

# 礫質土の工学的性質に及ぼす粒子形状の影響

## Effect of particle shape on engineering properties of gravelly soils

17N3100039F 三橋 齋 (地盤工学研究室)  
Itsuki MITSUHASHI/ Geotechnical Engineering Lab.

**Key Words :** gravelly soils, particle shape, engineering properties

### 1. はじめに

土構造物の設計用値(内部摩擦角 $\phi$ )や施工管理値(含水比 $w$ , 締固め度 $D$ )は, 使用する土の粒度に基づいて分類<sup>1)</sup>・規定される場合が多い. これは, 土粒子の特性がその構造体である土の工学的性質を決定付け, 土粒子に関する種々のパラメータのうち粒径と均等係数が最も重要な影響因子と認識されているためである. この認識は礫質土のように粒径が大きい材料ほど顕著である. したがって, 土構造物の設計・施工に際しては同粒度のあれば同じパラメータを用いることになるが, 実際の締固め特性や透水性, 締固め後の強度変形特性といった工学的特性には差がある場合がある<sup>2)3)</sup>. この要因を見出せれば, 土構造物の要求性能に応じた土の選択だけでなく, より合理的な設計や施工が可能になる. 上記の背景を踏まえ, 本研究では粒子形状が異なる一方で粒度分布特性が等しい2種類の礫質土(粒度調整碎石, 円礫混じり土)の工学的性質を比較した. 種々の室内試験を系統的に実施して粒子の物理特性, 締固め特性, 透水性および締固め後の強度変形特性の差異を調べた. この様な基礎的な知見を蓄積することで, 粒度分布特性以外の土の工学的性質に与える要因を見出す目的を得る.

### 2. 使用材料

本研究では粒度調整碎石と, 円礫混じり土の2種類の礫質土を用いた. 粒度調整碎石は擁壁の裏込め材や路盤材などに広く用いられており, 基準となる粒度も規定されている. 本研究で用いた粒度調整碎石は安山岩を母岩としたもので, 粒径域の区分なく単一母岩によることを化学組成から確認している. 入手時にはM-30の粒度に調整されていたが, このままでは以降に示す突き固めによる土の締固め試験(JIS A 1210, A-b法), 透水試験(JIS A 1218)および平面ひずみ圧縮試験を実施できないため, 最大粒径 $D_{\max}=19.0$  mmのせん頭粒度に再調整して用いた. 一方, 円礫混じり土は河床礫と多摩地方の洪積砂質土が混合されたものである. 図-1にこれら2種類の礫質土の実験粒度を示す. 両者は粒度が等しく, 実験粒度における粒径区分はともにGS(砂質礫)となる.

また, 2種類の礫質土の代表的な粒子の概要を図-2に示す. 碎石は母岩を破砕させた粒子であり, 角張った形状を有する. 自然界でも岩盤の風化でできた粒子は

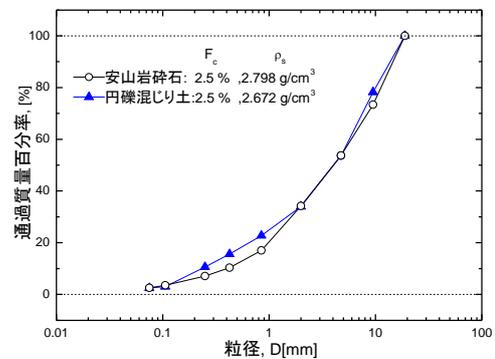


図-1 検討した礫質土の粒度

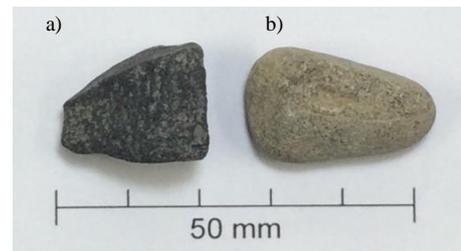


図-2 代表的な粒子の形状; a)碎石, b)円礫混じり土

角張った形状を有しているが, 侵食~運搬~堆積の過程で角が取れて球形の粒子形状に変化していく. 本研究で用いた材料においても, 碎石と円礫で粒子形状は明確に異なることが見て取れる. 粒子形状の違いの定量評価はZinggによる分類<sup>4)</sup>では不明瞭であったため, 本研究では凹凸係数 $FU$ <sup>5)</sup>で把握した. この結果, 碎石と円礫の $FU$ 値はそれぞれ0.689, 0.764であった.  $FU$ 値は粒子が完全球(投影断面が円)で1.0となり, 凹凸の度合いが激しくなるほどその値は小さくなる.

さらに, 近年では細粒分含有率 $F_c$ が数%の礫質土であっても, その塑性特性の違いによって礫質土全体の締固め特性や強度変形特性が異なることが明らかになっている<sup>6)</sup>. 本研究においてこれらの礫質土の工学的性質を調べるにあたっては, 細粒分の塑性の違いを予め把握した. その結果, 塑性指数 $I_p$ (=液性限界 $w_L$ -塑性限界 $w_p$ )は碎石= $10.0$ ( $w_L=31.0\%$ ,  $w_p=21.0\%$ ), 円礫混じり土= $11.4$ ( $w_L=32.0\%$ ,  $w_p=20.6\%$ )と大差はないことを確認している.

以上より, 安定的な粒子で構成され, 粒度や $F_c$ の塑性特性にも差がないため, 現状ではこれら2種類の礫質土は同様な工学的性質を有する材料と見なされる. これ

ら礫質土の工学的性質に差異がある場合は粒子形状の違いが主たる原因であると考えられる。以降、締固め特性、透水性、強度変形特性について検討した結果を順次示す。

### 3. 締固め特性および透水性の差異

砕石と円礫混じり土の締固め特性と透水性の差異を比較した結果を図-3に示す。図-3aは標準締固めエネルギー $1E_c$ ( $\approx 550 \text{ kJ/m}^3$ )における乾燥密度 $\rho_d$ -含水比 $w$ 関係、図-3bはそれぞれの最適含水比 $w_{opt}$ 条件下での締固め $D_c$ ( $=\rho_d/\rho_{dmax}$  [%])の変化に伴う締固め方向の透水係数 $k_{15}$ の推移を比較している。それぞれの $\rho_{dmax}$ および $w_{opt}$ の値は図中に示した。図-3aより、粒度が等しくても、突き固めによって得られる $\rho_{dmax}$ 値には明確な差があることが分かる。 $\rho_{dmax}$ 値は、粒子形状の違いによって砕石 $\phi$ の $2.135 \text{ g/cm}^3$ に対して円礫混じり土では $2.068 \text{ g/cm}^3$ とやや低い値であった。一般的に粒子破碎挙動の少ない砂礫材の強度は締固めによって構築された土骨格の強さに強く反映されるため、土構造物の安定性を向上させるためには $\rho_d$ 値を増加させることが効果的である。したがって、図-3aに示した結果は、粒度が等しくても粒子形状によって実現できる土骨格の構造の強さが異なる結果、土構造物の安定度にも違いが生じ得ることを示唆している。

粒子形状の違いによる締固め後の粒子構造の差異を多角的に把握するため、本研究では透水係数 $k_{15}$ の測定もあわせて実施した。 $k_{15}$ の計測に際して設定した $D_c$ 値は、現状で設定される施工管理条件を踏まえている。この結果、粒度と細粒分の塑性に大差がない礫質土であれば、締固め後の $\rho_d$ 値の差は透水性に大きな影響を及ぼさないことが確認された。球形の粒子の方が透水性は高く、かつ $\rho_d$ 値の増加による透水性の変化が弱い傾向が少なからず見受けられるものの、 $k_{15}$ 値自体は砕石と大差はない(図-3b)。すなわち、礫質土の工学的特性に与える粒子形状の差に関する主たる留意点は、透水性ではなく強度変形特性にあるものと考えられる。

### 4. 強度変形特性の差異

締め固めた礫質土の強度変形特性に及ぼす粒子形状の影響は、平面ひずみ圧縮試験で調べた。各供試体は、締固め曲線(図-3a)を基にそれぞれの $w_{opt}$ に含水調整した後、所定の密度状態となるように突き固めて作成した。供試体の密度条件は、現状で一般的な施工管理値を網羅するように $D_c=90, 95$ および $100\%$ の3段階とした。各供試体でのそれぞれの密度状態における土粒子の骨格構造の強さに注目するため、全ての供試体は飽和化して排水条件で強度変形特性を調べた。拘束圧条件は水平地盤の盛り立てを想定し、初期側圧係数 $K$

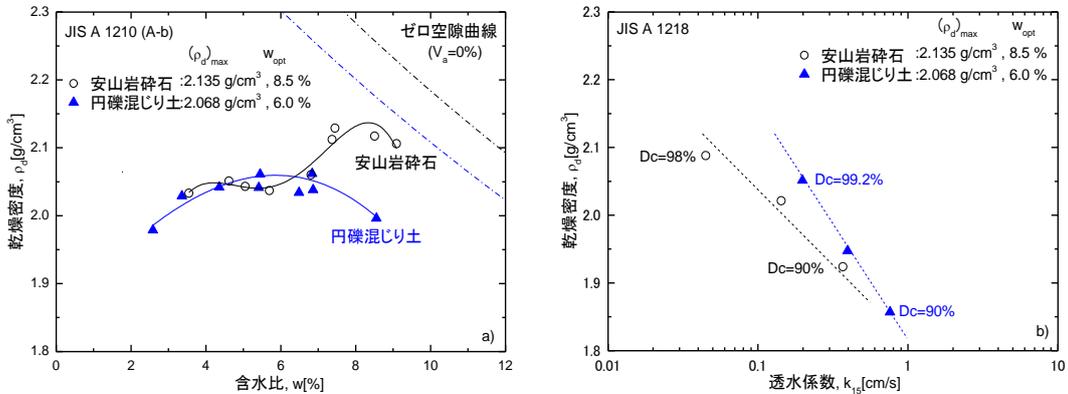


図-3 締固め特性と透水性の差異；a)締固め特性(JIS A 1210, A-b法), b)透水特性(JIS A 1218)

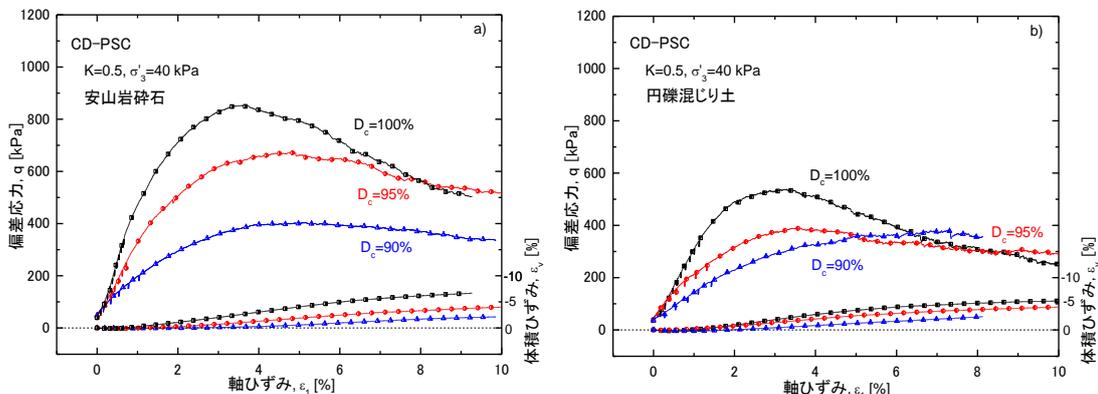


図-4 強度変形特性に及ぼす粒子形状の影響、応力-ひずみ関係；a)砕石, b)円礫混じり土

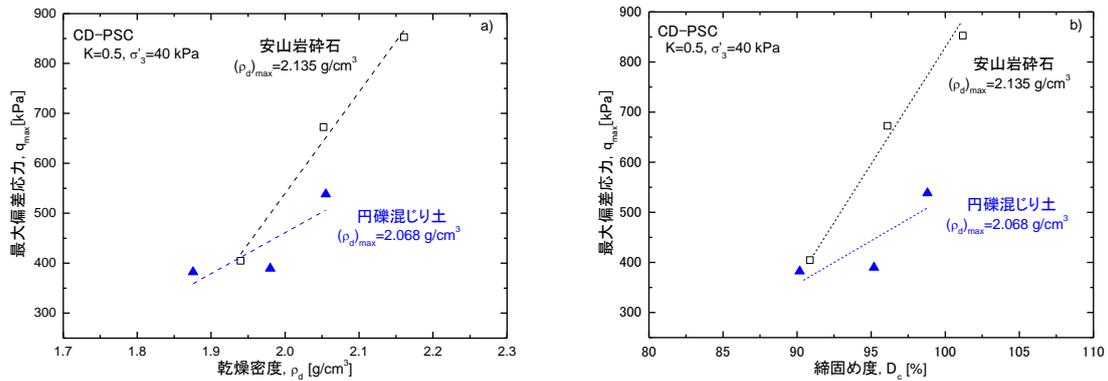


図-5 強度変形特性に及ぼす粒子形状の影響，強度－密度関係；a)乾燥密度，b)締固め度

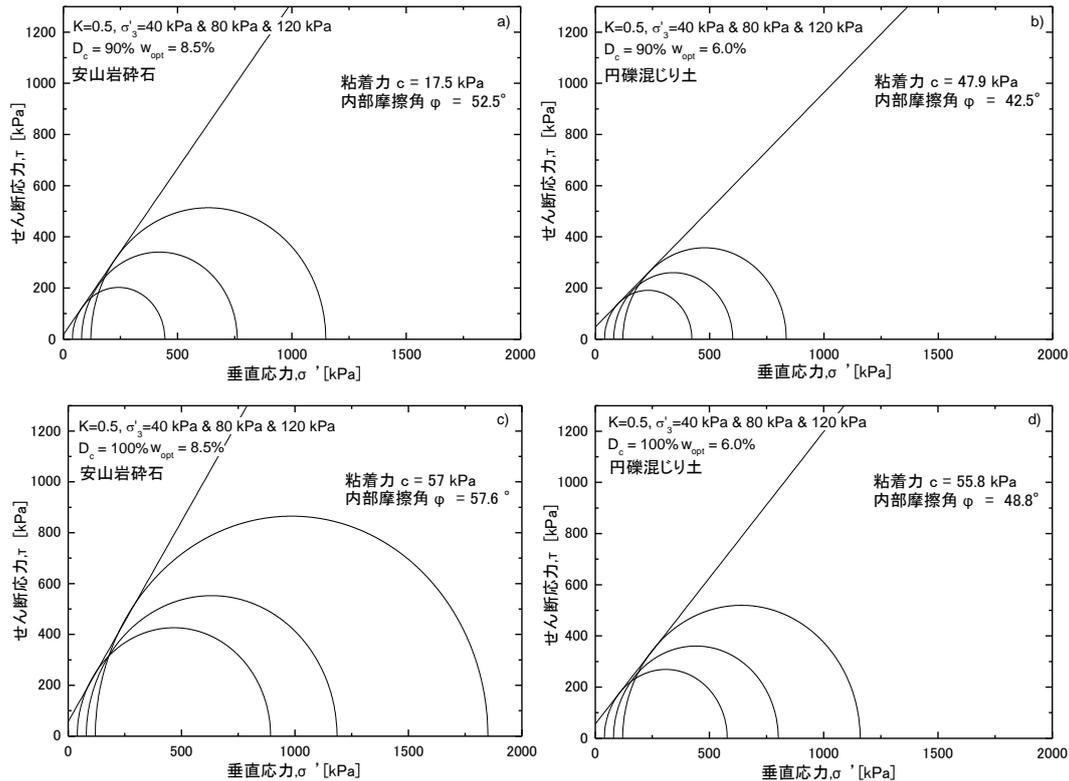


図-6 強度変形特性に及ぼす粒子形状の影響，強度パラメータ；a)&b) $D_c=90\%$ ，c)&d) $D_c=100\%$

( $\sigma'_3/\sigma'_1$ )=0.5，有効拘束圧 $\sigma'_3=40$  kPaとした。

平面ひずみ圧縮試験で得られた偏差応力  $q$  - 軸ひずみ  $\epsilon_a$  - 体積ひずみ  $\epsilon_{ol}$  関係を図-4 に示す。図-4 は碎石と円礫混じり土それぞれに対して  $D_c$  値の増加に伴う強度変形特性の変化をまとめて示している。また、各供試体の最大偏差応力  $q_{max}$  を求め、その時の  $\rho_d$  および  $D_c$  値に対して整理した結果を図-5 に示す。砂礫材の強度変形特性は  $\rho_d$  値の増加によって体積膨張挙動が強くなり、それに伴って最大偏差応力  $q_{max}$  が増加する<sup>2)</sup>。このような定性的な特性は、粒子形状に関係なく本研究で検討した2材料で共通している(図-4)。しかし、定量的には、応力－ひずみ関係では体積変化挙動には大差は見られない一方で、 $q_{max}$  値は碎石と円礫混じり土で明確に異なる(図-4)。密度の増加に伴う強度増加量も、碎石に対して円礫は相対的に弱い(図-5)。碎石と円礫混じり土の強度

の差を、設計用値(内部摩擦角 $\phi$ )として表した結果を図-6 に示す。図-6 は応力の Mohr 円であり、 $D_c=90\%$  および  $100\%$  の密度状態において有効拘束圧 $\sigma'_3=40\sim 120$  kPa の範囲内で求めた結果である。碎石の内部摩擦角は非常に大きく、さらに  $D_c$  値が  $90\%$  から  $100\%$  になると  $\phi$  は  $52.5^\circ$  から  $57.6^\circ$  に大きく増加する。円礫混じり土では  $\phi$  は  $42.5^\circ$  ( $D_c=90\%$ ) および  $48.8^\circ$  ( $D_c=100\%$ ) であった。円礫混じり土でも礫質土で一般的に用いられる値  $35^\circ$  を大きく超えているものの、粒度の等しい碎石と比較するといずれの密度状態でも約  $10^\circ$  の差がある。この差は設計上では表れてこなくても、構造物の実際の安定性には大きな差となる。

上記の碎石と円礫混じり土の強度変形特性の差の要因は、粒子形状の違いによる土粒子間の接触状態の違いにある。すなわち、碎石と比べて円礫は締固めによ

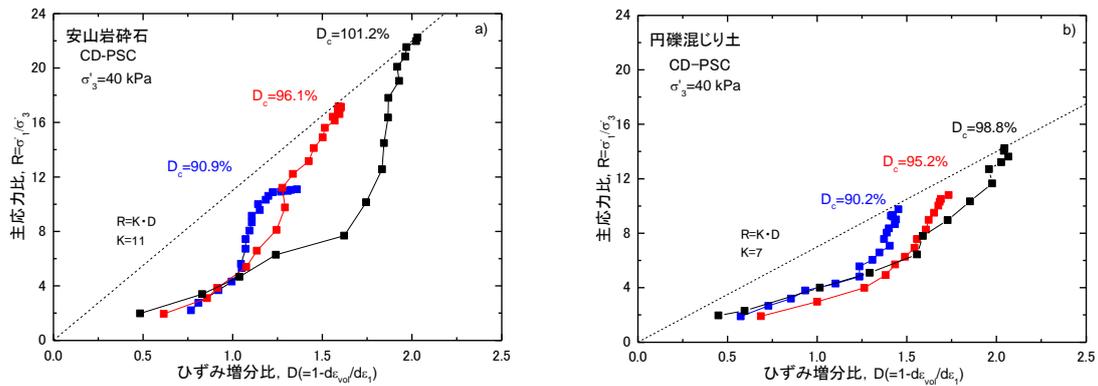


図-7 強度変形特性に及ぼす粒子形状の影響，ストレスーダイラタンシー関係；a)碎石，b)円礫混じり土

る構造化が生じにくく、点接触の状態に近いためにせん断変形時の土粒子の噛み合わせ効果が相対的に低いと考えられる。この差を確認するため、図-4 に示した応力-ひずみ関係をストレスーダイラタンシー関係に表した結果を図-7 にまとめる。図-7 は Rowe の Stress-Dilatancy (主応力比  $R=\sigma_1/\sigma_3$ -ひずみ増分比  $D=1-d\epsilon_v/d\epsilon_1$ ) 関係で、せん断変形過程での体積変化挙動に伴うひずみ硬化の法則性を示した結果である。Stress-Dilatancy 関係では、体積膨張～せん断抵抗力の関係性がせん断変形の過程で一定であれば、 $R-D$  関係は密度や拘束圧値に関係なく線形関係を示す<sup>7)</sup>。また、礫質土の強度変形特性の把握の方法として、本研究では三軸試験ではなく平面ひずみ試験を用いている。平面ひずみ試験ではダイラタンシー角が最大、すなわち潜在的に発揮し得る最大の体積変化挙動となるため、せん断変形過程での体積変化挙動に伴うひずみ硬化の法則性の把握を精度良く行うことができる。図-7 より、碎石ではせん断変形の過程で土粒子がかみ合い、それに伴ってせん断抵抗力が増加している様子が見て取れる。この様な挙動は、図-4 においても  $q-\alpha$  関係でのひずみ硬化挙動の増加でも確認できる。これに対して円礫混じり土では土粒子がかみ合うために必要なせん断変形量は碎石よりも大きくなり、土粒子間の接触状態が向上しても発揮されるせん断抵抗力の増加分は碎石よりも小さいことが分かる。

以上より、良配合の礫質土の工学的性質に及ぼす粒子形状の影響については、特に強度変形特性に明確に表れることが確認された。碎石と比べると円礫は締固めによる構造化が生じにくく、点接触の状態に近いためにせん断変形時の土粒子の噛み合わせ効果が相対的に低くなることが明らかとなった。

## 5. まとめ

土構造物の要求性能に見合った土の選択、土構造物のより合理的な設計・施工の実現に向けて、同粒度の安山岩碎石と円礫混じり土を用いて工学的性質の差異を調べた。土粒子の物理的特性(粒子形状、細粒分の塑

性特性)、締固め特性(締固め、透水係数)および締固めた土の強度変形特性の違いを把握して、その要因について考察した。本研究で得られた重要な知見を以下にまとめる；

- 1) 粒度と塑性特性がほぼ等しい礫質土であっても、締固め特性、締固めた礫質土の強度変形特性等の工学的性質には差が生じる。この要因の一つに、粒子の形状がある。
- 2) 良配合の礫質土においては、細粒分含有率とその塑性特性に大差がなければ、粒子形状の影響は透水性には大きな影響を与えないものと考えられる。
- 3) 粒子形状の違いによる礫質土の構造化の違いは最大偏差応力  $q_{max}$  の値や Stress-Dilatancy 関係、内部摩擦角  $\phi$  に大きく影響することが確認された。粒子形状の違いによる土粒子間の接触状態の差が主な要因として考えられ、碎石と比較すると、円礫粒子は締固めによる構造化が生じにくく、密度増加による強度増加が小さくなる。

## 参考文献

- 1) 植下協, 今井重利, 陶野郁雄, 藤下利男: 講座: 土質分類, 土と基礎, Vol.20, No.11, 1972~Vol.21, No.7, 1973.
- 2) 久野悟郎: 土の締固め-主として道路土工に関連して-, 技報堂全書, 1964.
- 3) 平川大貴, 河原園美幸, 龍岡文夫: 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, 土木学会論文集C, Vol.64, No.2, pp.253-266, 2008.
- 4) 土質工学会編: 粗粒材料の変形と強度, 1986.
- 5) 吉村優治, 小川正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易的な定量化法, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.95-103, 1993.
- 6) 平川大貴: 母岩の違いによる礫質土の工学的性質の差異, 土木学会論文集C, Vol.74, No.2, 202-212, 2018.
- 7) 地盤工学会編: 土の強さと地盤の破壊入門, 1987.