

地盤の数値解析における V&V(検証と妥当性確認)

京都大学防災研究所

渦岡良介

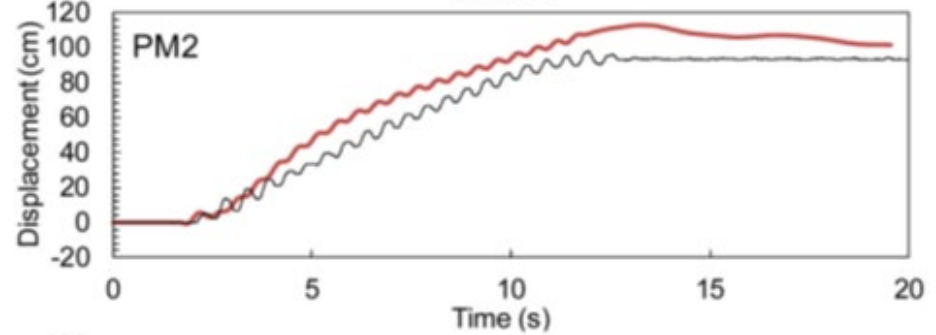
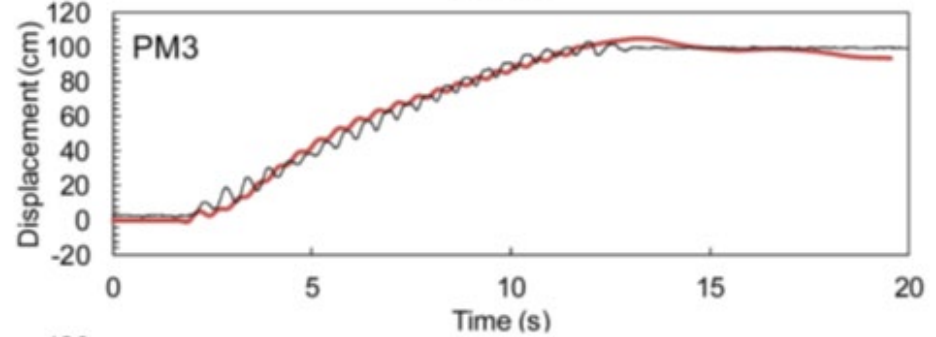
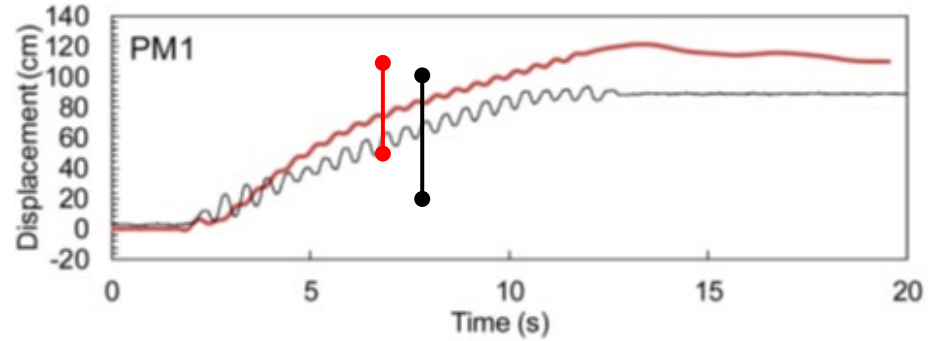
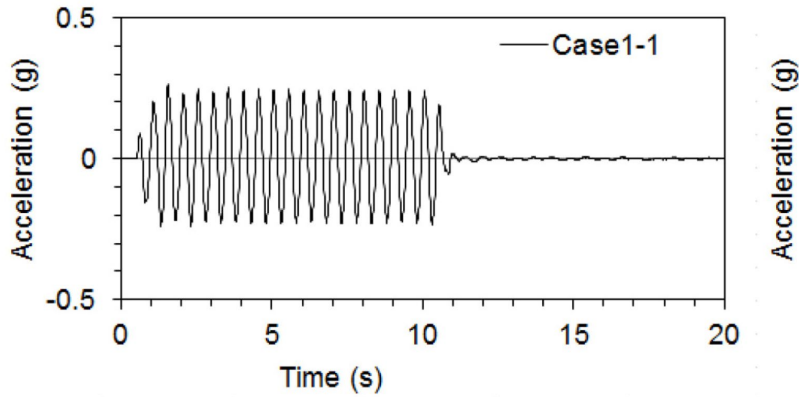
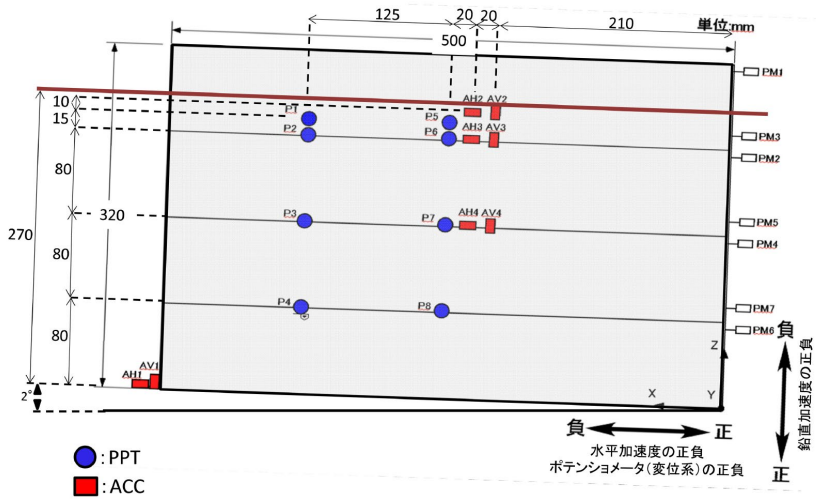
謝辞・参考文献

- 渦岡良介・櫻井英行・中井健太郎・森口周二: 数値解析のV&V (検証と妥当性確認), 地盤工学会誌, 65-11/12, 48-49, 2017.
- 特集 V&V—シミュレーションの信頼性確保のために—, 日本機械学会誌, Vol.123, No.1222, 2020.9
- The American Society of Mechanical Engineers: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10, 2006.
- The American Society of Mechanical Engineers: An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10.1, 2012.

謝辞・参考文献

- 肥前 大樹, 上野 勝利, 渦岡 良介, 粘性土地盤の圧密変形に関する数値解析の検証および妥当性確認, 土木学会論文集A2(応用力学), 2019, 75 巻, 2 号, p. I_351-I_359, https://doi.org/10.2208/jscejam.75.2_I_351
- 肥前 大樹, 粘性土地盤の変形解析における数値解析のV&V, 徳島大学学位論文, <https://repo.lib.tokushima-u.ac.jp/ja/114651>
- 上田 恭平, 和田 冬馬, 渦岡 良介, 液状化傾斜地盤の地震時挙動予測の高精度化に向けた遠心模型実験及び有効応力解析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 2019, 75 巻, 4 号, p. I_494-I_505, https://doi.org/10.2208/jscejsee.75.I_494

模型実験(黒)と数値解析(赤)の比較



土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会

- 目的

- 先行している欧米や日本の他学会の取り組み・成果を参照しつつ、地盤・鋼・コンクリート・流体など土木分野の材料ごとに必要となる数値解析のV&Vの考え方やプロセスをまとめ、解析の信頼性向上を図る。

- 期間

- 2014年～

- 委員

- 委員長：櫻井英行(清水建設)、副委員長：森口周二(東北大学)
- 地盤, コンクリート, 鋼, 流体など, 現在26名

- 活動

- 国内外の関連分野のV&Vの動向調査と分析
- 各材料分野における数値解析の信頼性の現状調査と分析
- 各材料分野におけるV&Vの具体的な実施方法の検討
- コンクリートWG, 地盤WG, 不確かさWG

委員会活動(講演, 話題提供など)

日時	内容
2020.01.14	応用力学委員会関東地区フォーラムの共催 「コンクリート構造物に対するV&Vの取組事例」
2018.10.23	計算工学会 HQC研究会での話題提供 「地盤工学におけるスケーリング～模型実験と数値解析の役割～」
2018.06.06	第23回計算工学講演会 パネルディスカッション「V&V標準の今」での話題提供
2018.01.19	応用力学委員会中国地区応用力学フォーラムでの話題提供 「土木分野のCAEとそのV&V・信頼性の提示の考え方」 「既存構造物の数値モデル構築におけるV&V」 「地盤工学における数値解析の役割を考える」
2016.12.22	応用力学委員会関東地区応用力学フォーラムの共催 「土木分野のV&Vに向けての実践的アプローチ」
2016.07.28	WCCM XII & APCOM VI ミニシンポの開催 「Verification and Validation in Computational Mechanics for Civil Engineering」
2016.06.02	第21回計算工学講演会 パネルディスカッション「V&Vの最近の進展」での話題提供
2015.10.15	第8回 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム パネルディスカッション「不確定事象を含むシミュレーションのV&Vをどう行うべきか」での話題提供
2015.09.16	第70回土木学会年次学術講演会 研究討論会の主催 「V&V のススメ: 土木分野における数値解析の課題」
2014.09.10	第69回土木学会年次学術講演会 研究討論会の主催 「数値解析におけるV&V(検証と妥当性確認)をご存知ですか？」

第69回年次学術講演会・研究討論会23(2014年) 数値解析における検証と妥当性の確認 (Verification & Validation)をご存知ですか？

- 堀宗朗(応用力学委員会委員長)
- 越塚誠一先生(東京大学)
 - V&Vの基礎, 計算工学会, 原子力学会, ASME
- 吉村忍先生(東京大学)
 - 機械学会, 認定試験, 海外機関との相互承認
- ディスカッション
- 佐藤靖彦先生(北海道大学)
 - コンクリート分野
- 中井健太郎先生(名古屋大学)
 - 地盤分野
- ディスカッション, 小委員会の今後の活動

土木分野での課題(2014年)

- 多様な非線形材料, 空間的・時間的スケールが大きい・長い構造物の解析にとって, 合理的なV&Vとは?
- モデルV&V
 - 材料挙動の複雑さのため, VerificationとValidationの区別が不明確?
 - Verificationの課題: 解析解がない非線形材料。
 - Validationの課題: 単純化された模型実験vs複雑な現場。解析結果の用途に適した問題設定は可能か?
 - Predictionの課題: 不均一性・不確実性の評価。解析に必要な調査とのバランスは?
- 品質V&V
 - コード+人の信頼性。
 - 確立されたコードがない分野では, コード毎に検討が必要。
 - V&Vに対応した解析者の力量。認定制度の必要性。

第70回年次学術講演会・研究討論会05(2015年) V&Vのススメ:土木分野における数値解析の課題

- 渦岡良介(徳島大学)
 - 委員会の活動報告, 研究討論会の進め方
- 櫻井英行(清水建設)
 - V&Vの重要性
 - ASMEのV&Vガイドラインの要点
- 山田貴博先生(横浜国立大学)
 - V&Vに関する海外の最新動向
- 本城勇介先生(元岐阜大学)
 - 地盤における不確実性の取扱いについて
- ディスカッション
 - 今後の委員会活動など

研究討論会05(2015年)

V&Vのススメ:土木分野における数値解析の課題

- 櫻井英行氏

- intended use, accuracy requirementsが重要。
- 「とりあえず」「ま, いか」はだめ。

- 山田貴博先生

- credibility: 社会的信頼性, 信じてもらうこと。例えば, 構成式は帰納的推論・現象論モデルなので信じるしかない。
- reliability: 客観的な信頼性。
- uncertainty: 偶然の不確かさ, 知識の不確かさ
- UQ: エラーバンド付きの解析結果。構造物全体でやる。

- 本城勇介先生

- 不確実性の定量化と伝播, システム分析と統合。
- 知識の不確かさが大きい。各不確実性の寄与。問題によって誤差の寄与は異なる。

委員会活動(関係論文・総説・概説など)

支持力問題の一斉解析による不確実性の定量化の試み(2021)中井健太郎, 森口周二, 大野進太郎, 佐藤伸, 若井明彦, 竹原和夫, 鈴木隼人, 石川裕規, 馬場菜々子, 渦岡良介, 櫻井英行, 計算工学講演会論文集, Vol.26.

異なる解析ツールを用いた地盤支持力の一斉解析(2020)森口周二, 中井健太郎, 大野進太郎, 佐藤伸, 若井明彦, 竹原和夫, 鈴木隼人, 石川裕規, 渦岡良介, 櫻井英行, 第62回地盤工学シンポジウム

不確かさの定量化に向けたRCはりの一斉載荷実験(2020)車谷麻緒・岡崎慎一郎・山本佳士・上田尚史・小倉大季, 土木学会論文集A2(応用力学), 75(2), I_411-I_420.

土木分野におけるV&Vの現状(2020) 櫻井英行・渦岡良介・森口周二・山本佳士・車谷麻緒・岡崎慎一郎・上田尚史・小倉大季, 日本機械学会誌 特集「V&V—シミュレーションの信頼性確保に寄せて」, 123, 14-17.

土木分野のV&Vに関する事例紹介(2020) 中井健太郎・渦岡良介・西尾真由子, 日本機械学会誌 特集「V&V—シミュレーションの信頼性確保に寄せて」, 123, 18-21.

数値解析のV&V(検証と妥当性確認)(2017) 渦岡良介・櫻井英行・中井健太郎・森口周二, 地盤工学会誌, 65-11/12, 48(718)-49(719)

土木の工学シミュレーションにおけるV&Vのニーズと課題(2016) 櫻井英行・桐山貴俊・渦岡良介・中井健太郎・森口周二, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, CS8-022, 43-44

土木のCAEとV&Vを考える(2016) 櫻井英行, 計算工学(日本計算工学会誌), 21-3, 3468(18)-3471(21)

モデルV&Vと品質V&V

- モデリング&シミュレーションにおけるV&V(モデルV&V)
 - 計算の正しさの検証と実験との比較による妥当性の確認
 - 誤差や不確かさの評価に基づく定量的な比較
- 品質マネジメントにおけるV&V(品質V&V)
 - コンピュータシミュレーションを業務として実施する際に取るべき手順

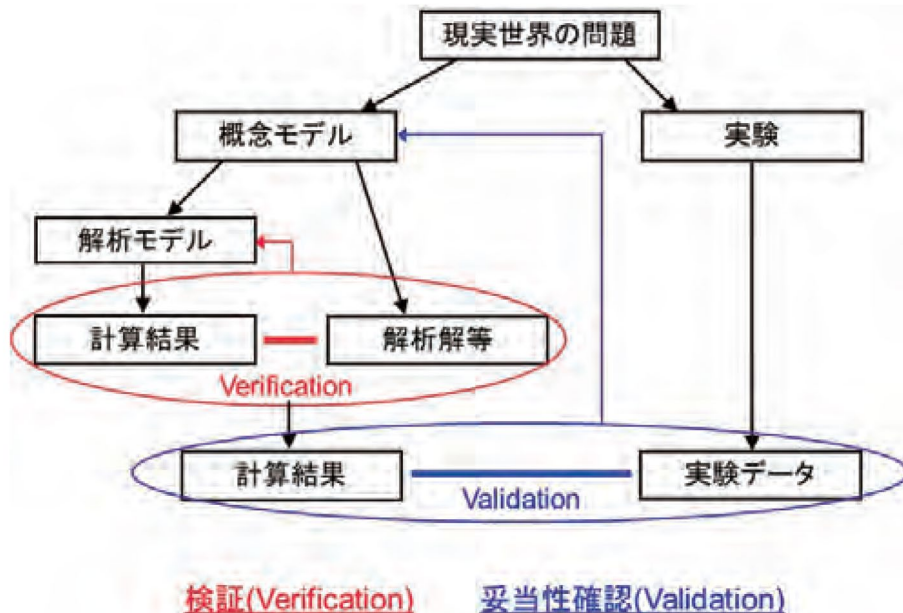


図1 モデルV&V

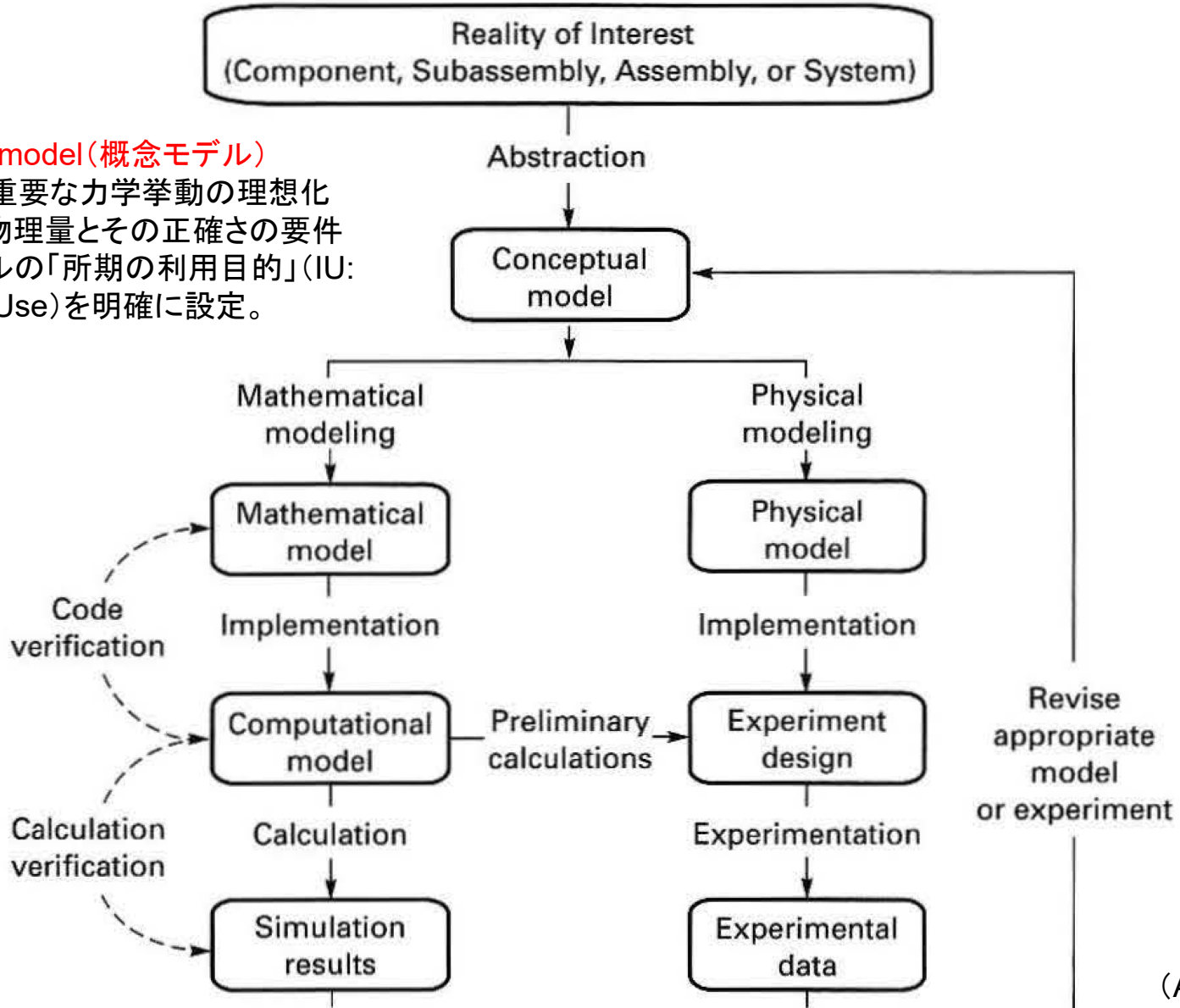


<p>検証 (Verification) 客観的証拠を提示することによって 規定要求事項(=解析計画書)が満たされていることを確認すること。</p>	<p>妥当性確認 (Validation) 客観的証拠を提示することによって 特定の意図された用途又は適用に関する要求事項(=顧客要求)が満たされていることを確認すること。</p>
--	--

図2 品質V&V

ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products

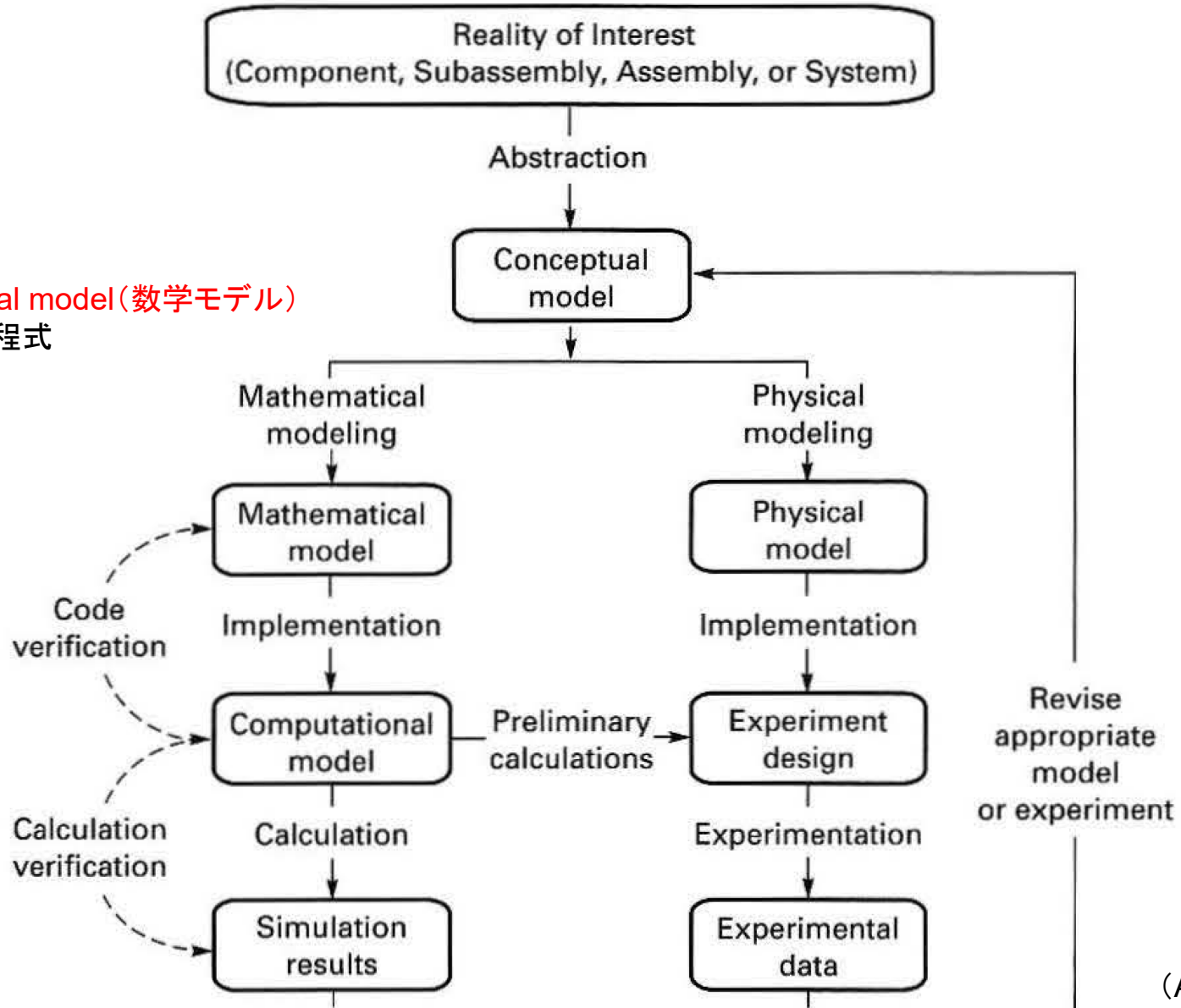


Conceptual model (概念モデル)

- 実現象の重要な力学挙動の理想化
- 着目する物理量とその正確さの要件
- 計算モデルの「所期の利用目的」(IU: Intended Use)を明確に設定。

ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products

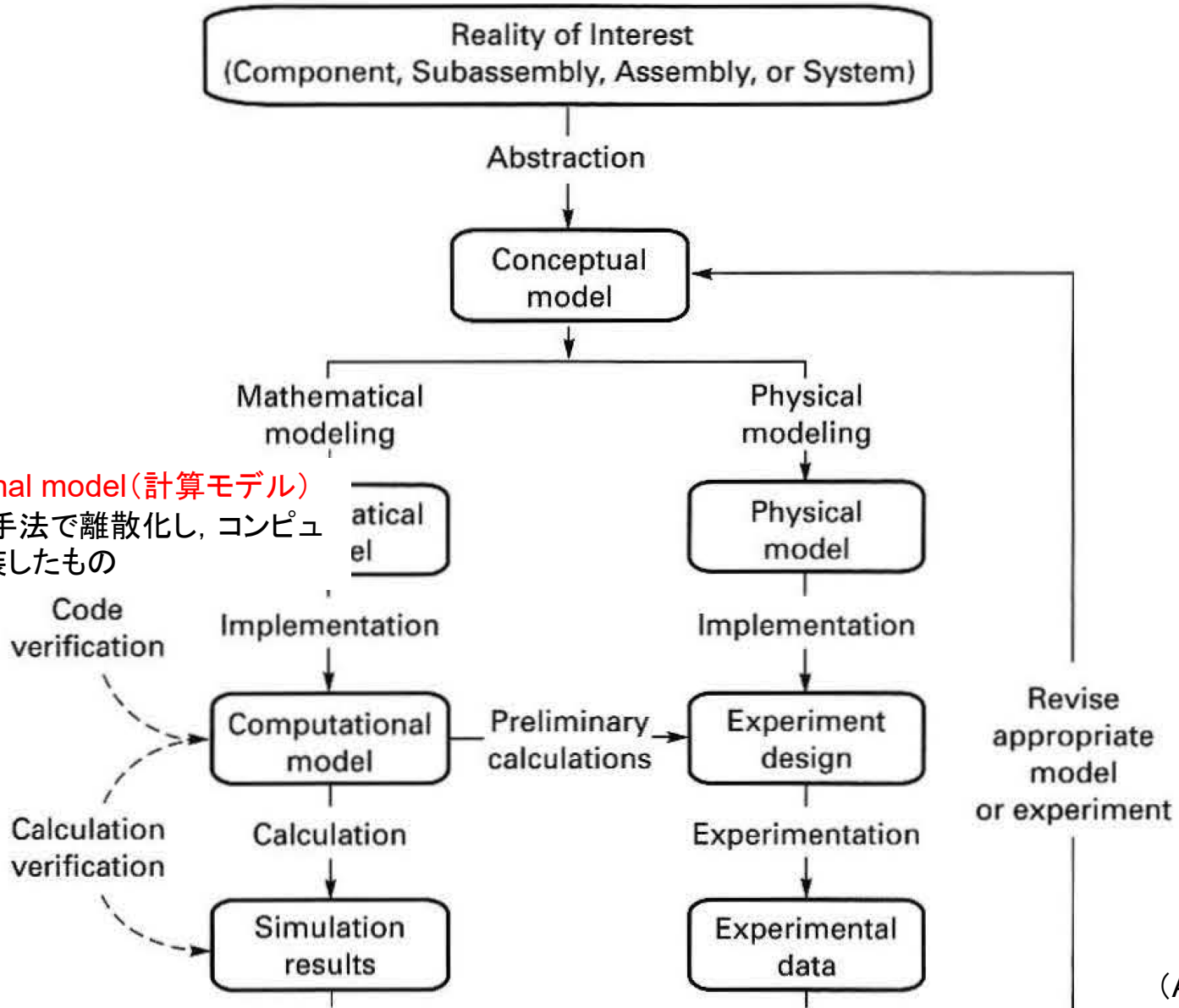


Mathematical model(数学モデル)

- 偏微分方程式

ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products

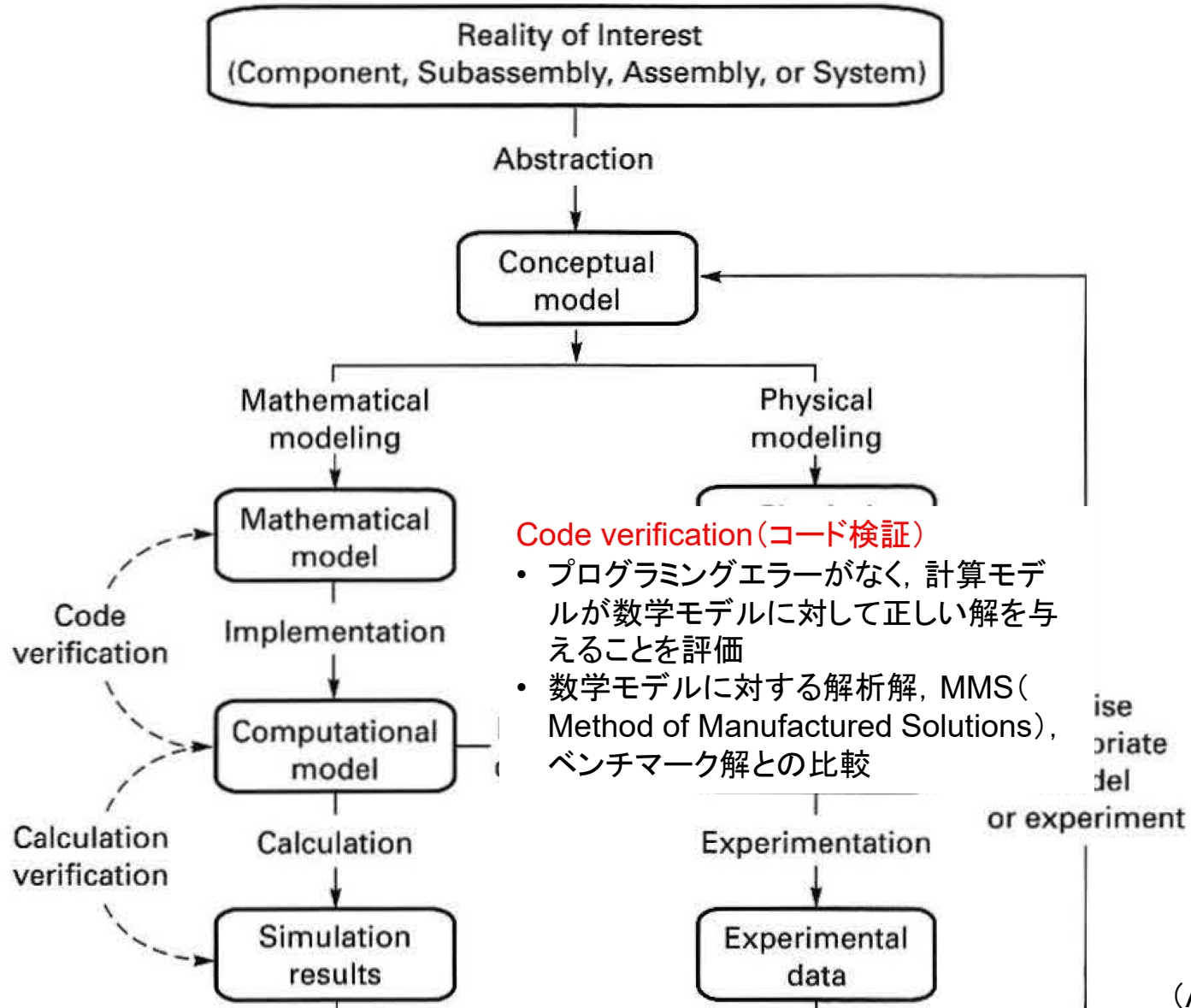


Computational model (計算モデル)

- 数値解析手法で離散化し、コンピュータに実装したもの

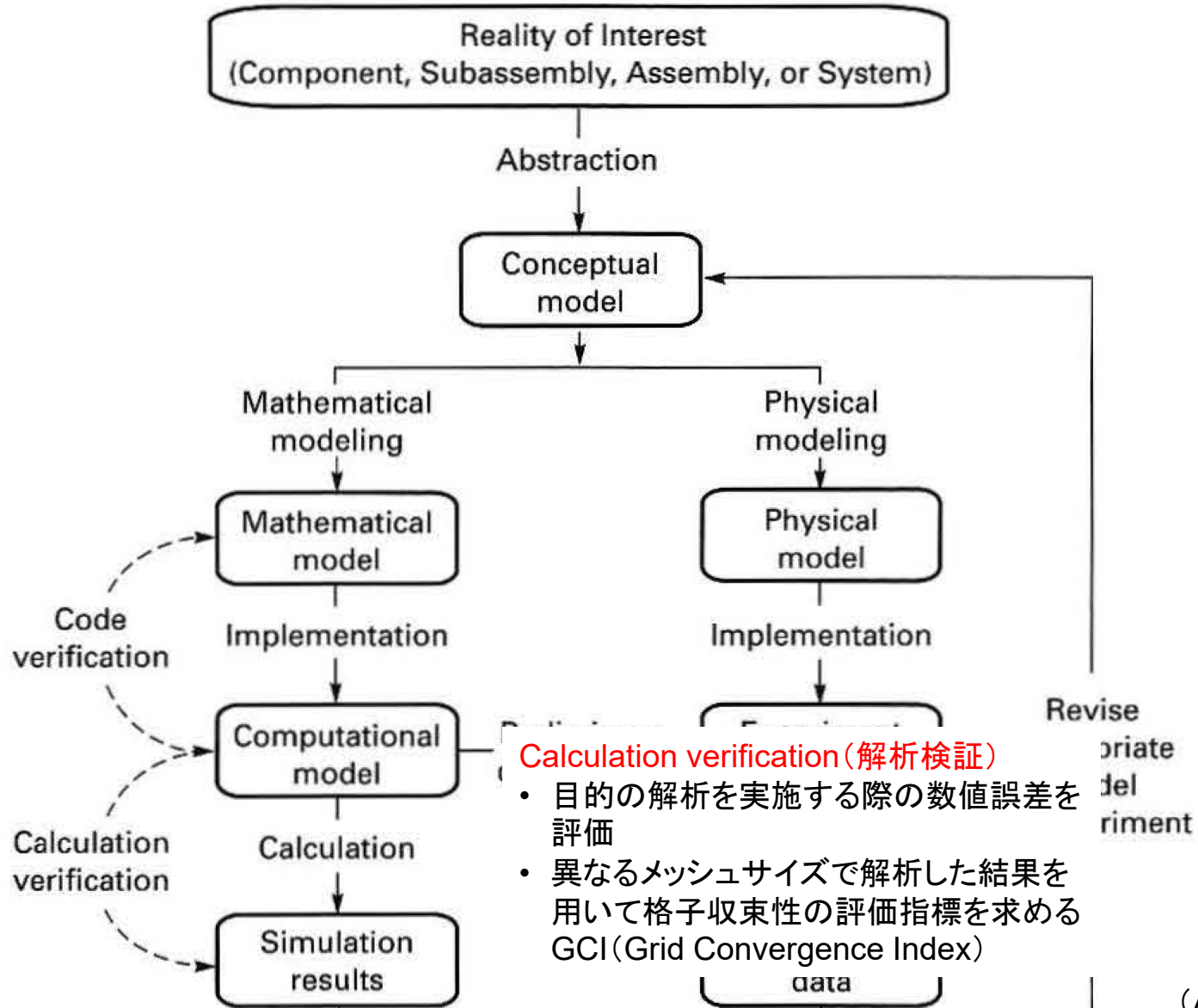
ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products

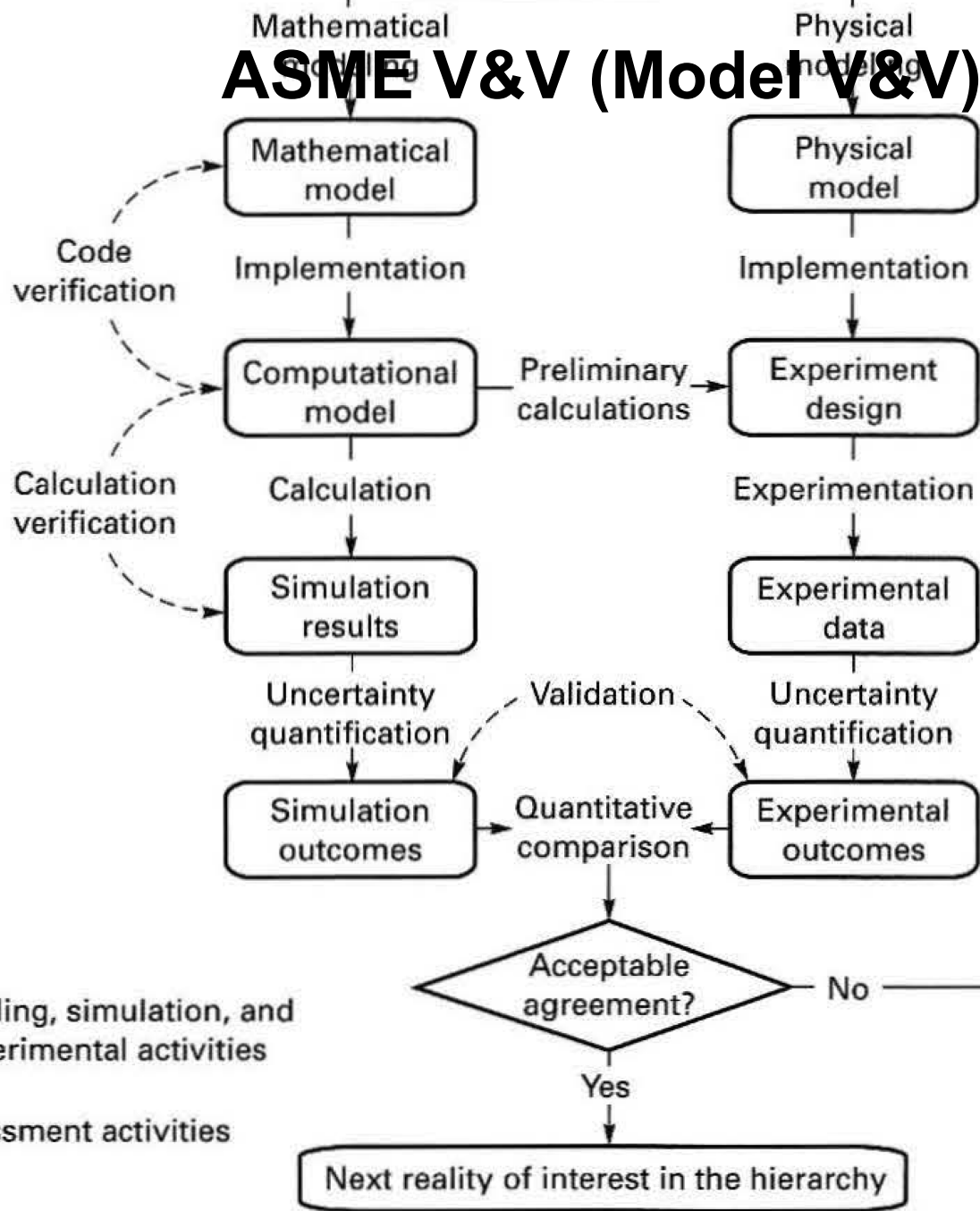


ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products



ASME V&V (Model V&V)

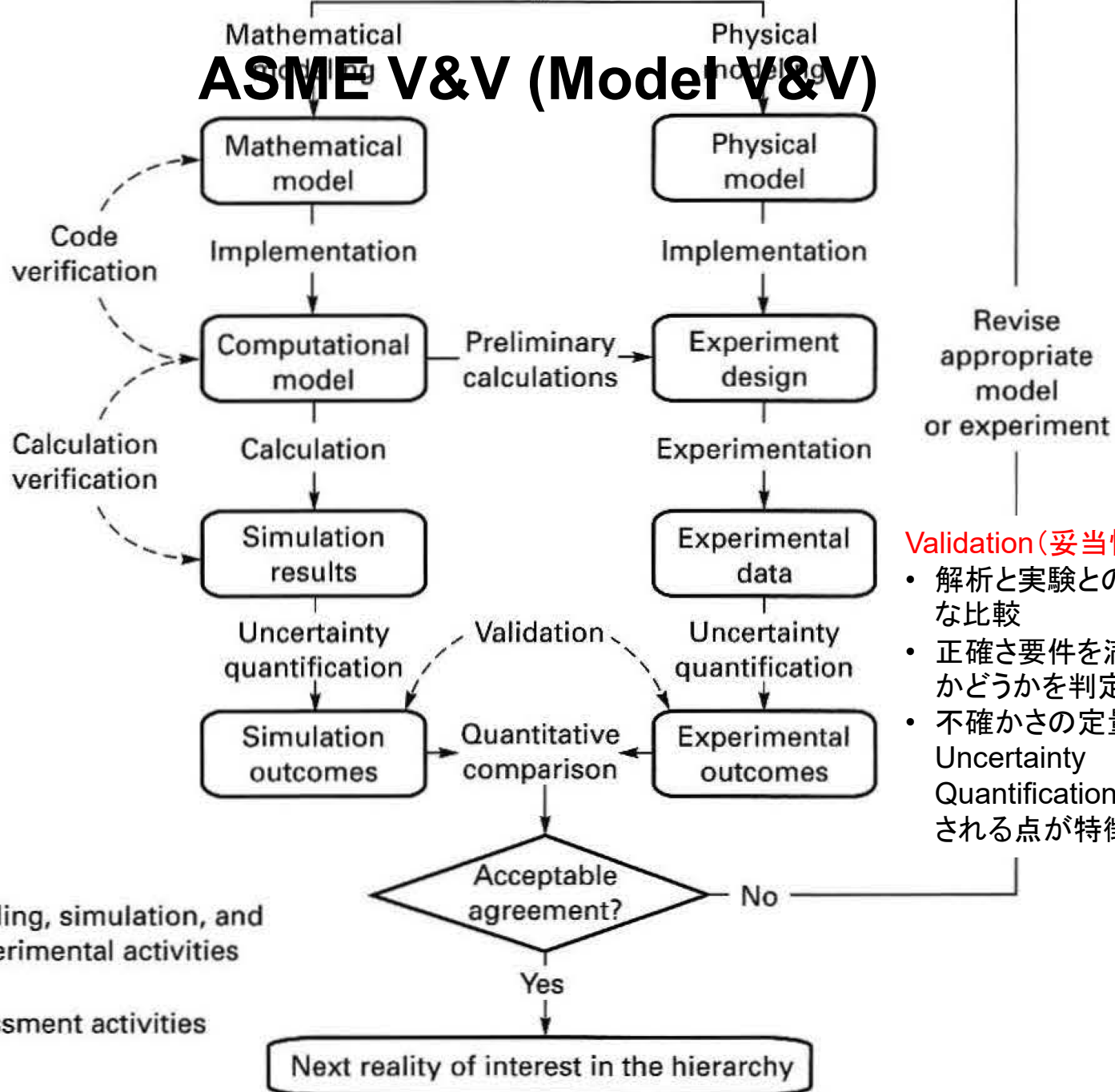


- Preliminary calculations**
- 実験者と解析者の協同
 - 実験計画
 - 初期条件, 境界条件

———— Modeling, simulation, and experimental activities
 - - - - - Assessment activities

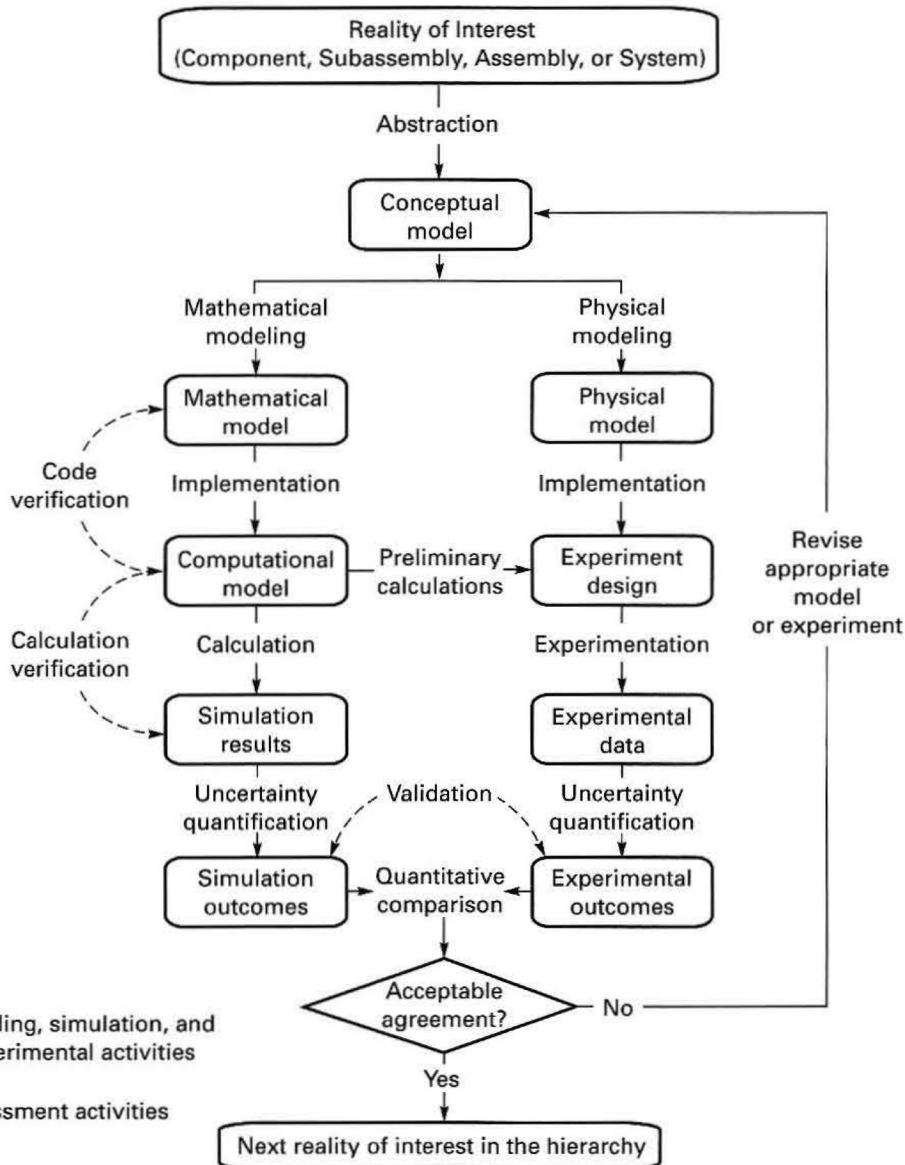
TE: This figure also appears as Fig. 4 in V&V 10 [1].

ASME V&V (Model V&V)



ASME V&V (Model V&V)

Fig. 1 V&V Activities and Products



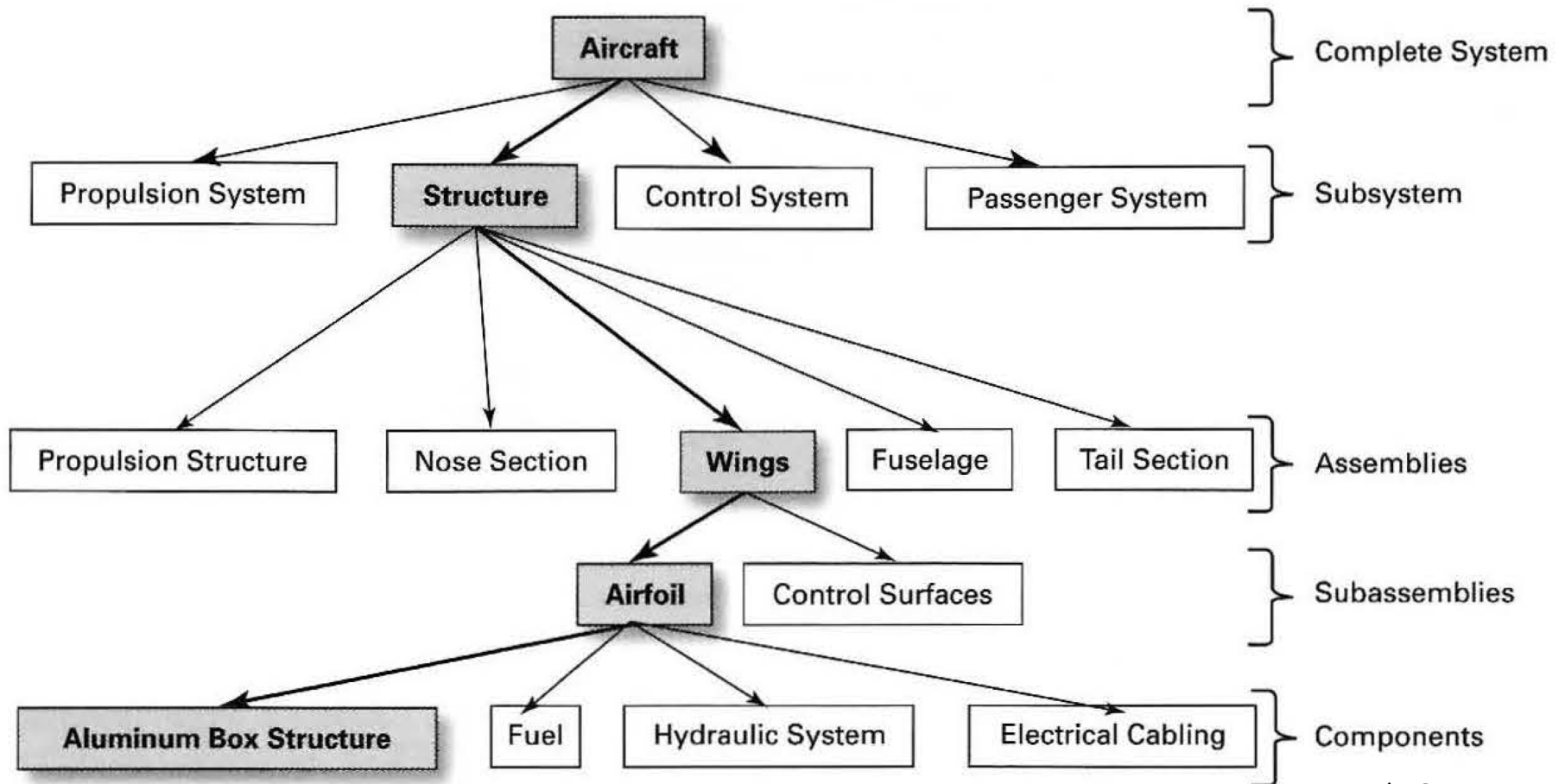
- Conceptual model
 - 所期の利用目的 (IU)
 - 着目量と正確さの要件
- Code verification
 - MMS, ベンチマーク解
 - Code to code
- Calculation verification
 - 格子収束の確認不十分
- Validation
 - 不確実性の評価不十分
 - 実事例は対象?
- Acceptable agreement
 - IUに応じた要求精度
 - 信頼性に基づく意思決定
- Credibility
 - 客観的な信頼性 (Reliability)
 - 主観的な信頼性 (Credibility)

ASME V&V (Model V&V)

- システム全体

- Model validation (要素試験, 模型実験)
- Profile validation (実地盤)

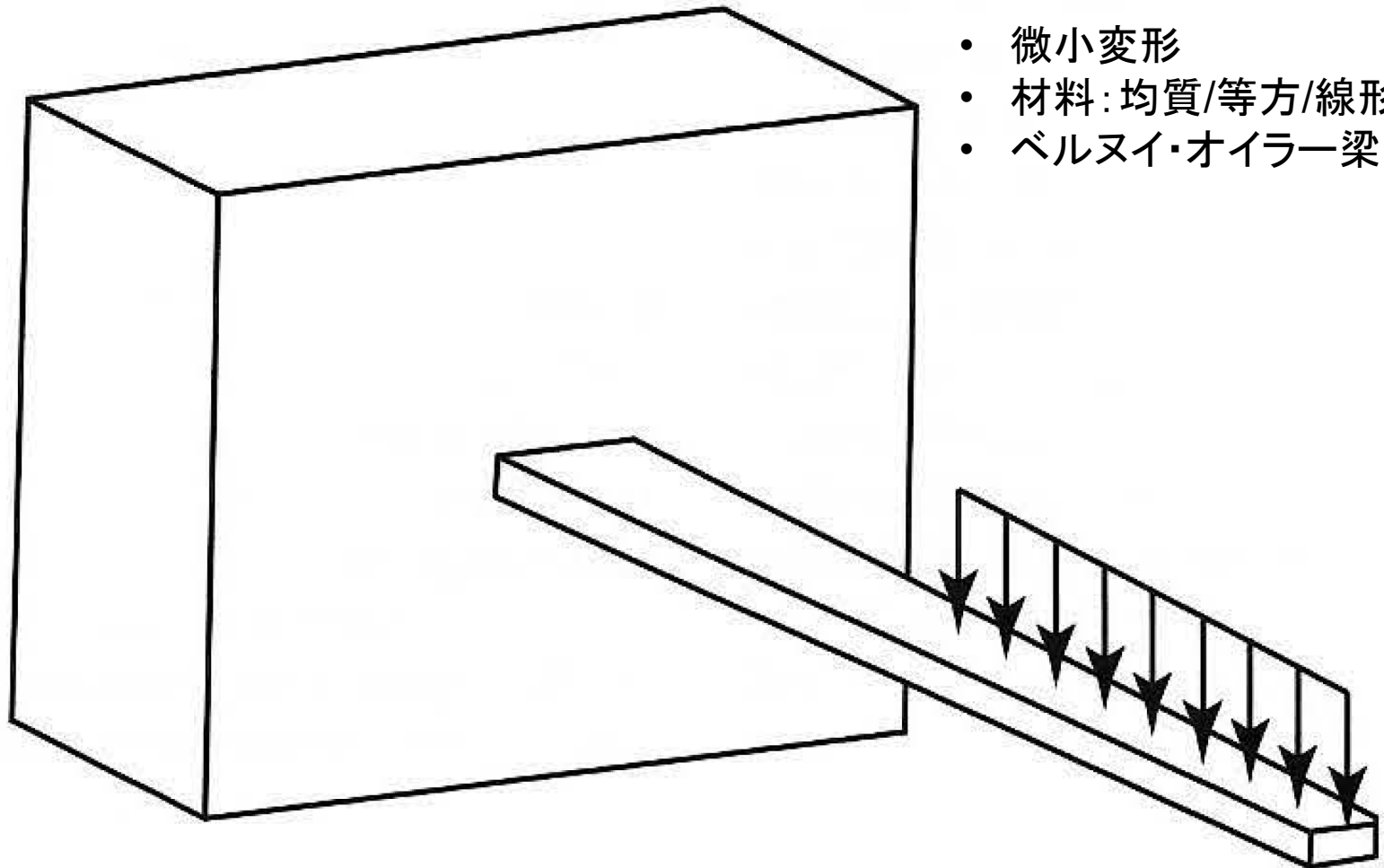
Fig. 2 Validation Hierarchy Illustration for an Aircraft Wing



ASME V&V (Model V&V)

- 概念モデル

Fig. 3 Schematic of the Hollow Tapered Cantilever Beam



- 微小変形
- 材料:均質/等方/線形弾性
- ベルヌイ・オイラー梁

ASME V&V (Model V&V)

- 数学モデル

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \frac{d^2}{dx^2} w(x) \right) &= q(x), \quad 0 \leq x \leq L, \\ w(0) &= \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = f_r EI(0) \left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{x=0}, \quad \left[EI(x) \frac{d^2}{dx^2} w(x) \right] \Big|_{x=L} = 0, \\ \left. \frac{d}{dx} \left[EI(x) \frac{d^2}{dx^2} w(x) \right] \right|_{x=L} &= 0, \\ I(x) &= \frac{1}{12} \left\{ b_0 \left(1 - \alpha \frac{x}{L} \right) h^3 - \left[b_0 \left(1 - \alpha \frac{x}{L} \right) - 2t \right] [h - 2t]^3 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

where

b_0 = width at the support

E = modulus of elasticity of the beam material

f_r = flexibility of the linear rotational spring restraining the beam at its constrained end

h = depth of the beam

$I(x)$ = area moment of inertia of the beam

L = length of the beam

$q(x)$ = distributed load in the y -direction

t = wall thickness

$w(x)$ = beam deflection in the direction normal to the undeformed centerline

x = measured from the supported end

α = taper factor $1 - (\text{tip width}) / (\text{base width})$

ASME V&V (Model V&V)

- コード検証: 解析解(一様荷重)との比較による格子収束性
 - Order of accuracy, p

$$w_{\text{exact}} = w_h + Ah^p + \text{H.O.T. as } h \rightarrow 0 \quad (4)$$

where

A = constant

H.O.T. = higher order terms, which tend to zero faster than the lowest order error term (the second term on the right) as h tends to zero

h = grid size

w_{exact} = exact solution

w_h = numerical solution at grid size h

ASME V&V (Model V&V)

● コード検証

The analytic solution of a linearly tapered, uniformly loaded cantilever beam has been derived by integration of eq. (3)₁ with $q = \text{constant}$. The resulting normalized transverse deflection for a beam that tapers linearly in width is

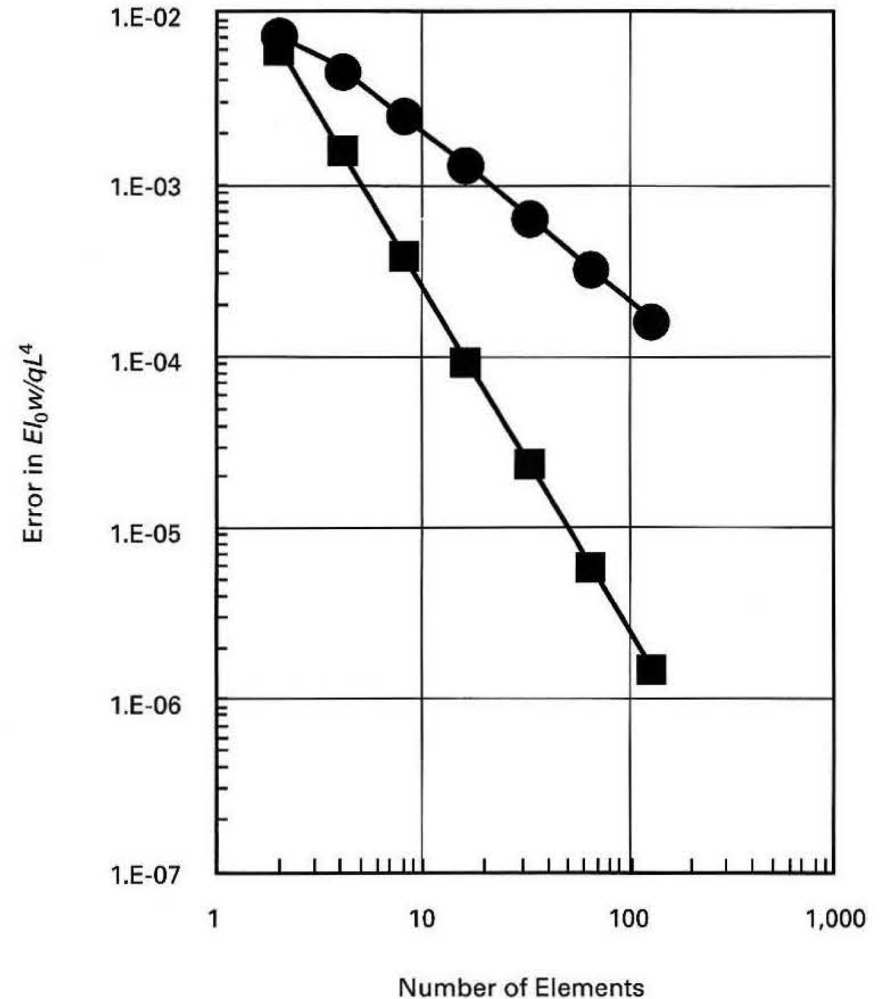
$$\frac{EI_0}{qL^4} w(x) = \frac{1}{2\alpha} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 \left[\frac{x}{L} + \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{x}{L} \right) \ln \left(1 - \alpha \frac{x}{L} \right) \right] - \frac{1}{6} \left(\frac{x}{L} \right)^3 + \left(1 - \frac{1}{2\alpha} \right) \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

The taper factor α for the problem at hand is 0.5, so from eq. (5) the exact normalized tip deflection is $\frac{5}{6} - \ln(2) \approx 0.14018615$, which will be the basis for code verification comparisons.

Table 1 Normalized Deflections

Number of Elements	EI_0w/qL^4	
	Initial Coding	Final
2	0.13281250	0.14642858
4	0.13549805	0.14172980
8	0.13769015	0.14057124
16	0.13890418	0.14028238
32	0.13953705	0.14021021
64	0.13985962	0.14019217
128	0.14002239	0.14018766

Fig. 7 Errors in Normalized Deflections

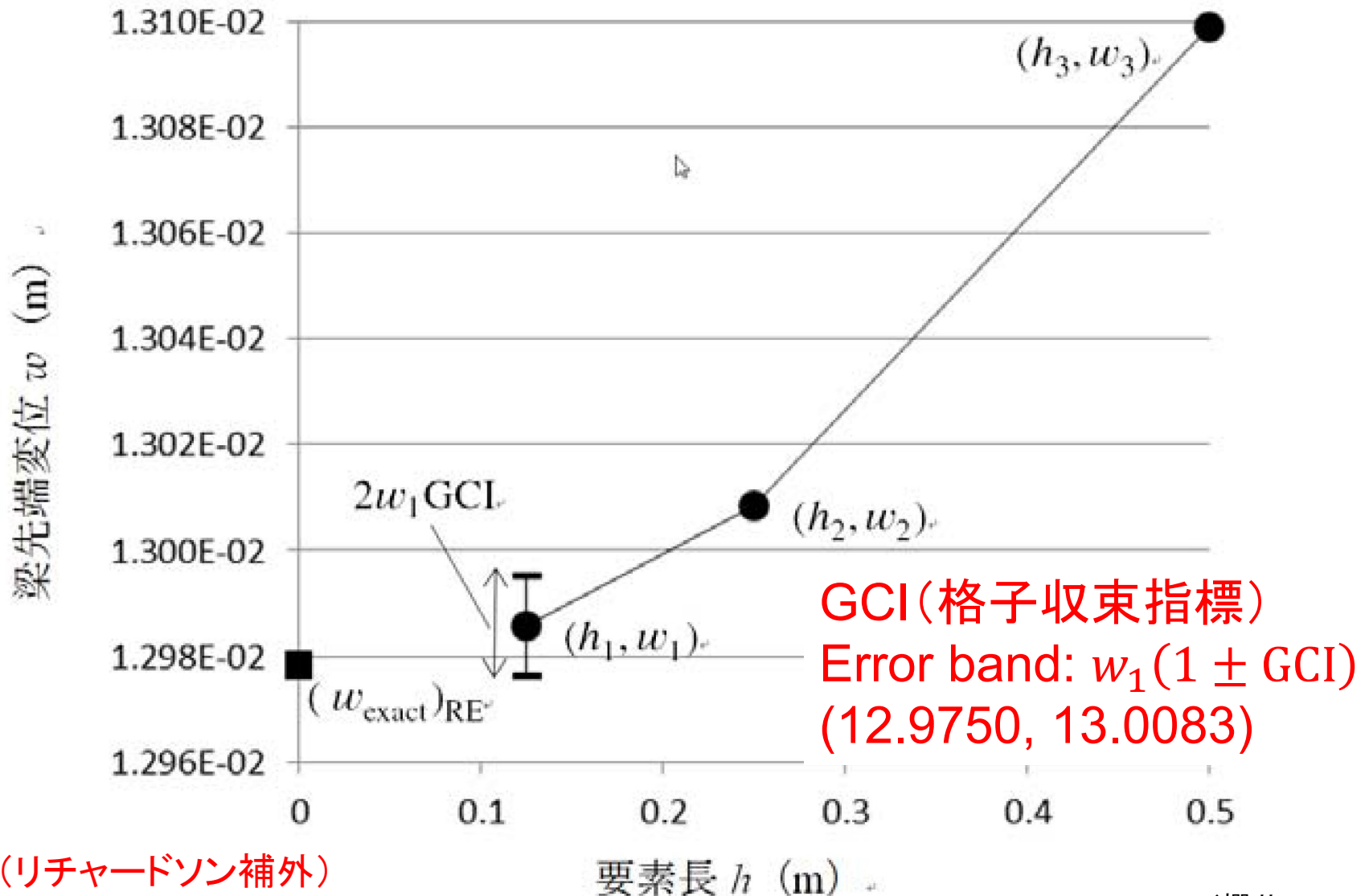


● Initial coding

■ After correction (ASME, 2012)

ASME V&V (Model V&V)

- 解析検証: 実モデル(解析解なし)で格子収束性を検討



ASME V&V (Model V&V)

- 解析検証: 実モデル(解析解なし)で格子収束性を検討

$$\frac{w_2 - w_1}{w_3 - w_2} = \frac{h_1^p - h_2^p}{h_2^p - h_3^p} \quad (6)$$

where now the subscripts 1, 2, 3 refer respectively to the finest, intermediate, and coarsest numerical solutions for the SRQ of interest. This is a transcendental equation that may be solved for p by any suitable numerical method. Although certainly not necessary, in some cases it may happen that the grid refinement ratio is constant (i.e., $h_2/h_1 = h_3/h_2 = r$) in which case eq. (6) can be solved in closed form to yield

$$p = \ln \left(\frac{w_3 - w_2}{w_2 - w_1} \right) / \ln(r) \quad (7)$$

Once p is determined, eliminating A from the two finer mesh instances of eq. (4) leads to

$$w_{\text{exact}} = w_1 + \frac{w_1 - w_2}{(h_2/h_1)^p - 1} \quad (8)$$

This value of w_{exact} is a Richardson extrapolation based on three grids. [Although neither w_3 nor h_3 appears explicitly in eq. (8), they both implicitly affect p through either eq. (6) or eq. (7).] Equation (8) can be easily rearranged to provide an estimate of the numerical error in the fine-mesh solution w_1 , by rewriting it as

$$w_{\text{exact}} - w_1 = \frac{\epsilon}{(h_2/h_1)^p - 1} w_1 \quad (9)$$

where

$$\epsilon = (w_1 - w_2)/w_1$$

Richardson extrapolation
(リチャードソン補外)

ASME V&V (Model V&V)

- 解析検証: 実モデル(解析解なし)で格子収束性を検討

For some purposes eq. (9) may be all that is needed to estimate the numerical error in the fine-grid solution. However, to standardize reporting of numerical error estimates, Roache [5] defined a grid convergence index (GCI) based on the right side of eq. (9), and it has been fairly widely adopted in the computational fluid dynamics community. Dividing eq. (9) by w_1 and multiplying by a factor of safety F_s (which Roache takes as 1.25 for “convergence studies with a minimum of 3 grids to...demonstrate the observed order of convergence...”), one obtains the GCI:

$$GCI = F_s \frac{|\epsilon|}{(h_2/h_1)^p - 1} \quad (10)$$

Thus the GCI is a dimensionless indicator for the mesh convergence error relative to the finest-zoned solution. Specifically, when multiplied by the finest-zoned solution, it provides the width of an error band, centered on that solution, within which the exact solution is very likely to be contained. Its validity rests on the assumption that the numerical solutions from which p was determined are in the asymptotic convergence range. In terms of the GCI, the error band is $w_1(1 \pm GCI)$. Equation (10) can be used for any discretization method with any order of spatial convergence. The only other requirement for eq. (10) is that $h_1 < h_2$. It is also recommended that successive grid refinement be greater than 1.3 (i.e., $h_2/h_1 > 1.3$).

Table 2 Numerical Solutions for Tip Deflections

Grid Number	Number of Elements	h , m	w , mm
3	4	0.5	13.098739
2	8	0.25	13.008367
1	12	0.16666667	12.991657
Surrogate for exact solution	200	0.01	12.978342

Using the first three of these displacements in eq. (6) and solving for p yields $p = 2.00256154$.

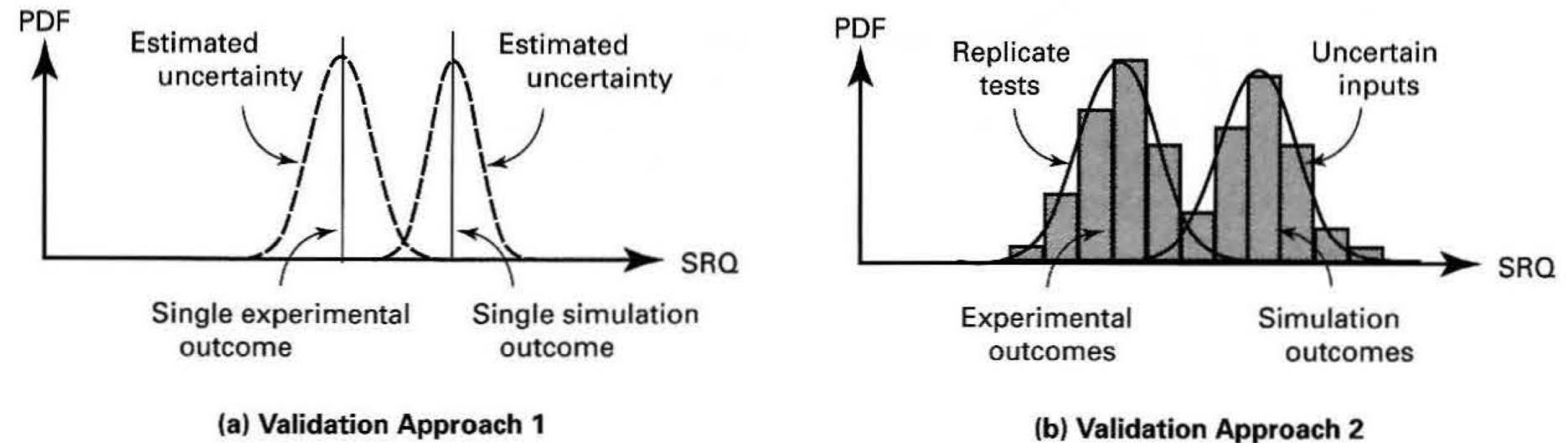
Since this is so close to the theoretical value of 2, the solutions are judged to be in the asymptotic convergence regime. From eq. (10) with $F_s = 1.25$, we have $GCI = 0.00128381$. The error band defined by this GCI about the fine-zoned solution w_1 is (12.9750, 13.0083) mm. The last line in Table 2 lists a 200-zone solution, which we regard as a surrogate for the exact numerical solution, and note that it does indeed fall within the GCI-defined interval.

Grid convergence index (格子収束指標)

ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 二つのアプローチ

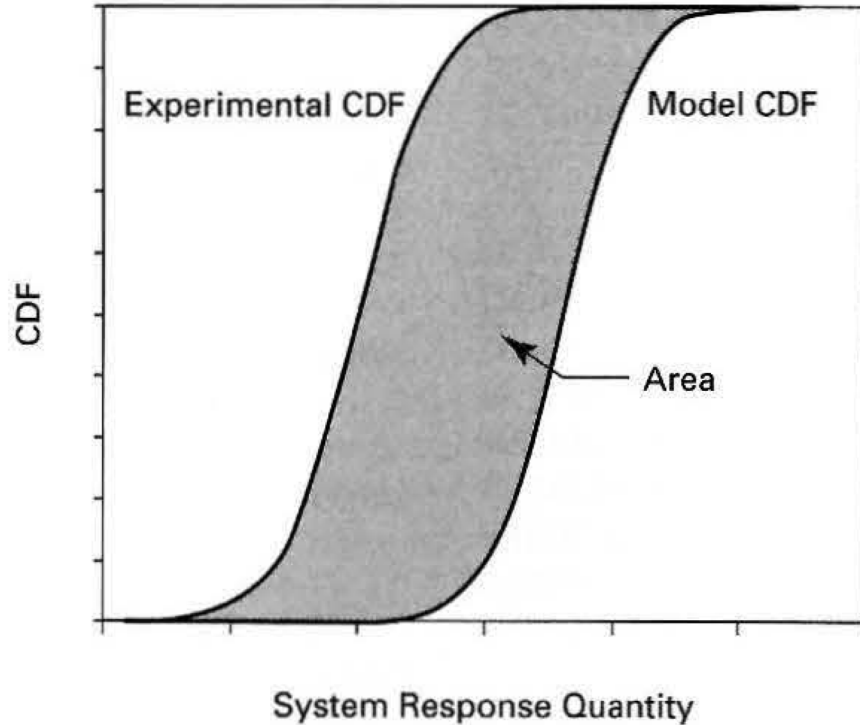
Fig. 5 Illustration of the Two Validation Approaches



ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 実験と解析との比較, area metric

Fig. 6 Illustration of the Basis of the Area Metric



The area metric M^{SRQ} is the area between the experiment and model CDF [3], normalized by the absolute mean of the experimental outcomes. Thus, if $F_{\text{SRQ}}(y)$ is the CDF of either the model-predicted or measured SRQ values, then

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

where

$\overline{\text{SRQ}}^{\text{exp}}$ = the mean of the experimental outcomes

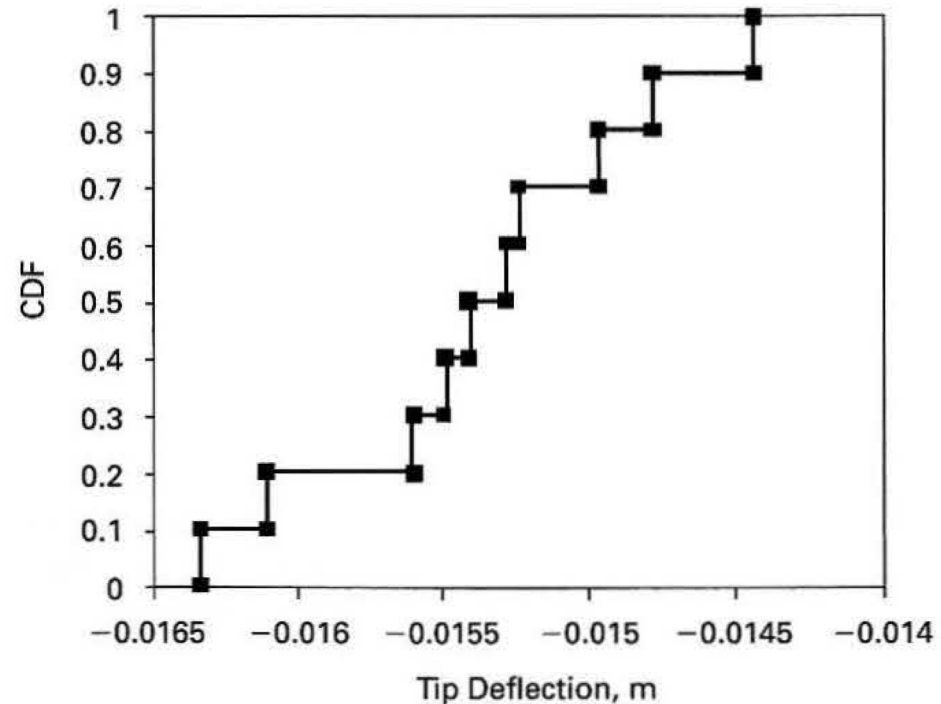
ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 実験結果

Table 3 Measured Beam-Tip Deflections From the Validation Experiments

Test Number, i	Tip Deflection, w_i^{exp} , mm
1	-16.3
2	-15.5
3	-16.1
4	-14.8
5	-14.4
6	-15.0
7	-15.3
8	-15.4
9	-15.6
10	-15.2

Fig. 9 Empirical CDF of the Validation Experiment Data



ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 材料定数

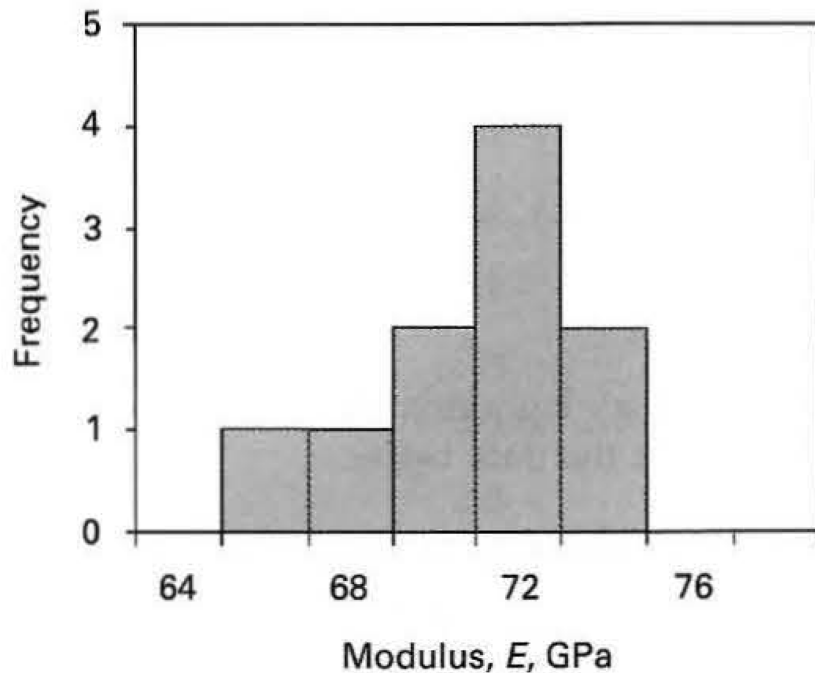
Table 4 Test Measurements of the Modulus of Elasticity, E

Test	Modulus, E , GPa
1	69.1
2	68.8
3	74.4
4	72.6
5	72.9
6	67.5
7	74.1
8	68.3
9	71.0
10	63.2

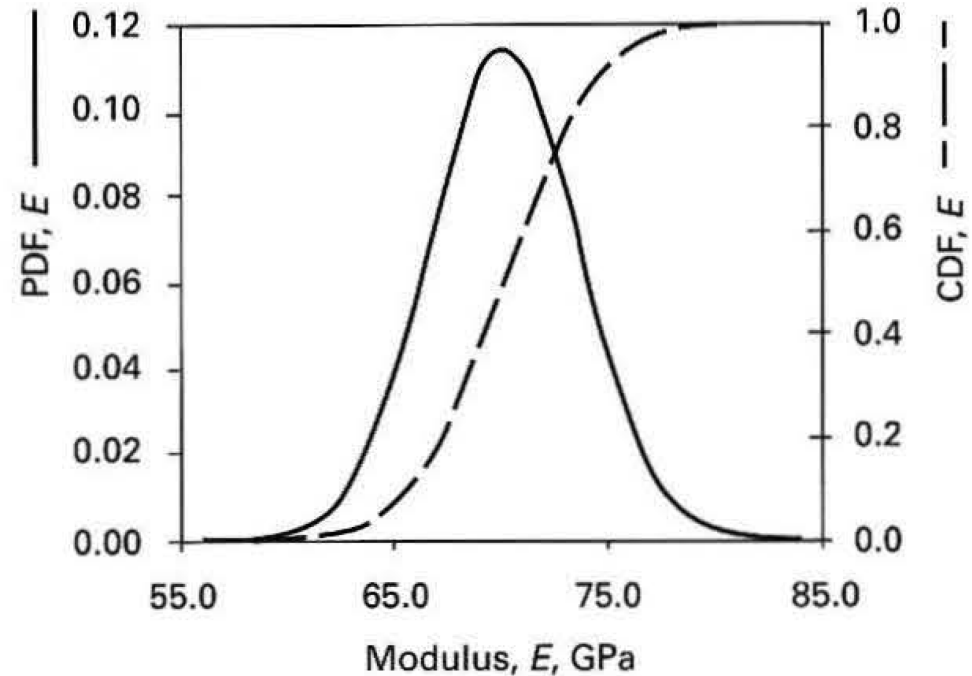
ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 材料定数

Fig. 10 Random Variability in Modulus, E , Used in the Computational Model



(a) Displayed as a Histogram



(b) Displayed as PDF and CDF

ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認:境界条件

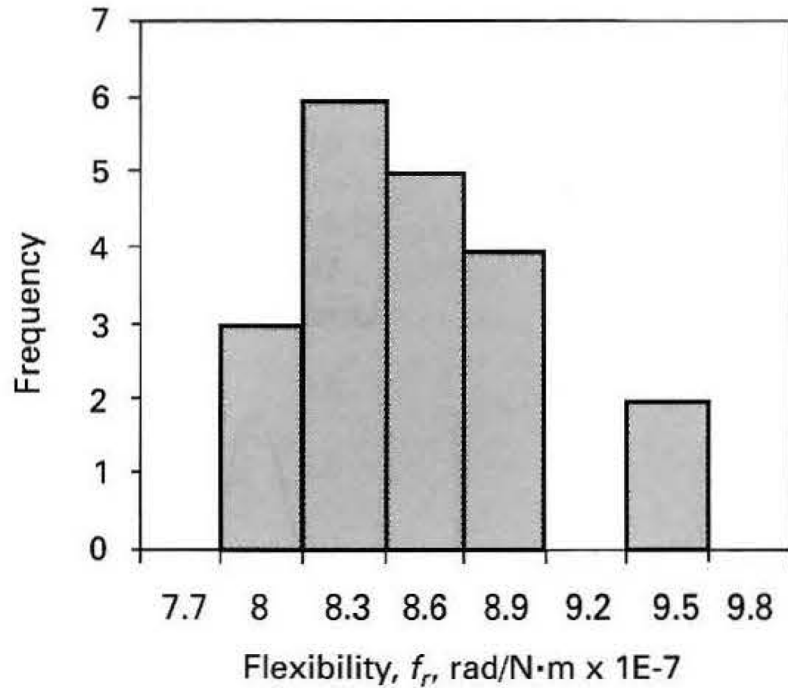
Table 5 Test Estimates of the Support Flexibility

Test	f_n rad/N·m $\times 10^{-7}$
1	8.5
2	8.2
3	8.1
4	8.4
5	7.8
6	7.7
7	8.8
8	8.6
9	8.6
10	8.1
11	8.6
12	8.8
13	8.5
14	8.0
15	9.3
16	8.1
17	9.3
18	8.1
19	8.3
20	8.3

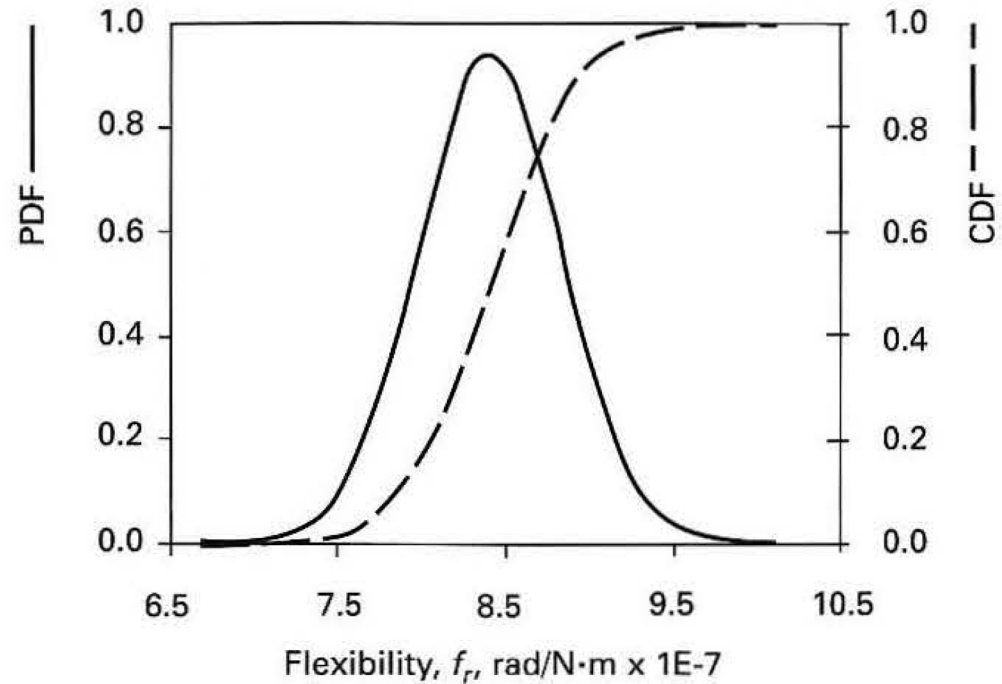
ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認:境界条件

Fig. 11 Random Variability in Support Flexibility, f_r , Used in the Computational Model



(a) Displayed as a Histogram

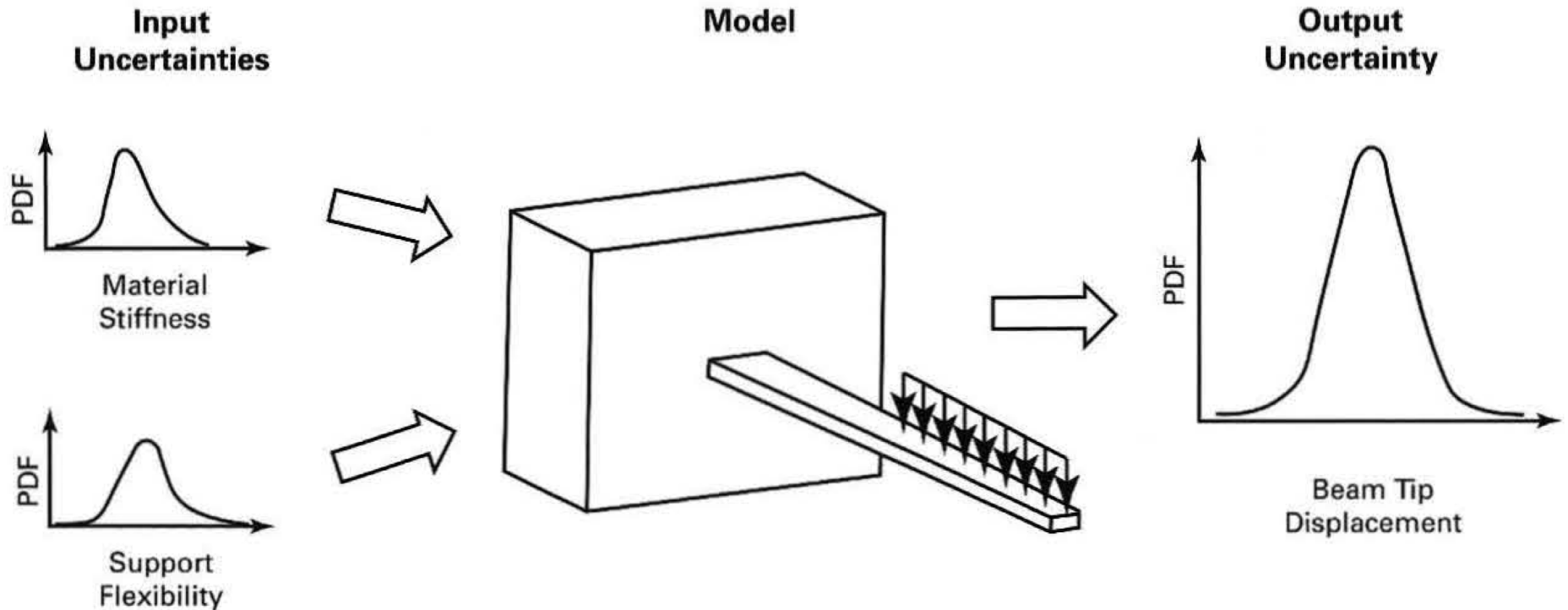


(b) Displayed as PDF and CDF

ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 解析条件

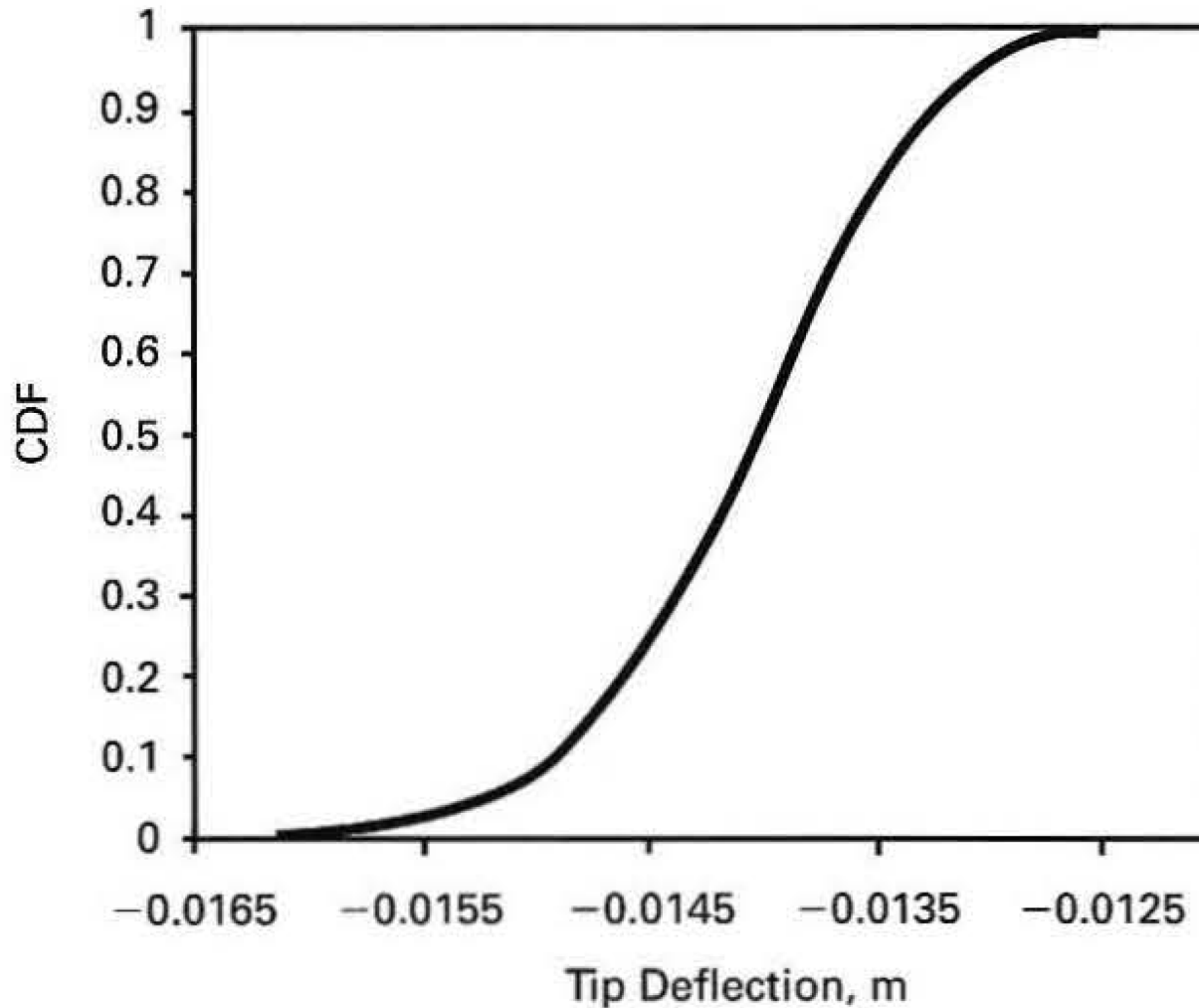
Fig. 12 Input Uncertainty Propagation Process



ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認: 解析結果

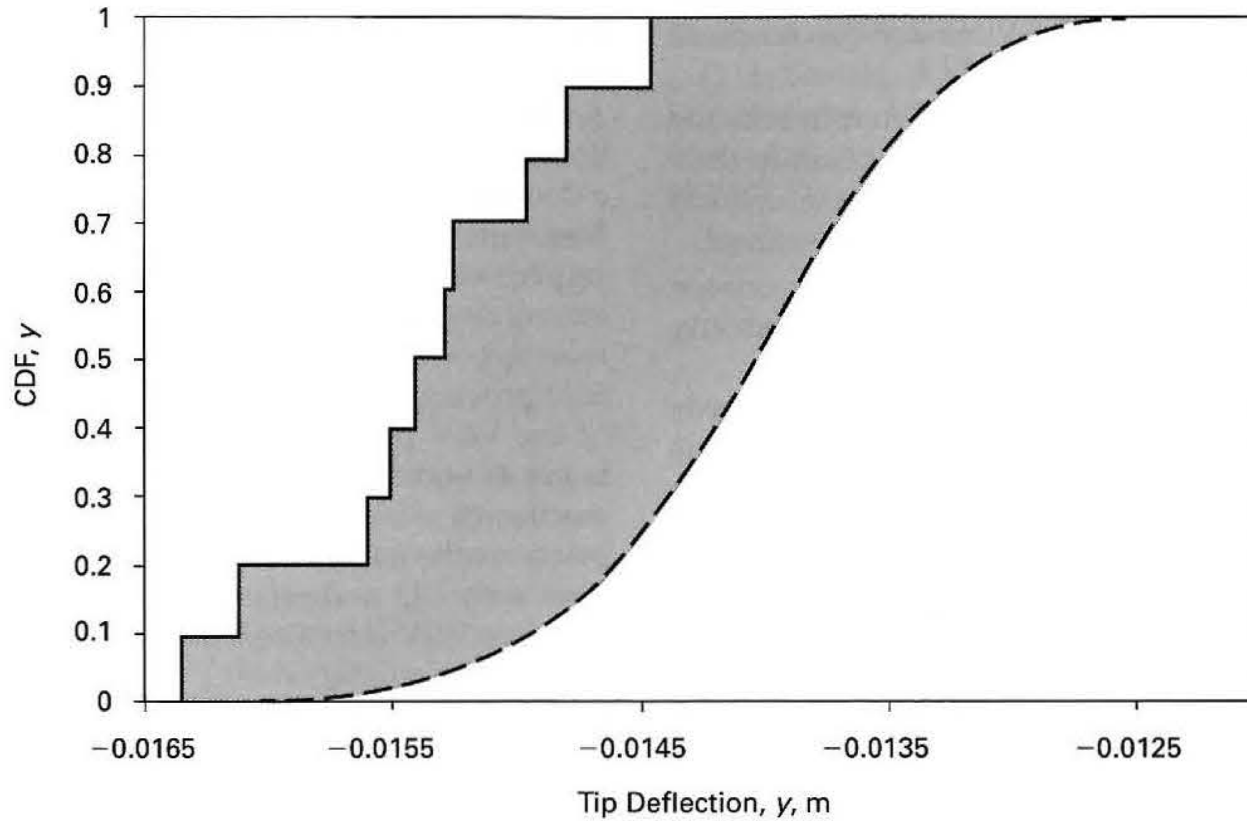
Fig. 13 Computed CDF of Beam Tip Deflection



ASME V&V (Model V&V)

- 妥当性確認

Fig. 14 CDF of the Model-Predicted Tip Deflection, Empirical CDF of the Validation Experiment Tip Deflections, and Area Between Them (Shaded Region)



— Experimental CDF
--- Computed CDF

粘性土地盤の変形解析における 数値解析のV&V

徳島大学大学院先端技術科学教育部

地盤工学研究室

肥前 大樹


粘性土地盤の圧密およびせん断変形問題に対して V&Vの考え方の適用を進める

□ Verification

- プログラムエラーがないこと
- 格子収束性を確認

□ Validation

- 遠心模型実験と三軸試験を実験方法を確立し、複数回実施
- 材料パラメーターのばらつき等を考慮した数値解析を実施



不確かさを定量化した多数対多数の比較を通じて、
対象とする問題におけるV&Vの適用性を検討

V&Vの進め方

所期の利用目的

粘性土地盤の沈下予測

概念モデル：着目する物理量，正確さの要件

粘性土地盤の変形量，10%

数学モデル：偏微分方程式

物理モデル

コード検証

計算モデル：離散化

実験計画

解析検証

解析結果

実験結果

Uncertainty Quantification

妥当性確認：不確かさの定量化(UQ)に基づき，概念モデルでの検討した正確さを満足するか判定

遠心模型実験
粘性土地盤の沈下量のばらつきを得る

遠心模型実験

予圧密載荷

- 模型作製
- ポーラスストーン
- 珪砂4号
- 信楽粘土

予圧密除荷

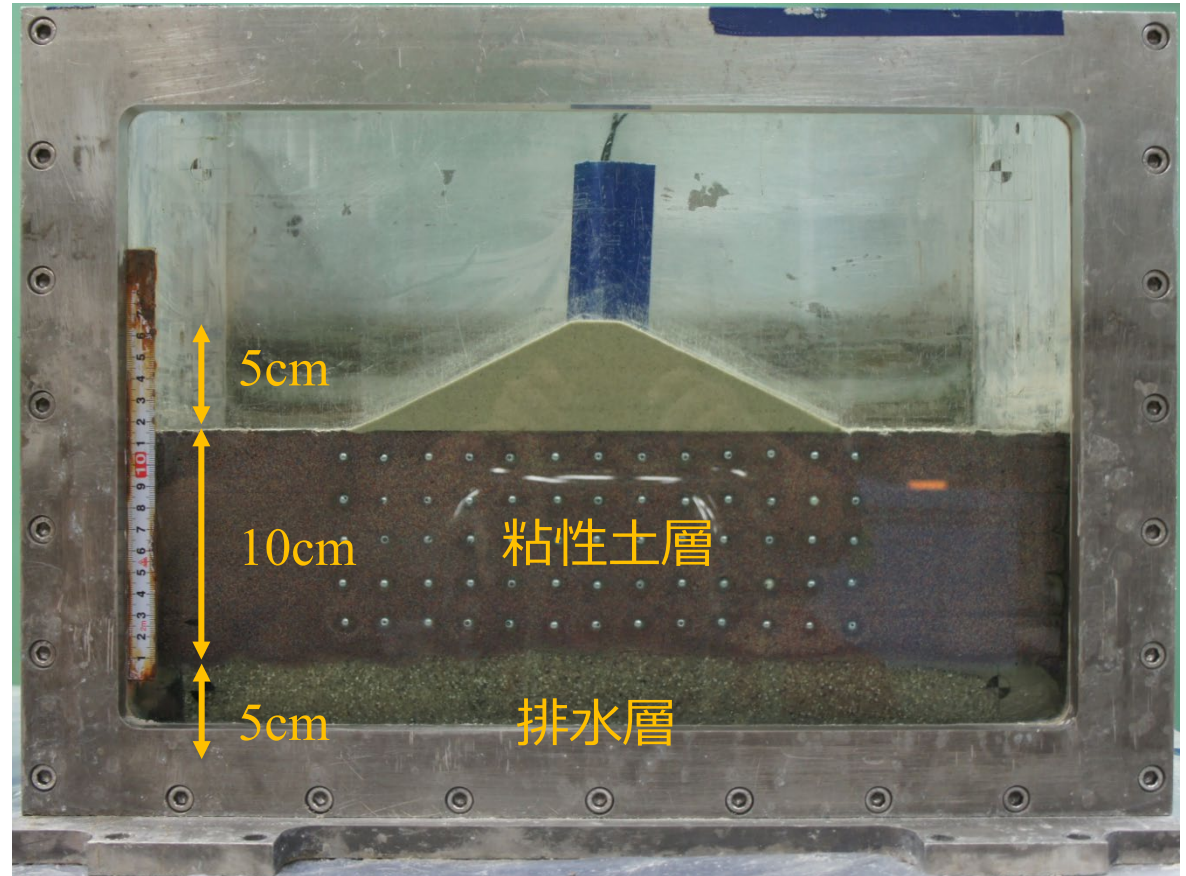
- 地盤高さ計測

盛土1G

- 盛土作製
- 珪砂7号
- ファインサンド

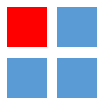
盛土50G

- 遠心載荷
- 地盤高さ計測



実験模型

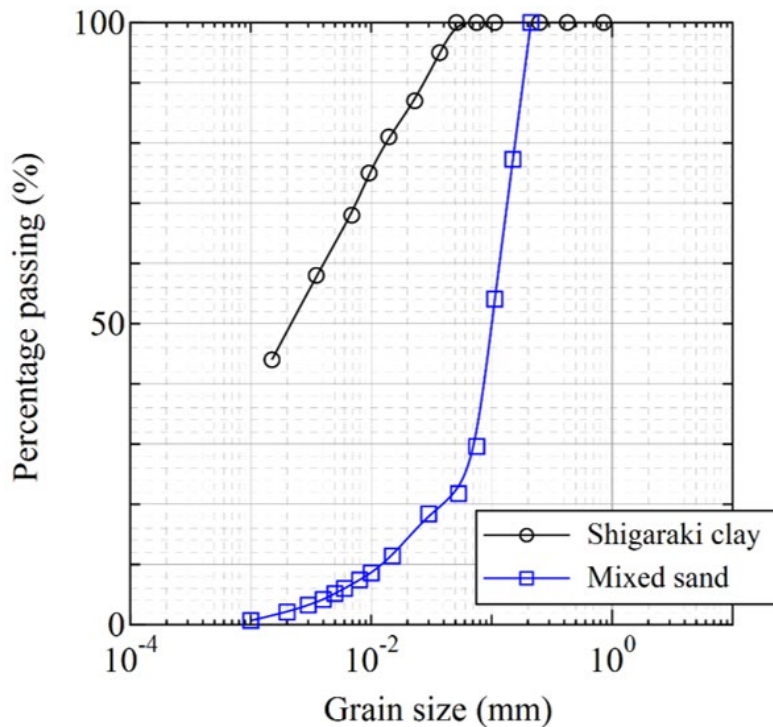
実験手法を確立し, 8回実施



材料物性値

信楽粘土の物性値

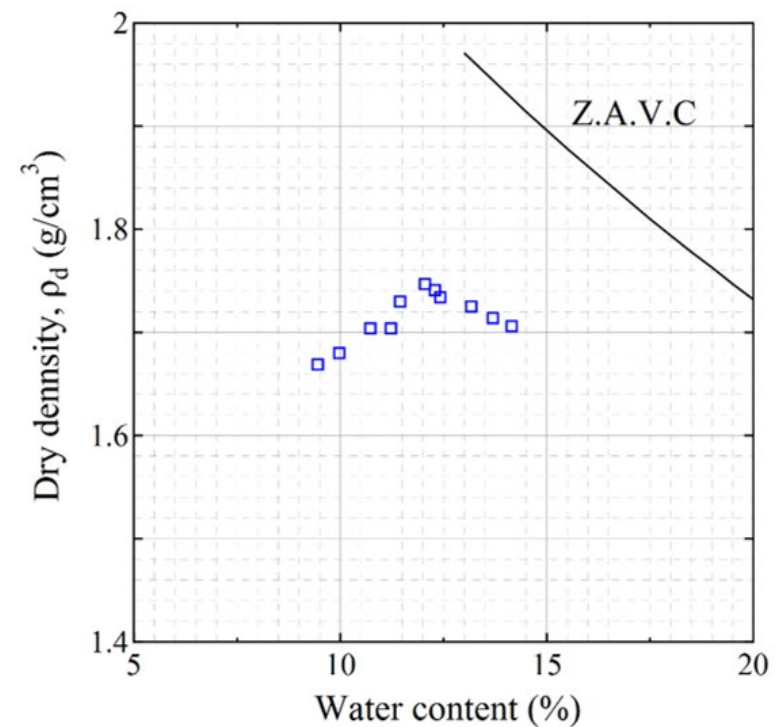
土粒子密度 (g/cm^3)	2.57
液性限界 (%)	35.7
塑性限界 (%)	18.4



粒径加積曲線

混合砂の物性値

土粒子密度 (g/cm^3)	2.65
最大乾燥密度 (%)	1.75
最適含水比 (%)	12.1

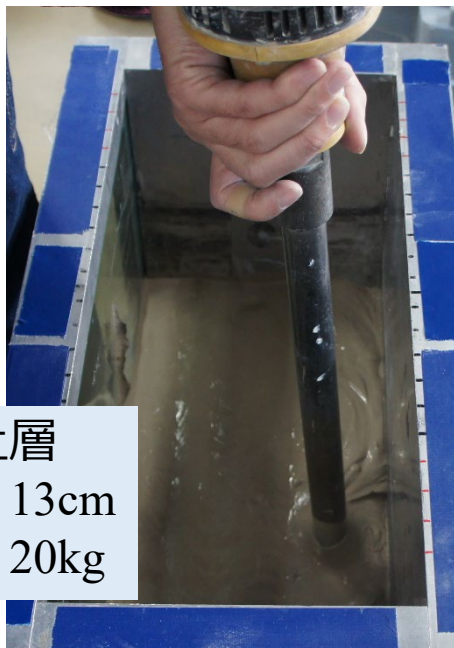


混合砂の締固め曲線

予圧密載荷 (粘性土地盤作製)



含水比 : 50%



粘性土層
高さ : 13cm
質量 : 20kg

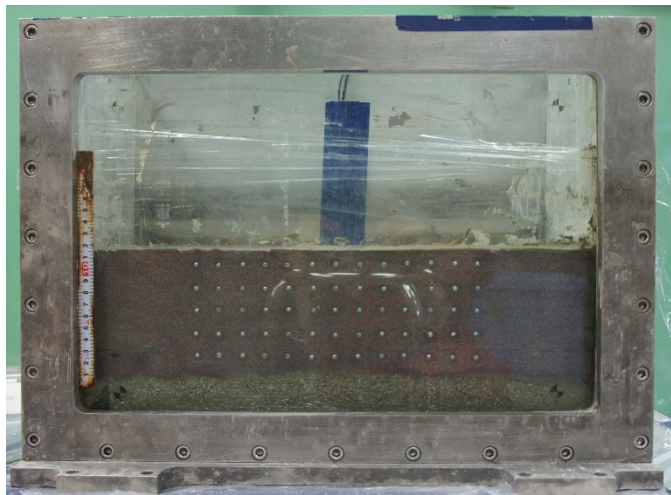


圧力と載荷時間

圧力 (kPa)	載荷時間 (h)
0.5	0.5
1.0	1.0
2.0	3.0
4.0	6.0
8.0	9.0
15.0	12.0
22.0	12.0
30.0	100.0

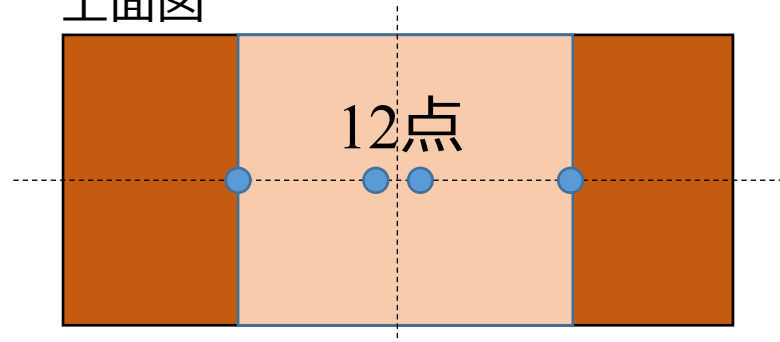
- シリンダー内に空気を送り, ロッドを押す
- 載荷板を介して地表面全体に圧力を載荷する

予圧密除荷～盛土1G過程



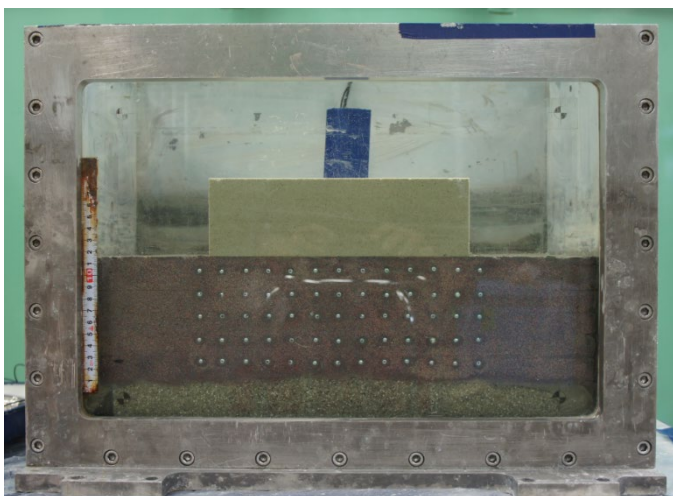
予圧密除荷時

上面図



地表面整形後に地盤高さの計測
→粘性土地盤沈下量の初期

盛土作製に伴う沈下量は計測不可



盛土作製



盛土完成

- 5Gずつ，所定の時間をかけて増加させる
- 解析でも同様の载荷を入力する

遠心加速度と载荷時間

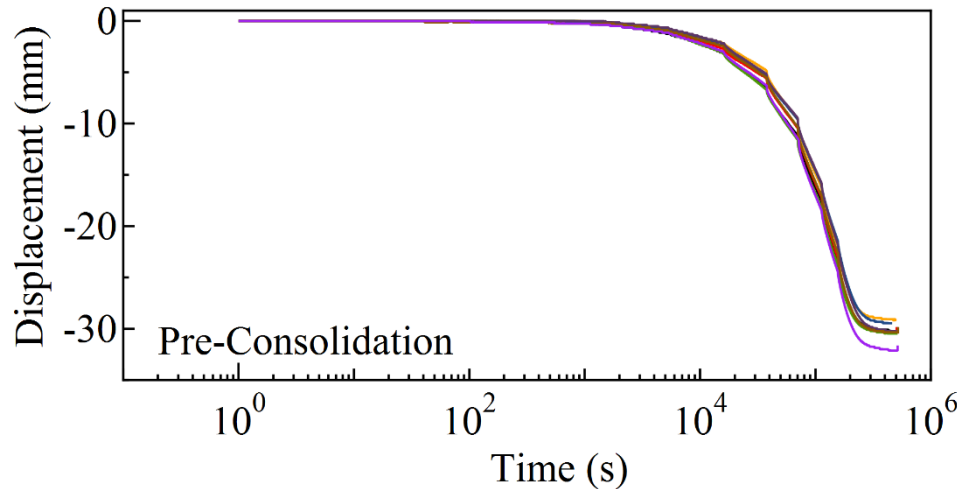
遠心加速度 (G)	载荷時間 (min)
5	2.5
10	5.0
15	7.5
・	・
・	・
40	20.0
45	22.5
50	30.0

- 遠心载荷終了後，盛土を除荷し粘性土地盤高さを計測
- 粘性土地盤の沈下量
=盛土除荷時－予圧密除荷時

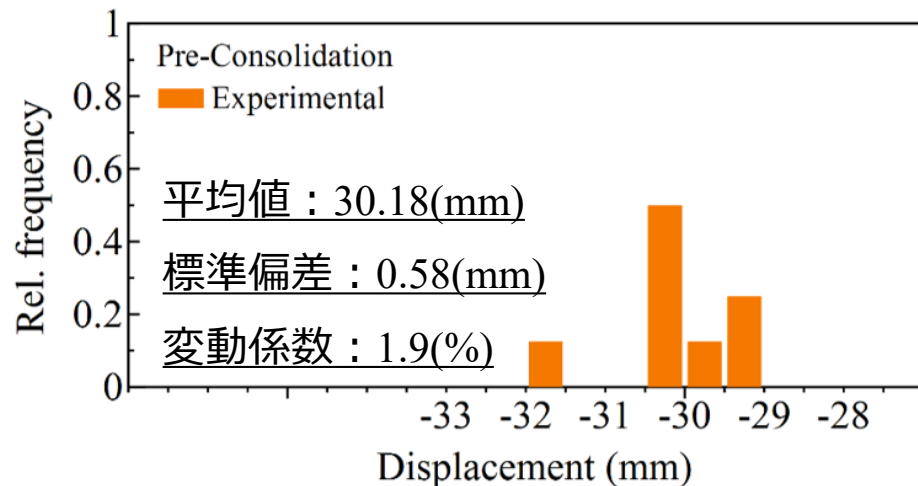
結果に影響を与える要因

- 作業時間のばらつき
- 遠心载荷時の風力
- 盛土作製の技量

予圧密載荷，実験結果



予圧密沈下量時刻歴



予圧密沈下量ヒストグラム

予圧密載荷過程に対するPIRT

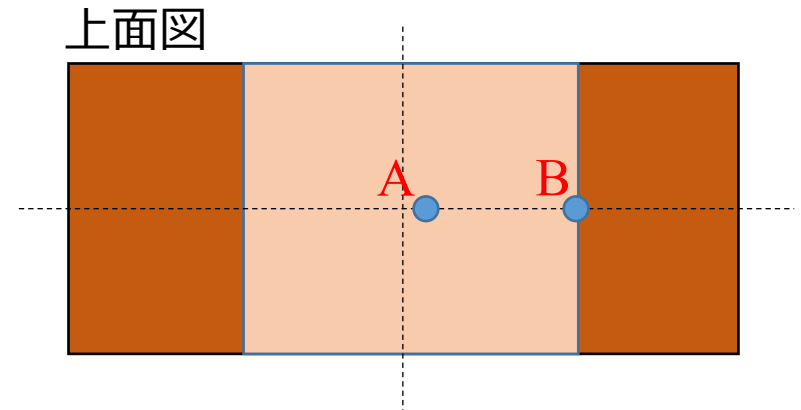
要因	影響度
スラリー状粘土の練り混ぜの程度	Mid
土槽に投入したスラリー状粘土の間隙水量	High
バイブレーターの程度による間隙空気の存在	Mid
予圧密圧力の時刻歴のばらつき	Mid

High : 沈下量に影響し人的制御が不可

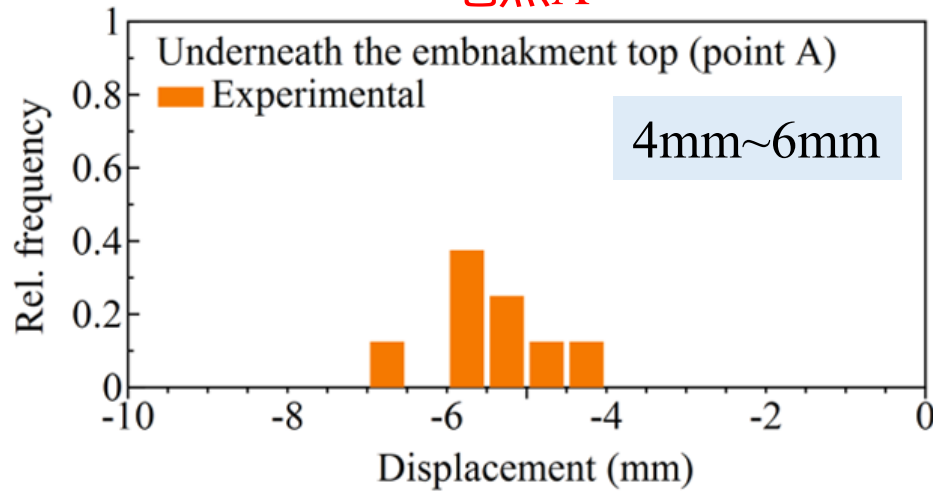
Mid : 沈下量に影響し人的制御が可

盛土1G～盛土50G, 実験結果

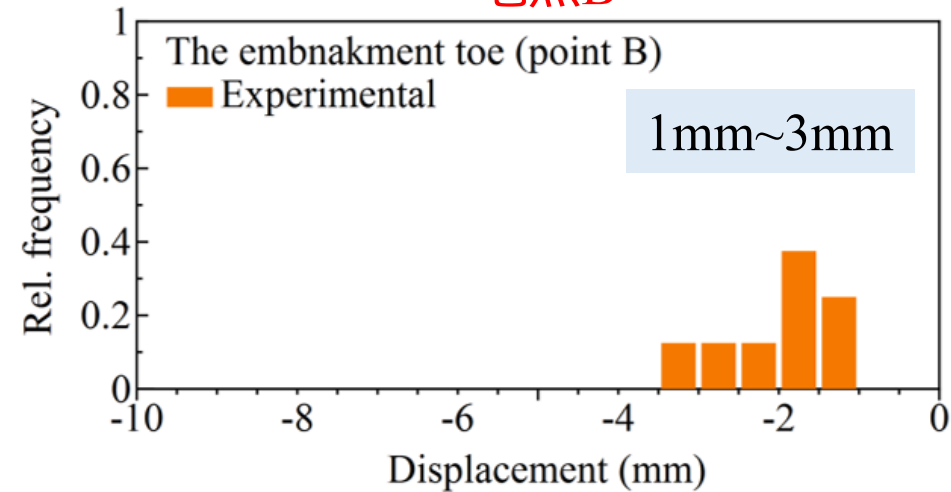
- 解析と比較を行う地点での鉛直変位
- 解析では壁面摩擦を考慮しないため、地盤中央線での沈下量と比較



地点A



地点B



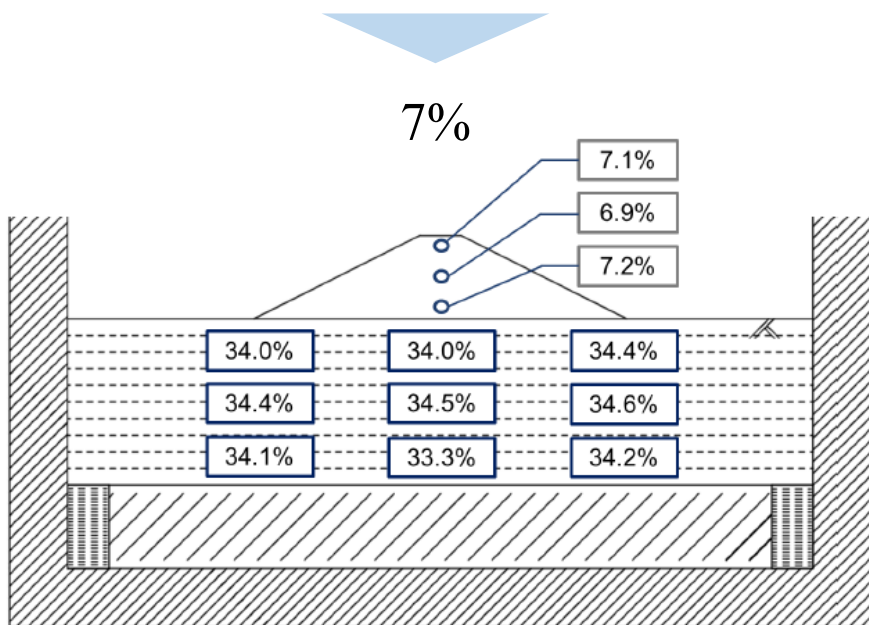
粘性土地盤の沈下量分布

遠心模型実験のPIRT

盛土作製時のばらつき

	盛土 締固め度	盛土 質量
変動係数 (%)	2.11	2.74

- 初期含水比：12.1%



盛土50G過程終了時の含水比分布

盛土1G~50G過程に対するPIRT

要因	影響度
盛土作製時の 粘性土地盤の沈下	High
作業時間のばらつき	Mid
盛土, 粘性土地盤の 含水比変化	High
盛土質量のばらつき	High
粘性土地盤の含水比の 空間的不均質性	High

High：沈下量に影響し人的制御が不可

Mid：沈下量に影響し人的制御が可

三軸試験

弾塑性パラメーターのばらつきを得る
(供試体の状態や計測誤差を含む)

三軸試験概要

圧密過程(排水)

20kPa

40kPa

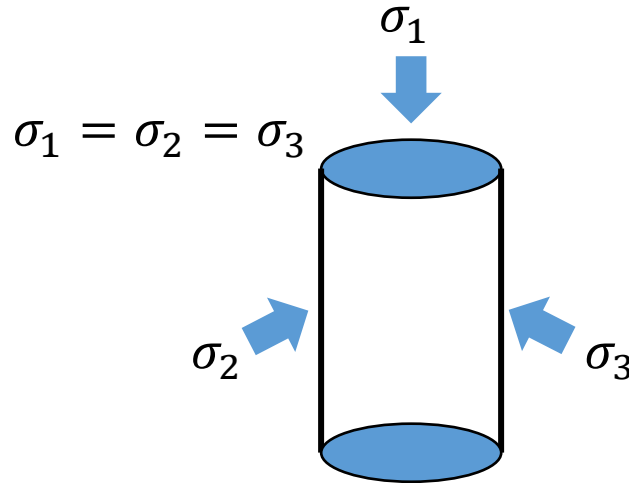
80kPa

20kPa

80kPa

100kPa or 150kPa or 200kPa

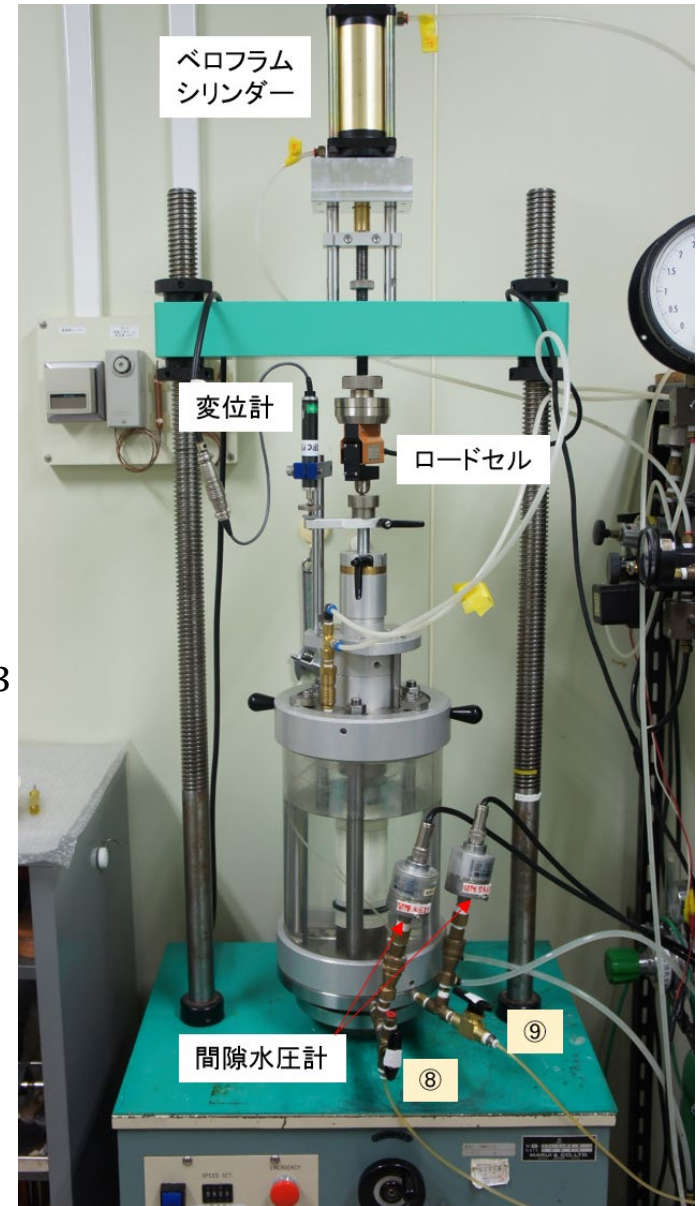
□ 各段階における終了条件は3t法に従う



せん断過程(非排水)

変位速度 : 0.05mm/min

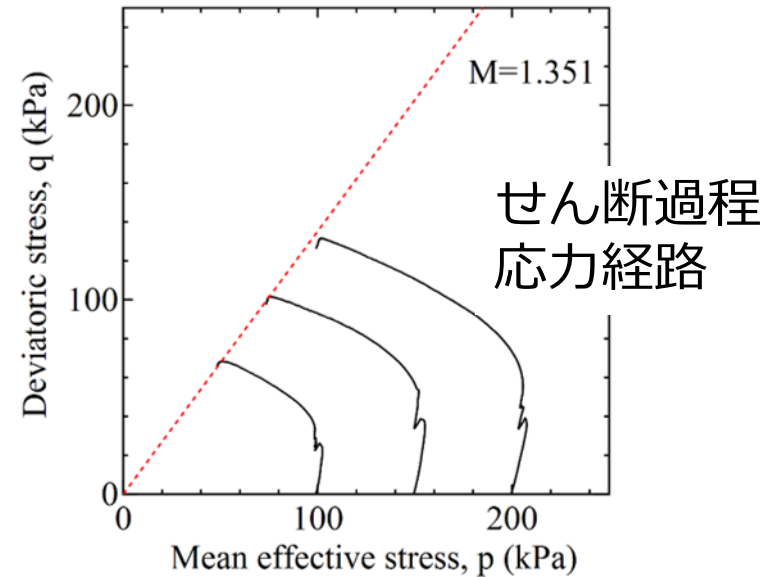
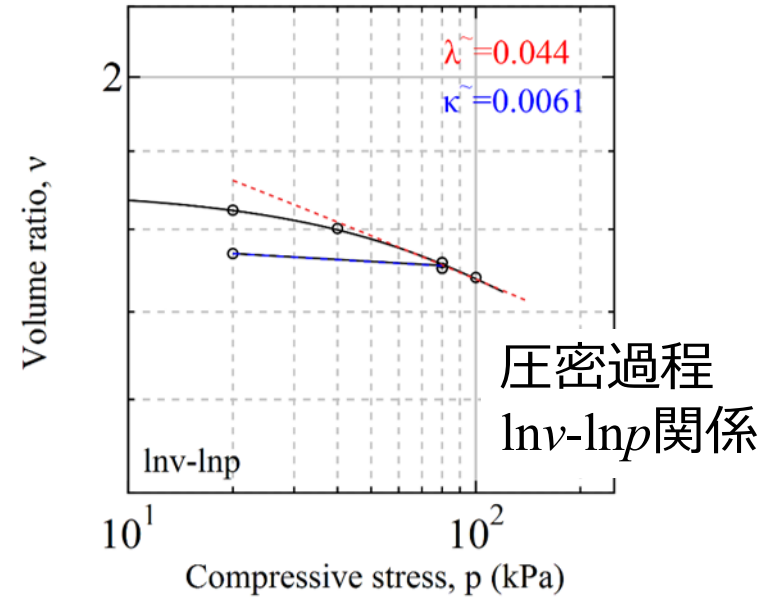
軸差応力 : $q = \sigma_1 - \sigma_3$



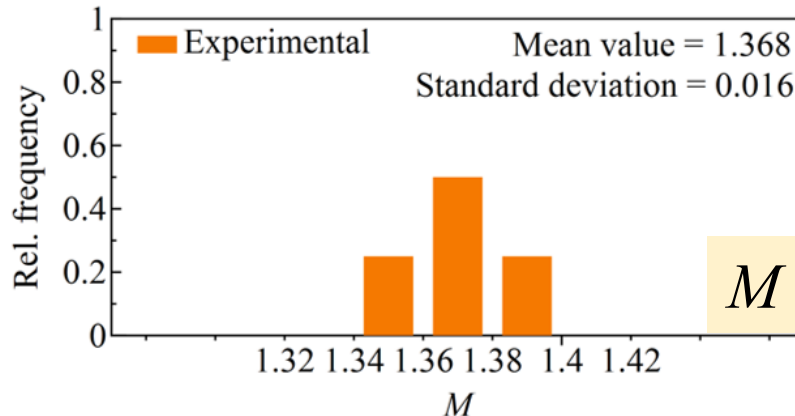
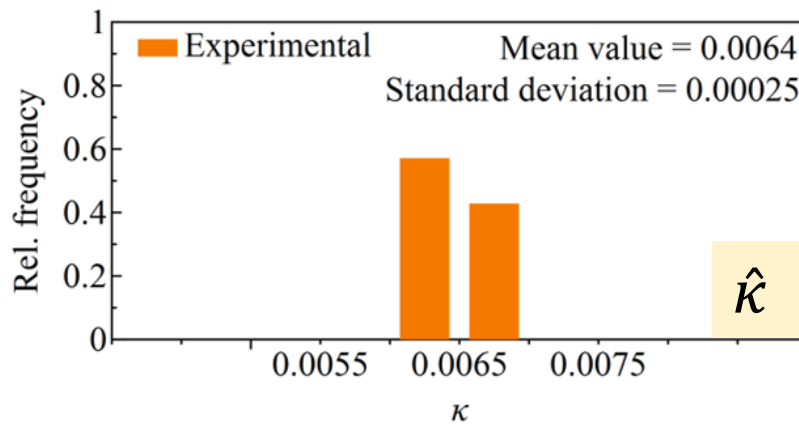
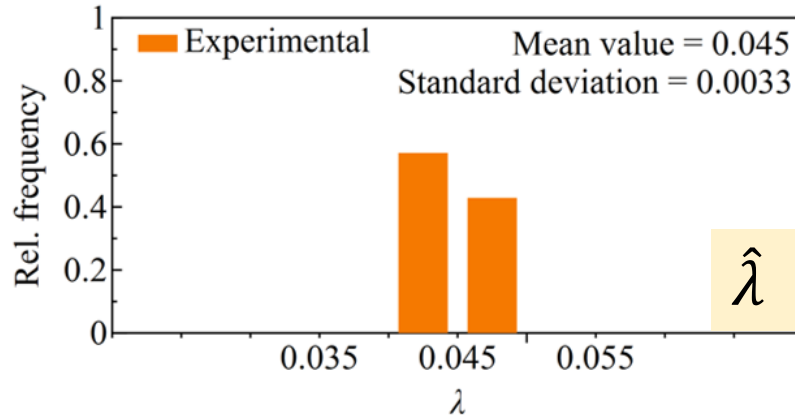
実験ケース

実験 ケース	最終拘束圧 σ_3 (kPa)	排水量 計測
1	100	差圧計
2	100	差圧計
3	150	ビュレット
4	150	ビュレット
5	200	差圧計
6	200	差圧計
7	200	ビュレット

差圧計の不具合があり
 ビュレットの読みにより計測
 →計測誤差(目視, 機械と人的)が含まれる



三軸試験, 実験結果



圧縮指数 $\hat{\lambda}$

- 平均値：0.045
- 変動係数：7.3%

膨潤指数 $\hat{\kappa}$

- 平均値：0.0064
- 変動係数：3.9%

限界状態応力比 M

- 平均値：1.368
- 変動係数：1.2%

変動係数 = 標準偏差 ÷ 平均値

ヒストグラムから正規分布を仮定

数値解析の入力の不確かさとして考慮

実験 ケース	供試体 含水比(%)	初期 間隙比
1	36.6	0.85
2	33.0	0.81
3	33.0	0.78
4	32.8	0.78
5	29.1	0.86
6	36.4	0.82
7	32.2	0.81
変動係数(%)	7.8	3.8

作製から設置に対するPIRT

要因	影響度
供試体の初期寸法	Mid
作業中の含水比変化	Mid
初期間隙比のばらつき	High
供試体の設置位置	Mid

圧密過程に対するPIRT

要因	影響度
等方拘束圧のばらつき	Mid
圧密終了に至る時間	Mid
間隙比のばらつき	High
排水量のばらつき	Mid

High：沈下量に影響し人的制御が不可

Mid：沈下量に影響し人的制御が可

数値解析手法の検証

数値解析の検証の流れ

1. 解析解との比較によるコード検証

- Morris (2005)による有限変形圧密
- 数値解と解析解の一致からプログラムエラーがないことを確認する
- 数値解の解析解に対する格子収束性

2. 対象に近い問題との比較による解析検証

- 格子収束性
- メッシュサイズが十分に細かいかどうか

数値解析（解析手法）

多孔質体理論に基づく有限要素解析手法

□ 混合体の運動量保存式

$$\rho \mathbf{a}^s = \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}' - p^f \mathbf{I}) + \rho \mathbf{b}$$

□ 間隙水の質量・運動量保存式

$$\left(\frac{n s^w \rho^{wR}}{K^w} - n \rho^{wR} c \right) \frac{D^s p^w}{Dt} + n \rho^{wR} c \frac{D^s p^a}{Dt} + s^w \rho^{wR} \operatorname{div} \mathbf{v}^s + \operatorname{div} \left\{ \frac{\mathbf{k}^{ws}}{g} (-\operatorname{grad} p^w + \rho^{wR} \mathbf{b} - \rho^{wR} \mathbf{a}^s) \right\} = 0$$

□ 非線形方程式の解法

- 空間離散化：有限要素法，時間離散化：後退差分法
- 形状関数：土骨格変位は二次，間隙水圧は一次
- 積分点数：土骨格変位は9つ，間隙水圧は4つ

コード検証 (解析解との比較)

有限変形圧密 (Morris, 2005)の解析解

正規化間隙比 E と圧密度 $U(T)$

$$E = R + \frac{4}{\pi} (1 - R) \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi z}{2}\right) \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T}{4}\right) \right]$$

Z: 正規化物質座標
T: 時間係数

$$T = \frac{gt}{l^2}$$

$$U(T) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T}{4}\right) \right]$$

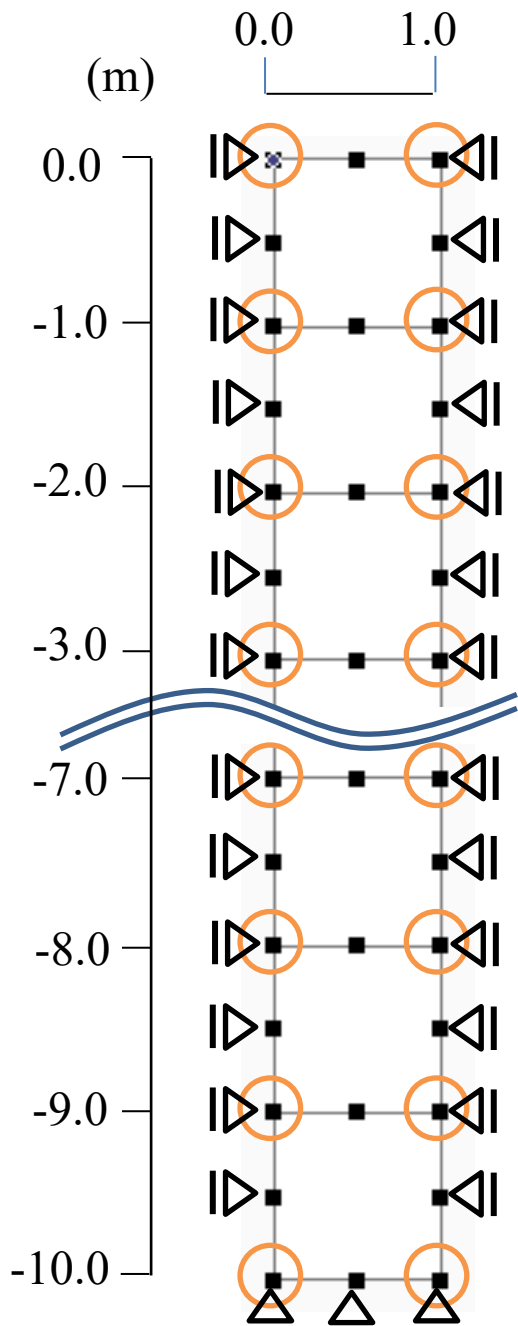
地表面の沈下量を求める

圧密係数 g と透水係数 $k(e)$

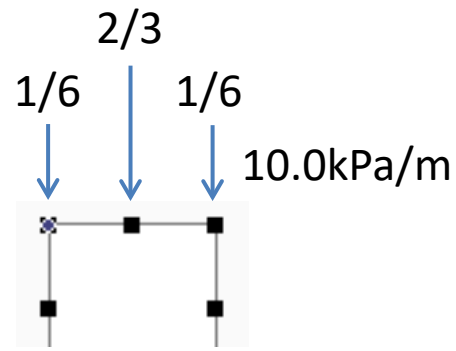
$$g = -\frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e}$$

$$k(e) = k_{0s} \frac{(2\mu + \lambda)J}{\mu \left(1 + \frac{1}{J^2}\right) + \frac{\lambda}{J^2} (1 - \ln J)}$$

- 構成式にneo-Hookeanモデルを適用



等価節点荷重



間隙水の境界条件

□ 地表面に水圧0kPaを設定(上面排水)

間隙水の初期条件

□ 全ての節点に初期間隙水圧10kPaを設定

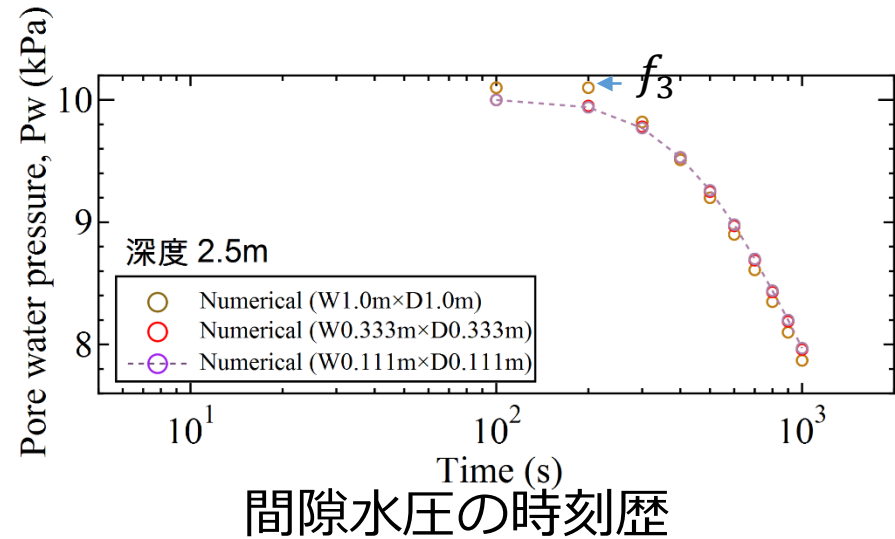
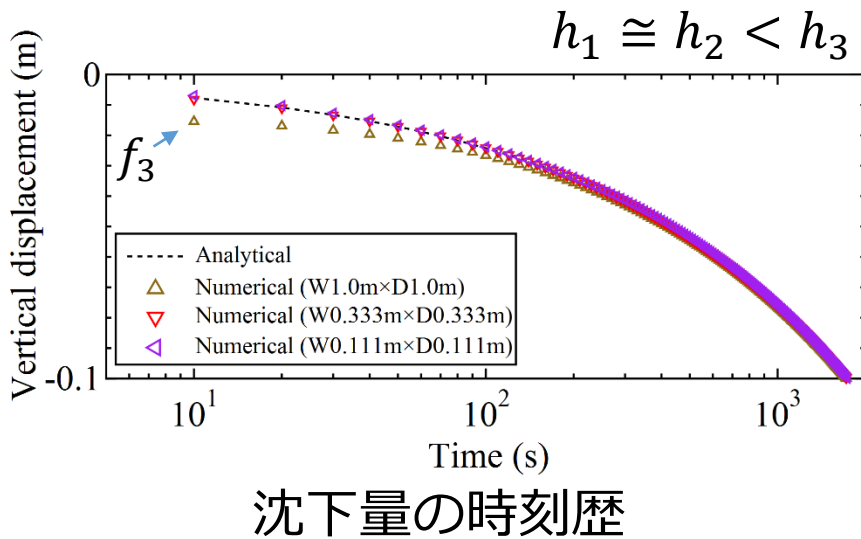
メッシュサイズ

□ $h_1 = 0.111\text{m}$, $h_2 = 0.333\text{m}$, $h_3 = 1.0\text{m}$

土粒子の実質密度, ρ_s (t/m ³)	1.0
間隙水の実質密度, ρ_w (t/m ³)	1.0
飽和透水係数, k (m/s)	1.0×10^{-4}
ラメ定数, λ (kPa)	100.0
ラメ定数, μ (kPa)	50.0

解析結果

- 最終沈下量はメッシュサイズに依らず解析解と定量的に一致
 - ▶ プログラムエラーがないことを示す
- 沈下量は圧密初期にメッシュサイズの影響があり、圧密の進行とともにその影響は減少する
- 間隙水圧は中間のメッシュサイズが細かいものに漸近しており、粗い場合のみ圧密が進行しても誤差が大きい → 沈下量の傾向と異なる



格子収束性(正確さの次数)

Order of accuracy

$$p = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{rh}}{\varepsilon_h}\right)}{\ln(r)}$$

$$r \equiv \frac{h_{coarse}}{h_{fine}}$$

$$u_h = u_{h=0} + \frac{\partial u_{h=0}}{\partial h} h + \frac{\partial^2 u_{h=0}}{\partial h^2} \frac{h^2}{2} + O(h^3)$$


u_h : h のときの数値解
 $u_{h=0}$: 解析解

解析解が存在する場合

$$r = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_2} > 1$$

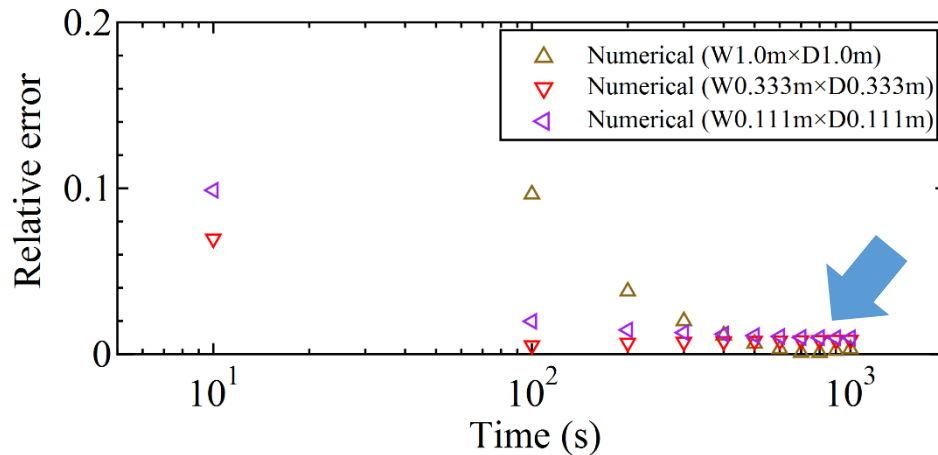
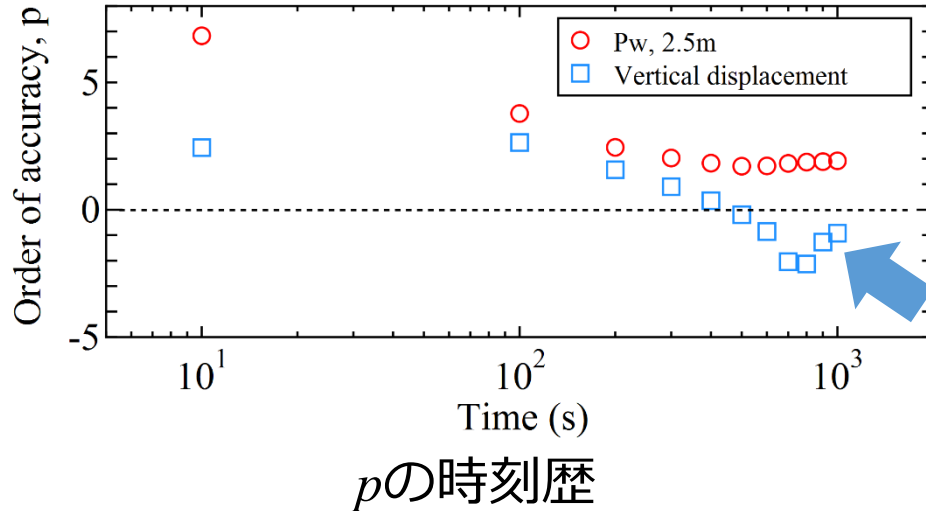
$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\ln(r)}$$

解析解が存在しない場合


$$\varepsilon_h = u_h - u_{h=0} = g_p h^p + O(h^{p+1})$$

誤差がメッシュサイズ h の p 次のオーダー

格子収束性(正確さの次数)



沈下量の相対誤差の時刻歴

相対誤差 (絶対値)

$$R.E = \frac{(\text{数値解} - \text{解析解})}{\text{解析解}}$$

- p が負値になる時間は相対誤差が十分小さい(1%以下)
- メッシュの影響があるときの格子収束性を求めれば十分である
- メッシュの影響があるときに格子収束性は2次精度

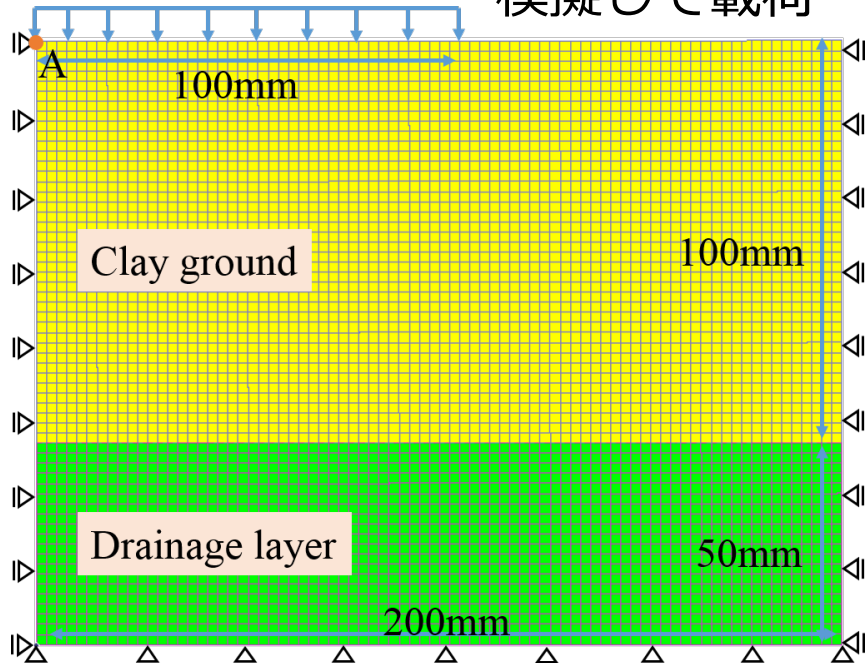
解析検証 (対象の問題を想定)

- ここでは, せん断変形に対して実施する
- 妥当性確認に近いモデルで実施
- 構成式は修正Cam-Clayモデルを適用
- Richardsonの外挿式(解析解が存在しない)

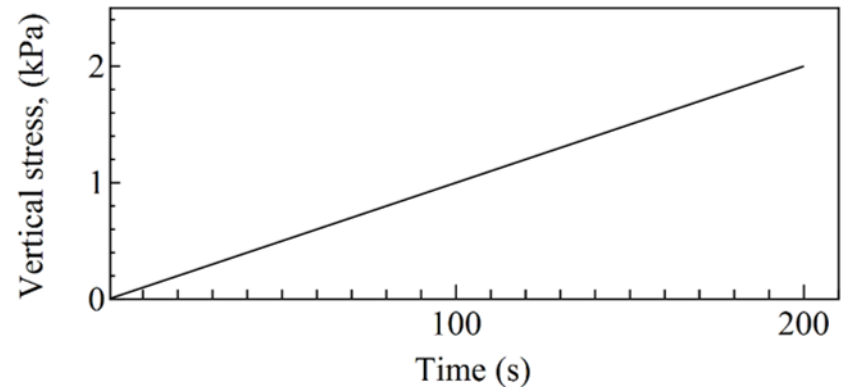
メッシュサイズ

- $h_0 = 0.00125\text{m}$ (発散)
- $h_1 = 0.0025\text{m}$
- $h_2 = 0.005\text{m}$
- $h_3 = 0.01\text{m}$

盛土を等分布荷重に
模擬して载荷



有限要素解析モデル



等分布荷重の時刻歴

構成式 (修正Cam-Clayモデル)

- 降伏関数

$$F = \frac{Q^2}{M^2} + P(P - \tilde{P}_c)$$

M : 限界状態応力比

- 硬化則

$$\dot{\tilde{P}}_c = -\frac{1}{\hat{\lambda} - \hat{\kappa}} \tilde{P}_c \dot{\epsilon}_v^p$$

$\hat{\lambda}$: 圧縮指数

$\hat{\kappa}$: 膨潤指数

- 関連流動則

$$\epsilon_v^e = \epsilon_v^{e(\text{tr})} - \Delta\gamma \frac{\partial F}{\partial P} \quad \text{体積ひずみ}$$

$$\epsilon_d^e = \epsilon_d^{e(\text{tr})} - \Delta\gamma \frac{\partial F}{\partial Q} \quad \text{相当ひずみ}$$

- 弾性関係

拘束圧依存性を考慮した
せん断弾性係数 μ^e

$$\mu^e = \mu_0 - P_0 \mu_1 \exp\left(-\frac{\epsilon_v^e - \epsilon_{v0}^e}{\hat{\kappa}}\right)$$

$$\mu_1 = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \frac{1}{\hat{\kappa}}$$

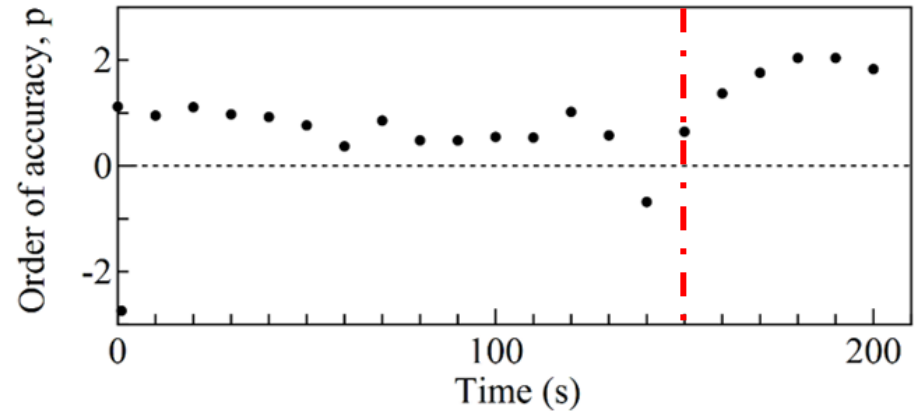
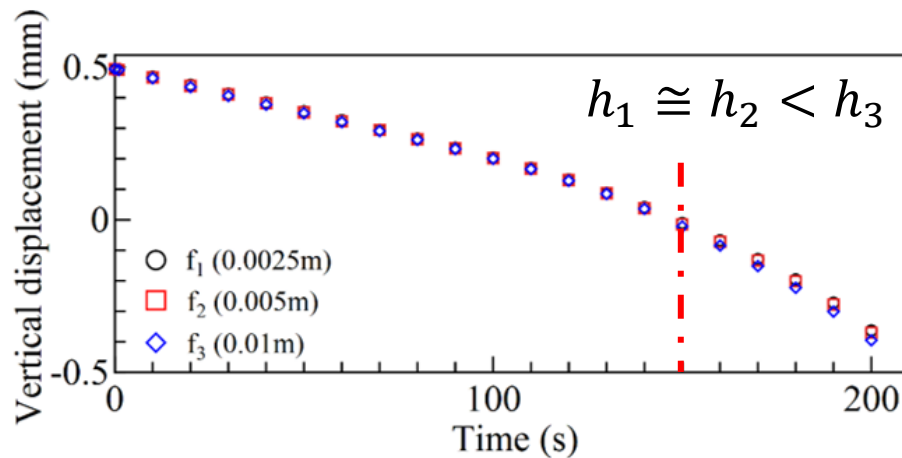
μ_0 : 拘束圧に依存しないせん断弾性係数

μ_1 : 拘束圧に依存するせん断弾性係数

ν : ポアソン比

材料パラメーター，解析結果

- 圧密初期ではメッシュによる影響がないため，格子収束性は1次精度
- メッシュの影響は150秒以降から見られ，徐々に格子収束性が増加
 - 最終的に2次精度に近い
 - コード検証で得た精度に近いことを確認



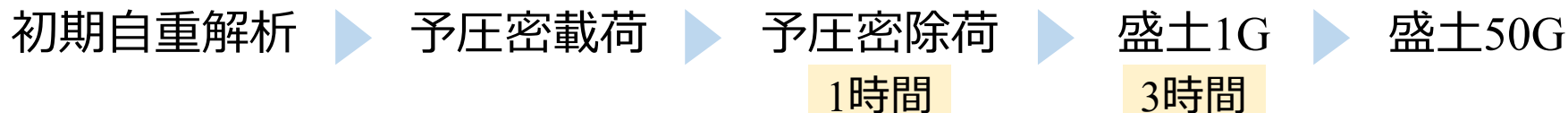
以上の検証から

- プログラムエラーがないこと
- メッシュの影響が見られるときに沈下量は2次精度，間隙水圧は2次精度

数値解析手法の妥当性確認

数値解析の妥当性確認の流れ

□ 遠心模型実験に準じて、有限変形問題として解析を実施



等価節点荷重

均質地盤

不均質地盤

1. 弾塑性パラメーターのばらつき (200回)
2. 弾塑性パラメーターと盛土質量のばらつき(200回)

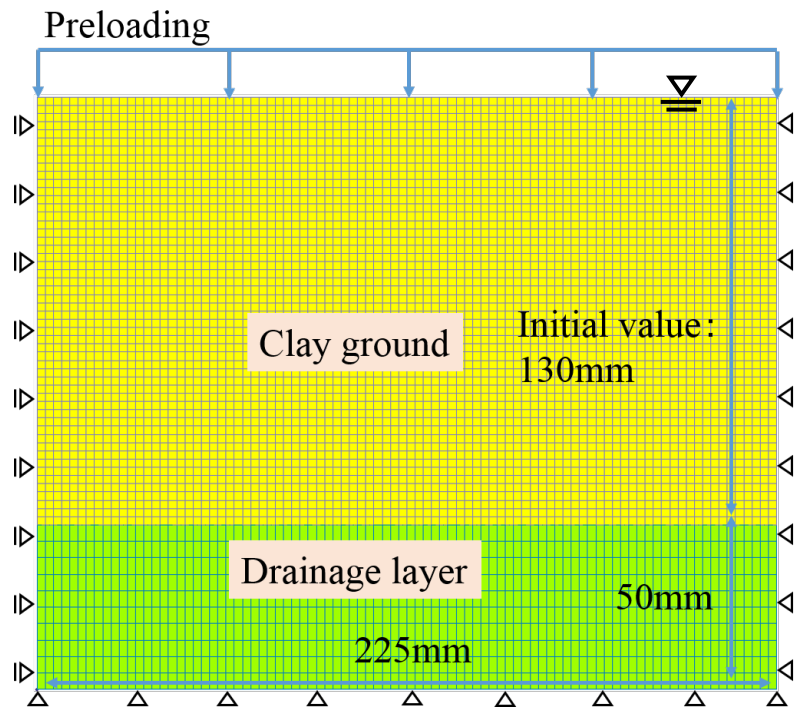
3. 弾塑性パラメーターの空間的不均質(計200回)

盛土のモデル化

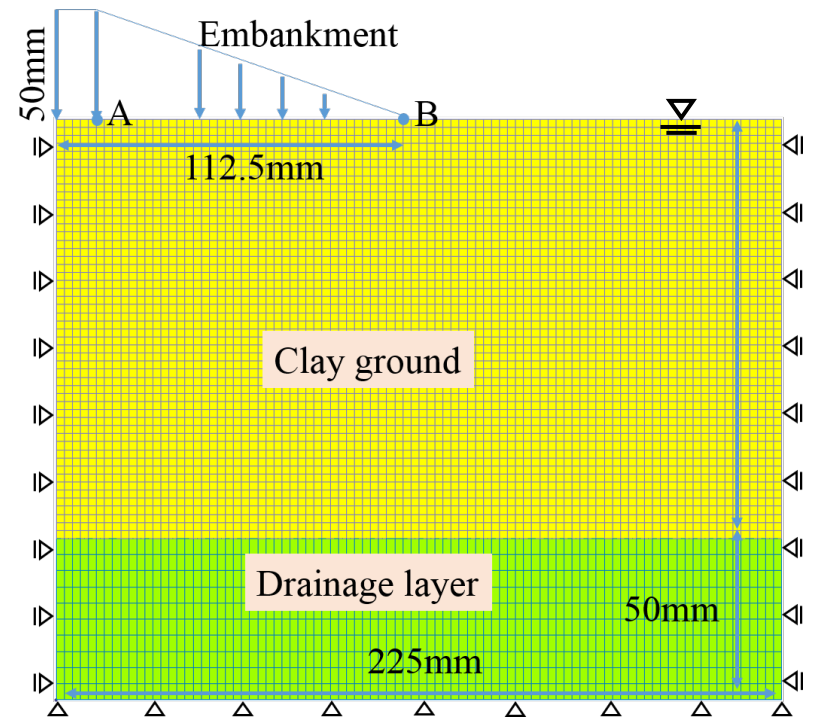
4. 盛土の剛性の影響(計400回)

有限要素モデル

- 対称性を利用して半断面でモデル化
 - 土骨格変位：底面に全方向固定，側面に水平方向固定
 - 間隙水：粘土地盤表面に水圧0kPa
- メッシュサイズ
 - 粘性土地盤は幅0.0025mの正方形
 - 排水層は幅0.0025m，高さ0.005mの長方形



予圧密载荷 (圧密)



盛土50G载荷 (せん断変形)

材料パラメーター

土粒子の実質密度, ρ_s (t/m ³)	2.57
間隙水の実質密度, ρ_w (t/m ³)	1.00
初期間隙率, n	0.557
飽和透水係数, k (m/s)	1.0×10^{-7}
圧縮指数, $\hat{\lambda}$	RAND
膨潤指数, $\hat{\kappa}$	RAND
限界状態応力比, M	RAND
過圧密比, OCR	1.0
ポアソン比, ν	0.333
拘束圧に依存しないせん断弾性係数, μ_0 (kPa)	10.0



- 三軸試験から得られた平均値, 標準偏差から正規乱数を発生

弾塑性パラメーター

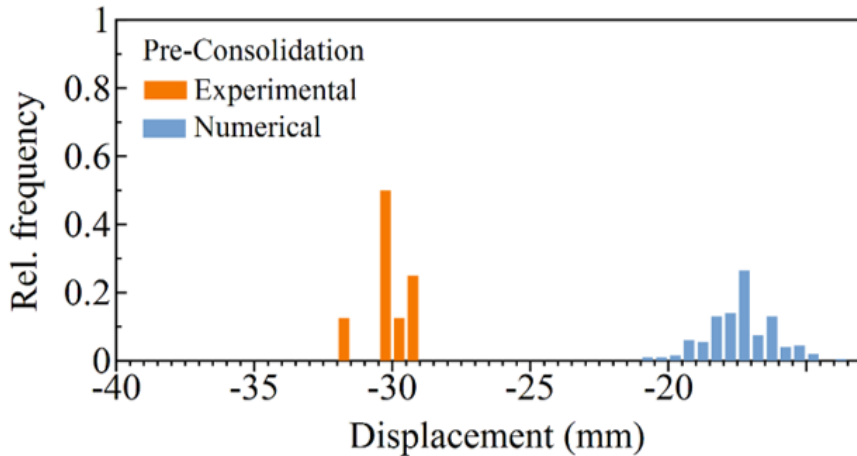
生成順	$\hat{\lambda}$	$\hat{\kappa}$	M
1	0.047	0.0068	1.396
2	0.048	0.0061	1.389
~	~	~	~
10	0.043	0.0058	1.367
~	~	~	~
200	0.038	0.0064	1.332

生成順に組み合わせ, 200回の解析

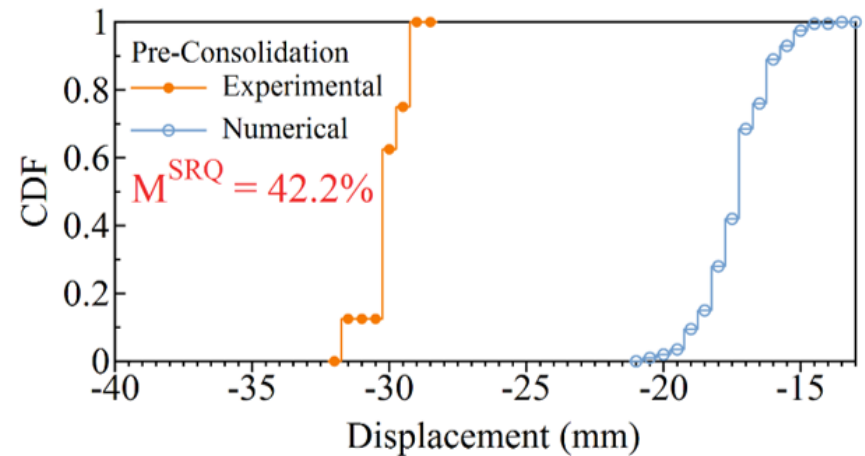
- 盛土質量は固定
- 実験における目標締固め度と最適含水比から算出

解析結果 (予圧密载荷)

- 最頻値の沈下量は約15cmの差があり，数値解が顕著に過小評価
- 分布幅も拡大し， M^{SRQ} も満足しない



沈下量のヒストグラム



沈下量の累積密度分布

妥当性確認の要求精度

$$M^{SRQ} = \frac{1}{|\mu_{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{exp} - F_{num}| dy$$

ASMEでは10%以下と
提示

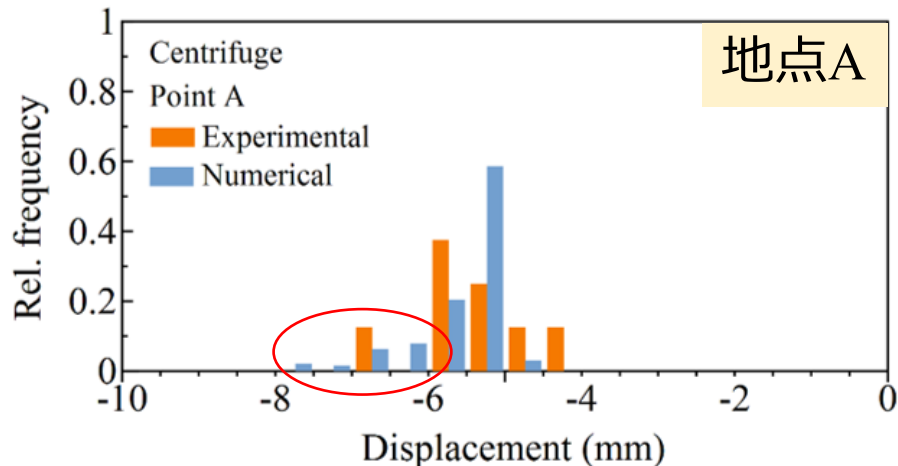
実験値（橙）と解析値（水色）で囲まれた面積を，実験の平均値で除す

解析結果 (盛土1G～盛土50G)

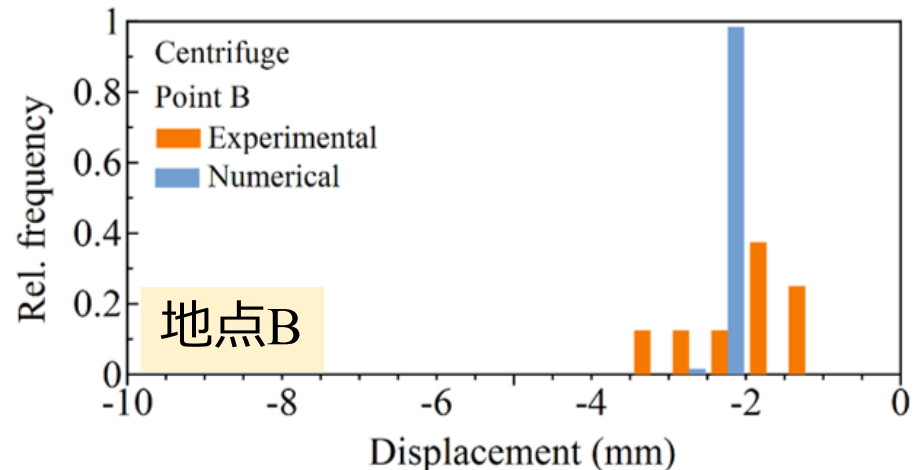
- 地点A：数値解が実験値の最頻値付近と分布が重なる部分では，盛土載荷面の変形モードが実験と解析で異なる。
- 地点B：数値解と実験値の沈下量は重なったが顕著な偏りが見られた。

含まれる不確かさ

- 実験における盛土1G過程の沈下量が計測できていない
- 解析では遠心載荷の除荷が考慮されていない



沈下量のヒストグラム



沈下量のヒストグラム

解析結果 (盛土1G～盛土50G)

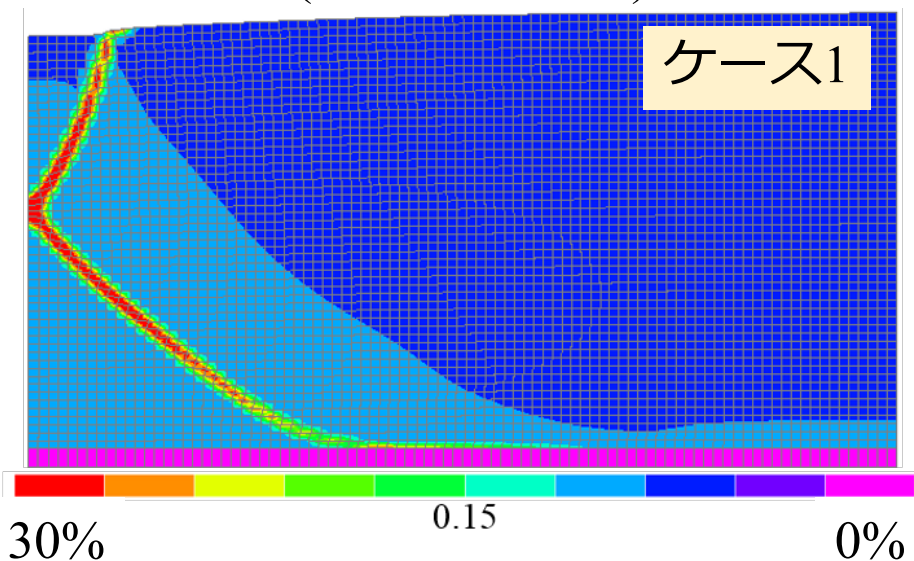
地点A付近の変形モード

- 実験と整合：盛土載荷面が滑らかな状態
- 実験と不整合：盛土載荷面にせん断変形が生じ，地表面にずれが見られる

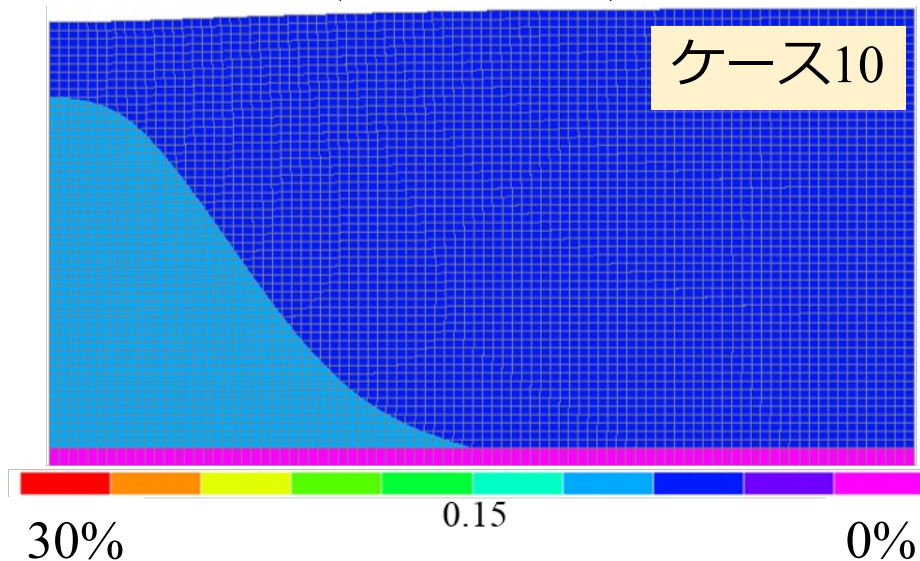


弾塑性パラメーター，等価節点荷重の影響(モデル化の影響)

載荷面にせん断変形
(実験と不整合)



載荷面が滑らかな場合
(実験と整合)

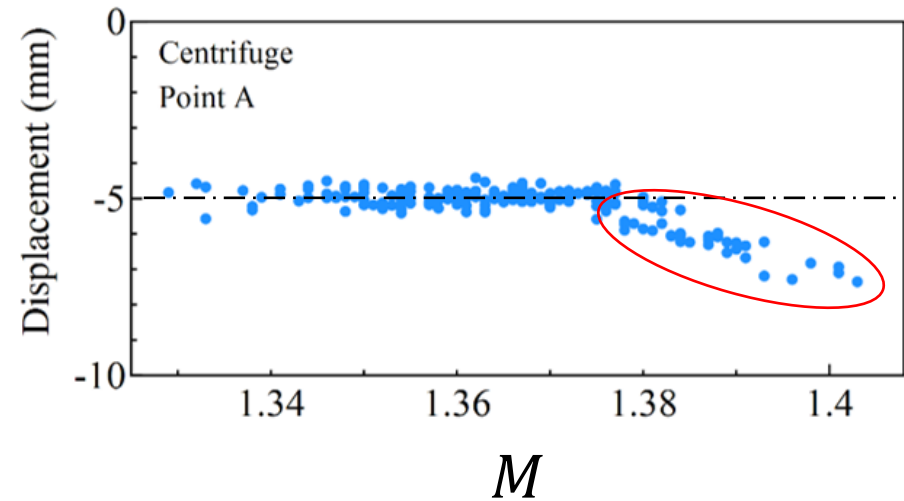
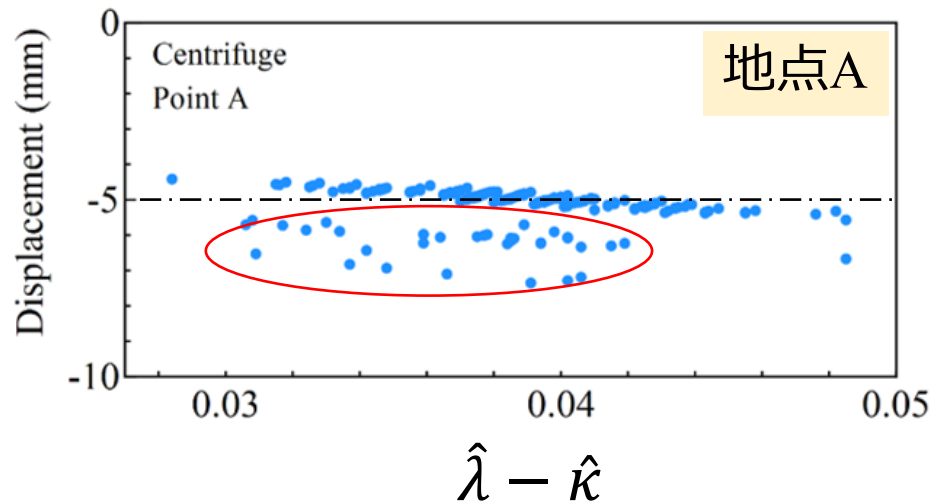


変形モードの違い(コンター：相当ひずみ)

解析結果 (盛土1G~盛土50G)

□ M が大きい場合に変形モードに差異が発生

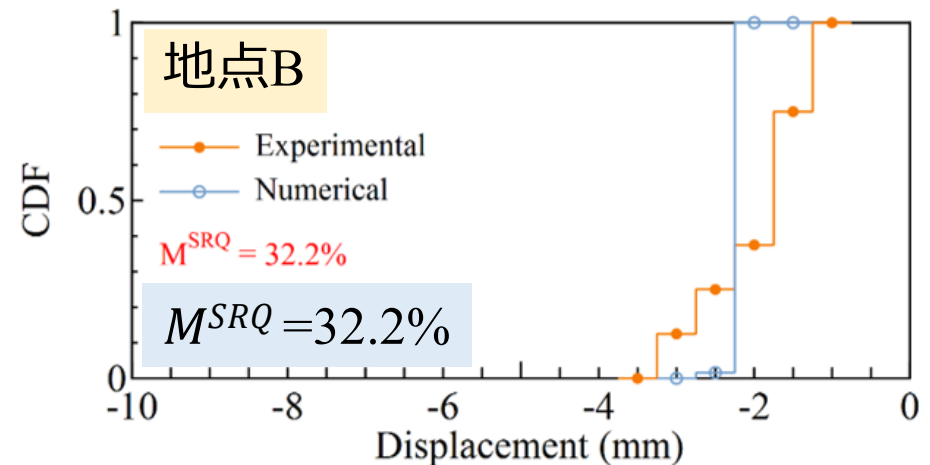
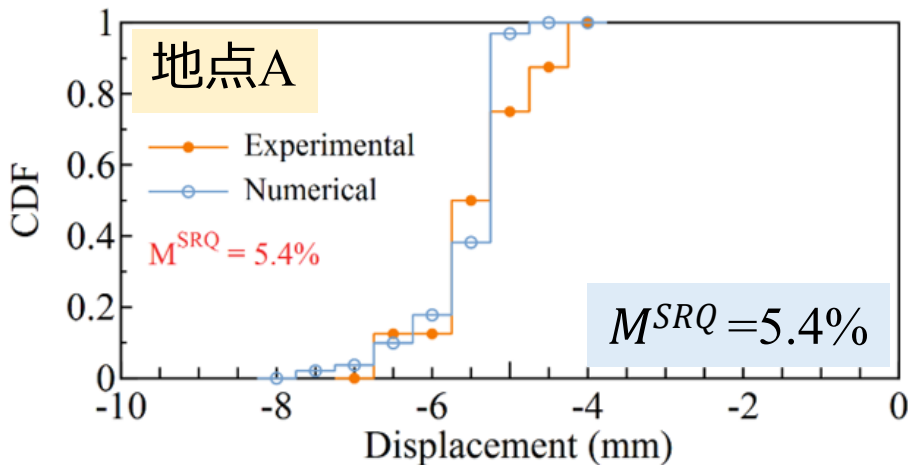
- 実験の変動係数が小さくても結果に影響を与えることを表す
- 考慮するパラメーターの取捨選択に留意



解析結果 (盛土1G～盛土50G)

- 地点A：変形モードが実験と解析で整合しない場合も含まれる
- 地点B：沈下量は重なるが偏りの影響で M^{SRQ} は満足しない

地盤工学では、変形量とその分布、変形モード全てが整合する必要がある



要求精度を満足したかどうかに関わらず、
他の要因を考慮して継続して数値解析を実施していく必要性

数値解析のPIRT

要因	地点A	地点B
弾塑性パラメーター	High	Low
弾塑性パラメーターの空間的不均質性	High	Low
盛土質量のばらつき	High	Low
盛土の有限要素モデル化	Mid	Low
盛土の剛性	Mid	Low

High : 沈下量やその分布に影響を与える

Mid : 影響があり, 詳細に検討する必要がある

Low : 影響を与えない

妥当性確認の要求精度を満足しない場合

- テストデータの追加取得
- 入力の不確かさに関するデータの追加取得
- モデルまたは実験を修正
- 妥当性確認の要求精度の緩和


満足した場合でも
解析は継続して
実施していくべき

□ 三軸試験

- 結果に与える要因を抽出することは可能であるが、その影響度を定量的に評価するためには検証実験を実施する必要がある。
- 要因のばらつきが小さい場合でも結果に影響を与えることも考えられる。

□ 遠心模型実験

- 遠心载荷中の風力の影響により盛土の含水比が変化し、盛土質量が時刻歴で変化しているため、初期のばらつきを小さくする。
- 検証実験の際には盛土質量を一定とするために、ゴム等で盛土を作製するなど必要。




他の機関でも同様の実験を行い、*PIRT*の修正と結果に客観性を持たせることが重要

□ 数値解析手法の検証

- 沈下量に関して解析解と一致することを確認した。
- メッシュの影響があるときに，格子収束性は2次精度であった。
- 格子収束性の閾値：連成解析における形状関数の次数や積分点数の影響を，他の構成式も導入して検討していく。

□ 数値解析の妥当性確認

- 妥当性確認の要求精度(M^{SRQ})を満足した時点で妥当性確認を終了すべきではない。
- 多数対多数の比較により客観性はあるが，結果に与える要因は他にもあるため偶然 M^{SRQ} を満足したことも十分考えられる。



他の解析ソフトとの比較も実施し，
検証や妥当性確認のためのデータを蓄積する

- ASME : An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid-Mechanics V&V10.1, 2012.
- Ronald B.J. Brinkgreve: Validating Numerical Modelling in Geotechnical Engineering, National Agency for Finite Element Methods and Standards (NAFEMS), 2013.
- Uzuoka, R. and Borja, R. I.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36, pp. 1535-1573, 2012.
- Morris, P. H.: Analytical Solutions of Linear Finite and Small-strain One-dimensional Consolidation, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29, pp. 127-140, 2005.
- Oberkampf, W. L. and Roy, C. J.: Verification and Validation in Scientific Computing, Cambridge University Press, pp. 180-185, 2012.
- 車谷麻緒ら：不確かさの定量化に向けたRCはりの一斉載荷実験，第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム講演論文集， pp. 235-236, 2019.



液状化傾斜地盤の地震時挙動予測 高精度化に向けた遠心模型実験 及び有効応力解析

京都大学大学院工学研究科 和田冬馬
京都大学防災研究所 ○上田 恭平・渦岡良介

本研究の目的

- 液状化傾斜地盤の地震時挙動を対象に，複数の遠心模型実験及び有効応力解析を行い，実験及び解析結果に対してより定量的な評価を試みる。
 - 実験結果(加速度や過剰間隙水圧の時刻歴)における不確実性
 - 実験と解析の整合性に関する定量的な評価
 - 感度解析を行い，解析条件が結果に与える影響について評価

遠心模型実験

地盤作成

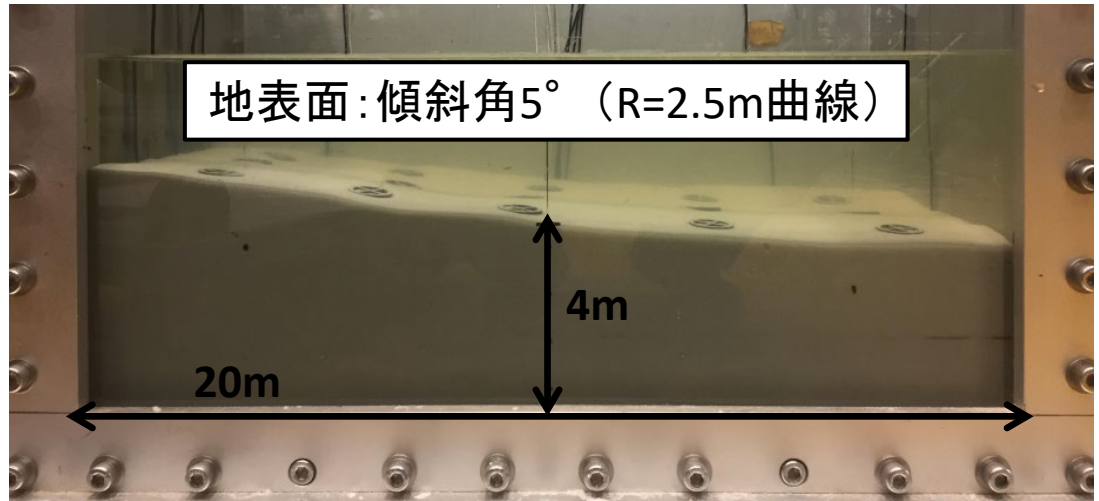
方法: 空中落下法

材料: オタワ砂F65

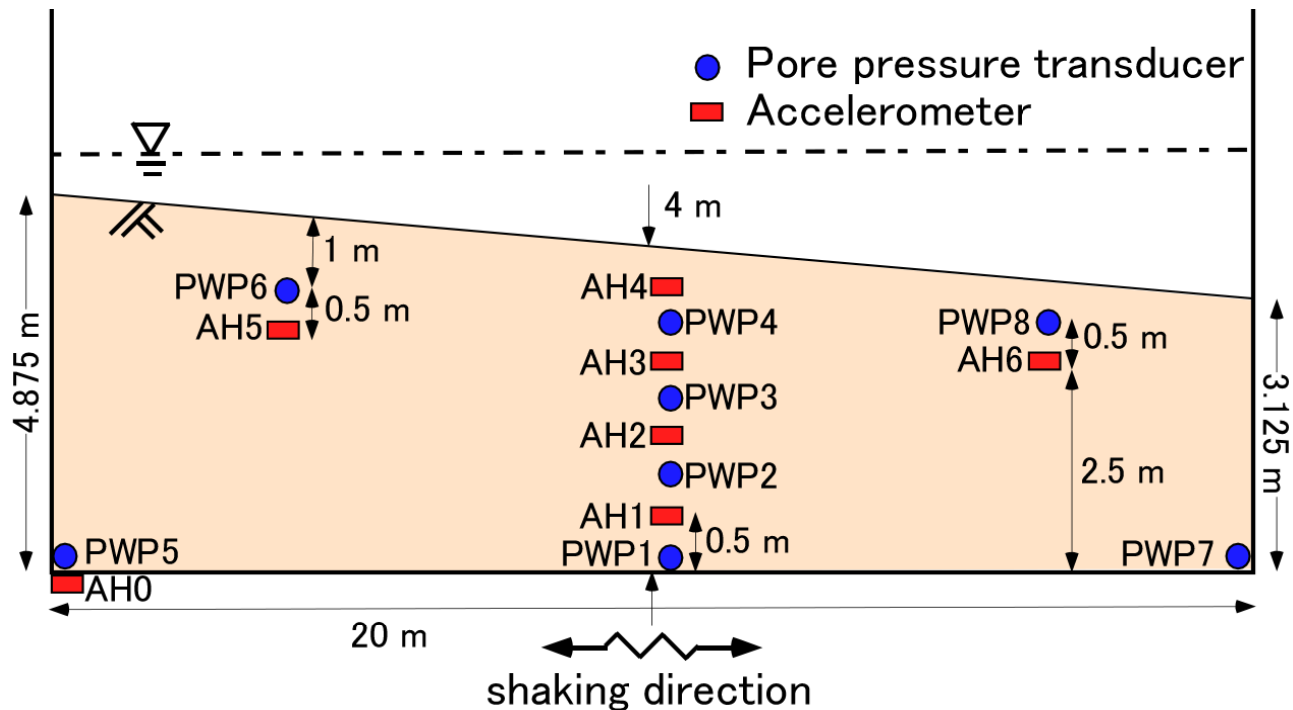
目標: $\rho_d = 1650 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

$e = 0.6$

間隙流体: メトローズ
(40 cSt)



模型地盤

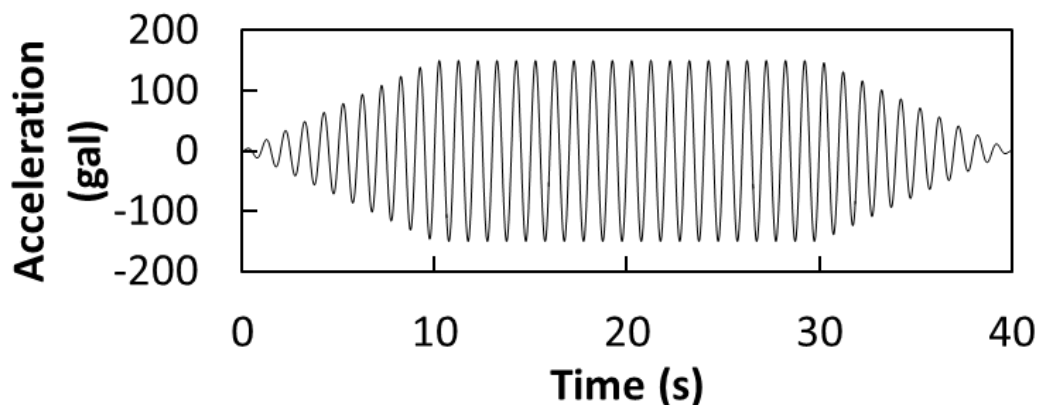


実験ケース及び入力波

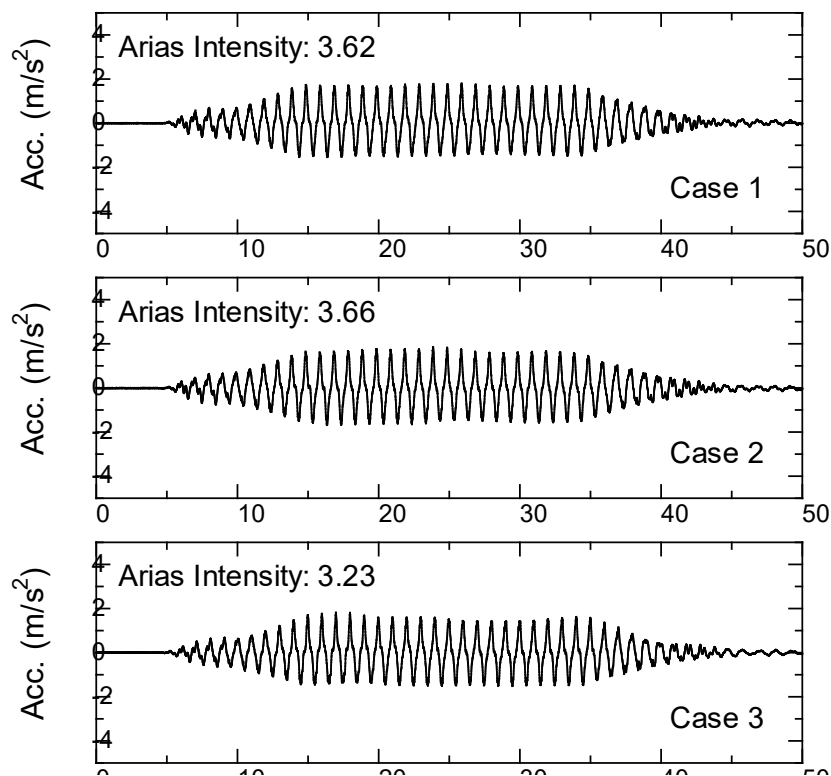
	目標 D.A. Input (gal)	D.A. Input (Gal)	ρ^d (kg/m ³)	e	Sr (%)	P.W. Viscosity (cSt)
case 1	300	334	1658	0.60	97.5	1.11
case 2		354	1646	0.61	100	0.99
case 3		333	1643	0.61	99.6	0.95
case 4		284	1663	0.59	100	0.90
case 5	500	490	1647	0.61	99.6	0.98
case 6		496	1647	0.61	99.9	0.90
case 7	600	629	1653	0.60	99.5	0.98

入力波

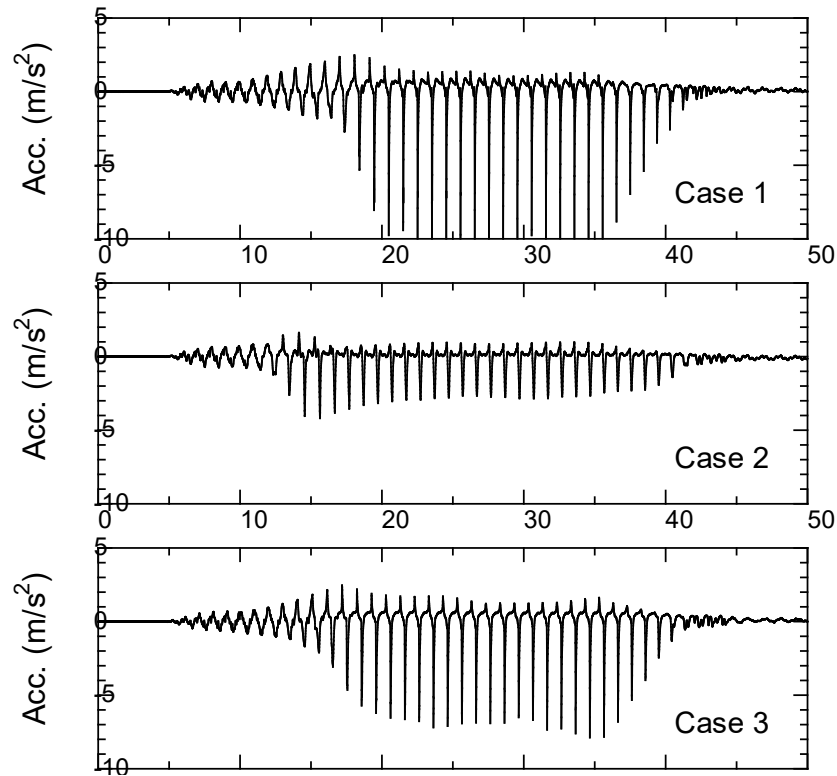
- f=1 (Hz)
- s=40 (s)
- 増幅減衰sine波



実験結果(入力加速度、応答加速度)

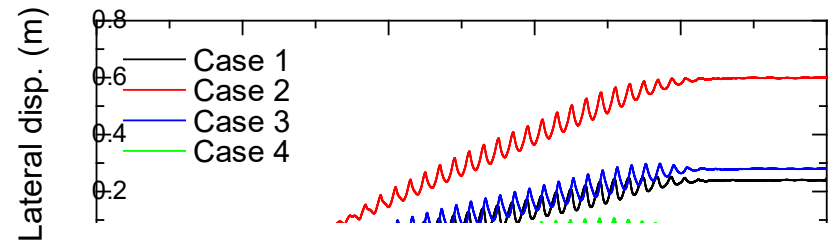
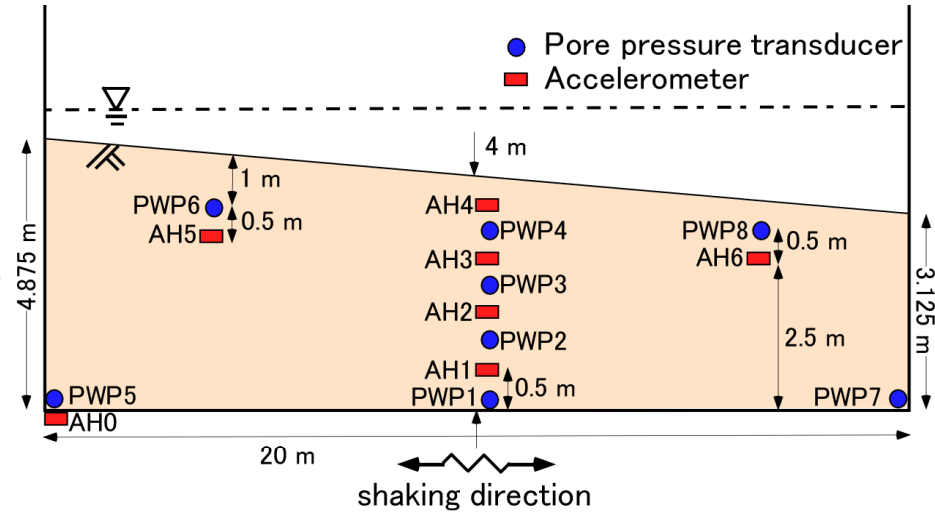
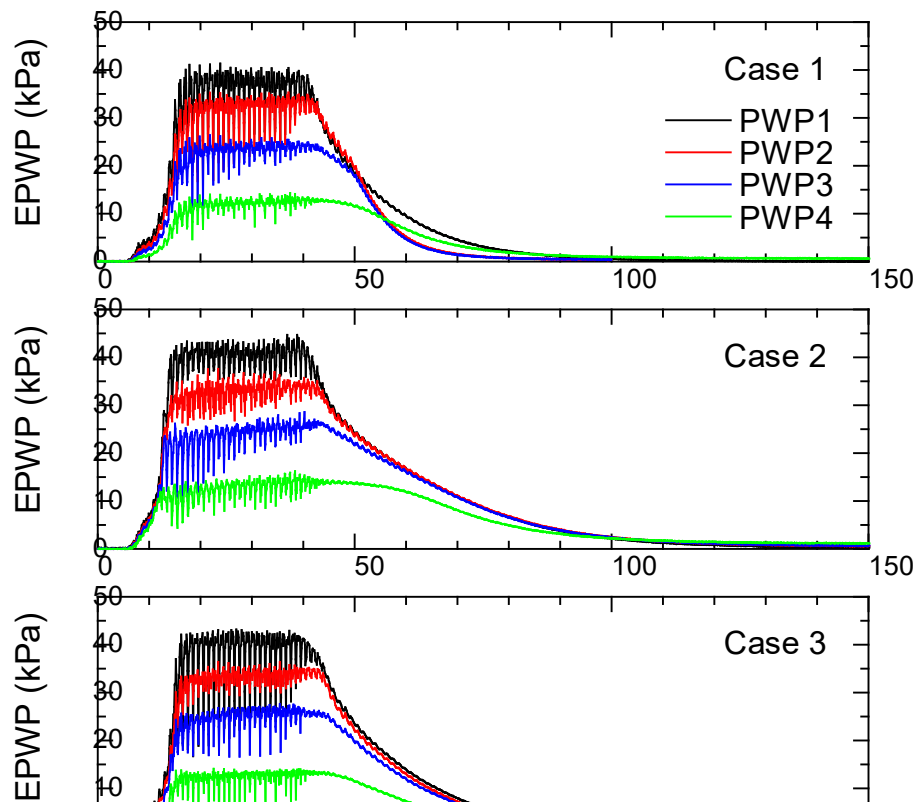


(a) AH0



(b) AH4

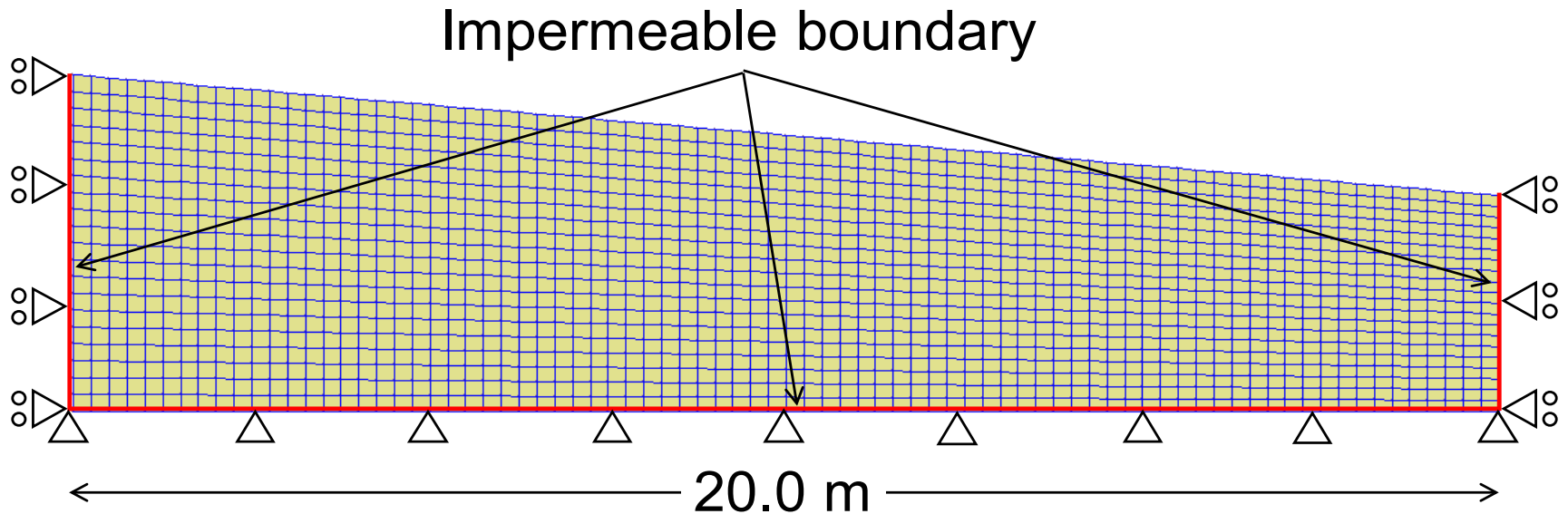
実験結果(過剰間隙水圧、地表面変位)



有效応力解析

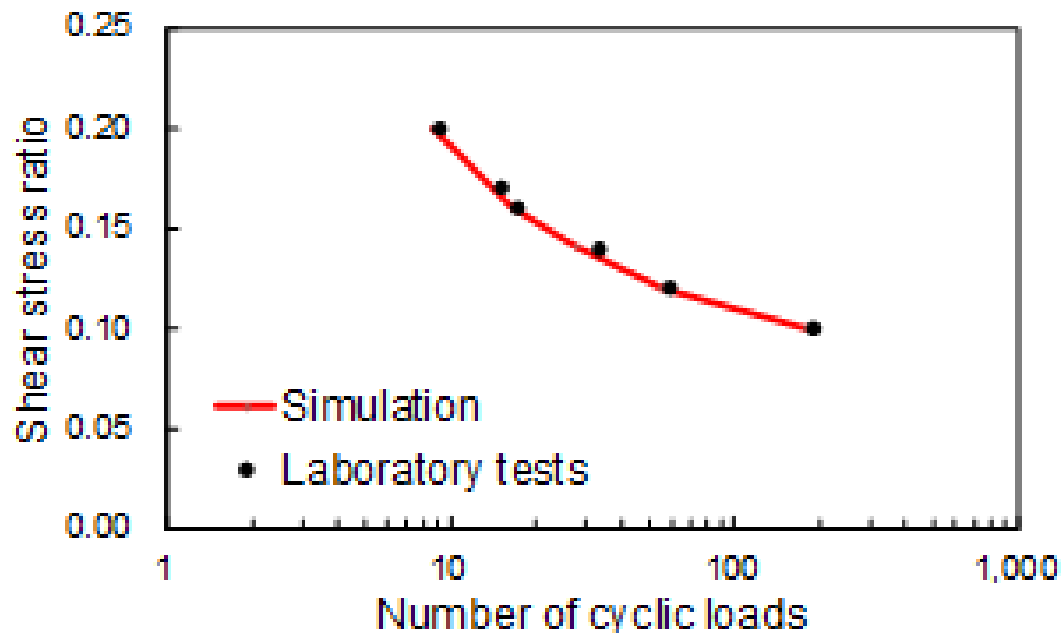
解析諸条件

- プログラム: FLIP (FEM)
- 構成則: カクテルグラスモデル (井合 2008 [8])
- 境界条件: 側面 → 鉛直ローラー
底面 → 固定

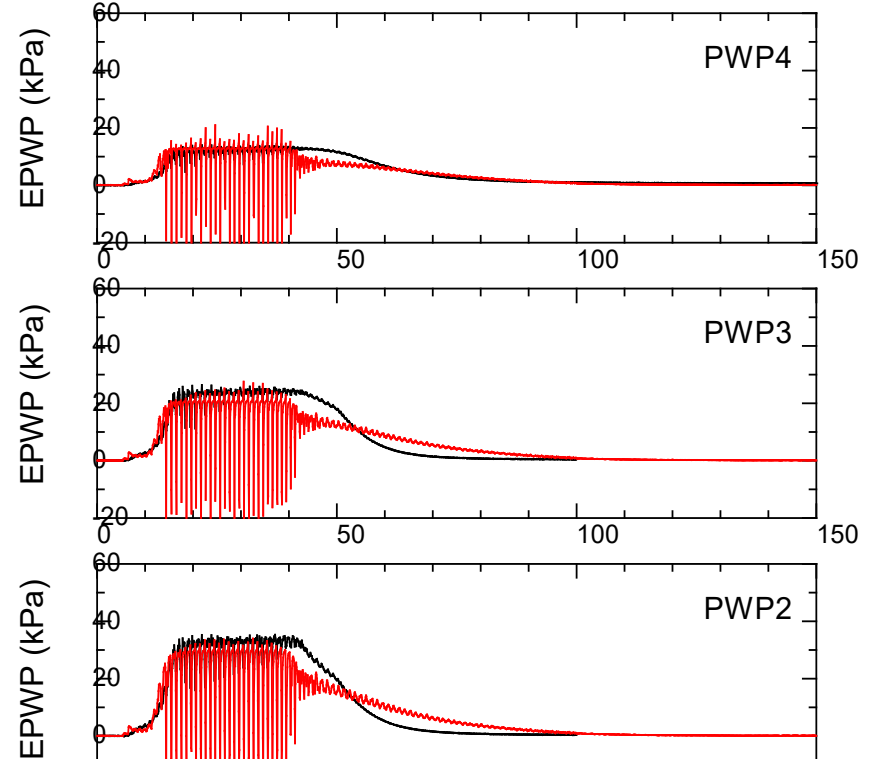
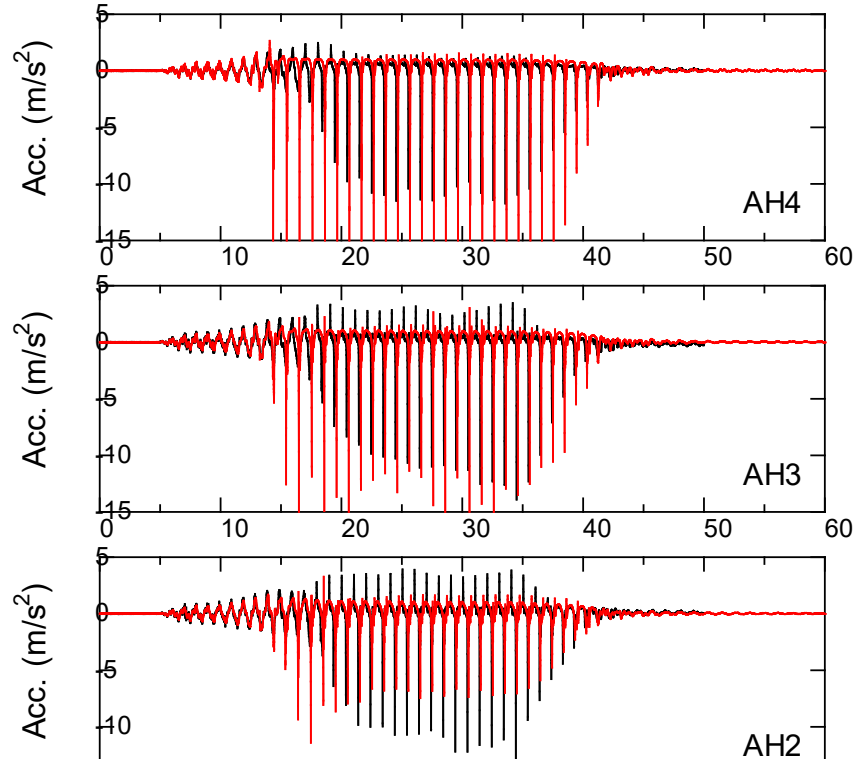


解析諸条件

- ※入力波は、各ケース遠心模型実験で得られた入力波を使用
- ※透水係数はメトロース水溶液の粘度など、実験条件を考慮して各ケースに設定
- ※実験ケース間で密度はほぼ等しかったため、液状化パラメータは全ケース等しいものを使用
- ※地盤の不均一性は考慮していない

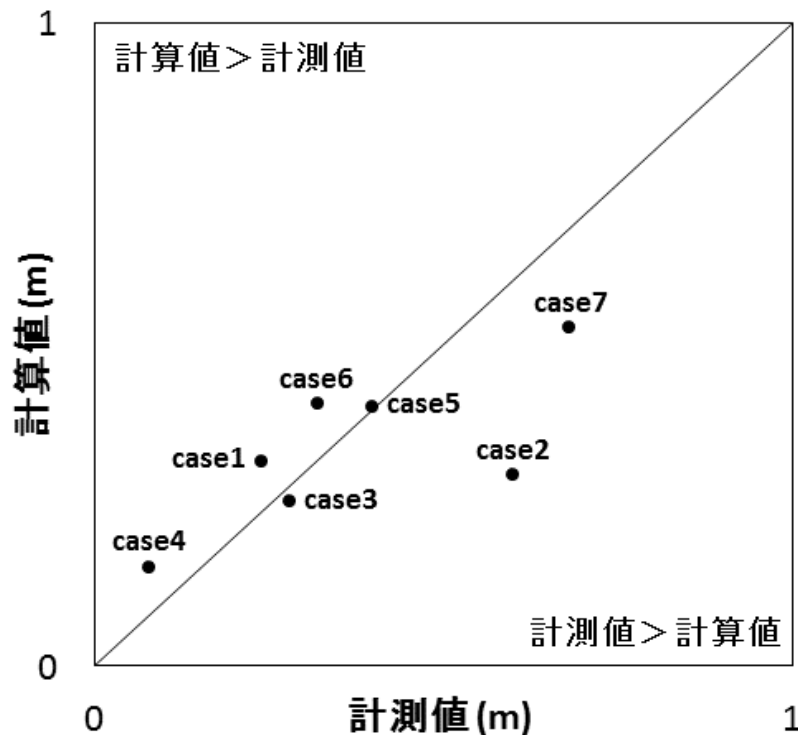
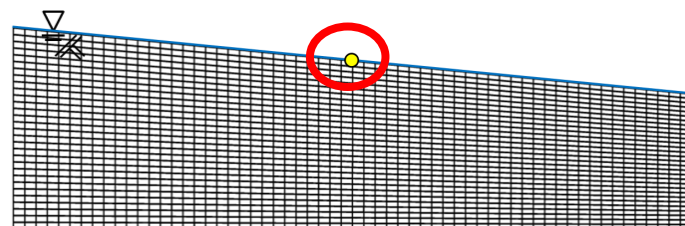
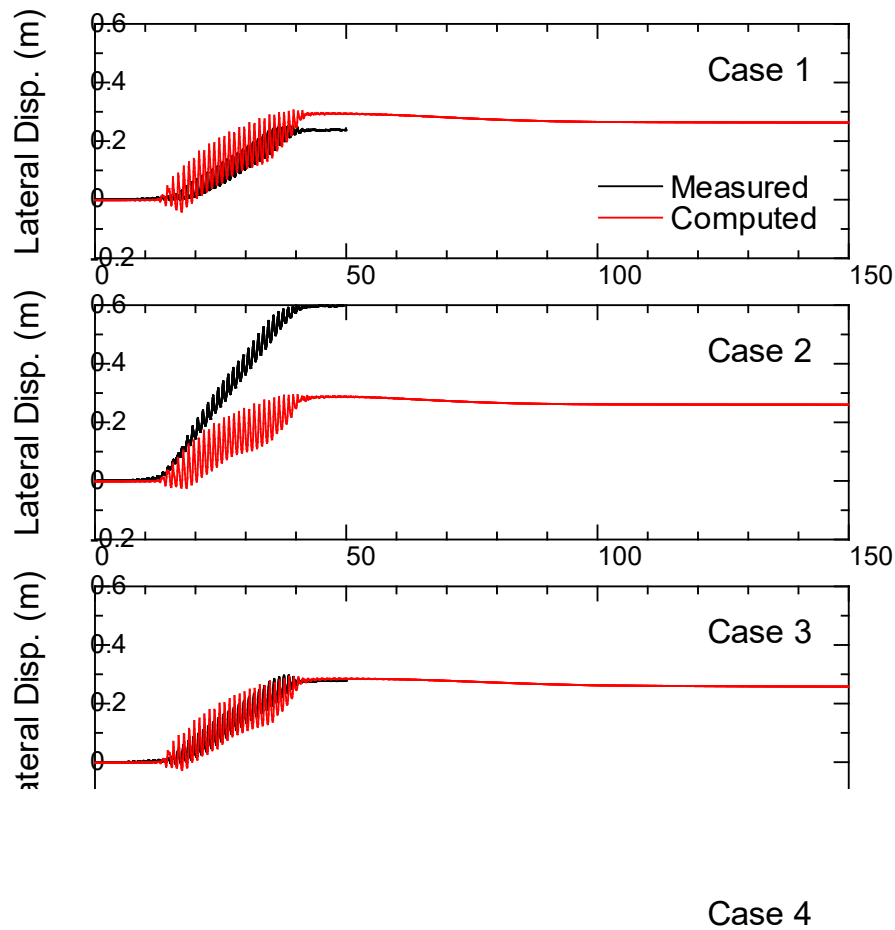


解析結果 (Case 1)



PWP1

解析結果(地表面変位)



地表面残留変位の計測値と計算値の比較

実験及び解析結果の評価

評価の概要

実験結果同士の差、実験結果と解析結果の差を時刻歴として定量的に評価

EARTH (Error Assessment of Response Time Histories)
(H.Sarin et.al, 2010[9])

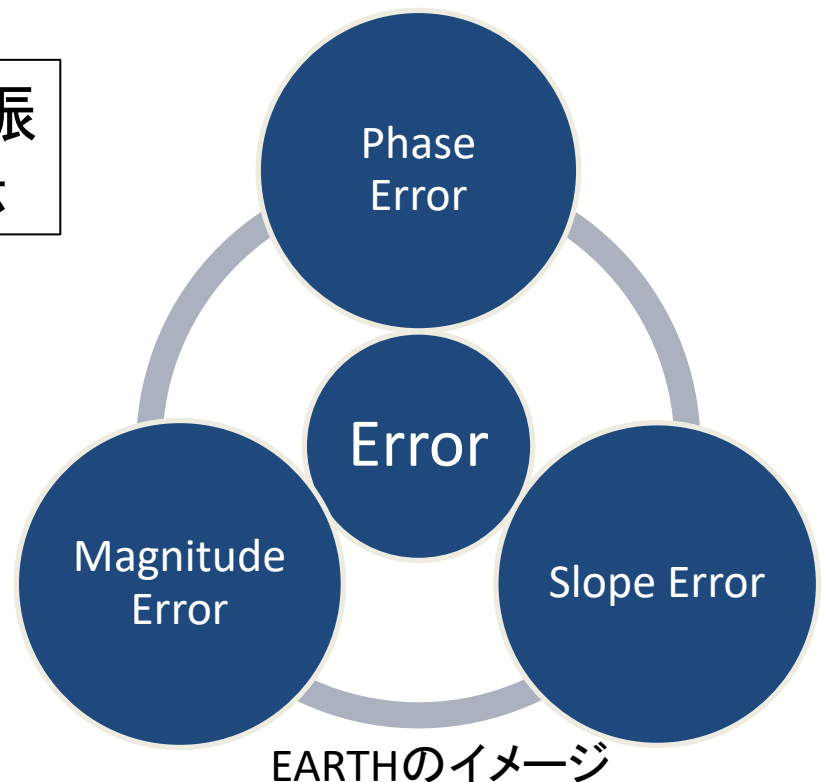
応答時刻歴の差を位相・振幅・振動数(傾き)に分けて考える手法

$$y(t_i) = Y \cos(\omega t_i + \varphi)$$

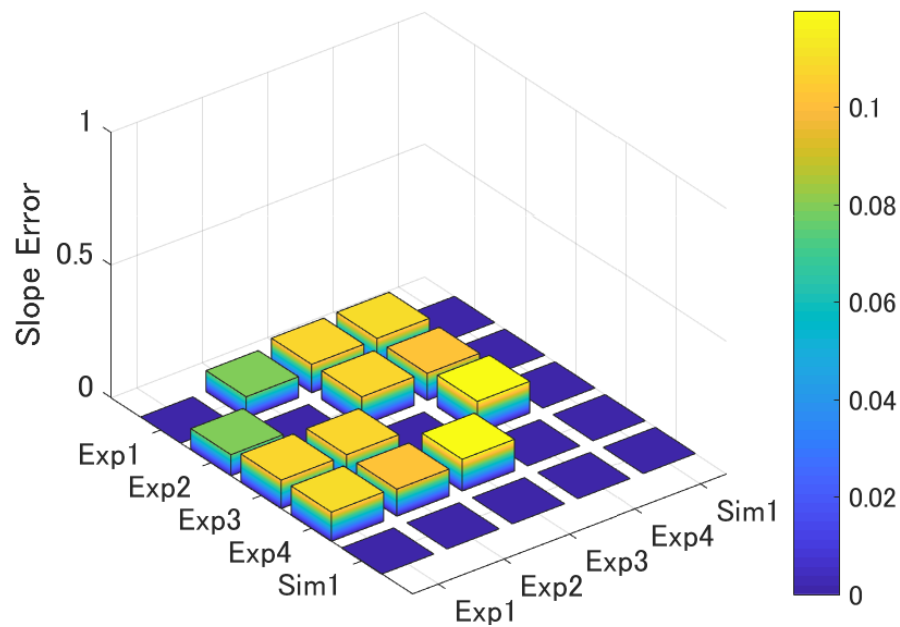
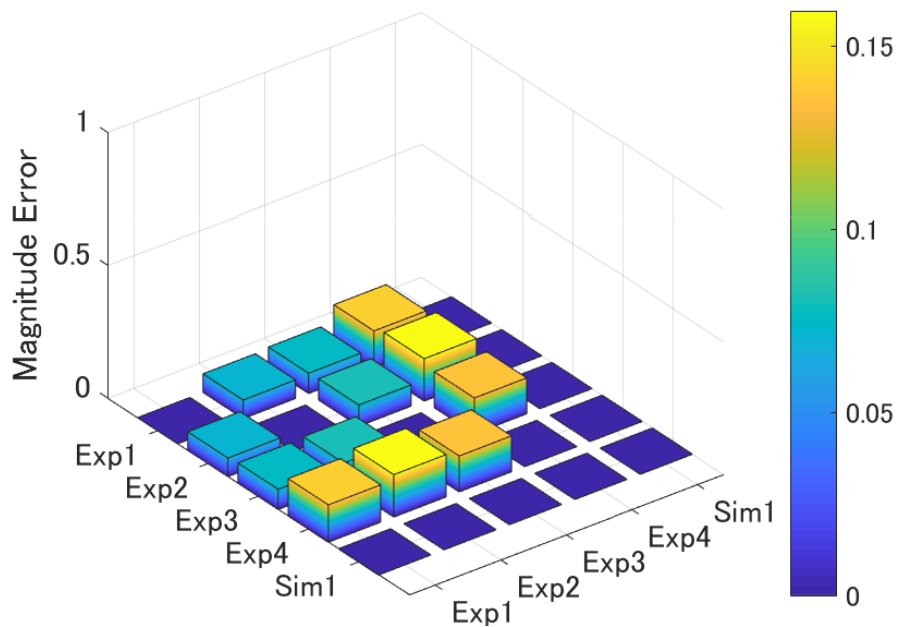
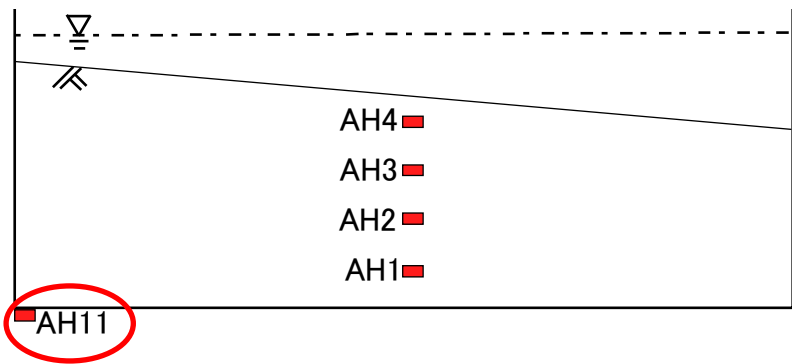
位相 (Phase): ϕ

振幅 (Magnitude): Y

振動数 (Slope): ω

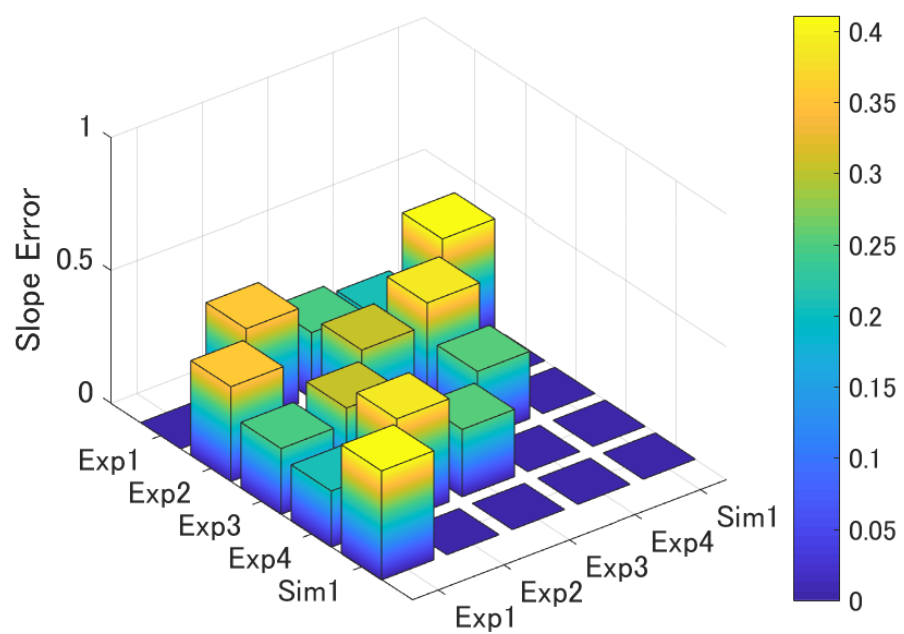
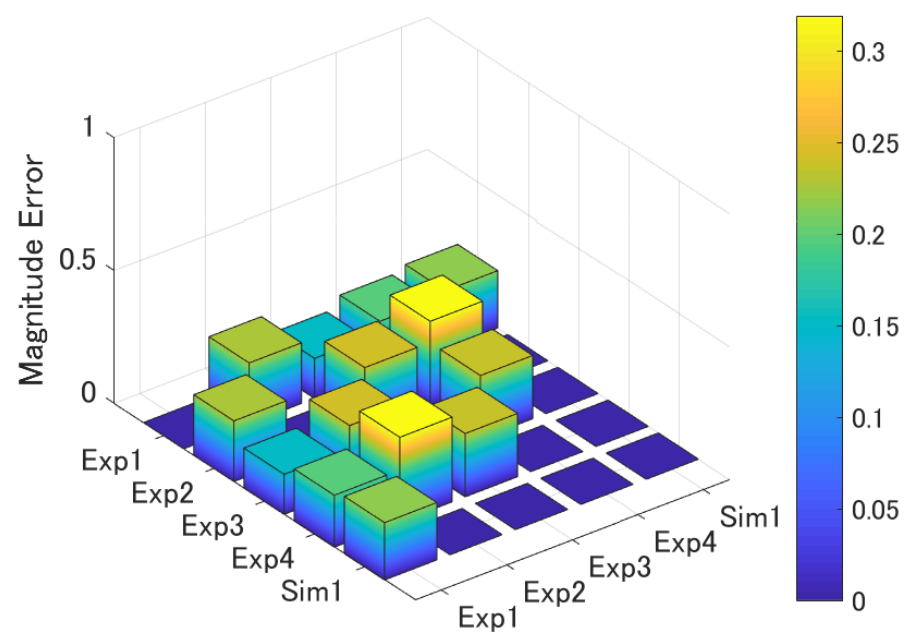
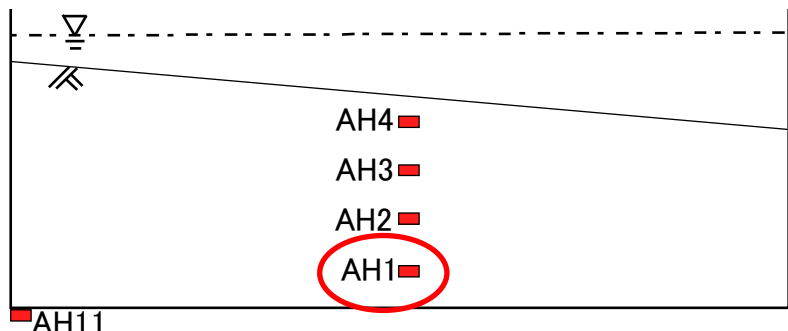


評価の結果



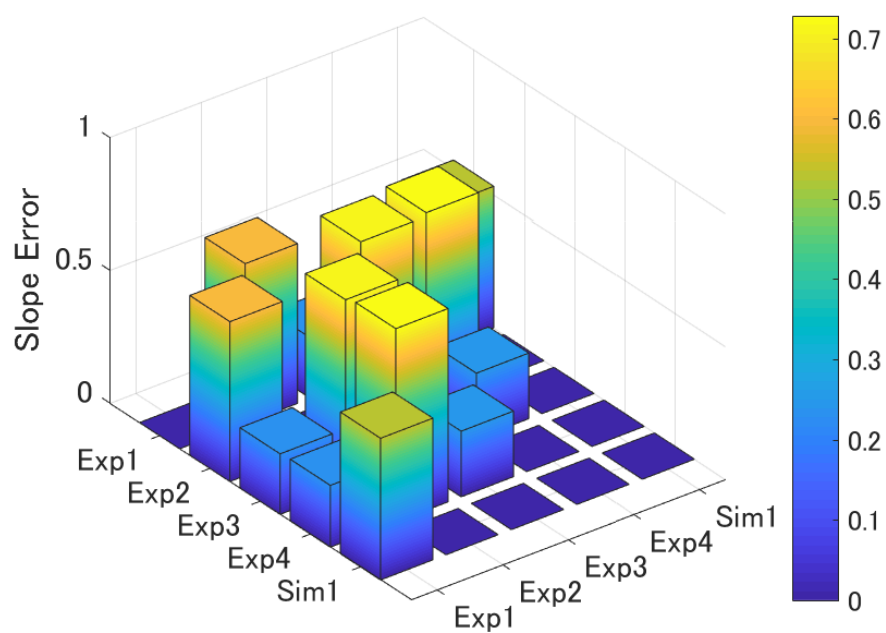
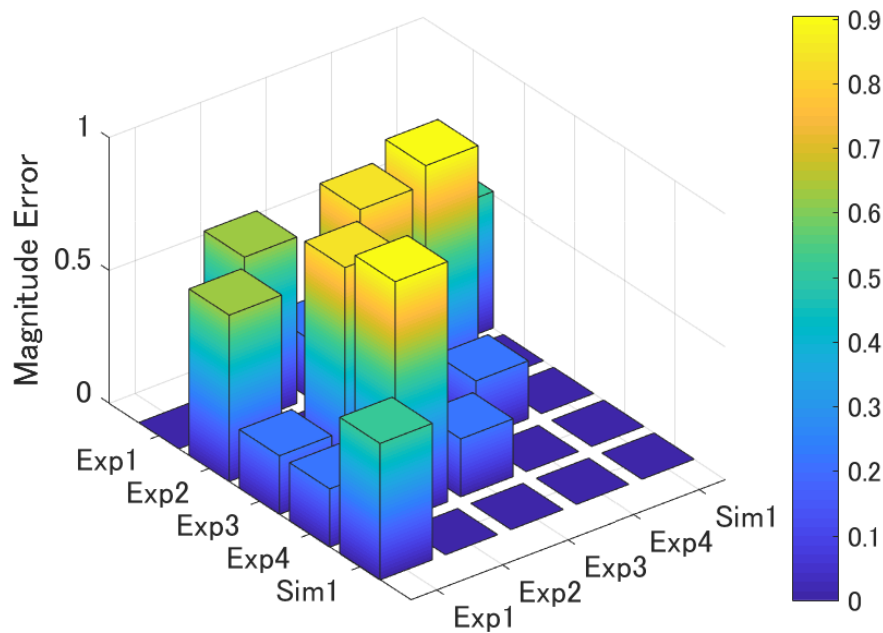
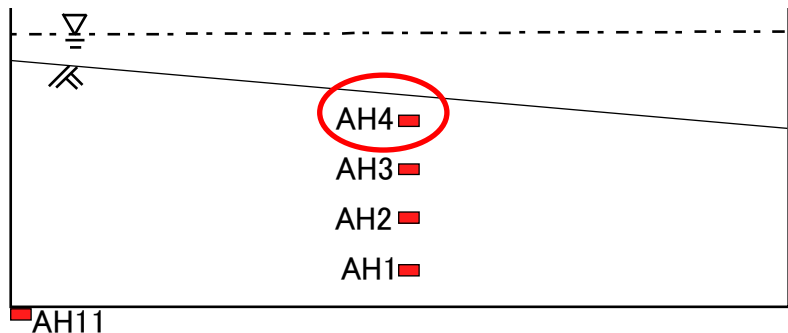
実験結果の加速度時刻歴 (AH11=AH0) の差

評価の結果



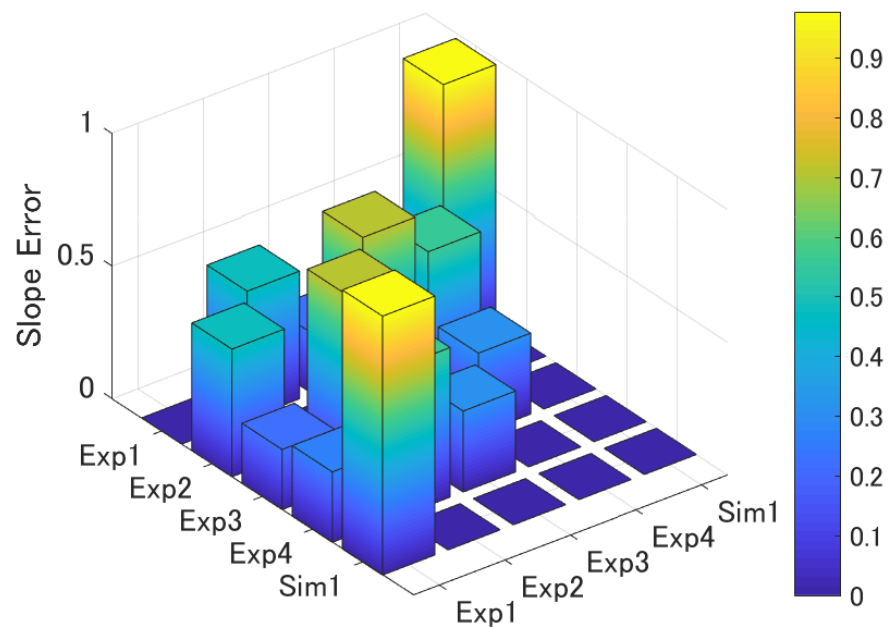
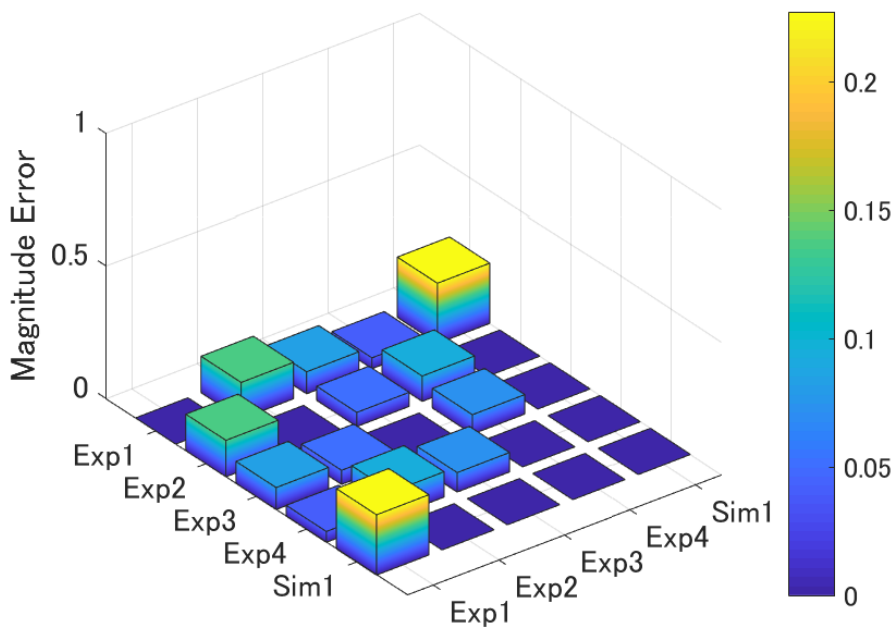
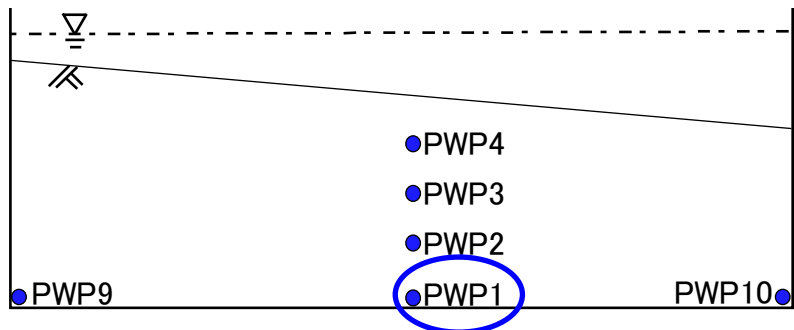
実験結果の加速度時刻歴(AH1)の差

評価の結果



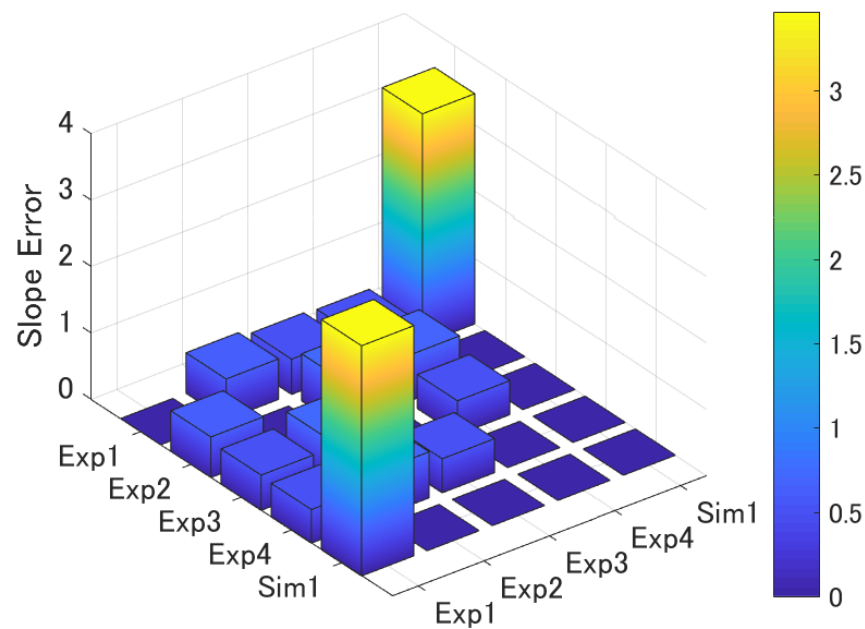
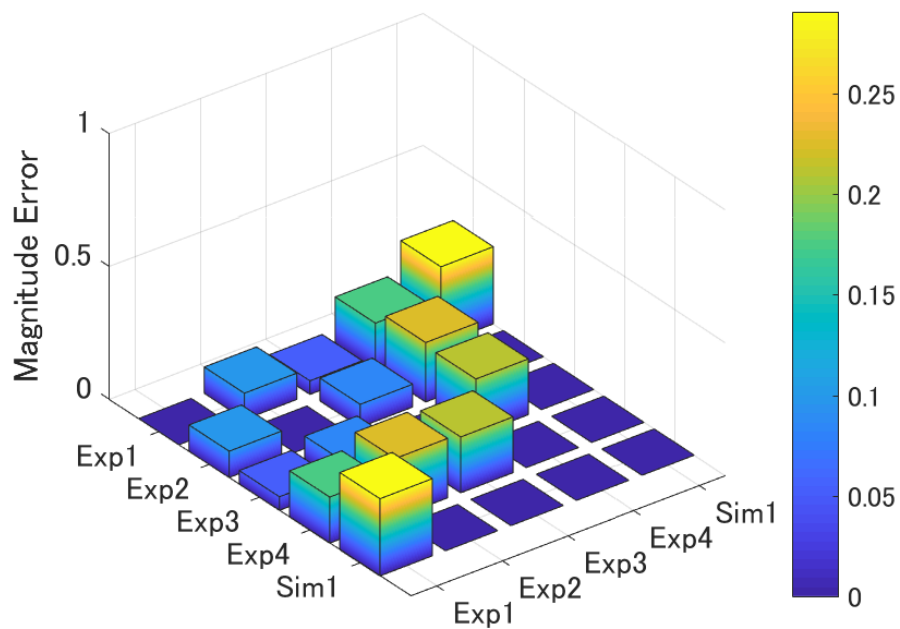
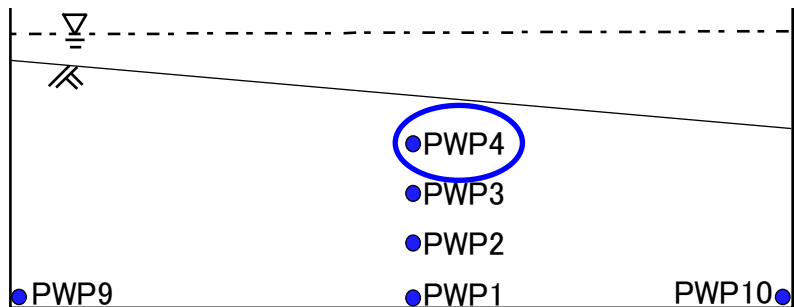
実験結果の加速度時刻歴(AH4)の差

評価の結果(加振中)



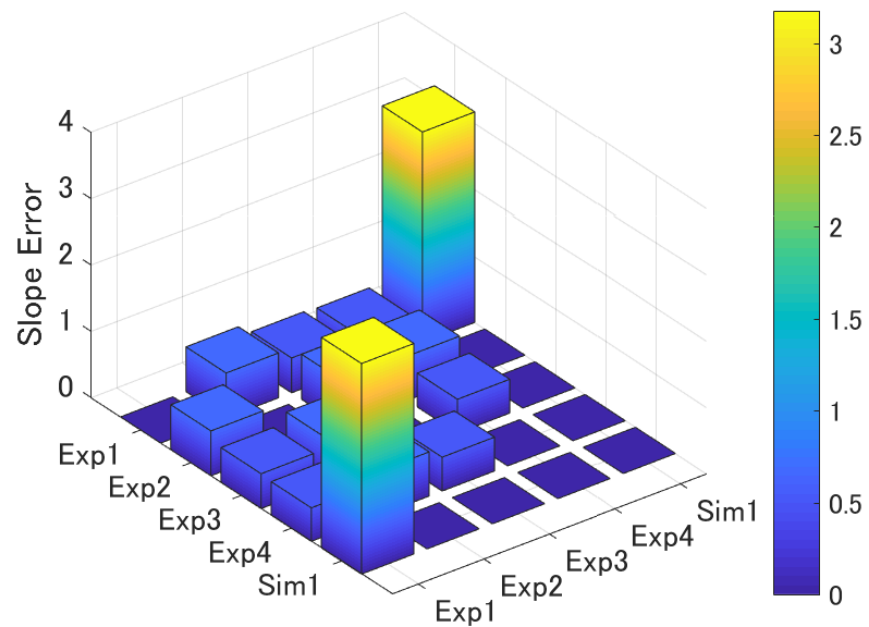
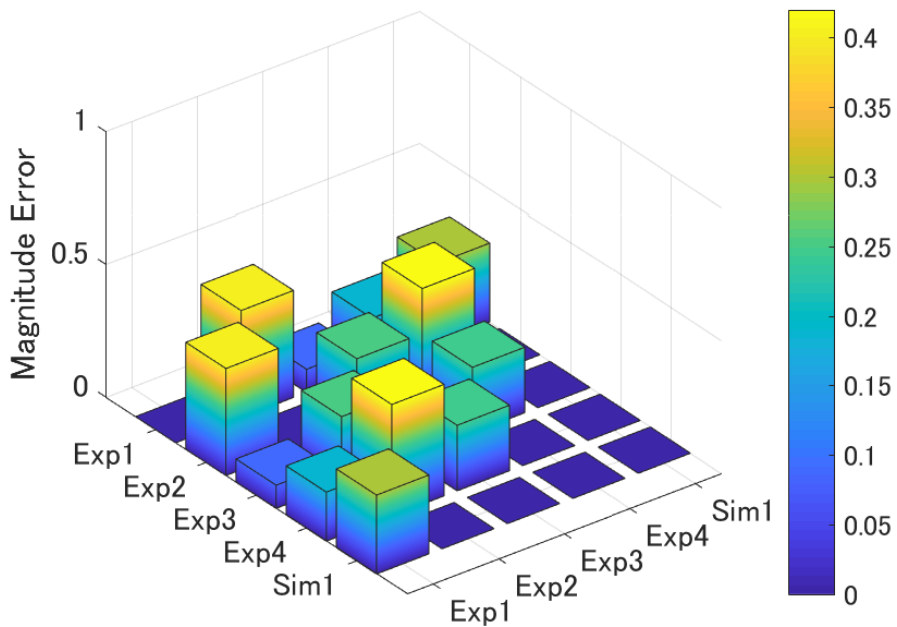
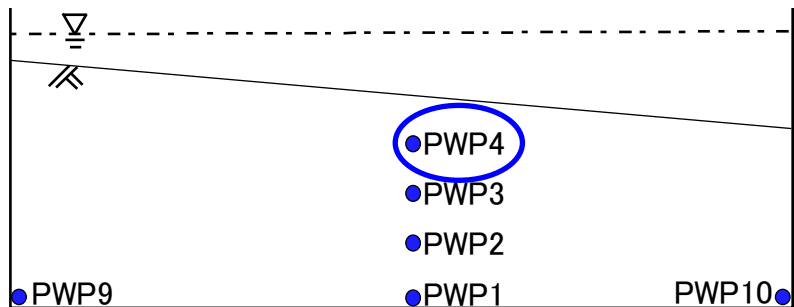
実験結果の過剰間隙水圧時刻歴(PWP1)の差

評価の結果(加振中)



実験結果の過剰間隙水圧時刻歴(PWP4)の差

評価の結果(消散含む)



実験結果の過剰間隙水圧時刻歴(PWP4)の差

全体の結論

- 評価の際には、時系列データの瞬間値ではなく時刻歴そのものを比較する手法を採用し、全体の誤差を位相の差 (Phase error), 振幅の差 (Magnitude error), および振動数の差 (Slope error) の三つに分けて取り扱うこととした。
- 同一条件を想定した実験データ同士を比較することで、実験が本質的に有するばらつきを振幅および振動数の差に分けて定量的に評価することができた。
- ある実験結果とその再現シミュレーションの結果に対して時刻歴に基づく定量的な評価法を適用することで、両者の間の誤差評価を行うことが可能である。
- 実験と解析間の誤差の大きさを複数の実験ケース間での誤差のばらつきと比較することで、解析結果の妥当性について定量的かつ客観的に評価できることを示した。

参考文献

- [1] 河村壮一, 西沢敏明, 和田曄暎 “20年後の発掘で分かった液状化による杭の被害,” NIKKEI ARCHITECTURE, 1985年7月29日号, 130-134, 1985
- [2] 安田進 “東京湾岸の液状化被害”
(http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/15_yasuda.pdf)
- [3] ASME: An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid-Mechanics V&V10.1, 2012
- [4] Radu Popescu, Jean H. Prevost, “Comparison between VELACS numerical 'class A' predictions and centrifuge experimental soil test results,” Soil Dynamics and Earthquake Engineering 14, 79-92, 1995.
- [5] Kutter, B.L., “LEAP-GWU-2015 experiment specifications, results, and comparisons,” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.018>
- [6] Ziotopoulou, K., “Seismic response of liquefiable sloping ground: Class A and C numerical predictions of centrifuge model responses,” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.038>
- [7] Manzari, M.T., “Liquefaction experiment and analysis projects (LEAP): Summary of observations from the planning phase,” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.015>
- [8] 井合進, 飛田哲男, 小堤治, “砂の繰り返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係,” 京都大学防災研究所年報, 第51号, p.291-304, 2008.
- [9] H. Sarin, M. Kokkolaras, G.Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, R.-J. Yang, “Comparing Time Histories for Validation of Simulation Models: Error Measures and Metrics,” Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 132, 061401-1-10, 2010