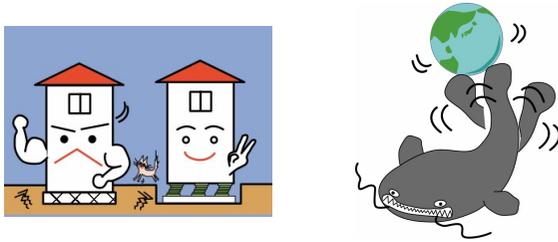


岡山地域地盤工学セミナー（2021年8月3日：18:00～20:00）

地震応答解析におけるV&Vの取り組み ～必要性・方法論・FLIPの事例～



関西大学社会安全学部
一井康二

自己紹介：自分の過去の所属先：
その1:運輸省港湾技術研究所
(現在は、国立研究開発法人港湾空港技術研究所)



ちなみに、このロゴマークも考案しました。

本日の内容

- (1) 広島を離れてもう5年、なので自己紹介
- (2) V&Vの必要性を、東日本から10年なので耐震設計の発展の流れから振り返る。
- (3) V&Vの手順（ガイドライン）の紹介

休憩

- (4) V&Vの事例の理解のための液状化解析プログラムFLIPの構成側の早わかり解説
- (5) FLIPのV&V事例の紹介

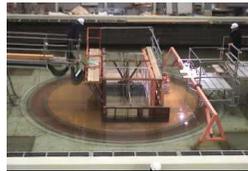
兵庫県南部地震のとき、
強い地震動（と液状化）で
いろいろな施設が壊れたので、
どのように耐震設計するかが問題でした
=> 耐震性能設計へ移行！



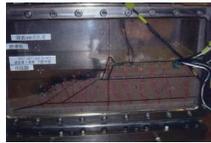
模型実験を行ったり，数値解析を行ったり，
=>兵庫県南部地震以降は設計法に大きな変化



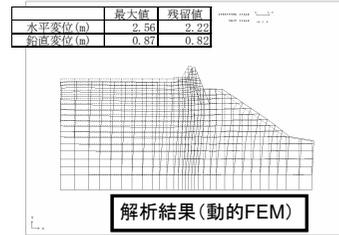
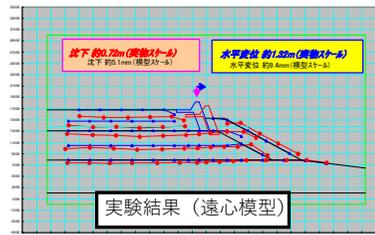
遠心模型実験



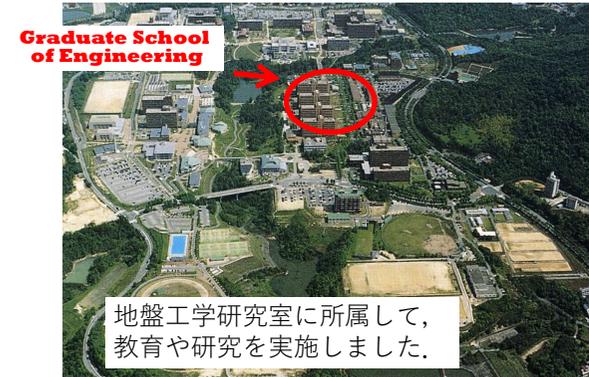
3次元振動実験



実験模型の例
(傾斜型護岸)



自己紹介：自分の過去の所属先：
その2:広島大学大学院工学研究科



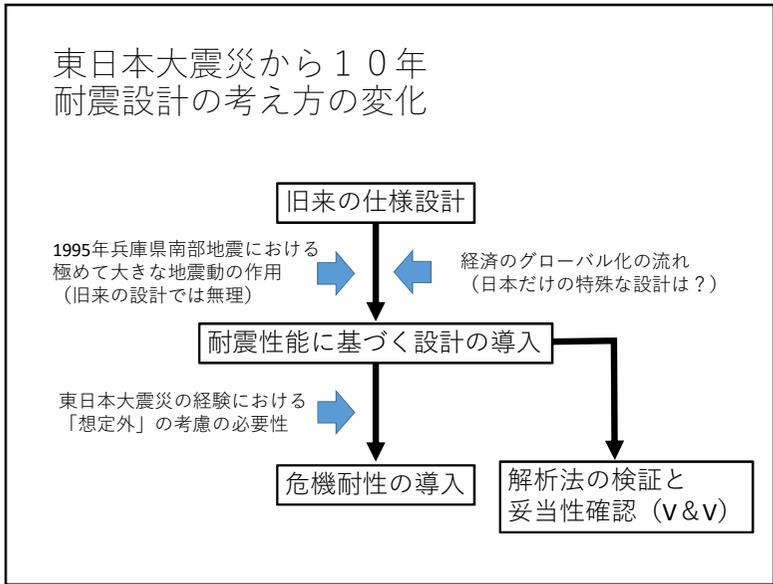
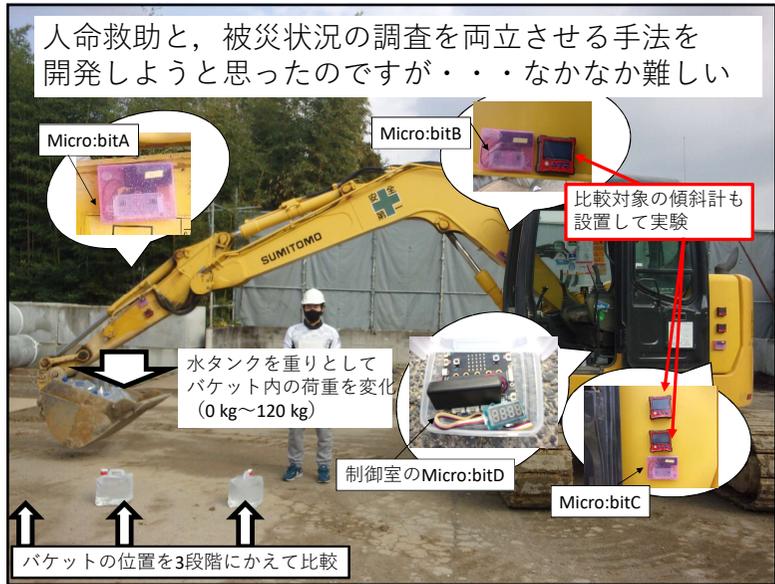
大学は山の中で，フィールドワークには最適(?)ですが，東北からは遠かったので，あまり東日本大震災の被災地などには，行っていません。

今も，港の施設は研究対象としています。
耐震設計より維持管理に興味がありますが



土石流災害があったので，
そちらの方で
防災を深く
考えたような





自己紹介：自分の現在の所属先：
その3:関西大学社会安全学部 (5年前から)

撮影:奥村 准教授

大阪北部地震による高槻市南平台の
高槻市 石田 博幸 (一井 啓介)

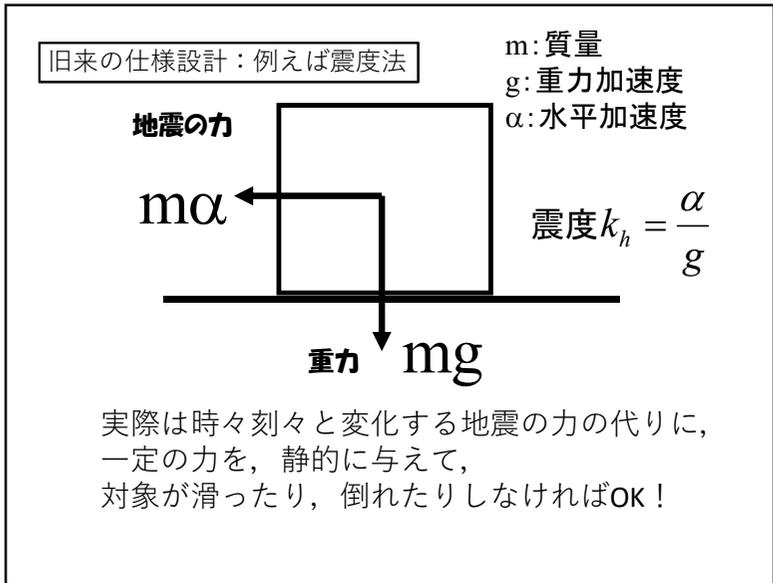
J-STAGE 資料・記事を探す J-STAGEについて ニュース&PR サポート

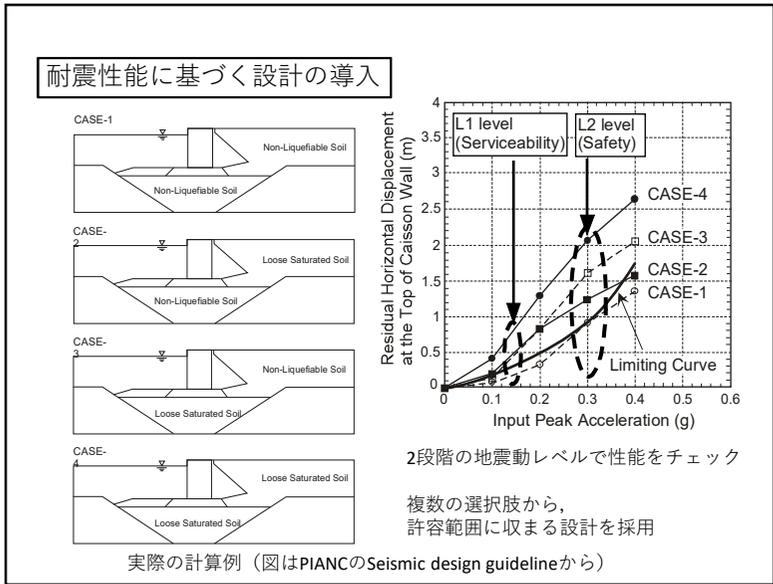
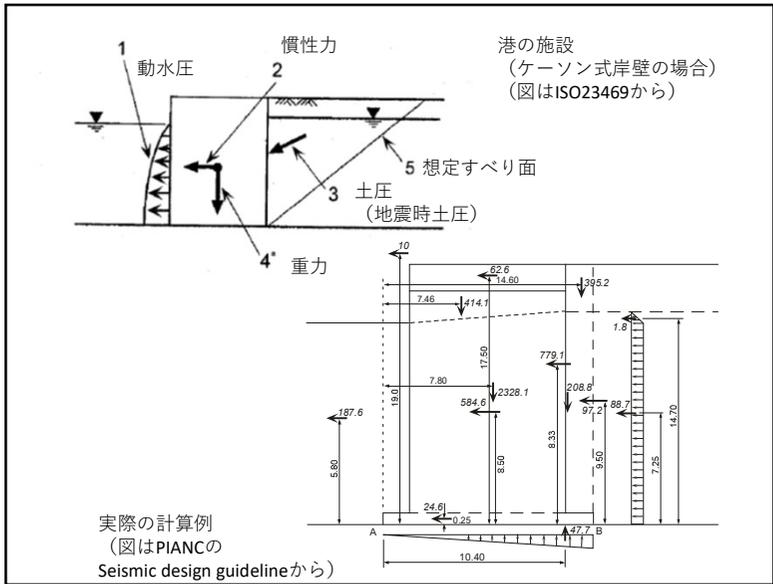
土木学会論文集A1 (構造・地震工学)

資料トップ 巻号一覧 この資料について

J-STAGEトップ / 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) / 76巻 (2020) 4号 / 前誌

地震工学論文集第39巻(報告)
2018年大阪北部地震におけるブルーシート屋根補修方法の実感調査
一井 康二, 牧 健介





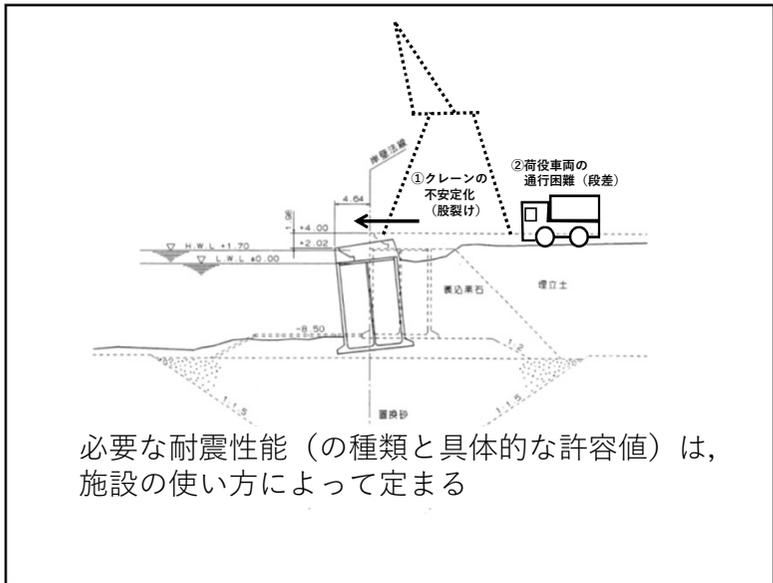
撮影：奥村准教授

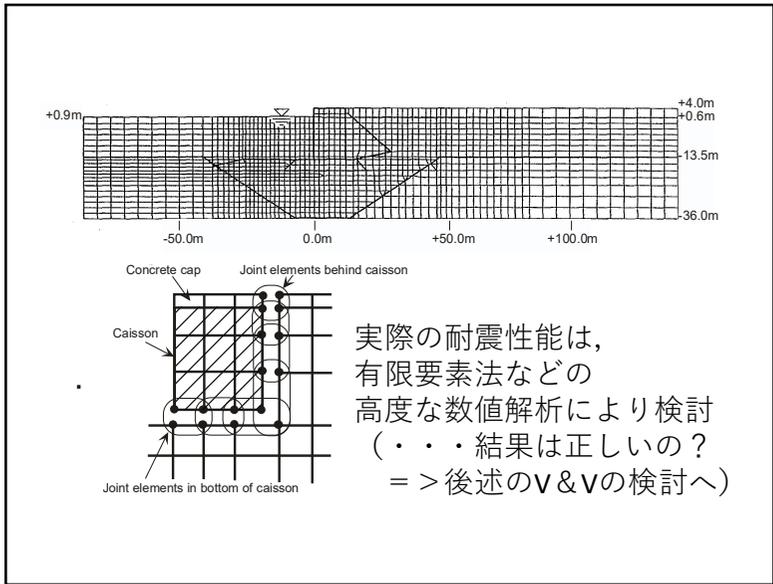
明らかにNG

ひび割れぐらいならセーフ?

力のつり合いだと、どの程度まで壊れるかわからない

安全なのか (安全性), 直して使えるのか (修復性)
そのまま使えるのか (使用性),
地震時に必要な性能を明らかにして設計したい





耐震設計での変化（その1）

性能設計を越えて、「危機耐性」の考慮へ

2021年度 部門別セッション名

- ※各部門内のセッション名を整理し区分しました。その結果、セッション名が大きく変更となっている場合がありますのでご注意ください。
- なお、従来のI部門の合成構造、V部門の合成・複合構造は共通セッションの複合構造物にご登録ください。
- ※研究関連セッションの他に、「CS1土木教育一般」「CS4タイパードイ&インクーション」への投稿もお考えの場合は、事務局全国大会係へお問い合わせください。

|| 第I部門 | 第II部門 | 第III部門 | 第IV部門 | 第V部門 | 第VI部門 | 第VII部門 | 共通セッション ||

第I部門

応用力学, 構造工学, 鋼構造, 地盤工学, 風工学など

[応用力学]
 固体力学, 計算力学(構造), 計算力学(非構造), 計算力学(アルゴリズム), 弾塑性, 有限変位, 振動, 波動, 衝撃(解析), 衝撃(実験), 数値解析

[構造工学]
 骨組・骨組部材, 薄肉構造, 板, シェル, 橋梁床版, エキスパートシステム, 特殊構造, 最適設計, 安全性・信頼性, 維持管理, 構造計画, 構造実験, 構造同定, 診断・補修・補強, 宇宙構造物

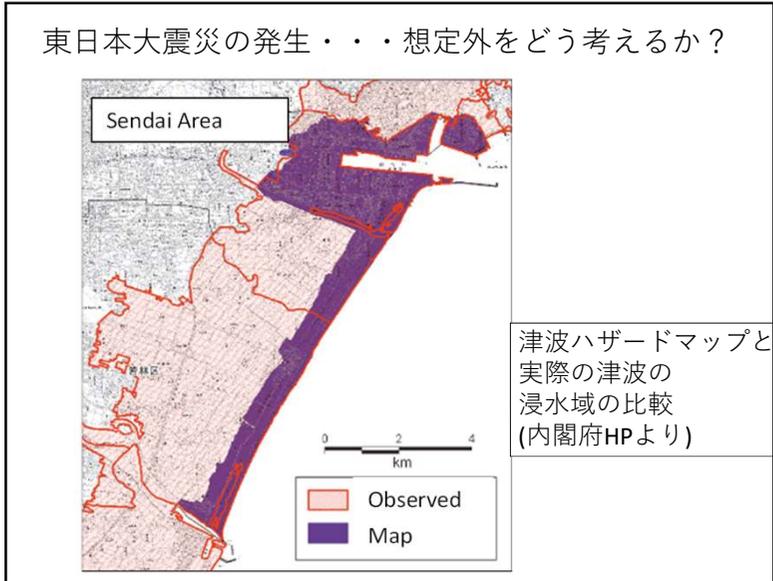
[鋼構造]
 座屈・耐荷力(桁), 座屈・耐荷力(柱), 座屈・耐荷力(板), 座屈・耐荷力(その他), 非線形評価, 破壊力学, 疲労, 溶接, 接合, 継手, 橋梁一般(設計), 橋梁一般(施工), 橋梁一般(測定・モニタリング), 橋梁振動

[地盤工学]
 免震・制振, 橋梁の耐震, 基礎の耐震, ダム・タンクの耐震, トンネルの耐震, 地中構造物の耐震, 盛土の耐震, 都市施設の耐震, 港湾の耐震

[風工学]
 耐風・風工学(数値流体), 耐風・風工学(基礎), 耐風・風工学(応答予測・制御), 耐風・風工学(事例報告・総論)

危機耐性

今の土木学会の研究発表会では、「港湾の耐震」などと並んで、「危機耐性」というセッションがあります。



(2) 定義

ここでは、耐震設計における「危機耐性」の定義を整理する。「危機耐性」は、

狭義の設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が、単体またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質

と定義することができるだろう。ここで、「狭義の設計」とは、従来の耐震設計の事を指し、定義をすれば「考慮すべき設計地震動、及び、それに対する性能が規定されていて、照査が義務づけられているもの」となる。

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆
 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72巻4号, I_459-I_472, 2016.

a) 事象の拡張～損傷後の局面の考慮

巨大な津波に対する防潮堤や防波堤の効果についても理解が進み、設計津波を超える規模の津波に対して、津波減災効果を発揮できる「粘り強い構造」^{7),8)}等が提唱されている。

耐震設計においても、設計で用いる外力よりも大きい外力に対する構造物の応答の重要性は認識されており、「粘りのある構造」⁹⁾等の考え方が提示されている。

これらは、被災・損傷した後のインフラがどのような挙動をみせるかという、従来の設計では明確に考慮していなかった事象を考慮し、それらへの対応をとることを求めるものである。「危機耐性」を考えるにあたって最も重要な考え方の一つである。

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
本田利器, 秋山 充良, 片岡 正次郎, 高橋 良和, 野津 厚, 室野 剛隆
土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72 巻 4 号, I_459-I_472, 2016.

a) 事象の拡張～損傷後の局面の考慮

倒壊している状態を
評価対象とするので、
緻密な解析は無理？

=> 定性的な評価内容

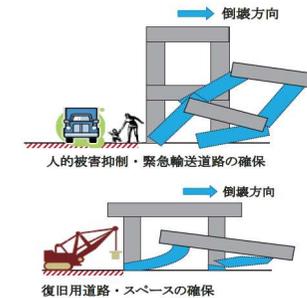


図7 倒壊方向の制御

室野 剛隆, 危機耐性の向上－想定を超える巨大地震への対応－
鉄道総研報告, 30 巻 5 号, 2016.

a) 事象の拡張～損傷後の局面の考慮



図5 逸脱防止装置の例¹⁰⁾

耐震設計された柱が万一破壊した場合自重を支える機能だけを有した柱(自重補償柱)

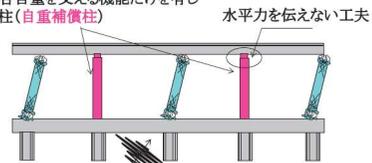


図6 自重補償機構を有するラーメン高架橋

室野 剛隆, 危機耐性の向上－想定を超える巨大地震への対応－
鉄道総研報告, 30 巻 5 号, 2016.

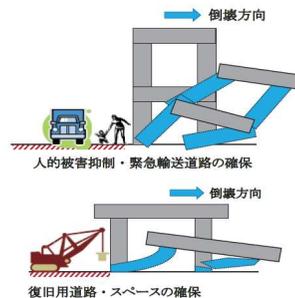


図7 倒壊方向の制御

b) 時間の拡張～レジリエンスの考慮

東日本大震災後、レジリエンスという言葉がよく聞かれるようになった。しかし、以前から、災害をはじめとする様々な分野で、Resilienceの議論^{10),11),12)}はあった。

地震工学分野では Bruneau et al.¹¹⁾の、社会の地震への対応力 (Resilience) を定量的に評価する枠組みの提案があげられる。ここでは、概念として、社会の有す

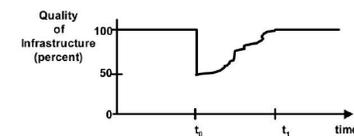


図-1 被災後のインフラの性能 (%) の時間的変化の概念図。
 t_0 が被災時を表す。Bruneau et al. (2003)¹¹⁾より引用。

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
本田利器, 秋山 充良, 片岡 正次郎, 高橋 良和, 野津 厚, 室野 剛隆
土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72 巻 4 号, I_459-I_472, 2016.

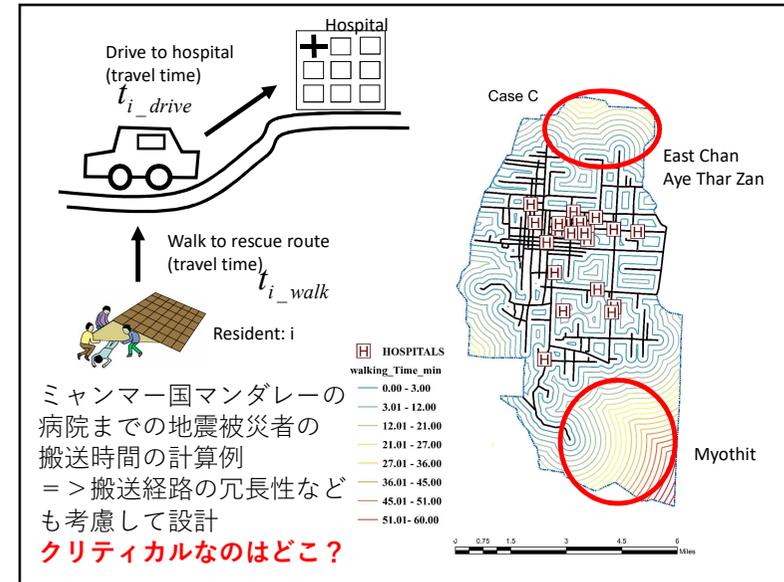
b) 時間の拡張～レジリエンスの考慮



(a)No.1 の変化



あまり良い例ではないですが、大阪北部地震の例
「災害時に、被災しても早く直しやすい構造」
「劣化しにくい応急処置の方法」なども考慮対象



c) 空間の拡張～拡大したシステム領域の考慮

従来の設計において、基本的にインフラ構造物単体について考えていたものを改め、そのインフラの属する地域社会における位置づけや行政組織との関係性など社会的な状況を考慮するという意味での空間的な拡張と、他のインフラとの連携によるインフラネットワークとしての機能を考慮するというシステム領域の拡張、という二面を考えることが必要であろう。

なお、レジリエンスという言葉こそ使われていないが、土木学会の第二次提言¹⁴⁾においては「システムとしての地震防災性」が言及されており、第三次提言¹⁵⁾では「地震動に強い社会基盤システムの構築」が提唱

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
本田 利器, 秋山 充良, 片岡 正次郎, 高橋 良和, 野津 厚, 室野 剛隆
土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72 巻 4 号, 1_459-1_472, 2016.



陸前高田市役所の裏には非常階段がありました、でも・・・



裏の非常階段が屋上までつながっていない・・・

このことがすごく気になります。

「何かできたはず？」

火災から避難する非常階段としては、屋上に階段が続いていても無駄ですけど・・・それを無駄と捉えない考え方が必要？

難しい点はいろいろあって、

- ・ 定量的な評価になじまず、定性的であったりする
 - ・ 構造物が被災／損傷するところから議論が始まる
- => **社会が、リスクを許容する、という必要**がある。

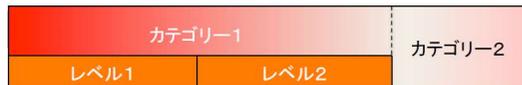
リスクガバナンスの実践枠組みとしては以下の5段階が考えられる²⁸⁾。

1. Pre-assessment (リスクと社会環境の事前調査)
2. Appraisal (リスクの評価)
3. Characterisation and evaluation (リスクの性質の理解)
4. Management (リスクマネジメント)
5. Communication (リスクコミュニケーション)

ここでも () 内の訳語は著者によるものである。

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
本田 利器, 秋山 充良, 片岡 正次郎, 高橋 良和, 野津 厚, 室野 剛隆
土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72 巻 4 号, I_459-I_472, 2016.

設計



性能

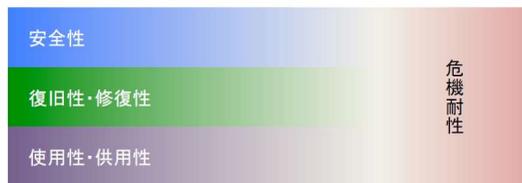
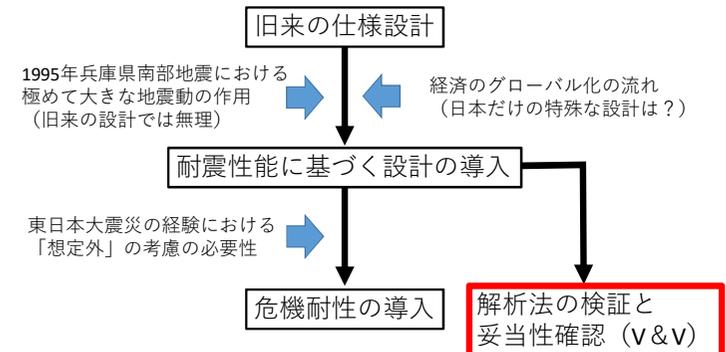


図-2 「危機耐性」と耐震設計カテゴリーの関係性

既存の設計のカテゴリーに追加される (べき)

引用元：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－
本田 利器, 秋山 充良, 片岡 正次郎, 高橋 良和, 野津 厚, 室野 剛隆
土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 72 巻 4 号, I_459-I_472, 2016.

東日本大震災から10年 耐震設計の考え方の変化 (その2)



2016年に、土木学会地震工学委員会に、「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」が設置された。

■趣旨：地盤・構造物に関する非線形地震応答解析の品質や信頼性向上のため、妥当性確認（Validation）と検証（Verification）に関する課題を整理し、それを実施するための考え方を幾つかの事例を示しながら、体系的にとりまとめる。

■活動期間：平成28年10月から令和3年3月(1年延長)

■期待される成果：

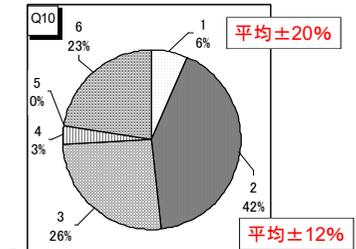
- V&Vの実施手順(ガイドライン)の評価事例集の作成と発行
- 不確実さを考慮した再現性、予測性能の評価手法

このガイドラインの原稿が完成したみたいなので、その宣伝でもあります。

<発注者向けアンケート回答> なぜ、V&Vが必要なのか？
A-8 FEMの信頼性について (つづき：個人的意見)

Q10 その業務におけるFEMの結果に信頼性がどの程度あると思いますか？

1. 高精度(たとえば、推定値がプラスマイナス %程度)
2. 使う人による(推定値がプラスマイナス %から %程度)
3. 従来設計程度
4. 従来設計より信頼性はなく、参考程度
5. まったく信用していない
6. その他()



- ・判らない
- ・FEM自体は高精度ですが、その結果は入力データによる所が多いと理解している。そのため、流量や応力の低減率に注目し施工範囲や施工方法決定の基礎資料として用いるものと考えている。
- ・原設計の基礎となるが、情報化施工によるデータをもとに修正が必要となる。
- ・FEM自身というよりも入力物性、地盤モデルの精度による
- ・余りに大きい変位結果が出て、どの程度を信用して良いか判断できない
- ・鉛直変位は信頼性が高いが、水平変位はそれほどでもない

発注者の人は、実際に解析をやっている受注者よりもFEM解析の精度を高精度に評価してしまう傾向にあるようです
=> 制度や信頼性についての共通理解が必要では？

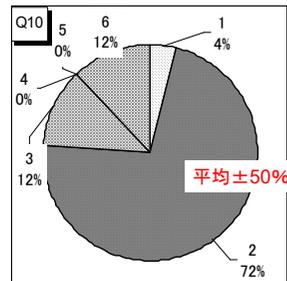
なぜ、V&Vが必要なのか？

<受注者向けアンケート回答>
B-8 FEM解析の信頼性

昔、解析の精度についてアンケートをしました。大昔の地盤工学会誌(土と基礎?)に、発表しています。

Q10 その業務におけるFEMの結果に信頼性がどの程度あると思いますか？

1. 高精度(たとえば、推定値がプラスマイナス %程度)
2. 使う人による(推定値がプラスマイナス %から %程度)
3. 従来設計程度
4. 従来設計より信頼性はなく、参考程度
5. まったく信用していない
6. その他()



- ・挙動パターンは概略推定。しかし実測データがなければ解析結果への定型的信頼性はほとんど確保できない
- ・相対的な比較は出来る(液状化対策効果とか、矢板のサイズを上げた場合とか)
- ・不明

要は、設計に解析を使っているけど、本当に大丈夫なの？、という不安への回答

地盤・構造物の非線形解析法の検証/妥当性確認 - ガイドラインとその実践事例 -

2021年度出版：編集者：地震工学委員会・地盤・構造物の非線形地震応答解析法の検証と妥当性確認による研究小委員会と応用力学委員会・土木分野の数値解析におけるV&Vに関する小委員会

第1編 ガイドライン

1. 適用範囲
2. 用語
3. 検証と妥当性確認の基本方針
4. 評価指標
5. 不確実さとその定量化
6. 検証
7. 妥当性確認
 - 7.1 初期構造・材料特性の妥当性確認
 - 7.2 全体解析モデルの妥当性確認
8. 評価過程の文書化

付属書：参考

- A. 解析モデルと数値モデルの関係について
- B. 創成解について
- C. 再現性と予測性能について
- D. 不確かさの評価と定量化

第2編 資料および事例集

1 資料

- 1.1 既往の評価指標の整理
- 1.2 地盤材料特性モデルの不確実さとモデル化の留意点
- 1.3 地盤構造のモデル化に及ぼす調査・探査の影響

2. 検証事例

3. 静的解析の妥当性確認事例

- 3.1 粘性土地盤の変形解析
- 3.2 個別要素法による非線形解析

4. 動的解析の妥当性確認事例

- 4.1 成層地盤における非線形地震応答解析
- 4.2 斜面の非線形地震応答解析
- 4.3 護岸構造物の非線形地震応答解析
- 4.4 地盤—基礎—構造物系の非線形地震応答解析

解説

もうすぐ出版されます

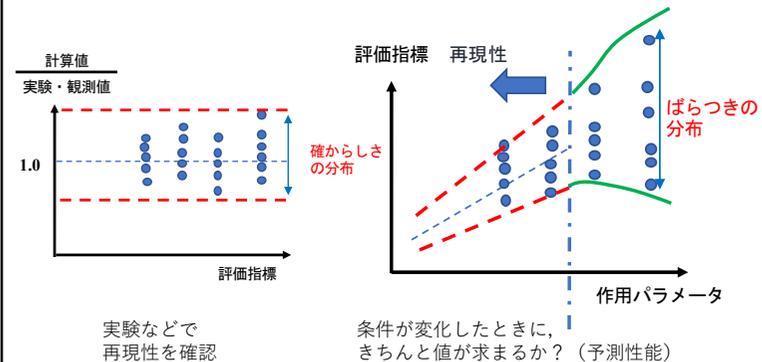
検証 (Verification) とは、
計算が正しく行われていることの確認プロセス
(壊れた電卓は使っていないよね?)

■**コード検証(Code verification)** : 概念モデルを表す数理モデルを計算機プログラムに変換するための数値モデルに用いる数値手法 (空間・時間離散化, 解析アルゴリズム, 収束判定など) がプログラムとしてデジタル計算機に適切に実装していることを確認するためのプロセス.

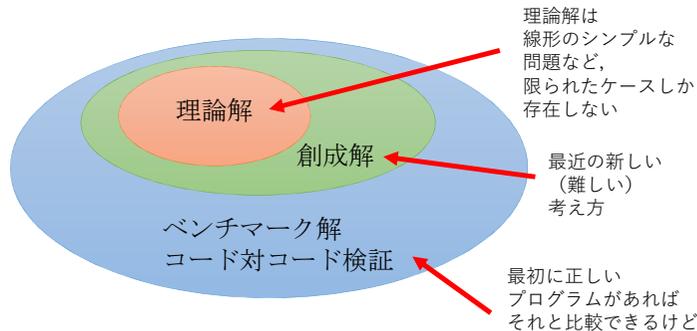
- 検証が既に実施されている解析コード(ABAQUS, ADINAなど)との比較((第2編2章検証事例2.1)
- 理論解との比較(第2編2章検証事例2.1)
- 創成解による検証(付属書(参考)C, 第2編2章検証事例2.2)

■**解析検証(Calculation verification)** : 入力データに対して所定の出力が得られていることおよび出力結果の精度について確認するプロセス(第2編2章検証事例2.3,2.4)

妥当性確認 (Validation) とは、
再現性, かつ予測性能が所期の利用目的に則していることを確認するプロセス
(計算結果に意味はあるよね?)



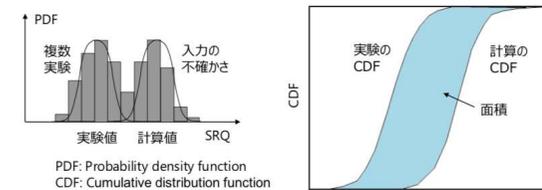
設計に用いる解析コードの検証 (Verification)
(計算がきちんとできているかどうか)



検証 (Verification) のために結果を比較する対象
(土木学会応用力学委員会計算力学小委員会：
いまさら聞けない計算力学の定石, 2020, を加筆・修正)

きちんとした定量化が重要
(例としての, ASMEの指標)

◇確率密度分布, 累積確率密度分布と M^{SQR}



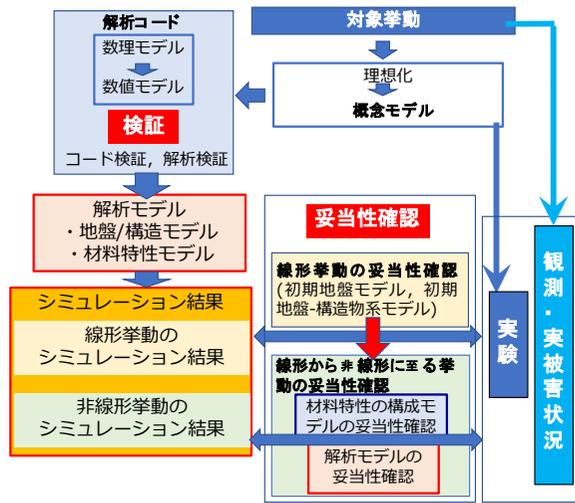
$$M^{SQR} = \frac{1}{|SRQ^{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SRQ^{exp}}(y) - F_{SRQ^{calc}}(y)| dy$$

System Response Quantity
| SRQ^{exp} | is the mean of the experimental outcomes
 F_{SRQ} is CDF of SRQ(system response quantity)

M^{SQR} 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絶対値の最小期待値。

ASME V&V 10.1-2012の
Validation Approach

ガイドラインにおける妥当性確認の実施手順



本日の内容

- (1) 広島を離れてもう5年, なので自己紹介
- (2) V&Vの必要性を, 東日本から10年なので耐震設計の発展の流れから振り返る.
- (3) V&Vの手順 (ガイドライン) の紹介

休憩

- (4) V&Vの事例の理解のための液状化解析プログラムFLIPの構成側の早わかり解説
- (5) FLIPのV&V事例の紹介

動的解析の妥当性確認事例 護岸構造物の非線形地震応答解析

■解析コード：1988年に運輸省港湾技術研究所において開発された平面歪状態を対象とする有効応力法に基づく二次元地震応答解析プログラムFLIP ROSE

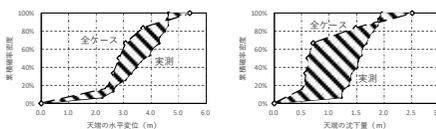
■不確かさ：

- 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, 応力ひずみ関係の回復法, 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)

■評価基準：

- 解析モデルによる水平変位, 沈下量:水平変位で $M^{SQR} = 19.8\%$, 沈下量で $M^{SQR} = 44.5\%$



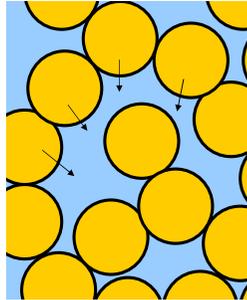
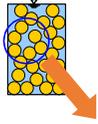
この事例の紹介が後半の内容 (内容理解のための構成側の解説を含む)

FEMにもとづく液状化解析プログラム (ここではFLIP) の耐震設計実務への応用の理解のために (少し基本からの説明になります)

- 1) 液状化とは？
- 2) FLIPにおける液状化現象のモデル化
 - a) 多重せん断ばねモデル
 - b) 同上 + 旧井合モデル (マルチスプリングモデル)
 - c) 同上 + 新井合モデル (カクテルグラスモデル)
- 3) FEMでの定式化と境界条件

粘土で、N値が小さいと、……そもそもぐちゃぐちゃで、ものが作れません。

砂で、N値が小さいと、……地震のときは、液状化の恐れがあります。



- ①地震発生
- ↓
- ②粒子が隙間に落ちようとする
(負のダイレイタンス)
- ↓
- ③間隙水は外に逃げだそうとする
- ↓
- ④逃げる時間が無い(地震だから)
- ↓
- ④水圧が上昇する
(過剰間隙水圧の上昇)

地盤液状化の基礎とその対策, 2009年度地盤工学会中国支部講習会資料より引用

液状化現象は広範囲にわたり生じることが多い。
ライフラインや護岸、建物の基礎に甚大な被害をもたらす。

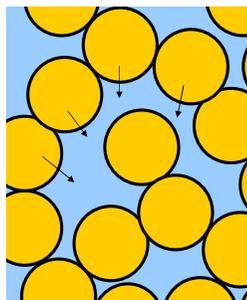
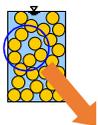


浮き上がり

支持力喪失による転倒

【引用：地盤工学会 土の活用法入門】

地盤液状化の基礎とその対策, 2009年度地盤工学会中国支部講習会資料より引用



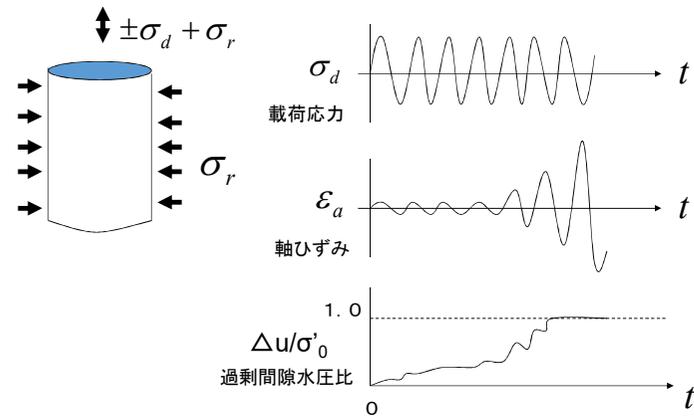
- ⑤水圧が有効土被り圧と等しくなると
- ↓
- ⑥粒子間の摩擦力が失われる
有効応力の低下
 $\sigma' = \sigma - u$
- ↓
- ⑦液状化の発生

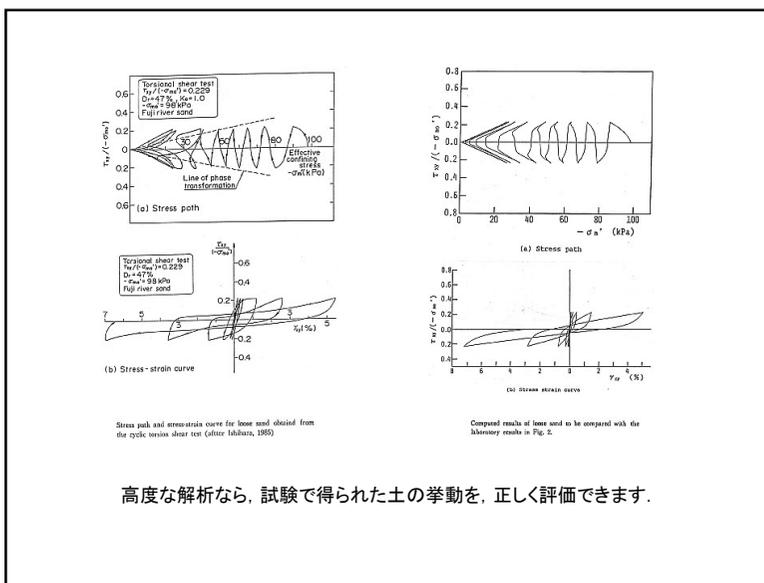
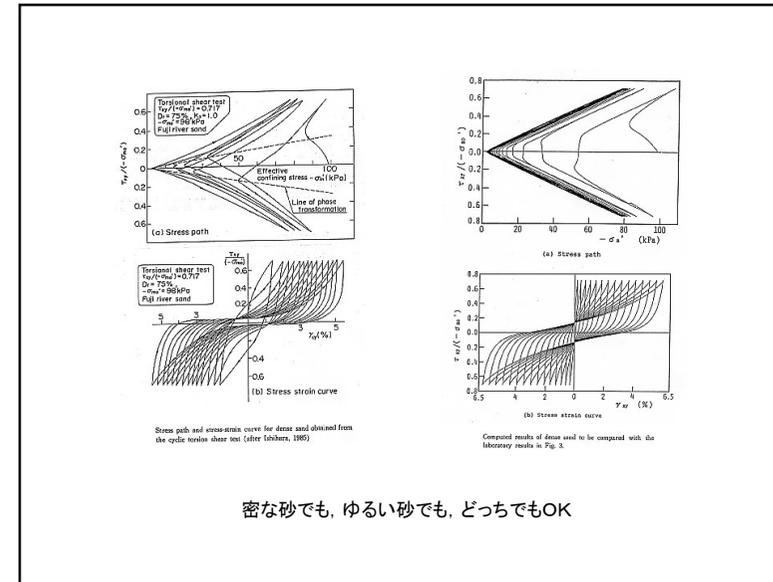
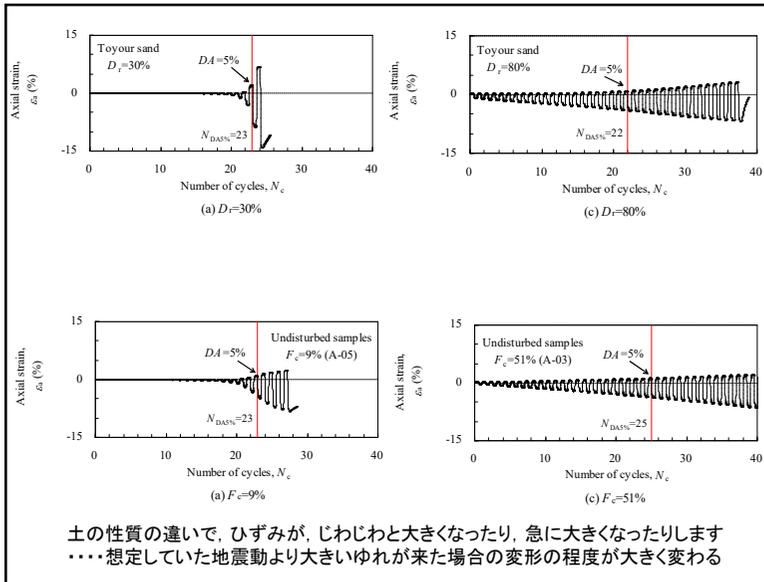
$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi$$

↑ ↑
砂だから ここまで
もともとゼロ ゼロになると……

地盤液状化の基礎とその対策, 2009年度地盤工学会中国支部講習会資料より引用

液状化に抵抗する度合いを調べる
(液状化試験、たとえば繰り返し三軸試験)

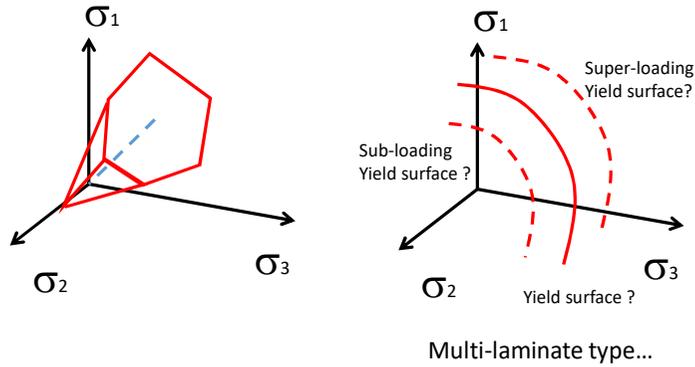




FEMにもとづく液状化解析プログラム（ここではFLIP）の耐震設計実務への応用の理解のために（少し基本からの説明になります）

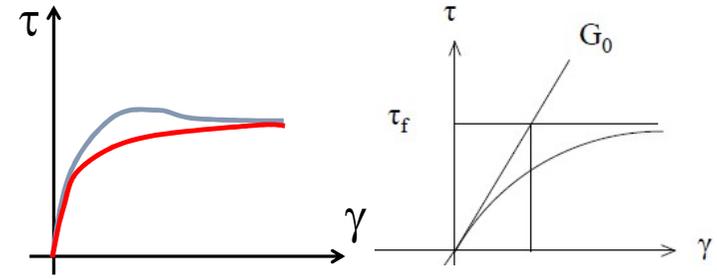
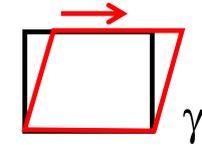
- 1) 液状化とは？
- 2) FLIPにおける液状化現象のモデル化
 - a) 多重せん断ばねモデル
 - b) 同上 + 旧井合モデル (マルチスプリングモデル)
 - c) 同上 + 新井合モデル (カクテルグラスモデル)
- 3) FEMでの定式化と境界条件

よくある構成側は、応力空間で
 応力とひずみの関係をモデル化します。
 ・・・・FLIPはぜんぜん違う



簡単のため、2次元でせん断変形をモデル化：双曲線モデル

Stress-strain relationship of sand
 In **drained** condition
 under monotonic loading



Stiffness G_0 and Strength τ_f

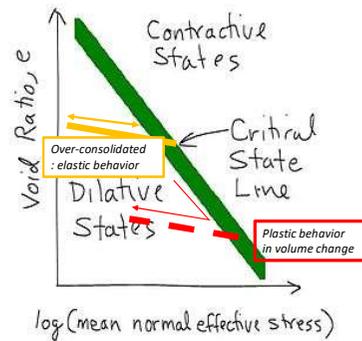
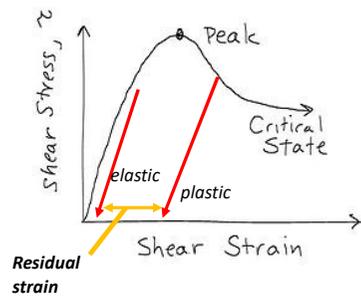
[en.wikipedia.org/wiki/Shear_strength_\(soil\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_strength_(soil))

Shear strength (soil)

From Wikipedia, the free encyclopedia

For a general description of shear strength, see *shear strength*.

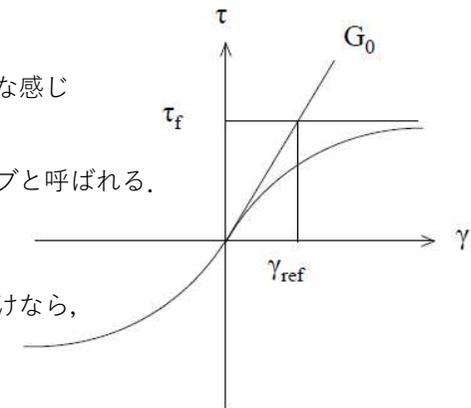
土のせん断変形と
 体積変化
 (なぜか英語の資料)



双曲線モデルを
 数式にするとこんな感じ

これは
 バックボーンカーブと呼ばれる。

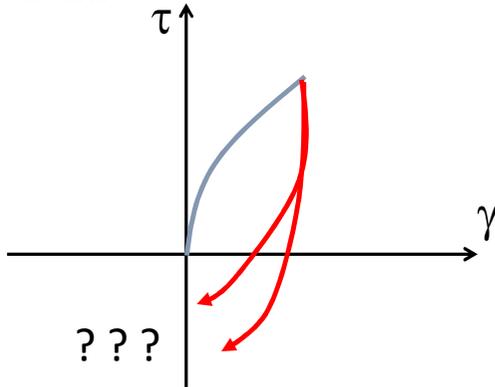
単調に载荷するだけなら、
 これでいい



$$\tau/\tau_f = (\gamma/\gamma_{ref}) / (1 + (\gamma/\gamma_{ref}))$$

地震だと、力が抜けたり、
逆方向になったり・・・サイクリックの载荷

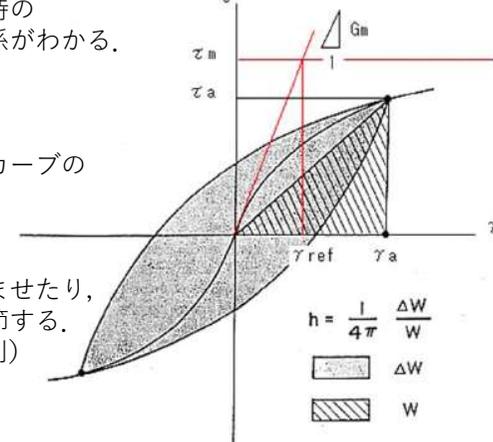
For cyclic shear...



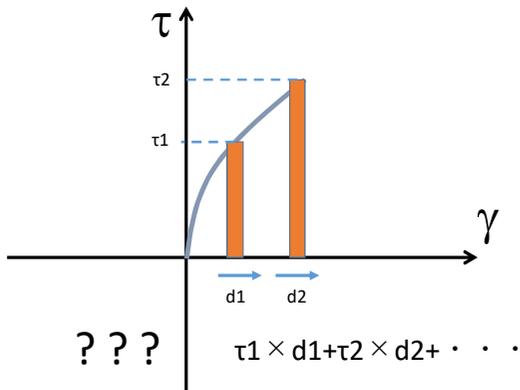
力かける変位が仕事（つまりエネルギー）なので、
面積は消費されたエネルギーにあたり、
その値から、（正確には減衰定数 h から）
繰り返し载荷時の
応力ひずみ関係がわかる。

バックボーンカーブの
形状を用いて
(Masing則)

ちょっと膨らませたり、
細くしたり調節する。
(拡張Masing則)

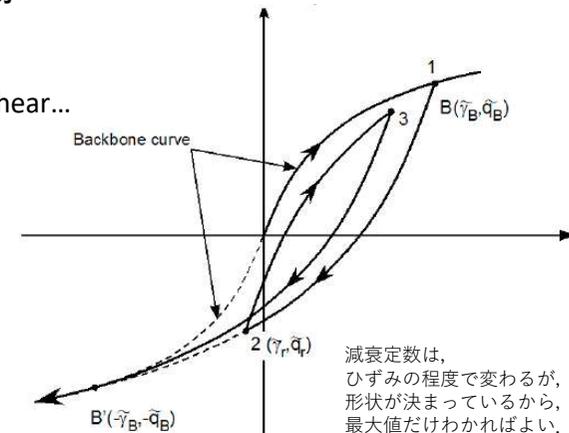


力かける変位が仕事（つまりエネルギー）なので、
面積は消費されたエネルギーにあたり、



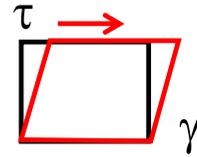
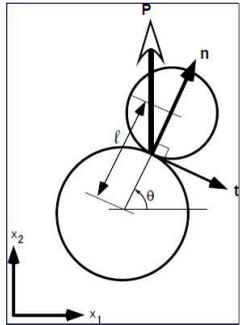
バックボーンカーブの形状（つまり、強度と剛性）
それから、エネルギー消費の程度（つまり減衰定数）が
わかれば十分

Finally,
for cyclic shear...

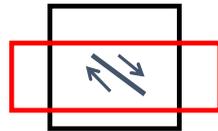


実際のせん断は、いろいろな方向に生じます。

Shears in soil elements



Simple shear



Compression shear

We need to consider both shear (and something between)

いろいろな方向のばねの縮み（ひずみ）から力（応力）を求めて、足し合わせればよい、という考え方

Integration of the spring behavior

To the overall behavior (details are in the references)

$$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} = -Y = -BX^{\frac{1}{1-m_k}} \quad (X > 0)$$

$$= 0 \quad (X \leq 0)$$

$$\frac{\sigma'_y - \sigma'_x}{2} = 2 \sum_{i=1}^{2n} F(\gamma_{\theta_i} + (\gamma_{\theta_i})_{st}) \cos \theta_i \Delta \theta \quad (X > 0)$$

$$= 0 \quad (X \leq 0)$$

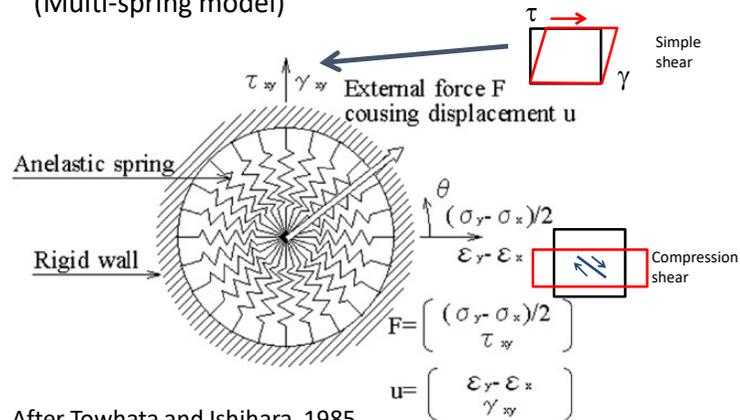
$$\tau_{xy} = 2 \sum_{i=1}^{2n} F(\gamma_{\theta_i} + (\gamma_{\theta_i})_{st}) \sin \theta_i \Delta \theta \quad (X > 0)$$

$$= 0 \quad (X \leq 0)$$

Note X is the volumetric strain (compression positive)

モデル化としては、いろいろな方向のせん断ばねを考える

Physical image of the multi-mechanism shear model (Multi-spring model)

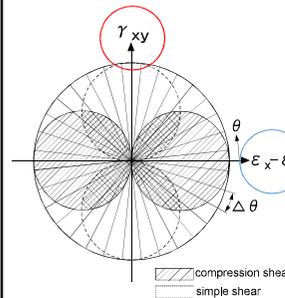


After Towhata and Ishihara, 1985.

単純せん断の方向の応力と、軸差せん断の方向の応力に各ばねの反力を、三角関数を用いて配分しているわけですね。

Integration of the spring behavior

To the overall behavior (details are in the references)



$$\tau_{xy} = 2 \sum_{i=1}^{2n} F(\gamma_{\theta_i} + (\gamma_{\theta_i})_{st}) \sin \theta_i \Delta \theta$$

$$\frac{\sigma'_y - \sigma'_x}{2} = 2 \sum_{i=1}^{2n} F(\gamma_{\theta_i} + (\gamma_{\theta_i})_{st}) \cos \theta_i \Delta \theta$$

Stress from strain

ここまでは、a) 多重せん断ばねモデル
 必要なパラメータは下記の通り：大事なのは、
 密度、（ある拘束圧の時の）剛性、強度、減衰定数

Summary of parameters

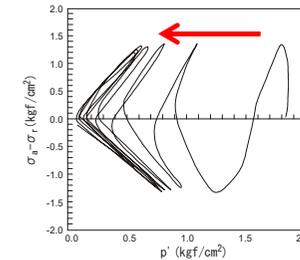
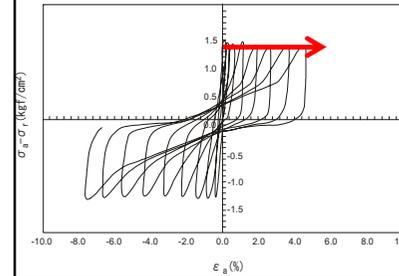
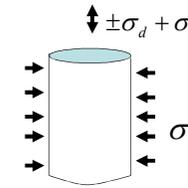
Type	Parameters	
Physical property	ρ_t	Density
	n	porosity
Dynamic property	σ_{ma}'	Effective confining stress for G_{ma} , K_{ma} (reference value)
	G_{ma}	Initial shear stiffness (at $\sigma_m' = \sigma_{ma}'$)
	K_{ma}	Bulk modulus (at $\sigma_m' = \sigma_{ma}'$)
	m_G	Dependency of confining effective stress for G_0
	m_K	Dependency of confining effective stress for K_0
	ϕ_t'	Friction angle
	C	Cohesion
	h_{max}	Maximum value of hysteresis damping ratio

$$G_0 = G_{ma} (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{m_G}$$

$$K_0 = K_{ma} (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{m_K}$$

一般の液状化試験：繰り返し三軸試験

Liquefaction test:
 i.e. triaxial cyclic shear test

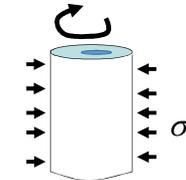


FEMにもとづく液状化解析プログラム（ここではFLIP）
 の耐震設計実務への応用の理解のために
 （少し基本からの説明になります）

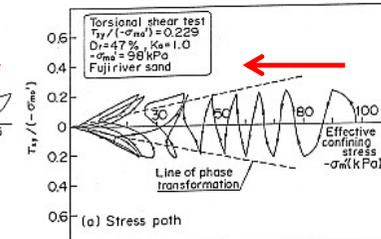
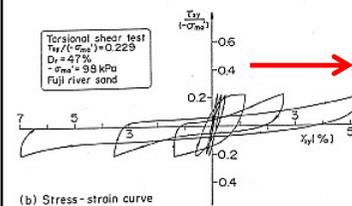
- 1) 液状化とは？
- 2) FLIPにおける液状化現象のモデル化
 - a) 多重せん断ばねモデル
 - b) 同上 + 旧井合モデル
 (マルチスプリングモデル)
 - c) 同上 + 新井合モデル
 (カクテルグラスモデル)
- 3) FEMでの定式化と境界条件

液状化試験ですが、中空ねじり試験の方が
 左右のせん断（図では、上下方向が）対称できれいかな

Liquefaction test:
 i.e. torsional hollow cylinder
 shearing test

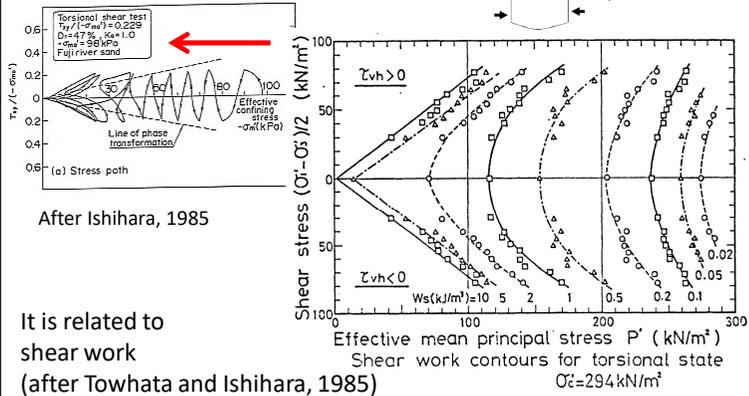


After Ishihara, 1985



仕事（エネルギー）に応じて、有効応力が減少する

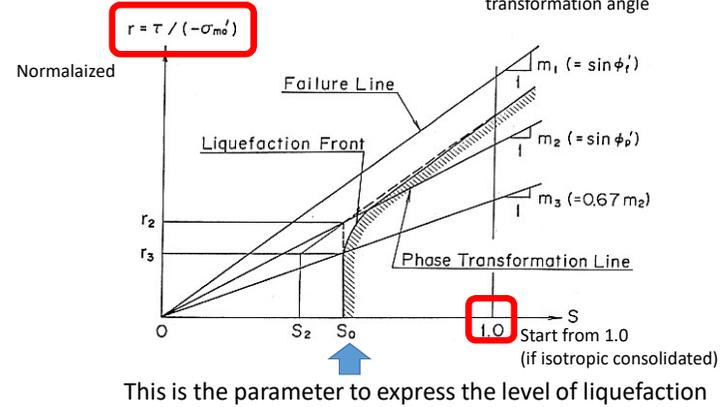
How effective stress decrease...



It is related to shear work (after Towhata and Ishihara, 1985)

多重せん断ばねモデルに、このダイレイタンスモデル（液状化モデル）を組み込んだものを、FLIPユーザーはマルチスプリングモデルと呼ぶ

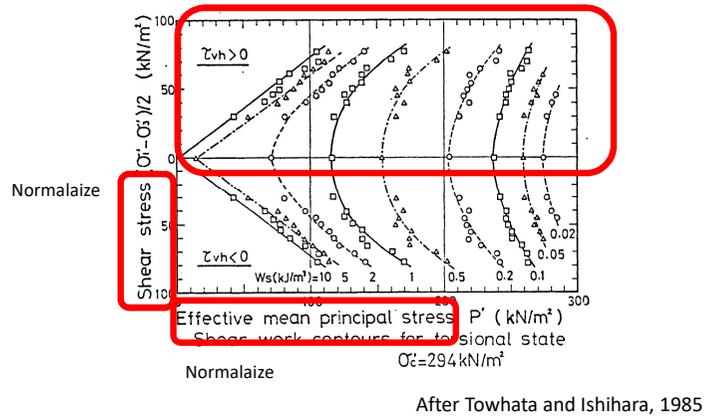
lai model (1990)



モデル化の基本は、無次元化、と単純化？

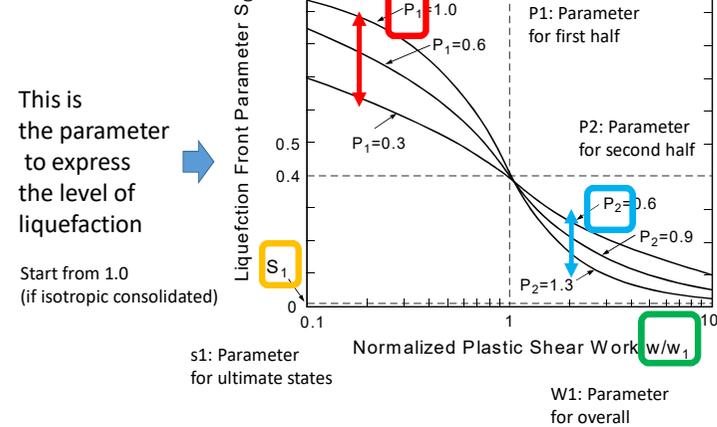
Focused on the test data

Only the upper half is enough



仕事（エネルギー）wを、パラメータw1で基準化し、液状化の進行をモデル化。極限值s1の設定などもポイント

lai model (1990)



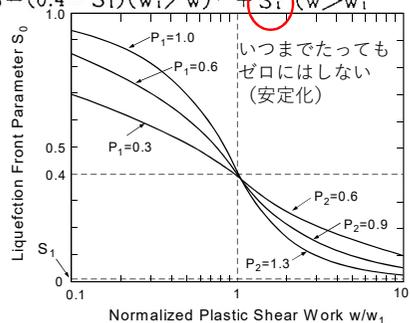
This is the parameter to express the level of liquefaction

lai model (1990): in Equation

The relationship between normalized plastic shear work (w/w_1) and liquefaction front parameter (S_0)

$$S_0 = 1 - 0.6(w/w_1)^{P_1} \quad (w \leq w_1)$$

$$S_0 = (0.4 - S_1)(w_1/w)^{P_2} + S_1 \quad (w > w_1)$$

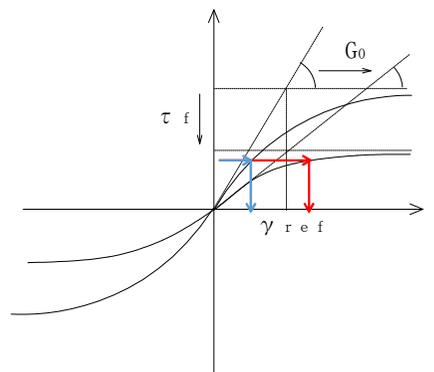


いつまでたっても
ゼロにはしない
(安定化)

有効応力に応じて、剛性も強度も低下 => ひずみの増加

lai model (1990):

Reduction of effective stress => change in backbone curve
=> Larger strain



Confining pressure dependency of initial shear stiffness G_0
 $G_0 = G_{ma}(\sigma'_m/\sigma'_{ma})^{m_g}$

Shear strength
 $\tau_f = \sigma'_m \sin \phi'_f$

Confining pressure dependency of bulk modulus K_0
 $K_0 = K_{ma}(\sigma'_m/\sigma'_{ma})^{m_k}$

実際の応力状態は、せん断応力の値に依存する。
=> サイクリックモビリティのモデル

lai model (1990): in Equation

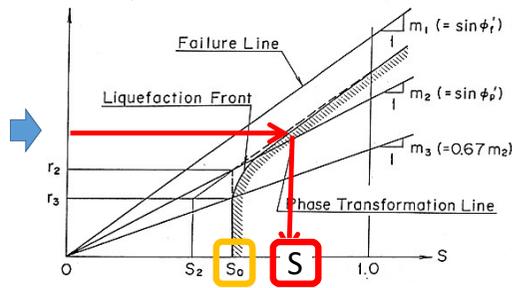
The relationship between normalized plastic shear work (w/w_1) and liquefaction front parameter (S_0)

$$S_0 = 1 - 0.6(w/w_1)^{P_1} \quad (w \leq w_1)$$

$$S_0 = (0.4 - S_1)(w_1/w)^{P_2} + S_1 \quad (w > w_1)$$

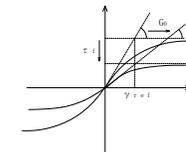
$$r = \tau / (-\sigma'_m)$$

Shear stress at the element



計算の安定化の工夫も多少はあります。

lai model (1990): in Equation



Liquefaction status parameter (S) and shear strength (τ_m), initial shear stiffness (G_m)

$S_0 > 0.4$ の時

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot S, \quad G_m = \tau_m / \gamma_{m0}$$

$S_0 < 0.4$ の時

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot S + \Delta \tau_m, \quad G_m = \tau_m / \gamma_m$$

ここに、 Δ where $\Delta r_m \cdot \sigma'_{m0}$

$$\Delta r_m = (m_1 - m_2) \cdot (0.4 - S_0)$$

$$\gamma_m = \gamma_{m0} / (S_0 / 0.4)$$

Technique for Numerical stability

与えたエネルギーは仕事から求めるが、弾性部分は除く

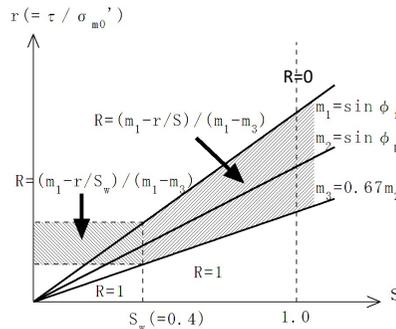
Iai model (1990): Shear work

$$W_s = \sum R \cdot \Delta W_s$$

$$\Delta W_s = \Delta W_{st} - C_1 \cdot \Delta W_{se}$$

W_s : Accumulated plastic shear work
 ΔW_s : Increment of plastic shear work
 ΔW_{st} : Increment of total shear work
 ΔW_{se} : Increment of elastic shear work

c_1 : Parameter for elastic threshold

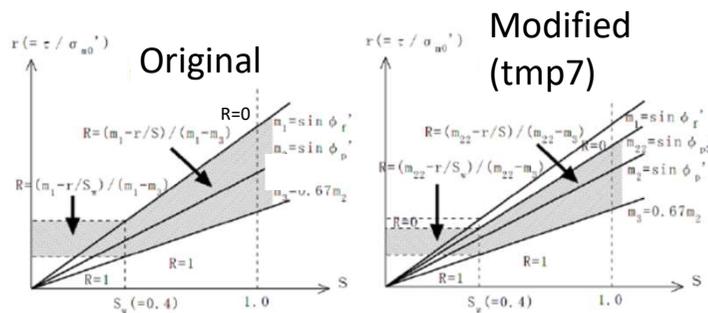


ここまでは、b) マルチスプリングモデル
 必要なパラメータは液状化の特性を決めるもの
 モデル依存なので、土質試験結果からすぐには求まらない
 (液状化試験結果を再現できるようにフィッティング)

Summary of parameters

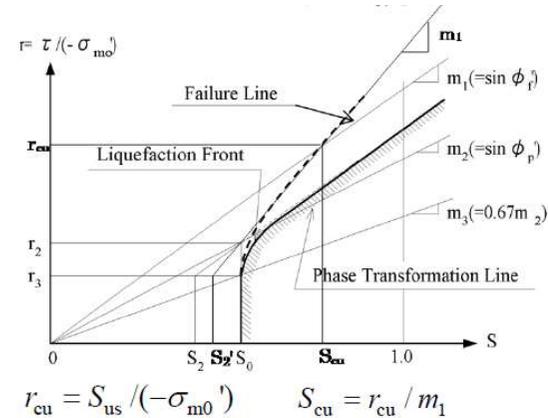
Type	Parameters	
Property for liquefaction	ϕ_p'	Phase transformation angle
(dilatancy)	w_1	Parameter for dilatancy in general
	p_1	Parameter for dilatancy in the first half
	p_2	Parameter for dilatancy in the second half
	c_1	Parameter for the threshold stress level for liquefaction
	S_1	Parameter for the limit status in liquefaction

構成側には改良が加えられているので、
 どのバージョンを用いたかが、かなり重要
 (プログラムのバージョンでなくオプションスイッチの選択)



もうひとつ、大きな構成側の改良がありました。

Additional recent modification: S_{us} for steady states



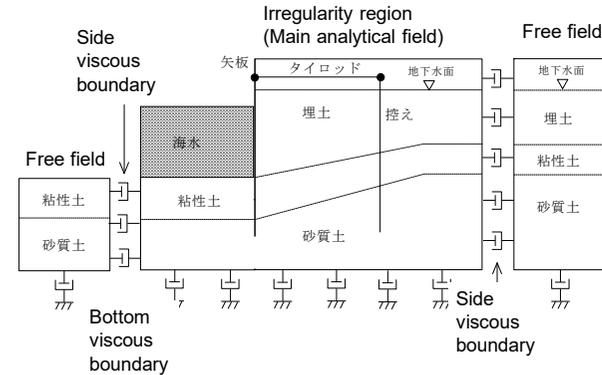
$$r_{cu} = S_{us} / (-\sigma_{m0}')$$

$$S_{cu} = r_{cu} / m_1$$

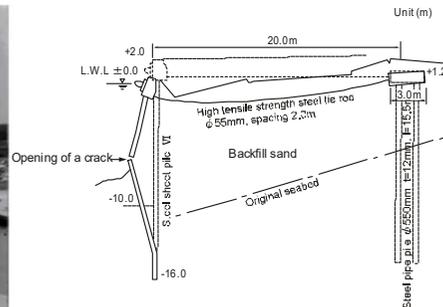
FEMにもとづく液状化解析プログラム（ここではFLIP）の耐震設計実務への応用の理解のために（少し基本からの説明になります）

- 1) 液状化とは？
- 2) FLIPにおける液状化現象のモデル化
 - a) 多重せん断ばねモデル
 - b) 同上 + 旧井合モデル (マルチスプリングモデル)
 - c) 同上 + 新井合モデル (カクテルグラスモデル)
- 3) FEMでの定式化と境界条件

解析領域に分割し、底面や側方の境界をセットしますね
 一般には、粘性境界を用います。



ターゲットとして、とりあえず、岸壁があるとします



せつくなので、底面の境界の考え方です。
 ただし、波動伝播の式の誘導は省略

At bottom

$$u_1 = E_1 e^{i\omega \left(t - \frac{y}{V_s} \right)} + F_1 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)}$$

$$u_2 = E_2 e^{i\omega \left(t - \frac{y}{V_s} \right)} + F_2 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)}$$

上昇波がE, 下降波はFで表されています。

Bedrock 2

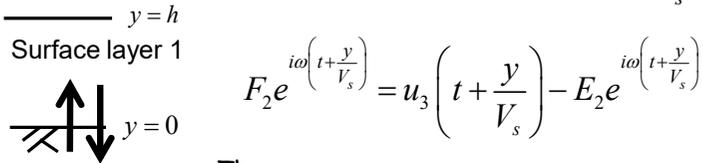
At time t, at the bottom interface, displacement is assumed as $u_3(t)$

Since $y = 0$,

$$u_3(t) = E_2 e^{i\omega t} + F_2 e^{i\omega t}$$

底面の変位はこんな式

Thus, the downward motion at interface, at time $t + \frac{y}{V_s}$



$$F_2 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)} = u_3 \left(t + \frac{y}{V_s} \right) - E_2 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)}$$

Thus,

$$u_2 = E_2 e^{i\omega \left(t - \frac{y}{V_s} \right)} - E_2 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)} + u_3 \left(t + \frac{y}{V_s} \right)$$

Obtain the shear strain by differentiate it.

時間を少しずらして、底面のちょっと下の変位 u_2 ，をもとめてから、微分すると、せん断ひずみになります。

Thus, the shear strain

$$\gamma_2 = -\frac{\partial u_2}{\partial y} = \frac{1}{V_s} \dot{E}_2 e^{i\omega \left(t - \frac{y}{V_s} \right)} + \frac{1}{V_s} \dot{E}_2 e^{i\omega \left(t + \frac{y}{V_s} \right)} - \frac{1}{V_s} \dot{u}_3 \left(t + \frac{y}{V_s} \right)$$

Note, $\dot{E}_2 = E_2 \times i\omega$ せん断ひずみからせん断応力を求めると、上昇波だけで決定可能

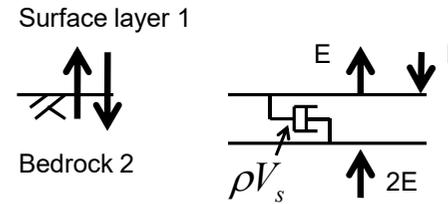
Thus, the shear stress at interface (y=0)

$$\tau_3 = G\gamma_2 = \rho V_s \left(2\dot{E}_2 e^{i\omega t} - \dot{u}_3(t) \right)$$

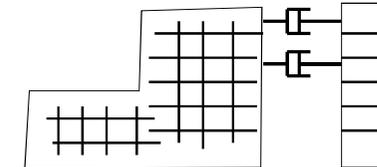
This is a shear stress proportional to velocity.

This is equivalent to the condition with 適切なダッシュポット a dashpot of a coefficient ρV_s (速度比例の力) を設定すれば応力が一致 and input the motion of 2E from downward.

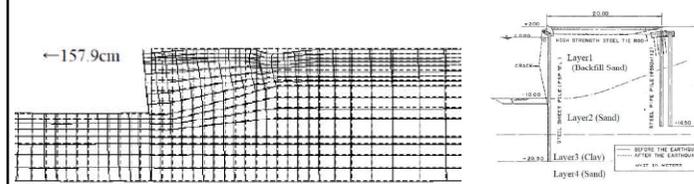
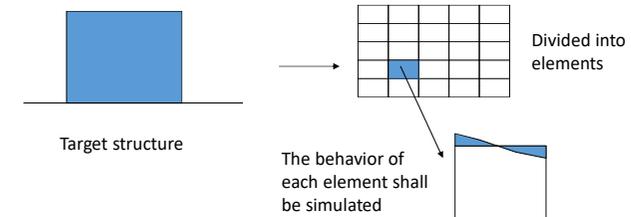
この考え方を、側面にも適用していますが、波が鉛直に入るかなど、疑問は一杯、のこります。そういう意味で、V&Vとしても難しい点

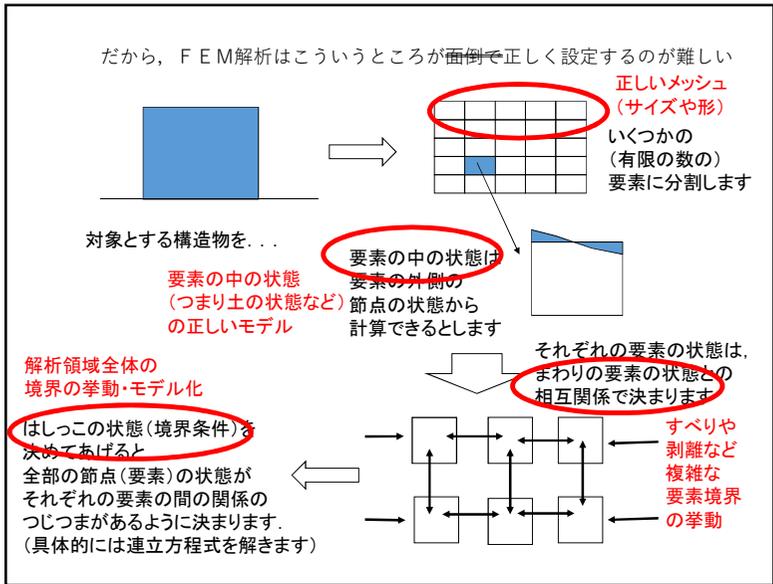
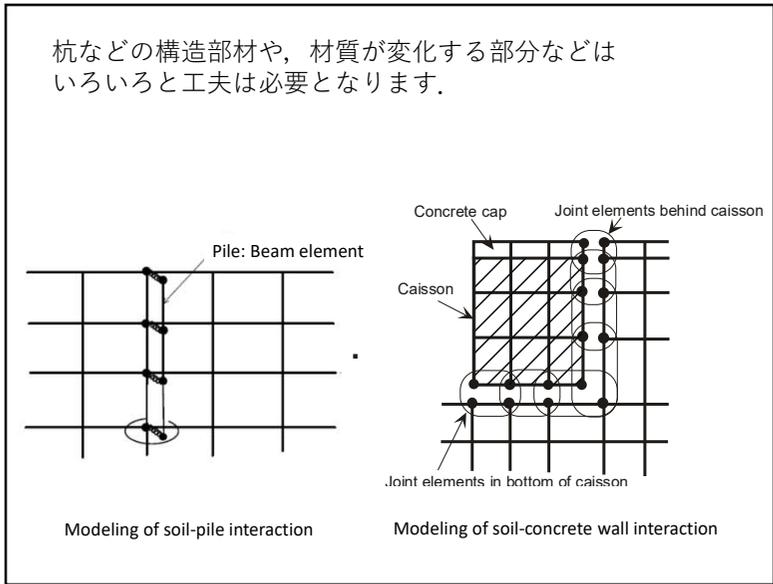
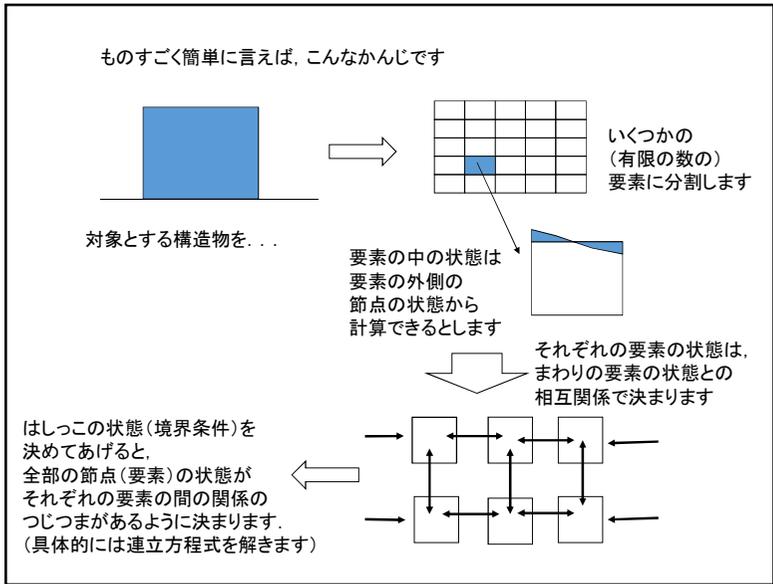


In many case, side boundary is also modeled in same way



教会で囲まれた内側は、小さい要素に分割し、それぞれの要素の挙動が計算できればその足し合わせのような形で、全体の挙動がわかります。





本日の内容

- (1) 広島を離れてもう5年、なので自己紹介
- (2) V&Vの必要性を、東日本から10年なので耐震設計の発展の流れから振り返る.
- (3) V&Vの手順(ガイドライン)の紹介

休憩

- (4) V&Vの事例の理解のための液状化解析プログラムFLIPの構成側の早わかり解説
- (5) FLIPのV&V事例の紹介

<なぜ、妥当性確認と検証なのか？>

1) 1995年兵庫県南部地震以降に耐震性能に基づく耐震設計手法が実務に取り入れられてきた。

2) しかし、耐震設計の実務に既に導入されているにもかかわらず、動的解析の妥当性（あるいは精度）が定量的に議論された例はあまりない。もちろん、被災事例や無被災事例、模型実験結果などが良好に再現できることを確認した上で実務設計に用いていることが原則となっている。しかし、既往の事例を良好に再現できることは妥当性確認の一部であり、将来の地震発生時の挙動を両王に評価できるかどうかは予測性能の問題であって、予測性能まで含めた妥当性確認の手順や妥当性評価の指標は確立されていない。

=>つまり、良い再現解析結果が発表されていても、未来の予測に使えるという保証は（保証の方法も示されていないので）どこにもない。

3) なお、技術者へのアンケートから、計算プログラムというよりユーザーの技術者の能力等が計算結果に大きく影響を及ぼすと考えられている。

論文は、応用力学論文集に掲載されています。

耐震設計に用いる 杭の支持力モデルの検証方法の検討

東電設計 ○兵頭 順一
関西大学 一井 康二

99

<妥当性確認と検証とは？>

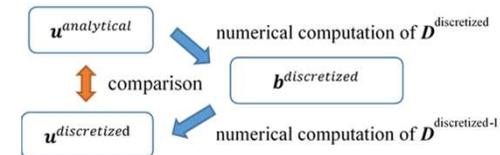
- 検証**：数値モデルが、その基礎となる数理モデルを忠実に表現し、かつ数値モデルの解をデジタル計算機の性能の範囲において導くことを確認する実施プロセス
- 妥当性確認**：解析モデルがその再現性と予測性能から、対象とする実現象の数値解析結果が所期の利用目的に照らして満足できる幅で予測できることを確認するための実施プロセスと定義する

上記はガイドラインとして作成中の案における表現
・・・明確に定義しているつもりだが、事例がないとやはりわかりにくい

1. はじめに

▶近年では、数値解析の検証（Verification）として、創成解を用いる検討が提唱されてきている。堀は創成解や数値創成解の考え方を提唱している。数値創成解は以下のように定義している。

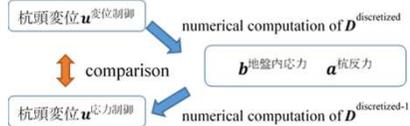
1. 離散化された支配方程式に、離散化された変位を代入し、離散化された物体力を計算する。この離散化された物体力を既知として数値解析を行い、「設定した離散化された変位が復元されるか否か」を調べることで、解析手法の検証を行う。
2. 変位と物体力に離散化された関数を使うため、“数値創成解”と呼ぶこととする。



100

2. 本研究における考え方

- 杭の支持力モデルの検証方法 (Verification) は決まった方法がない。
- 本研究では、数値創成解の考え方に準じた杭の支持力モデルの検証方法 (Verification) の検討を実施する。
- 杭頭に変位として载荷する場合と荷重として载荷する場合の解析を実施して、両者の荷重変位関係の比較を行う。

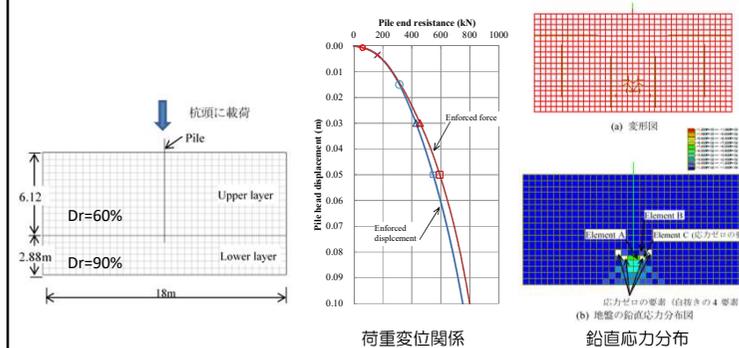


- ① 杭の押し込み試験 (杭先端の荷重変位関係に着目する)
- ② 解析は二次元有限要素法解析を用いる。
- ③ 解析モデルは杭は線形はり要素、地盤は平面ひずみ要素でモデル化する。

3. 完全排水条件下の杭の押し込み試験のシミュレーション

(2) 解析結果

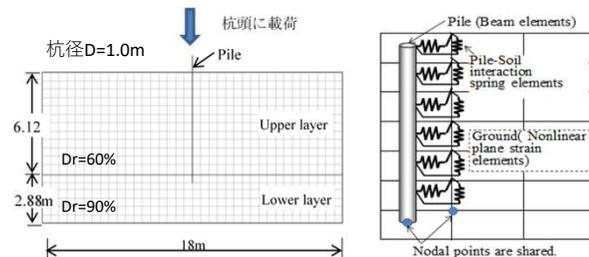
- 変位制御と荷重制御による杭の荷重変位関係は一致しなかった。
- 地盤内に引張破壊が生じており、応力がゼロとなる要素が生じていることが要因だと考えられる。



3. 完全排水条件下の杭の押し込み試験のシミュレーション

(1) 解析条件

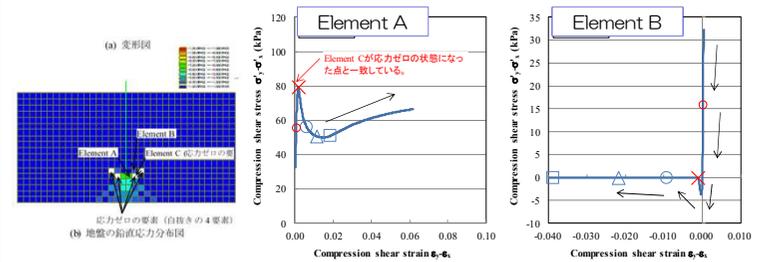
- 解析は完全排水条件で、杭頭からの载荷方法が変位制御と荷重制御の2種類の検討を行った。
- 地盤は上層($Dr=60%$)と下層($Dr=90%$)の2層構成とした。
- 杭先端のモデルは、杭と地盤の節点を共有する一般的な方法とした。
- 杭の周面摩擦力の非線形ばね要素や水平方向の相互作用をモデル化する杭-地盤相互作用ばね要素は考慮しない。



3. 完全排水条件下の杭の押し込み試験のシミュレーション

(2) 解析結果

- 隣接するElement AとElement C (応力がゼロ) の比較を行った。
- Element Cで引張破壊(×)が生じると、応力がゼロとなり任意のひずみの値をとる。同時に隣接するElement Aが負担する応力が減少する。
- よって、解の唯一性が担保されず、本ケースは解析コードの検証が困難な事例である。



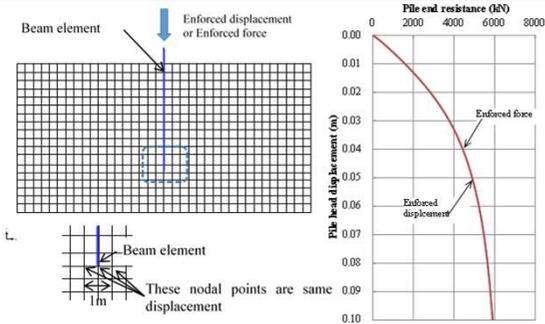
鉛直応力分布

軸差応力ひずみ関係 (変位制御の例)

4. 杭先端に拘束条件を与えた場合の杭の押し込み試験

(1) 杭先端に拘束条件を与えた場合の解析 (その1)

- 数値創成解で検証可能な事例を検討するために、杭先端の杭の節点と地盤の節点の動きを同一とする拘束 (変位拘束) を設けた解析を実施した。
- 変位制御と荷重制御による杭の荷重変位関係は一致した。
- 多点拘束は変位の拘束条件を与えることになり、数値創成解の考え方とは合っていない。



105

検証 (Verification) とは、計算が正しく行われていることの確認プロセス (で、この事例はコード検証の事例、かな?)

■**コード検証 (Code verification)** : 概念モデルを表す数理モデルを計算機プログラムに変換するための数値モデルに用いる数値手法 (空間・時間離散化, 解析アルゴリズム, 収束判定など) がプログラムとしてデジタル計算機に適切に実装していることを確認するためのプロセス。

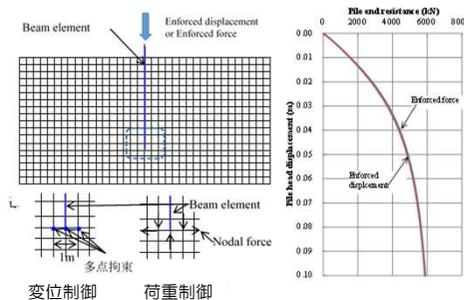
- 検証が既に行われている解析コード (ABAQUS, ADINA など) との比較 (第2編2章検証事例2.1)
- 理論解との比較 (第2編2章検証事例2.1)
- 創成解による検証 (付属書 (参考) C, 第2編2章検証事例2.2)

■**解析検証 (Calculation verification)** : 入力データに対して所定の出力が得られていることおよび出力結果の精度について確認するプロセス (第2編2章検証事例2.3, 2.4)

4. 杭先端に拘束条件を与えた場合の杭の押し込み試験

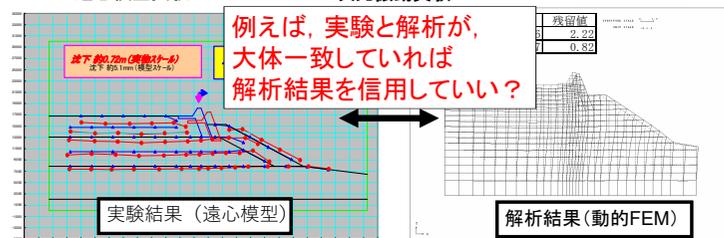
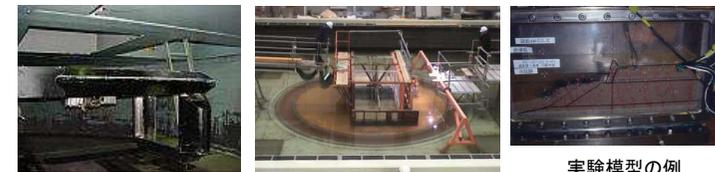
(2) 杭先端に拘束条件を与えた場合の解析 (その2)

- 杭先端の杭の節点と地盤の節点の動きを同一とする拘束に関して、変位制御の場合は変位拘束を、荷重制御の場合には節点力による拘束を設けた解析を実施した。
- 変位制御と荷重制御による杭の荷重変位関係は一致し、収束性もよい結果となった。

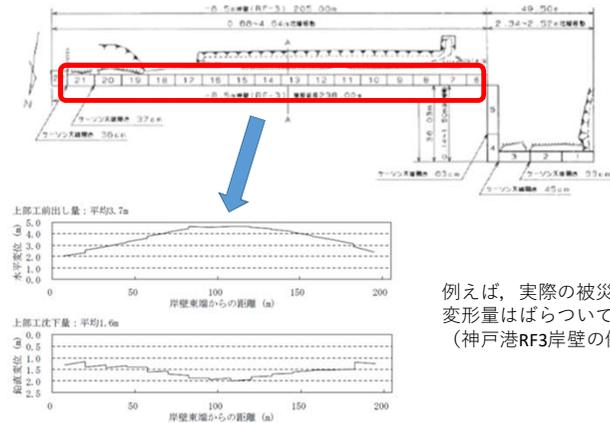


106

設計に用いる解析コードの妥当性確認 (Validation) (計算結果が意味のある値かどうか)



妥当性確認 (Validation) は難しい
(被災の実測値もばらつく. いわんや実験値?)



例えば, 実際の被災事例でも
変形量はばらついている
(神戸港RF3岸壁の例)

<ガイドライン (案) の流れと, 事例>

第1編 ガイドライン

本事例 (岸壁での検討事例) の内容

- | | |
|---------------------|------------------|
| 1. 適用範囲 | |
| 2. 用語 | |
| 3. 検証と妥当性確認の基本方針 | ①指標が必要! |
| 4. 評価指標 | ②定量化の手法 |
| 5. 不確かさとその定量化 | ③コード検証 |
| 6. 検証 | |
| 7. 妥当性確認 | |
| 7.1 初期構造・材料特性の妥当性確認 | ④初期構造
材料特性 |
| 7.2 全体解析モデルの妥当性確認 | ⑤全体解析モデル
予測性能 |
| 8. 評価過程の文書化 | |
- 付属書: 参考
1. 解析手法と数値・数理モデルについて
 2. 創成解について
 3. 再現性と予測性能について
 4. 不確かさの評価と定量化

< (個人的な?) 妥当性検討の背景 >

1995年兵庫県南部地震以降に耐震性能に基づく耐震設計手法が実務に取り入れられてきた。

しかし, 耐震設計の実務に既に導入されているにもかかわらず, 動的解析の妥当性 (あるいは精度) が定量的に議論された例はあまりない。

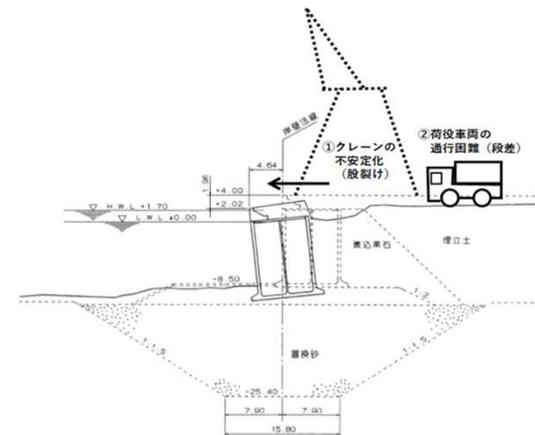
それでも, それまでの方法よりはマシ, と思って導入したけど, 本当だろうか?

とうことを, 検証しておきたい。

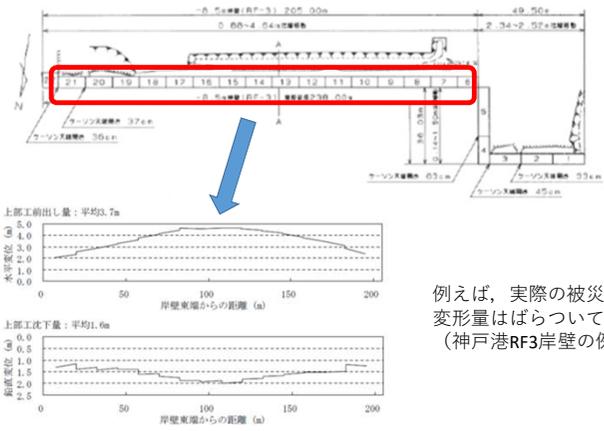
ということもあり, 最新の解析プログラム (FLIPにおけるカクテルグラスモデル要素の利用など) ではなく,

既往の検討事例 (FLIPにおけるマルチスプリングモデル要素) の再編集として事例を検討した。

①指標が必要! : 性能設計なら, 性能規定の指標
ケーソン式岸壁の性能設計なら, 天端の変位 (水平, 沈下)



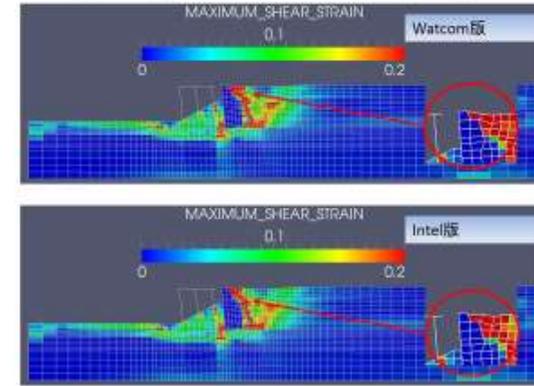
② 定量化の手法：累積分布関数を求めて、ASMEの指標



例えば、実際の被災事例でも
変形量はばらついている
(神戸港RF3岸壁の例)

③ 設計に用いる解析コードの検証事例 (Verification)

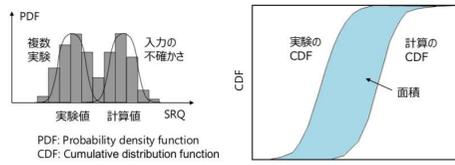
(同じプログラムでも、コンパイラが違っただけで
最適化の手順が異なり、結果が異なる場合がある
・・・つまり、パソコンの進化で
過去の解析結果が全く同じには再現できない場合もある)



② 定量化の手法：累積分布関数を求めて、ASMEの指標

6.4 ASME V&V10.1-2012のV&V事例

◇ 確率密度分布, 累積確率密度分布と M^{SQR}

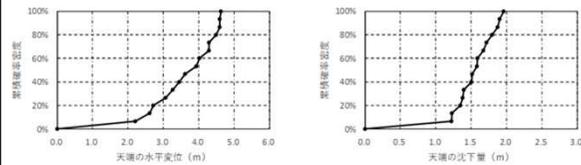


**M^{SQR} : システム応答量の
計測基準
この指標は平均の相対
誤差をほぼ正確に表し
ている。**

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

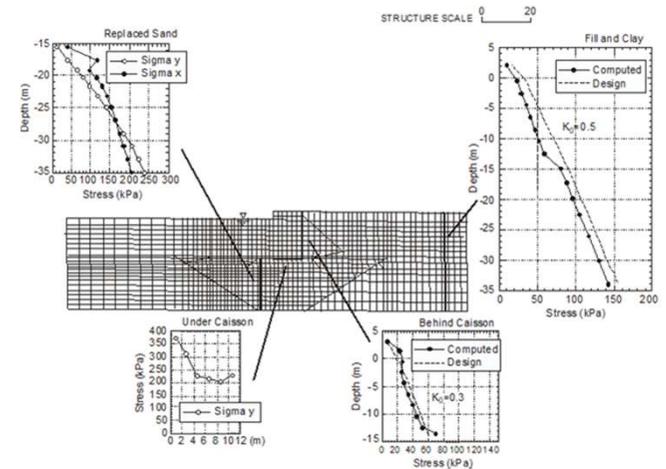
System Response Quantity
|SRQ^{exp}| is the mean of the experimental outcomes

M^{SQR} はCDFが同じ時に、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絶対値の最小期待値。
 F_{SRQ} is CDF of SRQ(system response quantity)

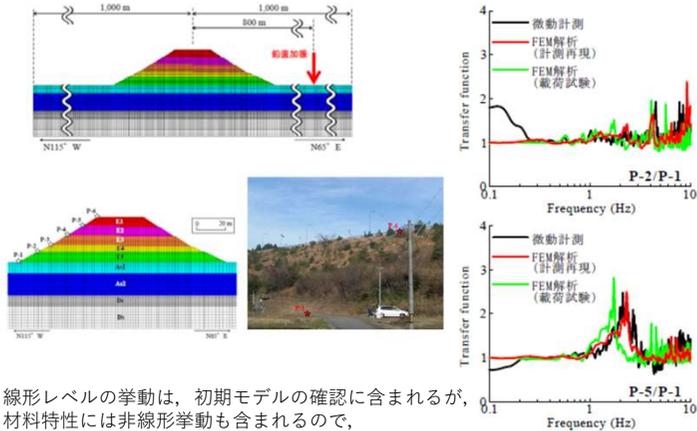


**実事例
(RF3岸壁)
のCDF**

④ 初期構造：土圧分布などで妥当性を確認
矢板式岸壁などでは施工過程による応力分布の違いが影響する



④材料特性：微動計測結果の再現などで妥当性を確認



線形レベルの挙動は、初期モデルの確認に含まれるが、材料特性には非線形挙動も含まれるので、非線形のレベルになると、全体解析モデルの妥当性確認の範囲になってくる。

いろいろなケースで解析を行った結果の例

	ケーソン 上部工 前出し量 (cm)	ケーソン 上部工 沈下量 (cm)	ケーソン 底部 前出し量 (cm)	ケーソン 残留回転角 (度)	ケーソン 背面上部 地表面段差 (cm)
ケースA	371/541	149/251	343/462	1.22/3.39	0/0
ケースB	240/264	55/58	160/174	3.46/3.84	86/63
ケースC	285/308	63/71	192/212	3.99/4.12	107/69
実測値(最大値)	464	198	238	6.4	200
実測値(平均値)	370	158	—	3.1	—

- ※1 一つのセルの二つの値は、左側が $\beta=0.002$ 、右側が $\beta=0.001$ に対応する。
- ※2 回転角は、ケーソン頭部が海側に傾くのを正とする。
- ※3 実測値は、図 3-1-1-4 に示す No.7~No.21 ケーソンでの最大値と平均値。
- ※4 ケーソン背面上部地表面段差の実測値は図 3-1-1-3 から読みとった値。

レーレー減衰の値により、変形量は大小 => 上限と下限?

ケースCがおすすめモデル => ケースAやケースBはどう扱う?

⑤計算結果の不確定さの要因の検討例

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. 変相線を越えた応力空間におけるせん断仕事の負のダイレ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-地盤相互作用系のモデル	境界条件の位置や杭-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

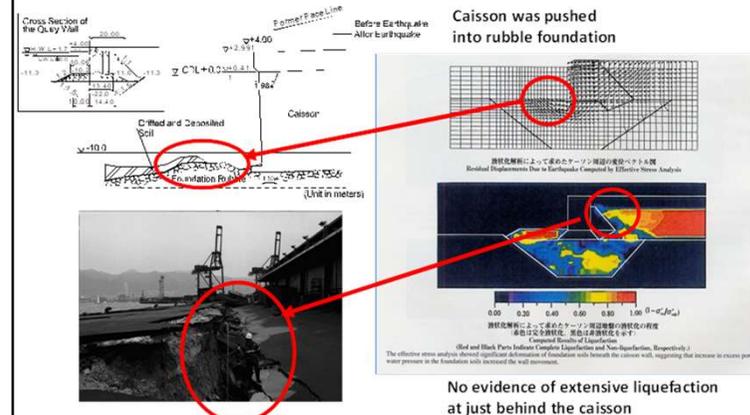
これは構成式の改良を検討した事例なので、ベストな解析条件とは思えないケースも含む

まあ、普通はベストと思われる解析条件で(あたらしいモデルで)計算しますね。

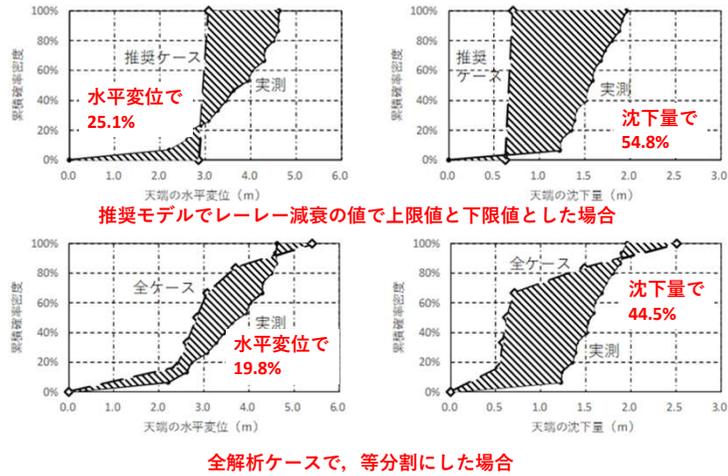
- 検討項目は例えば、
- ・モデルの違い
 - ・パラメータのばらつき(レーレー減衰など一意に決まらないパラメータ)
 - ・そもそもの地盤のばらつき
 - ・3次元的な形状の影響

全部を考慮できるわけでもない

⑤全体解析モデル：変形モードの確認は言わずもがな

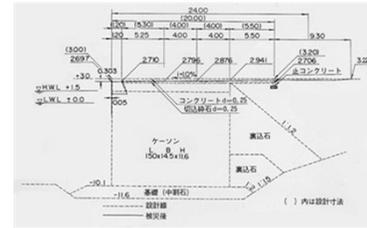


ASMEの指標の値：M^{SQR}の計算



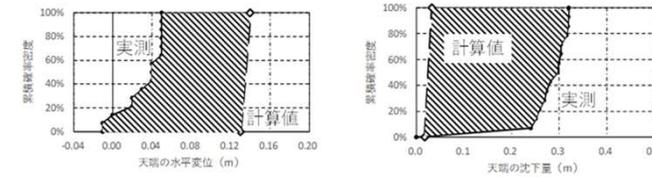
⑤全体解析モデル：予測性能の議論

もちろん、無被災事例による検討も実施する。

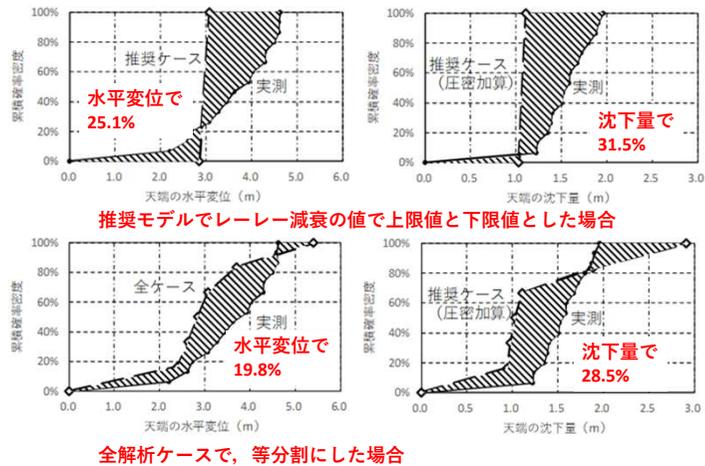


Case	天端の水平変位 (m)	天端の沈下量 (m)	傾斜角 (度)
ケースA	0.14	0.033	0.13
ケースC	0.13	0.018	0.06
観測値	-0.01~0.05	0.24~0.32	微小

ASMEのM^{SQR}だと、水平変位で321.4%、沈下量で93.1%。もともとの観測値の値が小さいため、極めて大きな誤差

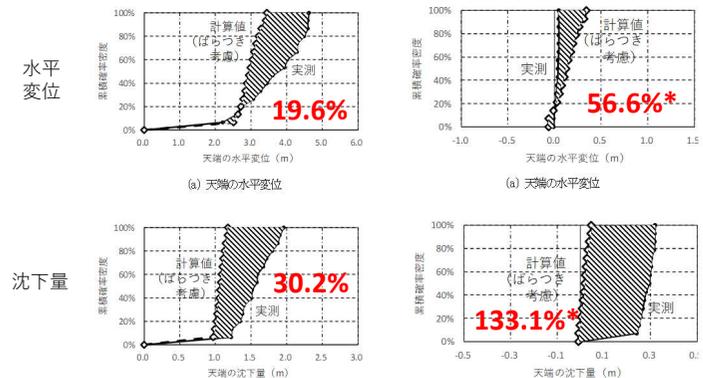


M^{SQR}の計算（排水沈下量を修正）



⑤全体解析モデル：・・・まとめると予測性能はこれぐらい？
(安全性評価で、20~30%、使用性評価で、50~150%*)

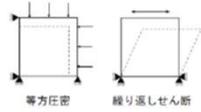
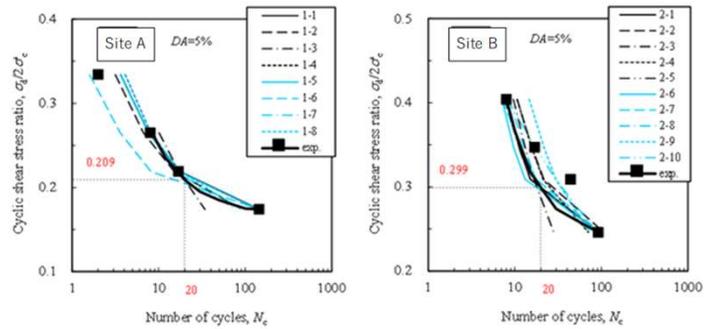
* 平均値を使用性評価の限界値として算定した値



神戸港岸壁 (a) 天端の水平変位
(被災事例：安全性評価)

釧路港岸壁 (b) 天端の沈下量
(無被災事例：使用性評価)

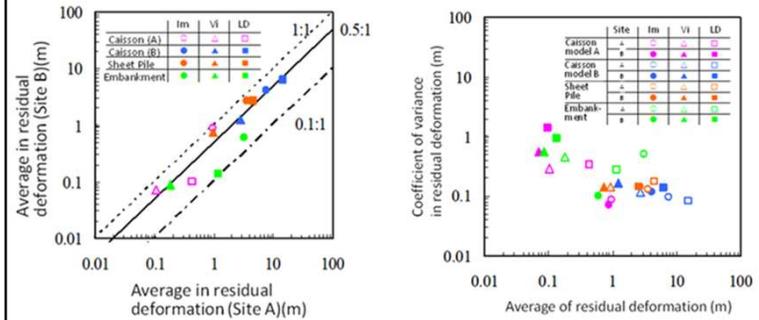
予測性能は技術者によるんじゃないの？



1要素の解析で、要素試験を再現
液状化強度の小さなSiteAと、大きなSiteBの違いを再現
ただ、技術者(8~10人)により再現の程度が異なる。

⑤全体解析モデル：予測性能の議論

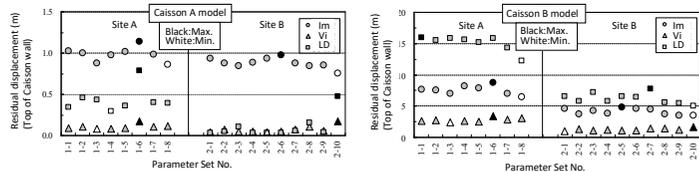
いろいろと条件が変わった時にどうなるかということ



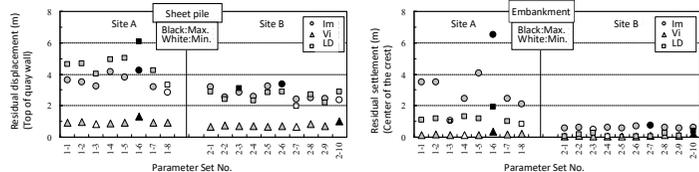
地盤条件が変わると変形量は変わる

技術者の設定したパラメータのばらつきによる影響を
変動係数で評価した場合

妥当性確認 (Validation) は難しい
(同じプログラムを、いろいろな人が試した場合)

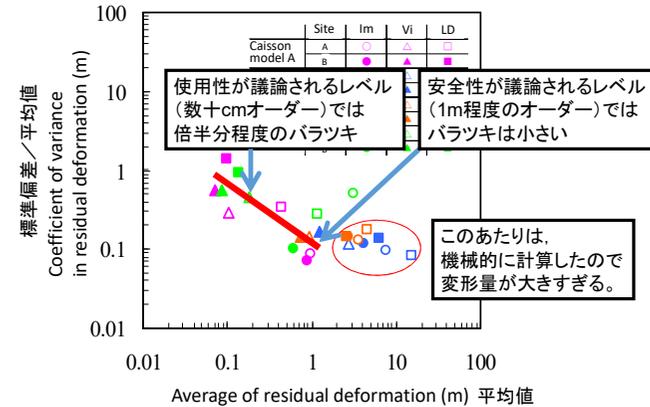


(a) Variation in caisson wall model (A model) (b) Variation in caisson wall model (B model)



(c) Variation in caisson wall model (A model) (d) Variation in caisson wall model (B model)

妥当性確認 (Validation) は難しい
(ばらつきを含めた比較へ：技術者の違いの例)



議論される変形量のレベルに応じてバラツキの大きさが異なる。
=> 危機耐性では、バラツキが大きすぎて、定性的

動的解析を使わない方法として、経験式（上部，1983）

の結果と比較しました。

$$K_e = \frac{a_{\max}}{g} \quad a_{\max} < 0.2g$$

まず、最大加速度から作用震度を計算します。

$$K_e = \frac{1}{3} \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad a_{\max} \geq 0.2g$$

そして、作用震度と設計震度の比を危険度 F_c として、

水平はらみだし量（水平変位）と沈下量を計算します。

$$\text{水平はらみ出し量(cm)} \quad D_x = -113.8 + 124.4F_c$$

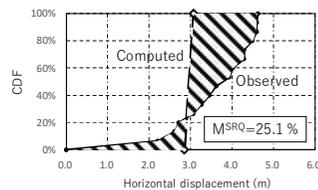
$$\text{沈下量 (cm)} \quad S_p = -50.9 + 57.1F_c$$

本日のまとめ

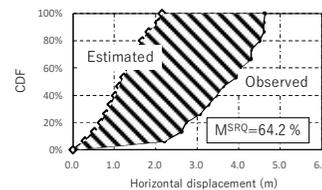
- (1) 広島を離れてもう5年、早いですね
- (2) V&Vと、危機耐性が大きな変化、かな.
- (3) V&Vのガイドライン、買ってね

休憩

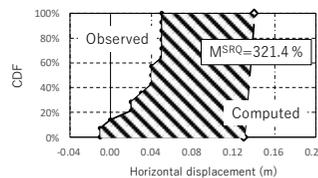
- (4) FLIPには体験版もあるよ
- (5) 事例の蓄積と、その議論が大事な



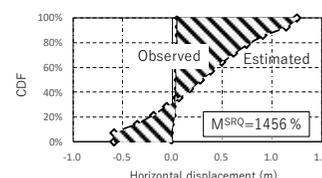
動的解析（被災事例）



経験式（被災事例）



動的解析（無被災事例）



経験式（無被災事例）

この例では経験式のほうが実測値との乖離が大きいと評価された。

ご期待に添える話だったか分かりませんが、ご清聴ありがとうございました。

これからも、関西大学社会安全学部をよろしくお願ひします。

