第 部門

京都大学	学生員	合谷	龍馬
京都大学大学院	学生員	吉田	竜也
京都大学大学院	正会員	肥後	陽介
京都大学大学院	正会員	木元	小百合
京都大学大学院	フェロー	岡 _	二三生

1. 研究の背景と目的

粒子破砕現象は、地滑りなどのすべり面や非常に高い圧力を受ける地盤で発生する現象である.特にシラスや まさ土などで構成される脆弱地盤では高圧下でなくとも起こることがあり、すべり面で液状化を誘引したり、圧 縮性を増大させるなどの工学的問題があるため、粒子破砕のメカニズムを解明する必要がある.これまでに巨視 的な視点での粒子破砕や単粒子に注目しての破砕モデルは研究されているが、粒子間相互作用を考慮した供試体 全体としての破砕メカニズムは未だ解明されていない.本研究では、このメカニズムの解明を目的とし、X 線 CT を用いることにより圧縮を受けたときのまさ土供試体の内部構造の変化を非破壊で観察し、破砕粒子分布を可視 化した.

2. CT 撮影,一次元圧縮の概要

本研究では、実験試料に破砕性の高いまさ土(土粒子 密度:2.70g/cm<sup>3</sup>)を用いた.ふるいを用いて 2.00mm~ 4.75mmに粒度調整した.一次元圧縮は静的締固め機を用 いて行い、3MPa、5MPa、10MPaの圧縮前後で CT 撮影を行 った.実験ケース毎の供試対諸量を表-1 に示す.撮影時 にステンレス製のモールドによる X 線の大きな減衰を避 けるため、OHP フィルムで供試体を自立させた.また圧 縮後は応力を開放して撮影した.撮影には µ フォーカス

表-1	試験条件

Case	3M		5M		10M	
	圧縮前	圧縮後	圧縮前	圧縮後	圧縮前	圧縮後
状態						
圧縮圧力	3MPa		5MPa		10MPa	
間隙比	1.52	1.01	1.67	1.25	1.39	0.720
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.07	1.34	1.01	1.20	1.13	1.57
高さ(mm)	11.97	9.605	14.96	12.55	12.38	8.862
直径(mm)	34.5					

X線 CT スキャナ装置(KYOTO-GEOµXCT)<sup>1)</sup>を使用した.voxel サイズは 36µm×36µm×55µm である.

3. CT 画像解析による粒子破砕挙動の可視化

まず CT 画像をもとに粒子一つ一つに番号を与える処理を行い、その後粒径を求めた. 解析手法は松島ら(2008)<sup>2)</sup> に準じた方法を用いた. この手法では、2 値化した画像を用いてエロージョン処理によって粒子間の接続を分離し た後に、それぞれの粒子番号を与える. ただし、解析の過程で、過度に粒子を分離し、一つの粒子に複数の番号が ついたものや、分離が十分でなく. 複数の粒子に同じ番号が与えられるものがあったため、それらについては個別 に抽出した.

次に, 圧縮前と圧縮後のCT画像を目視により比較し, 各粒子について破砕, 非破砕を識別した. 基本的には, 水 平断面画像(それぞれ 200 枚程度)で識別したが, 粒子が圧縮により鉛直方向に移動したり, 回転した場合に水平断 面画像では確認できないことがあるのでその場合は鉛直断面画像(すべての場合で 1024 枚)も用いて比較した. そ の情報をもとにCT画像の破砕粒子に桃色の色をつけ破砕粒子を可視化した. 図-1~図-3 に圧縮前後の水平断面 のおよび, 鉛直断面の一例を示した. これらの図を見ると, 圧縮圧力の大きいケース程破砕粒子の割合が多く, さ らに, 破砕粒子はランダムに存在せず, 空間的な偏りを持って分布しているように見える.

このような破砕粒子の空間分布を調べるため図-7, 図-8のように供試体を分割し, その領域における全粒子体積 に対する破砕粒子の体積の割合を計算した. なお, その際に, 粒子を構成する voxel が分割された領域のどこに属 するかを調べ, 領域はすべての領域の体積が同じになるように分割した.



図-1 CT撮影画像(3MPa) 表-2に8分割の結果を示す. 6分割に関しては、高さ方向の みに3分割したものと内側と 外側に2分割したものだけで もまとめ、それぞれ表-3、表-4 に示した.なおこれらは圧縮 後の供試体での検討結果であ り、単位は%である.

表-2を見ると、まず3MPaは、 上部で a-1、b-2 が多く、下部で ほぼ同じになっている.5MPa は、下部では b-2 が多く破砕し

表-2 破砕粒子の体積の割合(8分割)			
	3M	Pa	
a-1	b-1	c-1	d-1
41.7	49.0	23.0	30.3
a-2	b-2	c-2	d-2
50.4	49.7	46.8	45.7
	5M	Pa	
a-1	b-1	c-1	d-1
42.0	62.4	62.7	65.3
a-2	b-2	c-2	d-2
52.2	76.3	57.0	58.9
10MPa			
a-1	b-1	c-1	d-1
54.8	78.6	84.2	80.0
a-2	b-2	c-2	d-2
72.8	88.4	82.7	91.2

図-2 CT撮影画像(5MPa)

	52.4	67.8	87.5	
	3MPa	5MPa	10MPa	
		1		
		圧縮後		
表-3	高さ方向の破砕粒子の体積の割合			割合
	図-3	CT撮影	ど画像(10	MPa)

52.4	67.8	87.5
2		
36.8	57.4	78.1
3		
38.3	60.8	74.0

表-4 内側と外側の破砕粒子の体積の割合 <u>3MPa</u>5MPa10MPa in out in out in out

40.5 | 65.1 | 55.2 | 81.3 |

77.2

42.1



ており上部の b-2 も同様の傾向を示している. 一方 a-2 はあまり破砕 しておらず,上部でも同じように破砕粒子が少ない. 10MPa は上部, 下部ともに多くの領域で破砕しているが a-1, a-2の領域に関しては 相対的に少なくなっている. つまり,鉛直方向に分割したそれぞれ

の領域で破砕粒子の割合に偏りがある傾向が見られる.破砕した粒子は,他の粒子よりも大きい軸力を受け持ったと考えると,この傾向は圧縮を受ける供試体が柱状の構造で軸力を受け持ったためと考えられる.すなわち, 3MPaでは,a,bの領域,5MPaでは,bの領域が載荷初期に軸力を多く受け持ったと考えられ,その柱状の構造が破砕 により受け持つ軸力が減少すると,次に別の部分で受け持つことになると考えられる.

次に表-3 を見ると高さが高いほど破砕が多くなっている.これは、下の位置ほど側面の摩擦の影響で伝わる軸力 が減衰しているためだと考えられる.最後に表-4 をみると内側よりも外側で破砕が多くなっている.これも、側面 の摩擦の影響で鉛直荷重が減少して外側は内側に比べて伝わる軸力が小さくなっているためと考えられる.

4. 結論と今後の課題

CT 画像を解析することにより, 破砕粒子の分布を可視化した.また破砕粒子の分布を定量的に評価した.その結果破砕に偏りがあることや側面の摩擦の影響が大きいことが分かった.今後の課題としては, 破砕と粒径及び配位数の関係を調べ, 既存の破砕モデルと比較すること等が挙げられる.そのために接触点の可視化が必要である.

## 参考文献

1) Higo, Y., Oka., F., Kimoto, S., Sanagawa, T., and Matsushima, Y., Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT, Soil & Foundations, Vol51, No1, pp.95-111, 2011.

2) 松島亘志,上杉健太郎,中野司,土山明, Spring-8 マイクロX線CTによる粒状体の3次元微視構造の定量化,応用 力学論文集, Vol. 11, pp.507-515, 土木学会, 2008.