



## 砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響

上本, 雄也

瀧谷, 啓

橋元, 洋典

川尻, 峻三

---

**(Citation)**

地盤工学ジャーナル, 6(2):181-190

**(Issue Date)**

2011

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

©2011 公益社団法人 地盤工学会

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003309>



## 砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響

上本 雄也<sup>1</sup>, 濵谷 啓<sup>2</sup>, 橋元 洋典<sup>1</sup>, 川尻 峻三<sup>3</sup>

1 神戸大学大学院・工学研究科 博士前期課程市民工学専攻

2 神戸大学大学院・工学研究科 市民工学専攻

3 鉄道総合技術研究所

### 概 要

粒径の大きな礫を含んだ実盛土の変形・強度特性を求めるためには、原粒度試料を用いた大型三軸試験の実施が望ましいが、原粒度試料を用いた試験には数多くの制約があるため、粒度調整した小型供試体を用いた室内試験を実施するのが一般的である。一方、盛土の締固め管理には締固め度  $D_c$  を用いるが、盛土材の粒度を調整すると試料の変形・強度特性ばかりでなく締固め特性も変化する。したがって、実盛土の変形・強度特性を正しく求めるためには、締固め管理密度に相当する原粒度試料および各種室内粒度調整試料それぞれのせん断特性を明らかにした上で、適切な室内粒度調整法を選定する必要がある。そこで本研究では、兵庫県西宮市の宅地造成現場から採取した粒子形状が角張った砂礫盛土材および兵庫県南西端部を流れる千種川より採取した円礫が卓越した砂まじり礫盛土材のそれぞれについて、原粒度および異なる3通りの方法で粒度調整した試料を用いた一連の排水三軸圧縮試験を実施し、締固め特性およびせん断時の変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響を明らかにしている。

キーワード：粗粒材、盛土、締固め、せん断強度、室内試験

### 1. はじめに

盛土構造物は、他の土木構造物と比較して環境および経済面で優れている点が多いため、道路、鉄道等の多方面で用いられている。近年、環境および経済的な配慮から、現地発生土を盛土材として使用する工事が増加しており、大粒径の礫を含む幅広い粒度分布を有する土材料を用いるケースが増えている。大粒径の礫を含む盛土材の変形・強度特性を求めるためには、原粒度試料を用いた超大型三軸試験を実施することが望ましい。ところが、このような試験を実施するには、試験装置、試験時間、費用、労力等の数多くの制約があるため、便宜的に小型の粒度調整試料供試体を用いた室内試験で代用する。このときの粒度調整法は、原粒度材料の変形・強度特性を正しく再現できる粒度分布に調整することが望ましく、そのためには、原粒度試料と室内粒度調整試料との強度の対応関係が、実盛土の締固め管理値に照らして定量的に明らかでなければならない。一方、室内粒度調整法として、原粒度試料から所定の粒子径よりも大きな粒子を除外した「せん頭粒度試料」、粒度分布特性を変えずに全体的に粒子径を小さくした「相似粒度試料」および礫含有量を揃えて粒度調整した「礫粒度補正試料<sup>1)</sup>」、等がある。

これまで、原粒度試料と粒度調整試料の変形・強度特性を比較した研究は数多いが、「粒子サイズ効果<sup>2)</sup>」により、

粒子サイズが大きいほど粒子破碎量が多くなり、ダイレイタシー量が小さくなつて内部摩擦角が小さくなる<sup>3)</sup>、逆に粒径が大きい程強度が大きくなる<sup>4)</sup>、粒度によらず強度差は生じない<sup>5)</sup>、礫粒度調整試料と原粒度試料の強度がほぼ等しい<sup>6)</sup>、せん断強度は、粒子破碎特性に依存するストレスダイレタンシー関係に支配される<sup>7,8)</sup>、等、いまだに統一的な結論が見いだせていない。

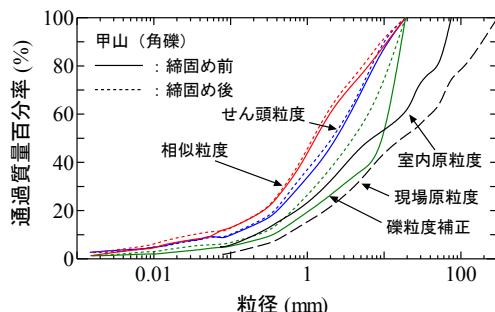
盛土の締固め管理には、締固め度  $D_c$  を用いるが、土材料の粒度を調整すると試料の締固め特性が変化する。したがって、原粒度を用いた現場の実盛土の強度特性を正しく求めるためには、原材料の締固め管理密度に相当する室内粒度調整試料の強度を推定して、所定の強度をクリアしているかどうかを的確に判断する必要がある。そのためには、各種室内粒度調整試料それぞれの締固め特性およびせん断特性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、排水三軸圧縮試験から求められる( $c_d, \phi_d$ )を設計強度として用いる盛土築造予定現場から採取した2種類の砂礫の原粒度試料を用いた大型排水三軸圧縮試験および前述した異なる3通りの方法で粒度調整した試料を用いた中型排水三軸圧縮試験を実施し、試料の粒度特性が締固め特性とせん断時の変形・強度特性、および両者の関係に与える影響を詳細に検討した。

表 1 試料の物理特性(甲山)

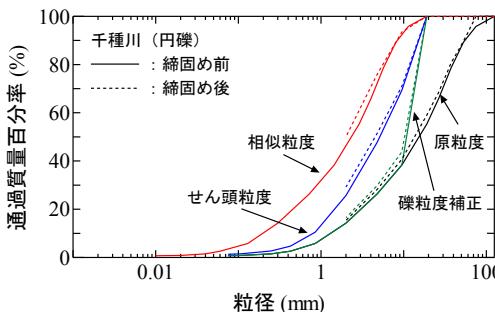
試料	甲山試料(角礫)			
土粒子密度・母岩・形状	$\rho_s = 2.629 \text{ g/cm}^3$ 形状: 花崗岩・角レキ			
粒度	原粒度(現場)	せん頭	相似	礫粒度補正
最大粒径 $D_{\max}(\text{mm})$	75(300)	19.0	19.0	19.0
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	7.2(17.3)	4.1	1.3	9.2
均等係数 $U_c$	83.7(75.9)	19.3	75.9	22.4

表 2 試料の物理特性(千種川)

試料	千種川(円礫)			
土粒子密度・母岩・形状	$\rho_s = 2.758 \text{ g/cm}^3$ 形状: 砂岩・円レキ			
粒度	原粒度	せん頭	相似	礫粒度補正
最大粒径 $D_{\max}(\text{mm})$	125.0	19.0	19.0	19.0
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	16.0	5.1	2.3	10.7
均等係数 $U_c$	16.3	8.6	16.3	8.4



a) 甲山試料



b) 千種川試料

図 1 試験に用いた試料の粒度分布

## 2. 試験方法

### 2.1 試 料

本研究で用いた試料は、兵庫県西宮市甲山から採取した花崗岩質の砂質礫(以後、甲山試料)、兵庫県南西端部を流れる千種川より採取した砂まじり礫(以後、千種川試料)およびこれらをそれぞれ異なる3種類に粒度調整した試料である。用いた試料の粒径加積曲線を図1に示す。試料は地盤工学会基準(JGS 0530-2000)「粗粒度の三軸圧縮試験の供試体作製・設置方法」<sup>9)</sup>に準じて、それぞれの試料の最大粒径が供試体直径の1/5程度以下となるようにした。甲山試料は、西宮市の宅地造成工事に使用され、施工時の締固め管理基準は、 $D_c=90\%$ 以上である。表1および表2は使用した試料の物理特性、写真1は、実験に用いた試料群である。甲山試料は花崗岩を母材とした角張った礫、す

表 3 試験条件(甲山試料)

供試体サイズ	$\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$	$\phi 300\text{mm} \times h600\text{mm}$
粒度調整法	せん頭粒度、相似粒度、礫粒度補正	原粒度
目標締固め度(%)	85, 90, 95, 100	
有効拘束圧(kPa)	50, 100, 150	50, 100, 200

表 4 試験条件(千種川試料)

供試体サイズ	$\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$	$\phi 300\text{mm} \times h600\text{mm}$
粒度調整法	せん頭粒度、相似粒度、礫粒度補正	原粒度
目標締固め度(%)	90, 98	
有効拘束圧(kPa)	200, 400, 800	



a) 甲山試料



b) 千種川試料

写真 1 試験試料



a) 大型三軸

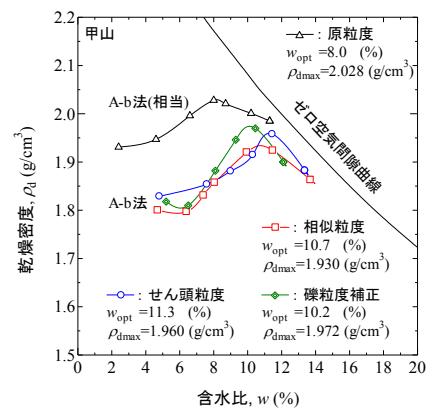


b) 中型三軸

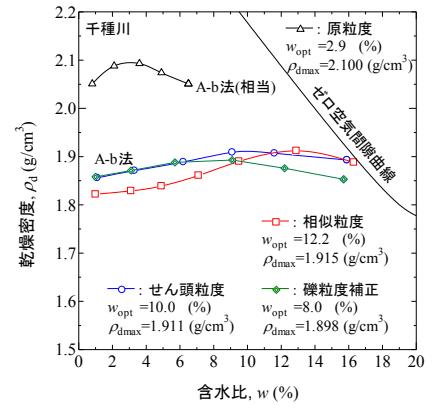
写真 2 使用した三軸試験装置

なわち角礫であり、千種川試料は河床から採取した角の取れた円礫である。表3および表4に試験条件を示した。甲山試料および千種川試料は、現場において、それぞれ最大盛土高さ5m程度および50m程度の実盛土材料として使用されるため、現場の応力状態に対応するよう最大拘束圧150kPaおよび800kPaに設定した。原粒度試料を用いた試験では、大型三軸圧縮試験機(供試体の公称直径 $\phi=300\text{mm}$ 、高さ $h=600\text{mm}$ )を使用した。一方、最大粒径を19mmに調整した「せん頭粒度試料」および「礫粒度補正試料」、

さらに平均粒径で比較すると甲山試料で 1.1mm (調整試料) / 7.2mm(原粒度), 千種川試料で 2.3mm / 16mm ≈ 1/7, の「相似粒度試料」(図 1 参照) の 3 種類の試料を用い試験には, 中型三軸圧縮試験機(供試体の公称直径 $\phi = 100\text{mm}$ , 高さ $h = 200\text{mm}$ )を用いた一連の排水三軸圧縮試験を実施した。供試体は, 含水比を最適含水比に調整した試料を最大粒径に応じて直径 100mm あるいは 300mm のモールドを用い 5 層および 8 層に分けて動的に締固めることにより作製した。本研究で用いた相似粒度および礫粒度補正粒度試料は, 19~9.5mm, 9.5~4.75mm, 4.75~2mm, 2mm 以下の 4 種に分級した試料を目標粒度となるように配合した。礫粒度補正試料は, 許容最大粒径より粒径の大きな試料を制限された粒径内の最も大きな粒径で置き換えたものであり, 本研究では 19mm 以上の礫を 9.5mm~19mm の礫に置き換えた。甲山の実際の盛土に用いられた現場での原粒度試料は, 最大粒径が 300mm であったが, 三軸供試体の直径が 300mm であったため, 現場原粒度に対する $D_{\max}$ 125mm の相似粒度の 53mm 以上の礫分を 53~75mm で置換し, この修正相似粒度 ( $D_{\max}$ 75mm) を図 1 に示す室内での原粒度試料とした。しかし, 甲山試料では, 現場での原粒度試料に対する相似粒度を定義しているため, 厳密には室内での原粒度試料の相似粒度とはなっていない。同様に礫粒度補正試料も現場での原粒度試料に対する礫補正を行ったため, 厳密には室内での原粒度試料に対する礫補正試料とはなっていない。また, 目標通りの割合で配合したにもかかわらず 9.5mm 以下の粒度曲線が現場原粒度と厳密に一致していない。これは 4.75~2mm の礫の表面の凹凸に付着した細粒分の存在のため, さらに 2mm 以下の試料はそれ以上細かく分級しなかつたために, 原粒度と比較して所定値よりも多くの細粒分が含まれてしまったものと考えられる。一般的にせん頭粒度試料は, 粒度調整法としては最も簡便であるため, 頻繁に採用されている粒度調整法である。しかしながら, 原粒度から除外した礫材料の割合が多い場合には, 原粒度試料と比較して相対的に細粒分が多くなるため, 力学特性が原材料と異なる可能性が懸念される。相似粒度試料は, 原粒度試料と最大粒径は異なるものの締固め特性に影響を及ぼすといわれている均等係数が変わらず, 加えて相対的な粒子の大小関係が同一であるため, 幾何学的粒子配列には大差がないと考えられている。しかしながら, 粒径加積曲線は全体的に左上に移動し, 力学的特性を大きく支配する細粒分が増加するために, 力学特性に影響を与えることが懸念される。松本ら<sup>1)</sup>は, 細粒分が多い試料の場合, 許容最大粒径より大きな試料を制限された粒径内の最も大きな粒径で置き換えるオーバーサイズ置換法(本論文では, 矿粒度補正試料と記す)の考えを提案している。一方, 小高ら<sup>6)</sup>は, 矿分占有率(重量比)を変えない粒度調整を行うことで, 小型三軸試験から得られる変形・強度特性が大型三軸試験の結果に近くなるという結果を得ている。本研究では, 異なる 3 種類の粒度に調整したそれぞれの試料において, 異なる



a) 甲山試料



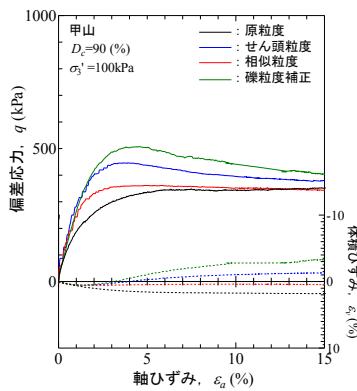
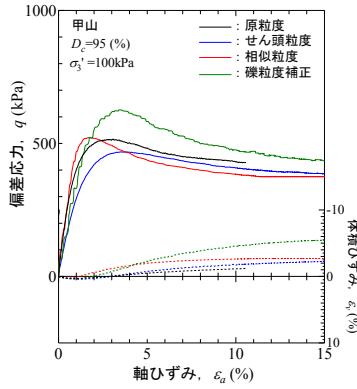
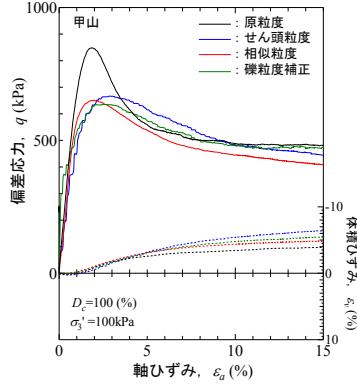
b) 千種川試料

図 2 試験に用いた試料の締固め曲線

$D_c$ で作製した供試体を用いた室内粒度調整試料の結果と原粒度試料の試験結果とを比較検討した。

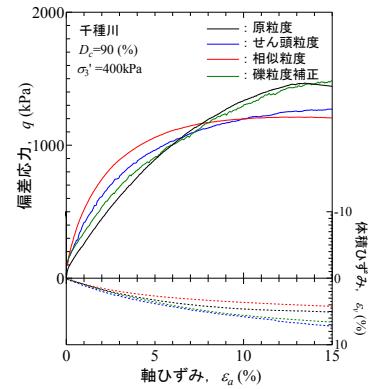
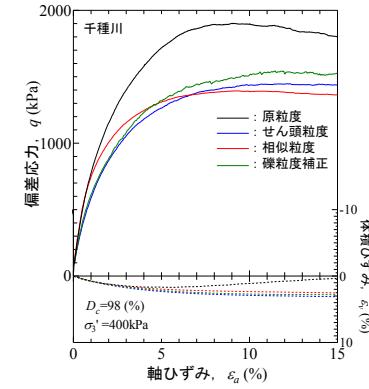
## 2.2 三軸圧縮試験および締固め試験

写真 2a)は, 大型三軸試験装置および供試体である。一方, 写真 2b)は, 中型三軸圧縮試験装置である。いずれの試験においても, 所定の  $D_c$  となるように締め固めた供試体を三軸セル内に設置後, 間隙空気を二酸化炭素に置き換え背圧(200kPa)を加えることで供試体を飽和させた後, 所定の有効拘束圧  $\sigma_3$  まで段階的に等方圧密し, 軸ひずみ速度 0.1%/min(一定)で排水せん断した。大型および中型供試体は, それぞれ 8 層および 5 層に分けて動的に締固めて作製した。三軸圧縮試験は, 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  が 15%に達した時点で試験を終了した。粒度調整試料(最大粒径 19mm 以下の突固め試験には, 日本工業規格 (JIS A 1210-2009)「突固めによる土の締固め試験方法」<sup>10)</sup>で定められた直径 100mm のモールドを使用し, 原粒度試料の突固め試験には, 最大粒径の値に配慮して, これよりもサイズの大きい直径 300mm 高さ 350mm のモールドを使用し標準プロクターの締固めエネルギーになるよう質量 10kg のランマーを落下高さ 50cm から一層 56 回で 5 層に分けて締め固めた。なお突固め試験には, 甲山, 千種川それぞれの試料を用いた実際の盛土は宅地盛土であることを考慮し A-b 法<sup>10)</sup>を採用した。

a)  $D_c = 90\%$ b)  $D_c = 95\%$ c)  $D_c = 100\%$ 図3 偏差応力  $q$  (= $\sigma_1 - \sigma_3$ )～体積ひずみ～軸ひずみ関係

### 3. 実験結果

図2は、締固め曲線の比較である。甲山試料の原粒度試料の最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=2.028g/cm^3$ であり、他の粒度調整試料と比較して最も大きな値を示している。一方、最適含水比は $w_{opt}=8\%$ であり、最小値を示している。せん頭粒度試料と礫粒度補正試料の $\rho_{dmax}$ は同程度であり、粒径の小さい相似粒度試料の $\rho_{dmax}=1.930g/cm^3$ が最小である。一方、千種川試料の原粒度試料の最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=2.100g/cm^3$ であり、甲山試料と同様に、他の粒度調整試料と比較して最も大きな値を示している。一方、最適含水比 $w_{opt}=2.9\%$ であり、最小値を示している。せん頭粒度試料と相似粒度試料の $\rho_{dmax}$ は同程度であり、礫粒度補正試料の $w_{opt}$ が粒度

a)  $D_c = 90\%$ b)  $D_c = 98\%$ 図4 偏差応力  $q$  (= $\sigma_1 - \sigma_3$ )～体積ひずみ～軸ひずみ関係

調整試料の中で最小値を示している。甲山試料と千種川試料の締固め曲線を比較すると、甲山試料の方がより明確なピークを示しており、千種川試料は締固め後の乾燥密度に及ぼす初期含水比の影響が小さく、ピークが不明確でならかな曲線となっている。甲山試料では、最大粒径75mmの試料の場合、試料に介在する粒径の大きな礫の影響により、最大乾燥密度が相対的に大きくなり、最適含水比が小さくなったものと考えられる。一方、最大粒径19mmの千種川試料では、均等係数が小さいために締固め曲線はフラットになるが、最大粒径が75mmの試料では、粒径の大きな礫が介在するために粒度分布が改善され、締固め曲線が上に凸となったものと考えられる。図1に示す実線および破線は、それぞれ締固め試験前と後に測定した粒度分布である。甲山試料では礫分の多い礫粒度補正試料において締固め時に粒子破碎が生じ、締固め後の礫分含有量が大幅に減少している。一方、せん頭粒度および相似粒度試料では、粒度分布は締固め前後で殆んど変らない。一般に、大粒子を含む原粒度試料および礫調整試料では、粒子破碎が生じやすいと考えられる。事実、礫粒度調整試料における粒子破碎は顕著である。本実験においては原粒度試料の粒子破碎の影響を測定していないが、原粒度試料も同様に粒子破碎が顕著であると推定される。千種川試料においては、目開き2mm以上のふるいを用いて試料の粒度分布の変化を調べた結果、粒度調整法の違いによらず締固め前後で粒度分布は殆ど変わっていない。図3および図4は、偏差応力

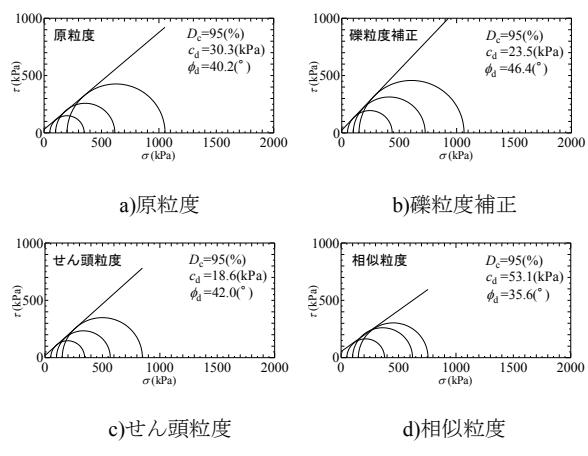


図 5 破壊時のモールの応力円群 (甲山試料)

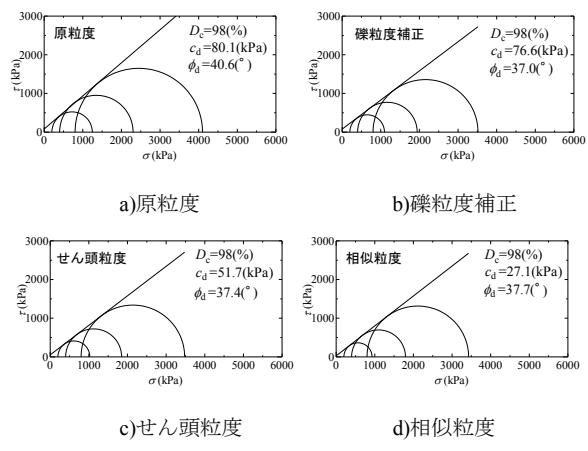


図 6 破壊時のモールの応力円群 (千種川試料)

力  $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$  ~ 体積ひずみ  $\varepsilon_v$  ~ 軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係である。表 5 および表 6 は、実験結果のまとめである。試料によらず共通に、締固め度  $D_c$  が大きくなるにつれ破壊時の軸ひずみ量が小さくなり  $q_{max}$  が大きくなり、ピーク時の体積膨張割合が大きくなる傾向を示すことが分かる。粒度分布の影響に関しては、甲山試料においては  $D_c$  によらず相似粒度試料が最も小さな強度を示していること、せん頭粒度および礫粒度補正試料と原粒度試料の強度が近いこと、が分かる。千種川試料では、 $D_c=90\%$  では礫粒度補正試料と原粒度の強度が近いこと、 $D_c=98\%$  では原粒度の強度が最も高く、その他の粒度調整試料が概ね同じ強度を示していることが分かる。図 5 および図 6 は、破壊時 (= ピーク強度発現時) の強度定数を求めた例である。粒度によらず破壊時のモールの応力円群の接線は、直線でうまく近似できることが分かる。

#### 4. 考察

##### 4.1 内部摩擦角に及ぼす粒度分布の影響

図 7 および図 8 は、甲山試料および千種川試料の  $c_d$  ~  $D_c$  関係および  $c_d$  ~  $\rho_d$  関係に及ぼす粒度分布の影響である。図 7 を見るとばらつきはあるものの、試料によらず、密度図 9 および図 10 は、それぞれ甲山試料および千種川試料の  $\phi_d$  ~  $D_c$ 、 $\phi_d$  ~  $\rho_d$  関係に及ぼす粒度分布の影響である。図

表 5 破壊時のモール円群より求めた排水せん断強度定数 (甲山試料)

$D_c$ (%)	せん頭粒度		相似粒度		礫粒度補正		原粒度	
	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$
85	4.8	36.7	22.5	31.9	18.8	35.5	-	-
90	33.7	36.3	29.5	33.5	32.1	41.2	4.4	38.7
95	18.6	42.0	53.1	35.6	23.5	46.6	30.3	40.2
100	55.0	41.2	24.2	44.9	46.6	44.2	47.9	47.7

表 6 破壊時のモール円群より求めた排水せん断強度定数 (千種川試料)

$D_c$ (%)	せん頭粒度		相似粒度		礫粒度補正		原粒度	
	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$	$c_d$ (kPa)	$\phi_d(^{\circ})$
90	56.4	34.6	32.2	34.8	81.6	35.0	42.9	38.7
98	51.7	37.4	27.1	37.7	76.6	37.0	80.1	40.6

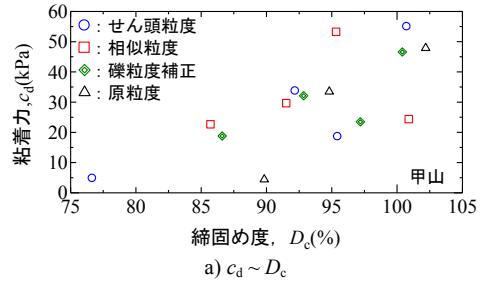
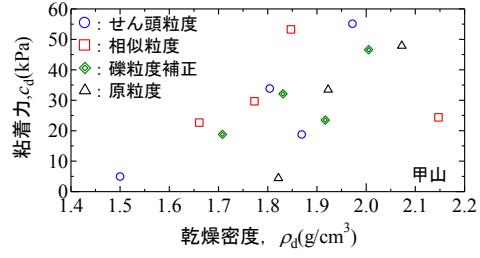
a)  $c_d \sim D_c$ b)  $c_d \sim \rho_d$ 

図 7 見かけの粘着力～締固め度、乾燥密度の関係 (甲山試料)

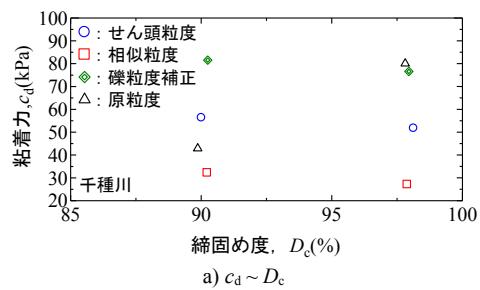
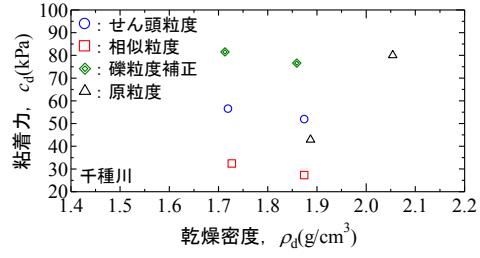
a)  $c_d \sim D_c$ b)  $c_d \sim \rho_d$ 

図 8 見かけの粘着力～締固め度、乾燥密度の関係 (千種川試料)

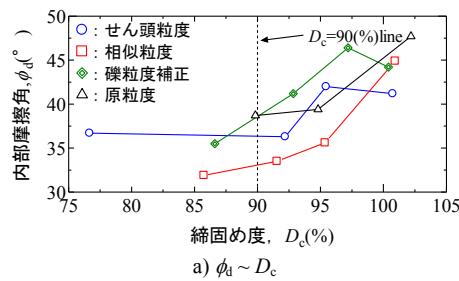
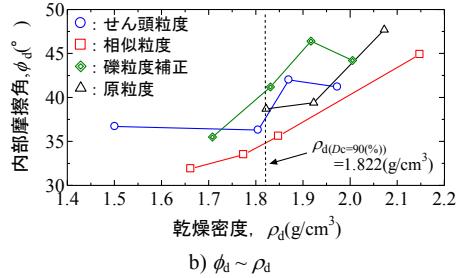
a)  $\phi_d \sim D_c$ b)  $\phi_d \sim \rho_d$ 

図 9 内部摩擦角～締固め度、乾燥密度の関係（甲山試料）

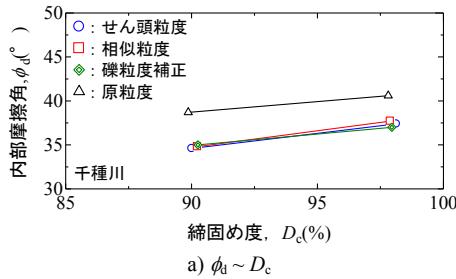
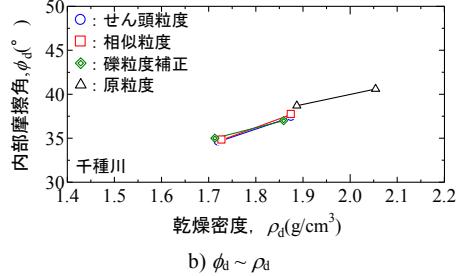
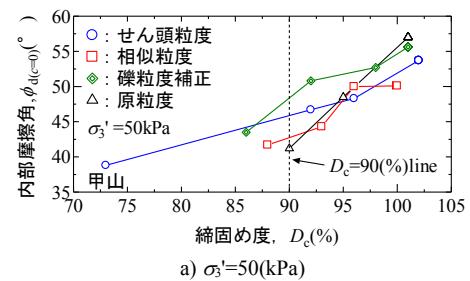
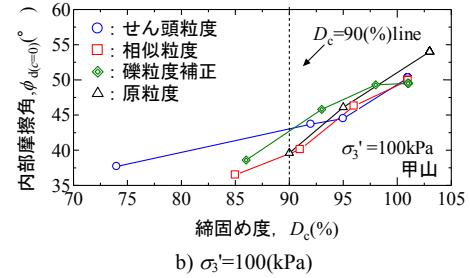
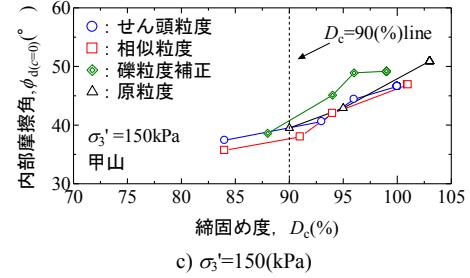
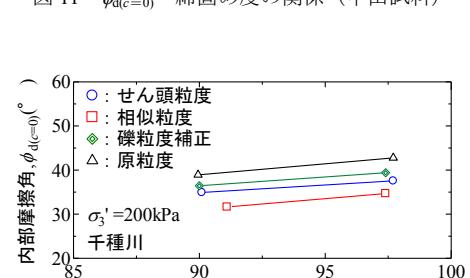
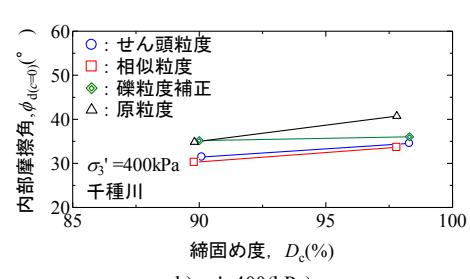
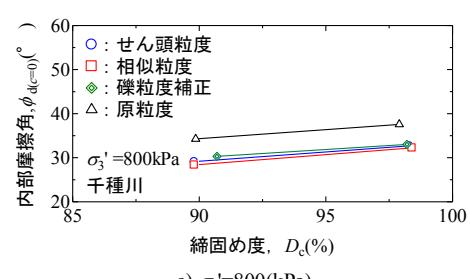
a)  $\phi_d \sim D_c$ b)  $\phi_d \sim \rho_d$ 

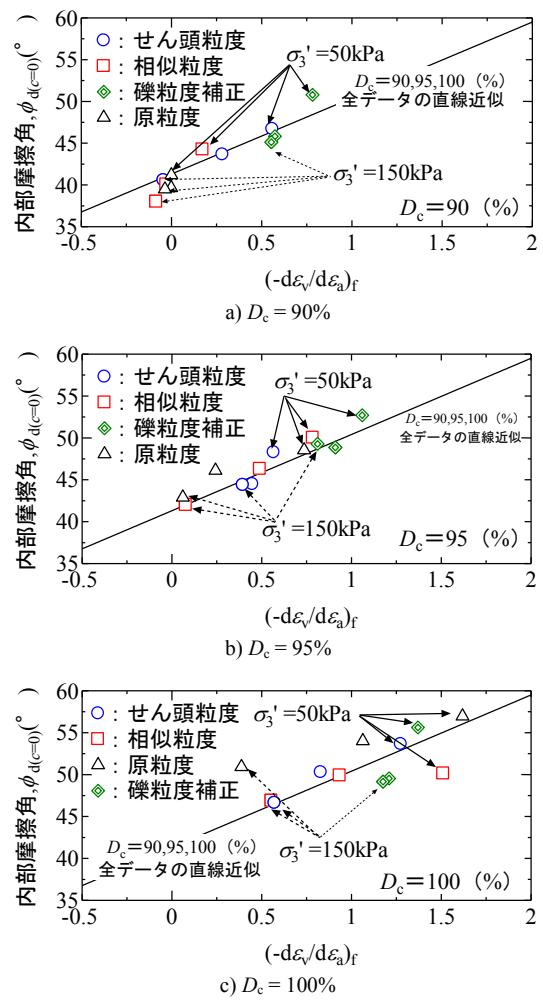
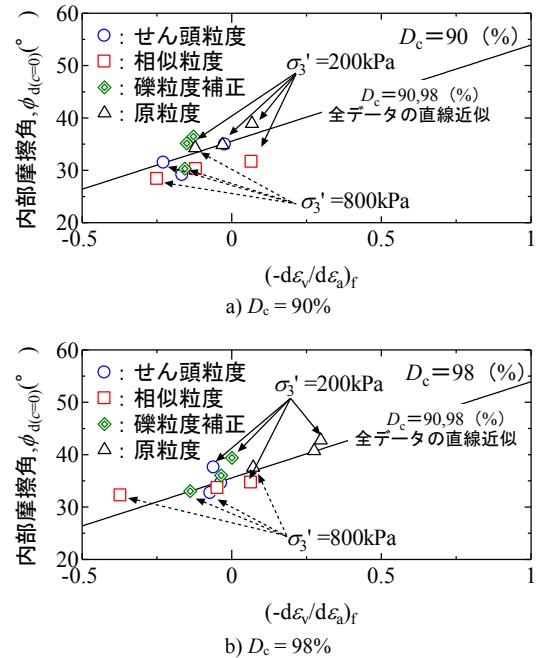
図 10 内部摩擦角～締固め度、乾燥密度の関係（千種川試料）

9より、甲山試料においては  $D_c$  あるいは  $\rho_d$  が同じ供試体を比較すると、相似粒度試料が最も小さい  $\phi_d$  の値を示すこと、一方礫粒度補正試料が最も大きい内部摩擦角  $\phi_d$  の値を示すことがわかる。また、甲山試料においては、実務で頻繁に採用される「せん頭粒度」を試験粒度とした三軸圧縮試験から求まる強度定数が原粒度の結果に近いといえる。一方、図 10 に示すように、千種川試料の  $D_c$  あるいは  $\rho_d$  が同じ供試体では、原粒度試料が最も大きい値を示し、その他の粒度調整試料では粒度によらず概ね同程度の値を示している。すなわち、粒度調整試料群の強度定数は、原粒度よりも小さい。角礫の甲山試料は、円礫の千種川試料と比較して、締固め度が大きくなると粒子のかみ合せがより顕著となり、内部摩擦角が急激に大きくなる。これは、後述する図 13 および図 14 に示す内部摩擦角～ダイレイターンシーカー関係からも明らかであり、角礫の甲山試料の場合には、円礫の千種川試料と比較して、締固め度が 90%を超える。

a)  $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$ b)  $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ c)  $\sigma'_3 = 150 \text{ kPa}$ a)  $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$ b)  $\sigma'_3 = 400 \text{ kPa}$ c)  $\sigma'_3 = 800 \text{ kPa}$ 図 12  $\phi_{d(c=0)}$ ～締固め度の関係（千種川試料）

るとダイレイタンシー量の増加がより大きくなっている。図 11 および図 12 は、それぞれ甲山試料および千種川試料の各試験の破壊時のモールの応力円に対して  $c = 0$  として求めた  $\phi_{d(c=0)} \sim D_c$  関係に及ぼす粒度分布の影響である。試験の違いによらず、 $D_c$  が 85~100% の範囲では  $D_c$  の増加に伴い、 $\phi_{d(c=0)}$  が徐々に大きくなることが分かる。龍岡ら<sup>11)</sup>は、いくつかの盛土材料に関して同様の結果を報告している。また、甲山試料においては  $D_c$  が同じ供試体では、ばらつきはあるものの相似粒度試料が最も小さな  $\phi_{d(c=0)}$  を示し、礫粒度補正試料が最も大きな  $\phi_{d(c=0)}$  の値を示しているが、両者の差はそれ程顕著ではない。一方、千種川試料では、原粒度試料が最も大きな値を示し、粒度調整試料群の中では、相似粒度試料が最も小さな  $\phi_{d(c=0)}$  の値を示し、礫粒度補正試料が最も大きな値を示している。なお、有効拘束圧や締固め度の変化により、粒度調整試料の  $\phi_{d(c=0)}$  が原粒度の  $\phi_{d(c=0)}$  に収束する傾向は見られなかった。

図 13 および図 14 は、それぞれの試料の  $\phi_{d(c=0)}$  と破壊時の軸ひずみ～体積変化の関係の傾き  $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_f$  (ここで、 $d\varepsilon_v$  は体積変化増分であり圧縮を正) の関係を示したものである。この関係には試料によらず良い相関が見られ、i)  $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_f$  が大きいほど、すなわちダイレイタンシー傾向が顕著であるほど  $\phi_{d(c=0)}$  が大きくなること、ii) この  $\phi_{d(c=0)} \sim (-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_f$  関係は、試料の粒度分布によらないこと、iii) 同じ密度および拘束圧では相似粒度試料および礫粒度補正粒度試料のダイレイタンシー量が、それぞれ最小および最大であること、iv) 同じ密度および拘束圧では、拘束圧が大きくなるとダイレイタンシー量が（よって強度も）減少すること、が分かる。i)～iii)に関しては、試料の粒径効果によるものと考えられ、比較的大きな粒径の礫を多く含んだ試料では、ダイレイタンシーが顕著となり、礫材料の噛み合せ効果によって  $\phi_{d(c=0)}$  が大きくなったものと考えられる。ここで図 9 を見ると、「当該盛土（原粒度試料）の締固め管理値  $D_c = 90\%$  と同じ  $D_c = 90\%$  における室内粒度調整試料の内部摩擦角（図 9a）および当該盛土（原粒度試料）の締固め管理値  $D_c = 90\%$  に相当する  $\rho_a = 1.822 \text{ g/cm}^3$  における室内粒度調整試料の内部摩擦角（図 9b）」の比較を示している。この図から、今回の実験の範囲では、設計用の内部摩擦角  $\phi_d$  に関しては、礫粒度補正試料 > 原粒度試料 > せん頭粒度試料 > 相似粒度試料、となっている。図 11 中にも当該盛土（原粒度試料）の締固め管理値  $D_c = 90\%$  と同じ  $D_c = 90\%$  における室内粒度調整試料の  $\phi_{d(c=0)}$  の比較を示しているが、 $\phi_{d(c=0)}$  の大小関係については、概ね礫粒度補正試料 > 原粒度試料 > せん頭粒度試料 > 相似粒度試料の順となっている。以上の事柄より、設計用の内部摩擦角を比較した結果より礫粒度補正粒度試料は、大粒径の礫の含有割合が大きくなるため、i) 矶の噛み合せ効果により、原粒度試料の強度定数を若干過大評価してしまうこと、逆に ii) せん頭粒度試料では、礫の含有割合が相対的に小さくなるため、粒子径効果により原粒度試料の強度定数を若干過小評価しているが粒度調整試料の中では最

図 13  $\phi_{d(c=0)} \sim (-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_f$  関係 (甲山試料)図 14  $\phi_{d(c=0)} \sim (-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_f$  関係 (千種川試料)

も原粒度に近い結果を示していること、iii) 相似粒度試料は、粒子径効果により原粒度試料の強度定数をかなり過小

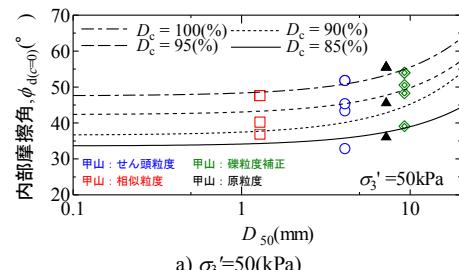
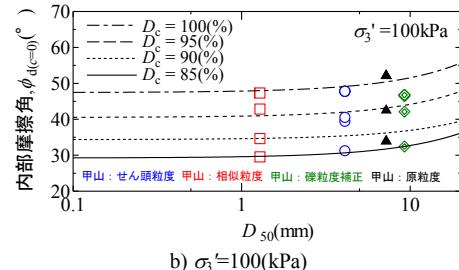
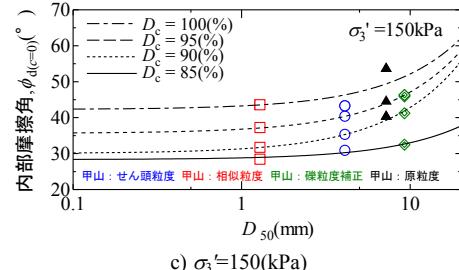
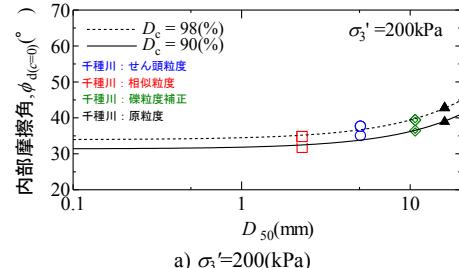
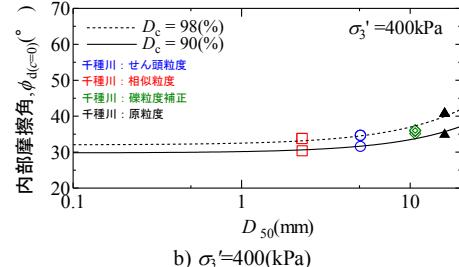
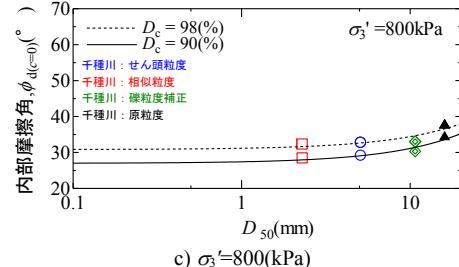
評価してしまうこと、等の知見を得た。

図 15 および 16 は、2 種類の試料における各試験の  $\phi_{d(c=0)} \sim D_{50}$  の関係を示している。図中には、目標締固め度が同一の試験における  $\phi_{d(c=0)} \sim D_{50}$  関係を近似して描いた  $D_c$  のコンター線を示している。本論文では、礫材料の簡単な指標を用いて、室内粒度調整試料の結果から原粒度試料の強度の推定を試みた。そこで、粒子径効果を最も簡便に表現する指標として平均粒径に着目した。千種川試料では、図 16 に示すように、平均粒径が大きくなるにつれ、内部摩擦角が大きくなるという粒子径効果が明瞭に観察された。一方、甲山試料では、一定の傾向は観察されるが、データのばらつきはやや大きいようである。これは、粒度調整の都合により厳密に見ると室内での原粒度に対する相似粒度、礫粒度補正粒試料と異なるために、原粒度試料の平均粒径が礫粒度補正試料より小さくなっているからである。しかし、粒度調整の基準とした現場原粒度試料の粒度組成を見ると、粒径の大きな礫の含有率が高いため、インターロッキング効果が顕著となり室内原粒度試料と比較して  $\phi_{d(c=0)}$  が大きくなることが予想される。加えて、現場原粒度の平均粒径が 17.3mm であり、図 15 の中でも一番右側にプロットされることを考慮すると、千種川試料と同様の傾向が見られると考えられる。これらの関係より、両試料に共通に、平均粒径が大きくなるにつれ  $\phi_{d(c=0)}$  が大きくなること、 $\phi_{d(c=0)} \sim D_{50}$  関係は締固め度に依存していることがわかる。以上の事柄は、試験試料の  $D_c$  および  $D_{50}$  が判れば、 $\phi_{d(c=0)}$  が大まかに推定できることを示唆している。

## 5. 結論

花崗岩を母岩とする最大粒径 75mm の角礫盛土材（原粒度試料）および河川河床から採取した最大粒径 125mm の円礫盛土材を用いて、それぞれ最大粒径 19mm のせん頭粒度試料、最大粒径 19mm の礫粒度補正試料および平均粒径が約 1/7 の相似粒度試料を用意し、一連の締固め試験および三軸圧縮試験を実施した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 甲山試料において、原粒度試料の締固め管理値  $D_c=90\%$  と同じ  $D_c=90\%$  における室内粒度調整試料および締固め管理値  $D_c=90\%$  に相当する  $\rho_d$  における室内粒度調整試料の設計用の内部摩擦角（すなわち、破壊時のモールの応力円群の傾き）を比較した結果、礫粒度補正試料 > 原粒度試料 > せん頭粒度試料 > 相似粒度試料となつた。その理由として、礫粒度補正粒度試料は、大粒径の礫の含有割合が大きくなるため、i) 矿の噛み合わせ効果により、原粒度試料の強度定数を若干過大評価してしまうこと、ii) せん頭粒度試料では、礫の含有割合が相対的に小さくなるため、粒子径効果により原粒度試料の強度定数を若干過小評価しているが粒度調整試料の中では最も原粒度に近い結果を得たこと、iii) 相似

a)  $\sigma_3' = 50\text{ kPa}$ b)  $\sigma_3' = 100\text{ kPa}$ c)  $\sigma_3' = 150\text{ kPa}$ 図 15  $\phi_{d(c=0)} \sim D_{50}$  関係（甲山試料）a)  $\sigma_3' = 200\text{ kPa}$ b)  $\sigma_3' = 400\text{ kPa}$ c)  $\sigma_3' = 800\text{ kPa}$ 図 16  $\phi_{d(c=0)} \sim D_{50}$  関係（千種川試料）

粒度試料は、粒子径効果により原粒度試料の強度定数をかなり過小評価してしまうこと、が分かった。

- 2) 千種川試料において、 $D_c$ あるいは $\rho_d$ が同じ供試体では、原粒度試料が最も大きい $\phi_d$ を示し、その他の粒度調整試料では、粒度分布によらず概ね同じ値を示した。
- 3) 甲山試料において、原粒度試料の締固め管理値  $D_c=90\%$  に対する各種室内粒度調整試料の $\phi_{d(c=0)}$ を比較した結果、ばらつきはあるものの礫粒度補正試料 > 原粒度試料 ≈ せん頭粒度試料 ≈ 相似粒度試料となった。
- 4) 千種川試料において  $D_c$  あるいは  $\rho_d$  が同じ供試体に対する各種室内粒度調整試料の $\phi_{d(c=0)}$ を比較した結果、原粒度試料が最も大きな値を示し、粒度調整試料の中では比較するとばらつきはあるものの概ね礫粒度補正試料 > せん頭粒度試料 > 相似粒度試料となった。
- 5) 1) ~ 4)より、角礫においては、実務で多用されているせん頭粒度試料を用いた室内締固め度～室内せん断強度関係は、実盛土の締固め度～せん断強度関係に近かった。一方、円礫に関しては実盛土の締固め～せん断強度関係をわずかに過小評価した。
- 6) 一連の排水三軸圧縮試験から、粒度分布によらず、破壊時の内部摩擦角は破壊時のダイレイタンシー割合と密接に関連しており、ダイレイタンシー割合が大きい程内部摩擦角が大きくなる。
- 7) 粒径効果により、平均粒径が大きくなるにつれ $\phi_{d(c=0)}$ が大きくなること、この関係は締固め度に依存すること、したがって、砂礫材料の粒径と締固め度から内部摩擦角が推定できる可能性があることが分かった。

## 6. 謝辞

本研究の遂行にあたって、(財)地域地盤環境研究所の三軸試験装置を使用した。また、同研究所の本郷隆夫氏なら

びに平野浩一氏には、実験のご協力と実験データの一部をご提供戴いた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 松本徳久・渡辺和夫・岩田充弘・小川優：粗粒材料の密度試験に関する実験的検討, 土木研究所資料第 2233 号, 建設省土木研究所, 1985.
- 2) 土質工学会：粗粒材料の変形と強度, pp. 172-201, 1986.
- 3) 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, No.260, pp. 109-118, 1977.
- 4) 鎌田隆司・プラダンテージ B. S.・今井五郎：砂のせん断特性に及ぼす粒径の影響, 第48回土木学会年次学術講演概要集, 第3部(A), pp. 902-903, 1993.
- 5) 高橋邦夫・春日井康夫：捨て石材の強度特性における粒度組成と最大粒径の影響, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 41-48, 1986.
- 6) 小高猛司・板橋一雄・中島康介・牧田祐輝・李圭太・上村俊英・坪田邦治・加藤雅也：河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価法に関する考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp. 193-205, 2010.
- 7) 軽部大蔵・野並賢・鶴ヶ崎和博・山口充：相似粒度に調整した粗粒材料の強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, 617巻, III-46号, pp. 201-211, 1999.
- 8) 野並賢・加藤正司・榎原辰雄・前田直孝：粒子破碎が粗粒材料のせん断挙動へ与える影響に関する個別要素法による検討, 土木学会論文集, 806巻, III-73号, pp. 113-127, 2005.
- 9) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の 2－, 丸善, pp. 557-562, 2009.
- 10) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の 1－, 丸善, pp. 373-385, 2009.
- 11) 地盤工学会：礫質土の力学的特性に関するシンポジウム発表論文集, 砂質土の力学特性についての研究委員会, p. 65, 2001.
- 12) 龍岡 文夫・DUTTINE Antoine・原大地・望月勝紀・望月一宏・奥野大輔・平川大貴・清田隆：多様な砂礫のせん断強度と締固め度・相対密度との相関, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 371-372, 2010.

(2011. 1. 14 受付)

---

---

## Influence of grain size distribution characteristics on compaction and deformation-strength characteristics of gravelly fill material

Yuya UEMOTO<sup>1</sup>, Satoru SHIBUYA<sup>1</sup>, Yosuke HASHIMOTO<sup>1</sup> and Shunzo KAWAJIRI<sup>2</sup>

1 Graduate school of Engineering, Kobe University

2 Railway Technical Research Institute

### Abstract

It involves many difficulties to employ a large-scale triaxial apparatus in an attempt to manifest deformation and strength characteristics of coarse-grained soil. Instead, the deformation and strength characteristics may be estimated based on the result of the shear test using a smaller-sized specimen whose grain size distribution is adjusted in compatible with the specimen size. In the current practice in Japan, the degree of compaction  $D_c$  is usually employed for the density control, hence the strength control, for embankment construction. On the other hand, the compaction curve of such a smaller sample is likely different from that of the original fill material. Therefore, the compaction and shear characteristics of both the original and the grain-size adjusted soils should be manifested in order to estimate the strength of in-situ embankment. In this paper, the effects of grain size distribution on compaction as well as the deformation-strength characteristics were examined in a series of drained triaxial test, in which two types of coarse grained fill materials (i.e., angular gravel from Nishinomiya city and round-shaped gravel from Chigusa river) were tested.

Key words: Coarse grained soil, Embankment, Compaction, Shear strength, Laboratory test