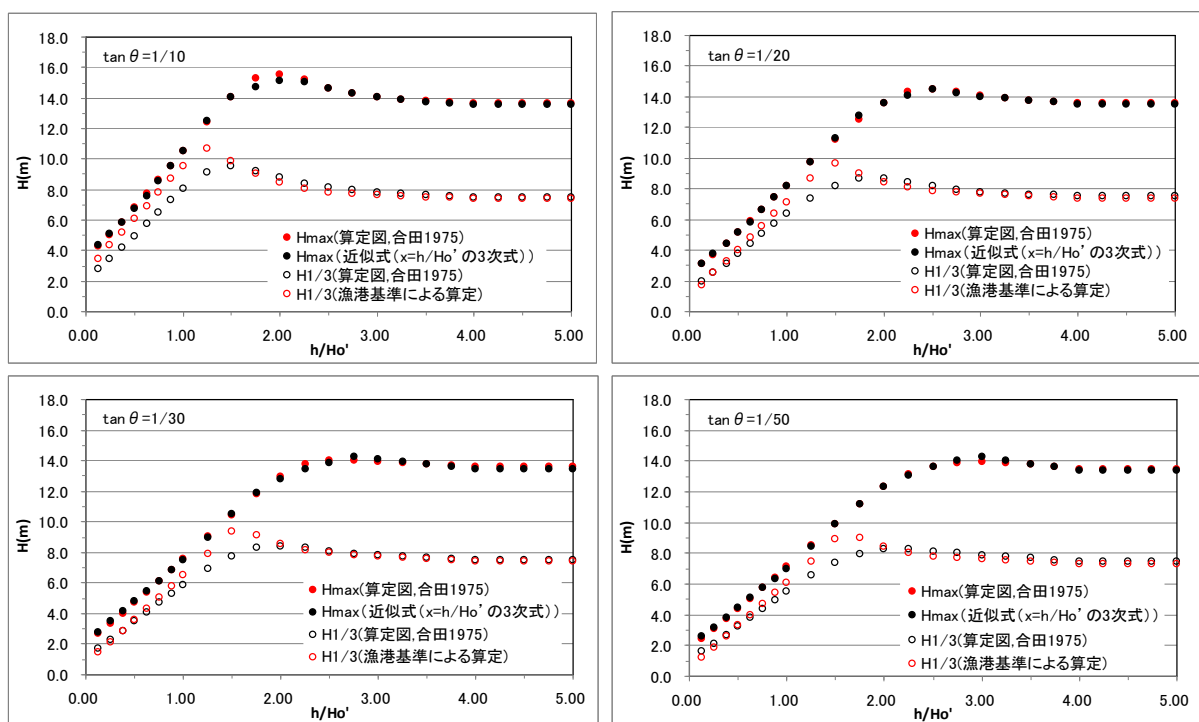


図 1.2.6 不規則波の砕波帯内の最大波高図と近似式による H_{max} の比較
($H_0'=8.0\text{m}$, $T_0=14.0\text{s}$)

1. 3 波高算定の精度について

現行の設計波の算定手順においては、エネルギー平衡方程式により屈折・浅水・砕波を考慮した波浪変形計算を行う場合に、浅水・砕波にかかる波高変化率を乗じる計算を二度繰り返す過程が現れる。また、不規則波を扱う計算過程に規則波を基本とする手法が混在することも問題点として挙げられる。

これらの問題を解消するため、波高算定の手順について改めて検討を行った。

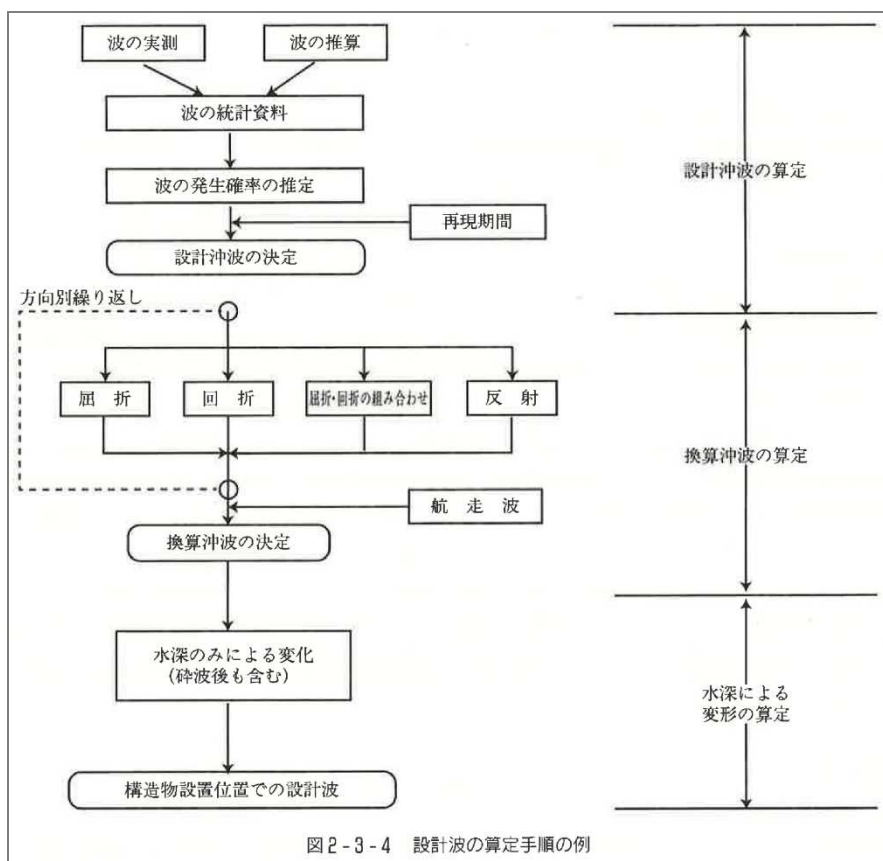


図 1.3.1 設計波の算定手順の例

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.23 より引用)

表 1.3.1 設計波の算定手順の例

表 2-3-1 代表的な平面波浪場の解析モデルの概要

波の不規則性及び多方向性並びに各種変形現象 代表的な波浪変形解析モデル	浅水変形	屈折	回折	多重反射	砕波	多方向性	不規則性	特記事項
エネルギー平衡方程式	◎	◎	▽	×	○	◎	◎	・定常状態の解析法 ・一次反射は考慮可能
高山の方法	×	×	◎	◎	×	◎	◎	・定常状態の解析法 ・水深を一定とした簡便法
非定常緩勾配方程式 数値波動解析法	◎	◎	◎	◎	○	○	○	・規則波の時系列解析法 ・不規則性及び多方向性は、成分波重ね合わせ法とした場合
非定常緩勾配不規則波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	・多方向不規則波の時系列解析法
ブシネスク方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	・多方向不規則波の時系列解析法 ・弱非線形性及び弱分散性を考慮

◎:基本形で適用可能 ○:応用形で一般的適用可能 ×:適用不可能
▽:基本理論では考慮されていないが実用上可能

(「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.19 より引用)

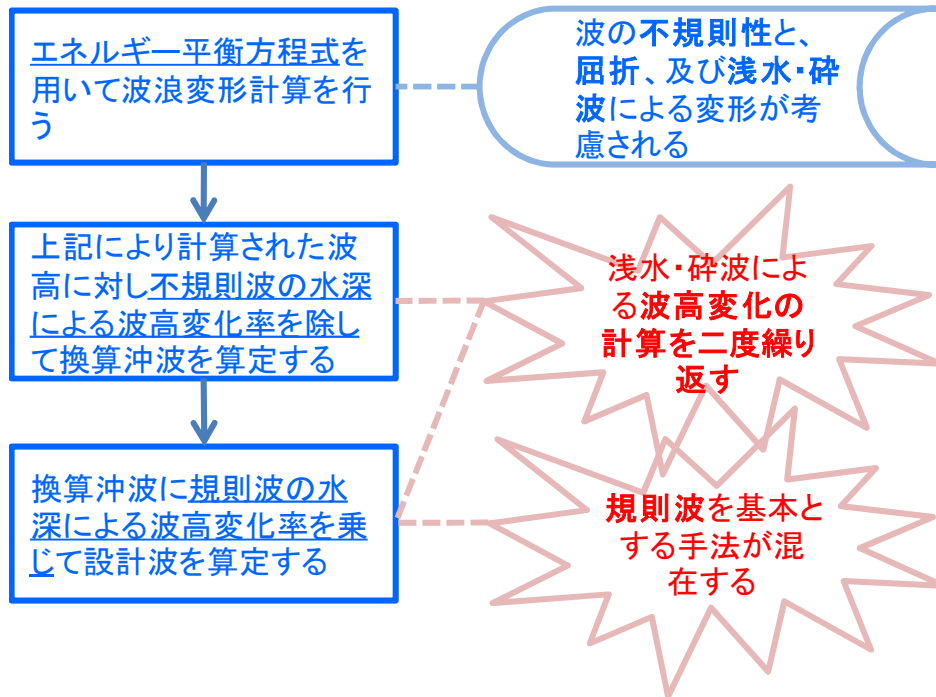


図 1.3.2 波高変化率算定図から波高算定する場合の問題点

以上の問題点を解消するための手順として、エネルギー平衡方程式を用いて浅水・砕波を考慮した設計波を算定する場合の基本的な流れについて、以下のフローを提案した。

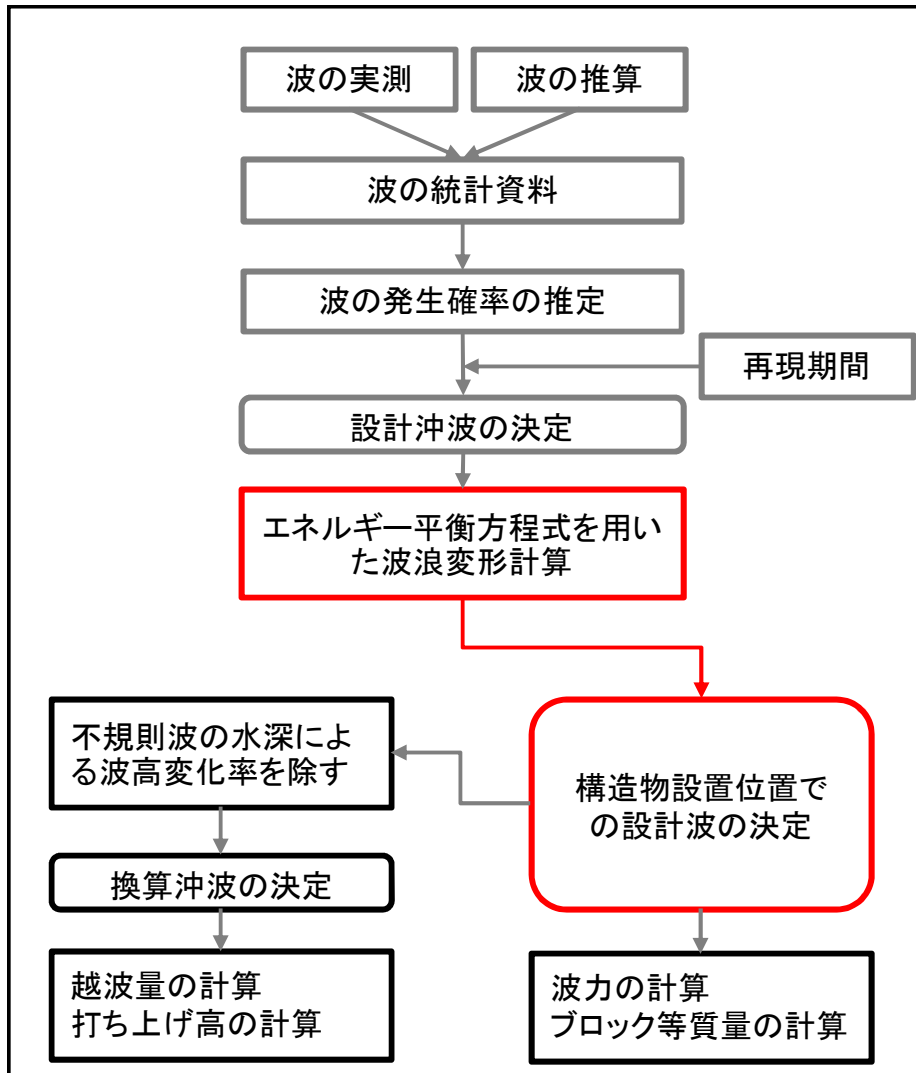


図 1.3.3 エネルギー平衡方程式を用いて浅水・砕波を考慮した設計波を算定する場合の基本的な流れ（案）

なお、水深の浅い浅海域では、エネルギー平衡方程式より算定される波エネルギーから微小振幅波理論を用いると波高は過小に計算される恐れがある。このため、エネルギー平衡方程式により計算される波高を堤体前面の波高として使う場合には、計算過程において有限振幅性を考慮する必要がある。

1. 4 波圧算定式の適用ケースの比較

以上の検討結果を踏まえ、波圧算定式の適用ケースについて、以下のように比較整理した。

表 1. 4. 1 波圧算定式の適用ケースの比較

	波浪変形計算との整合性	重複波領域での信頼性	砕波領域での信頼性	重複波・砕波の両領域の連続性
港湾基準 (合田式)	○ 不規則波の波浪変形計算をベースとしており、波高算定から波圧算定まで一貫性あり。	○ 波圧算定精度を一定範囲に収めやすくなり、照査方法の信頼性が確保されやすくなる。	▲ 重複波領域に比べ、砕波領域での実績が少なく、検証が必要である。	○ 全ての水深帯を一つの式で表現しており、重複波・砕波の不連続性がない。
提案 1 合田式 (修正型)	○ 不規則波の波浪変形計算をベースに考えており、波高算定から波圧算定まで一貫性が得られる。	○ 上記合田式と同じ。	△ 一部実験による検証を行っているが、有義波と最高波の関係式の確立が必要。但し、これで精度の向上が図れれば被災率の低減に繋がる可能性。	○ 全ての水深帯を一つの式で表現することで、両領域の不連続性が解消される。
提案 2 サンフルー式 (修正型)	○ 同上	△ 重複波領域での精度を検証の上で、従来のサンフルー式に修正を加える必要がある。	▲ 全体的に広井式(規則波)を下回り、不規則波の適用性については検討が必要。	△ 両領域の不連続部のギャップが従前よりも改善はされるが、完全には解消されない。
漁港基準 (広井式+サンフルーの式)	▲ 規則波を対象とする浅水変形、波圧評価と現行の波浪変形計算手法(不規則波対象)が整合しない。	▲ 重複波領域で波圧を過小に評価する可能性が指摘されており、信頼性は低い。	△ 同上	▲ 両領域の不連続性は解消されない。

(○：メリット、△：メリット(条件つき)、▲：デメリット)

1. 5 今後の課題

(1) 追加実験の必要性

波圧算定式の適用性をより精度よく検証するために、以下の課題がある。

- 浅水深域 ($h/H_0' < 1.0$) と碎波開始域 ($h/H_0' = 4.0$ 付近) の水深域のデータが不足している。
- 特に、浅水深域は防波堤の被災数の多い水深域のひとつである。
- 海底勾配で碎波変形の状況が異なるが、急勾配が不足している。
- そこで、上記の不足データを補完するための追加実験を行い、改めて、波圧算定式の検討を行う。

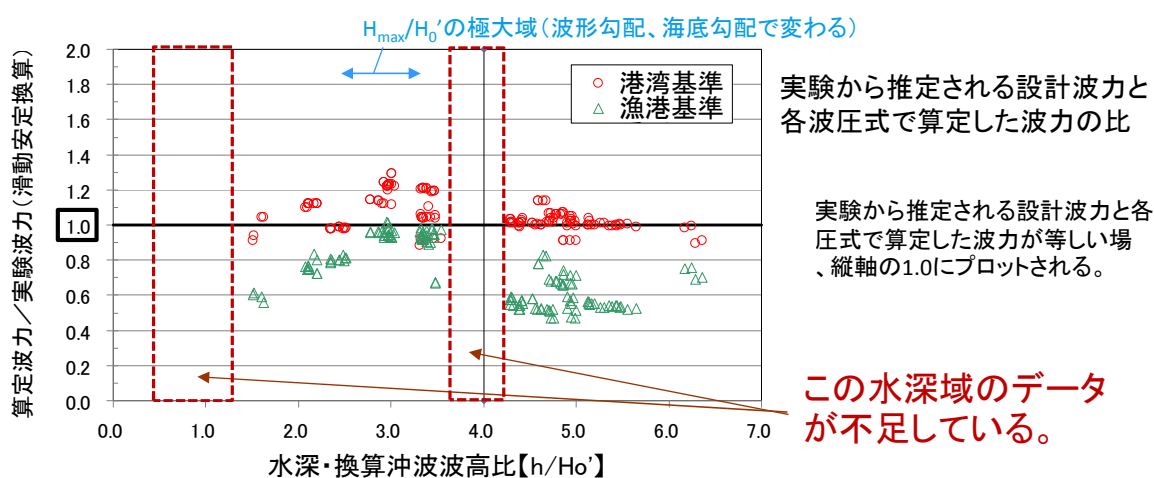


図 1.5.1 実験データの不足範囲 (消波工無し)

(2) 各波圧式適用ケースとコストの関係の検討

波圧算定式を改定することによる効果を確認するために、以下の課題がある。

- 新たな波圧算定式が、従前よりも安全側の断面を与えるようになりコスト増へと向かうのかどうか、傾向を把握する。
- 波圧算定の精度が大きく改善される領域が、コスト面でどの程度のウェイトを占めているのかを把握する。
- 新たな提案式を採用することが膨大なコスト増に繋がったり、効果が低いと判断される場合には、再考の余地があるものとする。

2. 水理模型実験による波圧算定式の高度化（平成 25, 26 年度）

2. 1 作用波力の計測（断面実験）

これまでに実施していない砕波帯内の浅水域や被災事例の多い水深域、急海底勾配（1/10）、並びに消波工で被覆された堤体への作用波力の計測を行い、波圧算定式の適用性を検証した。尚、実験波力は滑動安定換算の波力として評価を行った（参考資料参照）。

1) 実験施設・実験模型（図 2. 1. 1 参照）

- ・実験施設：還流風洞付造波水路（幅 1.0m×深さ 1.5m×長さ 100m）
- ・海底勾配：1/30、および 1/10
- ・模型縮尺：1/50

2) 計測内容

- ・水位：容量式波高計（沖・堤体前面）
- ・波圧：半導体型動歪み式波圧計（壁面前面・底面）

3) 実験ケース

①消波工無しの場合

実験ケース一覧を表 2. 1. 1 に示す。下記に示す計 17 ケースで計測を行った。

- ・海底勾配 1/30：水深 2 種（ $h/H_0=1.0, 4.0$ 付近）×波形勾配 4 種（ $H_0'/L_0=0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ）＝計 8 ケース
- ・海底勾配 1/10：水深 3 種（ $h/H_0=1.0, 2.5, 4.0$ 付近）×波形勾配 3 種（ $H_0'/L_0=0.01, 0.02, 0.03$ ）＝計 9 ケース

②消波工有りの場合

実験ケース一覧を表 2. 1. 2 に示す。下記に示す計 16 ケースで計測を行った。

- ・海底勾配 1/30：水深 4 種（ $h/H_0=0\sim 0.5, 1.0$ 付近, $1.0\sim 2.0, 4.0$ 付近）×波形勾配 4 種（ $H_0'/L_0 = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ）＝計 16 ケース



図 2. 1. 1 防波堤の実験模型（消波工有り）

表 2.1.1 実験ケース一覧（消波工無し）

海底勾配	水深域	実験 ケース No.	沖側 水深 h_0 (cm)	堤体設置条件				換算沖波 波高 H_0' (cm)	沖入射波		堤体位置(進行波)		波形勾配 H_0'/L_0	水深 波高比 h/H_0'	マウンド上 水深 堤前波高比 $d/H_{1/3}$
				防波堤設置 水深 h (cm)	マウンド上 水深 d (cm)	マウンド 高さ $h-d$ (cm)	d/h		周期 T_0 (s)	波長 L_0 (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)			
1/30	$h/H_0=1.0$ 付近	1-1	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	5.81	2.02	639	6.51	2.13	0.009	1.03	0.92
		1-2	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.66	1.61	406	6.44	1.80	0.019	0.78	0.93
		1-3	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.76	1.27	252	5.83	1.44	0.031	0.77	1.03
		1-4	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.99	1.11	193	5.32	1.30	0.041	0.75	1.13
	$h/H_0=4.0$ 付近	2-1	84.0	24.0	16.0	8.0	0.67	5.90	2.07	667	6.50	2.12	0.009	4.07	2.46
		2-2	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	7.67	1.60	398	7.24	1.68	0.019	3.91	3.04
		2-3	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	7.86	1.27	250	7.02	1.30	0.031	3.82	3.13
		2-4	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	8.03	1.11	192	7.20	1.12	0.042	3.74	3.06
1/10	$h/H_0=1.0$ 付近	3-1	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	5.75	2.02	637	7.37	1.95	0.009	1.04	0.81
		3-2	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.55	1.62	408	7.75	1.66	0.018	0.79	0.77
		3-3	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.54	1.25	245	7.22	1.37	0.031	0.80	0.83
	$h/H_0=2.5$ 付近	4-1	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	12.29	2.60	1053	14.27	2.76	0.012	2.44	1.33
		4-2	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	12.01	2.00	626	12.65	2.10	0.019	2.50	1.50
		4-3	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	11.77	1.54	372	11.32	1.65	0.032	2.55	1.68
	$h/H_0=4.0$ 付近	5-1	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	7.71	2.01	630	7.86	2.09	0.012	3.89	2.42
		5-2	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	7.89	1.60	397	7.38	1.70	0.020	3.80	2.57
		5-3	90.0	30.0	19.0	11.0	0.63	8.01	1.27	252	6.95	1.30	0.032	3.74	2.73

表 2.1.2 実験ケース一覧（消波工有り）

海底勾配	水深域	実験 ケース No.	沖側 水深 h_0 (cm)	堤体設置条件				換算沖波 波高 H_0' (cm)	沖入射波		堤体位置(進行波)		波形勾配 H_0'/L_0	水深 波高比 h/H_0'	マウンド上 水深 堤前波高比 $d/H_{1/3}$
				防波堤設置 水深 h (cm)	マウンド上 水深 d (cm)	マウンド 高さ $h-d$ (cm)	d/h		周期 T_0 (s)	波長 L_0 (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)			
1/30	$h/H_0=0\sim 1$	6-1	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	11.85	2.01	630	5.71	2.32	0.019	0.51	1.05
		6-2	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	17.02	2.01	630	6.48	3.02	0.027	0.35	0.93
		6-3	63.0	3.0	3.0	0.0	1.00	11.79	2.00	624	3.67	2.96	0.019	0.25	0.82
		6-4	63.0	3.0	3.0	0.0	1.00	17.12	2.04	647	4.73	4.09	0.026	0.18	0.63
	$h/H_0=1.0$ 付近	7-1	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	5.79	2.03	643	5.14	1.93	0.009	1.04	1.17
		7-2	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.63	1.61	405	5.42	1.78	0.019	0.79	1.11
		7-3	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	7.72	1.26	246	5.02	1.41	0.031	0.78	1.20
		7-4	66.0	6.0	6.0	0.0	1.00	8.16	1.11	194	4.80	1.28	0.042	0.74	1.25
	$h/H_0=1\sim 2$	8-1	70.0	10.0	6.0	4.0	0.60	4.92	1.81	509	7.33	1.92	0.010	2.03	0.82
		8-2	70.0	10.0	6.0	4.0	0.60	5.97	1.41	309	7.04	1.49	0.019	1.68	0.85
		8-3	70.0	10.0	6.0	4.0	0.60	6.86	1.19	222	7.13	1.34	0.031	1.46	0.84
		8-4	70.0	10.0	6.0	4.0	0.60	7.74	1.10	189	7.13	1.19	0.041	1.29	0.84
	$h/H_0=4.0$ 付近	9-1	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	7.38	1.95	590	7.35	1.96	0.013	4.06	2.99
		9-2	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	8.43	1.60	398	7.41	1.65	0.021	3.56	2.97
		9-3	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	8.56	1.29	259	7.18	1.27	0.033	3.50	3.06
		9-4	90.0	30.0	22.0	8.0	0.73	8.22	1.14	201	6.35	1.07	0.041	3.65	3.47

4) 実験結果

実験値（滑動安定換算）と各算定波力の比較は、以下の方法で行った。

(方法) 実験の H_0' を基に設計波高を算定し波圧算定式を評価。(図 2.1.2 参照)

・港湾基準（「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾ p.156～158 及び p.188～198 参照）

沖入射波高実験値から H_0' を算出

→ 港湾の波高変化図により H_{max} を算定

→ 合田式（消波工有りの場合は高橋ら⁷⁾ の補正係数を使用）

・漁港基準（「漁港・漁場の施設の設計の手引」¹⁾ p.41～42 及び p.59～66 参照）

沖入射波高実験値から H_0' を算出

→ 漁港の波高変化図により $H_{1/3}$ を算定

→ 砕波領域：広井式（消波工有りは森平ら⁸⁾ の式）、重複波領域：サンフルー部分砕波式

※両者共、砕波領域は 5 波高区間の最大波高を使用

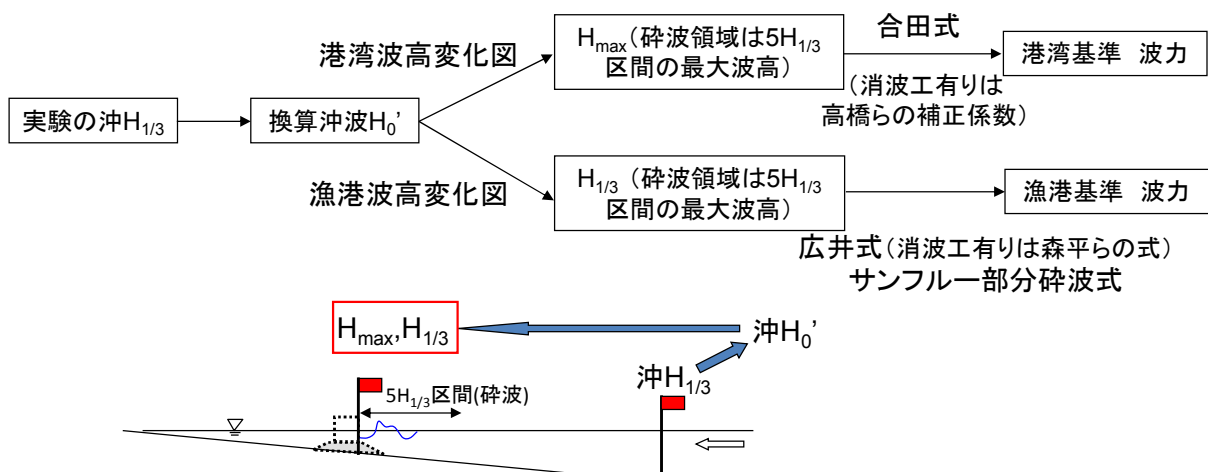


図 2.1.2 波力の算定方法

実験値（滑動安定換算）と各算定波力の比較結果について、消波工無しのケースを 図 2.1.3～図 2.1.5 に、消波工有りのケースを 図 2.1.6～図 2.1.8 に示す。

消波工無し、および消波工有りともに、現行漁港基準の算定波力は実験値より小さいケースが多く、過少評価となっている（図 2.1.3、図 2.1.6）。一方、港湾基準（合田式）の算定波力は実験値をやや上回るケースもあるが、おおむね安全側の評価となっている（図 2.1.4、図 2.1.7）。

ただし、砕波帯内の浅水域 ($h/H_0' < 2.0$) においては、合田式の算定波力は実験値より小さくなる傾向であり（図 2.1.5、図 2.1.8）、補正係数等による波力の割増が必要であると考えられる。

・消波工無し 実験値（滑動安定換算）と各算定波力の比較

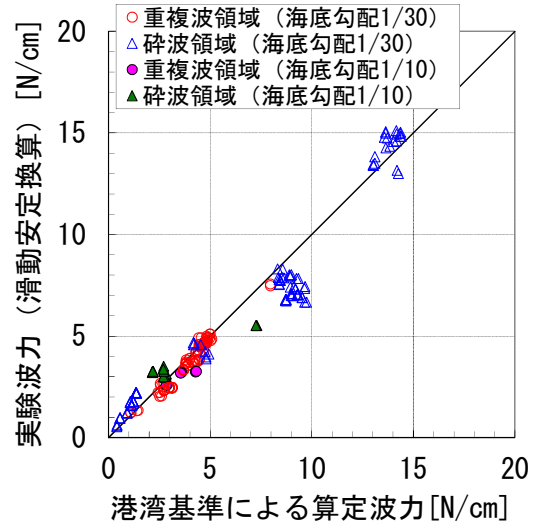
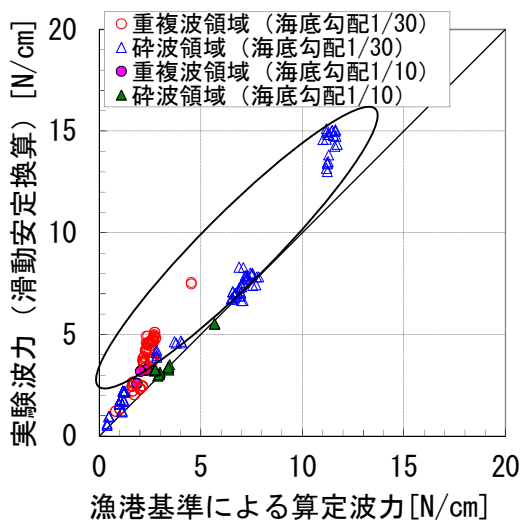


図 2.1.3 実験値と漁港基準の波力の比較

図 2.1.4 実験値と港湾基準の波力の比較

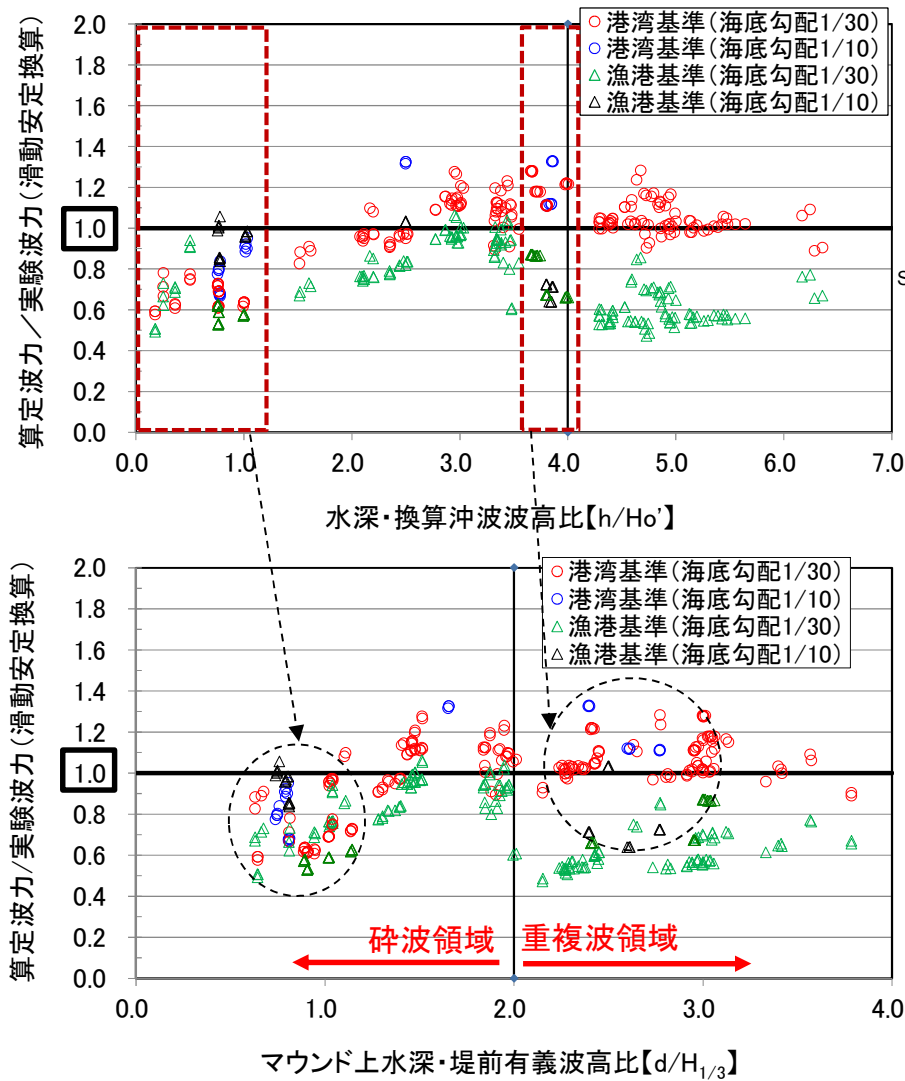


図 2.1.5 実験波力と各算定波力（漁港・港湾）の比較

※ H_0' は実験の沖入射波高から算出。

- ・消波工有り 実験値（滑動安定換算）と各算定波力の比較

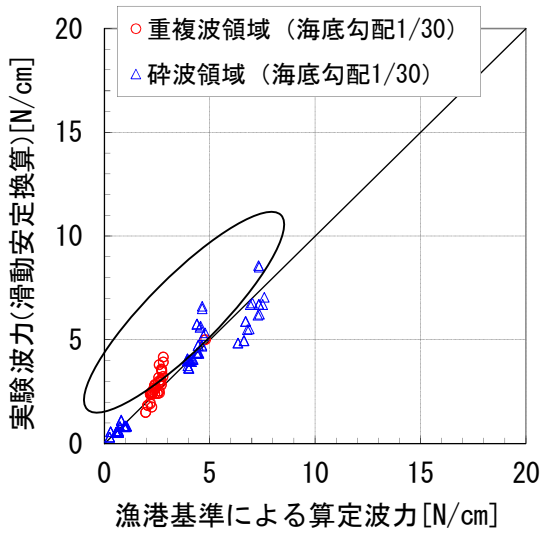


図 2.1.6 実験値と漁港基準の波力の比較

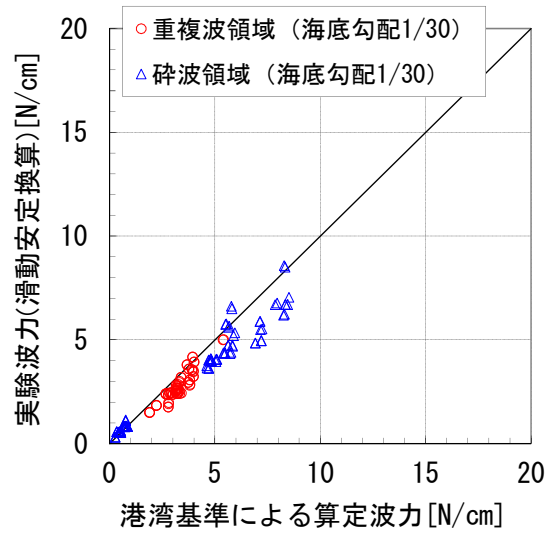


図 2.1.7 実験値と港湾基準の波力の比較

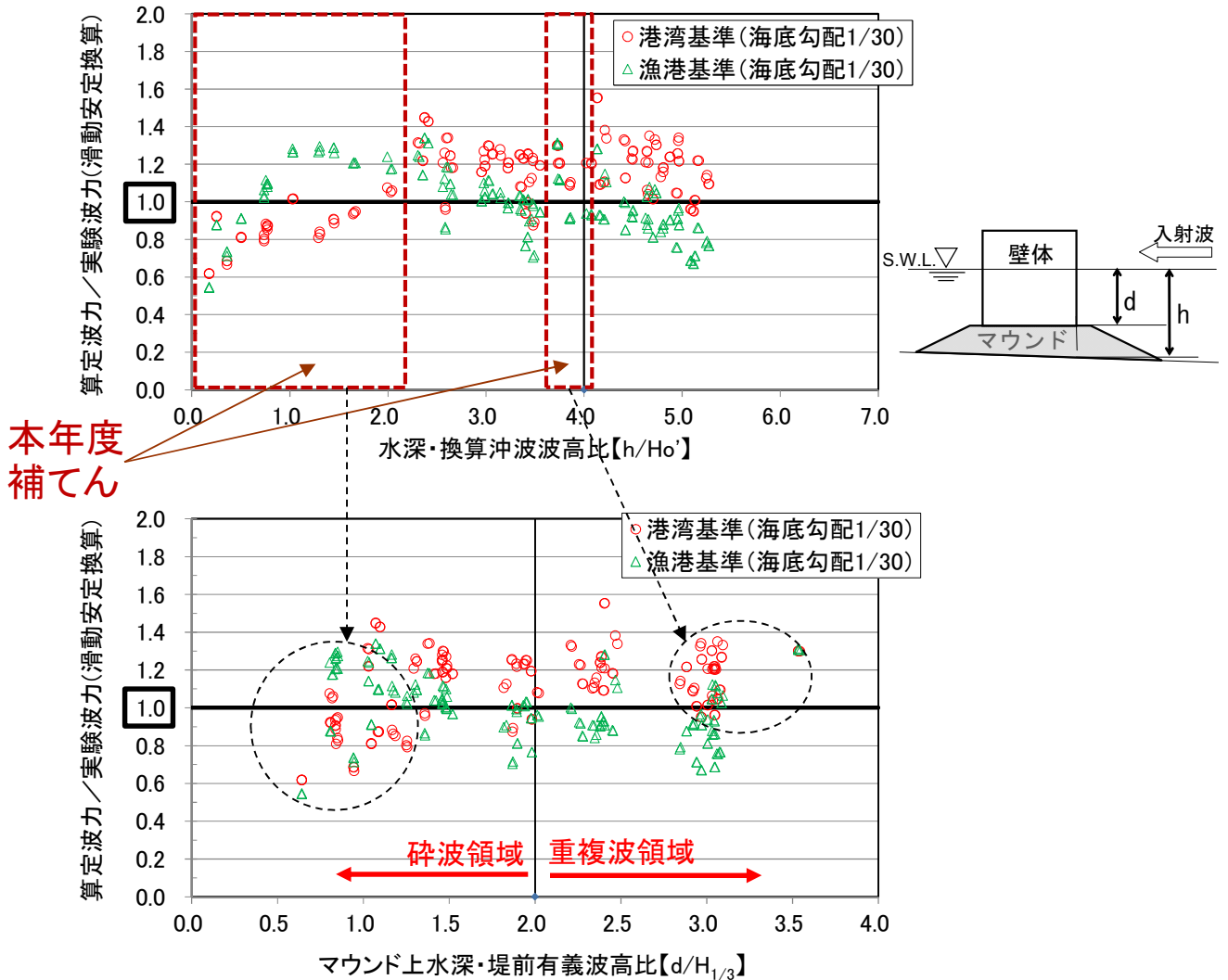


図 2.1.8 実験波力と各算定波力（漁港・港湾）の比較

※ H_0' は実験の沖入射波高から算出。

5) 浅水域の補正方法の検討

水理模型実験結果によると、砕波帯内の浅水域 ($h/H_0' < 2.0$) においては、合田式の算定波力は実験値より小さくなる傾向であった。水深の浅い水域への合田式の適用性は十分確認されておらず、砕波帯内の浅水域では、補正係数等による波力の割増が必要であると考えられる。そこで、合田式の補正係数 λ_1 による割増方法の検討を行った。

・提案波圧式：合田式

$$p_1 = 0.5 (1 + \cos\beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2\beta) \rho_0 g \lambda_0 H \quad (\text{式 2.1.1})$$

波圧補正係数： λ_1, λ_2

※港湾基準においては、以下の補正係数を標準としている。

消波工無し： $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.0$

消波工無しのケースについて、**図 2.1.9** 破線のような補正係数 λ_1 を導入すると、 $h/H_0' > 1.0$ の領域については、補正係数 λ_1 を最大で 1.4 程度にすると、広い水深帯 ($h/H_0' = 1.0 \sim 7.0$) で算定波力と実験波力の比が最低で 0.9 程度となり、全体的に実験波力と合田式による波力評価のバランスが良い (**図 2.1.10 (b)** 参照)。

一方、 $h/H_0' < 1.0$ の領域については算定波力と実験波力の比 0.9 を下回る傾向が見取れるが、被災事例 (平成 16 年災、平成 18 年災) を調べると、消波工無しの場合、相対水深 $h/H_0' < 1.0$ の領域で被災した事例は存在しない (**図 2.1.12** 参照。最も浅いケースは $h/H_0' = 1.22$)。室内実験では、 $h/H_0' < 1.0$ のようなごく浅い水深帯では衝撃的な波圧が発生しやすく、波力の実験精度自体にも課題があることから、 $h/H_0' < 1.0$ のごく浅い領域では現行レベルの評価が妥当であると考えられる。

上記を踏まえ、**図 2.1.9** 赤線のような最大 1.4、汀線で 1.0 となるような三角形分布型の補正係数 λ_1 に対して、同様に算定波力と実験波力の比を算出すると (**図 2.1.10 (c) ~ (e)**)、 $h/H_0' < 1.0$ の領域で、算定された値が現行漁港基準と同程度もしくはそれを上回っており、補正係数 λ_1 の分布が妥当なものであることがわかる。

なお、「3.事例分析等による波圧算定式の検証」に示す事例解析結果 (**図 3.2.3 ~ 図 3.2.8**) によると、汀線から $h/H_0' = 1.0$ までの補正係数 λ_1 を 1.4 とした場合、水深 5m では堤体幅は 1.4 ~ 1.7 倍程度となる。また汀線で補正係数を 1.0 とした三角形分布の補正をした場合、1.3 ~ 1.4 倍程度となる。

以上の検討結果から、補正係数 λ_1 として以下の案が妥当であると考えられる (**式 2.1.2**、**図 2.1.9** 赤線)。

$$\lambda_1 = \left\{ \begin{array}{ll} 0.4(h/H_0') + 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.4(h/H_0') + 1.8 & (1.0 < h/H_0' \leq 2.0) \\ 1.0 & (h/H_0' > 2.0) \end{array} \right\} \quad (\text{式 2.1.2})$$

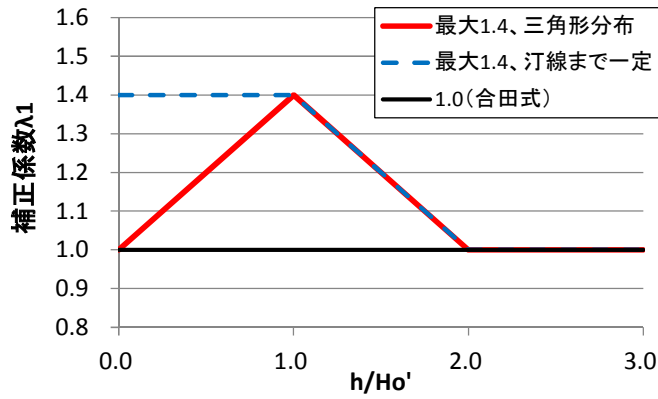
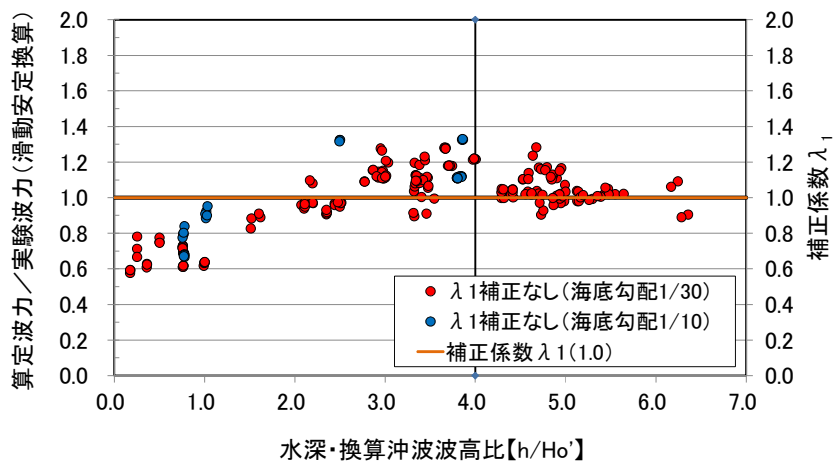
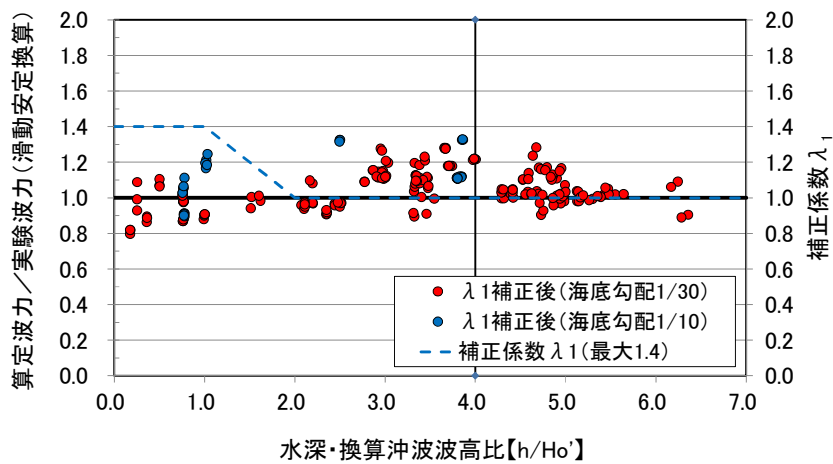


図 2.1.9 補正係数 λ_1 (消波工無し)

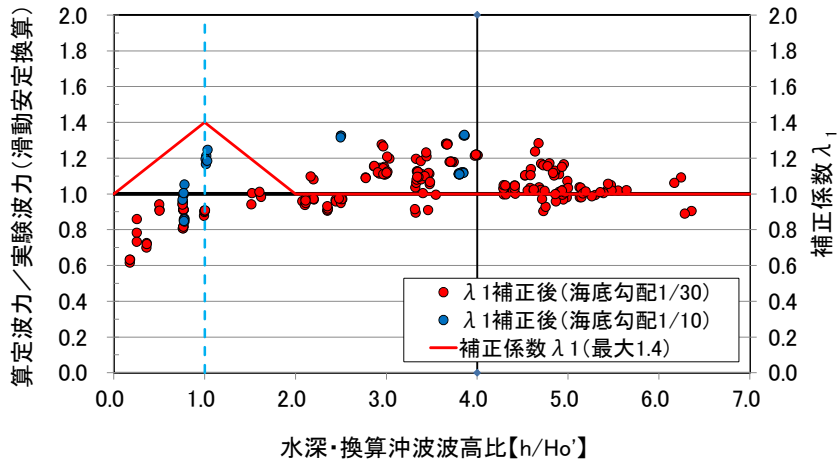


(a) 補正無し

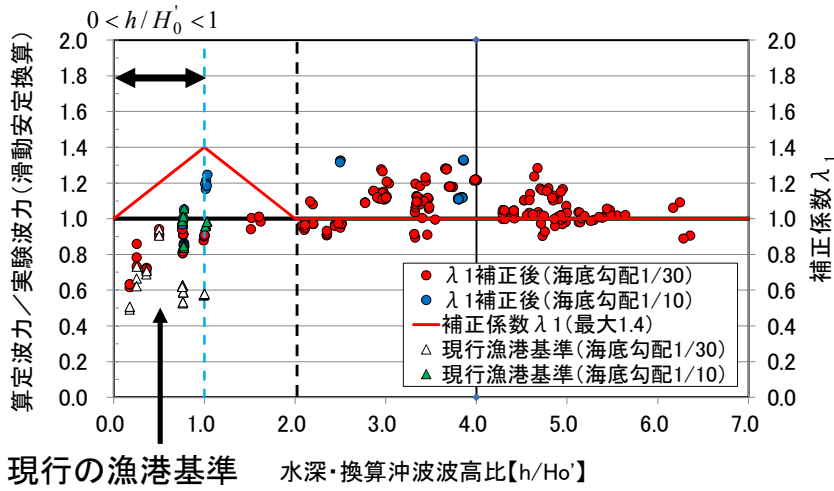


(b) $\lambda_1=1.4$ (汀線まで一定)

図 2.1.10 合田式補正後の算定波力と実験波力の比 (消波工無し)



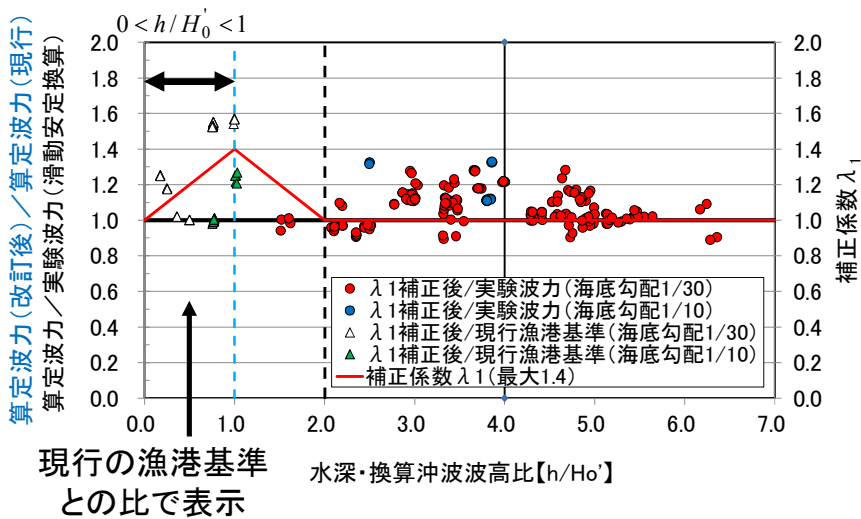
(c) $\lambda_1=1.4$ (汀線で 1.0、三角形分布)



現行の漁港基準 水深・換算沖波波高比【 h/H_0' 】

(d) $\lambda_1=1.4$ (汀線で 1.0、三角形分布)

※ $h/H_0' < 1.0$ のみ、現行漁港基準のプロット追加



現行の漁港基準 水深・換算沖波波高比【 h/H_0' 】
との比で表示

(e) $\lambda_1=1.4$ (汀線で 1.0、三角形分布)

※ $h/H_0' < 1.0$ は現行漁港基準との比を表示

図 2.1.10 合田式補正後の算定波力と実験波力の比 (消波工無し)

消波工有りのケースについても、 $h/H_0' < 2.0$ の領域においては、高橋らの補正係数による算定波力は実験値より小さくなる傾向であったため、補正係数 λ_1 の割増を検討する。図 2.1.11 黄線のように、 $h/H_0' < 1.0$ で補正係数 $\lambda_1=1.0$ となる分布で割り増した場合、広い水深帯で実験波力と合田式による波力評価のバランスが良いため、補正係数 λ_1 として以下の案が妥当であると考えられる（式 2.1.3、図 2.1.11 黄線）。

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.2(h/H_0') + 1.2 & (1.0 < h/H_0' \leq 2.0) \\ 0.8 & (2.0 < h/H_0' \leq 3.0) \\ 0.08(h/H_0') + 0.56 & (3.0 < h/H_0' \leq 5.5) \\ 1.0 & (h/H_0' > 5.5) \end{cases} \quad (\text{式 2.1.3})$$

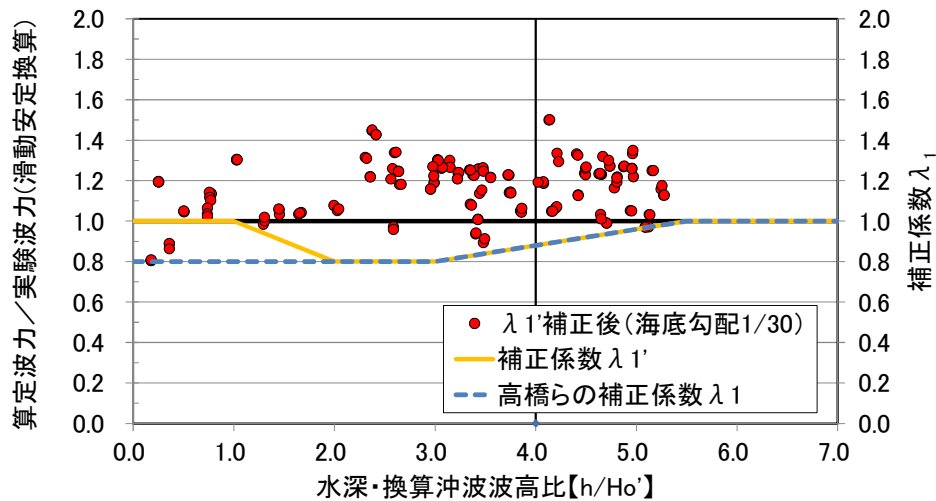
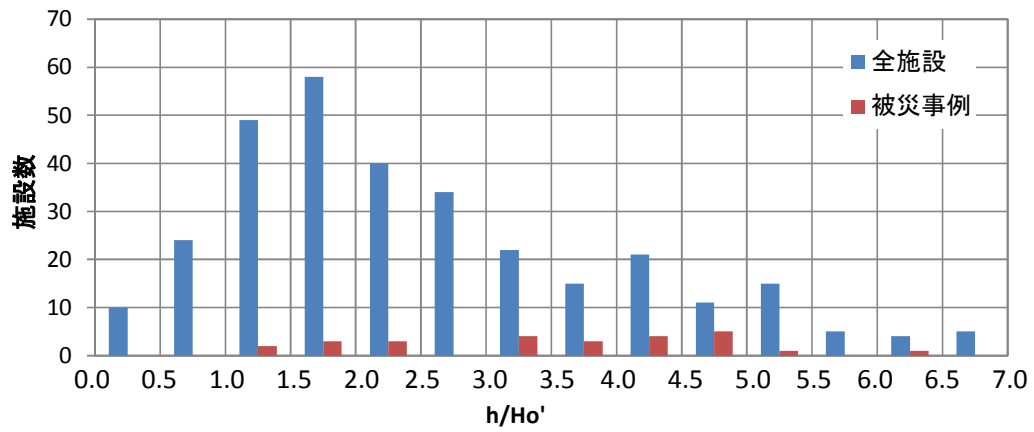
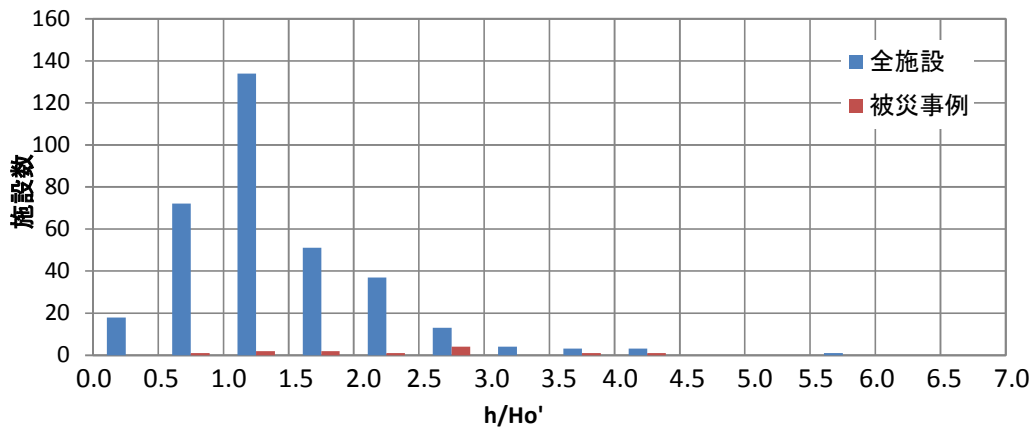


図 2.1.11 合田式補正後の算定波力と実験波力の比（消波工有り）



(a)消波工無し



(b)消波工有り

図 2.1.12 水深帯別の施設数, 被災事例の度数分布
 ※全施設: H14~16年整備、被災事例: H16, 18年災

2. 2 入射波向の影響（平面実験）

これまでに実施していない消波工で被覆された場合の平面実験を行い、提案波圧式への波向の効果の導入の検討を行った。

1) 実験施設（図 2.2.1 参照）

- ・実験施設：平面水槽、多方向不規則波造波装置（長さ 35m×幅 20m×深さ 0.8m）
- ・海底勾配：1/30

2) 堤体模型

- ・模型縮尺：1/50
- ・堤体模型：混成堤 1 形状（堤体長さ 3m）、消波工有りまたは無し

3) 計測内容

- ・水位：容量式波高計（沖・堤体前面）
- ・波圧：半導体型動歪み式波圧計（壁面前面）

4) 実験ケース

- ・①砕波領域、②砕波・重複波遷移領域の 2 ケース
- ・波群各 2 種：波高・周期は同じで、波の時系列のみ異なる波
- ・入射角：0°、15°、30°、45°、60°

堤体模型を回転させて、入射角を変更した。

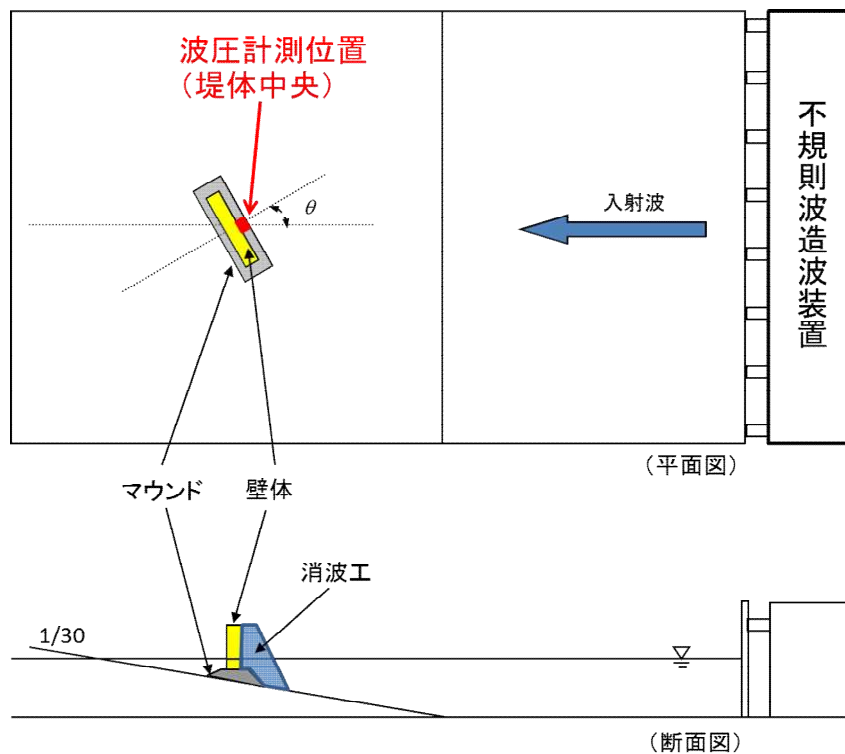


図 2.2.1 平面実験模型概要

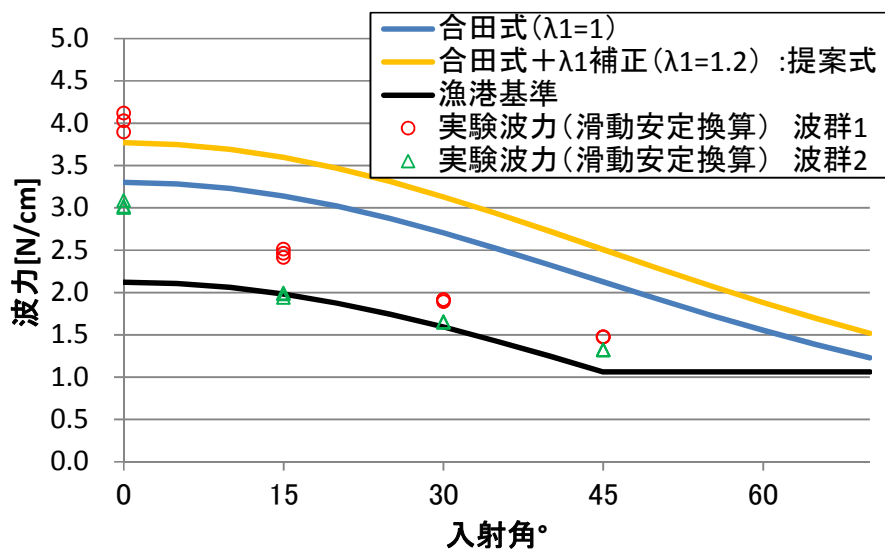
5) 実験結果

図 2.2.2、図 2.2.4 に消波工無し、図 2.2.3 に消波工有りの実験結果を示す。ここで実験波力は滑動安定換算の波力として評価を行った。

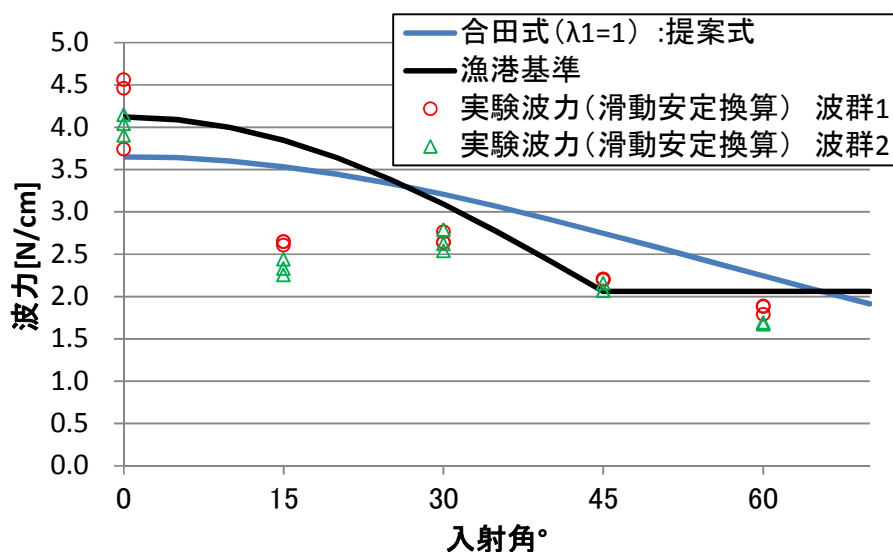
消波工無しについては、合田式、さらに浅水域の補正係数 λ_1 を使用することにより安全側に設計が可能となるケースがある。消波工有りについても、合田式と補正係数 λ_1 により算定して概ね問題がないことを確認した。

ただし、消波工無しの場合、入射角 0° の実験値は算定値より大きい傾向が見られる。図 2.2.5 に堤体中央における最大波圧の計測値を示すが、入射角 0° の最大波圧は 15° 以上に比べ極端に大きいケースがあり、衝撃碎波の影響があるものと考えられる。また、本実験結果には三次元的な波高分布の影響などの課題もある。

以上の検討結果から、合田式の波力は全体的に安全側の評価となっており、実績のある合田式の評価を採用することとする。

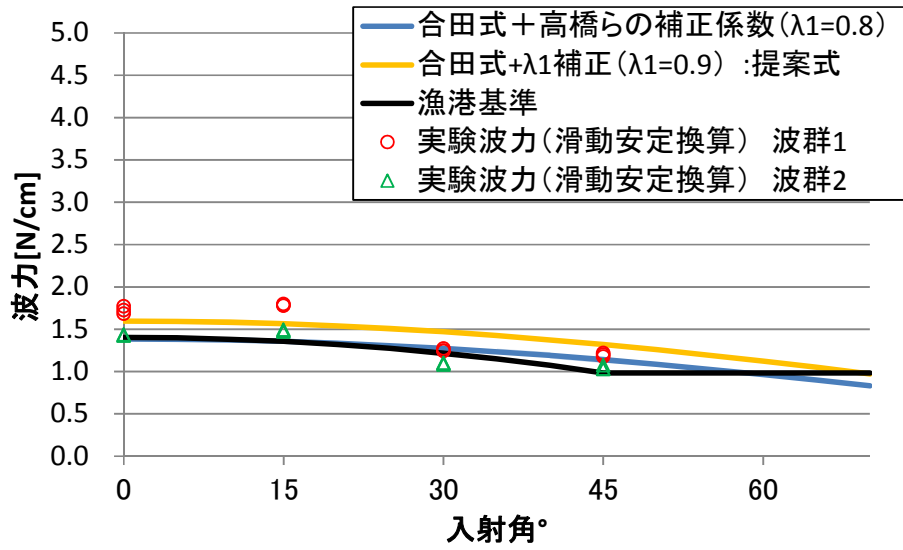


(a) 実験ケース① 碎波領域 ($d/H_{1/3}=0.6, h/H_0'=1.5$)

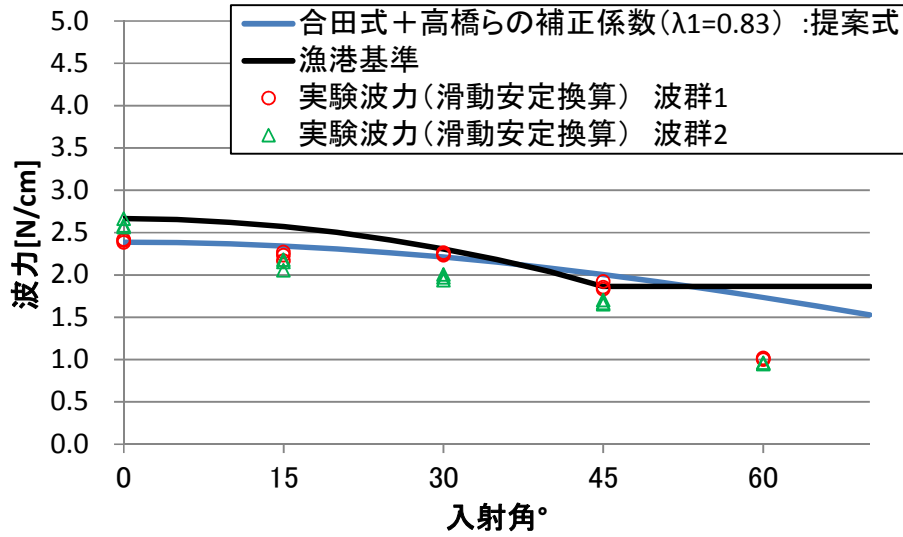


(b) 実験ケース② 碎波・重複波遷移領域 ($d/H_{1/3}=1.7, h/H_0'=3.4$)

図 2.2.2 平面実験結果 消波工無し (海底勾配 1/30)

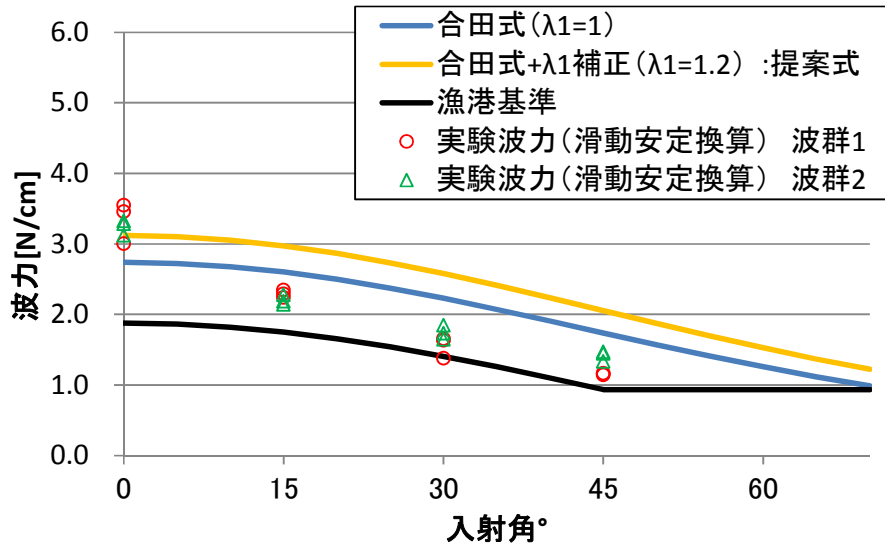


(a)実験ケース①砕波領域 ($d/H_{1/3}=0.6, h/H_0'=1.5$)

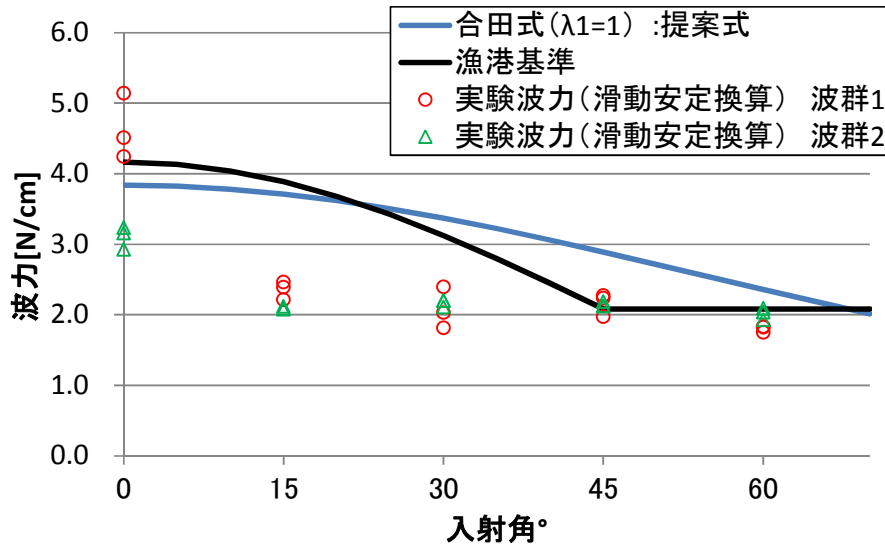


(b)実験ケース②砕波・重複波遷移領域 ($d/H_{1/3}=1.7, h/H_0'=3.4$)

図 2.2.3 平面実験結果 消波工有り (海底勾配 1/30)

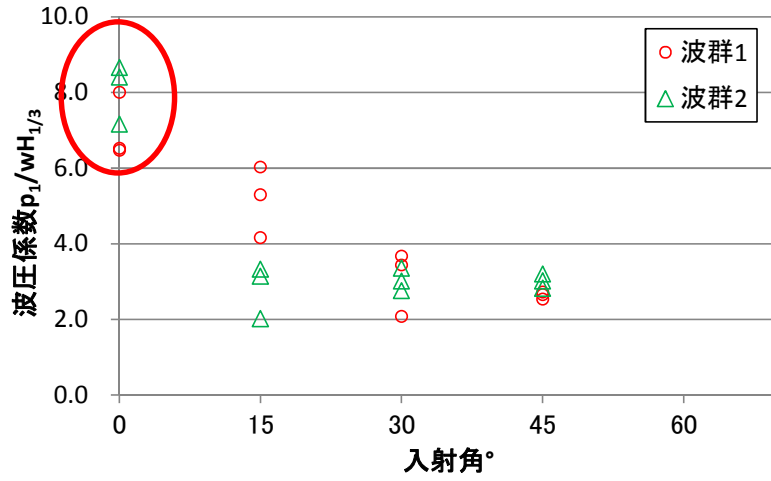


(a)実験ケース①砕波領域 ($d/H_{1/3}=0.6, h/H_0'=1.5$)

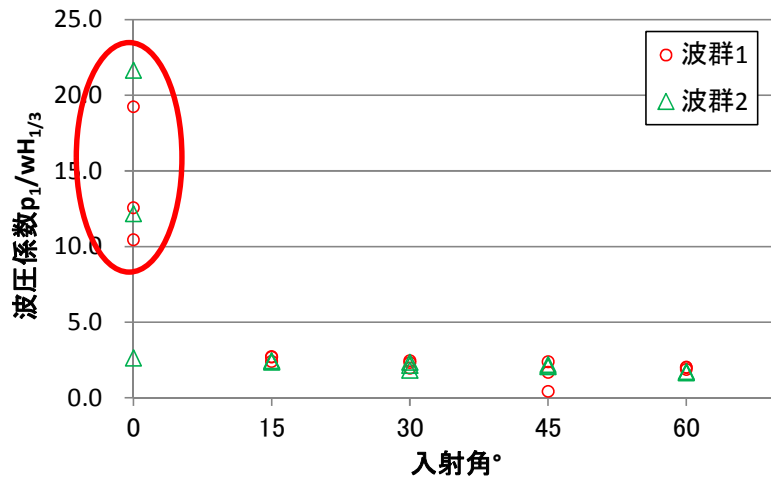


(b)実験ケース②砕波・重複波遷移領域 ($d/H_{1/3}=1.7, h/H_0'=3.4$)

図 2.2.4 平面実験結果 (平成 23 年度実施ケース) 消波工無し (海底勾配 1/20)



(a) 実験ケース① 砕波領域 ($d/H_{1/3}=0.6$, $h/H_0'=1.5$)



(b) 実験ケース② 砕波・重複波遷移領域 ($d/H_{1/3}=1.7$, $h/H_0'=3.4$)

図 2.2.5 最大波圧計測値 消波工無し (海底勾配 1/30)

2. 3 波浪変形の計測

水深による波高変化の計測を行い、設計波高の算定手法の検討を行った。

1) 実験施設

- ・実験施設：還流風洞付造波水路（幅 1.0m×深さ 1.5m×長さ 100m）
- ・海底勾配：1/30、および 1/10

2) 計測内容

- ・水位：容量式波高計（ $H_{1/3}$, H_{max} , 平均水位）
- ・計測位置： $h/H_0'=0\sim 4.0$ の範囲で 16 箇所程度（8 箇所同時計測×2 位置）

3) 実験ケース

実験ケース一覧を表 2.3.1 に示す。下記に示す計 8 ケースで計測を行った。

海底勾配 2 種（1/30, 1/10）×波形勾配 4 種（ $H_0'/L_0=0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ） = 計 8 ケース

波浪スペクトルは修正ブレットシュナイダー—光易型とし、各ケース 3～5run（1run 200 波程度）の計測を行った。

表 2.3.1 実験ケース一覧

海底勾配	沖側水深 h_n (cm)	換算沖波 波高 H_n' (cm)	沖入射波		波形勾配 H_n'/L_n
			周期 T_n (s)	波長 L_n (cm)	
1/30	70.0	5.99	1.95	595	0.010
	80.0	7.84	1.59	397	0.020
	80.0	7.98	1.28	254	0.031
	80.0	7.89	1.11	191	0.041
1/10	70.0	6.00	1.96	601	0.010
	80.0	7.77	1.59	396	0.020
	80.0	7.91	1.27	252	0.031
	80.0	7.83	1.10	190	0.041

波高変化の計測値と算定値（漁港基準・港湾基準）の比較結果を図 2.3.1～図 2.3.4 に示す。有義波高の計測値は、漁港基準より港湾基準（合田の不規則波波高変化）に近いと言える。最大波高の計測値は、ややばらつきがあるものの、合田の波高変化を概ね再現している。尚、最大波高の計測値にばらつきがある原因として、約 200 波の最大であり波数が十分とは言えないことや、実験水槽や造波機特性により特に急勾配（1/10）で最大波の再現が難しいこと等が考えられる。

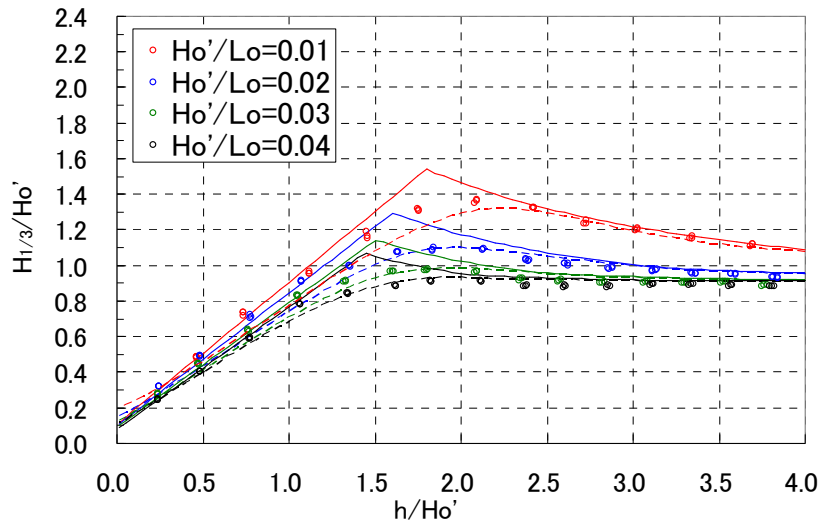


図 2.3.1 水深による有義波高 $H_{1/3}$ の変化（海底勾配 1/30）
（実線：漁港基準、破線：港湾基準、プロット：計測値）

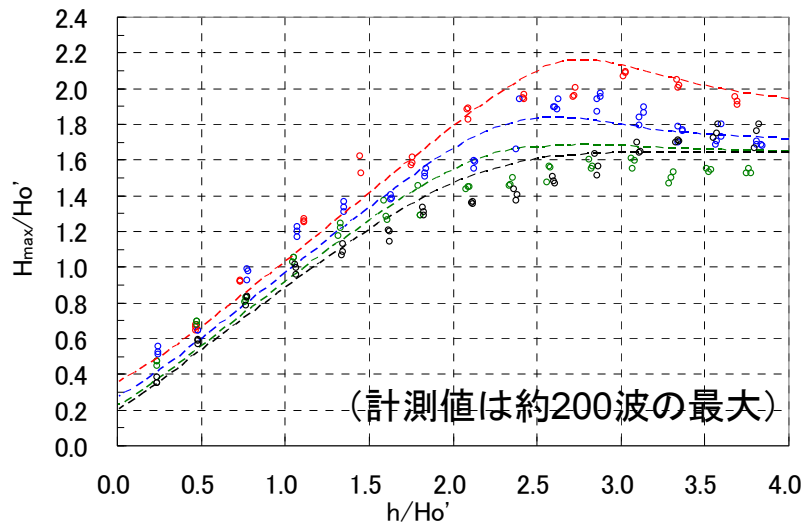


図 2.3.2 水深による最大波高 H_{max} の変化（海底勾配 1/30）
（破線：港湾基準、プロット：計測値）

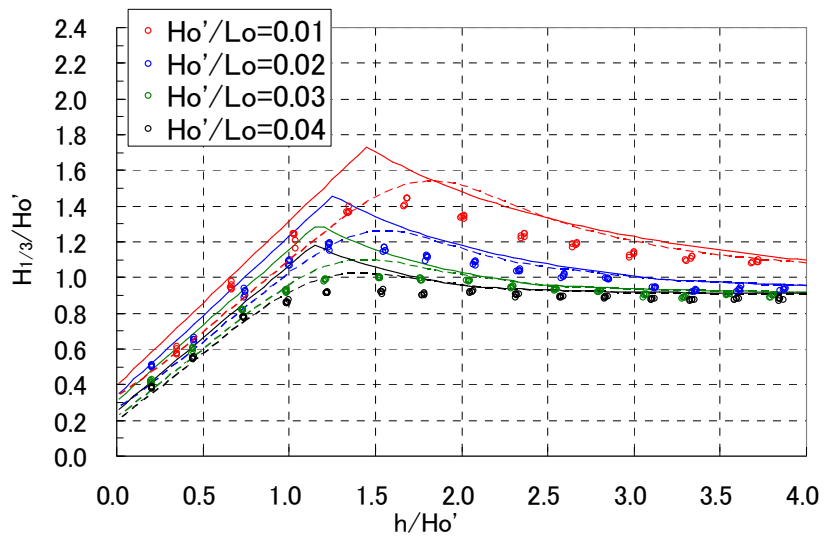


図 2.3.3 水深による有義波高 $H_{1/3}$ の変化 (海底勾配 1/10)
 (実線：漁港基準、破線：港湾基準、プロット：計測値)

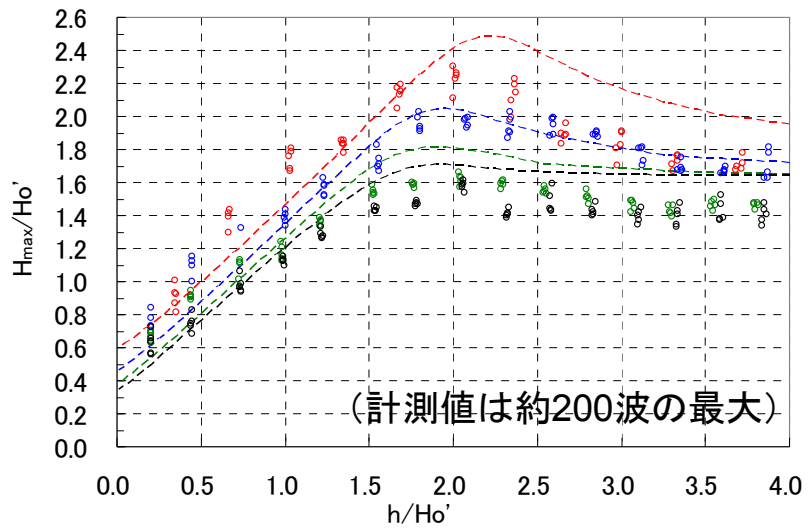


図 2.3.4 水深による最大波高 H_{max} の変化 (海底勾配 1/10)
 (破線：港湾基準、プロット：計測値)

3. 事例分析等による波圧算定式の検証（平成 25, 26 年度）

実在構造物を対象とした防波堤の基本断面の変化とコストの増加傾向について事例分析を行い、設計法の適用性の検証を行った。

3. 1 水平波力合力・堤体幅の試算

現行漁港基準と提案設計法について、水平波力合力および堤体幅を試算し、比較を行った。試算条件を以下に示す。

(a) 計算条件（図 3.1.1 参照）

- ・ 海底勾配：1/30 または 1/50
- ・ マウンド上水深 d ： $d/h=0.7$ （ $d/h=0.6\sim 0.7$ が最多事例）
- ・ 天端高 $h_t=1.0\times$ 到達波高 ($H_{1/3}$) + 平均水位上昇量
- ・ 堤体単位体積重量： $\omega_{dry}=20.6(\text{kN/m}^3)$ 、海水単位体積重量： $\omega_o=10.1(\text{kN/m}^3)$
- ・ 堤体摩擦係数：0.6
- ・ 滑動安全率 1.2 の必要堤体幅 B を算定

(b) 波浪条件

- ・ 入射角度=0 度
- ・ 周期： $T=13\text{s}$
- ・ 換算沖波波高：下記の 3 種
 - $H_0' = 10.5\text{m}$ ($H_0' / L_0 = 0.04$)
 - $H_0' = 8.0\text{m}$ ($H_0' / L_0 = 0.03$)
 - $H_0' = 5.5\text{m}$ ($H_0' / L_0 = 0.02$)

(c) 比較設計法

① 現行漁港基準

- ・ 到達波高 (H)：黒本波高変化図
- ・ 設計波 (H)：対象地点と $5\times H$ 沖までの最大値
- ・ 水位上昇量：黒本水位上昇量図
- ・ 波圧式： $d/H > 2$ （重複波域） サンプル式 + 部分碎波式
 $d/H < 2$ （碎波域） 広井式

② 港湾基準

- ・ 到達波高 ($H_{1/3}$)：合田波高変化図
- ・ 設計波 (H_{max})：対象地点と $5\times H_{1/3}$ 沖までの H_{max} の最大値（合田波高変化図による）
- ・ 波圧式：合田式
- ・ 合田式補正係数
 - 消波工無し $\lambda_1=1.0, \lambda_2=1.0$
 - 消波工有り λ_1 =高橋らの補正係数, $\lambda_2=0.0$

③ 提案式 (λ_1 による補正)

- ・ 到達波高、設計波、波圧式は②と同様
- ・ 合田式補正係数
 - 消波工無し λ_1 ：式 2.1.2（最大 1.4、三角形分布）, $\lambda_2=1.0$
 - 消波工有り λ_1 ：式 2.1.3（0.8~1.0）, $\lambda_2=0.0$

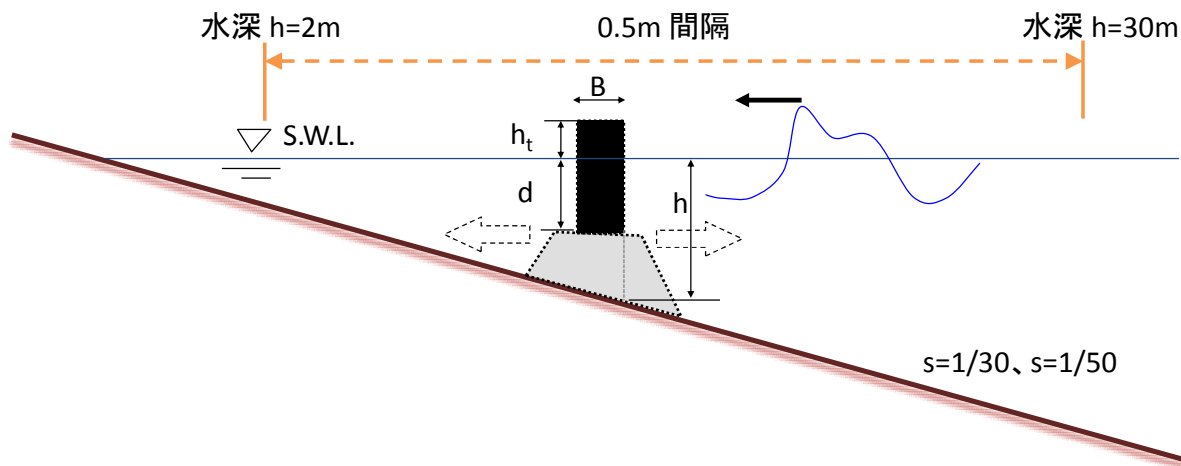


図 3.1.1 堤体幅の試算条件概要

消波工無しの場合の試算結果例を図 3.1.2、参考として全ケースを図 3.1.3～図 3.1.8 に示す。重複波・砕波境界の波力・堤体幅の不連続部分が解消されるとともに、全体的に現行基準より波力・堤体幅が増加傾向となることが分かる。ただし、波形勾配の大きいケース ($H_0'/L_0=0.04$) では、砕波帯で波力・堤体幅がやや小さくなる（経済的）場合もある。

消波工有りの場合の試算結果を図 3.1.9～図 3.1.12 に示す。傾向は消波工無しと同様であるが、全体的に波力・堤体幅の差は小さい。また、現行式での波力ピーク付近の波力・堤体幅は、今回検討範囲ではすべて提案式の方が小さい（経済的）傾向にある。

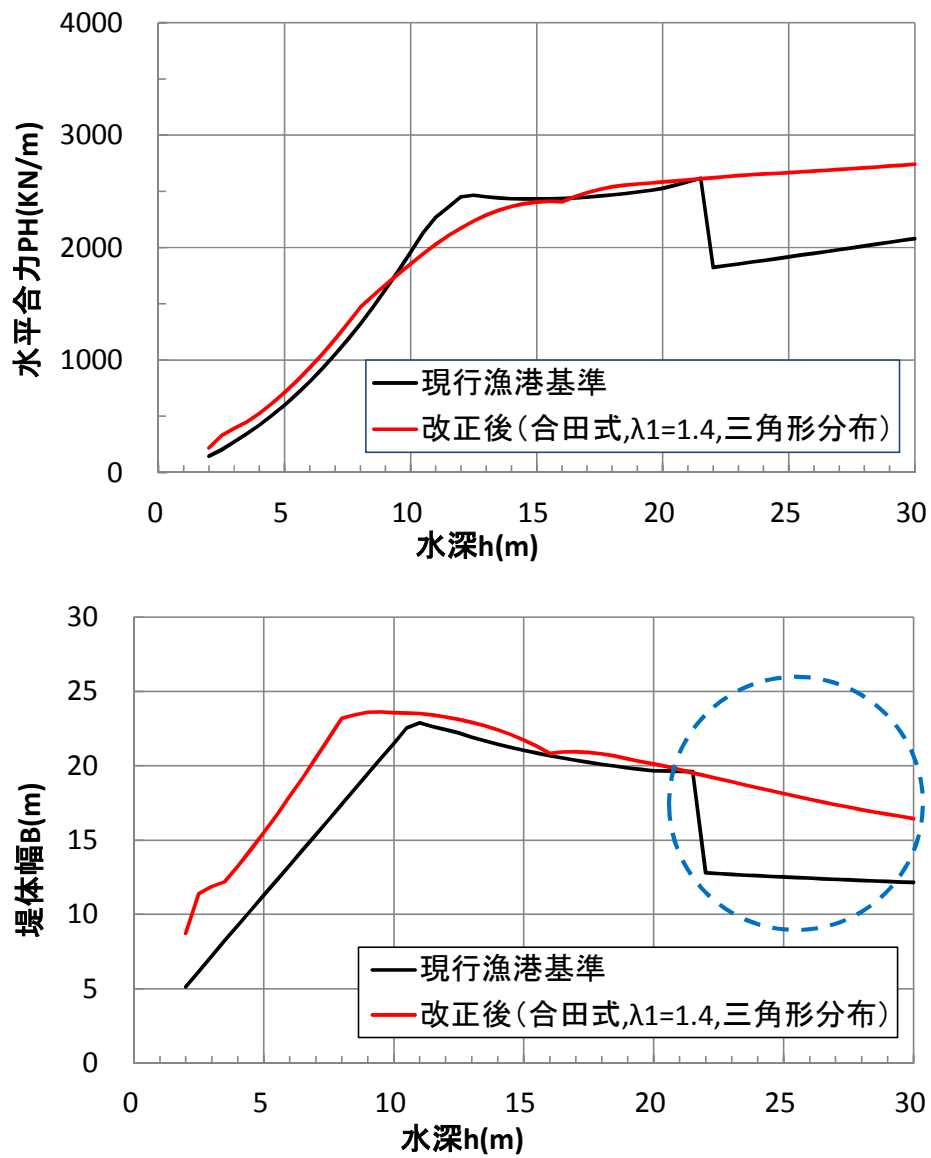


図 3.1.2 試算結果例 (消波工無し、海底勾配 1/30、 $H_0' = 8.0\text{m}$)

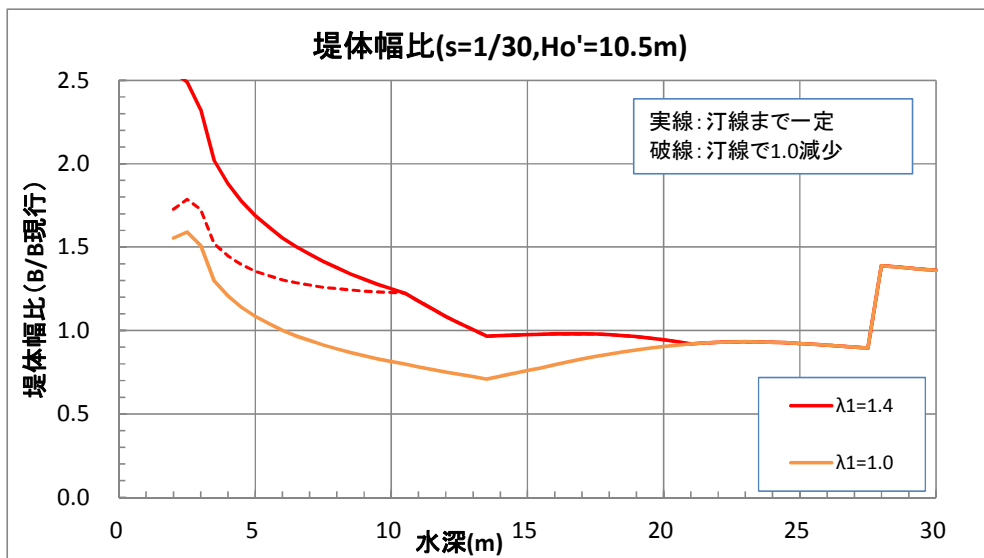
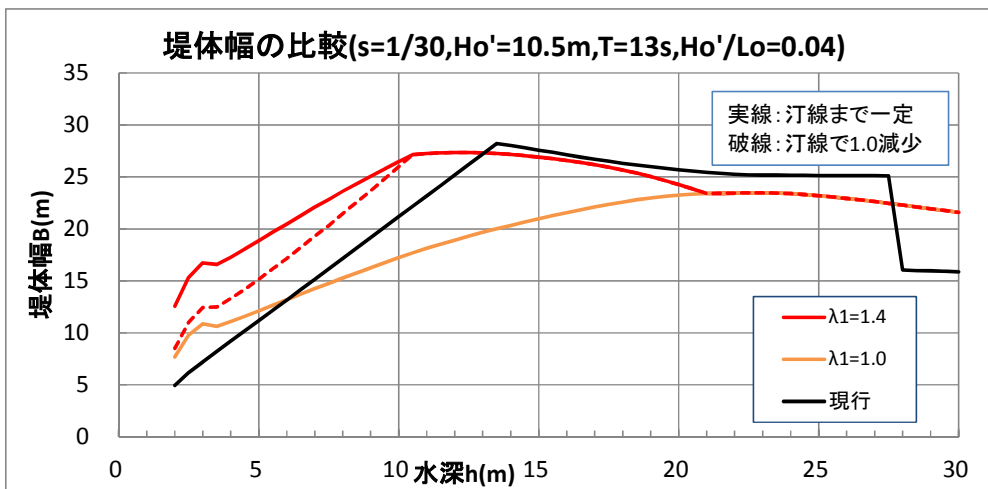
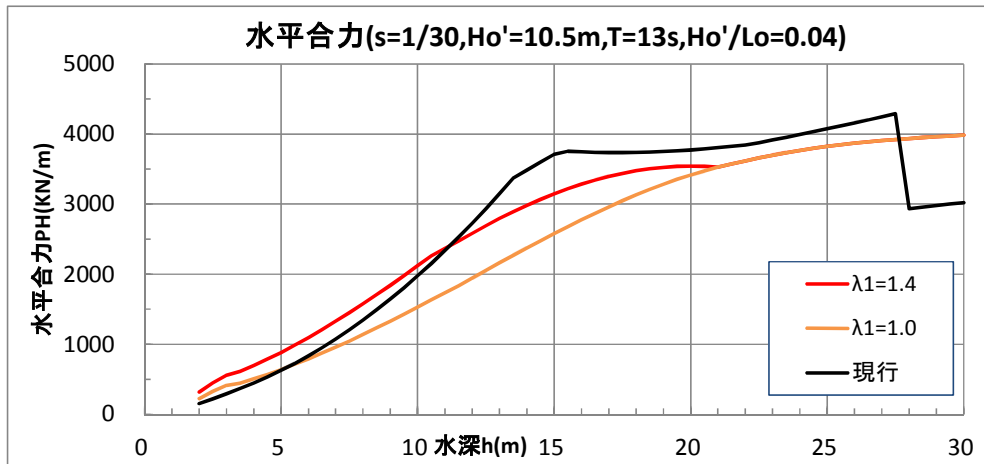


図 3. 1. 3 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/30、 $H_0' = 10.5\text{m}$)

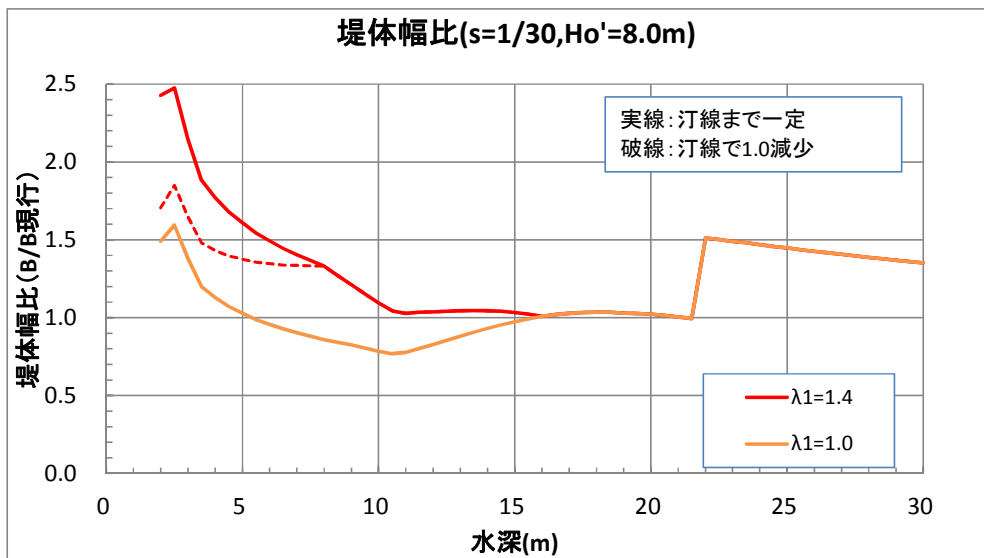
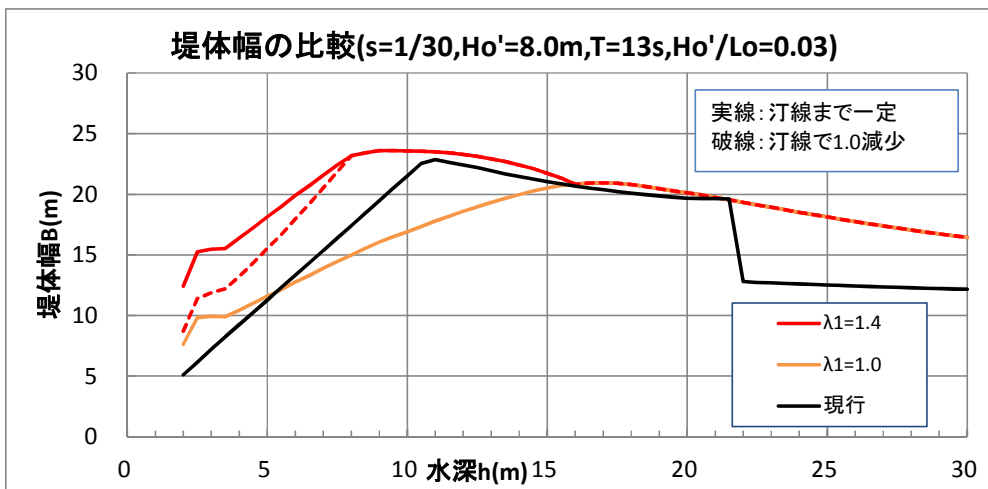
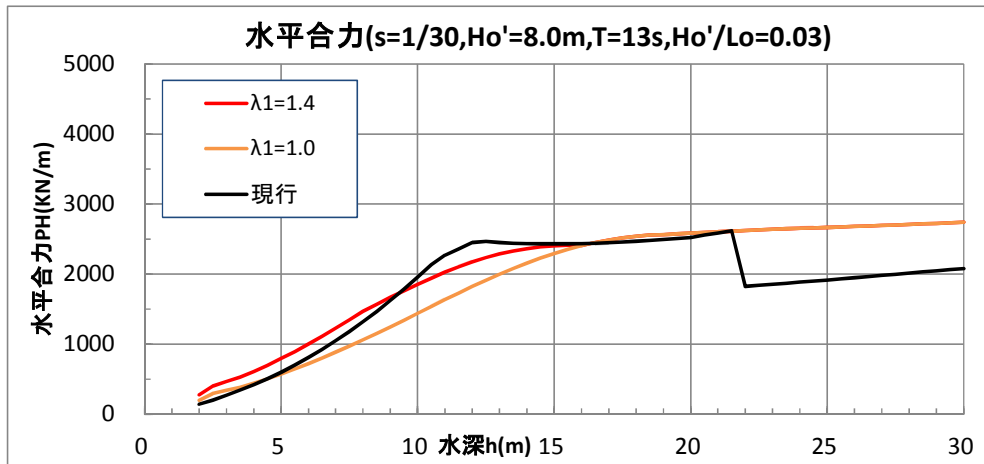


図 3.1.4 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/30、 $H_0' = 8.0m$)

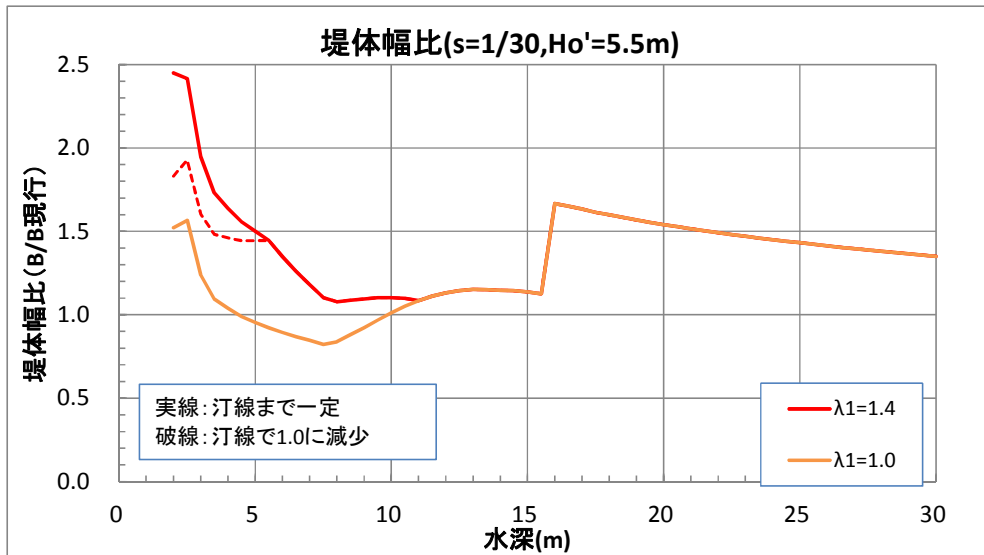
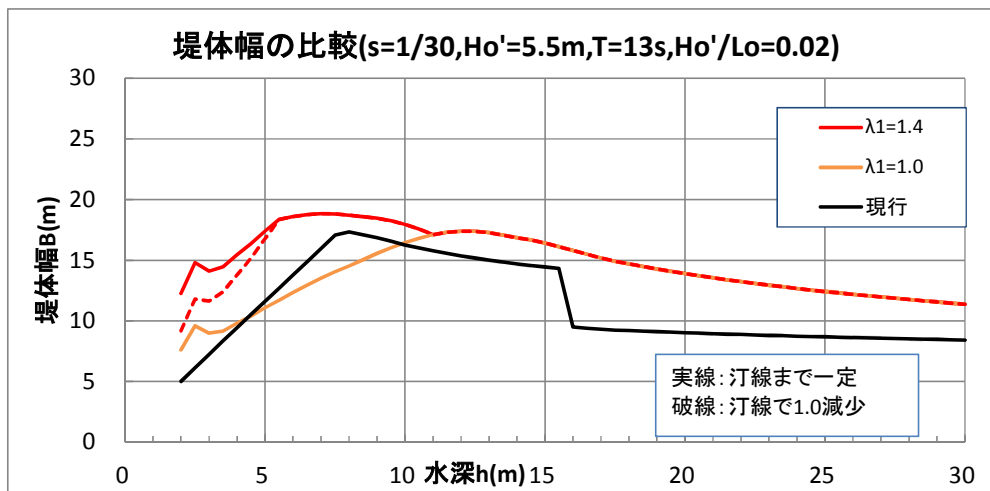
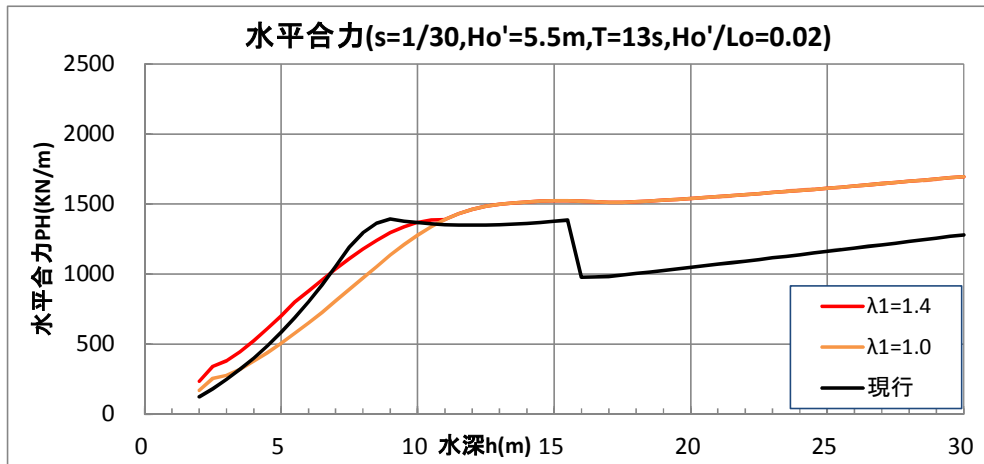


図 3.1.5 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/30、 $H_0' = 5.5m$)

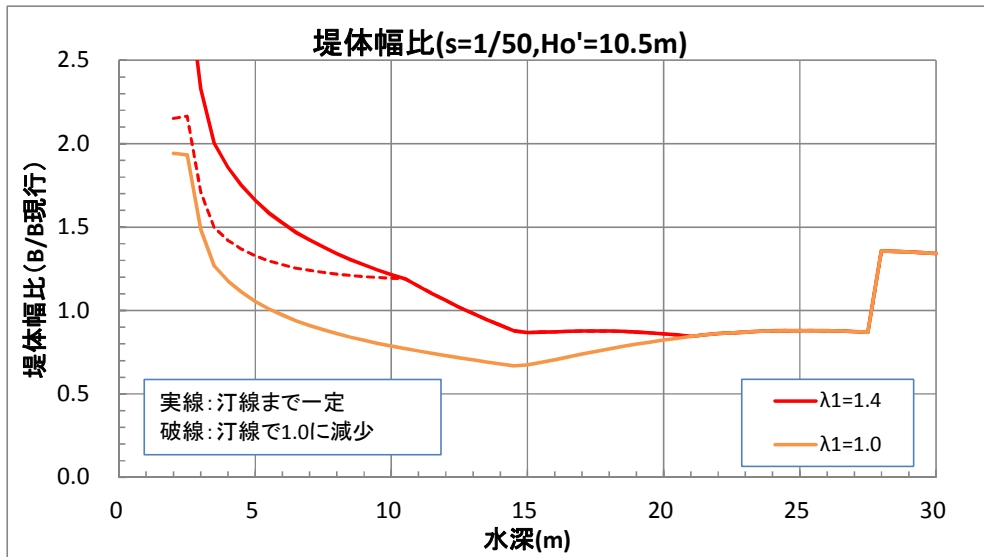
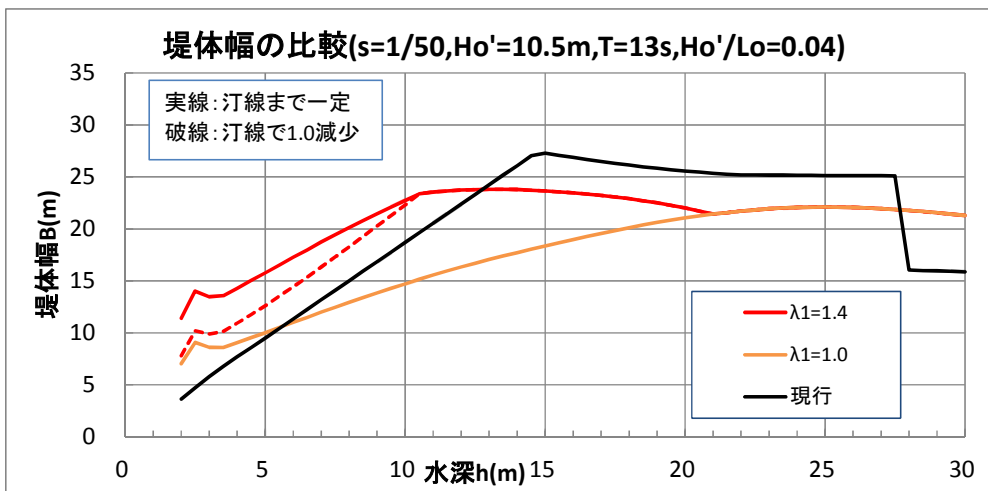
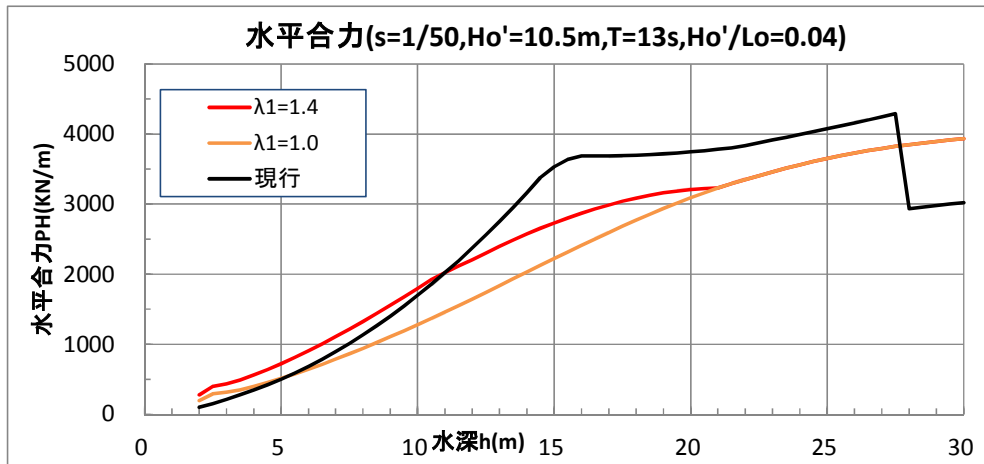


図 3.1.6 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/50、 $H_0' = 10.5m$)

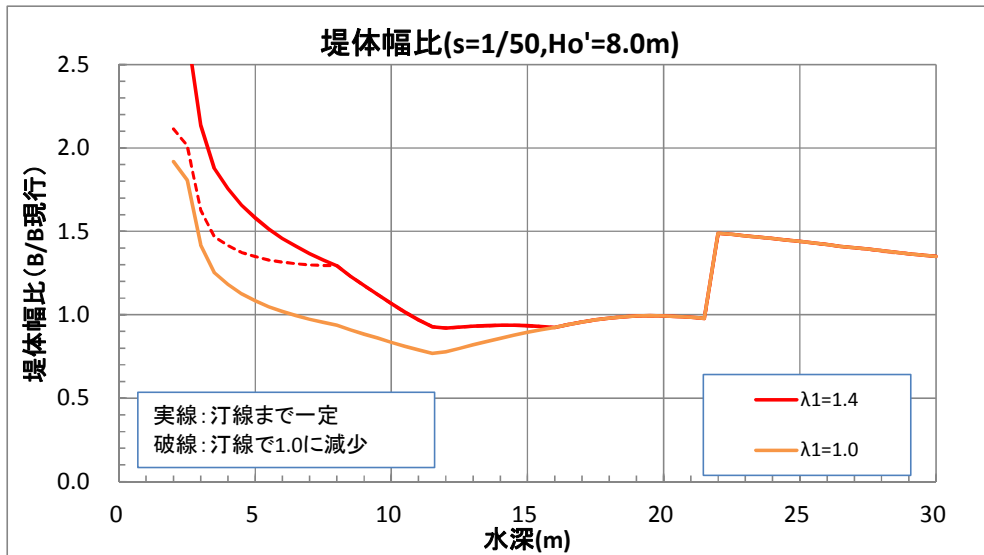
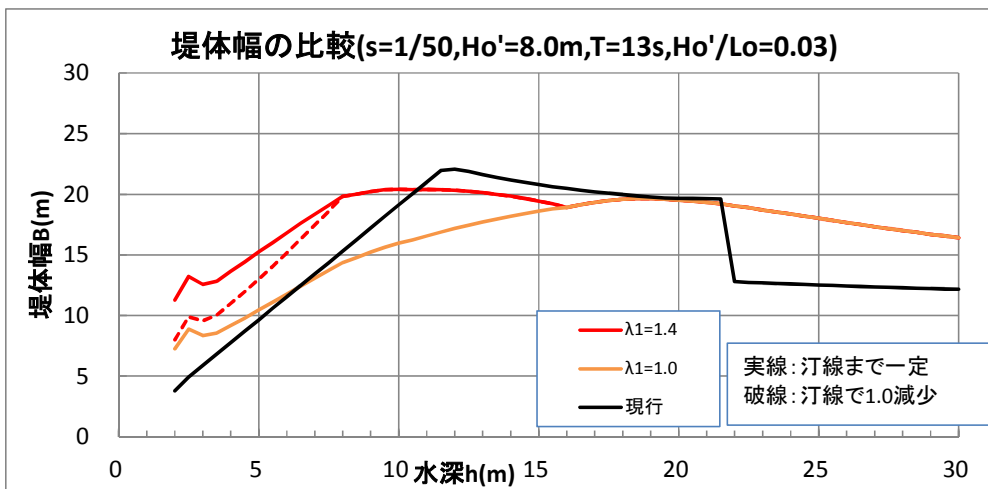
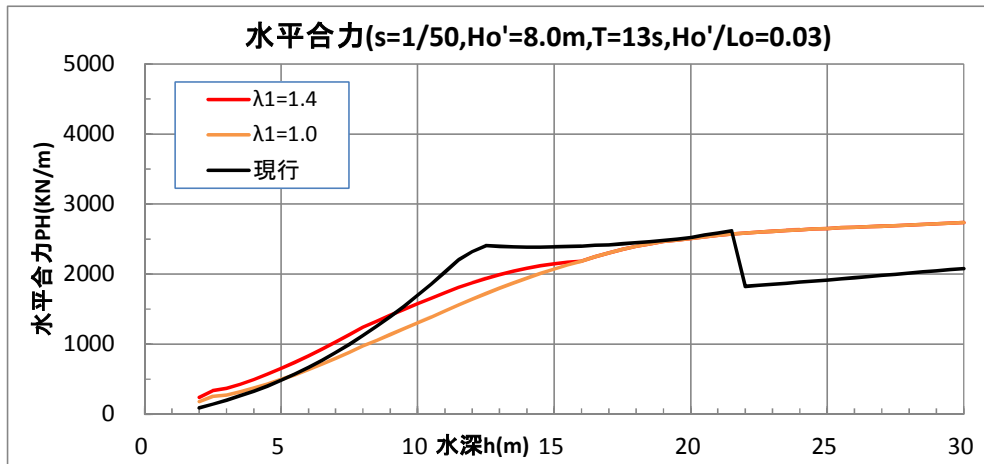


図 3.1.7 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/50、 $H_0' = 8.0m$)

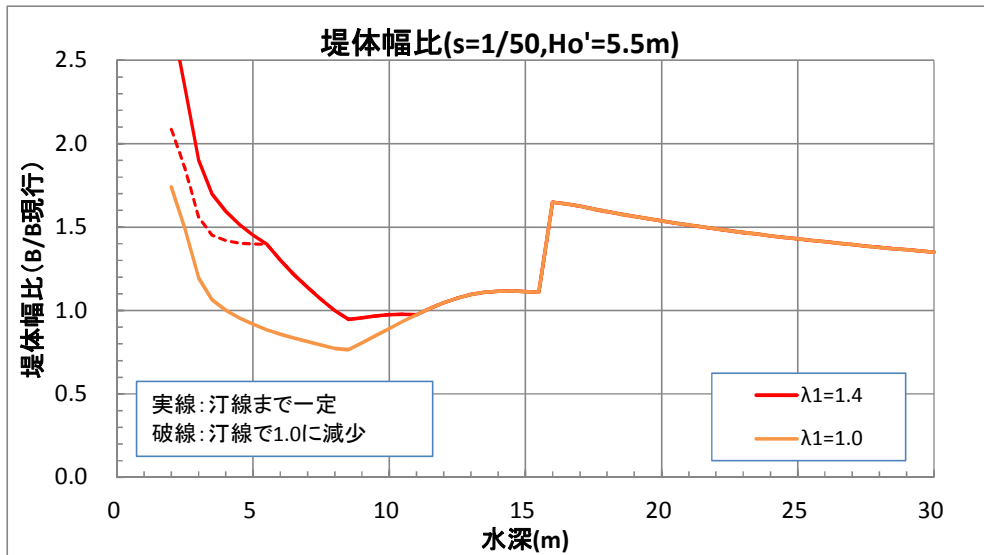
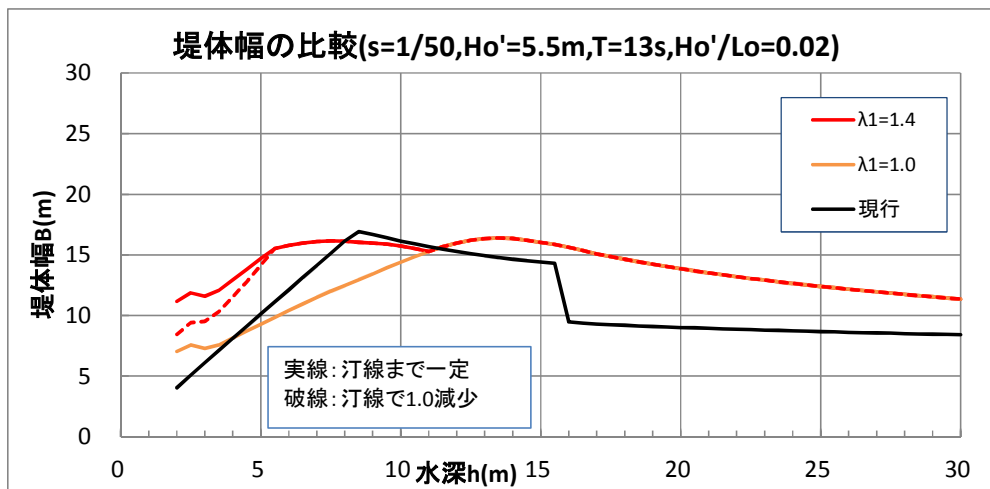
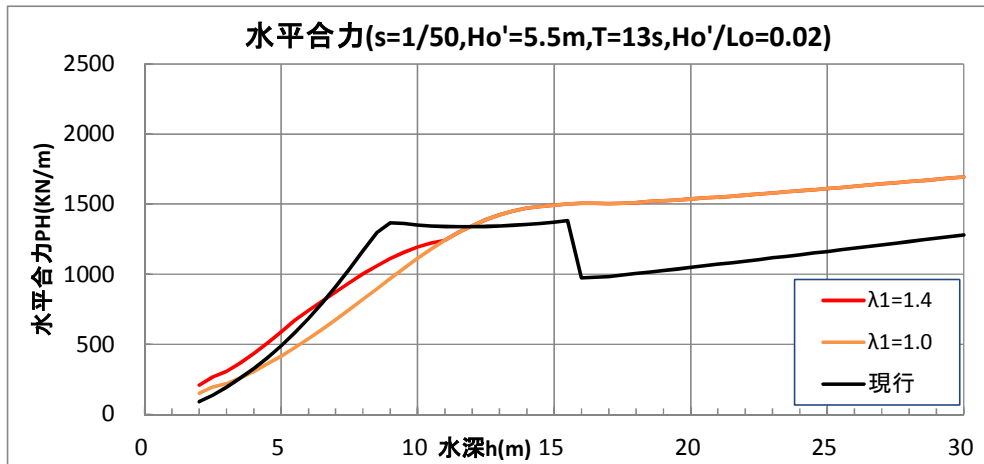


図 3.1.8 試算結果 (消波工無し、海底勾配 1/50、 $H_0' = 5.5m$)

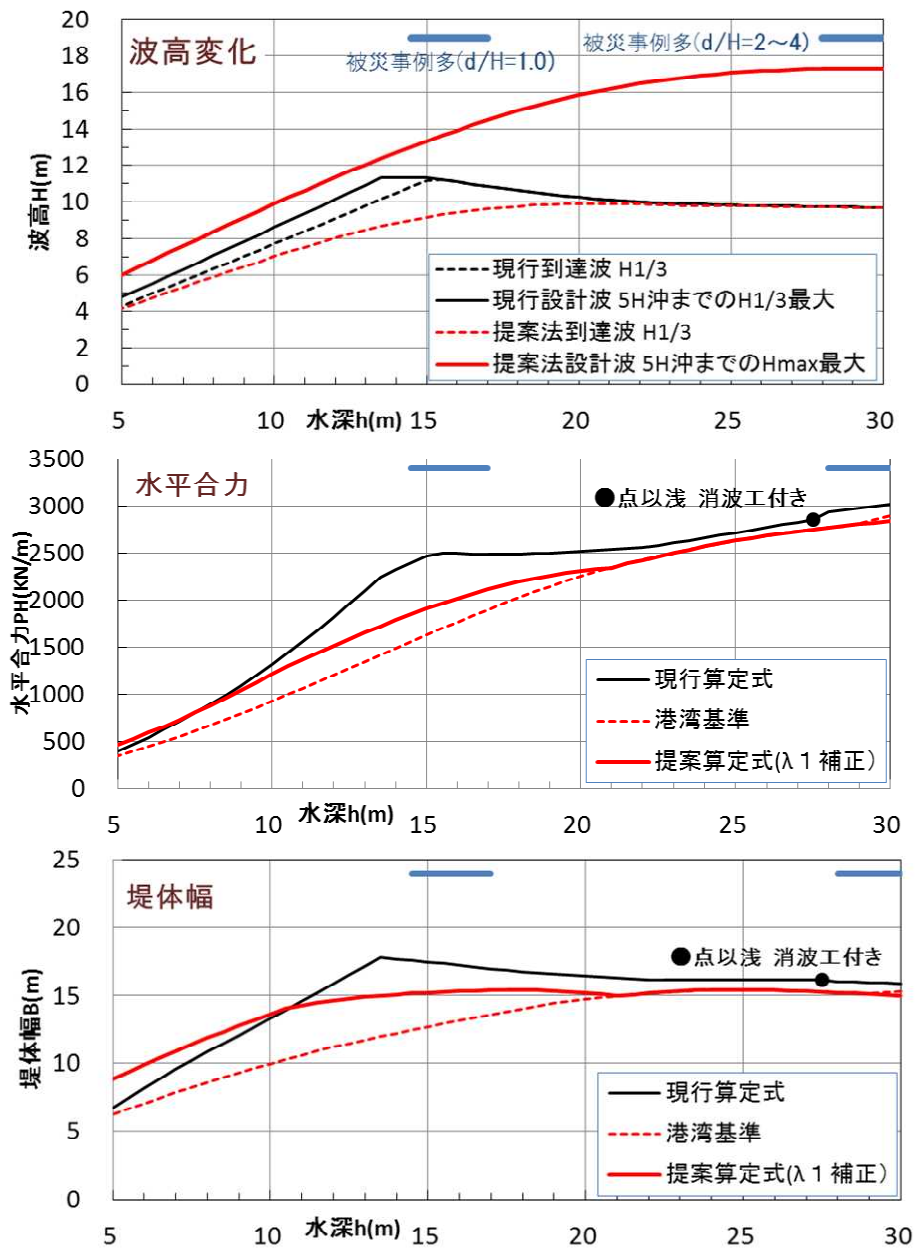


図 3.1.9 試算結果 (消波工有り、海底勾配 1/30、 $H_0' = 10.5\text{m}$)

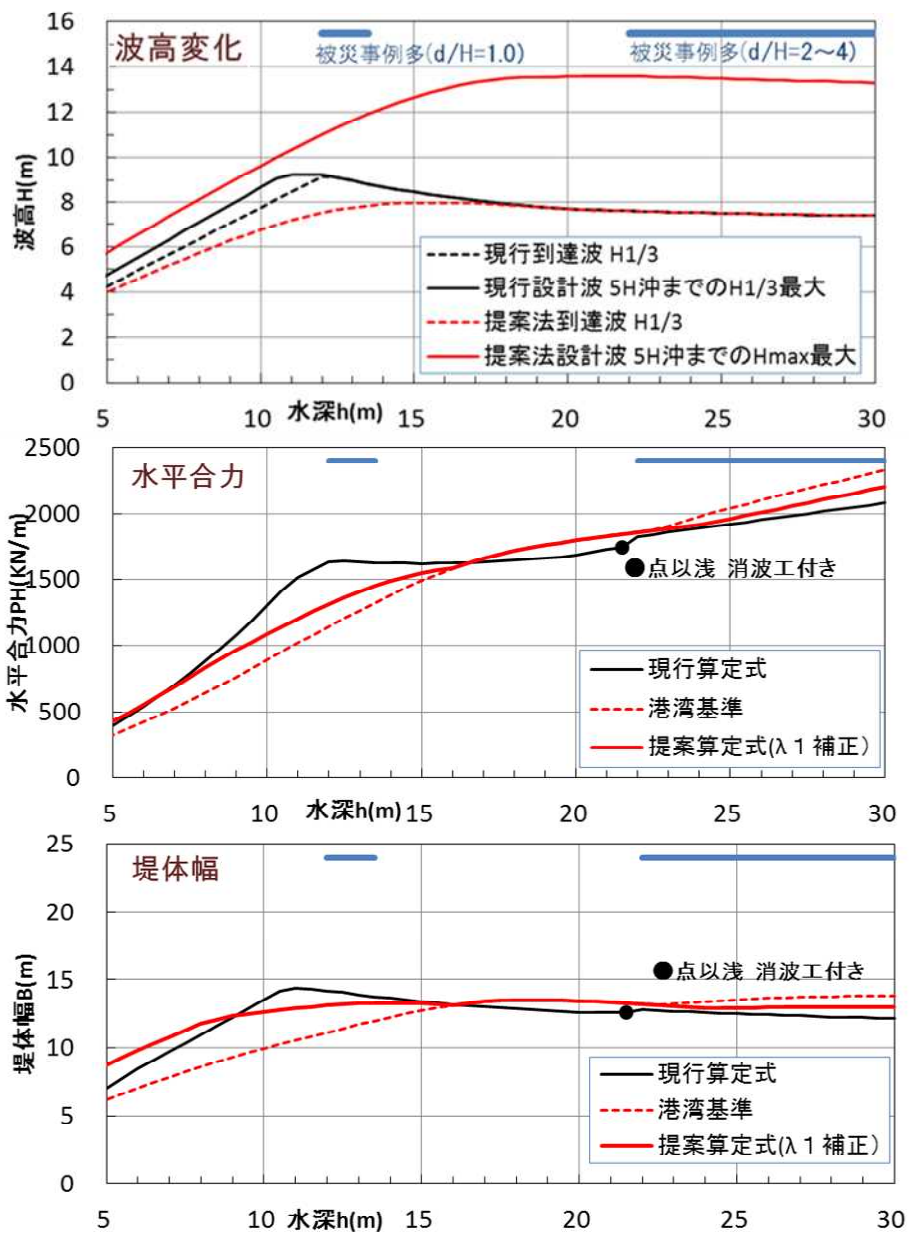


図 3.1.10 試算結果（消波工有り、海底勾配 1/30、 $H_0' = 8.0$ m）

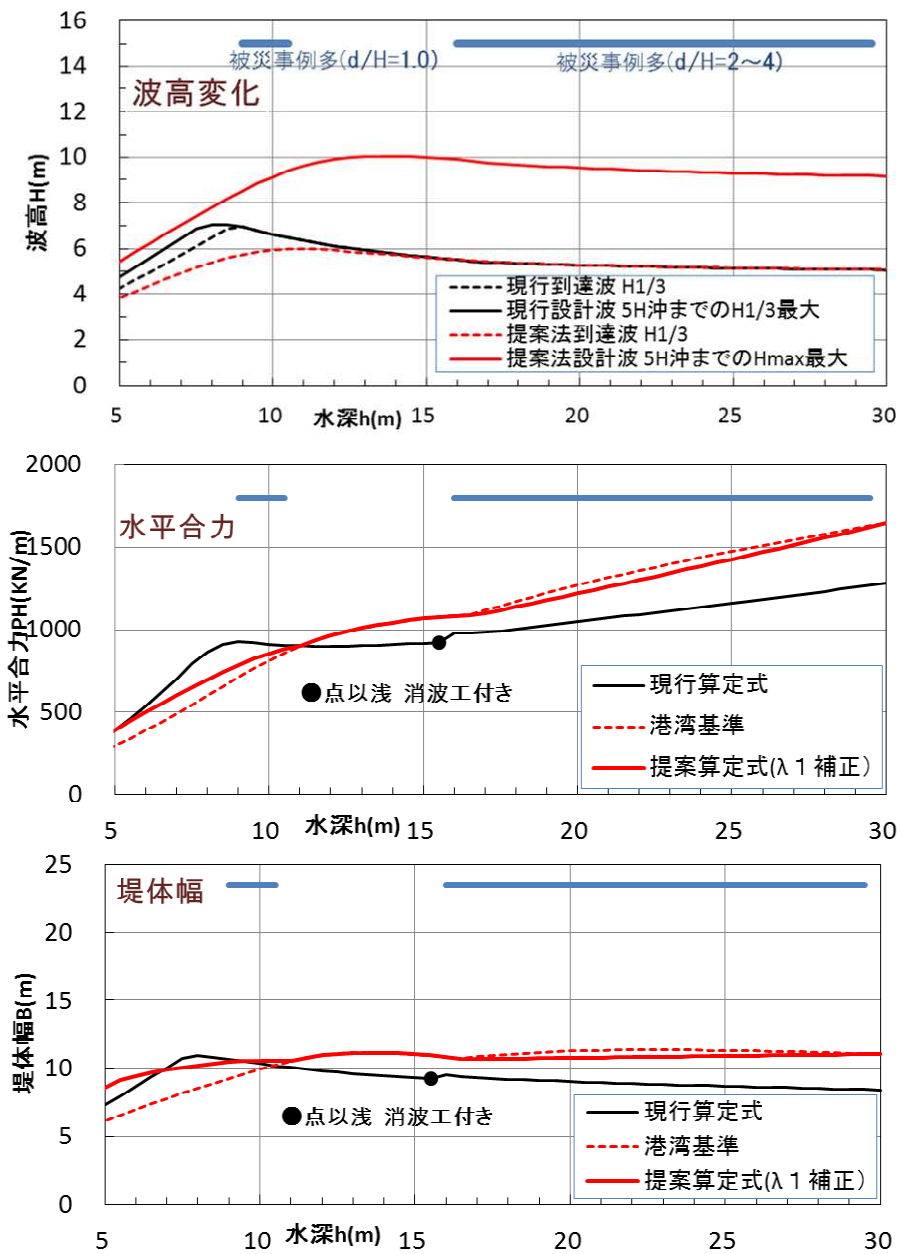


図 3.1.11 試算結果（消波工有り、海底勾配 1/30、 $H_0' = 5.5$ m）

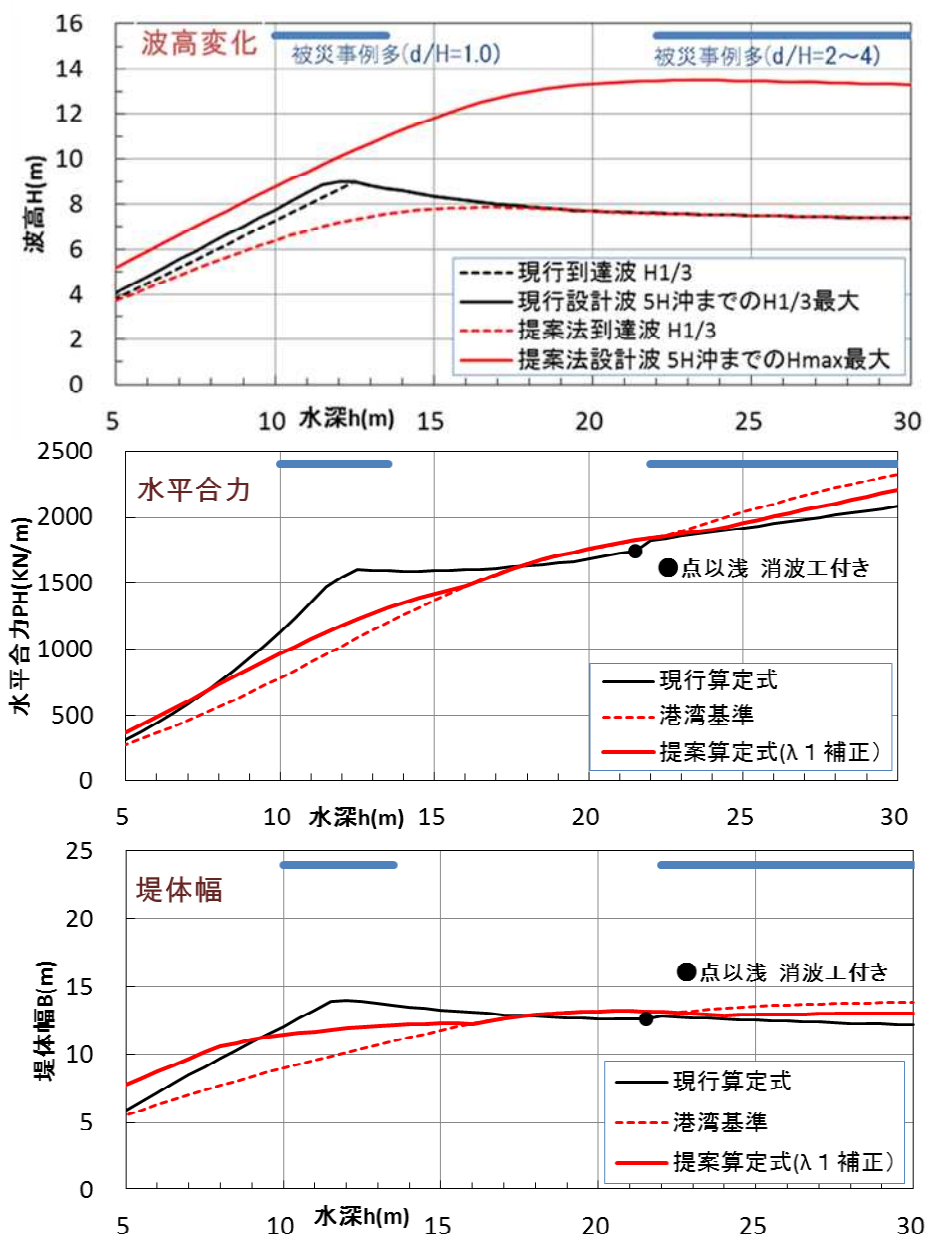


図 3.1.12 試算結果（消波工有り、海底勾配 1/50、 $H_0' = 8.0$ m）

3. 2 実在構造物を対象とした断面・コストの増減分析

実在構造物（平成 16, 17 年被災事例）を対象に波高算定法・波力算定法の変更に伴う防波堤の基本断面の変化とコストの増加傾向について事例分析を行った。断面・コストの算定事例を図 3.2.1、表 3.2.1 に示す。

提案設計法により滑動安全率が 1.2 となる断面を概算し、堤体幅の増加傾向を把握した。なお、防波堤天端高は現行設計と同じ H.W.L.設計潮位 + 1.0 × $H_{1/3}$ で算定した。

基本断面について直接工事費（胸壁工、上部工、本體工、基礎捨石、本均し、荒均し）を概算し、概算事業費（直接工事費 × 1.5）の比較を行った。

各事例解析結果を図 3.2.2～図 3.2.6 に、断面増加率とコスト増加率の整理結果を図 3.2.7 に示す。砕波域、重複波域の両方で、最大 50% 程度の堤体幅が増加することが分かる。現断面の滑動安全率が 1.2 に近い場合は、水平波力に比例して堤体幅が増加する結果となっている。また概算事業費の増加は、最大 35% 程度となっている。

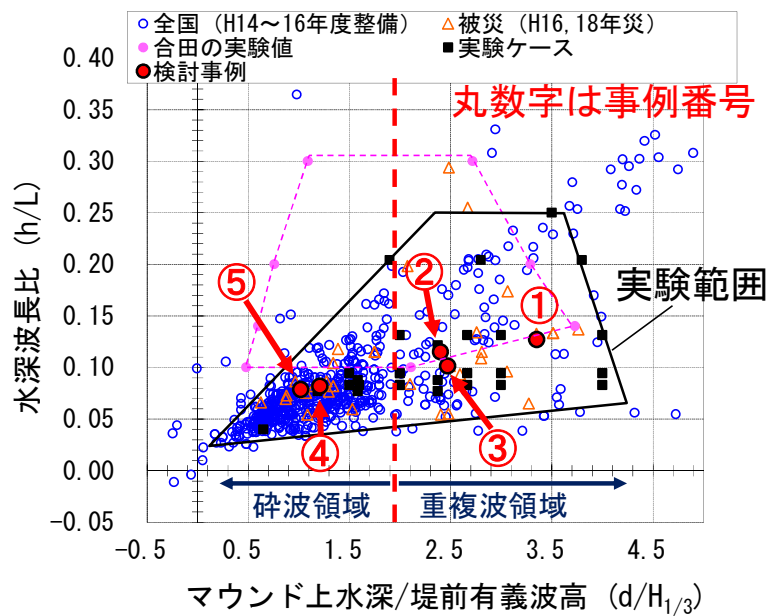
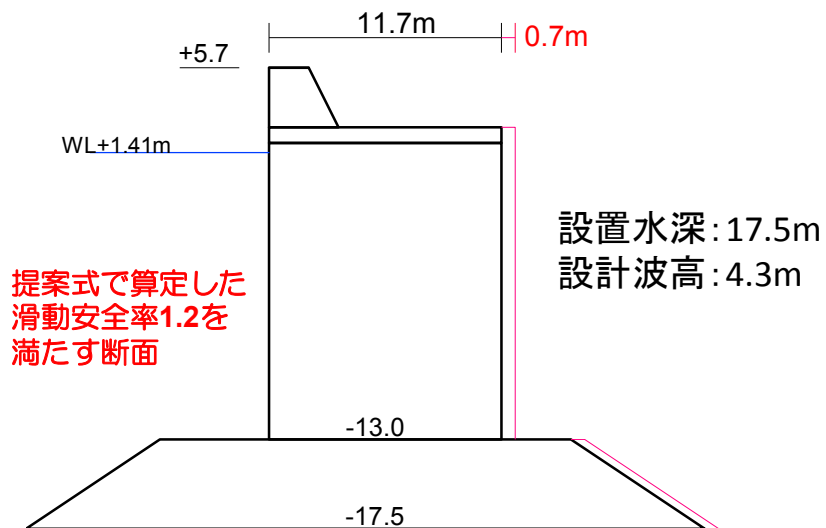


図 3.2.1 断面・コスト算定事例

表 3.2.1 断面・コスト算定事例一覧

事例	領域	設計波高	設置水深
①	重複波	4.3m	17.5m
②	"	5.3m	18.0m
③	"	4.35m	11.5m
④	砕波	5.3m	7.8m
⑤	"	5.1m	7.5m



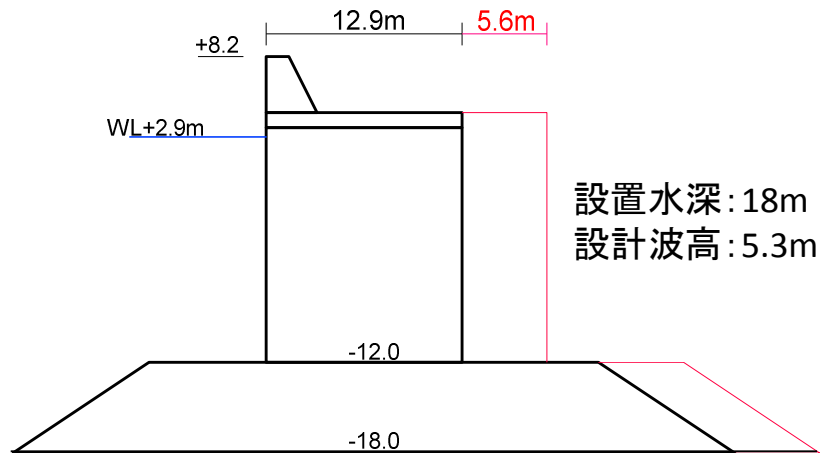
築造時設計条件			
換算沖波波高(Ho')	4.44m	Ho'/Lo	0.020
設計波高(H)	4.3 m	h/Ho'	4.26
周期(T)	12.0 秒	d/H	3.35
設計潮位	+1.4 m	海底勾配	1/50
設置水深(h)	-17.5 m		
堤体水深(d)	-13.0m		
天端高(ht)	+5.7m		

(dは根固方塊考慮)

	現行設計法	提案法	提案式滑動安全率1.2を満足する断面
有義波高 H1/3(m)	4.30	4.30	堤体幅が約0.7m増加
水平波力(kN/m)	805(1.00)	1072(1.33)	
滑動安全率	1.59	1.14	

():水平波力増加率

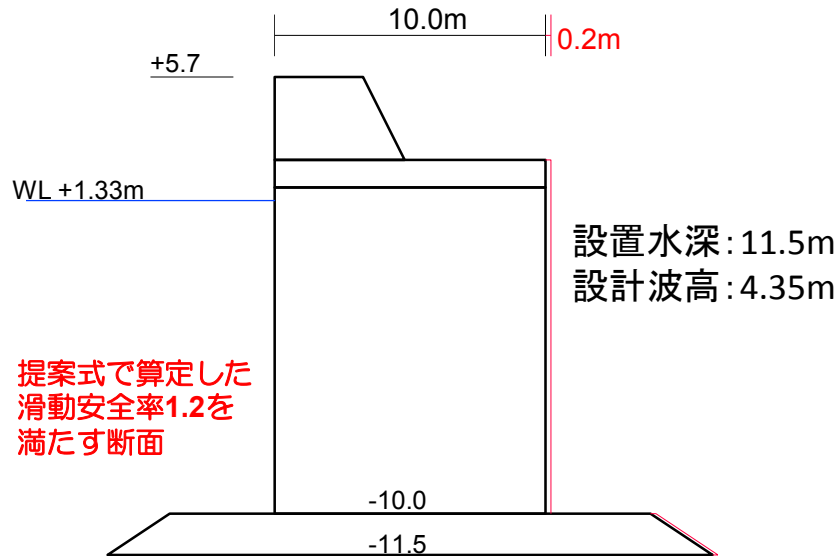
図 3.2.2 解析例① (重複波域)



築造時設計条件			
換算沖波波高(Ho')	5.40m	Ho'/Lo	0.018
設計波高(H)	5.30 m	h/Ho'	3.87
周期(T)	13.7 秒	d/H	2.40 (dは根固方塊考慮)
設計潮位	+2.90 m	海底勾配	1/50
設置水深(h)	18.0 m		
堤体水深(d)	-12.0m		
天端高(ht)	+8.2m		

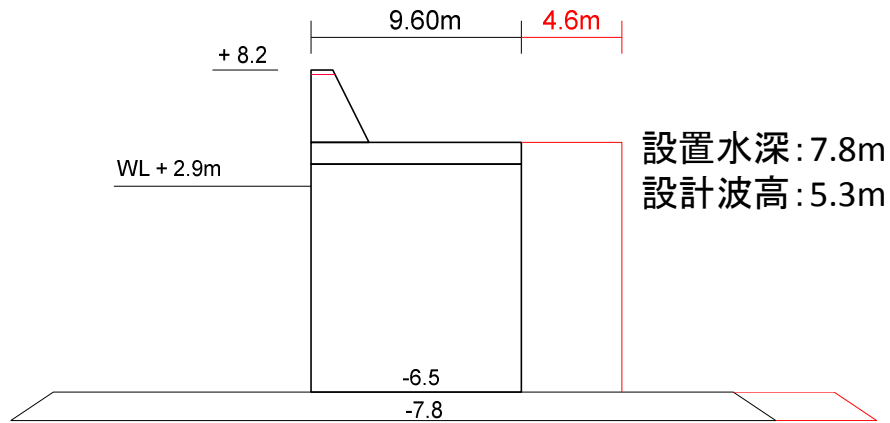
	現行設計法	提案法	提案式滑動安全率 1.2を満足する断面
有義波高 H1/3(m)	5.30	5.24	堤体幅5.6m増加
水平波力(kN/m)	1100(1.00)	1621(1.47)	
滑動安全率	1.32	0.84	

図 3.2.3 解析例② (重複波域)



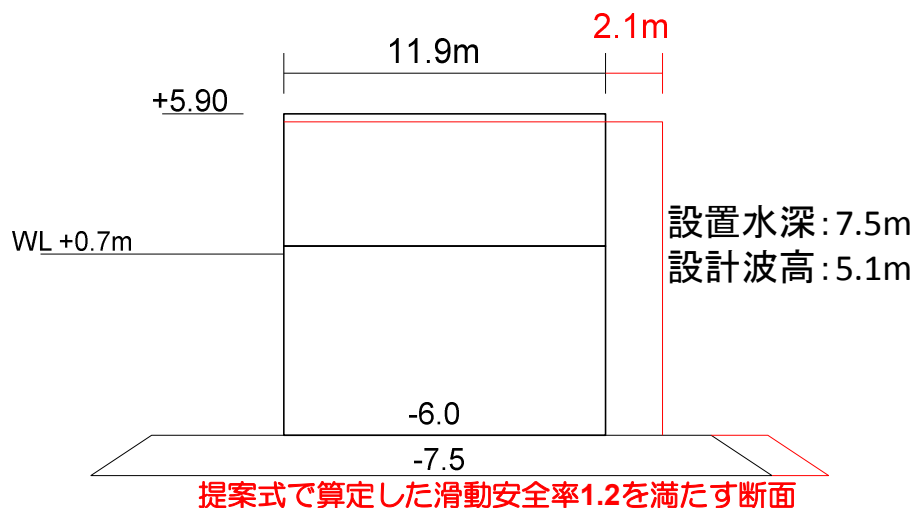
築造時設計条件			
換算沖波波高(Ho')	4.26m	Ho'/Lo	0.019
設計波高(H)	4.35 m	h/Ho'	3.01
周期(T)	12.0 秒	d/H	2.47 (dは根固方塊考慮)
設計潮位	+1.33 m	海底勾配	1/50
設置水深(h)	-11.5 m		
堤体水深(d)	-10.0m		
天端高(ht)	+5.7m		
	現行設計法	提案法	提案式滑動安全率 1.2を満足する断面
有義波高 H1/3(m)	4.35	4.30	堤体幅0.2m増加
水平波力(kN/m)	707(1.00)	780(1.10)	
滑動安全率	1.35	1.19	

図 3.2.4 解析例③ (重複波域)



築造時設計条件			
換算沖波波高(Ho')	4.53m	Ho'/Lo	0.016
設計波高(H)	5.3 m	h/Ho'	2.36
周期(T)	13.3 秒	d/H	1.21 (dは根固方塊考慮)
設計潮位	+2.9 m	海底勾配	1/50
設置水深(h)	-7.8 m		
堤体水深(d)	-6.5m		
天端高(ht)	+8.2m		
	現行設計法	提案法	提案式滑動安全率 1.2を満足する断面
有義波高 H1/3(m)	5.30	5.06	堤体幅4.6.m増加
Hmax(m)	-	8.12	9.6m->14.2m
補正係数 λ_1	-	1.00	天端高0.20m低下
水平波力(kN/m)	590(1.00)	899(1.52)	
滑動安全率	1.23	0.77	

図 3.2.5 解析例④ (碎波域)



築造時設計条件			
換算沖波波高(Ho')	4.30m	Ho'/Lo	0.019
設計波高(H)	5.1 m	h/Ho'	1.91
周期(T)	12.1 秒	d/H	1.02 (dは根固方塊考慮)
設計潮位	+0.7 m	海底勾配	1/30
設置水深(h)	-7.5 m		
堤体水深(d)	-6.0m		
天端高(ht)	+5.9m		
	現行設計法	提案法	提案式滑動安全率1.2を満足する断面
有義波高 H1/3(m)	5.10	4.80	堤体幅2.1m増加
Hmax(m)	-	7.42	天端高0.3m低下
補正係数 λ_1	-	1.04	
水平波力(kN/m)	912(1.00)	1039(1.14)	
滑動安全率	1.21	1.04	

図 3.2.6 解析例⑤ (碎波域)

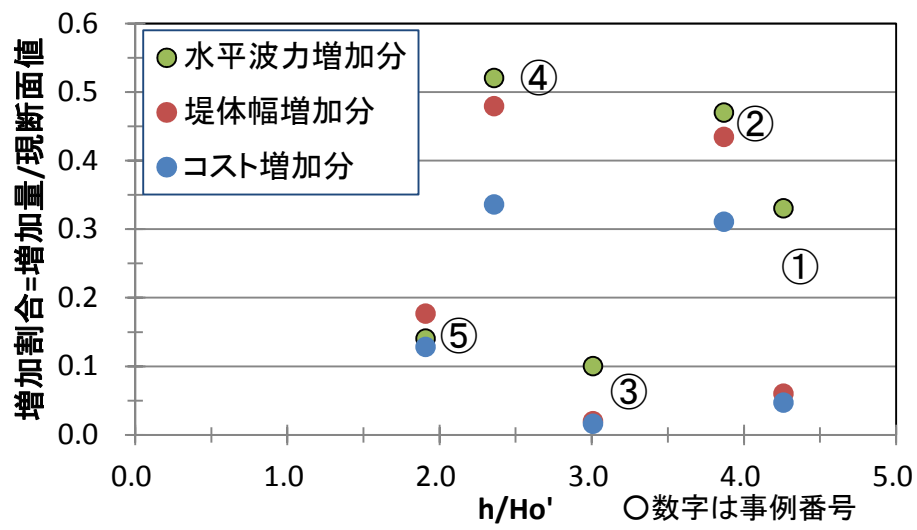


図 3.2.7 事例の断面増加率とコスト増加率

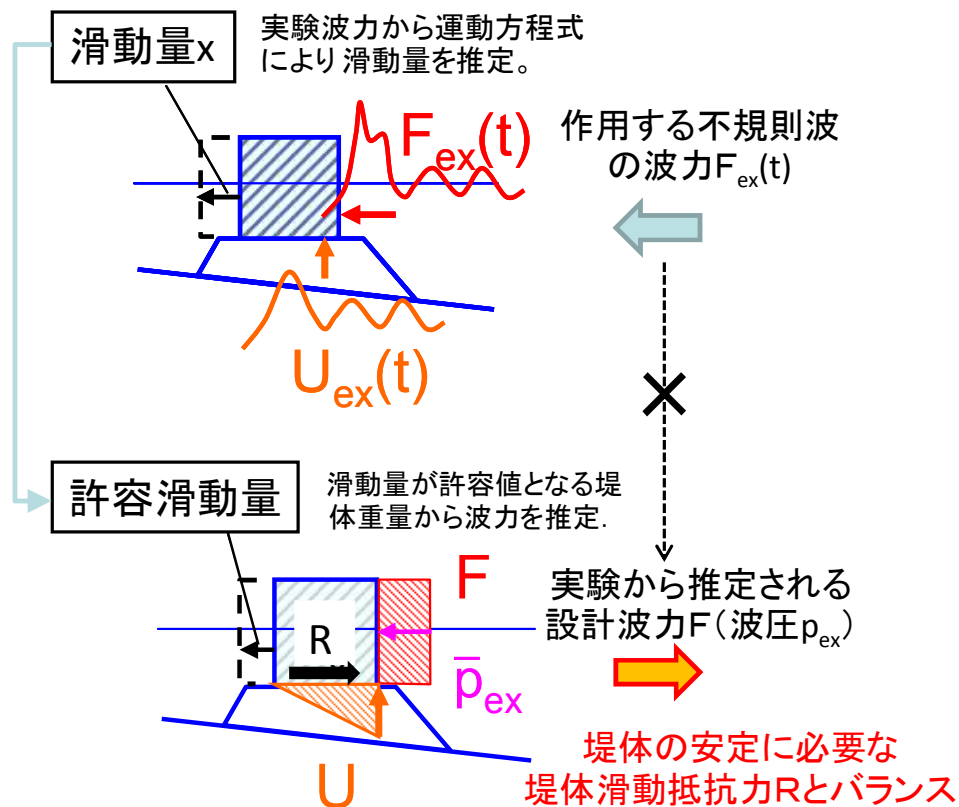
(参考資料) 実験から推定される滑動安定換算波力

○水理実験による設計波圧の検討

- ・衝撃砕波圧の発生や波群の違いにより、波圧はバラツキが大きく、定式化は困難。
 - ・衝撃砕波圧の作用時間は短く、防波堤の滑動にどの程度寄与するか評価が必要。
- ⇒防波堤の安定性を評価するため、滑動量を運動方程式により推定⁹⁾¹⁰⁾(後述※参照)。
滑動量が許容値以下となる波圧レベルを、滑動安定性から見た波力として求め、各波圧式で算定した波力と比較。

【検討方法】

- ・計測した水平波力、揚力の時系列を作用させて計算した滑動量が許容滑動量となる堤体サイズから安定に必要な堤体滑動抵抗力を評価。
- ・滑動安定から見た波力は上記の滑動抵抗力とバランスするものとして推定。
- ・許容滑動量は設計波に対する許容値が 10cm (港湾の通常施設の 50 年確率波に対する許容値を準用¹¹⁾) として、実験スケール (縮尺 1/50) に換算。
- ・基礎マウンドとの静止摩擦係数 $\mu = 0.6$ と設定 (堤体の引張試験により、静止摩擦係数が約 0.6 であることを確認)。



参考図 1 滑動安定換算波力の算出方法

※滑動量の推定に用いた運動方程式⁹⁾

滑動時の壁体の運動方程式は、次式のように表される。

$$M\ddot{x} = F - R - F_R$$

$$R = \mu_d(W_0 - U)$$

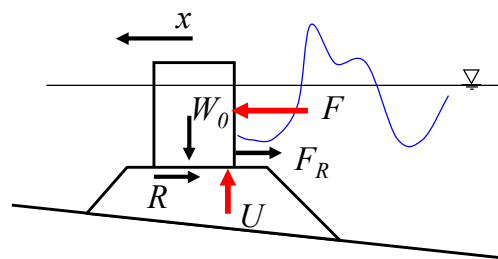
$$W_0 = gM - V_B$$

ここに、 M ：壁体の質量、 x ：滑動変位（ \dot{x} , \ddot{x} は時間による一階微分，二階微分）、 F ：壁体に働く水平波力、 R ：壁体とマウンド間の摩擦抵抗力、 F_R ：滑動時の壁体に働く流体抵抗力、 μ_d ：壁体とマウンド間の動摩擦係数、 W_0 ：壁体の静水中重量、 U ：壁体に働く鉛直波力（揚圧力）、 g ：重力加速度、 V_B ：壁体に働く浮力

滑動開始は、次式のように滑動合成波力が摩擦抵抗力に等しくなったときである。

$$F + \mu_s U = \mu_s W_0$$

ここに、 μ_s ：静止摩擦係数



参考図 2 滑動時に働く力

非定常運動の場合の流体抵抗力 $F_R(t)$ は次式で表される¹⁰⁾。

$$F_R(t) = \int_0^t R(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau + M_A\ddot{x}(t)$$

$$M_A = 1.0855\rho h'^2$$

ここに、 t ：滑動開始後の時間、 h' ：壁体の没水深、 ρ ：流体の密度

右辺第 1 項は速度に比例する流体抵抗力（造波減衰力）、第 2 項は加速度に比例する流体抵抗力（付加質量力）に相当している。今回の検討では、第 1 項の造波減衰力は考慮せず、第 2 項の付加質量力のみを考慮した。

また、動摩擦係数は静止摩擦係数と同じ 0.6 と設定した。

VII. 摘要

1. まとめ

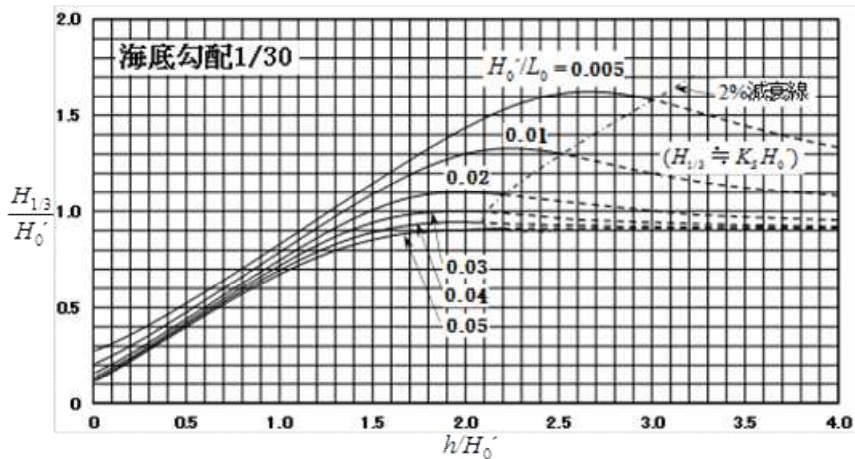
混成堤の直立壁に作用する波力について、実験波力と比較した結果、現行の算定波力は浅海域における防波堤の作用波力を過小評価することが確認された。また、合田式の補正係数に対して浅海域での修正を加えることにより、砕波帯内を含む幅広い水深帯において合理的な波力算定が可能となることを示した。

設計波圧、設計波高の評価方法について、以下のように取りまとめを行った。

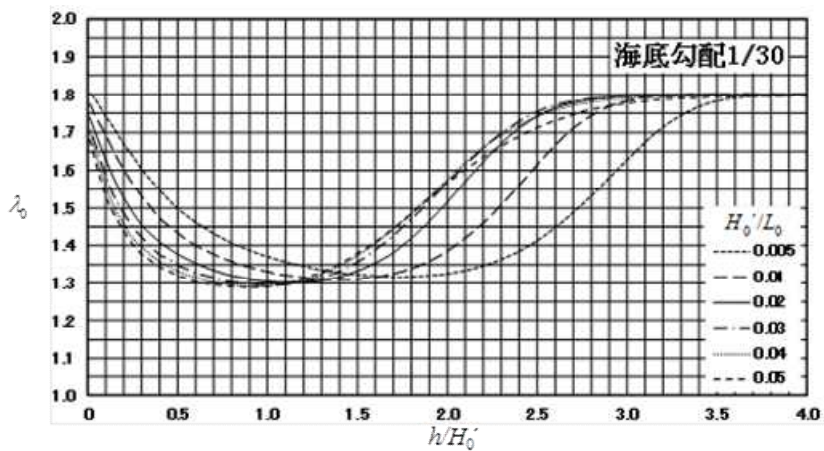
(1) 波高算定の手順

- ①合田の不規則波による波高変化図により有義波高 $H_{1/3}$ を算出 (図VII.1)
 - ②補正係数 λ_0 の算定図により、波圧の計算に用いる波高 ($\lambda_0 H_{1/3}$) を算出 (図VII.2)
- ※波圧の計算には最高波高相当波を使用する。

なお、砕波の影響を受ける領域 (2%減衰線より岸側の領域) では、直立壁前面から 5 波高沖までの区間の $\lambda_0 H_{1/3}$ の最大値を用いることとする。



図VII.1 水深による波高変化 (有義波高 $H_{1/3}$)



図VII.2 補正係数 λ_0 の算定図

h : 直立壁の前面における水深(m)

H_0' : 換算沖波波高(m)

(2) 波圧算定の手順

合田式を基本とする。

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g \lambda_0 H$$

p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m²)

ρ_0 : 海水の密度 (通常は、1.030t/m³)

g : 重力加速度 (9.81m/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 (°)

λ_0 : 波高の補正係数

λ_1 及び λ_2 : 波圧の補正係数

H : 設計波高 (壁体前面位置における進行波としての有義波高) (m)

波圧の補正係数については、下記の値を用いることができる。

- ・ 消波工無し

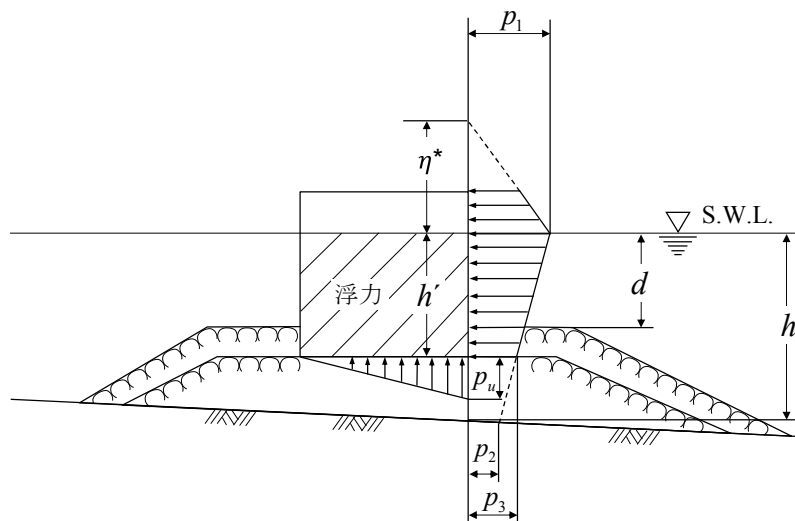
$$\lambda_1 = \begin{cases} 0.4(h/H_0') + 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.4(h/H_0') + 1.8 & (1.0 < h/H_0' \leq 2.0) \\ 1.0 & (h/H_0' > 2.0) \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 1.0$$

- ・ 消波工有り

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq h/H_0' \leq 1.0) \\ -0.2(h/H_0') + 1.2 & (1.0 < h/H_0' \leq 2.0) \\ 0.8 & (2.0 < h/H_0' \leq 3.0) \\ 0.08(h/H_0') + 0.56 & (3.0 < h/H_0' \leq 5.5) \\ 1.0 & (h/H_0' > 5.5) \end{cases}$$

$$\lambda_2 = 1.0$$



図Ⅶ.3 壁面に波の山がある場合の波圧分布図

2. 残された課題

(1) 浅水域の補正係数

砕波帯内の浅水域 ($h/H_0' < 2.0$) においては、最大 1.4、汀線で 1.0 の三角形分布型の補正係数を採用したが、浅水域の実験では衝撃的な波圧等の影響により、値のばらつきが見られた。

浅水域の補正係数については、海底勾配や波形勾配、堤体設置条件等を変更した波圧計測や数値解析等により、更に検証することが望ましい。また、浅水域の施工事例や被災事例を集積し検証を継続することが望ましい。

(2) 入射波向の影響

平面実験結果では、合田式による算定波力は安全側ではあるものの、いささか大きい値を示しており、波の入射角の取り扱い方法に課題が残っている。三次元的な波高分布の影響等を考慮し、波向の影響を検証することが望まれる。

VIII. 引用文献

- 1) 水産庁監修、2003：漁港・漁場の施設の設計の手引(2003年版)、社団法人全国漁港漁場協会
- 2) 合田良実、1973：防波堤の設計波圧に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol.12、No.3、pp.31-69.
- 3) 谷本勝利・本浩司・石塚修次・合田良実、1976：防波堤の設計波力算定式についての検討、第23回海岸工学講演会論文集、pp.11-16.
- 4) 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会、2007：港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月、社団法人日本港湾協会
- 5) 水産庁監修、1999：漁港の技術指針（1999年版）、社団法人全国漁港協会、p.74.
- 6) 合田良実、1975：浅海域における波浪の砕波変形、港湾技術研究所報告、Vol.14、No.3、pp.59-106.
- 7) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎、1990：消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重、港湾技術研究所報告、Vol.29、No.1、pp.54-75.
- 8) 森平倫生・柿崎秀作・菊谷徹、1967：異形ブロックの波力減殺効果に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol.6、No.4、pp.3-31.
- 9) 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭、1996：混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル、海岸工学論文集、第43巻、pp.846-850.
- 10) 青木伸一・奥部綾子、1995：防波堤直立部の滑動シミュレーション、海岸工学論文集、第42巻、pp.861-865.
- 11) 土木学会・海岸工学委員会・研究現況レビュー小委員会、2001：新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法—性能設計法の確立に向けて—、社団法人土木学会、pp.222-223.