

砂粒子の破碎特性とせん断過程における粒子形状の変化

山口大学工学部

正 員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一

山口大学大学院

学生員 ○足立剛 加登文学

中電技術コンサルタント（株） 正 員 児玉信

1. まえがき 一般に砂のような粒状体では、拘束圧の増加に伴いダイレイタンシー量の変化や強度低下を引き起こすことが知られている^{1),2)}。この様な力学的特性の変化は、供試体内の粒子が高圧下で破碎していることに起因している。そのため、破碎特性やせん断過程における粒子形状の変化を把握することは、粒状体の力学特性における拘束圧依存性を解明するのに有効であると考えられる。本報では、砂を構成している単粒子の破碎特性を実験的に明らかにするとともに、粒子破碎を伴う高圧下での圧密およびせん断試験後の粒子の状態を顕微鏡観察し、比較検討を行うものである。

2. 試料および実験方法 用いた試料は、粒度調整($d_{50}=2.00\sim0.85\text{mm}$)を行った秋穂砂($G_s=2.615$, $e_{max}=0.985$, $e_{min}=0.706$)であり、構成鉱物は、石英と長石(正長石と斜長石)である。その構成鉱物割合は石英 68.7%、長石 31.3%である。単粒子破碎試験は、秋穂砂の構成鉱物割合に準じて石英 70 個、長石 30 個の合計 100 個を用いて行った。また、試験後の供試体内の粒子の破碎状態の観察は、次の手順で行った。1) 単粒子を石英 6 個、正長石 6 個、斜長石 6 個合計 18 個それぞれ着色する。2) 着色した粒子の写真撮影を行う。3) 着色した粒子を 6 個ずつ供試体の上部および下部から約 2cm 離れた所と供試体の中央に配置する。供試体をタンピング法により相対密度 100%を目標に作成する。4) 等方圧密試験および側圧一定排水三軸圧縮試験を行う。5) 試験終了後、着色した粒子を取り出し写真撮影と画像処理を行う。

3. 実験結果 本研究における単粒子破碎試験の結果の整理では、それぞれの粒子の荷重と変位の関係において最初に荷重が低下する点を破碎荷重 F_b と定義している。図-1 は、破碎荷重における度数分布を示したものである。図-1 から長石は、荷重が 30(N)までで全体の 90%程度が破碎していることが認められる。これに対して、石英は、30(N)ではほとんど破碎せずに、約 120(N)で 90%程度破碎していることがわかる。このことから、長石は、脆弱な粒子であり、石英は、長石に比べて堅い粒子であることがわかる。またこの結果は、秋穂砂の構成鉱物割合に準じて試験を行ったため、秋穂砂の特徴を表していると言える。

図-2 は、本研究で行った圧密試験とせん断試験における間隙比 e と平均有効主応力 p の関係を示したものである。それぞれの試験は、秋穂砂の降伏点 p_y の近傍である拘束圧 $\sigma_c=3\text{MPa}$ と、それを大きく越える $\sigma_c=10\text{MPa}$ で行っている。

図-3 は、せん断試験の主応力比と軸ひずみ、体積ひずみの関係を示している。この図から、いずれの拘束圧においても応力ひずみ挙動は、ほぼ同様な関係を示している。また、両者とも、せん断中常に負のダイレイタンシーを示していることもわかる。以下では、これらのせん断中の粒子破碎の観察結果について述べる。

顕微鏡による試験後の破碎状態について見ると、 $\sigma_c=3\text{MPa}$ の圧密試験では粒子は全く破碎しておらず、試験前と同じ粒子形状であることが認められた。単粒子破碎強度が低い正長石や斜長石においても欠けている様子は見られなかった。 p_y を大きく越える $\sigma_c=10\text{MPa}$ では、3 回行った試験で取り出した粒子のうち正長石や斜長石は、角がわずかに欠ける様子が 28 個中 23

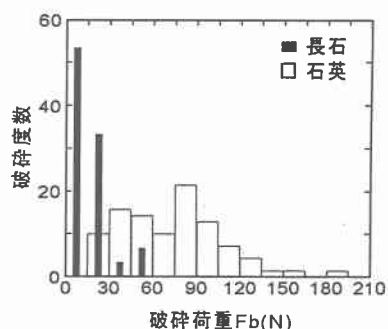
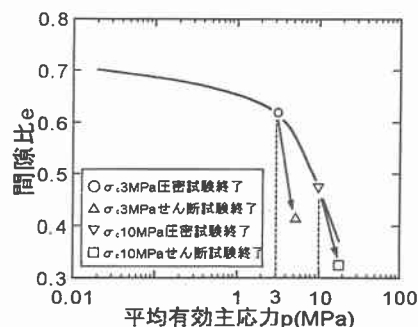


図-1 破碎荷重における度数分布

図-2 e - p 関係

個の粒子について認められた。これに対し、試験前後で形状が変化しない石英粒子は、18個中16個であった。このように、圧密試験後の粒子の破碎状態を見てみると、 $\sigma_c=3\text{MPa}$ 程度では粒子が欠けている様子は見られないが、 $\sigma_c=10\text{MPa}$ まで圧密すると長石において粒子の角が欠ける様子が見られた。次に、せん断後の粒子の破碎状態について見てみると、 $\sigma_c=3\text{MPa}$ まで圧密した後せん断試験を行った場合では、正長石や斜長石は、試験後粉々に破碎するか、角が欠けて丸みを帯びている様子が見られた粒子が取り出せた9個うち8個であった。石英については、角が少し欠ける粒子は6個中1個で、着色していた塗料が落ちていた粒子は6個中4個であった。これに対し、 $\sigma_c=10\text{MPa}$ まで圧密した後せん断試験を行った場合では、正長石や斜長石は、それらのほとんどが破碎して砕けており、供試体内から取り出すことの

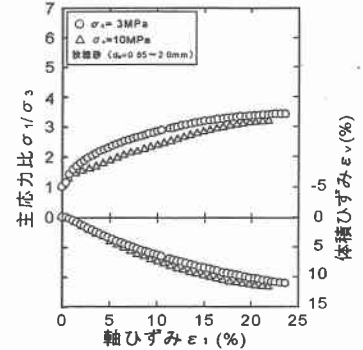


図-3 $\sigma_1/\sigma_3 - \epsilon_v$ 関係

不可能なものがほとんどであった。取り出せた長石粒子は、11個中2個であり、試験後角が大きく欠けて丸みをおびている様子が見られた。また、石英に対しては、単粒子破碎試験の破碎状態と同様に数個に割れて破碎している状態の粒子は、取り出せた5個のうち4個確認された。

表-1は、各試験におけるそれぞれの鉱物の、粒子が破碎および欠ける様子が見られた個数を、取り出せた全粒子で除した破碎確率を示している。以上のことから、 $\sigma_c=3\text{MPa}$ と 10MPa せん断中の供試体内の粒子破碎の程度は大きく異なっているにもかかわらず、応力ひずみ関係に拘束圧依存性は見られないことが明らかとなった。

表-1 供試体内の粒子の破碎確率

拘束圧	3MPa				10MPa			
	圧密後		せん断後		圧密後		せん断後	
鉱物	長石	石英	長石	石英	長石	石英	長石	石英
破碎確率	0.0	0.0	91.7	16.7	86.1	11.1	100	83.3

表-2 F_{sp} の算出結果

拘束圧	3MPa		10MPa	
	圧密後	せん断後	圧密後	せん断後
e	0.6204	0.4172	0.4727	0.3296
p	3.000	10.85	10.00	33.77
F_{sp}	9.791	32.38	30.61	96.57

Nは単位体積あたりの土粒子の個数であり、秋穂砂全体で石英と長石の構成割合が7:3であったことから(2)式を用いている。

$$N = \frac{7V_s}{10V_{spq}} + \frac{3V_s}{10V_{spf}} \quad \cdots (2)$$

ここで V_s は、単位体積あたりの土粒子のみの体積であり、間隙比を用いて $V_s=1/(1+e)$ で与えられる。また、 V_{spq} は石英の単粒子体積の平均で、 V_{spf} は、長石の単粒子体積の平均である。さらに、(1)中の応力 p には等方圧密時では平均有効主応力、せん断時では最大主応力を用いた。

表-2に各試験の F_{sp} の算出結果を示す。この表より $\sigma_c=3\text{MPa}$ まで圧密後せん断した時の F_{sp} は32程度であることがわかる。ここで、 F_{sp} と単粒子破碎試験における Fb を等価であるとする、 $F_{sp}=32$ という荷重は、図-1より長石が90%程度、石英が10%程度破碎する荷重であることがわかる。さらにその破碎度数は、表-1の $\sigma_c=3\text{MPa}$ のせん断後の破碎確立とほぼ同値を示している。また、 $\sigma_c=10\text{MPa}$ まで圧密後せん断した時についても同様な結果が見られた。

4. あとがき 本報では、単粒子破碎試験および三軸圧縮試験を行い、砂の粒子の破碎特性と供試体内の粒子の破碎状態との比較検討を行った。その結果、単粒子破碎試験より得られた粒子の破碎度数とせん断試験後の粒子の破碎状況は、良く対応することが明らかとなった。さらに、 $\sigma_c=3\text{MPa}$ 以降での供試体内の粒子破碎は、顕著であるにもかかわらず、応力ひずみ関係に拘束圧依存性は見られないことが明らかとなった。

<参考文献>1)三浦清一(1993):「粒状体の力学」,第2章15節,pp.177-120, 2)矢嶋三郎(1986):「破碎と粉体物性」,ケミカルエンジニアリング・シリーズ10,培風館