

最小締固め曲線および密度幅と粒度特性の関係

野並 賢* 大西 毅** 永井ことね*** 野崎央斗****

Relationship to Minimum Density Curve and Density Width with Particle Grade Property

Satoshi NONAMI* Tsuyoshi OHNISHI** Kotone NAGAI*** Hiroto NOZAKI****

ABSTRACT

In order to estimate shear strength property of embankment material, we defined the minimum density curve and considered the geometry. And we considered the relationship between a density width with a compaction curve, and a particle-size specificity, and the maximum and the minimum density. As a result, the geometry of the minimum compaction curve is subject to the influence of for a fine contents and a uniformity coefficient. As for the density width with the compaction curve in the optimal water content, the correlation with fine content is found. Moreover, as for the dry density width, the correlation with maximum dry density is found.

Keywords : Minimum Density Curve, Density Width, Particle Grade Property, Compaction, Embankment

1. はじめに

わが国ではこれまで、道路、宅地、堤防などの社会インフラとして盛土が多く築造されている。地震、豪雨時の盛土の安定性を評価するためには、盛土材料のせん断強度特性を把握する必要があるが、室内せん断試験は費用および時間がかかるため、容易に実施可能な物理試験と施工管理基準に用いる締固め試験のみ実施されることが多い。このため設計に用いるせん断強度定数は、安全側を見越した一般値が用いられるのが実情である。

一方、細粒分をほとんど含まない砂および砂礫に対して適用される、「JIS A 1224:2009：砂の最小密度・最大密度試験⁽¹⁾」や「JGS 0162：礫の最小密度・最大密度試験方法⁽¹⁾」から得られる最小・最大密度より求められる密度の幅（以下、最小・最大密度幅と称す）がせん断抵抗角との相関があることが報告されている⁽²⁾、⁽³⁾、⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。このことに着想を得ると、締固め試験時に最小密度と類似した物性値を求めて締固め曲線との密度幅（以下、締固め密度幅と称す）を評価し、その値に

最小・最大密度幅と同様の物理的意味を見出すことができれば、従来の方法から大きな労力をかけずに盛土材料のせん断強度定数に関する情報が得られる可能性がある。

そこで本研究では、上記に係る初歩的な検討として最小締固めエネルギーによって得られる最小締固め曲線を種々の盛土材に対し求めた。そして、最小締固め曲線および締固め密度幅がもつ物理的意味について粒度特性、最大乾燥密度、最小乾燥密度との比較を通じ考察を行った。なお、今回提案する最小締固め曲線や締固め密度幅は、最小・最大密度試験で対象外としている細粒分および礫分や含水量の影響を内包している。そこで、締固め密度幅と最小・最大密度幅との類似性についても着目した。

2. 試料および試験方法

2.1 試料

試料の粒度特性を図1に示す。一般に用いられる盛土材を検討対象とすべく、細粒土から礫質土まで幅広い粒度を網羅するように試料を選定した。試料1は比較的塑性の低い細粒土であり、試料5と試料6は貧粒度の砂である。試料7、試料8、試料10はまさ土、試料9は未固結な第4紀層の礫質土、試料11は古生代の砂岩を母岩とする切土発生土、試料12は古生代の流紋

* 都市工学科 准教授

** JR 西日本コンサルタンツ(株) (平成28年度卒)

*** (株)浅沼組(平成28年度卒)

**** (平成29年度卒)

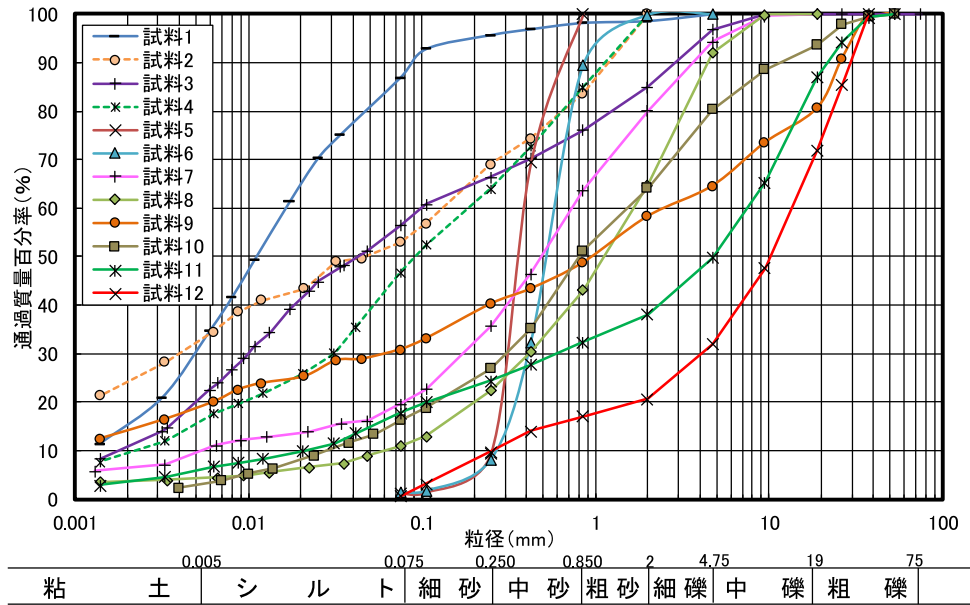


図1 粒径加積曲線

岩を母岩とするトンネル掘削土である。試料2，試料4はそれぞれ，試料9，試料11の2mmせん頭粒度試料であり，試料3は試料1と試料8を質量比4：6で混合した試料である。

2.2 試験方法及び密度幅の定義

最小締固め曲線を得るための試験は以下のように実施した。締固め試験を行うために含水比を調整した試料に対し，締固め試験用モールドに出来るだけ緩詰めとなることを意識し，落下高さをなくした状態，すなわち締固めエネルギーが0となるよう試料土を投入した。この試験で得られる最小締固め密度は，ある含水比において試料が取りうる最大の高位構造であり，その値が小さいほど少ない粒子接点でも構造を保つことができるという物理的意味を持つ。

締固め試験は「JIS A 1210:2009 突固めによる土の締固め試験方法⁽⁶⁾」に基づき，標準エネルギーで実施した。試料9，試料11，試料12は最大粒径の制限からB-b法とし，これ以外はA-b法とした。

締固め密度幅の定義について，本研究では $\Delta\rho_{d1}$ ， $\Delta\rho_{d2}$ の2種類を採用した。 $\Delta\rho_{d1}$ は最適含水比での密度幅とした。最適含水比は飽和度の上昇がもたらす相反する作用である，サクシジョンの減少に伴い粒子接点で互いに抑えつけ合う接触力が低下することによる密度増加の影響と，締固めエネルギーが伝わりにくくなることによる密度減少の影響が逆転する状態である。締固めエネルギーが最も効率よく伝播するため，乾燥密度は最大値となり，密度幅も大きくなる考えた。したがって $\Delta\rho_{d1}$ はサクシジョンの影響を反映した，骨格構造が取り得る範囲のポテンシャルを表すものといえる。

$$\Delta\rho_{d1} = \rho_{dmax1} - \rho_{dmin1} \tag{1}$$

ここに， $\Delta\rho_{d1}$:最適含水比での締固め密度幅
 ρ_{dmax1} :最大乾燥密度(g/cm³)

ρ_{dmin1} :最適含水比での最小乾燥密度(g/cm³)

次に， $\Delta\rho_{d2}$ は最大・最小密度試験を実施する際と同じく，気乾状態時での密度幅とした。したがって $\Delta\rho_{d2}$ は，最小・最大密度幅との類似性を検討するのに適していると考えられる。

$$\Delta\rho_{d2} = \rho_{dmax2} - \rho_{dmin2} \tag{2}$$

ここに， $\Delta\rho_{d2}$:気乾状態での締固め密度幅

ρ_{dmax2} :気乾状態の締固め乾燥密度(g/cm³)

ρ_{dmin2} :気乾状態の最小乾燥密度(g/cm³)

なお，最小締固め密度における ρ_{dmin1} より湿潤側の試料土は団粒化を生じ，その程度は細粒分の多い試料において顕著であった。このときの最小締固め密度が ρ_{dmin2} より小さくなった試料もあるが，団粒化した試料のときほぐしに個人差を生じる恐れがあり，再現性の確保が困難な状態であったため，密度幅の定義に用いることを見送った。

3. 結果および考察

3.1 締固め曲線の形状

図2(a)～(l)まで，各試料の締固め曲線および最小締固め曲線を示した。締固め曲線に着目すると，貧粒度の試料5，試料6を除き最大乾燥密度をピークとした上に凸の形状を示す。試料5，試料6は含水比15%を超えるあたりからモールドから漏水を生じ，他の試料と比べてゼロ空気間隙曲線に近づくことなく試験を終了することとなった。これは貧粒度で保水性が低い試料の特徴であり，締固め曲線に明確なピークが現れないことも一般的にみられる傾向である。

最小締固め曲線に着目すると，試料5，試料6は締固め曲線と同様に含水比が大きくなると微増するものの，大きな変動はみられない。また，含水比が気乾状態に近づくと，締固め曲線，最小締固め曲線ともにコラプ

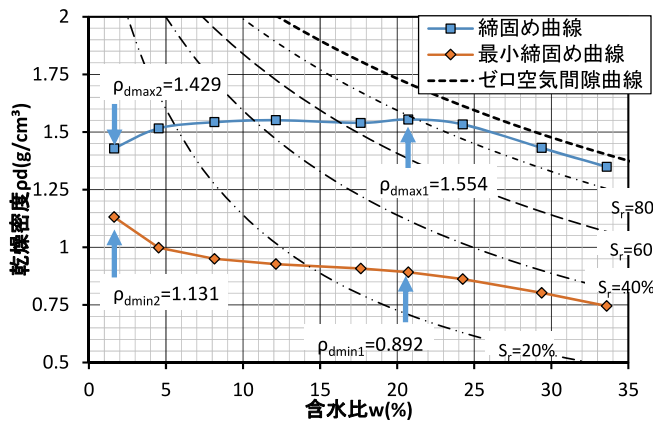


図 2(a) 試料 1 の締固め曲線

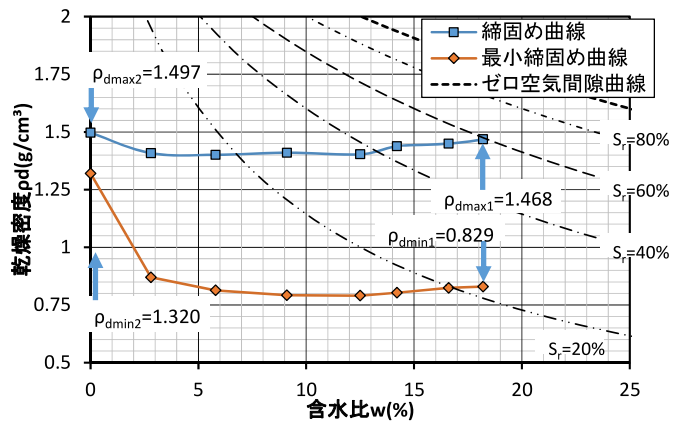


図 2(e) 試料 5 の締固め曲線

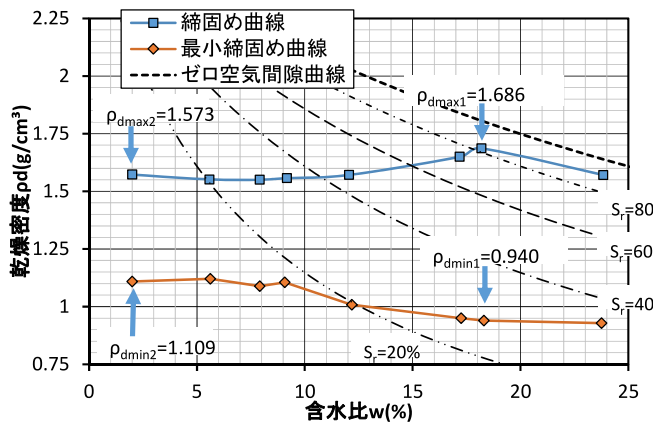


図 2(b) 試料 2 の締固め曲線

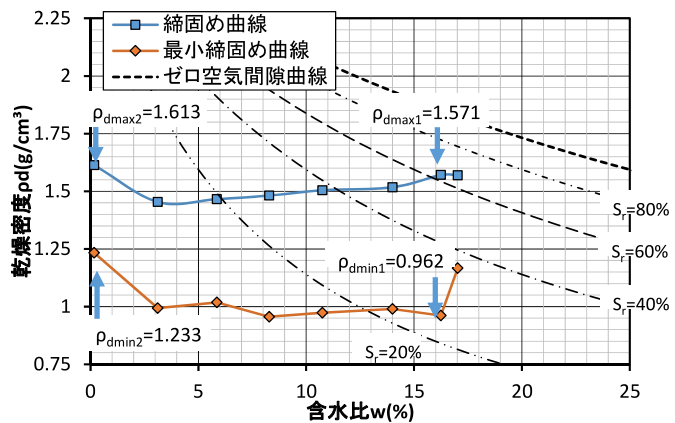


図 2(f) 試料 6 の締固め曲線

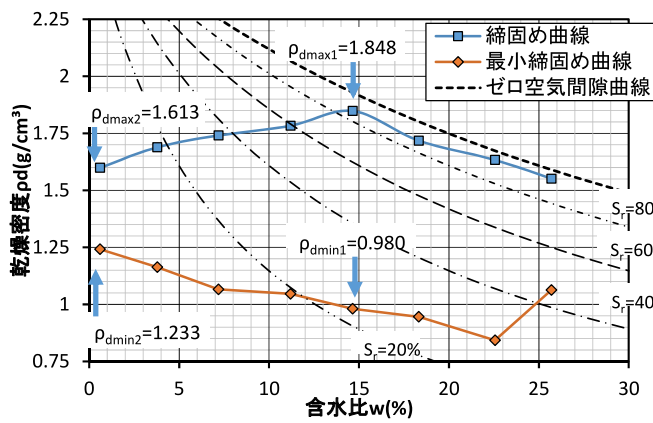


図 2(c) 試料 3 の締固め曲線

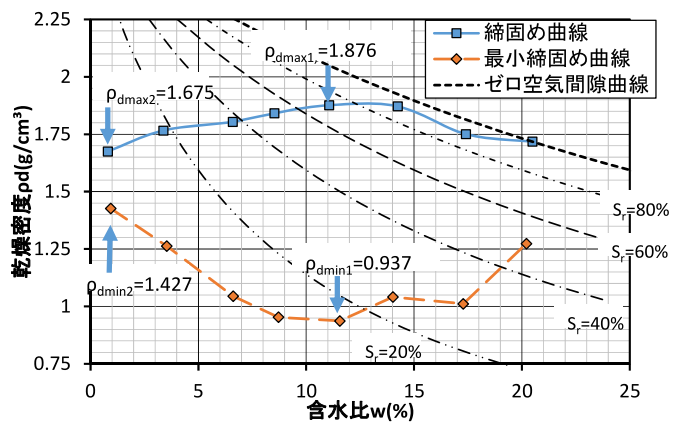


図 2(g) 試料 7 の締固め曲線

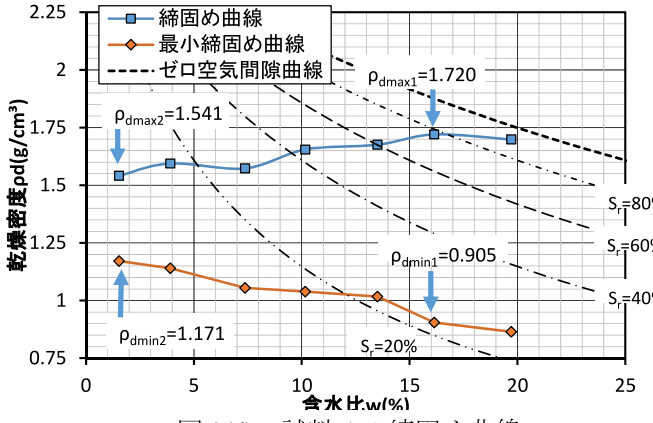


図 2(d) 試料 4 の締固め曲線

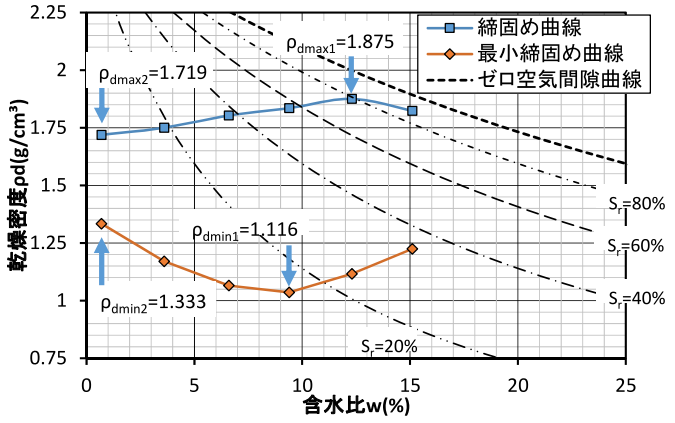


図 2(h) 試料 8 の締固め曲線

ス現象を生じ、乾燥密度が急激に増加している。締固め曲線での傾向と合わせて考察すると、貧粒度の砂は発揮されるサクシオンが小さく、これに起因する粘着力成分も小さい材料であるといえる。

これら以外の試料について、最適含水比から乾燥側に着目すると、いずれも含水比の減少に伴い乾燥密度は小さくなっている。これは上述のようにサクシオンの減少により骨格構造が劣化して密度が増加したものと説明できる。

次に最適含水比より湿潤側について、細粒分の多い試料 1, 試料 2 は乾燥密度が減少している。これらの試料は単位体積当たりの粒子接点数が多いことに着目すると、含水比の増加に伴ってサクシオンが効果を発揮する粒子接点数も増加したものと考えられる。礫分主体で細粒分も 20~30%含む、良粒度な盛土材である試料 9, 試料 11 も細粒分の多い試料 1, 試料 2 の形状と類似している。これは礫粒子の周りに細粒土が付着し、その影響が卓越したためと考えられる。これら以外の試料 3, 試料 7, 試料 8, 試料 10, 試料 12 は、飽和度の上昇に伴う自重の増加やサクシオン減少により、密度が大きくなっている。試料 4 もこれらの傾向を踏まえると、試験を行った含水比より湿潤側では乾燥密度が増加した可能性が高いと思われる。

最小締固め曲線の飽和度に着目すると、含水比を増加させても、試料に拘わらず飽和度は 20~40%程度の範囲になることがわかった。原位置では、表層付近の飽和度が雨水浸透などによってこの値より上昇すると、骨格構造の低位化を招く。締固め度が低い盛土では、水浸沈下や強度低下をもたらすこととなる。

3.2 密度幅と粒度特性および締固め密度の関係

締固め密度幅と粒度特性の関係を検討するため、図 3 に 50%通過粒径 D_{50} ~締固め密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係を、図 4 に細粒分含有率 F_c ~締固め密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係を示した。また、締固め密度と密度幅の相関関係について、図 5 に最大乾燥密度 ρ_{dmax1} ~締固め密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係を、図 6 に最小乾燥密度 ρ_{dmin1} ~締固め密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係を示した。図 3~図 6 とともに、(a)は密度幅 $\Delta\rho_{d1}$ 、(b)は密度幅 $\Delta\rho_{d2}$ としている。

(a) $\Delta\rho_{d1}$ に関する考察 図 4(a)より、 $\Delta\rho_{d1}$ は細粒分含有率 F_c が 30%をピークとした分布となっている。すなわち、締固め試験のような小さい上載圧では、 $F_c=30%$ より細粒分が少なくなるとサクシオンに起因する粒子間接触力が小さくなる影響が卓越し、骨格構造の低位化をもたらす。 $F_c=30%$ より細粒分が多くなると粗粒子のかみ合わせが妨げられる影響が卓越し、骨格構造の低位化をもたらす。結果的に $F_c=30%$ でピークを迎えたものと考えられる。一方、図 3(a)より 50%通過粒径 D_{50} は $\Delta\rho_{d1}$ と相関がみられない。80%通過粒径 D_{80} と最大粒径 D_{max} も同様の傾向であることを確認しており、粒径が $\Delta\rho_{d1}$ に与える影響は不明であった。ま

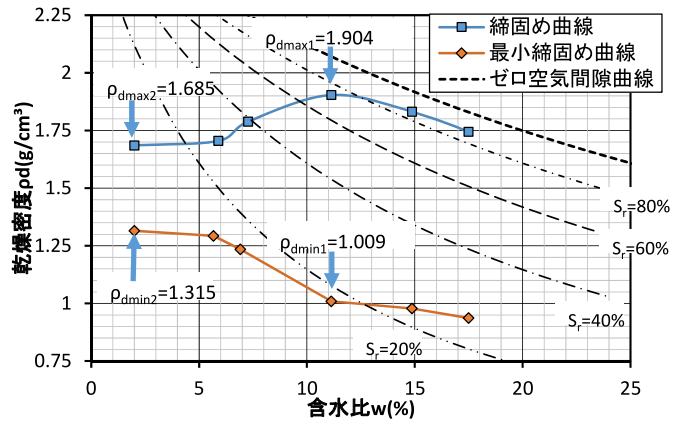


図 2(i) 試料 9 の締固め曲線

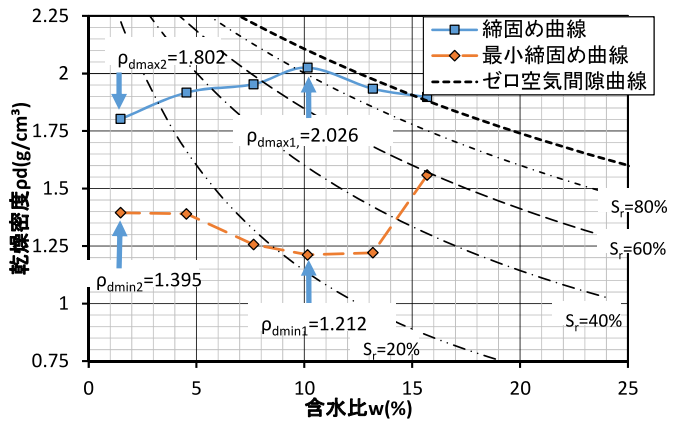


図 2(j) 試料 10 の締固め曲線

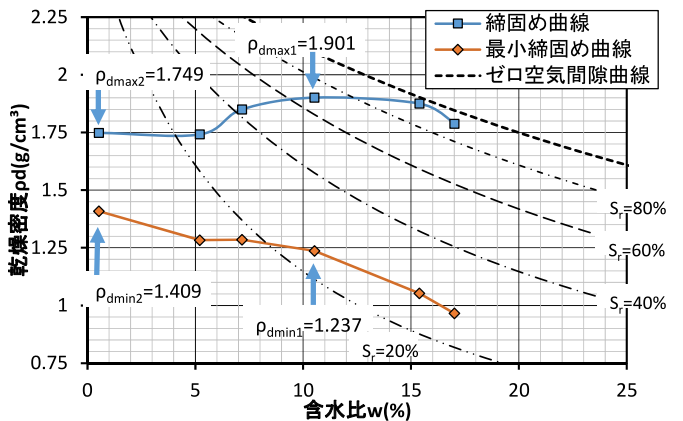


図 2(k) 試料 11 の締固め曲線

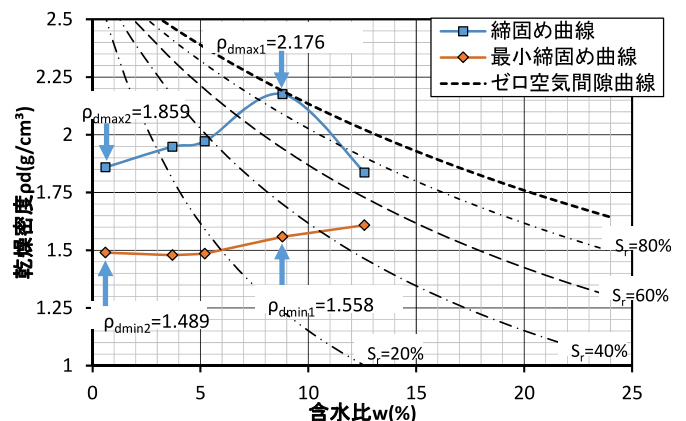


図 2(l) 試料 12 の締固め曲線

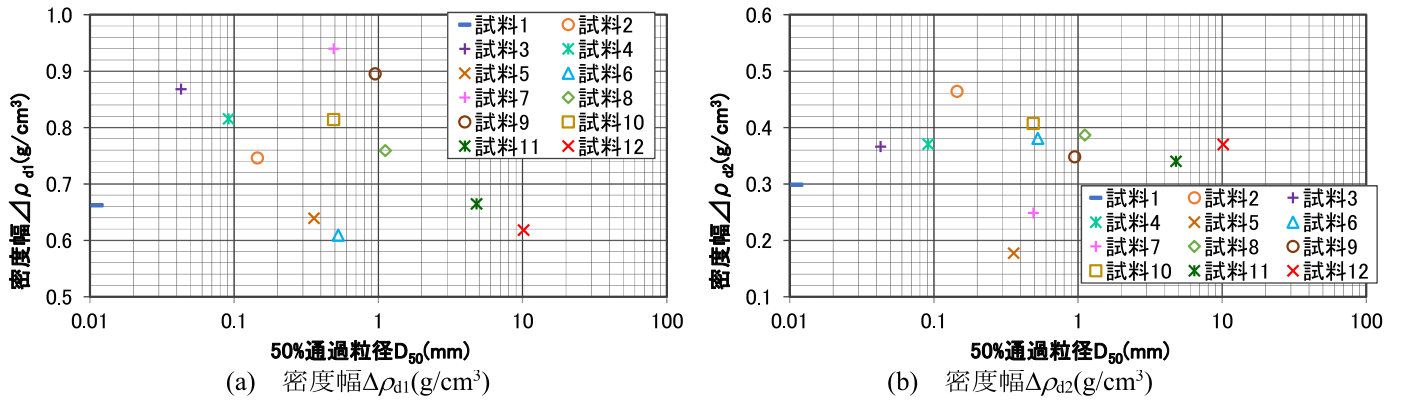


図3 50%通過粒径 D_{50} ～締めめ密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係

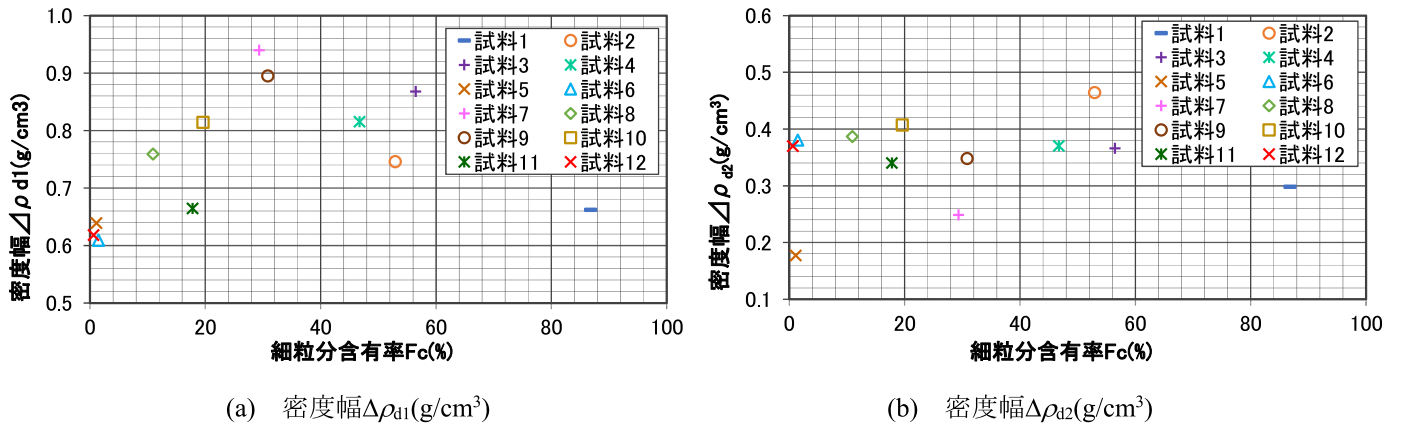


図4 細粒分含有率 F_c ～締めめ密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係

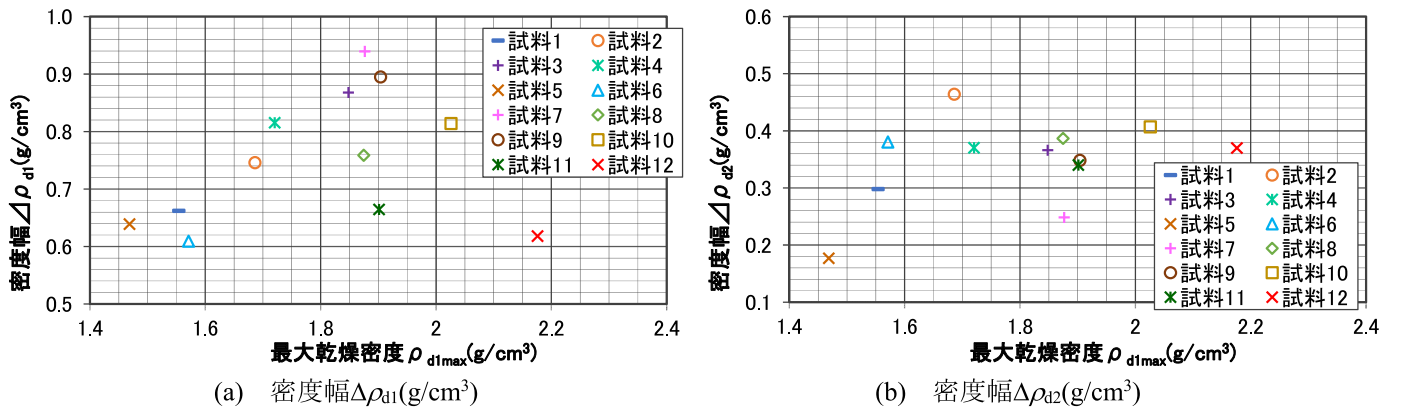


図5 最大乾燥密度 ρ_{dmax1} ～締めめ密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係

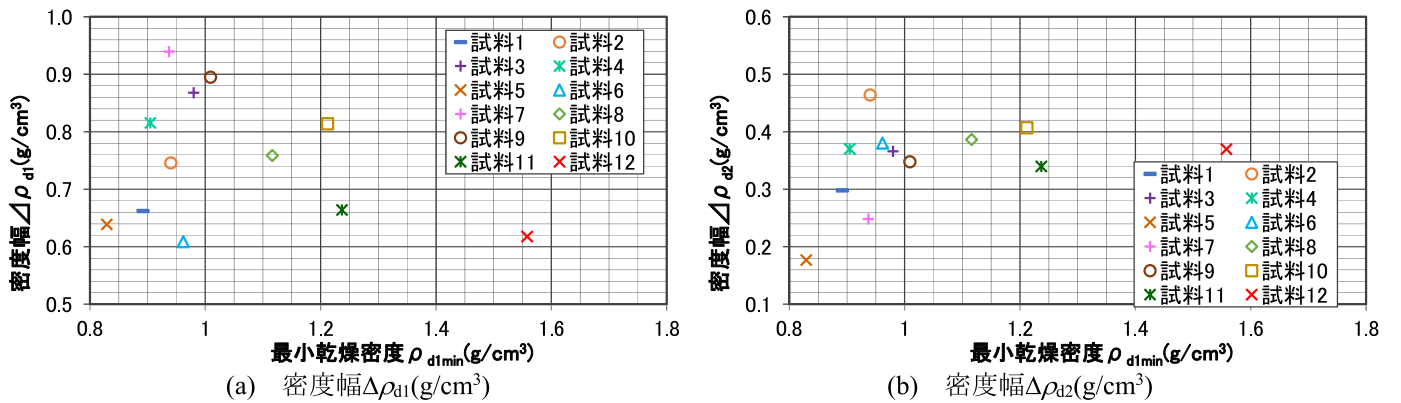


図6 最小乾燥密度 ρ_{dmin1} ～締めめ密度幅 $\Delta\rho_d$ の関係

た、図 5(a)、図 6(a)より、 $\Delta\rho_{d1}$ と ρ_{dmax1} 、 ρ_{dmin1} の間にも明確な相関がみられなかった。

$\Delta\rho_{d1}$ と最大・最小密度幅の関係について、後者の試験結果がなく直接的な比較はしていないものの、先述のように $\Delta\rho_{d1}$ は細粒分およびサクシヨンの影響が強く反映されることから、最大・最小密度幅とは物理的意味が異なると考えられる。なお、現段階では $\Delta\rho_{d1}$ とせん断強度特性の関係は十分な対比を行えていないが、上記の傾向を踏まえ、せん断抵抗角のみならずサクシヨンに起因する粘着力と $\Delta\rho_{d1}$ の相関に関する検討が望まれる。

(b) $\Delta\rho_{d2}$ に関する考察 $\Delta\rho_{d2}$ について、図 3(b)、図 4(b)より粒度特性に拘らず $\Delta\rho_{d2}$ は 0.3~0.4 の値をとるものが多数を占め、50%通過粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c ともに明確な相関が見られないことがわかった。JIS 基準による最大・最小密度幅は粒径に反比例する傾向が確認されているが^{(2)、(4)}、締固め試験を拡張して得られる $\Delta\rho_{d2}$ に類似性は見出せなかった。したがって、 $\Delta\rho_{d2}$ とせん断強度特性との相関は見られない可能性が高いといえる。

次に $\Delta\rho_{d2}$ と ρ_{dmax1} 、 ρ_{dmin1} の関係について、これらの増加に比例して $\Delta\rho_{d2}$ も大きくなる傾向が確認できた。したがって、大きい密度が得られる試料ほど、気乾状態における骨格構造の自由度が大きいといえる。

4. おわりに

本論文は盛土材料のせん断強度特性の推定手法を探るため、種々の粒度特性を持つ盛土材に対して最小締固め曲線を定義し、締固め曲線の差から得られる密度幅の値と、粒度特性および最大・最小乾燥密度との関係を検討した。概要は以下のとおりである。

- 1) 最小締固め密度を、締固めエネルギーが 0 となるよう落下高さをなくして試料土を投入して得られる密度として定義し、最適含水比と気乾状態における締固め曲線との乾燥密度の差を密度幅と定義した。
- 2) 貧粒度の砂の最小締固め曲線の形状は含水比の変化に対してあまり変動することなく、気乾状態になると締固め曲線、最小締固め曲線ともにコラプス現象を生じる。これ以外の試料の最適含水比より乾燥側では、含水比の減少に伴いサクシヨンに起因する粒子間接触力が低下し、骨格構造が低位化して密度が増加する。最適含水比より湿潤側では、細粒分により最小締固め曲線の発現傾向は異なるものとなった。
- 3) 最適含水比での密度幅 $\Delta\rho_{d1}$ は細粒分含有率 $F_c=30\%$ で最大値となる。一方、粒径が $\Delta\rho_{d1}$ に与える影響は不明であった。
- 4) 気乾状態の密度幅 $\Delta\rho_{d2}$ は概ね 0.3~0.4 の値となる。また、最大・最小乾燥密度と正の相関はあるが、

50%通過粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c ともに明確な相関がみられなかった。

参考文献

- (1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 第 3 編 物理試験 第 10 章 最小密度・最大密度試験，pp.195-221，2009.
- (2) 吉村優治，小川正二：粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響，土木学会論文集，No.487，III-26，pp.98-108，1994.
- (3) 吉村優治，小川正二：砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響，土木学会論文集，No.487，III-26，pp.187-196，1994.
- (4) Maeda, K and Miura, K: Confining Stress Dependency of Mechanical Properties of Sands, Soil and Foundations, Vol.39, No.1, pp.53-68, 1999.
- (5) Maeda, K and Miura, K: Relative Density Dependency of Mechanical Properties of Sands, Soil and Foundations, Vol.39, No.1, pp.69-80, 1999.
- (6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 第 5 編 安定化試験 第 2 章 突固めによる土の締固め試験，pp.373-385，2009.