

話題提供： 港湾施設の耐震設計における数値解析の活用

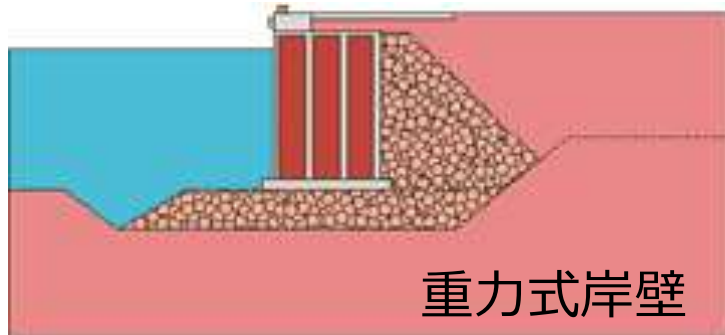
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ
大矢陽介

2025年度土木学会全国大会研究討論会（9）
原子力土木委員会『数値解析における不確実さと原子力
施設の安全性評価における課題』

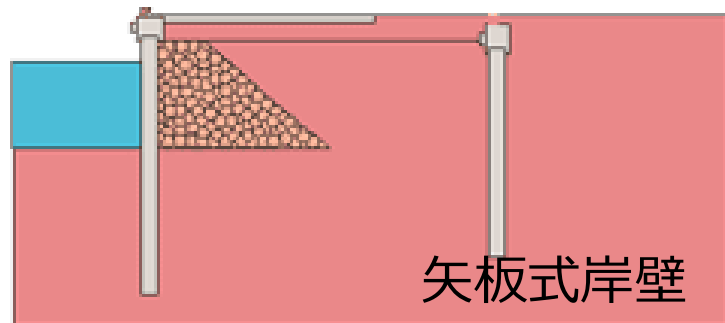
災害時における港湾施設の役割



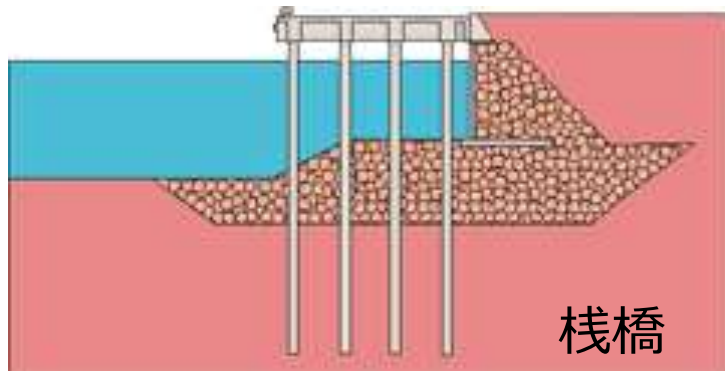
● 主な係留施設



重力式岸壁



矢板式岸壁



栈橋

東北地方整備局HP

● 人員，緊急物資輸送の拠点

1995年兵庫県南部地震（神戸港）

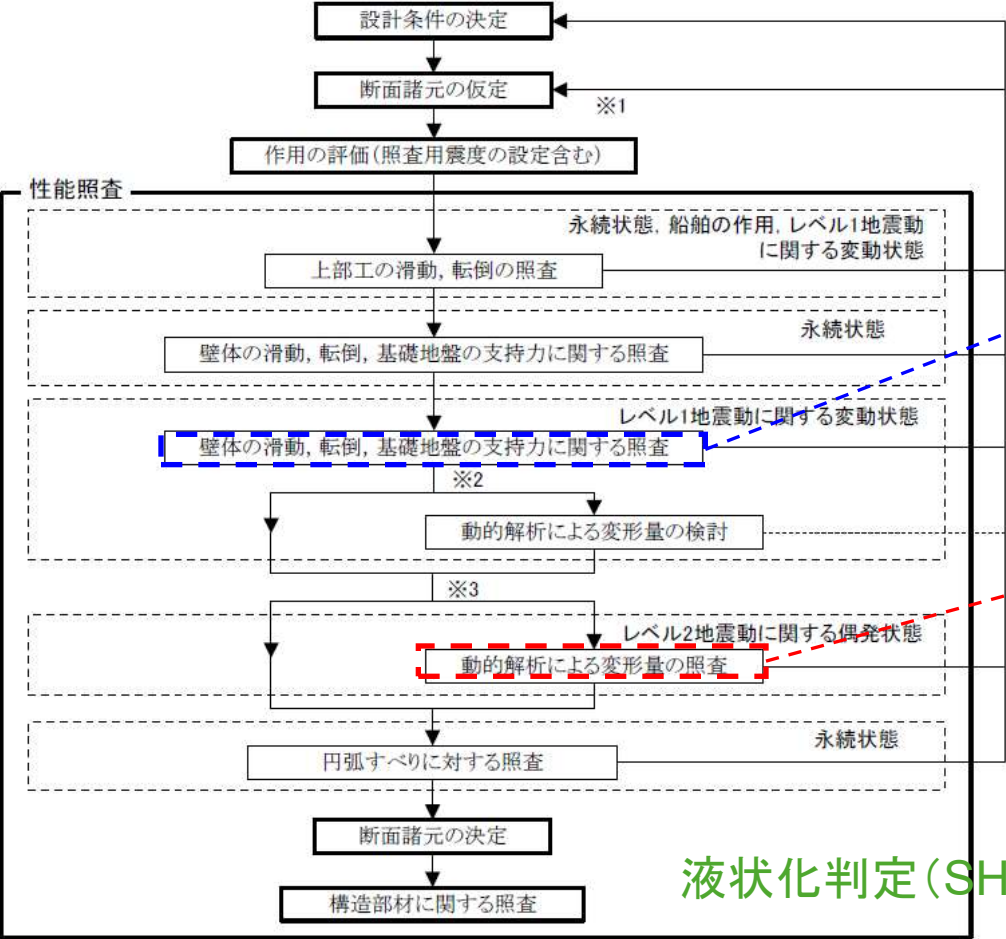


2024年能登半島地震（輪島港）



1月5日
応急復旧により車両のアクセス経路を確保

設計の流れ（重力式岸壁） 地震応答解析の利用



※1: 液状化及び沈下等の影響の評価については表示していないため、別途考慮する必要がある。
※2: 必要に応じて、レベル1地震動に対して動的解析による変形量の検討を行うことができる。
なお、耐震強化施設にあっては、動的解析による変形量の検討を行うことが望ましい。
※3: 耐震強化施設は、レベル2地震動に対する照査を行う。

通常施設	耐震強化施設
L1変動状態に対する照査	滑動、転倒、支持力等の照査 震度法ベースの安定解析(FLIPを利用)
L2偶発状態に対する照査	変形照査 有限要素法他

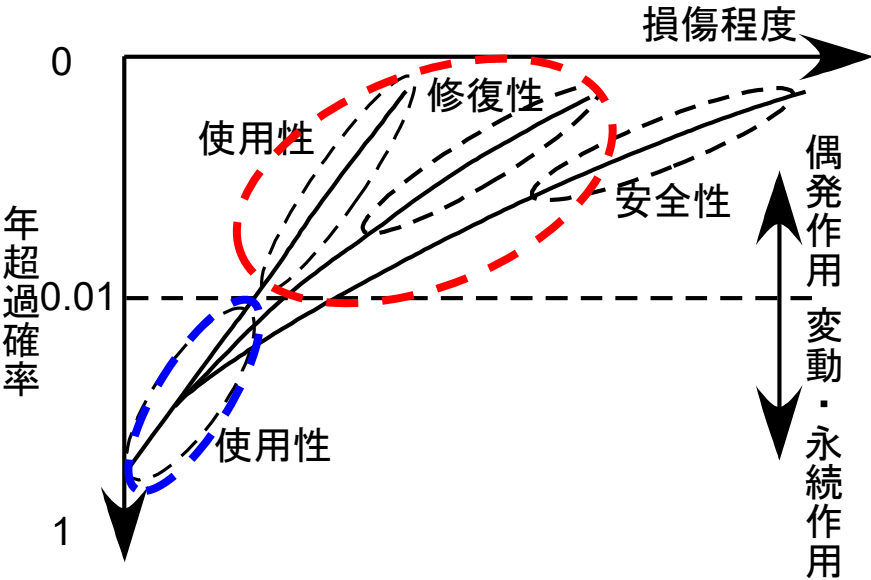
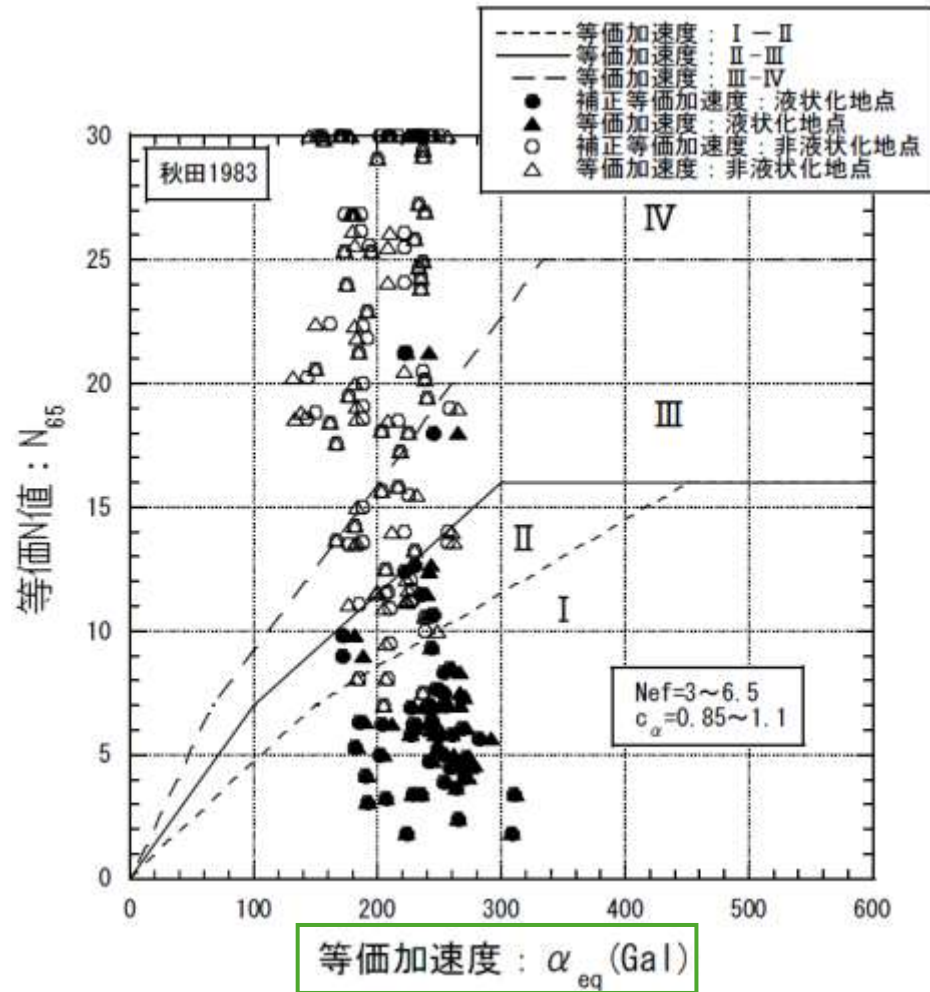


図-2.2.1 重力式係船岸の性能照査順序の例

事例検証（液状化判定）



液状化判定（SHAKEを利用）



$$\alpha_{eq} = 0.7 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} g \frac{1}{c_{\alpha}}$$

α_{eq} : 等価加速度

τ_{max} : 最大せん断応力

σ'_v : 有効上載圧力

g : 重力加速度

c_{α} : 波補正係数

液状化の判定

I 液状化すると判定する。

II 液状化すると判定するか、繰返し三軸試験により判定する。

III 液状化しないと判定するか、繰返し三軸試験により判定する。

IV 液状化しないと判定する

1983年日本海中部地震の事例（秋田港）

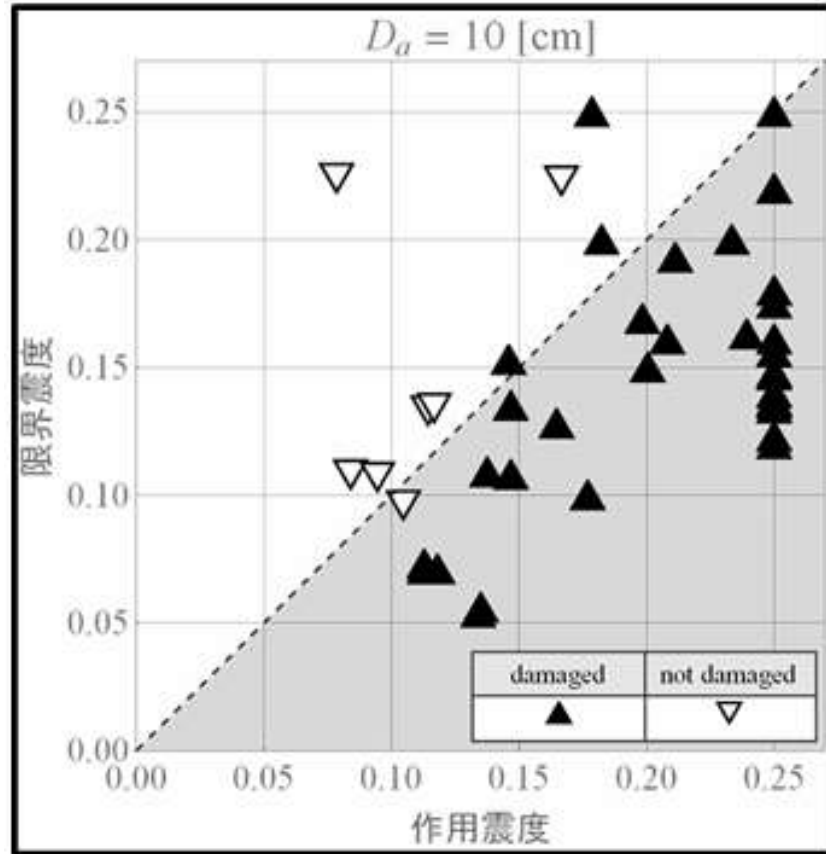
山崎・江本（2010）

事例検証（照査用震度）



照査用震度（FLIP*を利用）

*旧運輸省港湾技術研究所において開発された



重力式岸壁の実被害による被災判定
福永他（2016）

・作用震度

実際に構造物が経験した地表の地震波形を基に震度算定式により算出

・限界震度

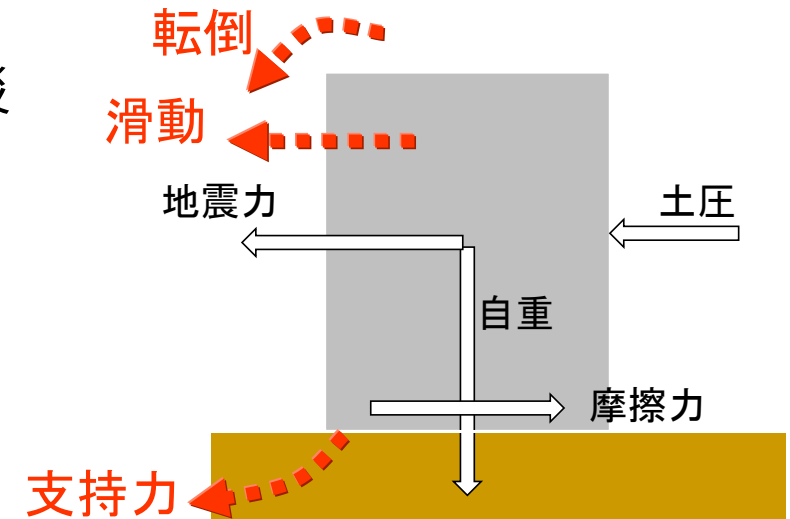
破壊が初めて生じた時の水平外力を構造物の重量で除したもの（耐力を作用で除した安全率）

天端残留水平変位

実測最大値 $> D_a$: 被災

実測最大値 $\leq D_a$: 無被災

D_a : 変形量許容値



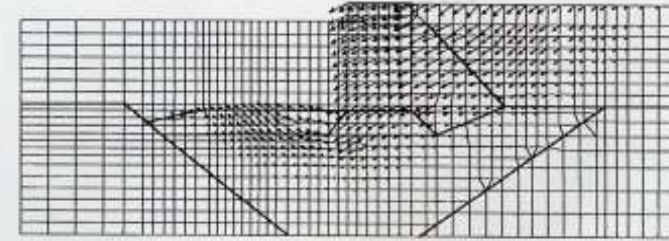
レベル2地震動に関する偶発状態の性能照査



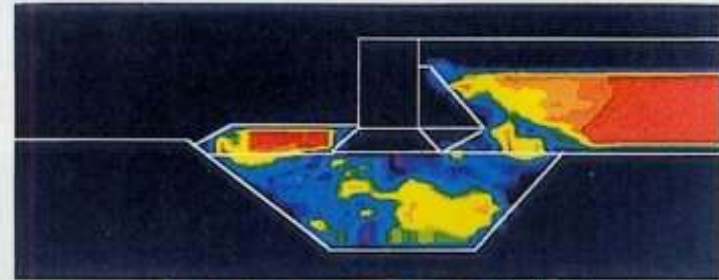
- ① 地震応答解析による方法
- ② 振動実験による方法

- 設計実務では①解析が用いられる
 - 新構造・新技術は②実験を実施
- 毎回模型実験での検証は不要

地震応答解析の事例



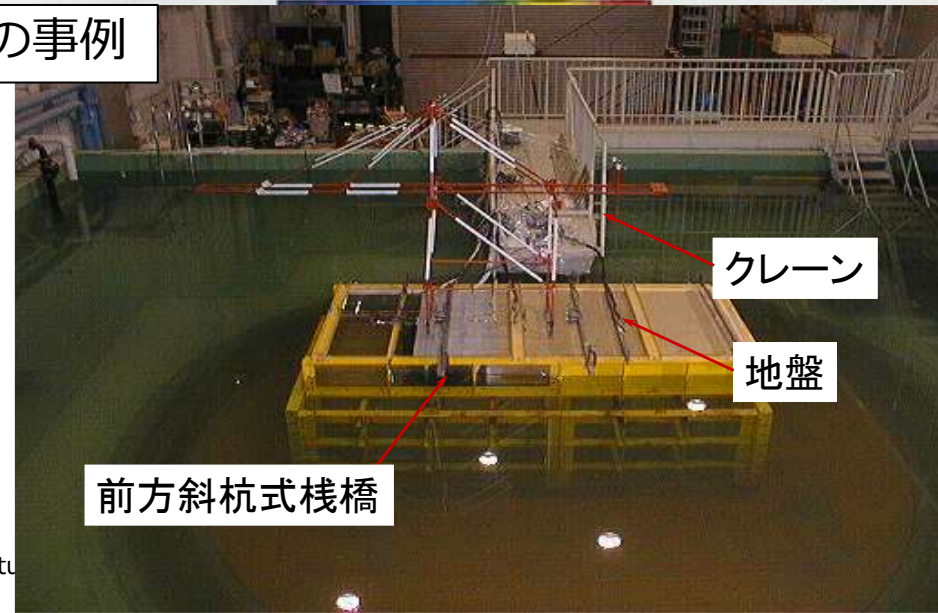
数値解析によって求めたケーソン周辺の変位ベクトル図
Residual Displacements Due to Earthquake Computed by Effective Stress Analysis



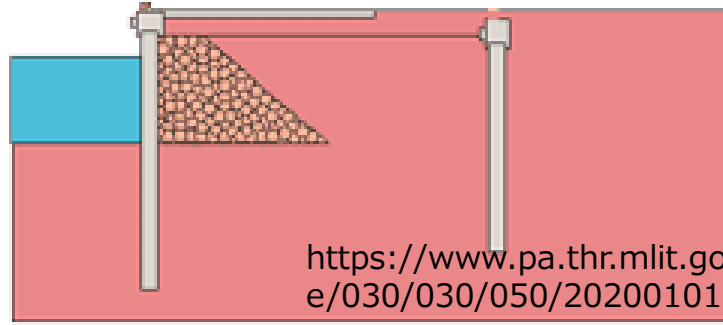
振動実験の事例

有限要素解析による変形照査（FLIP等）

- 地盤及び構造部材の変形を考慮できる
- 主たる要因である液状化現象を考慮できる



照査事例（矢板式岸壁）



<https://www.pa.thr.mlit.go.jp/hachinoh/e/030/030/050/20200101205000.html>

無対策 ×

● 要求性能

- ✓ 地震直後に接岸が可能
- ✓ 大型トラックによる輸送が可能

↓ 工学的な指標に翻訳する

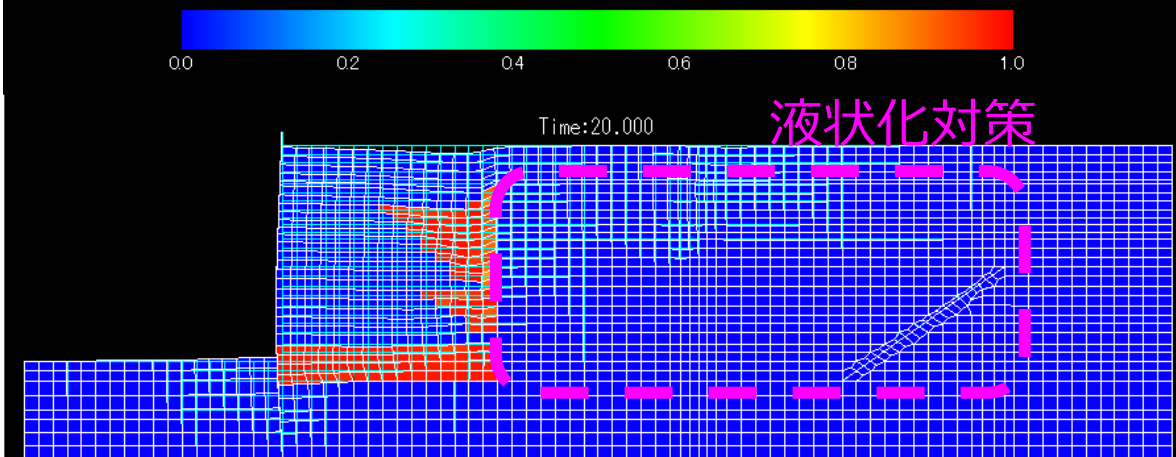
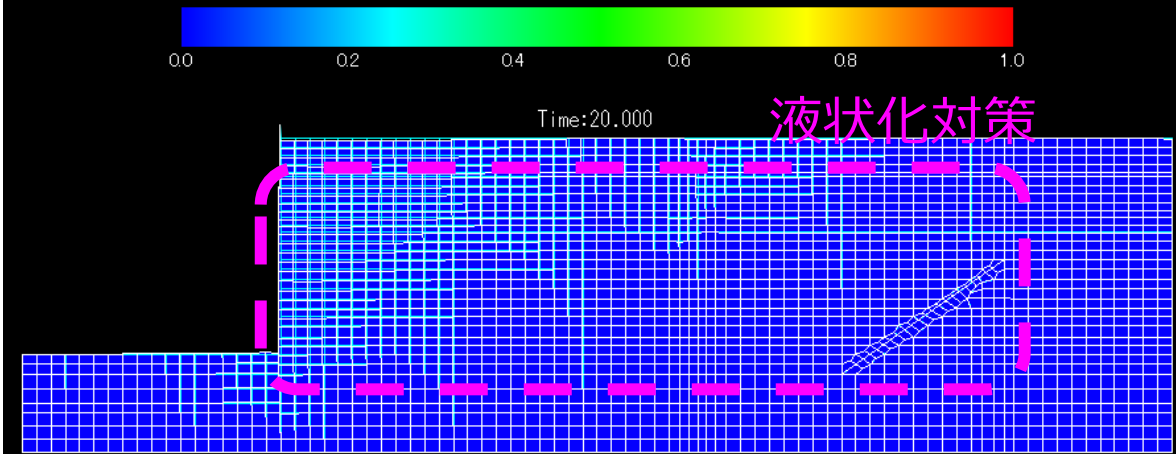
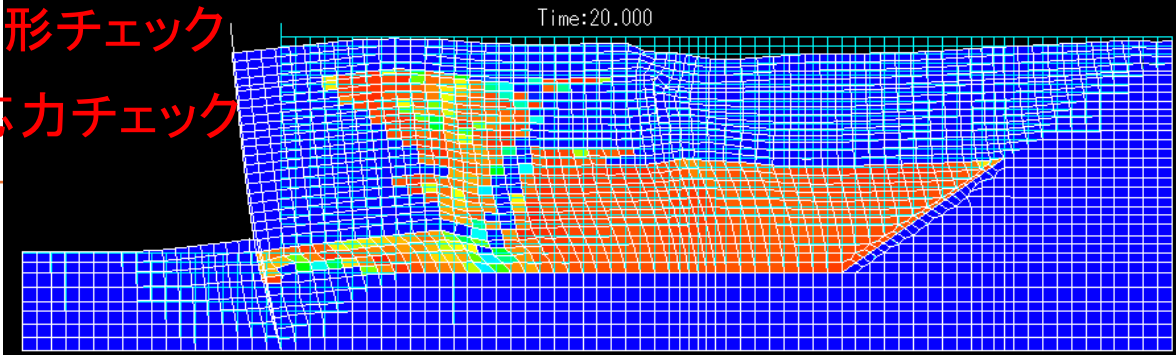
● 性能規定

- ✓ 矢板天端の残留変位は〇〇cm以下

液状化対策（部分改良） ○

性能を満足し，安価な構造を選択可能

変形チェック
応力チェック



FLIPの検証事例（2016年迄）



地震被害を対象

☐ ケーソン式岸壁

- 釧路港西港第2埠頭東側岸壁（無被災）（1993年釧路沖地震）
- 神戸港六甲アイランドRF3岸壁（1995年兵庫県南部地震）
- 神戸港ポートアイランドPC14, PC15バース（SCP改良）（1995年兵庫県南部地震）
- 小名浜港5号埠頭（2011年東北地方太平洋沖地震）

☐ 直杭式栈橋

- 神戸港T栈橋（1995年兵庫県南部地震）

☐ 防波堤

- 神戸港第七防波堤（1995年兵庫県南部地震）

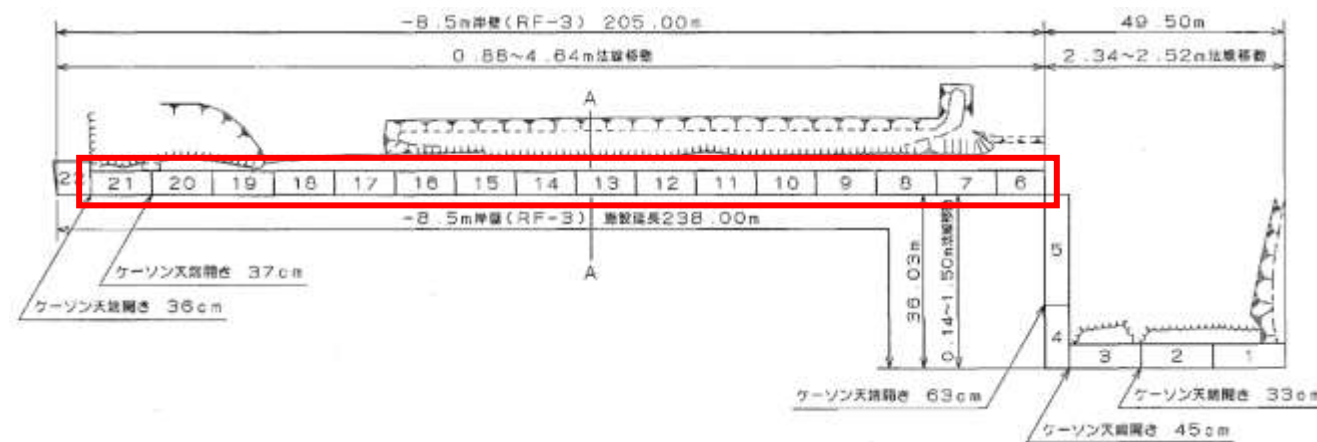
☐ 矢板式岸壁

- 秋田港第1号（無被災）（1983年日本海中部地震）
- 秋田港第2号（1983年日本海中部地震）
- 茨城港日立港区第5ふ頭D岸壁（控え組杭）（2011年東北地方太平洋沖地震）
- 仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭1号岸壁（鋼管矢板式）（無被災）（2011年東北地方太平洋沖地震）
- 仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭2号岸壁（鋼管矢板式）（2011年東北地方太平洋沖地震）
- 相馬港2号埠頭岸壁（鋼管矢板・控え組杭）（2011年東北地方太平洋沖地震）
- 小名浜港3号埠頭（控え組杭）（2011年東北地方太平洋沖地震）

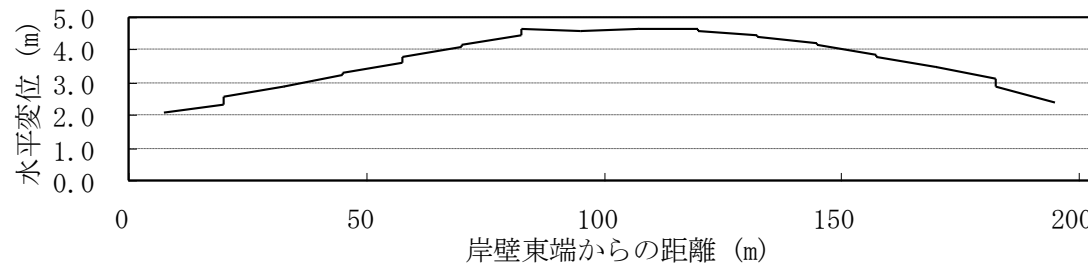
再現性の確認事例



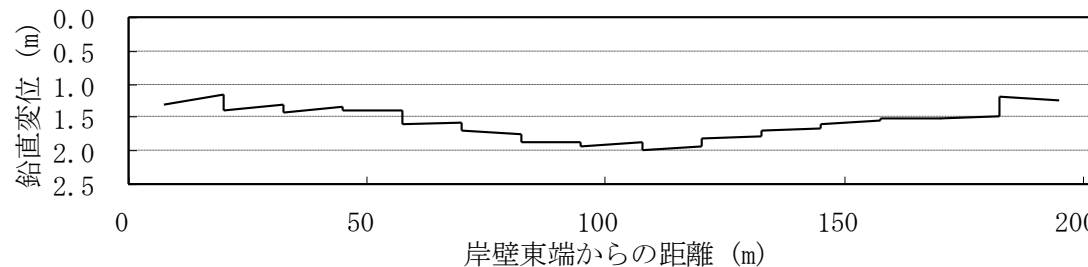
● 1995年兵庫県南部地震（神戸港）



上部工前出し量：平均3.7m



上部工沈下量：平均1.6m



実際の被災事例でも変位・沈下量はばらついている

稲富他（1997）

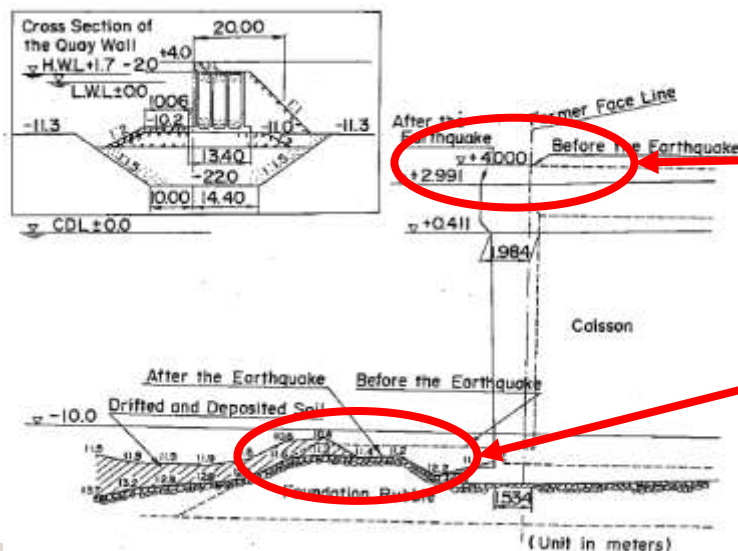
港研資料857

再現性の確認事例



● 変形モードの確認

実測

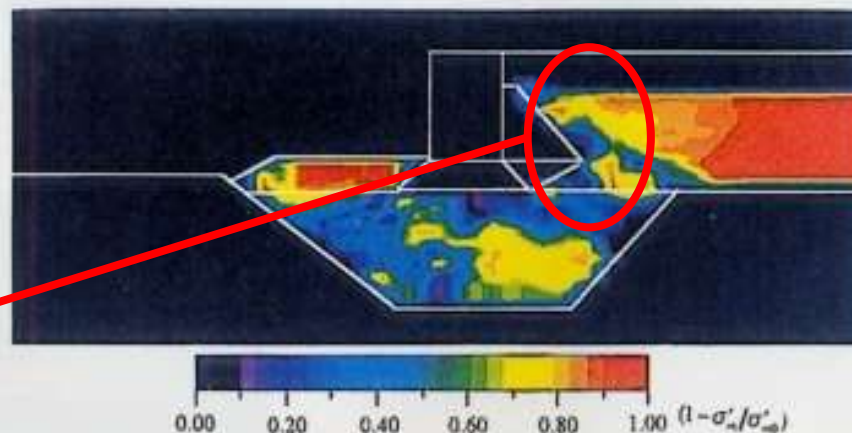


解析結果

ケーソン天端の海側への残留変位,
ケーソンの傾斜

ケーソンの捨て
石へのめり込み

解析によって求めたケーソン周辺の変位ベクトル図
Residual displacements Due to Earthquake Computed by Effective Stress Analysis



Iai et al. (1998)



ケーソン背後で顕著な液状化の痕跡は見られない

(矢板・杭の場合, 変形モード・損傷箇所の確認)

妥当性評価（ASMEの指標）



● 不確かさの要因（数値解析モデル化に関する内容）

分類	解析結果に大きく影響する諸要因	解析ケース
①砂の力学モデル	a. 変相線を超えた応力空間におけるせん断仕事の負のダイレイタンシーへの寄与評価法の違い	ケースA：従来モデル ケースB：修正モデル ケースC：修正モデル
②二相系の運動方程式とその数値解析法	b. 応力ひずみ関係の非線形反復法の違い	ケースA：従来モデル ケースB：修正モデル ケースC：修正モデル
	c. ジョイント要素の滑り挙動へのレーレー減衰の影響の評価方法の違い	ケースA：従来モデル ケースB：修正モデル ケースC：修正モデル
	その他、微小レーレー減衰の値の違いや大変形効果の影響の考慮の有無	全ケースについて、微小レーレー減衰の影響を考慮
③境界条件・接触条件・杭ー地盤相互作用系のモデル	境界条件の位置や杭ー地盤相互作用系における3次元効果の考慮の有無	境界条件は全ケースで固定（ベストな条件を想定） 杭構造は存在しない
④初期状態の設定法	地層断面・土層分割の違いや初期応力状態の評価法の違い	境界条件は全ケースで固定（ベストな条件を想定）
⑤砂以外の土や材料あるいは各種部材に関する力学モデル	d. 捨石の力学モデル	ケースA：従来モデル ケースB：従来モデル ケースC：修正モデル

- モデルの更新時に従来モデルと修正モデルを複数組み合わせで検討
- 地盤物性の不確かさは扱わない

一井（2022）

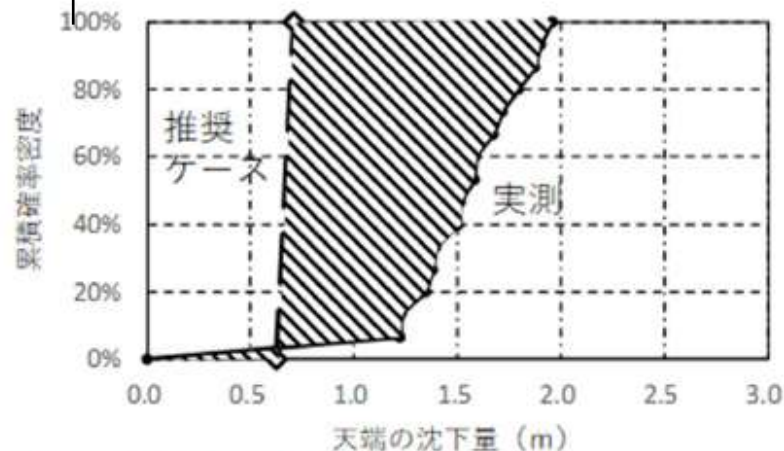
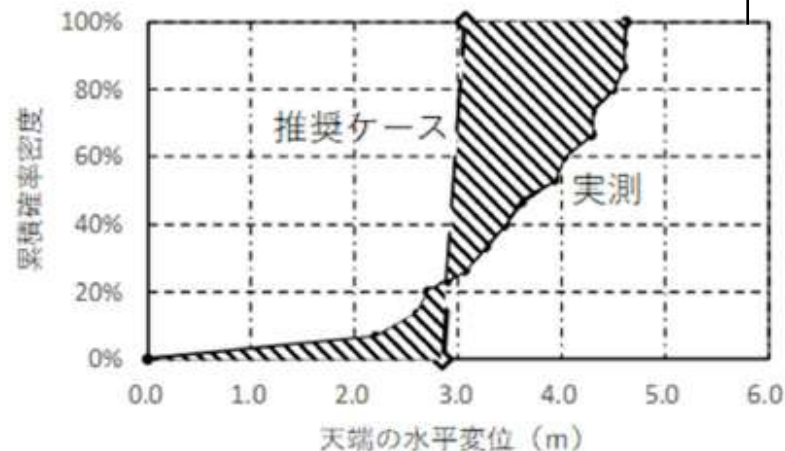
土木学会・V&Vガイドライン

妥当性評価（ASMEの指標）

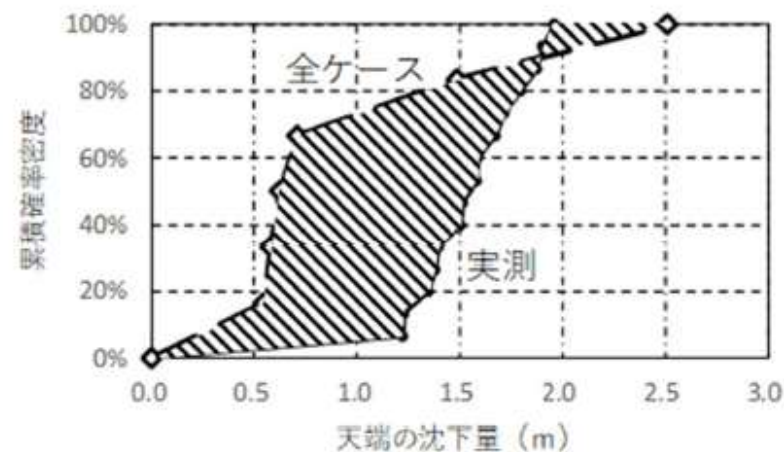
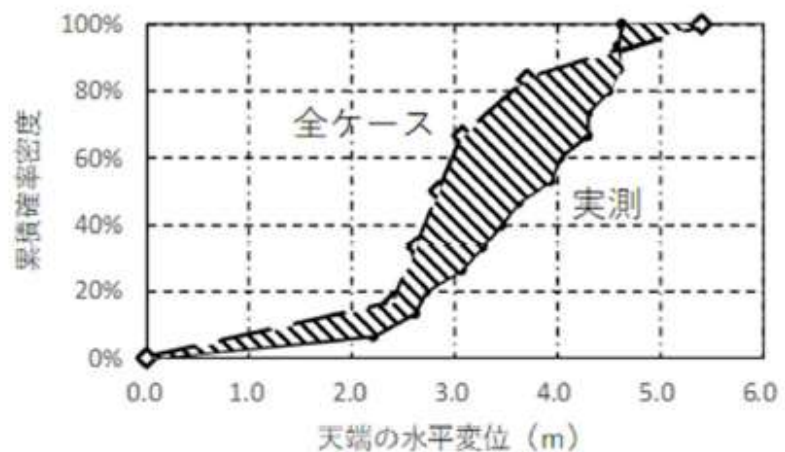


● MSRQの評価

$$M^{SRQ} = \frac{1}{SRQ^{\exp}} \int_{-\infty}^{\infty} \left| F_{SRQ^{\text{mod}}} (y) - F_{SRQ^{\text{exp}}} (y) \right| dy$$



推奨モデルの場合：水平変位で25.1%，沈下量で54.8%



全モデルの場合：水平変位で19.8%，沈下量で44.5%

- ケーソンの変位により，クレーンの損傷，通行阻害等による機能低下

→評価指標は岸壁天端の変形量（水平変位及び沈下量）

- MSRQ：精度(確からしさ)の評価に用いる評価指標の基準化指標

異なる構造を含む他の模型振動実験，遠心実験のMSRQの結果と同程度

一井（2022）

近年の取り組み 利用可否判断における数値解析の活用



- 2024年能登半島地震では設計地震動レベルを超えた大きな地震動を受けて、多くの施設が被害を受けた
- 被害を受けた施設についても、物資輸送等の拠点として、利用要請があった
- 2日より6港湾について利用可否判断の実施

【平成29年6月港湾法の一部改正】
(55条の3の3の規程)

- 港湾の利用調整
- 施設の利用可否判断

港湾管理者に代わって大臣が管理

2016年熊本地震（八代港）

http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/h28kumamoto/pdf/h281114shiryo01_2.pdf

支援船等の利用が集中する様子



撮影：平成28年4月26日

利用調整等が円滑かつ迅速に行われなかった場合

- 円滑な被災地支援に支障が発生
- 震災直後の背後圏の経済・産業活動の損失・支障が拡大

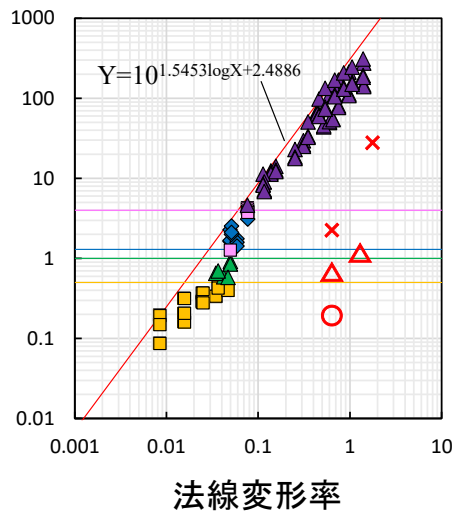
近年の取り組み 利用可否判断における数値解析の活用



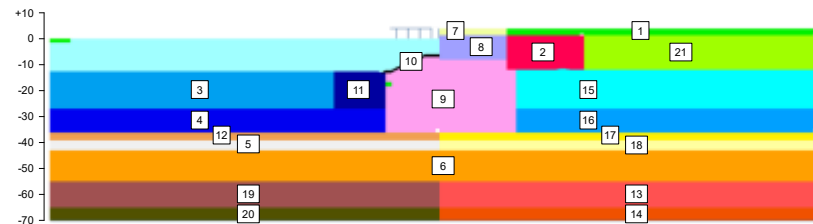
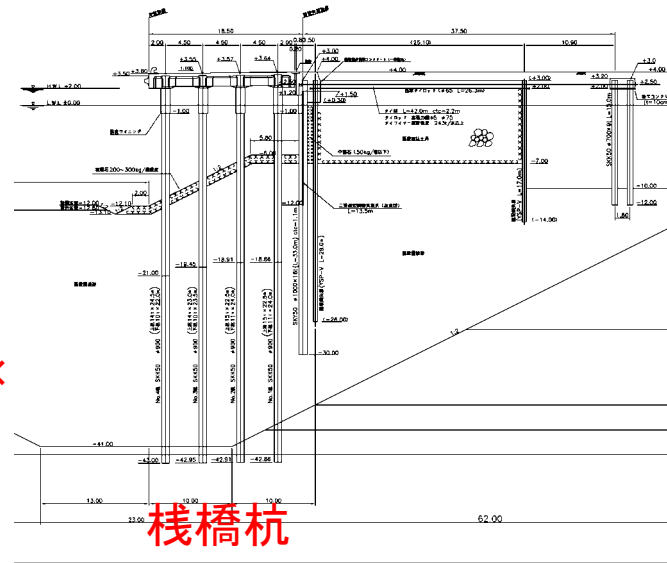
● 地震前の事前準備

数値解析より変位と部材損傷の関係を設定

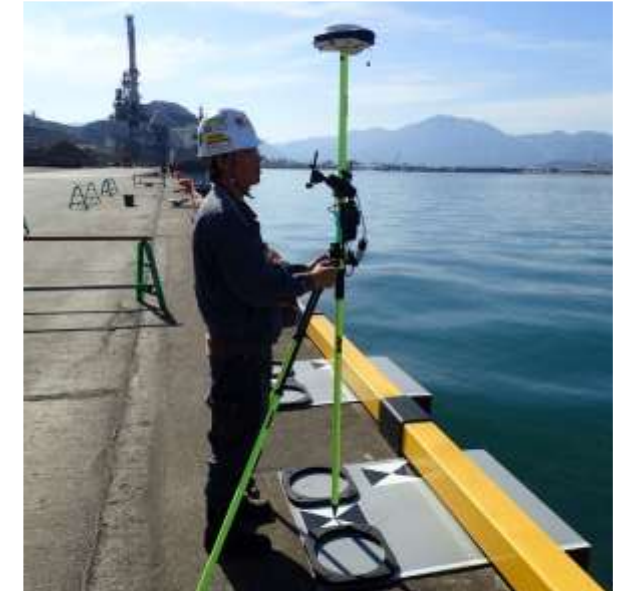
- 1: 全ての杭で降伏応力度未満、○
- 2: 全ての杭で限界曲率未満、○
- 3: ある杭で限界曲率が発生、△
- 4: ある杭で2箇所以上の限界曲率が発生、△
- 5: 全ての杭で2箇所以上の限界曲率が発生、×



- : 損傷レベル1、○
- ▲ : 損傷レベル2、○
- ◆ : 損傷レベル3、△
- : 損傷レベル4、△
- ▲ : 損傷レベル5、×
- : 岸壁法線変位量から各部材耐力の推定



● 地震後の変位計測・利用可否判断



アプリ：バースサーベイヤー

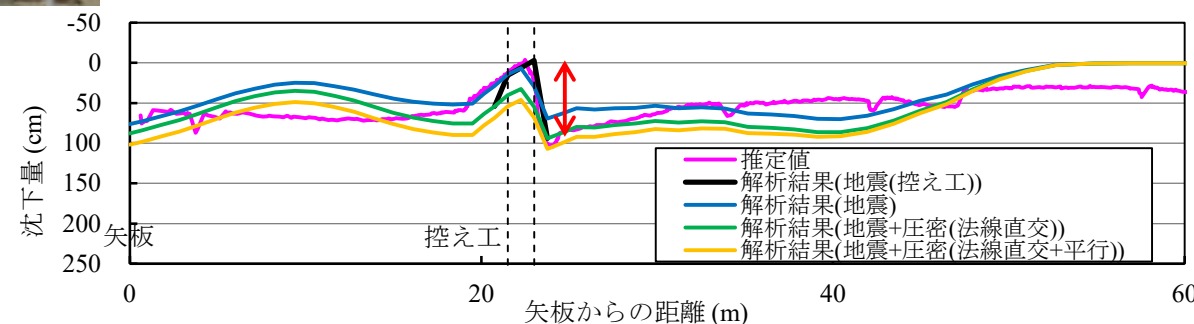


○×△を現地で表示

残留変位を現地で表示

近年の取り組み 被災調査

- 2024年能登半島地震（七尾港）の矢板式岸壁の被害
 - ✓ 矢板が約1.7m海側へ変位，控え工背後で約1mの段差
 - 地中部の被災メカニズム確認のため試掘調査，数値解析を実施



松村他：令和6年能登半島地震で被災した七尾港（大田地区）矢板式係船岸の部材調査，第80回年次学術講演会

大矢他：令和6 能登半島地震における七尾港・岸壁エプロン部等の沈下評価と繰返し三軸試験，第80回年次学術講演会