

係留施設の耐震対策および 地震後の使用可否判断

小濱 英司

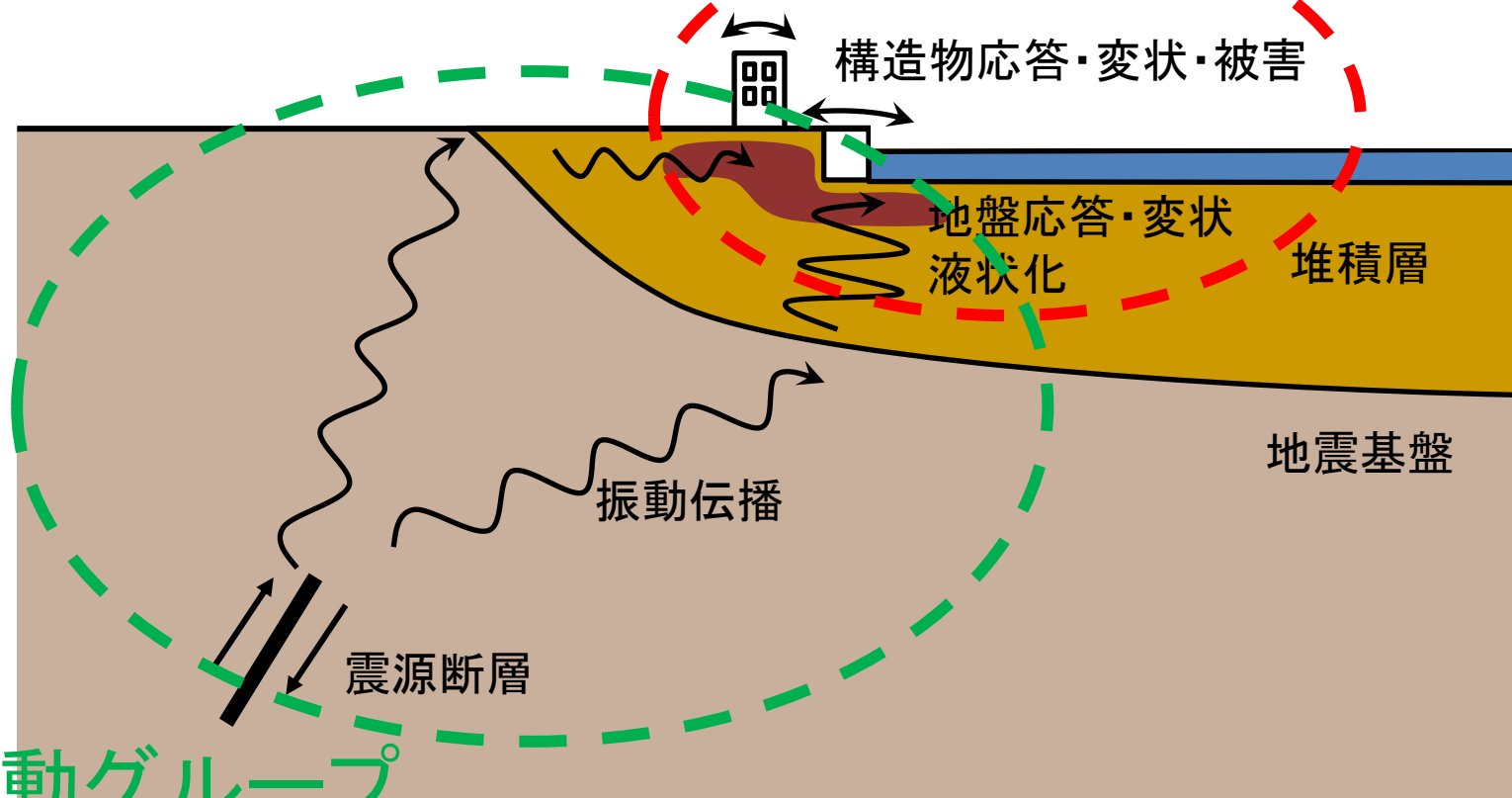
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所
地震防災研究領域 耐震構造研究グループ

港空研 地震防災領域の研究範囲

地震の発生から構造物応答・被害まで

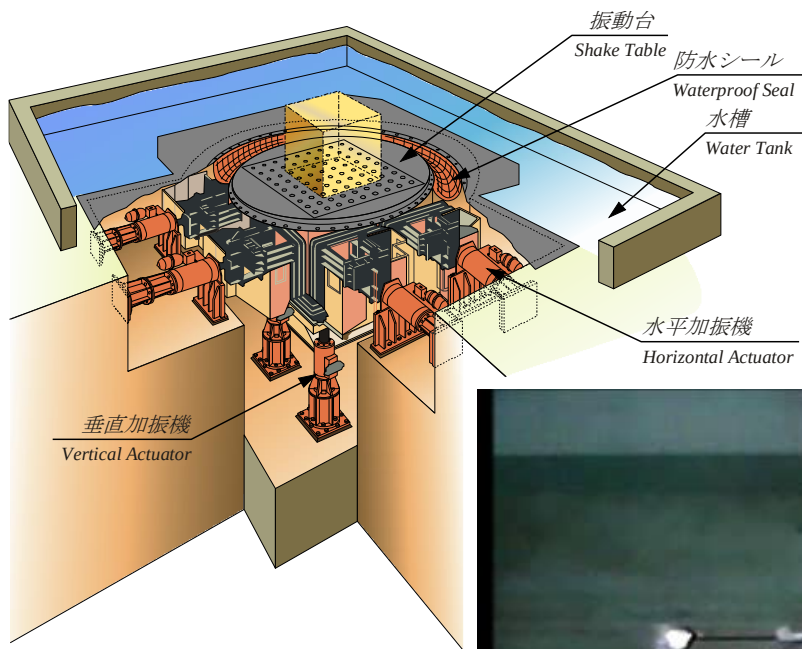
- 断層運動(地震発生)
- 振動伝播
- 地盤応答, 変状, 液状化
- 構造物応答, 変状, 被害

耐震構造グループ



地震動グループ

• 三次元水中振動台



- 港湾施設の地震時挙動、被災メカニズム解明
 - 岩ズリを用いた岸壁の被害
- 耐震性能照査手法、技術基準対応
 - 耐震性能照査時の鋼管杭のモデル化
 - 岸壁増深改良時の地震応答解析
 - 矢板構造による重力式岸壁の増深改良時の既設構造及び築堤過程省略の影響検討
- 港湾構造物の耐震対策
 - 制振部材を用いた栈橋の改良
- 地震後の港湾係留施設の利用可否判断
 - RTK-GNSSによる地震後岸壁変形量計測ツール, 利用可否判断
 - 強震観測情報を用いた利用可否判断

岩ズリを用いた岸壁の沈下被害(2011年東北地方太平洋沖地震)

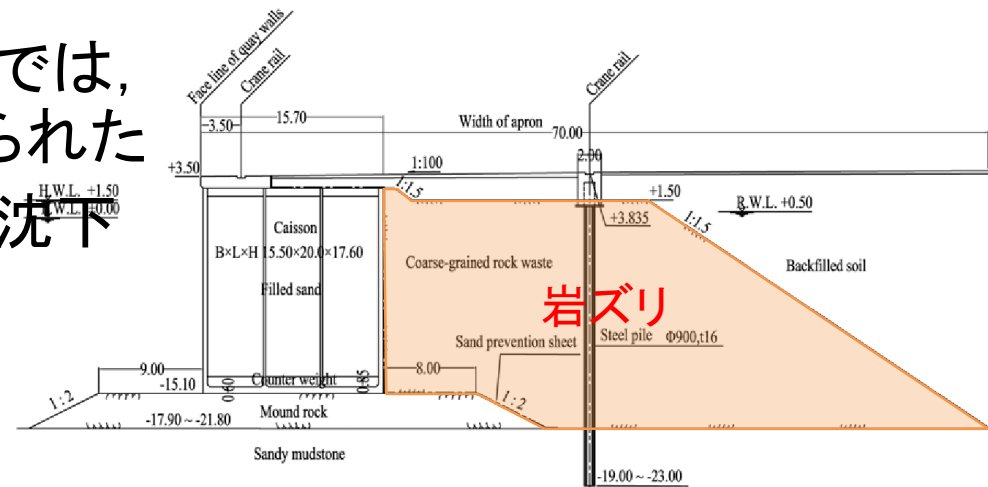


仙台塩釜港



常陸那珂港

- 2011年東北地方太平洋沖地震では、岸壁背後で沈下する被害が見られた
- 岸壁の水平変位 < 背後地盤の沈下
過去の多くの地震被害
水平変位 ≥ 沈下
- “岩ズリ”で埋め立て

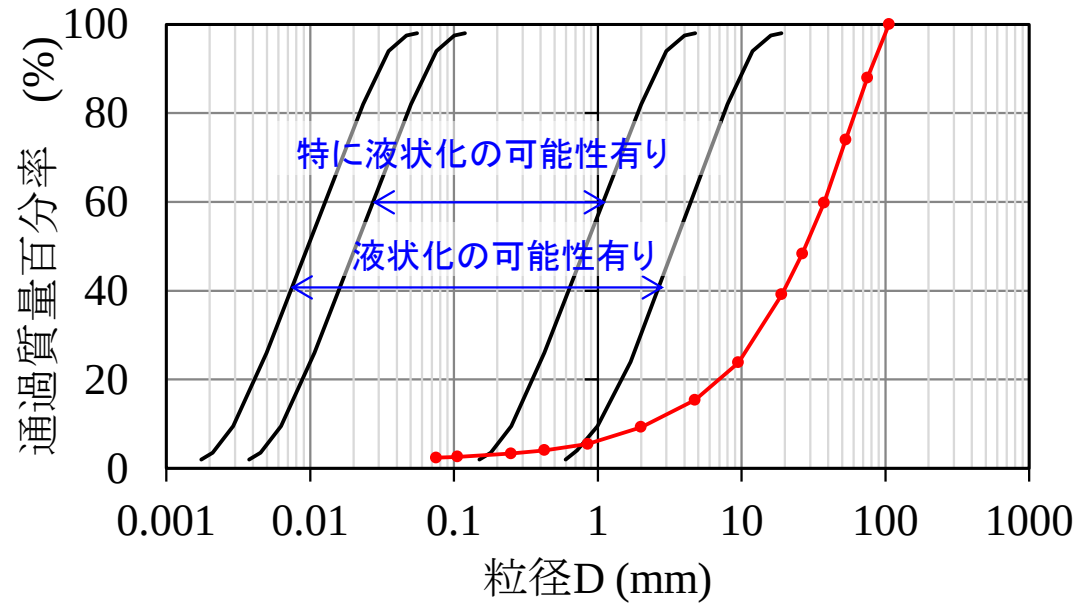


研究目的



岩ズリ

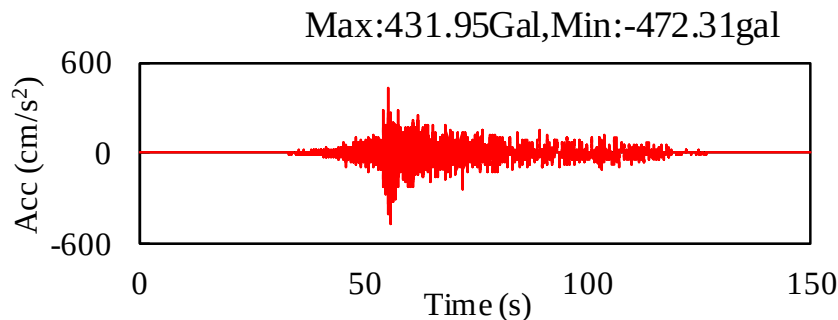
- 石材生成, 建設工事で発生する副産物
- 排水性が良いので液状化しない
- 埋立造成時に緩詰の可能性



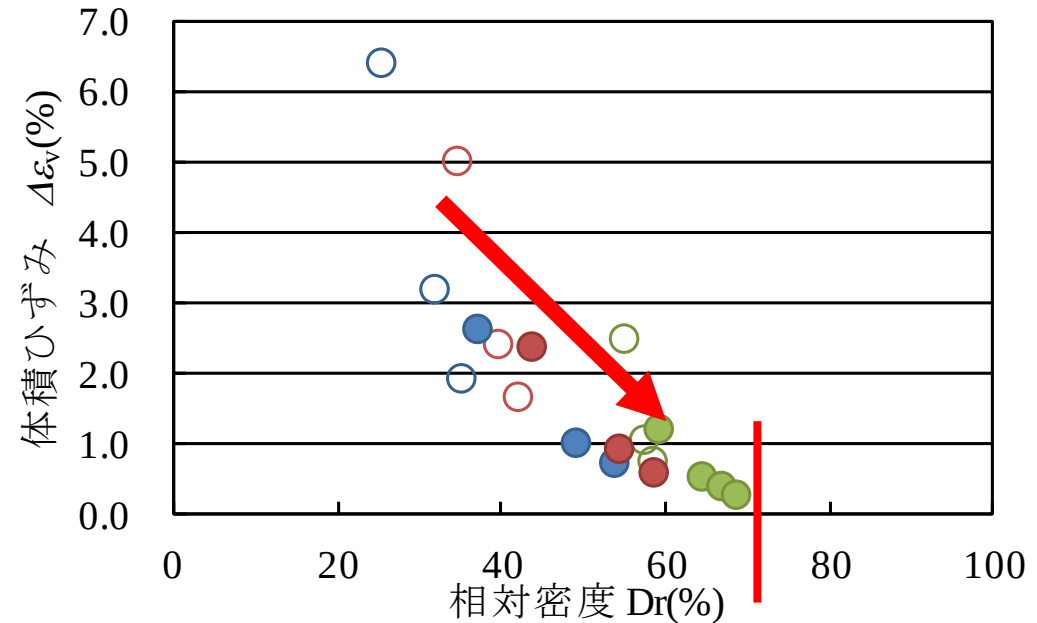
- 動的作用による岩ズリの体積圧縮特性の把握
- 岸壁構造の安定性に与える影響
- 数値解析の適用性確認

岩ズリの体積収縮特性

せん断土槽 (三次元水中振動台)



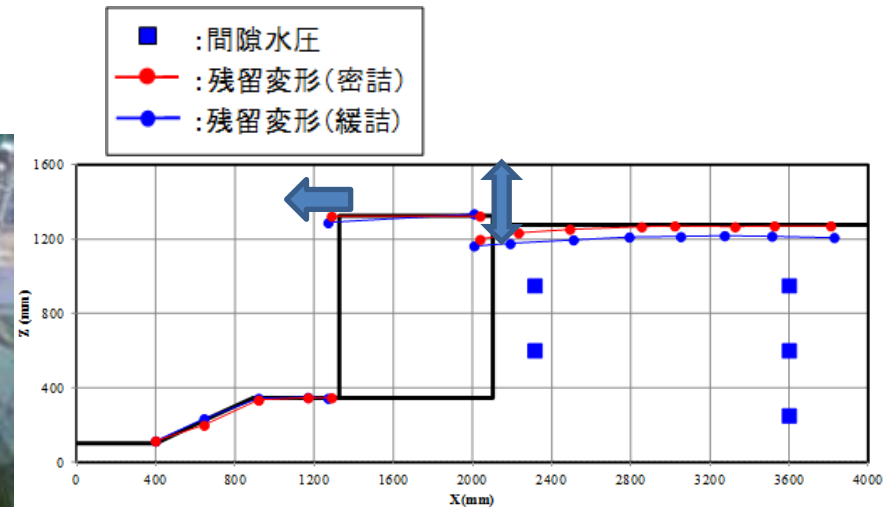
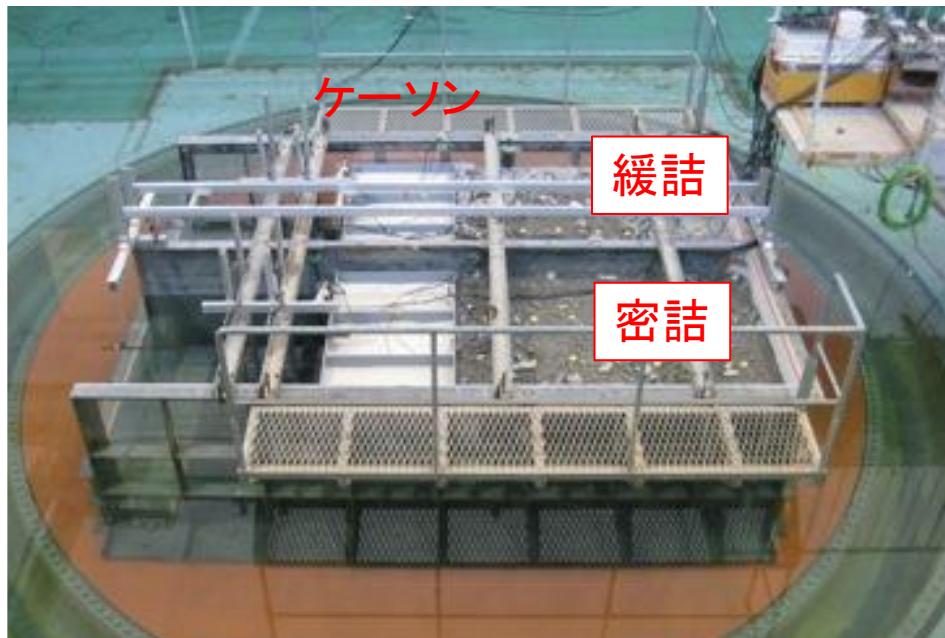
○case1(相似則波) ○case2(相似則波) ○case3(相似則波)
●case1(原寸波) ●case2(原寸波) ●case3(原寸波)



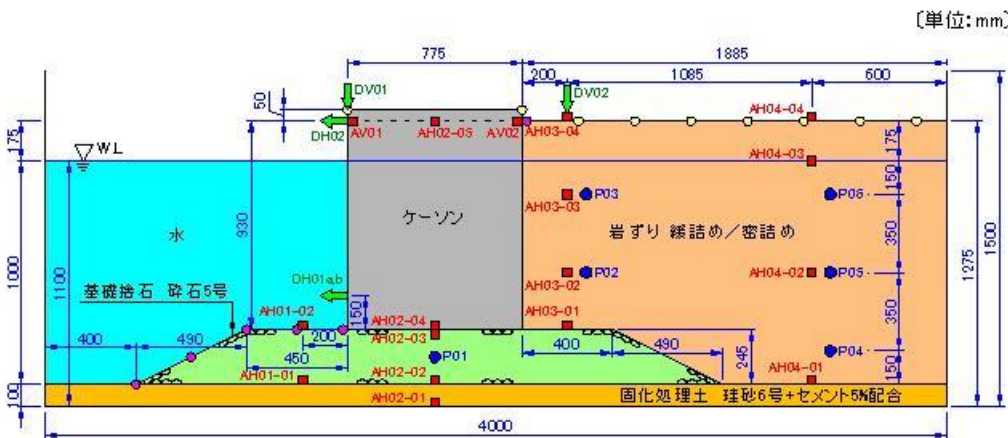
70%

- 岩ズリ密度が小さいとき, 体積収縮量が大きい
- 相対密度70%以上では体積圧縮しない

岩ずりを用いた岸壁の挙動の研究



	水平変位	背後の段差
調査報告	0.5m程度	最大1.33m
緩詰	0.58m	1.25m
密詰	0.46m	0.58m



過剰間隙水圧比は最大でも0.3程度(液状化しない)

岸壁背後の段差は密度により変わり、緩詰が実被害と整合

数値解析(岩ズリの体積収縮特性)

有効応力解析コードFLIP

- マルチスプリング要素(基礎捨石, 固化処理土)

地震動の短い時間では土骨格からの間隙水の流出入は発生しないと過程した非排水条件下の解析。実務での適用事例多数。

- カクテルグラス要素(岩ズリ)

土骨格からの間隙水の流出入を考慮し, 過剰間隙水圧の消散や土骨格の体積収縮を表現可能

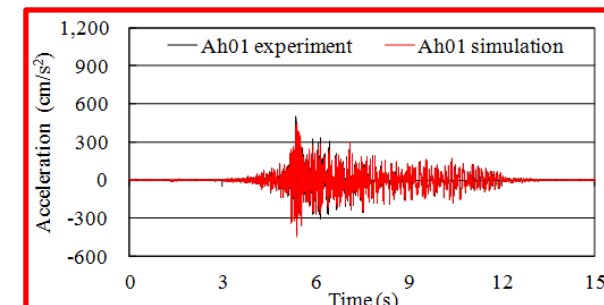
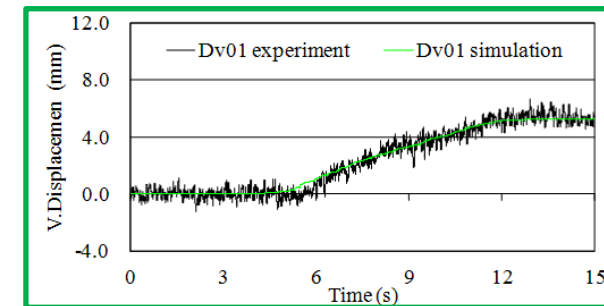
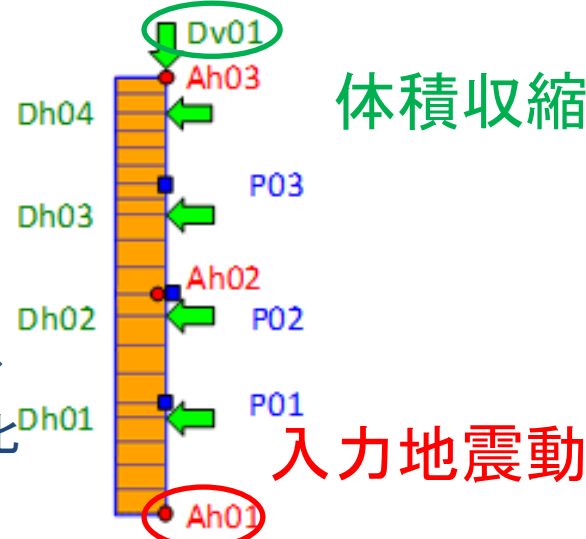
パラメータ		岩ズリ
密度	$\rho_{\text{sat}}(\text{t/m}^3)$	1.74
基準拘束圧	$\sigma'_{\text{ma}}(\text{kN/m}^2)$	3.530
せん断弾性係数	$G_{\text{ma}}(\text{kN/m}^2)$	2980
体積弾性係数	$K_{\text{U/La}}(\text{kN/m}^2)$	7772
ポアソン比	ν	0.33
間隙率	n	0.38
せん断抵抗角	$\phi_f(\text{deg})$	39
粘着力	$c(\text{kN/m}^2)$	0
最大減衰定数	h_{max}	0.24
体積弾性係数(間隙水)	$K_f(\text{kN/m}^2)$	2200000

パラメータ	$-\varepsilon_d^{\text{cm}}$	$q1$	$q2$	γ_k''	l_k	γ_k	$c1$	$\gamma_{\varepsilon d}$	$\gamma_{\varepsilon d}^c$
設定値	0.13	1.00	0.00	0.00	2.00	0.50	1.00	0.08	0.5

せん断土槽振動実験のシミュレーションより岩ズリのパラメータを決定

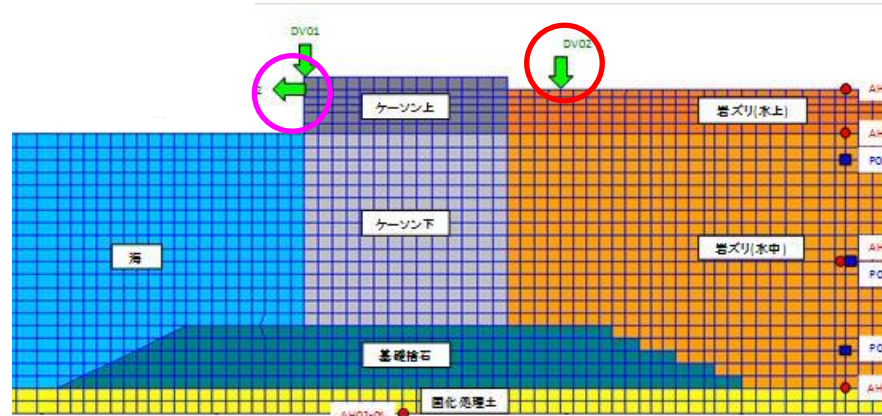


モデル化

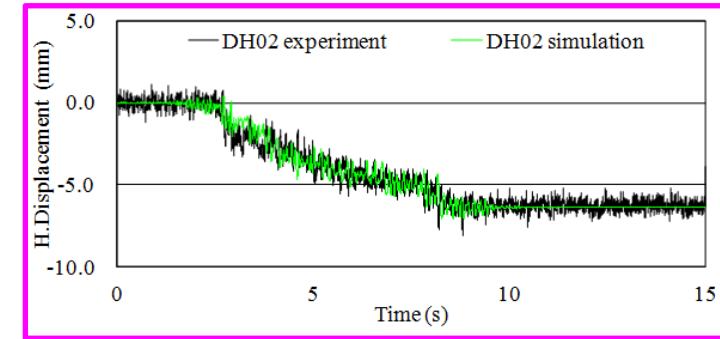


数値解析(ケーソン式岸壁模型実験)

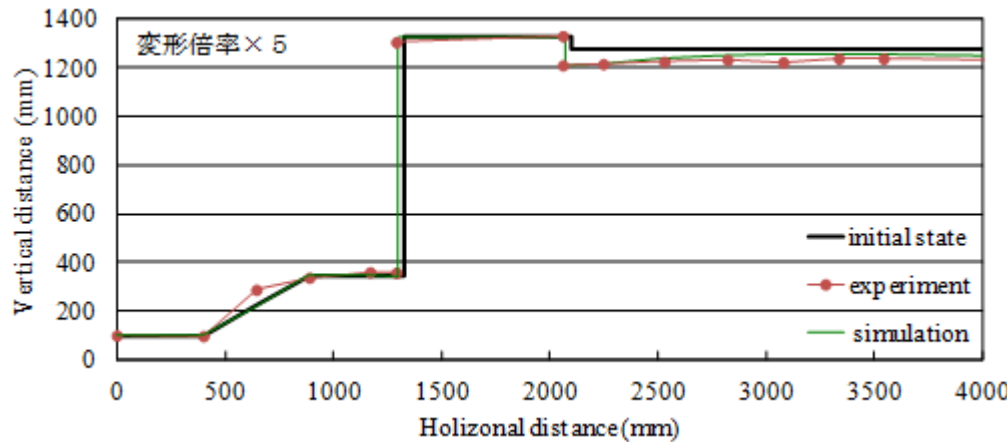
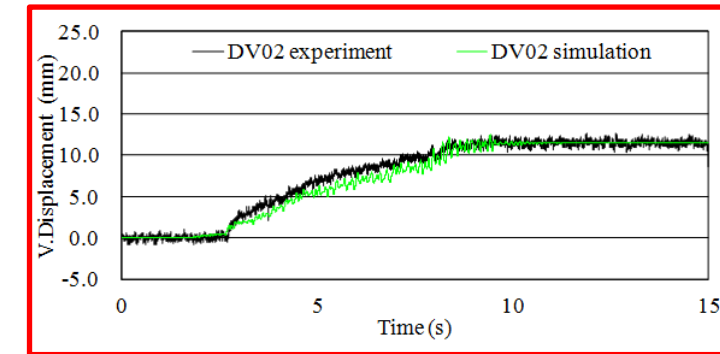
緩詰ケースを対象



ケーソン天端の水平変位



岸壁背後の鉛直変位



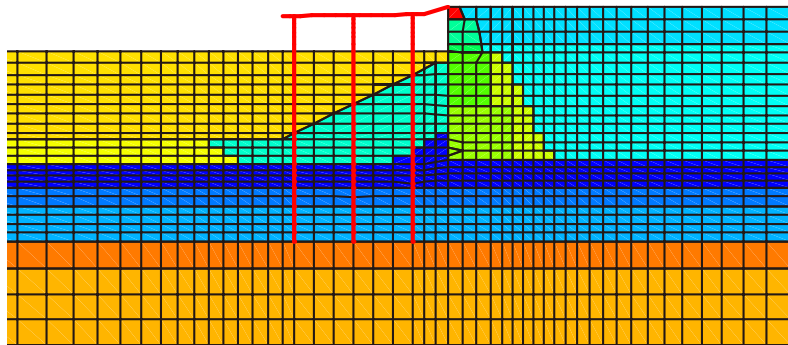
—実験結果 —解析結果

岩ズリ要素をカクテルグラスモデルでモデル化することで、ケーソン天端の水平変位とケーソン背後地盤(岩ズリ部)の鉛直変位を再現

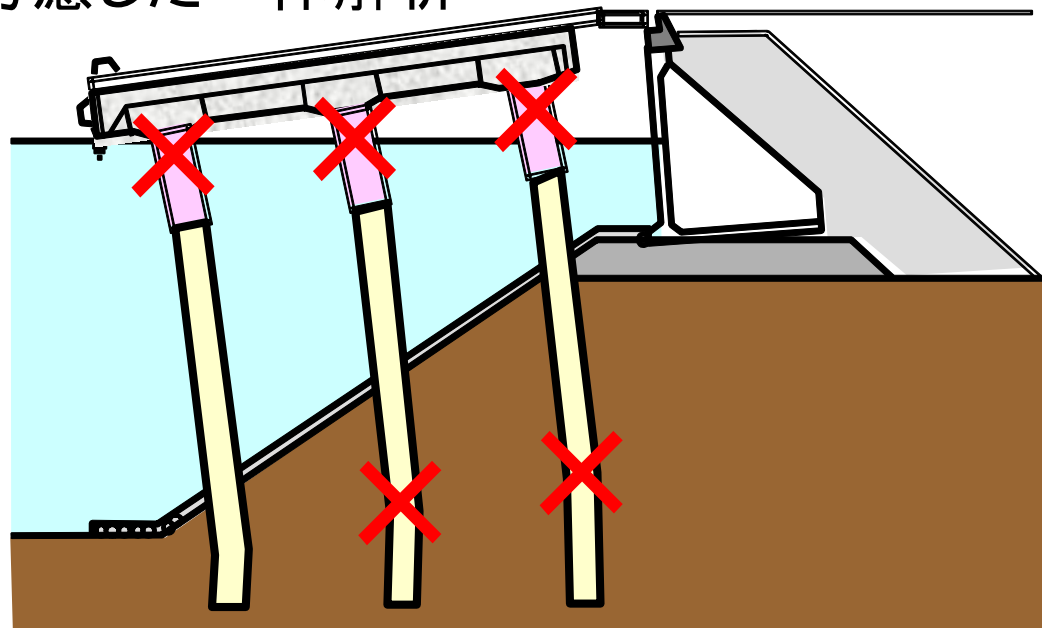
栈橋耐震性能照査時の鋼管杭のモデル化の検討

現行の耐震設計照査手法

- 耐震強化施設の栈橋
鋼管杭: **全塑性モーメント**の個数で照査
- 非線形地震応答解析
 - ✓ サイト特性を考慮したL2地震動
 - ✓ 地盤の液状化を考慮した有効応力解析
 - ✓ 杭－地盤相互作用を考慮した一体解析

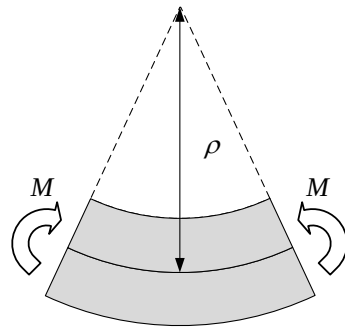


有限要素分割図

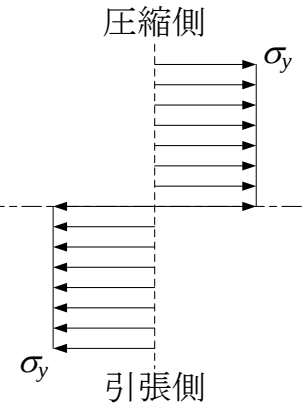
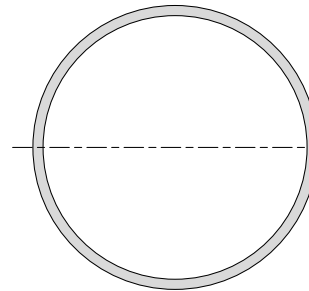


現行法の杭のモデル化法

- 全塑性モーメントの算出方法



M : 曲げモーメント
 ρ : 曲率半径
 ϕ : 曲率 $=1/\rho$



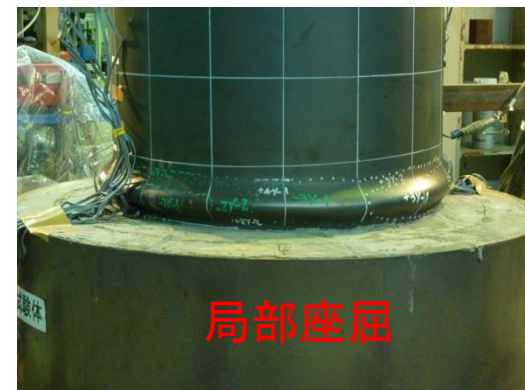
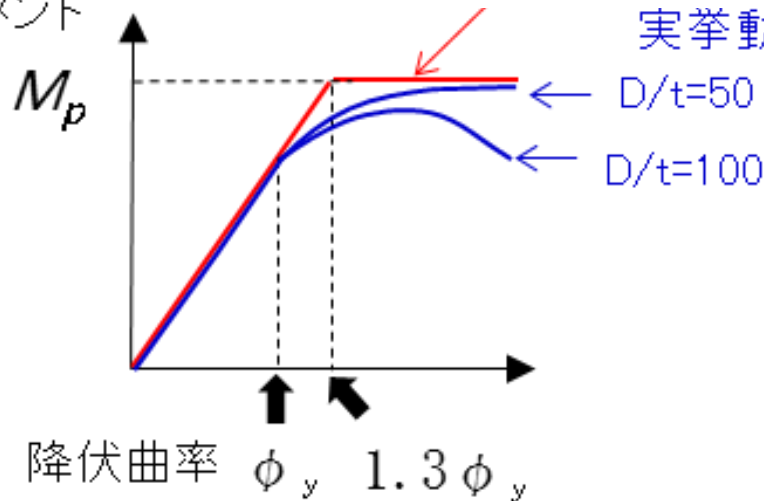
全断面塑性
状態のモーメント

- 杭のモデル化(曲げモーメントー曲率関係, M - ϕ 関係)

全塑性
モーメント

現行法(バイリニア型)

実挙動



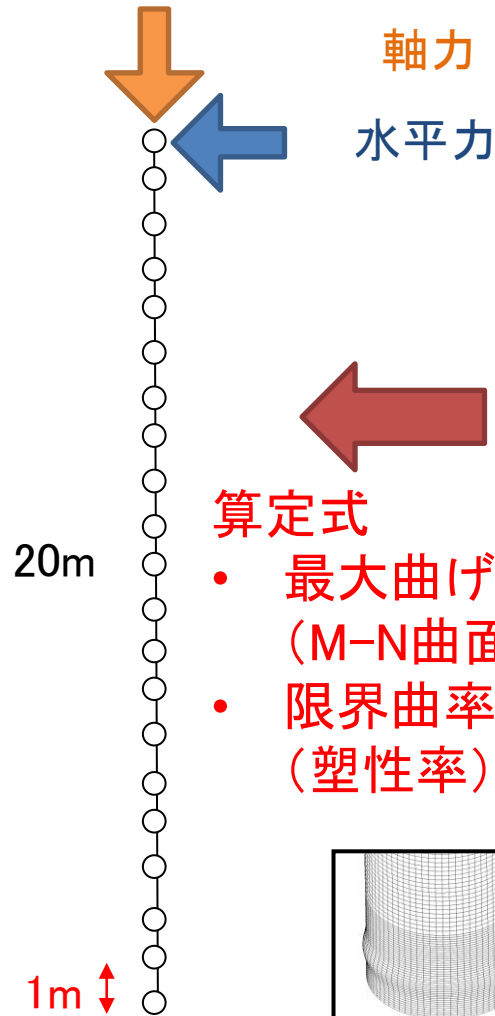
径厚比 D/t 直径 D /板厚 t

局部座屈を考慮した鋼管杭のモデル化法

梁要素解析

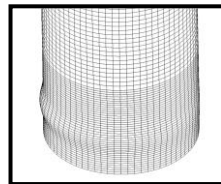
3次元FEM

L2地震に対する実務での照査
を念頭に検討実施



算定式

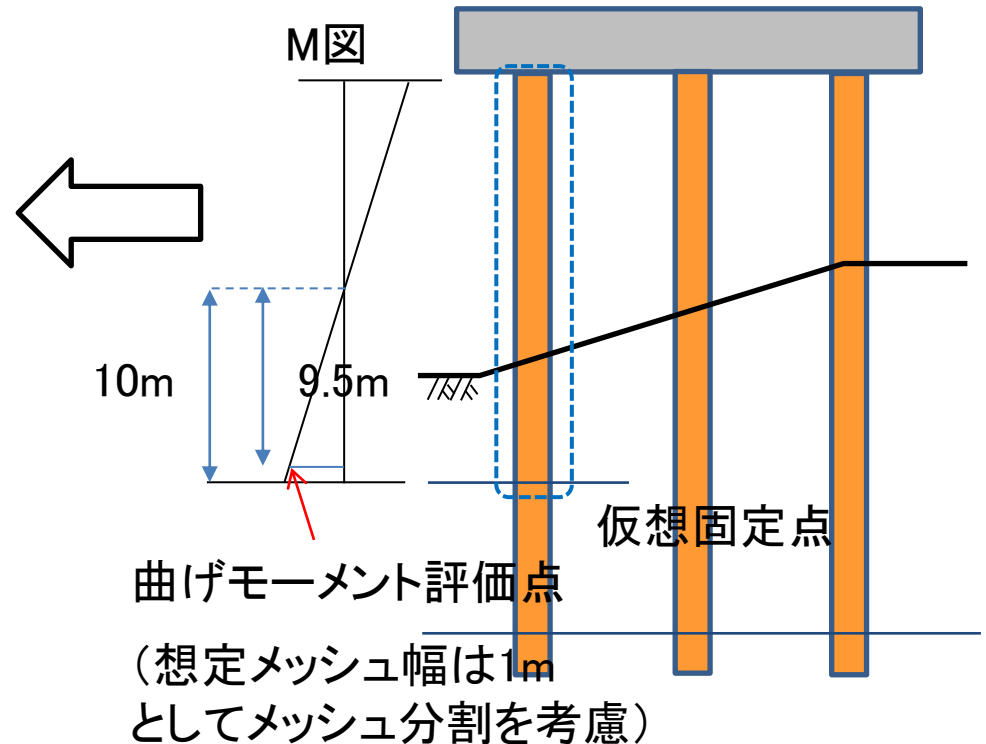
- 最大曲げ耐力 (M-N曲面)
- 限界曲率 (塑性率)



Timoshenkoはり理論
微小変形理論

局部座屈

実際の栈橋をイメージ



仮想固定点

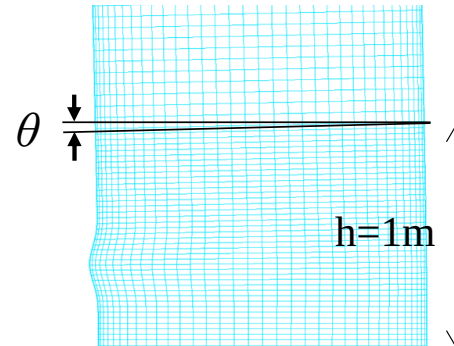
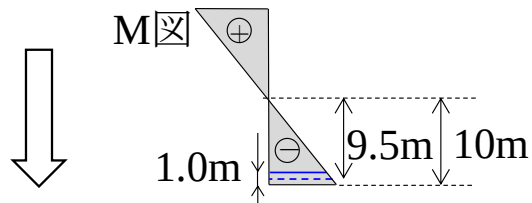
検討フロー

下端（固定点）の
曲げモーメント算出

下端から1m高さまでの
平均曲率算出

補正①

梁要素の積分点高さを
考慮して0.95倍



$$\phi = \theta/h$$

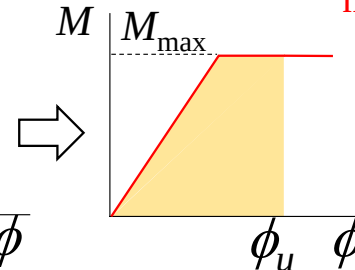
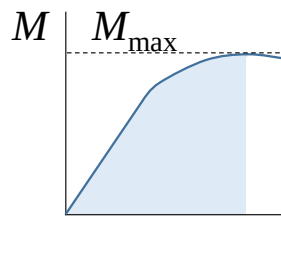
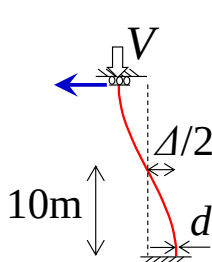
補正②

鉛直力による
付加曲げモーメントを差引く

$$V(\Delta/2-d)$$

Δ : 杭頭水平変位

d : 下端から0.5m高さの水平変位

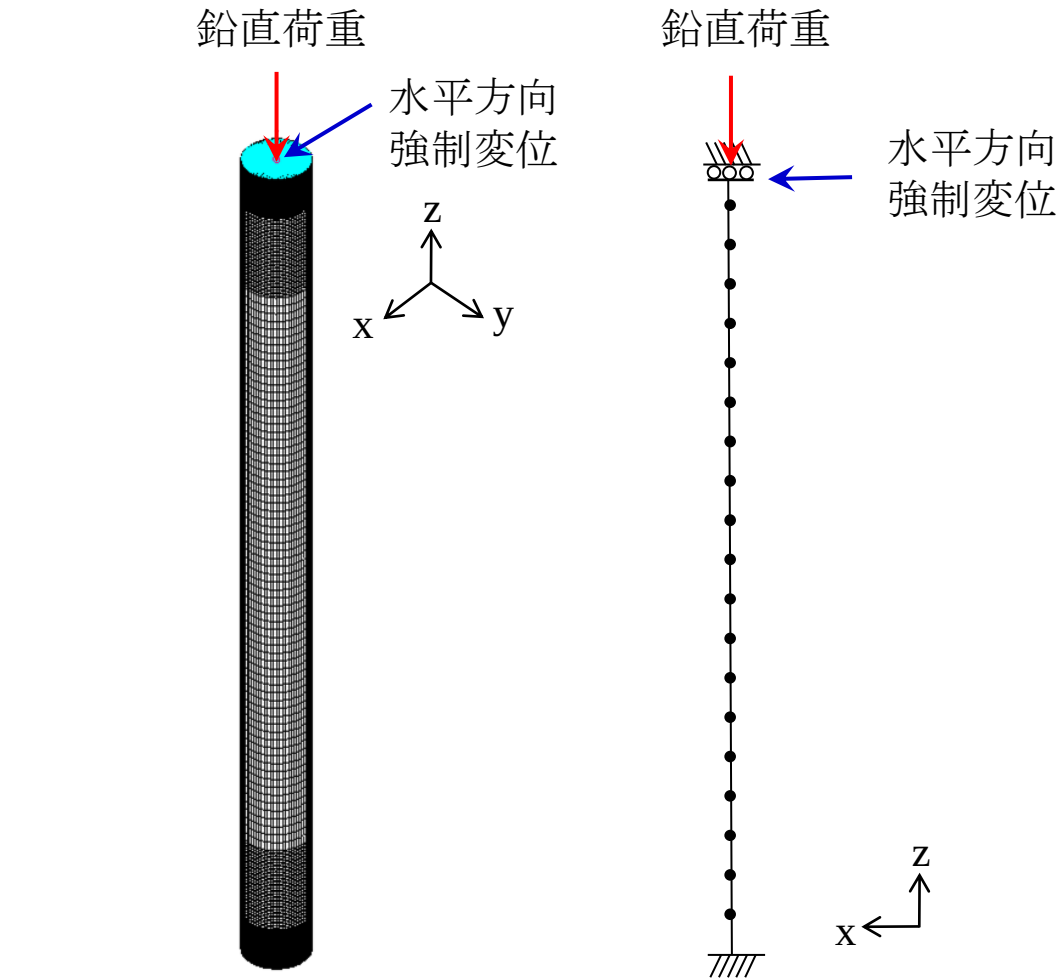


最大曲げ耐力
 $M_{\max}$

限界曲率
 ϕ_u

着色部の面積が等しくなるように ϕ_u を設定

3D-FEMと梁要素解析の比較から 最大曲げ耐力，限界曲率を設定

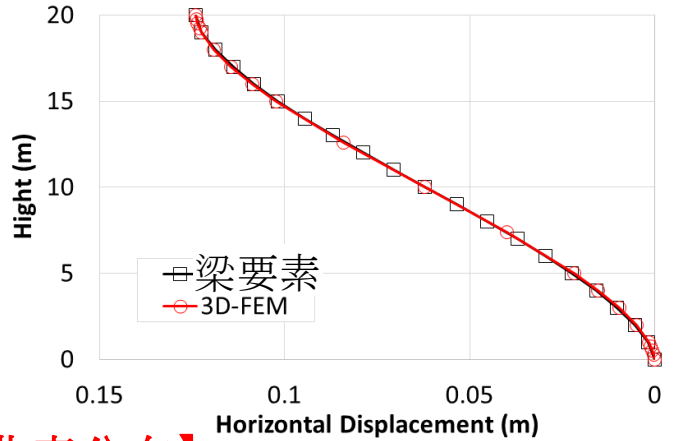


3D-FEM (シェル要素)

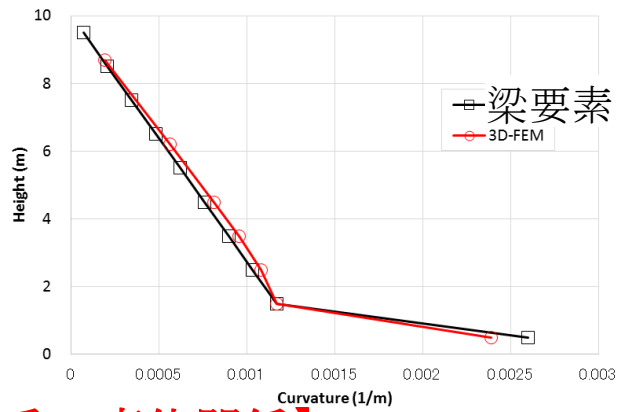
梁要素

M-φモデルはバイリニア型

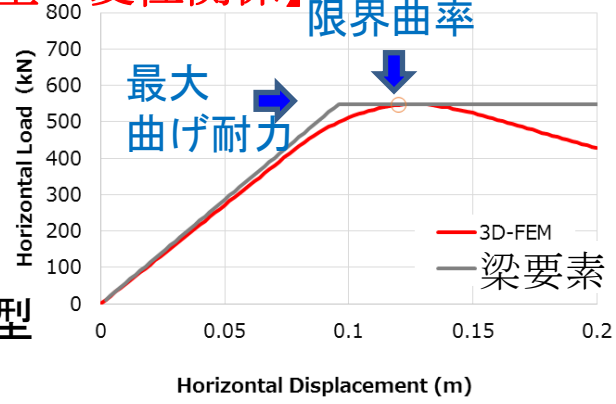
【水平変位分布】



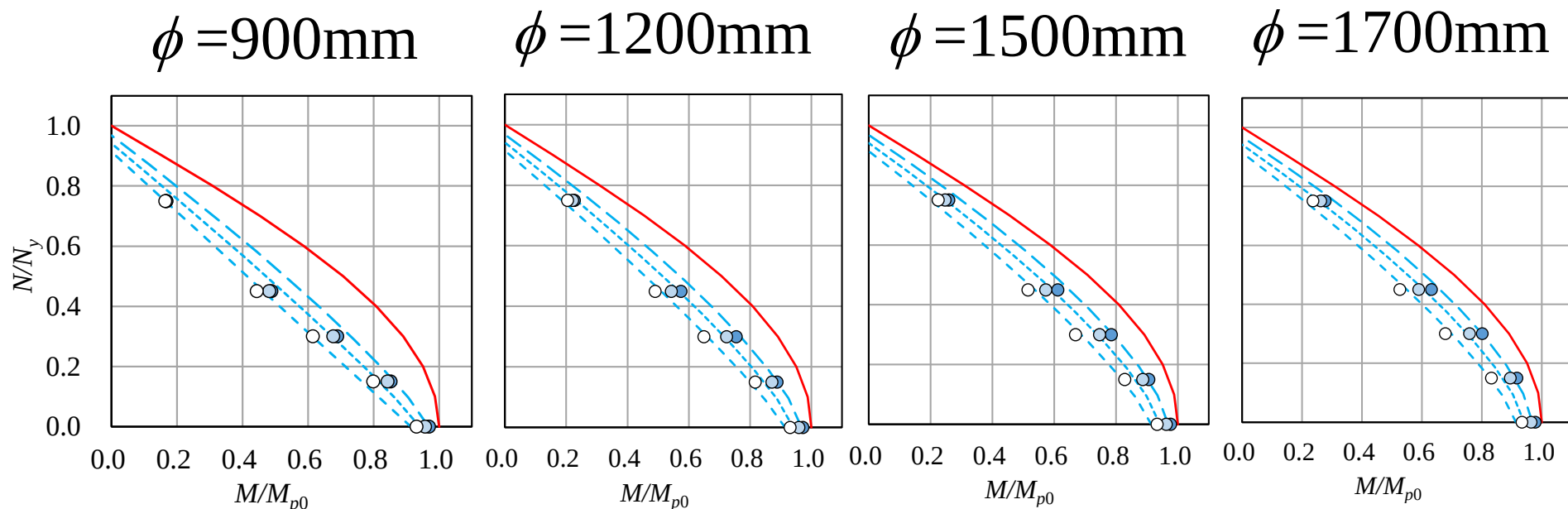
【曲率分布】



【荷重～変位関係】



M-N曲面(耐荷性能)



提案法

———— 全塑性モーメントによる理論式

--- $D/t=50$

--- $D/t=66.7$

--- $D/t=100$

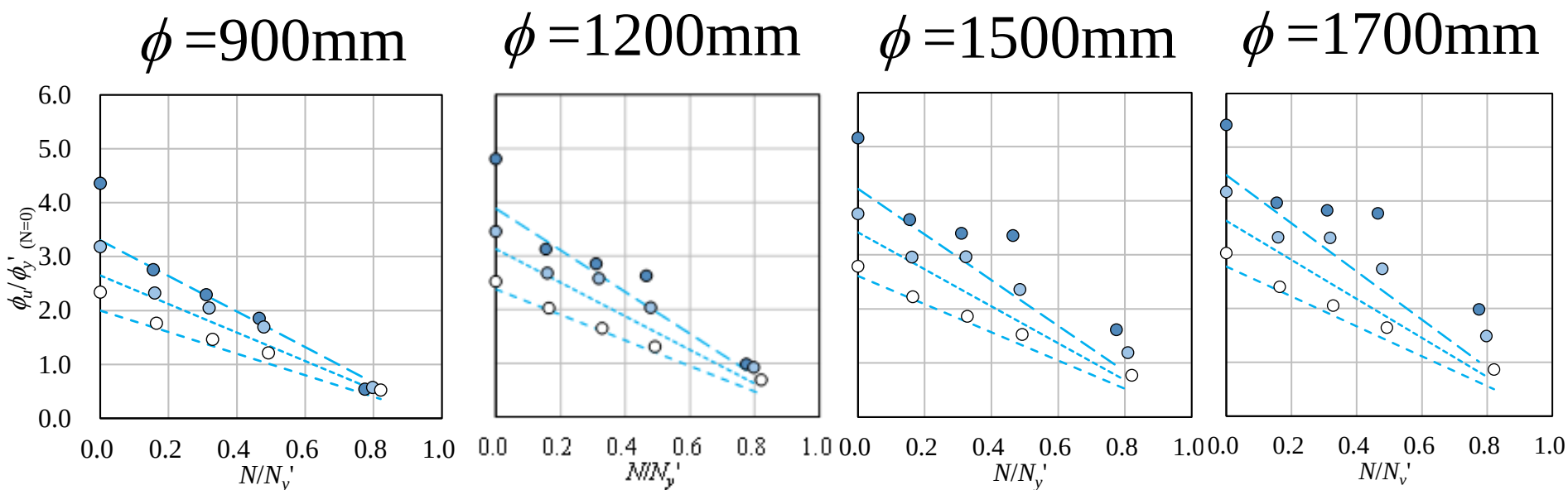
3D-FEM

● $D/t=50$

● $D/t=66.7$

○ $D/t=100$

限界曲率(变形性能)



提案法

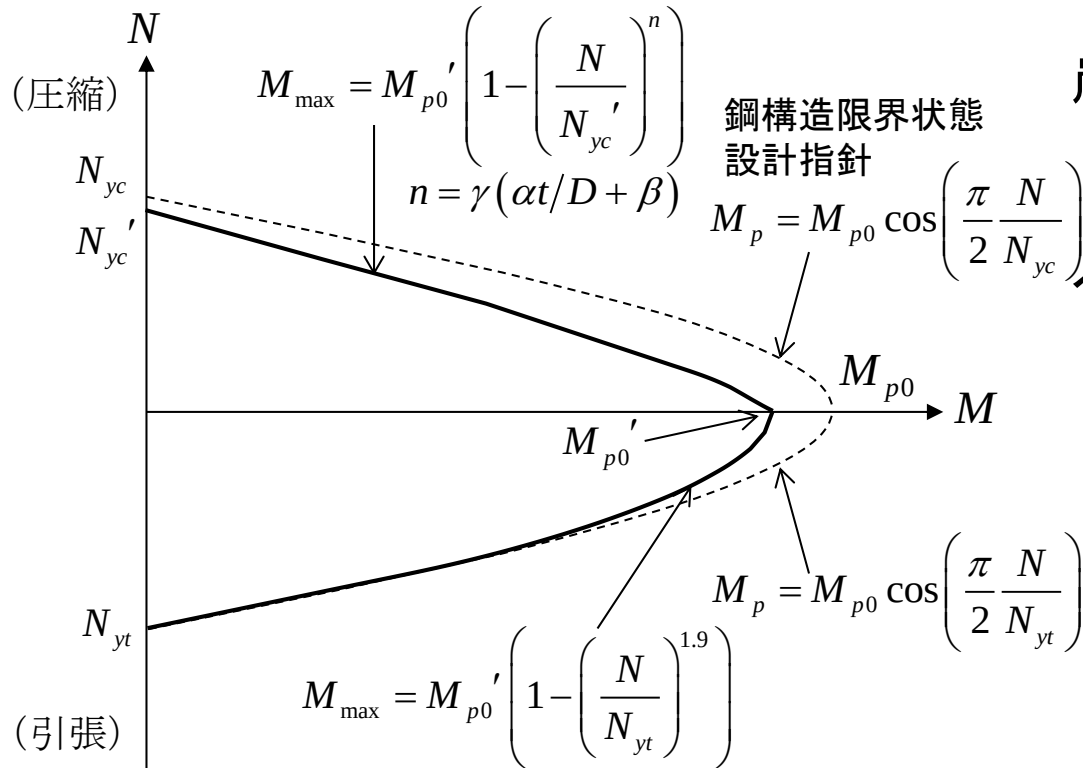
--- $D/t=50$ - - - $D/t=66.7$ - . - $D/t=100$

3D-FEM

● $D/t=50$ ● $D/t=66.7$ ○ $D/t=100$

M-N曲面(耐荷性能)

M-N曲面 ———— 参考 - - - - -



岸田式による低減

$$\sigma_y' = \sigma_y (0.86 + 5.4t/D)$$

べき数 n

【円形保持】

$$n = \gamma (20t/D - 0.0095l/r + 1.41)$$

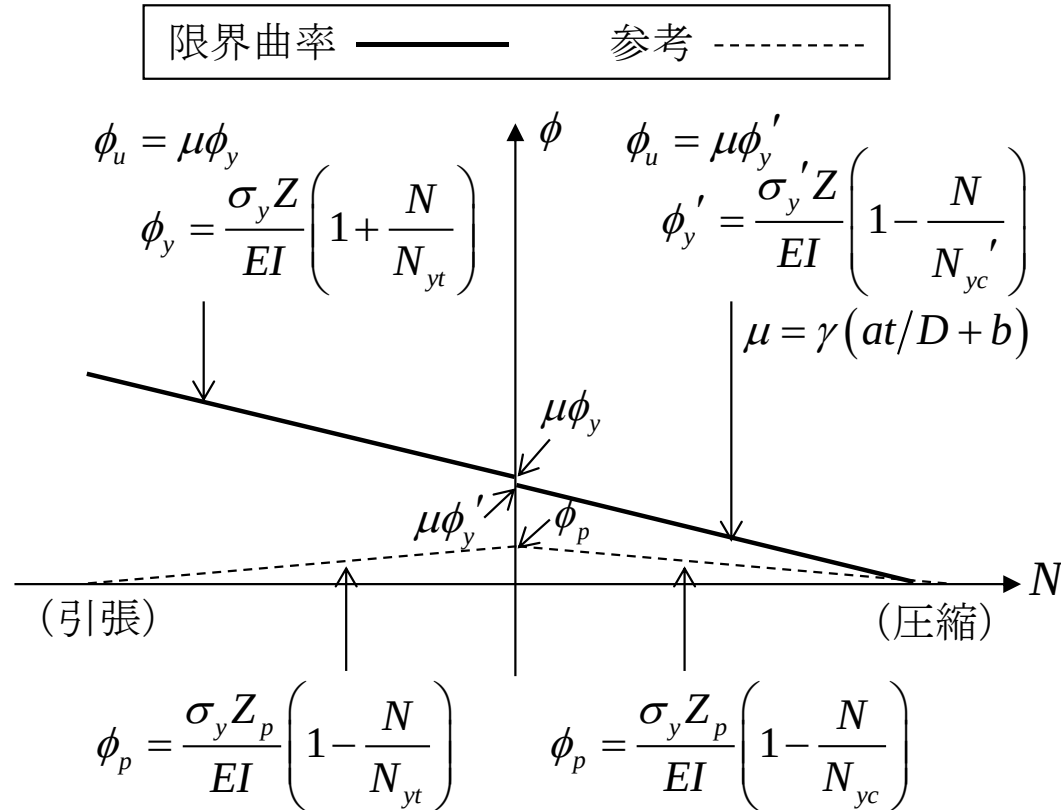
【円形非保持】

$$n = \gamma (10t/D - 0.0094l/r + 1.45)$$

降伏応力補正係数

$$\gamma = \sqrt{235/\sigma_y}$$

限界曲率(変形性能)



塑性率 μ

【円形保持】

$$\mu = \gamma \left((-1.24l/r + 209)t/D - 0.0119l/r + 1.46 \right)$$

降伏応力補正係数

$$\gamma = \sqrt{235/\sigma_y}$$

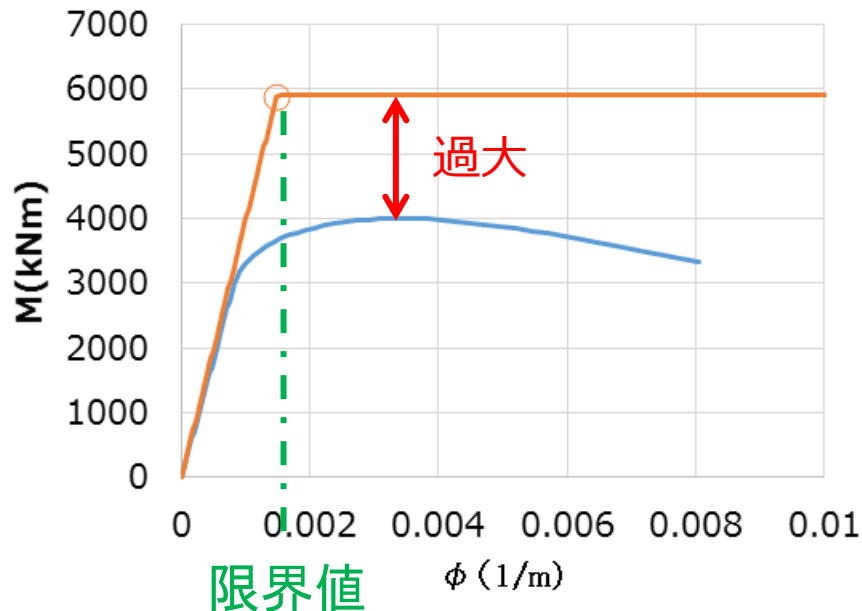
【円形非保持】

$$\mu = \gamma \left((-4.72l/r + 440)t/D + 0.0413l/r - 2.55 \right)$$

現行法と提案法の比較

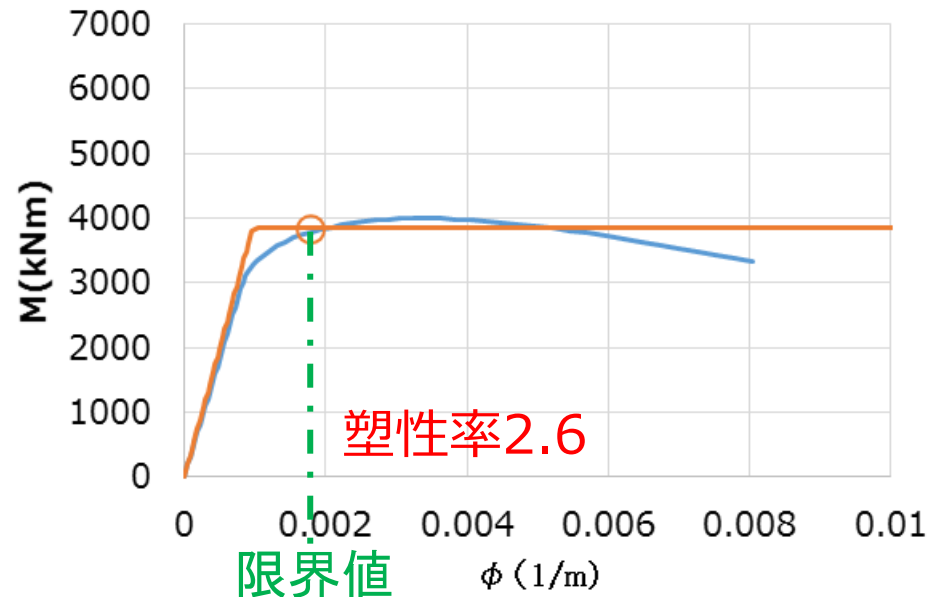
$\Phi 1500t15$ ($D/t=100$) , $N/N_y=0.45$, 円形保持
大径厚比, 高軸力比

現行法



全塑性モーメント（従来法）
による危険側評価が排除された

提案法

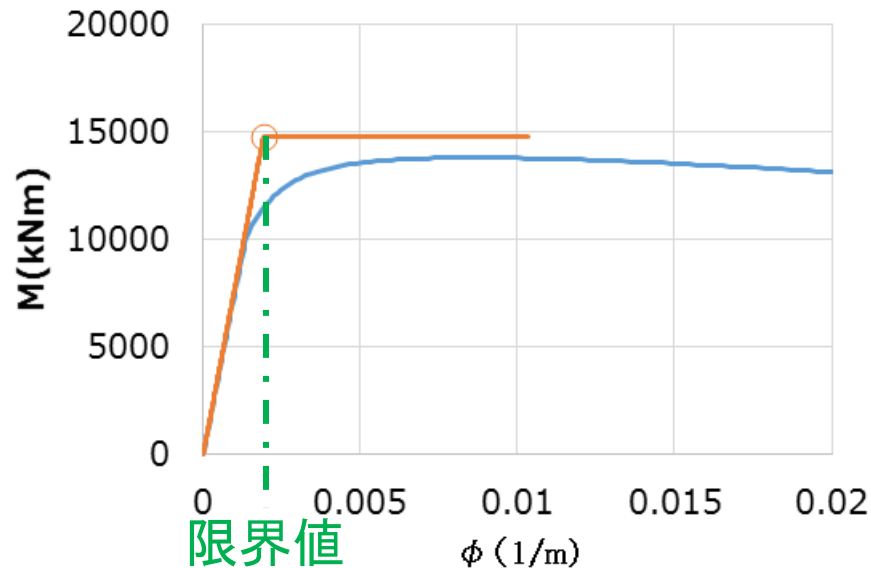


- 3次元FEM (ADINA)
- 梁要素解析 (FLIP)

現行法と提案法の比較

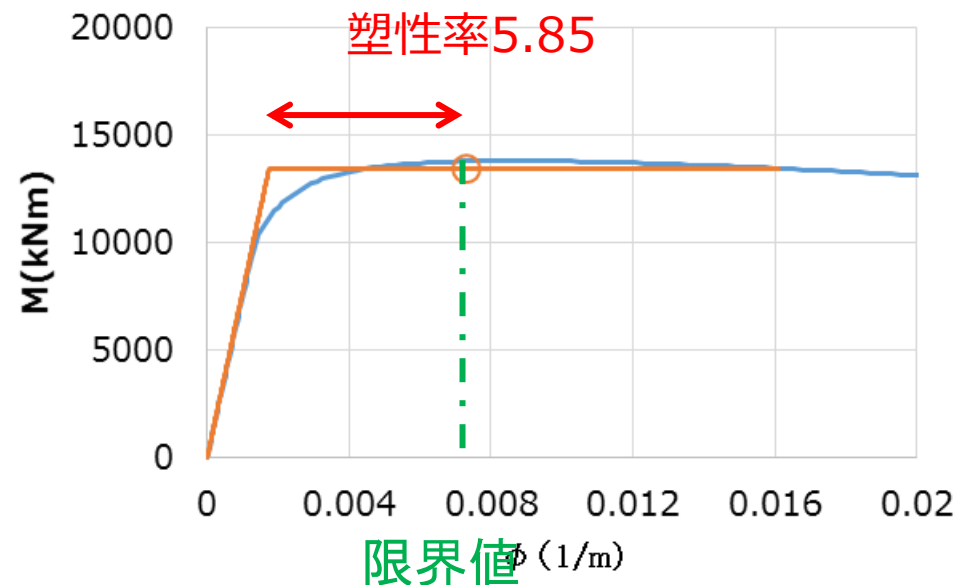
$\Phi 1500t30$ ($D/t=50$) , $N/N_y=0.15$, 円形保持
小径厚比, 低軸力比

現行法



変形性能が評価可能となった

提案法

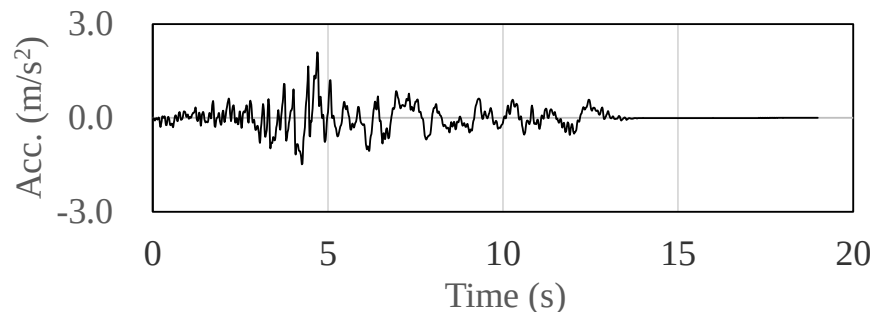


- 3次元FEM (ADINA)
- 梁要素解析 (FLIP)

実務設計への影響検討(現行法との比較)

- 現行法で, L2地震の要求性能を満足する鋼管杭諸元
(地中部で全塑性モーメントが発生しない)を設定
→地震動の振幅を調整
- この断面で提案法に変更した際の, L2地震要求性能を満足するための鋼管杭諸元(地中部で限界曲率が発生しない)を設定し, 差異を確認
→提案法での板厚(または, 降伏応力)の増減を確認

入力地震動



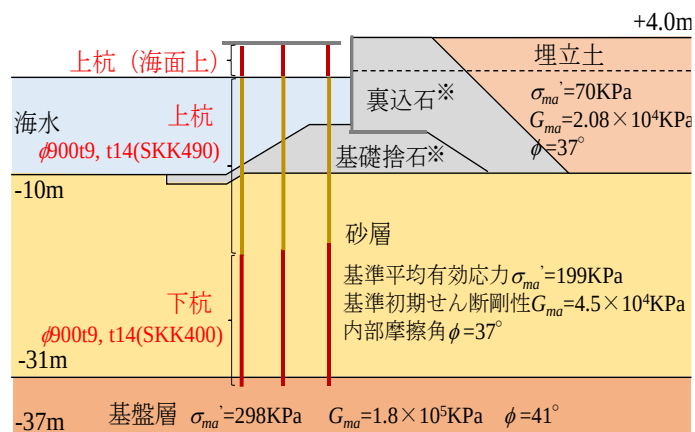
検討断面

検討ケース

	水深	クレーン	入力 加速度 (m/s ²)	最大 軸力比	上杭(海面上) 上杭(海面下)	下杭	径厚比 D/t
Case-P1	-10m	—	4.7	0.17	φ900t9 (SKK490)	φ900t9 (SKK400)	100
Case-P2	-10m	—	5.4	0.16	φ900t14 (SKK490)	φ900t14 (SKK400)	64.3
Case-P3	-13m	あり	4.7	0.44	φ1200t12 (SKK490)	φ1200t12 (SKK400)	100
Case-P4	-13m	あり	5.7	0.32	φ1200t18 (SKK490)	φ1200t18 (SKK400)	66.7

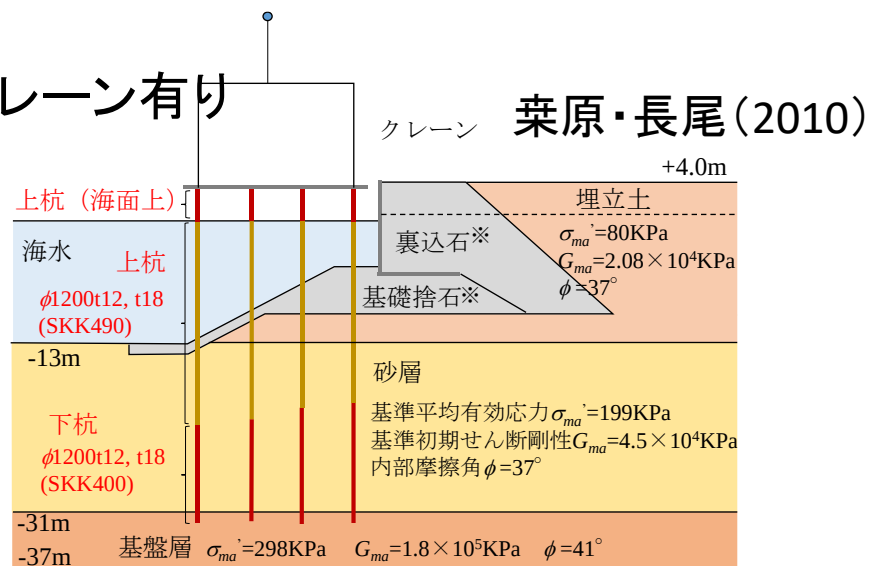
主な地盤定数

-10mクレーン無し



※ 裏込石・基礎捨て石 $\sigma_{ma}' = 98 \text{ KPa}$ $G_{ma} = 1.8 \times 10^5 \text{ KPa}$ $\phi = 40^\circ$

-13mクレーン有り



※ 裏込石・基礎捨て石 $\sigma_{ma}' = 98 \text{ KPa}$ $G_{ma} = 1.8 \times 10^5 \text{ KPa}$ $\phi = 40^\circ$

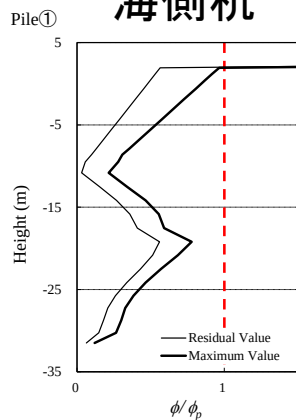
検討結果 (Case-P2)

曲率比分布

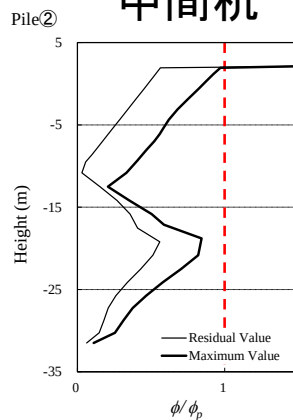
要求性能判断
基準曲率比

現行法t14

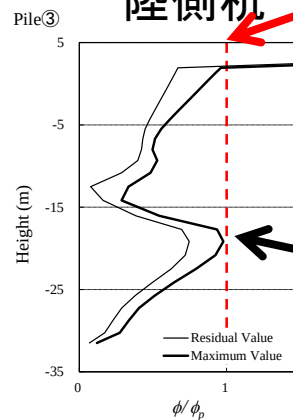
海側杭



中間杭



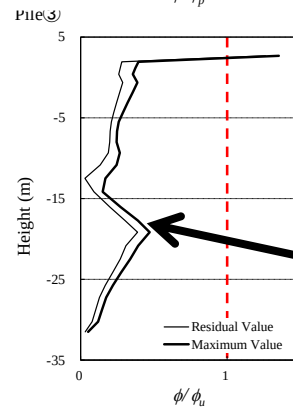
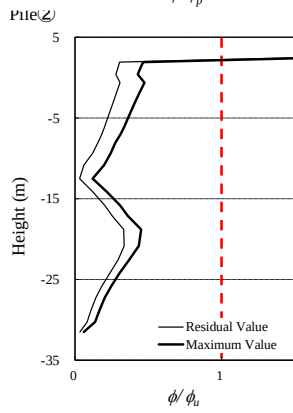
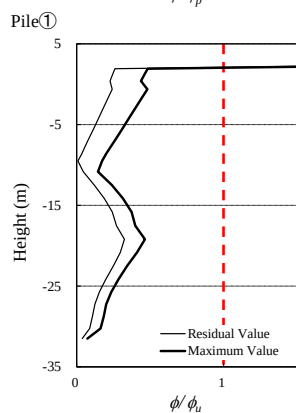
陸側杭



杭頭部は全杭で
限界値を超える

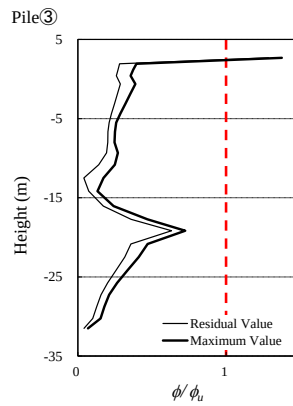
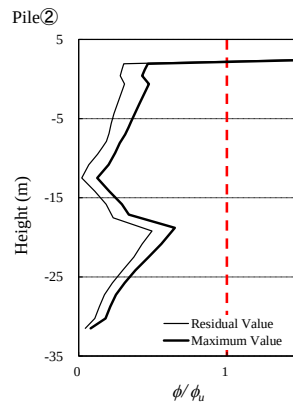
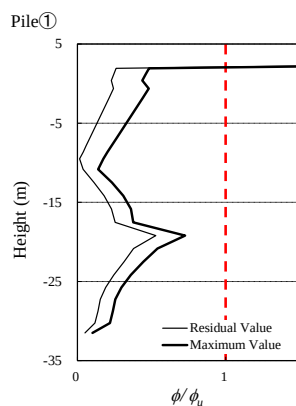
地中部では限界値
の一手前

提案法t14



限界値まで余裕あり

提案法t12



板厚12mmでも余裕あり

検討結果まとめ

地中部ヒンジを発生させないための下杭の諸元

	現行法(下杭)	提案法(下杭)
-10m 3列杭 (軸力比0.18)	$\phi 900t9(400)$ $D/t=100$	$\phi 900t9(400)$ $D/t=100$
(軸力比0.16)	$\phi 900t14(400)$ $D/t=64$	$\phi 900t12(400)$ $D/t=75$
-13m 4列杭 クレーンあり (軸力比0.45)	$\phi 1200t12(400)$ $D/t=100$	$\phi 1200t13(490)$ $D/t=92$
クレーンあり (軸力比0.33)	$\phi 1200t18(400)$ $D/t=67$	$\phi 1200t18(400)$ $D/t=67$

現行法に比べ : 厳しい : 同等 : 余裕

検討結果の傾向

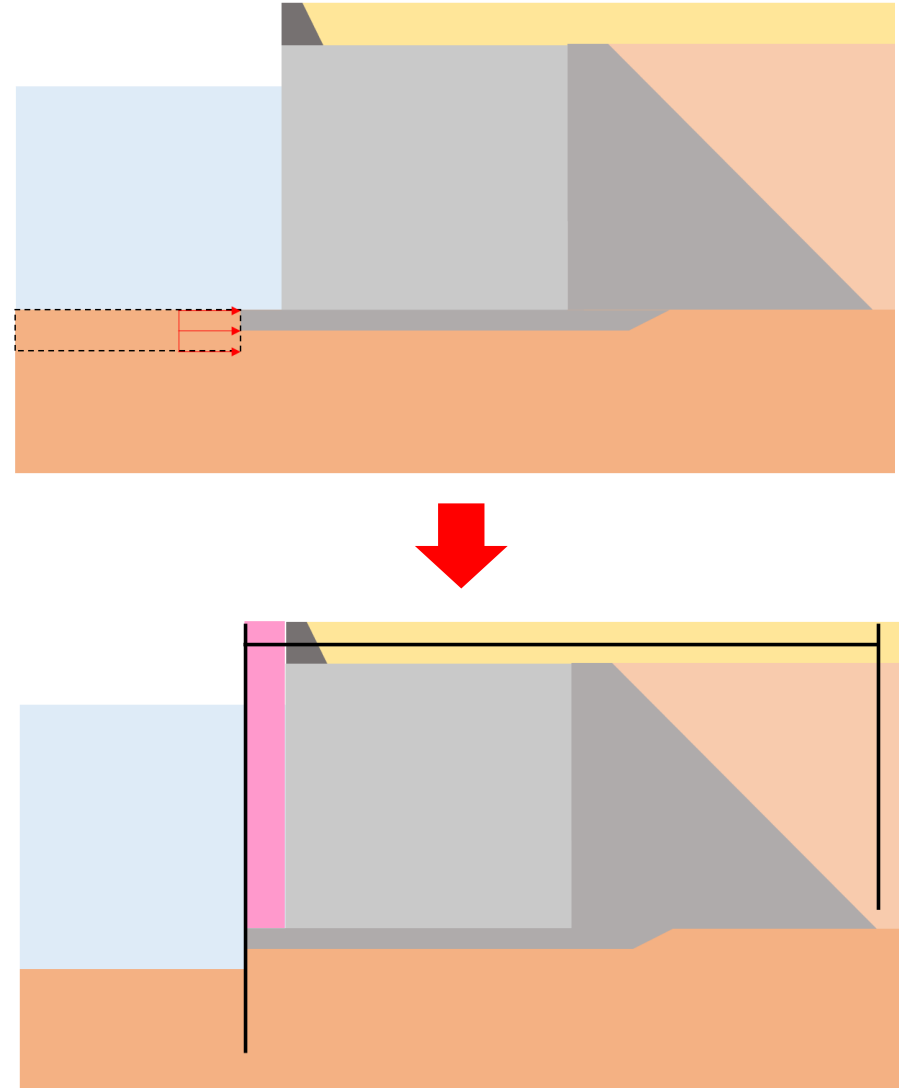
径厚比 D/t が大きい場合: 同等 小さい場合: 余裕

クレーンありの場合: 厳しい

岸壁増深改良時の地震応答解析

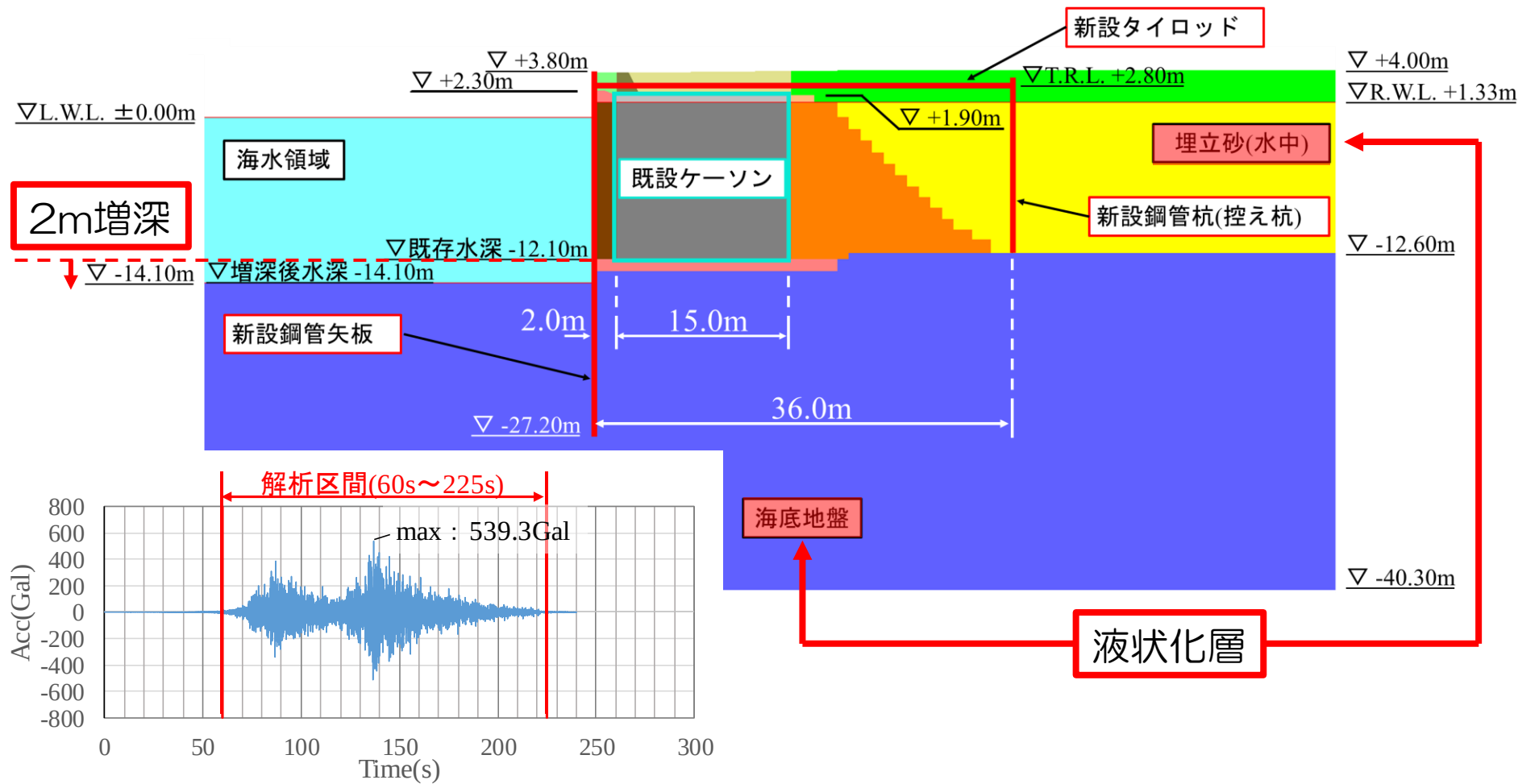
矢板構造による重力式岸壁の増深改良時の既設構造及び築堤過程省略の影響検討

- 近年の船舶大型化において、既存ストックを有効活用するために、既存岸壁の増深改良が増加
- 設計においては、設計作業を簡略化するために既存構造を考慮しないことがある
- 地震応答解析（FLIP）において、既存構造省略の影響は？？？



解析対象（解析モデル）

- 1) 既設の重力式岸壁に
- 2) 覆いかぶせるように控え式鋼管矢板構造を施工
- 3) 新設矢板の前面を2m増深（荷重除荷にて対応）



解析条件（検討ケース）

簡易モデル

詳細モデル

簡易モデル

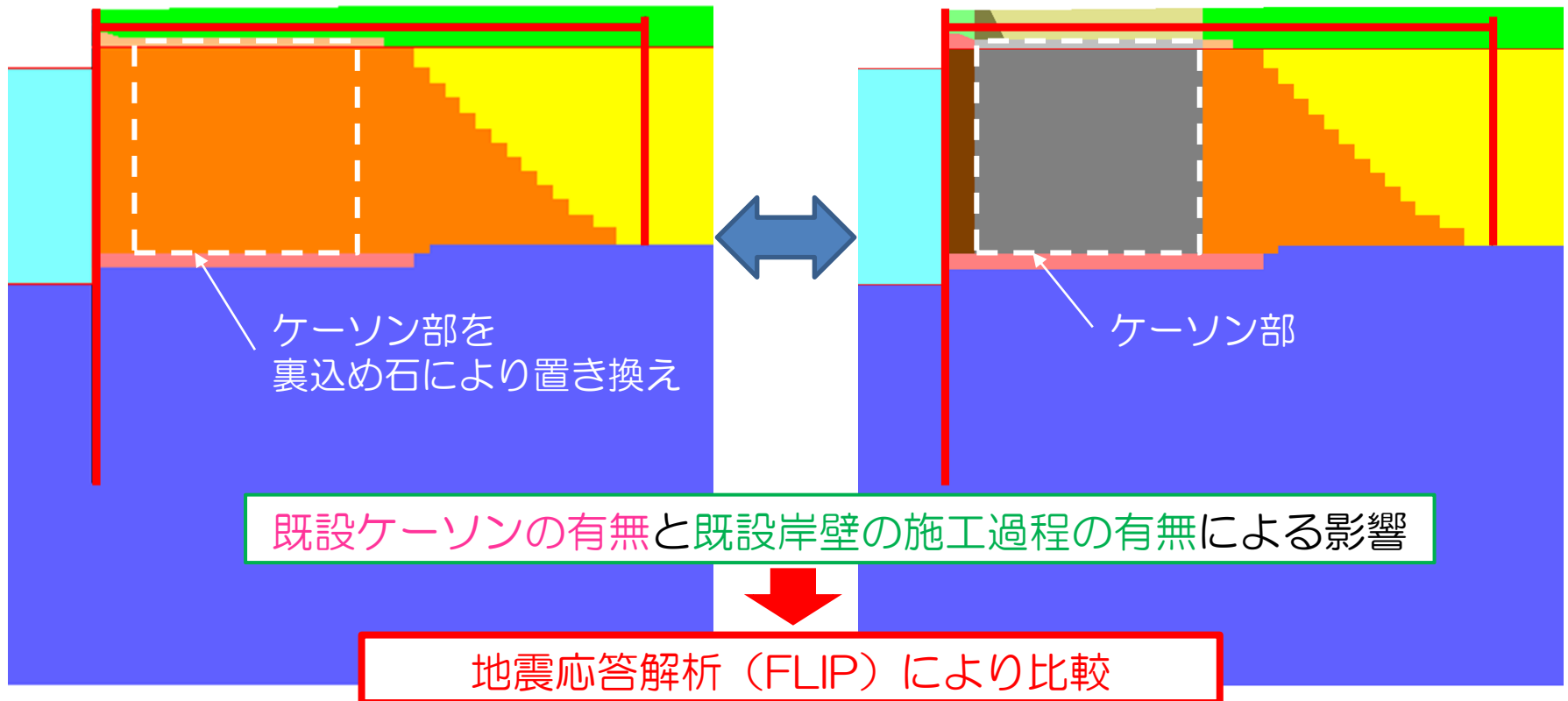
Case	検討内容		Step
	構造物のモデル化	施工過程	
1	新設構造物のみ	すべて考慮	5
2	新設, 既設構造物の両方	すべて考慮	6
3	新設, 既設構造物の両方	一部省略	5

既設ケーソンの有無

既設岸壁の
施工過程の
有無

Case1：新設構造物のみ

Case2・3：新設, 既設構造物



解析条件（解析手順：Case1）

Case	検討内容		Step
	構造物のモデル化	施工過程	
1	新設構造物のみ	すべて考慮	5
2	新設，既設構造物の両方	すべて考慮	6
3	新設，既設構造物の両方	一部省略	5

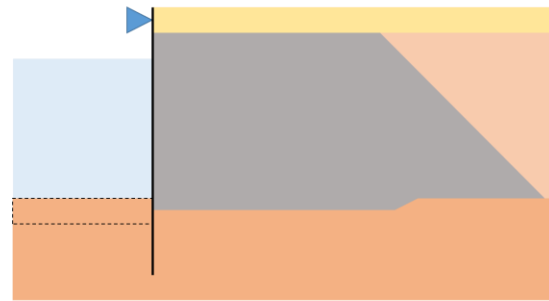
Case1：新設構造物のみ

自重解析
4ステップ

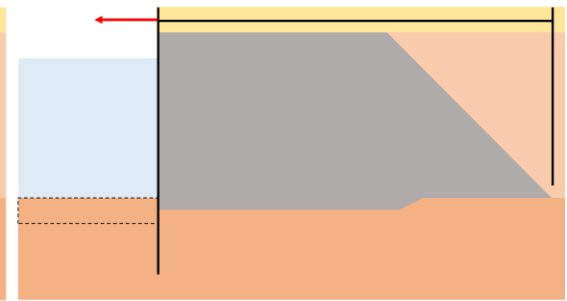
step1 原地盤の自重解析



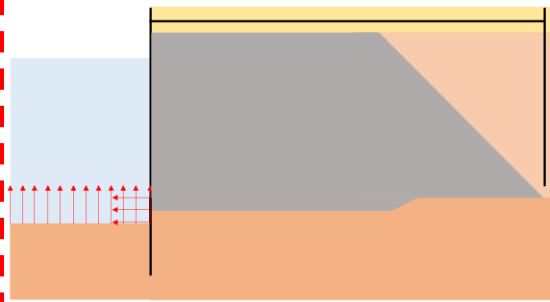
step2 埋立土の自重解析



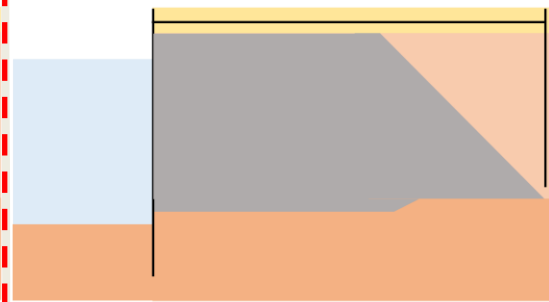
step3 タイ取付点の反力解放



step4 掘削による応力解放



step5 地震応答解析



通常のFLIPによる
控え矢板式係船岸の解析手順に，
掘削段階を追加した



(step1～3+5) + (step4)

解析条件（解析手順：Case2）

Case	検討内容		Step
	構造物のモデル化	施工過程	
1	新設構造物のみ	すべて考慮	5
2	新設，既設構造物の両方	すべて考慮	6
3	新設，既設構造物の両方	一部省略	5

Case1に，
既設ケーソンの
設置ステップ
追加

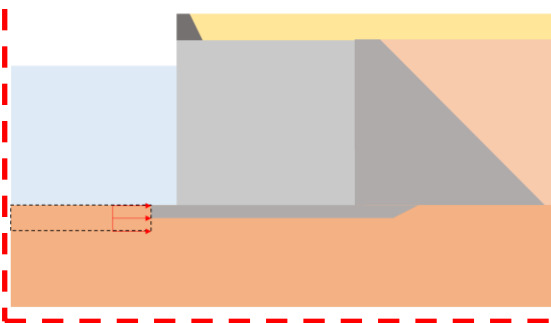
Case2：既設，新設構造物

自重解析
5ステップ

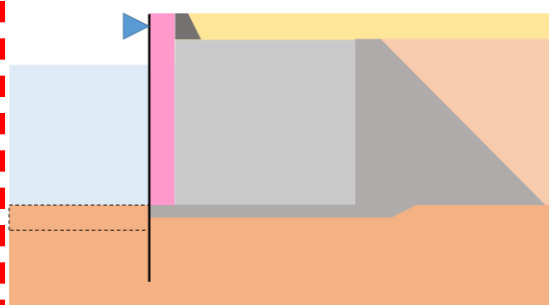
step1 原地盤の自重解析



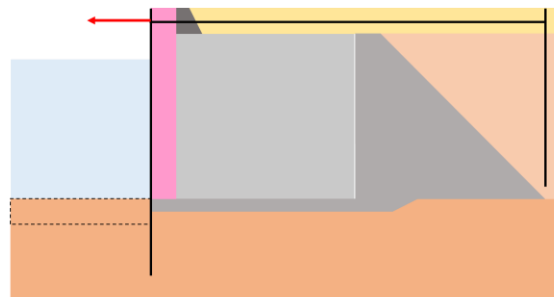
step2 既設構造物の自重解析



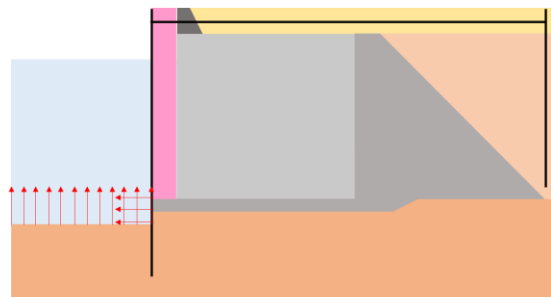
step3 中詰砂の自重解析



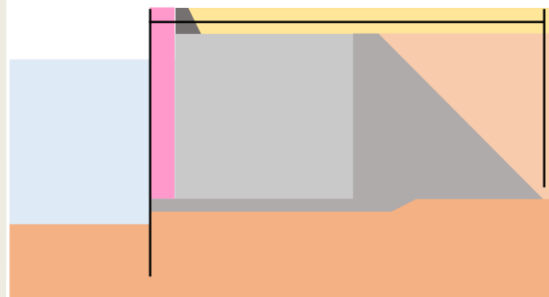
step4 タイ取付点の反力解放



step5 掘削による応力解放



step6 地震応答解析



解析条件（解析手順：Case3）

Case	検討内容		Step
	構造物のモデル化	施工過程	
1	新設構造物のみ	すべて考慮	5
2	新設，既設構造物の両方	すべて考慮	6
3	新設，既設構造物の両方	一部省略	5

Case2の，
既設ケーソンの
設置ステップ
省略

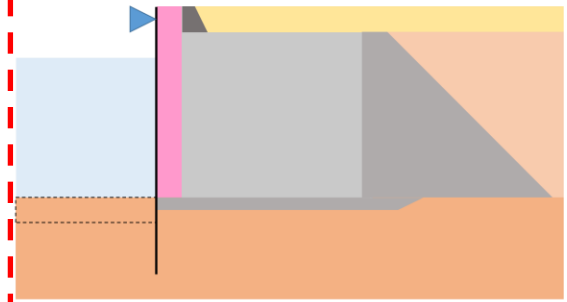
Case3：既設，新設構造物

自重解析
4ステップ

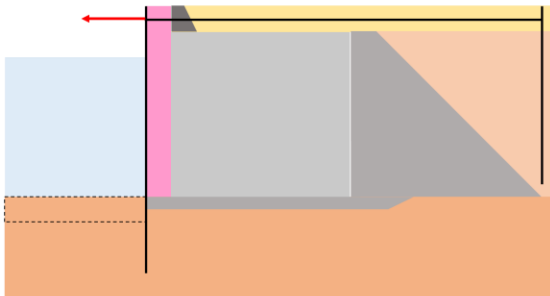
step1 原地盤の自重解析



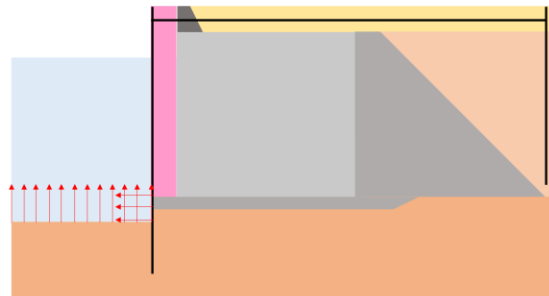
step2 既設構造物と中詰砂の自重解析



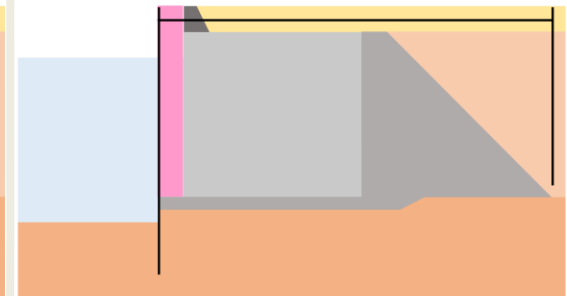
step3 タイ取付点の反力解放



step4 掘削による応力解放



step5 地震応答解析

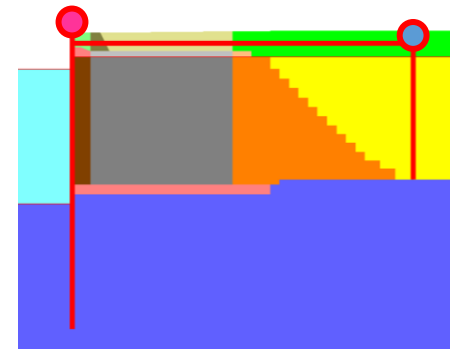


解析結果（変位・張力と曲げモーメント）

天端水平変位・タイロッド張力

出力段階	検討 ケース	天端 水平変位量(mm)				タイロッド張力 (kN/m)	
		新設前面矢板		新設控え杭			
		残留値	最大値	残留値	最大値	残留値	最大値
自重解析 終了時	Case1	-16.2	-16.2	-7.2	-7.2	94.3	94.3
	Case2	-1.0	-1.0	-0.8	-0.8	6.5	6.5
	Case3	-9.5	-9.5	-5.2	-5.2	50.5	50.5
	Case1/Case2	15.41	15.41	8.59	8.60	14.42	14.42
	Case3/Case2	9.05	9.05	6.21	6.21	7.72	7.72
地震応答 解析 終了時	Case1	-571.6	-616.4	-561.5	-605.6	57.9	402.4
	Case2	-446.0	-467.4	-439.8	-472.5	44.8	306.8
	Case3	-578.5	-611.3	-572.2	-609.2	48.8	319.3
	Case1/Case2	1.28	1.32	1.28	1.28	1.29	1.31
	Case3/Case2	1.30	1.31	1.30	1.29	1.09	1.04

※水平変位量は、各部材設置段階からの累積値を示している。



自重解析
地震応答解析ともに、

鋼材の天端水平変位・タイロッド張力

詳細モデル < 簡易モデル
(Case2) (Case1・3)



詳細モデル
Case2に比べて、

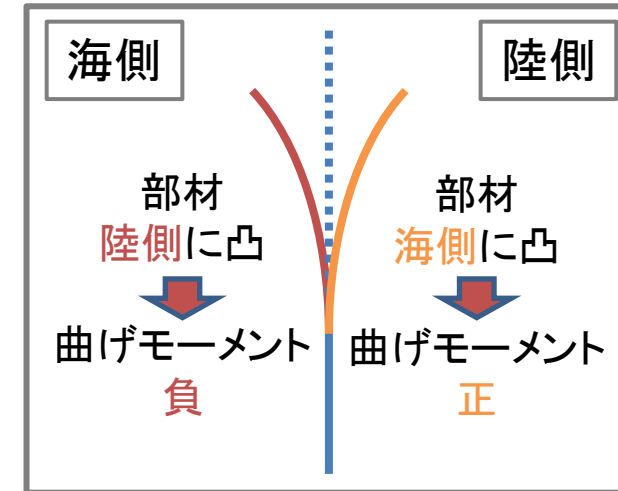
地震後の矢板の天端残留変位

Case1：28%大きく評価
Case3：30%大きく評価

解析結果（変位・張力と曲げモーメント）

天端水平変位・タイロッド張力

出力段階	検討ケース	天端 水平変位量(mm)				タイロッド張力(kN/m)	
		新設前面矢板		新設控え杭			
		残留値	最大値	残留値	最大値	残留値	最大値
自重解析 終了時	Case1/Case2	15.41	15.41	8.59	8.60	14.42	14.42
	Case3/Case2	9.05	9.05	6.21	6.21	7.72	7.72
地震応答解析 終了時	Case1/Case2	1.28	1.32	1.28	1.28	1.29	1.31
	Case3/Case2	1.30	1.31	1.30	1.29	1.09	1.04



前面矢板曲げモーメント

出力段階	検討ケース	曲げモーメント(kN・m/m)			
		新設前面矢板		新設控え杭	
		正	負	正	負
地震応答解析時 (最大値)	Case1	1031	-2653	13	-695
	Case2	1092	-2251	10	-692
	Case3	1479	-2926	9	-729
	Case1/Case2	0.94	1.18	1.21	1.00
	Case3/Case2	1.35	1.30	0.86	1.05

前面矢板曲げモーメント

根入れ部

負の曲げモーメント
絶対値最大

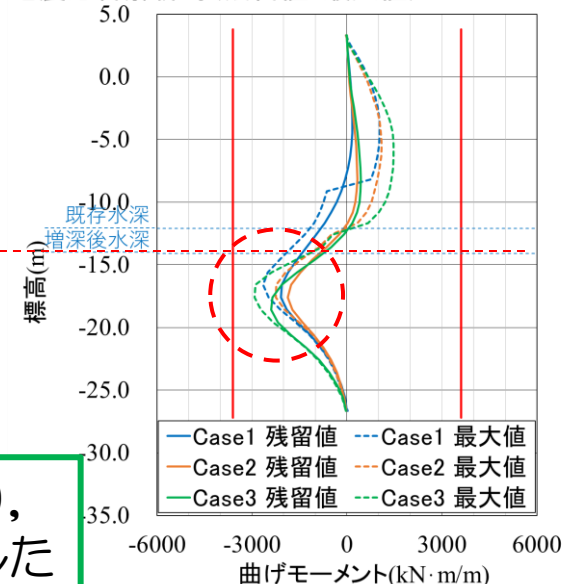
曲率の程度が異なり、
残留変位の差が生じた

変位の差が現れたのは、

絶対値最大の負の曲げモーメント

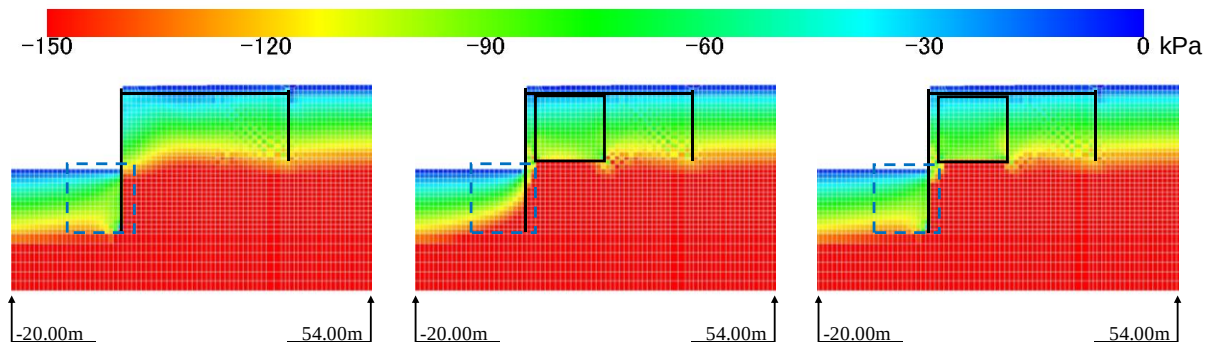
Case3 > Case1 > Case2
30% 18%

— 全塑性モーメント
地震応答解析時(残留値・最大値)

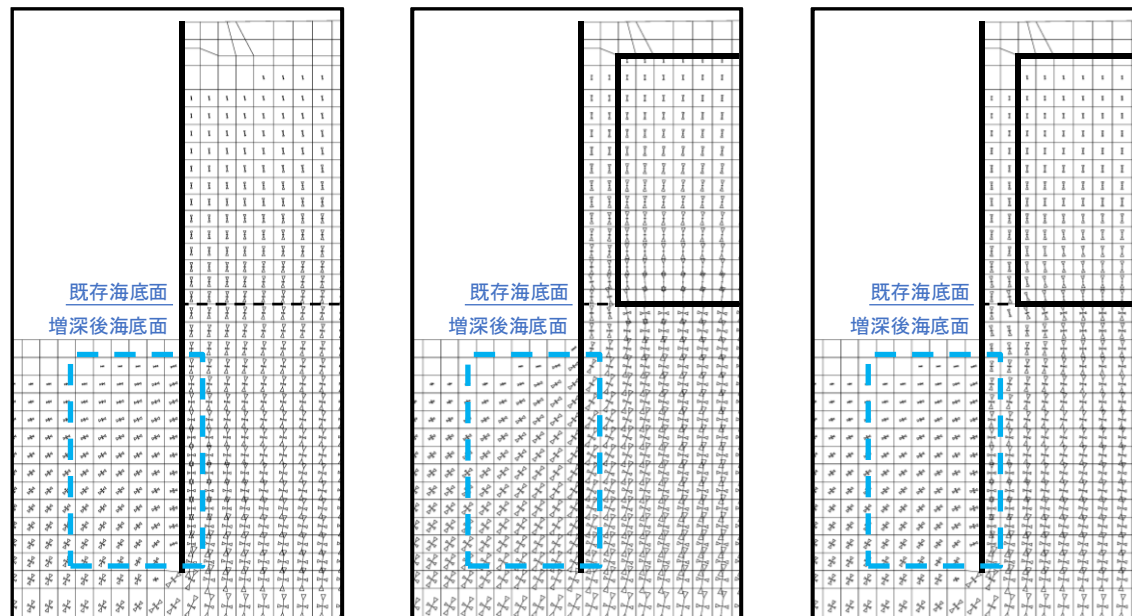


解析結果（有効拘束圧，有効主応力）

有効拘束圧



有効主応力



Case1, Case3において矢板前面地盤の有効拘束圧が小さい



Case3では既存ケーソンの施工過程を省略したことで、矢板前面地盤でのケーソン支持のための応力が発揮されていない



ケーソン施工過程の省略により矢板前面地盤の拘束圧が小さくなり、強度、剛性が小さくなり、矢板変位が大きくなった

矢板変位においては、ケーソン省略の影響よりも施工過程省略の影響のほうが大きかった

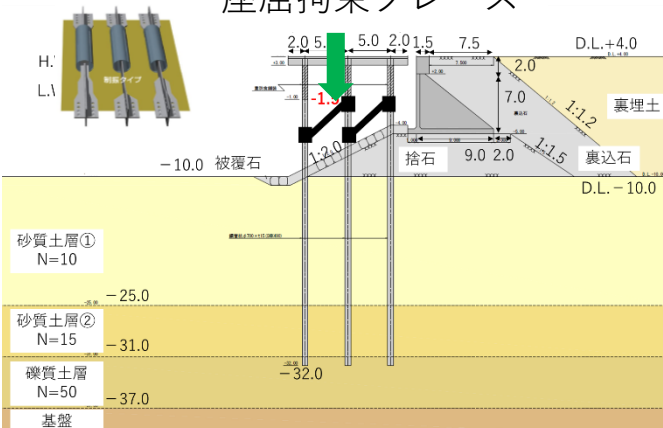
制震部材を用いた栈橋の耐震改良

- 現在の港湾構造物の設計において考慮する地震作用は一般的に過去のものよりも大きく、既存施設の耐震性を向上させる方法に関する需要が高まっている
- 特に民間係留施設においては、経年劣化が進展する一方で更新に対する余力が低下しており、比較的安価な工法が必要

▶ 目的: 栈橋式係留施設の耐震性向上を容易に実施できる耐震補強工法の開発
地震時の損傷を許容することで構造全体の変形を低減する
制振部材を追設する工法の有効性について模型振動台実験, 再現解析, 実規模解析で検討

検討対象の構造

座屈拘束ブレース



- 既設杭間に新たに制振部材を追加

既往の研究：オイルダンパーの追設(宇野ら, 2016)
座屈拘束ブレース(塩崎, 2015), 水平材(鋼管)の追設(CDIT, 2000)

- ▶ 直杭式栈橋への座屈拘束ブレース取付けに着目
損傷後の交換による復旧や防食対策などのメンテナンス性を考慮

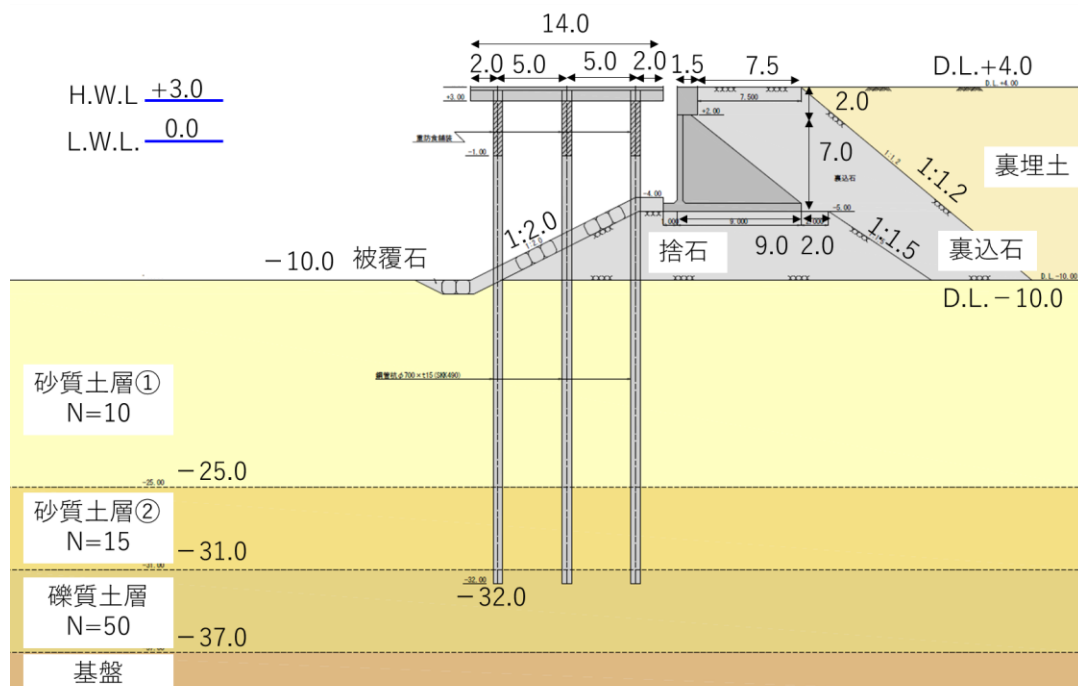
取付け場所, 軸降伏力による影響を栈橋の応答から
パラメトリックに解析し, 基礎的な知見をとりまとめる

対象断面

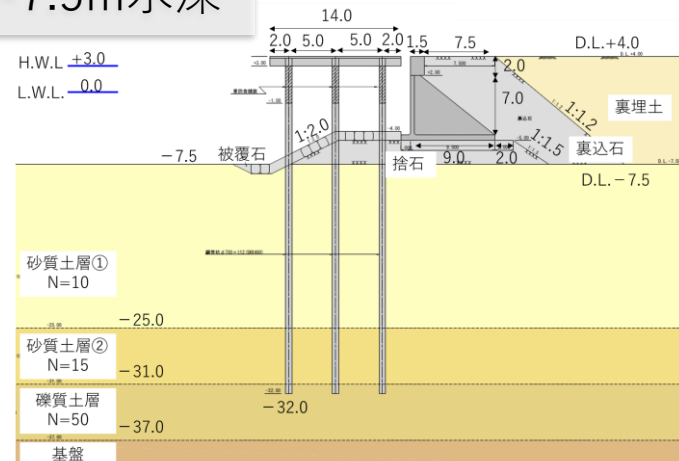
栈橋式係留施設の照査用震度算出方法の設定に関する検討断面を参考にL型
 ブロックの護岸を持つ一般的な直杭式栈橋（3種類の水深）を対象

(勝俣ら, 国総研資料No.1001, 2018)を主に参考

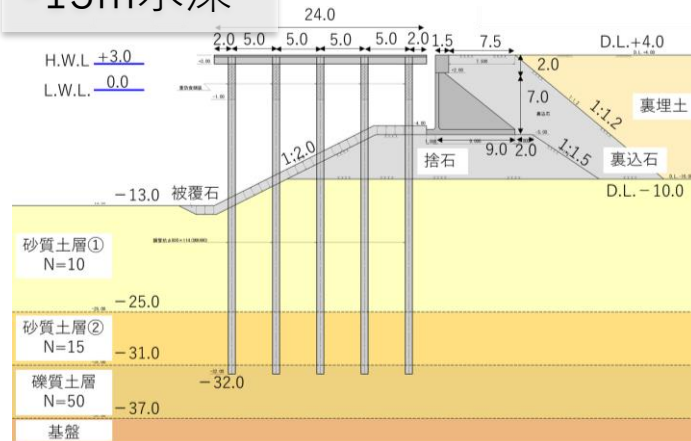
-10m水深

杭 ϕ 900mm $\times$ t12mm(SKK490)

-7.5m水深



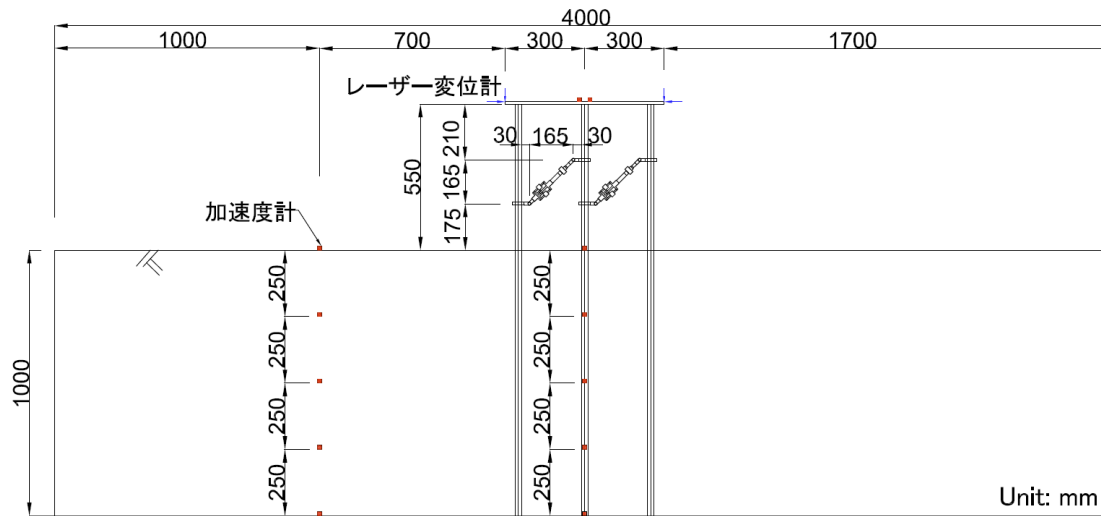
-13m水深



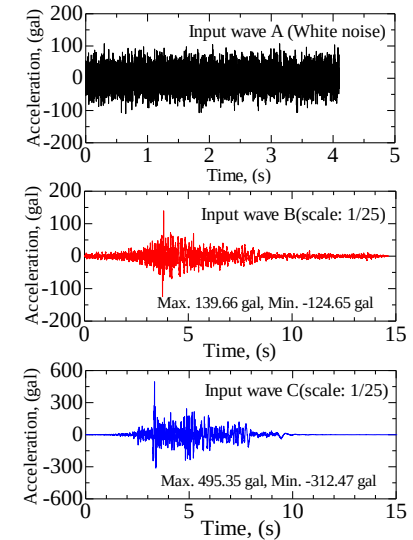
模型振動台実験 概要

- 水深-10mの一般的な直杭式栈橋を対象に模型振動台実験を実施

▶ 制振部材の設置による効果を検討するため、護岸のない断面

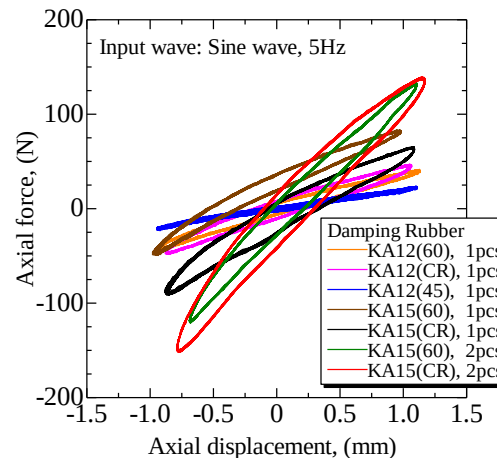


入力地震動



- 制振部材：座屈拘束ブレースを模型で再現困難なため、制振ゴムで

再現



▶ 選定した 4 ケース

KA15(CR)・2個: 面積最大

KA15(CR)・1個: 赤の軸剛性半分

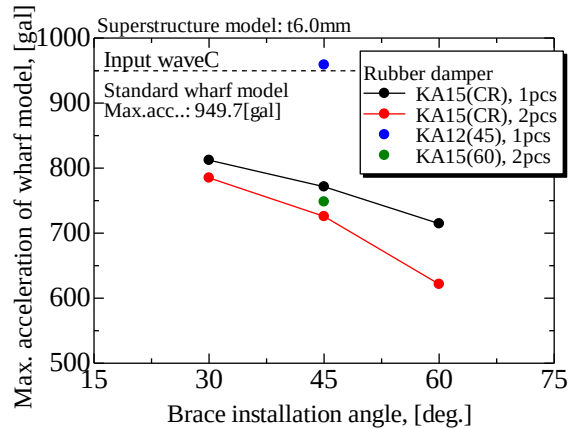
KA15(60)・2個: 軸剛性同一&面積小

KA12(45)・1個: 軸剛性最小&面積小

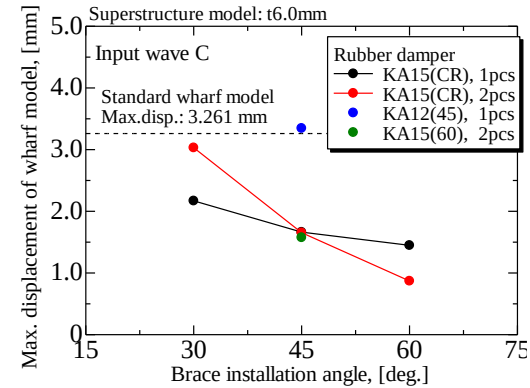
7 ケースで載荷テスト

模型振動台 加振結果

栈橋上部工の最大加速度

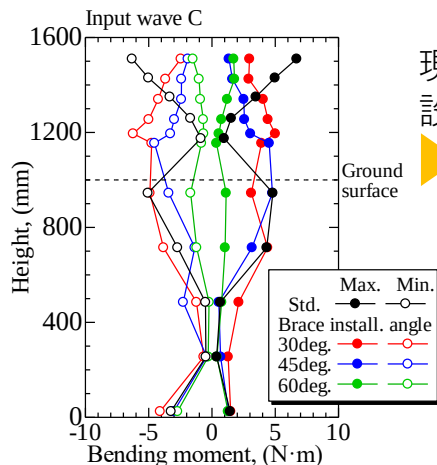


栈橋上部工の最大水平変位



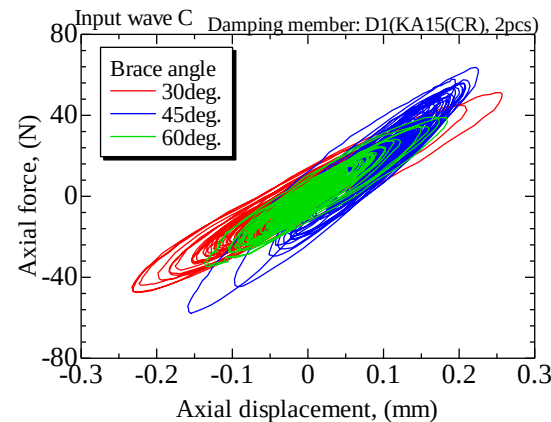
- ▶ 防振材取付により応答加速度・応答変位が減少
- ▶ 防振材の減衰が大きいほど応答加速度・応答変位は減少(現況より最大35%減)
- ▶ 設置角度が大きいほど応答加速度・応答変位は減少(現況より最大75%減)

基礎杭の曲げM分布



現況は杭頭で最大だが
設置位置で最大に変化
▶ 設置角度が大きいほど
曲げMが低減

制振部材の荷重変位



制振部材の応答変位

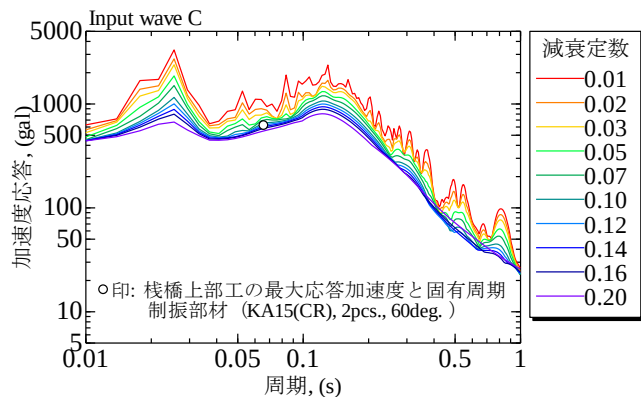
30度：0.24mm
60度：0.17mm(35%減)

上部工の応答変位

30度：3.03mm
60度：0.87mm(71%減)

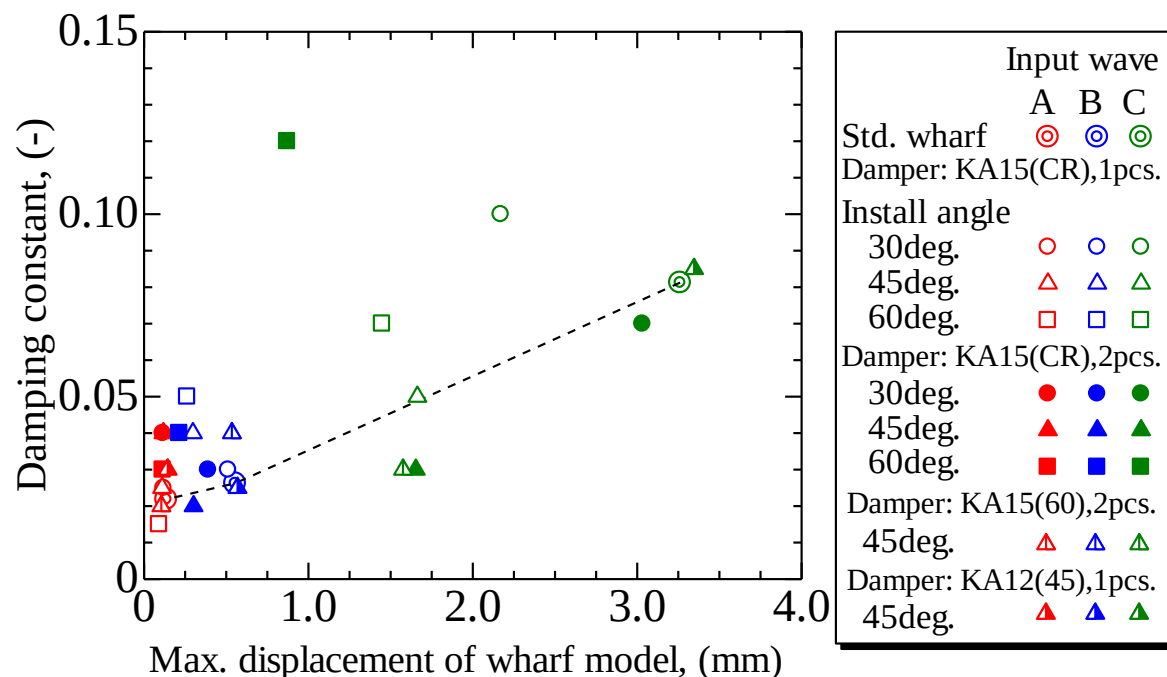
▶ 設置角度が大きいと
相対的に面積大

制振部材の設置による減衰への影響



様々な減衰定数の加速度応答スペクトルと上部工の応答(固有振動数, 応答加速度)を比較

▶ 相当する減衰を算出



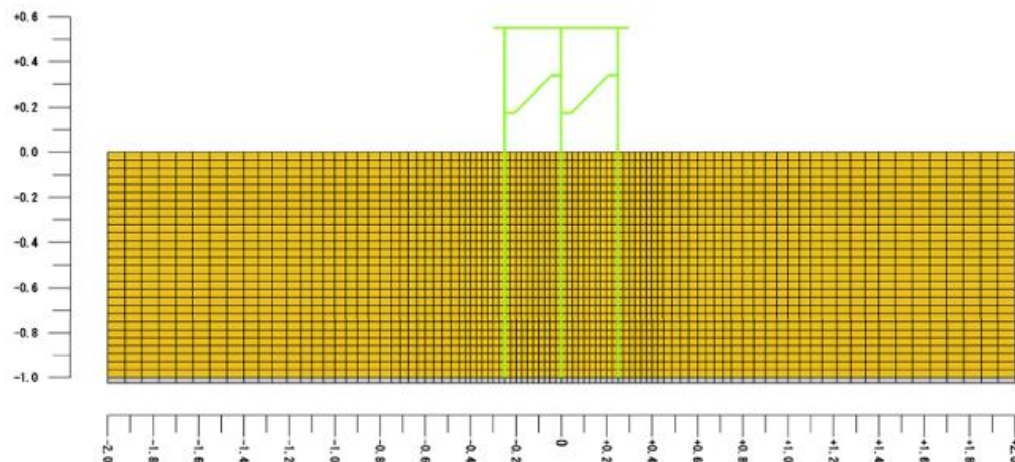
変位に応じて全体系の減衰も大きくなる点を考慮

▶ 応答変位が同一のレベルにおいて、制振部材を設置した栈橋構造は、より高い減衰定数を持つ傾向

模型振動台実験の再現解析

2次元非線形動的解析プログラムFLIP(lai, 1990)を用いて対象断面をモデル化

解析断面



解析パラメータ

線形はり要素	上部工	基礎杭
密度 ρ (t/m ³)	77.0	26.3
断面積 A (m ² /m)	8.10×10^{-3}	3.02×10^{-3}
断面二次モーメント I (m ⁴ /m)	5.47×10^{-8}	2.18×10^{-8}

ダンパー要素	制振部材
粘性減衰定数 C (kN・s/m ²)	1.0

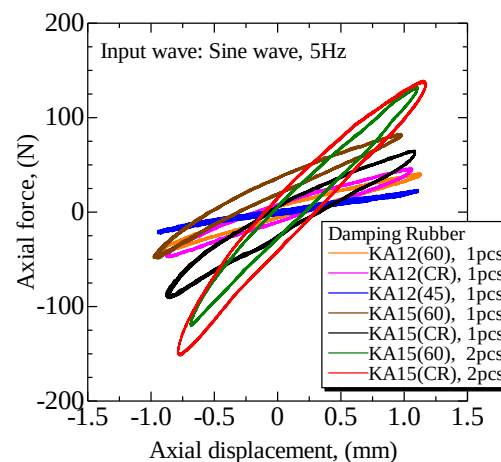
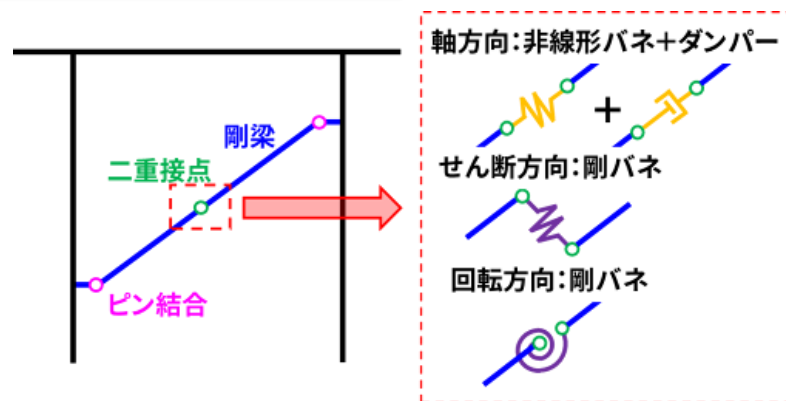
非線形バネ要素	制振部材
等価剛性(一次) K_1 (N/mm)	40.0

※等価剛性(二次)：なし

マルチスプリング要素	密地盤
密度 ρ (t/m ³)	14.8
基準拘束圧 σ_{ms} (kN/m ²)	98.0
せん断弾性係数 G_{ms} (kN/m ²)	73.9
体積弾性係数 K_{ms} (kN/m ²)	192.6
ポアソン比 ν	0.33
間隙率 n	0.43
内部摩擦角 ϕ (deg.)	39.6
粘着力 c (kN/m ²)	—
最大減衰定数 h_{max}	0.24
拘束圧依存性 m_g, m_k	0.5

地盤パラメータは加振前のパルス波加振によるせん断波速度から算定

制振部材のモデル化

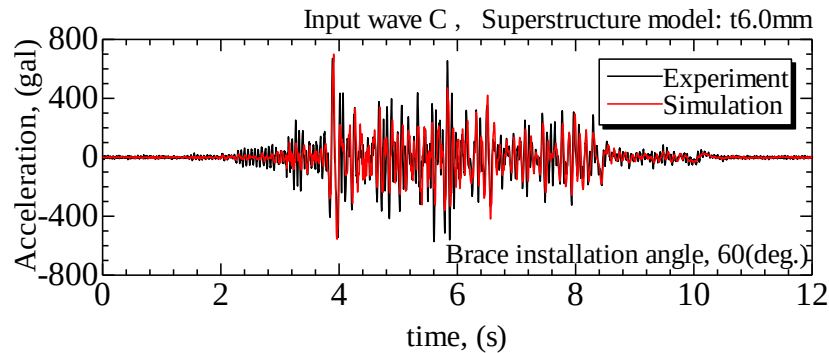


▶ 両端ピン結合した剛梁の中間に二重接点を設け、軸方向のみ変形するようモデル化

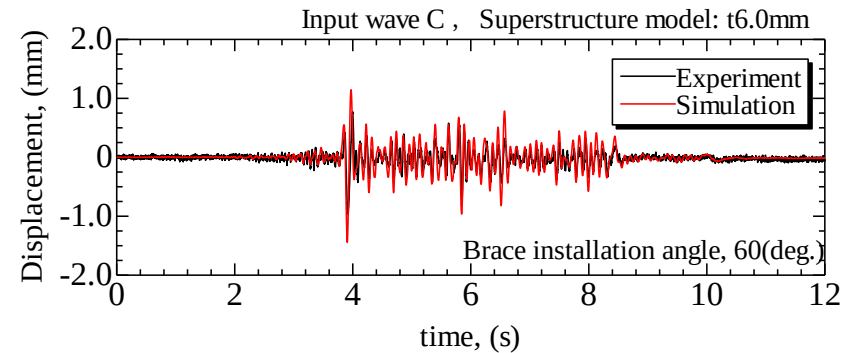
▶ 最も改良効果の高かったKA-15(CR), 2個を対象

模型振動台実験 再現解析結果

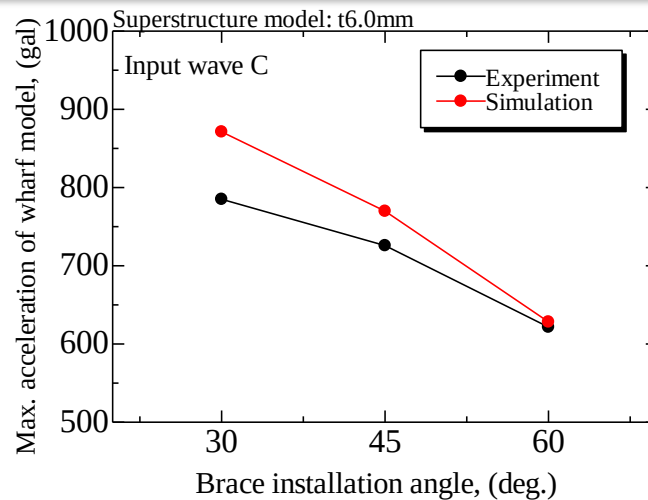
栈橋上部工の応答加速度



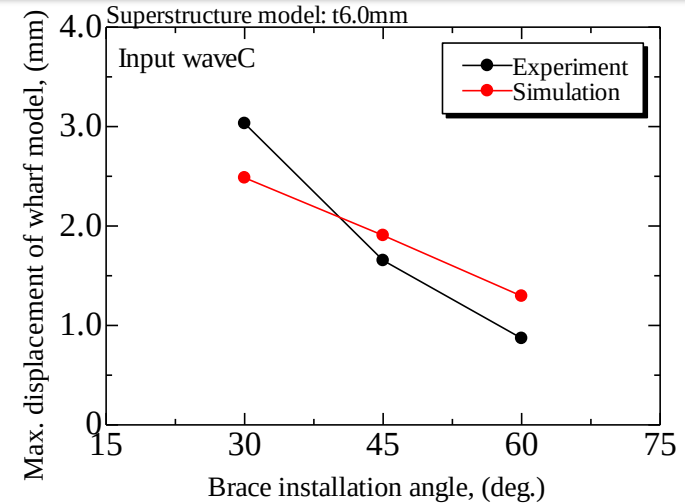
栈橋上部工の最大水平変位



栈橋上部工の最大加速度



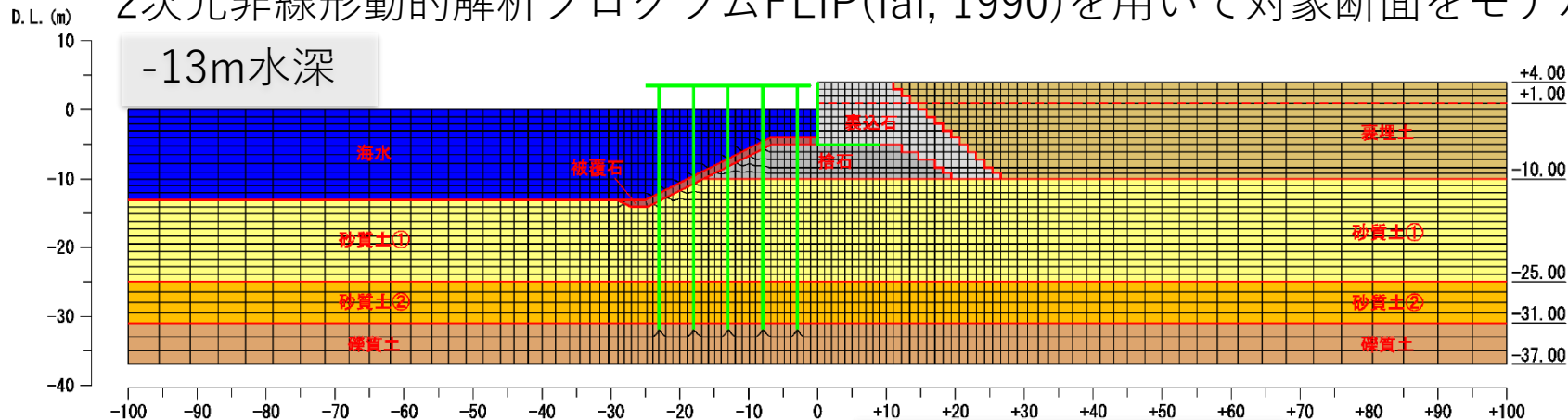
栈橋上部工の最大水平変位



- ▶ 最大応答加速度は15%程度，最大応答変位は30%程度の誤差で再現
設置角度に対する傾向も実験結果と一致

実規模栈橋での検討（解析）

2次元非線形動的解析プログラムFLIP(lai, 1990)を用いて対象断面をモデル化



鋼管杭（非線形はり要素）	重防食範囲（-1.0m以浅）	水中	地中
密度 ρ (kN/m ³)	77.0	77.0	77.0
断面二次モーメント I (m ⁴ /m)	5.34×10^{-4}	4.94×10^{-4}	5.28×10^{-4}
断面積 A (m ² /m)	6.91×10^{-3}	6.41×10^{-3}	6.84×10^{-3}
曲げ剛性（一次勾配） EI_1 (kNm ² /m)	1.07×10^5	9.88×10^4	1.06×10^5
曲げ剛性（二次勾配） EI_2 (kNm ² /m)	0	0	0
全塑性モーメント M_p (kNm/m)	520.2	478.5	513.9

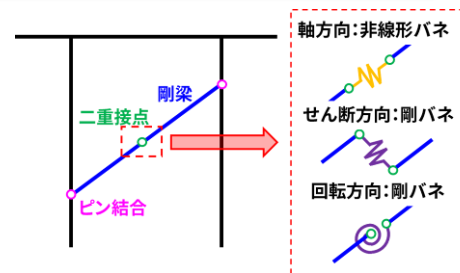
● 奥行1.0mあたりに含まれる本数を乗じたパラメータ

地盤（マルチスプリング要素）	裏埋土（気中）	裏埋土（水中）	砂質土①	砂質土②	礫質土
密度 ρ (kN/m ³)	18.0	20.0	20.0	20.0	20.0
基準拘束圧 σ_{m0} (kN/m ²)	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
せん断弾性係数 G_{m0} (kN/m ²)	76,326	76,326	81,626	77,771	160,593
体積弾性係数 K_{m0} (kN/m ²)	108316	90410	154863	146979	679456
ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
間隙率 n	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
内部摩擦角 ϕ (deg.)	39.70	39.70	39.80	39.70	42.80
粘着力 c (kN/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
最大減衰定数 h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
拘束圧依存性 m_g, m_k	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

● 液状化パラメータなし

液状化による土留部の移動が栈橋の変位応答において支配的にならないため

座屈拘束ブレース



引用：杉沢ら, 1995

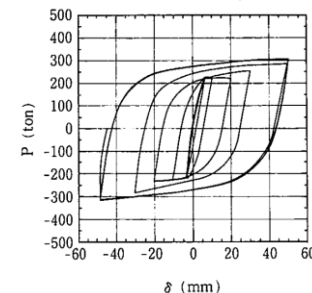


図3 荷重-軸方向変形

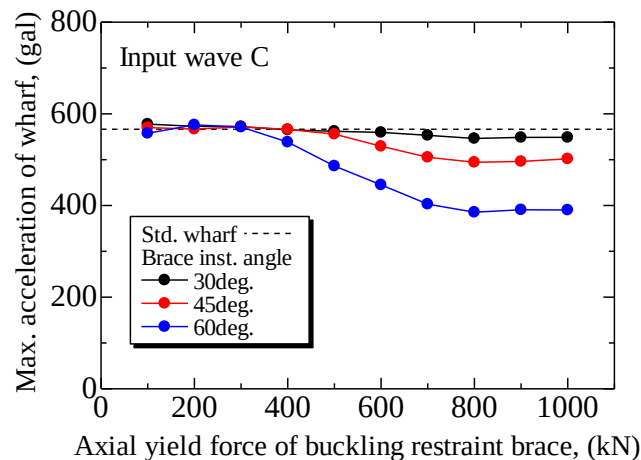
座屈拘束ブレース（非線形バネ要素）					
降伏軸力 P_y (kN)	100	200	300	400	500
等価剛性（一次） K_1 (kN/m/m)	4100	7940	11160	14180	16900
等価剛性（二次） K_2 (kN/m/m)	82.0	158.8	223.2	283.6	338.0
降伏軸力 P_y (kN)	600	700	800	900	1000
等価剛性（一次） K_1 (kN/m/m)	19260	22420	25600	28900	31980
等価剛性（二次） K_2 (kN/m/m)	385.2	448.4	512.0	578.0	639.6

● 降伏軸力に応じた断面変化を等価剛性で表現

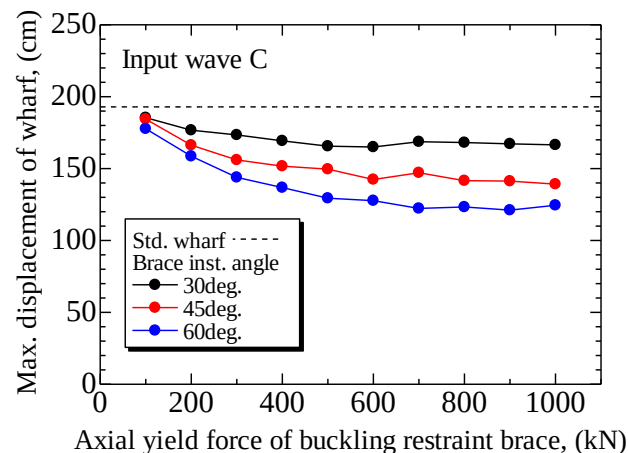
● 降伏軸力100kNから1000kNまで10パターンを対象

実規模スケール 解析結果

栈橋上部工の最大加速度

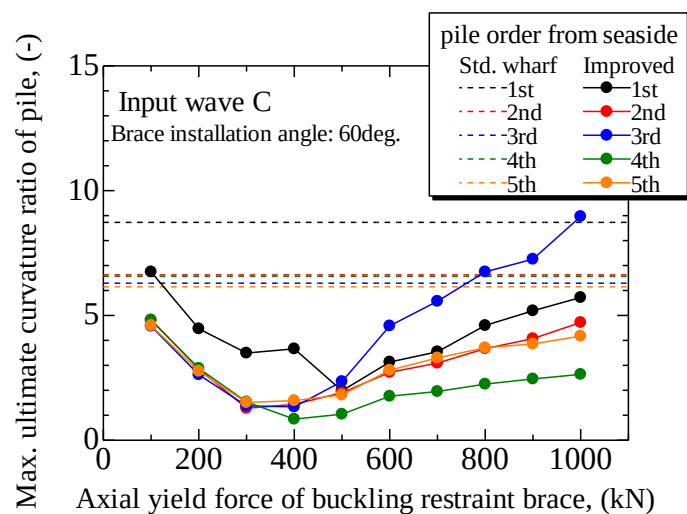


栈橋上部工の最大水平変位



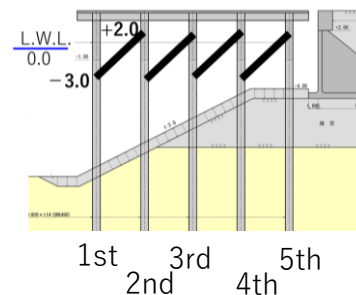
▶ 制振部材の設置により最大応答加速度，最大応答変位は低減

基礎杭の最大限界曲率比

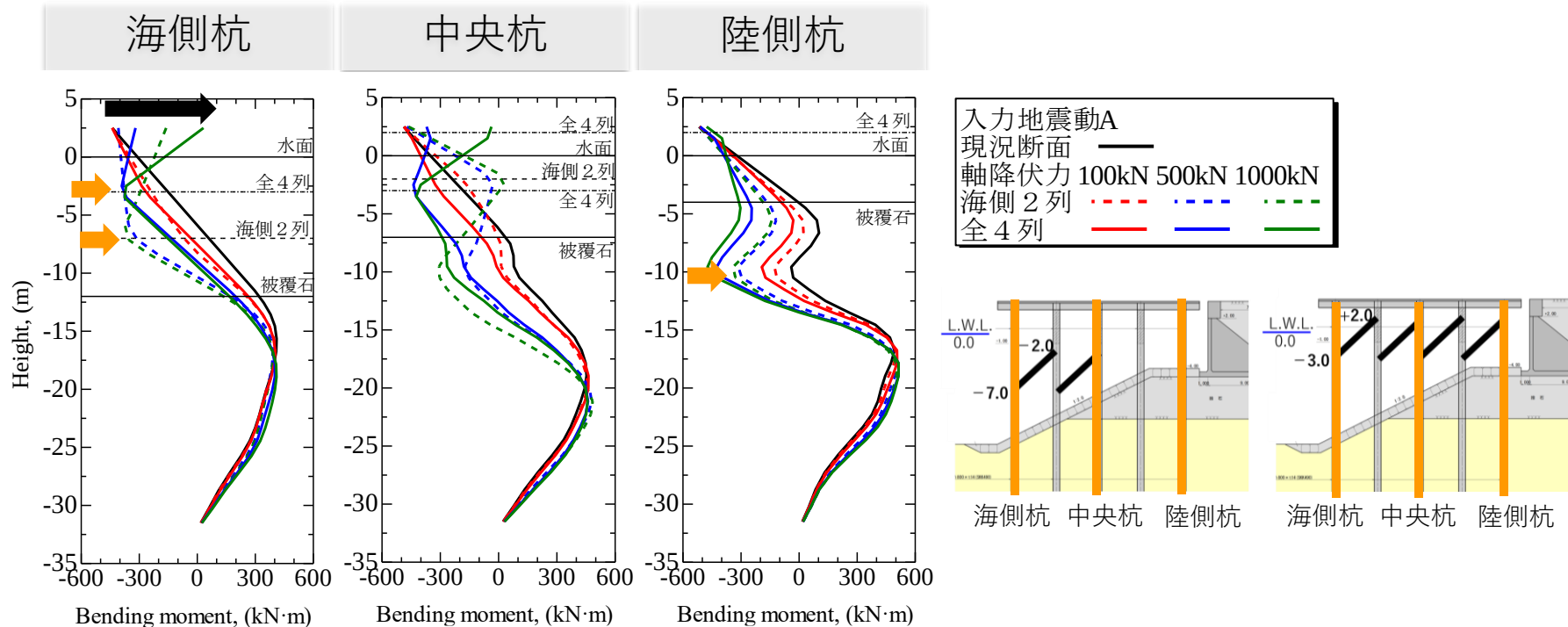


- 降伏軸力100-300kN
負担する軸力が小さく
杭頭に荷重が集中
- 降伏軸力600-1000kN
負担する軸力が大きく
基礎杭との接合部に荷重が集中

▶ 基礎杭の損傷の観点から
適切な部材特性(降伏軸力，軸剛性)がある



栈橋の曲げモーメントによる変形挙動の検討(杭ごとの比較)



● 現況との比較 現況断面では杭頭部と地中-20m付近で曲げモーメントが最大

- ▶ 座屈拘束ブレース取付により、杭頭付近の曲げモーメントが低減、取付部の曲げMが増加
- ▶ 変化割合は軸降伏力が高いケースほど顕著
最大曲率が500-1000kNで増加したのは、部材剛性の増加と相まって局所的に大きな曲率が発生したため

● 部材の配置 部材取付の無い海側2列でも陸側杭の地中曲げMが増加

- ▶ 荷重バランスが変化し、栈橋全体で耐荷

まとめ

制振部材を用いた直杭式栈橋の耐震補強の開発

直杭式栈橋の基礎杭間に座屈拘束ブレースを用いて効果的に耐震補強を行う工法を検討

模型振動台実験

制振部材が杭頭部に発生する曲げモーメントを分担することで、
栈橋に発生する最大加速度を最大35%, 最大応答変位を最大75%低減する効果を確認

- ✚ 設置角度が大きいほど上部工変位に対する相対軸変位が大きく改良効果が高い
- ✚ 制振部材の設置により構造全体の減衰も同じ変位レベルで相対的に大きい

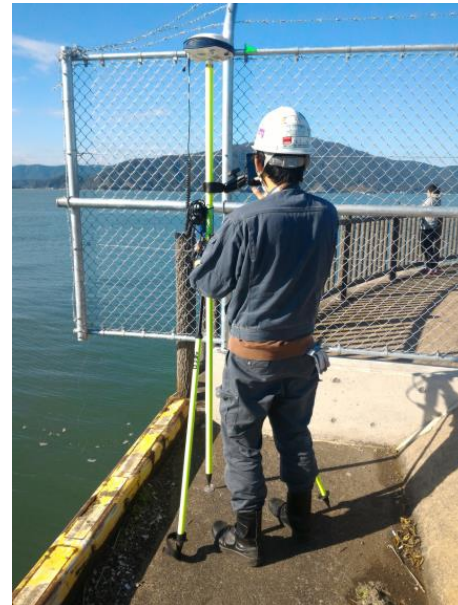
再現解析

両端ピン結合した剛梁の中間に二重接点を設けて軸方向のみ変形するようモデル化
最大応答加速度15%, 最大応答変位30%の誤差で再現, 設置角度に対する傾向も一致

実規模スケール解析

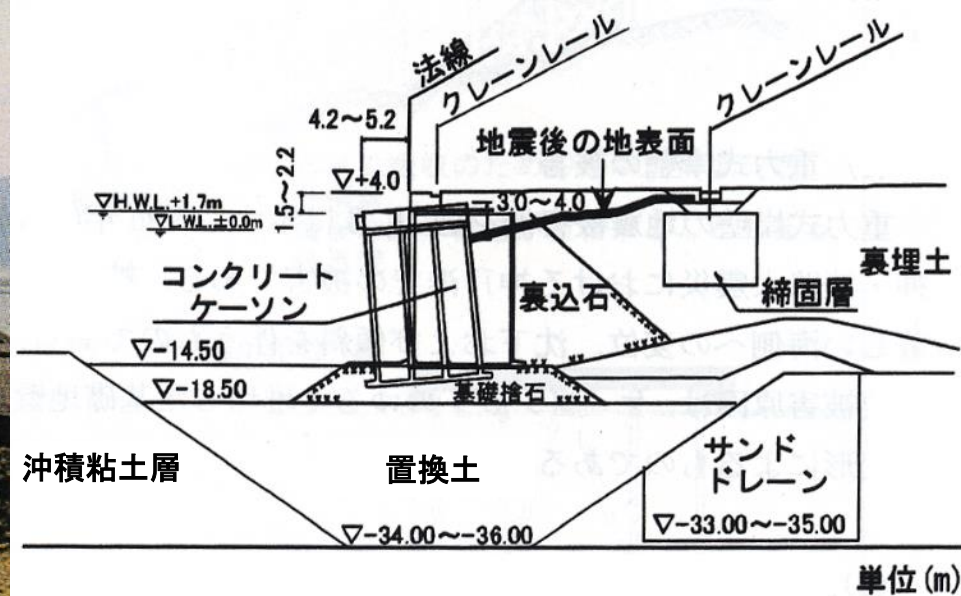
制振部材の降伏軸力が大きく分担荷重が大きいほど応答加速度, 応答変位を低減
制振部材の降伏軸力が小さいと分担不足, 大きいと杭との接合部で限界曲率比が増加
▶ 基礎杭の損傷の観点から適切な部材特性(降伏軸力, 軸剛性)の選定が望ましい

RTK-GNSSによる係留施設使用可否判断のための 地震時変形量調査および安定性評価



ケーソン式岸壁の被害

神戸港ポートアイランド、1995年兵庫県南部地震



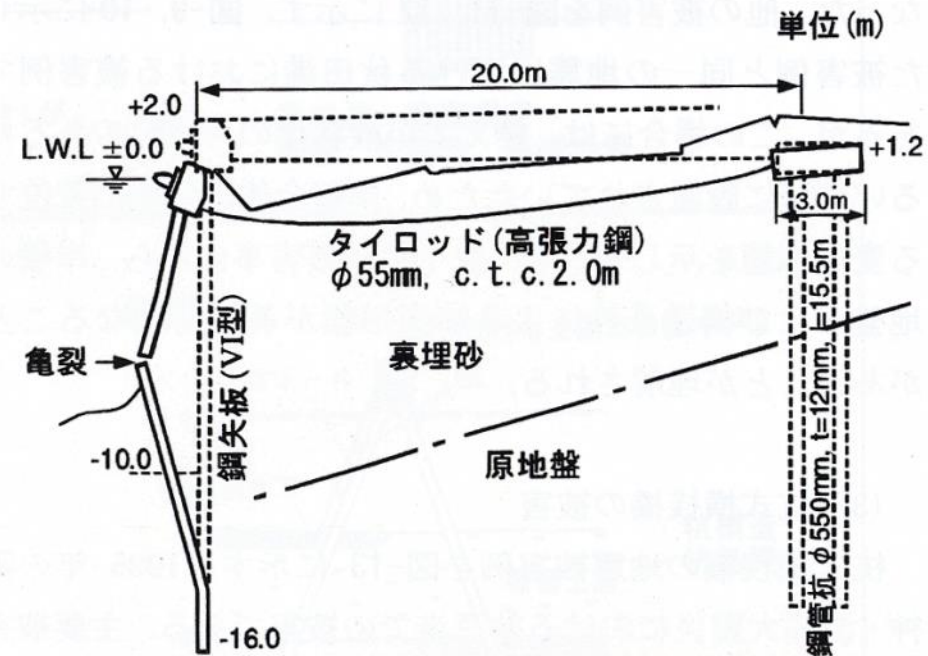
単位 (m)

ケーソンの大きい変位
ケーソン自体には損傷はない

矢板式岸壁の被害

秋田港大浜埠頭

1983年日本海中部地震



構造部材の損傷
(矢板に亀裂発生)

神戸港高浜埠頭 1995年兵庫県南部地震

施設の損傷判断の難しさ あまり変状は見られないが、



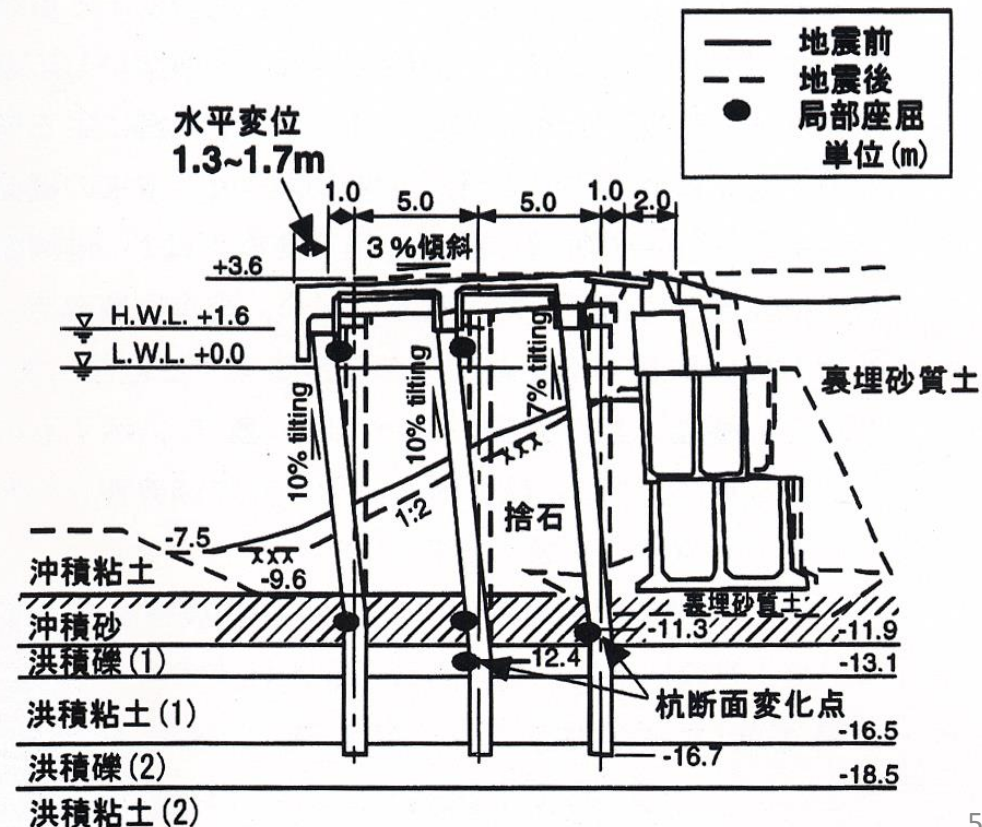
神戸港高浜埠頭 1995年兵庫県南部地震



実際には, , 杭の塑性化発生.

引き抜き調査により確認

⇒上からの見た目だけでは, 分からない.



港湾での人、物資の輸送

1995年阪神淡路大震災

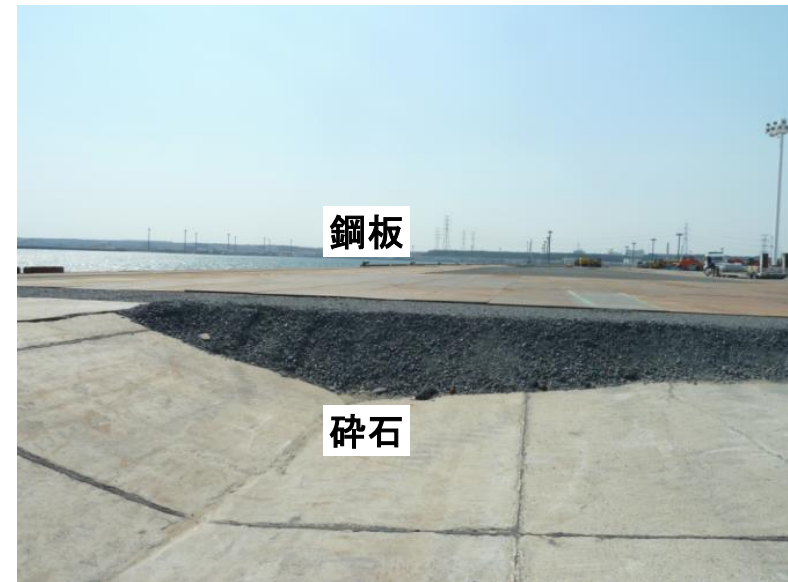
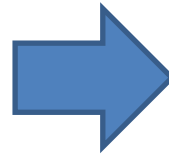
- 岸壁が変形していても、利用しなければならない場合も



重力式岸壁の応急復旧

2011年東北地方太平洋沖地震茨城港常陸那珂工区

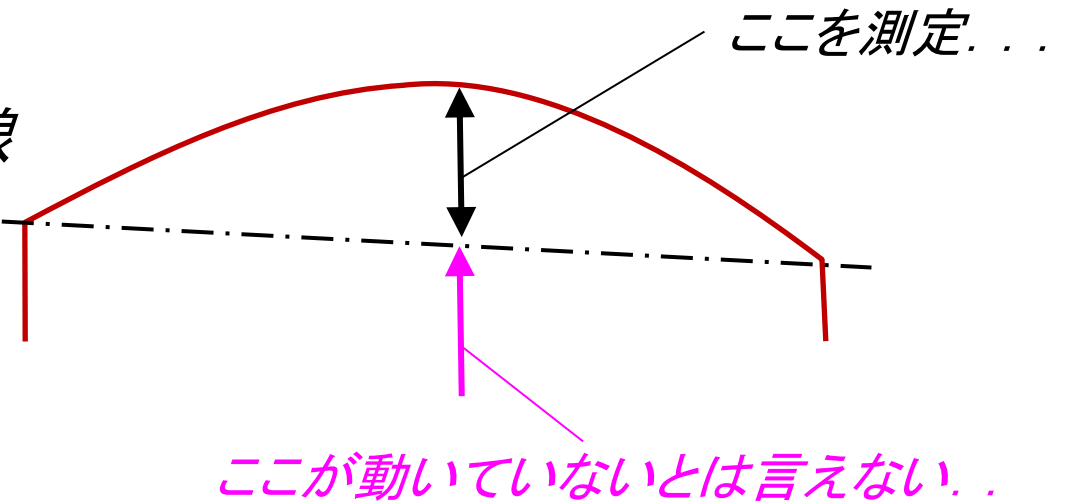
- ・ ケーソン背後の沈下部に碎石と鋼板を敷き、ケーソン上にアクセス
 - － 地震動によるケーソンの構造的損傷が無いため、応急復旧可能



杭、矢板損傷等により構造的安定性が損なわれている可能性がある場合は、難しい

地震直後によく行われる計測...

- 法線のはらみ出しを、埠頭端部を結んだ直線からの移動量で計測...
- 目地開き量の計測...



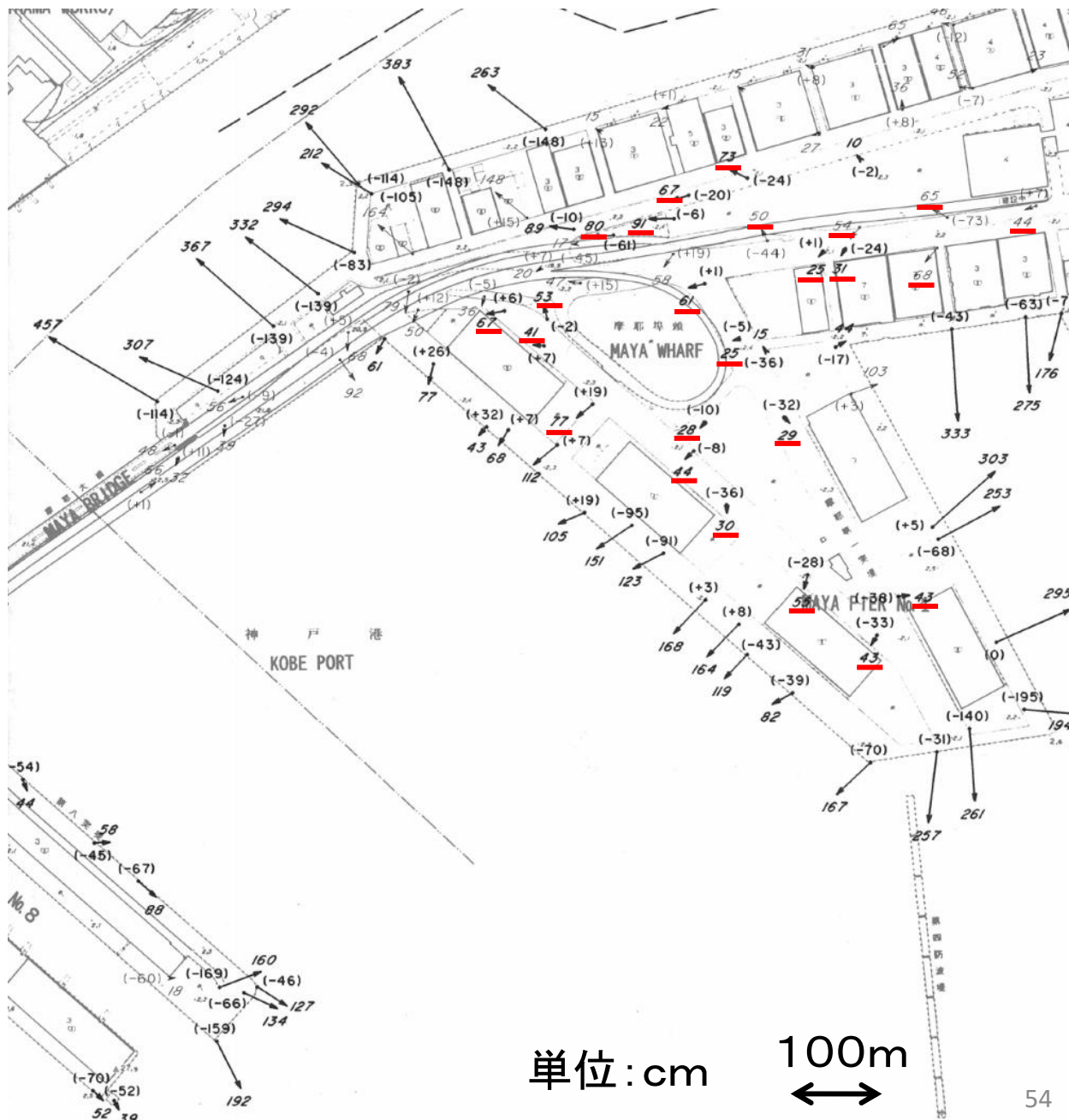
護岸移動、液状化等による地盤側方流動

- 埠頭内(埋立地内)では、護岸移動や液状化によって、かなり陸側の位置でも地盤の移動が生じている
 - 法線から100m程度陸側でも、数十~100cm程度の移動がある

⇒ 構造物変位測定のための基準となる点を、地盤の局所的な変位(護岸移動、液状化)の影響を受けない場所に設定する必要がある

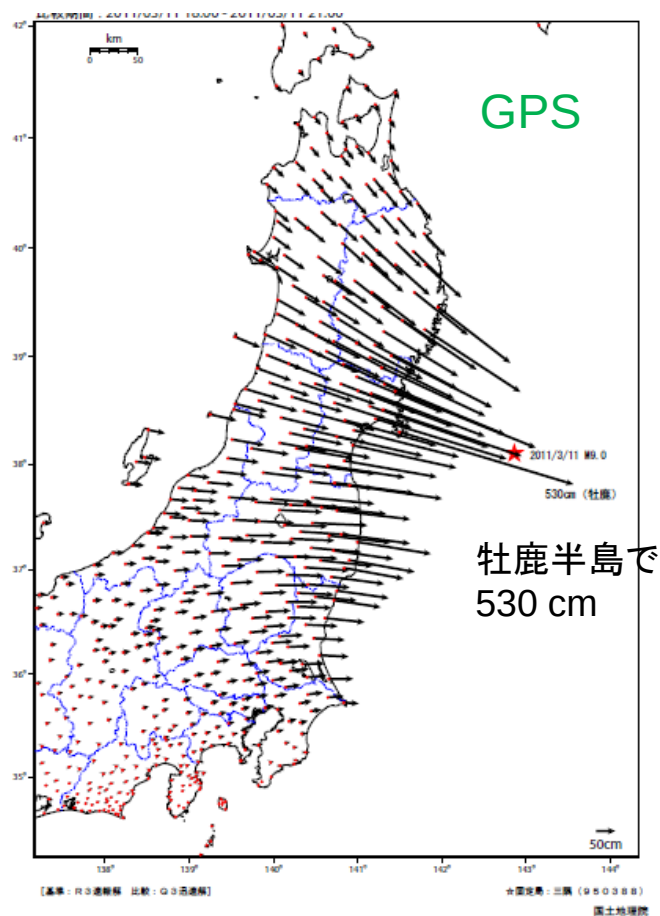
濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江:
1995年兵庫県南部地震液状化, 地盤
変位及び地盤条件, 1995

神戸港摩耶埠頭

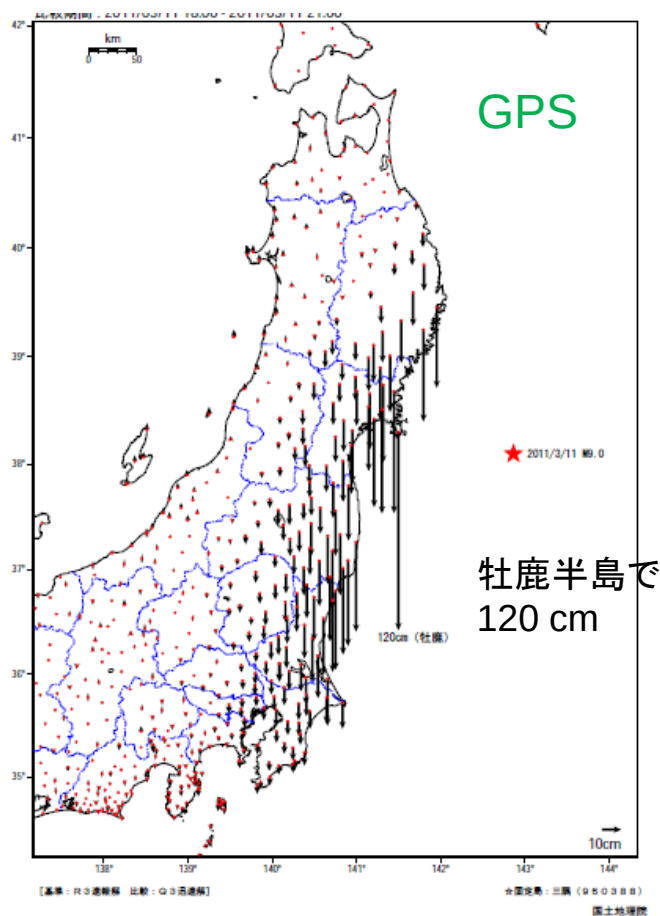


地殻変動による変位(2011年東北地方太平洋沖地震)

水平変位



鉛直変位

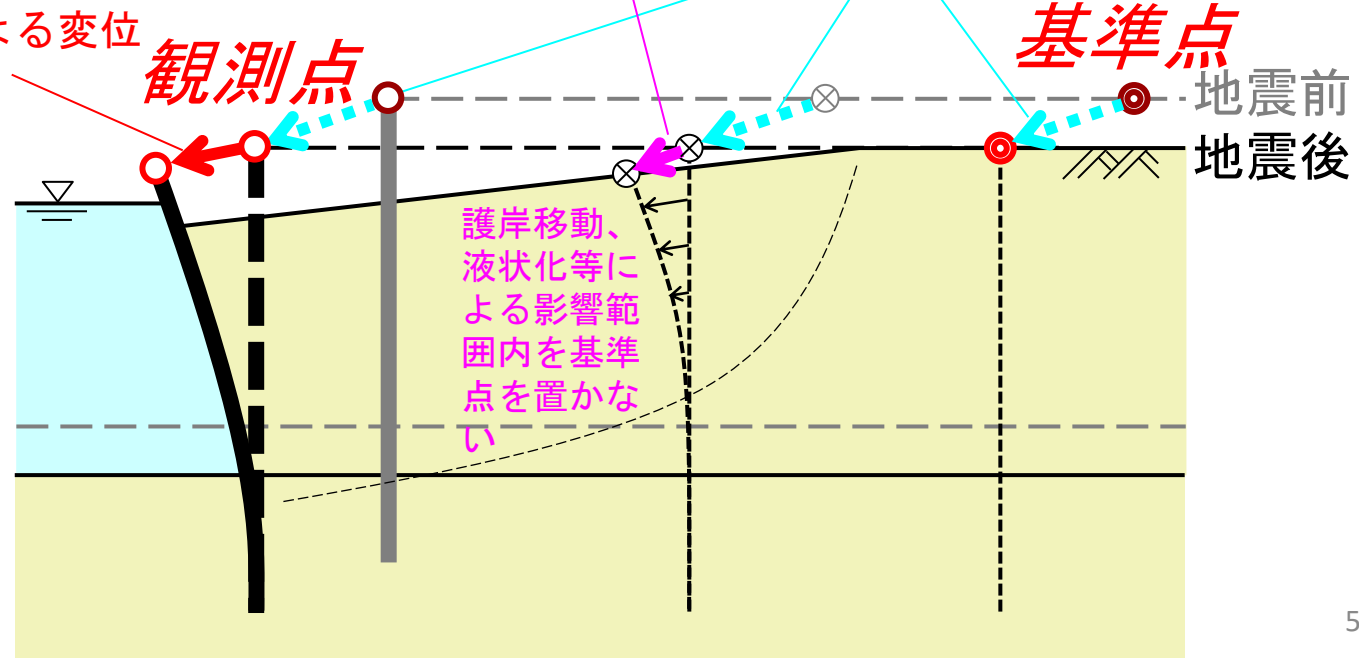
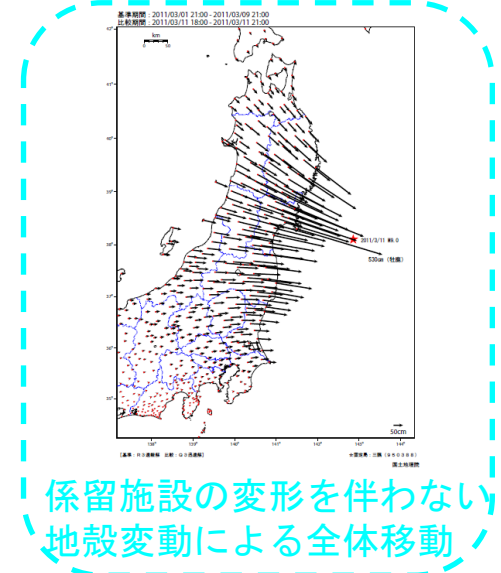
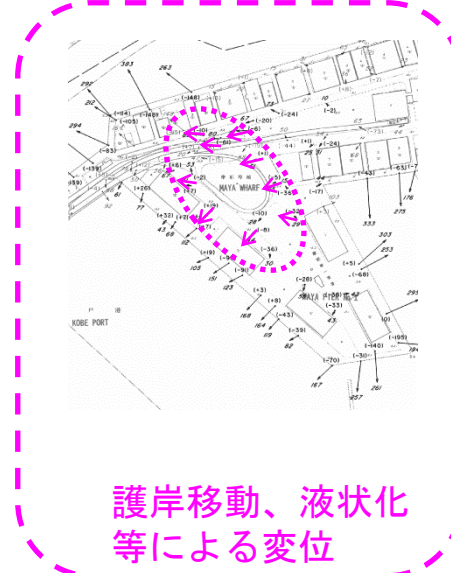


(国土地理院)

地殻変動により非常に大きな水平変位と鉛直変位が発生した。国土地理院のGPS連続観測によると牡鹿半島は約120cm沈下した。海上保安庁によると、震源付近の海底は約24m東南東に移動した。海底の移動は約50mという報告もある(海洋研究開発機構)。

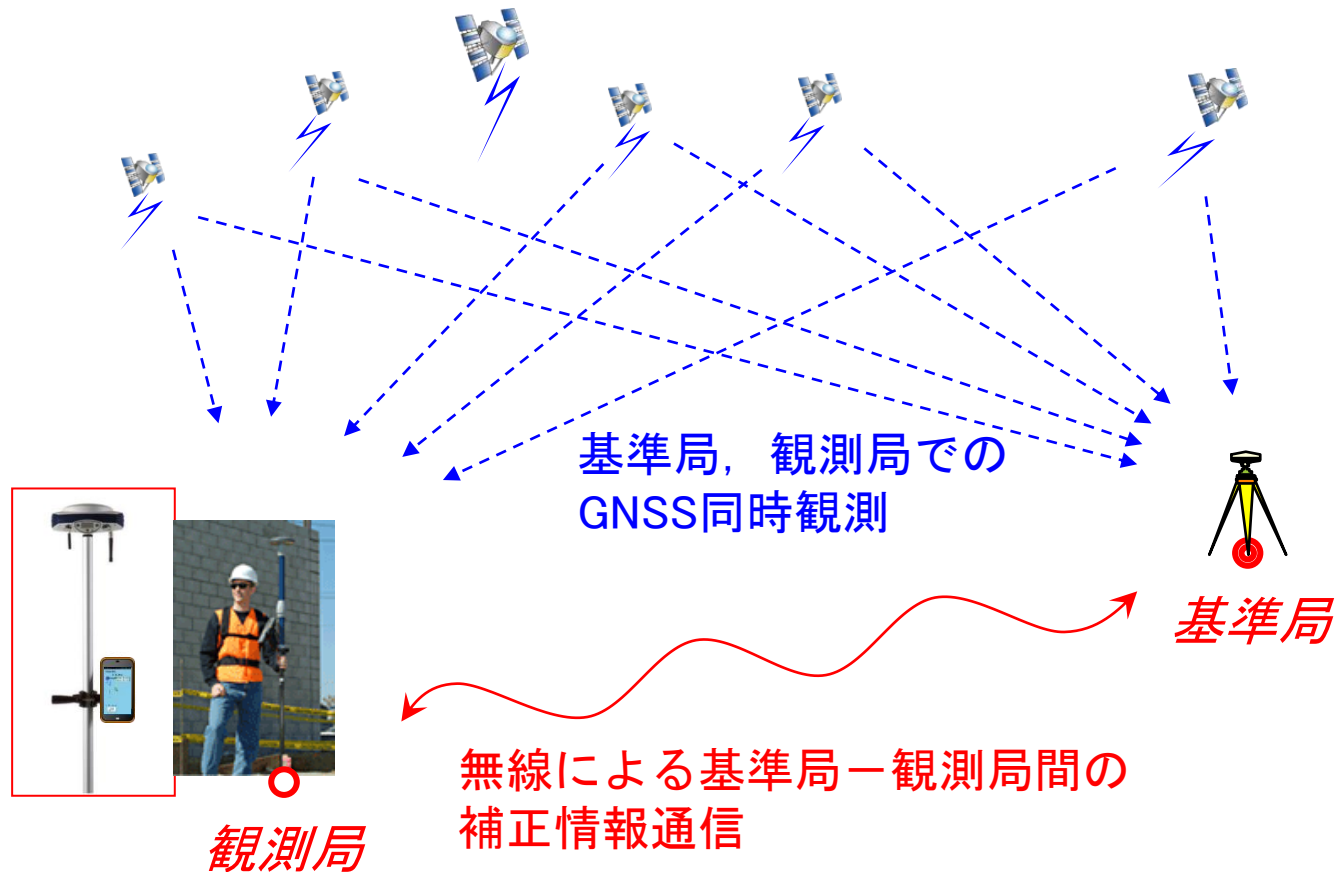
施設安全性に関する変位の測定方法

- 地殻変動分による変位を取り除くため、基準点を決め、そこからの地震前後の相対位置を比較して変位とする
- 基準点は地殻変動でのみ移動する点とする。地殻変動以外の護岸移動や液状化等のローカルな変状によって移動する箇所に置かない。



RTK-GNSS (Real-Time Kinematic GNSS) 測位技術

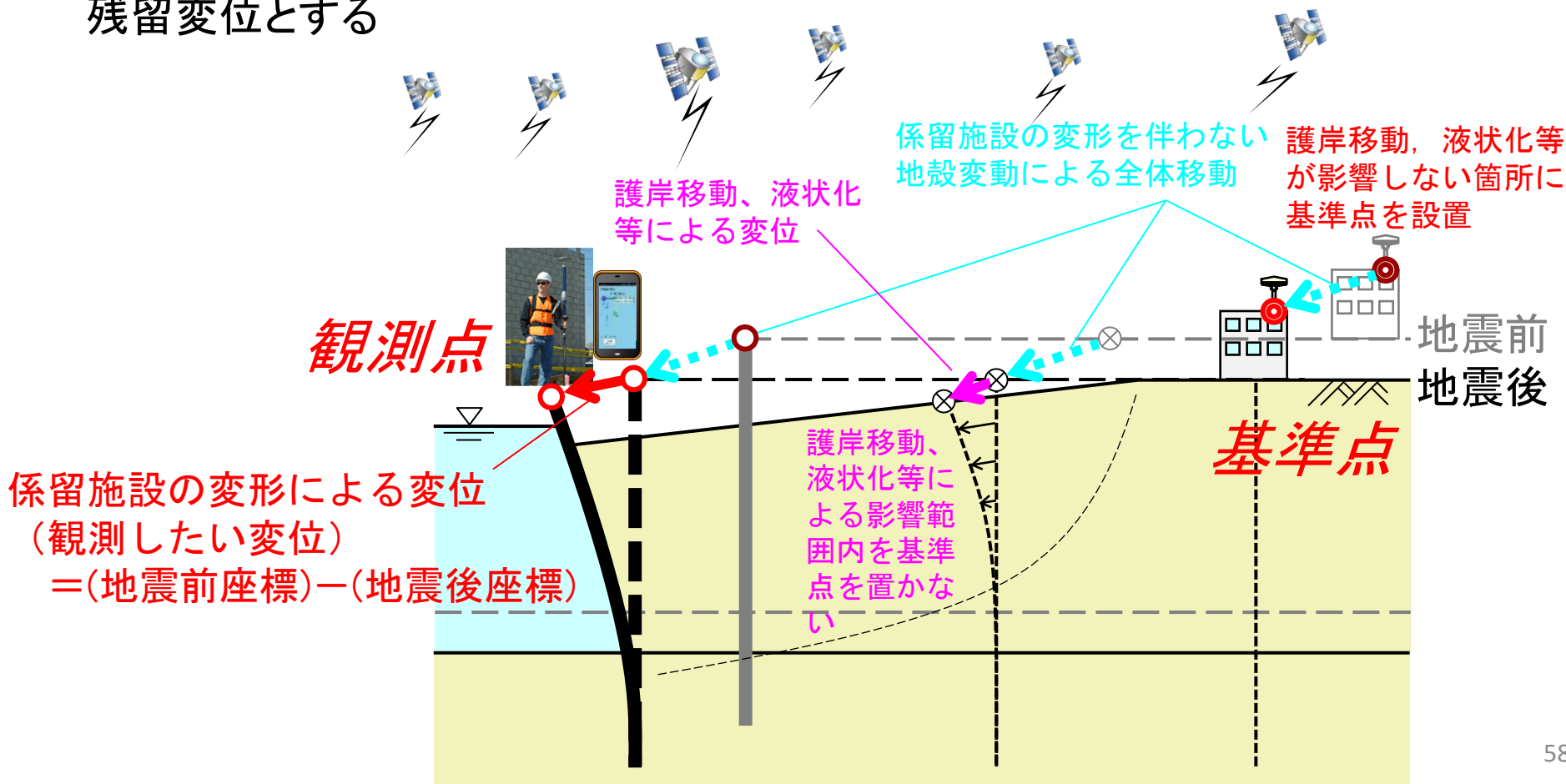
- 座標が既知である基準点と観測点にGNSS受信機を置いて同時に観測し，別途無線により補正情報をやり取りすることで，観測点の座標をリアルタイムで精度良く計測（誤差1~2cm程度）
- 基準点座標を使って観測点座標を測定しており，本質的に基準点から観測点の相対位置を測定していることと同等



RTK-GNSSを用いた岸壁変形量計測ツールの検討

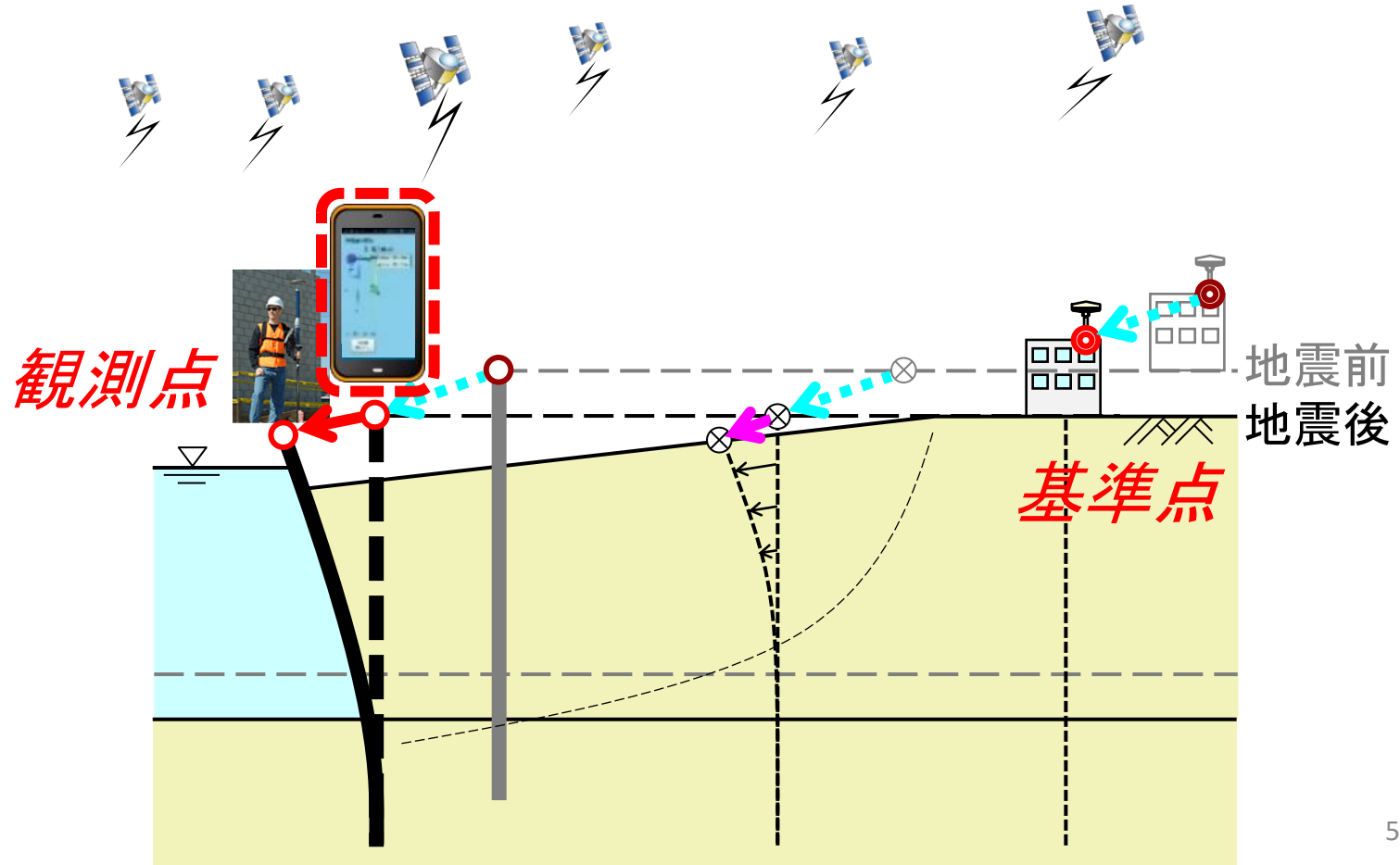
「Berth Surveyor」

- 地殻変動でのみ移動する箇所(護岸移動, 液状化等が影響しない箇所)に基準点を設置
- 地震前の基準点座標を用いて観測点座標を測定(地殻変動で基準点が移動しても基準点座標を更新しない), 地震前後の観測点座標の差分から地震後残留変位とする



RTK-GNSSを用いた岸壁変形量計測ツールの検討 「Berth Surveyor」

- スマートフォン、Androidアプリにより簡単にGNSS受信機を操作，1人でも計測可能
- 地震前の座標情報を記憶、地震後測定時にその場でアプリ上に変位量を表示
- 変形量一部材損傷関係を用いて，供用可否判定結果の表示

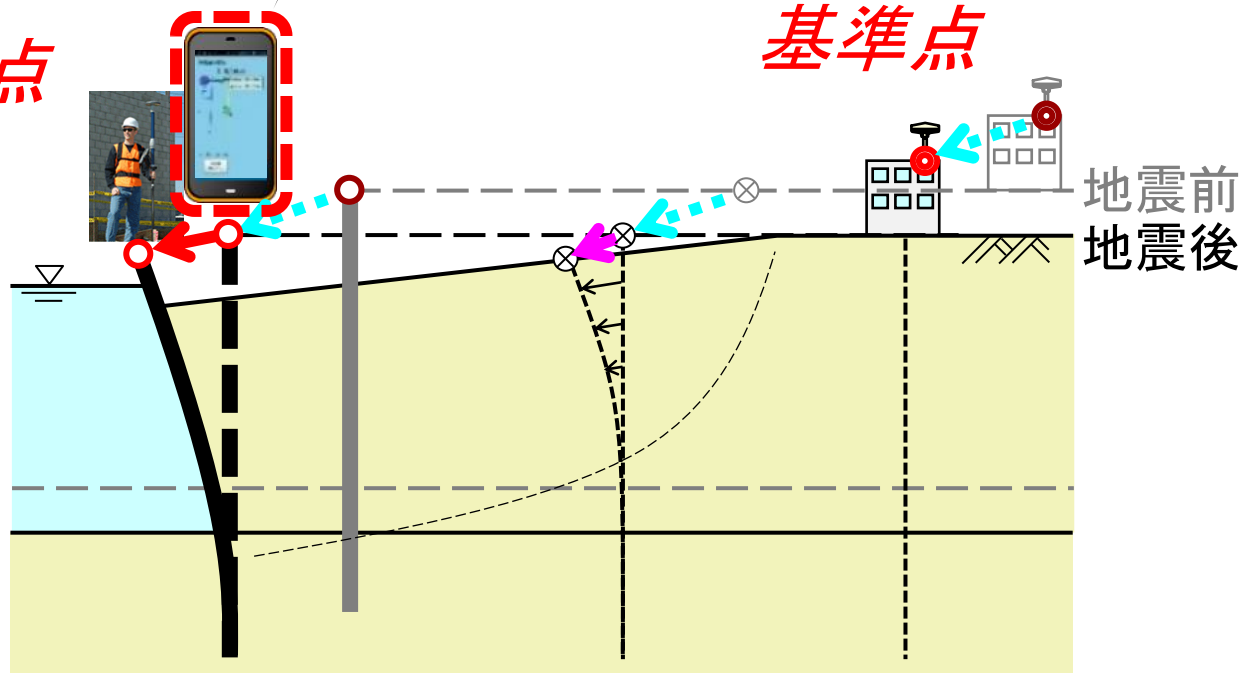


RTK-GNSSを用いた岸壁変形量計測ツールの検討 「Berth Surveyor」



観測点

基準点



係留施設地震時変形量調査・安定性評価支援システム

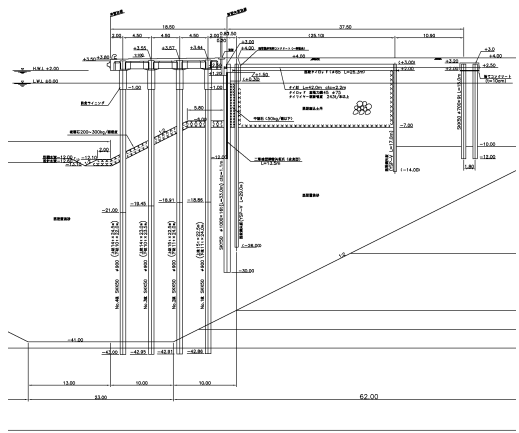
「Berth Surveyor」

- GNSS機器を簡単操作
- 過去の測定座標を保持し、地震後の測定座標との差分により、その場で地震時変位量を確認可能
- CAD平面図上に測定結果を表示

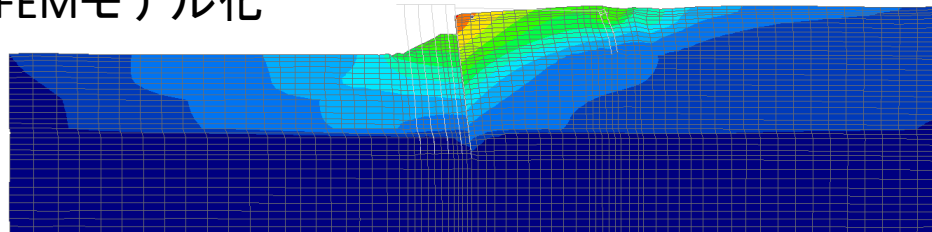


法線変位量と部材損傷状態の関係の整理

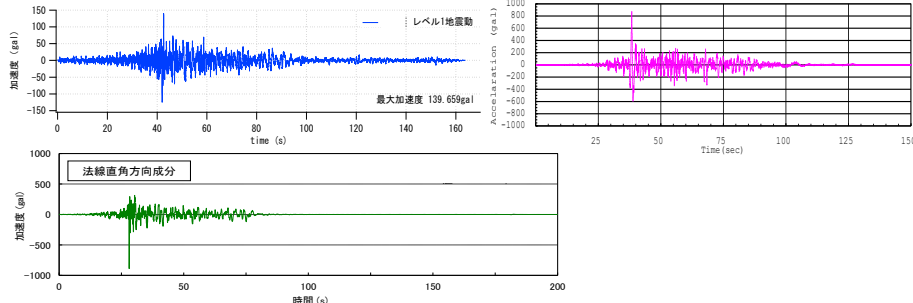
個別の施設ごとに地震動の振幅を変えた複数の地震応答解析を実施し、変形率（法線変位量/水深）と損傷状態を杭や矢板など部材ごとに整理



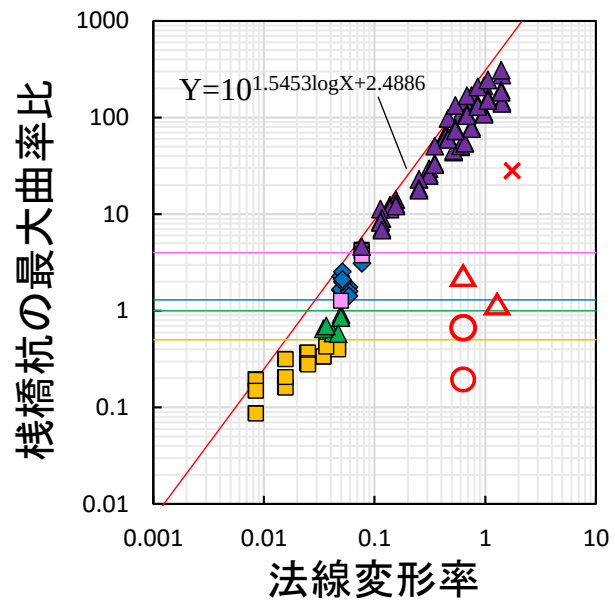
FEMモデル化



振幅調整をして、様々な大きさの地震動を入力

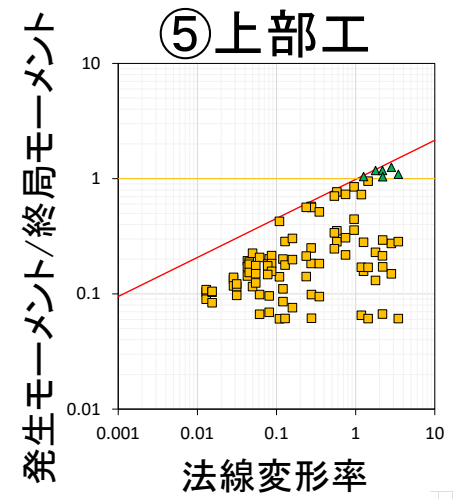
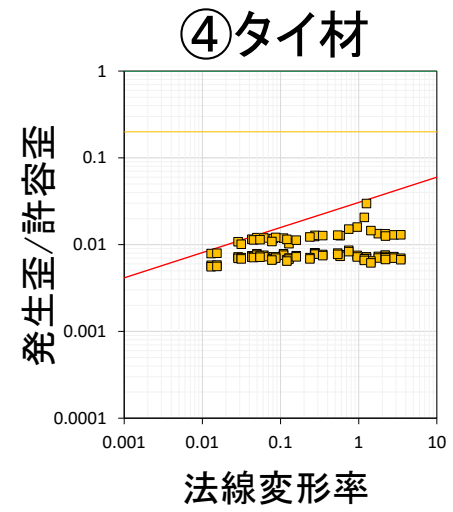
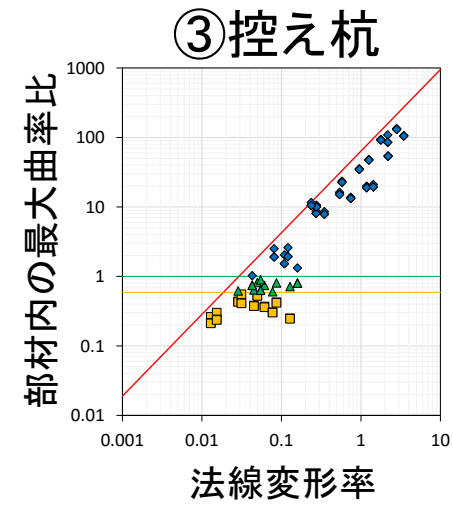
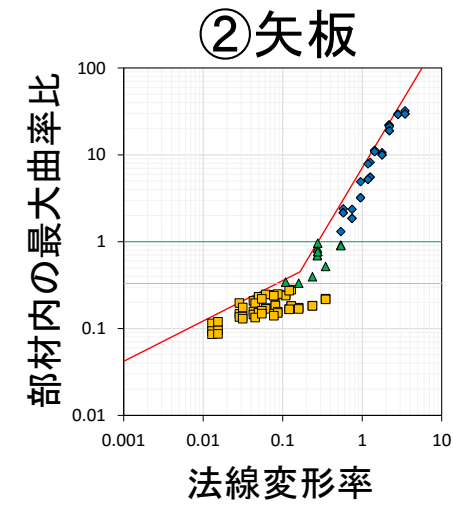
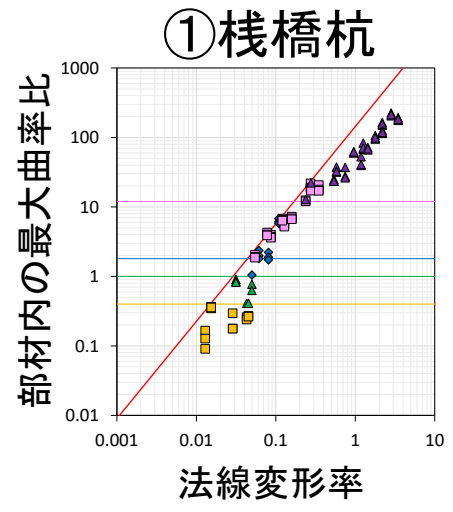


変位量と各部材損傷の関係を整理

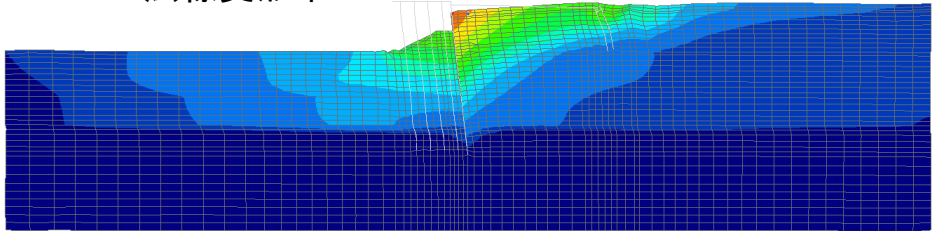
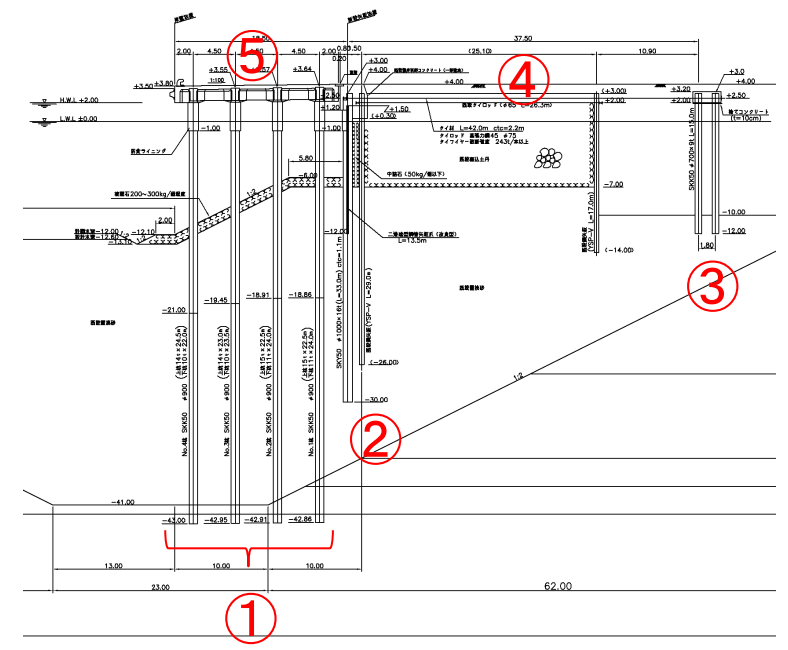


- 例えば、
- : 全ての杭で降伏応力度未滿、○
 - ▲ : 全ての杭で限界曲率未滿、○
 - ◆ : ある杭で限界曲率が發生、△
 - ◻ : ある杭で2箇所以上の限界曲率が發生、△
 - ▲ : 全ての杭で2箇所以上の限界曲率が發生、×
 - : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定

法線変位量と部材損傷状態の関係の整理



■ : I
▲ : II
◆ : III
■ : IV
▲ : V
— : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定



部材損傷判定結果の詳細のアプリ上での表示

- 変位一部材損傷関係グラフ上への測定値のプロット
- 損傷判定閾値との位置関係の確認

余裕で○？、ぎりぎり○？、ぜんぜん×？

測定点「SP00」に発生した変位量は以下の通りです。

開始点： 2019/03/04 13:29:47

終了点： 2019/03/04 13:34:23

200.1cm変位発生！

200.1cm直交変位発生！

詳細
変位

×

△

×

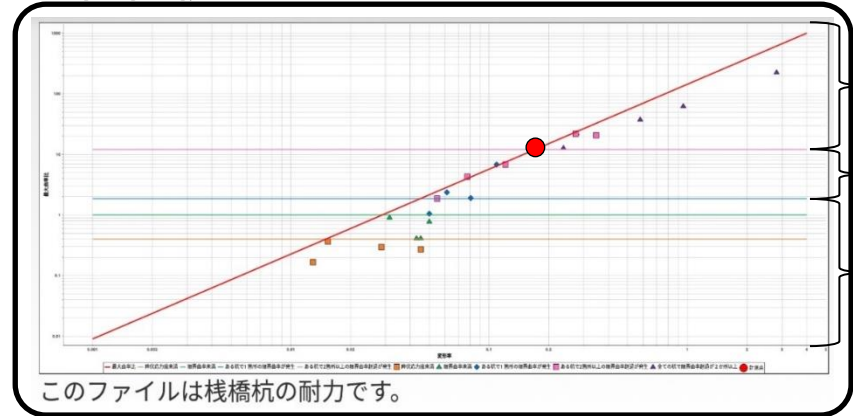
○

○

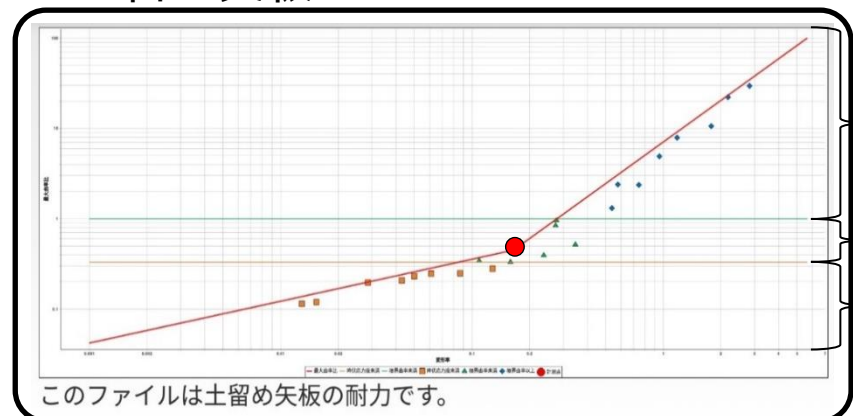
栈橋杭 矢板 控え杭 タイ材 上部工

『○』『×』をタップ

● 栈橋杭



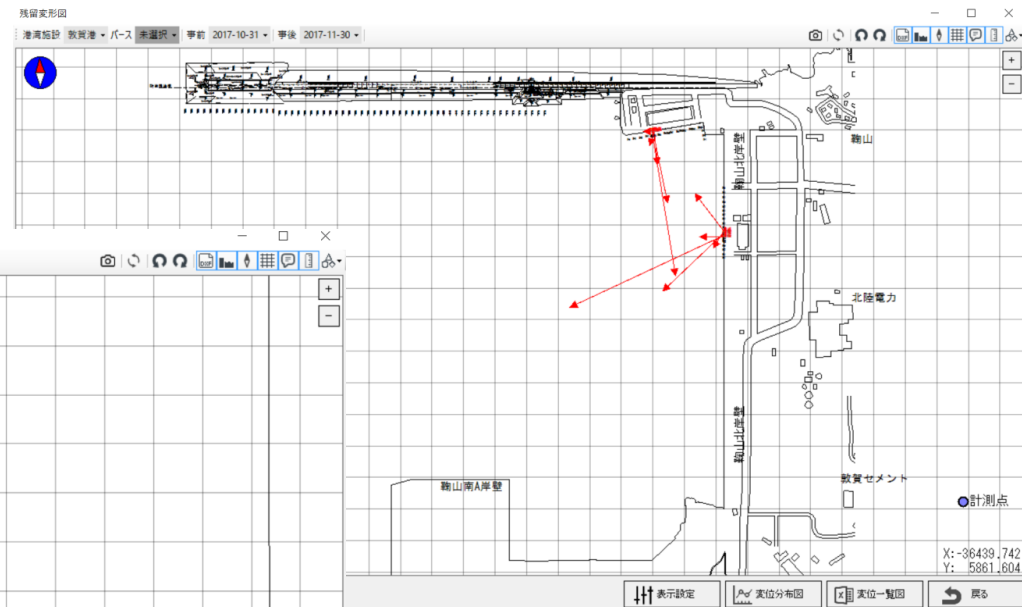
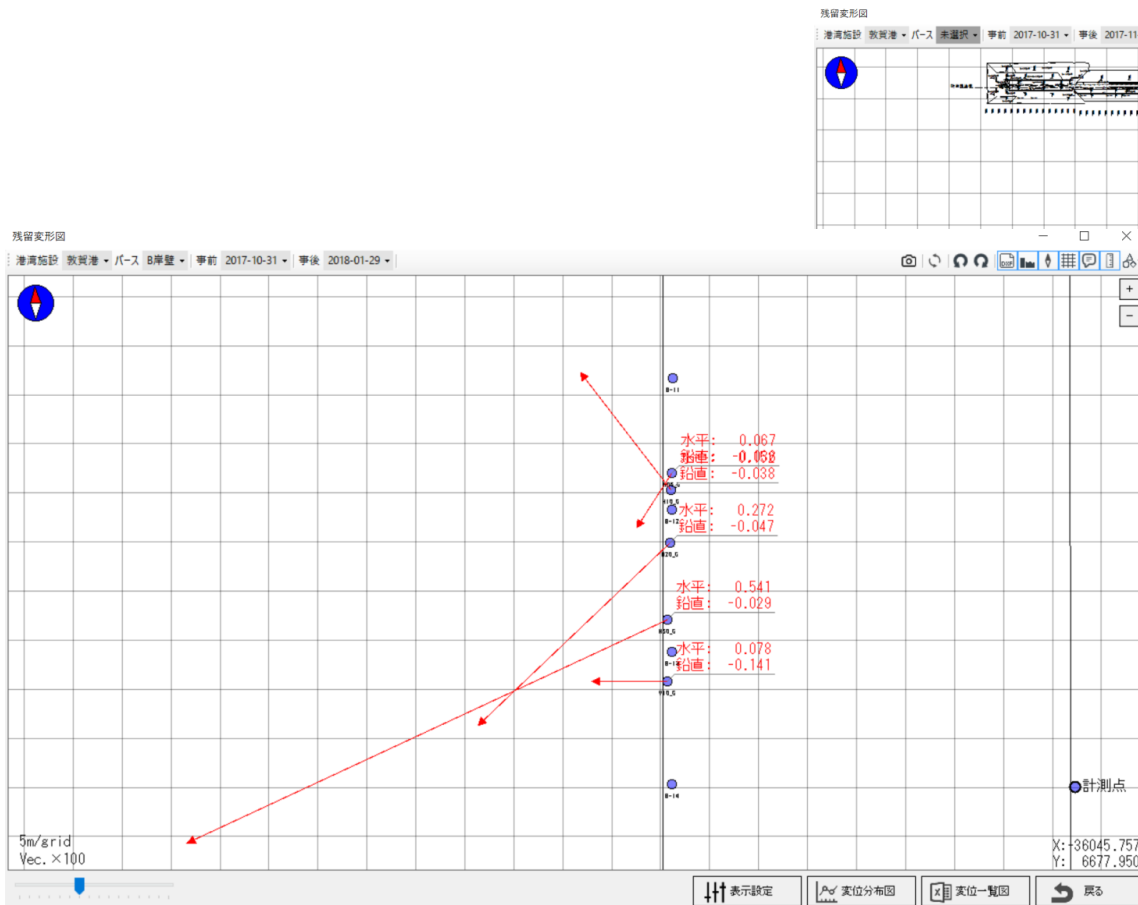
● 土留め矢板



● : 計測点

PCソフトウェア (Berth Surveyor for Desktop)

- スマホアプリの設定、計測点等の編集・管理
- 岸壁全延長や港全体の変形量分布を把握するための残留変形図描画等の機能



基準局移動時の確認

- 巨大地震時の地殻変動を考慮し、基準局が移動した場合に測定が可能かを確認



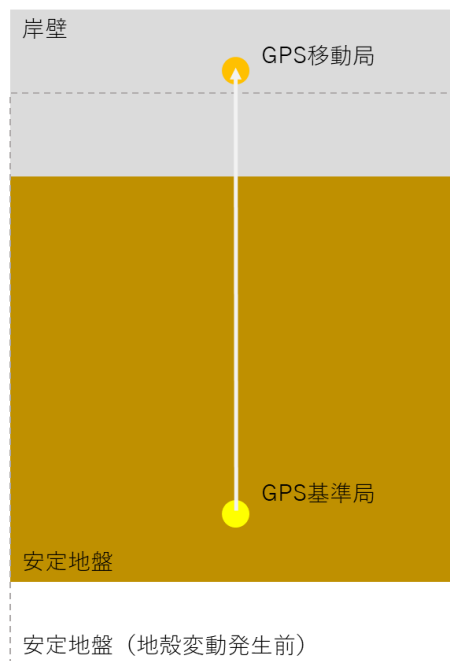
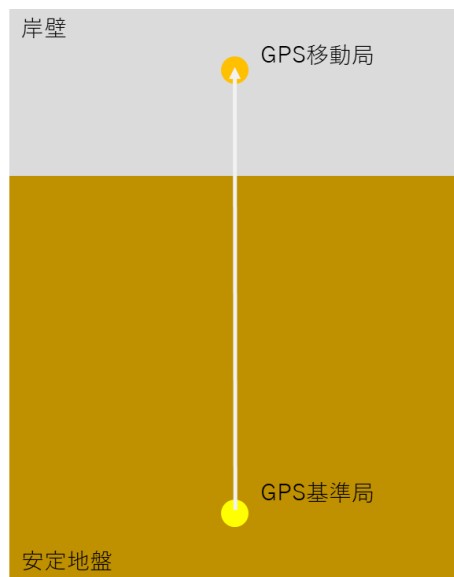
事後計測において、基準局ポールに金具を付け、位置をずらす



基準局位置がずれた状態で、観測点も動いたという想定で測定

基準局，観測局ともに移動時の確認

- 基準局，観測局を共に北に20cm移動



測定点「BT-C-00」に発生した変位量は以下の通りです。

開始点： 2017/11/02 14:37:38
終了点： 2017/11/02 15:12:33

↓ ↑ 1.0cm変位発生！
1.1cm隆起発生！

(詳細)
X:南へ 0.9cm
Y:東へ 0.4cm
1.1cm変位発生！

続けて、他の計測点に発生した変位量を確認する場合は「変位を見る」を押して下さい。

CAD図

変位を見る

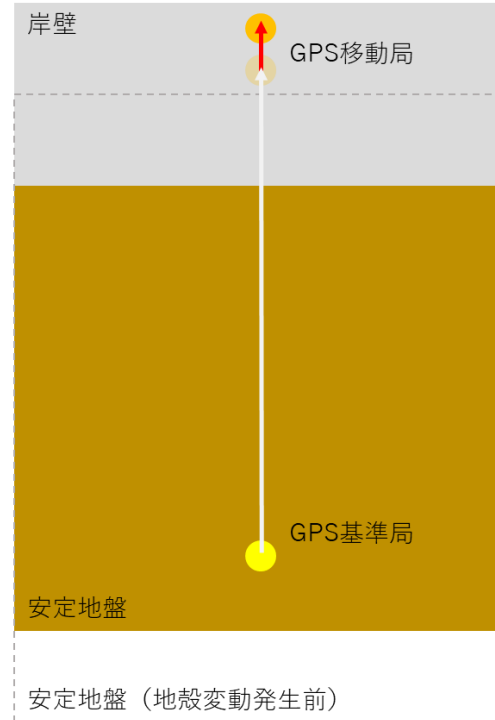
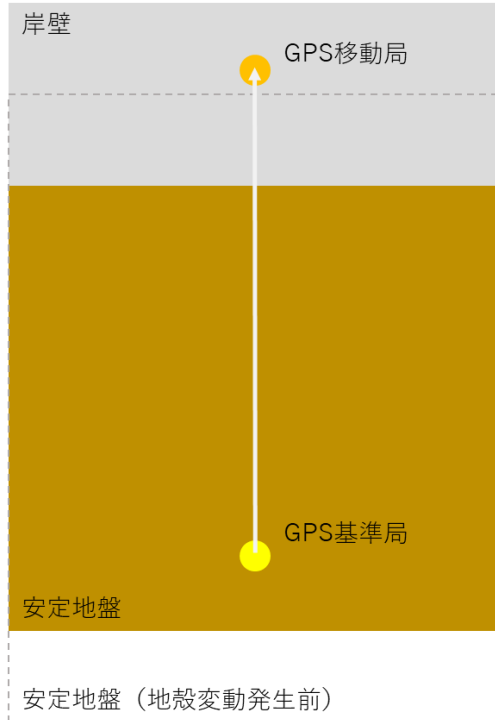
メイン画面へ

← 67

結果(変位量)はほぼ0

基準局，観測局ともに移動時の確認

- 基準局を北に20cm，観測局を北に40cm移動



少し誤差は大きいが、
変位量は約20cmと表示

Measurement application interface showing the results of a measurement at point 'BT-C-00'. The interface includes a status bar at the top with icons for camera, battery, and time (13:05). The main text displays the measurement point and the displacement amount. Below this, the start and end times are shown. A green arrow icon indicates the direction of movement. The displacement amount is shown as 17.7cm (North) and 3.9cm (West). A detailed breakdown of the displacement is provided below. At the bottom, there are buttons for 'CAD図' (CAD Diagram), '変位を見る' (View Displacement), and 'メイン画面へ' (Return to Main Screen). The bottom status bar shows navigation icons for back, home, and recent apps.

測定点「BT-C-00」に発生した
変位量は以下の通りです。

開始点： 2017/11/02 14:37:38
終了点： 2017/11/02 15:15:11

17.7cm変位発生！
3.9cm隆起発生！

(詳細)
X:北へ 17.3cm
Y:西へ 3.5cm
3.9cm変位発生！

続けて、他の計測点に発生した変位
量を確認する場合は「変位を見る」を
押して下さい。

CAD図

変位を見る

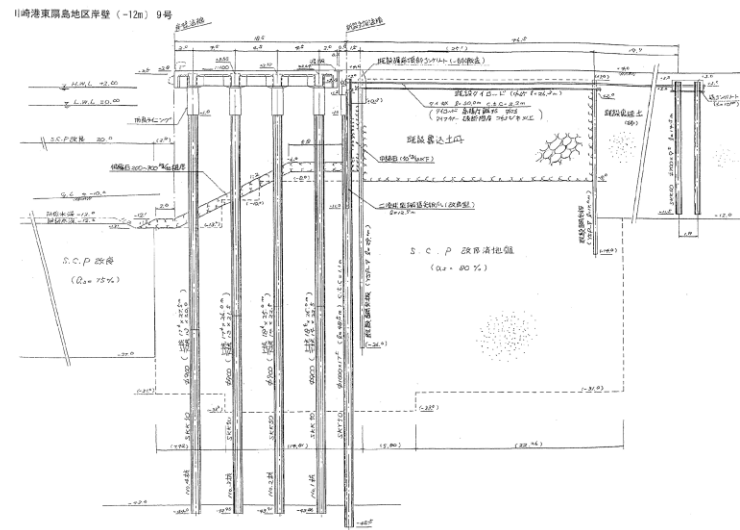
メイン画面へ

- 基準局異常時も測定ができることを確認

適用事例

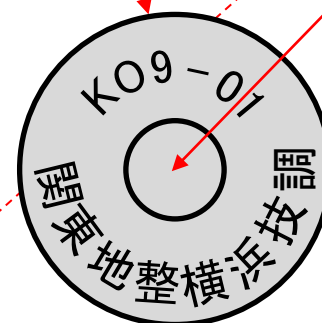
○川崎港東扇島地区(-12m)9号岸壁

- ・ 全長240mの栈橋式係船岸
- ・ 1スパンの両端に金属鈎を設置



アルミ製

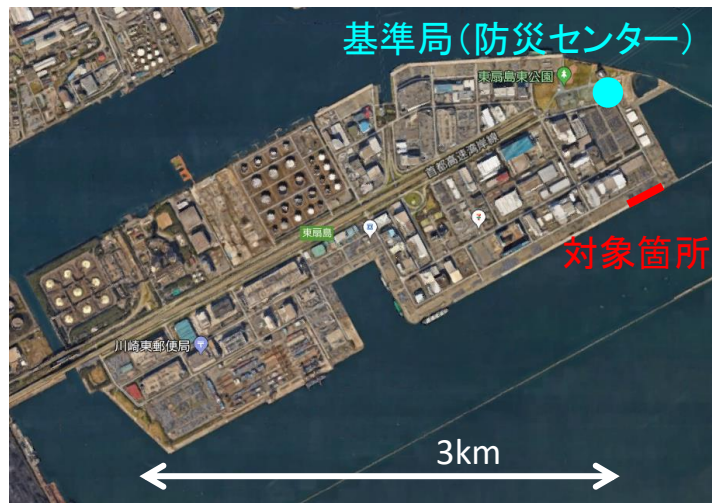
ステンレス製



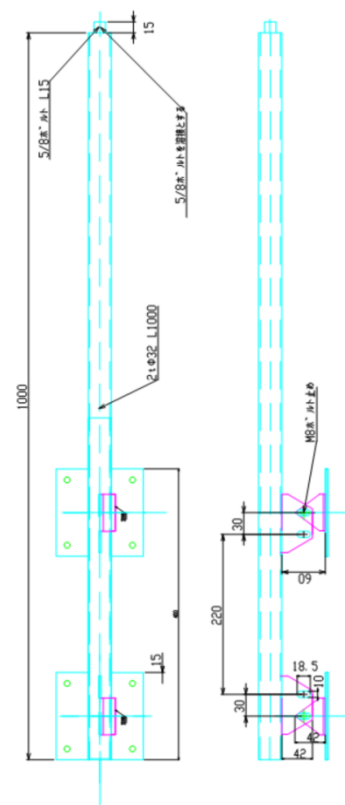
設置した金属鈎

基準局の設置

関東地方整備局首都圏臨海防災センター屋上に基準局設置



GNSS、アンテナ設置用ポール
(常時残存)



一部建物の陰で無線強度が低いところもあったが、東扇島のほぼ全域で基準局一観測局の無線通信は可能であった

一般の測量で用いられるGNSS測位との違い

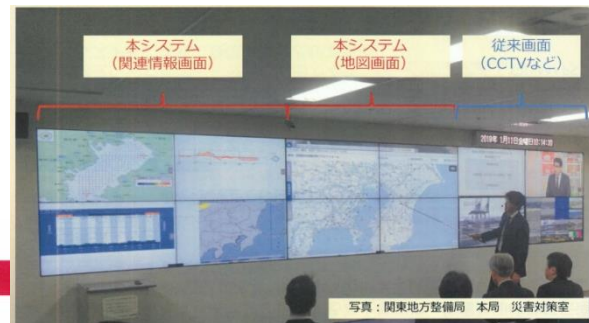
- 一般の測量ではネットワーク型RTK-GNSS方式が用いられることが多いが、巨大地震発生後において地殻変動が生じたときに、用いられている電子基準点データ（座標値等）、それをもとにした測位補正情報データがどのようなになるか不明。
- 電子基準点のデータ配信が停止される可能性や、測位補正情報データの通信（携帯電話網）が利用できない可能性もある

⇒基準局を独自に設置し、観測局とのデータ通信には無線通信を用いることで、外部機関と関係せず、非常時においても確実に測定をすることが可能。

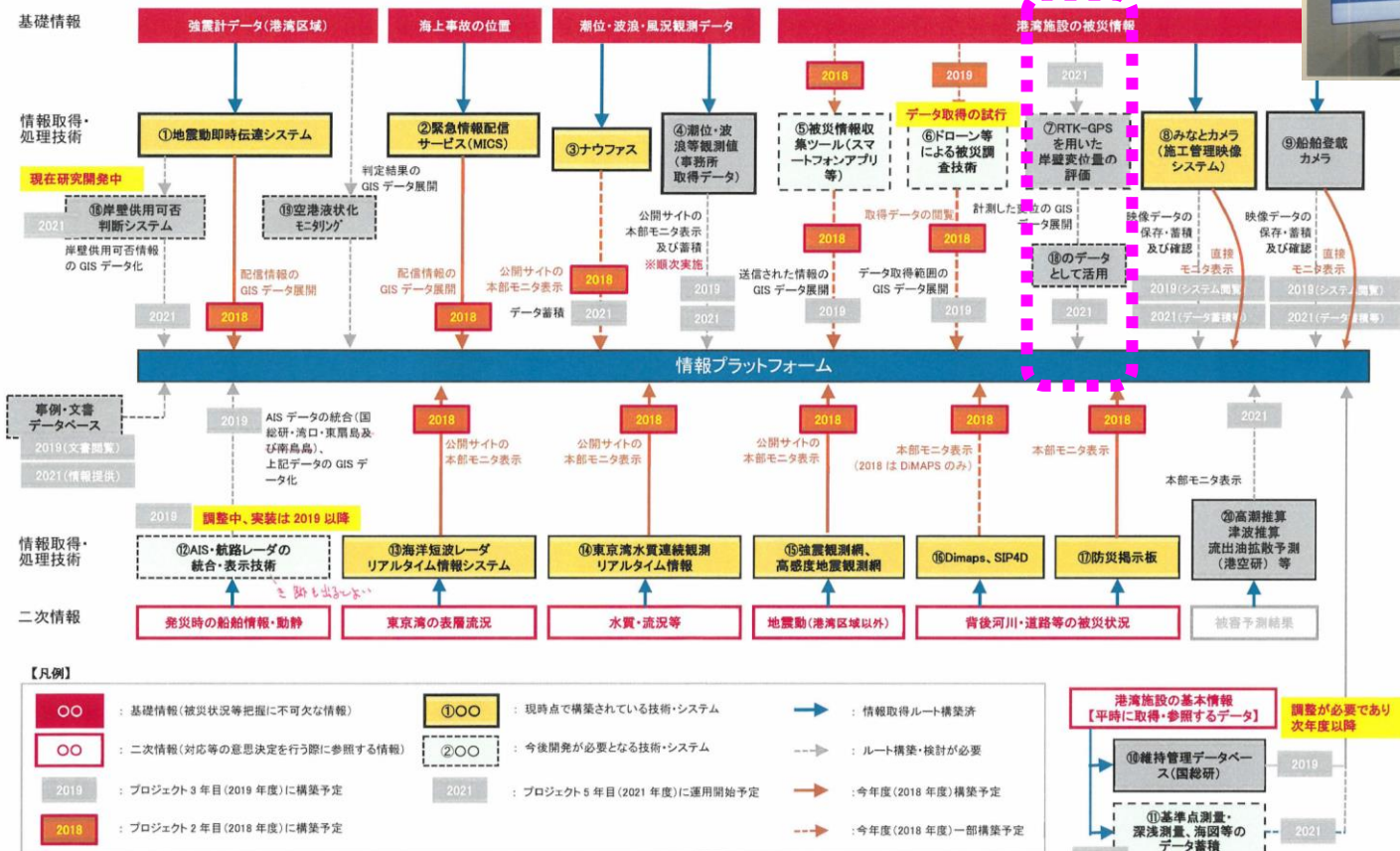
関東地整 防災情報プラットフォームへの連携対応

関東地整開発中の災害時の各種情報を一覧できるシステム

Berth Surveyor改良、サーバーソフトウェア作成により、防災情報プラットフォームで変位量・判定結果を表示できるようにする



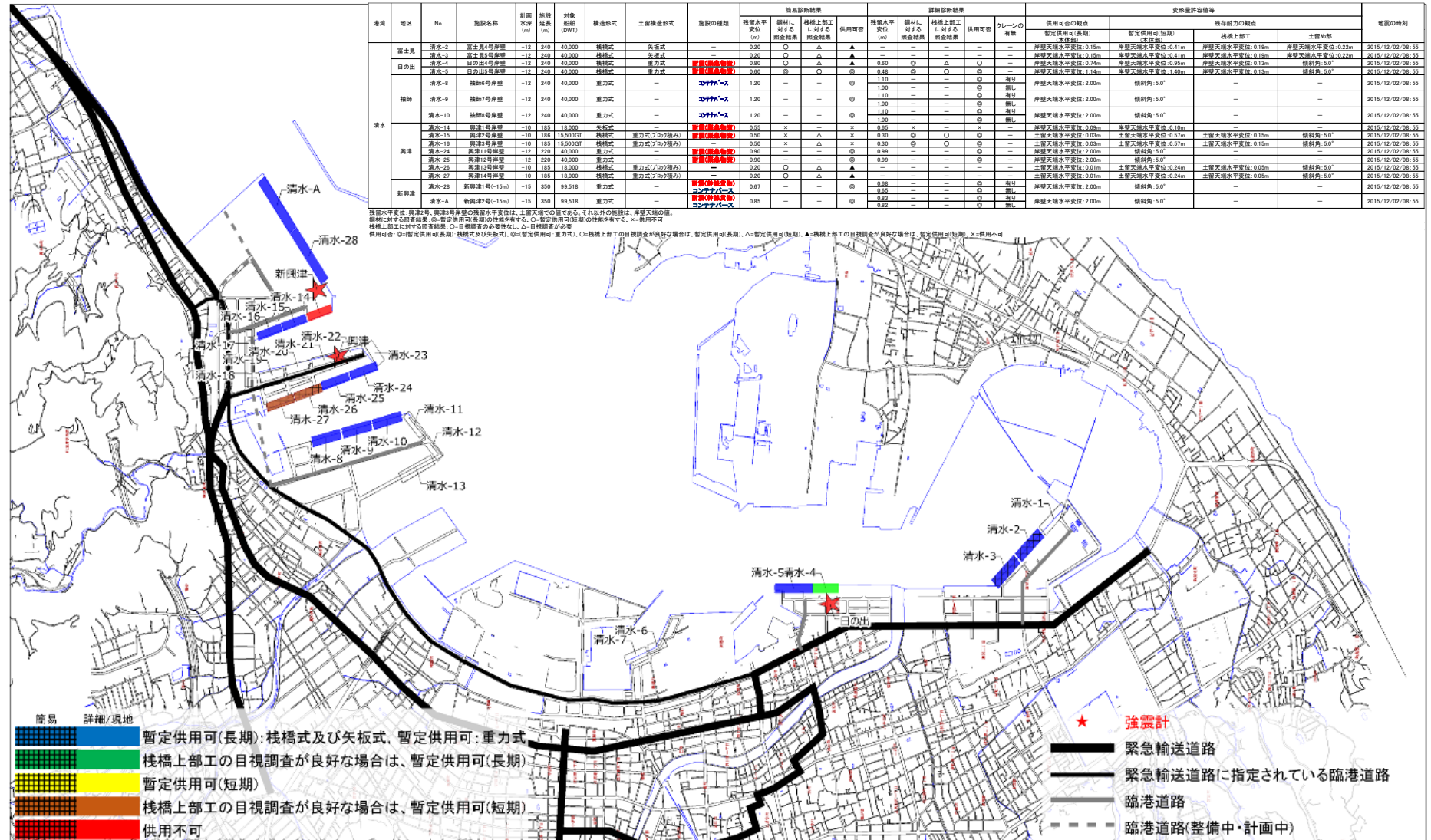
1.1. 情報プラットフォームの全体像 (情報取得経路)



強震計観測情報を用いた係留施設供用可否判定システム

中部地整名古屋港湾空港技術調査事務所

- 強震観測データを用い、被害推定マップを自動作成
- 津波警報等で現地調査が出来ない間に活用



システムの役割と目的

津波警報・注意報発令中
(岸壁に近づくことができない期間)

警報・注意報解除
(現地調査可能)

- ①机上で岸壁の供用可否判定
- ②現地調査を行う優先順位の整理

- ①現地踏査の実施
- ②総合的な供用可否判定

強震情報を用いた施設診断システムによる自動処理

観測地震
情報取得

供用可否の推定
簡易 詳細

被害推定
マップ作成

現地被災
状況調査



地震動情報即時伝達システム(港空研)の配信メール

地震後に港空研から強震動情報がメール配信される

※本メールは港湾地域強震観測網から(独)港湾空港技術研究所経由で自動配信されています。

2016年4月1日 11時40分頃、強震計が揺れを検知しました。
地震によるものかどうか確認中です。

興津-UB

PSI値 : $0.5 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.2
最大加速度 : 1 Gal

三河-U

PSI値 : $0.8 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.8
最大加速度 : 3 Gal

名古屋飛島-UB

PSI値 : $2.6 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 1.8
最大加速度 : 2 Gal

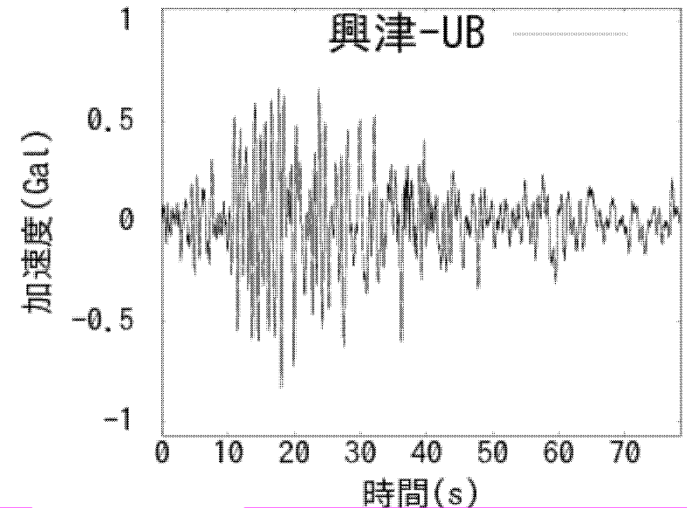
衣浦-U

PSI値 : $2.2 \text{ cm/s}^{0.5}$
計測震度相当値 : 2.0
最大加速度 : 3 Gal

地震動が観測された
強震計ごとに“速度の
PSI値”、“計測震度相
当値”、“最大加速度”
が表示。

波形

波形 (SOUTH)



注: PSI値は速度波形の二乗積分値の平方根として定義される量で、港湾構造物の被害程度と良い相関を示します。

参考までに1995年兵庫県南部地震の際、神戸港工事事務所では $\text{PSI}=99 \text{ cm/s}^{0.5}$ 、1983年日本海中部地震の際、秋田港工事事務所では $\text{PSI}=61 \text{ cm/s}^{0.5}$ です。

注: 計測震度相当値を公表される際には「計測震度相当値」という名称で公表して下さい。

注: 最大加速度は港湾施設の被害の大小と結びつかない場合が多いので御注意下さい。

詳細は以下のページを参照して下さい。

興津-UB http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79232

三河-U http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79238

名古屋飛島-UB http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79223

名古屋飛島-U http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79224

衣浦-U http://www.eq2.pari.go.jp/mobile/mobile_record_view.php?recorddata_id=79221

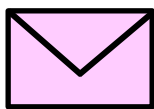
地震の波形情報の
在処を表示

システム構成の概要

港空研

- ①
データ送信
(震度3以上)

地震動情報即時伝達システム
「地震動情報メール」配信
地震発生から約15分後



- ②メール配信、取得
(PSI値などの情報入手)

港空研サーバー
(強震計観測記録)

- ④
アクセス

- ⑤地震を観測した強震計の
観測記録を入手
※対象の強震計、7港湾で合計13箇所

中部地整

メールサーバー(中部地整)
③指定した時間間隔でアクセス

(加速度時刻歴波形の入手)

波形記録入力

施設診断システムPC



- ⑥強震計観測データの変換
(地表・地中のデータから工学的基盤上の入力地震動に変換)

- ⑦簡易判定(評価線による判定)

- ⑧詳細判定(FLIP解析)

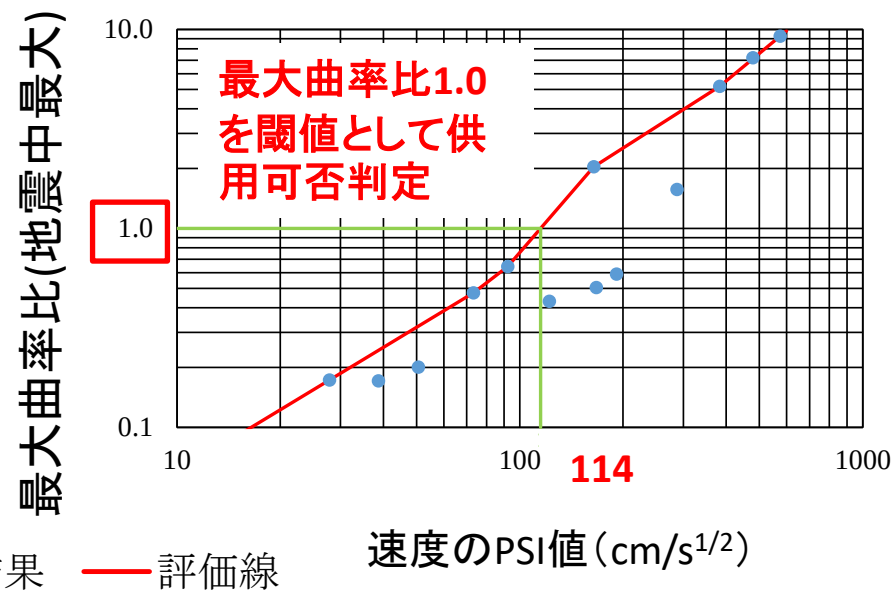
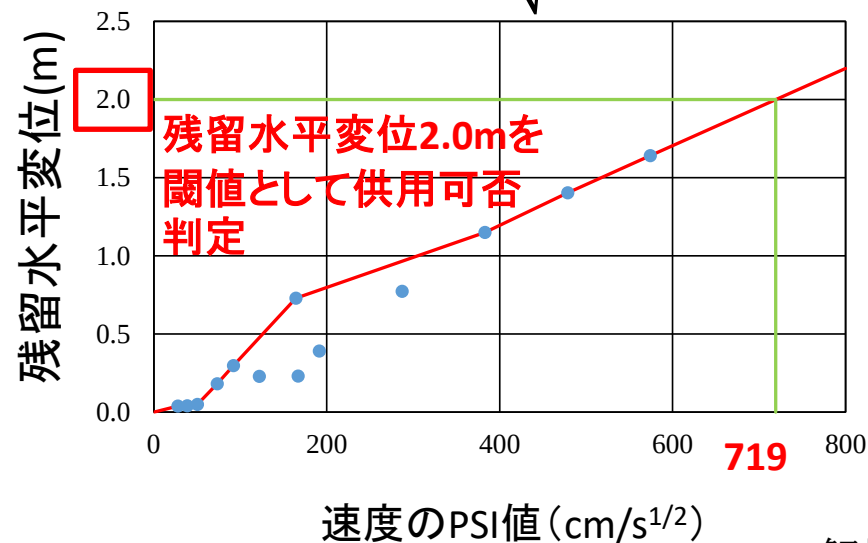
強震計
(各港湾事務所)

係留施設の供用可否判定(簡易判定)

- 予め様々な地震動(50年～500年の再現確率地震、L2地震等)を想定したFLIP解析を実施。
- 速度のPSI値をパラメータとして、残留水平変位、鋼部材の最大曲率比の評価線から判定。

※最大曲率比 = 最大発生曲率 / 全塑性モーメントが発生する曲率

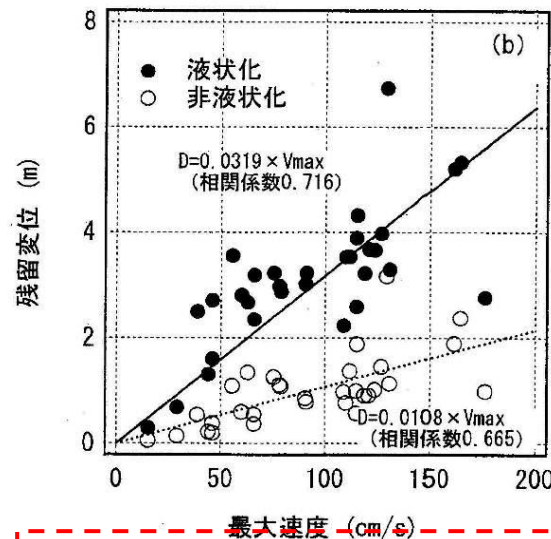
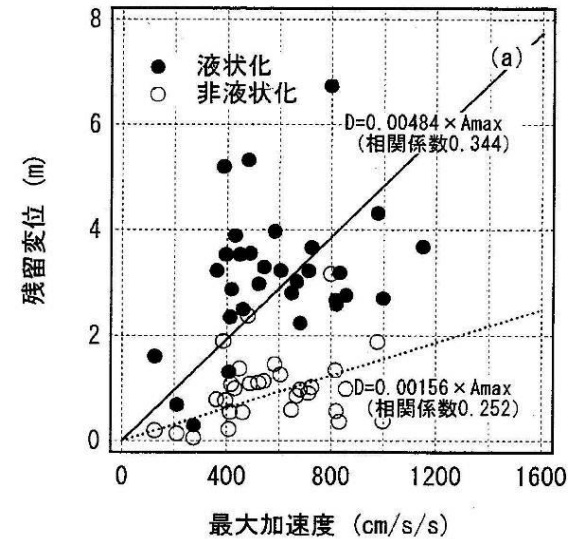
$$\text{速度のPSI値} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt}$$



● 解析結果 — 評価線

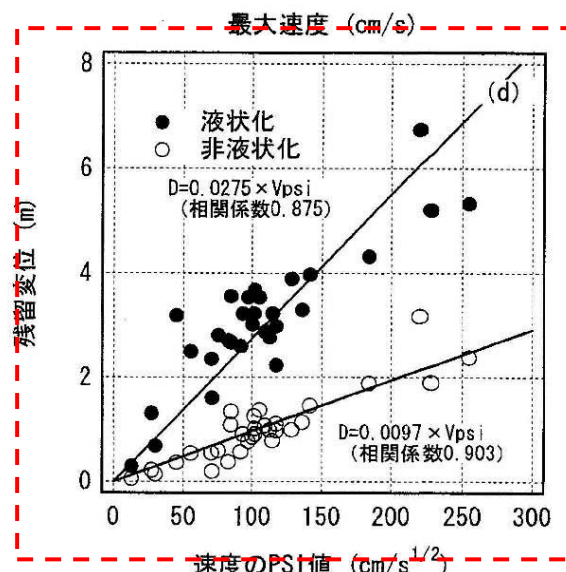
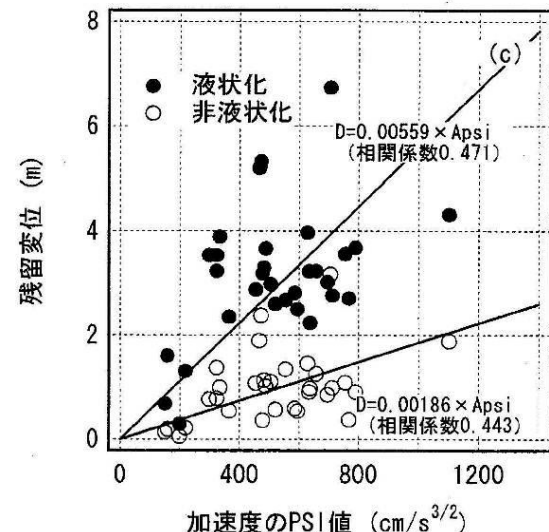
速度PSI値とは

- 速度のPSI値とは、野津ら¹⁾により定義された、港湾構造物の変形量と相関が高い地震動指標である。



$$\text{速度のPSI値} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt}$$

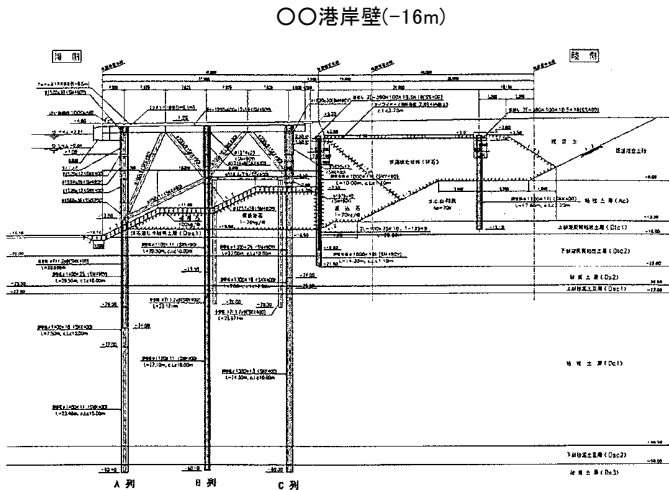
1)野津 厚・井合 進:岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, pp.18~19, 2001.



係留施設の供用可否判定(簡易判定)

出力結果例

- 地震観測後、数分後に自動で“Excelファイル”で出力。
- 通信網が不通時の対策として、“計測震度”による簡易判定方法も整備。



速度のPSI値を用いた簡易判定

工学的基盤における速度のPSI値(cm/s ^{1/2})	60.0	
残留水平変位(岸壁)	0.13m	
残留水平変位(土留め)	0.22m	
地震中の設計耐力比(上部工コンクリート)	0.09	設計耐力以下
地震中の最大曲率比(栈橋杭)	0.54	全塑性未満
地震中の最大曲率比(土留め)	0.61	全塑性未満
船舶接岸時の作用耐力比(栈橋杭)	0.41	発生応力は降伏未満
供用可否判断	◎	暫定供用可(長期)

対象船舶: 108,500DWT

簡易判定結果

計測震度を用いた簡易判定

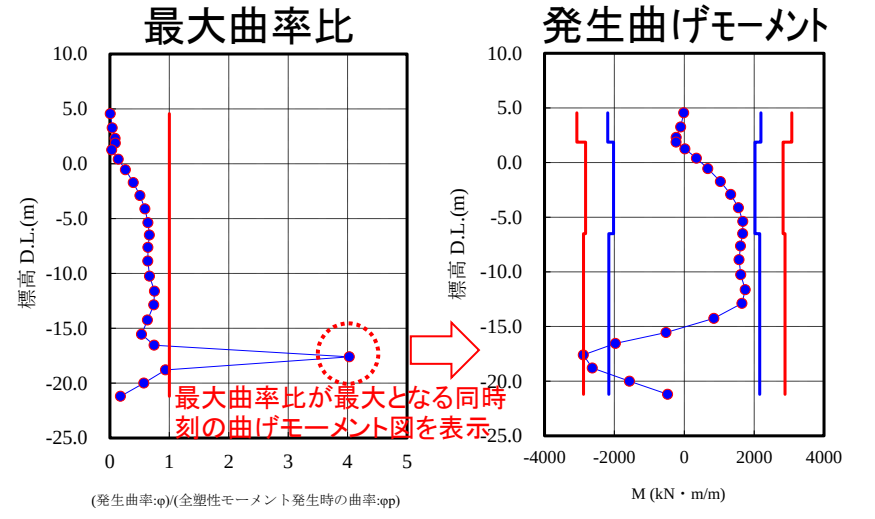
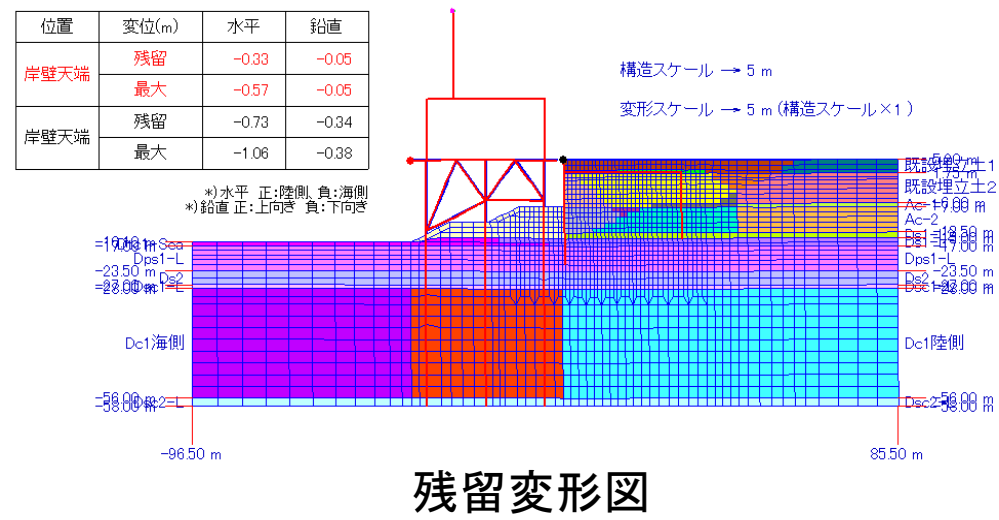
震度階級	4以下	
残留水平変位(岸壁)	0.06m	
残留水平変位(土留め)	0.10m	
地震中の設計耐力比(上部工コンクリート)	0.09	設計耐力以下
地震中の最大曲率比(栈橋杭)	0.16	全塑性未満
地震中の最大曲率比(土留め)	0.49	全塑性未満
船舶接岸時の作用耐力比(栈橋杭)	0.17	降伏未満
供用可否判断	◎	暫定供用可(長期)

対象船舶: 108,500DWT

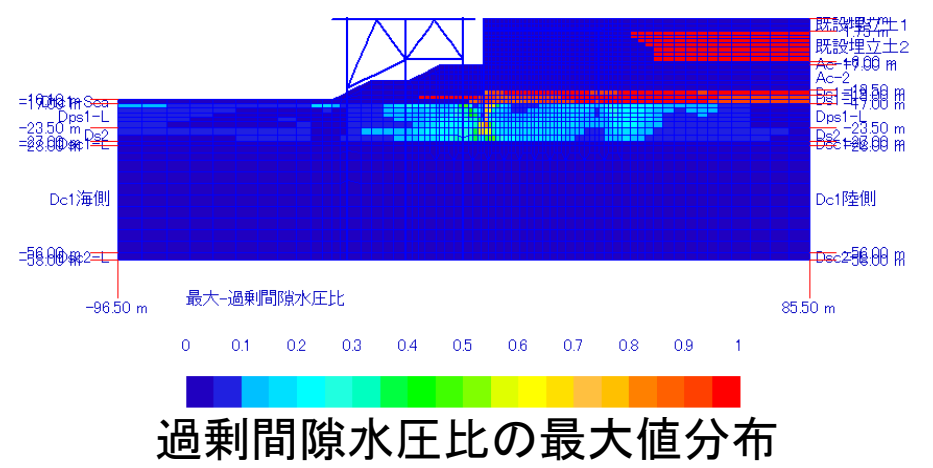
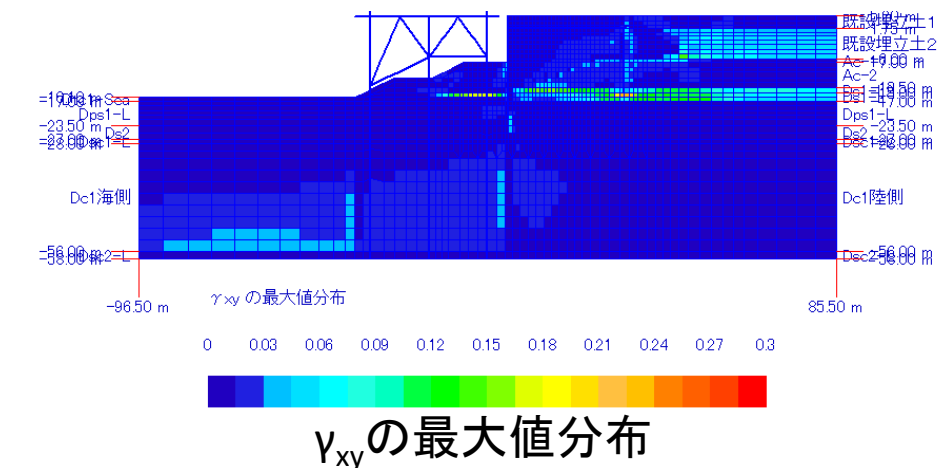
通信網不通時の対策として、気象庁発表の震度階級を手入力することでも判定が可能。

係留施設の供用可否判定(詳細判定)

- 強震計の観測地震動を用いたFLIP解析をシステムで実施して、詳細判定する



鋼材(土留矢板や栈橋杭等)の照査例



- 港湾施設の地震時挙動、被災メカニズム解明
 - 岩ズリを用いた岸壁の被害
- 耐震性能照査手法、技術基準対応
 - 耐震性能照査時の鋼管杭のモデル化
 - 岸壁増深改良時の地震応答解析
 - 矢板構造による重力式岸壁の増深改良時の既設構造及び築堤過程省略の影響検討
- 港湾構造物の耐震対策
 - 制振部材を用いた栈橋の改良
- 地震後の港湾係留施設の利用可否判断
 - RTK-GNSSによる地震後岸壁変形量計測ツール, 利用可否判断
 - 強震観測情報を用いた利用可否判断

ご清聴ありがとうございました

