砂の圧縮降伏応力と単粒子強度との関係

大津市役所　正会員　○小山　桃太
三井住建道路㈱　仲森　直人
立命館大学理工学部　正会員　福本　武明

1. はじめに　著者らの研究室では，以前から砂の圧縮特性に関する実験的研究を継続しており，その都度得られた主要な研究成果を公表してきた[1)~8)]．特に，砂の特性値として重要な圧縮降伏応力 p_c と，その p_c への圧縮に伴う粒子破砕現象の関与を明確にしたことなどがあげられる[2)~8)]．これらの成果を踏まえ，本報では，主として砂の構成粒子の破壊強度に着目し，単粒子強度試験から求まる平均単粒子強度 $\bar{p}$ と p_c との関連性について検討したので，その結果について報告する．

2. 実験方法　試料は，Table 1 に示すように，しらすと 4 地方の真砂土，相馬砂，砕石を用い，まず同一条件下(絶乾状態,粒径:0.85～0.60mm,相対密度:D_r=95%)で実験を行った(A シリーズ)．次に粒径のみを変えた実験(B シリーズ)と，相対密度を変えた実験(C シリーズ)を行った．これらの実験ではいずれも，試料を鋼製モールド(内径 60mm,深さ 40mm)に詰め，これを標準圧密試験機で圧密圧力 p=0.01～0.64 MPa まで段階的に載荷した後，油圧式高圧圧縮試験装置[1)]に移して p=1.25,2.5,5,10,20,40, 69.4MPa まで載荷した．各載荷段階後の供試体の粒子破砕状況を調べるために，ロータップ型振とう機を用いて粒度分析を行った．一方，各試料から無作為に 30 個の粒子を取り出し，簡易圧縮試験機(Fig.1)の台座上に粒子を無理なく置き，一定の載荷速度(13.6mm/min)で圧縮し，破壊時のダイヤルゲージの読みを測定した．ダイヤルゲージの読み R にプルービング係数 k を乗し，次式から破壊荷重 Q(N)を求める．

$$Q=kR \quad \cdots\cdots (1)$$

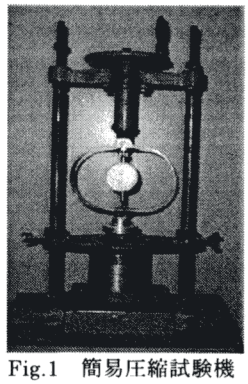

Fig.1　簡易圧縮試験機

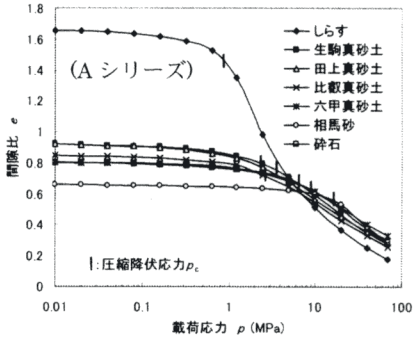

Fig. 2　e-log$p$ 曲線

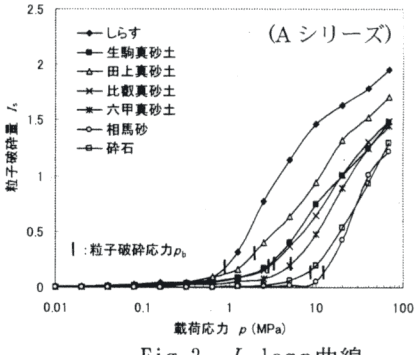

Fig. 3　I_s-log$p$ 曲線

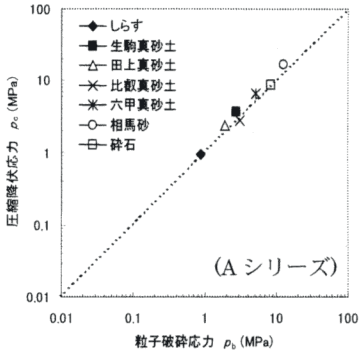

Fig. 4　p_c と p_b の関係

3. 実験結果と考察

3.1 高圧圧縮試験　Fig.2 に，今回の 7 種類の試料で得られた e-log$p$ 曲線(A シリーズ)を示す．図から，脆い粒子の砂ではかなり低い載荷応力段階から間隙比の減少が認められ，特に，しらすの場合には，p=1MPa あたりから e が急激に減少する．これに対して，堅固な粒子からなる砕石や相馬砂の間隙比は 10MPa あたりから急激に減少する傾向にある．図中の | 印が各試料の圧縮降伏応力 p_c の位置であり，粘性土の圧密試験[9)]における圧密降伏応力と同じ方法で求めた．このように脆い砂と硬い砂の e-log$p$ 曲線の対比から，粒子の硬軟による圧縮特性への影響が極めて大きいことが理解できる．

次に，各載荷段階終了後，供試体を取り出して粒度分析した結果から粒子破砕量 I_s を式(2)で算定し，載荷応力 p に対しプロットしたものが Fig.3(A シリーズ)である．なお式(2)中の S_w は試験前の比表面積(cm²/g)，S_w' は試験後の比表面積(cm²/g)である．

$$I_s = 2.3 \cdot \log\left(\frac{S_w'}{S_w}\right) \quad \cdots\cdots (2)$$

Fig.3 から，堅固な粒子の砕石や相馬砂の場合，載荷応力 p=10MPa まではほとんど破砕せず，これに対し,しらすや真砂土では p=1MPa の低い圧力下

キーワード　砂，圧縮降伏応力，粒子破砕応力，単粒子強度
連絡先　〒525-8577　滋賀県草津市野路東 1-1-1，　TEL；077-566-111 (内線 8717)，　FAX；077-561-2667

でも相当の粒子破砕を起こしていることが認められる．なお，図中の｜印が I_s - log$p$ 曲線上で粒子破砕が顕著化し始める応力，すなわち粒子破砕応力 p_b の位置であり，前後の直線部分を延長しその交点として求めた．

Fig. 4 に，上記の要領で求めた p_c と p_b の関係(A シリーズの場合)を一括図示する．図から明らかなように，p_c と p_b の間には，45° の線上に乗り，不可分の相関関係がある．

3. 2　単粒子強度試験　式(1)から求まる単粒子の破壊荷重を応力で表現するために，まず接触面積を求める必要がある．ここでは，砂粒子の形状を 14 面体と仮定し，載荷板と砂粒子の接触面積 A を式(3)から求める．式中，a は粒子の水平長軸の長さ(mm)，b は粒子の水平短軸の長さ(mm)である．故に，砂の単粒子強度 q と平均単粒子強度 $\bar{q}$ はそれぞれ式(4), (5)より求まる．N は試験に供した粒子の数である．

Table 1　試験条件と試験結果の比較表

		高圧圧縮試験			単粒子強度試験				
シリーズ	試料	粒径 d (mm)	相対密度 D_r (%)	圧縮降伏応力 p_c (MPa)	粒径 d (mm)	平均単粒子強度 $\bar{p}$ (MPa)	図記号	図番号	Fig.
A	しらす	0.85～0.60	95	1.0	0.85～0.60	23.7	○	1	5
	生駒真砂土			3.6		97.8		2	
	田上真砂土			2.4		69.4		3	
	比叡真砂土			2.8		84.7		4	
	六甲真砂土			6.6		122.8		5	
	相馬砂			20.6		509.3		6	
	砕石			8.5		196.8		7	
B	しらす	2.00～1.18	95	1.1	2.00～1.18	15.1	◇	1	6
	六甲真砂土			3.8		56.0		5	
	相馬砂			16.2		205.1		6	
	砕石			4.5		107.7		7	
C	しらす	0.85～0.60	25	0.7	0.85～0.60	23.7	□	1	7
	生駒真砂土			0.8		97.8		2	
	相馬砂			8.7		509.3		6	
	砕石			2.1		196.8		7	

$$A = \frac{ab}{800} \quad \cdots\cdots (3) \qquad q = \frac{Q}{A} \quad \cdots\cdots (4) \qquad \bar{q} = \frac{\Sigma q}{N} \quad \cdots\cdots (5)$$

3. 3　圧縮降伏応力 p_c と平均単粒子強度 $\bar{q}$ の関係　単粒子強度試験より得られた各試料の平均単粒子強度 $\bar{q}$ と，高圧圧縮試験より得られた圧縮降伏応力 p_c との対比を Table 1 中に条件別に整理して示す．また，Fig. 5～Fig. 7 は平均単粒子強度 $\bar{q}$ と圧縮降伏応力 p_c の関係を条件別に一括図示したものである．これらの図より $\bar{q}$ と p_c は非常に相関性がよく，両対数紙上でユニークな直線関係が存在することが分かる．図中には，矢印で粒径や相対密度を変えた場合の動きを示してあるが，結果としてほぼ平行な直線上に並ぶ傾向にある．このことは，事前に相関式を立てておけば，$\bar{q}$ を求めるだけで容易に砂の p_c が求められることを意味する．

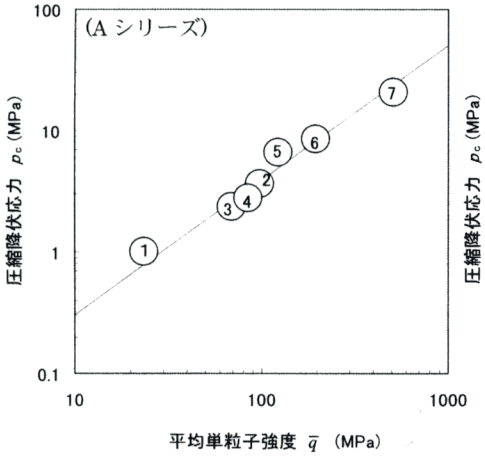

Fig. 5　p_cと$\bar{q}$の関係 (材質の影響)

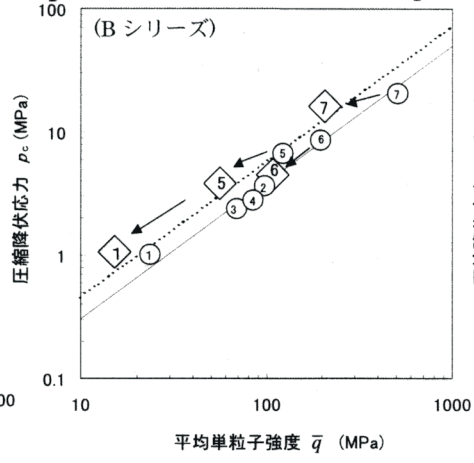

Fig. 6　p_cと$\bar{q}$の関係 (粒径の影響)

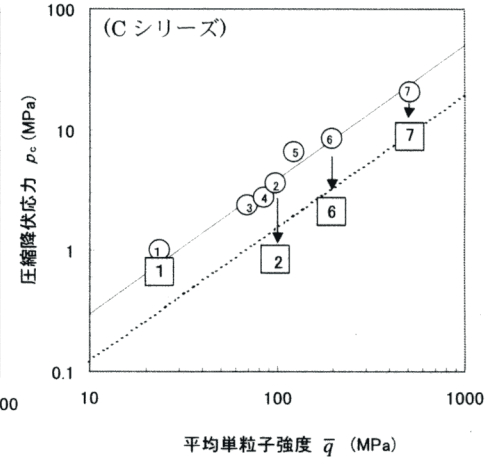

Fig. 7　p_cと$\bar{q}$の関係 (相対密度の影響)

4. 結び　以上より，①砂の圧縮降伏応力 p_c と粒子破砕応力 p_b との間に深い相関関係があること，及び，② p_c を平均単粒子強度 $\bar{q}$ から推定することが可能なこと，などが判明した．今後は，上記の知見が他の粒状土でも成り立つか否か，広く検討していきたい．

参考文献】1)福本武明，福田英和，岡部康夫：まさ土の圧縮特性に及ぼす粒子破砕の影響，第 28 回土質工学研究発表会，pp.457~458，1993　2)福本武明，野口進，中木村尚史：砂の高圧圧縮特性，平成 7 年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp.Ⅲ－21－1～2，1995　3)野口進，福本武明：高圧下での砂の圧縮特性に関する考察，土木学会第 53 回年次学術講演会，pp.386～387，1996　4)野口進，澤井大祐，福本武明：高圧圧縮時の砂の粒子破砕特性，平成 9 年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp.Ⅲ－58－1～2，1997　5)澤井大祐，喜田啓介，野口進，福本武明：高圧下における砂の $e$log$p$ 特性，土木学会第 53 回年次学術講演会概要集，pp.380～381，1998　6)澤井大祐，喜田啓介，福本武明：砂の高圧圧縮特性に及ぼす水侵の影響，土木学会第 54 回年次学術講演会，pp.348～349，1999　7)小山桃太，福本武明：脆い粒子から成る砂の圧縮特性に関する考察，平成 14 年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp.Ⅲ－3－1～2，2002　8)福本武明：まさ土の圧縮特性に関する一考察，土木学会第 38 回年次学術講演会概要集，pp.565～566，1983　9) 地盤工学会：土の載荷段階による圧密試験，土質試験の方法と解説，pp.348～3888，2000