

土木学会地震工学委員会
令和元年度 第2回研究会

浅い基礎の沈下に着目した大型液状化実験 のブラインド解析とコンテスト優勝の報告

2019年8月21日（水） 13:40～14:15

東電設計株式会社 溜幸生

はじめに（1）

- **（動機）**以前より実務解析の予測精度を確認したい。
- **（目的）**2018年10月、米国太平洋地震工学研究センター主催のブラインド解析コンテストの開催を知り、予測の精度を客観的に把握することを目的として参加。
- **（結果）**優勝。2019年1月、The Winner として表彰される。

- コンテストの概要
- 浅い基礎のブラインド解析
- 優勝の要因 など

コンテストの概要

ノーベル賞受賞者数: 31名

ノーベル賞: 39名

Engi

コンテスト主催者

- 米国太平洋地震工学研究所 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, 以下“PEER”)。
- UCバークレーを筆頭とした、主にカリフォルニア州の大学による共同研究機関。
- 米国のみならず世界的に権威ある研究機関と言われる。

Berkeley
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Oregon State
University

UC DAVIS
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

UC Irvine

UCLA

USC University of
Southern California

Caltech

Stanford
University

UC San Diego

ノーベル賞: 17名

W
UNIVERSITY OF WASHINGTON



ブラインド解析の対象

- 大型液状化振動台実験
- 液状化地盤における浅い基礎(直接基礎)の沈下量
- プロジェクトそのものは、ヘリカルパイルの活用を目的。

Blind Prediction Contest 2018



2018 Blind Prediction
Contest

コンテストのルール概要

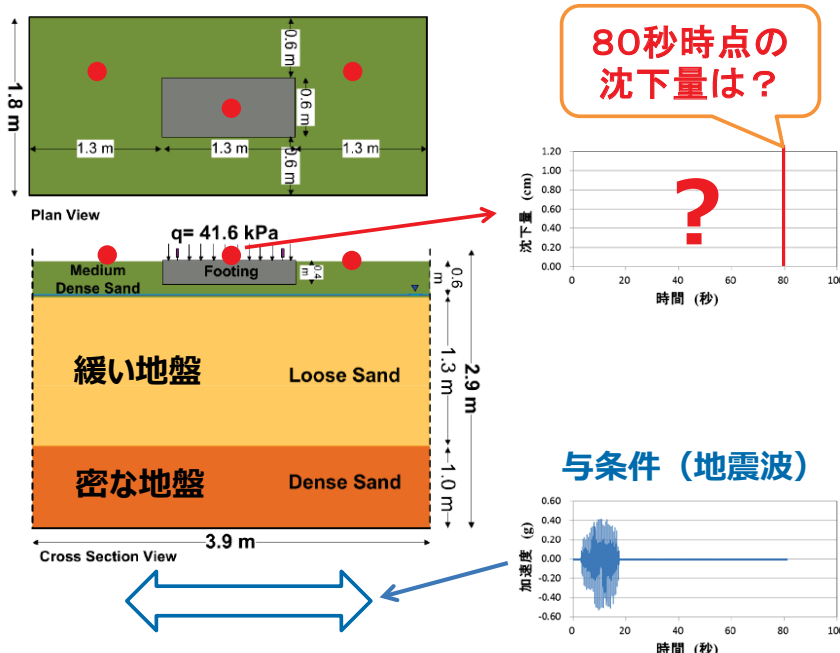
- 直接基礎を含む複数箇所の沈下量(Permanent Settlement)を解析により予測する。
- 参加者は、実務者、大学研究者(学生含む)、研究機関の研究者からのチーム。**外国からの参加も歓迎。**
- 入賞(3位)以外は、匿名で発表。
- 結果(順位)は、PEER Annual Meeting (UC Los Angeles)にて発表する(January 17-18, 2019.)
- 優勝チームの代表者には、旅費を支給する。

コンテストの期間等

- 2018年10月26日開始
- 質問は開始後10日間まで受付
- 2018年12月16日締め切り
- 所定の時刻歴デジタルデータと解析予測レポートを提出
- 期間: 1ヶ月と20日

コンテストの課題

- 2018年: 液状化による浅い基礎の沈下量予測



Building (Mat Foundation)
-70cm Settlement

Photo: Ashford et al., 2011

コンテストの課題

- せん断土槽の図面、仕様
- 地盤モデルの図面、仕様
- 土(オタワ砂)の物理・力学試験結果
- 博士論文、および、WEB掲載データのURL

コンテストの課題

- せん断土槽の図面、仕様

Laminar Soil Box:

The UCSD large-scale laminar soil shear box, shown in Fig. 1, has a height of 2.9 m, length of 3.9 m, and width of 1.8 m. The laminar soil box consists of 43 steel laminar frames to allow for unidirectional movement.

Each frame section is S3x5.7 (76.2 mm depth and the weight of the frame 83.2 N/m). One of the advantages of the laminar container is that each frame can move relative to the frames above and below it, thus minimizing boundary effect influence. As such, the bearing system of the container consists of 16 cold-rolled steel pipes rolling on stainless steel plates with 1.6 mm thickness. The weight of the steel frame is approximately 10 to 13 percent of the soil mass depending on the soil density. The total mass of the 43 frames is 4229 kg.



Fig. 1: Laminar Soil Box at UCSD Powell Laboratory (H2.9m×L3.9m×W1.8m)

コンテストの課題

- 地盤モデルの図面、仕様



Fig. 2: Model footing prior to placement and weights to replicate target contact pressure

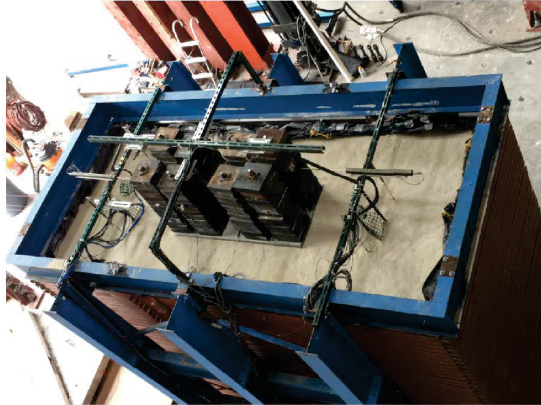


Fig. 3: Model ground prior to shaking

Table 1: Model soil properties

Soil Layer	Thickness (m)	Relative Density (%)
Layer #1	0.6	50
Layer #2	1.3	50
Layer #3	1.0	90

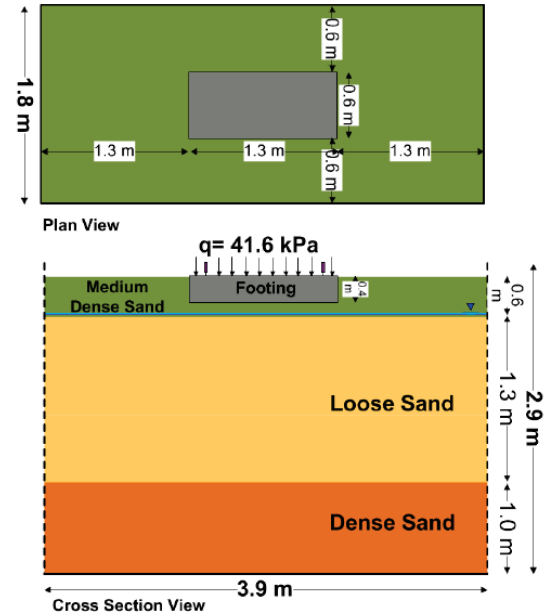


Fig. 1: Model ground configuration

コンテストの課題

- 土(オタワ砂)の物理・力学試験結果
- 博士論文、および、WEB掲載データのURL

Sand:

We used Ottawa F-65 sand for all the soil layers in this experiment. This sand has been well characterized (Parra Bastidas et al. 2017; Parra Bastidas 2016) and is currently used by several centrifuge sites as well as shake table facility at UCSD. Basic index and dynamic properties of this sand have been at UC Davis (Parra Bastidas et al. 2017). Links to the information on Ottawa F-65 sand can be found here:

Link 1 (Parra Bastidas 2016):

https://datacenterhub.org/app/site/resources/2017/06/14288/FINAL_Ana_Maria_Parra_Bastidas_PhD_Dissertation.pdf

Link 2 (Parra Bastidas et al. 2017, Ottawa F-65 Index Properties and Element Test Data):

https://datacenterhub.org/resources/ottawa_f_65/about

References:

Ana Maria Parra Bastidas; R. W. Boulanger; Trevor Carey; J. DeJong (2017), "Ottawa F-65 Sand Data from Ana Maria Parra Bastidas," https://datacenterhub.org/resources/ottawa_f_65.

Ana Maria Parra Bastidas (2016), "Ottawa F-65 Sand Characterization," PhD Dissertation, University of California Davis.

内容

- チーム編成(50代1人と20代2人)
- 解析プログラム、土の構成モデル
- 解析モデル(2次元モデル)
- 解析パラメタの設定
- 解析結果

解析プログラム

- **FLIP ROSE 2D** (一般社団法人FLIPコンソーシアム)
- 我が国において港湾構造物の耐震設計や原子力施設の土木・建築関係構造物の実務検討に実績が多い。

土の構成モデル

- **多重せん断機構(マルチスプリングモデル)** (井合ほか、1992)
- FLIP2Dが備える構成モデルのうち、最も頻繁に用いられている。
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15.

浅い基礎のブラインド解析

解析モデル (2次元モデル)

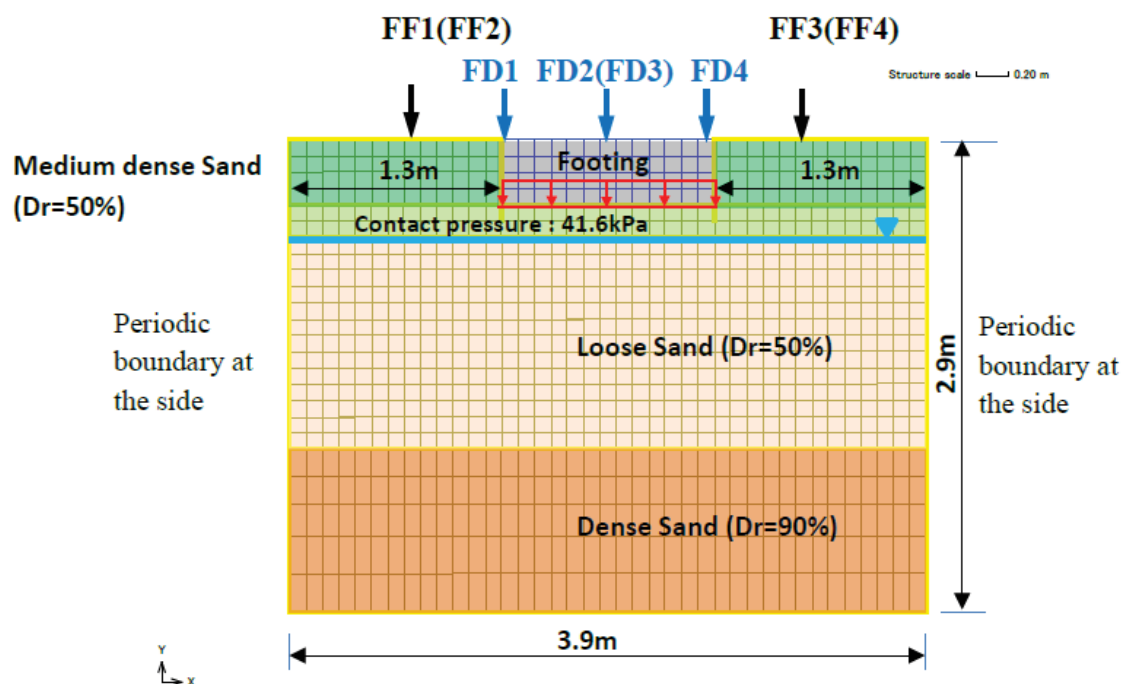


Figure 1 Two dimensional finite element model

Ottawa F-65 Index Properties and Element Test Data

Characterization of Ottawa F-65 sand performed by Ana Maria Parra Bastidas

Scanning Electron Microscope (SEM) [Images of Ottawa F-65 Sand](#)

Soil Index Properties: [Summary of Index Properties](#)

- [Specific Gravity](#)
- [Grain Size Distribution](#)
- [Maximum and Minimum Densities](#)
- [Permeability](#)

Element Test Data: [Summary of Element Test Data](#)

- [1-D Compression](#)
- [Monotonic Direct Simple Shear](#)
- [Cyclic Direct Simple Shear](#)
- [Cyclic Pre-Straining Simple Direct Shear](#)

Ottawa F-65 Sand Characterization: [Ana Maria Parra Bastidas PhD Dissertation](#)

解析パラメタ（動的変形特性）

Table 1. Model parameters for physical and dynamic deformation characteristics of soils.

Layer	H (m)	e Void ratio	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	G_{ma} (kPa)	$-\sigma_{ma}'$ (kPa)	ϕ_f (deg)	h_{max}	ϕ_p (deg)	Cyc.Str.Ratio DA=5.0%, N=20
#1-1	0.40	0.672	1.99	96	18500	3.9	30.0	0.24	—	—
#1-2	0.20	0.672	1.99	96	18500	3.9	30.0	0.24	—	—
#2 (Dr=50%)	1.30	0.672	1.99	122	29800	10.0	30.0	0.24	21.5	0.08
#3 (Dr=90%)	1.00	0.549	2.07	152	47800	16.2	30.0	0.24	—	—

Water level: GL-0.6m H : layer thickness; ρ : density; V_s : shear wave velocity; G_{ma} : elastic shear modulus at a confining pressure of $(-\sigma_{ma}')$; $-\sigma_{ma}'$: reference confining pressure; ϕ_f : shear resistance angle; and ϕ_p : phase transformation angle, $\sigma_{ma}' = \sigma_z' \cdot (1+2Ko)/3$, Ko : earth pressure at rest (=0.5), σ_z' : effective vertical pressure at the center depth of soil unit.

解析パラメタ (液状化特性)

- 提示されたデータの中から、対象実験に合うものを抽出して液状化パラメタを設定。

Table 2. Model parameters for liquefaction

Layer	S_I	w_I	p_1	p_2	c_I
#2	0.005	0.52	0.50	0.90	1.37

Parameter controlling ; p_1 : initial phase, p_2 : final phase, w_I : overall, of dilatancy. Parameter controlling ; S_I : ultimate limit, c_I : threshold limit, of dilatancy.

Layer	Residual strength S_{us} (kPa)
#2	10.0

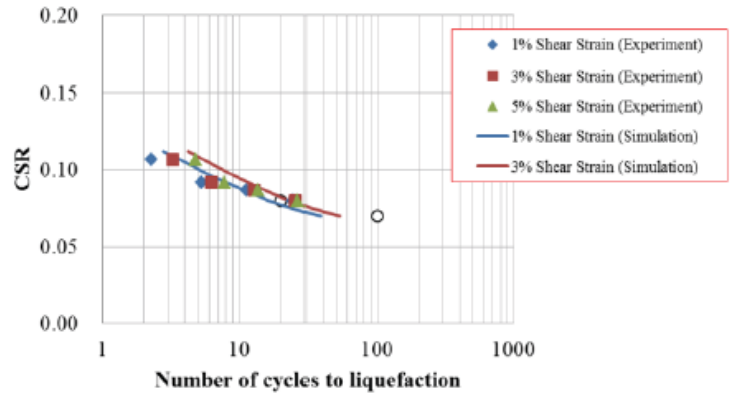
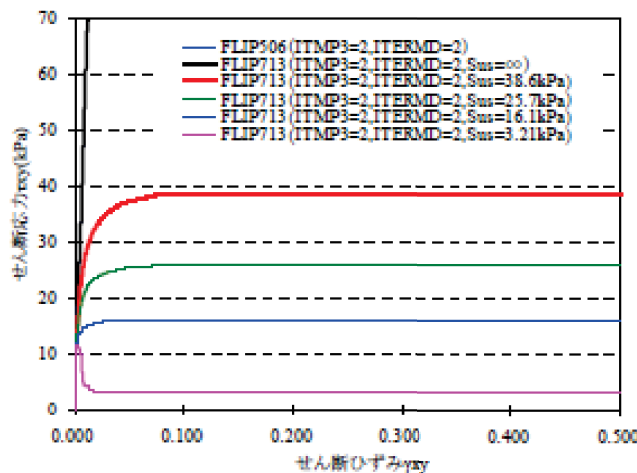


Figure 2. Reproduced liquefaction resistance curves.

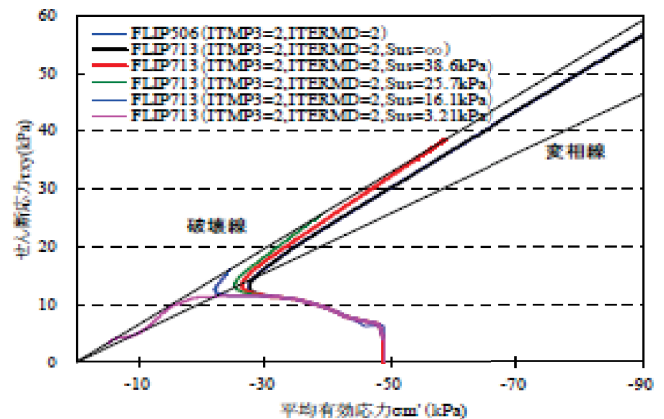
解析パラメタ (定常状態)

- FLIP2Dでは、土の定常状態を、“Sus”というパラメタを用いてシミュレート可能である。

せん断応力-せん断ひずみ関係 (ひずみ制御: 50%まで)



有効応力経路 (ひずみ制御: 50%まで)



解析パラメタ (定常状態)

- オタワ砂の試験結果より、相対密度 D_r が30%以下では定常状態らしきものが見られる。

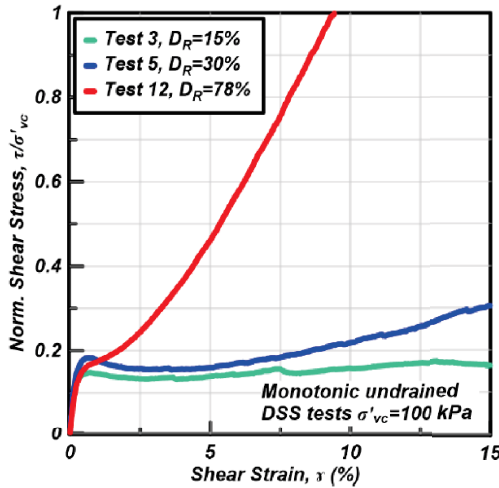


Figure 5.6 Stress strain response for $\sigma'_{vc}=100$ kPa DSS monotonic tests

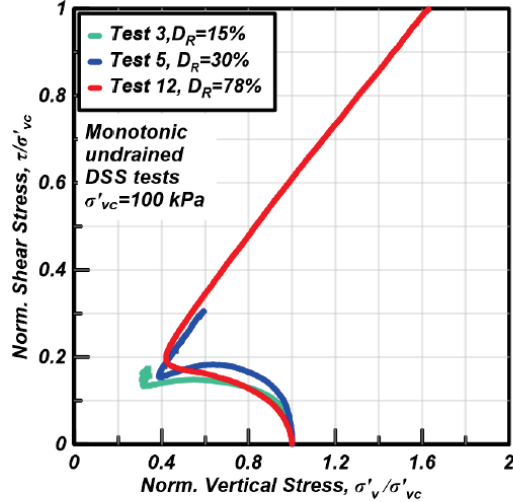


Figure 5.5 Stress path for $\sigma'_{vc}=100$ kPa DSS monotonic tests

Bastidas et al. (2017)

解析パラメタ (定常状態)

- 対象とする実験の相対密度 D_r は50%である。ジャストの実験結果はないので内挿により推定した。

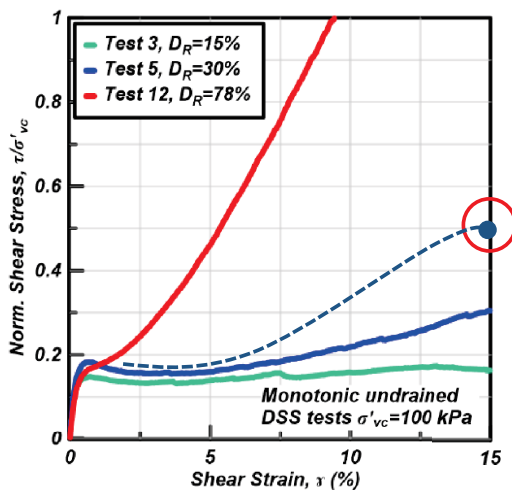


Figure 5.6 Stress strain response for $\sigma'_{vc}=100$ kPa DSS monotonic tests

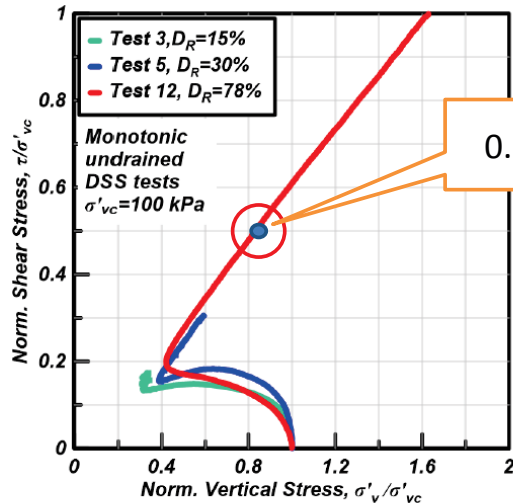
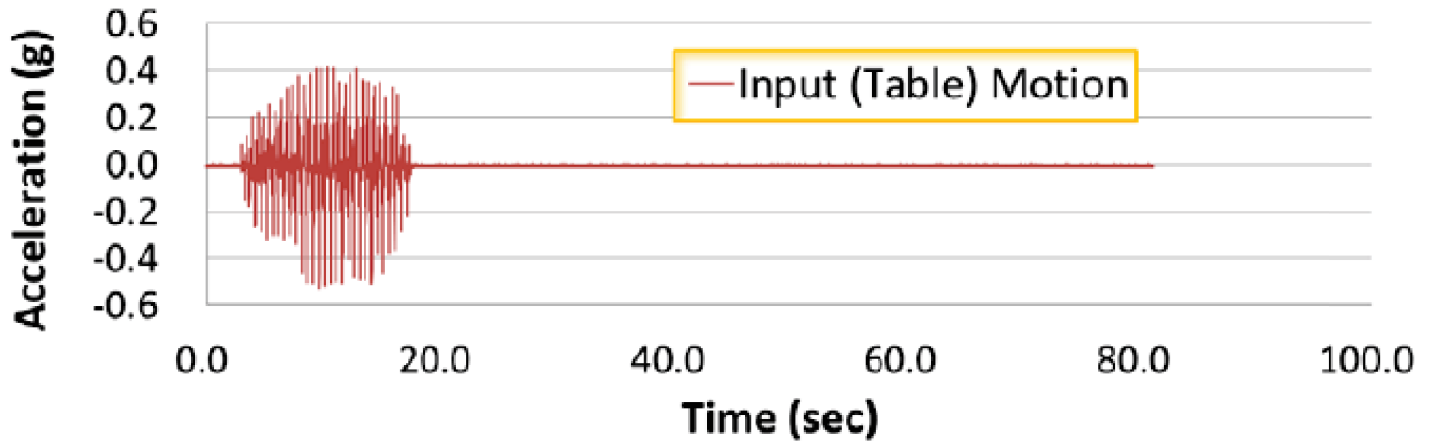


Figure 5.5 Stress path for $\sigma'_{vc}=100$ kPa DSS monotonic tests

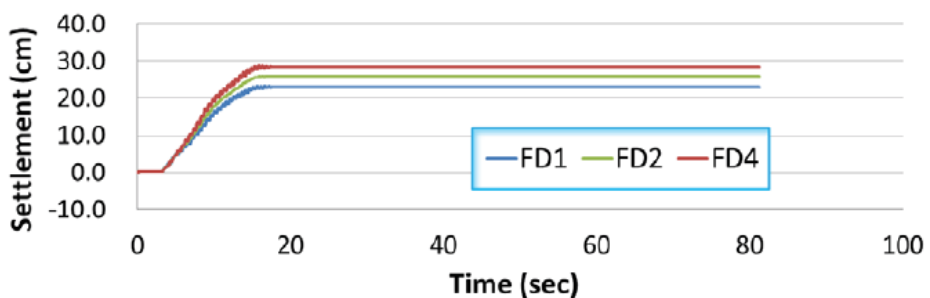
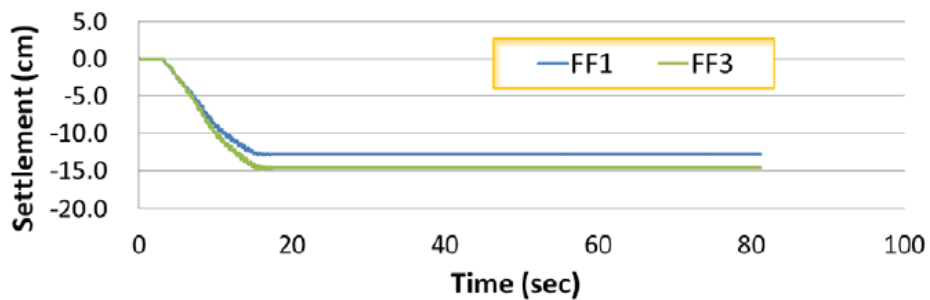
Bastidas et al. (2017)

振動台加速度

- 入力波は与条件であり、そのまま用いた。



予測解析結果（鉛直変位）



予測解析結果 (ひずみ、参考)

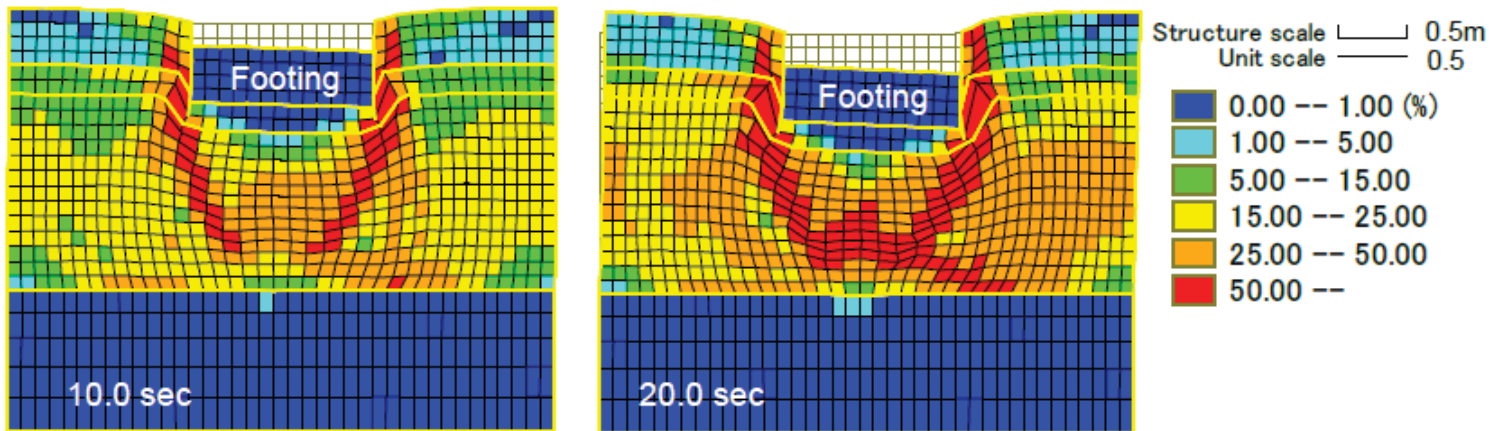


Figure 5. Distribution of maximum shear strain (γ_{max}).

浅い基礎のブラインド解析

予測解析結果 (考察)

Bastidas et al. (2017)

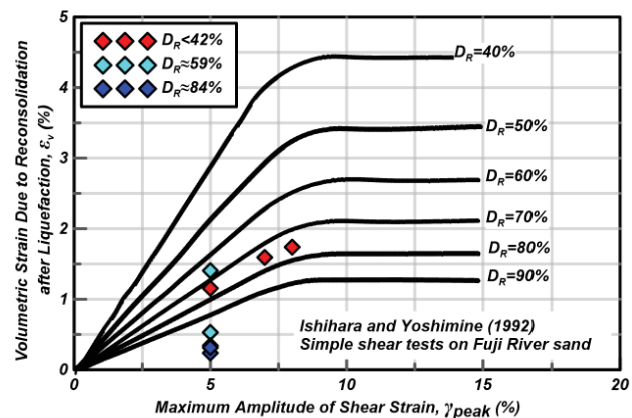


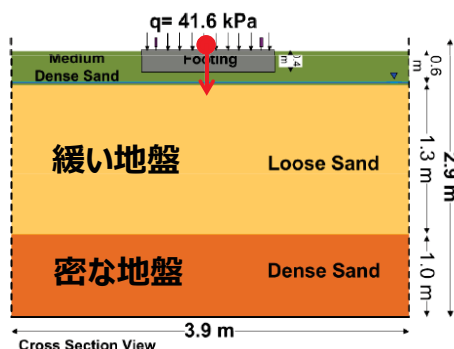
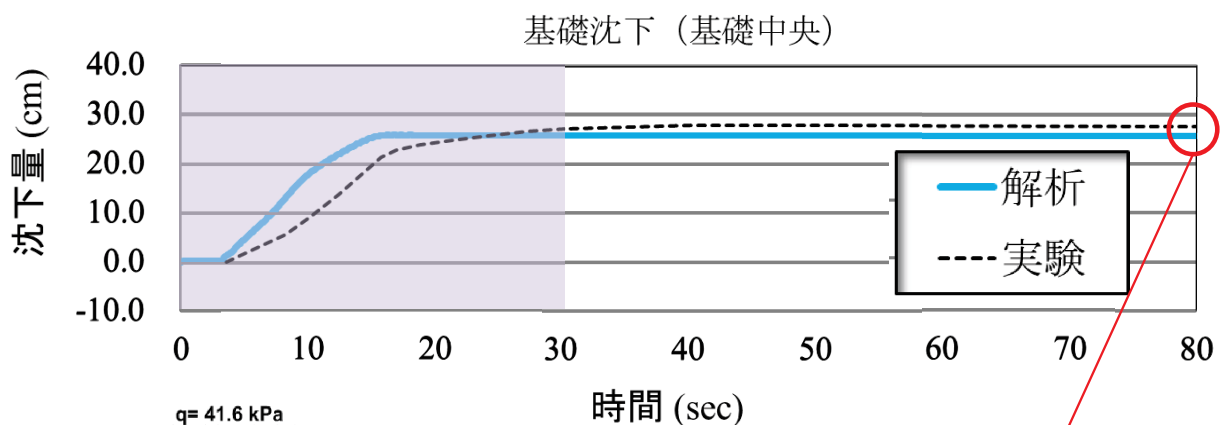
Figure 6.14 Reconsolidations results compared to Ishihara and Yoshimine's (1992) reconsolidation curves

As numerical simulation in this study assumed **undrained condition** of liquefied soil, no settlement due to reconsolidation after liquefaction was considered. According to the reconsolidation test results, loose to medium dense Ottawa sand ($D_r < 42\%$, $= 59\%$) shows **volumetric strain $\epsilon_v = 1.0\%$ to 2.0% due to reconsolidation after liquefaction** (Bastidas, 2016). Assuming hydraulic conductivity as $k = 2.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, settlement at liquefied layer as $\Delta H = \epsilon_v \cdot H = 130 \text{ cm} \times (1.0\% \text{ to } 2.0\%) = \mathbf{1.3 \text{ to } 2.6 \text{ cm}}$, effective soil density as $\gamma' = 0.987 \text{ gf/cm}^3$, approximate duration time of reconsolidation time is estimated as $\Delta H / (\gamma' \cdot k) = 65 \text{ to } 130$ seconds (Ishihara, 1976). Considering that it might be end of reconsolidation at 80 seconds (about 60 seconds after cease of shaking), permanent settlements shown in Table 4 are thought to **slightly be underestimated**.

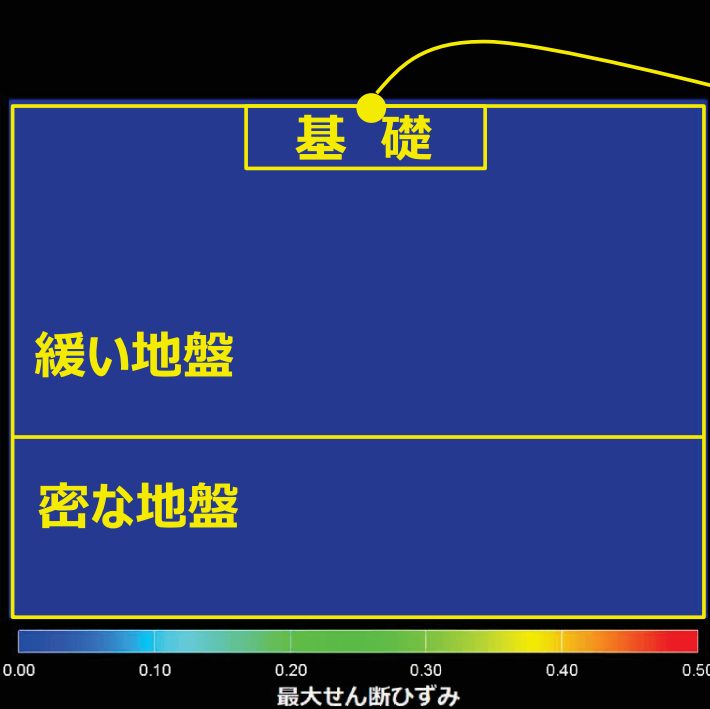
実験の紹介のビデオ（1分30秒）

PEER Annual Meeting 2019より

予測解析結果（基礎の沈下）

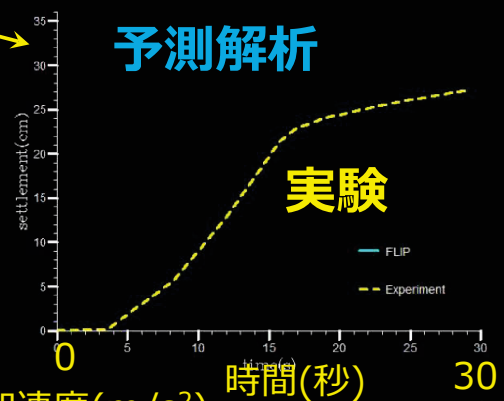


80秒時点の沈下量
予測は考察のとおり2cm程
度小さい



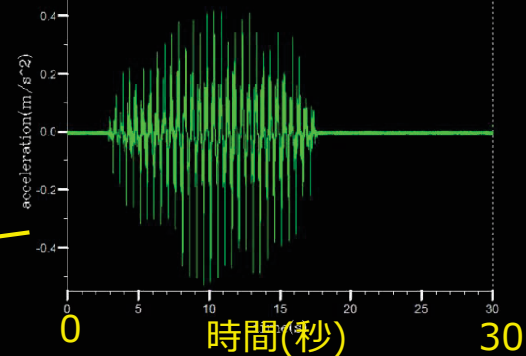
沈下量(cm)

予測解析



実験

加速度(m/s²)



コンテストの順位

コンテストの順位 (プログラム)

Team	Program	Modeling
1	FLIP	2D
2	LS-Dyna	3D
3	ANSYS	2D
4	OpenSees	2D
5	FLAC	2D
6	OpenSees	3D
7	Plaxis	2D

- PEER Annual Meeting 2019 資料より引用。
https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/2019_peer-annual-mtg-mosalam-winners.pdf

コンテストの順位（7機関参加、3位まで公開）

順位	機関	国
1	東電設計	日本
2	ワシントン大学	米国
3	Arup社	英国
4~7	A,B,C,D	米国、中国

- **Arup社**: 国際的な総合エンジニアリング・プロフェッショナル企業。
160ヶ国以上でプロジェクト経験。
10,000名以上のスタッフ。

優勝の要因(1/2)

- 今回の問題では、土の大きなひずみの挙動がポイント
- 定常状態を表す解析パラメタ“Sus値”の設定が重要な役割を果たした

- 現象に対する“**勘**”
- 実験のシミュレーションの経験
- 地震国日本における数々の事例解析の経験 (2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震 など)
- など

その他 成果の掲載・予定

- 「国際会議 Geo-Congress 2020」
(掲載予定、2020年2月)
- 「PEER News Letter」 5th Feb 2019 (web
掲載)

2018 PEER Blind Prediction Contest Winning Teams and Individuals

- First Place - Tokyo Electric Power Services Co., Ltd. - Yukio Tamari, Principal Investigator, Yuta Nakagama, & Yuichi Otsuka
- Second Place - University of Washington: Long Chen & Pedro Arduino
- Third Place - Arup: Nick O’Riordan, Anton Pillai, Samila Bandara & Ulas Cilingir



Yukio Tamari, Principal Investigator
Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.



Yuta Nakagama



Yuichi Otsuka

PEER



表彰盾には, ”PEER Pacific Earthquake Engineering Research Center Winner of the 2018 PEER Blind Prediction“, に続き, 筆者らの氏名・所属, 最下段に, “2018 Liquefaction Blind Prediction Contest” と記されている。

優勝盾

- Ana Maria Parra Bastidas (2016), "Ottawa F-65 Sand Characterization," PhD Dissertation, University of California Davis.
- Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. (1992). Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, 32(2): 1–15.
- Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O. (2013): Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 37(9), 1189-1212.
- Ishihara K. (1996). "Soil Behavior in Earthquake Geotechnics", *Oxford science publications*, pp.89.
- Ishihara K. and Yoshimine M. (1992). "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes", *Soils and Foundations*, 32(1): 173-188.
- Morita T., Iai S., Liu H., Ichii K., Sato Y. (1997): Simplified Method to Determine Parameter of FLIP, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan*. (in Japanese)
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, Blind Prediction Contest 2018.
<<https://peer.berkeley.edu/news-and-events/blind-prediction-contest-2018>> (2019.2.26)
- R. Motamed, M. J. Orang, A. Parayancode, M. Zayed. Large-Scale Shake Table Test on a Shallow Foundation in Liquefied Soils, 2019 PEER Annual Meeting Poster Presentation
<https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/orang_milad.pdf>, (2019.2.26)

ご静聴、ありがとうございました。