



# 粒状体地盤材料の弾性波伝播特性に関する 室内実験と個別要素法解析

## 東京大学生産技術研究所 助教

大坪正英(桑野研究室)





東京大学 生産技術研究所 Institute of Industrial Science. The University of Tokyo



#### 粒子間の接触によって 地中応力を伝達する材料



珪砂



**ガラスビーズ材料** (研究目的)



川砂

## 応力伝達 光弾性による可視化



Majmudar & Behringer, 2005

Majmudar et al., 2008

## 地盤剛性率



## 弾性波検層



発表内容

#### 粒状体地盤材料(細砂ー礫材)に対する

- 1) 弾性波速度の密度・拘束圧依存性
- 2) 土粒子堆積方向による速度異方性
- 3) 細粒分混じり材料の周波数応答特性

地盤の巨視的な応答を土粒子スケール挙動で説明する 研究手法:室内実験+個別要素法数値解析(DEM)

ディスクトランスデューサーの開発













三軸試験装置 H150×*φ*75mm

2種類弾性波



大型三軸試験装置 H500×235×235mm

9種類弾性波

## 弾性波計測手法



## 弾性波計測手法



## 個別要素法(DEM)数値解析



DEMソフトウェア: LAMMPS (オープンソース)

✓ 砂粒/ガラスビーズの物性
 ✓ ヘルツーミンドリン接触理論



法線バネ:非線形 接線バネ:バイリニア





2球体剛結



## 個別要素法(DEM)数値解析

P波伝播

S波伝播



## 室内試験と数値解析の比較



発表内容

#### 粒状体地盤材料(細砂ー礫材)に対する

## 1)弾性波速度の密度・拘束圧依存性

## 2) 土粒子堆積方向による速度異方性

3) 細粒分混じり材料の周波数応答特性

## 弾性波速度の密度依存性



密度による速度の増大 → *粒子間の接触点数が増加するため* 

## 接触点の可視化実験

# X線マイクロCT

#### 棏 墨汁による着色実験



Figure 3. Print of contact points on ballotini: (a, b) visual and engaged contacts from test case 1 (11 kPa) and (c) engaged contacts from test case 2 (703 kPa) (Black arrows indicate the center of engaged contacts).



(a) (b) Figure 4. Print of contact points on wall after test case 3 (2010 kPa): (a) magnified and (b) view of the mold.







#### Otsubo 2016; Otsubo et al, 2015

## 弾性波速度の拘束圧依存性



深度による速度の増大 →*粒子間の接触剛性が増加するため* 

## 弾性波速度の拘束圧依存性



## 表面粗度の影響

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

深度による速度の増大 →*粒子間の接触面積が増加するため* 

発表内容

#### 粒状体地盤材料(細砂ー礫材)に対する

1) 弾性波速度の密度・拘束圧依存性

## 2) 土粒子堆積方向による速度異方性

3) 細粒分混じり材料の周波数応答特性

## 土粒子堆積方向による速度異方性

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

Santamarina & Cho, 2004

![](_page_21_Picture_0.jpeg)

![](_page_21_Picture_1.jpeg)

![](_page_21_Figure_2.jpeg)

![](_page_22_Picture_0.jpeg)

![](_page_22_Picture_1.jpeg)

#### 粒子接触点数

接触力網

![](_page_22_Figure_4.jpeg)

![](_page_22_Figure_5.jpeg)

![](_page_22_Figure_6.jpeg)

![](_page_22_Figure_7.jpeg)

![](_page_23_Picture_0.jpeg)

![](_page_23_Picture_1.jpeg)

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

発表内容

#### 粒状体地盤材料(細砂ー礫材)に対する

1) 弾性波速度の密度・拘束圧依存性

2) 土粒子堆積方向による剛性異方性

3)細粒分混じり材料の周波数応答特性

## 細粒分混じり材料

![](_page_25_Picture_1.jpeg)

## 骨材(粗粒材)の挙動+細粒分の挙動? 液状化強度の増大?

![](_page_25_Picture_3.jpeg)

細粒分流出による水みち、地中空洞形成

![](_page_25_Picture_5.jpeg)

![](_page_25_Picture_6.jpeg)

## 細粒分混じり材料の透水特性

## DEM-CFD coupled simulation

![](_page_26_Figure_2.jpeg)

Fig. 5. Coupled DEM-CFD simulation. Particles are coloured by drag force. The CFD grid is overlain in black.

#### 細粒分が骨格に寄与している場合は流出しにくい

## 細粒分混じり材料の周波数応答特性

![](_page_27_Picture_1.jpeg)

骨材(粗粒材)の挙動+細粒分の挙動? 液状化強度の増大?

![](_page_27_Picture_3.jpeg)

細粒分流出による水みち、地中空洞形成

<u>細粒分が骨格構造に寄与しているか否かが重要</u>

目的:細粒分の骨格構造寄与度を非破壊検査で評価する

細粒分の骨格構造寄与

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

![](_page_28_Picture_2.jpeg)

## 細粒分の骨格構造寄与

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

## 最大通過周波数

#### 弹性波周波数応答(個別要素法数値解析)

![](_page_30_Figure_2.jpeg)

粒径が小さい → 高周波成分まで地盤を通過する

## 最大通過周波数

#### 弹性波周波数応答 (室内試験)

![](_page_31_Figure_2.jpeg)

粒径が小さい → 高周波成分まで地盤を通過する

## 最大通過周波数の変化

細粒分25~35%の範囲で大きく遷移

![](_page_32_Figure_2.jpeg)

## 実験結果との比較

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

細粒分が応力負担 → 高周波成分が通過するようになる

![](_page_34_Picture_0.jpeg)

## 粒状体地盤材料の弾性波速度は

- ・密度が大きいほど増大する
   → 粒子間の接触点数が増加するため
- ・深度が大きいほど増大する
- → 粒子間の接触剛性(面積)が増加するため
- ・水平方向の伝播速度>深度方向の伝播速度
   → 土粒子の向きとの相関あり(要検討)

#### <u>細粒分が骨格構造に寄与すると高周波成分が顕著となる</u>