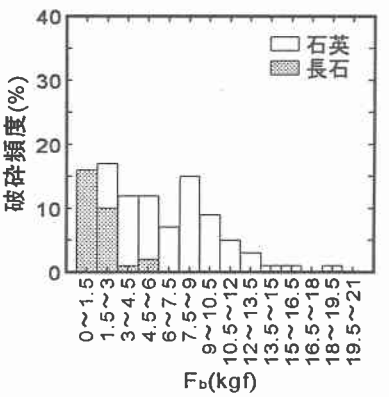
砂粒子の破砕特性と供試体内での粒子破砕との関連性

山口大学工学部　正　員　兵動正幸　中田幸男　村田秀一
山口大学大学院　学生員　○加登文学　足立剛
中電技術ｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ(株)　正　員　児玉信

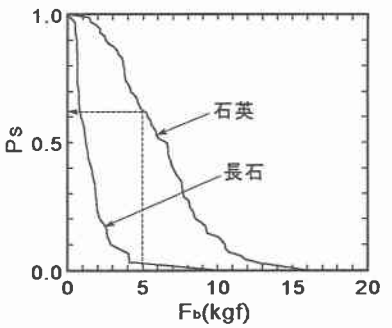
1.まえがき　土などの粒状体における圧縮性やせん断強さなどの力学特性は、土粒子の大きさや形状、間隙比などの基本物性に依存して変化することが知られている。また、拘束圧の大きさなどの応力状態によっても砂の応力ひずみ挙動が変化することが明らかとなっており、その要因の一つとして高圧下における粒子破砕が挙げられている。粒子破砕には、砂を構成している粒子の硬さなどが強く起因していると考えられ、そのような構成粒子の特性を明らかにしていくことが、砂の力学特性を把握するためにも重要である[1),2)]と言える。本研究では、単粒子破砕試験を行い、砂を構成する粒子の破砕特性を明らかにし、供試体内のせん断中の粒子破砕と単粒子の破砕特性との関連性を検討していくものである。

2.試験方法　用いた試料は0.85～2.0mmに粒度調整した秋穂砂(G_s=2.615, e_{max}=0.985, e_{min}=0.706)である。単粒子破砕試験は、試験装置の上盤を固定し、下盤を載荷速度 0.1(mm/min)一定で上昇させることにより粒子を破砕させるものである。単粒子破砕試験は、秋穂砂を構成する石英、長石について行い、せん断試験は、タンピング法を用いて供試体を作成し、高圧三軸試験機を用い、σ_c=30kgf/cm^{2}および100kgf/cm^{2}で側圧一定排水試験を行った。

3.結果と考察　図-1は、石英、長石のすべての粒子を含めた秋穂砂全体について、単粒子破砕試験より得られた破砕荷重F_bと破砕頻度との関係を示したものである。ここで、単粒子破砕試験の荷重と変位の関係において、荷重が最初に減少する点を破砕荷重F_bと定義している。また、破砕頻度は、あるF_bの範囲で、F_bが測定された粒子の個数を試験に用いた全粒子個数で除すことによって得られた破砕の頻度を表している。本研究における試験では、秋穂砂に含まれる石英と長石の構成割合がそれぞれ68.7%と31.3%であったことから、この割合に準じて石英70個、長石30個の破砕試験を行っている。図-1から、荷重が3(kgf)程度までは破砕する粒子のほとんどが長石であるが、3(kgf)からは石英も破砕し始めており、秋穂砂全体としてみると、破砕頻度が徐々に低下していることがわかる。上記したように、本試験では秋穂砂の構成割合に準じて破砕試験を行っているので、この図の結果は、秋穂砂の特徴をそのまま表すものと言える。図-2は、石英と長石について、ある破砕荷重F_bで粒子が破砕しない確率P_sを示した図である。この図から、単粒子に5(kgf)程度の荷重が作用すると、長石ではほとんどすべての粒子が破砕しているが、石英については4割程度しか破砕しておらず、長石に比べて硬い粒子であることが認められる。図-3は、すべての粒子を含めた秋穂砂全体について図-2と同様の結果の整理を行ったものである。この図から、秋穂砂全体としては単粒子に5(kgf)程度の荷重が作用すると、約5割が破砕し、10(kgf)程度の荷重が作用すると約9割が破砕することがわかる。このP_sとF_bの関係で示される曲線の形状は、図-2における石英のみの場合と近い形状を示している。これは、秋穂砂の7割程度が石英で構成されているためであり、この構成割合が変わってくると曲線の形状も変わってくる。したがっ



図－１　破砕頻度－F_b関係



図－２　P_s－F_b関係

て、単粒子の強度から試料の破砕特性を把握する場合は、粒子の構成割合がその試料の特性を表す大きな要因になると言える。

本研究では、秋穂砂を用いて、拘束圧 σ_c=30kgf/cm^2,100kgf/cm^2 のそれぞれにおける圧密後およびせん断後について粒子破砕量を調べ、供試体内の粒子破砕と単粒子の破砕特性との関連性を検討している。そこで、まず三軸供試体内の単粒子に作用する荷重 F_{sp} を(1)式を用いて算出した。

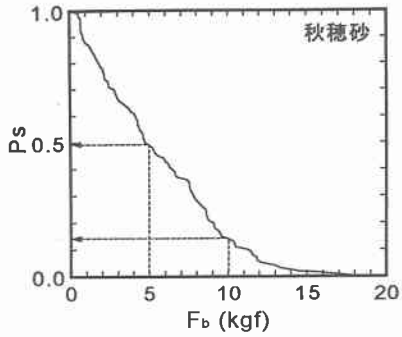
$$F_{sp} = \frac{p}{N^{2/3}}(\mathrm{kgf/個}) \cdots\cdots (1)$$

この(1)式における単位体積中の粒子の個数 N は、秋穂砂全体で石英と長石の構成割合が 7:3 であったことから次式を用いている。

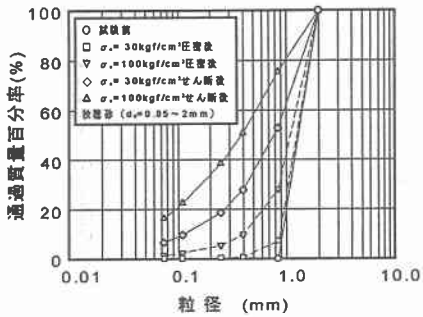
$$N = \frac{7}{10}\frac{V_s}{V_{spq}} + \frac{3}{10}\frac{V_s}{V_{spf}} \cdots (2)$$

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_{spq}=0.0037(cm^3/個)、V_{spf} は長石の単粒子体積の平均で V_{spf}=0.0035(cm^3/個)となる。さらに、(1)式中の応力 p は、試験中の最大主応力 σ_1 の最大値であり、等方圧密時には平均有効主応力 p(=σ_1)に、せん断時には最大主応力 σ_1 に相当すると考えた。図-4 は、それぞれの試験後の粒径加積曲線であるが、この曲線において試験前の最小のふるい目(粒径)d_0=0.85(mm)に着目し、試験後このふるい目以上に粒子が残る割合を三軸試験における粒子が破砕しない確率 P'_s とし、図-3 に示した P_s-F_b 関係に重ねてプロットしたものが図-5 である。それぞれの試験における F_{sp} と P'_s の値は、表-1 に示す通りである。図-5 から、単粒子破砕試験によって得られた P_s と三軸圧縮試験から得られた P'_s がほぼ良い対応をなしていることがわかる。このことより、単粒子破砕試験から砂の破砕性を知り得る可能性が見い出せたと考えられる。しかし、この P'_s の決定方法は、0.85(mm)のふるいに残留した粒子が必ずしも破砕していないわけではなく、粒子が破砕しない確率を過大評価している点や、単粒子に作用する荷重の算出方法等、多くの問題もあり、今後さらに研究を深めていく必要性がある。

4. あとがき　本報では、単粒子破砕試験および三軸圧縮試験を行い、砂粒子の破砕特性と三軸供試体内で生じる粒子破砕との関連性についての検討を行った。その結果、単粒子破砕試験から求めた粒子が破砕しない確率 P_s と三軸圧縮試験の粒径加積曲線から求めた粒子が破砕しない確率 P'_s は、おおむね良い対応をなすことが明らかとなった。



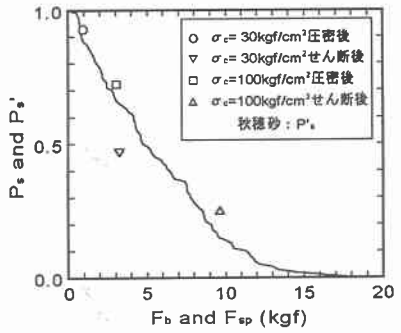
図－3　P_s－F_b 関係



図－4　粒径加積曲線

表－1　P'_s および F_{sp}

拘束圧	σ_c=30kgf/cm^2		σ_c=100kgf/cm^2	
応力状態	圧密後	せん断後	圧密後	せん断後
p(kgf/cm^2)	30.00	108.5	100.0	337.7
P'_s	0.9276	0.4728	0.7209	0.2464
F_{sp}(kgf/個)	0.9791	3.238	3.061	9.657



図－5　P_s－F_b および P'_s－F_{sp} 関係

<参考文献>1) 三浦清一(1993):「粒状体の力学」, 第 2 章 15 節, pp.117-120、2) 八嶋三郎(1986):「粉砕と粉体物性」, ケミカルエンジニアリング・シリーズ 10, 培風館