

## 破碎性地盤の工学的性質

### Mechanical Properties of Grounds Composed of Crushable Soils

兵 動 正 幸 (ひょうどう まさゆき)

山口大学教授 工学部

#### 1. はじめに

本小特集では、昨年10月号の「破碎性地盤の力学特性」小特集に引き続き、破碎性地盤の工学的性質というテーマで5件の報文と事例報告が掲載されることになった。我が国には、風化残積土や火山灰質土などの破碎性土が広く分布しており、それらの工学的問題に対する関心が高く、多くの報文や事例報告が寄せられたことによると聞いている。前回は種々の破碎性土の力学特性を中心にとりまとめられたが、今回はそれらの工学的性質ということでまとめられている。

破碎性土の定義は、前回の小特集の北村教授による総説<sup>1)</sup>において、地盤工学で経験する応力範囲(0.1~数MPa)で粒子破碎を起こしやすい土とされている。もちろん、いかなる土もその破碎強度を上回る外力を受けた場合には破碎するわけであるが、通常的设计、施工における土被りや载荷により発生する応力域において、土粒子が破碎を起こすような土を破碎性土と呼んでいる。これまでにも高圧下での土粒子の破碎については多くの研究者によって調べられてきた<sup>2)~7)</sup>。しかしながら、土質力学では、通常の応力域においては粒子は破碎しないことが前提となっているので、破碎性土に対しては、特別な扱いが必要になってくる。我が国における代表的な破碎性土のまさ土やしらすなどは、特殊土として取り扱われている現状にある。破碎性土に関する研究の使命は、それぞれの土の特徴を解明すると同時に、それらの破碎性を表す新しいパラメータを求め、より一般的な形で土質力学の体系の中に組み込んでいくことにあると考えられる。

外力の作用に対し個々の土粒子が破碎を生じる結果、それらの集合体としての地盤においては、圧縮性がより顕著になり、強度や支持力あるいは透水性の低下をきたす等、工学的に悪影響を被ることが多い。一方では、破碎による圧縮性を利用して、締固め地盤として利用することもできる。このような現象は、土粒子が必ずしも完全に割裂あるいは粉碎されたためばかりではなく、粒子表面の突起のわずかな欠損に伴う土粒子骨格構造の変化により起こる場合も多い。したがって、土の破碎性を理解するためには、土粒子の強さを知るばかりでなく、粒子の形状や表面の粗さを知る必要がある。このようなミクロな粒子や粒子表面の形状が、マクロな地盤挙動に大きな影響を及ぼすことを念頭に置く必要がある。

#### 2. 破碎性土の特徴

土は、外力の作用に対し程度の差こそあれ粒子の破碎を伴いながら変形を生じるものと考えられる。単一の粒子の破碎強度の支配要因は、粒子の鉱物組成、風化度、粒子形状などであるが、粒子集合体の強度は、これらに加えて粒度分布、密度等にも影響される。粒子破碎を引き起こす外的要因としては、応力レベル、応力経路、載荷時間、水の存在などが挙げられる。

破碎性土は、元々脆弱な粒子で構成されるものと、本来堅固な粒子が風化によりその一部もしくは全体が脆弱になったものに分けられる。しかし、多くは大なり小なりの風化の影響を受けていると考えられる。土粒子を構成する鉱物は風化を起こすと、表面に無数の亀裂が生じて表面から脆弱になり、外力を受け破碎を起こす。破碎された粒子は表面が粗く角張り、更なる外力の作用で破碎を繰り返す。その際、破碎により生じた細かい破砕片に応力が集中しやすい<sup>8)</sup>ことから細粒分が増加し、土は次第に均等係数の高いなだらかな粒度分布へと変化していく。これに対し、河川の運搬・分級作用により堆積した粒子の堅固な砂は、表面の脆弱な部分が削りとられ、堅い芯からなる丸みを帯びた粒径のそろった土であることが多い。一般に破碎性土の方が非破碎性土より締固め効果に優れているのは、このように粒度分布が良いことと突固め時の粒子接触部分の破碎により粒子の再配列が容易であることによると考えられる。

#### 3. 粘性土の力学特性と破碎性地盤の工学的性質

##### 3.1 破碎性土の間隙比と圧縮特性

破碎性土は、粒子形状が複雑であることから、総じて大きな間隙比を有する。図-1に幾つかの砂の最大および最小間隙比と均等係数の関係を示す。ここで、破碎性土として、まさ土、しらす、カーボネイト砂であるフランスのキュー砂、沖縄のチービシ砂についてそれぞれ示した。それぞれの成因等については、10月号の総説に書かれている。カーボネイト砂は、海中微生物の遺骸を起源とし炭酸カルシウムを主成分としており、特異な粒子形状で破碎性に富む。比較のために、シリカ砂としての豊浦砂、粒径1.4~1.7mmの珪砂についてもそれぞれ示した。破碎性土の方が、総じて最大、最小間隙比ともに大きいことが明らかである。

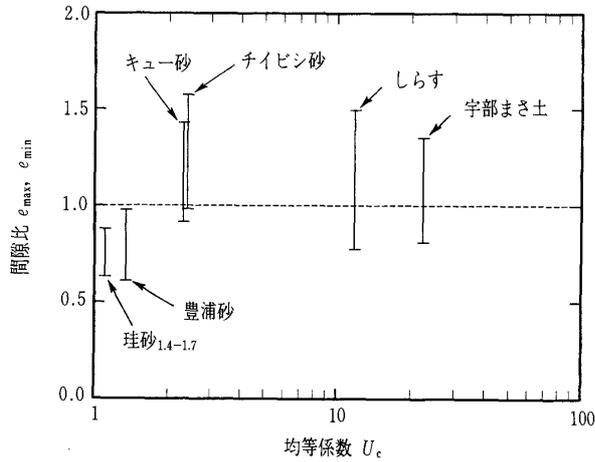


図-1 最大および最小間隙比と均等係数の関係

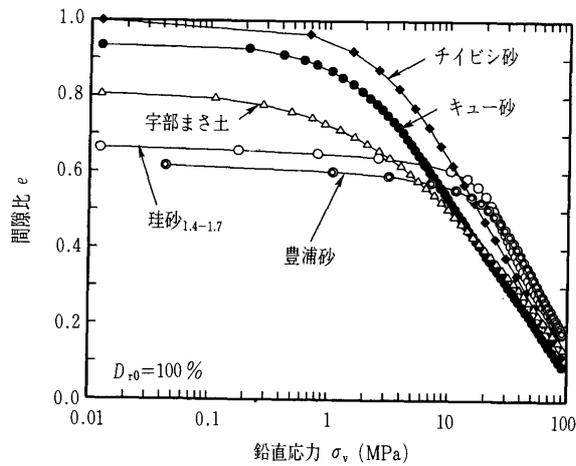
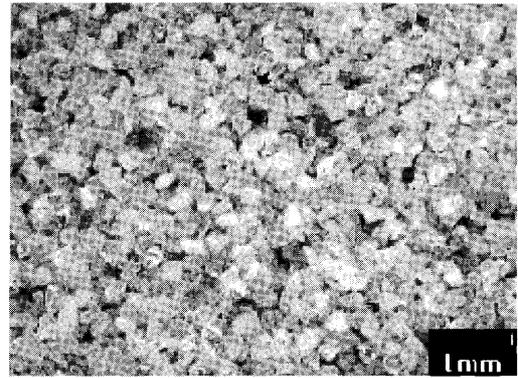


図-2 一次元圧縮特性

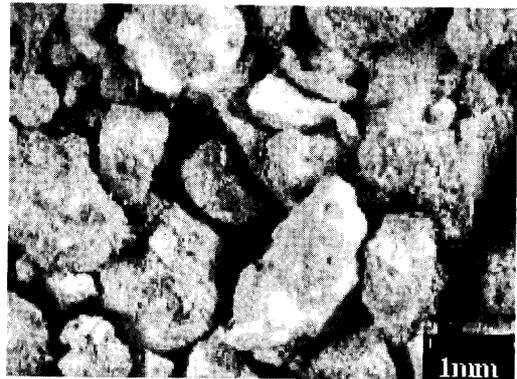
これらの一次元圧縮特性を図-2に示す。図のようにどの土もある鉛直応力  $\sigma_v$  を越えると急激に間隙比が減少し、正規圧密粘土のような挙動を示す。それぞれの曲線の折れ曲がり点が、粒子破砕が顕著に生じ始める点に対応することがこれまでの研究で明らかになっている<sup>7),9)</sup>。破砕性土では、それより低い鉛直応力においても表面の突起部の破砕は生じていることが知られている。破砕性土の折れ曲がり点での鉛直応力は、おおよそ1 MPa程度かそれ以下であるのに対し、豊浦砂、珪砂のそれは、10 MPaを越えていることが認められる。

### 3.2 破砕性土のせん断特性と破砕性地盤中の杭の支持力特性

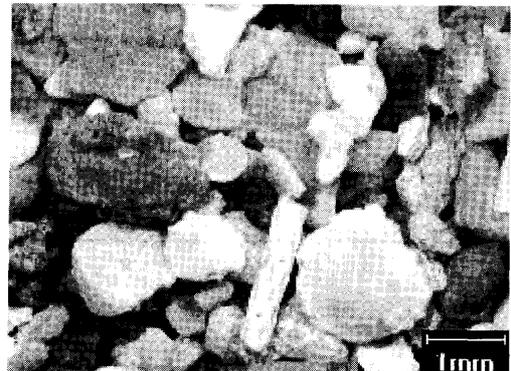
チイビシ砂、まさ土、豊浦砂の相対密度をそれぞれ90%にそろえて拘束圧50 kPa および200 kPa で排水三軸圧縮試験 (CD 試験) を行った。用いた試料の顕微鏡写真を写真-1 (a)~(c)に示す。写真から、豊浦砂は比較的粒径がそろっているのに対し、まさ土は種々の粒径成分から成り、チイビシ砂は棒状や板状など複雑な粒子形状を有することが観察される。図-3 (a)に拘束圧50 kPa の、図-3 (b)に200 kPa の軸差応力および体積ひずみの軸ひずみに対する関係がそれぞれ示されている。これら三つの材料に対する三軸試験結果を比較すると、チイビシ砂が特に大きな強度を示しており、豊浦砂とまさ土はほぼ同程度の強度となっている。これらの結果は



(a) 豊浦砂



(b) 宇部まさ土

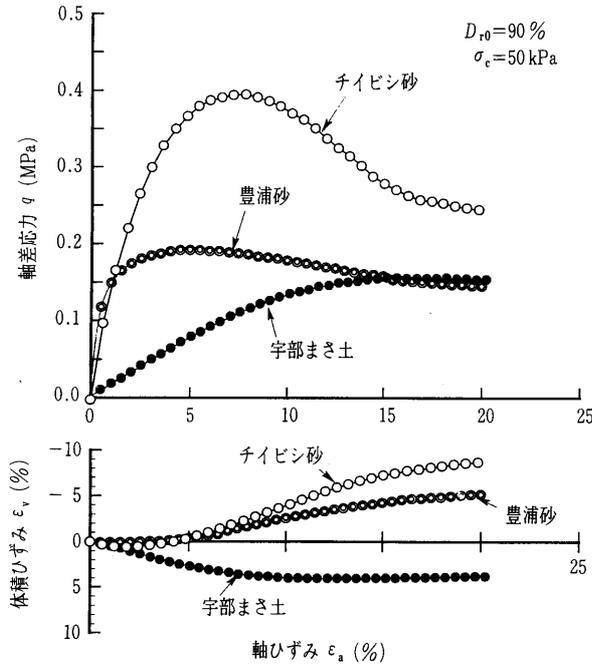


(c) チイビシ砂

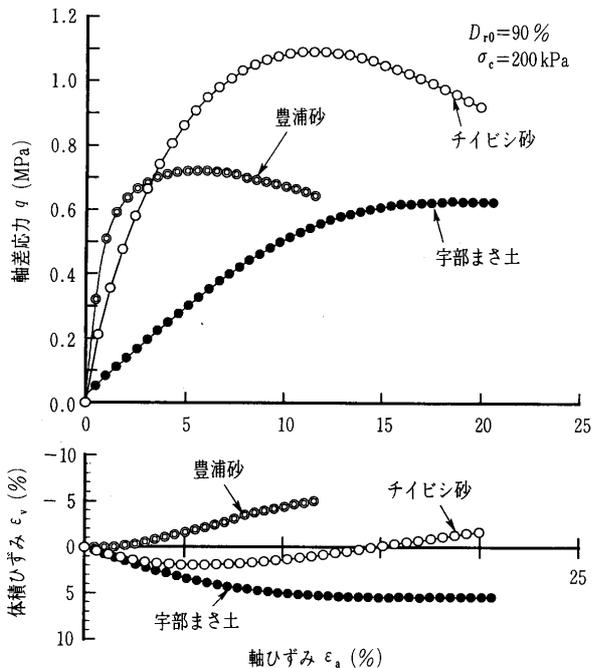
写真-1 粒子の顕微鏡写真

粒子形状に依存しており、チイビシ砂が特異な粒子形状を示すことから、インターロッキング効果が卓越したためと考えられる。しかしながら、最大強度の発現までに、豊浦砂が軸ひずみ約5%程度の、チイビシ砂は約7~10%の軸ひずみを必要とするのに対し、まさ土は15%を越えても明確なピークを示していない。また、体積ひずみ特性においては、豊浦砂は体積膨張傾向であるのに対し、チイビシ砂は収縮後膨張挙動を示し、まさ土においては終始収縮挙動であることが観察される。さらに、この範囲での拘束圧の増加に対して、チイビシ砂のみ剛性が低下し、圧縮性が増加し、ピーク強度までの軸ひずみも増加していることが認められる。このように、いずれも密詰め試料であったにもかかわらず、破砕性土においては、強度の発現までに大きな軸ひずみや体積収縮を伴うことが明らかである。これらは、粒子破砕に伴う再

説 明



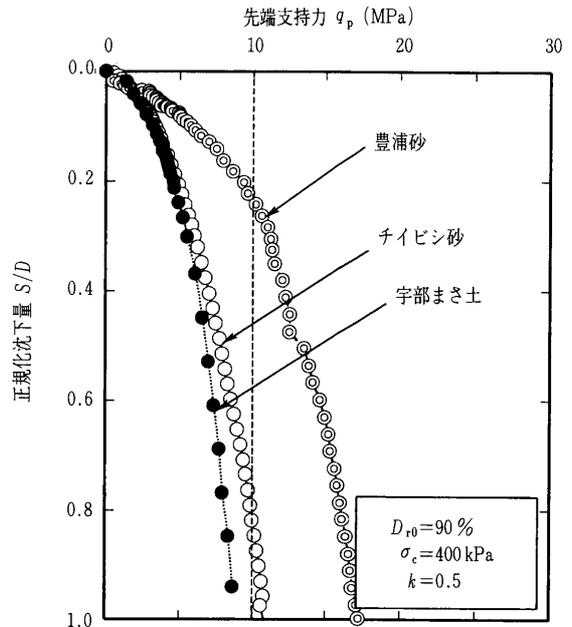
(a) 拘束圧 50 kPa



(b) 拘束圧 200 kPa

図一 3 軸差応力—軸ひずみ—体積ひずみ関係

配列によるものと考えられる。三者の比較から、破碎性土は粒子の堅固な砂に比べ、同等またはそれ以上の強度を有するが、剛性がかなり低いことが認められる。次に、破碎性土の豊浦砂による地盤中の杭の支持力模型実験<sup>10)</sup>を図一 4 に示す。この実験では、杭は二重管構造で、先端支持力と周面摩擦力を独立に計ることができる仕組み<sup>11)</sup>になっており、先端支持力の大きさに周面摩擦の影響は含まれていない。図の縦軸は杭の沈下量を杭径で除した正規沈下量を、横軸は先端支持力を示している。図のように杭の先端部には10 MPaを越える応力が作用しており、破碎性土においては顕著な粒子破碎を伴



図一 4 先端支持力と正規化沈下量の関係

っていることが推察できる。一般に杭の支持力は、正規化沈下量1.0程度の支持力が採用されることが多いが、この時点では豊浦砂に比べ、チイビシ砂、まさ土ともに、半分程度の支持力しかないことがわかる。先の三軸試験結果からは、破碎性土の方がむしろ高い強度を示し、当然高い内部摩擦角を有していたにもかかわらず、支持力は逆に破碎性土の方がはるかに低い値となった。このことは、内部摩擦角より算出する従来の杭の支持力公式の理念と反するものであり、支持力評価式の中に強度発現過程における土の変形を取り込む必要性が明らかである。また、このような杭の支持力というマクロな挙動の中に、個々の土粒子のミクロな性質が大きく影響していることがわかる。

3.3 破碎性地盤の工学的問題との関連

上述のように、破碎性土は、特異な表面および粒子形状を有すること、拘束圧の変化に敏感に反応し粒子の表面突起および粒子自体の破碎を伴うことにより、常圧域では顕著な破碎を生じないシリカ砂に比べ特異な挙動を呈する。しかし、その性状は、ひずみレベル、拘束圧レベルによって異なるので、各々の工学的問題において支配的なひずみ、拘束圧レベルを評価し対応させることが重要である。以下、具体的工学的問題と想定される変形レベルを挙げる。ここで、表現は若干あいまいであるが、破碎性土地盤の特徴が現れると思われる各工学問題の変形レベルをおおまかに掲げてみた。ここで大変形とは地盤の破壊に相当し、中変形は破壊前の有限な変形を、小変形は弾性域の変形を意図したものである。

- i) 支持力問題                      中変形～大変形
- ii) サウンディング
  - (1) PS 検層                      微小変形
  - (2) 標準貫入試験              中～大変形
  - (3) コーン貫入試験            中～大変形
- iii) 斜面安定                      大変形

- iv) 液状化 (非排水), 大変形
- v) 繰返しせん断破壊 (初期せん断), 大変形
- vi) 締固め特性 大きな体積変化

上記の中で、支持力問題では、基礎の許容沈下量に応じて支持力が決定される。破碎性土は、最大の強度を発揮するまでに大きな変形を起こすので、許容変形内では完全な強度を発現できない状態にある。また、地震時の液状化の問題であるが、兵庫県南部地震で埋立てまき土が、鹿児島県北西部地震で2次しらすが液状化を起こした。いずれも破碎性土である。特に埋立て地では、山地の風化土を埋立て材料として用いている。これらの中には、液状化強度が低いものも多く、初期せん断応力下では、さらに強度を弱めていく性格を持っており<sup>12)</sup>、注意が必要である。液状化は、有効応力が低下していく現象であるが、ひずみの増大に伴い破碎性土では粒子接点での破碎が生じ<sup>13)</sup>、そのことが液状化強度を減じていることが明らかになっている。

#### 4. 土の破碎性に関する最近の国内および国際研究組織

1996～1998年度の3箇年にわたり、鹿児島大学北村良介教授を委員長として、破碎性土地盤の工学的諸問題に関する研究委員会が組織され、破碎性土粒子のミクロな性質から、それらにより構成される地盤のマクロな挙動に至るまで、多面的な角度から検討が行われてきた。それらの研究成果は、委員会シンポジウム論文集<sup>14)</sup>に掲載されている。

破碎性土のみならず土の破碎のメカニズムとそれに起因する諸問題を議論するために、土の破碎性に関する国際ワークショップが1997年9月に英国のSheffield (シェフィールド) 大学で、1999年7月に山口大学で、さらに2000年12月に英国のCambridge (ケンブリッジ) 大学で開かれた。

この流れを受けて、2000年に国際地盤工学会にMicro-Geomechanics (微視的土の力学) に関する委員会TC35がケンブリッジ大学のM. D. Bolton (ボルトン) 教授を委員長として組織された。我が国からは現在のところ、日下部治東京工大教授、中田幸男山口大助教授、そして筆者がメンバーとなっている。活動内容は、粒子の表面形状に起因した破碎を伴う土の力学特性の究明とモデル化、そのような土質材料からなる地盤のマク

ロな挙動の評価を行うことが主となる予定である。今、破碎性地盤のマクロな挙動を予測するために、個々の土粒子の表面形状や強さを評価する“マイクロジオメカニクス”の研究の進展の必要性が求められている。

#### 参 考 文 献

- 1) 北村良介: 破碎性土の力学特性と破碎性地盤の工学的諸問題, 土と基礎, Vol. 48, No. 10, pp. 3～6, 2000.
- 2) Hall, E. B. and Gordon, B. B.: Triaxial testing with large-scale high pressure equipment, Laboratory shear testing of soils, ASTM, STP 361, pp. 315～328, 1963.
- 3) Vesic, A. S. and Clough G. W.: Behavior of granular materials under high stresses, Proc. ASCE, Vol. 94, No. SM3, pp. 661～668, 1968.
- 4) Lo, K. Y. and Roy, M.: Response of particulate materials at high pressures, Soils and Foundations, Vol. 13, No. 1, pp. 1～14, 1973.
- 5) 三浦哲彦・山内豊聰: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, 第260号, pp. 109～118, 1977.
- 6) Yamamuro, J. A. and Lade, P. V.: Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures, Proc. ASCE, Vol. 122, No. GT2, pp. 109～119, 1996.
- 7) 村田秀一・兵動正幸・安福規之: 低・高圧下における密な砂の降伏特性, 土木学会論文集, No. 382/Ⅲ-7, pp. 183～192, 1987.
- 8) McDowell, G. R., Bolton, M. D. and Robertson, D.: The fractal crushing of granular materials, Journal of Mech. Phys. Solids, pp. 2079～2102, 1996.
- 9) 中田幸男・加登文学・兵動正幸・村田秀一・原田孝行: 一次元圧縮を受ける粒状材の粒子破碎, 破碎性地盤の工学的諸問題に関するシンポジウム論文集, pp. 15～20, 1998.
- 10) 桑嶋啓治: カーボネイト砂中における杭の先端形状に着目した支持力特性, 山口大学大学院工学研究科修士論文, 1996.
- 11) 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. 99～109, 1995.
- 12) 兵動正幸・荒牧憲隆・岡林 巧・中田幸男・村田秀一: 破碎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. 197～209, 1996.
- 13) Hyodo, M., Nakata, Y., Hyde, A. F. L. and Aramaki, N.: Undrained cyclic shear behaviour and particle crushing of sand under high confining stress, Proc. of 2nd Int. Symposium on hard soils-soft rocks, Vol. 1, pp. 545～550, 1998.
- 14) 破碎性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会: 破碎性地盤の工学的問題に関する研究委員会報告およびシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 1999.

(原稿受理 2001.1.5)