

平成 22年 5月 21日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560495

研究課題名（和文） 地盤の不安定流動の開始・停止条件のメカニズムとその構成モデルに関する研究

研究課題名（英文） Mechanisms and Constitutive Modeling of Unstable flow of Granular Materials

研究代表者

飛田 善雄 (TOBITA YOSHIO)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：40124606

研究成果の概要（和文）： 地盤工学における流動現象は、土石流、地震時の液状化に伴う緩斜面の流動、海底地盤の様々な要因による大規模すべりなど、自然災害に係る分野で顕著である。地盤の流動問題に関しては、これまで流体力学的なアプローチがなされてきた。本研究では、固体力学の観点からの不安定流動の開始条件や粒状体としての土の特徴を考慮した停止メカニズムについて研究を行い、土の内部構造の影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： There are many flow phenomena in geotechnical engineering; e. g. mudflow during and after strong rainfall, flow slide owing to the liquefaction after strong earthquake motion, flow slide in the seabed. These phenomena have not been investigated in the engineering to a sufficient level, which had nothing to do with the design of structures. The flow problem of geo-materials have been studied with the hydraulic-mechanics approach, the initiation and cease condition of flow, requiring the solid mechanics approach, have not been discussed to a sufficient level. The study presented in this paper have shown the importance of internal fabrics and the creation of fabric called force chains on the initiation and cease conditions of flow phenomena.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤流動、構成モデル、安定条件、粒状体

1. 研究開始当初の背景

地盤の流動問題は、自然災害における現象としてはよく認識されている。例えば、土石流、火砕流、液状化後の緩斜面を有する飽和

砂地盤の大変位などが典型的な例である。

地盤の流動問題は、これまで主として流体力学的なアプローチで、流れの状況が解明されてきた。流体力学的なアプローチには限界があり、固体力学的なアプローチが必要であ

る。流動が開始する条件および停止する条件においては、内部構造が重要な役割を果たすことは容易に想像できる。様々な状況での砂のような粒状体の内部構造については、粒状田力学の分野で取り扱われてきた。力を伝える力の鎖 (force chain) と呼ばれる特殊な構造が形成されなくなったときに流動の開始条件となり、流動中にこの構造が再度形成される条件が整ったときに停止条件と考えることができる。このような構造の発達・消滅を考慮しながら、実験的研究、モデルの構築を行い、流動現象に対する理解を深める。

このような基礎的研究とともに、実務において重要な液状化後の流動変位の大きさに対する実用的解析の適用性についても、基礎的研究の成果を踏まえ考察する。

2. 研究の目的

地盤の流動現象が設計条件と関連することは少ないために、工学的研究は立ち遅れている。また地盤の流動問題が、物性的考察、モデルの構築、数値解析の適用性と多様な研究を必要とする複雑なものであるために、個人の能力では、意義ある成果を得ることは困難である。本研究では、同一大学に勤務する、理論・モデル、実験、数値解析を専門とする3人の研究者がそれぞれの得意分野を利用して地盤の流動問題に対して成果を上げようとする研究である。主たる研究目的は以下の通りである。

- (1) 粒状体に対する基礎的実験により、流動問題における内部構造の重要性とその発生・消滅について基本的な知見を得る
- (2) 基本的知見に基づいて、連続体としたときの内部変数の同定とその発展モデルを取り入れ、弾塑性モデルを定式化し、連続体の安定条件の適用性などについて基本的な考察を行う。
- (3) 砂の内部構造の変化が力学的挙動に対する影響を理解するために、上向き浸透流によって構造を乱された砂の再液状化特性に対する実験を行い、影響の大きさについて基本的知見を得る
- (4) 液状化後の地盤流動の大きさを推定することは工学的に重要な事項であり、流動変位を予測するFEMプログラムを用いて、3次元効果を理解するとともに、内部構造を考慮して、計算モデルに含まれるパラメータの同定方法について基本的検討を行う。

3. 研究の方法

本研究で用いた手法は以下の通りである。

<理論的・モデル的研究>

- (1) 粒状体的観点からの粒状体の流動機構に関する基礎的実験
- (2) 内部構造変化を考慮した現象論的構成モデルの構築と適用性の検証
- (3) 飽和砂地盤の流動開始条件に対する安定性の条件の適用の検討

<内部構造の変化に着目した飽和砂地盤の再液状化に関する実験>

- (1) 液状化した砂地盤の体積圧縮特性・せん断特性に関する既往の研究のまとめ
- (2) 上向き浸透流により液状化し、その後沈降した粒子が有する不安定な構造がせん断抵抗に及ぼす影響に関する実験

<液状化した地盤の流動変位の予測手法に関する研究>

- (1) 流動変位を予測する既存プログラムの3次元条件への適用
- (2) 流動変位を精度よく計算するためのパラメータ同定に対する考察

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下の分類にしたがって発表論文より主要部分を抜粋する。

- (1) 砂のような粒状体の基本的性質に関する実験結果とその考察
 - (2) 内部構造とその変化を考慮した弾塑性モデルの構築とその適用性
 - (3) 構造が乱された砂のせん断抵抗特性に関する実験的考察
 - (4) 飽和砂の液状化後の大きな変位の予測手法に関する研究
- (1) 砂のような粒状体の基本的性質に関する実験結果とその考察

砂のような粒状体を理解する上で不可欠な基本的な性質について、簡単な条件のもとで行った実験結果について、その成果を報告する。

流動する粒状体の基本的挙動に関する実験

粒状体の流動の理解は、様々な場合に必要となる。液体の流動挙動とは全く異なる。地盤工学における流動問題としては、土石流、液状化に伴う流動などをあげることが出来る。極めて難しい挙動であるので、簡単な条件での理解が必要となる。

本研究では着色した大きなガラスビーズ

の粒径の異なる粒子2種類を用いて、土石流などで顕著に見られる粒径の違いによる分離現象に着目した実験結果について報告する。様々な状態での2つの異なる粒子を用いて粒状体の流動の様子を観察した。

特に、大径の粒子と小径の粒子の分離挙動について考察した。既往の研究²⁾によると、大小粒子の分離現象のメカニズムとしては、次の3つのメカニズムが考えられている：

(1) 粒子の対流的現象の発生、(2) 小さな粒子が大きな間隙に落ちる確率が高いことによる相対的な大きな粒子の上昇、(3) ひずみ速度勾配の高い表面付近への大きな粒子の移動。今回行った実験において、これらのメカニズムのどれが卓越しているのかについて、明確な考察を行うことができなかった。この実験的研究で報告した結果は、すでに粒状体力学の分野においてはよく知られた事実であるが、流動メカニズムを考える上で、自ら実験事実を確認することが、流動現象の本質を理解する上で重要な知見を与えてくれた。

(2) 内部構造とその変化を考慮した弾塑性モデルの構築とその適用性

本研究では、砂のような粒状体の挙動を表現する目的で提案された数多くのモデルのうち、Li & Dafalias (2000)¹⁾が提案したモデルについて、その基本的な応力・ひずみ関係と安定性の検証を行う。Li & Dafalias モデルの特徴は、有効拘束圧と密度の依存性を比較的簡単な関係式で表現することにある。せん断変形が卓越した状態で、作用するせん断応力もダイレイタンスーも生じない極限状態(Critical state)の存在を仮定し、極限状態での間げき比と有効拘束圧の一意的な関係を利用して、状態変数 ψ を定義する。その状態変数 ψ に様々なパラメータ(塑性係数、ダイレイタンスー係数)が依存するという定式化を行うことにより、密度および有効拘束圧依存性を簡潔に表現している。Li & Dafalias モデルにおいては、せん断変形中においても、ダイレイタンスーや有効拘束圧が変化したときには、その変化を取り入れてパラメータを更新している。このことにより、砂のような粒状体が示す様々な挙動の表現が可能になっている。密度・有効拘束圧依存性を表現するLi and Dafalias モデルに対して、様々な経路における応力・ひずみ関係挙動を調べた。特に、これらの依存性を表現する上で中心的な役割を果たしている状態変数(内部変数)のそれぞれの経路での変化について考察した。便宜的な安定性の観点からの検討も行った。検討したものは3軸圧縮試験に限定されているが、拘束圧一定試験、非排水試験以外に、ひずみ比一定試験、せん断応力一定共生体積変化経路など特殊な経路

についても検討した。ここでの Li and Dafalias モデル検証結果は満足すべきものであった。

砂の体積圧縮特性は、せん断特性とともに、砂の内部構造に大きく影響されることはよく知られている。いったん、粒子間力を伝える内部構造が発達すると、低い密度であっても、その構造が外力を支えるために、間隙比に応じて無数の $e-\log p'$ 関係が得られる。せん断時の体積変化すなわちダイレイタンスーに及ぼす構造の影響については、異方性と絡めてよく話題になるが、体積圧縮特性については、構造の影響が議論されることは少ない。これは、通常の場合、砂の体積圧縮ひずみは小さく工学的に大きな問題とならないためであると考えられる。しかし、液状化のように砂の内部構造が大きく乱されたときには、内部構造が外力を支持できないために大きな体積圧縮をもたらすことが知られ、実験事実に基づく曲線近似がなされている。本文では、弾塑性モデルを基本として、構造の乱れによる損傷の発達が弾性係数と塑性係数の劣化をもたらすメカニズムを現象論的に表現する定式化を試み、せん断挙動および体積圧縮特性に及ぼす内部構造の影響をモデル化する。得られた計算結果は、用いた関数が初等的なものであることより、実験事実の全てを表現するものではないが、このような内部構造の劣化の影響を弾塑性モデルの範疇で表現できる可能性を示している。

(3) 構造が乱された砂のせん断抵抗特性に関する実験的考察

再液状化特性に及ぼす内部構造の影響を把握する目的で実施した実験について報告する。

土粒子の水中落下が再液状化に与える影響

本研究では、実際に多くの現場で再液状化が観察されている理由として、地盤の液状化に伴う体積減少によって発生する土粒子の水中落下を考え、模型地盤を用いて土粒子の水中落下が土のせん断抵抗に与える影響を調べた。

その結果、土粒子の落下距離が大きくなると、せん断抵抗が減少する層厚(影響深さ)が大きくなることがわかった。また、本研究で用いた豊浦砂では、水中落下前の相対密度にかかわらず、水中落下後の相対密度が約38%となった。これらの実験と既往の研究から、地震動により液状化した層の上層では土粒子の水中落下により再液状化がしやすくなることがわかった。

一度液状化した地点における液状化危険度の評価においては、土粒子の水中落下による二次的な液状化の影響を考慮するべきである。なお、地震動によって液状化した層の

上部でも、下部の体積圧縮によりある程度水中落下していると考えられる。水中落下により緩く体積する層と地震動によって体積圧縮する層の関係については、別な議論が必要であると考えられる。

(4) 飽和砂の液状化後の大きな変位の予測手法に関する研究液状化に伴う地盤流動の予測手法を数値解析により検討した結果を収録する。

液状化後の地盤流動に関する数値解析プログラムの検討

液状化に伴い地盤が広範囲の地域で大きな変位を生じる現象は、液状化に伴う流動と呼ばれ、液状化に対し、地盤が水平に動くことによって構造物に外力として作用する新しい問題を投げかけた。本報告では、地盤条件の異なる被害事例を対象に、三次元的な効果の影響を解析的に検討し、精度良い解析手法の構築につながるような知見を得ることを目的とする。

具体的には、三次元的広がりを持つ解析モデルについて流動解析 ALID を用いて適用性の検討を行った。流動が発生する地盤条件に該当する二つの被害事例を対象に検討し、三次元効果の重要性を示した。以上、本研究の主要な成果を、すでに発表した論文、学外発表等より抜粋した。地盤の流動について、流動開始の条件については、粒子のみの相互作用を考える粒状体力学の分野においても未解決の問題である。さらに、間隙水および間隙空気との相互作用を考えた場合には、きわめて難しい問題となる。流動の停止条件についても、流動を引き起こす駆動力の減少、粒状体としての特徴である、特別な構造（鎖の力の発達を可能とする構造）の発達とそれに伴う正のダイレイタンスの発現が大きな影響を与えることは確認できたものの、その定量的評価（モデル化、モデルに含まれるパラメータの同定方法）については、まだ解決すべき問題が山積している。土の構造のあり方は、再液状化問題などの実務的現象ばかりでなく、粒状体力学の根幹をなす問題であり、今後も研究を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1) 飛田善雄, 三塚保法, 山口晶, 吉田望: 密度と拘束圧依存性を考慮した砂の構成モデルの検証, 土木学会応用力学論文集, Vol. 11, 2008, pp. 411-422, 査読有

2) 山口晶, 奥平喜広, 佐藤由惟, 吉田望, 飛田善雄: 地震時の地盤の流動メカニズムと流動量の定量的評価東北学院大学工学部研究報告 Vol. 42, 2008, pp. 35-40, 査読有

3) 山口晶, 吉田望, 飛田善雄: 土粒子の水中落下が再液状化に与える影響, 土木学会論文集, 2010年, 掲載決定, 査読有

〔学会発表〕（計 14 件）

1) 飛田善雄, 吉田望, 山口晶, 三塚保法: 密度依存性を考慮した構成モデルによる砂の安定・不安定挙動に関する研究, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 年 7 月 4 日~7 日, 名古屋国際会議場

2) 菅原光哉, 飛田善雄, 吉田望, 山口晶: 引張りせん断時の脆性挙動を対象とした土の構成モデル, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 年 7 月 4 日~7 日, 名古屋国際会議場

3) 伊東久雄・飯川聡美・山口晶: 水平二次元せん断が液状化地盤の体積ひずみに与える影響, 平成 19 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2008 年 3 月 8 日, 岩手大学

4) 阿部有佳理・神名川雅俊・山口晶・飛田善雄: せん断応力履歴がせん断ひずみ発生量に与える影響, 平成 19 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2008 年 3 月 8 日, 岩手大学

5) 佐藤 周・千田亜斗里・飛田善雄・山口晶: 引張り応力履歴が繰返しせん断剛性に与える影響, 平成 19 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2008 年 3 月 8 日, 岩手大学

6) 久住雅敏・千葉智徳・三塚保法・飛田善雄・山口晶: 密度・拘束圧依存性と初期異方性を考慮した砂の変形挙動, 平成 19 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2008 年 3 月 8 日, 岩手大学

7) 大熊浩輝・加藤慎一・菅 智子・山口晶・飛田善雄: 振動台実験とクイックサンド実験による再液状化メカニズムの検討, 平成 19 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2008 年 3 月 8 日, 岩手大学

8) 飛田善雄, 山口晶: 不飽和土の弾塑性モデルの数学的枠組みに対する一考察, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008 年 7 月 9 日~12 日, 広島国際会議場

9) 薄井良平・三塚保法, 永野友基・飛田善雄・山口晶: 密度・拘束圧依存性を考慮した二重硬化モデルの適用性: 土木学会東北支

部技術研究発表会，2009年3月7日，東北学院大学多賀城キャンパス

10) 蜂谷菜穂子・菊池剛志・飛田善雄・山口晶・吉田望：粒状体の安息角と流動に関する基礎的実験，土木学会東北支部技術研究発表会，2009年3月7日，東北学院大学多賀城キャンパス

11) 三塚保法，飛田善雄，山口晶，吉田望：密度依存性・初期異方性を考慮した砂の弾塑性モデルの検証，第43回地盤工学研究発表会，広島市，2008年7月9日～12日，広島国際会議場

12) 飛田善雄，吉田望：内部構造を考慮した砂の体積圧縮特性の表現，第44回地盤工学会研究発表会，2009年8月18日～21日，関東学院大学金沢八景キャンパス

13) 保坂直道・大宮美香・飛田善雄：粒径の異なる粒子の流動時の挙動に関する基礎的実験，平成21年度土木学会東北支部技術発表会，2010年3月6日，日本大学工学部

14) 梅津一星・横瀬正志・飛田善雄：異方性を考慮した砂の弾塑性モデルに対する基礎的検討，平成21年度土木学会東北支部技術発表会，2010年3月6日，日本大学工学部

〔図書〕（計1件）

編集委員会飛田（委員長）：土の弾塑性構成モデル：地盤工学・基礎理論シリーズ3，地盤工学会（発売元：丸善株式会社），2009年3月発行，CD-ROM判

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飛田 善雄 (TOBITA YOSHIO)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号：40124606

(2) 研究分担者

吉田 望 (YOSHIDA NOZOMU)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号：50405891

(3) 連携研究者

山口 晶 (AKIRA YAMAGUCHI)
東北学院大学・工学部・准教授
研究者番号：30337191