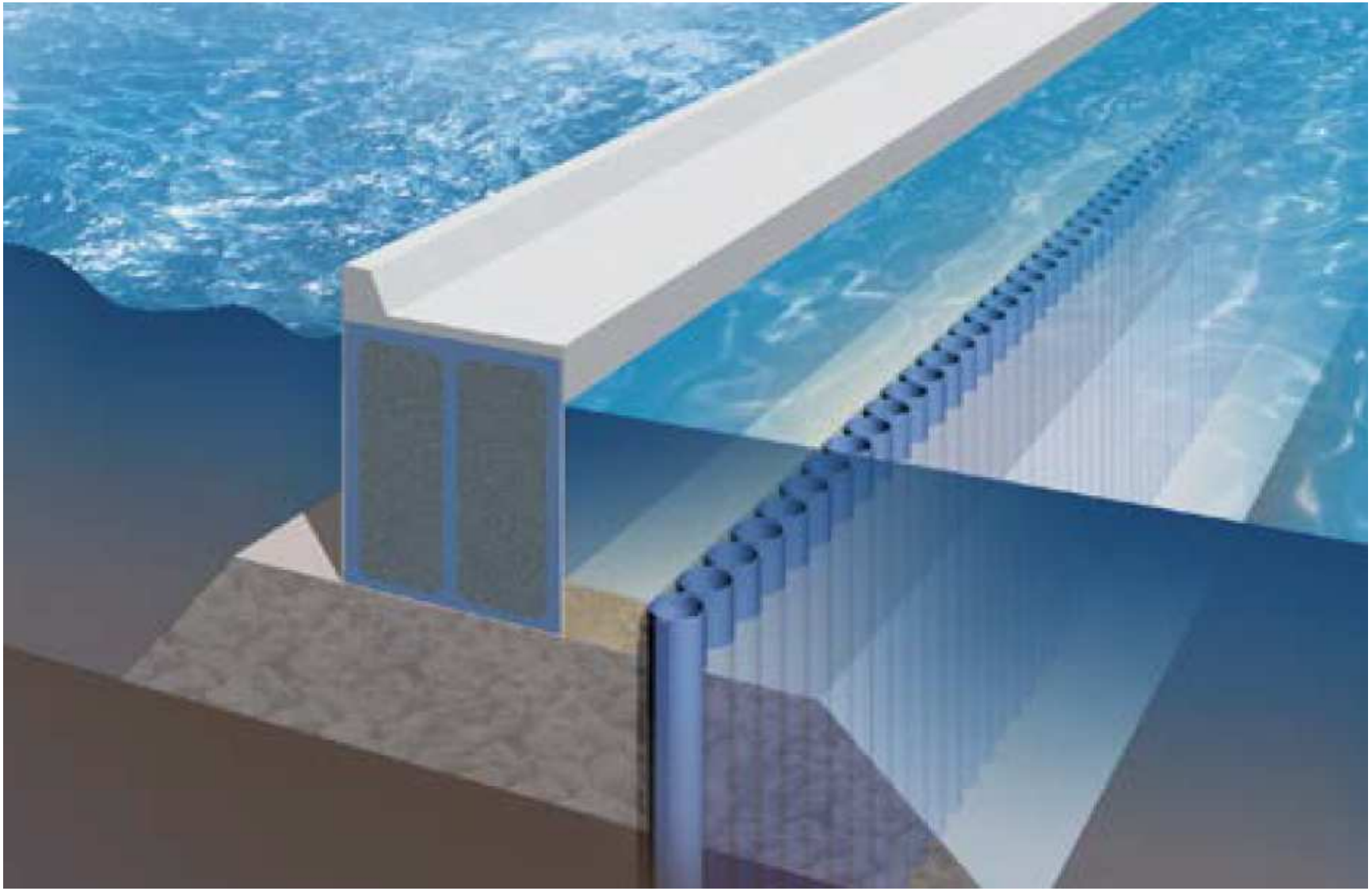
鋼管杭式防波堤補強工法

港湾空港技術研究所，東京理科大学，沿岸技術研究センター との共同研究



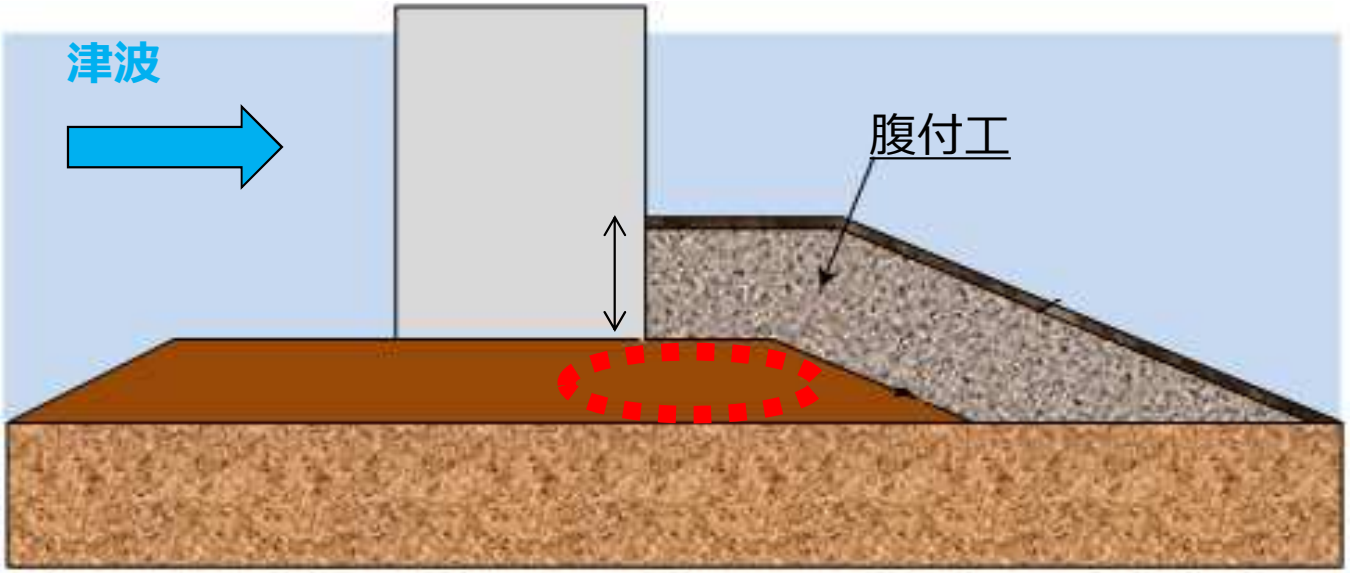
目次　１．概要(背景，検証，オーソライズ)

２．設計法紹介(簡易設計)

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■津波に対する防波堤の補強技術紹介

腹付方式



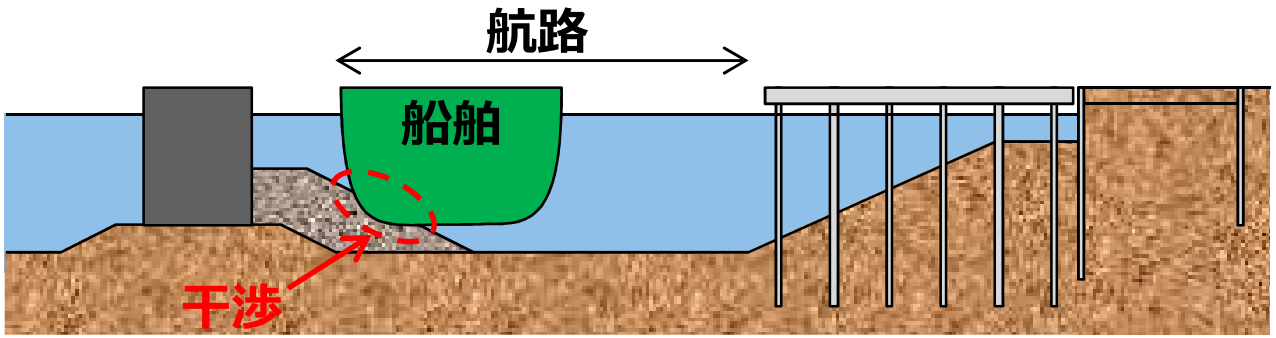
•ｹｰｿﾝ高さの1/3以上の腹付工は補強効果(滑動抵抗増強＋円弧すべり補強)を見込む

•ｹｰｿﾝの安定上重要なｹｰｿﾝ直下の「基礎ﾏｳﾝﾄﾞ」の洗掘を遅延できる　**…腹付方式の粘り強さ**

•洗掘時のｹｰｿﾝ倒壊は脆性的で，倒壊に関して予測技術が確立していない

→少しでも洗掘が生じる場合は補強効果は見込めないため，その場合は洗掘対策が必須

•比較的大断面の対策となるため，
航路･泊地･堤頭部etc…では
設置が難しい

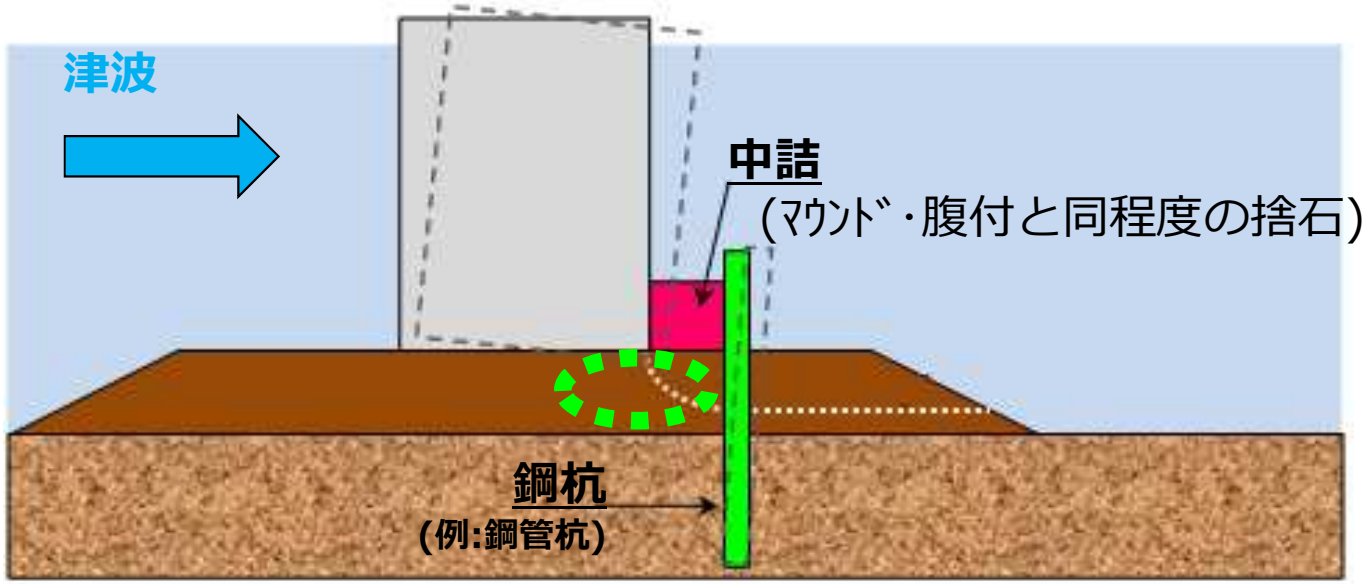


© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

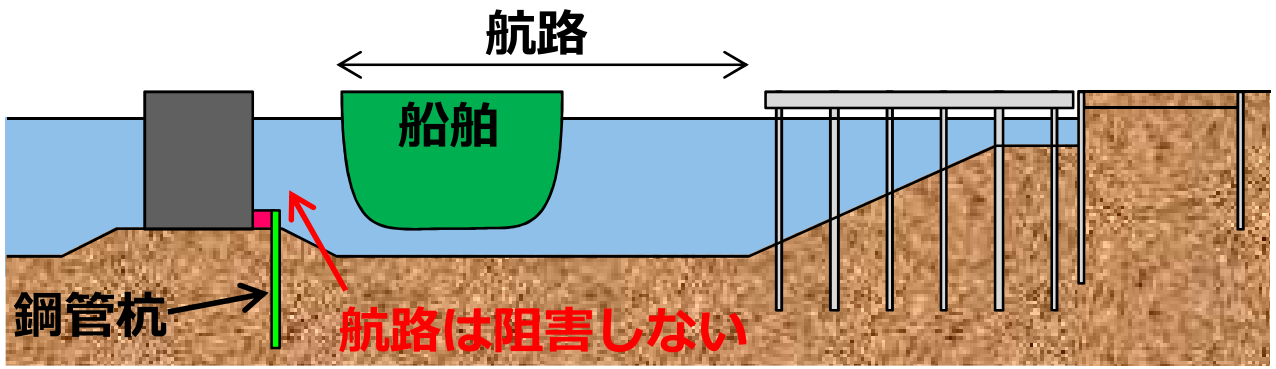
■津波に対する防波堤の補強技術紹介

鋼管杭式
防波堤補強工法

※ここでは簡単に「杭方式」とも標記する



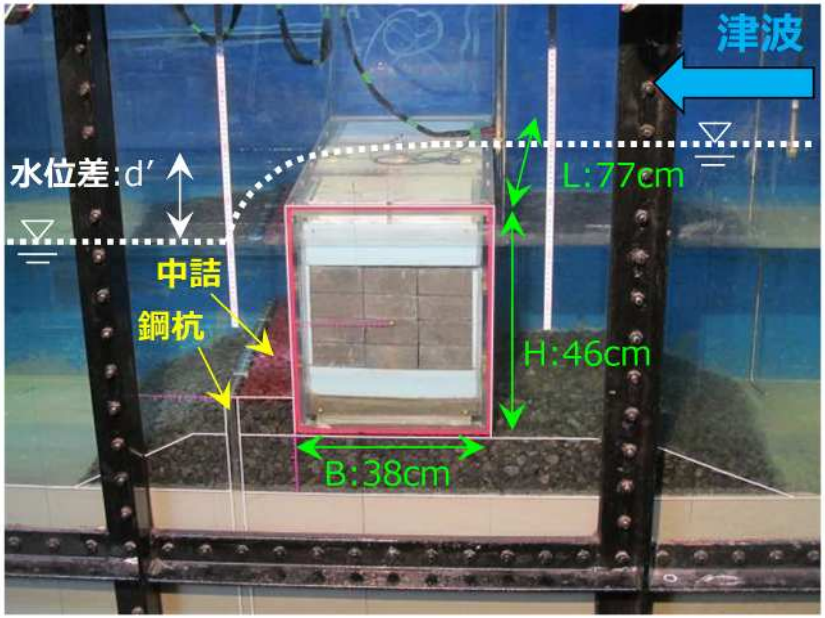
- ｹｰｿﾝの安定性を確保するための杭の仕様を簡易的に設計できる
- ｹｰｿﾝの安定上重要な**ｹｰｿﾝ直下の「基礎ﾏｳﾝﾄﾞ」の洗掘を抑止する**　**…杭方式の粘り強さ①**
- 洗掘が進行した場合の破壊ﾓｰﾄﾞを確認しており，その初動に関して安定計算が可能
- 洗掘時に「杭転倒ﾓｰﾄﾞ」となれば，**ｹｰｿﾝは完全には倒壊しない**　**…杭方式の粘り強さ②**
- 比較的**小断面**での対策が可能



© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■水理模型実験 (港湾空港技術研究所・東京理科大・沿岸技術研究ｾﾝﾀｰとの共同研究 2014)

➢実験水路と防波堤模型



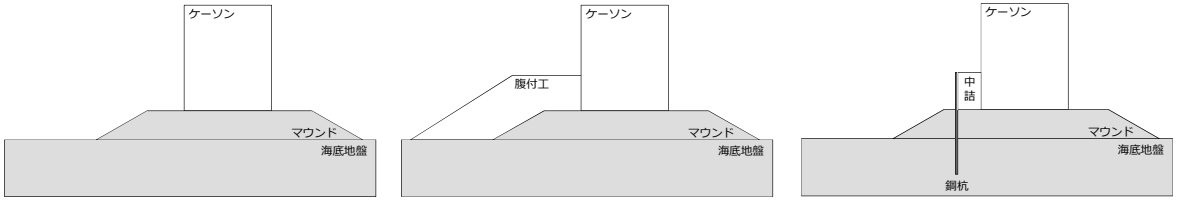
モデル	O港防波堤(模型縮尺:1/25)
被災ｼﾅﾘｵ	防波堤天端を超える規模の津波により越流→洗掘→倒壊

➢実験ケースと結果

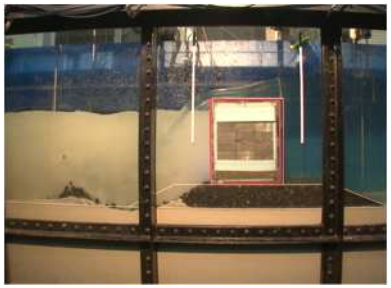
無対策
①水位差5.0m(d'=20cm)

腹付工法
①水位差5.0m(d'=20cm)
②水位差7.5m(d'=30cm)

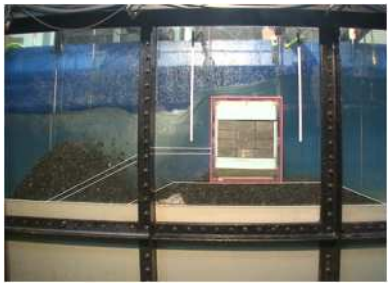
鋼管杭式補強工法
①水位差5.0m(d'=20cm)
②水位差7.5m(d'=30cm)



①水位差5.0m:洗掘進行中

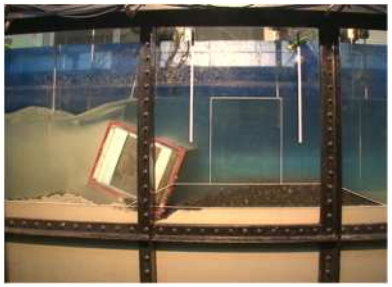


①水位差5.0m:洗掘定常化

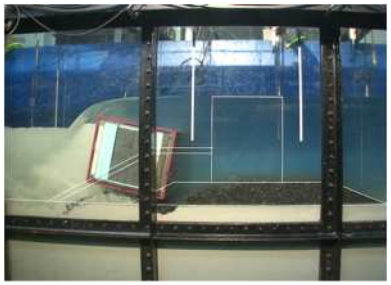


①水位差5.0m:洗掘定常化

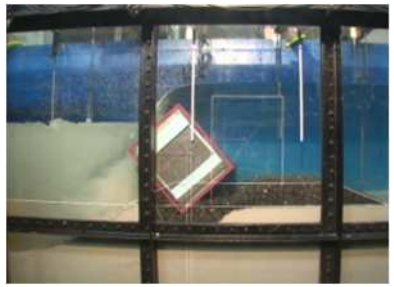
①水位差5.0m:**完全倒壊**



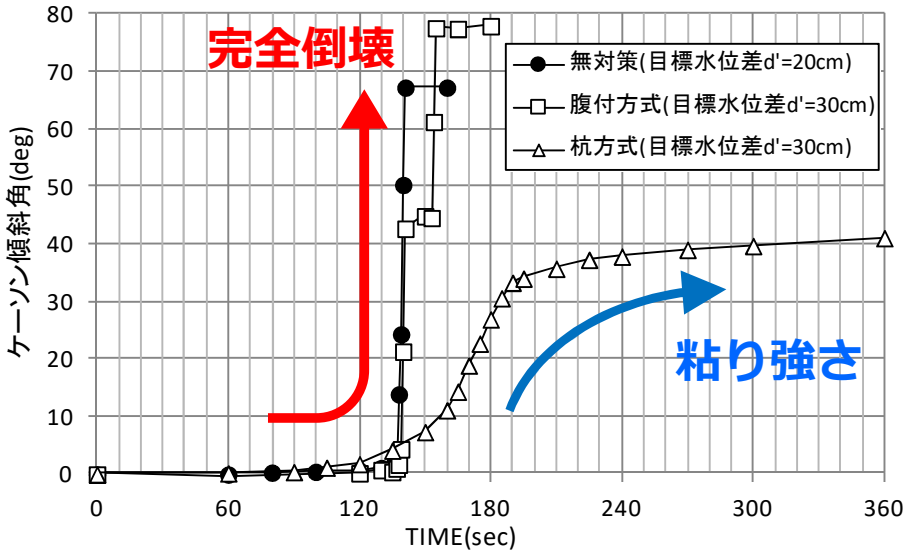
②水位差7.5m:**完全倒壊**



②水位差7.5m:**大変形**



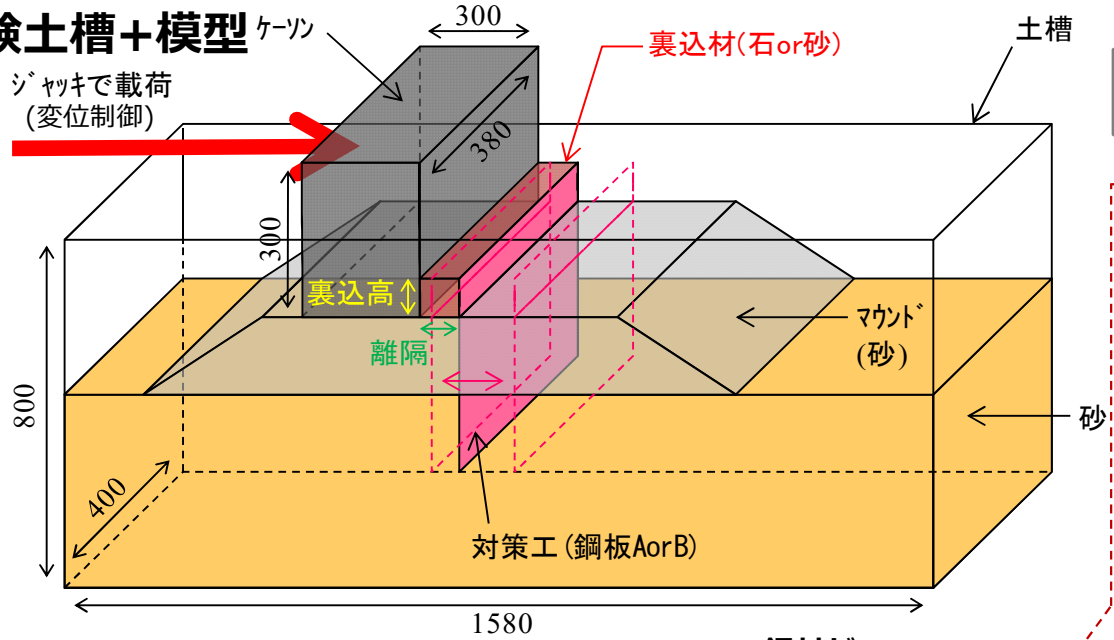
➢結果まとめ(ｹｰｿﾝ変形量の推移)



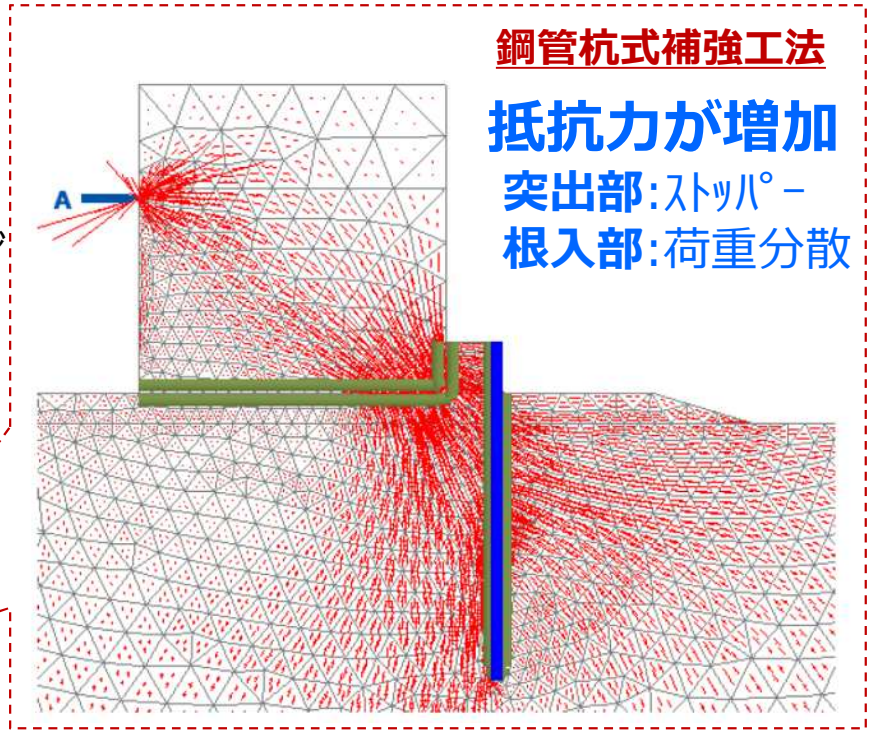
→本工法の"粘り強さ"を確認し，全体の安定性を定量的に評価.

■気中模型載荷実験 (東京理科大との共同研究 2012-2013)

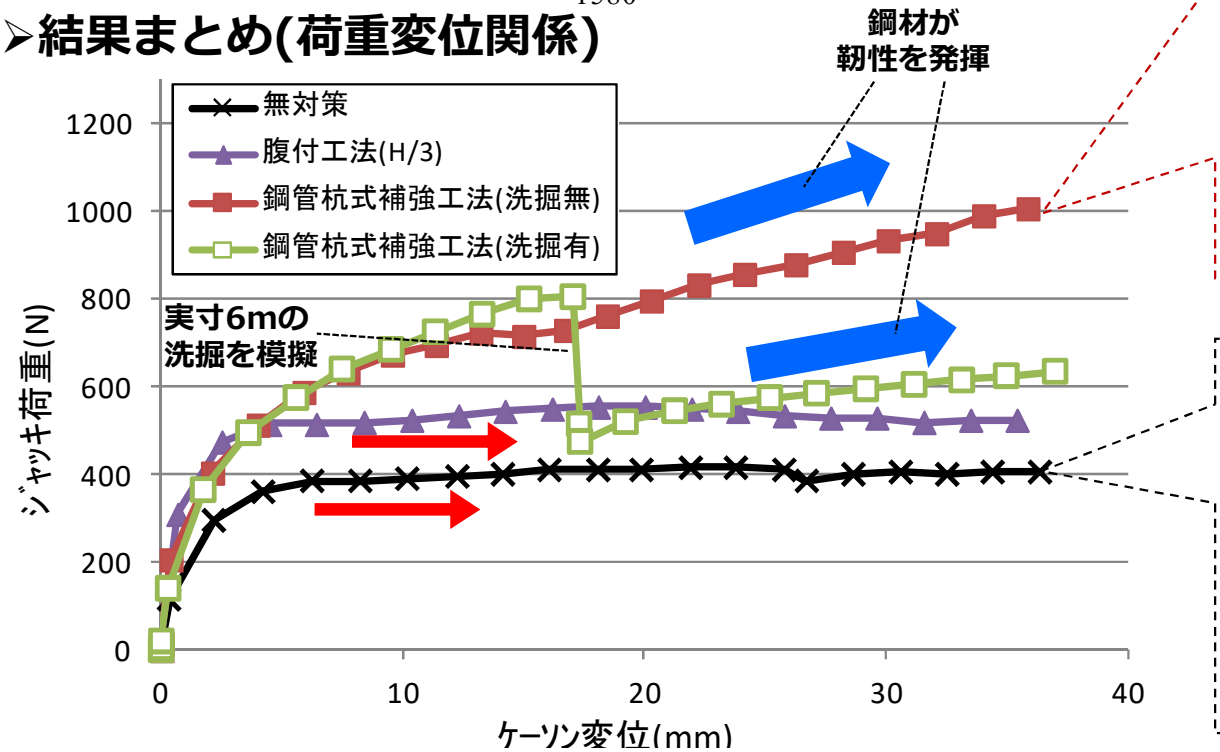
➢実験土槽+模型

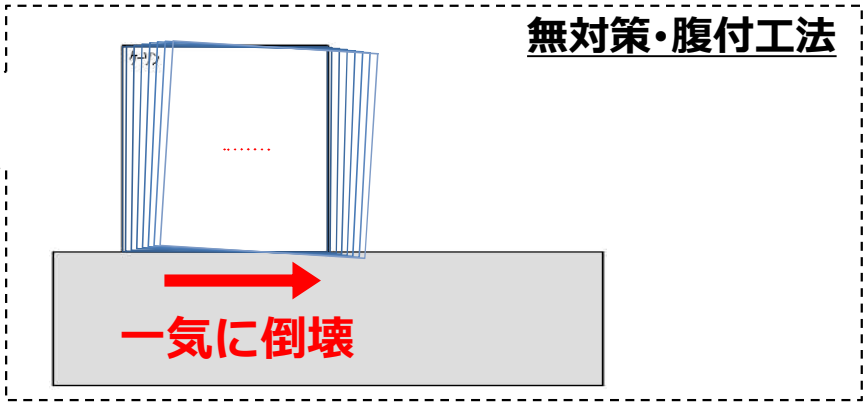


モデル　某防波堤(模型縮尺:1/60)



➢結果まとめ(荷重変位関係)





→本工法の抵抗機構の解明し，鋼材の健全性が照査可能に.

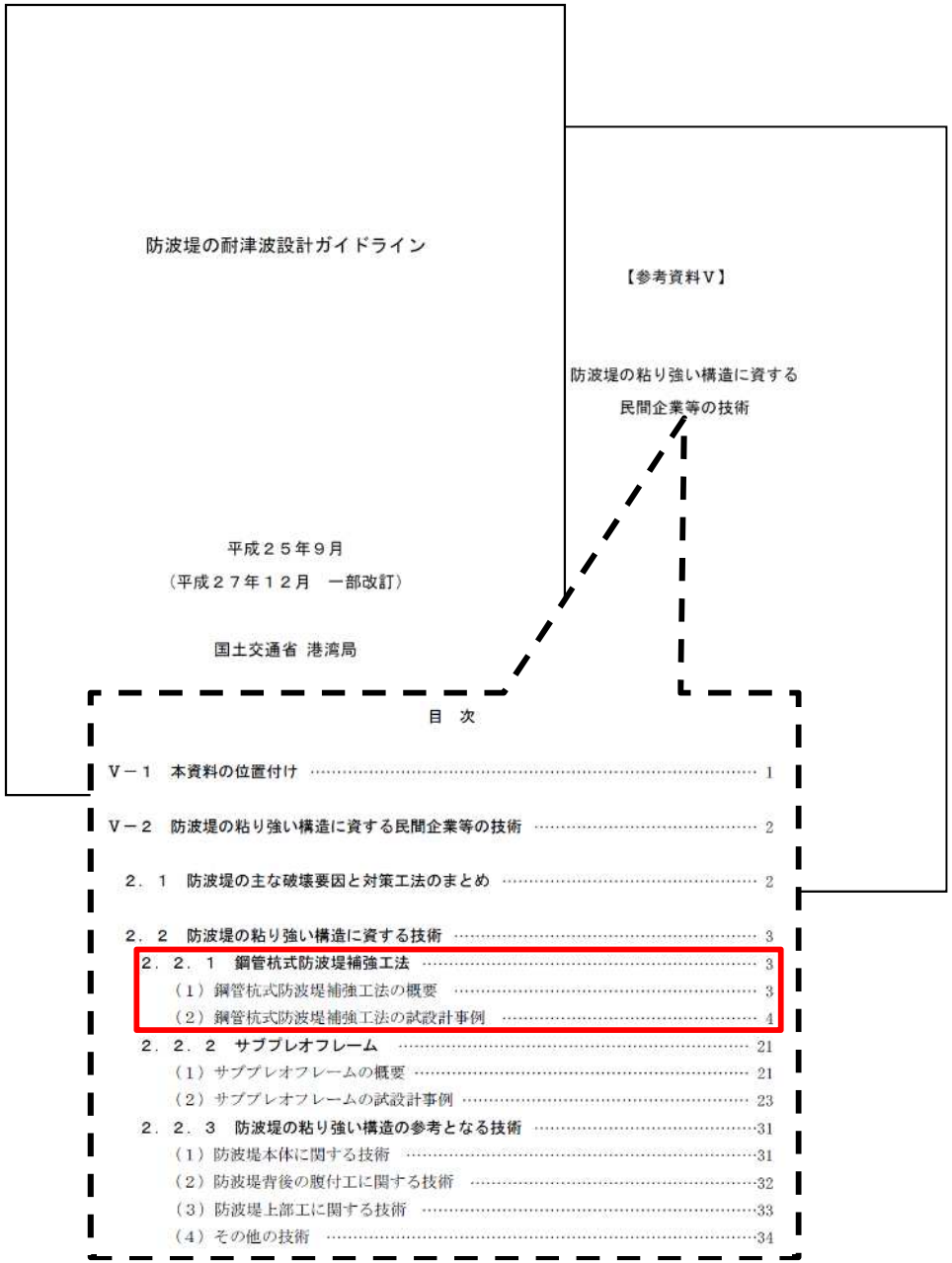
■「防波堤の耐津波設計ガイドライン」改定

◆港湾の施設の技術上の基準に関連するマニュアル

「防波堤の耐津波設計ガイドライン(平成25年9月)
(平成27年12月 一部改訂)」
- 【参考資料Ⅴ】防波堤の粘り強い構造に資する民間企業等の技術

◆平成27年12月の改訂の主なポイント

（１）「粘り強い構造」の性能照査の考え方を充実
（２）新たな調査研究による知見の追加
（３）耐津波設計に関する設計事例の追加
（４）民間企業等で開発された新技術や知見の追加
- 防波堤の粘り強い構造に資する民間企業等の技術を公募し合計10技術を紹介
  - 破壊に至る過程までの定量的な検証がなされている技術
    - 鋼管杭式防波堤補強工法
    - サブプレオフレーム工法
    - ペルメックスによる腹付被覆マウンド工法


防波堤の耐津波設計ガイドライン

平成２５年９月
（平成２７年１２月　一部改訂）

国土交通省 港湾局

【参考資料Ⅴ】

防波堤の粘り強い構造に資する
民間企業等の技術

目　次

Ⅴ－１　本資料の位置付け …… 1
Ⅴ－２　防波堤の粘り強い構造に資する民間企業等の技術 …… 2
２．１　防波堤の主な破壊要因と対策工法のまとめ …… 2
２．２　防波堤の粘り強い構造に資する技術 …… 3
２．２．１　鋼管杭式防波堤補強工法 …… 3
（１）鋼管杭式防波堤補強工法の概要 …… 3
（２）鋼管杭式防波堤補強工法の試設計事例 …… 4
２．２．２　サブプレオフレーム …… 21
（１）サブプレオフレームの概要 …… 21
（２）サブプレオフレームの試設計事例 …… 23
２．２．３　防波堤の粘り強い構造の参考となる技術 …… 31
（１）防波堤本体に関する技術 …… 31
（２）防波堤背後の腹付工に関する技術 …… 32
（３）防波堤上部工に関する技術 …… 33
（４）その他の技術 …… 34

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■「水産公共関連民間技術確認審査・評価」取得

◆評価機関

一般社団法人 漁港漁場新技術研究会 殿

◆評価項目(全6項目)

① 鋼管杭の根入部と突出部および中詰により、基礎地盤と防波堤直立部を補強することで、津波・波浪に対して防波堤の滑動・転倒・支持力に関する安定性を向上できること。

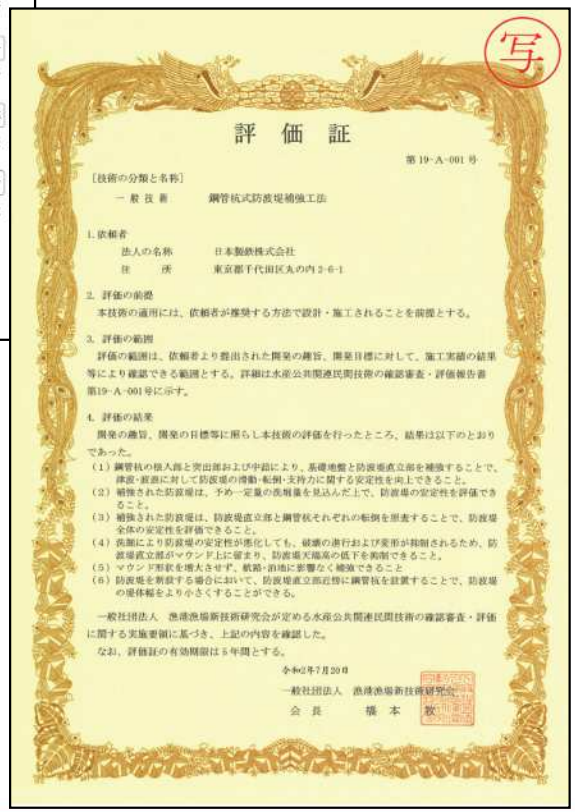
② 補強された防波堤は、予め一定量の洗堀量を見込んだ上で、防波堤の安定性を評価できること。

③ 補強された防波堤は、防波堤直立部と鋼管杭それぞれの転倒を照査することで、防波堤全体の安定性を評価できること。

④ 洗掘により防波堤の安定性が悪化しても、破壊の進行および変形が抑制されるため、防波堤直立部がﾏｳﾝﾄﾞ上に留まり、防波堤の天端高の低下を抑制できること。

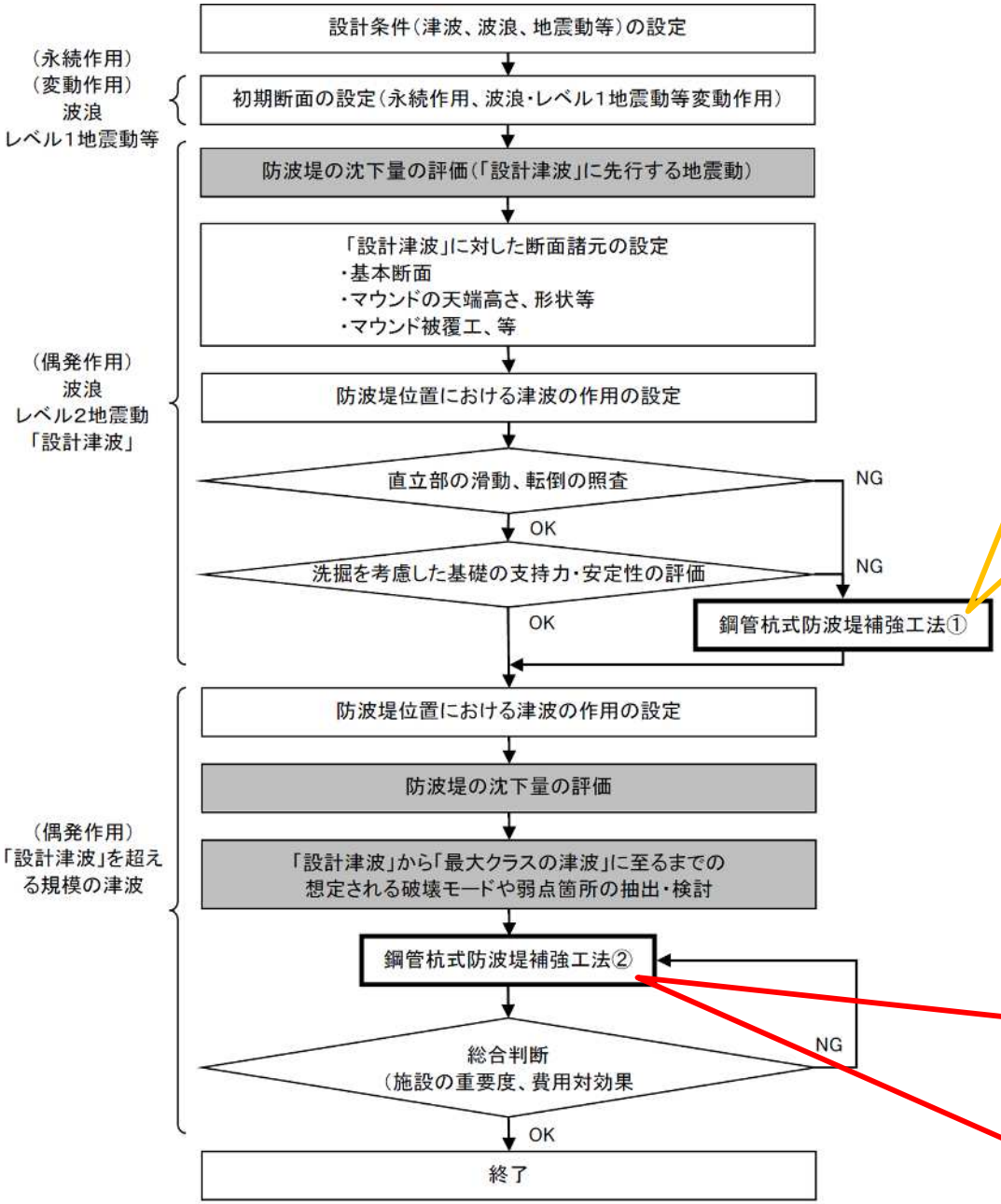
⑤ マウンド形状を増大させず、航路・泊地に影響なく補強できること。

⑥ 防波堤を新設する場合において、防波堤直立部近傍に鋼管杭を設置することで、防波堤の堤体幅をより小さくすることができる。

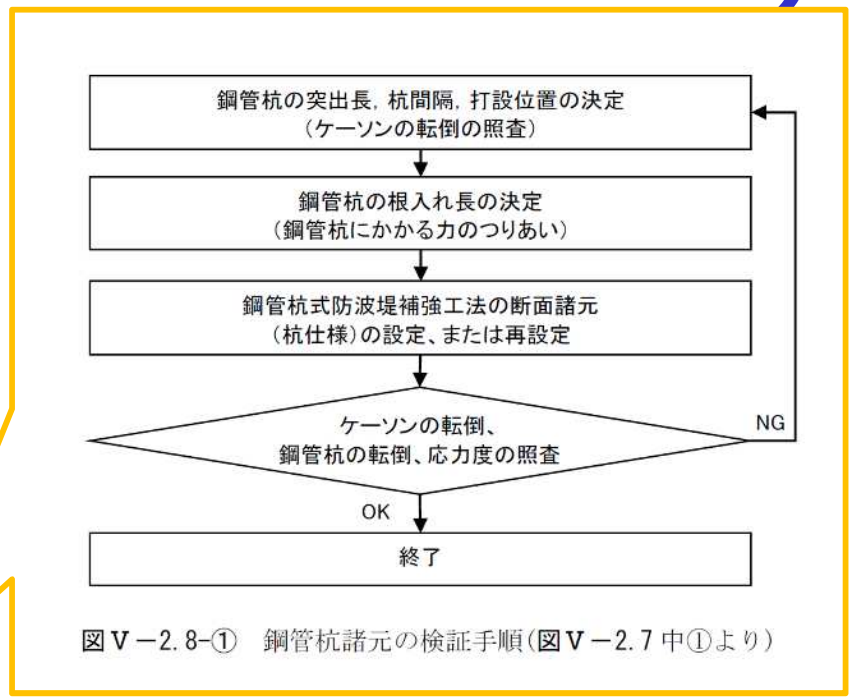


© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

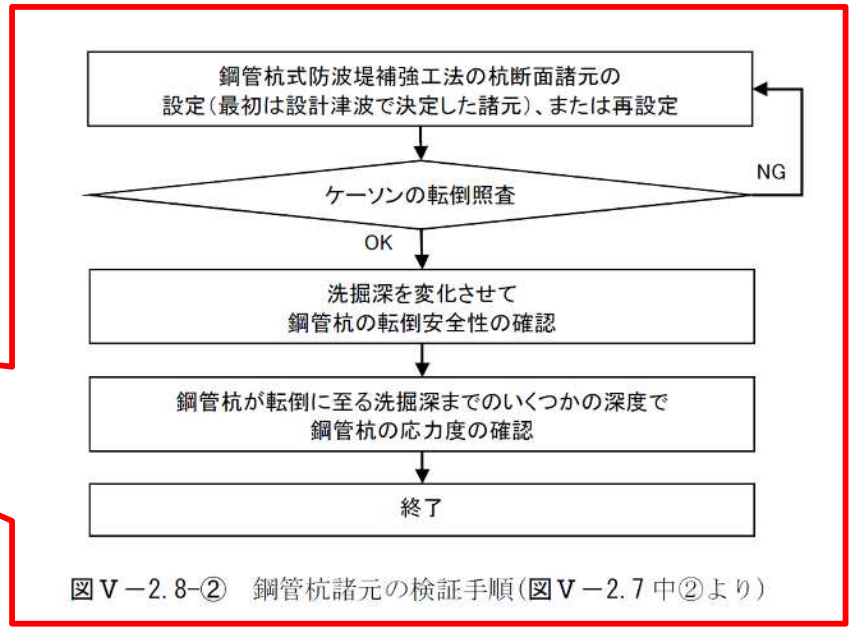
■杭方式の設計フロー(ガイドラインより抜粋)



図Ⅴ－2.7　補強断面(鋼管杭式防波堤補強工法)検討フロー



図Ⅴ－2.8-①　鋼管杭諸元の検証手順(図Ⅴ－2.7 中①より)



図Ⅴ－2.8-②　鋼管杭諸元の検証手順(図Ⅴ－2.7 中②より)

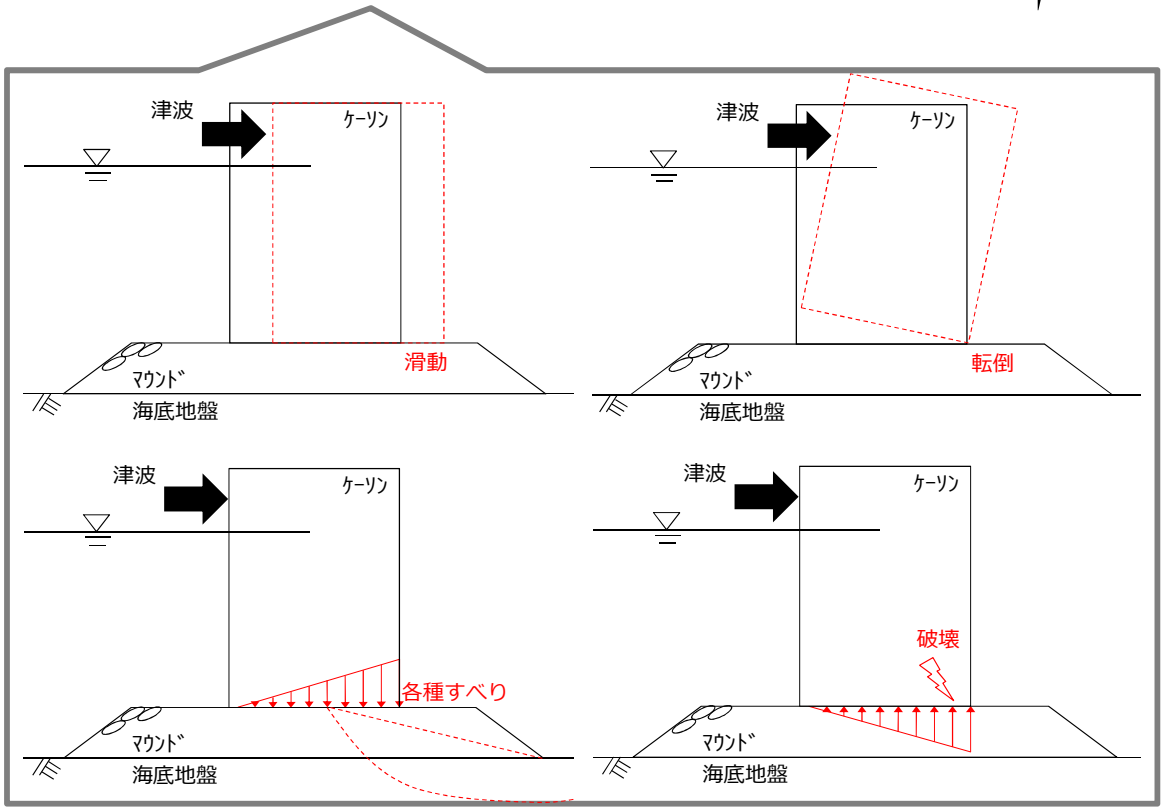
© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■既往設計との対比

◆防波堤の設計

①ｹｰｿﾝ・地盤の安定性の照査

- ｹｰｿﾝの滑動
- ｹｰｿﾝの転倒
- 地盤のすべり
  (円弧･直線etc…)
- 局所的な破壊(端趾圧)



◆杭方式による補強の場合

①ｹｰｿﾝ・杭の安定性の照査

※水理模型実験(@港空研)で検証

- ~~ｹｰｿﾝの滑動~~
- **ｹｰｿﾝの転倒**
- ~~地盤のすべり~~
  ~~(円弧･直線etc…)~~
- 局所的な破壊(端趾圧)
- **杭の転倒**

②防波堤安定時の杭のたわみ

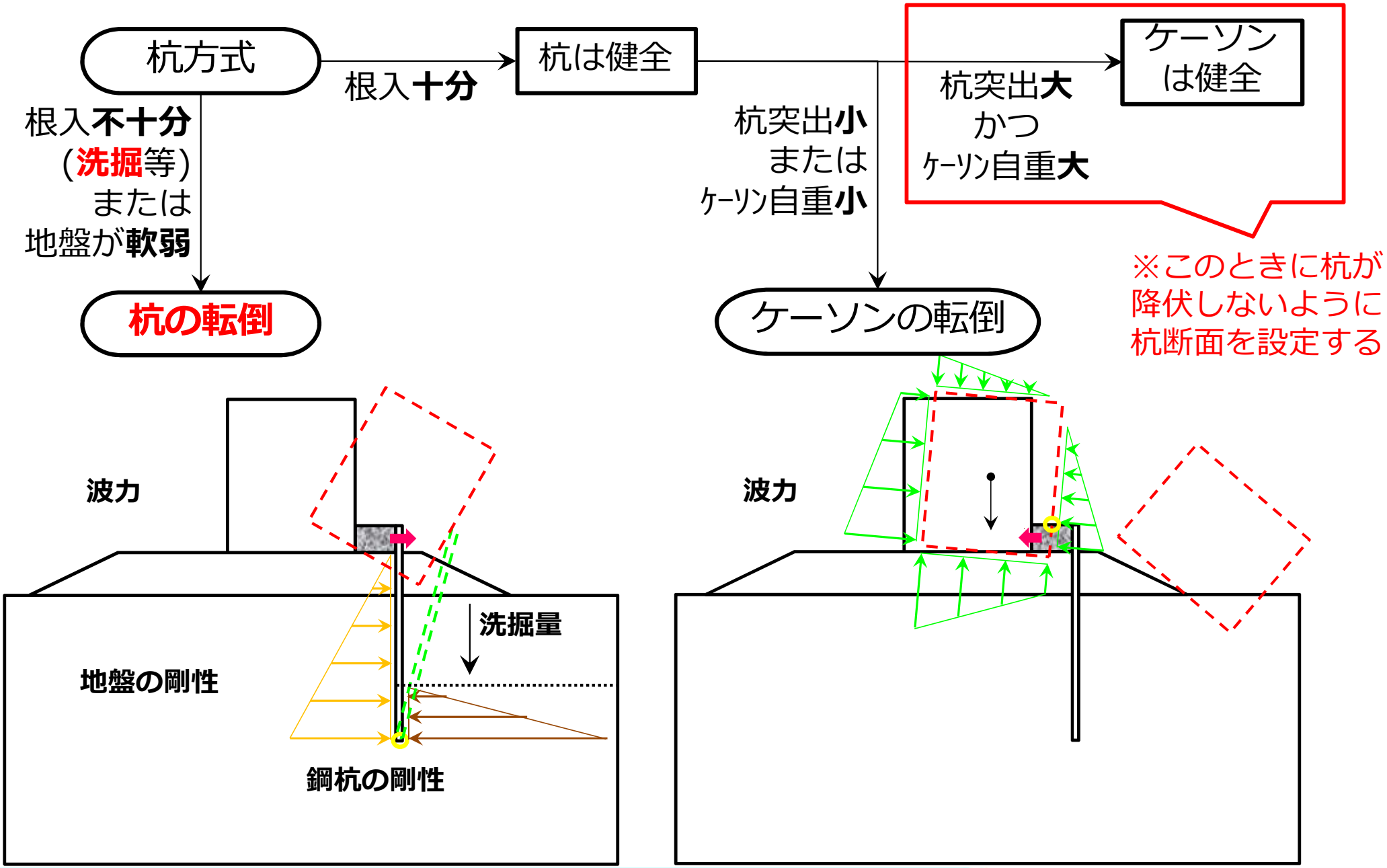
※気中載荷模型実験(@理科大)で検証

- **杭断面の応力度照査**

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■杭方式/簡易設計の要点

◆杭方式の破壊モードの推移(杭の剛性が十分にある場合)



© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■杭方式/簡易設計

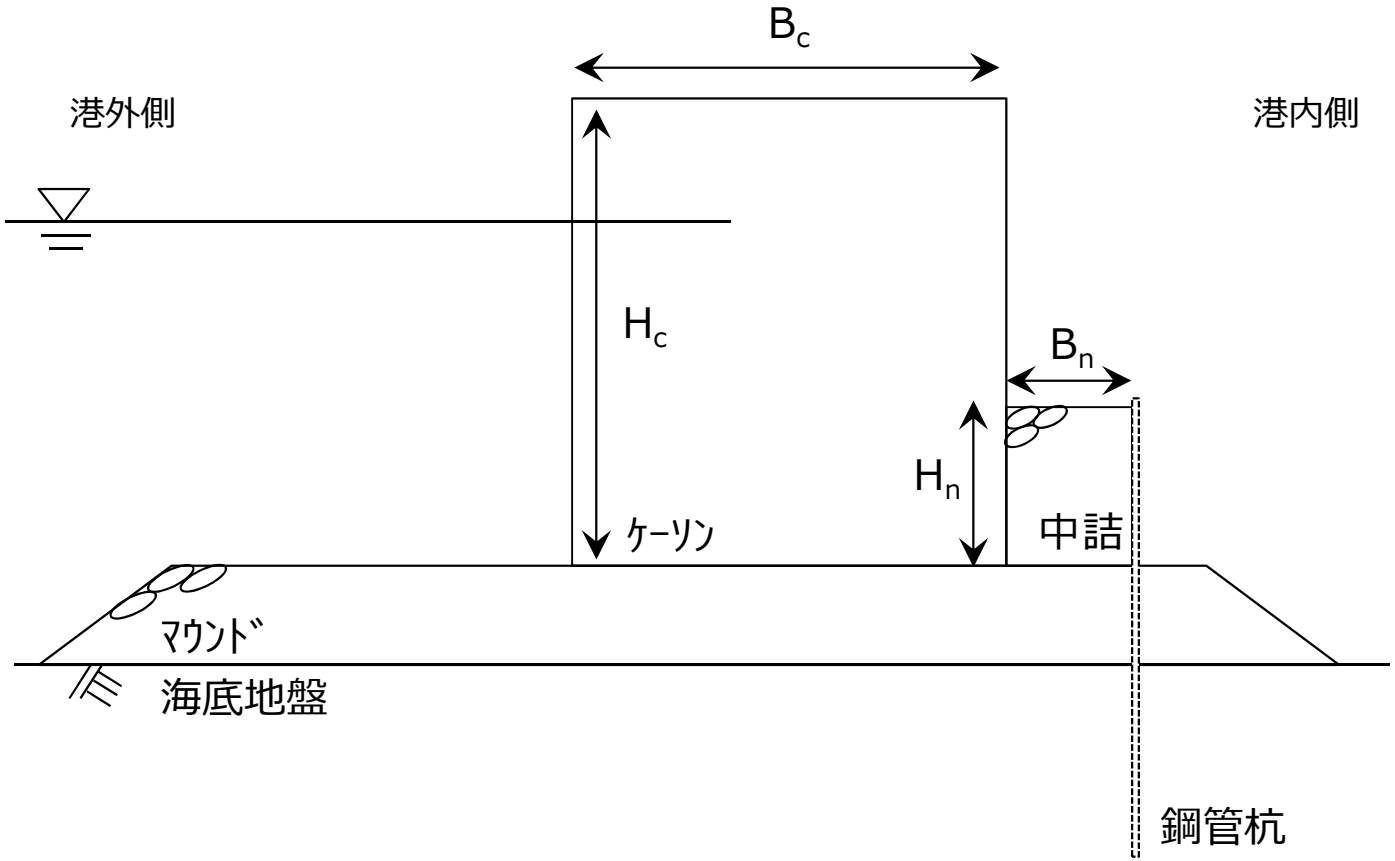
◆中詰の寸法

•中詰の寸法は，実験で確認している下記を基本とし，状況に応じて適切に変更する

高さ$H_n \fallingdotseq H_c/3$　　…水理模型実験(港空研)より

幅$B_n \fallingdotseq 3m$　　…水理模型実験(港空研)･気中載荷模型実験(理科大)より

※鋼管杭は越流による水衝部よりｹｰｿﾝ側に配置する



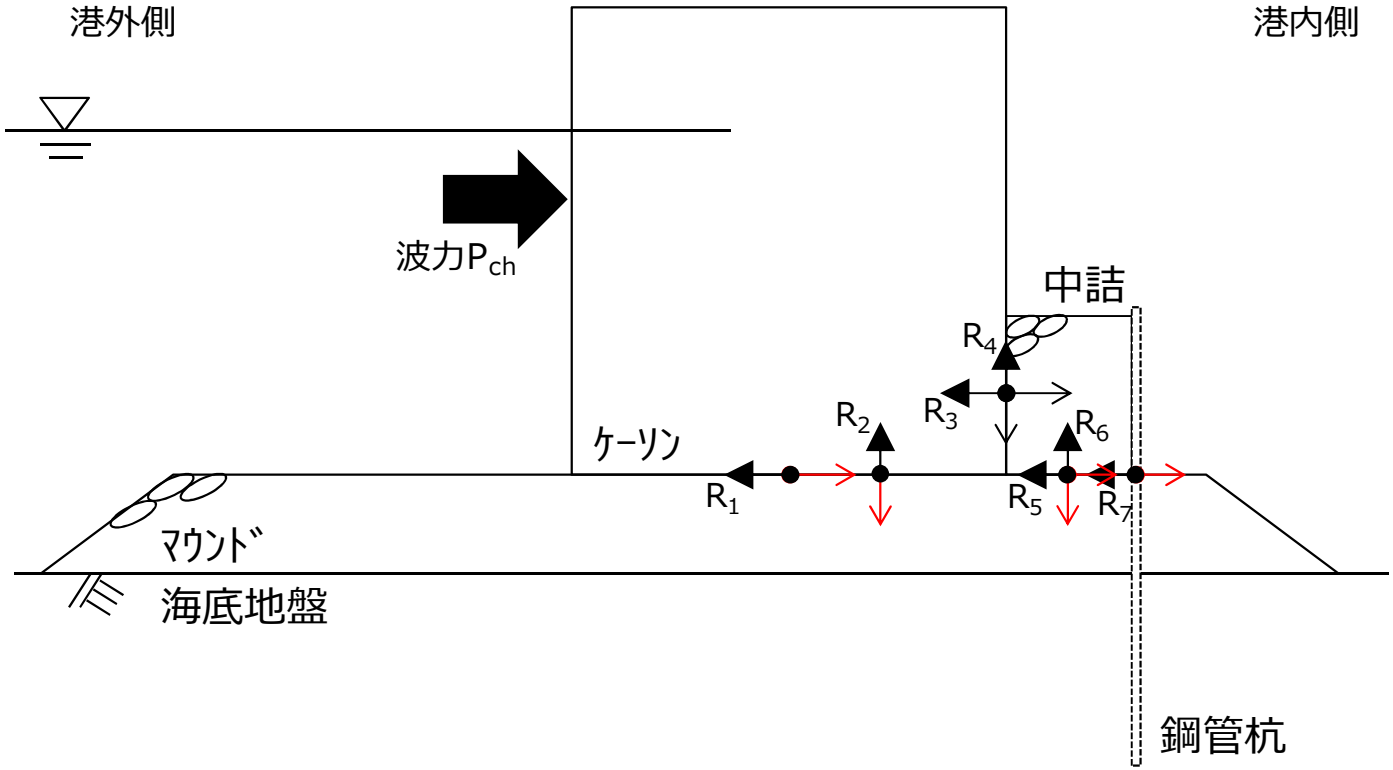
ここに，H_c:ｹｰｿﾝ高さ，B_c:ｹｰｿﾝ幅(岸沖方向の長さ)，H_n:中詰高さ，B_n:中詰幅

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■杭方式/簡易設計

◆各部材間の力の釣合いから考えるケーソンの転倒

- 各部材間の作用力を下の模式図のように定義し，**断面の変形は無視**して力の釣合式を解く
- 摩擦係数は，ﾏｳﾝﾄﾞと剛体(ｹｰｿﾝ･中詰)の接触面，剛体(ｹｰｿﾝ･中詰)同士の接触面にて定義する
- P_{ch}＞R_1の場合(無対策時の滑動)もｹｰｿﾝは滑動しないため，滑動抵抗を補う分だけR_3を定義する
- R_3はｹｰｿﾝ転倒の抵抗としても考慮する　→ｹｰｿﾝ転倒安全率が不足の場合は**中詰高**を大きくする



ここに，R_1:ｹｰｿﾝ底面摩擦力(矩形分布荷重)，R_2:ｹｰｿﾝ底面反力(三角形/台形分布荷重)，R_3:ｹｰｿﾝ壁面反力(矩形分布荷重，R_4:ｹｰｿﾝ壁面摩擦力(矩形分布荷重)，R_5:中詰底面摩擦力(矩形分布荷重)，R_6:中詰底面反力(矩形分布荷重)，R_7:杭頭から中詰に作用する反力(集中荷重)

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

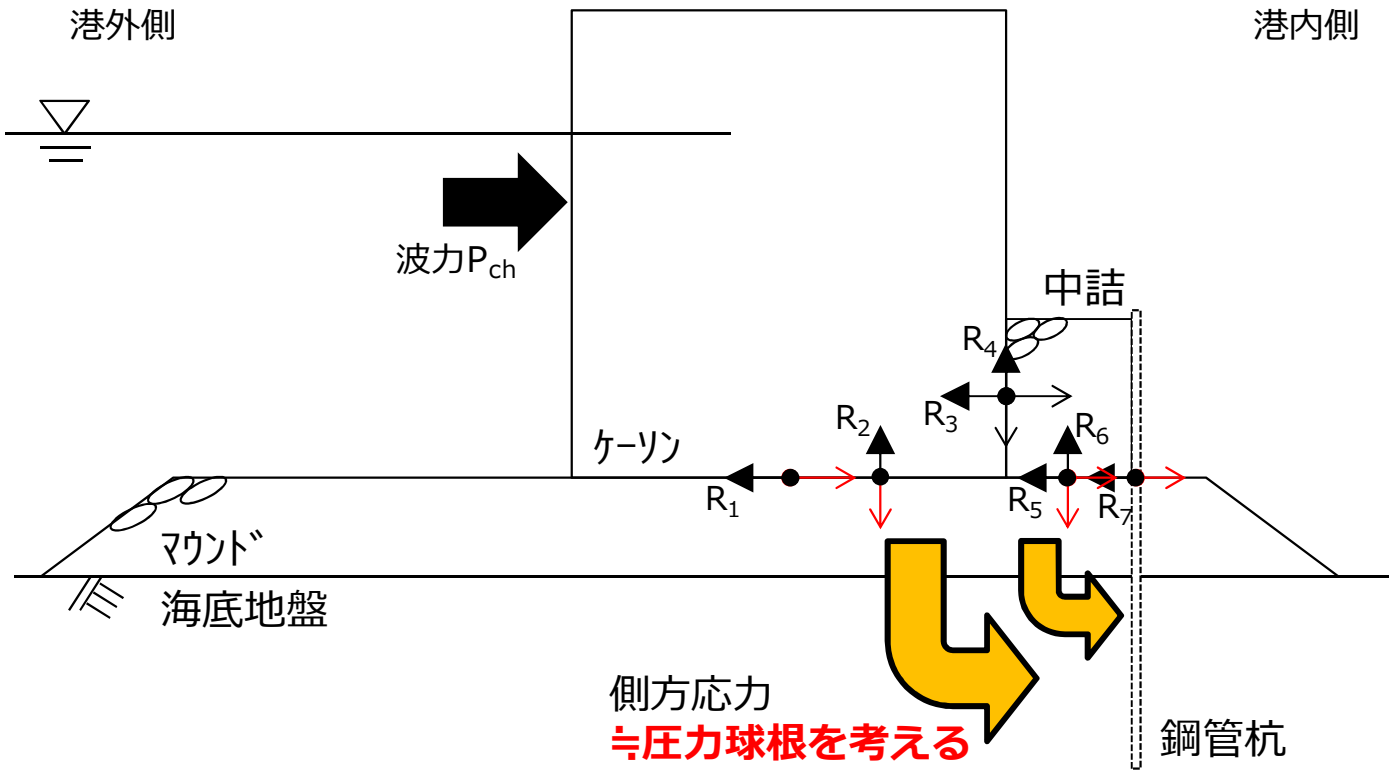
■杭方式/簡易設計

◆杭への側方応力

•各部材間の作用力の内，R_1,R_2,R_5,R_6,R_7の反作用(赤矢印)から杭への作用力を求める

•R_1,R_5は**水平荷重**のため**Cerrutiの解**，R_2,R_6は**鉛直荷重**のため**Boussinesqの解**を用い，それぞれ変換したものを重ね合わせ，各深度における**分布荷重**(圧力球根)として杭に作用させる

•R_7が発生する場合はﾏｳﾝﾄﾞ天端高さに水平に**集中荷重**として作用させる



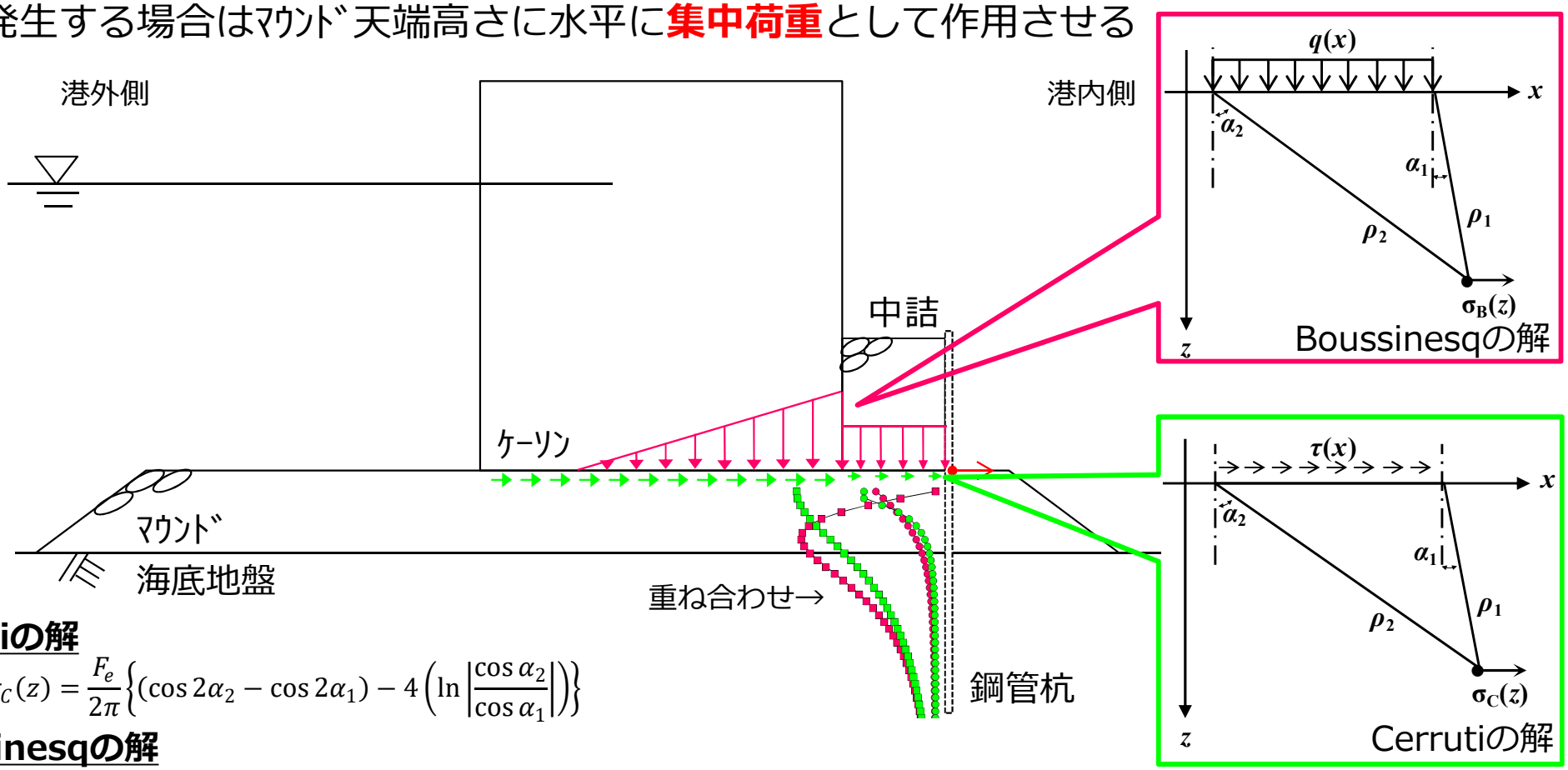
ここに，R_1:ｹｰｿﾝ底面摩擦力(矩形分布荷重)，R_2:ｹｰｿﾝ底面反力(三角形/台形分布荷重)，R_3:ｹｰｿﾝ壁面反力(矩形分布荷重，R_4:ｹｰｿﾝ壁面摩擦力(矩形分布荷重)，R_5:中詰底面摩擦力(矩形分布荷重)，R_6:中詰底面反力(矩形分布荷重)，R_7:杭頭から中詰に作用する反力(集中荷重)

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

■杭方式/簡易設計

◆杭への側方応力

- 各部材間の作用力の内，R_1,R_2,R_5,R_6,R_7の反作用(赤矢印)から杭への作用力を求める
- R_1,R_5は**水平荷重**のため**Cerrutiの解**，R_2,R_6は**鉛直荷重**のため**Boussinesqの解**を用い，それぞれ変換したものを重ね合わせ，各深度における**分布荷重**(圧力球根)として杭に作用させる
- R_7が発生する場合はﾏｳﾝﾄﾞ天端高さに水平に**集中荷重**として作用させる



$\tan\alpha_i = a_i/z\ (i = 1,2,3)$

Cerrutiの解

$$\sigma_C(z) = \frac{F_e}{2\pi}\left\{(\cos 2\alpha_2 - \cos 2\alpha_1) - 4\left(\ln\left|\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1}\right|\right)\right\}$$

Boussinesqの解

$$\sigma_B(z) = \frac{p_e}{2\pi(a_3 - a_1)}[2a_3(\alpha_2 - \alpha_1) - a_3(\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) - z(\cos 2\alpha_2 - \cos 2\alpha_1) + 4z\left(\ln\left|\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1}\right|\right)]$$

© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

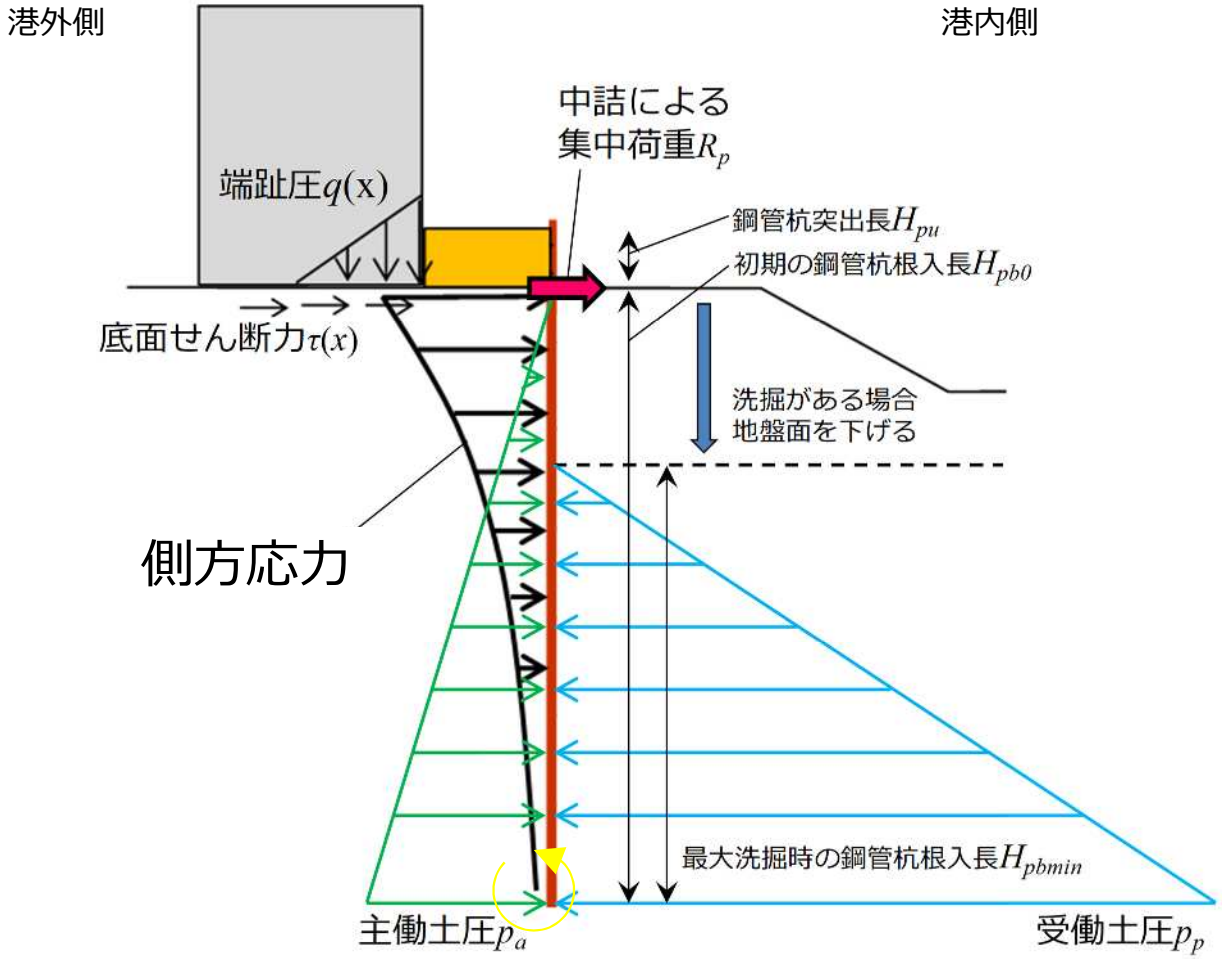
■杭方式/簡易設計

◆杭の転倒

•港外側からは側方応力＋主働土圧＋杭頭作用力R_p(＝R_7)，港内側からは受働土圧を作用させ，杭下端中心の杭転倒安全率の照査を行う

•基本断面の設定時には杭転倒安全率が**1.2以上を確保できるように杭の根入長**を決定する

※粘り強さの確認の際は**杭の転倒安全率が1.0を下回る洗掘深**を確認する



© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.

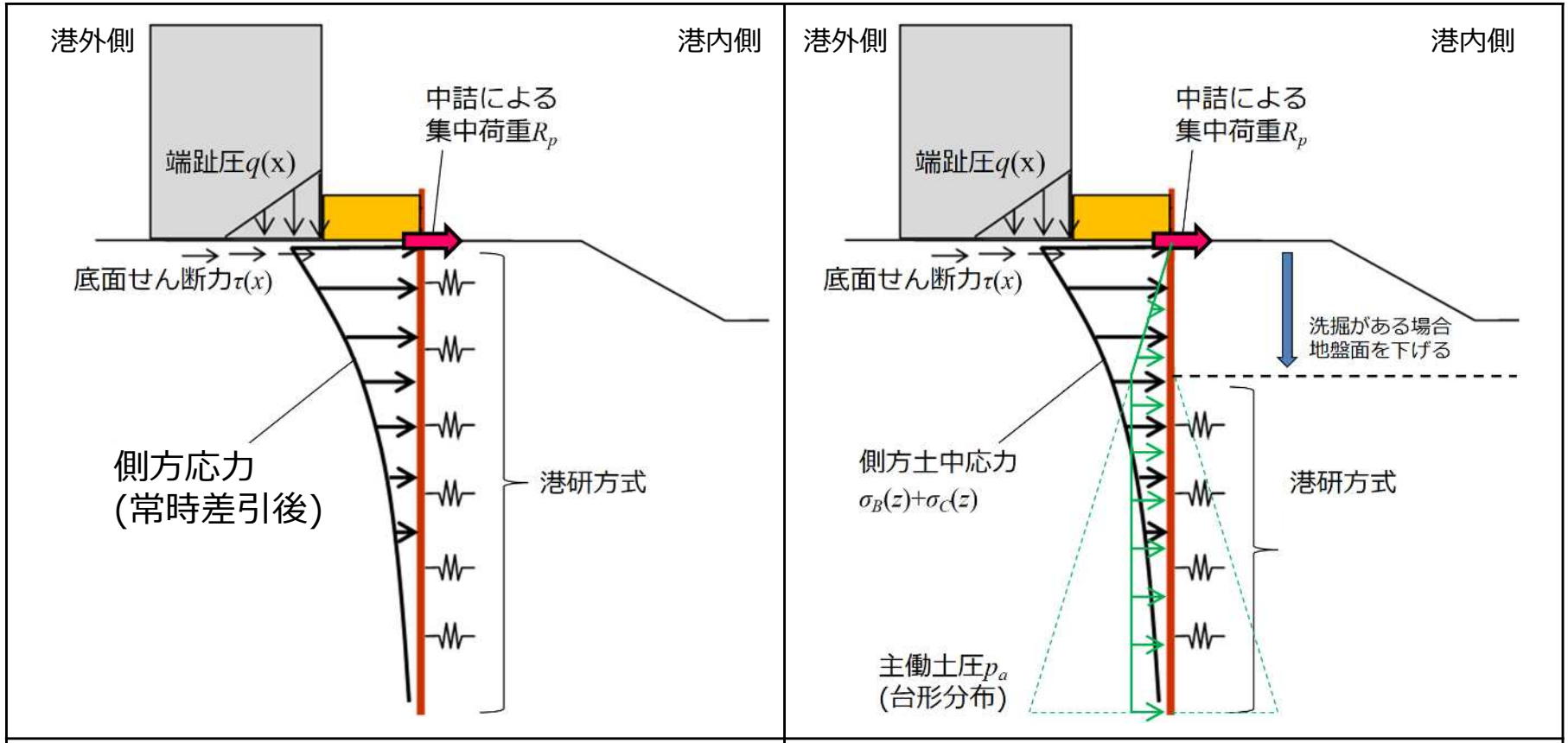
■杭方式/簡易設計

◆杭断面の応力度照査

•港外側からは側方応力＋主働土圧＋杭頭作用力R_p(＝R_7)，港内側からは地盤反力ﾊﾞﾈ(港研方式)を適用し，梁-ﾊﾞﾈﾓﾃﾞﾙによるﾌﾚｰﾑ解析を実施する

•基本断面の設定時には許容応力度は**降伏ﾓｰﾒﾝﾄ**まで用いてもよいこととしている

※粘り強さの確認の際は**全塑性ﾓｰﾒﾝﾄに達していないこと**を確認する



© 2021 NIPPON STEEL CORPORATION All Rights Reserved.