

港湾設計業務シリーズ

二重矢板式防波堤

Ver 2. X. X

商 品 概 説 書

目次

1. 概要	1
1-1. システムの特長	1
1-2. システムの制限事項	2
2. 機能説明	3
2-1. 見かけの震度	3
2-2. 波圧	4
波長の算定	4
合田式	5
黒田/広井式（重複波）	8
黒田/広井式（碎波）	10
2-2. 動水圧	12
2-3. 津波	13
谷本式	14
修正谷本式	15
谷本式（消波ブロック被覆堤）	16
静水圧差による算定式（越流／非越流）	17
水工研提案式	18
2-4. 土圧	19
砂質土	20
粘性土	21
地震時－主働土圧の考え方	22
2-5. 残留水圧	25
2-6. 腐食後の断面性能	26
鋼矢板	26
鋼管矢板	27
溝形鋼	30
2-7. 水平方向地盤反力係数の算定方法	31
2-8. 矢板の計算	32
ラーメン式構造物として設計	32
仮想ばり法	33
たわみ曲線法	33
ロウの方法	33
大堀らの方法	35
中詰め完了時	36
水平外力作用時	37
2-9. 応力照査	40
2-10. 根入れ長の検討	40
フリーアースサポート法	40
たわみ曲線法	41
ロウの方法	41
2-11. 地盤支持力の検討	42
2-12. タイ材の検討	44
2-13. 腹起こしの検討	46
2-14. 水平力支点位置	47
2-15. 作用荷重一覧	49
3. 補足資料	50
3-1. 参考文献	50

— 目 次 —

— 目 次 —

1. 概要

1-1. システムの特長

本システムは、港湾・漁港構造物の中の1つである「二重矢板式防波堤」の設計業務を支援するために開発されたシステムです。データは、入力画面を用いることにより比較的簡単に入力することができます。

計算外力として波圧／動水圧／津波、土圧、上載荷重の考慮ができ、矢板応力度、矢板根入れ長、地盤支持力、タイ材、腹起こしの検討が可能です。

本システムには以下のような特長があります。

- ・ 設計基準は許容応力度法、信頼性設計法に準拠しております。
- ・ 矢板応力度の計算、タイ材、腹起こしの検討では各部材でトライアル計算を行います。
- ・ 矢板の計算はラーメン構造形式に基づいた方法（仮想ばり法、たわみ曲線法、ロウの方法含む）と大堀らの方法が選択できます。
- ・ プログラム内部に鋼矢板データを保持しており、矢板断面が自動選択/任意選択できます。
- ・ 波圧式は、合田式を選択が可能です。また、引き波時の検討も可能です。
- ・ 津波式は、谷本式、修正谷本式、谷本式（消波ブロック被覆堤）、静水圧差による算定式、水工研提案式を選択が可能です。
- ・ 現況の腐食しろ、腐食速度と耐用年数から腐食後の矢板の断面性能を自動計算します。
- ・ 地盤反力係数をN値から計算します。また、直接入力することも可能です。
- ・ 仮想ばり法では複数の仮想海底面が検出された場合に選択が可能です。
- ・ 上部工は断面形状が任意のものを扱えます。
- ・ 地盤支持力の検討を行います。
- ・ 地盤支持力の検討では、その他の外力として任意の荷重を作用させることができます。
- ・ プログラム内部にタイ材・腹起こし材を保持しており、任意選択ができます。
- ・ 印刷イメージを画面に表示し、確認することができます。
- ・ 任意の鋼矢板データ/腹起こし材データを追加・修正することができます。

1-2. システムの制限事項

[データ容量]

検討潮位 最大 4 潮位

検討条件 最大 6 条件 (常時 波の山/谷、地震時 港外/港内 津波 押波/引波)

層データ数 最大 15 層

鋼管矢板データ数 最大 10 データ

上部工座標データ 最大 50 点

その他外力データ数 最大 1

追加矢板データ数 最大 30 データ

追加腹起こし材データ数 最大 30 データ

2. 機能説明

2-1. 見かけの震度

本プログラムでは、見かけの震度の計算方法は荒井・横井の提案式を用いています。

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P356

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P154

荒井・横井の提案式

$$k' = \frac{2(\sum \gamma h + \sum \gamma_i h_j + w) + \gamma_i h}{2\{\sum \gamma h_i + \sum (\gamma_i - 10)h_j + w\} + (\gamma_i - 10)h} \times k$$

ここに

h_i : 残留水位以上の土層の厚さ (m)

h_j : 残留水位以下の土圧を求めようとする層より上の土層の厚さ (m)

h : 残留水位より下の土圧を求めようとする土層の厚さ (m)

γ : 水位面上の土単位体積重量 (kN/m^3)

γ_i : 水で飽和した土の空気中における単位体積重量 (kN/m^3)

w : 単位体積当たりの載荷重 (kN/m^2)

k : 設計震度

k' : 見かけの震度

2-2. 波圧

波長の算定

本システムでは、波長を計算で求めるか、あるいは、直接入力するか選択できるようになっています。計算で波長を求める場合、入力データとして与えられた周期と水深から波長を計算します。

参照：「土木学会，水理公式集 平成11年版」P458

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

ここに

- L : 波長 (m)
 T : 周期 (s)
 h : 水深 (m)
 g : 重力加速度 (m/s^2)

解法

$$L_0 = T\sqrt{gh}$$

$$L_{n+1} = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L_n}$$

$L_{n+1} \approx L_n$ となった時が解となる

波高の算定

港湾基準では、砕波の影響の有無によって波高は次のように算定されます。

(砕波の影響を受けない場合)

波圧式に作用する設計波高 H は次式になります $H=1.8H_{1/3}$

$H_{1/3}$: 直立壁前面水深における進行波としての有義波高

(砕波の影響を受ける場合)

H_{\max} : 不規則波の砕波波形を考慮した波高

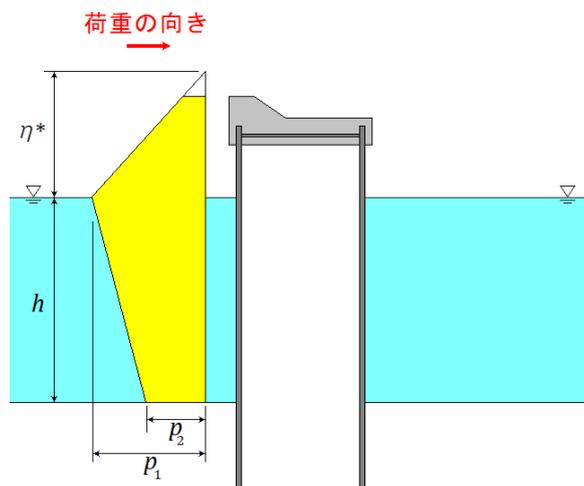
波圧式に作用する設計波高 H は次式になります $H=H_{\max}$

合田式

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」P189

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P84～87

波の山の場合



港湾基準

$$\begin{aligned}\eta^* &= 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 H_D \\ p_1 &= 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta)\rho_0 g H_D \\ p_2 &= \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \\ p_3 &= \alpha_3 p_1 \\ \alpha_1 &= 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \\ \alpha_2 &= \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_D}{d} \right), \frac{2d}{H_D} \right] \\ \alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]\end{aligned}$$

ここに

漁港基準

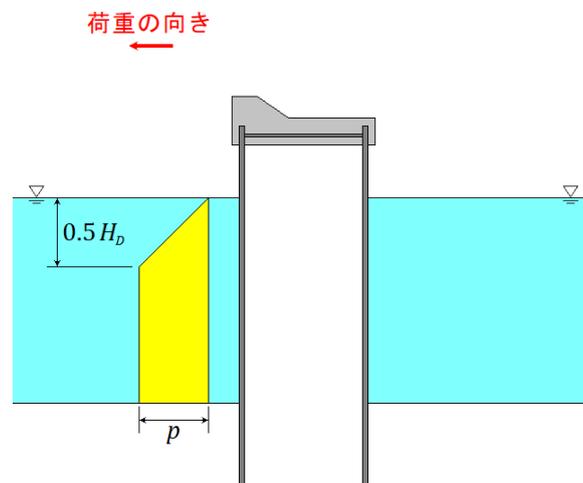
$$\begin{aligned}\eta^* &= 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 \lambda_0 H \\ p_1 &= 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta)\rho_0 g \lambda_0 H \\ p_2 &= \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \\ p_3 &= \alpha_3 p_1 \\ \alpha_1 &= 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \\ \alpha_2 &= \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{\lambda_0 H}{d} \right), \frac{2d}{\lambda_0 H} \right] \\ \alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]\end{aligned}$$

- η^* : 静水面上波圧強度が0となる高さ (m)
- p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m²)
- p_2 : 海底面における波圧強度 (kN/m²)
- p_3 : 直立壁底面における波圧強度 (kN/m²)
- h : 直立壁前面における水深 (m)
- h_b : 直立壁前面から沖側へ有義波高の5倍だけ離れた地点での水深 (m)
- d : 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さい方の水深 (m)
- ρ_0 : 海水の密度
- g : 重力加速度(9.8m/s²)
- H_D, H : 設計計算に用いる波高 (m)
- L : 水深 h における設計計算に用いる波長 (m)
- β : 直立壁法面の垂線と波の主方向から±15° の範囲で最も危険な方向となす角度 (度)
- $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$: 波圧の補正係数

補正係数 λ_1, λ_2 は次式で算定されます

通常	消波被覆
港 $\lambda_1 = 1.0$ 湾 $\lambda_2 = 1.0$	$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0.0 \leq H/h \leq 0.3) \\ 1.2 \times H/h + 1.8 & (0.3 < H/h \leq 0.6) \\ 0.8 & (H/h > 0.6) \end{cases}$
漁 港 $\lambda_1 = \begin{cases} 0.4 \times h/H'_0 + 1.0 & (0.0 \leq h/H'_0 \leq 1.0) \\ -0.4 \times h/H'_0 + 1.8 & (1.0 < h/H'_0 \leq 2.0) \\ 1.0 & (h/H'_0 > 2.0) \end{cases}$ $\lambda_2 = 1.0$	$\lambda_2 = 0.0$ $\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & (0.0 \leq h/H'_0 \leq 1.0) \\ -0.2 \times h/H'_0 + 1.2 & (1.0 < h/H'_0 \leq 2.0) \\ 0.8 & (2.0 < h/H'_0 \leq 3.0) \\ 0.08 \times h/H'_0 + 0.56 & (3.0 < h/H'_0 \leq 5.5) \\ 1.0 & (h/H'_0 > 5.5) \end{cases}$ $\lambda_2 = 0.0$

波の谷の場合



港湾基準

$$p = 0.5\rho_0 g H_D$$

ここに

p : 一様分布における波圧強度 (kN/m^2)

ρ_0 : 海水の密度($=1.03t/m^3$)

g : 重力加速度($=9.81m/s^2$)

H_D, H : 設計計算に用いる波高 (m)

漁港基準

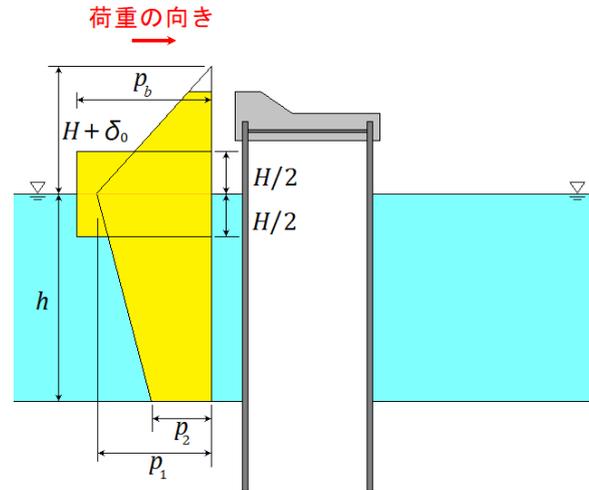
$$p = 0.5\rho_0 g \lambda_0 H$$

黒田/広井式（重複波）

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年6月」P123

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」P60

波の山の場合



港湾基準

静水面の上下 $0 \sim H_0/2$ の範囲

$$p_b = 1.5w_0H_D \cos^2 \beta$$

静水面上 $H_0/2$ 以上及び

静水面下 $H_0/2$ 以下の範囲

$$p_1 = (p_2 + w_0h) \left(\frac{H_D + \delta_0}{h + H_D + \delta_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{w_0H_D}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H_D^2}{L} \coth\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

漁港基準

静水面の上下 $0 \sim H_0/2$ の範囲

$$p_b = 1.5wH$$

静水面上 $H_0/2$ 以上及び

静水面下 $H_0/2$ 以下の範囲

$$p_1 = (p_2 + wh) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{wH}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

ここに

p_b ：砕波による波圧強度 (kN/m^2)

p_1 ：壁面に波の峰がある場合の静水面における波圧強度 (kN/m^2)

p_2 ：壁体下端における波圧強度 (kN/m^2)

w, w_0 ：海水の単位体積重量 (kN/m^3)

β ：直立壁法面の垂線と波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向となす角度

δ_0 ：壁面における波高中分面の静水面上の高さ (m)

H_D ：設計計算に用いる波高 (m)

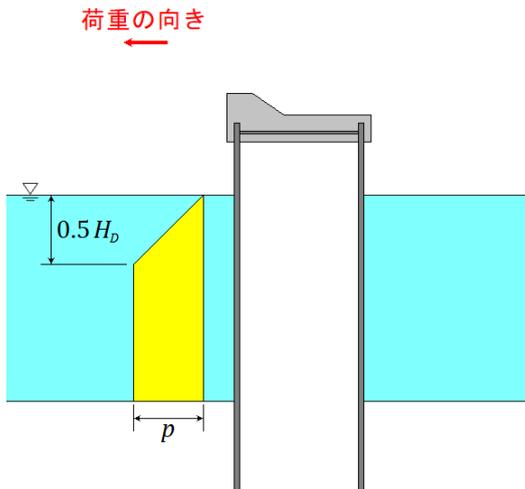
H ：壁体設置位置における進行波としての波高 (m)

h ：壁体前面の水深 (m)

L ：水深 h における波長 (m)

波の谷の場合

港湾基準



$$p = 0.5\rho_0 g H_D$$

ここに

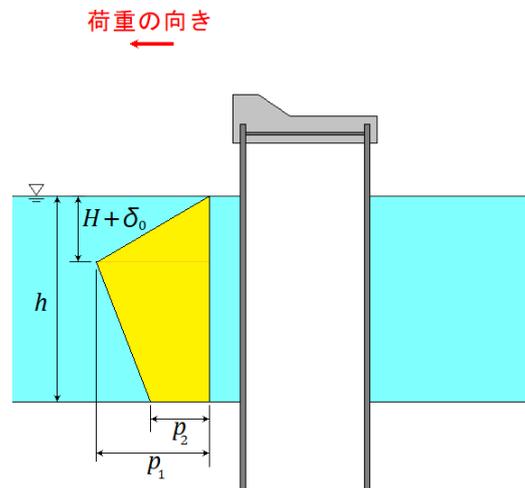
p : 一様分布における波圧強度 (kN/m^2)

ρ_0 : 海水の密度 ($=1.03t/m^3$)

g : 重力加速度 ($=9.81m/s^2$)

H_D : 設計計算に用いる波高 (m)

漁港基準



$$p_1 = (p_2 + wh) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right)$$

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

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

ここに

p_1 : 壁面に波の峰がある場合の静水面における波圧強度 (kN/m^2)

p_2 : 壁体下端における波圧強度 (kN/m^2)

δ_0 : 壁面における波高中分面の静水面上の高さ (m)

w : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)

H : 壁体設置位置における進行波としての波高 (m)

h : 壁体前面の水深 (m)

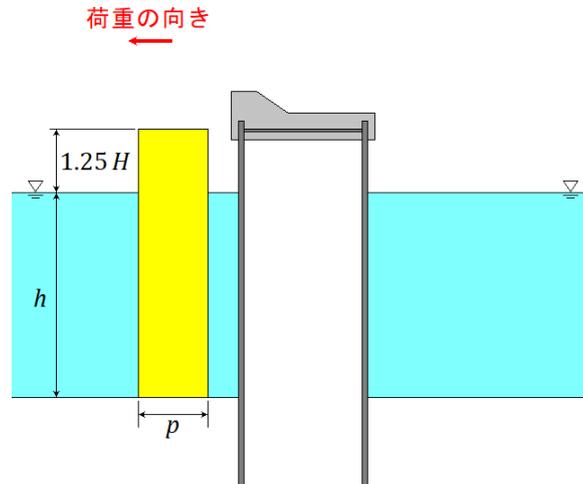
L : 水深 h における波長 (m)

黒田/広井式（碎波）

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年6月」P123

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」P60

波の山の場合



港湾基準

$$p_b = 1.5w_0H_D \cos^2 \beta$$

漁港基準

$$p_b = \begin{cases} 1.5wH \cos^2 \beta & (\beta < 45^\circ) \\ 0.75wH & (\beta \geq 45^\circ) \end{cases}$$

ここに

p_b ：碎波による波圧強度 (kN/m²)

w, w_0 ：海水の単位体積重量 (kN/m³)

H_D ：設計計算に用いる波高 (m)

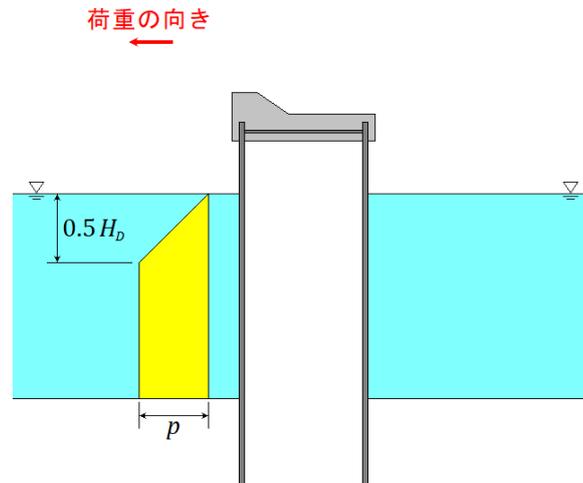
H ：壁体設置位置における進行波としての波高 (m)

β ：直立壁法面の垂線と波の主方向から±15° の範囲で最も危険な方向となす角度

波の谷の場合

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年6月」P123

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」P60



港湾基準

$$p = 0.5\rho_0 g H_D$$

ここに

p ：一様分布における波圧強度 (kN/m^2)

ρ_0 ：海水の密度($=1.03t/m^3$)

g ：重力加速度($=9.81m/s^2$)

w ：海水の単位体積重量 (kN/m^3)

H_D, H ：設計計算に用いる波高 (m)

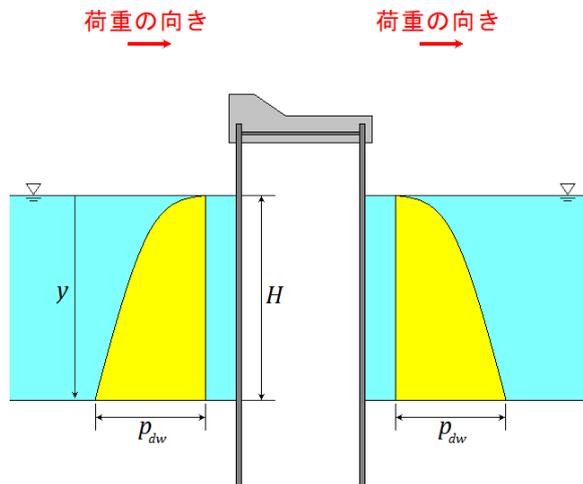
漁港基準

$$p = 0.5wH$$

2-2. 動水圧

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」P380

本システムでは、地震時に作用する外力として動水圧を考慮しています。
算定式は次式を使用しています。



動水圧

$$p_{dw} = \pm \frac{7}{8} k \gamma_w \sqrt{H} y$$

動水圧合力及び作用点位置

$$P_{dw} = \frac{7}{12} k \gamma_w \sqrt{H} y^2$$

$$h_{dw} = \frac{2}{5} H$$

※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります
ここに

p_{dw} : 動水圧 (kN/m^2)

k : 設計震度

γ_w : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)

y : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

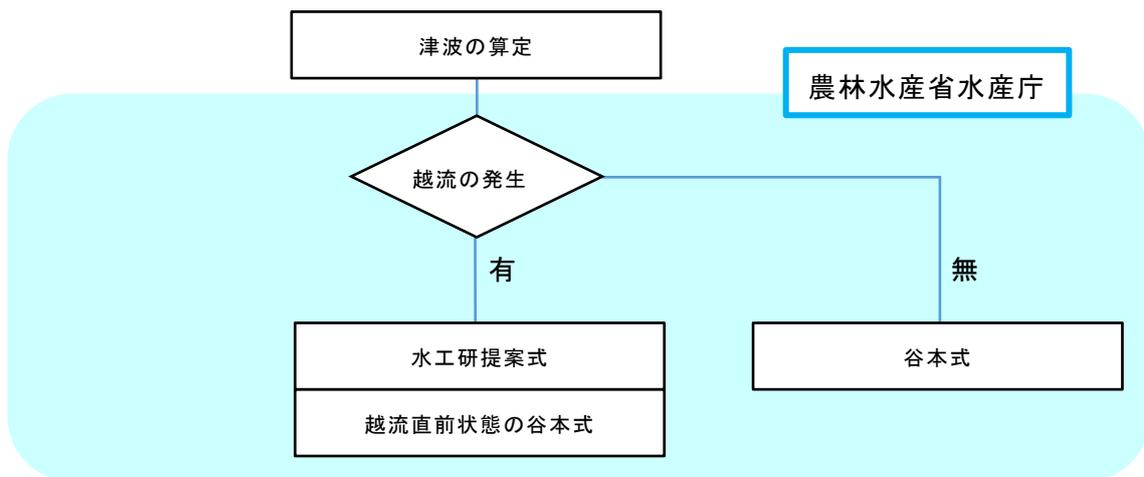
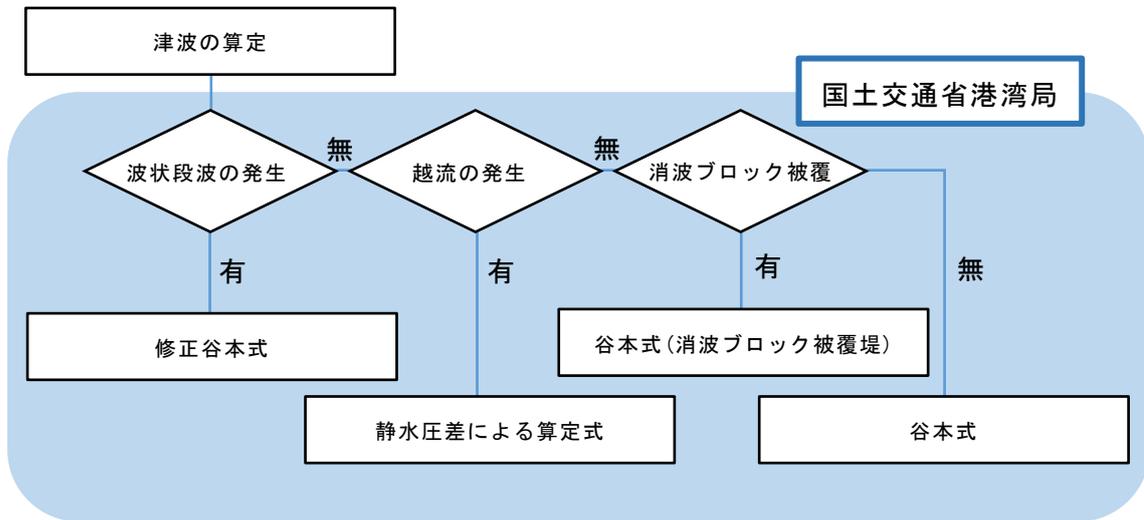
H : 直立壁前面における水深 (m)

P_{dw} : 動水圧の合力 (kN/m)

h_{dw} : 動水圧を求める点から動水圧合力の作用点までの距離 (m)

2-3. 津波

津波の手法は次のように分類されます。



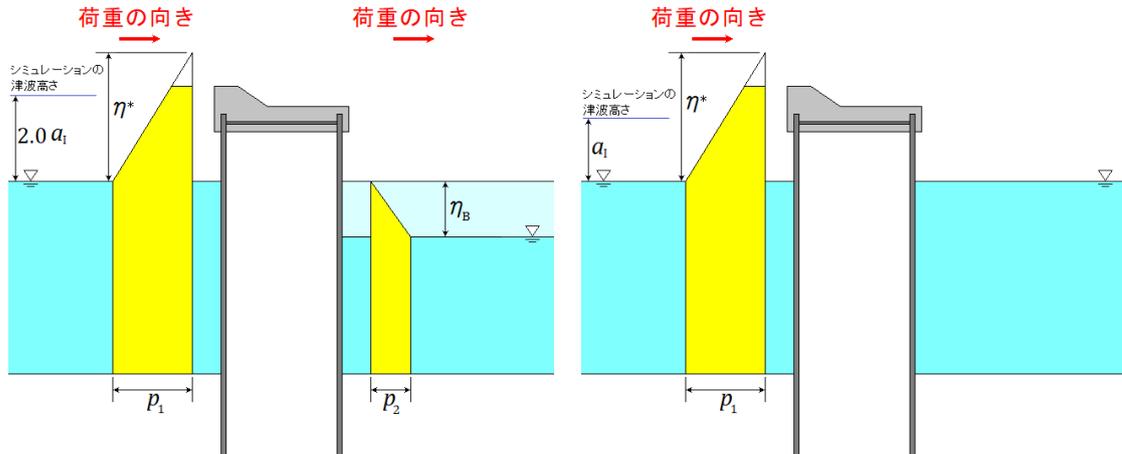
谷本式

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」P236～238

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P105～106

背面水位が下がる場合

背面水位が下がらない場合 ($\eta_B = 0$)



※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります

$$\eta^* = 3.0a_1$$

$$p_1 = 2.2\rho_0 g a_1$$

$$p_2 = \rho_0 g \eta_B$$

ここに

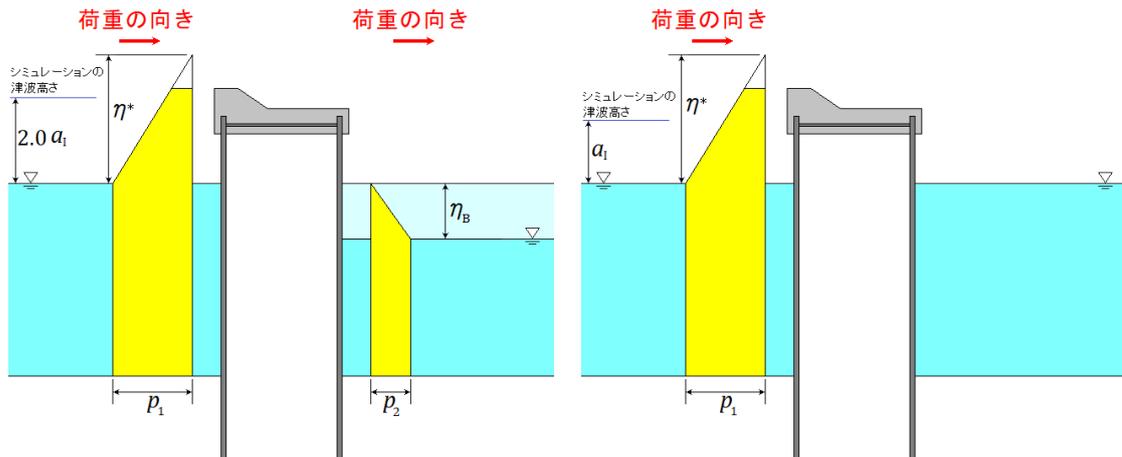
p_1 : 静水面における波圧強度	(kN/m^2)
p_2 : 背面における波圧	(kN/m^2)
η^* : 静水面上の波圧作用高さ	(m)
η_B : 背面で静水面から下がった高さ	(m)
a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅)	(m)
$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量	(kN/m^3)

修正谷本式

参照：「国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドライン 平成27年 一部改訂」P24～25

背面水位が下がる場合

背面水位が下がらない場合 ($\eta_B = 0$)



※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります

$$\begin{aligned}\eta^* &= 3.0a_l \\ p_1 &= 3.0\rho_0ga_l \\ p_2 &= \rho_0g\eta_B\end{aligned}$$

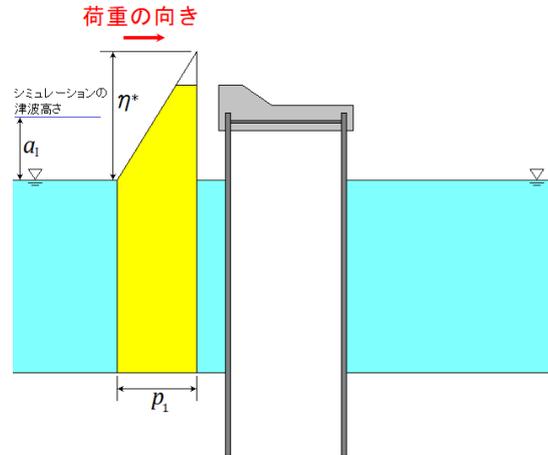
ここに

p_1 : 静水面における波圧強度	(kN/m^2)
p_2 : 背面における波圧	(kN/m^2)
η^* : 静水面上の波圧作用高さ	(m)
η_B : 背面で静水面から下がった高さ	(m)
a_l : 入射津波の静水面上の高さ (振幅)	(m)
ρ_0g : 海水の単位体積重量	(kN/m^3)

谷本式（消波ブロック被覆堤）

参照：「国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドラインー【参考資料Ⅲ】津波に対する防波堤の安定性及び粘り強い構造の検討に係る現状の知見 平成27年 一部改訂」PⅢ-43

参照：「土木学会論文集B2(海岸工学)，ソリトン分裂津波に対する消波ブロック被覆堤の津波波力算定法に関する研究」Vol. 71, No. 2, 2015



※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります

$$\eta^* = 3.0\alpha_1$$

$$p_1 = \alpha\lambda\rho_0 g a_1$$

ここに

p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m²)

η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)

a_1 : 入射津波の静水面上の高さ(振幅) (m)

α : 静水面の波圧に関する係数

λ : 消波工による波圧低減率

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

α, λ は次式により算出される

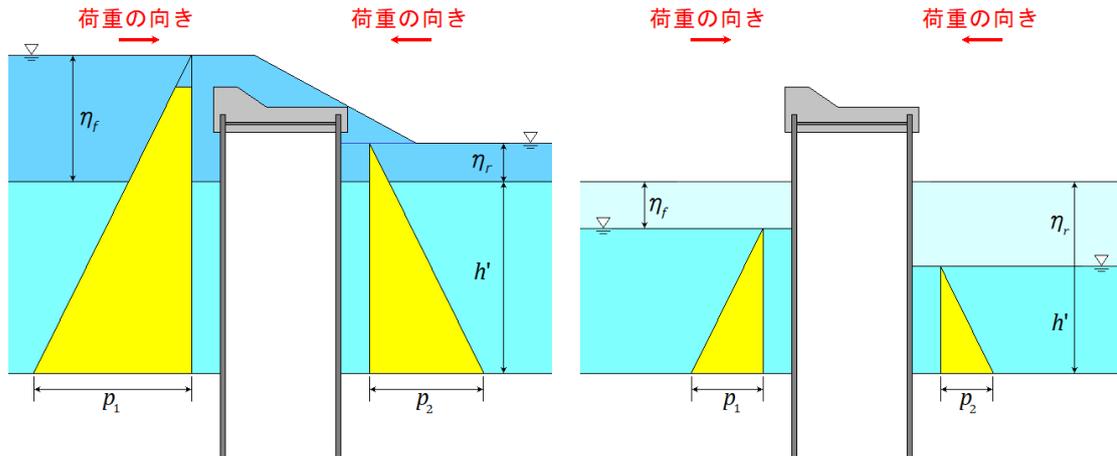
$$\alpha = \begin{cases} 2.2 & (a_1/h < 0.15) \\ 1.0 + 8.0 \frac{a_1}{h} & (0.15 \leq a_1/h < 0.25) \\ 3.0 & (0.25 \leq a_1/h) \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} \left(\frac{h_c}{H_D} = 0.6 \right) \begin{cases} 1.0 & (a_1/h < 0.15) \\ 1.27 - 1.8 \frac{a_1}{h} & (0.15 \leq a_1/h) \end{cases} \\ \left(\frac{h_c}{H_D} = 1.0 \right) \begin{cases} 1.0 & (a_1/h < 0.20) \\ 1.27 - 1.8 \frac{a_1}{h} & (0.20 \leq a_1/h) \end{cases} \end{cases}$$

静水圧差による算定式（越流／非越流）

参照：「国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドライン 平成27年 一部改訂」P26

越流

非越流



$$p_1 = \alpha_f \cdot \rho_0 g (h + \eta_f)$$

$$p_2 = \alpha_r \cdot \rho_0 g (h + \eta_r)$$

$$p_1 = \alpha_f \cdot \rho_0 g (h - \eta_f)$$

$$p_2 = \alpha_r \cdot \rho_0 g (h - \eta_r)$$

※左側（港外側）より荷重が作用する場合の荷重分布となります

p_1 : 前面－底面における波圧強度 (kN/m²)

p_2 : 背面－底面における波圧強度 (kN/m²)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

η_f : { 直立壁前面の静水面からの津波高さ (越流) (m)
直立壁前面の静水面から下がった水位 (非越流) (m)

η_r : { 直立壁背面の静水面からの津波高さ (越流) (m)
直立壁背面の静水面から下がった水位 (非越流) (m)

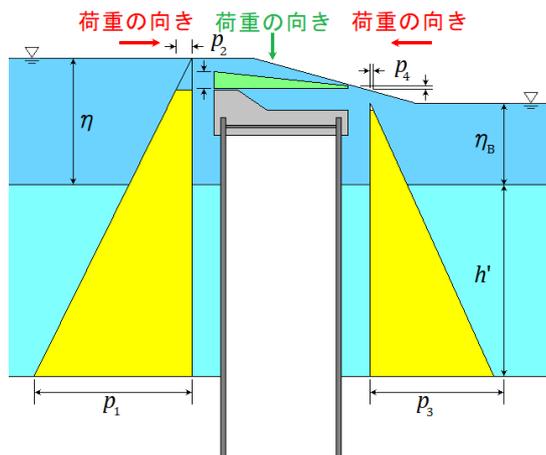
α_f : 直立壁港外側の静水補正係数

α_r : 直立壁港内側の静水補正係数

h' : 水深 (m)

水工研提案式

参照：「農林水産省水産庁，平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方 平成26年 最終改正」P64～65



※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります

$$p_1 = \rho_0 g (h' + \eta) a_l$$

$$p_2 = \begin{cases} \rho_0 g \frac{(h' + \eta - H)}{(h' + \eta)} a_l & (h' + \eta - H > 0) \\ 0 & (h' + \eta - H \leq 0) \end{cases}$$

$$p_3 = \rho_0 g (h' + \eta_B) a_{lB}$$

$$p_4 = \begin{cases} \rho_0 g \frac{(h' + \eta_B - H)}{(h' + \eta_B)} a_{lB} & (h' + \eta_B - H > 0) \\ 0 & (h' + \eta_B - H \leq 0) \end{cases}$$

ここに

- p_1 : 堤体前面下端における波圧強度 (kN/m^2)
- p_2 : 堤体前面上端における波圧強度 (kN/m^2)
- p_3 : 堤体背面下端における波圧強度 (kN/m^2)
- p_4 : 堤体背面上端における波圧強度 (kN/m^2)
- η : 静水面上の前面の津波高さ (m)
- η_B : 静水面上の背面の津波高さ (m)
- h' : 水深 (m)
- H : 堤体上端～下端までの高さ (m)
- a_l : 堤体前面での係数
- a_{lB} : 堤体背面での係数

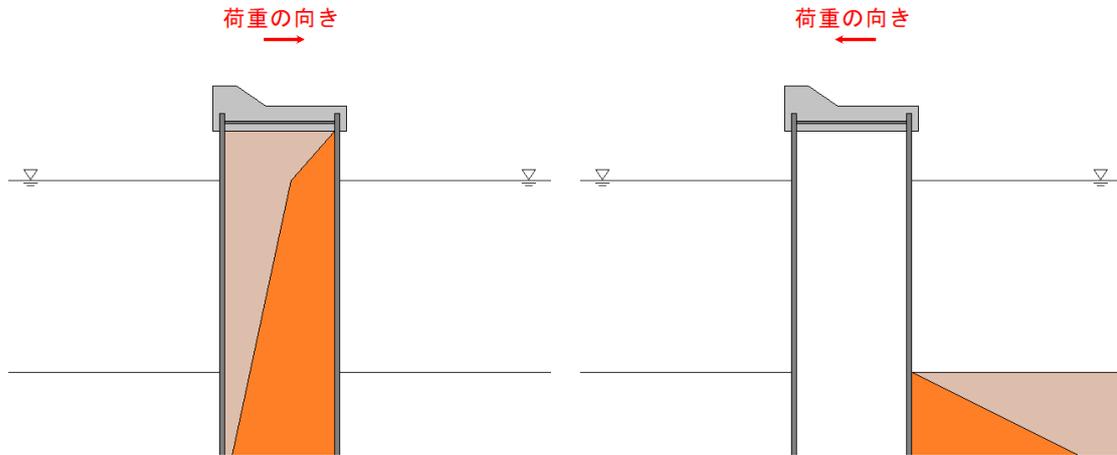
2-4. 土圧

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」P372～377

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P146～154

主働土圧

受働土圧



※左側(港外側)より荷重が作用する場合の荷重分布となります

砂質土

主働土圧強度 p_a (kN/m^2)

$$p_a = K_a \cos \delta \left[\Sigma \gamma h + \frac{w \cos \varphi}{\cos(\varphi - \beta)} \right]$$

主働土圧係数 K_a (kN/m^2)

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta + \varphi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{常時})$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \varphi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \varphi + \theta) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{地震時})$$

受働土圧強度 p_p (kN/m^2)

$$p_p = K_p \cos \delta \left[\Sigma \gamma h + \frac{w \cos \varphi}{\cos(\varphi - \beta)} \right]$$

受働土圧係数 K_p (kN/m^2)

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \varphi)}{\cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \beta)}{\cos(\delta + \varphi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{常時})$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \varphi - \theta)}{\cos \theta \cos^2 \varphi \cos(\delta + \varphi - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \beta - \theta)}{\cos(\delta + \varphi - \theta) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (\text{地震時})$$

ここに

- γ : 土の単位体積重量 (kN/m^3)
 h : 土層厚 (m)
 ϕ : 土の内部摩擦角 (度)
 φ : 壁面が鉛直となす角度 (度)
 β : 地表面が水平となす角度 (度)
 δ : 壁面摩擦角 (度)
 θ : 地震合成角 (度)
 k : 震度 ($\theta = \tan^{-1} k$ または $\theta = \tan^{-1} k'$)
 k' : みかけの震度

粘性土

主働土圧強度 p_a (kN/m^2)

$$(式 - 1) \quad p_a = \Sigma\gamma h + w - 2c \quad (\text{常時})$$

$$(式 - 2) \quad p_a = K_c(\Sigma\gamma h + w)$$

次に示される(式-1)あるいは(式-2)のうち、構造物に危険となる土圧分布を用いるか(漁港基準)あるいは、(式-1)のみを用いるか(港湾基準)の選択がプログラムで可能です。また、(式-2)のみを用いることも可能です。(式-1)を使用した場合に生じる負の土圧領域は考慮せず、正の土圧が発生する深さまでは土圧を0とします。

$$(式 - 3) \quad p_a = \frac{(\Sigma\gamma h + w)\sin(\zeta + \theta)}{\cos\theta\sin\zeta} - \frac{c}{\cos\theta\sin\zeta}$$

$$(式 - 4) \quad p_a = K_c(\Sigma\gamma h + w) \quad (\text{地震時})$$

$$\zeta = \tan^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{\Sigma\gamma h + 2w}{2c} \right) \tan\theta}$$

(式-3)あるいは(式-4)のうち、構造物に危険となる土圧分布を用いるのか、あるいは、(式-3)のみを用いるのかの選択がプログラムで可能です。また、(式-4)のみ用いることも可能です。

(式-3、式-4)の比較を行って土圧を計算する場合で、(式-3)の ζ 算定式の $\sqrt{\quad}$ 内が負になる場合、次の4項目の選択が可能です。

1. 崩壊角規定値

2. 岡部式

$$p_a = \frac{(\Sigma\gamma h + w)\sin(\alpha + \theta)}{\cos\theta\sin\alpha} - \frac{c}{\cos\theta\sin\alpha}$$
$$\alpha = 90^\circ - \mu \quad , \quad \mu = \tan^{-1} \frac{\bar{a}}{\sqrt{\bar{b}^2 - \bar{a}^2}}$$
$$\bar{a} = \sin\theta \quad , \quad \bar{b} = \sin\theta + \frac{2c \cdot \cos\theta}{\Sigma\gamma h + w}$$

3. 常時土圧式

4. $\Sigma\gamma h + w$

受働土圧強度 p_p (kN/m^2)

$$p_p = \Sigma\gamma h + w - 2c$$

ここに

γ :土の単位体積重量	(kN/m^3)
h :土層厚	(m)
c :粘着力	(kN/m^2)
K_c :圧密平衡係数(=0.5)	
w :地表面単位面積当たり載荷重	(kN/m^2)
α, ζ :崩壊面が水平となす角	(度)
θ :地震合成角	(度)
k :震度($\theta = \tan^{-1} k$ または $\theta = \tan^{-1} k'$)	
k' :見かけの震度	

地震時一主働土圧の考え方

本プログラムでは、地震時粘性土主働土圧の計算方法を以下の2つの方法の中から選択します。計算方法は次の文献の解釈によります。設計事例集等に使用されている方法はBの方法です。

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月」P377

(3) 海底面下における粘性土の地震時土圧を算出する場合、海底面においては見掛けの震度を用いて土圧を求めるが、海底面下10m以下においては震度を0として土圧を求めることができる。ただし、海底面下10mにおける土圧が海底面より小さい場合には、海底面における値を用いるべきである。

A. 上・下共に見かけの震度を用いて土圧を計算する

B. 海底面～海底面-10m間の土圧強度を直線補間(土層上・下限値共に補間で算出)

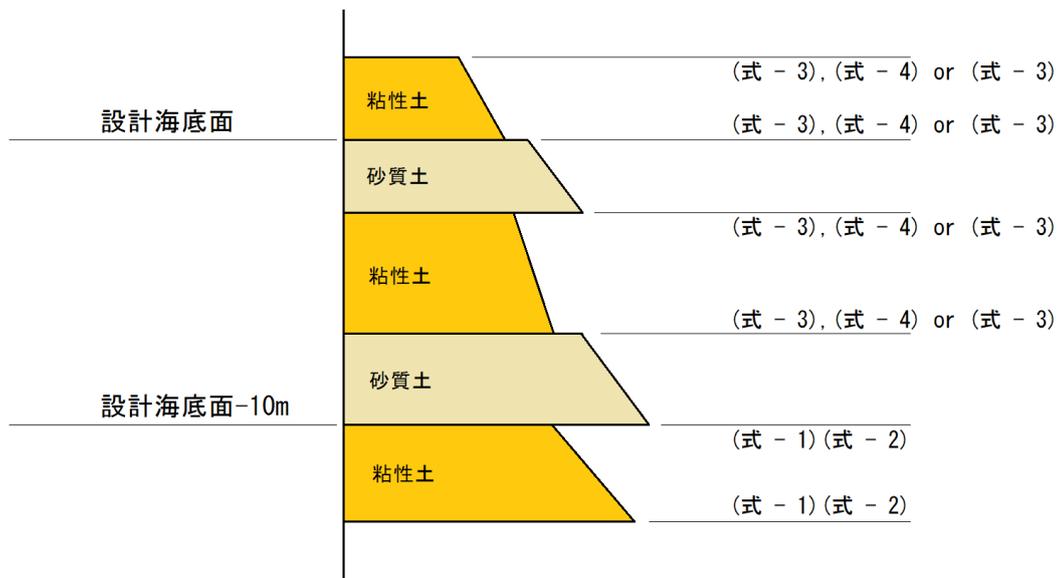
※上・下共に見かけの震度を用いる場合、海底面-10m以下の粘土層についてのみ、見かけの震度を0として計算します。

(Aの方法を選択した場合)

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合でも、全て見かけの震度を考慮し、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算します。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算します。

尚、層の下限值が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とするかどうかの選択が可能です。



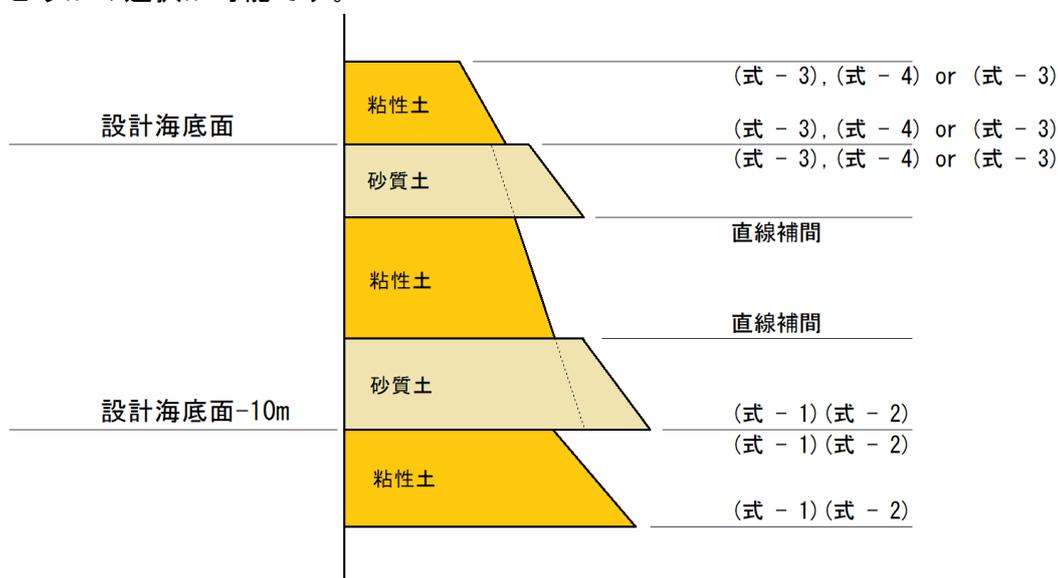
(Bの方法を選択した場合)

海底面～海底面－10m以内に粘土層がある場合に、その粘性土が一様にあるものとし、層の上限位置を海底面位置と仮定して、見かけの震度を考慮し、計算式の選択により(式-3、式-4)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-3)・(式-4)のみで計算し、実際の層の上限位置で直線補完を行います。

層の下限の土圧は、その土層が海底面－10m位置までであると仮定し、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算し、実際の層の下限位置で直線補完を行います。尚、層の上限・下限の土圧強度が海底面位置の土圧強度よりも小さくなった場合、海底面位置の土圧強度を採用するかどうかの選択が可能です。

海底面－10m以深の粘土層については、見かけの震度を0として、計算式の選択により(式-1、式-2)の構造物に危険側となる値があるいは、(式-1)・(式-2)のみで計算します。

尚、層の下限値が層の上限値よりも小さくなる場合は、層の上限値を層の下限の土圧とすることかのかの選択が可能です。



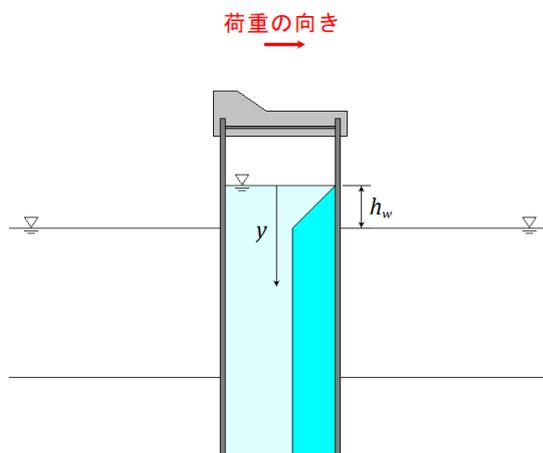
※ 粘性土が設計海底面を挟む場合、使用する見かけの震度は、実際の土層による見かけの震度です。

2-5. 残留水圧

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P358

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P155～156

中詰土内の水位が潮位よりも高い場合、以下に示す残留水圧が作用するものとします。



$$p_w = \gamma_w y \quad (0 \leq y < h_w)$$

$$p_w = \gamma_w h_w \quad (h_w \leq y)$$

ここに

p_w : 残留水圧 (kN/m^2)

h_w : 残留水位差 (中詰水位 > 潮位) (m)

y : 中詰土内の水面から残留水位を求める点までの深さ (m)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

2-6. 腐食後の断面性能

鋼矢板

腐食後の断面性能の計算方法として以下の2つの内のどちらかが選択できます。

- a. 腐食後の断面係数を「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」から直接引用し、その値に鋼矢板の高さを乗じて断面二次モーメントを求めます。
- b. 「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」から残存断面性能率を引用し、その値をそれぞれ腐食前の断面係数、断面二次モーメントに乗じて腐食後の断面諸値を求めます。

以下に a を指定した場合の詳細について記述します。

断面係数

システム内部に「鋼矢板の腐食後の断面係数のグラフ」を保持しており、 $\alpha = t_2/t_1$ から腐食後の断面係数を引用します。

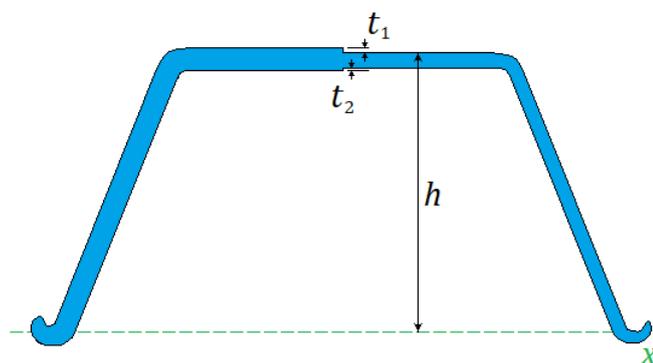
断面二次モーメント

次式により算出します。

$$I = Z \times [h - (t_1 + t_2) \times 0.5]$$

ここに

I : 腐食後の断面二次モーメント	(cm^4/m)
Z : 腐食後の断面係数	(cm^3/m)
h : 鋼矢板の上縁までの高さ	(cm)
t_1 : 鋼矢板の腐食しろ	(cm)
t_2 : 鋼矢板の腐食しろ	(cm)



鋼管矢板

継手有効間隔

直接入力の外、以下の5つのタイプについては継手有効間隔を自動的に算出します。

L-T型(二港湾型)L- 65 × 65 × 8

$$B = 76.0 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 80^2} - \frac{D}{2}$$

L-T型(二港湾型)L- 75 × 75 × 9

$$B = 85.5 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 90^2} - \frac{D}{2}$$

L-T型(二港湾型)L-100 × 75 × 10

$$B = 110 + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 90^2} - \frac{D}{2}$$

P-T型(パイプT型)

$$B = 180.0$$

P-P型(パイプ型)

$$B = 247.8$$

ここに

B : 鋼管矢板の継手有効間隔 (mm)

D : 鋼管矢板の外形 (mm)

図心軸に関する断面二次モーメント

a. 腐食がない場合、あるいは腐食しろ t_1, t_2 が同じ値の場合

$$I_{nx} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

ここに

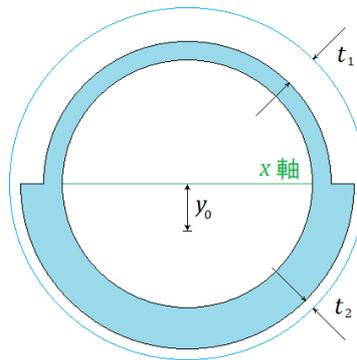
I_{nx} : 図心軸に関する断面二次モーメント
 D : 外径
 d : 内径

b. 腐食しろ t_1, t_2 が異なる場合

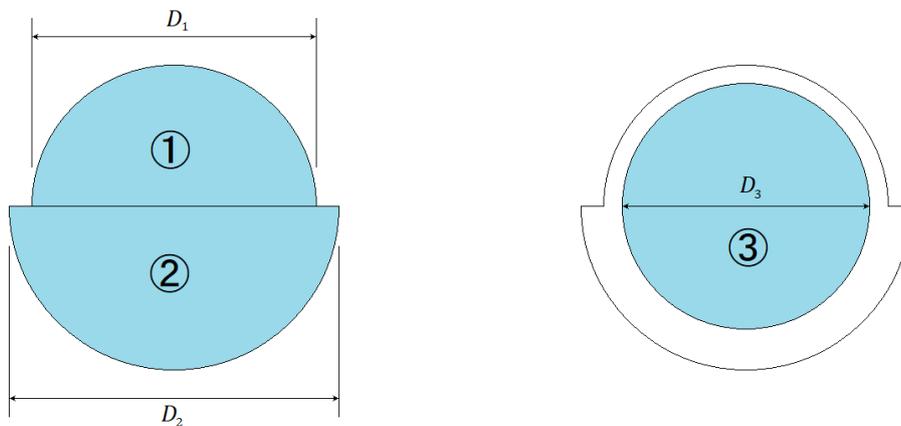
$$I_{nx} = I_x - Ay_0^2$$

ここに

I_{nx} : 図心軸に関する断面二次モーメント
 I_x : x 軸に関する断面二次モーメント
 A : 断面積
 y_0 : x 軸と図心軸との離れ



計算過程の詳細について、次のように断面を分割して計算を行います。



	断面積 A_i	x 軸からの距離 y_i	断面二次モーメント I_{xi}
①	$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{8}$	$y_1 = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{D_1}{2}$	$I_{x1} = \frac{\pi D_1^4}{128}$
②	$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{8}$	$y_2 = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{D_2}{2} \times (-1)$	$I_{x2} = \frac{\pi D_2^4}{128}$
③	$A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} \times (-1)$	$y_3 = 0$	$I_{x3} = \frac{\pi D_3^4}{64} \times (-1)$
合計	$A_0 = \Sigma A_i$	-----	$I_{x0} = \Sigma I_{xi}$

x 軸における図心軸の距離

$$y_0 = \frac{\Sigma A_i y_i}{A_0}$$

断面二次モーメント

$$I = I_{x0} - A_0 y_0^2$$

断面係数

断面係数は腐食後の断面二次モーメントを用いて、次式から計算します
腐食しろ t_1, t_2 が異なる場合、最小の断面係数を採用します。

$$Z_c = \frac{I_{nx}}{y_c} \quad Z_t = \frac{I_{nx}}{y_t}$$

$$Z = \min(Z_c, Z_t)$$

ここに

Z : 断面係数

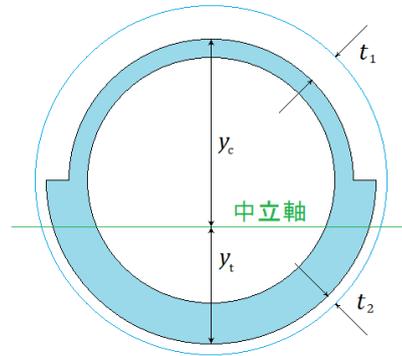
Z_c : 上縁～図心軸における断面係数

Z_t : 下縁～図心軸における断面係数

I_{nx} : 図心軸に関する断面二次モーメント

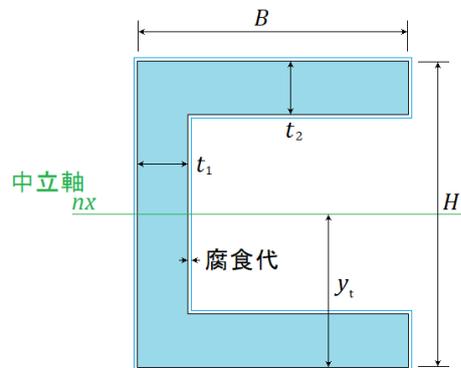
y_c : 上縁と図心軸との離れ

y_t : 下縁と図心軸との離れ



溝形鋼

本プログラムでは、溝形鋼の腐食前の断面性能は、システム内部に保持しています。腐食後の断面係数は次式により計算します。



$$Z = \frac{B \cdot H^3 - (B - t_1)(H - 2t_2)^3}{6H}$$

2-7. 水平方向地盤反力係数の算定方法

参照：「日本道路協会，道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 平成24年3月」P285

参照：「鋼管杭・鋼矢板技術協会，鋼矢板 設計から施工まで 2014年 改定新版」P102

参照：「第41回地盤工学研究発表会，杭軸直角方向地盤反力係数の推定方法に関する一提案」

水平方向地盤反力係数K値の計算方法として、以下の6種類を用意しています。

- 1) K値直接入力
- 2) $K = 1500 \cdot N$
- 3) 横山の図
- 4) 道路橋N値→K値

$$K_H = \frac{\alpha}{0.3} \cdot E_0 \cdot \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{\frac{3}{4}}$$

ここに

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数 $\alpha = 1.0$ (常時) $\alpha = 2.0$ (地震時)

E_0 : 標準貫入試験のN値(入力値)より $E_0 = 2800N$ で推定した変形係数

B_H : 換算載荷幅(=10.0) (m)

- 5) 道路橋 E_0 値→K値

算定式は4) 道路橋N値→K値と同様、 α 、 E_0 は以下の通り

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数 $\alpha = 4.0$ (常時) $\alpha = 8.0$ (地震時)

E_0 : ボーリング孔内で推定した変形係数(入力値)

- 6)

$$K = 3910 \cdot N^{0.733}$$

尚、粘性土でN値がない場合は $q_u \rightarrow N$ 値でK値を算出します。

$$N = 2XC$$

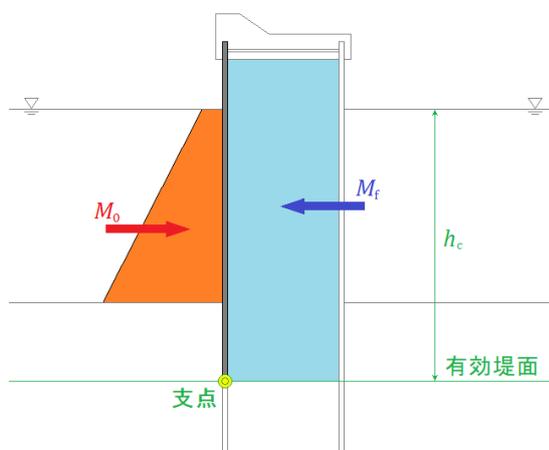
ここに

C : 土層の粘着力 (N/mm^2)

X : 一軸圧縮強度 $q_u = N/X$ (N/mm^2) の分母の値

2-8. 矢板の計算

ラーメン式構造物として設計



$$M_{\max} = EI\beta^2 Y_{\text{top}}$$

$$Y_{\text{top}} = \frac{M_s h_c^2}{24EI}$$

$$M_s = 1.2M_0 - M_f, \quad M_0 = \sum P_i y_i, \quad M_f = \frac{1}{6} \gamma' h_c B^2 \left(3 - \frac{B}{h_c} \cos \phi \right) \sin \phi$$

ここに

M_{\max} : 矢板に生じる最大曲げモーメント (kN・m/m)

Y_{top} : 矢板頭部変位量 (m)

M_s : 矢板の受け持つ抵抗モーメント (kN・m/m)

M_0 : 外力によるせん断変形モーメント (kN・m/m)

M_f : 中詰砂のせん断抵抗による抵抗モーメント (kN・m/m)

P : 壁幅 1 m あたりの外力 (kN/m)

y_i : 有効堤面を支点とした外力作用点までの距離 (m)

γ' : 中詰砂の水中での単位体積重量 (kN/m³)

h_c : 有効堤高 (m)

B : 堤体幅 (m)

ϕ : 中詰砂の内部摩擦角 (度)

抵抗モーメントを算出される際に使用される外力は波圧／動水圧／津波になります。

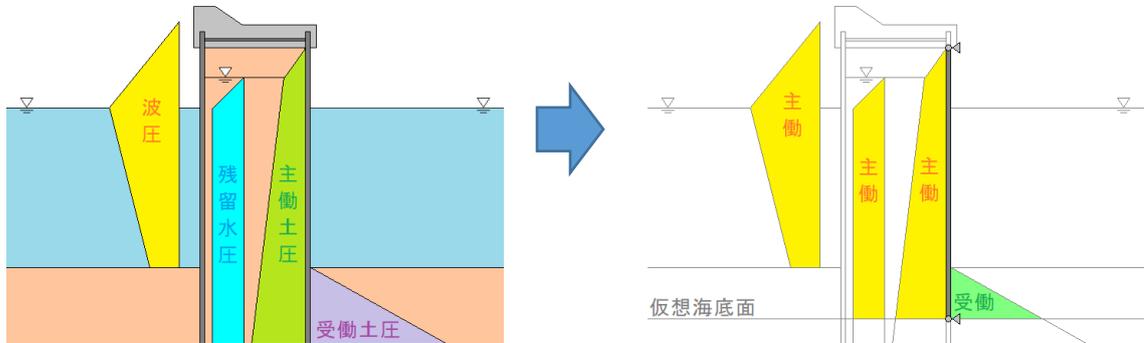
本システムでは、 M_s が負、または非常に小さく算出される場合には、仮想ばり法とたわみ曲線法でそれぞれ算出して、矢板に作用するモーメントが最大となる値を採用しています。

使用する外力は波圧、残留水圧、主働土圧、受働土圧となります。

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P343～345

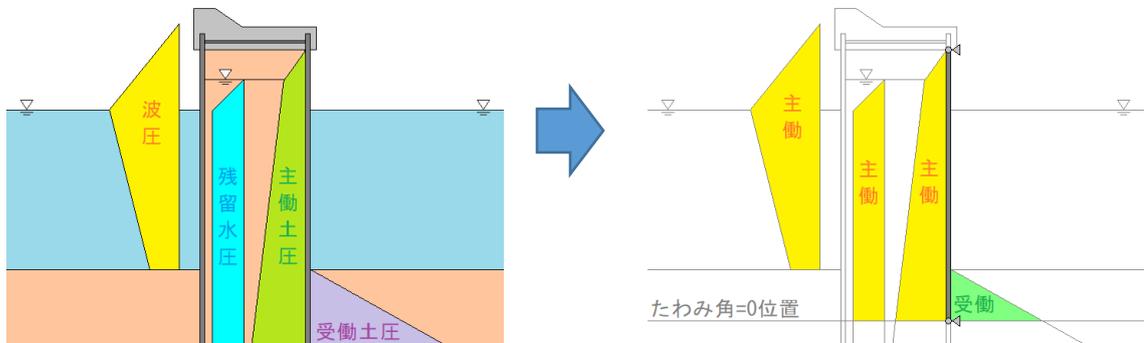
仮想ばり法

上部工底面高～仮想海底面または設計海底面高を支点とした単純梁にて、最大モーメントを算出します。



たわみ曲線法

たわみ曲線が鉛直線と接するものとして、たわみ曲線を描き、根入れ下端を変えてたわみ角=0となる位置を検索し、見つかった場合には上部工底面高～たわみ角=0となる位置を支点とした単純梁にて、最大モーメントを算出します。



ロウの方法

仮想ばり法で算出した最大曲げモーメントをロウの方法で修正します。

$$\mu_N \geq 3.8625 \times \omega^{-0.2} + 0.2255 \quad (\text{永続状態})$$

$$\mu_S \geq 4.5647 \times \omega^{-0.2} + 0.1329 \quad (\text{地震作用時})$$

ここに

$$\mu_N, \mu_S := M_F / M_T$$

M_F : たわみ曲線解析における収束根入れ長のときの最大曲げモーメント

M_T : タイ材取付点及び海底面を支点とした仮想ばり法により算定された最大曲げモーメント

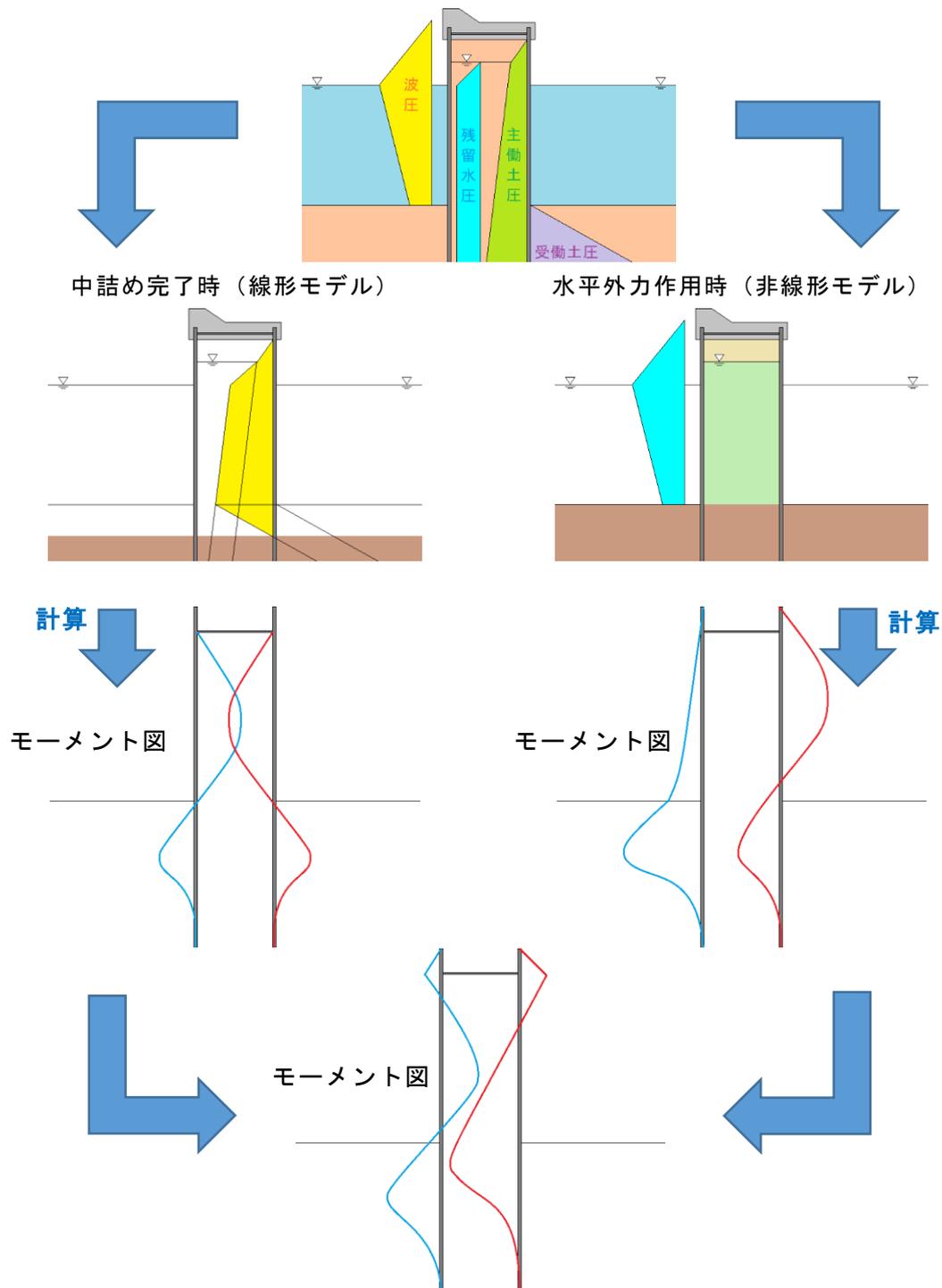
- ※ この計算手法は一方向からの荷重が1つの矢板に作用する場合を想定しています。地震時や津波時で荷重が二方向に作用した場合、二重矢板式防波堤では2つの矢板にそれぞれ荷重が作用するため、この手法によって算出される矢板に生じる変位や断面力は適切ではありません。

ラーメン式構造物、仮想はり法、たわみ曲線法では適切ではないと思われる事例

地震時	津波時 谷本式－背面波圧考慮	津波時 静水圧差による算定式 水工研提案式
二方向の荷重を1つの矢板に加算して断面力の計算を行うため、矢板断面力は過大に算出される		二方向の荷重を1つの矢板に加算して断面力の計算を行うため、矢板断面力は過少に算出される

大掘らの方法

参照：「港湾技術研究所報告，二重矢板式構造物の力学特性に関する研究（1984.3）」



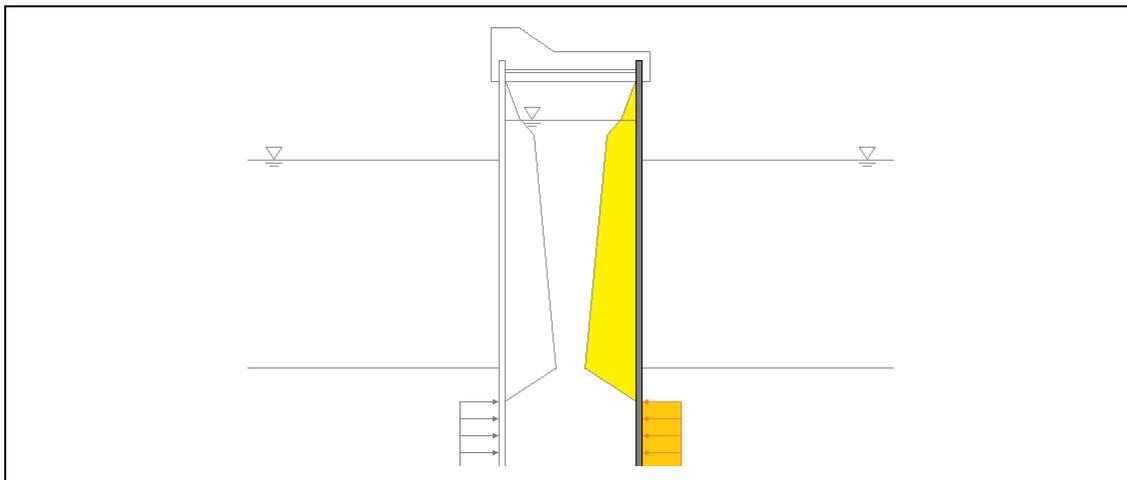
中詰め完了時と水平力作用時と荷重とモデルを分けて、モーメントを算出後、2つのモーメントを足し合わせます。

中詰め完了時では主動土圧＋残留水圧が受働土圧と釣り合う位置まで荷重を考慮し、以降に土層バネを設定した線形モデルとして計算を行います。

水平力作用時は波圧等の外力を考慮し、設計海底面以降に土層バネを設定し、中詰土の剛性を考慮した非線形モデルとして計算を行います。

中詰め完了時

一般式



地盤上部

$$y = \frac{m_f}{120EI} x^5 + \frac{m_f H + p_f}{24EI} x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4$$

地中部塑性域

$$y = \frac{K_p - p_f}{120EI} x^5 + \frac{m_f H + p_f}{24EI} x^4 + b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4$$

地中部弾性域

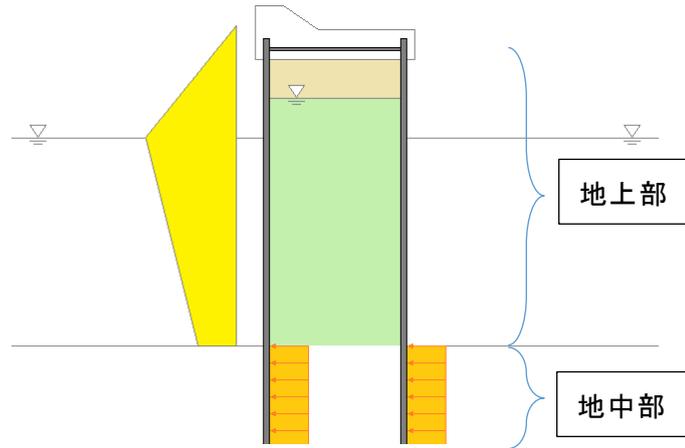
$$y = e^{\beta x} (Q_1 \cos \beta x + Q_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (Q_3 \cos \beta x + Q_4 \sin \beta x)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h}{4EI}}$$

y : 矢板の変位
 m_f : 中詰土の主働土圧を表す係数
 p_f : 中詰土の主働土圧を表す係数
 K_p : 受働土圧係数
 γ : 地盤の単位体積重量

水平外力作用時

一般式



地上部

$$y_A + y_B = A_1 \cosh(\lambda x) + A_2 \sinh(\lambda x) + A_3 x + A_4 - \frac{m_A + m_B}{3BG} (H - x)^3 - \frac{p_{A0} + p_{B0}}{BG} (H - x)^2 + \frac{k\gamma}{G} (H - x)^2$$

$$y_A - y_B = e^{\alpha x} (C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (C_3 \cos \alpha x + C_4 \sin \alpha x) + \frac{B(m_A - m_B)}{2E_f} (H - x) + \frac{B(p_{A0} - p_{B0})}{2E_f}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{BG}{2EI}}$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{E_f}{2BEI}}$$

y_A : 矢板Aの水平変位

y_B : 矢板Bの水平変位

γ : 水平中詰土の単位体積重量

E_f : 水平中詰土の圧縮弾性係数

H : 壁高 (m)

B : 壁体幅 (m)

G : せん断剛性係数

m_A : 矢板Aに作用する荷重

m_B : 矢板Bに作用する荷重

p_A : 矢板Aに作用する荷重(外力)

p_B : 矢板Bに作用する荷重(外力)

k_{hA} : 矢板Aの地盤反力係数

k_{hB} : 矢板Bの地盤反力係数

k : 設計震度

地中部

$$y_{A0} = e^{\beta_A x} (Q_1 \cos \beta_A x + Q_2 \sin \beta_A x) + e^{-\beta_A x} (Q_3 \cos \beta_A x + Q_4 \sin \beta_A x)$$

$$\beta_A = \sqrt[4]{\frac{k_{hA}}{4EI}}$$

$$D \geq B \text{ の場合 } 0 \leq x \leq -B \text{ または } D < B$$

$$y_{B0} = e^{\beta_B x} (R_1 \cos \beta_B x + R_2 \sin \beta_B x) + e^{-\beta_B x} (R_3 \cos \beta_B x + R_4 \sin \beta_B x) + \frac{2S}{k_{hB}}$$

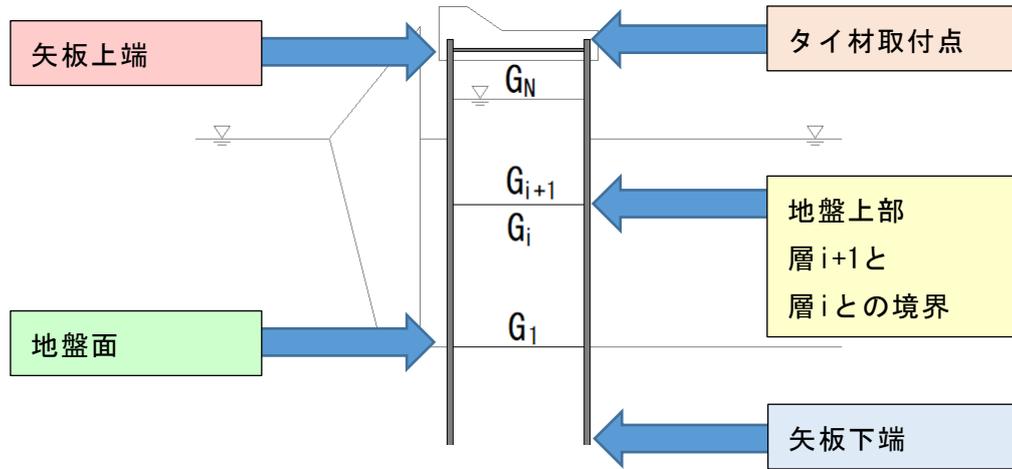
$$D \geq B \text{ の場合 } -B \leq x \leq -D$$

$$y_{B0} = e^{\beta_B x} (R_5 \cos \beta_B x + R_6 \sin \beta_B x) + e^{-\beta_B x} (R_7 \cos \beta_B x + R_8 \sin \beta_B x)$$

$$\beta_B = \sqrt[4]{\frac{k_{hB}}{4EI}}$$

境界条件

5つの箇所による境界条件は以下のとおりになります。



矢板上端	
頭部の拘束がない場合 $y''_{AN} = 0$ $y''_{BN} = 0$ $y''_{AN} = \frac{BG_N}{2EI}(y'_{AN} + y'_{BN}) - \frac{P_{AN}}{EI}$ $y''_{BN} = -\frac{P_{BN}}{EI}$	頭部に頂盤を有する場合 $y_{AN} - y_{BN} = 0$ $y'_{AN} = 0$ $y'_{BN} = 0$ $y'''_{AN} + y'''_{BN} = \frac{BG_N}{2EI}(y'_{AN} + y'_{BN}) - \frac{P_{AN} + P_{BN}}{EI}$
タイ材取付点	
$y_{A1} = y_{A0}$, $y_{B1} = y_{B0}$ $y'_{A1} = y'_{A0}$, $y'_{B1} = y'_{B0}$ $y''_{A1} = y''_{A0}$, $y''_{B1} = y''_{B0}$	
$G_N \leq G_{N-1}$ の場合 $y'''_{AN} - y'''_{AN-1} = \frac{B(G_N - G_{N-1})}{2EI}(y'_{AN-1} + y'_{BN-1}) - \frac{E_t A_t}{BEI}(y_{AN-1} - y_{BN-1}) + \frac{P_{AN-1}}{EI}$ $y'''_{BN} - y'''_{BN-1} = \frac{E_t A_t}{BEI}(y_{AN-1} - y_{BN-1}) + \frac{P_{BN-1}}{EI}$	$G_N > G_{N-1}$ の場合 $y'''_{AN} - y'''_{AN-1} = -\frac{E_t A_t}{BEI}(y_{AN-1} - y_{BN-1}) + \frac{P_{AN-1}}{EI}$ $y'''_{BN} - y'''_{BN-1} = \frac{B(G_N - G_{N-1})}{2EI}(y'_{AN-1} + y'_{BN-1}) + \frac{E_t A_t}{BEI}(y_{AN-1} - y_{BN-1}) + \frac{P_{BN-1}}{EI}$
地盤上部 層i+1と層iとの境界	
$y_{Ai+1} = y_{Ai}$, $y_{Bi+1} = y_{Bi}$ $y'_{Ai+1} = y'_{Ai}$, $y'_{Bi+1} = y'_{Bi}$ $y''_{Ai+1} = y''_{Ai}$, $y''_{Bi+1} = y''_{Bi}$	
$G_{i+1} \leq G_i$ の場合 $y'''_{Ai+1} - y'''_{Ai} = \frac{B(G_{i+1} - G_i)}{2EI}(y'_{Ai} + y'_{Bi}) + \frac{P_{Ai}}{EI}$ $y'''_{Bi+1} - y'''_{Bi} = \frac{P_{Bi}}{EI}$	$G_{i+1} > G_i$ の場合 $y'''_{Ai+1} - y'''_{Ai} = \frac{P_{Ai}}{EI}$ $y'''_{Bi+1} - y'''_{Bi} = \frac{B(G_{i+1} - G_i)}{2EI}(y'_{Ai} + y'_{Bi}) + \frac{P_{Bi}}{EI}$

地盤面	
$y_{A1} = y_{A0} \quad , \quad y_{B1} = y_{B0}$ $y'_{A1} = y'_{A0} \quad , \quad y'_{B1} = y'_{B0}$ $y''_{A1} = y''_{A0} \quad , \quad y''_{B1} = y''_{B0}$	
$G_1 \leq G_0$ の場合 $y'''_{A1} - y'''_{A0} = \frac{B(G_1 - G_0)}{2EI} (y'_{A0} + y'_{B0}) + \frac{P_{A0}}{EI}$ $y'''_{B1} - y'''_{B0} = \frac{P_{B0}}{EI}$	$G_1 > G_0$ の場合 $y'''_{A1} - y'''_{A0} = \frac{P_{A0}}{EI}$ $y'''_{B1} - y'''_{B0} = \frac{B(G_1 - G_0)}{2EI} (y'_{A0} + y'_{B0}) + \frac{P_{B0}}{EI}$
矢板下端	
$y''_{A0} = 0 \quad , \quad y''_{B0} = 0$ $y'''_{A0} = 0 \quad , \quad y'''_{B0} = 0$	

中詰土のせん断弾性係数 G の一般的な算定式はせん断ひずみ角 θ および鉛直応力 σ_N の関数で表す

$$G = a \times 2.5 \sigma_N^{0.7} \theta^{-0.5}$$

算出されたせん断ひずみ角と、その前に計算されたせん断ひずみ角との誤差が許容範囲に収まるまで繰り返し計算を行います。

2-9. 応力照査

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P345

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1104

許容応力度法	信頼性設計法
$\sigma \leq \sigma_a, \quad \sigma = \frac{M}{Z}$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_S S_k$ $R_k = \sigma_y, \quad S_k = \sigma = \frac{M}{Z}$
ここに	ここに
σ_a : 矢板の許容応力度 (N/mm ²) σ : 矢板の応力度 (N/mm ²) M : 矢板に生じる最大曲げモーメント (N・mm) Z : 矢板の断面係数 (mm ³)	σ_y : 矢板の降伏応力度 (N/mm ²) σ : 矢板の応力度 (N/mm ²) M : 矢板に生じる最大曲げモーメント (N・mm) Z : 矢板の断面係数 (mm ³) γ_S : 荷重項に乗じる係数 γ_R : 抵抗項に乗じる係数 Z : 調整係数

2-10. 根入れ長の検討

必要根入れ長は次式により算定する

$$D = \frac{5}{4} \cdot \frac{\pi}{\beta}$$

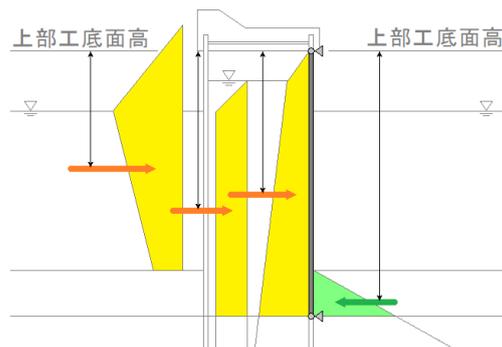
ここに

D : 必要根入れ長 (m)
 β : 平均特性値 (腐食前) (m⁻¹)

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P346

本システムでは、 M_s が負または非常に小さく算出される場合には、フリーアースサポート法とたわみ曲線法とロウの方法で、それぞれ根入れ長を算出して、参考値として表記しています。

フリーアースサポート法



$$M_p \geq F M_A$$

$$M_A = \sum P_{Ai} l_{Ai}$$

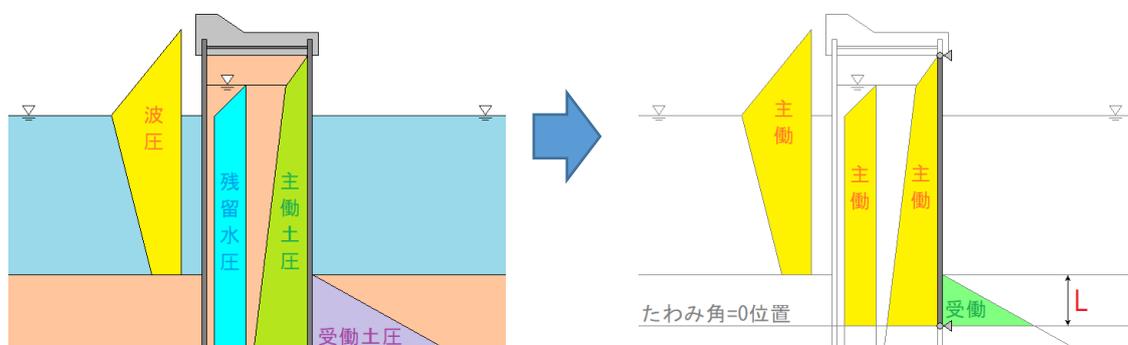
$$M_p = \sum P_{Pi} l_{Pi}$$

ここに

- M_A : 主働側に作用する荷重による上部工底面位置まわりのモーメント (kN・m)
 P_{Ai} : 主働側に作用する荷重 (主働土圧・残留水圧・波圧) (kN)
 l_{Ai} : 主働側に作用する荷重の上部工底面位置～荷重作用位置までの距離 (m)
 M_P : 受働側に作用する荷重による上部工底面位置まわりのモーメント (kN・m)
 P_{Pi} : 受働側に作用する荷重 (受働土圧) (kN)
 l_{Pi} : 受働側に作用する荷重の上部工底面位置～荷重作用位置までの距離 (m)
 F : 安全率

たわみ曲線法

たわみ曲線が鉛直線と接するものとして、たわみ曲線を描き、根入れ下端を変えてたわみ角=0となる位置を検索し、見つかった場合には海底面～たわみ角=0区間までの長さLに安全率をかけた値を必要根入れ長として算出します。



ロウの方法

本システムではフリーアースサポート法で計算した根入れ長がロウの方法による根入れ長を満足するように決定します。ここでは、値の大きくなる方の値を用いています。

$$\delta_N \geq 4.9510 \times \omega^{-0.2} - 0.2486 \quad (\text{永続状態})$$

$$\delta_S \geq 5.0916 \times \omega^{-0.2} - 0.2591 \quad (\text{地震作用時})$$

ここに

- $\delta_N, \delta_S := D_F / H_T$
 D_F : 矢板の根入れ長 (m)
 H_T : タイ材取付点から海底面までの高さ (m)
 ω : シミラリティナンバー (= $\rho \cdot l_h$)
 ρ : フレキシビリティナンバー (= $H_T^4 / E / I$) (m³ / MN)
 E : 矢板のヤング係数 (kN / m²)
 I : 矢板の単位幅当たりの断面二次モーメント (m⁴ / m)
 l_h : 矢板の地盤反力係数 (MN / m³)

2-11. 地盤支持力の検討

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P248～251

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成元年版」P337

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P676～677

許容支持力－許容応力度法

砂質土地盤

$$q_a = \frac{1}{F} (\beta \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + D \cdot N_q) + \gamma_2 \cdot D$$

粘性土地盤

$$q_a = \frac{1}{F} 5.52C_0 + \gamma_2 \cdot D \quad (k=0)$$

$$q_a = \frac{1}{F} (1.84kB + 5.52C_0) + \gamma_2 \cdot D \quad \left(\frac{H}{B} \geq 0.4 \right)$$

$$q_a = \frac{1}{F} (1.18kB + 6.94C_0) + \gamma_2 \cdot D \quad \left(\frac{H}{B} < 0.4 \right)$$

許容支持力－信頼性設計法

砂質土地盤

$$q_a = \frac{1}{m} (\beta \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + D \cdot N_q) + \gamma_2 \cdot D$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \exp(\pi \tan \phi)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$$

粘性土地盤

$$q_a = \frac{1}{m} 5.52C_0 + \gamma_2 \cdot D \quad (k=0)$$

$$q_a = \frac{1}{m} (1.84kB + 5.52C_0) + \gamma_2 \cdot D \quad \left(\frac{H}{B} \geq 0.4 \right)$$

$$q_a = \frac{1}{m} (1.18kB + 6.94C_0) + \gamma_2 \cdot D \quad \left(\frac{H}{B} < 0.4 \right)$$

ここに

q_a : 許容支持力	(kN/m^2)
B : 基礎の最小幅	(m)
D : 基礎の根入れ深さ	(m)
F : 安全率	
m : 支持力に関する調整係数	
γ_1 : 基礎底面より下の土の単位体積重量	(kN/m^3)
γ_2 : 基礎底面より上の土の単位体積重量	(kN/m^3)
β : 基礎の形状係数	
N_γ, N_q : 支持力係数	
ϕ : せん断抵抗角	(度)
C_0 : 基礎底面における粘着力	(kN/m^2)
k : 地盤の粘着力増加係数	(kN/m^3)
H : C_0/k	

最大地盤反力

$$\left(e \leq \frac{b}{6} \right) \quad p = \left(1 + \frac{6e}{b} \right) \frac{V}{A}$$

$$\left(e > \frac{b}{6} \right) \quad p = \frac{2}{3 \left(\frac{1}{2} - \frac{e}{b} \right)} \frac{V}{A}$$

荷重合力の偏心距離

$$e = \frac{b}{2} - x$$

$$x = \frac{M_V - M_H}{V}$$

ここに

p : 矢板下端に生じる最大地盤反力 (kN/m^2)

e : 荷重合力の偏心距離 (m)

x : 堤体端から合力作用位置までの距離 (m)

M_H : 矢板下端に生じる水平合力のモーメント $(kN \cdot m/m)$

M_V : 矢板下端に生じる鉛直合力のモーメント $(kN \cdot m/m)$

V : 鉛直合力 (kN/m)

参照: 「全国漁港漁場協会, 漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」 P186

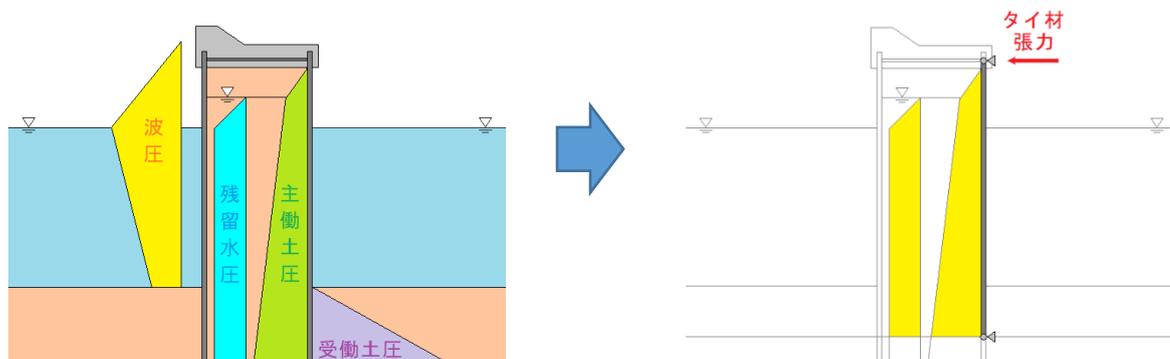
2-12. タイ材の検討

参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P524

参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1104

タイ材の検討／腹起こしの検討では主働土圧、残留水圧が作用する

タイ材取付点位置～仮想海底面または設計海底面高を支点とした単純梁にて、タイ材張力を算出する仮想ばり法、たわみ曲線法、ロウの方法での計算方法が選択できます。



$$T = A_p L$$

ここに

T : タイ材の張力 (kN/本)

A_p : タイ材取付点位置反力 (kN/m)

L : タイ材1本あたりの負担幅 (m/本)

本プログラムでは、タイ材データをシステム内部に保持し、照査式を満足するように断面の小さいものからトライアル計算を行い、決定します。

タイロッド

<p>許容応力度法</p> $\frac{\sigma}{\sigma_a} \leq 1.0, \quad \sigma = \frac{T}{A}$ <p>ここに</p> <p>T:タイロッドの張力 (N) A:タイロッドの断面積 (mm^2) σ_a:タイロッドの許容引張応力度 (N/mm^2)</p>	<p>信頼性設計法</p> $m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = \sigma_y, \quad S_k = \sigma = \frac{T}{A}$ <p>ここに</p> <p>σ_y:タイロッドの降伏応力度 (N/mm^2) σ:矢板の応力度 (N/mm^2) T:タイロッドの張力 ($N \cdot mm$) A:タイロッドの断面積 (mm^2) γ_s:荷重項に乗じる係数 γ_R:抵抗項に乗じる係数 m:調整係数</p>
---	---

タイプル・タイケーブル・タイロープ

<p>許容応力度法</p> $\frac{T}{T_a} \leq 1.0$ <p>ここに</p> <p>T:タイ材張力 (kN) T_a:タイ材許容張力 (kN)</p>	<p>信頼性設計法</p> $m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0, \quad R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = T_a, \quad S_k = \sigma = T$ <p>ここに</p> <p>σ_y:$\begin{cases} \text{タイ材のみなし降伏点荷重(2022年以前)} & (kN) \\ \text{タイ材の降伏点荷重} & (2022年以降) \end{cases}$ (kN) σ:タイ材の張力 (kN) γ_s:荷重項に乗じる係数 γ_R:抵抗項に乗じる係数 m:調整係数</p>
---	--

※ 部分係数の照査では「降伏点荷重」か、「みなし降伏点荷重(引張荷重(破断荷重×2/3))」か、を選択する事ができます。2022年以前は「みなし降伏点荷重」が標準でしたが、今後は「降伏点荷重」を用いる事が標準となります。

2-13. 腹起こしの検討

本プログラムでは、腹起こし材データをシステム内部に保持し、照査式を満足するように断面の小さいものからトライアル計算を行い、決定します。

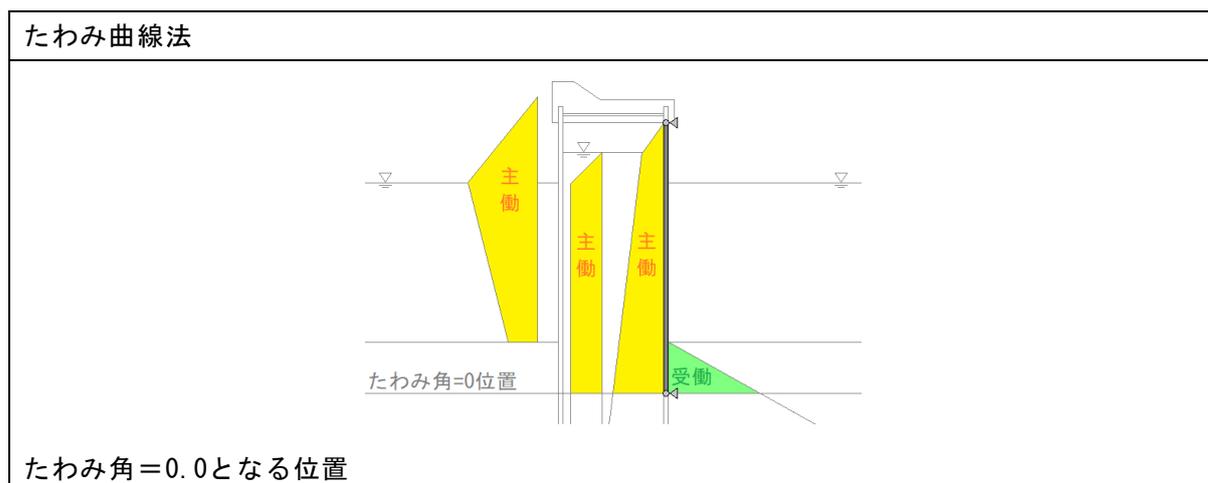
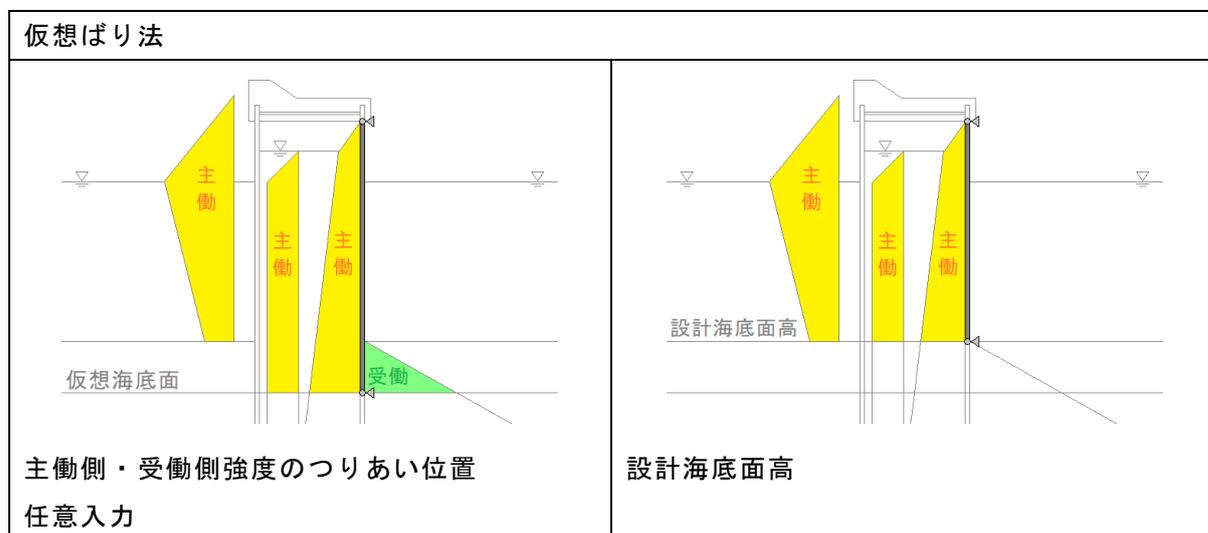
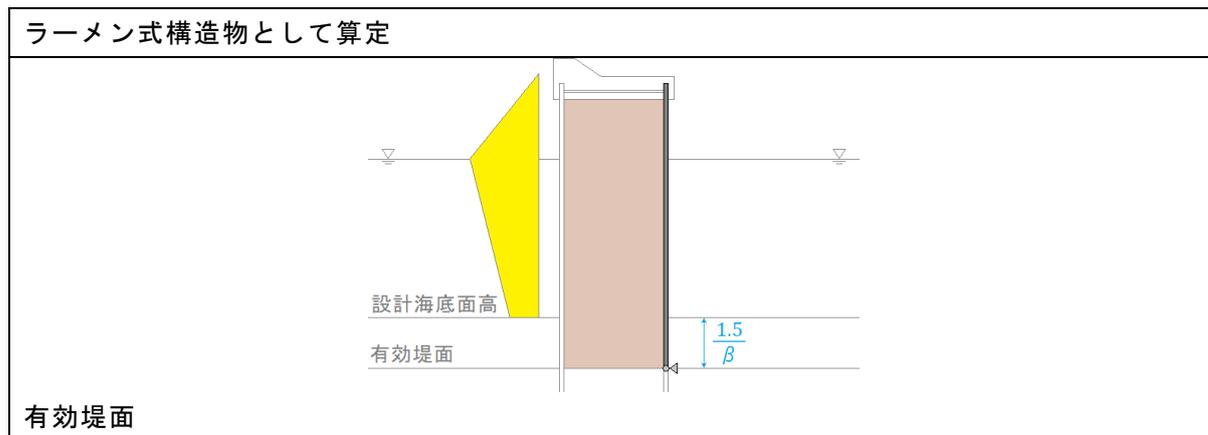
参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P524

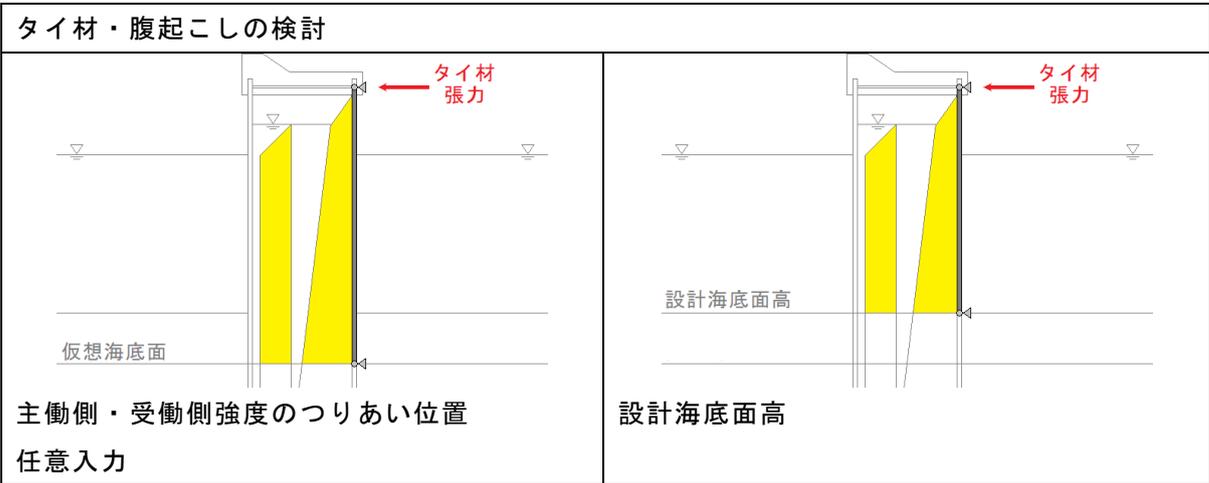
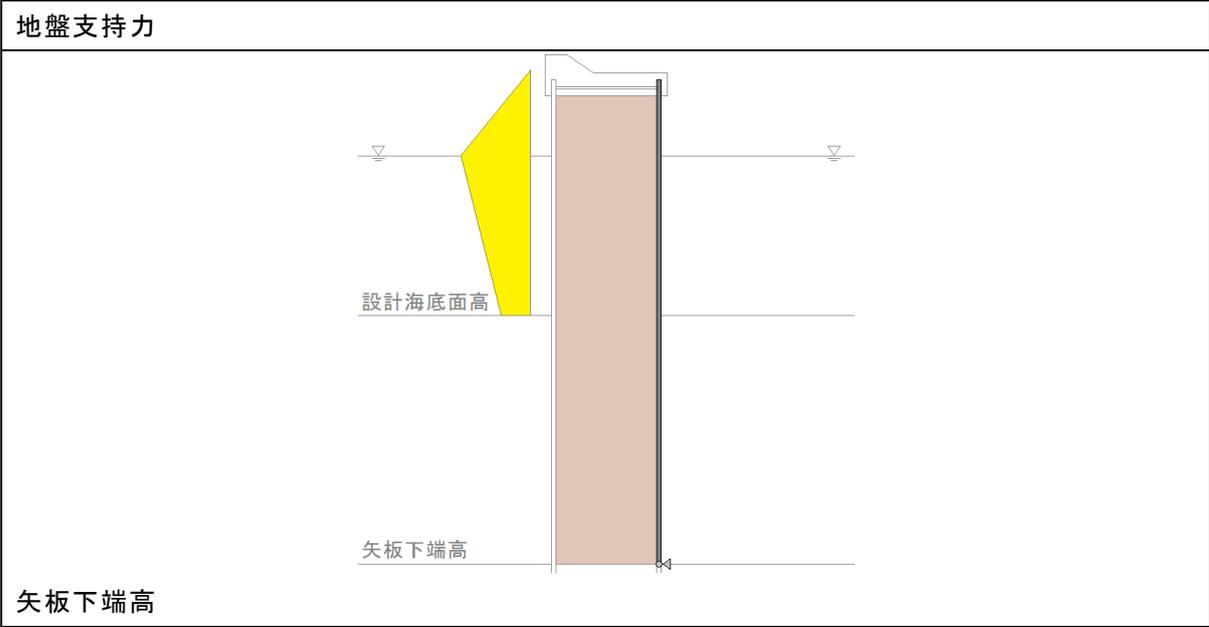
参照：「日本港湾協会，港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」P1107

許容応力度法	信頼性設計法
$M_{\max} = \frac{TL}{10}$ $\sigma_a \geq \frac{M_{\max}}{2Z} \quad (\text{溝形鋼})$ $\sigma_a \geq \frac{M_{\max}}{Z} \quad (\text{H形鋼})$	$m \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$ $R_d = \gamma_d R_k, \quad S_d = \gamma_s S_k$ $R_k = \sigma_y, \quad S_k = \sigma = \frac{M_{\max}}{2Z} \quad (\text{溝形鋼})$ $M_{\max} = \frac{TL}{10}, \quad S_k = \sigma = \frac{M_{\max}}{Z} \quad (\text{H形鋼})$
ここに	ここに
M_{\max} : 腹起こし材に作用する最大曲げモーメント (kN・m) T : タイ材張力 (kN) L : タイ材取付点間隔 (m) Z : 腹起こし材の断面係数 (m ³) σ_a : 腹起こし材の曲げ応力度 (N/mm ²)	M_{\max} : 腹起こし材に作用する最大曲げモーメント (kN・m) T : タイ材張力 (kN) L : タイ材取付点間隔 (m) Z : 腹起こし材の断面係数 (m ³) σ_a : 腹起こし材の曲げ応力度 (N/mm ²)

2-14. 水平力支点位置

水平力支点位置は計算方法によって、次のように設定されます。





参照：「全国漁港漁場協会，漁港・漁場の施設の設計参考書 2015年版」P344

2-15. 作用荷重一覧

各計算手法で使用する荷重（水平力）は次の通りとなります。

	波圧	動水圧	津波	残留水圧	主働土圧	受働土圧
ラーメン式構造物として計算	○	○※	○※	○		
フリーアースサポート法	○	○※	○※	○	○	○
たわみ曲線法	○	○※	○※	○	○	○
大堀らの方法	○	○	○	○	○	○
タイ材・腹起こしの検討				○	○	

※計算手法の条件に合致していないため、適切な値とならない場合があります。

3. 補足資料

3-1. 参考文献

準拠基準及び参考文献は以下の通りです。

- | | | |
|--|---------------|-------------|
| ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説 | 平成30年 5月 | 日本港湾協会 |
| | 平成19年 7月 | 日本港湾協会 |
| | 平成11年 4月 | 日本港湾協会 |
| | 平成 元年 6月 | 日本港湾協会 |
| ・ 漁港・漁場の施設の設計の手引き | 2003年度版 | 全国漁港協会 |
| ・ 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 | 平成24年 3月 | 日本道路協会 |
| ・ 鋼管杭—その設計と施工— | 2009年度版 | 鋼管杭・鋼矢板技術協会 |
| ・ 鋼矢板—設計から施工まで— | 2014年度版 | 鋼管杭・鋼矢板技術協会 |
| ・ 水理公式集 | 平成11年版 | 土木学会 |
| ・ 杭軸直角方向地盤反力係数の推定方法に関する一提案 | 第41回地盤工学研究発表会 | |
| ・ 防波堤の耐津波設計ガイドライン | 平成27年 | 国土交通省港湾局 |
| ・ 津波に対する防波堤の安定性及び粘り強い構造の検討に係る現状の知見 | | 国土交通省港湾局 |
| ・ 平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方 | | 農林水産省水産庁 |
| ・ ソリトン分裂津波に対する消波ブロック被覆堤の津波波力算定法に関する研究 | | 土木学会論文集 |