

盛土の締固め管理手法の高度化に関する研究

堀田 崇由 北島 明

概 要

地盤材料を締固めて造られる盛土構造物の設計には、三軸圧縮試験等から求められる内部摩擦角 ϕ や粘着力 c といった強度定数が用いられ、その強度定数を担保する施工管理上の指標として、最大乾燥密度 ρ_{dmax} や最適含水比 w_{opt} から設定した基準値が用いられている。また、これらの強度定数・最大乾燥密度といった値はそれぞれの地盤材料固有のものであり、設計時には材料ごとに一連の土質試験を適切に実施することが必要である。一方で、数百万 m^3 を超えるような土量を扱う大規模工事では、同一の施工現場で採取される地盤材料であったとしても、風化や破砕による粒度の差などによって土質が微妙に変化していることがある。管理基準値の変更は一連の土質試験を再度行う必要があり、工程・費用における負担も大きく、簡易な値から変化を推定できれば有用である。

そこで本稿では、締固め・強度特性の推定に関する基礎的研究として、同一現場で採取される鉱物等の由来は等しく、粒度が変化したことを想定した礫分を含んだいくつかの試料に対して締固め・強度特性を求める試験を実施し、粒度と締固め・強度特性の関係を調べた。

Study on advancement management method of soil compaction for embankment

Abstract

The design of embankment structures that are made by compacting soil usually uses strength parameters such as the internal friction angle ϕ and cohesion c . For the construction management, the standard values are set by using the maximum dry density ρ_{dmax} and the optimal water content w_{opt} . In addition, these values such as strength parameters and maximum dry density are unique to each soil material, and it is necessary to appropriately perform a series of tests for each soil in the planning phase. At a large-scale construction site, there is a wide variety of soil materials even in the same area, so the soil properties may change frequently. It is useful if the difference in soil properties can be estimated from a simple index.

In this paper, we describe the relationship between compaction, strength, and grain size by testing several samples as a basic study on estimation of compaction and strength characteristics of soils.

キーワード: 粒度、締固め特性、
強度特性

§1. はじめに

1.1 背景

盛土構造物の設計には、内部摩擦角 ϕ や粘着力 c といった強度定数が用いられ、その強度定数を担保する施工管理上の指標として、最大乾燥密度 ρ_{dmax} や最適含水比 w_{opt} から設定した基準値が用いられる。一方で、大規模工事では同一施工現場内で土質が微妙に変化していることがあるが、管理基準値の変更は施工監督者の判断次第である場合が多く、簡易な値から変化を推定できれば有用である。本研究では、特に同一施工現場内での土質の変化に伴う物性値や強度特性について、締め固め試験および三軸圧縮試験を行い、算出された ρ_{dmax} や c 、 ϕ を用いて、粒度から締め固め特性・強度特性の推定について検討した。

§2. 試験概要および試験装置

2.1 用いた試料の概要

本研究では粒度分布と締め固め・強度特性の関係を調べるために、粒度調整をした6種類の試料を用いた。粒度調整をする母材には大阪府茨木市の造成現場より採取した盛土材料(以下、彩都試料)を使用した。彩都試料の物理特性を調べるために行った物性試験の結果と粒径加積曲線を表1、図1に示す。表1及び図1より、彩都試料は幅広い粒径を持った細粒分質砂質礫であり、いわゆる「良く締固まる」盛土に適した材料であることがわかる。

次に、6種類の試料について述べる。粒度を調整した6種類は①19mmふるい通過分試料(以下、-19mm)、②9.5mmふるい通過分試料(以下、-9.5mm)、③2mmふるい通過分試料(以下、-2mm)、④19mmふるいを通し9.5mmふるいに残留したものと19mmふるいを通し2mmふるいに残留したものを乾燥重量比1:1で混合したもの(以下、合成A)、⑤9.5mmふるい通過分と模擬砂を1:1で混合したもの(以下、合成B)、⑥9.5mmふるい通過分と模擬粘土を1:1で混合したもの(以下、合成C)である。①、②、③、④は彩都試料をふるい分けしたものであるが、⑤合成Bで用いた模擬砂は砂の2-8号を用いて彩都試料の2~0.075mmの粒度分布を再現した試料である。⑥合成Cで用いた模擬粘土は市販のNSF粘土とDLクレーを1:1で混合したものである(表2)。

以上に述べた6種類の試料の礫分、砂分、細粒分の含有率を表2に、それらの粒度の三角座標上での位置を図2に示す。図2から分かるように彩都試料のみを用いた①、②、③、④はほぼ一直線上に分布していることが分かる。このように彩都試料のみでは粒度調整に限界があるため、市販の

表1 母材の物性値

分類	細粒分質砂質礫
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.724
最大粒径 D_{max} (mm)	75
液性限界 w_L (%)	49.9
塑性限界 w_P (%)	22.4
塑性指数 I_P (%)	27.5
礫分 (%)	58.6
砂分 (%)	19.2
シルト分 (%)	15.3
粘土分 (%)	5.3
均等係数 U_c	569
曲率係数 U_c'	0.84

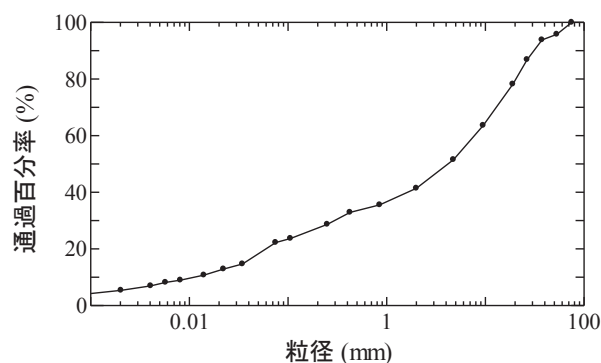


図1 母材の粒径加積曲線

材料から成る砂および模擬粘土を用いた。本研究では、これら異なる粒度の6種類の試料を用いて締め固め試験および三軸圧縮試験を行った。

2.2 締め固め試験概要

先述した6種類の試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} を求めるために締め固め試験を行った。本研究ではA-a法¹⁾(ランマー質量2.5kgモールド内径10cm突固め層数3、1層あたりの突固め回数25回許容最大粒径19mm)を使用して締め固め試験を実施した。

2.3 中型三軸圧縮試験

それぞれの試料の飽和状態での強度定数を求めるために中型三軸圧縮試験機を用いて試験を行った。試験条件は圧密排水条件(CD)とし、粘着力 c_a 、内部摩擦角 ϕ_a を求めた。また、供試体作製条件は乾燥密度 ρ_d =最大乾燥密度 ρ_{dmax} (締め固め度 $D_c=100\%$)、含水比 w =最適含水比 w_{opt} とし、供試体を作製した。供試体寸法は直径10cm、高さ20cmである。有効拘束圧は50kpa、100kpa、200kpaの3種類とし、圧縮時のせん断速度は0.05mm/minとして試験を行った。

表 2 6 試料の粒度成分

試料名	① -19mm	② -9.5mm	③ -2mm	④ 合成A	⑤ 合成B	⑥ 合成C
礫分 (%)	47.0	34.9	0.0	100.0	18.0	17.4
砂分 (%)	24.5	30.2	46.3	0.0	63.0	15.1
細粒分 (%)	28.4	35.0	53.7	0.0	19.0	67.5

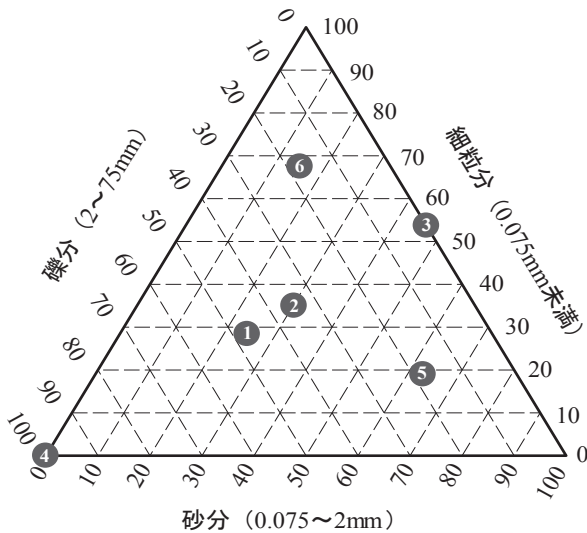


図 2 6 試料の分布

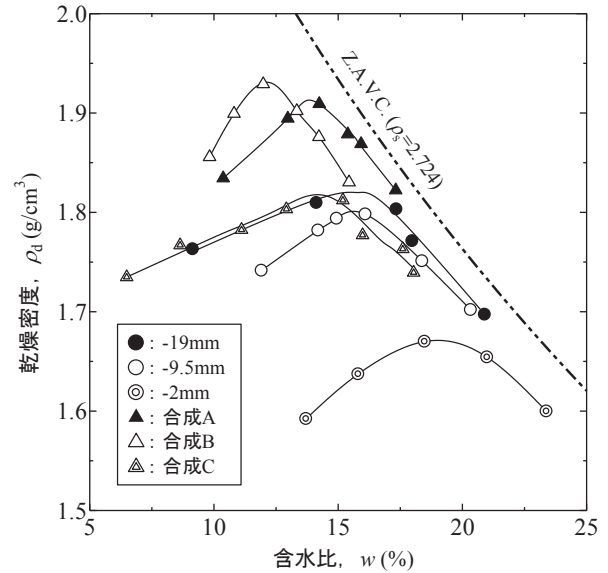


図 3 6 試料の締固め曲線

表 3 6 試料の締固め特性

試料名	① -19mm	② -9.5mm	③ -2mm	④ 合成A	⑤ 合成B	⑥ 合成C
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.820	1.800	1.669	1.911	1.931	1.817
w_{opt} (%)	15.6	15.7	18.9	14.0	12.2	14.3

§3. 試験結果および考察

3.1 締固め試験結果および粒度と締固め特性の関係性についての考察

図3、表3にそれぞれ6種類の試料の締固め曲線と最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} を示す。

彩都試料のみである-19mm、-9.5mm、-2mm、合成Aの4試料に関しては、最大粒径が大きいほど ρ_{dmax} は大きくなり、 w_{opt} は小さくなる結果が得られた。この結果は、広く認知されている平均粒径が大きい土では ρ_{dmax} は大きくなる²⁾³⁾という傾向と同様である。

次に、図4に粒度の三角形座標上の ρ_{dmax} のコンター図、図5に w_{opt} のコンター図を示す。まず、 ρ_{dmax} に関しては値が最小となるのは礫分:砂分:細粒分の比率がおおよそ0:5:5である③-2mm試料で $\rho_{dmax} = 1.669 \text{ g/cm}^3$ となり、 ρ_{dmax} の最大

値は、礫分:砂分:細粒分がおおよそ2:6:2の⑤合成B試料で $\rho_{dmax} = 1.931 \text{ g/cm}^3$ であった。全体的な傾向としては、 ρ_{dmax} が大きくなると w_{opt} が小さくなり、 w_{opt} の最大値は③-2mm試料($w_{opt} = 18.9\%$)、最小値は⑤合成B試料($w_{opt} = 12.2\%$)であった。

また、 ρ_{dmax} 、 w_{opt} の値は細粒分が30%以上のときは ρ_{dmax} の最小値、 w_{opt} は最大値を中心として、ほぼ同心円状に分布していることも読み取れた。この中心となっている点は③-2mm試料であるため、礫分を含まず砂分と細粒分がほぼ1:1である試料が最も ρ_{dmax} は小さく、 w_{opt} は大きくなり、そこから同心円状に ρ_{dmax} は大きくなっていき w_{opt} は小さくなっていくということである。また、細粒分が30%以下になると ρ_{dmax} 、 w_{opt} ともに細粒分に依存し、細粒分が少なくなればなるほど ρ_{dmax} は大きくなり、 w_{opt} は小さくなる傾向が見られる。また、細粒分30%以下のとき、礫分より砂分を多く含んでいる方が ρ_{dmax} は大きくなり、 w_{opt} は小さくなっている。

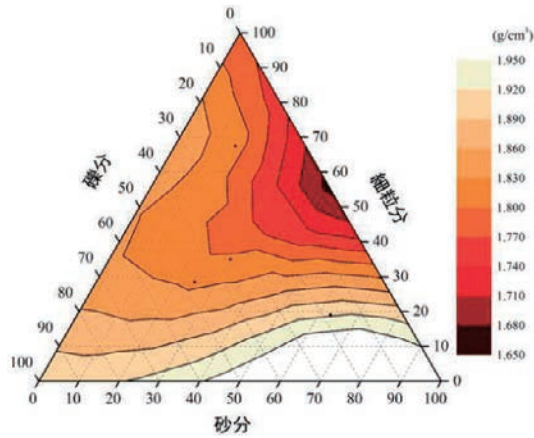


図4 ρ_{dmax} のコンター図

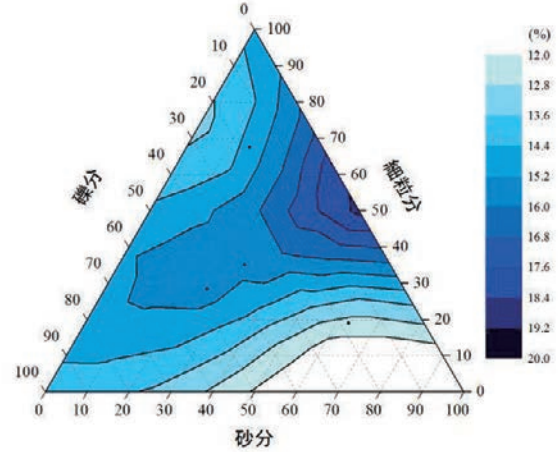


図5 w_{opt} のコンター図

次に、他の粒度特性を有する土質と比較するために既往の研究⁴⁾で得られた、細粒土の ρ_{dmax} のコンター図を図6に示す。図6は細粒土を対象としているため図4、5と異なり、3軸が砂分、シルト分、粘土分となっている。図6より、砂分:シルト分:粘土分の比率が6:2:2で ρ_{dmax} が最大となり、その点を中心に同心円状に小さくなっていく分布である。本研究とは ρ_{dmax} の最小値ではなく最大値が中心となっている点では異なっているが、同心円状の分布を持つという共通点がみられた。また、 ρ_{dmax} の絶対値も異なっているが、これは母材の土質固有の値であるため差がついたと考えられる。この研究では砂、シルト、粘土の3成分のうち、2成分のみで構成された試料では粒度変化に対する ρ_{dmax} の増減傾向が変化する比率が存在し、砂:粘土の2種配合では7:3、砂:シルトでは6:4であると報告されている。本研究で得られたコンター図でも ρ_{dmax} の傾向が変化するのは細粒分がおおよそ30%であり、この点についても共通した傾向となった。

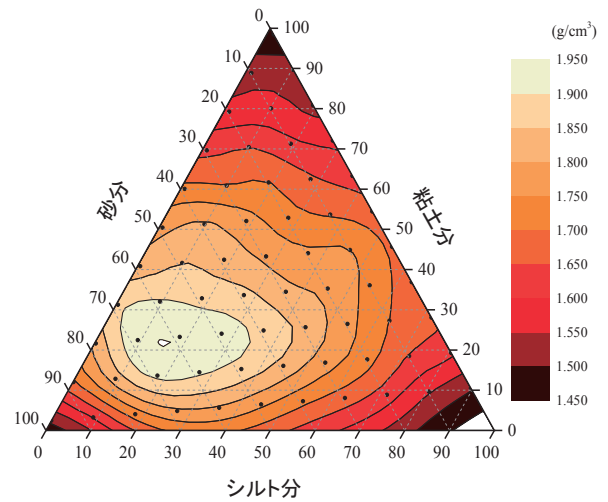


図6 細粒土の ρ_{dmax} のコンター図⁴⁾

一方で、図4より礫分>30%の範囲では、コンターの形状は礫分、砂分、細粒分のいずれかに依存しているというよりも、中心点から遠ざかるにつれて、 ρ_{dmax} の値が大きくなっていることが分かる。そこで、中心点からの距離を定量化して ρ_{dmax} の変化を考察した。

ここで、三角座標上の距離を求めるには、(礫分100, 砂分0, 細粒分0)を原点としたxy座標系に置換する必要があり、その式は

$$\begin{aligned} (X, Y, Z) &\Rightarrow (x, y) \\ x &= Y + (Z \cos 60^\circ) \\ y &= Z \sin 60^\circ \end{aligned}$$

と表される。

ここで

- (X, Y, Z) : (礫分, 砂分, 細粒分)の座標系
- (x, y) : (礫分100, 砂分0, 細粒分0)を原点としたxy座標系である。

また、ある中心点 (a, b) から (x, y) までの距離 r は

$$r = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2}$$

と表すことができる。

図7に ρ_{dmax} のコンターの中心点を $(0, 44, 56)$ とした場合の各6試料の三角座標上の距離と ρ_{dmax} の関係を示す。図より、⑤合成B(図中△)試料のみが外れているが、他の試料はおおむね一定の相関関係が得られている。⑤合成Bは図4のコンター線の傾きをみても、細粒分へのみ大きく依存している範囲に存在している。このことから、中心から同心円状に広がるコンターの範囲では、礫分、砂分、細粒分それぞれが影響因子となっている場合でも、三角座標上の距離を用いることで、粒度との関係を整理できることが分かった。

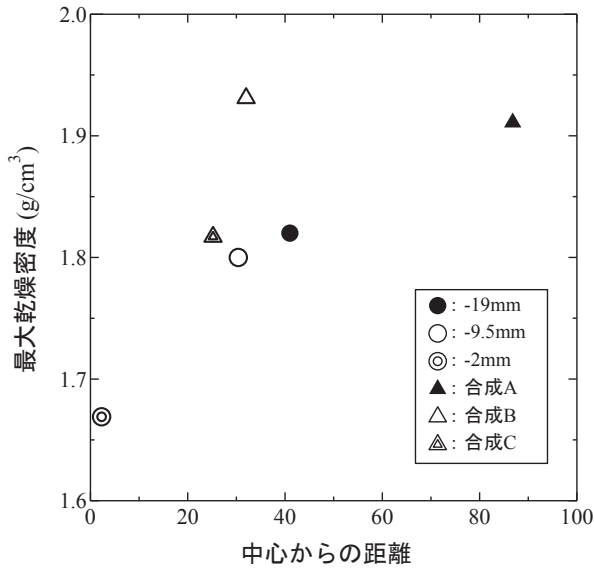


図7 コンターの中心からの距離と ρ_{dmax} の関係

3.2 三軸圧縮試験結果および粒度と強度定数の関係性についての考察

粒度と粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_i のコンター図を図8、図9に示す。 c_d については、砂分が最も多い合成Bが最も大きい33.2kPaとなり、細粒分が最も多い合成Cが最も小さく8.5kPaとなった。 ϕ_i は礫分が最も多い合成Aが最も大きく38.4°、細粒分が最も多い合成Cが最も小さく30.1°となった。

図8から、礫分が50%以下の部分は細粒分に依存していることがわかる。これは c_d の傾向が変化することを示しており、礫分が多くなるほど c_d は減っている。一方、図9では、細粒分が30~50%の部分を除いては細粒分に依存していると考えられる。また、図9より ϕ_i に関しても、礫率50%程度で傾向の変わっていることが分かる。

図8、図9を図4の ρ_{dmax} のコンター図を比較すると、あまり相関はないと考えられる。しかし、細粒分が0~30%かつ礫分が40%以下の場合に限っては ρ_{dmax} と強度特性の両者が細粒分に比例して、細粒分が増加すると ρ_{dmax} と c_d は減少し、 ϕ_i は増加していることが分かる。この範囲以外では、現段階で ρ_{dmax} と c_d 、 ϕ_i の関係性を見出すことは難しい結果となったが、強度特性についても、粒度との関係をコンター図で示すことが可能であることが分かった。この関係性を確かなものにするためにも更なる試料での実験データの蓄積が必要となる。

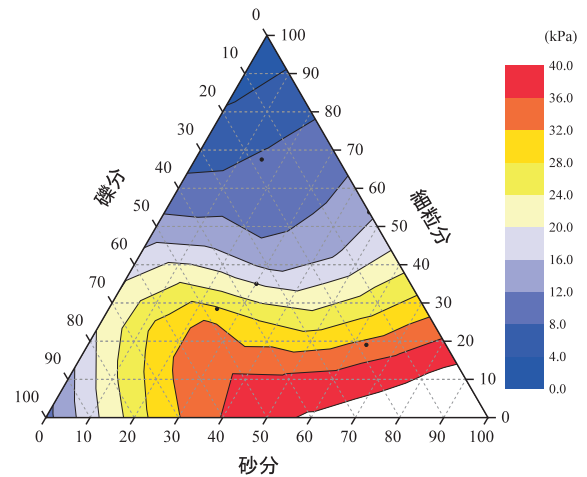


図8 c_d のコンター図

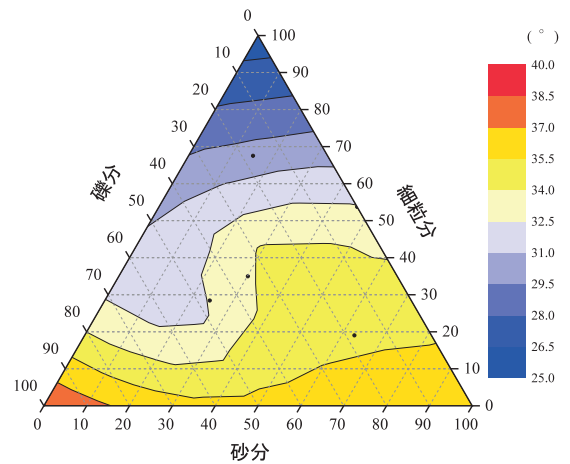


図9 ϕ_i のコンター図

§4. まとめ

本報告では、粒度調整をした6種類の試料に対し締固め試験と三軸圧縮試験を行った結果、以下の知見を得た。

- 最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、粘着力 c_d 、内部摩擦角 ϕ_i をそれぞれ粒度の三角座標上にプロットしたところ、いずれもコンター(等値線)を描くことができ、締固め特性・強度特性は粒度に関係していることが分かった。
- ρ_{dmax} は中心点を持つコンターを描いており、限定された範囲であれば、三角座標系上の距離と相関関係があることが分かった。

表4 彩都試料の物性値

試料名	① -19mm	② -9.5mm	③ -2mm	④ 合成A	⑤ 合成B	⑥ 合成C
c_d (kPa)	30.8	17.0	15.0	10.6	33.2	8.5
ϕ_i (°)	32.1	34.5	32.6	38.4	35.2	30.1

- ・ ρ_{dmax} と c_d 、 ϕ_d のコンター図を比較すると、あまり相関はないと考えられるが、細粒分が0~30%かつ礫分が40%以下の場合に限っては締固め特性と強度特性の両者が細粒分に比例して、細粒分が増加すると ρ_{dmax} と c_d は減少し、 ϕ_d は増加していることが分かった。

謝辞 本研究は、神戸大学大学院 澁谷啓教授、片岡沙都紀助教との共同研究にて遂行された。澁谷先生、片岡先生及びご協力いただいた神戸大学の学生皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 公益社団法人地盤工学会編:地盤材料試験の方法と解説, 第5編第2章突き固めによる土の締固め試験, pp.373-385, 2009.
- 2) 森 満雄, 阿部 道雄, 森 麟:礫まじり土の締固め密度の推定に関する研究, 土木学会論文集, No.541, III-35, pp.159-171, 1996.
- 3) 常田賢一, 小田和広, 佐野郁雄, 澁谷啓, 新納格:土質力学, 理工図書株式会社出版, p.58, 2010.
- 4) 澁谷啓, 堀田崇由, 片岡沙都紀:塑性を有する盛土材料の締固め施工管理基準値の簡易推定法, 基礎工, Vol.42, No.9, pp.62-65, 2014.

ひとこと

ICT土工の本格導入に伴い、盛土の締固めに関しても施工管理方法の見直しが求められています。少しでも現場の助けになれるよう今後も精進します。



堀田 崇由