

## 破砕性材料の力学特性—現状と展望—

## Mechanical Properties on Crushable Geomaterials

村田秀一 Hidekazu MURATA (山口大学工学部)



近年、地盤材料の破砕性に着目する研究が脚光を浴びつつある。本論文は、このような現状を鑑み、破砕性材料の力学特性にかかわりのある研究、主として粒子破砕に関するこれまでの山口大学のグループの研究を概観するとともに、破砕性材料の工学的な問題点として取り上げられる研究に対する現状と今後の展開について触れるものである。粒子破砕の研究について、力学特性に与える粒子破砕の影響に着目する研究、弾塑性挙動に着目した検討と数値モデルの開発、繰返し挙動に関連する実験的検討、単粒子の破砕挙動に着目した微視的特性を把握する試みがなされている。これらを踏まえた今後の研究の取り組みとして、個別要素法を用いた詳細な分析の有効性、礫材の力学挙動への試み、リサイクル材料としての人工造粒材の開発、地盤支持力特性についてなどが上げられる。

キーワード：粒子破砕，破砕性，力学特性，個別要素法，礫材，リサイクル材，支持力  
(IGC : D-5, D-6, D-7, E-4, E-13)

## 1. はじめに

破砕性地盤の工学的諸問題<sup>1)</sup>を検討する上で、破砕性材料と呼ばれる地盤材料の力学的な特性を把握しておくことが重要である。破砕性材料と呼ばれる材料には、しらす、スコリアなどの火山性堆積物、まさ土などの風化残積土、カーボネイト砂やサンゴ礫混じり土などの海洋堆積物などがあげられる。いずれの材料も、特異な粒子形状、粒子表面の脆さ、粒子自体の脆弱さなどの特徴を持ち合わせているために、破砕を受けやすいことが指摘されている。一方、フィルダムなど大型土構造物に使用される材料は、比較的堅固な材料であっても、載荷圧力が高いため粒子破砕を生じることが指摘されている。このように我々が取り扱っている地盤材料は、外力の大きさにも依るが、多かれ少なかれ粒子破砕を起こす材料であるともいえる。そのため、破砕のしやすさ、いわゆる破砕性をあらわす指標を設定し、その指標を遭遇する外力条件と比較することが、破砕性を工学的な問題に取り入れる上で重要となる。

工学的な問題を取り扱う上での粒子破砕の重要性は国際的にも認識されている。1999年国際地盤工学会の技術委員会にTC35が設立された。粒子の特性を十分に理解することや、その粒子集合体の巨視的挙動の特性を理解することの重要性は高い。しかし、粒子の特性もきわめて理想的な材料に対して行われる例が多く、工学的に利用されている地盤材料を対象とするものは以前限られているといえる。また、連続体力学として捉えるには難しいはずの境界値問題が多いにもかかわらず、これまで連続体として捉えることに重点がおかれていた。そのため、それを表現しようとする力学モデルは、きわめて高度で複雑なものになってきている。粒子の集合体である地盤を、あるがままに捉えることで、複雑な数学モデルに頼ることなく、物理的かつ現象的根拠に基づく材料定数の評価のみで十分対応できる可能

性もある。この委員会では、これらの問題の抽出とともに、粒子の特性が巨視的な特性をどのように支配しているかを理解しておくことが目標である。委員会のテーマとして

- ・ 粒子サイズ、形状、破砕強度などの粒子特性
- ・ 比表面積、構造、異方性などの粒子集合体としての特性
- ・ マイクロストラクチャーの可視化（載荷中の変化）
- ・ 透水性、波速度、圧縮性、塑性流動、強度などの要素試験データ
- ・ 物理的かつ統計的な視点からのマイクロとマクロパラメーターの関連性
- ・ DEMを用いたマイクロメカニクス的なシミュレーション
- ・ マイクロメカニクスに基づいた構成連続体モデルの開発（消散エネルギーや局所化）

が挙げられ、粒子の破砕現象は中心的な要素となっている。

ここでは、破砕性材料の力学特性にかかわりのある研究、主として粒子破砕に関するこれまでの山口大学のグループの研究を概観するとともに、今後の研究の方向性、工学的なかわりへの展開について触れたい。

## 2. これまでの研究

## 2.1 粒子破砕の影響の究明（1970年代）

砂の圧縮特性やせん断特性に与える粒子破砕の影響を実験的に明らかにする先駆的な研究として、国内外をとわず三浦らによる一連の研究を取り上げることができる。まず、図-1に示す

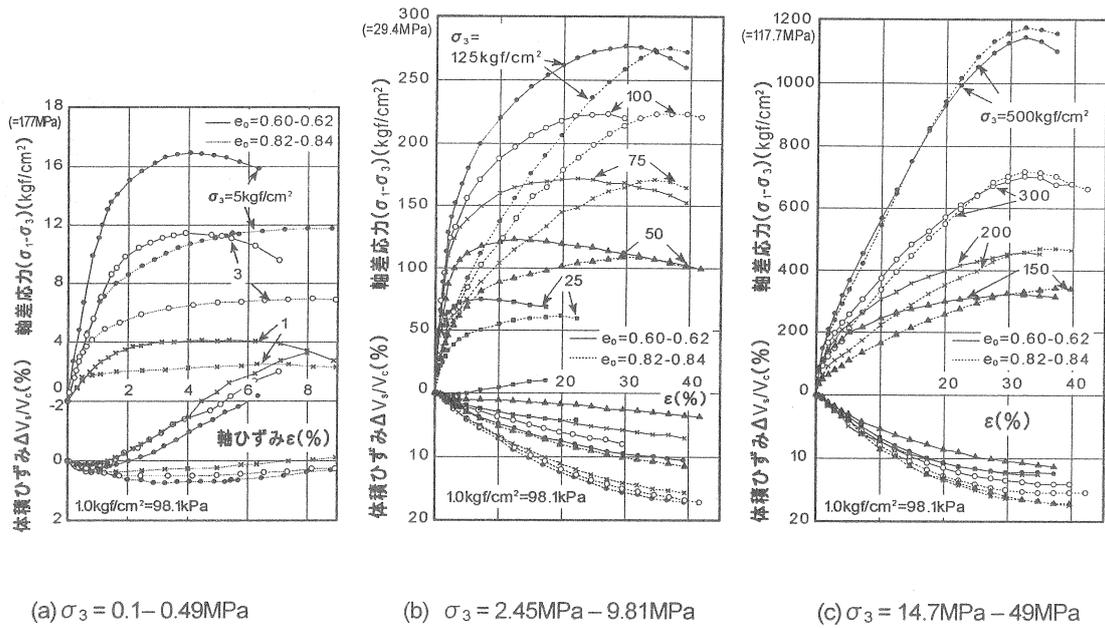


図-1 豊浦砂のせん断中の応力ひずみ挙動に与える拘束圧依存性<sup>2)</sup>

ような砂のせん断特性の拘束圧依存性、密度による拘束圧依存性の現れ方の違いを示している<sup>2)</sup>。密詰供試体では、体積膨張をしめす拘束圧域から体積収縮一方の挙動を示す拘束圧域があること、その供試体の最大軸差応力の値を含む応力ひずみ挙動は、拘束圧の増加に伴い緩詰のそれに次第に近づいていくということ、これらは粒子破碎によるものであること、密度によって粒子破碎の生じ方が異なっていること、などが指摘されている。また、砂の圧縮特性の時間依存性も明確に示されている。図-2 はある応力を超えると圧縮時間が数百時間に及ぶようになることを示している<sup>3)</sup>。また、図-3 には砂の間隙比と等方圧縮応力、いわゆる  $e-\log p$  曲線を示している。応力レベルこそ違うものの、粘土のそれと同程度の圧縮性が伺える。図中実線が飽和供試体に、破線が乾燥供試体に対するものである。図-2 に示したような時間依存性が間隙中の水によるところが大きいことを指摘できるとともに、圧縮量も大きく変化するということが理解される。また、圧縮降伏応力は 9.8MPa~19.6MPa であり、密詰、緩詰供試体のせん断時の応力ひずみ関係が類似となる応力域がそれに対応している。これは、圧縮、せん断といわず、包括的に土の力学特性を説明できる可能性を示唆している。これらの検討は、フィルダムや高盛土の沈下が長期間にわたることに対する解析、最終沈下量及び沈下に要する時間を予測するという実際的問題の解決のアプローチの一つにつながるといえる。

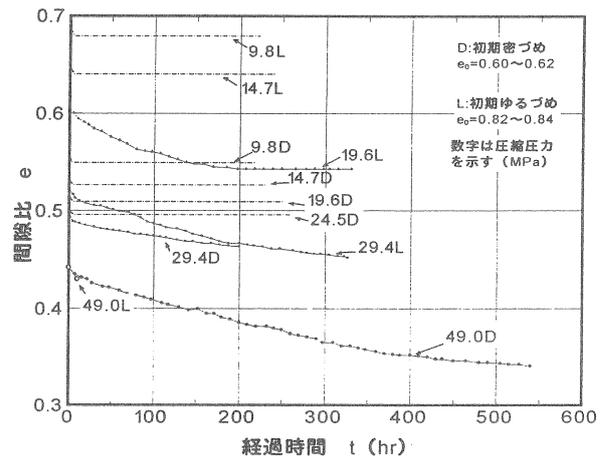


図-2 豊浦砂の等方圧縮量の時間依存性<sup>3)</sup>

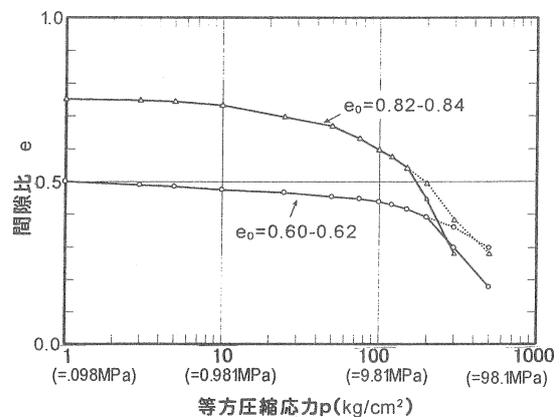


図-3 豊浦砂の間隙比と等方圧力の関係<sup>3)</sup>

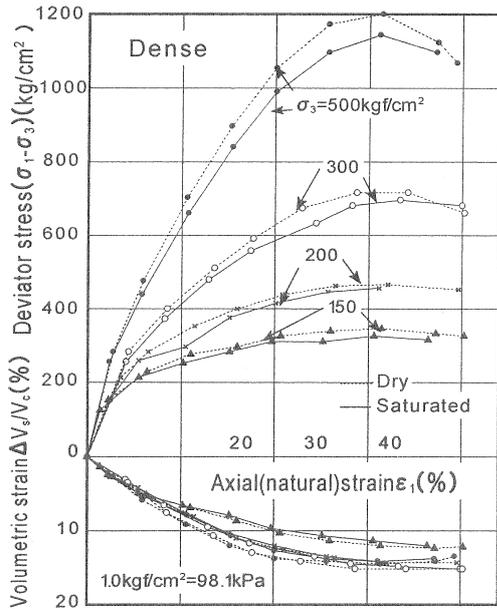


図-4 豊浦砂のせん断挙動に与える水の影響<sup>4)</sup>

高拘束圧下における挙動に与える水の影響に対する検討は、図4に示すような結果としてもまとめられている<sup>4)</sup>。土中の水分の存在は、粒子破砕の活性化を促し、その結果として圧縮性の増加とせん断強度の低下を引き起こす。これは、粒子内に存在するクラックを含む亀裂面の表面エネルギーの変化に関係付けられるであろうことが指摘されている。この検討は締固めに対して適正な土を定量的に評価する場合にも、サクシジョンの作用の効果とともに重要な因子に挙げるべきといえよう。

三浦の研究は、上述したような巨視的な挙動のみならず、粒子破砕量の数量化、およびそれと力学挙動との関連について検討している。その粒子破砕量の数量化は、試験前後の試料について一組のふるいを用いてふるい分け試験を行い、粒度分布曲線の変化についてなされるものが一般には用いられている。三浦らは、この方法の背景や物理的意味が不明確なものであることを指摘し、古典的粉砕理論の一つとして知られている Rittinger の法則などに取り入れられている表面積増加量と塑性エネルギーについて検討を加えている。図5 はせん断試験中の表面積増加量と塑性エネルギーに関する実験結果を示すものである<sup>5)</sup>。結果には等方圧縮下での表面積増加量と塑性エネルギー量も含まれており、等方圧縮およびせん断の両過程を通じて、表面積増加量が塑性エネルギーに密接に関係していることがわかる。このことは、等方圧縮過程とせん断過程のいずれの過程が粒子破砕を生じやすいかという議論が無意味であり、塑性仕事の大きさが粒子破砕量を支配していることを示している。また、図6 のように、主応力比やダイレタンシー比の拘束圧依存性が示されるとともに、両者の間に一義的な関係が存在することが示されている。加えて、ダイレタンシー比は、単位塑性エネルギー量

に対する表面積増加量、つまり図5 の傾きときわめて良い関係にあることも議論されている。

三浦の研究は、石英中心に構成された豊浦砂だけでなく、風化残積土の一つであるまさ土についても同様の検討を行っている<sup>5)</sup>。図7 のようにまさ土のせん断特性の拘束圧依存性を把握するとともに、表面積増加量・塑性エネルギー関係などについても豊浦砂と同様の傾向があることを示している。単位塑性エネルギー量に対する表面積増加量の値、つまり表面積増加に対するエネルギー効率、豊浦砂で  $127 \text{ cm}^2/\text{cm}^3/\text{MPa}$  であるのに対し、まさ土では  $510 \text{ cm}^2/\text{cm}^3/\text{kPa}$  程度となっている。この値は破砕性を表す指標になりえるものと考えられ、この値に着目した更なる検討が必要であるといえる。

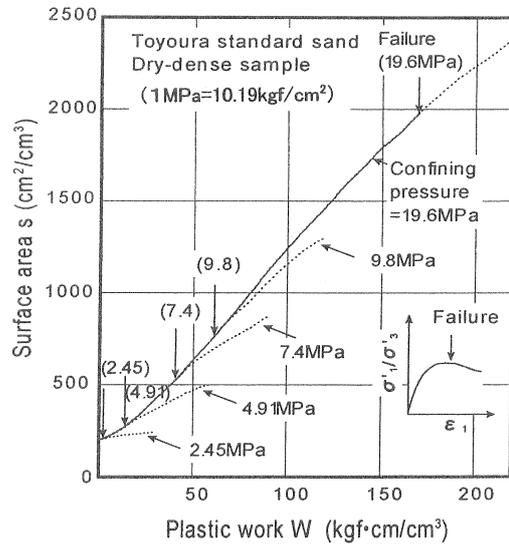


図-5 豊浦砂の表面積増加量と塑性仕事の関係<sup>5)</sup>

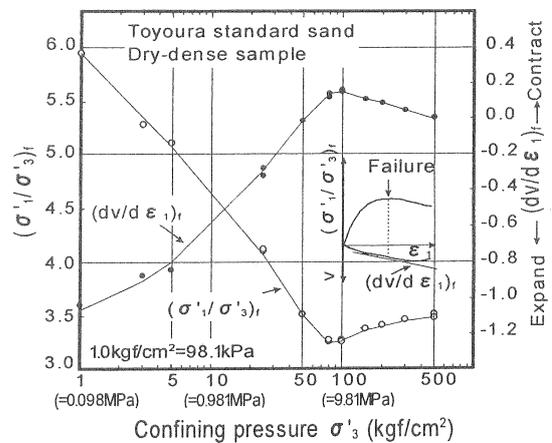


図-6 豊浦砂のセカントアングルとダイレタンシー特性の拘束圧依存性<sup>5)</sup>

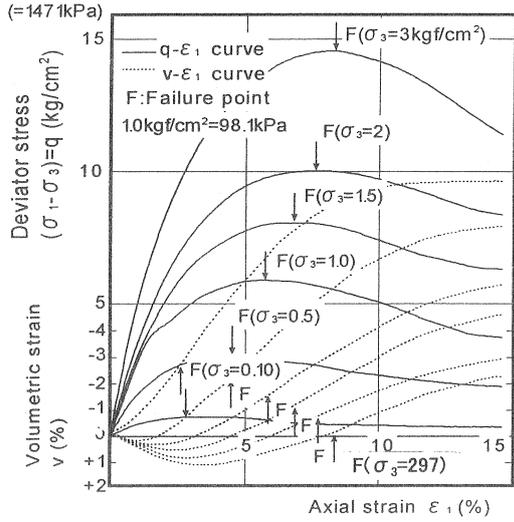


図-7 まさ土のせん断中の応力ひずみ挙動に与える拘束圧依存性<sup>5)</sup>

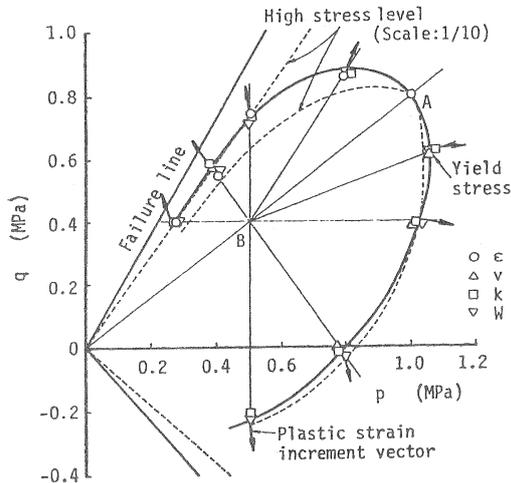


図-8(a) 圧縮側に異方圧密された砂の低拘束圧域の降伏特性<sup>11)</sup>

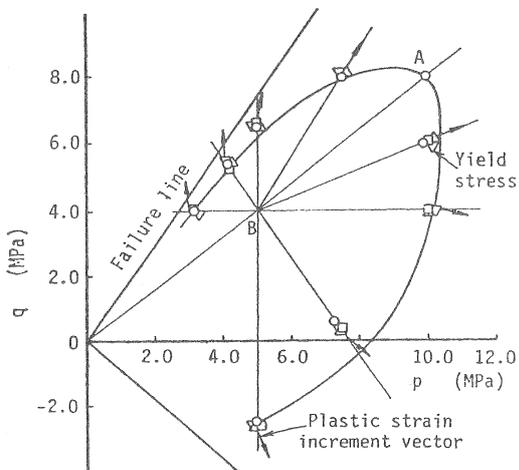


図-8(b) 圧縮側に異方圧密された砂の高拘束圧域の降伏特性<sup>11)</sup>

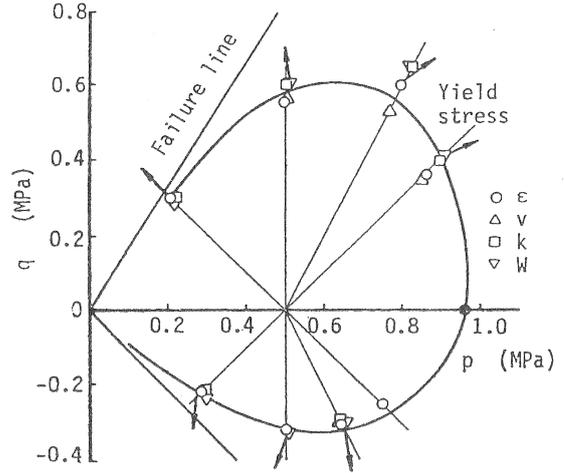


図-9(a) 等方圧密された砂の低拘束圧域の降伏特性<sup>11)</sup>

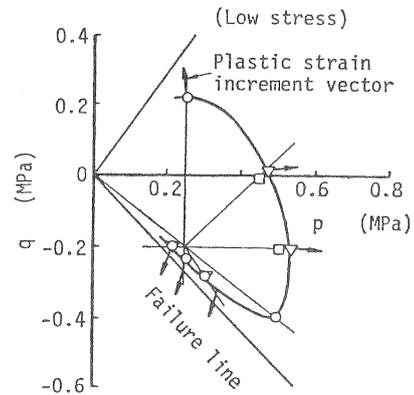


図-9(b) 伸張側に異方圧密された砂の低拘束圧域の降伏特性<sup>11)</sup>

2.2 弾塑性的挙動の把握とモデル化 (1980-90年代)

粒子破砕が顕著に表れる圧力域の降伏特性に関する研究は、本研究グループの取り組みが最初といえる<sup>7-10)</sup>。安福等は、低圧域から高圧域にかけて、また、圧縮側や伸張側への圧密(異方圧密)の影響も含めた形で、降伏特性を実験的に把握している(図-8, 9)<sup>11)</sup>。実験的に得られた降伏曲面に対する考察の中で、得られた曲面の形状は、ひずみエネルギーコンターに一致することも指摘されている。ひずみエネルギーはおよそ塑性エネルギーであると考えられる。さらに、得られた降伏曲面を3つのパラメータで表現できる降伏関数を下式のように導いている。

C=1

$$f = (\eta - \alpha)^2 + 2N(N - \alpha) \ln p/p_0 = 0 \quad (1)$$

C≠1

$$f = \ln p/p_0 + \frac{C}{2(C-1)} \ln \left[ \frac{(1-C)(2\alpha - \eta)\eta}{(1-C)\alpha^2 + \{N + \frac{\{N - (2-C)\alpha\}N}{-(2-C)\alpha}\}} \right] = 0 \quad (2)$$

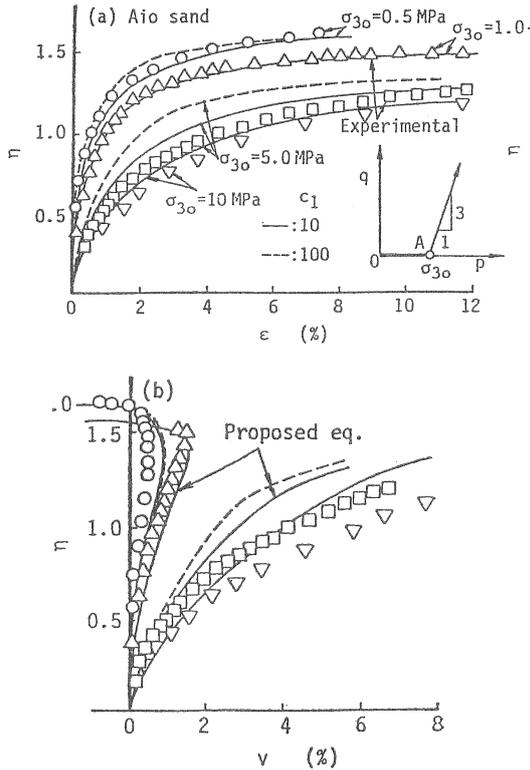


図-10 Yasufuku, et al.によって提案された構成モデルによる応力ひずみ関係の拘束圧依存性の予測<sup>12)</sup>

ここで、 $\eta$ や $p$ の応力状態を表すパラメータは限界状態に基づいたモデルで使用されているものと同じである。 $p_0$ は降伏曲面上の $p$ の最大値、つまり曲面の傾きが $dq/dp=\infty$ である $p$ の値に対応し、 $\alpha$ は $dq/dp=\infty$ である $\eta$ の値に対応する。また、 $N$ は $dq/dp=0$ である $\eta$ の値に対応する。さらに $C$ は降伏曲面の形状に関連するパラメータであり、 $C$ の値が増加するとともに、 $dq/dp=0$ である $p$ の値が減少する。この降伏関数の特徴は、 $C=2$ の場合に修正 Cam-Clay モデルのそれに一致するという点である。

求められた降伏関数をもとに、弾塑性理論に基づいた数学モデルも提案されている<sup>12)</sup>。このモデルの特徴は、先に示した実験的に得られた降伏関数を基礎にしていること、硬化パラメータには、低圧域から高圧域に応力レベルが増加する中で、連続的に正規化エネルギーから体積ひずみのみに変化するものを用いていること、ピーク強度の拘束圧依存性が指数関数を用いて組み込まれていることなどが挙げられる。図-10はこのような特徴を持つモデルを用いて求められた応力ひずみ関係であり、実によく砂の拘束圧依存性が示されている。さらに、このモデルが不攪乱まさ土の力学特性へ適用性できることも確認されている<sup>13),14)</sup>。このモデルを用いて予測を行う上で、降伏曲面の形状を規定する定数、つまり $C$ の値を同定する必要がある。実験的に求めることが可能ではあるが、かなり複雑なもので実用的であるといいたい。安福の研究<sup>14),16)</sup>および図-11<sup>15)</sup>に示す状態境界曲

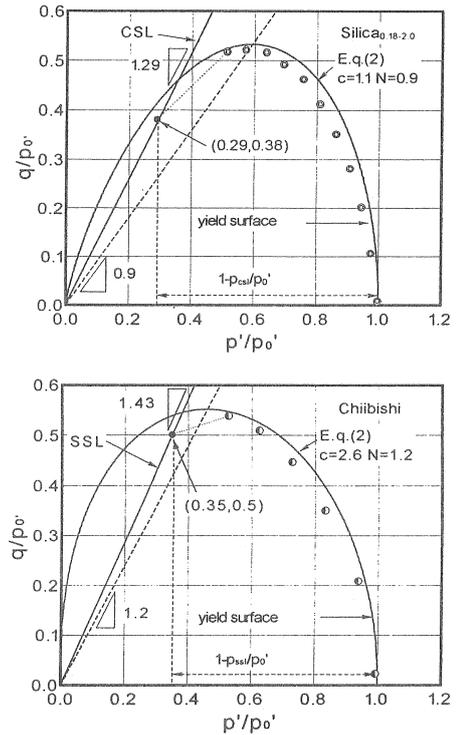


図-11 状態境界曲面の比較<sup>15)</sup>

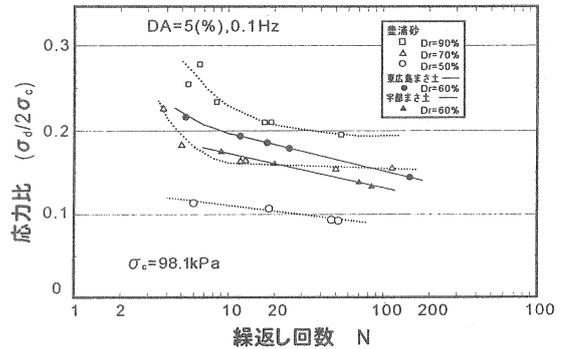


図-12 まさ土の液状化特性に及ぼす密度の影響<sup>17)</sup>

面（この曲面を実験的に求めるなかで、状態量に着目しているため、ここではこのように記述する）を総合して考えると、降伏関数の形状には、破砕性の程度が大きくかかわっているものと推察され、今後さらなる検討を要するものといえる。

### 2.3 繰返し特性の究明（近年の研究）

破砕性の卓越する材料の繰返しせん断特性に対する検討も早い時期から行われている。日本国内では阪神淡路大地震を機に、まさ土の繰返し特性に対する研究が活発になっている。兵動らは、それよりも5年も前から、まさ土が繰返し荷重に対して強い材料ではないことを示している<sup>17)</sup>（図-12）。

また、しらすやカーボネイトの液状化特性についても既にまとめられている(図-13)<sup>18),19)</sup>。これらから、粒度分布が良い材料であっても、緩い状態での液状化強度は決して高いとはいえないことがわかる。この中では、繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅が5%となる繰返しせん断応力比は、おおむね非排水単調せん断時の変相応力と一義的な関係があるという有益な情報が示されている。このような関係の存在は、兵庫県南部地震に被害を受けたまさ土<sup>20)</sup>に対してだけでなく、鹿児島県北西部地震で被害を受けた地盤材料<sup>21)</sup>に対しても明確にされている。また、非排水単調及び繰返しせん断時の粒子破砕量の検討が、先に示した表面積増加量を中心に調べられている<sup>22)</sup>。

2.4 個々の粒子強度とのかかわり (現在の研究)

力学挙動の材料間の差異は、基本的な性質に限定するならば、粒子の形状、大きさおよび分布、鉱物およびその組成割合などによってもたらされていることが知られ、かなりの詳細にわたって研究がすすめられている。加えて、粒子の硬さや脆さも、また材料の力学特性の違いをもたらし一つの要因として指摘されている。しかし、粒子個々の破砕と集合体としての破砕の間の複雑さも指摘され、十分な検討がなされないままであった。このような現状のなかで、砂集合体内の粒子の破砕を統計的に明らかにする研究、個々の粒子に対する破砕強度特性と集合体の粒子破砕を伴う領域との関連性を示した研究が中田等によって進められた<sup>23)-30)</sup>。

図-14は、一次元圧縮をうける砂の粒子破砕の傾向を捉えたものである<sup>26)</sup>。破砕には、表面が消れるような破砕から、角の欠損、割裂破砕などと様々なケースが考えられるが、この図は圧縮降伏応力が割裂的な破砕に支配されていることを示すものである。

粒子個々の破砕強度は単粒子破砕試験によって求められている。この試験は粒子を下盤に最も安定する方向に配置し、上盤を下降させ粒子を破砕させる試験である<sup>23),24),27)</sup>。試験中の荷重は、それぞれの載荷版が平板であるため、理想的な球形粒子では上下方向の2点から作用することになる。単粒子破砕試験から得られる最大の荷重値を初期の粒子高さの2乗で除すことで破砕強度 $\sigma_f$ が定義されている。図-15は、同一条件で行った個々の破砕強度 $\sigma_f$ の平均値である平均単粒子破砕強度 $\sigma_{fm}$ を示しているが、その強度には粒子サイズ依存性があるという結果が得られている。この平均単粒子強度と圧縮降伏応力の関係は、均一粒径材料に限れば、図-16のようになる<sup>28)</sup>。1:1の関係とはならないのは、一次元圧縮応力条件下にある材料内に発達する力のネットワークの違いにあり、これが材料の形状や表面形状に関連していることが示されている。

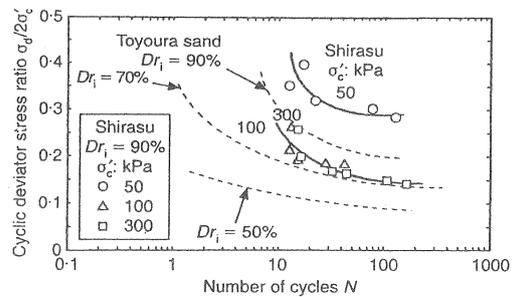
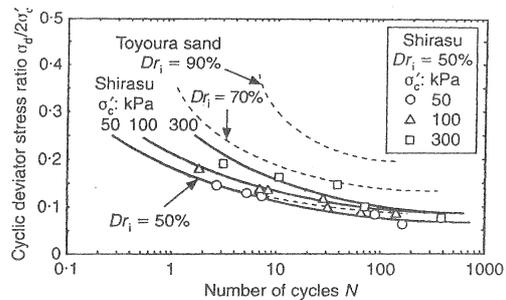
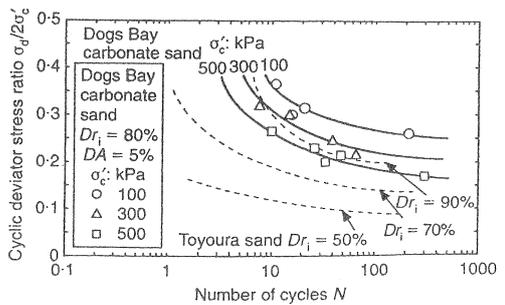
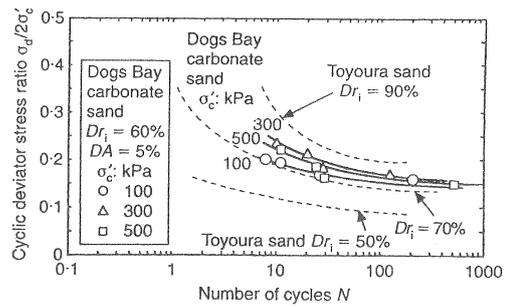


図-13 種々の破砕性材料の液状化特性に与える拘束圧の影響<sup>18)</sup>

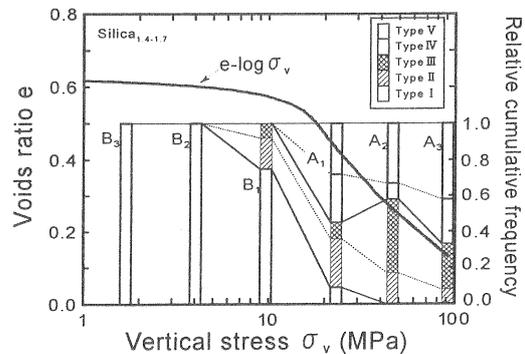


図-14 一次元圧縮中の粒子破砕の進行(均一粒径試料の場合)<sup>26)</sup>

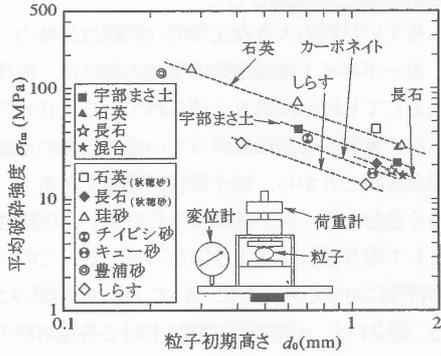


図-15 各種地盤材料の単粒子破碎強度<sup>27)</sup>

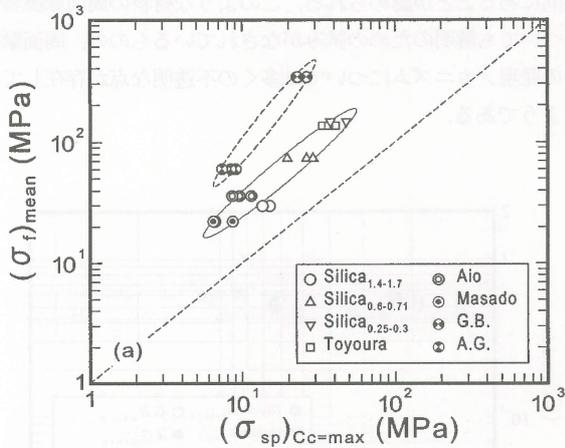


図-16 単粒子強度と圧縮降伏応力との関係(均一粒径試料の場合)<sup>28)</sup>

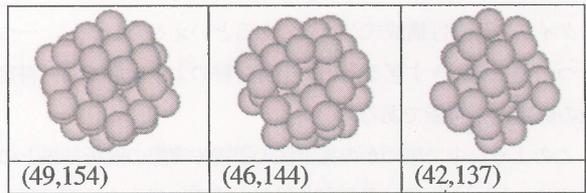
これらを通じて、単粒子の破碎強度特性の解明は、ある部分では粒子集合体の特性を直接的に評価できることや、単粒子破碎強度を把握することで集合体の粒子破碎、拘束圧依存性の現れ方の違いを定性的に解釈できるといえる。そして、さらなる材料特性の把握という意味においては、粒子自体の破碎強度の理解は必要不可欠といえよう。

### 3. 今後の研究

#### 3.1 個別要素法をもちいたマイクロメカニクスの視点から究明

個別要素法解析は、実際の粒状土の微視的力学特性を定量的に捕らえることが可能であるという観点から多くの研究者に用いられ、成果をもたらしている。しかし、現状の解析の多くは、粒子破碎のような粒子自体の塑性変形を取り入れたものとなっておらず、本来の地盤材料とはある意味異なる材料に対して研究の労力が注がれているといえる。破碎性材料のシミュレーションとして、図-17のように球要素のかたまりとして土粒子を表

現し、球要素間に結合強度を与えることで破碎強度を与えることが可能であり、すでに有効性の片鱗が認められている<sup>31)</sup>。たとえば、図-18は、図-17のDEM粒子集合体の定体積圧縮試験の結果について示したものである。10MPaや20MPaの結果では、擬似変相状態や変相状態の挙動が認められ、せん断後半では明確な正のダイラタンシー増分の発生が認められる。一方40MPaや80MPaの結果では、せん断中おおよそ負のダイラタンシー挙動のみを示していることがわかる。また、実際の破碎性土と同様、限界状態線が等方圧縮曲線から左に平行移動した位置に存在していることがわかっている。



0内は粒子数と接点数

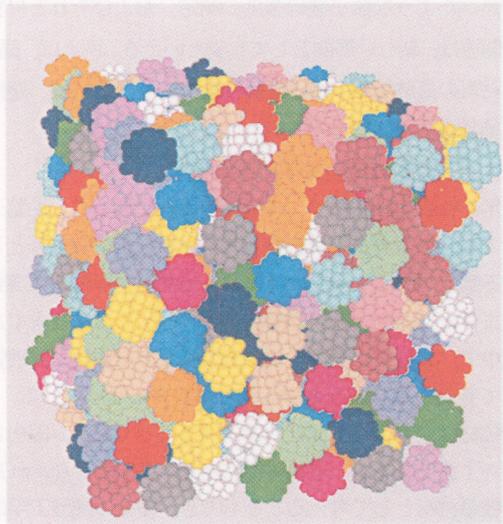


図-17 個別要素法によって作られた粒子およびその集合体<sup>31)</sup>

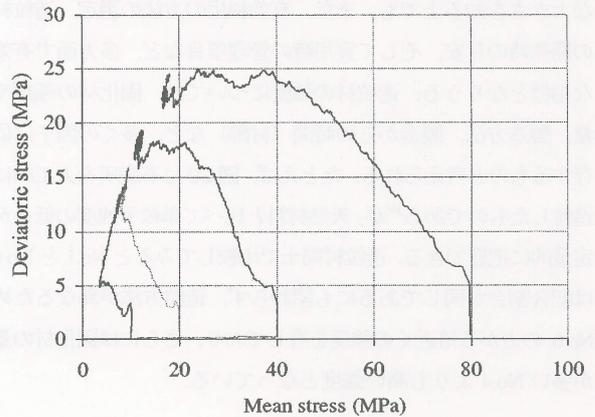


図-18 個別要素法による破碎性粒子集合体の三軸挙動<sup>31)</sup>

### 3.2 礫材の力学挙動の把握

ロックフィルダム、空港盛土、高速道路盛土などの高盛土構造物は種々の地盤材料を締固めながら、盛り立てていく。その施工中あるいは施工後の盛土の変形状や安定性を把握するための数値解析が行われる場合がある。この際、転圧された地盤材料の力学特性を出来るだけ忠実にモデル化し、材料定数の設定に注意を払うことが、数値解析結果を正確に理解するうえでも重要といえる。転圧される材料として、粒子サイズが大きいかつ堅固な材料が用いられるが、このような材料に対しても高盛土の最下部にあっては粒子破碎を示し、負のダイレタンシーのみを示すようになる。このような材料に対しては、カムクレイタイプの弾塑性構成式が有効であるといえる。しかし、一つ一つの粒子が大きすぎるため、土質材料のような形での材料定数の決定は不可能である。

このような中で幾つかの推定法の提案や実際の解析結果との比較がなされ<sup>32)34)</sup>、既に数値解析結果と実際の盛土の沈下挙動との比較検討結果<sup>35)</sup>が報告されている。このような問題において、先に述べたような粒子破碎強度の測定、およびそれと材料特性との関連は、新しい展開として有望といえる。例えば、図-19は砂質材料の最終圧縮指数と破碎強度であり、最終的(塑性的)な圧縮指数にはさほど差がないことを示している<sup>29)</sup>。

### 3.3 人工造粒材の開発および用途開発

近年、社会的なリサイクル気運の流れに乗って、地盤工学においても、さまざまな材料のリサイクル材を地盤材料として利用する動きがある。元々の材料は、地盤材料から産業廃棄物までさまざまであり、その有効利用時の性状もさまざまである。その中で、しらすや浚渫粘土、石炭灰などを造粒し、砂質材料として有効利用しようとする試みが活発となっている。

造粒材は、セメントなどの固化材によって凝集、固化されたものが主流であるが、造粒材内に空隙が多かれ少なかれあるため、軽量材料として考えることもでき、多くの地盤工学的利用が考えられるといえる。一方で、粒子自体の強度について不透明感もある。

この中で、上述した単粒子破碎強度は造粒材の強度の相対的な大きさを知る上でも、また、有効利用の方法の選定、造粒材の開発時の目安、そして実用時の管理項目など、多方面で有効な指標となりうる。造粒材の強度については、固化材の種類や量、製造方法、製造からの時間(材齢)など、多くの因子に依存するものと考えられる。たとえば、図-20は石炭灰を人工的に造粒したものである<sup>39)</sup>が、天然材料と比べて単粒子強度の低さが定量的に把握できる。造粒材同士で比較してみるとNo.1とNo.6は配合割合が同じであるにも関わらず、造粒方法が異なるためNo.6の方が5倍近くの強度を有しており、さらには固化材の量が多いNo.4よりも高い強度となっている。

### 3.4 工学的問題との関連として

破碎しやすい材料の大きな工学的な問題は支持力といえる。例えば、カーボネイト堆積地盤の支持力特性が、海洋開発の一つの課題としてしばしば取り上げられている。日本の沖縄県海域、ならびに世界の各国に広がっているこの種の地盤は、生物の遺骸等を含むことから、粒子形状が複雑である上、粒子内間隙比を多く含むため、粒子破碎の生じやすい、圧縮性の卓越する地盤として取り扱われるようになってきている。このような地盤の支持力特性に対する考え方について、幾つかの試みが<sup>37)38)</sup>なされている。図-21は、小型模型実験における各種材料の杭の支持力値と沈下量の関係を示すものである。圧縮性の高いDogs Bay砂やまさ土は、より高い内部摩擦角を有し、高い古典的な理論支持力値を示すにもかかわらず、実際には低い支持力値を示す傾向にあることが認められる。このような材料の周面摩擦特性についても解明のための試みがなされているものの、周面摩擦力の発現メカニズムについては多くの不透明な点が存在しているようである。

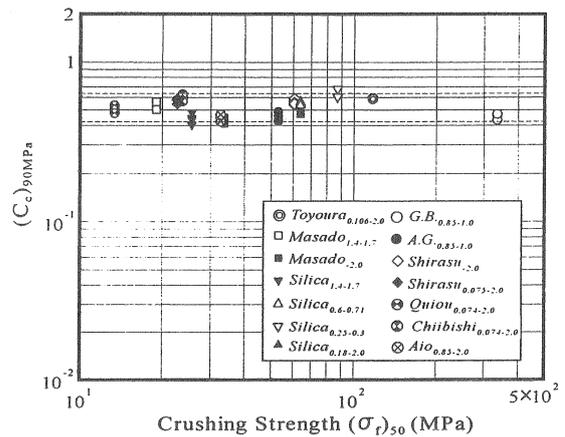


図-19 各種地盤材料の一次元圧縮時の最終圧縮指数と破碎強度の関係<sup>29)</sup>

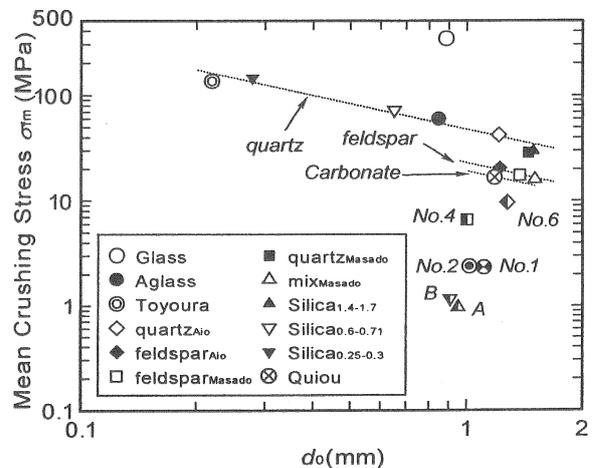


図-20 石炭灰造粒材の単粒子強度<sup>36)</sup>

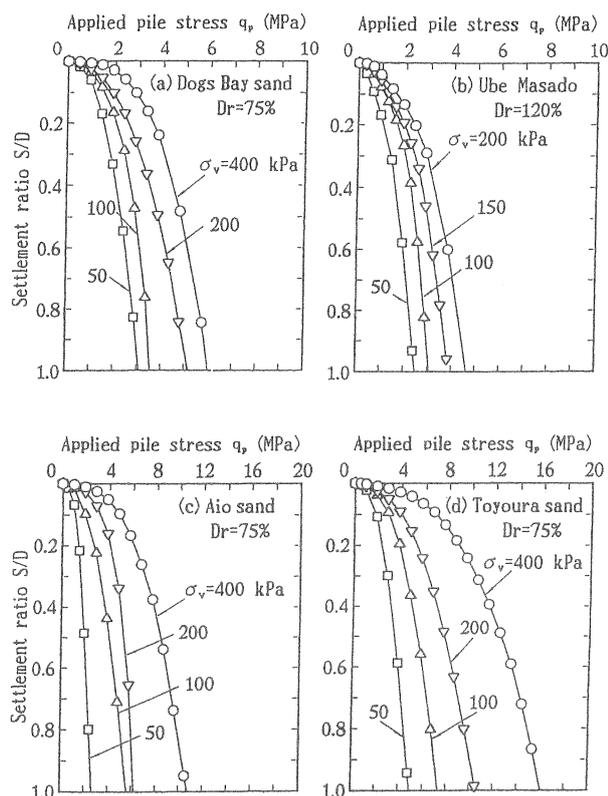


図-21 小型模型実験における破砕性土の杭の支持力特性<sup>37)</sup>

#### 4. まとめ

破砕性材料の力学特性にかかわりのある研究、主として粒子破砕に関するこれまでの山口大学グループの研究を概観するとともに、破砕性材料の工学的な問題点として取り上げられる研究に対する現状と今後の展開について触れた。とくにリサイクル技術については、社会的な要請から急速に進むと考えられる。材料の開発とともに適正用途の開発も切望されるなかで、高い圧縮性を示す材料の地盤工学的な不確定要素をどのように定量的に把握し排除するかが重要となろう。今後の研究の発展を期待したい。

#### 謝辞

本論文を取りまとめるに当たって、本学中田幸男氏には多大な助力を得た。末筆ながら感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会編：破砕性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会報告書, 1999.
- 2) 三浦哲彦, 山内豊聡：高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文報告集, No.183, p.69-79, 1971.
- 3) 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, 土木学会論文報告集, No.203, p.45-52, 1972.
- 4) Miura, N., and Yamanouchi, T.: Effect of water on the behaviour of a quartz-rich sand under high stresses, *Soils and Foundations*,

- Vol.15, No.4, pp.1-10, 1975.
- 5) 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, p.109-118, 1977.
- 6) Miura, N., and O-hara, S.: Particle-crushing of a decomposed granite soil under shear stresses, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.3, pp.1-14, 1979.
- 7) 三浦哲彦, 山本紀之：粒子破砕領域における砂の降伏曲線について, 土木学会論文報告集, No.326, pp.83-90, 1982.
- 8) Miura, N., Yasufuku, N. and Yamamoto, T.: Yielding characteristics of sand under triaxial compression and extension stresses, *Technical Reports of Yamaguchi University*, Vol.3, No.1, pp.33-85, 1984.
- 9) Miura, N., Murata, H. and Yasufuku, N.: Stress-strain characteristics of sand in particle-crushing region, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.77-89, 1984.
- 10) 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之：低・高圧下における砂の降伏特性を評価した弾塑性構成式について, 土木学会論文集, No.394, pp.11-20, 1988.
- 11) Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M.: Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.95-101, 1991.
- 12) Yasufuku, N., Murata, H., Hyodo, M. and Hyde, A.F.L.: A stress-strain relationship for anisotropically consolidated sand over wide stress region, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.75-92, 1991.
- 13) 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之：風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 土木学会論文集, No.382, III-7, pp.131-140, 1988.
- 14) Yasufuku, N., Murata, H., and Hyodo, M.: Application of elasto-plastic constitutive model to undisturbed soil, *Proceeding of International Conference on Engineering Problems of Residual Soils*, Vol.1, pp.759-764, 1988.
- 15) 篠田龍一, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 加登文学, HAM Tae-gyu: 状態境界曲面に基づく破砕性砂の力学特性について, 第37回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.459-460, 2002.
- 16) 安福規之：広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 九州大学学位請求論文, 1990.
- 17) 兵動正幸, 安福規之, 村田秀一, 山本陽一, 丸山浩史：まさ土の液状化強度に及ぼす拘束圧の影響, 第26回土質工学研究発表会講演概要集, No.1, pp.841-842, 1991.
- 18) Hyodo, M., Hyde, A.F.L. and Aramaki, N.: Liquefaction of crushable soils, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.527-543, 1998.
- 19) 兵動正幸, 荒牧憲隆, 岡林巧, 中田幸男, 村田秀一：破砕性土の定常状態と液状化強度, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.197-210, 1996.
- 20) 兵動正幸, 荒牧憲隆, 徳原裕輝, 菊池慎二, 中田幸男, 村田秀一：六甲アイランド埋立まさ土の非排水繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.87-98, 1997.
- 21) 岡林巧, 兵動正幸, 村田秀一, 山本哲朗, 中田幸男, 北村良介, 小林孝洋, 藤井照久, 日下部伸：1997年鹿児島県北西部地震および同第2北西部地震による液状化地盤災害, 自然災害西部地区部会報・論文集, No.22, pp.21-28, 1998.
- 22) Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Aramaki, N. and Nakata, Y.: 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.
- 23) Nakata, Y., Hyde, A.F.L., Hyodo, M. and Murata, H.: A probabilistic approach to sand crushing in the triaxial test, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583, 1999.

- 24) Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H. and Hyde, A. F. L. : Single particle crushing and mechanical behaviour of decomposed granite soils, Proc. of International Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku'98, pp.479~483, 1998.
- 25) 中田幸男,兵動正幸,加登文学,村田秀一 : 破砕性材料の力学特性, 土と基礎, No. 48, No.10, pp. 31-34, 2000.
- 26) Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Kato, Y. and Murata, H. : Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.69-82, 2001.
- 27) 加登文学・中田幸男・兵動正幸・村田秀一 : 地盤材料の単粒子破砕特性, 土木学会論文集, No.673/Ⅲ-54, pp. 189-194, 2001.3.
- 28) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L. and 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.
- 29) Nakata, Y., Kato, Y. and Murata, H. : Properties of compression and single particle crushing for crushable soil, Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp.215-218, 2001.
- 30) 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.
- 31) 中田幸男, Bolton, M.D. : 破砕性材料のDEM シミュレーション, 第 37 回地盤工学研究発表会講演概要集, No.1, pp.841-842, 2002.
- 32) 三浦哲彦, 村田秀一,安福規之,赤司六哉 : 粗粒材の材料定数と応力ひずみ特性, 土と基礎, No.33-6, pp.13-18, 1985.
- 33) 三浦哲彦,山本紀之 : ロックフィル材の応力ひずみ特性に関する一考察, 山口大学工学部研究報告, No.30, Vol.2, pp.35-42, 1980.
- 34) 三浦哲彦,安福規之 : 砂、礫の応力ひずみ特性について, 山口大学工学部研究報告, No.34, Vol.1, pp.47-54, 1983.
- 35) 森吉昭,内田善久,中野靖,吉越洋,石黒健,太田秀樹 : 現場転圧された粗粒材料の高圧下における圧縮性状と材料定数, 土木学会論文集, No.687/Ⅲ-56, pp. 233-247, 2001.
- 36) 佐藤昌岳・加登文学・中田幸男・兵動正幸・吉本憲正・鶴谷巖・新田邦昭 : 石炭灰造粒材の単粒子強度が一次元圧縮特性に及ぼす影響, 第36回地盤工学会研究発表会概要集, pp.657-658, 2001.
- 37) 安福規之,田中邦博,村田秀一,兵動正幸 : 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集, No.505/Ⅲ-29, pp. 191-200, 1994.
- 38) 田中邦博,安福規之,村田秀一,兵動正幸 : カーボネイト砂の力学特性とその砂中の杭の周面摩擦力特性, 土木学会論文集, No.523/Ⅲ-32, pp. 99-110, 1995.