

最大粒径の異なる砕石の変形・強度特性

九州工業大学 学生会員 ○黄 中原 張 磊
九州工業大学 正会員 永瀬 英生 廣岡 明彦
日建設シビル 正会員 片桐 雅明

1. はじめに： 地盤改良工事は埋立て部の外周に護岸を築造してから行われるが、軟弱な海底地盤上に護岸を構築する場合には、基礎地盤の改良を施す必要がある。砕石は粗い粒子が多く含まれるものであり、透水性が良く、液状化しにくい材料であることが確認されている。そのため、近年においては護岸の地盤改良工事における床掘置換材として用いられてきている。そこで、本研究では砕石（0~300mm）で築造された基礎地盤の変形・強度特性を把握するため、最大粒径、供試体の密度および粒度調整方法に着目して砕石の排水三軸圧縮試験を実施した。

2. 試験方法： 試料には福岡県門司で採取された 0~300mm の砕石を用いた。しかし、このような材料の変形・強度特性を室内試験で求める場合、全粒径を対象にすると供試体の大きさはメートルオーダーのものを用意しなければならず、ほとんど実現不可能である。従って、本試験では、最大粒径 53mm や 26.5mm として原粒度を細粒側へ平行移動させる相似粒度と粒径の大きいものを除去した尖頭粒度に調整した。図 1 に各粒度の粒径加積曲線を示す。また、粒径 2.0mm 以下の粒子の密度は 2.721g/cm^3 である。表 1 には各粒度の均等係数および曲率係数を示す。表 1 により、本研究で用いた材料は調整前後とも粒径幅の広い礫質土（ $U_c > 4$ 且つ $1 < U_c' < 3$ ）であると判断できる。

本試験では、直径 15cm、高さ 30cm の円柱供試体を使用した。供試体は、厚さ 1mm のメンブレンを装着したモールド内で水中落下法により 3 層に分けて作製した。また、供試体の密度には、振動台模型実験結果を参照して設定した。すなわち、振動台実験において 1 回加振した試料と同程度のものを Case 3、水中落下法により作製できる供試体で最も緩い状態のものを Case 1、それらの中間値を Case 2 として設定した。供試体は非常に緩い、緩い、中密（Case 1、2、3）の 3 種類のものである。また、有効拘束圧 98kPa、196kPa、294kPa で等方圧密した後、セル圧一定の排水条件で軸ひずみが 15%に達するまで排水三軸圧縮試験を実施した。

3. 試験結果： 図 2 に Case 1 における各粒度での軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係を示す。この図を見ると各粒度とも拘束圧が高いほど q は大きくなることが読み取れる。また、いずれの粒度でも尖頭粒度の方が小刻みな変動を伴い不安定な形状であり、特に最大粒径が 53mm (Case A)の方が変動が大きいことが分かる。これは、粒子の角部が接触している部分が軸圧縮を受けたことで滑るが、尖頭粒度の方がその周りに細かい粒子が少ないので、その分移動が大きくなり、 q の変動も大きくなったものと考えられる。さらに、角部に荷重が集中しているので、その滑りで粒子の角部が破碎したことも原因の一つと考えられる。また、有効拘束圧が同一である場合、各粒度を比較すると尖頭粒度-Case A における $q_{\max}$ が最も大きいことが分かる。この主たる要因としては、尖頭粒度-Case A の骨格構造は粗粒分が最も多く、粒子間のかみ合わせ程度の影響がせん断特性に現れたものと考えられる。すなわち、各粒度とも粒度の悪い、

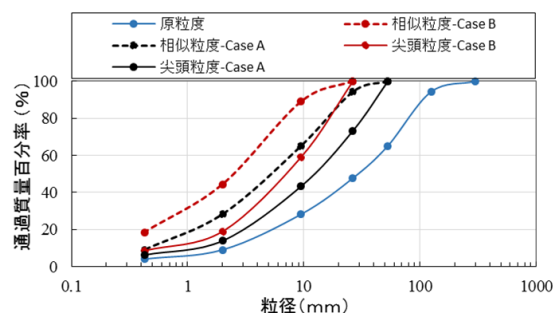


図 1 粒径加積曲線

表 1 均等係数および曲率係数

ケース	粒度	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	最大粒径 (mm)
	原粒度	19.09	1.16	300.0
Case A	相似粒度	16.96	1.35	53.0
	尖頭粒度	13.26	1.08	
Case B	相似粒度	29.58	2.04	26.5
	尖頭粒度	17.58	2.15	

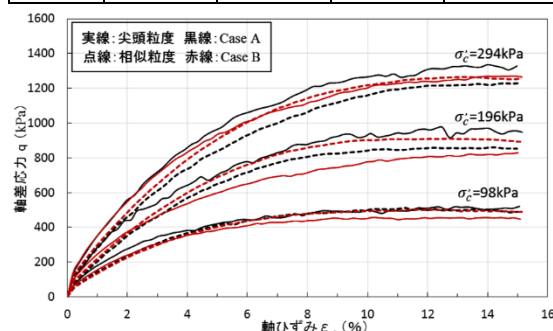


図 2 軸差応力—軸ひずみ (Case 1)

キーワード 砕石, 粒度調整, 強度特性, 変形特性

連絡先 〒804-8550 福岡市北九州市戸畑区水仙町 1-1 永瀬 英生 TEL: 093-884-3111

U_c が小さい尖頭粒度では $\varepsilon_a=15\%$ に至っても q のピークは認められず、強度発現が遅いことがわかる。相似粒度では $\varepsilon_a=15\%$ までに q はピークを示している。なお、この図には示していないが、密になる Case 2 と Case 3 とも同様な挙動を示した。これは前述のように尖頭粒度の方が圧縮することで粒子間の滑りが多く、粒子破砕量も多くなり、粒子の再配列によって強度発現が遅くなるような影響が与えられるものと考えられる。

粒子破砕が起こると変形・強度特性に大きな影響を及ぼすため、試験前後の粒径加積曲線の比較を行った。図 3 に有効拘束圧と粒子破砕率 B_M (Marsal の破砕率) の関係を示す。 B_M とは、各粒度階における粒子破砕前後の残留質量百分率の差の負符号の総和と定義されている。これらの結果を比較すると Case B において、尖頭粒度の B_M の有効拘束圧依存性は相似粒度より大きいことが分かる。これは、尖頭粒度より相似粒度の方が均等係数 U_c が大きく、粒子組成が良好であるため、粒子間接点数が多く、粒子間に応力集中が起こりにくいからと考えられる。また、粒子破砕率 B_M の有効拘束圧依存性は粒度依存性より小さく、最大粒径に関わらず尖頭粒度の方が相似粒度より B_M の値が大きいことが読み取れる。特に、 B_M は尖頭粒度-Case A の場合に最も大きく、相似粒度-Case B の場合に最も小さいことを示している。

図 4 に有効拘束圧と載荷終了時での体積ひずみの関係を示す。ここに、体積ひずみの符号は収縮側をプラス、膨張側をマイナスとしている。各粒度とも供試体の密度が小さくなる、あるいは有効拘束圧が大きくなると体積ひずみ ε_v は正の傾向を示しており、体積収縮の傾向があることが分かる。なお、密な砂のように相似粒度-Case A における Case 3 では有効拘束圧に関わらず体積ひずみは負の値であり、せん断に伴って体積膨張を起こしている。また、有効拘束圧が 200kPa に超える場合には相似粒度-Case A の Case 3 を除外して各ケースとも体積ひずみは緩い砂のような正の値であることが分かる。

最大軸差応力より算出した内部摩擦角 ϕ_d および粘着力 c_d を表 2 に示す。この表を見ると尖頭粒度-Case B を除いて各粒度とも内部摩擦角 ϕ_d は密になるにつれて増加していることがわかる。また、 ϕ_d は全ての場合において 40° より大きい値を示している。通常使用されている捨石材の強度定数は標準値が 35° と定められているため、設計上は基準を満足できていることが分かる。また、粘着力 c_d に関しては、本来は設計上考慮しないが、表 2 を見ると本研究で得られた c_d の値はすべて正の値であり、 $c_d=0$ の時の内部摩擦角 ϕ_0 は ϕ_d より大きくなるため、結果として ϕ_d は安全側に求められることが確認される。Marachi らの研究によると同一密度によるせん断強度は最大粒径が大きくなるにしたがって低下することが報告されている。本研究は試験装置の制約上、相似粒度と尖頭粒度の概念を用い、最大粒径が 53mm や 26.5mm になるように粒度調整した試料を用いて実施した。その研究結果に基づいて本研究のように最大粒径が 26.5mm から 300mm になった時の ϕ_0 の減少量は大きく見積っても 5° 程度であることが分かる。従って、本研究において得られた ϕ_d の値が 40° 以上であり、設計基準 35° を満足していると認められる。

4. まとめ： 本研究では粒径調整後の砕石を対象として排水三軸試験を実施し、以下の知見が得られた。

1) 相似粒度より尖頭粒度の方が粒子間の滑りや粒子破砕量が多くなり、粒子の再配列によって強度発現が遅くなるような影響が与えられることが分かる。また、原粒度は粒径幅が広く、 U_c が大きいと、その影響が少ないと考えられる。2) 各粒度とも供試体の密度が小さくなる、あるいは有効拘束圧が大きくなると体積収縮の傾向があることが分かる。3) ϕ_d の値が 40° 以上であり、設計基準 35° を満足していると認められる。

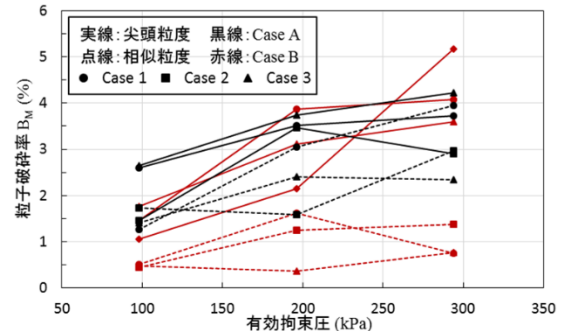


図 3 粒子破砕率と有効拘束圧の関係

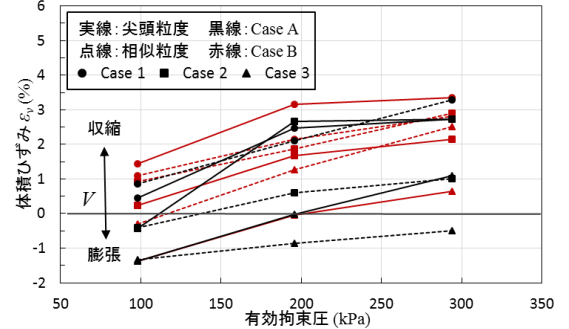


図 4 体積ひずみと有効拘束圧の関係

表 2 強度定数

試験ケース	Case A $D_{max}=53.0 \text{ mm}$		Case B $D_{max}=26.5 \text{ mm}$	
	$\phi_d (^\circ)$	$C_d (\text{kN/m}^2)$	$\phi_d (^\circ)$	$C_d (\text{kN/m}^2)$
相似 Case 1	40.3	34.1	41.4	28.2
相似 Case 2	43.9	12.4	41.6	22.9
相似 Case 3	44.4	29.0	43.0	20.2
尖頭 Case 1	42.5	27.4	42.4	8.1
尖頭 Case 2	43.9	18.2	42.1	25.5
尖頭 Case 3	44.9	27.7	42.1	38.7