

検証(Verification)と 妥当性確認(Validation)の 現状(と課題)

中村晋・日本大学

参考資料：

- ①中村晋,先進技術解説 地盤・構造物の非線形解析の検証と妥当性確認-ガイドラインと評価事例-, 計算工学, Vol.27, No.3, pp.33-38, 2022
- ②土木学会地震工学委員会, 地盤・構造物の非線形解析法の検証と妥当性確認の方法 -ガイドラインとその実践事例, 土木学会, 2022.1.25

非線形解析を用いたシミュレーションの検証と妥当性確認への取り組みの経緯

- シミュレーションの信頼性向上にむけた実施手順の策定に関する活動は、欧米では1990年代から、国内では2010年前後から進められている。
 - その主要な取り組みは大きく品質V&V、モデルV&Vの取り組みに分けられ、その取り組みを欧米、国内の先行学協会から土木学会の順に紹介しています。
- **品質マネジメントにおけるV&V(品質V&V)**：解析が計画通りに正しく行われたことの確認(検証)と解析結果が意図した用途に適用できることの確認(妥当性確認)
 - NAFEMS, SAFESA, 1995
 - 日本計算工学会, HQC標準, 2011
- **ModelシミュレーションにおけるV&V(モデルV&V)**：計画通りに解析コードが正しく作られたことの確認(検証)と解析コードへ入力した解析モデルによるシミュレーション結果が物理的実体の表現能力を有していることの確認(実験などとの比較および不確かを含む定量評価;妥当性確認)
 - ASME V&V
 - 日本原子力学会/学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」

土木学会の検証と妥当性確認に関する取り組みの現状

■Model V&V

- 2014- : 応用力学委員会 土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会(委員長: 櫻井英行・清水建設)
- 2016-2022: 地震工学委員会: 地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会(委員長: 中村晋・日大)

2022:2つの小委員会が合同で「**地盤・構造物の非線形解析法の検証と妥当性確認の方法-ガイドラインとその実践事例-**」を作成

土木構造物共通示方書2023版: 7章 性能評価 7.3節の解説にて応答値の評価に用いる手法や入力情報の評価として妥当性確認が必要と明記
(ガイドラインが引用)

■品質V&V

2015- (**土木学会技術評価制度**)/ :コンクリート委員会:コンクリート標準示方書に基づく数値解析認証小委員会(委員長: 斎藤成彦・山梨大)

検証(Verification)と妥当性確認(Validation)の概要

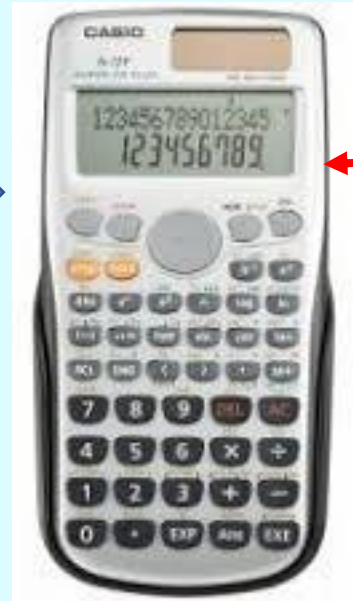
地震時の挙動や現象

橋梁の震動、地中構造物や岸壁と周辺地盤の地震時挙動、地盤の液状化、斜面崩壊など

構造物や地盤の挙動を支配する力学モデル⇒運動方程式+境界条件+作用のモデル化

プログラミング

解析コード



検証(Verification) :
対象とする解析コードが、①力学モデルを**正しくプログラミング**されていること、②入力データに応じた**精度**が確保されていることを確認する。

妥当性確認に用いる情報(挙動の物理量,材料特性,作用など): ①**モデル実験**, ②**実対象の挙動観測**, ③**実被害状況**

入力情報(様々な情報やデータの**不確実さ**考慮)

妥当性確認(Validation) :
設計や評価などの利用目的に応じた精度(再現性)を有していることを確認する。

力学モデルの**不確実さ**を含む種々の**不確実さ**影響

解析結果(様々な情報やデータの**不確実さ**考慮)

妥当性確認(Validation)の目的と精度評価

解析コード

■妥当性確認の目的：種々の不確実さを踏まえた入力情報に対するシミュレーションの精度(確からしさ)の確認

➤種々の不確実さ

- 力学モデルなどの不確実さ影響(認識論的不確実さ等)
- 地盤・構造・作用情報などの不確実さ(認識論的不確実さ+偶然的不確実さ)

■精度の確認：シミュレーション結果との比較

➤比較に用いる情報：①モデル実験，②実対象の挙動観測，
③実被害状況

➤精度の評価：入力データの不確実さに応じたシミュレーションの結果と比較対象との評価指標(使用目的に応じた物理量など)の統計的性質に基づく評価基準の大きさに基づいて実施する。



精度の評価：評価指標の評価基準

■**評価指標**：対象とする挙動に関するシミュレーションより得られた応答量のうち、単一また複数の応答量を、所期の利用目的に応じて適宜選定する。

■**評価基準**：精度(確からしさ)の評価に用いる評価指標の基準化指標

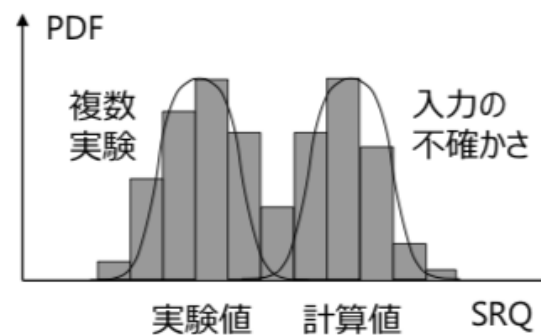
• **ASMEの M^{SRQ}**

• **計算値/実験値の比などの統計的な特性(例えば平均や変動係数)**

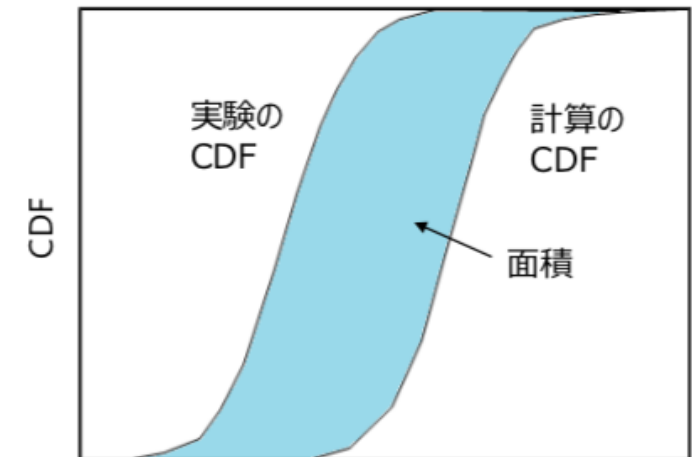
➤ASME規準：不確かさに関するデータがない場合とある場合の2つの方法が示されている。

• M^{SRQ} : システム応答量の計測基準であり、平均の相対誤差をほぼ正確に表している。

◇確率密度分布, 累積確率密度分布と M^{SRQ}



PDF: Probability density function
CDF: Cumulative distribution function



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

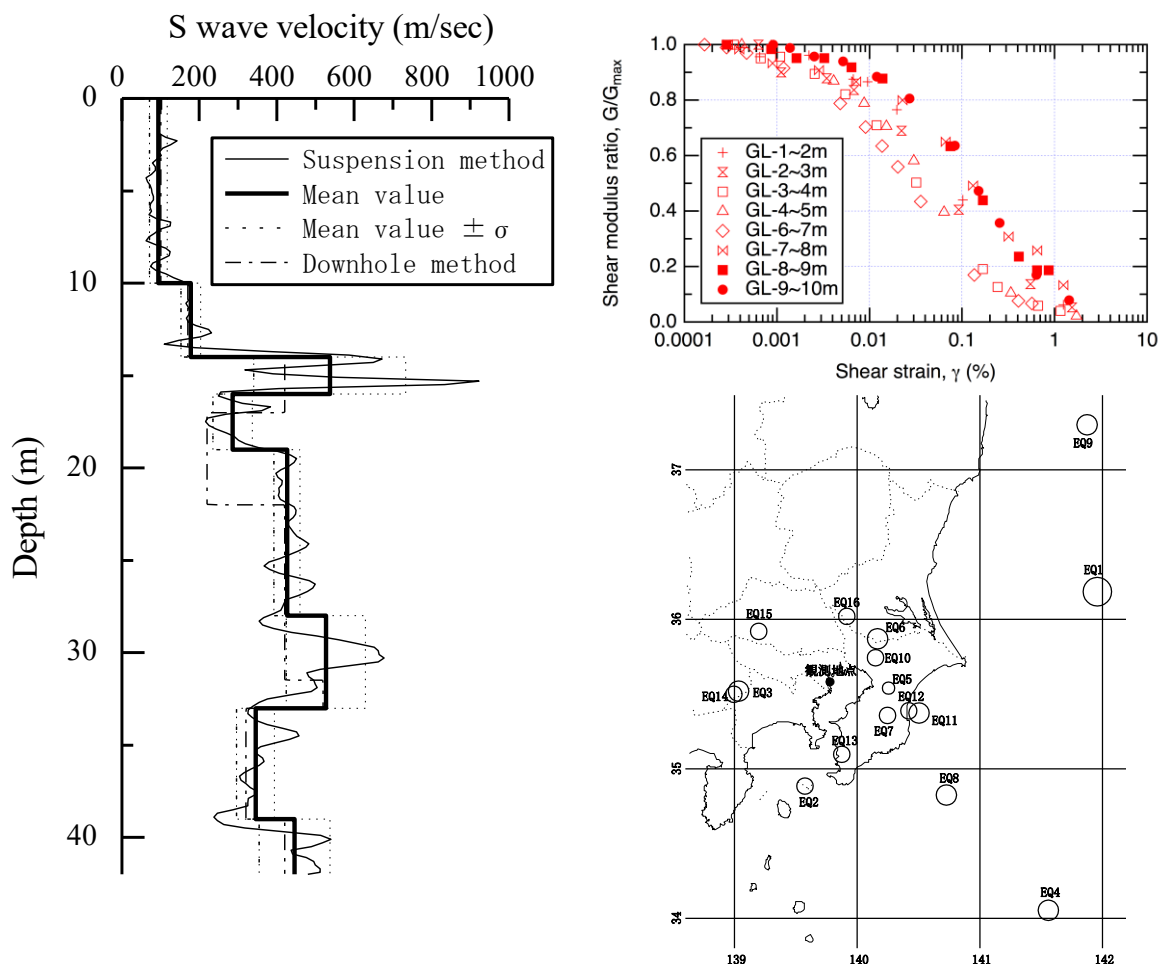
M^{SRQ} はCDFが同じ時ゼロ。交差しない場合、平均値の差。それ以外の場合は、実験値と計算値の分布の差の絶対値の最小期待値。

System Response Quantity
 $|\overline{SRQ}^{\text{exp}}|$ is the mean of the experimental outcomes

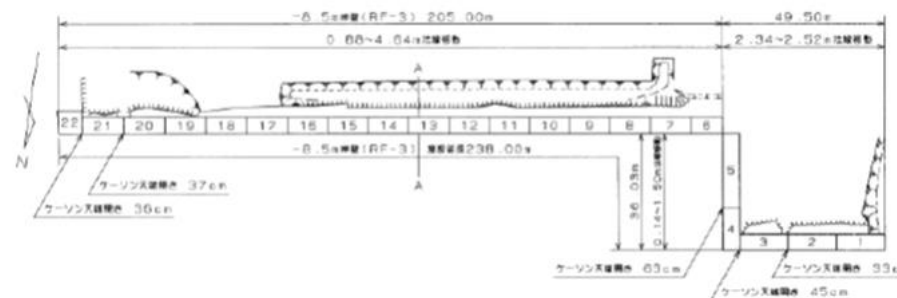
F_{SRQ} is CDF of SRQ(system response quantity)

妥当性確認事例(ガイドライン)：観測・実被害の事例

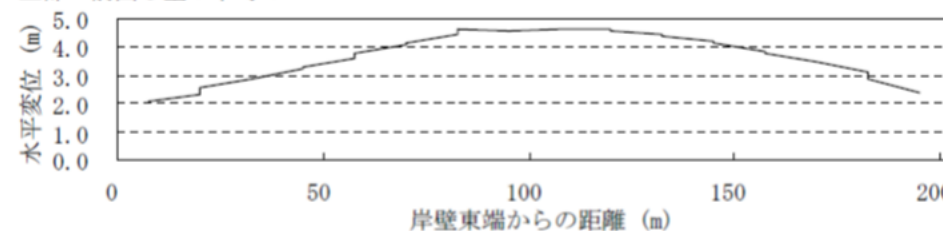
観測：東京湾内の埋め立て地にて実施された地震観測により得られた観測記録および地震計設置と合わせて実施された詳細な地盤調査データ



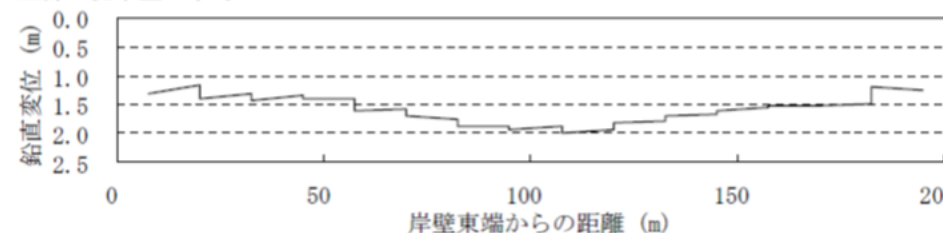
実被害状況：1995年兵庫県南部地震による神戸港RF3岸壁の被災状況



上部工前出し量：平均3.7m



上部工沈下量：平均1.6m



各事例で得られた評価基準 M^{SRQ} の比較

比較対象		評価指標	評価基準 M^{SRQ}
実験	斜面模型	法肩鉛直変位	0.20
	護岸構造物模型	ケーソン 天端の残留水平変位(八戸波)	0.16
	基礎-地盤模型	フーチングの最大水平変位	0.24
観測	鉛直アレー地震観測	PGA(地表面)	0.26
		PGV(地表面)	0.05
		SI(地表面)	0.07
実被害状況	護岸構造物の地震被害	ケーソン天端の水平変位	0.25
		ケーソン天端の鉛直変位	0.50

- 実被害状況のケーソン天端の鉛直変位を除くと概ね0.3以下となっている.
- 対象に関する調査・試験データの分析を含む適切な評価の手順を踏むことにより一定の再現性が得られる.

➤ **ASMEのガイドラインで示されている規準量 M^{SRQ} (Metrics of system response quality)**

$$M^{SRQ} = \frac{1}{|\overline{SRQ}^{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ}^{sim}(y) - F_{SRQ}^{exp}(y)| dy$$

- $F_{SRQ}^{sim}(y)$, $F_{SRQ}^{exp}(y)$: 評価指標 y に関する確率密度関数の累積分布関数, $|\overline{SRQ}^{exp}|$ は実験値の平均値を表す.
- **M^{SRQ} : 実験などの平均に対する応答全体の相対誤差を正確に表す量であり, 応答の確からしさの程度と見なすこともできる.**

妥当性確認(Validation)の意義と課題

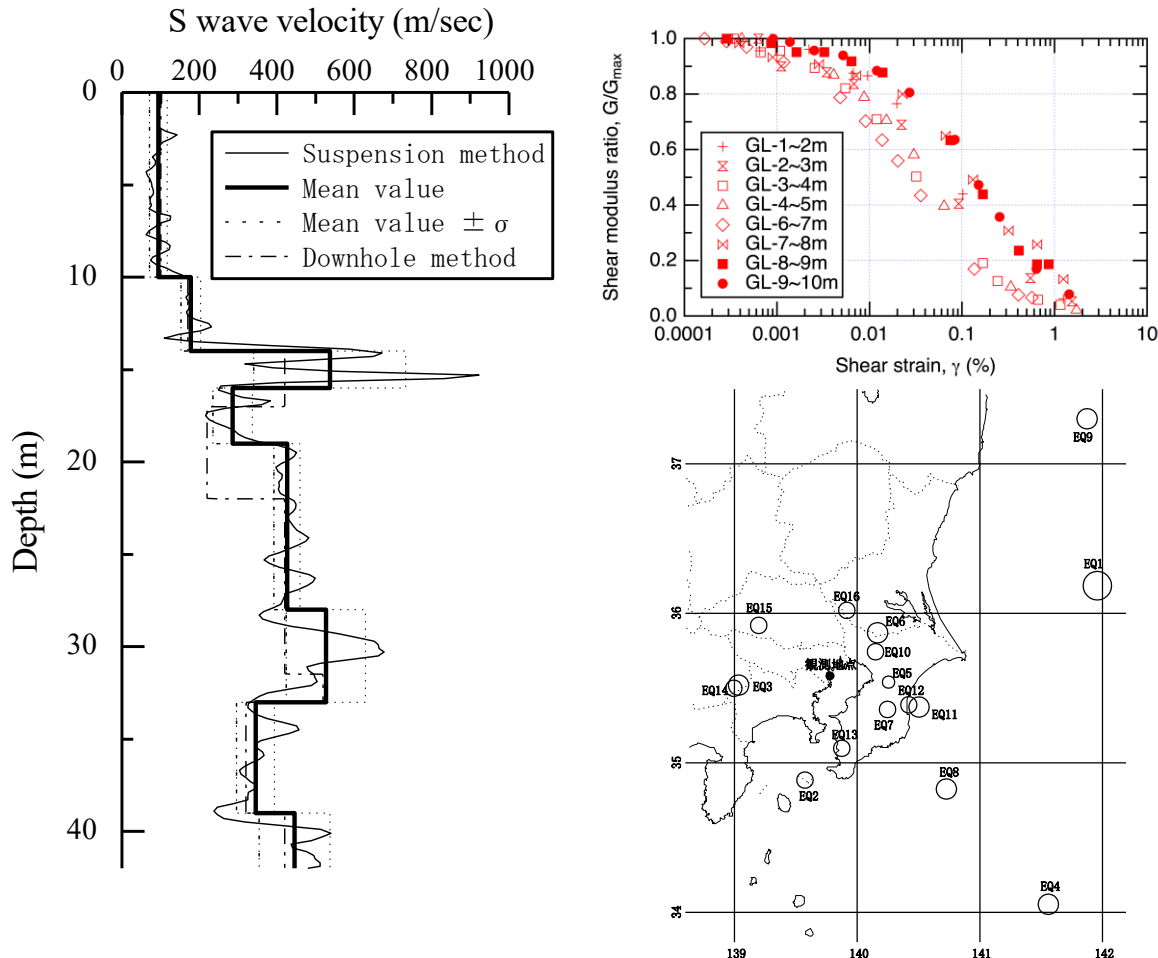
- 精度(確からしさ)の定量化**：設計・評価におけるシミュレーション結果の応答値における位置づけの明確化
- 不確実さ要因の抽出と定量化**：入力情報の不確実さがシミュレーション結果に及ぼす影響が大きい情報(不確実さ要因)の抽出と定量化(UQ)を適切に実施することが重要
- 最良の解析モデル(Best estimate model)の合理的な設定**：様々な不確かさの影響を踏まえ、最も確からしいシミュレーション結果が得られる入力情報(解析モデル)の評価の考え方の習得
- 課題**：
 - 確認に必要な実被害・観測・実験の情報の獲得と開示
 - 確認条件と異なる地盤・作用などの条件への適用性評価の考え方(予測性能：再現性との関係)

補足資料

ガイドラインの観測に基づくの妥当性確認事例

-成層地盤における非線形地震応答解析-

東京湾内の埋め立て地にて実施された地震観測により得られた観測記録および地震計設置と合わせて実施された詳細な地盤調査データ



■解析コード：時間領域における1次元非線形地震応答解析コード「DYNES3D」

■解析モデル：

➤線形挙動の妥当性確認(最適な解析モデルの設定)：探査方法に応じたS波速度の分布に基づく3つの地盤構造モデルに、地震観測記録に基づいた同定より得られた地盤モデルを加えた4種類のモデルを用いた。12地震の記録を用いて求めた6つの評価指標に対する評価基準より再現性を総合的に評価

➤線形から非線形域に至る挙動の妥当性確認(最良の解析モデルの設定)：HDモデル, RO_モデルおよび吉田モデルの3種類の構成モデルを対象とした。各構成モデルのパラメータは得られている繰り返しせん断特性に基づいて設定した。地震観測期間中に観測された地震のうち4地震の記録を用いて再現性の評価を実施

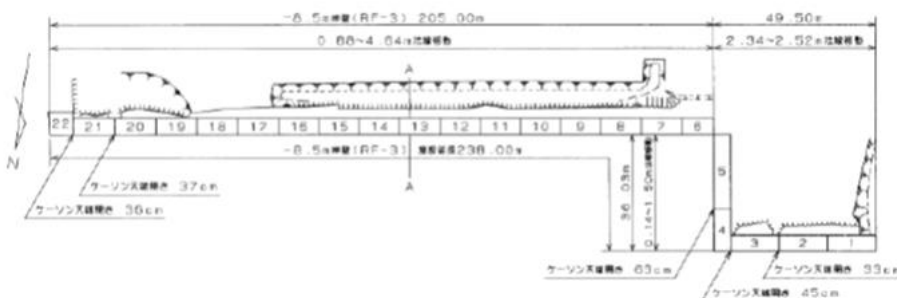
■不確かさ：

- ・観測：複数の観測記録, PS検層法, サスペンション法, および同定により得られたS波速度構造
- ・シミュレーション：S波速度構造, 構成モデル(HD, RO, 吉田)

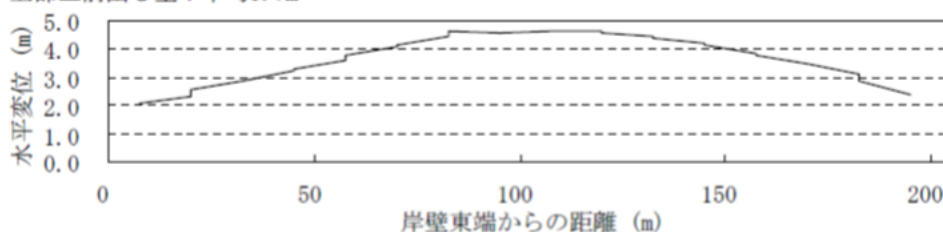
■評価指標：地表面のPGA, PGV, AI, SI, スペクトル振幅

実被害状況の妥当性確認事例 -護岸構造物の非線形地震応答解析-

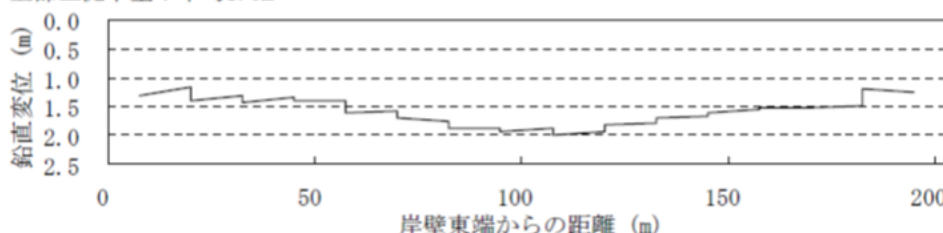
1995年兵庫県南部地震による神戸港
RF3岸壁の被災状況



上部工前出し量：平均3.7m



上部工沈下量：平均1.6m



■解析コード：非線形地震応答解析コードFLIP ROSE

■解析モデル：

➤線形挙動の妥当性確認(最適な解析モデルの設定)：対象地点周辺で実施された現位置調査試験を踏まえ，ケーソン護岸の周辺地盤における弾性定数等に関する2次元的な地盤構造モデルの作成と有限要素分割を実施。

・常時微動観による1次卓越周期との整合性と施工過程を考慮したケーソン岸壁への作用土圧分布の妥当性に基づき評価

➤線形から非線形域に至る挙動の妥当性確認(最良の解析モデルの設定)：周辺地盤より採取した地盤材料の室内試験結果に基づき，液状化強度曲線などの材料特性を適切に再現性する構成モデルのパラメータを設定

■不確かさ：

・実被害状況：地震後に測定された六甲アイランドRF3岸壁の水平変位，沈下量

・シミュレーション：砂の力学モデル，応力ひずみ関係の反復法，Rayleigh減衰，捨て石の力学モデル

■評価指標：岸壁天端の変形量（水平変位及び沈下量）