GEOASIA Bulletin No.16 All Soils All States All Round **GEO-A**NALYSIS INTEGRATION

砂から中間土や粘土までを対象に、動的か静的かを問わず、地盤の変形と破壊を求めます。
令和4年8月26日 発行
編集:一般社団法人 *GEOASIA* 研究会事務局
〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻地盤工学講座内
TEL: 052-789-3834 FAX: 052-789-3836 E-mail: office@geoasia.jp URL: https://www.geoasia.jp

会長メッセージ

一昨日,安倍元首相が暴漢に射殺された.悔しかっただろう.私たち国民も, 同じように悔しい思いをし続けている.

15年が過ぎて、今号は第16号になる.安倍元首相の不幸を思って茫然としている時、この15年「会長メッセージ」で、浅岡が恩師の松尾稔先生のことを 一度も書いたことのなかったことに気付いた.先生もまだ若くて悔しかった.

松尾先生は 2015 年に 78 歳で亡くなられた.先生の業績と人柄は,依頼され て 2015 年の地盤工学会誌「土と基礎」7月号に,1頁丁度だが,長文の浅岡追 悼文を載せていただいている.正確な記述で,まだ8年しか経っていないから, 今からでも,もしお読みいただけるなら誠に有り難い.しかしそこには,浅岡 の本音が書けていない.

松尾先生は、京都大学村山朔郎先生の弟子で村山研なのだが、事情があって学位論文は計画研(長尾義三先生) で纏められ、すぐそのあと、京都大学学士山学会の「ブータン学術探検隊長」として、まるまる1年間大学を離 れた.長尾研に戻られたのは、浅岡が長尾研4年生から大学院1年生に上がるときだった.1970年前後のことで ある.

赤池の情報量(AIC)最小基準は,最尤法の拡張として 1973年国際会議で発表された.しかし浅岡が AIC について京都大学で赤池弘次先生の講義を直接聴いたのは,1975年のことである. x軸 y 軸の空間にデータが 10 個ある.9 次式を当てはめれば全データを通過するが,誰もそんなことはしない. $y = a_0 + a_1 x$ か,せいぜい $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ くらいしか当てはめない.それは何故なのか,AIC最小基準は所謂「ケチの原理, principle of parsimony」を正確に表したものである.松尾・浅岡はこの新しい情報量基準を用いて粘土地盤内の非排水せん断強度の確率分布のモデルを探索したことがあり,1977年の国際地盤工学会(東京会議)で発表した.しかし松尾も浅岡も,この研究には特段深い感懐はなかった.東京会議には別の論文も書いたが,それもどんな論文だったか,もう忘れて久しい.

しかし、Rosenblueth Method(1975) に巡り合った時は、浅岡は腰を抜かすほど驚いてしまった.

松尾先生の専門は、なんと言っても地盤工学における信頼性設計である. 信頼性設計など、実は何も難しい話ではないが、計算が困難なのである. 信頼性設計というのは、突き詰めていえば、Y = f(X) の X が確率変数の時の、Y の確率分布を求める問題と言っていい. 普通には f(X)を X の平均値の周りでテイラー展開して、X の平均と分散から Y の平均と分散を求めたりする(first order second moment 法). しかし例えば、 $\phi u = 0$ 円弧滑り解析を考えてみよう. X が粘土の非排水せん断強度で Y は安全率である. 円弧滑り解析は、ご存じのように「最小安

全率円」の探索が鍵で、これは塑性学で言う上界定理の適用に相当し、最小安全率円探索を欠いては円弧滑り解 析は力学にならない. 試行錯誤の計算ののち、ようやく一つの X = x から一つの安全率 Y = y が決まる. このよ うなときに、f(X)を解析的に式示したり、その1階、2階の導関数を求めたりすることは出来ない. モンテカルロ シミュレーションと言っても、そんな多数の円弧滑り解析など全く現実的でない. このようなときに、連続確率 変数 X の確率分布を、わずか2点での離散確率分布に置き換えて(Rosenblueth Method)、わずか2回の円弧滑り解 析から安全率 Y の確率分布を求めるのである. 詳細は文献参照. 精度は多点確率分布に置き換える等、工夫次第 でいくらでも上がるが、その説明などここで必要はない.

それまでの「最小安全率円探索」を欠いた(今でもほとんどはそうと思うが)「信頼性解析」に忸怩たる思いで おられた松尾先生は,積年の恨みを晴らしたかのように明るい顔になり,大喜びされた.先生の理解の速さには 驚いたが,先生は学問に妥協を許さない,勉強好きの学者だったことを思い出す.

中野教授は、教授昇進の時「浅岡先生は、実は粘土も触ったことのない先生です」と言ってしまって、周りを びっくりさせた. 松尾先生も、「ノルウェイ(NGI)から届いた 3 軸試験機を組み立てたのは俺だ」と言いつつ、い つも_故軽部先生のことをよく話ししていたなあ. 今名城大学学術支援センター長の小高教授は、ドクターの時「砂 地盤の浸透破壊実験を水道水でやると、気泡ばかりが出てきて困る」と心配していたが、水道水がビールに化け るならいい話じゃあないかと、飲めない小高君を前に浅岡だけ、毎晩ビールを飲んでいた. 野田教授なども、助 教授に上がる前だったか、教室会議で「浅岡先生の試験問題や採点なんかは、私は学生の時からずっとやってい ました」とふと喋ってしまって、これにも往生したなあ. みな本当の話だから仕方なかったけれど、どれも松尾 ~浅岡の関係と変わるところがない. 大学総長などに浅岡はなれるはずもなかったが、しかし師匠と弟子の関係 はよく似てしまうものだと、懐かしい.

文献 1: Emilio Rosenblueth: "Point estimates for probability moments", Proc. Nat. Acad. Sci. USA Vo.72, No.10, pp. 3812-3814, October 1975.

文献 2: Akira Asaoka and Minoru Matsuo: "A simplified procedure for probability based $\phi u = 0$ stability analysis", Soils and Foundations Vol.23, No.1, pp. 8-18, March 1983.

(公財)地震予知総合研究振興会副首席主任研究員 名古屋大学名誉教授 浅岡 顕

令和3年度活動報告

(1) 降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション

空気~水~土三相系の GEOASIA により,降雨模型実験 ¹における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション を行った.DL clay から成る基盤の上に,霞ヶ浦砂(K sand)から成る不飽和斜面を構築し,上方から散水する実 験である.図1は降雨強度 100mm/h の場合の間隙水圧分布の実験結果と解析結果を示す.両者の比較より,解析 は地表面からの降雨の浸透過程を再現できている.図2は降雨強度 100mm/h の場合のすべり破壊の様子を示す. 解析は法尻から法肩まで斜面全体に渡ってすべる挙動を再現できている.紙幅の都合上図面は省略するが,すべ り面上の土要素では限界状態線 q=Mp'上側で示す塑性体積膨張を伴う軟化が生じて,大変形に至った.図3と図 4 は,降雨強度が 50mm/h と 25mm/h の場合のすべり破壊挙動と間隙水圧分布の違いをそれぞれ示す.コンター図 の凡例は,図1および図2と同じである.図1と図2に示した降雨強度 100mm/h の場合と併せると,降雨強度が 25mm/h の場合には斜面中腹まですべり線が生じる一方,降雨強度が 50mm/h と 100mm/h の場合には斜面全体に 渡ってすべり線が生じる様子を解析は再現できている.この理由は降雨強度が大きいほど斜面上部まで間隙水圧 が高い状態になるためである.





図3降雨強度に応じたすべり破壊挙動の違い

(a) 降雨強度 50mm/h の場合
(b) 降雨強度 25mm/h の場合
図 4 降雨強度に応じた間隙水圧分布の違い

1) Chueasamat, A. et al.: Experimental tests of slope failure due to rainfalls using 1g physical slope models, *Soils and Foundations*, 58(2), 290-305, 2018.

(2) 真空圧密工法の大型模型実験の3次元水~土連成有限変形解析

浚渫土砂を用いた埋立地盤の早期圧密・残留沈下抑制を目的とした真空圧密工法 ²⁾に関する大型模型実験につ いて GEOASIA を用いた三次元解析(図5参照)を実施し,実験結果をよく再現できることを示した.図6は, 層別沈下の比較を,図7,8は、ドレーン有りと無しの領域での間隙水圧の経時変化の比較を示していて、いずれ も良く一致している.図9では,負圧がドレーン部全体に伝わった後各深さで伝播し、それに伴って、ドレーン 周辺の土から圧縮が始まっている様子を確認することができる.この圧密問題においては、未圧密状態の土砂が 大圧縮を示すことから、次の①~④に示す解析上の特徴が必要である.①圧密開始前の高間隙比と静水圧以上の 間隙水圧を有する未圧密状態(コロイド状態)の土砂の力学挙動を表現するため、上負荷面概念に基づく弾塑性 構成式を用いること、②刻々の大沈下/圧縮量を正確に計量しつつ上澄み水も考慮できる水~土連成有限変形解 析であること、③土の大圧縮に伴う透水性変化モデルを導入していること、および④バーチカルドレーンもモデ ル化した三次元解析が可能なこと.これらは、GEOASIA[®]が実装しているものである.



2) 梅原ら:真空井戸を用いた真空圧密工法に関する大型模型実験,第55回地盤工学研究発表会講演集,21-10-2-01,2020.

(3)入力地震動の周波数特性に着目した実河川堤防の耐震性再照査

河川堤防の現行耐震性能照査では静的照査法が推奨されており、地震動の周波数特性や継続時間の影響が十分 に考慮されていない.そこで、入力地震動の周波数特性に着目し、軟弱地盤上に立地する実河川堤防の耐震性能 を再照査した.入力地震動は当該地域で想定される南海トラフ地震であり、内閣府から2011年に公開された地震 動(A)、同じく内閣府から2015年に公開された長周期地震動(B)に加え、両地震動をハイブリッド合成した地震動 (C)を用いた(図10参照).短周期成分が卓越する地震動(A)の場合、盛土および表層砂層に被害が集中するが、長 周期成分が卓越する地震動(B)では、表層被害に比して深部粘性土での被害が目立つ.これら被害集中箇所の違い は、入力地震動の卓越周期と地盤各層における固有周期の一致/不一致に起因する.なお、広帯域地震動である 地震動(C)では、表層砂質土および深部粘性土の両方で被害が発生し、堤防被害が最も甚大化した.以上のように、 精緻な被害予測のためには地震動と地盤の共振を考慮することが重要であり、複数の地震シナリオを想定しない と被害を過小評価する危険性を指摘した.



図 10 周波数特性の異なる入力地震動と地震直後のせん断ひずみ分布

(4) 地盤の不安定化現象に対する Full formulation の適用

間隙水の静的浸透を仮定する u-p formulation に基づく水〜土骨格連成解析は、透水係数 k が大きい場合のみな らず、時間刻み幅 Δt を小さい場合においてもその数値解が発散することが知られている.液状化やボイリングの ような、有効応力低下に伴い地盤の剛性が次第に喪失する現象や、すべり破壊、動的座屈といった不安定化問題 を対象に時刻歴解析を行う場合、不安定化に伴い step 毎の変位増分が次第に増加してゆくため、十分な時間積分 の精度を維持するためには、時間刻み幅 Δt を小さくしてゆく必要があるため、u-p formulation によっては計算の 継続が困難となる.これに対し、間隙水の相対加速度を考慮した u-w-p formulation では、上記のような数値解の 発散を生じることなく不安定化後の変形挙動を追う事ができる.本研究では、地震外力作用下で液状化により不 安定化する砂地盤〜盛土系の動的変形問題(図 11) および動水勾配作用下でボイリングにより不安定化する砂地 盤の変形問題(図 12) を u-w-p formulation で解析した. u-p formulation によっては発散する条件下においても u-w-p formulation であれば計算を継続できることを確認し、不安定化問題に対する u-w-p formulation の優位性を示 した.



図 11 液状化解析により得られた平均有効応力分布 (**u-w-**p)



図 12 ボイリング解析で解かれた流線の乱れ(u-w-p)

(5)短繊維(PVA ファイバー)混入により補強された砂のせん断挙動の SYS Cam-clay model によ る再現計算

本研究では、再現性のある短繊維混合の砂供試体の作製方法を確立し、排水・非排水三軸圧縮試験を、短繊維 混入率(乾燥砂に対する短繊維の質量百分率)、初期相対密度,拘束圧等を変化させて実施した.図13は、短繊 維混入率が0.4%で、初期相対密度を3種類、拘束圧を100kPaとした排水せん断試験結果を示す.初期相対密度 に応じてせん断挙動、ダイレイタンシー特性は異なるものの、拘束圧が同じ条件でせん断終了時のq,p',vが一致し ている.この挙動は、短繊維混入率0.2%においても見られた挙動で、せん断終了時は限界状態と見なすことがで き、短繊維混合砂は、限界状態土質力学によって解釈することができることを示している.そこで、SYS Cam-clay model による再現を試みたのが図14である.拘束圧を5種類変化させた実験結果は限界状態線の存在を示し、解 析結果もまた実験結果をよく再現している.短繊維混入率0.2%も再現することができ、限界状態定数は0.4%よ りも小さくなる.また、短繊維混入率の増加につれて、初期の剛性が低下し、また、せん断初期における負のダ イレイタンシーの程度も大きくなった.これらは短繊維混入による初期異方性の程度が小さくなるとが原因の一 つと考えられ、再現計算からも示すことができた.



図 13 初期相対密度の異なる排水三軸試験結果 (短繊維混入率 0.4%)



図 14 拘束圧の異なる排水三軸試験および解 析結果(短繊維混入率 0.4%)

(6)L2 地震に対する砂・粘土互層軟弱地盤上の河川堤防の二重鋼矢板工法による変形抑止効果

河川堤防の適切な耐震性評価と耐震対策は喫緊の 課題である.N値がほぼゼロの厚く堆積した軟弱粘土 と砂の互層地盤上に築造された河川堤防(図15参照) について,GEOASIAを用いて,法肩に鋼管矢板を打設 した二重鋼矢板工法の有効性を調べた.この結果,鋼 管矢板によって,粘土層内から発生する滑りや堤防の ストレッチングや沈下が地震後も含めて大きく抑制





され,軟弱な粘土層に起因する大変形に対して高い拘束効果が期待できることがわかった.図16は,地震開始90 秒後,地震終了時のせん断ひずみ分布,図17は左岸堤防盛土の法尻・法肩の沈下,および図18は左岸堤防盛土 の法尻・法肩の水平変位の経時変化を示す.ケース1(無補強)の場合は,地震直後から発生する砂質土の液状化 に伴う沈下に加え、堤防直下のN値ゼロの粘土層の乱れに起因して生じた袈裟懸け状の滑りがさらなる堤防の沈 下と河床隆起を引き起こし、河積が減少している.また堤体直下の滑りに助長され、堤体のストレッチングが約 3.5m も生じている.粘土が構造高位な状態にある軟弱な場合、従来は地震時被害がほとんど発生しないと考えら れてきた粘土層においては、特に河川堤防直下のように偏荷重を受ける箇所付近では、地震中の沈下や滑りが発 生し、被害が甚大化する危険性があることを示唆する.ケース2(補強あり、鋼管矢板を法肩より深さ20m打設) は、ケース1で生じた砂層の液状化や粘土層での滑りに伴う大変形(沈下や側方流動)が抑制されている.



令和3年度の主な公表論文等(令和3年4月~令和4年3月)

学術論文など

[Soils and Foundations]

1) Attempt to reproduce the mechanical behavior of cement-treated soil using elasto-plastic model considering soil skeleton structure, Soils and Foundations Vol.61, Issue 5, pp. 1464-1474, 2021.

2) Importance of considering unsaturated triaxial tests including ceramic disk as initial and boundary value problems, Soils and Foundations, Vol. 61, Issue 3, pp. 901-913, 2021.

3) Numerical simulation based heuristic investigation of inertia-induced phenomena and theoretical solution based verification by the damped wave equation for the dynamic deformation of saturated soil based on the u–w–p governing equation, Soils and Foundations, Vol.61, Issue 2, pp. 352-370, 2021.

[Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering]

1) Method to Introduce the Cementation Effect into Existing Elastoplastic Constitutive Models for Soils, *Journal of Geotechnical* and Geoenvironmental Engineering, Vol.148, Issue 5, 2022.

2) Verification of a macro-element method with water absorption and discharge functions in quasi-static problems, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.148, Issue.7, 2022.

令和4年8 冝 26 日発行 編集:一般社団法人 GEOASIA 研究会事務局 TEL:052-789-3834 E-mail:office@geoasia. ц.

[Journal of Applied Science]

1) Effects of strong ground motion with identical response spectra and different duration on pile support mechanism and seismic resistance of spherical gas holders on soft ground, Journal of Applied Science, Vol. 11, No. 23, pp. 11152, 2021.

[Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering]

1) Effect of fiber-reinforcement on the mechanical behavior of sand approaching the critical state, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021.

[Computers and Geotechnics]

1) Combined-loading elastoplastic constitutive model for a unified description of the mechanical behavior of the soil skeleton, *Computers and Geotechnics*, Vol.141, 2022.

2) Numerical analysis of drained compression behavior of fiber-reinforced sand based on a soil skeleton structure concept, *Computers and Geotechnics*, Vol.148, 2022.

【地盤工学会誌】

1) 空気~水~土連成有限変形解析による河川堤防の地震と外水位の複合外力下における力学挙動の評価, 地盤工学 会誌, Vol. 70, No. 3, pp. 10-13, 2022.

[ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories]

1) Ex-post evaluation of countermeasures against residual settlement of an ultra-soft peaty ground due to test embankment loading: A Case study in Maizuru-Wakasa Expressway in Japan, ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories, Vol. 7, Issue 1, pp.59-75, 2021.

【基礎工】

1) 電柱のドレーン化による液状化対策 - 遠心力模型実験と数値解析による地震時返上抑制効果の検証 - , 基礎工(特集:地盤の液状化対策の最前線 - 調査・設計・施工と検証への取組み -), Vol.49, No.5, pp.81-84, 2021. 国際会議

[IX International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2021)]

1) Clarification of water absorption failure mechanisms of unsaturated silt triaxial specimen through three-phase elastoplastic finite deformation analysis considering inertia force, IX International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2021), 2021.

2) Evaluation of the performance of u-p formulation-based analysis by the u-w-p formulation-based analysis in oscillation problem, IX International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2021), 2021.

[11th International Conference on Geotechnique, Construction & Environment]

1) Seismic performance evaluation of PFS method by soil-water coupled finite deformation analysis, 11th International Conference on Geotechnique, Construction & Environment, gxi 381, 2021.

国内発表

【2021 年度日本地球惑星科学連合大会(2021 年 5 月)】3 編,【第 26 回計算工学講演会(2021 年 6 月)】2 編,【第 56 回 地盤工学研究発表会(2021 年 7 月)】9 編,【第 33 回中部地盤工学シンポジウム(2021 年 8 月)】3 編,【第 76 回土木学 会年次学術講演会(2021 年 9 月)】5 編,【第 9 回河川堤防技術シンポジウム(2021 年 12 月)】1 編,【令和 3 年度土木 学会中部支部研究発表会(2022 年 3 月)】3 編など

編集後記

今号の会長挨拶文に挿入した写真は、44 年前の 1978 年松尾稔先生が教授に昇任されたと きのお祝の会の時の写真です.右手に煙草を持たれてる様子などは懐かしいです.浅岡先生 は、この翌年に名古屋大学に赴任されています.もともとは、右のような白黒写真ですが、 最近は AI とかで簡単にきれいにカラーにしてくれます.この Bulletin くらいの記事であれ ば、いずれ、AI が作成してくれるでしょうか.会長挨拶だけは、無理でしょうが.(高稲, 奈良市在住)

