

【不飽和土地盤WG】

目 次

【不飽和土地盤 WG】

1 . はじめに	1
曾根 照人 (ニュージェック)	
2 . 一般化流体圧力ベクトルによる不飽和土の定式化と静的滲出試験に対する適用性 . . .	3
井合 進 (FLIP コンソーシアム)	
3 . 不飽和土の繰返し三軸試験に対する要素シミュレーション	7
3-1 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 1)	9
曾根 照人 (ニュージェック)	
楠 謙吾 (ニュージェック)	
3-2 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 2)	11
堤 彩人 (五洋建設)	
3-3 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 3)	13
小堤 治 (明窓社)	
3-4 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 1)	15
工藤 暢章 (ダイヤコンサルタント)	
3-5 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 2)	17
西村 敏明 (復建調査設計)	
水野 匠 (復建調査設計)	
渡邊 真悟 (復建調査設計)	
3-6 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 3)	19
兵頭 順一 (東電設計)	
落合 祐介 (東電設計)	
杉浦 陽子 (東電設計)	
3-7 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 4)	21
北出 圭介 (中電技術コンサルタント)	
曾根 照人 (ニュージェック)	
楠 謙吾 (ニュージェック)	
4 . 不飽和土地盤の遠心載荷実験等の再現解析	23
4-1 不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心載荷模型を対象とした再現解析(その 1)	25
田代 聡一 (東亜建設工業)	

4-2	不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心載荷模型を対象とした再現解析(その2)・・	27
	新名 大輔 (東洋建設)	
4-3	不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心載荷模型を対象とした再現解析(その3)・・	29
	岡本 英久 (パシフィックコンサルタンツ)	
	宮下 健一郎 (パシフィックコンサルタンツ)	
4-4	不飽和土盛土の振動台実験の再現解析・・・・・・・・・・・・・・・・	31
	北出 圭介 (中電技術コンサルタント)	
	生頼 直樹 (中電技術コンサルタント)	
5	平成 28 年度～平成 29 年度の成果のまとめ・・・・・・・・	33
	不飽和土地盤 WG	
	【不飽和土地盤 WG の外部発表成果】(2020 年 8 月現在)・・	35

1 はじめに

株式会社ニュージェック 曾根照人

1 はじめに

(1) 目的

不飽和土地盤 WG は、ひずみ空間多重せん断モデルによる不飽和土解析用プログラムの実問題への適用を目指して設置されたものである。不飽和土の影響を考慮する対象としては、盛土等の不飽和土地盤への過剰間隙水圧の伝播により地震時の変状が大きくなる事象、液状化対策として地盤を不飽和化改良した事象とした。

(2) 検討項目

- 文献調査(不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験, 水分特性曲線, 被災事例, 不飽和土地盤の遠心載荷実験)
- 不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現解析
- 模型実験, 被災事例の再現解析

(3) 検討期間

2 年(平成 28 年 10 月~平成 30 年 8 月)であり, 今年度は最終年度の 2 年目に該当する。

2 検討方針

(1) 検討の全体工程

平成 28 年度(1 年目)は, 基礎的検討として, 文献調査, 繰返し非排水三軸試験の再現解析, 事例解析を行った。事例解析の対象は, 不飽和土地盤の挙動が被害増大に寄与する事例と被害抑制に寄与する事例とした。

平成 29 年度(2 年目)は, 平成 28 年度に引き続いて事例解析を実施した。また, 検討で出てきた課題に対する対応を実施した。具体的な課題は, 不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現において間隙の体積弾性係数のみの変更では模擬できなかったこと, 及び不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験へのサクシヨンの影響の確認である。

(2) プログラムのバージョンと地盤要素, 間隙水要素

プログラムのバージョンは FLIP tripβ15 版とする。FLIPtripβ では, 飽和土(二相系)と不飽和土(三相系)の両方が解析可能である。

地盤要素: カクテルグラスモデルと cookie モデル

間隙水要素: 三相系となるため, 透気係数, 水分特性曲線, 透水係数等の飽和度依存性を指定する。

境界条件: 空気圧, 空気流量に関する条件を指定する。

3 検討内容及びスケジュール

本 WG の検討内容及びスケジュールを表-1 に示す。

表-1 検討内容及びスケジュール

検討項目		1年目						2年目					
		H28		H29				H29		H30			
		10月	12月	2月	4月	6月	8月	10月	12月	2月	4月	6月	8月
①文献調査													
②繰返し非排水三軸試験の再現解析	間隙の体積弾性係数(K_p)のみ変更(二相系)												
	K_p に加えて他のパラメータの変更及び三相系での検討												
③模型実験の再現解析	不飽和化による液状化対策効果を確認するための遠心載荷実験												
	背面地山からの浸透水の影響を受けた模型盛土の1G場振動台実験												

(1) 文献調査

以下の 4 項目に着目し, 文献調査を行い, 事例解析の対象となる実験を選定した。

- ①不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験
- ②不飽和土地盤の水分特性曲線
- ③不飽和土地盤の遠心載荷実験
- ④被災事例

(2) 不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現解析

不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験として、実験結果のデジタルデータを入手することができた下記3事例について簡易解析法(二相系)及び三相系(事例1及び事例3)で再現解析を実施した。

- ・事例1：岡村ら¹⁾が実施した豊浦砂の不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験
- ・事例2：藤井ら²⁾が実施した南陽砂(不攪乱試料)及び鳥取砂(不攪乱試料)の不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験
- ・事例3：松丸や³⁾が実施した稲城砂(不飽和)を対象として実施された繰返し非排水三軸試験

(3) 模型実験の再現解析

- (a)富田ら⁴⁾が実施した盛土の基礎地盤に空気を注入することにより不飽和土地盤を作成し、過剰間隙水圧の発生を抑制することで盛土の沈下量を小さくした実験に対して、簡易解析法と三相系の2つの方法で再現解析を実施した。
- (b)松丸ら³⁾が実施した浸透水や降雨散水を与えた盛土の振動台実験に対して、三相系のモデルを用いて再現解析を実施した。

4 今年度の実施体制及び開催記録, メンバー構成

今年度の実施体制及び開催記録, メンバー構成を表-2~表-3 に示す。

表-2 不飽和土地盤 WG のメンバー構成

No.	氏名	所属	グループ	No.	氏名	所属	グループ
1 幹事	曾根 照人	株式会社 ニュージェック	1	16	渡邊 真悟	復建調査設計株式会社	2
2 サブ幹事	北出 圭介	中電技術コンサルタント株式会社	2	17	水野 匠	復建調査設計株式会社	2
3 サブ幹事	楠 謙吾	株式会社 ニュージェック	1	18	西村 俊明	復建調査設計株式会社	2
4	小堤 治	株式会社 明窓社	2	19	鈴木 明憲	株式会社 海洋河川技術研究所	2
5	藤井紀之	応用地質株式会社	2	20	金原 剛	愛三コンサルタント株式会社	1
6	植村一瑛	応用地質株式会社	2	21	兵頭 順一	東電設計株式会社	2
7	三上 武子	前田建設工業株式会社	2	22	杉浦 陽子	東電設計株式会社	2
8	新名 大輔	東洋建設株式会社	1	23	落合 祐介	東電設計株式会社	2
9	生頼 直樹	中電技術コンサルタント株式会社	2	24 特別顧問	井合 進	一般社団法人FLIPコンソーシアム	
10	戎 健次	株式会社 ニュージェック	1	25 特別顧問	一井 康二	関西大学	
11	堤 彩人	五洋建設株式会社	1	26 特別顧問	上田 恭平	京都大学防災研究所	
12	宮下 健一朗	パシフィックコンサルタンツ株式会社	1	27 顧問	飛田 哲男	関西大学	
13	岡本 英久	パシフィックコンサルタンツ株式会社	1	28 特別会員	小濱 英司	港湾空港技術研究所	
14	工藤 暢章	株式会社 ダイヤコンサルタント	2	29 特別会員	大矢 陽介	港湾空港技術研究所	
15	田代 聡一	東亜建設工業株式会社	1	30 事務局	溜 幸生	東電設計株式会社	2
				31 事務局	中原 知洋	五洋建設株式会社	1
				H30.4.17 まで	王 海龍 (ワンハイロン)	応用地質株式会社	2

グループ1: 不飽和土地盤の挙動が被害抑制に寄与する事例検討
 グループ2: 不飽和土地盤の挙動が被害増大に寄与する事例検討

表-3 不飽和土地盤 WG の開催記録

No.	年度	日時	場所	主な議題
1	H29 (2017)	2017/10/13	京都大学東京オフィス	昨年度までの検討における課題, 模型実験の再現解析(1)
2		2017/12/11	京都大学東京オフィス	不飽和土地盤の非排水三軸試験の再現解析(1), 模型実験の再現解析(2)
3		2018/2/9	京都大学東京オフィス	不飽和土地盤の非排水三軸試験の再現解析(2), 模型実験の再現解析(3)
4		2018/4/19	京都大学東京オフィス	不飽和土地盤の非排水三軸試験の再現解析(3), 模型実験の再現解析(4)
5		2018/5/17	京都大学東京オフィス	不飽和土地盤の非排水三軸試験の再現解析(4), 模型実験の再現解析(5)
6		2018/6/28	京都大学東京オフィス	成果報告書の内容確認
7		2018/8/23	中央大学駿河台記念館	成果報告

5 参考文献

- 1) Mitsu Okamura and Yasumasa Soga: Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations Vol.46, No.5, pp.695-700, 2006.10
- 2) 藤井直, 西垣誠, 大内正敏: 飽和砂の液状化強度特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.3, pp.564-576, 2010.8
- 3) 松丸貴樹, 渦岡良介: 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 C, Vol.70, No.4, pp.395-411, 2014.
- 4) 富田雄一, 紙田直充, 内田純二, 岡本辰也, 岡村未対: 液状化対策として地盤不飽和工法の道路盛土への適用性に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.3, 375-386

2 一般化流体圧力ベクトルによる不飽和土の定式化と静的滲出試験に対する適用性

不飽和土, 支配方程式, 3 相系

一般社団法人 FLIP コンソーシアム 井合 進

1. はじめに—飽和土 (2 相系) の支配方程式 (復習)

飽和土は, 土粒子骨格からなる多孔質体 (スポンジ状の孔が空いた連続体) が間隙水で満たされた連続体とみなすことができる。その支配方程式は, 土粒子骨格に対する間隙水の相対加速度が無視できる場合には, 土要素 (土粒子骨格と間隙水) に作用する力の釣り合い, および, 多孔質体の孔 (間隙率) を流れる間隙水の収支バランス, の 2 つの式で表わすことができ, 以下のとおりとなる (Zienkiewicz & Bettess, 1982)。

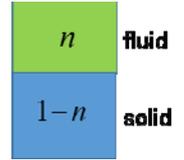
力の釣り合い:

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

間隙水の収支バランス:

$$n \dot{p} / K_f + \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) = -\text{div}(\mathbf{k}[-\text{grad}(p) + \rho_f \mathbf{g} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}]) \quad (2)$$

ここに, $\boldsymbol{\sigma}$ は全応力テンソル, ρ は密度, \mathbf{g} は重力加速度ベクトル, \mathbf{u} は変位ベクトル, n は間隙率, p は間隙水圧, \mathbf{k} は透水係数テンソル, ρ_f は水の密度, である。



2. 不飽和土 (3 相系) の支配方程式

不飽和土は, 土粒子骨格からなる多孔質体 (スポンジ状の孔が空いた連続体) とみなす点では, 飽和土と同じであるが, 多孔質体に, 液体(f)用の孔と気体(a)用の孔の 2 種類の孔が空いているとみなし, 簡単のため, 2 種類の孔は相互にはつながっていない (液体と気体とは独立して流れる) ものとする (Borja, 2004)。飽和度 S_r , 間隙率 n の不飽和土では, 単位体積あたり, 液体が占める孔の体積は nS_r , 気体が占める孔の体積は $n(1-S_r)$ である。これらのことから, 不飽和土の支配方程式は, 飽和度が変化しなければ, 式(2)を, 液体, 気体が占める体積に応じて, 左辺に, それぞれ S_r , $(1-S_r)$ を乗じて修正するとともに, 液体, 気体の体積弾性係数, 透水 (気) 係数, 密度, を考慮することにより得られる。飽和度が変化する一般の場合の不飽和土 (3 相系) の場合には, 液体・気体が占める体積変化 (すなわち, 体積の時間微分) の項を, それぞれの収支バランス式の左辺に加えることにより, 式(2)の収支バランス式が一般化され, 以下となる。

液体の収支バランス:

$$n \dot{S}_r + n S_r \dot{p}_f / K_f + S_r \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) = -\text{div}(\mathbf{k}^f[-\text{grad}(p_f) + \rho_f \mathbf{g} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}]) \quad (3)$$

気体の収支バランス:

$$-n \dot{S}_r + n(1-S_r) \dot{p}_a / K_a + (1-S_r) \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) = -\text{div}(\mathbf{k}^a[-\text{grad}(p_a) + \rho_a \mathbf{g} - \rho_a \ddot{\mathbf{u}}]) \quad (4)$$

さて, 飽和度 S_r とサクション s の水分特性曲線の接線勾配 (比水分容量) を用いて, 以下が成り立つ。

$$\dot{S}_r = \frac{\partial S_r}{\partial s} \dot{s} = \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f), \quad s = p_a - p_f, \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{m} p^* \quad (5)$$

これを, 式(3)(4)に代入し,

$$\begin{aligned} n \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f) + n S_r \dot{p}_f / K_f + S_r \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) &= -\text{div}(\mathbf{k}^f[-\text{grad}(p_f) + \rho_f \mathbf{g} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}]) \\ -n \chi (\dot{p}_a - \dot{p}_f) + n(1-S_r) \dot{p}_a / K_a + (1-S_r) \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) &= -\text{div}(\mathbf{k}^a[-\text{grad}(p_a) + \rho_a \mathbf{g} - \rho_a \ddot{\mathbf{u}}]) \end{aligned} \quad (6)$$

以上より, 不飽和土 (3 相系) の支配方程式は, 式(1)(6)で与えられる。

3. 不飽和土における有効応力の定義

有効応力は, 一般に, 間隙圧力 (液体・気体の混合体の圧力) p^* を用いて, 以下であらわされる。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{m} p^* \quad (7)$$

ここに, \mathbf{m} は 2 階の単位テンソル。さて, 不飽和土における有効応力を定義するための間隙圧力には 2 種類あり, 1 つ

は、飽和度 S_r による重みつき平均、他の一つは、有効飽和度 S_e による重みつき平均(Ohno, Iizuka, & Ohta, 2006)として、以下で与える。

$$p^* = S_r p_f + (1 - S_r) p_a, \text{ or } p^* = S_e p_f + (1 - S_e) p_a, S_e = \frac{S_r - S_m}{S_{rx} - S_m} \quad (8)$$

ここで、 S_{rx} は飽和度を上げていく過程で初めてサクション $s=0$ となる飽和度、 S_m は飽和度を下げていく過程で初めてサクション $s=\infty$ となる飽和度。

4. 一般化流体圧力ベクトルの導入と不飽和土（3相系）の支配方程式の離散化

式(1)の全応力を有効応力と間隙水圧の和として、式(7)において $p^*=p$ とおき、式(1)(2)について境界条件を考慮して離散化すると、飽和土（2相系）の支配方程式は、節点での変位ベクトル $\underline{\mathbf{u}}$ および水圧ベクトル $\underline{\mathbf{p}}$ を未知数とする以下の連立方程式となる(Ozutsumi, 2003)。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}' dv - \mathbf{Q} \underline{\mathbf{p}} + \mathbf{M}(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) - \int_{\partial\Omega_s} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{t}} ds &= 0 \\ \mathbf{G} \underline{\mathbf{p}} + \mathbf{R} \dot{\underline{\mathbf{p}}} &= \int_{\partial\Omega_{qf}} \hat{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{q}} ds - \mathbf{Q}^T \underline{\dot{\mathbf{u}}} - \hat{\mathbf{M}}(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) \end{aligned} \quad (9)$$

同様に、式(7)を式(1)に代入し、これと、式(6)よりなる不飽和土（3相系）の支配方程式を離散化すると、

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}' dv - \mathbf{Q}^f \underline{\mathbf{p}}_f - \mathbf{Q}^a \underline{\mathbf{p}}_a + \mathbf{M}(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) - \int_{\partial\Omega_s} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{t}} ds &= 0 \\ \mathbf{G}^f \underline{\mathbf{p}}_f + \mathbf{R}^f \dot{\underline{\mathbf{p}}}_f + \mathbf{R}^{fa} \dot{\underline{\mathbf{p}}}_a &= \int_{\partial\Omega_{qf}} \hat{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{q}}_f ds - \mathbf{Q}^{fT} \underline{\dot{\mathbf{u}}} - \hat{\mathbf{M}}^f(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) \\ \mathbf{G}^a \underline{\mathbf{p}}_a + \mathbf{R}^a \dot{\underline{\mathbf{p}}}_a + \mathbf{R}^{af} \dot{\underline{\mathbf{p}}}_f &= \int_{\partial\Omega_{qa}} \hat{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{q}}_a ds - \mathbf{Q}^{aT} \underline{\dot{\mathbf{u}}} - \hat{\mathbf{M}}^a(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、液圧・気圧を合体して、一般化流体圧力ベクトル、境界での一般化流量ベクトルを以下で定義する。

$$\underline{\mathbf{p}}^T = [\underline{\mathbf{p}}_f \quad \underline{\mathbf{p}}_a], \bar{\mathbf{q}}^T = [\bar{\mathbf{q}}_f \quad \bar{\mathbf{q}}_a] \quad (11)$$

また、これに応じて、マトリクス類を、以下のとおりまとめて書く。

$$\mathbf{Q}^* = [\mathbf{Q}^{f*} \quad \mathbf{Q}^{a*}], \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}^a \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^f & \mathbf{R}^{fa} \\ \mathbf{R}^{af} & \mathbf{R}^a \end{bmatrix}, \mathbf{Q}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^{fT} \\ \mathbf{Q}^{aT} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{M}}^f \\ \hat{\mathbf{M}}^a \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

これらにより、離散化した不飽和土（3相系）の支配方程式（式(10)）は、形式的に、離散化した飽和度（2相系）の支配方程式（式(9)）と同一形式の式に還元され、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}' dv - \mathbf{Q}^* \underline{\mathbf{p}} + \mathbf{M}(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) - \int_{\partial\Omega_s} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{t}} ds &= 0 \\ \mathbf{G} \underline{\mathbf{p}} + \mathbf{R} \dot{\underline{\mathbf{p}}} &= \int_{\partial\Omega_q} \hat{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{q}} ds - \mathbf{Q}^T \underline{\dot{\mathbf{u}}} - \hat{\mathbf{M}}(g \underline{\mathbf{L}}_v + \underline{\ddot{\mathbf{u}}}) \end{aligned} \quad (13)$$

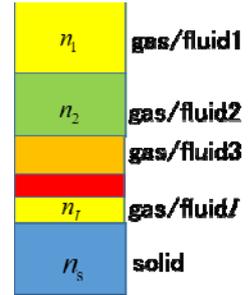
ただし、式(9)における \mathbf{Q} マトリクスは、一般化して \mathbf{Q}^* マトリクス（式(12)第1式）に代え、後述の有効応力の定義式に応じて定義する。また、式(13)第2式における境界積分の範囲は、流体自由度に応じて、それぞれ式(10)第2式および第3式で与える範囲毎に与えるものとする。

なお、式(11)(12)は、液圧ベクトル、気圧ベクトルの順で並ぶようにシンボリックな表記をしているが、実際の解析では、要素の1節点が液圧成分と気圧成分からなる2成分（2自由度）を有しているものと見なして、節点変位ベクトルに準じた自由度（成分）の並び方とする。各種マトリクスの成分も、この並び順に整合するように、並び替える。

このような一般化流体圧力ベクトルの導入による定式化（式(13)）は、不飽和土（3相系）の解析での適式化のみならず、水・空気に加え、さらに多種類の流体・気体が混合する一般化した多相系の解析にも、直ちに適用することができ、汎用性に満ちた定式化といえる。すなわち、間隙が I 種類の流体・気体により構成された多相系（ $I+1$ 相系）の解析では、一般化流体圧力ベクトル、境界での一般化流量ベクトルを以下で定義する。

$$\underline{\mathbf{p}}^T = [\underline{\mathbf{p}}_1 \quad \underline{\mathbf{p}}_2 \quad \cdots \quad \underline{\mathbf{p}}_l], \quad \underline{\mathbf{q}}^T = [\underline{\mathbf{q}}_1 \quad \underline{\mathbf{q}}_2 \quad \cdots \quad \underline{\mathbf{q}}_l] \quad (14)$$

これに対応して、式(12)のマトリクス類も自由度を拡張して、一般化することにより、全体系の支配方程式は、形式的には、式(13)と同一となる。



5. 液体と気体の混合体の等価体積弾性係数による不飽和土の簡易解析

飽和度が比較的高い場合には、サクション $s=0$ となり、この場合には、式(5)の第 2 式より、以下が成り立つ。

$$p_a = p_f = p \quad (15)$$

ここで、透水・透気係数が、飽和度に応じて比例配分で与えられるものとして、以下を仮定する。

$$\mathbf{k}^f = S_r \mathbf{k}, \quad \mathbf{k}^a = (1 - S_r) \mathbf{k} \quad (16)$$

式(15)(16)を、式(6)に代入し、同式の第 1 式と第 2 式を足し合わせると、以下が得られる。

$$\frac{n}{K_p} \dot{p} + \text{div}(\dot{\mathbf{u}}) = -\text{div}[\mathbf{k}(-\text{grad}(p) + \rho_p \mathbf{g} - \rho_p \ddot{\mathbf{u}})] \quad (17)$$

ここに、

$$\rho_p = S_r \rho_f + (1 - S_r) \rho_a, \quad \frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{(1 - S_r)}{K_a} \quad (18)$$

よって、この場合は、等価体積弾性係数 K_p (式(18)第 2 式) を用いて、飽和土の解析に準じて、2 相系の支配方程式を適用して解析すればよい。

水・空気に加え、さらに多種類の流体・気体が混合する一般化した多相系の解析でも、サクションに相当する間隙流体圧力の相互の相違が小さい場合には、上と同様の考察により、式(18)を一般化して、以下が成り立つ。

$$\rho_p = \sum_i n_i \rho_i, \quad \frac{1}{K_p} = \sum_i \frac{n_i}{K_i} \quad (19)$$

ここに、 n_i は i 番目の間隙流体の占める体積比を、また、 K_i は i 番目の間隙流体の体積弾性係数である。

6. 静的滲出試験に対する適用性

提案した不飽和土の定式化の適用性について、1m 長さの円筒状シリンダーによる静的滲出試験(Liakopoulos, 1964) に対して検討した結果を示す。図-1 は間隙水の滲出速度、図-2 と 3 はそれぞれシリンダー内での間隙水圧、過剰空気圧分布の時間変化、図-4 はこれらに対応するシリンダー内でのサクションと飽和度分布の変化を示す。既往解析 Ehlers, Graf, and Ammann (2004) との比較も行い、提案した不飽和土の定式化の妥当性が確認された(Iai, 2018)。

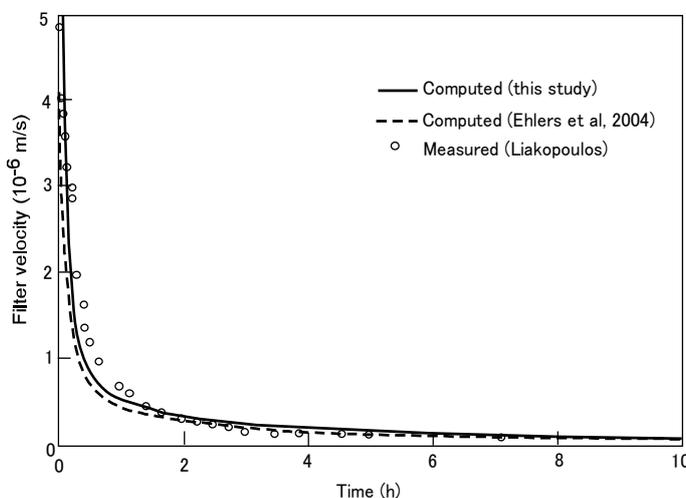


図-1 静的滲出試験結果と解析結果

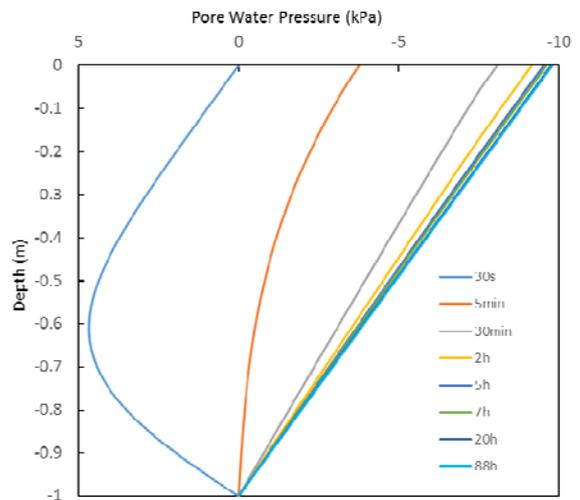
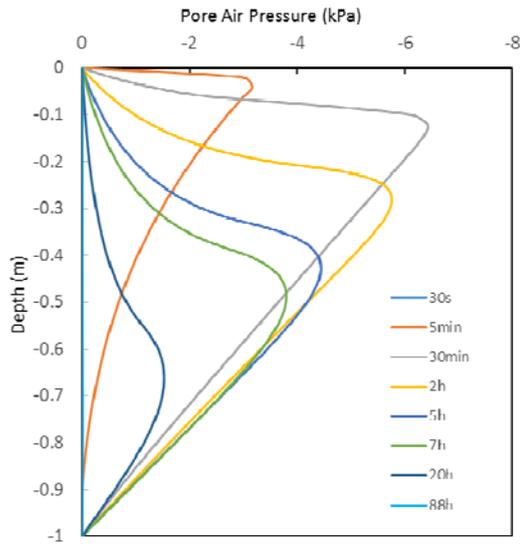
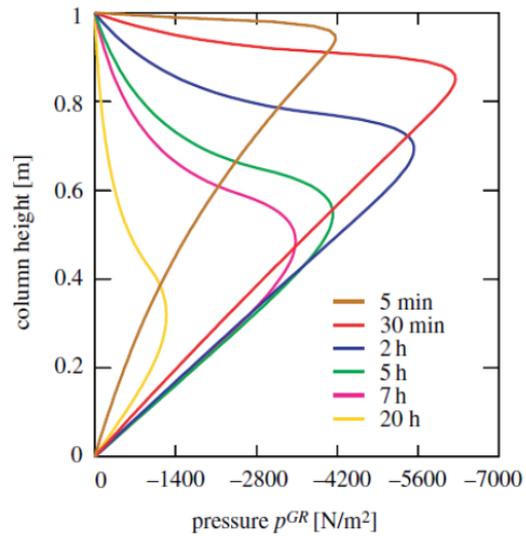


図-2 間隙水圧分布の解析結果



(a) 本研究



(b) Ehlers et al., 2004 による

図-3 間隙気圧分布の解析結果

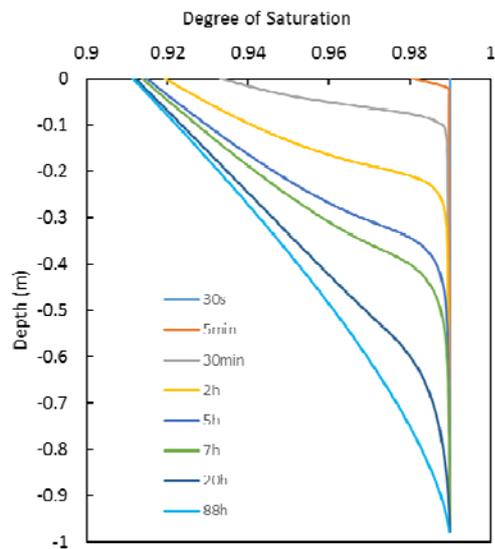
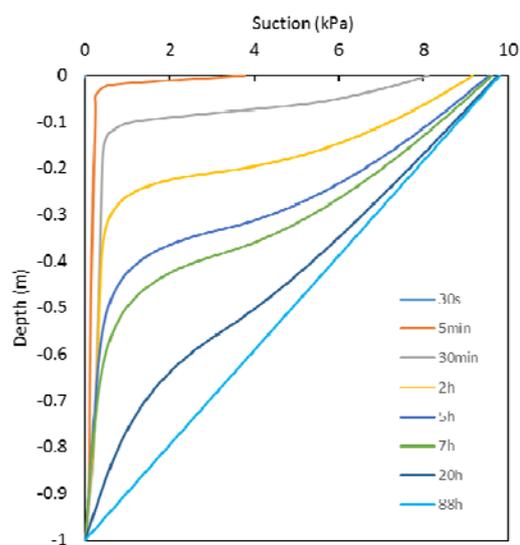


図-4 サクションおよび飽和度分布の解析結果

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。

参考文献

Borja, R. I. (2004). Cam-clay plasticity. Part v: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, 5301-5338.

Ehlers, W., Graf, T., & Ammann, M. (2004). Deformation and localization analysis of partially saturated soil. *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, 2285-2910.

Iai, S. (2018). *Partially saturated soil: Formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test*. Paper presented at the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V.

Liakopoulos, A. (1964). *Transient flow through unsaturated porous media*. (PhD), University of California at Berkeley.

Ohno, S., Iizuka, A., & Ohta, H. (2006). Two categories of new constitutive model derived from non-linear description of soil contractancy. *Journal of Applied Mechanics, JSCE*, 9, 407-414 (in Japanese).

Ozutsumi, O. (2003). *Numerical studies on soil-structure systems on liquefiable deposit during earthquakes*. (Doctors Dissertation), Kyoto University, Japan.

Zienkiewicz, O. C., & Bettess, P. (1982). Soils and other saturated media under transient, dynamic conditions. In Pande & Zienkiewicz (Eds.), *Soil mechanics - transient and cyclic loads* (pp. 1-16): John Wiley and Sons.

3 不飽和土の繰り返し三軸試験に対する 要素シミュレーション

3-1 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 1)

不飽和土 有効応力解析 液状化

(株) ニュージェック ○曾根 照人、楠 謙吾

1 はじめに

不飽和土地盤の液状化に対する挙動を再現するために、ひずみ空間多重せん断モデル¹⁾に対して三相系(水-土粒子-空気)のモデルが組み込まれた。これまで、不飽和土 WG ではこのモデルの検証のため不飽和土の繰返し非排水三軸試験に対し間隙の体積剛性に着目して二相系を用いた簡易法による要素シミュレーションを実施してきた。ここでは、三相系による飽和土、不飽和土の要素シミュレーションを実施し、二相系を用いた簡易法との比較を行った。

2 検討方法

カクテルグラスモデル要素は、二相系の検討により既往の飽和土の試験結果²⁾によくフィッティングするように設定されたパラメタ³⁾を用いた。また、既往の保水性試験結果⁴⁾をもとに三相系に用いる水分特性曲線に関するパラメタを設定した。二相系は静的な繰返し載荷を行ったが、三相系による検討ではプログラムの制約条件から動的に載荷を行う必要がある。解析を安定化させるため、積分時間間隔、カクテルグラスモデル要素、間隙水要素のレーレー減衰 β を表.3 のように設定した。飽和土と不飽和土で解析が安定する β が異なるのは、間隙の体積弾性係数が大きく異なるためであると考えられる。二相系による検討では目標とする飽和度に応じて式(1)により間隙の体積弾性係数を与えた。三相系による検討では、初期圧密解析時に目標の飽和度になるように表.4 に示す空気圧を与えた。不飽和土に対する検討では実験結果と整合するように、ダイレイタンシー

パラメタ $r_{\epsilon dc}$ 、 $r_{\epsilon d}$ を変化させた。なお、二相系、三相系ともに実験と同様、軸差せん断で繰返し載荷を行った。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{(1 - S_r)}{K_a} + \frac{S_r}{K_f} \dots \dots \dots (1)$$

K_p : 間隙の体積弾性係数、 K_a : 空気の体積弾性係数 (=98kPa)、 K_f : 水の体積弾性係数(=2.2×10⁶kPa)

3 検討結果

二相系と三相系の要素シミュレーション結果を図.1～図.3 に示す。図.1、図.3 は飽和土、図.2、図.3 は不飽和土に対するシ

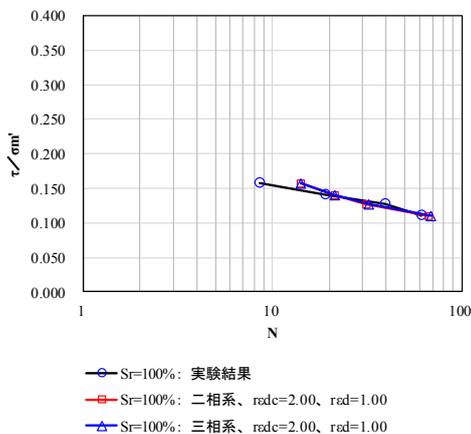


図.1 飽和土に対するシミュレーション結果

表.1 カクテルグラスモデル要素の解析パラメタ

pa(kPa)	98	$r_{\epsilon d}$	1.00
Gma(kPa)	5.45E+04	q1	1.00
K_{La}, K_{ua} (kPa)	1.42E+05	q2	1.10
m_G, m_K	0.50	l_k	2.00
h_{max}	0.24	$r_{K, r_{K''}}$	0.30
$\phi f(^{\circ})$	39.0	c1	1.41
$\phi p(^{\circ})$	28.0	s1	0.005
ϵ_{dc}	0.20	r_{γ}	0.10
$r_{\epsilon dc}$	2.00	r_{tmp}	0.50

表.2 水分特性曲線に関するパラメタ

Srx	0.99	saL(kPa)	30.00
Srn	0.20	pnfL	5.00
saU(kPa)	45.00	pmfL	1.00
pnfU	8.10		
pmfU	1.00		

表.3 三相系検討時の解析条件

Δt (sec)	レーレー減衰 β		
	カクテル	間隙水	
		飽和	不飽和
0.001	2.00E-06	0.03	1.00E-07

表.4 三相系検討時の初期圧密解析条件

Sr(%)	90.00	96.00	98.00
Pa(kPa)	3.50	2.35	1.80
Pf(kPa)	0.00	0.00	0.00
s(kPa)	3.50	2.35	1.80
Se(%)	90.00	96.00	98.05

Sr: 目標飽和度、Pa: 空気圧、Pf: 水圧

s: サクション、Se: 初期飽和度

結果である。これをみると、飽和状態、不飽和状態によらず、二相系と三相系の結果の差はほとんどない。飽和度が下がると、 $r_{\varepsilon dc}$ 、 $r_{\varepsilon d}$ 等のパラメータの調整が必要であると考えられるが、それらパラメータを調整すれば実験結果と非常によく整合している。

3 まとめ

既往の試験結果に対し、二相系、三相系による要素シミュレーションを実施した。二相系、三相系ともに実験結果を再現するパラメータの設定は可能である。ただし、飽和度に応じた適切なパラメータの設定方法を検討する必要がある。検討の際には、二相系による簡易法で三相系と同等の結果がえられることから、二相系による簡易法で検討可能であることがわかった。

謝辞:本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。繰り返し三軸試験のデータは愛媛大学の岡村未対教授より提供していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献:

1)Iai S, Tobita T, Ozutsumi O and Ueda K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011.
 2)Mitsu Okamura and Yasumasa Soga Effectsof pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand,Soils and Foundations Vol.46,No.5,pp.695-700,2006.10 3)平成 28 年度 FLIP コンソーシアム 不飽和土 WG 成果報告資料 4)岡村未対, 来山博昭和: 遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究、土木学会論文 集 C Vol.64 No.3 pp.662-672,2008.8

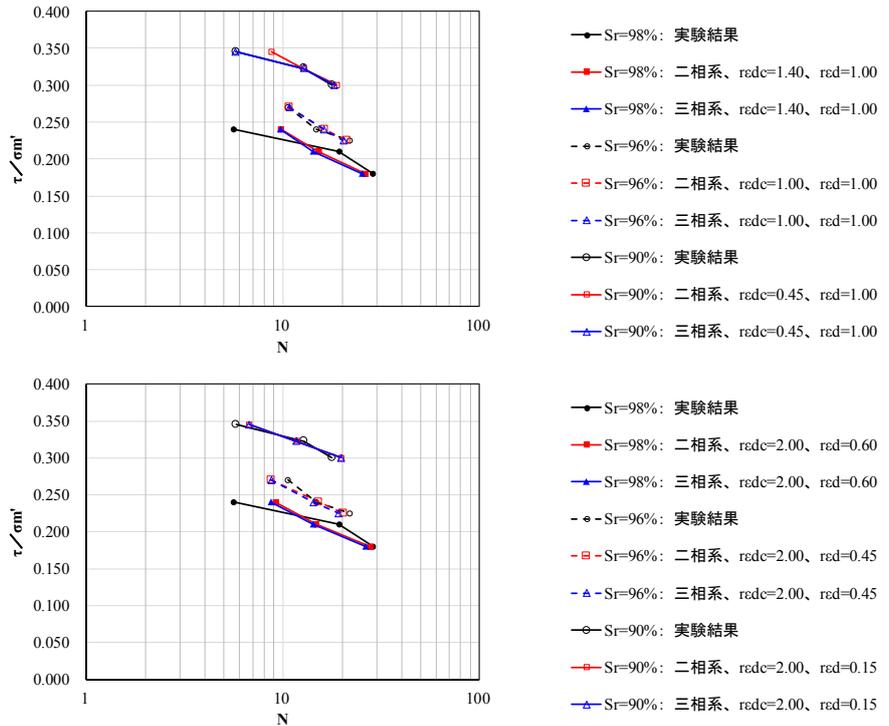


図.2 不飽和土に対するシミュレーション結果

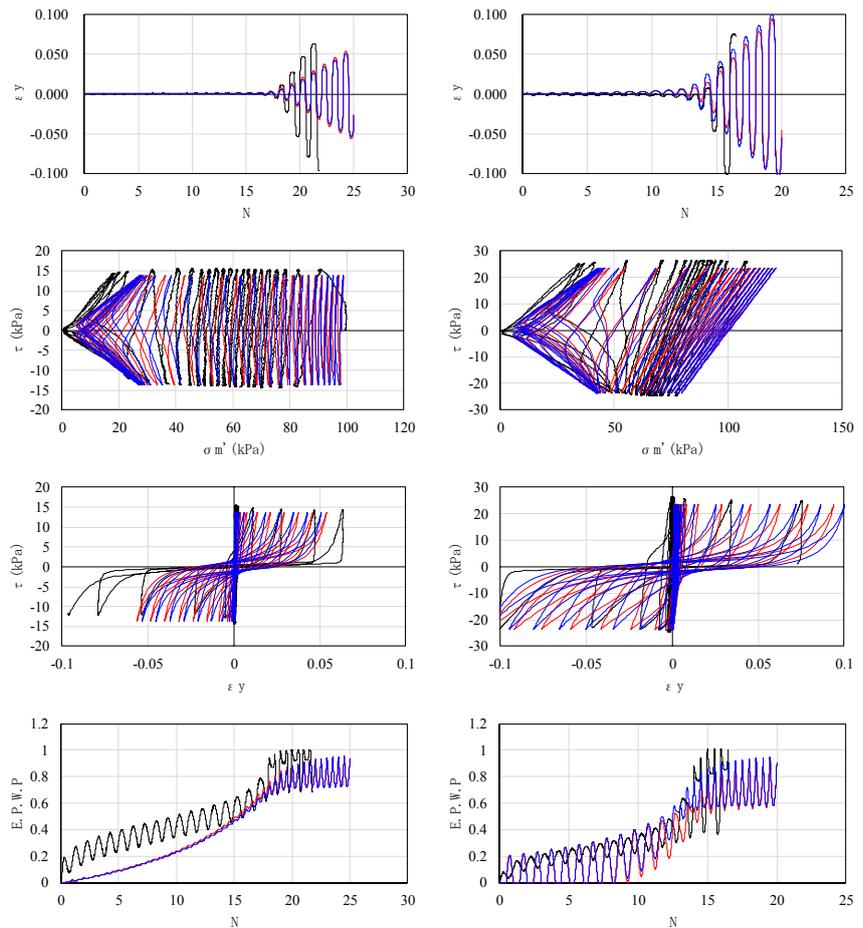


図.3 要素シミュレーション結果 (—実験結果、- -二相系、...三相系)

左図 : Sr=100% $\tau / \sigma m' = 0.14$

右図 : Sr= 96% $\tau / \sigma m' = 0.24$ $r_{\varepsilon d} = 0.45$

3-2 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 2)

不飽和土 有効応力解析 液状化

五洋建設株式会社 堤彩人

1. はじめに

FLIP コンソーシアム不飽和土地盤 WG では、不飽和土の挙動を再現できる FLIPtrip の実用化に向けた検討を行っている。FLIPtrip では、Iai(2018)¹⁾により提案された土・水・空気混合体の二相系モデル、及び土・水・空気の三相系モデルの 2 種類の不飽和土モデルを扱うことができる。本文では、Okamura and Soga(2006)²⁾が実施した不飽和土の繰返し非排水三軸試験結果を対象に二相系と三相系のモデルによる要素シミュレーションを実施した結果について報告する。

2. 検討方法

Cocktail Glass モデル要素³⁾のパラメータは、二相系モデルによる飽和土の繰返し三軸試験結果の再現計算により設定した(表-1)。三相系モデルで使用する間隙水要素のパラメータは、岡村ら(2008)⁴⁾が実施した保水性試験の結果をターゲットに決定した(表-2)。また、非排水条件を模擬する目的で透水係数と透気係数には小さな値を設定した。図-1に要素シミュレーションの境界条件を示す。二相系では「等方圧密」、「軸差せん断」の順番でシミュレーションを実施した。一方、三相系では第一段階で等方圧密に加え初期飽和度解析を実施し、所定の飽和度 S_r になるよう各節点に負の水圧 p_w を与えサクシオンを調整した。

3. 検討ケース

表-3 に検討ケースの一覧を示す。 $S_r=100\%$ と $S_r=90\%$ の繰返し三軸試験結果を検討対象とした。二相系では飽和度に応じた間隙の体積弾性係数 K_p を設定する方法⁵⁾により、三相系ではサクシオンを制御する方法により不飽和状態を再現した。室内試験では飽和度を制御するのみでサクシオンの値を測定していないが、FLIPtrip によるシミュレーションではサクシオンの影響を考慮している ($\sigma'_{m0} > \sigma_c$)。三相系では設定した水分特性曲線に応じてサクシオンが負荷されるのに対し、二相系ではサクシオンを考慮した初期拘束圧を与えた(表-3 参照)。 α_i は室内試験と同じ値を設定した。

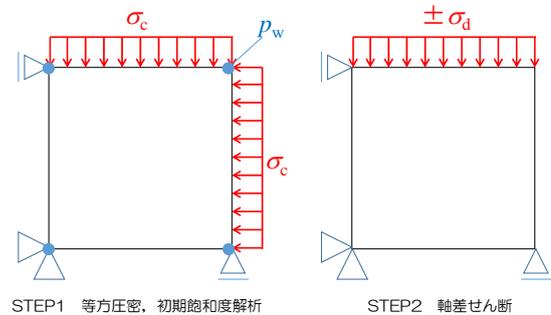


図-1 要素シミュレーションの境界条件

表-1 飽和土の繰返し三軸試験の再現解析により決定した Cocktail Glass モデル要素のパラメータ

ρ (t/m^3)	p_a (kPa)	G_m (kPa)	m_G	K_{la} (kPa)	K_{ua} (kPa)	n_K	ϕ_f (deg)	H_{max}	n	K_p (kPa)
2.00	98	54500	0.5	142100	142100	0.5	39	0.24	0.45	2.20E+06
ϕ_p (deg)	ε_d^{cm}	$r\varepsilon_{dc}$	$r\varepsilon_d$	q_1	q_2	r_k''	l_k	r_k	S_1	c_1
28	0.20	2.00	0.60	5.00	0.64	0.50	2.00	0.50	0.005	1.49

表-2 間隙水要素のパラメータ

K_f (kPa)	ρ_f (t/m^3)	k_f (m/s)	$IKSW$	p_{wvd} (kN/m^3)	S_r	K_a (kPa)	ρ_a (t/m^3)	k_a (m/s)	x_{si}	r_p	p_{awd} (kN/m^3)	
2.20E+06	1.00	1.40E-10	0	10	0.5	9.80E+01	1.23E-03	7.00E-09	0	1	10	
S_{rx}	S_m	s_{aU} (kPa)	n_{aU}	m_{aU}	s_{aL} (kPa)	n_{aL}	m_{aL}	S_{ni}	s_i (kPa)	n_{kf}	n_{ka}	m_f
0.99	0.20	4.50	8.10	1.00	3.00	5.00	1.00	0.90	3.50	0.50	0.50	1.000

表-3 検討ケース一覧と解析条件の相違点

$S_{r,target}$	モデル	初期飽和度の設定方法	STEP1					STEP2				
			σ_c (kPa)	p_w (kPa)	p_a (kPa)	s (kPa)	$S_{r,calculated}$ (%)	σ'_{m0} (kPa)	σ_d (kPa)	載荷方法	Δt	β
100	室内試験	B value > 0.95	98	測定していない				98	室内試験と同じ値	繰返し三軸試験		
	二相系	$K_p = 2.2 \times 10^6$		-						静的	0.002	-
	三相系	サクシオン制御		0	0	0	99			動的	0.001	2.00E-05
90	室内試験	供試体に供給した水の量から推定	98	測定していない				不明	室内試験と同じ値	繰返し三軸試験		
	二相系	$K_p = 980$	101.2	-				101.2		静的	0.001	-
	三相系	サクシオン制御	98	-3.5	0	3.5	90	101.2		動的	0.001	2.00E-05

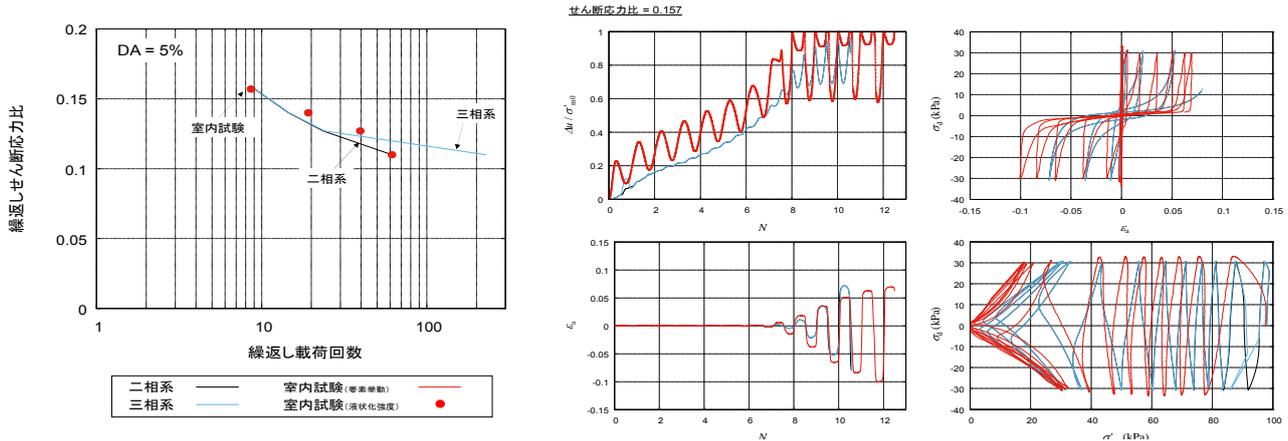


図-2 飽和土 ($S_r=100\%$) の繰返し三軸試験の再現解析結果

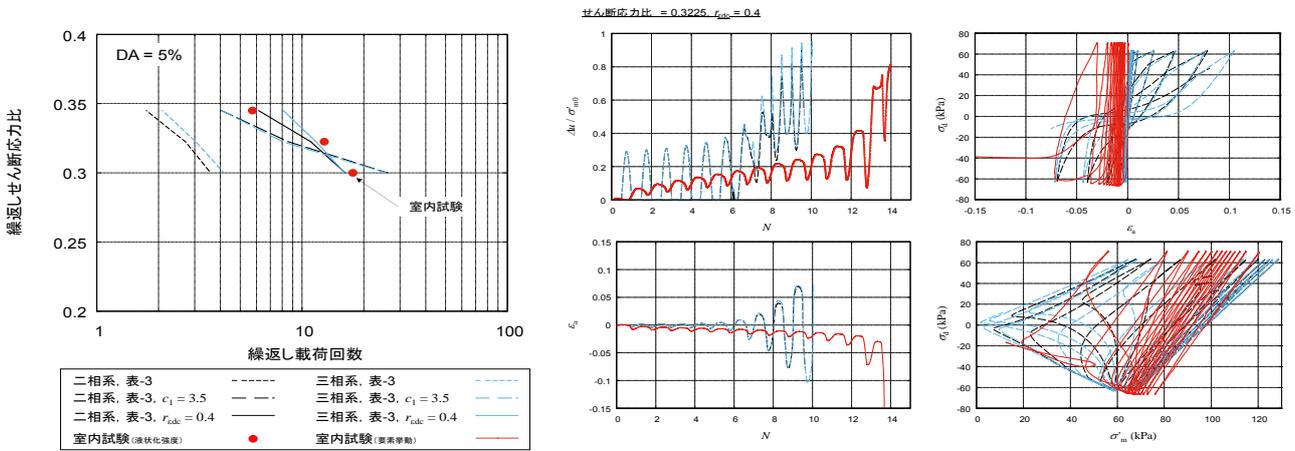


図-3 不飽和土 ($S_r=90\%$) の繰返し三軸試験の再現解析結果

4. 要素シミュレーション結果

三相系の軸差せん断は動的載荷 (DYNA) により実施した。 $S_r=100\%$ の要素シミュレーションにより、積分時間間隔とレーレー減衰の値を変化させ、解析を安定化させるための最適条件を検討した。 図-2 に $S_r=100\%$ の要素シミュレーションの結果を示す。せん断応力比が 0.11 のケースを除き、二相系と三相系の計算結果はほぼ一致している。設定した解析条件は概ね妥当なものになっていると判断し、これらの条件を基準に不飽和土の要素シミュレーションを実施した。

不飽和土 ($S_r=90\%$) の要素シミュレーションでは、表-3 の条件に加えダイレイタンスパラメータ c_1 と r_{edc} を変化させ繰返し三軸試験結果の再現を試みた。 図-3 に $S_r=90\%$ の要素シミュレーションの結果を示す。不飽和土の場合も、二相系と三相系で計算した結果はほぼ同様の結果になることが確認される。また、表-3 に示す「初期飽和度の設定」だけでは $S_r=90\%$ の繰返し三軸試験結果を再現できないことも確認される。一方、飽和度の低下はダイレイタンスにも影響を与えると考え c_1 と r_{edc} を調整すると、液状化強度曲線は右方向にシフトし、繰返し三軸試験結果に近づくことを確認した。

5. まとめ

不飽和土の繰返し非排水三軸試験結果に対して FLIPtrip を用いた二相系モデル、及び三相系モデルによる要素シミュレーションを行った。不飽和状態を再現する境界条件を適切に設定し、飽和度に応じて変化する K_p (二相系のみ) とダイレイタンスパラメータ (c_1 や r_{edc}) を適切な値に設定することで繰返し非排水三軸試験の結果をシミュレーションできると考えられる。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。繰返し三軸試験のデータは愛媛大学の岡村未対教授に提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献：

- 1) Iai, S.: Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test, GEESDV, 2018.
- 2) Okamura M. and Soga Y.: Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations, Vol. 46, No.5, pp.695-700, 2006.
- 3) Iai S., Tobita T., Ozutsumi O. and Ueda K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011.
- 4) 岡村未対, 来山博昭: 遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.662-671, 2008.
- 5) 平成 28 年度 FLIP コンソーシアム不飽和土 WG 成果報告資料

3-3 不飽和土の繰返し三軸試験に対する三相系の要素シミュレーション(その 3)

不飽和土 三相系 要素シミュレーション

株式会社明窓社 正会員○小堤 治

1. 概要

飽和砂地盤の地震時挙動を模擬するために、砂の構成則であるカクテルグラスモデル (Iai ら, 2011) を応力ひずみ関係とする運動方程式と、間隙水の挙動を模擬するための間隙水の収支バランス式 (Zienkiewicz & Bettles, 1982) が、既に FLIP ROSE プログラムに実装されていて、両者を連成させて解くことができる。前者の未知変数は変位 u で、後者の未知変数は間隙水圧 p_f である。Iai (2018) は、間隙水の収支バランス式の考え方を間隙空気に対しても適用して、運動方程式と間隙水の収支バランス式および間隙空気の収支バランス式の三つを連成させて解くことにより、不飽和土地盤の挙動を表現することが出来るとしている。新たに加わった未知変数は間隙空気圧 p_a であり、Iai (2018) は、 p_f と p_a を合体させて一般化流体圧力ベクトル \mathbf{p} とすることにより、これまでの飽和砂の支配方程式と同型の不飽和砂の支配方程式が得られるとしている。この不飽和砂の支配方程式が、不飽和土地盤ワーキンググループでの検討のために、FLIP ROSE プログラム (2次元版) に組み込まれた (以下、FLIPtrip)。この不飽和砂の支配方程式の適用性を確認するために、不飽和砂の繰返し三軸試験を模擬する解析を、FLIPtrip を用いて行った。以下に、この解析結果などを示す。

2. 対象とした繰返し三軸試験の概要

解析の対象としたのは、不飽和の稲城砂を対象として実施された繰返し三軸試験である (松丸&渦岡, 2014)。試験の手順を以下の①②に示す。①排気・排水条件下でサクシオンを与え、②非排気・非排水条件下で変位制御により軸ひずみを繰返し変化させる (三角波)。図 1 に軸ひずみ時刻歴を示す。繰返し三軸試験の供試体の初期状態を表 1 に示す。また、稲城砂のパラメータなどを表 2 に示す。図 2 には、供試体の稲城砂の水分特性曲線を示す。図中の試験値は、松丸&渦岡 (2014) に基づく。計算値は FLIPtrip による解析の際に使用した曲線であり、表 3 に示す FLIPtrip 用のパラメータを使って算定したものである。

3. カクテルグラスモデル要素などのパラメータ

稲城砂の供試体は FLIPtrip のカクテルグラスモデル要素 1 要素と節点共有で貼り合わせた流体要素 1 要素でモデル化した。カクテルグラスモデル要素のパラメータは、稲城砂 (飽和) に対する液状化試験結果 (松丸・小島・館山, 2014) をターゲットにキャリブレーションを行って決定した。決定したパラメータ値を表 4 に示す。このパラメータ値を使って稲城砂の液状化試験の再現解析を行った。解析結果の例を図 3 に示す。また、間隙流体要素のパラメータ値は、表-2 と表-3 のいくつかのパラメータ値に基づき設定した。

表 1 繰返し载荷の初期状態 (松丸&渦岡 (2014)に基づく)

Case	間隙 空気圧	間隙 水圧	サク シオン	飽和度	有効 飽和度	間隙 圧	基底 応力	全 応力	有効 応力
	p_a kPa	p_f kPa	s kPa	S_r	S_e	p kPa	σ_{net} kPa	σ kPa	σ' kPa
Case1	18	5	13	0.437	0.328	13.74	25	43.0	29.26
Case2	5	0	5	0.538	0.452	2.74	25	30.0	27.26
Case3	1.5	0	1.5	0.792	0.763	0.36	25	26.5	26.14

※1 間隙圧は Ohno et al (2007)の方法による。 ※2 解析では、 s_i , S_{ri} (FLIPtrip のパラメータ)として表中の s , S_e をそれぞれ指定した。

表 2 稲城砂のパラメータなど (松丸&渦岡 (2014)に基づく)

土粒子 の比重	細粒分 含有率	乾燥 密度	初期 間隙率	飽和 透水係数	乾燥 透気係数	間隙水 体積剛性	間隙空気 体積剛性
ρ_s	F_c	ρ_d	n_0	k_r	k_a	K_f	K_a
	%	t/m ³		m/s	m/s	kPa	kPa
2.723	23.6	1.108	0.596	1.86E-4	1.86E-5	2.2E+6	9.8E+1

※ K_f および K_a の値は、FLIPtripβ15_manual.docx の記述に基づく。

表 3 水分特性曲線を表すパラメータ (FLIPtrip)

Srx	Srn	saU	pnfU	pmfU	saL	pnfL	pmfL	Sri	sci
0.985	0.17	6	1.182	1	1.47	1.576	1	0.538 他	5.0 他

表 4 稲城砂のカクテルグラスモデル要素パラメータ

記号	ρ	n	p_a	G_{ma}	m_G	K_{La}, K_{Ua}	n_K	H_{max}	H_{maxL}	q_{us}	ϕ_f	ϕ_p	$-\epsilon_d^{cm}$	$r\epsilon_d^c$	$r\epsilon_d$	r_k	q_1	q_2	q_4	r_k''	c_1	l_k	r_f	r_{tmpp}
単位	t/m ³		kPa	kPa		kPa				kPa	度	度												
値	0	0.596	100	29500	0.5	76930	0.5	0.24	0.24	0	28.7	25.1	0.2284	3.45	0.4	0.5	10	1	1	0.3	1.95	1.2	0.1	0.5

※記号の意味は、Iai ら (2011) または FLIP ROSE Ver.7.4 の取扱説明書を参照。

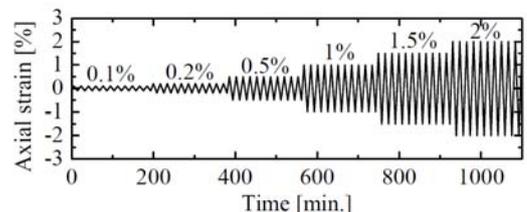


図 1 繰返し载荷で与えた軸ひずみ時刻歴 (松丸&渦岡, 2014)

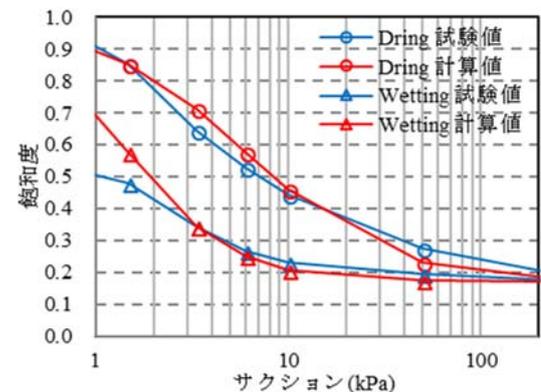


図 2 水分特性曲線 (試験値は松丸&渦岡(2014)に基づく)

4. 繰返し载荷の初期状態設定と動的要素シミュレーション

初期状態の設定では、表 1 に示す間隙空気圧 p_a 、間隙水圧 p_f 、全応力 σ をカクテルグラスモデル要素および間隙流体要素に与えた。载荷の順序は、①間隙空気圧 p_a と間隙水圧 p_f を载荷し、次に②全応力を载荷した。これにより要素の状態は、表 1 に示す状態 (p_a, p_f, s, S_r) をよく再現した。三軸試験での強制軸ひずみによる繰返し载荷を模擬するために、図 4 に示す 2 要素貼り合わせモデルを用いた。また、要素シミュレーションは動的解析として行った。

5. 繰返し三軸試験のシミュレーション結果

繰返し三軸試験の要素シミュレーション結果である間隙空気圧の経時変化、間隙水圧の経時変化および体積ひずみの経時変化を、それぞれ図 5、図 6、図 7 に示す。これら各図の、左側に試験結果（松丸&渦岡, 2014）を、右側に FLIPtrip の結果を示す。

6. 結論

FLIPtrip を用いて、稲城砂（不飽和）に対する繰返し三軸試験（松丸&渦岡, 2014）のシミュレーションを行った。繰返し三軸試験の初期状態は、FLIPtrip により忠実に再現された。また、繰返し三軸試験のシミュレーションでは、試験結果である諸量の経時変化がほぼ再現された。これにより、カクテルグラスモデルと一般化流体圧カベクトルの不飽和砂に対する適用性が確認出来た。

謝辞

本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものです。この活動に参加された皆様に謝意を表します。

参考文献

1) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., Ueda, K., 2011, Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in geomechanics, 35(3): 360-392. 2) Zienkiewicz, O.C., Bettles, P., 1982, Soil and Other Saturated Media under Transient, Dynamic Conditions, General Formulation and the Validity Various Simplifying Assumptions, in Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, Jhon Wiley & Sons. 3) Iai, S., 2018, Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test, 5th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Austin. 4) 松丸, 渦岡, 2014, 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 C, Vol. 70, No.4, 395-411. 5) 松丸, 小島, 館山, 2014, 浸透水の影響を受けた盛土の地震時挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol. 70, No. 1, 135-149.

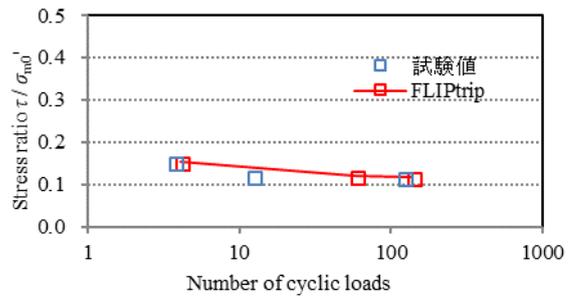
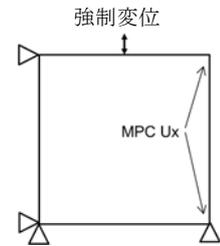


図 3 稲城砂(飽和砂)の液状抵抗曲線 試験値は松丸他(2014)による



2 要素貼り合わせモデル
間隙空気圧は4点で非排気条件
間隙水圧は4点で非排水条件
図 4 要素シミュレーション用モデル

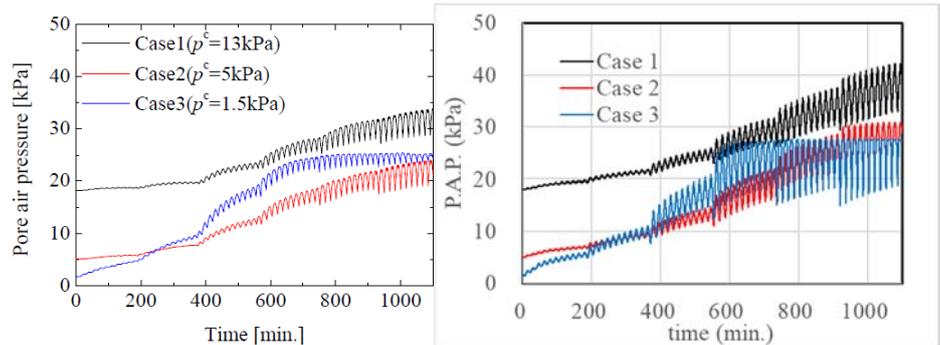


図 5 間隙空気圧の経時変化 (左図: 試験結果, 右図: FLIPtrip による)

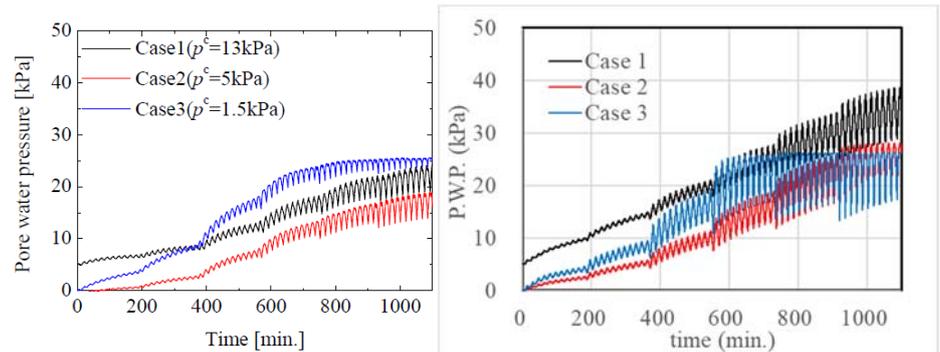


図 6 間隙水圧の経時変化 (左図: 試験結果, 右図: FLIPtrip による)

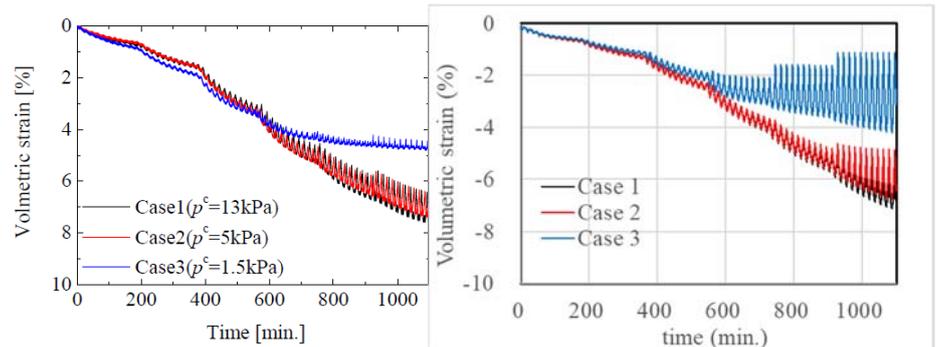


図 7 体積ひずみの経時変化 (左図: 試験結果, 右図: FLIPtrip による)

3-4 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 1)

有効応力解析 不飽和土 簡易解析法

株式会社ダイヤコンサルタント ○工藤 暢章

1. はじめに

本ワーキングでは、飽和土(2相系)及び不飽和土(3相系：水-空気-土粒子混合体)の両方を解析対象とする不飽和土解析用プログラムFLIPtri β版の実用化を主な目的としている。

FLIPtri β版は3相系による不飽和土解析をサポートするが、必要とするパラメータが多いため、これらの設定には細心の注意を要する。一方、簡便に不飽和土解析を疑似的に行う方法として簡易解析法がある。これは不飽和土における3相系の複雑な挙動を、飽和度に応じて等価な体積弾性係数を与えた2相系として扱うことで不飽和土の挙動を包括的に扱う手法である。必要な液状化パラメータはカクテルグラスモデルと同じである。本検討では簡易解析法により不飽和土の液状化特性を模擬するためのパラメータの設定法について考察を行った。

2. 要素シミュレーション

不飽和土の液状化特性を再現することを目的として、繰返し三軸試験を模擬した要素シミュレーションを実施した。不飽和土を対象とした既往の実験結果¹⁾について、この要素シミュレーションをFLIPtri β版で実施し、両者の比較を行った。簡易解析法では式(1)のように水と空気から成る間隙を飽和度に対応して等価な体積弾性係数 K_p で表現する2相系の問題として扱う。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{(1-S_r)}{K_a} \quad (1)$$

ここに、 K_p ：間隙の等価体積弾性係数 (kPa) , K_a ：空気の体積弾性係数 ($=1.4 \times 10^2$ kPa) , K_L ：水の体積弾性係数 ($=2.2 \times 10^6$ kPa) , S_r ：飽和度である。

2.1. 検討モデル

要素シミュレーションのFEMモデルを図-1に示す。要素タイプはカクテルグラスモデルを用いた。まず、要素に所定の有効拘束圧 (σ'_m) を与えるため、FEM要素の上面・側面に有効拘束圧相当の等分布荷重をかけた。次に繰返し応力比 r に相当する繰返し荷重 (正弦波, 振幅 $r \times (2\sigma'_m)$) を要素上面に載荷した。最初の載荷方向は圧縮側とした。液状化曲線は両軸ひずみが5%に達するときの繰返し載荷回数を用いた。

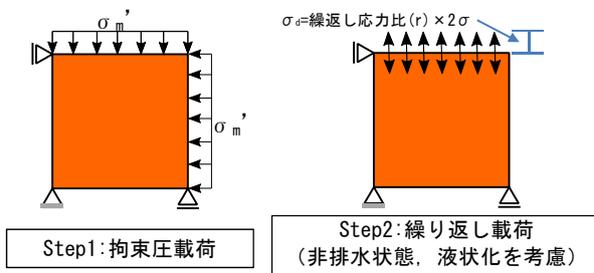


図- 1 要素シミュレーションのモデル

表- 1 検討ケース一覧

No.	飽和度 S_r (%)	等価体積弾性係数 K_p (kPa)	有効拘束圧 σ'_c (kPa)
1	100	2,200,000	98
2	98	6,978	98
3	96	3,495	98
4	90	1,399	98

2.2. 検討の進め方

飽和度 100%における要素シミュレーション (表-1 中のNo.1) により、試験結果に合うように調整した液状化パラメータを基本ケースとした。液状化パラメータ一覧を表-2に示す。次に飽和度が98%, 96%, 90%における簡易解析法による要素シミュレーションについて、表-2に示す液状化パラメータのうち、不飽和土の挙動を再現する影響が大きいと考えられるパラメータ r_k ($r_k' = r_k$ とする) , $r_{e,d}$ について試験結果に合うようにパラメータの調整を行った。

表- 2 カクテルグラス要素の液状化パラメータ ($S_r=100\%$) (赤枠は調整したパラメータ項目を示す)

検討ケース	基準拘束圧	初期せん断剛性	初期体積弾性係数	パラメータ	ポアソン比	密度	間隙率	最大減衰定数	粘着力	内部摩擦角					
	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	m, nk	ν	(t/m ³)	n	H_{max}	c	ϕ					
豊浦砂, $D_r=40\%$, $S_r=100\%$, $\sigma'_c=98$ kPa	98	54500	142100	0.5	0.33	2.00	0.5	0.24	0	39					
液状化パラメータ(カクテルグラス要素)															
変相角 ϕ_a (度)	$- \epsilon_d^{cm}$	$r_{e,dc}$	STOL	$r_{e,d}$	q1	q2	r_k'	r_k	S_1	c_1	q_{1s}	q4	r_γ	$r_{int,mp}$	1865SW
28	0.2	2.0	1.0E-06	1.0	1.0	1.1	0.3	0.3	0.005	1.41	0.0	1.0	0.1	0.5	0

2.3. 解析結果

(1) $r_k, r_{\epsilon d}$ の感度解析

$r_k, r_{\epsilon d}$ をそれぞれ単独で変化させ、試験結果（液状化曲線）と合うように調整を行った。飽和度 98% 時における感度分析の結果を図-2 に示し、飽和度 98%，繰返し応力比 $r=0.18$ におけるシミュレーション結果を図-3 に示す。図-2 に示すように $r_k, r_{\epsilon d}$ を増加させるに従い、いずれも液状化曲線は全体に左側にシフトする傾向がみられた。

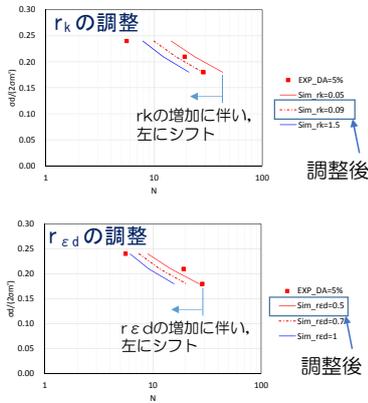


図-2 $r_k, r_{\epsilon d}$ の感度分析（飽和度 98% 時）

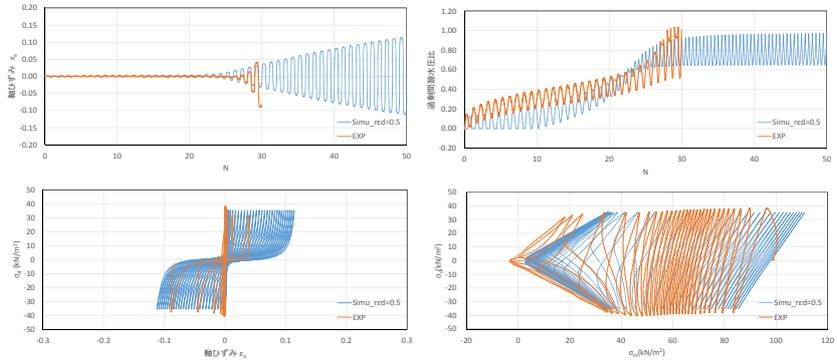


図-3 $r_{\epsilon d}$ 調整後のシミュレーション結果（飽和度 98%， $r=0.18$ ）

(2) 飽和度と調整後のパラメータの関係

$r_k, r_{\epsilon d}$ をそれぞれ単独で調整した場合における各飽和度における調整後のパラメータ値の関係を図-4 に示す。飽和度が下がるに従い、調整後のパラメータ値は $r_k, r_{\epsilon d}$ ともに小さくなった。また各飽和度の調整後の各パラメータは、飽和度が下がるに従い一定値に収束する傾向がみられ、パラメータが寄与する液状化曲線への影響が小さくなる傾向が推察された。

次に $r_k, r_{\epsilon d}$ を同時に調整した場合の液状化強度曲線を図-5 に示す。 $r_k, r_{\epsilon d}$ 同時調整後のパラメータ値は、それぞれを単独に調整した場合に比べ異なる値となり、試験結果へのフィッティングも向上した。 $r_k, r_{\epsilon d}$ 同時調整後の両者の関係をプロットしたのが図-6 である。飽和度が下がるに従い、調整後の $r_k, r_{\epsilon d}$ の相関関係が変化していることがわかる。別途行った検討結果（図-6 中「参考」と記載した系列）²⁾と比較すると、概ねこれに調和したパラメータ値となった。

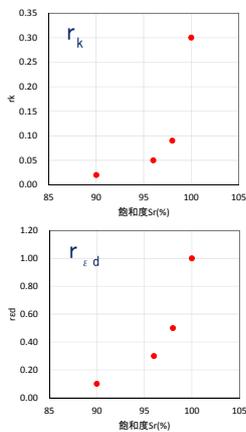


図-4 各飽和度における調整後の $r_k, r_{\epsilon d}$ ($r_k, r_{\epsilon d}$ を単独で調整)

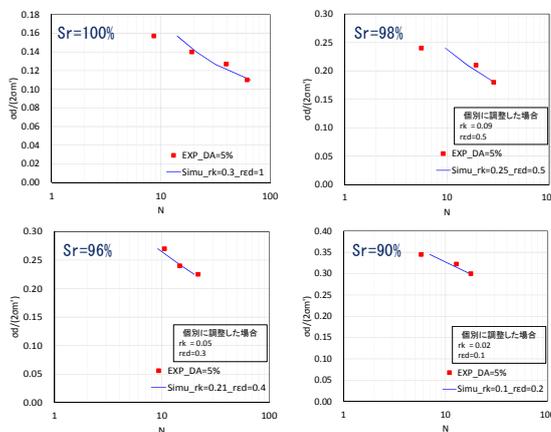


図-5 各飽和度における調整後の $r_k, r_{\epsilon d}$ ($r_k, r_{\epsilon d}$ を同時に調整)

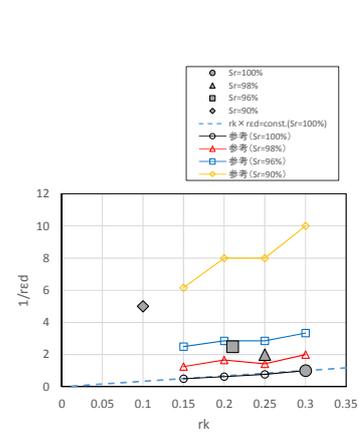


図-6 調整後の $r_k, r_{\epsilon d}$ の関係 ($r_k, r_{\epsilon d}$ を同時に調整) (図中「参考」は既往検討結果を示す²⁾)

3. まとめ

不飽和土解析用プログラム FLIPtri β 版を用いて、簡易解析法による液状化パラメータについて検討を行った。飽和度に応じて試験結果を再現する調整後の液状化パラメータ $r_k, r_{\epsilon d}$ の傾向を考察した。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。繰返し三軸試験のデータは愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Mitsu Okamura and Yasunasa Soga (2006): Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations, Vol. 46 No. 5, pp. 695-700
- 2) 北出圭介, 生瀬直樹 要素シミュレーション感度解析 宿題: r_k と $r_{\epsilon d}$ の関係について, 第 4 回 WG 資料

3-5 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その2)

不飽和土 動的特性 要素シミュレーション

復建調査設計株式会社 西村 敏明
 復建調査設計株式会社 水野 匠
 復建調査設計株式会社 渡邊 真悟

1 はじめに

ひずみ空間多重せん断モデルが組み込まれた二次元動的有効応力解析プログラム FLIP¹⁾は、砂の液状化を含む地震時の地盤構造物系の解析等において、広く活用されている。これに対し、FLIP のさらなる高度利用の観点より、同モデルの不飽和土への適用性について、盛土等の不飽和地盤への過剰間隙水圧の伝播により地震時の変状が大きくなる事象、液状化対策として地盤を不飽和化改良した事象を対象として研究が行われている。昨年度不飽和土 WG では、飽和度に応じてダイレイタンシパラメータ($r_{e,dc}$ 、 $c1$ 、 $q2$)の調整を行うことで不飽和土の液状化強度・挙動を再現できることを確認している³⁾。本検討ではダイレイタンシパラメータ($r_{e,d}$ 、 $q1$)を変化させることでの不飽和土の液状化強度を再現することを試みた。解析プログラムは、飽和土 (2 相系) 及び不飽和土 (3 相系: 水-空気-土粒子混合体) の両方を解析対象とする不飽和土解析用プログラム FLIPtrip の $\beta 15$ 版を用いた。地盤要素はカクテルグラスモデルを用いた。

2 検討方法

既往の不飽和土の繰返し非排水三軸試験²⁾に対して要素シミュレーションを実施した。昨年度報告³⁾で確認された飽和土の試験結果によくフィッティングするように設定されたパラメータを基本とした(図-1、表-1)。次に、飽和度に応じた間隙の体積剛性を式(1)より与え要素シミュレーションを実施し、試験結果の液状化強度と整合するようにダイレイタンシパラメータ $r_{e,d}$ 、 $q1$ を変化させた。検討対象とした実験は昨年度報告と同様に有効拘束圧が同じ 98kPa で飽和度の異なる No.4、No.7、No.8 とした(表-2)。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{(1 - S_r)}{K_a} + \frac{S_r}{K_f} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

K_p : 間隙の体積弾性係数

K_a : 空気の体積弾性係数(=1.4×10²kPa)

K_f : 水の体積弾性係数(=2.2×10⁶kPa)

S_r : 飽和度

表-1 検討対象ケース

No	飽和度 Sr(%)	拘束圧 σ'_c (kPa)	背圧 BP(kPa)
1	100	98	98
2		19.6	
3	98	49	98
4		98	
5		19.6	
6	96	49	98
7		98	
8	90	98	98
9			196
10			98
11	80	98	196
12			98
13	70	98	196

※ 赤字が検討対象

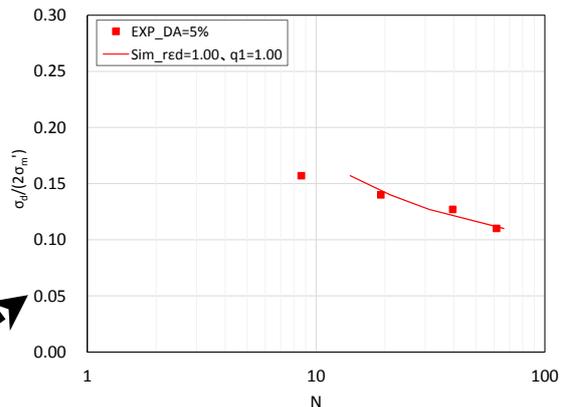


図-1 飽和土の試験のシミュレーション結果

表-2 飽和土の解析パラメータ

p_a (kPa)	98	$r_{e,d}$	1.00
Gma(kPa)	5.45E+04	q1	1.00
K_{La}, K_{ua} (kPa)	1.42E+05	q2	1.10
m_G, m_K	0.50	l_K	2.00
h_{max}	0.24	$r_{K,JK''}$	0.30
$\phi f(^{\circ})$	39.0	c1	1.41
$\phi p(^{\circ})$	28.0	s1	0.005
ϵ_{dcn}	0.20	r_y	0.10
$r_{e,dc}$	2.00	r_{mtmp}	0.50

□ : 今回追加検討 □ : 昨年度報告³⁾

3 検討結果

(1) $r_{e,d}$ の検討結果

図-2～図-3 に、一例として飽和度 96% に対してパラメータ $r_{e,d}$ を変更して最適値を求めた結果を示す。図-2 は飽和度 96% の液状化強度曲線に整合するように $r_{e,d}$ を変化させて検討した結果である。検討の結果、全てのケース ($S_r=98\%$ 、 96% 、 90%) において、 $r_{e,d}$ が増加すると液状化強度が小さくなる傾向が確認され、各飽和度において、 $r_{e,d}$ を変化させることで試験結果の液状化強度曲線へのフィッティングを行うことができた。また、図-3 に示すように、 $r_{e,d}$ を最適値とした場合の方が $r_{e,d}=1.00$ (飽和土の最適値) の場合よりも、軸ひずみ・過剰間隙水圧比ともに実験値に近づく傾向となった。これらのことから、パラメータ $r_{e,d}$ の感度は比較的に大きいと考えられる。

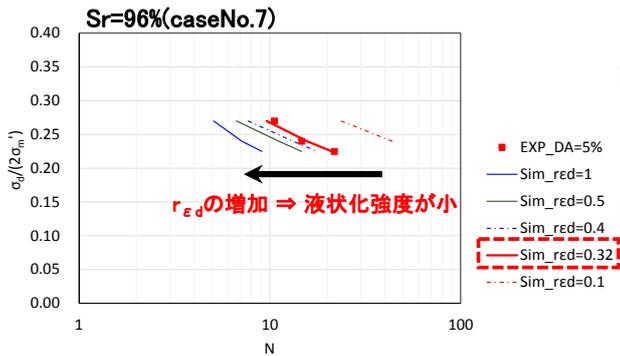


図-2 液状化強度曲線 (Sr=96%)

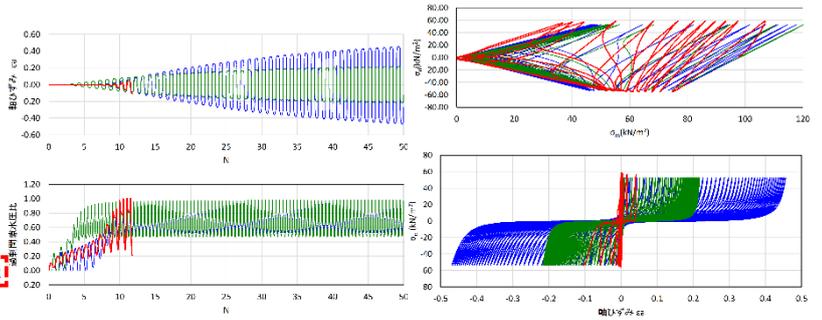


図-3 時刻歴等の結果 (Sr=96%、 $\sigma_d/(2\sigma'_m)=0.240$)

(赤：実験結果、青：解析結果 ($r_{\epsilon d}=0.32$)、緑：解析結果 ($r_{\epsilon d}=1.00$))

(2) q_1 の検討結果

図-4～図-5 に、一例として飽和度 96% に対してパラメータ q_1 を変更して最適値を求めた結果を示す。図-4 は飽和度 96% の液状化強度曲線に整合するように q_1 を変化させて検討した結果である。検討の結果、全てのケース (Sr=98%、96%、90%) において、 q_1 が増加すると液状化強度が小さくなる傾向が確認されたが、 $q_1=0.1$ 以下では液状化強度に変化がないことが確認されたことから $q_1=0.1$ が下限値となることがわかった。また、試験結果と比べ、液状化強度が小さくなる結果となり、試験結果の液状化強度曲線へのフィッティングはできなかった。図-5 に示すように、 $q_1=0.1$ (下限値) とした場合と $q_1=1.00$ (飽和土の最適値) とした場合において、解析結果に大きな違いは確認されなかった。よって、パラメータ q_1 の感度は比較的に小さいことがわかった。

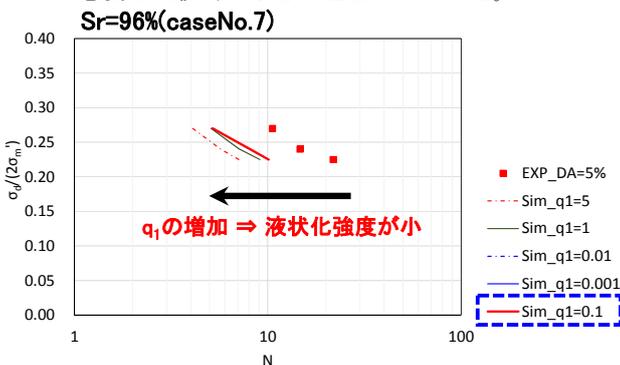


図-4 液状化強度曲線 (Sr=96%)

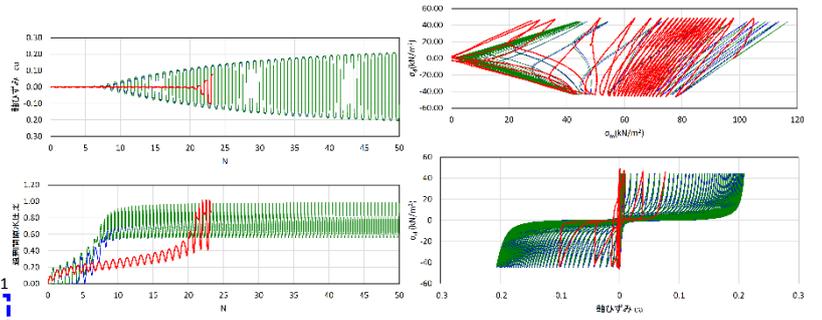


図-5 時刻歴等の結果 (Sr=96%、 $\sigma_d/(2\sigma'_m)=0.240$)

(赤：実験結果、青：解析結果 ($q_1=0.1$)、緑：解析結果 ($q_1=1.00$))

4 まとめおよび今後の課題

図-6 に、「3 検討結果」で得られた各パラメータの最適値と飽和度 Sr の関係を示す。図より、パラメータ $r_{\epsilon d}$ と飽和度 Sr には、飽和度の減少に伴い $r_{\epsilon d}$ も減少する相関関係が確認されたが、パラメータ q_1 と飽和度 Sr の相関関係は確認されなかった。

以上の検討結果より、不飽和土の挙動の再現にあたり、各パラメータの感度には差があることがわかった。本検討および昨年度報告³⁾では、パラメータ $r_{\epsilon dc}$ 、 $r_{\epsilon d}$ 、 c_i 、 q_1 、 q_2 のそれぞれに対する検討を実施したが、今後は各パラメータを組み合わせるの検討を実施し、不飽和土の試験結果の液状化強度を再現する必要があると考えられる。

謝辞：本検討は FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。繰返し三軸試験のデータは愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献：1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.

2) Mitsu Okamura and Yasumasa Soga: Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations Vol.46, No.5, pp.695-700, 2006.

3) 曾根照人他: 不飽和土の繰返し 3 軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 12), 一般社団法人 FLIP コンソーシアム平成 29 年度報告会, pp.49-50, 2017

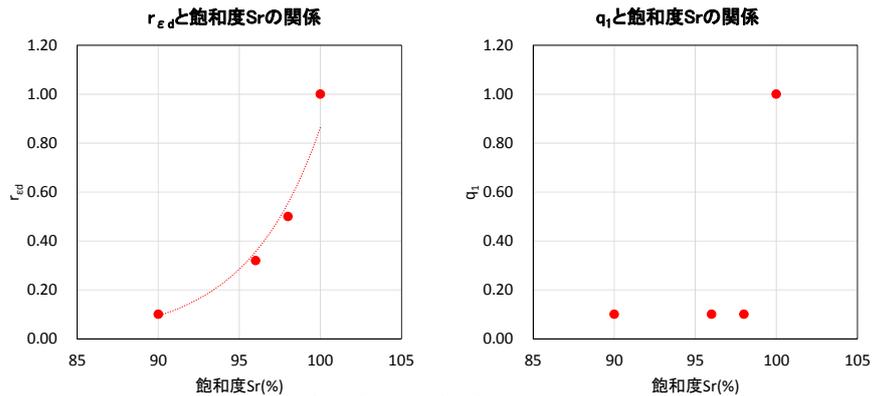


図-6 飽和度 Sr と各パラメータとの関係

3-6 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 3)

不飽和土 有効応力解析法 液状化

東電設計株式会社 ○兵頭順一
落合祐介
杉浦陽子

1 はじめに

一般社団法人 FLIP コンソーシアムでは、不飽和土の液状化強度に対する検討として、様々な要素シミュレーション検討を通じた研究開発を行っている。本検討では、不飽和土を対象とした繰返し三軸試験結果^{1),2)}を基本として、ひずみ空間多重せん断モデル³⁾のカクテルグラスモデル要素の各パラメータの感度解析を実施したものである。なお、解析コードは、FLIPtrip β15 版⁴⁾を用いた。

2 解析条件

Okamura and Soga (2006)¹⁾は、不飽和土に対する繰返し三軸試験を実施している。本検討では、等方圧密後に周期 0.01Hz の正弦波で軸差せん断を行う方法とした。解析方法を図-1 に示す。

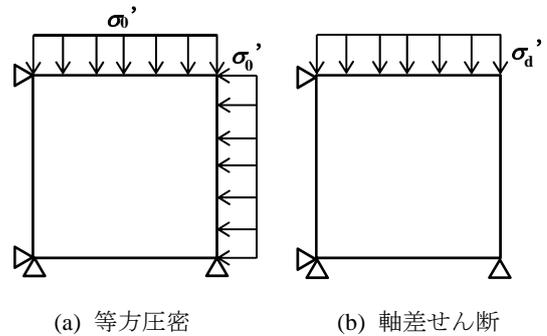


図-1 解析方法

表-1 解析に用いる地盤物性値

動的変形特性	平均有効拘束圧 P_a (kPa)	98.0
	初期せん断弾性係数 G_0 (kPa)	54500.0
	体積弾性係数 K_{La}, K_{Ua} (kPa)	142100.0
	拘束圧依存係数 m_G, m_K	0.5
	質量密度 ρ (t/m^3)	2.00
	間隙率 n	0.50
	粘着力 c (kPa)	0.0
	内部摩擦角 ϕ (degrees)	39.0

表-2 液状化パラメータ (基本ケース)

液状化特性	飽和度 S_r (%)	100.0	98.0	96.0	90.0
	変相角 ϕ_p (degrees)	28.0	28.0	28.0	28.0
	ε_d^{cm}	0.2	0.2	0.2	0.2
	r_{edc}	2.0	1.1	0.9	0.35
	r_{ed}	1.0	1.0	1.0	1.0
	q_1	1.0	1.0	1.0	1.0
	q_2	1.1	1.1	1.1	1.1
	l_k	2.0	2.0	2.0	2.0
	r_k	0.3	0.3	0.3	0.3
	S_1	0.005	0.005	0.005	0.005
	c_1	1.4	1.4	1.4	1.4

不飽和土の解析は、Okamura and Soga (2006)¹⁾のうち、飽和度 $S_r=100, 98, 96, 90(\%)$ の結果 (拘束圧 98 (kPa)) を用いて、カクテルグラスモデル要素のパラメータ r_k と r_{edc} の感度解析を実施した。なお、不飽和土の間隙の体積弾性係数は飽和度 S_r に応じて式(1)で算定した。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{(1 - S_r)}{K_a} \quad (1)$$

ここで、 K_a は空気の体積弾性係数 (1.4×10^2 kPa)、 K_f は水の体積弾性係数 (2.2×10^6 kPa) である。

解析に用いる地盤物性値を表-1、表-2 に示す。本解析では表-2 に示す液状化パラメータを基本ケースとして、 $r_k=0.025, 0.5, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.8, 1.0$ とした場合の要素シミュレーションを実施し、 r_k と r_{edc} の関係の整理を行った。

3 解析結果

基本ケースの液状化強度曲線を図-2 に、解析結果の一例 (飽和度 $S_r=96\%$, $r/\sigma'_m=0.24$) を図-3 に示す。

図-4 に、飽和度 S_r と r_{edc} の関係を示す。飽和度 S_r が大きいほど、 r_k が大きいほど、 r_{edc} は大きくなる結果となった。また、図-5 に飽和度 S_r と $r_k \times r_{edc}$ の関係を示す。飽和度 S_r が大きいほど、 r_k が大きいほど、 $r_k \times r_{edc}$ は大きくなる結果となった。図-6 に、 r_k と r_{edc} の関係を示すが、両者は反比例の関係を示した。

4 まとめ

本検討では、Okamura and Soga (2006)¹⁾による不飽和土の繰返し三軸試験を対象に、FLIPtripβ15 版⁴⁾による要素シミュレーションを実施した。本検討では、飽和度 S_r に応じた液状化パラメータ r_k と r_{edc} の関係の整理を行った。今後、不飽和土の簡易的なパラメータ設定を検討する予定である。

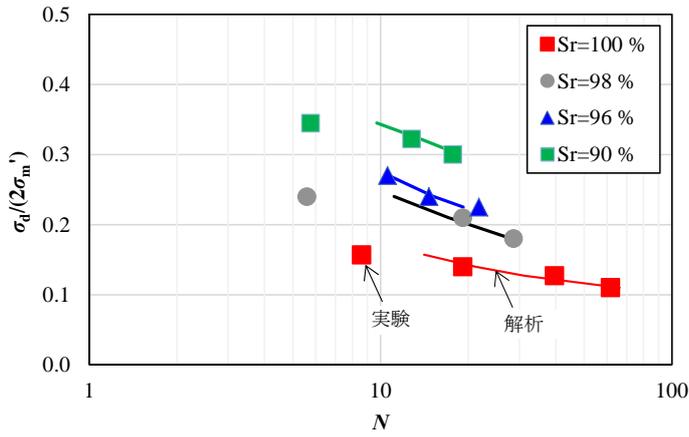


図-2 液状化強度曲線 (基本ケース)

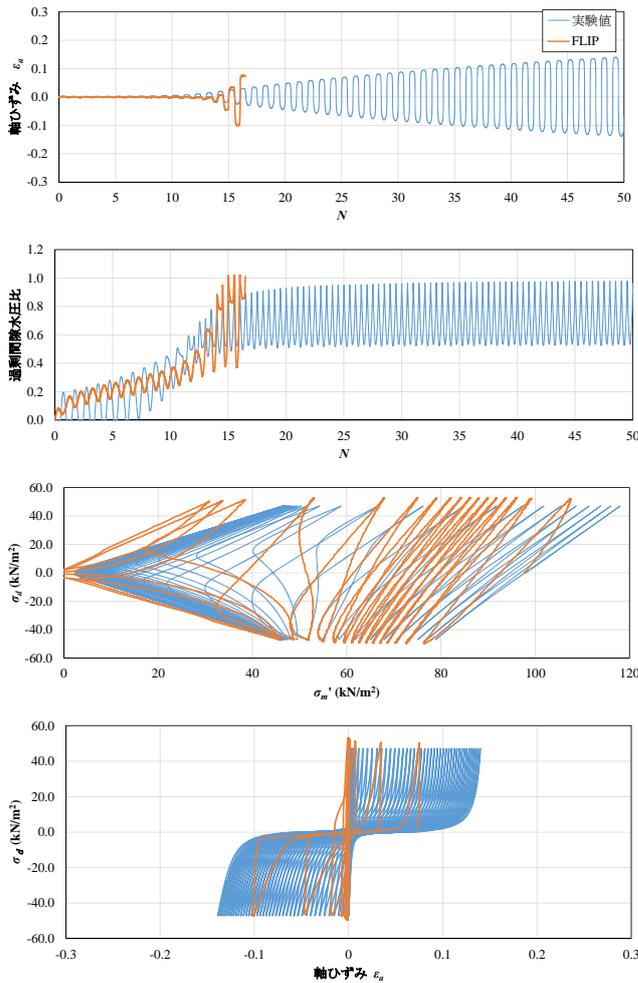


図-3 解析結果の一例 (飽和度 $S_r=96\%$, $\tau/\sigma'_m=0.24$)

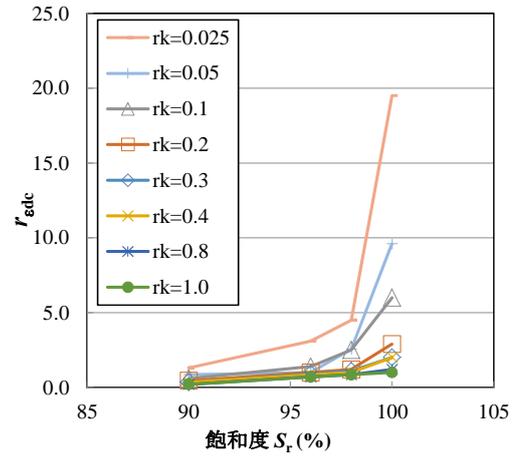


図-4 飽和度 S_r と r_{edc} の関係

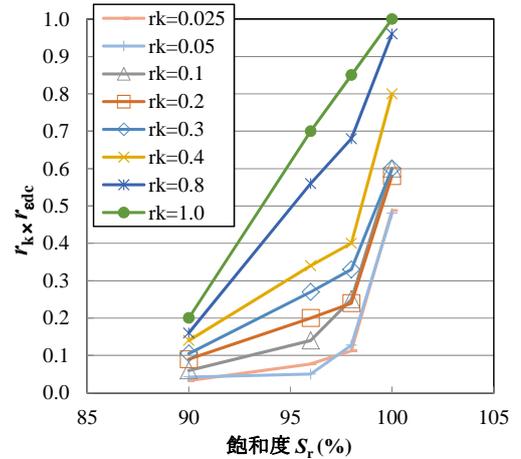


図-5 飽和度 S_r と $r_k \times r_{edc}$ の関係

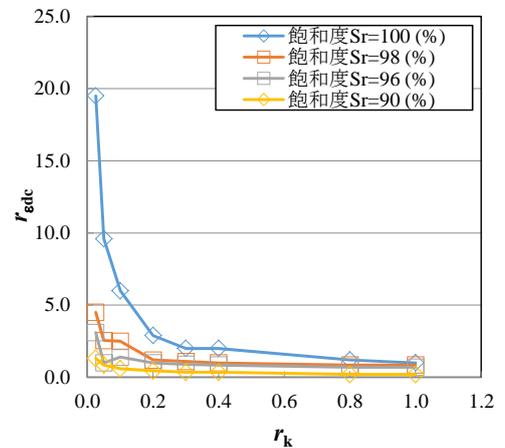


図-6 r_k と r_{edc} の関係

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。繰返し三軸試験のデータは愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Okamura, M., Soga, Y. (2006) : Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.695-700.
- 2) 藤井直, 西垣誠, 大内正敏 (2010) : 不飽和砂の液状化強度特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.3, pp.564-576
- 3) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., and Ueda, K. (2011) : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.35, No.3, pp.360-392.
- 4) Iai, S. (2018) : Partially saturated soil formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test, GEEDV.

3-7 不飽和土の繰返し三軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション(その 4)

不飽和土 液状化 要素シミュレーション

中電技術コンサルタント株式会社 ○北出 圭介
株式会社ニュージェック 曾根 照人, 楠 謙吾

1. はじめに

飽和砂地盤の地震時挙動を模擬するために、砂の構成則であるカクテルグラスモデル¹⁾を応力-ひずみ関係とする運動方程式と、間隙水の挙動を模擬するための間隙水収支バランス式が、FLIP ROSE プログラムに実装されていて、両者を連成させて解くことができる(2 相系モデル)。井合は、これに間隙空気収支バランス式を追加した 3 相系モデルにより、不飽和砂地盤の挙動を表現する方法を提案している²⁾。同時に、間隙流体を等価な体積弾性係数を持つ、液体と気体の混合体として取り扱う簡易法も提案している²⁾。簡易法であれば、既存の 2 相系モデルを流用することが出来る。昨年度は、簡易法の検証のために不飽和砂の非排水繰返し三軸試験の要素シミュレーションを行った。しかし、間隙流体に等価体積弾性係数を与えただけでは、実験結果を精度よく再現できなかったことから、負のダイレイタンシも影響していると考え、ダイレイタンシ制御用パラメタ $r_{\varepsilon dc}$, c_1 , q_2 も変化させて不飽和土の液状化強度を再現することを試みた。本年度は、昨年度に追加して、 $r_{\varepsilon d}$, r_k , q_1 についても検討を実施するとともに、 r_k と $r_{\varepsilon d}$ (または $r_{\varepsilon dc}$) の両方を変化させて不飽和土の液状化強度を再現することも試みた。

2. 検討方法

Okamura らの不飽和の繰返し三軸試験³⁾は表-1 に示すように、飽和度 $S_r=70\sim 100\%$ で実施されている。本検討では、有効拘束圧が同じ 98kPa で、飽和度が異なる No.1, No.4, No.7, No.8 を対象とする要素シミュレーションを実施した。No.1 の飽和土 ($S_r=100\%$) から設定したカクテルグラス要素のパラメタを表-2 に示す。飽和度に応じて間隙流体の体積剛性を式(1)により与えた上で、試験結果の液状化強度を説明するような各パラメタ値を求めた。さらに、 r_k と $r_{\varepsilon d}$ を同時に変化させて、試験結果を説明するようなその組み合わせを求めた。 r_k と $r_{\varepsilon dc}$ の組み合わせについても同様。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{(1 - S_r)}{K_a} + \frac{S_r}{K_f} \quad (1)$$

ここに、 S_r は飽和度、 K_f は流体の体積弾性係数で、水の場合は 2.2×10^6 kPa、 K_a は気体の体積弾性係数で、空気の場合は 1.4×10^2 kPa である。

3. 検討結果

昨年度の成果報告書の「3-12 不飽和土の繰返し 3 軸試験に対する簡易解析法による要素シミュレーション (その 12)」に追加して、図-1 に飽和度に応じた各パラメタの最適な値を示す。飽和度 100% のシミュレーションより設定したパラメタ値のまま、間隙流体の体積剛性だけを変化させるより、追加して、 $r_{\varepsilon dc}$, $r_{\varepsilon d}$, c_1 , r_k , q_2 も変化させることで、実験結果と調和的になることが分かる。なお、 q_1 は、変化させても実験結果を説明することは出来なかった。飽和度が小さくなると液状化強度が大きくなるため、 q_1 を除く各々のパラメタの液状化強度への寄与を飽和度に応じて考慮すると、不飽和土の挙動をより精緻に再現することが可能であることを示している。次に、土骨格の体積弾性係数の低減係数 r_k とダイレイタンシ制御パラメタ $r_{\varepsilon d}$ を同時に変化させて、飽和度に応じた両パラメタ値の最適な組み合わせを求めた。その結果を図-2 に示す。なお、飽和度 100% の場合は、 $r_k \times r_{\varepsilon d} = \text{const.}$ となるように変化させた⁴⁾。また、 r_k と $r_{\varepsilon dc}$ の最適な組み合わせについては、図-3 に示す。 r_k に対する $r_{\varepsilon d}$, $r_{\varepsilon dc}$ の値は、飽和度が小さくなるにしたがって r_k の違いによる $r_{\varepsilon d}$, $r_{\varepsilon dc}$ の取り得る範囲が小さくなる傾向になった。さらに、図-2 の右側には、 $r_k \times r_{\varepsilon d} = \text{const.}$ あれば液状化強度が変化しないことを不飽和土でも確認するために、 r_k と $1/r_{\varepsilon d}$ のグラフに $r_k \times r_{\varepsilon d} = \text{const.}$ の近似曲線を追加した。ここで、飽和度 100% については、 r_k と $r_{\varepsilon d}$ の組み合わせはこの近似曲線上にあるが、不飽和土の $S_r=98\%$, 96% , 90% についても概ね $r_k \times r_{\varepsilon d} = \text{const.}$ の傾向になっている。

表-1 検討ケース

No.	飽和度 $S_r(\%)$	有効拘束圧 $\sigma'_c(\text{kPa})$	背圧 (kPa)
1	100	98	98
2	98	19.6	98
3		49	
4		98	
5	96	19.6	98
6		49	
7		98	
8	90	98	98
9		98	196
10	80	98	98
11		98	196
12	70	98	98
13		98	196

表-2 カクテルグラスモデルの解析定数

$P_a(\text{kPa})$	98.00	$r_{\varepsilon d}$	1.00
$G_{ma}(\text{kPa})$	54500.00	q_1	1.00
$K_{La}, K_{ua}(\text{kPa})$	142000.00	q_2	1.10
m_G, m_K	0.50	l_k	2.00
h_{max}	0.24	r_k, r_k''	0.30
$\phi f(^{\circ})$	39.00	c_1	1.41
$\phi p(^{\circ})$	28.00	s_1	0.01
ε_{dcm}	0.20	r_{γ}	0.10
$r_{\varepsilon dc}$	2.00	r_{mtmp}	0.50

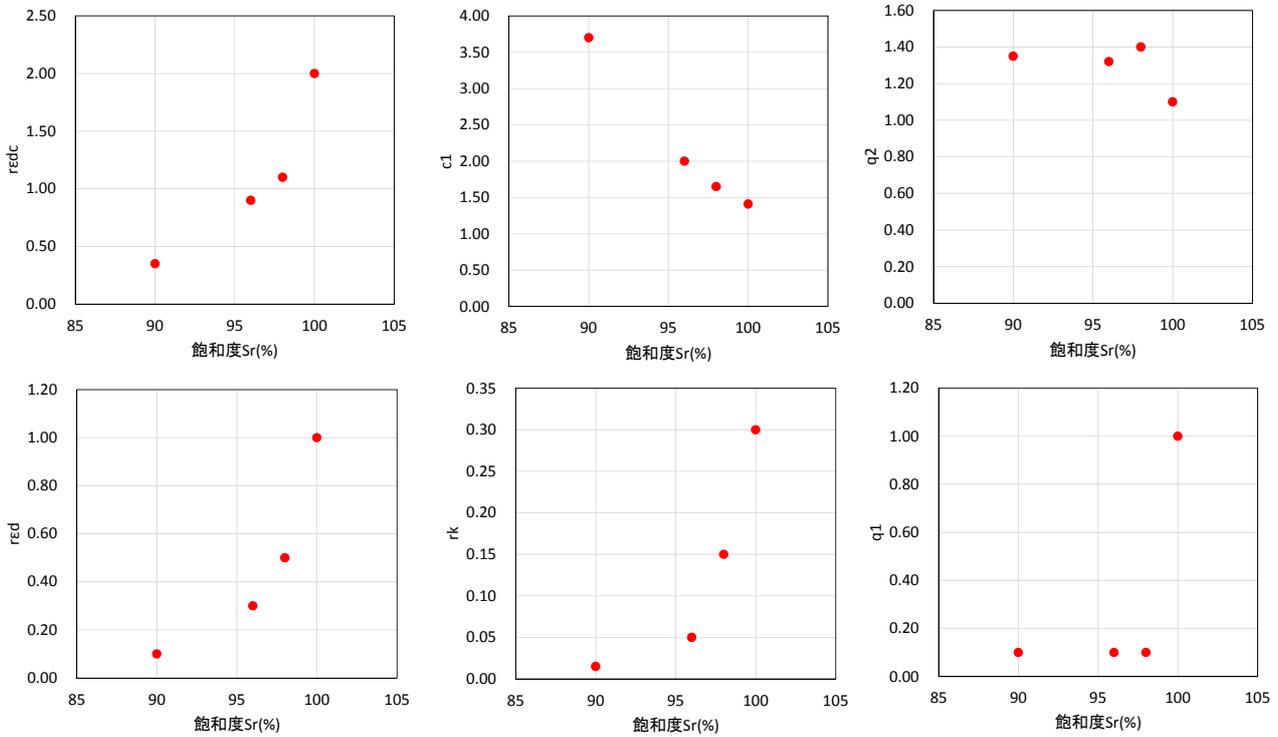


図-1 飽和度別の各パラメタの最適値 ※上段3図は昨年度の検討結果

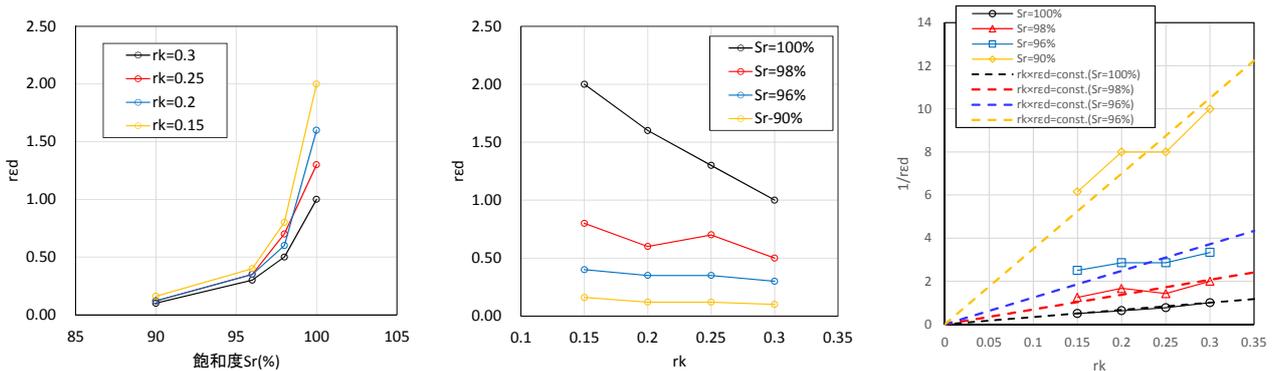


図-2 飽和度別の r_k と $r_{\epsilon d}$ の最適な組み合わせ

4. まとめ

簡易法に基づく2相系の要素シミュレーション結果は、不飽和土の挙動を再現するためには、間隙流体の体積弾性係数だけでなく、土骨格のダイレイタンシ制御用パラメタも調整する必要があることが昨年度の成果に追加してあらためて確認できた。今後は、飽和度に応じて各々のパラメタがどのように関係するかを数式等で表現していきたいと考える。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。試験データを提供頂いた岡村未対先生はじめ、関係者の方々に謝意を表します。

参考文献： 1) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O., Ueda, K., 2011, Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in geomechanics, 35(3): 360-392. 2) Iai S. (2018). "Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test" 5th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Austin. 3) Okamura, M. and Soga, Y. (2006). "Effect of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand." Soils and Foundations, 46 (5): 695-700. 4) FLIP 研究会 Steady State WG 平成21 年度 成果報告書の表 3-4-1.

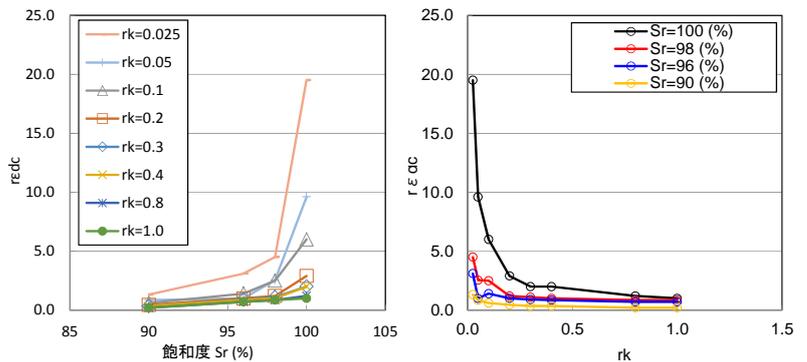


図-3 飽和度別の r_k と $r_{\epsilon dc}$ の最適な組み合わせ

4 不飽和土地盤の遠心載荷実験等の再現解析

4-1 不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心载荷模型を対象とした再現解析(その 1)

不飽和土 有効応力解析法 液状化

東亜建設工業株式会社 田代聡一

1 はじめに

地震時において不飽和状態にある砂地盤は、飽和砂地盤に比べ高い液状化強度を有することが知られている。この性質を利用した液状化対策として空気注入不飽和化工法¹⁾が開発されており、当該工法の道路盛土への適用性を確認するため遠心载荷模型実験が行われている²⁾。本報告は、この模型実験を対象として、従来の 2 相系(土粒子-水)で定式化されたひずみ空間多重せん断モデル(Cocktail Glass モデル)³⁾をもとに 3 相系(土粒子-水-空気)に拡張されたプログラム FLIPtripβ15 版⁴⁾を用い、2 相系及び 3 相系による再現解析を行ったものである。

2 検討対象模型実験²⁾の概要

対象とする遠心载荷模型実験ケースの模型図を図 1 に示す。Case1 は未対策地盤、Case3 は不飽和化対策地盤である。模型の縮尺は 1/40 (遠心加速度 40g) である。地盤材料はすべて豊浦砂 ($\rho_s=2.64$, $e_{min}=0.609$, $e_{max}=0.973$) が用いられ、盛土材料のみカオリン粘土が混合されている。基礎地盤は、厚さ 2cm の相対密度 $D_r=90\%$ の土層と厚さ 13.5cm の相対密度 $D_r=60\%$ の土層で構成されている。Case3 における不飽和領域の地下水位における幅は 19.5cm, 不飽和領域の飽和度は 93.2% である。加振は、入力加速度を次第に上げて 3 回行われているが、2 回目までの沈下量は 0.5mm (原型スケールで 2cm) と小さいため、文献²⁾では主に 3 回目の結果が示されている。再現解析においても、この 3 回目の入力加速度波形 (図 2) を対象とした。

3 解析条件

実験ケースの Case1 及び Case3 に対し、それぞれ 2 相系で解く場合と 3 相系で解く場合を実施した。

各地盤材料の物理特性及び変形特性は、相対密度をもとに簡易設定法⁵⁾を用いて推定した。推定したパラメタを表 1 に示す。なお、間隙の等価体積弾性係数 K_p は、式(1)を用いて算定したものであり、2 相系の解析のみにおいて適用される。

$$\frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{(1-S_r)}{K_a} \quad (1)$$

ここに、 K_f は水の体積弾性係数 ($2.2 \times 10^6 \text{kPa}$) であり、 K_a は空気の体積弾性係数 (140kPa) である。

飽和領域の液状化強度は、変形特性と同様、相対密度をもとに簡易設定法⁵⁾を用いて推定した。一方、不飽和領域における液状化強度については、不飽和土の体積ひずみポテンシャル ε_v^* (式(2)) と液状化強度倍率 R_{desat}/R_{sat} の関係 (式(3))⁶⁾を用いて推定した。

$$\varepsilon_v^* = \frac{\sigma_v'}{p_0 + \sigma_v'} (1 - S_r) \frac{e}{1+e} \quad (2)$$

$$\frac{R_{desat}}{R_{sat}} = \log(6500\varepsilon_v^* + 10) \quad (3)$$

ここに、 e は間隙比、 p_0 は初期間隙圧及び σ_v' は有効上載圧である。式(2)からわかるように、体積ひずみポテンシャルは有効上載圧等に依存するが、本事例においては液状化強度倍率のばらつきは小さいため、代表値として盛土直下における不飽和土層の中

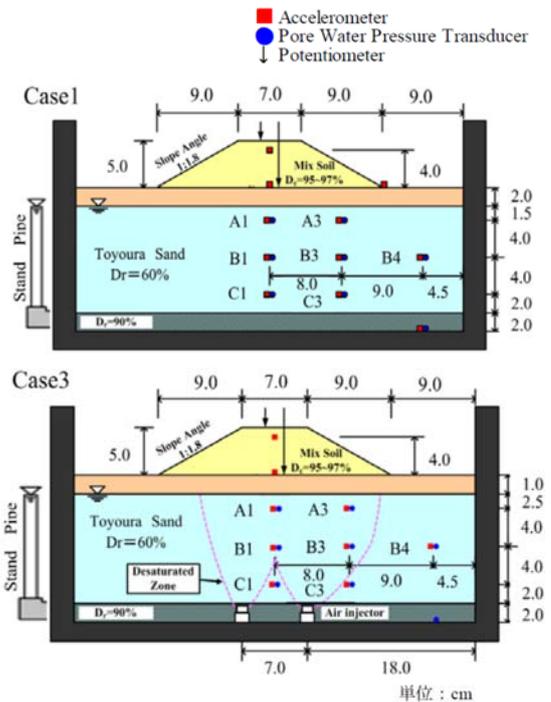


図1 検討対象模型図 (模型スケール)²⁾

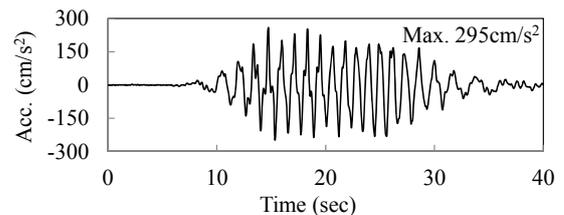


図2 入力加速度波形 (原型スケール)²⁾

表1 物理特性及び変形特性に関するパラメタ

項目	基礎 $D_r=90\%$	基礎 $D_r=60\%$			盛土
		飽和域	不飽和	水位上	
$\rho(t/m^3)$	2.00	1.93	1.91	1.80	1.80
$P_a(\text{kPa})$	98.0	98.0			98.0
$G_{ma}(\text{kPa})$	1.65×10^5	9.53×10^4			1.65×10^5
$K_{LUa}(\text{kPa})$	4.30×10^5	2.49×10^5			4.30×10^5
m_G, nk	0.5	0.5			0.5
h_{max}	0.24	0.24			0.24
n	0.392	0.430			0.392
$K_p(\text{kPa})$	2.2×10^6	2.2×10^6	2.1×10^5	-	-
$\phi(\text{°})$	43	40			43

中央深度における値を採用した。このときの体積ひずみポテンシャル及び液状化強度倍率は、それぞれ、0.0213 及び 2.17 である。飽和土及び不飽和土の液状化特性に関するパラメータを表 2 に、液状化強度曲線を図 3 に示す。

3 相系で解く場合には水分特性曲線と透水(気)係数(両者とも Van Genuchten 式)が必要になる。前者については、岡村・来山(2008)において用いられた豊浦砂の水分特性曲線を参考に設定した。ここで設定した両者のパラメータを表 3 に示す。なお、Case3 の飽和度解析及び自重解析においては不飽和領域内の飽和度が所定の値(ここでは 93.2%)になるように空気圧(水分特性曲線の間接線上において所定の飽和度に対応するサクシオンに静水圧を加えた圧力)を与えた。

4 解析結果

盛土天端における沈下(図 4)は、2 相系と 3 相系で有意な差は見られず、未対策地盤で実験の半分程度ではあるものの不飽和化対策地盤では実験結果を再現することが確認できた。過剰間隙水圧(図 5, 図 6)についても、2 相系と 3 相系で違いはなく、実験結果を比較的良好に再現できている。なお、Case3 の C1, C3 地点では、モデル上は飽和領域に含めているが、実際には不飽和領域であったものと考えられる。

5 まとめ

2 相系, 3 相系のいずれの解析手法も不飽和化対策地盤の変形照査には有用であることが確認できた。

謝辞: 本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。入力加速度波形及び間隙水圧の時刻歴等の実験データは、愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献: 1) Air-des 工法研究会: 空気注入不飽和工法(Air-des 工法)技術マニュアル, 2012. 2) 富田雄一, 紙田直充, 内田純二, 岡本辰也, 岡村未対: 液状化対策としての地盤不飽和工法の道路盛土への適用性に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.3, pp.375-386, 2014. 3) Iai S, Tobita T, Ozutsumi O and Ueda K: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.35, No.3, pp.360-392, 2011. 4) Iai, S.: Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test, *Proc. 5th GEESDV, Austin, Texas*, 2018. 5) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997. 6) Okamura M and Soga Y: Effect on liquefaction resistance of volumetric strain of pore fluid, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.696-700, 2006. 7) 岡村未対, 来山博昭: 遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作成と飽和度計測法に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.662-671, 2008.

表2 液状化特性パラメータ

項目	飽和砂	不飽和砂
$\phi_p(^{\circ})$	28.0	28.0
ε_d^{cm}	0.2	0.2
$r\varepsilon_{dc}$	0.9	0.15
$r\varepsilon_d$	0.5	0.5
q_1	2.0	1.0
q_2	1.0	1.0
r_K	0.18	0.1
r_K^{**}	0.18	0.1
l_K	2.0	2.0
s_1	0.005	0.005
c_1	1.6	2.0
r_γ	0.1	0.1
r_{tmp}	0.5	0.5

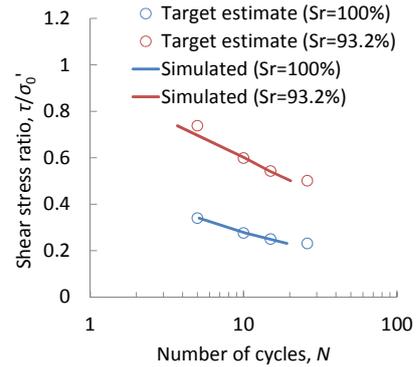


図3 推定液状化強度曲線

表3 水分特性曲線と透水(気)係数に関するパラメータ

S_{rx}	S_m	S_aU	r_{nLU}	r_{mLU}	S_aL	r_{nLL}	r_{mLL}	r_{nkf}	r_{nka}	r_{mf}
0.99	0.18	4.5	12.0	1.0	3.0	4.5	1.0	0.5	0.5	1.0

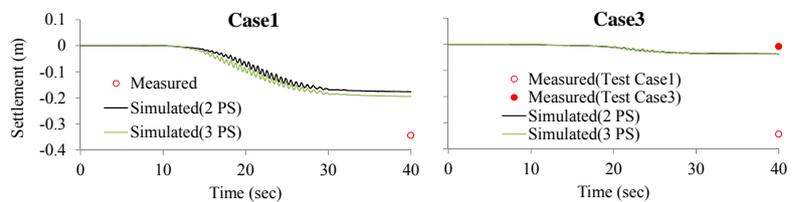


図4 盛土天端における沈下時刻歴

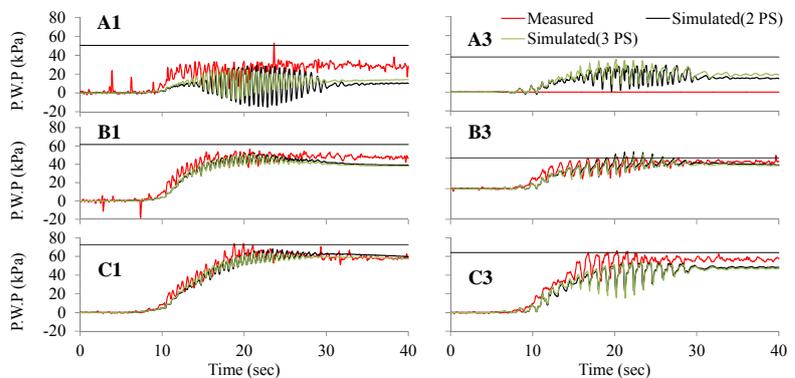


図5 過剰間隙水圧時刻歴 (Case1)

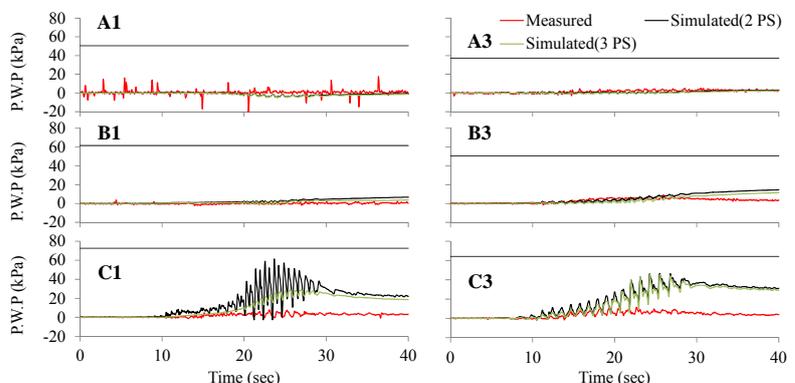


図6 過剰間隙水圧時刻歴 (Case3)

4-2 不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心载荷模型を対象とした再現解析(その 2)

不飽和土 有効応力解析

東洋建設株式会社 新名 大輔

1. はじめに

多重せん断ばねモデルを基本とするカクテルグラスモデル¹⁾を不飽和土の解析へ拡張することを目的に、富田ら²⁾が実施した不飽和地盤の遠心模型実験を対象に再現解析を実施した。検討において動的解析が実行できるものの安定しないことがあったが、いくつかの改善策を施すことで安定した結果を得られた。本報告は、その検討過程を記す。なお、プログラムは 3 相形解析が可能な FLIPtripβ15 版を使用する。

2. 解析条件

富田らが実施した実験のうち、Case3 の盛土直下地盤を不飽和化した地盤を対象に検討を行う。模型実験の概要を図-1 に示す。実験は剛な土槽内に相対密度を調整した豊浦砂で地盤と盛土を構築する。そして、遠心加速度を 40g に上昇させた後に土槽底面上の空気注入口から空気を注入して地盤の不飽和化を行う。その後動的実験を実施して不飽和化地盤の挙動を観察している。図-1 の Desaturated Zone が実験で不飽和化した領域である。

解析モデルを図-2 に、解析で用いたパラメータの一覧を表-1 に示す。モデルは実験に従い相対密度 90%の支持層及び相対密度 60%の液状化層（地下水面以深）、非液状化層、盛土層に分割した。液状化パラメータは相対密度より簡易設定法⁴⁾に基づき液状化強度曲線を求め、パラメータフィッティングを行うことで設定した（図-3 参照）。水分特性曲線のパラメータは岡村・来山⁵⁾による豊浦砂の水分特性曲線から設定した（図-4 参照）。解析は、初めに初期飽和度解析を行った後に初期自重解析を実施し、その後動的解析を行う 3 段階で実施した。動的解析で入力した地震動を図-5 に示す。実験の飽和度分布の再現を目指して初期飽和度解析時は空気注入位置に $p_a=70\text{kPa}$ を与え、盛土底部の空気圧境界を $p_a=0\text{kPa}$ とした。これらの空気圧条件は動的解析に解除して、代わりに盛土表面の空気圧条件 $p_a=0\text{kPa}$ を与えた。なお、いずれの段階においても地下水面位置で水压境界 $p_w=0\text{kPa}$ とした。

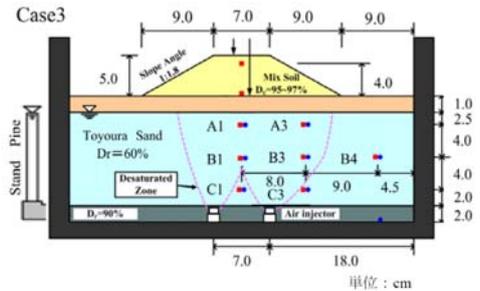


図-1 模型地盤の概要図（模型スケール）

（出典：富田ら²⁾(2014) p.378)

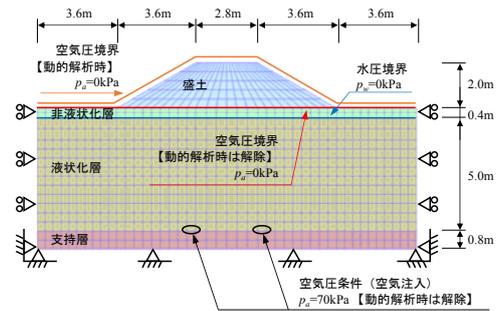


図-2 解析モデル

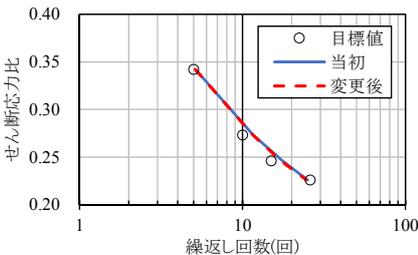


図-3 液状化強度曲線

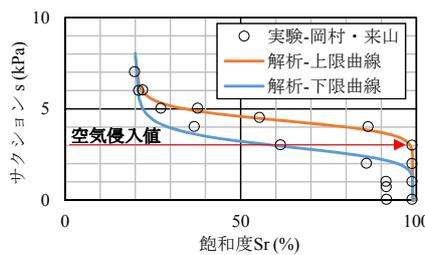


図-4 水分特性曲線

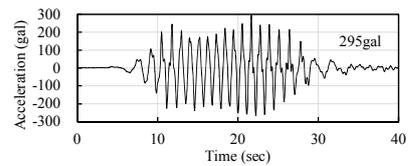


図-5 入力地震動

表-1 パラメータ一覧

	液状化層 ^{**}	支持層
D_r (%)	60	90
ρ (g/cm ³)	1.93	2.00
σ_{ma}' (kN/m ²)	98	98
G_{ma} (kN/m ²)	94,400	163,900
$K_{L/Ua}$ (kN/m ²)	251,700	436,900
mG, mK	0.5	0.5
h_{max}	0.24	0.24
ϕ_r (°)	40.3	42.9
n	0.430	0.392
K_p (kN/m ²)	2.2E+06	2.2E+06

^{**}非液状化層・盛土層も基本は同じパラメータ。ただし、盛土層は $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ とした。

液状化パラメータ		
ϕ_p	28.0	1865SW 0
ε_d^{cm}	0.10	AA 0.001
r_{sd}	1.00	BB 0
r_{sd}	0.10	L 2
r_K	0.50	LR 1
q_1	2.00	$h_{max}L$ 0.24
q_2	0.15	r_K'' 0.50
q_4	1.00	q_{us} 0
s_1	0.005	NSPR4 6
c_1	1.60	l_K 2.0
r_γ	0.10	STOL 1.0E-06
r_{mtmp}	0.50	

水分特性曲線	
S_{rx}	0.99
S_{rn}	0.20
s_{aU} (kPa)	4.4
n_{fu}	12.0
m_{fu}	1.0
s_{aL} (kPa)	3.0
n_{fL}	7.0
m_{fL}	1.0
S_{ri}	0.6
s_i	3.8

透水(気)係数	
k_f (m/s)	1.0E-04
k_a (m/s)	5.0E-03
n_{kf}	0.5
n_{ka}	0.5
m_f	1.0

水分特性曲線、透水(気)係数に関するパラメータは全ての層で同じとした。

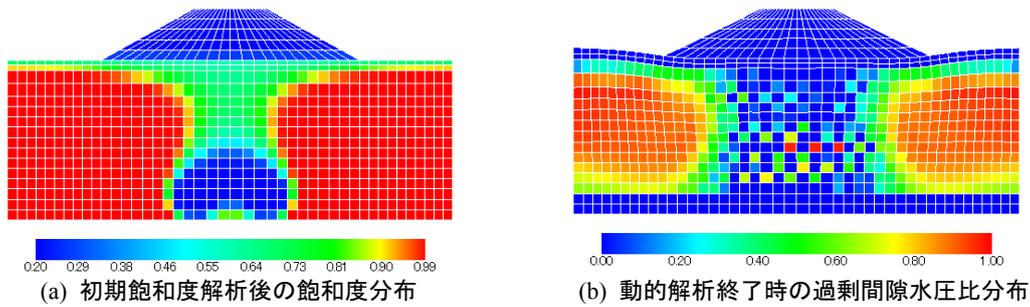


図-6 解析結果（当初）

解析結果を図-6 に示す。不飽和領域を中心に過剰間隙水圧比が千鳥状に発生しており、不自然な上昇傾向である。また、解析も最終ステップまで実行できるものの収束していないステップが目立った。これらの改善を目指して、次項に記す対策を実施した。

3. 解析条件の変更

初期飽和度分布と液状化パラメータの 2 点に着目して検討を行った。3 相系解析は飽和度に応じて土の密度が変化するため、著しく飽和度が低い箇所では拘束圧が低下して解析が不安定なものになると考えられる。当初の検討では、実験の条件である空気注入による不飽和化を空気圧条件で再現しようとしたため、飽和度が大きく低下する要素が生じた。そこで、図-7 に示すように実験結果の飽和度分布 ($S=93.2\%$) を再現するようにサクシオン圧を調整して与えることで、液状化層で飽和度が極端に低下しないようにした。

当初設定した液状化パラメータは液状化強度曲線のみを対象にフィッティングを行ったものでダイレイタンスの影響を考慮していなかった。そこで、石原・吉嶺⁶⁾を参考に目標値を設定しダイレイタンスの影響を考慮するようパラメータの再フィッティングを実施した。具体的には、 $r_{ed} \times r_K$ を一定として、 r_{ed} を r_K に対して反比例するように与えた。また、 ε_d^{cm} は r_{ed} に比例するように変化させ、 r_K'' は r_K と等しくした。結果を表-2 及び図-8 に示し、この時の液状化強度曲線を図-3 (赤色破線) に示す。以上の変更を行い、再度解析を実施した。

解析結果を図-9 に示す。模型実験は不飽和化の効果で液状化が発生せず盛土の変位がほぼ生じない結果であるが、解析は盛土が沈み込む結果となった。実験の再現解析の観点からは入力パラメータの改善の余地があるが、過剰間隙水圧比の上昇傾向は要素間で大きくばらつくことなく収束性も向上した解析となった。

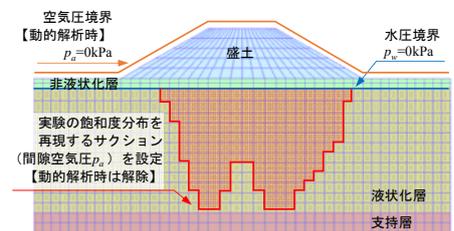


図-7 サクシオン圧の設定

表-2 パラメータの変更

	当初	変更後
r_{ed}	0.10	r_{ed} 0.50
r_K	0.50	r_K 0.10
ε_d^{cm}	0.10	ε_d^{cm} 0.50
r_K''	0.50	r_K'' 0.10

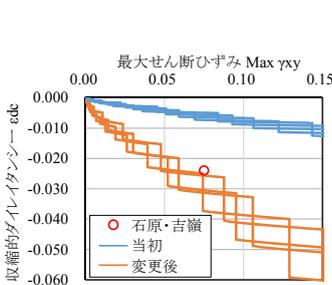


図-8 Max γ_{xy} - ε_{dc} 関係

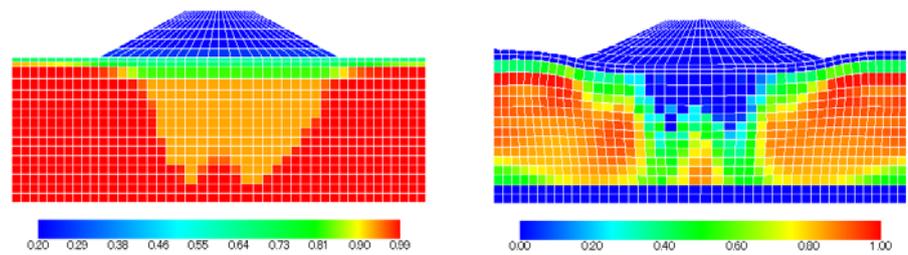


図-9 解析結果（条件変更後）

4. まとめ

解析の検討で用いた FLIPtrip β 15 版は 3 相系解析でも計算が発散しづらいプログラムであるが、初期状態の飽和度分布や液状化パラメータなどの入力条件を適切に設定すれば一層安定した結果が得られる。本検討を通して実験の飽和度分布を境界条件のみで再現する事は難しいことが分かった。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。入力加速度波形及び間隙水圧の時刻歴等の実験データは、愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献：1) lai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 35, No. 3, pp. 360-392, 2011. 2) 富田雄一, 紙田直充, 内田純二, 岡本辰也, 岡村未対 : 液状化対策としての地盤不飽和工法の道路盛土への適用性に関する研究, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 9, No. 3, pp. 375-386, 2014. 3) van Genuchten, M. T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980. 4) 森田年一, 井合 進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博 : 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, *港湾技研資料*, No.689, 1997. 5) 岡村未対, 来山博昭 : 遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究, *土木学会論文集 C*, Vol. 64, No. 3, pp. 662-671, 2008. 6) 石原研而, 吉嶺充俊 : 地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測, 第 26 回土質工学研究発表会, pp. 767-770, 1991.

4-3 不飽和化液状化対策地盤盛土の遠心载荷模型を対象とした再現解析(その 3)

不飽和土 再現解析 二次元シミュレーション

パシフィックコンサルタンツ株式会社
パシフィックコンサルタンツ株式会社

○ 岡本 英久
宮下 健一郎

1. はじめに

FLIP³tripβ版では、2 相系と 3 相系で不飽和土を対象とした解析が可能である構成モデルが組み込まれた。不飽和土 WG では、FLIPtrip の 3 相系地盤への適用性の検証として、不飽和地盤上の盛土構造物を対象とした遠心模型実験²⁾の再現解析を実施している。本報告では、既往の試験結果²⁾から解析パラメータを設定し、3 相系の構成モデルを用いて不飽和地盤の加振実験の再現計算を行った。

2. 遠心模型実験の概要

検討対象とする模型実験は、盛土直下の地盤の一部を不飽和化して遠心模型実験を行ったものである。再現計算の対象とする実験は、盛土直下が飽和地盤のケース (Case1) と、盛土全体の直下地盤を不飽和化したケース (Case3) である。実験模型の概要を図 1 に示す。模型縮尺は 1/40 である。模型地盤の支持層 (Dr=90%) と液状化層 (Dr=60%) は豊浦砂で作成され、土層中央の盛土は豊浦砂とカオリン粘土の混合砂を用いて締固め度 95~97% で作成されている。地盤を不飽和化する Case3 では、地盤全体を飽和した後に地盤下部の支持層に設置した空気注入口から空気を入力し、盛土直下を不飽和化している。図 1 に破線で示されている範囲が不飽和化された範囲である。その後、40G の遠心加速度で、原型スケールで最大加速度 85Gal、190Gal、295Gal のステップ加振を行った。本報告では、実験において大きな変動が確認された 295Gal の実験ケースを対象に再現計算を行った。入力地震動を図 2 に示す。

3. 解析パラメータの設定

地盤と盛土のせん断剛性、体積剛性等のパラメータについては、実験に用いられた砂の相対密度と既往論文³⁾から簡易設定法⁴⁾により推定した。液状化パラメータについては、遠心模型実験の論文を参考に、液状化強度比 RL20 のときのせん断応力比が 0.136 となるよう設定した。水分特性曲線に関するパラメータについては、豊浦砂を対象とした既往の保水試験結果³⁾に整合するよう設定した。但し、上限・下限曲線のパラメータ S_{aU} と S_{aL} については 10 倍した値を用いることとした。これは、既往の保水試験結果の値をそのまま利用すると、飽和度の上限値 ($S_r=99%$) から下限値 ($S_r=20%$) までの遷移領域における飽和度を与えるサクシジョンの幅が小さく、実験において確認された地盤の飽和度分布を再現することが難しかったためである。設定したパラメータを表 1 に示す。また、設定した水分特性曲線を図 3 に示す。解析パラメータは Case1 と Case3 で同様である。

4. 解析条件

解析領域は模型スケールで作成することとし、 $\Delta x=0.01m$ 、 $\Delta y=0.01m$ でメッシュを作成した。作成した領域及び境界条件を図 4 に示す。境界は底面固定、側方は鉛直ローラーとし、Case1、Case3 とともに地表面位置に空気圧 $p_a=0kPa$ 、地下水面位置に水圧 $p_w=0kPa$ の境界条件を与えた。また、重力加速度は実験に合わせて 40G を作用させることとする。

解析では、加振前の飽和度分布を再現するために、第一段階として飽和度解析を行い、第二段階に初期自重解析を行った後、第三段階で動的解析を行う。

無対策条件の Case1 では空気を注入しないため、重力のみを作用させて飽和度解析と初期自重解析を行った後、動的解析を実施する。空気を注入する Case3 では、飽和度解析と初期自重解析において、重力を作用させるのと同時に土層下端に空気圧の境界条件を与えて空気を注入することにより、不飽和領域を再現することとした。なお、飽和度分布は初期自重解析の際には更新されないが、飽和度分布に応じたサクシジョン分布を与えるために、初期自重解析においても空気圧の境界条件を与えることとした。空気圧境界に与える空気圧の大きさは、実験において確認された不飽和領域の飽和度を与えるサクシジョンに応じた値を設定した。

表 1 パラメータ一覧

パラメータ	盛土	表層	液状化パラメータ				水分特性曲線				透水(気)係数			
			液状化層	基盤	ϕ_p (°)	r_k	α	$S_{r,c}$	$S_{r,m}$	$S_{r,avg}$	k_r	k_s	pm_{fr}	pm_{tr}
Dr (%)	60	60	60	90	28.0	0.1	0.99	0.20	0.60	1.00E-04	5.00E-03	0.5	0.5	1.0
P_c	98	98	98	98	0.2	S_1	0.005	0.60	45.0					
m_G, n_k	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	c_1	1.3	8.10						
n	0.39	0.40	0.40	0.39	0.5	q_{in}	0.0	1.00						
ρ (g/cm ³)	1.80	1.80	1.80	2.00	2.0	q_1	1.0	8.10						
G_{max} (kN/m ²)	165,000	95,300	95,300	165,000	1.0	q_2	0.1	30.0						
$K_{s,vis}$ (kN/m ²)	430,000	249,000	249,000	430,000	2.0	r_r	0.5	5.00						
ϕ_r (°)	40	40	40	40	2.0	186SSW	0	1.00						

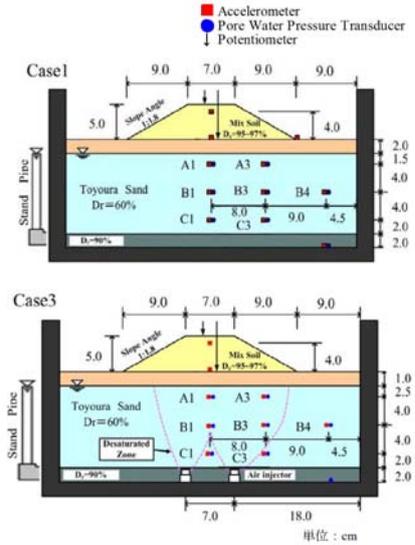


図 1 実験模型の概要図²⁾

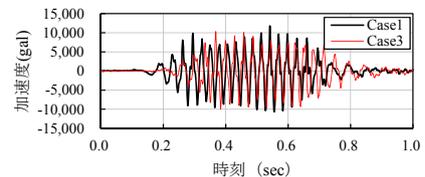


図 2 入力地震動

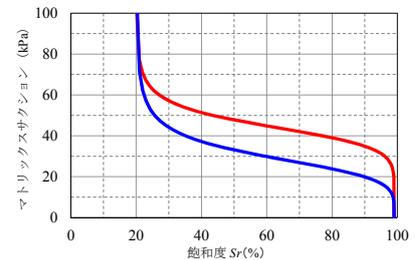


図 3 水分特性曲線

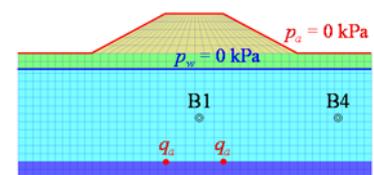


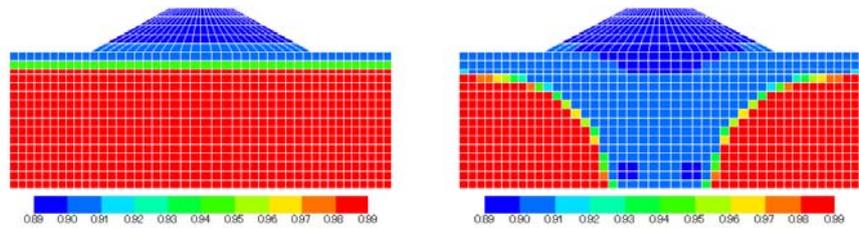
図 4 メッシュ図および境界条件 (Case3のみ q_a を与える)

5. 解析結果

初期自重解析結果を図 5 に示す。同図(a)より、Case1 については、地下水水位以下が飽和、地下水水位以上が不飽和となっている様子が再現できている。また、同図(b)より、Case3 では空気の注入により盛土直下の地盤が不飽和化されている。不飽和領域の範囲は実験結果と概ね一致しており、空気を注入することで地盤の不飽和領域を再現することができた。また、不飽和化された範囲の飽和度は $S_r=90\%$ 程度となっており、実験結果の不飽和域の平均飽和度 $S_r=93.2\%$ と同程度の値となっている。

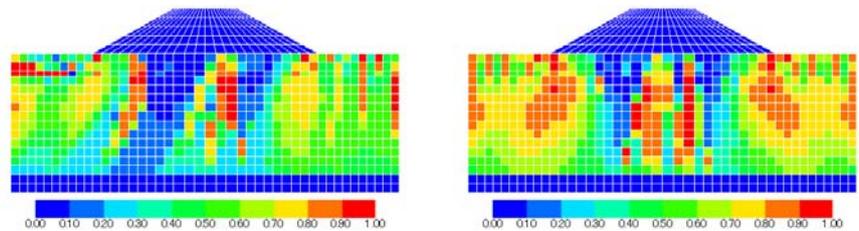
地震応答解析における過剰間隙水圧比の最大値の分布を図 6 に示す。同図(a)より、Case1 については、盛土中央の直下では過剰間隙水圧の上昇が確認できるものの、盛土法肩の直下では過剰間隙水圧の上昇は確認できない。特に、盛土の左側において斜め状に過剰間隙水圧比の小さい範囲が分布している。この範囲では加振中に発生するせん断応力が小さく、不自然な挙動を示していたため、パラメータの設定に問題があると考えられる。同図(b)に示す Case3 においても、盛土中央の直下で過剰間隙水圧の上昇が確認できる。Case1 では十分に過剰間隙水圧が上昇していないことに加え、両ケースで過剰間隙水圧比がモザイク状に分布していることから、レーレー減衰の値や液状化パラメータについて今後十分な検討が必要である。

過剰間隙水圧の時系列を図 7 に示す。Case3 において不飽和化される範囲である B1 地点における結果と、両ケースにおいて飽和条件となっている B4 地点における結果を示す。同図より、Case1 では B1、B4 地点ともに解析結果は実験結果の値よりも小さくなっており、加振に伴う過剰間隙水圧の上昇を再現できていない。また、Case3 については、実験では過剰間隙水圧の上昇が殆ど確認できない B1 地点においても過剰間隙水圧が上昇しており、実験における過剰間隙水圧の変動の傾向を再現できていない。飽和条件である Case1 で過剰間隙水圧の上昇が確認できないことから、液状化パラメータの設定に課題があるといえる。



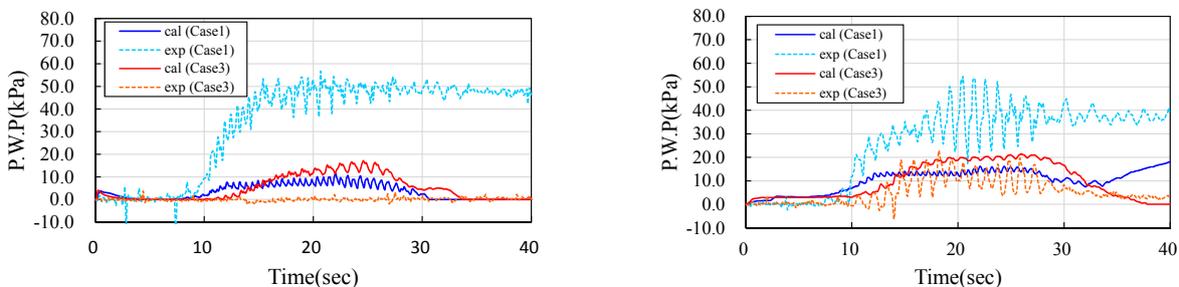
(a) Case1 (b) Case3

図 5 初期飽和度分布



(a) Case1 (b) 初期飽和度分布 (Case3)

図 6 過剰間隙水圧比の最大値



(a) B1 地点 (b) B4 地点

図 7 過剰間隙水圧の時系列変化

6. まとめ

遠心模型実験における実験結果を再現するために、飽和地盤と不飽和地盤について地震応答解析を行った。飽和度解析と初期自重解析において、境界から空気を注入することにより、実験で得られた飽和度分布を地震応答解析の初期値として与えることができた。地震応答解析においては、飽和条件・不飽和条件ともに過剰間隙水圧の変動を再現することができなかった。この原因としては、液状化パラメータの設定が不適切であったと考えられ、パラメータの設定に課題が残っている。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。入力加速度波形及び間隙水圧の時刻歴等の実験データは、愛媛大学の岡村未対教授より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献：Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K. (2011). "Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(3):360-392. 2) 富田ら:液状化対策としての地盤不飽和工法の道路盛土への適用性に関する研究：地盤工学ジャーナル vol.9, No.3, pp375-386 3) 岡村ら:遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究：土木学会論文集 C Vol.64, No.3, pp662-671, 2008 4) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.

4-4 不飽和土盛土の振動台実験の再現解析

不飽和土 模型実験 再現解析

中電技術コンサルタント株式会社

○北出圭介
生頼直樹

1. はじめに

FLIPtrip β 版では、不飽和土を対象とした解析が可能になった構成モデルが考案され組み込まれた¹⁾²⁾。この FLIPtrip β 版の適用性の検証として、盛土構造物を対象とした振動台実験³⁾の再現解析を実施した。本報告では、模型実験に先だって行われた要素試験から設定した成果報告書 3-3 に記載されている解析パラメータを使用し、再現解析を行った。

2. 振動台実験の概要

解析対象の概略図を図-1 に示す。1G 場での模型盛土の加振を行ったものであり、実際の盛土より小さな応力状態にあるが、背面からの浸透水や盛土上面からの降雨散水等、異なる降雨・浸透条件下で、また加振波形・加振加速度の大きさを変えることで、盛土の挙動の違いに検討の主眼を置いている³⁾。模型実験のケースを表-1 に示す。本報告書では、表-1 の Case1 について再現解析を行った。

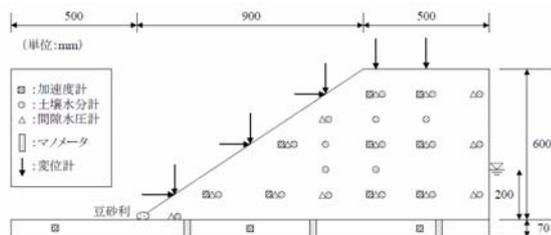


図-1 振動台実験の概要図³⁾

3. 解析条件

Case1 では、盛土背面の水位を 20cm に保ち、浸透を行って、法先付近で水位線が形成された後に 5Hz, 20 波の正弦波で加振を行っている。解析においては、まず、浸透流解析を実施した後、初期自重解析、加振解析を行った。なお、模型実験の入力波形については図-2 の通りとした。また、解析パラメータを表-2、表-3 に、解析メッシュおよび模型実験の計測位置に合わせた出力位置を図-3 に示す。土骨格のモデル化にはカクテルグラスモデルを用いた¹⁾。解析が不安定になるのを防ぐため、間隙水のレーレー減衰 βe を 200gal の場合は井合式⁴⁾の 400 倍 ($\beta e=6.0 \times 10^{-5}$)、400gal の場合は井合式⁴⁾の 100 倍 ($\beta e=1.5 \times 10^{-5}$) に設定した。振動台模型では、浸透流のみによる盛土の崩壊を防ぐため、盛土法尻部に盛土材料よりも透水性の高い豆砂利を配置している。解析においても豆砂利のモデル化を行った。豆砂利の解析パラメータは盛土材料の透水係数と透気係数のみを変更し、各々 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とした。境界条件については、浸透流解析および初期自重解析では、盛土表面は空気圧ゼロ境界とし、豆砂利の部分は空気圧、水圧ともにゼロ境界とした。加振解析時は、盛土表面、豆砂利ともに空気圧・水圧ゼロ境界を設けた。

表-1 検討ケース

ケース	浸透・散水の条件	加振波形・加速度
Case1	背面浸透 - 水位 20cm, 4時間	正弦波 - 200gal・400gal
Case2	降雨散水 - 1時間雨量 30mm, 4時間	神戸波 - 400gal・600gal・1000gal

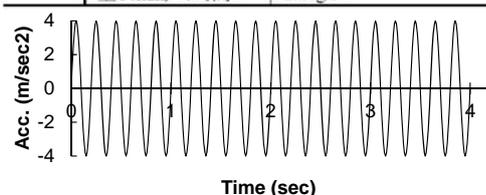


図-2 解析入力波形 (400gal の場合)

表-2 カクテルグラスモデルのパラメータ

ρ_f t/m ³	P_a kN/m ²	G_{ma} kN/m ²	K_{LA}, K_{UA} kN/m ²	m_G, m_K	H_{max}	ϕ_f
1.243	100.0	29498	76926	0.5	0.24	28.7
ϕ_p	ε_{dcn}	r_{dcn}	r_{sd}	q_1	q_2	l_k
25.1	0.2284	3.45	0.4	10.0	1.0	1.2
r_k	s_1	c_1	r_γ	r_{mip}		
0.5	0.005	1.95	0.1	0.5		

※記号の意味は、FLIP ROSE Ver.7.4の取扱説明書を参照

表-3 間隙水・水分特性曲線を表すパラメータ (FLIPtrip)

n	K_f kN/m ²	C_{KX}, C_{KY} m/s	C_{KXa}, C_{KYa} m/s	S_r	K_a kN/m ²	ρ_a t/m ³
0.596	2.200E+06	1.860E-04	1.860E-05	0.5	98	1.230E-03
S_{rx}	S_m	S_{at}	r_{nl}	r_{mfl}	S_{at}	r_{nfl}
0.985	0.17	6	1.182	1	1.47	1.576
r_{mfl}	S_{ri}	S_{ei}	p_{nkf}	p_{nka}	p_{mkf}	
1	0.437	13	0.5	0.5	1	

4. 解析結果

図-4 に実験結果、図-5 に解析結果を示す。飽和度 100% の範囲は解析より実験の方がやや上部まで広がっているが概ね一致している。しかし、盛土上部の飽和度は実験では 60~70% であるが、解析では 51% と低い値になった。また、図-4 に示す実験と解析の水位線では、盛土法尻の方に行くにしたがって若干乖離が見られるが、浸透させている盛土背面近傍では概ね一致している。次に、加振時の比較を図-6 に示す。200gal の場合は、実験で鉛直変位がほとんど発生していない状況を解析で再現できた。水圧の時刻歴についても、PW05 については再現できた。PW06 と PW14 については、解析の方が加振による水圧変動が若干生じているが、概ね再現できている。400gal の場合は、沈下量については、実験よりも解析の方が小さくなる傾向になった。水圧の時刻歴については、PW05 については、水圧の大きさおよび変動の状況が概ね再現できた。PW06 と PW14 については、解析のように変動している状況が実験では得られていないが、水圧が上昇している現象は概ね再現できた。

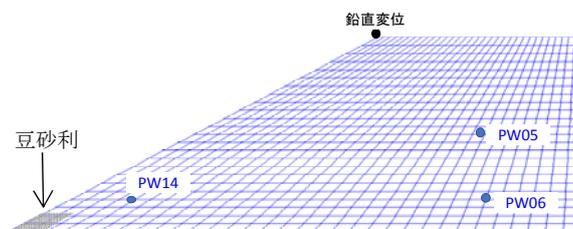


図-3 解析メッシュ及び出力位置

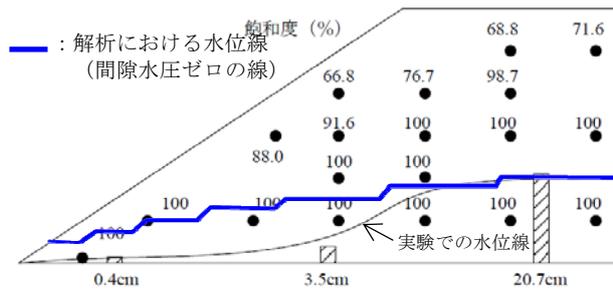


図-4 実験での水位線位置・飽和度分布³⁾

(解析結果での間隙水圧ゼロの線として水位線を加筆)

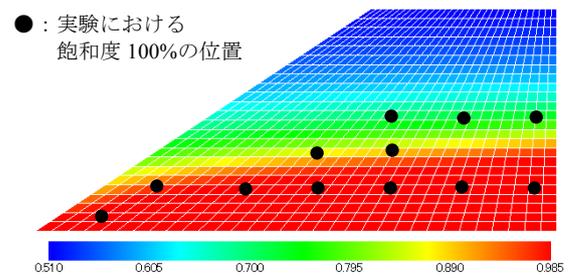


図-5 解析での飽和度分布

(実験での飽和度 100%の計測結果を加筆)

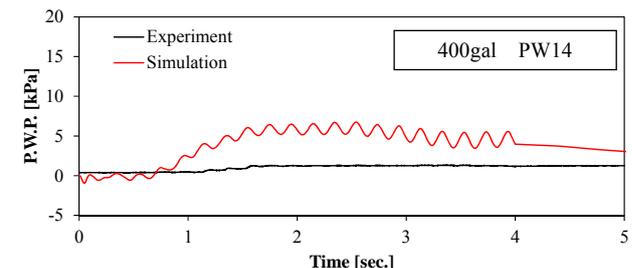
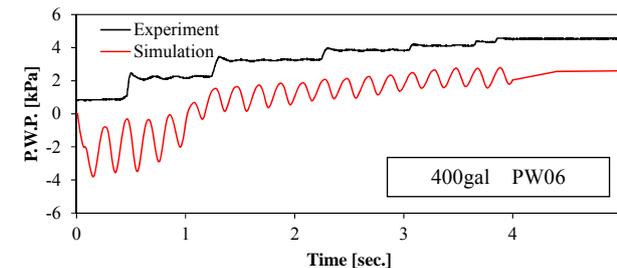
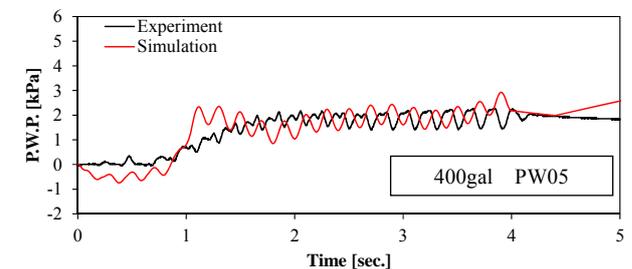
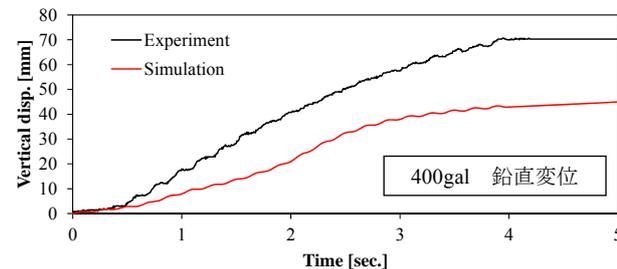
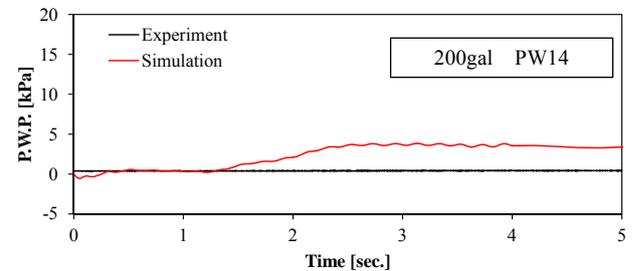
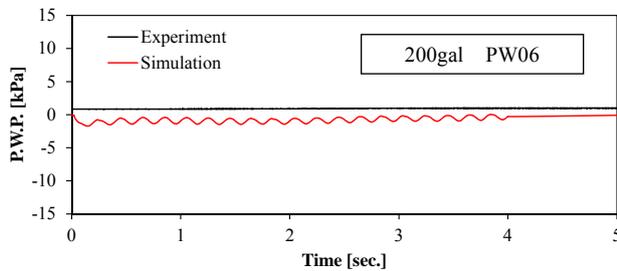
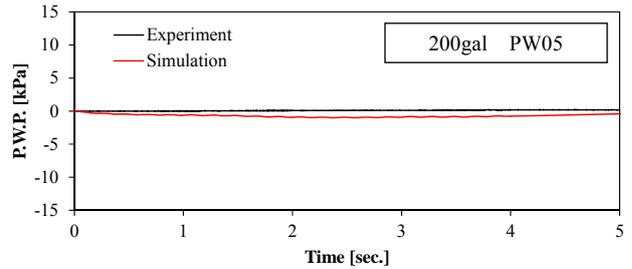
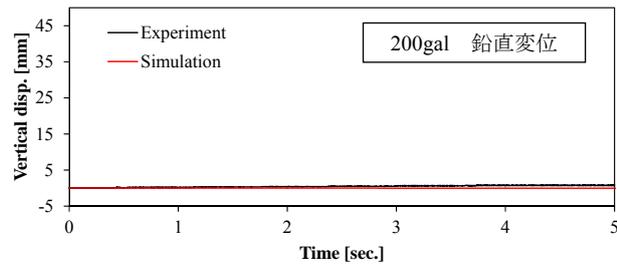


図-5 加振時における実験³⁾と解析の時刻歴の比較

5. まとめ

模型実験の再現解析の結果、変位および水圧の状況は概ね実験を再現できていると思われる。本報告書では、変位と水圧のみの比較であったが、実験では有効応力経路、せん断応力とせん断ひずみの関係も得られていることから、今後、比較の追加を行っていく。

謝辞：本検討は一般社団法人 FLIP コンソーシアムの活動の一環として実施されたものである。実験データは公益財団法人鉄道総合技術研究所の松丸貴樹氏より提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献：1) Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K. (2011). "Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35(3):360-392. 2) Iai S. (2018). "Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test" 5th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Austin. 3) 松丸貴樹, 渦岡良介: 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.4, pp.395-411, 2014. 4) FLIP研究会 透水WGII 成果報告書, 平成23年8月3日, 第四期FLIP研究会 透水解析作業部会II, <付録III>非排水間隙水要素の要素別レレー減衰について。

5 平成 28 年度～平成 29 年度の成果のまとめ

FLIP コンソーシアム 不飽和土地盤 WG

1 検討内容

不飽和土地盤 WG は、ひずみ空間多重せん断モデルによる不飽和土解析用プログラムの実問題への適用を目指して活動を開始した。不飽和土の影響を考慮する対象としては、盛土等の不飽和土地盤への過剰間隙水圧の伝播により地震時の変状が大きくなる事象、液状化対策として地盤を不飽和化改良した事象を対象とした。1 年目にあたる昨年度は、一般化流体圧力ベクトルによる不飽和土の定式化、二相系を用いた不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現解析、不飽和土地盤の遠心載荷実験等の再現解析を行った。2 年目にあたる今年度は、提案した不飽和土の定式化の適用性確認のための静的滲出試験の再現解析、不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現解析について、間隙の体積弾性係数以外のパラメータの影響検討及び三相系での解析、不飽和土地盤の遠心載荷実験等の再現解析を行った。

それぞれの検討結果を整理して以下に示す。

2 検討結果

(1) 一般化流体圧力ベクトルによる不飽和土の定式化

不飽和土は、土粒子骨格からなる多孔質体とみなす点では、飽和土と同じであるが、多孔質体に、液体(f)用の孔と気体(a)用の孔の 2 種類の孔が空いているとみなし、簡単のため 2 種類の孔は相互にはつながっていないとして二相系の支配方程式を基にして不飽和土(三相系)の支配方程式を設定した。支配方程式の離散化には、一般化間隙圧ベクトルを導入し、不飽和土(三相系)の解析での定式化のみならず、水・空気・油・天然ガスなど、さらに多種類の流体・気体が混合する一般化した多相系の解析にも、直ちに適用することができ、汎用性に満ちた定式化を実施した。水分特性曲線及び透水係数は、van Genuchten (1980)¹⁾による実験式を入力できるようにした。なお、水分特性曲線は、上限値、下限値、中間値の 3 種類が入力できる。また、1m 長さの円筒状シリンダーによる静的滲出試験(Liakopoulos, 1964)²⁾を本提案モデルで再現し、定式化の妥当性を確認した。

(2) 不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験の再現解析

不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験として、実験結果のデジタルデータを入手することができた下記 3 事例について再現解析を実施した。

- ・岡村ら³⁾が実施した豊浦砂の不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験
- ・藤井ら⁴⁾が実施した南陽砂(不攪乱試料)及び鳥取砂(不攪乱試料)の不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験
- ・松丸や⁵⁾が実施した稲城砂(不飽和)を対象として実施された繰返し非排水三軸試験

不飽和土を取り扱う場合は、液体のみならず気体の収支バランスも考慮した三相系の支配方程式を解く必要がある。しかしながら、まずはこれを二相系の飽和土を取り扱うのと同様の方法で取り扱える簡易解析の方法を適用した。簡易解析法は、次式により求めた等価質量密度 ρ_p と等価体積弾性係数 K_p により間隙流体のパラメータを置き換えて、通常の飽和土として解析を行うものである。

$$\rho_p = S_r \rho_r + (1 - S_r) \rho_a, \quad \frac{1}{K_p} = \frac{S_r}{K_r} + \frac{(1 - S_r)}{K_a}$$

ここに S_r は飽和度、 K_r は流体の体積弾性係数で、水の場合は 2.2×10^6 kPa、 K_a は気体の体積弾性係数で、空気の場合は 1.4×10^2 kPa である。この方法を用いて不飽和土に対する側圧一定条件での非排水・非排気の繰返し三軸試験の再現解析を実施した。なお、土骨格のモデルは、Cocktail Glass モデル⁴⁾を用いた。

飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験結果を模擬できたパラメータを用いて不飽和土地盤の繰返し非排水三軸試験結果の再現を試みた。今回対象とした岡村ら³⁾の実験結果に関しては、不飽和化による間隙の体積剛性を考慮しただけでは実験結果を説明できなかった。これは、不飽和土地盤は飽和地盤と比べ単に体積剛性だけが変化するのではなく、負のダイレイタンスの発生する傾向も変化するためであると考えられた。そこで、間隙の体積剛性係数に加えダイレイタンスパラメータ ($r_{i,dc}$, c_1 , q_1 , q_2 , r_{ed} , r_k)を変化させ不飽和土地盤の液状化強度を表現することを試みた。試験結果を再現できるパラメータと飽和度の関係を確認すると表-1 の結果が得られた。

表-1 実験結果と調和的となるダイレイタンスパラメータ

飽和度が小さくなるに従い値を小さくした方が実験結果と調和的となるパラメータ	飽和度が小さくなるに従い値を大きくした方が実験結果と調和的となるパラメータ
r_{edc} , r_{ed} , r_k , q_1	c_1 , q_2

【不飽和土地盤 WG の外部発表成果】
（2020年8月現在）

不飽和土地盤 WG の外部発表成果（2020 年 8 月現在）

平成 28 年度～平成 29 年度に設置された“不飽和土地盤 WG”の検討成果のうち、2020 年 8 月現在における外部発表成果を以下に示す。

- 1) S. Iai : Partially Saturated Soil: Formulation through Generalized Fluid Vector and Validation with Leaking Test, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference V, Numerical Modeling and Soil Structure Interaction, pp.228-236, Austin Texas, 2018.
- 2) S. Iai, K. Ueda : Analysis of partially saturated liquefiable soil through strain space multiple mechanism model, Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions, Proceedings of the 7th Int. Conf. on Earthquake Geotech. Eng. Rome, Italy, pp.2949-2956, 2019.
- 3) K. Kitade, O. Ozutsumi, N. Orai, S. Iai : Numerical simulations on unsaturated soil experiments using tri-phase seismic response analysis, Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions, Proceedings of the 7th Int. Conf. on Earthquake Geotech. Eng. Rome, Italy, pp.3353-3363, 2019.

