

## 粒子特性の評価と工学的意義

### 5. 粒子強度の評価と土の挙動

中田 幸男 (なかた ゆきお)  
山口大学大学院 准教授

荒牧 憲隆 (あらまき のりたか)  
崇城大学工学部 准教授

武井 正孝 (たけい まさたか)  
西松建設株式会社品質管理部品質管理課

#### 5.1 はじめに

土を構成している粒子は剛体ではない。すべての粒子は、ある大きさ以上の力が作用することで、割れたり、砕けたりする。土質力学の体系の中では、この粒子が破碎するという事実を認識するに至ってはいるものの、実際の設計など、工学的な検討では直接その特性を認識することなく進められているのが実情である。

2章で紹介したロックフィルダムの事例では、材料特性における相似粒度の適用性に触れた。相似粒度の適用は粒子特性が粒径に依らないとことを前提に成り立つが、粒子の大きさによって圧縮指数が異なることが明らかにされ、これをもとに実務上の問題が解決に導かれた。また、杭の支持力特性の事例では、深い基礎の支持力発現が、粒子破碎に結びつけられる圧縮性と関係付けられている。

近年、リサイクル材料の地盤工学的利用が広がり、これには、造粒材、スラグ、脱水処理材料など、自然材料と比べて、粒子強度の低い粒子（あるいは地盤工学的に粒子としてみなされる土塊）で構成されているものが対象となっている。2章では、脱水処理粘土の沈下事例が取り上げられ、土塊の強さの理解が脱水処理土の変形・強度特性の理解に有効であることが紹介されている。

このように、土粒子の強さ、いわゆる粒子強度の評価が、工学的に意義を持つ場面が広がりつつある。ここでは、粒子強度の測定に関する現状と、粒子強度の違いが与える力学挙動を実験的に調べた結果、および粒子強度のモデル化とその展開について紹介する。

#### 5.2 粒子強度の測定

##### 5.2.1 粒子強度の測定方法

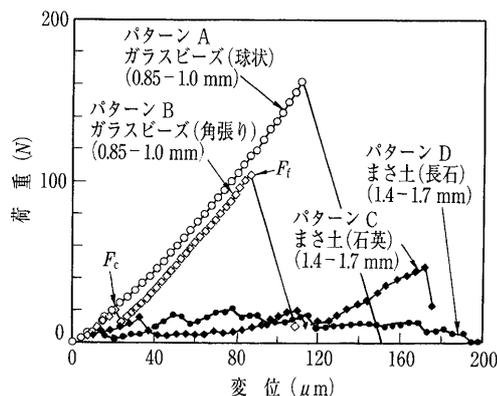
粒子強度に関する研究は、粉体工学の分野では古くから行われており、粉碎における古典理論を提唱した Rittinger (リッティンガー)、Kick (キック) を始まりとしている<sup>1)</sup>。近年、地盤工学の分野においても単粒子破碎に関する研究<sup>2)~13)</sup>が行われるようになってきた。その測定には、一軸圧縮試験機の機構とほぼ同じである単粒子破碎試験機が用いられることが多い。すなわち、載荷ロード間に単粒子を配置し、破碎させるものである。計測は、載荷荷重と変位の測定を行う。変位は、粒径が

ある程度大きい場合は接触型変位計で測定可能であるが、粒径が小さい場合には、非接触型変位計で測定することが望ましい<sup>6)</sup>と考えられる。載荷ロードには、岩石用のポイントロードテストに用いられる円錐形状型点載荷ロード<sup>12)</sup>や一般的な圧縮試験機に用いられる平面形状のロード<sup>2)~11),13)</sup>がある。載荷速度に関しては、2 mm 前後の粒径に対し 0.1~0.3 mm/min 程度で行われているが、明確な基準は定められていない。地盤材料の単粒子強度の載荷速度依存性を確認しているが、コンクリート円柱形試験や岩石角柱片に比べるとわずかであること<sup>7)</sup>がわかっている。

##### 5.2.2 粒子強度特性

図—5.1には、単粒子破碎試験結果（変位速度0.1 mm/min）から得られた代表的な荷重と変位の関係を示している<sup>7)</sup>。球体をなすガラスビーズ（G.B.）以外の試料は、最大のピーク荷重 ( $F_i$ ) を示す前に小さな荷重のピークを示す。この荷重の小さなピークの繰返しは、載荷板に接触している粒子の角の破碎か、粒子内に存在するクラックに沿って粒子の一部が欠ける破碎に対応していることは、実験中の観察から確認されている<sup>7)</sup>。火山灰質粗粒土のしらす構成粒子でも図—5.1のまさ土の試験結果とほぼ同様な傾向を示す<sup>8)</sup>が、軽石系粒子は、粒子内空隙の影響により、荷重の増加に伴い粒子が全体的に押し潰されながら崩れる延性的な破碎となる傾向を示す。

粒子強度は、圧縮により粒子内に生じる引張（破碎）応力によって表されている。代表的なものとして、破碎荷重を粒子体積の  $2/3$  乗で除す方法<sup>9)</sup>、破碎荷重を直接



図—5.1 荷重と変位の関係<sup>5)</sup>

測定された加圧板と粒子の接触面積で除す方法<sup>10)</sup>、粒子を14面体と仮定して加圧板と粒子の接触面積を算出し、これで破碎荷重を除す方法<sup>11)</sup>、破碎荷重を粒子の高さ<sup>12)</sup>、もしくはその2乗で除す方法<sup>2)~4),6)~8),13)</sup>などが挙げられる。以下は、点載荷試験でよく利用され、理論的裏付けがある破碎荷重を粒子の高さの2乗で除して表すものである。

$$\sigma = \frac{F_f}{d^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\sigma$ は粒子強度、 $F_f$ は最大ピーク荷重、 $d$ は粒子径である。

図—5.2は、平均粒子強度と平均粒径を両対数上に示したものである<sup>2)</sup>。図には、3種類の地盤材料に対する単粒子破碎試験結果を示しているが、粒径の増加に伴いいずれの粒子強度も減少することを示している。この結果は、他の材料についても同様な傾向を示すことが示されている<sup>2),4),7),11),12)</sup>。2章で紹介したロックフィルダムの沈下検討事例では、圧縮指数が粒径に依存するということから、相似粒度で行った室内試験結果が原位置での変形特性を正しく評価できないことを示した。相似粒度によって圧縮指数が異なる一つの要因として、この図に示した粒子強度に与える粒径依存性が挙げられる。

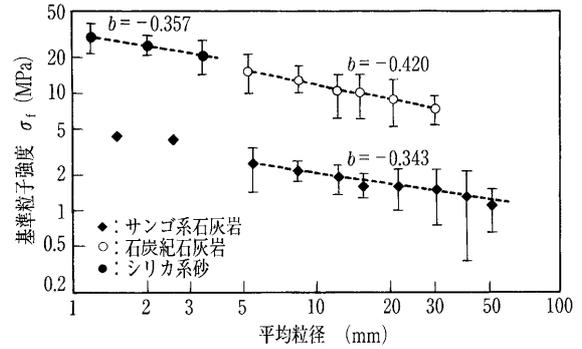
粒子強度は、粒子サイズ、形状、鉱物、材料内のクラックなどによって大きく変動する。したがって、粒子強度を表す場合、強度の平均値の表示とともに、ばらつき(強度分布)を評価することも重要である。この評価には、負の2項分布を用いる方法<sup>11),12)</sup>、Weibull(ワイブル)の統計分布関数<sup>3),4),7)</sup>を用いる方法がある。ここでは、ばらつきを表す係数が比較的簡単に得られる後者について概説する。これは、Weibull<sup>14)</sup>が示したブロックの破碎しない確率を修正したもので、以下のような式で表される<sup>3)</sup>。

$$P_s(d) = \exp \left\{ - \left( \frac{d}{d_0} \right) \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right\} \dots\dots\dots(2)$$

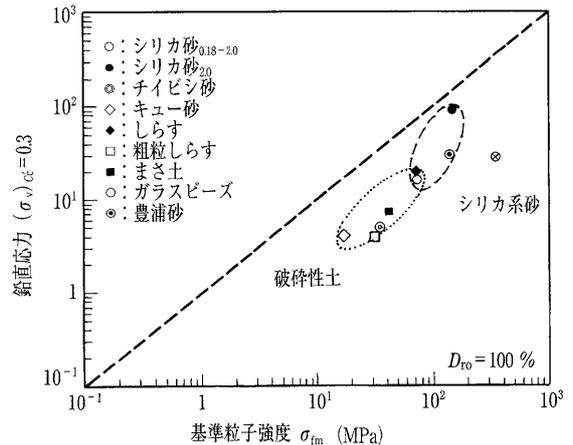
ここで、 $P_s(d)$ はある粒子強度 $\sigma$ の時の直径 $d$ の粒子が破碎しない確率、 $\sigma_0$ は基準粒子強度、 $m$ はWeibull係数である。基準粒径 $d_0$ の粒子が粒子強度 $\sigma = \sigma_0$ となることを考えると、 $P_s$ の値は $\exp(-1)$ 、約0.37となる。つまり破碎しない確率が37%の時の粒子強度を基準粒子強度としている。Weibull係数 $m$ は粒子強度の均一性を示すパラメータであり、 $m$ が大きいものほど基準粒子強度付近で破碎する粒子が多いことを表す。また、図—5.2の傾きは $-3/m$ となる。一般に地盤工学で取り扱う材料は、製品化されたガラスビーズとは異なり粒子径や鉱物など多種多様であるため、その粒子強度は大きくばらつく。このばらつきの程度も粒子強度特性として加味することが必要となる<sup>3),4),7),15)</sup>。

5.2.3 粒子強度と一次元圧縮特性

砂のような粒状体の一次元圧縮特性に関する研究は、支持力問題や地盤沈下の問題と直結し、Terzaghi(テルツァーギ) and Peck(ペック)<sup>16)</sup>に始まり、これまでに多くの研究者(例えば<sup>3),7),15)</sup>によって行われてきた。



図—5.2 破碎強度の粒径依存性<sup>2)</sup>



図—5.3 粒子強度と降伏応力

その特徴的な成果として、 $e$ - $\log p'$ 曲線上に現れる変曲点(粘性土の場合では圧密降伏応力)は粒子の破碎に依ることや、その応力域は初期の間隙比に依存することなどが挙げられる。図—5.3は、一次元圧縮試験における圧縮指数0.3となる時の鉛直応力とその試料の平均粒径における粒子強度 $\sigma_f$ との関係を示している<sup>7),17)</sup>。なお、初期の相対密度はいずれも100%である。圧縮性の高い破碎性材料の結果は、石英質の砂やGlassの結果に比べ、粒子強度も低く、圧縮降伏応力も低くなっていることが示されている。また、全体的に右上がりの傾向がうかがえ、圧縮降伏応力が平均粒径の粒子強度に関係づけられる。

5.3 粒子強度と土の挙動

5.3.1 静的挙動に与える影響

粒子強度の違いが土の挙動に与える影響を調べるために、高圧試験を用いた検討がなされてきた(例えば17)~20))。高い圧力レベルでは、粒子破碎を伴うために、応力ひずみ関係、体積変化や強度特性に影響を与える。このため、高い圧力レベルでの土の挙動を低圧での結果から外挿することは難しい。その上、粒状材料は相対密度の影響をうける。低い拘束圧では緩い砂は収縮挙動を、密な砂は膨張挙動を示す。しかし、密な砂の膨張挙動は拘束圧の増加とともに減少し、収縮挙動を示す。この膨張から収縮挙動へ変化する拘束圧は初期相対密度に依存する。図—5.4は、三軸圧縮試験における破壊時の平均

講座

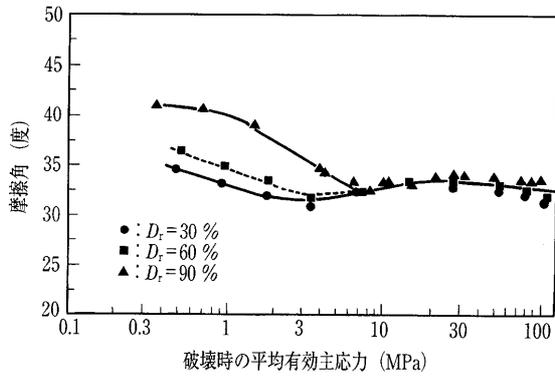


図-5.4 高压レベルまでの破壊時の強度特性に与える相対密度の影響<sup>21)</sup>

有効主応力の増加に伴うせん断抵抗角の変化の様子を示している<sup>19)</sup>。低い圧力領域では、初期の相対密度が高いものほど、せん断抵抗角も高い値を示す。破壊時の平均主応力が高くなると、せん断抵抗角は徐々に減少し、およそ 7 MPa で相対密度の影響が認められなくなり、10 MPa あたりで 33° の値に達し、それ以降はさほどの値の変化を示さない。高压レベルでの三軸圧縮試験の結果は、数多くの研究者によって確認されているが（例えば 18)), 伸張試験の結果の比較についても示されている<sup>21)</sup>。

このようなせん断抵抗角の推定のための経験式が、相対密度、圧力レベルの影響が加味されて提案されている<sup>22)</sup>。提案式は、ダイレイタンスーにより限界状態時のせん断抵抗角を上回る増分に着目されている。ここでは、ある圧力レベル以上のせん断抵抗角は、限界状態時のせん断抵抗角と等しくなることを仮定している。提案された式は、以下に示すように拘束圧と相対密度の関数として表されている。

$$\Delta\phi = \phi_p - \phi_{crit} = A I_R$$

$$I_R = I_D(Q - \ln p') - 1 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $I_D$  は百分率表示されていない相対密度であり、 $A$  は試験条件等によって異なる定数である。また、 $Q$  はダイレイタンスーを抑制するために必要となる平均有効主応力に関係づけられる材料定数である。つまり、上式中の  $Q$  の値が粒子破砕強度の低下とともに減少することになる。例えば、石英および長石からなる砂の場合、10 程度、石灰岩の場合で 8、石炭で 7、チョークで 5 となることを指摘している<sup>22)</sup>。また、豊浦砂では 10.2、カーボネイト砂で 9 となることも明らかにされている<sup>15)</sup>。

図-5.5 は、基準破砕強度で正規化した平均主応力を用いて、ダイレイタンスーによる強度増加分を評価したものである<sup>3)</sup>。2 種類の砂を同じ初期相対密度で供試体としている。また、各試料で 2 種類の粒度分布が用意され、2 種類の粒径は約 10 倍の違いがある。この図から、せん断抵抗角のダイレイタンスー成分は正規化平均有効主応力の対数との間において線形関係を有していることがわかる。つまり、粒子の破砕強度が砂質土のダイレイタンスーによる強度特性を支配している一つの要因であ

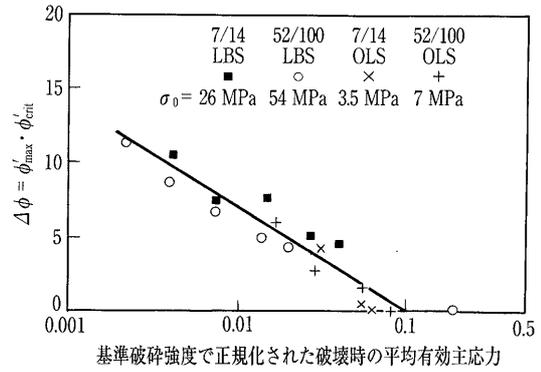
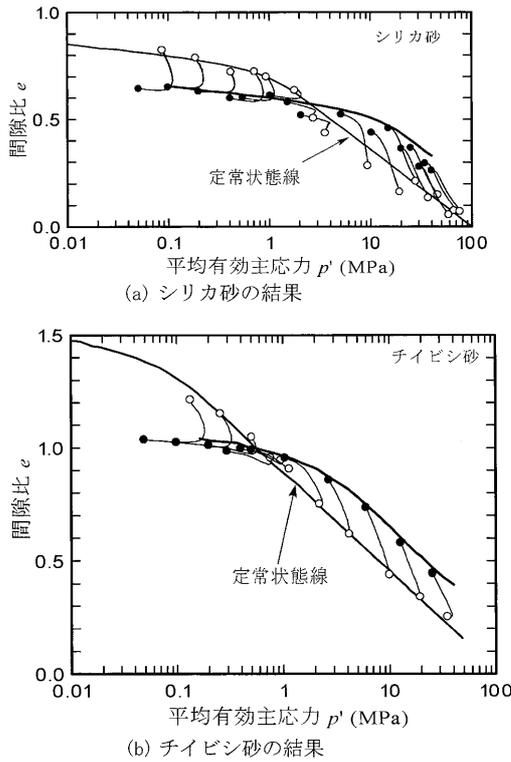


図-5.5 三軸圧縮試験における破壊時の内部摩擦角と粒子強度によって正規化された平均有効主応力の関係<sup>2)</sup>

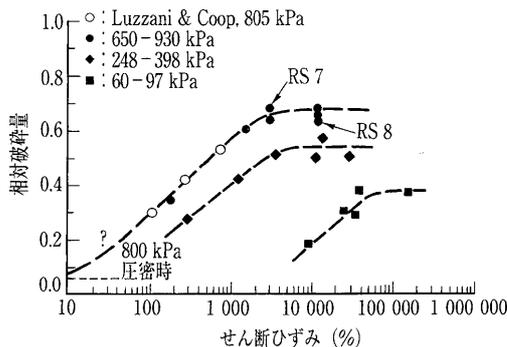
ることを示している。

せん断中の体積変化については古くから考察がなされている。Casagrande (キャサグランデ)<sup>24)</sup> は鉛直拘束圧一定の一面せん断試験から、密な砂はせん断中に膨張し密度が低下すること、緩い砂は体積の圧縮により密度が増加することを示し、最終的に初期密度にかかわらず同一の密度に収束することを報告している。そして、これを限界間隙比と称した。その後の研究（例えば 25), 26)) により限界間隙比は応力の関数となり、間隙比～応力平面において限界状態線の存在が確かめられた。図-5.6 は、等方圧縮試験から得られた  $e - \log p'$  曲線とともに排水せん断中の間隙比の変化を示したものである<sup>27)</sup>。図 (a) はシリカ砂、図 (b) はチイビシ砂の結果である。図中には排水せん断試験の開始時を●印、せん断終了時を○印で示す。いずれの試料も、低圧域におけるせん断中の間隙比  $e$  の変化は増加傾向を示すが、シリカ砂は 2 MPa、チイビシ砂は 200 kPa を超える応力域では減少傾向を示す。シリカ砂の粒子強度がチイビシ砂のそれより高いことから、せん断中の体積挙動の変化は粒子の強さに大きく依存する。

このように、粒状体の高压レベルに及ぶ力学挙動が、限界状態土質力学に適用できるという考えで、実験結果に対する考察が進められている。その一方で、適用性の限界について論じられた検討もある。これは、リングせん断試験を用いた実験的検討によるもので、せん断中の体積変化と粒子破砕の間の関係を明らかにするために行われた<sup>28), 29)</sup>。図-5.7 は、リングせん断供試体中央部の相対破砕量とせん断ひずみの関係である<sup>29)</sup>。ここでの破砕量はリングの割れ目の ±2.5 mm の範囲にある土粒子に対して実施された粒度について示している。これから、大きなひずみレベルでは相対破砕量の値は定常化している。このときの破砕量は、加えた圧力が高いものほど大きくなる。また、定常化までに必要なひずみレベルは、拘束圧の増加とともに急激に減少する。これらの検討から、最終的に、非常に大きな変位に達したところで、土は安定な粒度に達すること、粒子破砕中は体積収縮を引き起こすこと、この体積収縮は安定粒度に達したときに停止することを見出している。これらの結果は、三軸



図—5.6 粒子強度の違いが、圧縮曲線や限界状態線に与える影響<sup>27)</sup>



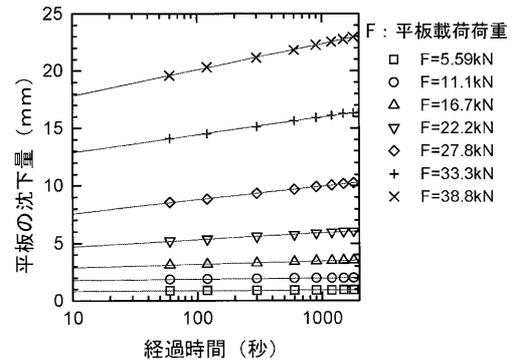
図—5.7 リングせん断供試体中央部の粒子破砕量とせん断ひずみの関係<sup>29)</sup>

試験などのような室内試験，つまりひずみ領域が数十%の辺りでは厳密には限界状態を定義できないことを示している。しかし，このような粒子にかなりの破砕が生じ，体積収縮が起きたとしても，土の動員されるせん断抵抗角に顕著な変化は認められていない。

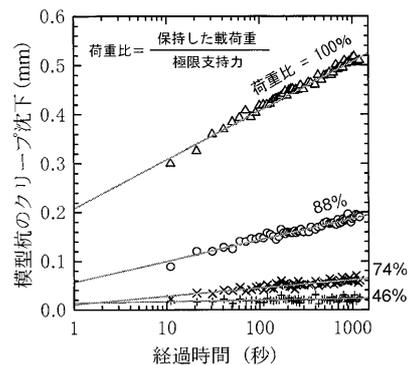
### 5.3.2 時間依存挙動に与える影響

地盤内において起こる粒子破砕とそれに伴う現象（粒子破砕に続く粒子（破片）の再配列および粒子間接触力の再配分）は，進行性（時間依存性）の現象である。このことは，1960年代から，何人かの研究者により指摘されている<sup>31),32)</sup>。近年，粒子破砕による時間依存挙動について，実際の沈下挙動の出方やその間の粒子破砕の進み方，さらには粒子強度などの粒子特性との関係について，実験的に調べられている。ここでは，それらの研究の概要を紹介する。

図—5.8は風化花崗岩地盤における平板載荷試験結果<sup>33)</sup>を再整理<sup>34)</sup>し，試験の各荷重保持期間中における



図—5.8 風化花崗岩地盤で行われた平板載荷試験の各荷重段階における平板の沈下と経過時間の関係<sup>34)</sup>



図—5.9 遠心模型実験による模型杭のクリープ沈下状況<sup>35)</sup>

平板の沈下の進行状況を示したものである。平板の沈下は，経過時間の対数に比例して進行しており，その勾配も荷重が大きいほど大きくなっている。当該地盤は地下水位が非常に深く，圧密の影響は排除できる。試験後に平板直下から採取した試料を偏向顕微鏡で観察したところ，顕著な粒子破砕が観察された<sup>33)</sup>。以上のことから，対数時間に比例した沈下の主原因が平板直下の地盤における粒子破砕の進行であると言える。この平板載荷試験は，風化度の異なる地盤においても行われており<sup>33)</sup>，より風化の進んだ地盤ほど，平板沈下量～経過時間曲線の勾配が大きいことも確認された<sup>34)</sup>。

遠心載荷試験により，砂地盤に設置した模型杭のクリープ沈下量の測定が行われている<sup>35)</sup>。この模型杭の沈下量の経時変化を図—5.9に示している。図中の荷重比は，模型杭の極限支持力に対する保持した荷重の比率である。荷重比が大きいほど，クリープ沈下の勾配も大きいことがわかる。この試験においても模型杭直下地盤における粒度分布の変化が調べられ，試験後には試験前よりも細粒分が増加していることが確認された。また，別途，試験に用いた砂の一次元圧縮試験が行われ，荷重保持中の沈下の進行と，それに伴う粒子破砕の状況も観察されている。試験前後の試料の観察から，粒子表面の突起部分が砕かれるような破砕が生じていることが確認された。

荷重保持中に粒子破砕がどのように進行するのかを観察するために，円柱形のチョーク棒または石筆棒約100

## 講座

本を二次元的に積層した模型供試体の一次元圧縮試験が行われ、荷重保持中の粒子破碎の進行の様子が観察されている<sup>36)</sup>。このような特異な供試体でも、 $e$ - $\log p$  曲線は、粘土と同様な形状を示し、また試験の再現性も確認できたことから、この模型実験により地盤の挙動を再現できているという判断の下、観察が行われた。

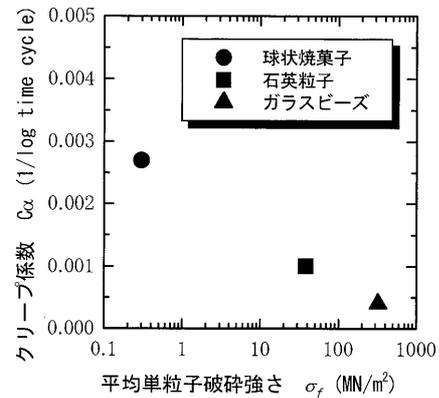
荷重保持中における破碎粒子の増加および破碎粒子の変化の状況を口絵写真—32に示す。時間の経過に伴い破碎粒子が増加していくこと、および破碎した個々の粒子は、時間の経過に伴い亀裂の入った粒子の接触点付近から局所的に崩れていく様子が観察される。以上のことから、粒子破碎による時間依存挙動の進行メカニズムとして、ある粒子が破碎すると、その接触部の局所的な破碎が進行し、それにより粒子が再配列し、粒子間の接触力が再配分され、新たな破碎が生じる、という連鎖的挙動が起こっていることが検証された<sup>36)</sup>。

各種の粒子の単粒子破碎強度を把握した上で、その粒子をパッキングした供試体の一次元圧縮試験が行われている<sup>36),37)</sup>。それらの一次元圧縮試験では、各荷重段階で1~2日程度の荷重保持時間を取り、その間の供試体の圧縮ひずみを測定している。いずれの試験でも対数時間におおむね比例した圧縮ひずみの増加が認められた。その最も支配的な傾きをクリープ係数  $C_\alpha$  とし、これと供試体を構成する粒子の平均単粒子破碎強度の関係を図—5.10に示す。両者の間には、強い相関の存在する可能性が認められ、一次元圧縮を受ける粒状材料の時間依存挙動において、粒子強度を考慮することの重要性が伺われる。

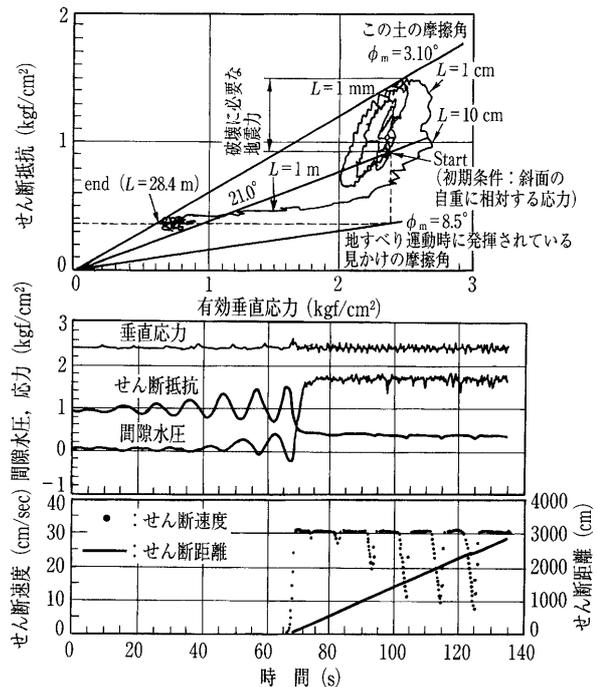
## 5.3.3 繰返し挙動に与える影響

粒子強度が繰返し挙動に与える影響に関する研究は、交通、波浪、地震など対象となる外力に対し行われてきた。交通関連分野では、第2章に示されたように鉄道バラスト材等に対し、粒子強度だけではなく、粒子径、粒度分布、粒子形状などが粒子の摩耗・破碎に影響を及ぼし、その集合体である盛土などの土構造物の変形特性に与える影響を検討する事例が多い(例えば38), 39), 40))。一方、地震力による繰返し挙動に関する研究では、1960年代以降、砂の液状化特性を中心に発展してきた。1970年代に、粒子強度の低いまさ土を対象に繰返し挙動について検討<sup>19)</sup>しており、粒子破碎が繰返し挙動に及ぼす影響について警鐘を鳴らしている。1990年代の北海道で発生した地震や阪神・淡路大震災による火山灰粗粒土やまさ土での被害を契機に、粒子特性が繰返しせん断特性に及ぼす影響を検討する研究が活発になってきた。図—5.11は繰返しリングせん断試験結果<sup>41)</sup>を示している。阪神・淡路大震災でのまさ土斜面の高速地すべりは、せん断面上におけるまさ土粒子の破碎により、体積収縮が生じ、過剰間隙水圧が発生しせん断応力が低下したためであると指摘されている。

繰返し三軸試験での液状化特性に及ぼす粒子強度の影響は、図—5.12のように示される。つまり、粒子強度が大きい豊浦砂では、低拘束圧で液状化強度に変化は認め



図—5.10 供試体のクリープ係数と単粒子破碎強度の関係

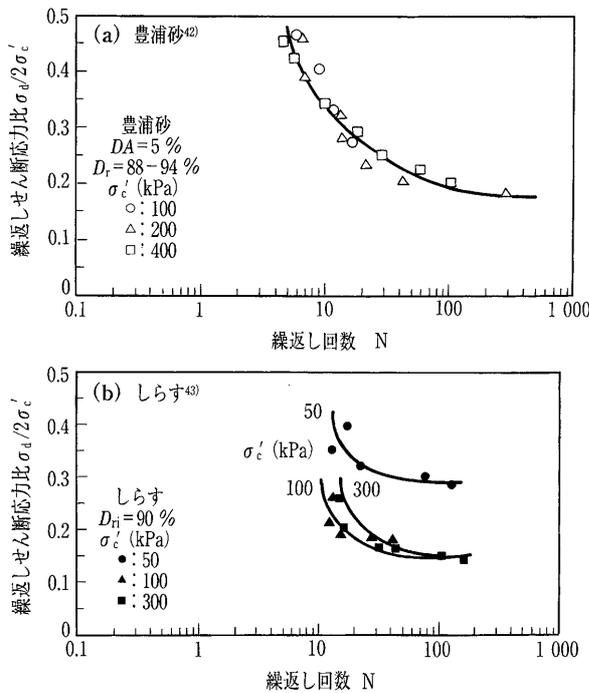


図—5.11 繰返しリングせん断<sup>41)</sup>

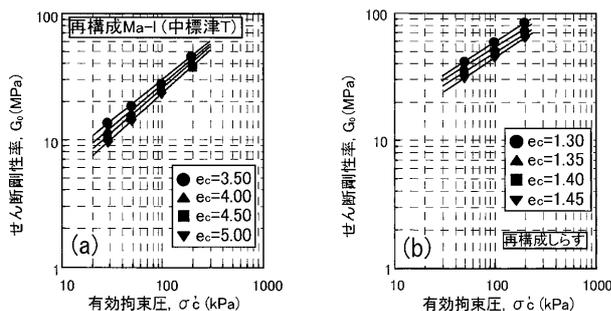
られない<sup>42),43)</sup>。しかし、粒子強度の弱いしらすでは、拘束圧の増加に伴い液状化強度が低下している<sup>43),44)</sup>。これは、粒子破碎によるものと結論づけられ、常圧域において容易に起こりえる現象として考察<sup>44)</sup>されている。このような傾向は、一般に圧縮性に富んだ材料、すなわち粒子強度の低い火山灰質粗粒土、まさ土、カーボネイト砂などでも示されている<sup>43),46),47)</sup>。また、豊浦砂のようなシリカ系砂の繰返し挙動においても、粒子破碎を伴うような高拘束圧域で、同様な傾向を示すとの報告<sup>45)</sup>もある。

動的変形特性については、図—5.13に示すように、せん断剛性率  $G = A \cdot e_c \cdot b \cdot (\sigma'_c)^n$  の関数式において、拘束圧の指数  $n$  は、粒子破碎を起こしやすい材料が最も小さくなると結論付けられている<sup>47)</sup>。

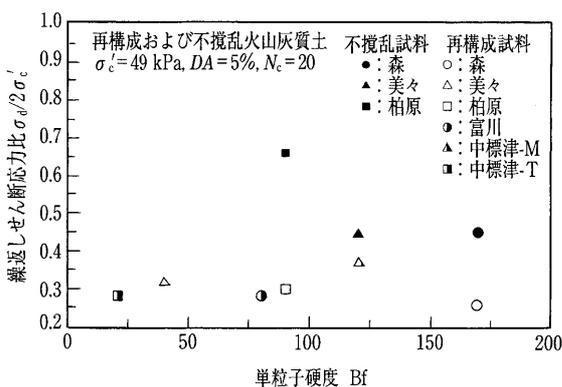
図—5.14は、単粒子破碎試験による最大荷重  $P_{max}$  を等価粒径(載荷点距離)  $D_2$  で除した値を硬度指標  $B_f$  とし、 $DA = 5\%$ 時の繰返し回数20回時の繰返しせん断応力比  $\sigma_d / 2\sigma_c$  との関係をもとめている。拘束圧  $\sigma'_c$  は、いずれも50 kPaであり、試料は北海道での噴火起源の異



図—5.12 粒子強度の違いが繰返しせん断強度に与える影響



図—5.13 粒子強度の違いが繰返しせん断剛性に与える影響<sup>47)</sup>



図—5.14 単粒子硬度と繰返しせん断強度の関係<sup>12)</sup>

なる数種類の火山灰質粗粒土を用いて行っている。液化強度は粒子硬度の影響よりも、圧密履歴や堆積時に形成される構造異方性の影響を大きく受けるようである<sup>12)</sup>。しかし、このような粒子強度と液化化特性に関する研究事例は静的に比べ少なく、今後の結果の蓄積が望まれるところである。

## 5.4 粒子強度のモデル化と挙動

### 5.4.1 粒子モデル

粒状体の破碎を実験的に研究する場合、常に、何らかの制限をうける。これは、粒子破碎を起こすために必要な高い圧力の载荷を有する装置が必要であること、たとえ装置があった場合でも、境界に不連続面や摩擦面を持つことを避けることは出来ないこと、また、視覚的に観察出来ないことなどによる。このために、DEM解析<sup>48)</sup>を用いた数値シミュレーションの導入が検討されている。これまでに、粒子破碎を表現することを目的として二つの手法が提案されている。

一番目の方法は、1粒子を複数の小さな要素を結合することで表し、シミュレーション中に完全あるいは部分的に分裂することを表現できるものである。口絵写真—33は、典型的な研究例<sup>49)</sup>を示している。1粒子中の要素数を増加させることで任意の形状の粒子を再現できるという点で都合よいが、その分計算時間が延びる。また、DEM要素の分裂(破碎)の条件もさまざまである。示した研究例の場合、各DEM要素間に結合力が存在し、それ以上のせん断力あるいは引張力が作用した要素間では結合力が消失し、この結合力消失の連鎖として破碎を表現するものである。その他には、クラスター(DEM要素の集合体)に作用したすべりエネルギーの累積がある値を超えたときに、破碎が生じるという規準を適用しているもの<sup>50)</sup>もある。

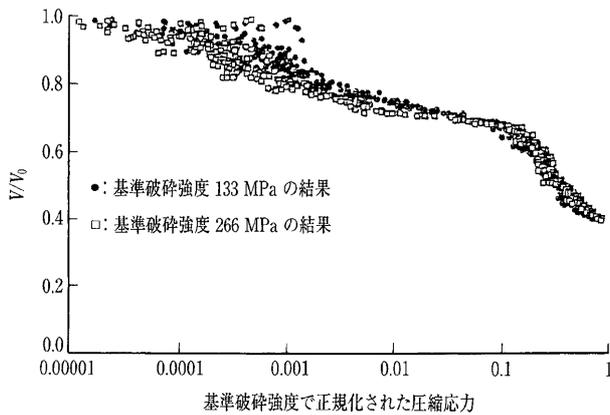
二番目の方法は、ある破碎規準を満足した場合に、その粒子をより小さな粒子の集合に置換するものである。これには、二次元のDEM解析において、接点数が2あるいは3の粒子について、その粒子に作用する引張応力がある値に達したときに破碎が生じるとしたもの<sup>51)</sup>がある。この手法を用いて、直接せん断試験のシミュレーションが実施され、せん断中の破碎や再配列の様子がせん断応力とせん断変位に関係付けて紹介されている<sup>52)</sup>。

### 5.4.2 モデル粒子の巨視的挙動

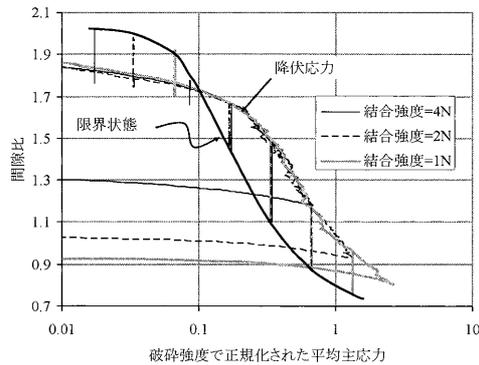
図—5.15は、一番目の方法で表現した粒子の集合体(口絵写真—34)から得られた一次元圧縮挙動<sup>53)</sup>を示している。図は、体積ひずみと鉛直応力を先述した基準粒子強度で正規化したものである。図に示す2種類の結果は粒子間の結合力が2倍異なるもので、基準粒子強度も2倍の違いがある。二つの圧縮曲線はほぼ同一であり、降伏応力は、基準粒子強度の14から17%となっている。この値は、粒子形状によって異なり、より丸い粒子となるほど、また滑らかな粒子表面であるほど、小さな値となることが実験結果から示されている<sup>15)</sup>。

図—5.16は、一番目の方法で表現した粒子の集合体から得られた、等方圧縮および三軸圧縮挙動<sup>54)</sup>を示している。図は、3種類のモデル供試体に対して行った結果で、粒子間の結合力の異なるものについて示している。また、図の横軸は、基準粒子強度で正規化された平均主応力  $p/\sigma_0$  である。 $p/\sigma_0 \approx 0.1$ までの間隙比の変化は比較

## 講座



図—5.15 数値シミュレーションによる破砕性粒状体の一次元圧縮挙動<sup>53)</sup>



図—5.16 数値シミュレーションによる破砕性粒状体の等方圧縮および三軸圧縮挙動<sup>54)</sup>

的の小さく、 $p/\sigma_0 \approx 0.2$ を超えたあたりでこの曲線の最大曲率（降伏点）を迎える。その後、おおむね $\lambda = 0.45$ の直線となり、いわゆる正規圧縮線を示している。三軸試験終了時（軸ひずみで30%）の状態を表された限界状態線は、正規圧密線から対数軸で約1/3移動した所に位置している。結合強度の異なる3種類の粒子（ただし結合強度と接点剛性の比は一定）の結果をして示しているが、 $p/\sigma_0$ で示すことにより一義的な関係が得られている。さらに、三軸圧縮試験における $\phi = \sin^{-1}[(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)]$ と $p/\sigma_0$ との関係についても検討され、図—5.5と同様、一義的な関係が得られることも示されている<sup>54)</sup>。このように、基準粒子強度 $\sigma_0$ は、粒状材料の拘束圧依存性を議論する上で意義のあるパラメータであることが明確となっている。

#### 5.4.3 モデル粒子の工学的適用

本節で示したような破砕を表すことが出来る粒子を用いて、いくつかの工学的な適用先を見据えて検討が進められている。

一つは、粒状材料と異種固体との相互作用の検討<sup>50)</sup>である。粒状体と固体表面との相互作用は大きく二つに分類される因子に影響を受けている。一つは、粒子のサイズ、形、相対的な粒子の変位、回転、あるいは割れや破砕のような粒子の損傷のような、粒子特性やマイクロメカニクスに依存するものが挙げられる。もう一方は、境界面の状況、つまり、せん断表面の粗度、応力レベル、

変形履歴に関連するものが含まれる。ここで示したようなモデルを用いて、粒状体と固体表面との相互作用における粒子の損傷の把握のために、粒子の損傷をクラスター（DEM要素の集合体）に作用したすべりエネルギーの累積と関連付けようとしている<sup>50)</sup>。

二つ目は、断層内の粒子の粒度分布の検討である。断層は、破砕岩片の集合した粒状体の帯として構成される。これは、断層間に作用するせん断をうけ破砕したことによる。これまでの研究で、断層内の材料の粒度がフラクタル分布となるように進展することが明らかにされている。この分布に至るまでの過程をひずみと関係付ける<sup>51),52),55)</sup>ために、DEMモデルの利用は有効である。この粒子破砕による粒度分布の変化は、直接、土の透水性に影響を与える。このため、断層内において粒子破砕が広い領域で起こるのか、局所的に起こるのかの理解は、地下資源の採掘の効率<sup>55)</sup>などを検討する上で重要であり、この種のモデルの利用が検討されている。

三つめは、地盤の支持力発現メカニズムと粒子強度の関係についての検討<sup>56)</sup>である。地盤の支持力特性は、一般に基礎の深さや、地盤の密度あるいは強度によって、発現メカニズムが異なることが知られている。例えば、浅い基礎の場合では、全般せん断破壊、局所せん断破壊、パンチ破壊に分類される。このDEM破砕モデルを利用することで、支持力発現メカニズムにおける粒子強度の影響が検討され、粒子強度によって異なる支持力発現メカニズムが現れることが示されている。

## 5.5 おわりに

本章では、粒子強度に関する現状について、研究例を紹介しながら概観した。特に、粒子破砕を伴うような環境では粒子強度の理解が材料特性の把握や推定に役立つことや、これに関連した工学的事例が存在することを示した。

### 参考文献

- 1) 八嶋三郎：ケミカルエンジニアリング・シリーズ10、培風館、pp. 54~149. (1986)
- 2) Lee D. M.: The angle friction of granular fills, Ph.D. dissertation, University of Cambridge. 1992.
- 3) McDowell, G.R. & Bolton, M. D.. On the micromechanics of crushable aggregates. *Géotechnique* 48, No. 5, pp. 667~679.
- 4) Nakata, Y., Hyde, A. F. L., Hyodo, M. and Murata, H.: A probabilistic approach to sand crushing in the triaxial test, *Géotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 567~583, 1999.
- 5) Yasufuku, N. and Kwag, J. M., Significance of soil particle fragmentation strength related to soil crushability, *Proceedings of 11 Asian Regional Conference on SMGE*, pp. 149~152, 1999.
- 6) 加登文学・中田幸男・兵動正幸・村田秀一：地盤材料の単粒子特性、*土木学会論文集*, No. 673/III-54, pp. 189~194, 2001.
- 7) 加登文学・中田幸男・兵動正幸・村田秀一：破砕性材料の粒子特性と一次元圧縮特性、*土木学会論文集*, No. 701/III-58, pp. 343~355, 2002.
- 8) 荒牧憲隆・兵動正幸・岡林 巧：しらすの単粒子破砕と液状化特性、*地盤工学会・火山灰地盤の工学的性質の評*

- 備法に関するシンポジウム論文集, pp. 103~108, 2002.
- 9) 山口梅太郎・西松裕一: 岩石力学入門, 東京大学出版会, pp. 153~159, 1971.
  - 10) Hobbs, D. W.: A simple method for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Mining. Sci.*, Vol. 25, pp. 297~301, 1963.
  - 11) 福本武明・原 健夫: 粒状体の粒子破砕強度分布に関する研究, 土木学会論文集, No. 596/Ⅲ-43, pp. 91~99, 1998.
  - 12) 八木一善・菅場信弘・三浦清一: 火山灰性粗粒土の粒子硬度と破砕特性の相関, 地盤工学会北海道支部技術報告書, Vol. 39, pp. 153~162, 1999.
  - 13) 平松良男・岡 行俊・木山英朗: 非成形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, Vol. 81, No. 932, pp. 1024~1030, 1965.
  - 14) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Appl. Mech.*, Vol. 18, pp. 293~297, 1951.
  - 15) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo M., Hyde, A. F. L. & Murata, H.: One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength. *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 2, pp. 39~51, 2001.
  - 16) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: *Soil mechanics in engineering practices*, John Wiley and Sons, New York, pp. 65~67, 1948.
  - 17) 三浦哲彦・山内豊聡: 高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について, 土木学会論文集, 第203号, pp. 45~52, 1972.
  - 18) 三浦哲彦・山内豊聡: 砂のせん断特性におよぼす粒子破砕の影響, 土木学会論文報告集, No. 260, pp. 109~118, 1977.
  - 19) Miura, N. and O-hara, S.: Particle-crushing of a decomposed granite soil under shear stress, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, pp. 1~14, 1979.
  - 20) Kitamura, R. and Haruyama, M.: Compression and shear deformation of soil under wide-ranging confining pressure, *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM special technical publication 977, ASTM, pp. 501~511, 1988.
  - 21) Lade, P. V. and Bopp, P. A.: "Relative density effects on drained sand behavior at high pressures, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No.1, pp. 1~13, 2005.
  - 22) Bolton, M. D.: The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique* 36, No. 1, pp. 65~78, 1986.
  - 23) Kwag, J. M., Ochiai, H. and Yasufuku, N., Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength, *Proceeding of International conference on Engineering for Calcareous Sediments*, pp. 79~85, 1999.
  - 24) Casagrande, A.: Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*, pp. 257~276, 1940.
  - 25) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: On yielding of soils, *Géotechnique*, Vol. 8, No. 1, pp. 25~53, 1958.
  - 26) Been, K. and Jefferies, M. G.: A state parameter for sands, *Géotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 99~112, 1985.
  - 27) Kato, Y., Nakata, Y., Hyodo, M. and Murata, H.: Effect of particle characteristics on drained shear properties of sand, *Proceeding of International symposium on deformation characteristics of geomaterials*, pp. 707~713, 2003.
  - 28) Luzzani, L. and Coop, M. R.: On the relationship between particle breakage and the critical state of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 2, pp. 71~82, 2002.
  - 29) Coop, M. R., Sorensen K. K., Bodas Freitas, T. and Georgoutsos, G., Particle breakage during shearing of a carbonate sand, *Géotechnique*, Vol. 54, No. 3, pp. 157~163, 2004.
  - 30) Jensen, R. P., Plesha, M. E., Edil, T. B. and Bosscher, P. J., DEM simulation of particle damage in granular media-structure interfaces, *The international journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 1, pp. 21~39, 2001.
  - 31) Terzaghi, K., Discussion on Salt Springs and Lower Bear River dams. *Trans. ASCE* 125, pt 2, pp. 139~148, 1960.
  - 32) Lee, K. L. and Farhoomand, I., Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 68~86, 1967.
  - 33) 服部隆行・北川隆司・瀬戸一法・低引博隆・日下部治: 風化した広島型花崗岩での一原位置試験, 土木学会論文集, No. 589/Ⅲ-42, pp. 359~368, 1998.
  - 34) 武井正孝・米今智信・Galer Mircea Mihai・日下部治: 粒子破砕による地盤材料の時間依存挙動について, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 58, pp. 37~56, 1998.
  - 35) Leung, C. F., Lee, F. H. and Yet N. S., The role of particle breakage in pile creep in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 888~898, 1996.
  - 36) Takei, M., Kusakabe, O. and Hayashi, T.: Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests. *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 1, pp. 97~121, 2001.
  - 37) 松原寛之・落合英俊・安福規之・大嶺 聖・中島通夫: 破砕性粒状材料における一次元圧縮挙動とその時間依存性, 土木学会第56回年次学術講演会, Ⅲ-A016, pp. 32~33, 2001.
  - 38) Ishikawa, T., Kobayashi, K., Sekine, E. and Ohnishi, Y.: Effect evaluation of particle shape on mechanical behavior of railroad ballast with discontinuous analysis, *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media 2006*, pp. 389~395, 2006.
  - 39) Indraratna, B. and Lackenby, J.: Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading, *Géotechnique*, pp. 325~328, 2005.
  - 40) McDowell, G. R., Lim, W. L., Collop, A. C., Thom, N. H. and Armitage, R.: Laboratory simulation of train loading and tamping on ballast, *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.*, Vol. 158, No. TR2, pp. 89~95, 2005.
  - 41) 佐々恭二: 西宮市仁川で発生した地震時高速地すべり, 土と基礎, Vol. 44, No. 2, pp. 83~85, 1996.
  - 42) 柚木祐二・石原研而・関 元治・米田吉博: 密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp. 1649~1652, 1982.
  - 43) Hyodo, M., A. F. L. Hyde and Aramaki, N., Liquefaction of crushable soils, *Géotechnique*, 48, No. 3, pp. 1~17, 1998.
  - 44) 岡林 巧・兵動正幸・安福規之・村田秀一: 乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動, 土木学会論文集, No. 499/Ⅲ-28, pp. 97~106, 1994.
  - 45) Hyodo, M., Aramaki, N., Nakata, Y. and Hyde, A. F. L.: Undrained monotonic and cyclic shear behaviour of sand under low and high confining stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 3, pp. 63~76, 2002.
  - 46) 三浦清一・八木一善・川村志麻: 北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破砕. 土木学会論文集, No. 547/Ⅲ-36, pp. 159~170, 1996.
  - 47) 三浦清一・八木一善・川村志麻: 破砕性粗粒火山土の非排水繰返し変形特性-強度特性に及ぼす応力履歴の影響. 土木学会論文集, No. 547/Ⅲ-36, pp. 221~229, 1996.
  - 48) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47~65, 1979.

## 講座

- 49) Cheng, Y. P., Nakata, Y. and Bolton, M. D.: Distinct element simulation of crushable soil. *Géotechnique* 53, No. 7, pp. 633~641., 2003.
- 50) Jensen, P. R., Plesha, M. E., Edil, T. B. Bosscher P. J. and Kahla, N. B.: Dem simulation of particle damage in granular media-structure interface, *International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 1, pp. 21~39, 2000.
- 51) Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L. E.: Modeling granular crushing in ring shear tests: experimental and numerical analyses, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 2, pp. 147~157, 2006.
- 52) Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L. E.: Crushing a weak granular materials: experimental numerical analyses, *Géotechnique*, Vol. 55, No. 3, pp. 245~249, 2005.
- 53) McDowell, G. R. & Harireche, O., Discrete element modelling of yielding and normal compression of sand. Technical note, *Géotechnique* 52, No. 2, pp. 131~135., 2002.
- 54) Nakata, Y., Cheng, Y. P. & Bolton, M. D.: Relating particle characteristics to macro behaviour of DEM crushable material. *Powders and Grains 2005*, pp. 1387~1391, 2005.
- 55) Marketos, G. and Bolton, M. D.: A statistical investigation of particle crushing of sand, *Proc. of Int. Sym. on Geomechanics and Geotechnics of Particulate media*, pp. 247~252, 2006.
- 56) Nakata, Y., Hyodo, M. and Murata, H.: DEM loading simulation of a crushable grain sediment, *Proc. of Int. Sym. on Geomechanics and Geotechnics of Particulate media*, pp. 261~266, 2006.