



粒度分布に着目した土の締固め特性の簡易推定方法に関する研究

堀田, 崇由

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-09-25

(Date of Publication)

2022-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8168号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008168>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

粒度分布に着目した土の締固め特性の 簡易推定方法に関する研究

令和3年7月

神戸大学大学院工学研究科

堀田 崇由

目次

1. 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の目的	1
1.3 本論文の構成	2
2. 既往の研究	4
2.1 はじめに	4
2.2 土の締固め特性に関する研究	4
2.2.1 締固め度による施工管理について	4
2.2.2 締固めた土の力学特性に影響を与える諸要因について	6
2.2.3 Walker-Holtz 法に関する研究	8
2.2.4 盛土の施工管理における材料試験	10
2.3 土のせん断波速度測定に関する研究	11
2.4 混合土に関する研究	13
2.4.1 混合土中の構造に関する研究	13
2.4.2 混合土の構造主体について	17
2.4.3 粗粒材料の締固め特性に関する研究	17
2.4.4 粗粒土の統一土質分類に関する考察	18
2.5 粒度の三角座標用いた各種特性の推定に関する研究	19
3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響	21
3.1 はじめに	21
3.2 試料の説明	21
3.3 試験結果および考察	23
3.3.1 締固め試験	23
3.3.2 液性限界・塑性限界試験	27
3.3.3 一軸圧縮試験	31
3.3.4 ベンダーエレメント試験	37
3.3.5 サクション測定	42
3.4 締固め条件の違いによって及ぼされる影響の関係	44

3.4.1	はじめに	44
3.4.2	試料の説明	45
3.4.3	試験条件と試験方法	47
3.4.4	締固め度が一軸圧縮強さに及ぼす影響	47
3.4.5	締固め度がせん断波速度に及ぼす影響	50
3.4.6	含水比が一軸圧縮強度に及ぼす影響	51
3.4.7	含水比がせん断波速度に及ぼす影響	52
3.4.8	一軸圧縮強度とせん断波速度およびせん断弾性係数の関係	
3.5	第3章のまとめ	54
4.	礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響	58
4.1	はじめに	58
4.2.	試料の説明	58
4.2.1	粒度調整試料（彩都）	58
4.2.2	同一現場内で採取位置を変えた試料（土岐）	61
4.2.3	その他の盛土材料試料（堤沢，大原，大分，小野）	64
4.2.4	比較検討に用いた文献試料	69
4.3	試験結果および考察	70
4.3.1	礫の吸水率・自然含水比試験	70
4.3.2	締固め試験	74
4.3.3	三軸圧縮試験	77
4.4	第4章のまとめ	83
5.	粒度に着目した締固め特性の推定方法	85
5.1	はじめに	85
5.2	礫分を含まない土の締固め特性の推定方法	85
5.2.1	塑性図を用いた推定方法	85
5.3	礫分を含む土の締固め特性の推定方法	91
5.3.1	三角座標の図上距離を用いる推定方法	91
5.3.2	締固め特性と均等係数・曲率係数の関係	99
5.3.3	最大乾燥密度と最適含水比の関係	101
5.4	推定法の有用性	103
5.5	第5章のまとめ	105

6. 結論	106
6.1 礫分を含まない締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響についてのまとめ	106
6.2 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響についてのまとめ	109
6.3 粒度に着目した締め固め特性の推定方法についてのまとめ	110

参考文献

謝辞

1. 序論

1.1 はじめに

昨今の地球全体の気候変動に伴い、日本でも記録的な豪雨が頻繁に観測されている。それに加え、地震も元来から「地震大国」と称されるほど日本では地震が頻発しており地震と集中豪雨などの複合災害による被害が多発している。中でも土構造物である盛土はそれ自体が人々の暮らしと密接しており、重要なライフラインである鉄道や道路などの線状構造物の一部を構成している場合も多いため、崩壊すれば崩壊地周辺に留まらずシステム全体に甚大な被害をもたらす可能性が高いといえる。現在、盛土のような締固め土を材料とする土構造物の施工管理には、締固め度 D_c (=ある施工現場内の多数の地点でそれぞれ測定した乾燥密度 ρ_d / 所定の締固めエネルギーによる室内締固め試験で求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax}) が用いられている。しかし、現行の施工管理方法では、現場の任意の箇所から採取した代表試料の ρ_{dmax} を管理値として用いているが、広範囲にわたる現場では使用する盛土材料の工学的諸性質がばらついている可能性が低くない。すなわち、同じ ρ_{dmax} を用いて D_c を算出している現行の管理方法では、見かけ上は基準を満たしている箇所であっても、 ρ_{dmax} の値が管理値である代表試料と異なっているため、実際の D_c は基準値を下回っているおそれがある¹⁾。しかし、広域な施工現場内のばらつきを正確に把握することは難しいのが現状である。工事の発注者によっては、この問題を解決するために、所定の盛土量毎に一連の材料試験を実施する規定があるが、局所的な材料の変化に対応できるような簡易な試験方法はなく、施工前の目視等による施工技術者の確認に委ねられているのが現状である。そこで、労力・時間ともに比較的少なく済む粒度試験の情報から、締固め特性について変化を把握することは大変有用である。

一方で締固め度の管理の目的は設計値である強度定数を担保することである。盛土の施工時における物理試験・力学試験に関しても古くから論文^{2),3)}としてまとめられている。しかし、用いられている試料の多くは締固めに適している砂礫質土にも関わらず、現場毎に最大乾燥密度や強度は大きく異なり、それぞれ一連の物理試験や力学試験を行って設計に用いている。強度の違いは主に粒度や細粒分の土質によって生じていると考えられ、物理試験から得られるいくつかの指標となる値を用いて強度をある程度推定することができれば施工管理において有益な情報となる。

1.2 本研究の目的

本研究では、汎用的に粒度から締固め特性および強度特性を推定する方法を確立させ

ることを目的としている。様々な現場から採取した試料を用いて締固め試験および三軸圧縮試験を行い、粒度特性・締固め特性・強度特性の関係性を明らかにした。また、研究室に蓄積されたデータや、既往の研究で用いられているデータを参照し、汎用性のある締固め特性および強度特性の推定方法の確立を行うために考察・検証した。

1.3 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。

第1章では、序論とし、本研究における背景と研究の目的について述べている。

第2章では、本研究を遂行するために必要な知見について既往の研究をまとめて記述した。本研究に必要な知見を(1)土の締固め特性に関する研究(2)土のせん断波速度測定に関する研究(3)混合土の変形・強度特性に関する研究(4)粒度の三角座標を用いた研究の4つに大別して既往の試験結果より得られる傾向や課題について示している。

第3章では、細粒土を対象として、土の粒度と締固め、コンシステンシー限界、変形・強度特性等の各種特性との関係について明らかにするために行った試験について述べる。試験概要としては、任意の割合で砂・シルト・粘土を混合した多数の試料に対して締固め試験、液性限界・塑性限界試験等の物理試験および一軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験といった力学試験を行い、結果に対して考察をしている。

第4章では、第3章と同様の細粒土を対象として締固め時の条件、具体的には締固め度 D_c と含水比 w を変えた数種類の試料の強度・せん断波速度を測定することで、粒度と締固め条件の関係が強度・せん断波速度にどのように影響を与えるか調べている。

第5章では、粗粒土を対象として土の粒度と締固め強度特性等の各種特性との関係について明らかにするために行った試験について述べる。試験概要としては、主に盛土施工現場から採取された試料群に対して土の粒度試験、締固め試験を行い、粒度から締固め特性の推定に関して調べている。また同様の試料に対して三軸圧縮試験を行い、強度との関係についても調べている。

第6章では、第3章から第5章について得られた知見についてまとめるとともに、粒度に着目した締固め特性の推定法について述べている。

第1章 序論

本研究の背景と目的，論文構成について述べている。

第2章 既往の研究

- ・土の締固め特性に関する研究
- ・土のせん断波速度測定に関する研究
- ・混合土に関する研究
- ・粒度の三角座標を用いた各種特性の推定に関する研究

本研究を遂行するために必要な知見について既往の研究をまとめて記述し，既往の試験結果より得られる傾向や課題について示している。

第3章 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

対象試料：礫分(粒径 2mm 以上)を含まない試料。粒度を変化させた 66 種類。

主な試験：締固め試験，液性限界・塑性限界試験，一軸圧縮試験，ベンダーエレメント法によるせん断波速度測定

得られた知見：粒度と締固め特性の関係，粒度と強度特性の関係，液性限界・塑性限界試験結果（塑性 or 非塑性）が締固め特性と強度特性に与える影響。

第4章 礫分を含む締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

対象試料：礫分(粒径 2mm 以上)を含む試料。多数の盛土現場から採取。

主な試験：締固め試験，三軸圧縮試験

得られた知見：粒度と締固め特性の関係，粒度と強度特性の関係，粒度の三角座標の図上距離を用いた粒度と締固め特性の関係。

第5章 粒度に着目した締固め特性の推定方法

礫分の有無により，2通りの推定方法を提案

礫を含まない場合：塑性図を用いた推定方法。液性限界・塑性限界から汎用的な締固め特性（最大乾燥密度・最適含水比）の推定が可能。

礫を含む場合：粒度の三角座標の図上距離を用いた推定方法。同一現場であれば事前に粒度，最大乾燥密度の 4～5 点のデータを準備することで，粒度から最大乾燥密度を推定可能。

第6章 結論

本研究で得られた知見についてまとめている

図-1.1 本論文の構成と概要

2. 既往の研究

2.1 はじめに

この章では本研究を遂行するために必要な知見について既往の研究をまとめて記述する。本研究に必要な知見を「(1) 土の締固め特性に関する研究 (2) 土のせん断波速度測定に関する研究 (3) 混合土の変形・強度特性に関する研究 (4) 粒度の三角座標を用いた各種特性の推定に関する研究」の4つに大別して既往の試験結果より得られる傾向や課題について示している。

2.2 土の締固め特性に関する研究

2.2.1 締固め度による施工管理について

現在、盛土や擁壁、堤体といった締固めた地盤材料によって構成される構造物の施工・品質管理には締固め度 D_c の値が用いられている^{4~8)}。締固め度 D_c とは室内で行われる土の突き固め試験によって得られる最大乾燥密度 ρ_{dmax} に対する現場の測定地点における乾燥密度 ρ_d の大きさを表される ($D_c = \rho_d / \rho_{dmax}$)。土の乾燥密度 ρ_d と力学特性との関係は土の種類によって異なるため、その土の相対的な締固め具合である D_c が規定の値以上であることを確認することで施工・品質管理が行われているのである。

締固め土の力学特性に関する研究は古くより行われており、締固め度 D_c 、締固め時の含水比 w 、粒度や締固め方法が締固め土の力学特性を左右するといわれている。近年では、平川ら⁹⁾や龍岡ら^{10), 11)}によって様々な地盤材料に対して D_c および w を変化させた一連の室内強度試験の結果から、 D_c の増加に伴う地盤材料の変形・強度特性の変化を把握するとともに、変形・強度特性と高い相関を持つ管理指標を見出すための研究が進められている。

龍岡ら¹⁰⁾は従来から締固め管理の指標として用いられている相対密度 D_r および締固め度 D_c の各試料の強度との相関性を比較することで、両者の締固め管理指標としての妥当性を検証している。図-2.1 および図-2.2 は龍岡ら¹⁰⁾によって示された多様な砂礫を用いた三軸圧縮試験での粘着力 $c=0$ として求めた内部摩擦角 ϕ_{peak} と D_r および D_c の関係を表した図である。図-2.1 より ϕ_{peak} と D_r の相関性が非常に低いことがわかる。一方、 ϕ_{peak} を D_c に対してプロットした図-2.2 をみると、データのばらつきが小さく、狭い範囲に収まっており、 ϕ_{peak} と D_c の相関は比較的良いことがわかる。以上より龍岡らは広範

な砂礫を対象とする現場の締固め管理には相対密度ではなく、締固め度によって行われるのが妥当であると結論付けている。

図-2.3 は様々な地盤材料の締固め度 D_c の減少に伴う最大偏差応力 q_{max} の変化を示した図である。平川ら⁹⁾は6種類の砂礫を用いて締固め度 D_c を変化させた一連の室内強度試験の試験結果より、所定の基準締固めエネルギーに対して最適含水比 w_{opt} で締め固めた場合の変形・強度特性は、 D_c が90%~100%の間で大きく変化することを報告している。また、 D_c の変化に伴う盛土材の最大偏差応力の変化率は、排水状態の場合よりも非排水状態の場合の方が大きいとしている。また、図-2.4 は地盤材料ごとのせん断抵抗角

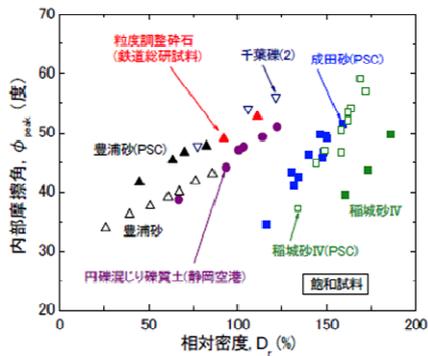


図-2.1 D_r と ϕ_{peak} の関係¹⁰⁾

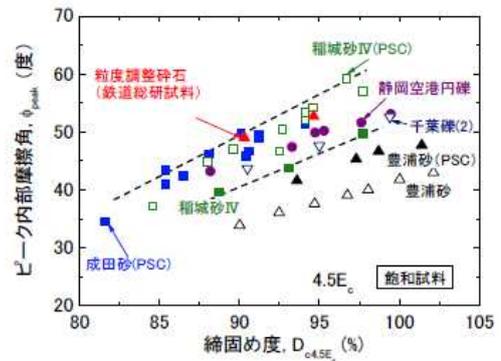


図-2.2 D_c と ϕ_{peak} の関係¹⁰⁾

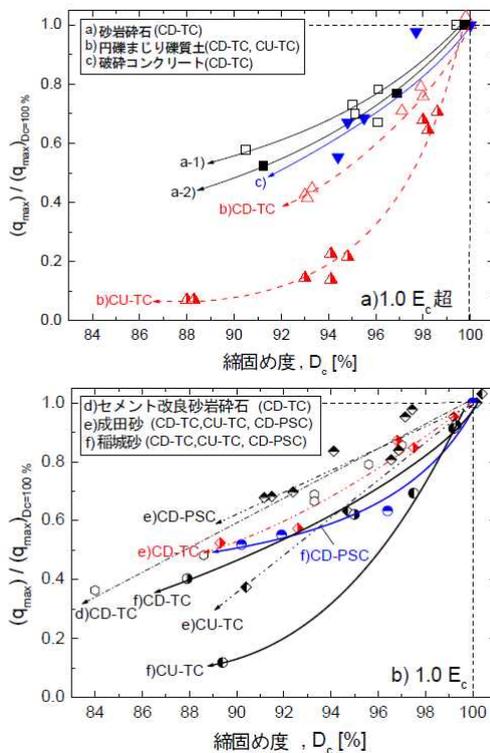


図-2.3 D_c の減少に伴う q_{max} の推移⁹⁾

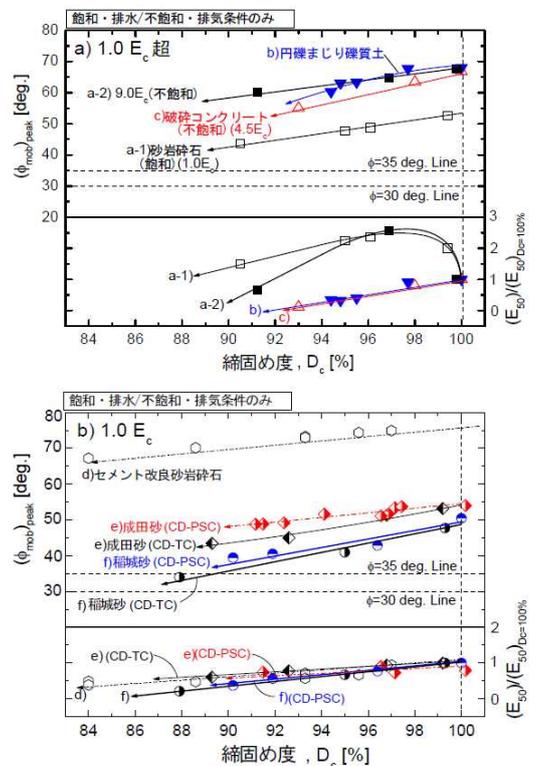


図-2.4 D_c と $(\phi_{mob})_{peak}$ および $E_{50}/(E_{50})_{Dc=100\%}$ の関係⁹⁾

の最大値 $(\phi_{\text{mob}})_{\text{peak}} \sim$ 割線剛性比 $E_{50}/(E_{50})_{D_c=100\%} \sim D_c$ の関係を示している. この図より砂礫の変形・強度特性は, 同じ D_c においても盛土材の粒子特性 (粒径, 粒度, 粒子形状および粒子破碎性) に強く依存し, D_c の変化による変形・強度特性の変化率もその粒子特性に依存すると報告している.

また龍岡ら¹¹⁾は様々な建設プロジェクトで用いられた多様な砂礫を用いた各種力学試験の結果より, D_c と締固めた地盤材料の強度特性との間に高い相関性があることを示し, またその傾向には材料の種類 (土質分類, 粒度) に応じて明確な差があることを明らかにしている. 図-2.5 は龍岡らによって示された, 多様な砂礫を用いた三軸圧縮試験での $c=0$ として求めた内部摩擦角 ϕ_{peak} を $4.5E_c$ と $1E_c$ 基準の D_c に対してプロットした図であり, この図より次のような傾向が示されている.

- (1) 飽和砂質土において, 粒度に応じて貧配合と良配合で明確な差がある.
- (2) 飽和良配合砂礫においては, 試料ごとの差が小さい.
- (3) 良配合礫の不飽和排水強度は, D_c が高いと通常設計で用いられる飽和排水強度よりも高いが, D_c が低いと飽和排水強度と類似であり, 過剰間隙水圧の発生によっては飽和排水強度以下になる可能性も考えられる.

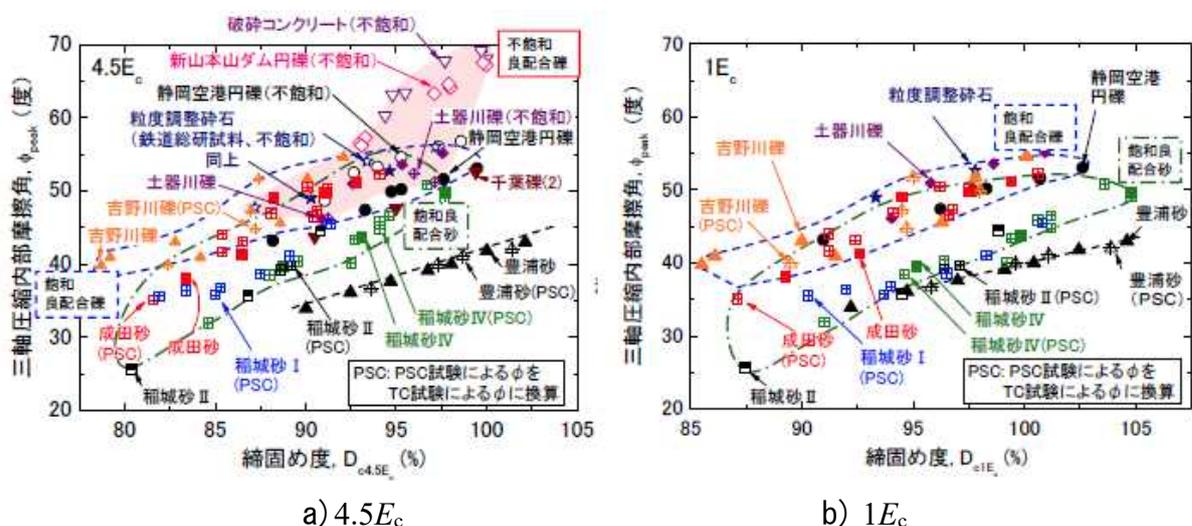


図-2.5 $\phi_{\text{peak}} \sim D_c$ 関係¹¹⁾

2.2.2 締固めた土の力学特性に影響を与える諸要因について

前節で述べたように締固めた土を用いた構造物に対しては締固め度 D_c によって管理されているが, 粒度等の土質の違いによって土試料ごとに D_c と力学特性の関係が異なっている. そもそも最大乾燥密度 ρ_{dmax} やそれに伴う最適含水比 w_{opt} の考え方は 1933 年の Proctor の研究¹²⁾によって提示された締固め曲線によって広く知られることとなり, D_c

を高めることや正しく管理してばらつきを少なくするための研究が熱心に行われてきた。それらの研究によって土の締固めに関する多くの知見が得られてきたことは事実であるが、構造物を造る際に土を締固める目標は密度を高めることではなく、要求される性能を満足することである。

久野¹³⁾は D_c のみに捕われず、構造物として要求されている性能を満たすことが重要であると述べ、締固めた土の含水比や締固めエネルギー、細粒分の違いといった状態や土質を表す値と透水性、圧縮性といった力学特性との関係について求めている。図-2.6、図-2.7 は久野による試験の結果である。図-2.6 より次のような考察が示されている。

- (1) 圧縮強さや CBR の強度特性の極大値は最適含水比 w_{opt} よりやや低い含水比 w で生じ、締固めエネルギーが大きいほど強度も大きい。しかし、水浸後の強度は w_{opt} 付近で最大となる。
- (2) 圧縮性は w_{opt} よりやや低い含水比で極小となる。
- (3) 透水性は w_{opt} よりやや高い含水比で極小となる。

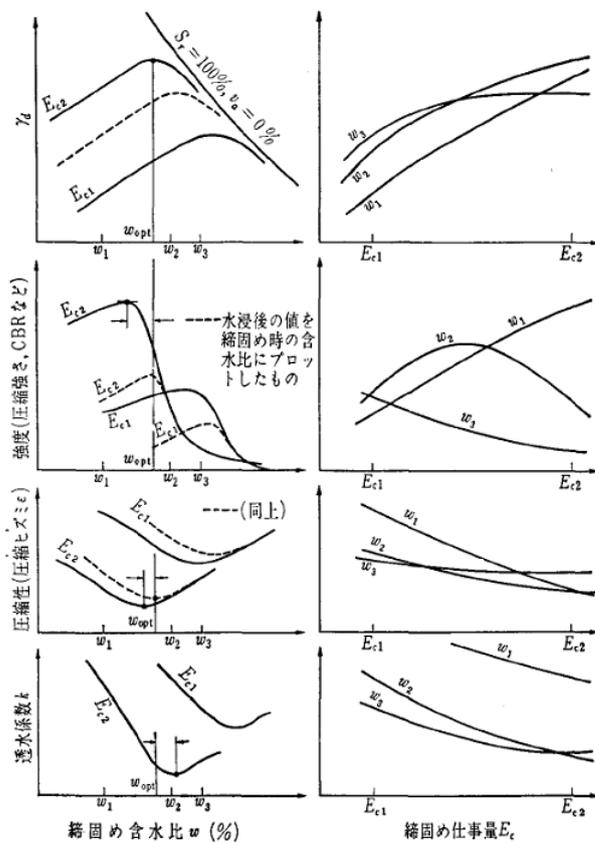


図-2.6 締固めによる土の性質の変化の傾向¹³⁾

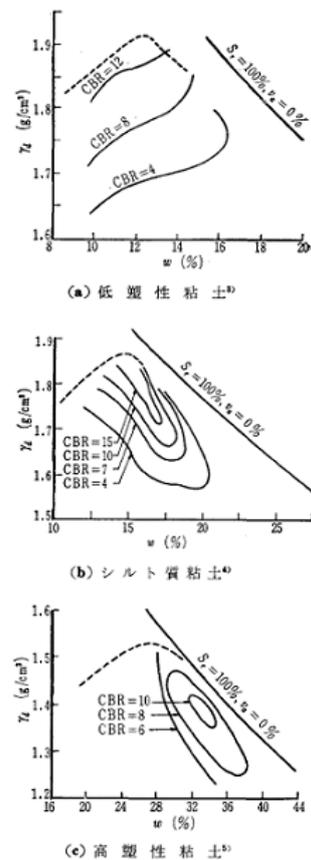


図-2.7 細粒分の土質が異なる試料の γ_d - w 図上の等浸水 CBR¹³⁾

- (4) 同一含水比で締固めエネルギーを増加させると普通は一定の勾配で乾燥密度は増加するが、含水比が高すぎると乾燥密度が低下する場合がある。これはオーバーコンパクションである。

また、**図-2.7**より、粘性土であっても土質の違いによって得られる強度の傾向は異なることを示している。以上の結果を受けて久野は締固めエネルギーや土質の違いによって乾燥密度と強度の関係は変わるものの、現場で直接締固めエネルギーを測定・管理することは難しいとしている。

さらに最近では龍岡ら^{14),15)}が室内試験と現場の締固めエネルギーの違いに関する問題点の解決策として、締固めエネルギーに依らない最適飽和度の考え方による締固め土の管理手法について提案している。

2.2.3 Walker-Holtz 法に関する研究

Walker-Holtz 法は、原粒度と規定のふるい通過試料の間に生まれる最大乾燥密度の誤差を補正するために広く認知されているものである¹⁶⁾。また、規定したふるいを通過せずに残留した試料を礫、通過試料を土と仮定して、その礫分の混入率とふるいを通過した土に対する締固め試験の結果から礫の密度を推定し、乾燥密度を求めるものである。この方法では、任意に規定したふるいを通過する試料を土とし、それ以上の粗粒分を礫とみなす。そして、土と礫の混合物を締め固めた場合、礫と礫の間隙は土が満たされ、間隙中の土はその締固め仕事量で土のみを締め固めた場合の密度になっていると仮定している。この仮定は、礫の混入率が30~40%までの場合は成立するものである。いま、締め固めた土および礫の混合物の状態を**図-2.8**のように表す。

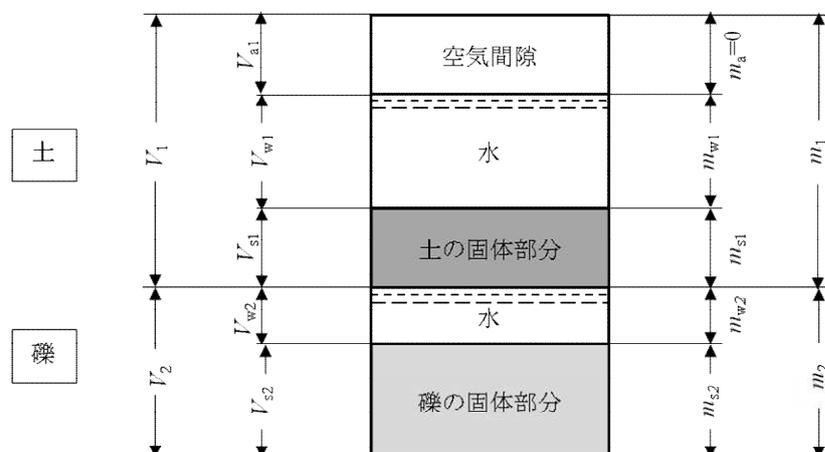


図-2.8 Walker-Holtz 法の概念図

図-2.8によれば，土粒子の密度 ρ_{s1} ，礫の密度 ρ_{s2} はそれぞれ，

$$\rho_{s1} = \frac{m_{s1}}{V_{s1}}, \quad \rho_{s2} = \frac{m_{s2}}{V_{s2}}$$

であり，土の含水比 w_1 ，礫の含水比 w_2 はそれぞれ，

$$w_1 = \frac{m_{w1}}{m_{s1}}, \quad w_2 = \frac{m_{w2}}{m_{s2}}$$

となる（ここでは式を簡略化するため，含水比を%でなく小数で表す）．礫の混入率 P を次のような乾燥質量比で表わす．これは粒径加積曲線上の制限粒径に対する残留率（これも簡単化のために%でなく小数で表す）である．

$$P = \frac{m_{s2}}{m_{s1} + m_{s2}}$$

土と礫の混合物の乾燥密度 ρ_d は，

$$\rho_d = \frac{1}{\frac{1-P}{\rho_{d1}} + \frac{(1+w_2 \cdot \rho_{s2} / \rho_w)P}{\rho_{s2}}} \quad \text{式-2.1}$$

となる．ここに， ρ_{d1} は土のみの乾燥密度 $=m_s/V_1$ ， ρ_w は水の密度である．ここで，

$$\frac{\rho_{s2}}{(1+w_2 \cdot \rho_{s2} / \rho_w)} = \rho_{d2} \quad \text{式-2.2}$$

とすれば，式(1.2.1)は，

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1} \cdot \rho_{d2}}{P \cdot \rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} \quad \text{式-2.3}$$

となる．また，ゼロ空気間隙状態における含水比に対する乾燥密度は，次の式によって算出する．

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + \frac{w}{100}} \quad \text{式-2.4}$$

一方，式-2.2をみると， ρ_{d2} は $w_2=0\%$ の時に ρ_{s2} で礫の固体密度であり， $w_2 \neq 0$ のときは式-2.4と対比すると，式の形は礫のゼロ空気間隙乾燥密度 ρ_{dsat} を表している．これはこの方法の仮定から明らかのように，礫と礫の間隙を土が満たしていると考えているため，図-2.8に示したように礫部分には空気間隙の存在を認めていないからである．したがって，ここでの ρ_{d2} は礫のみを突き固めた場合の乾燥密度と考えてはならない．

また，土と礫の混合物全体の含水比 w は，

$$w = w_1(1-P) + w_2 \cdot P \quad \text{式-2.5}$$

となる。なお、混合物全体の体積に対する、土のみ、礫のみの乾燥密度をそれぞれ ρ'_{d1} 、 ρ'_{d2} とすれば、

$$\rho'_{d1} = \frac{m_{s1}}{V_1 + V_{s2} + V_{w2}} = \frac{\rho_{d1} \cdot \rho_{d2} \cdot (1-P)}{P \cdot \rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} \quad \text{式-2.6}$$

$$\rho'_{d2} = \frac{m_{s2}}{V_1 + V_{s2} + V_{w2}} = \frac{\rho_{d1} \cdot \rho_{d2} \cdot P}{P \cdot \rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} \quad \text{式-2.7}$$

となり、

$$\rho_d = \rho'_{d1} + \rho'_{d2} \quad \text{式-2.8}$$

である。

ここで、式-2.7の ρ'_{d2} は、礫のみを締め固めた乾燥密度より大きくなることはない。また、 ρ'_{d1} および ρ_{d1} は、礫の混入率 P が大きくなるにしたがい礫に邪魔されて増加しなくなるため、式-2.6どおりの変化は期待できない。その適用範囲は P が30~40%までといわれている。

2.2.4 盛土の施工管理における材料試験

盛土の施工管理においては、日常管理として行われるRI法や突き砂法による密度測定に加えて、一定施工量毎に行われる材料試験がある。材料試験の頻度及び試験項目は土木工事においては工事発注者によって基準が設けられていることが多く、表-2.1に主な基準を示す。材料試験の試験項目は対象構造物によって異なるが10種類以上に及び、粒度試験や締め固め試験といった基本的な物性を調べる試験は必ず実施される。

表-2.1 主な材料試験頻度の基準^{17),18)}

基準の種類	材料試験頻度	対象構造物
NEXCO 施工管理要領	100,000m ³ 又は 材料が異なるごと	下部路体
	50,000 m ³ 又は 材料が異なるごと	上部路体
	20,000 m ³ 又は 材料が異なるごと	下部路床
	10,000 m ³ 又は 材料が異なるごと	上部路床
	上部路床に準じる	インバート埋戻し工
道路土工－盛土工指針	材料が変わるごと	盛土

表-2.1 から分かるように、材料試験の実施頻度は数万 m^3 に一回程度又は材料が変わる毎とされている。工事規模にもよるが、材料試験の実施される施工量に達するには1カ月以上の間隔が必要となることが多い。日常管理で行われる目視等による確認で明らかに材料が異なる場合においても材料試験は行われるが、定量的な判断基準がなく、品質の確保は現場技術者の判断に委ねられているのが実情である。

2.3 土のせん断波速度測定に関する研究

澁谷・川口¹⁹⁾は、現場調査と室内試験の両方を合理的に相互補完するツールとして表面波探査などから得られるせん断波速度 V_s の利用が有用であることを示している。また、今後自然斜面や盛土の健全性評価手法を確立する際には、非破壊試験である表面波探査は有望であるという成果が多数報告されている²⁰⁻²³⁾。室内試験としてはベンダーエレメント (BE) 試験がある。

BE とは、片持ち梁とした二枚貼り付けたピエゾセラミック板を用いて、土供試体にせん断波を発生・受信し、せん断波速度を測定するものである。片持ち梁にしたピエゾセラミックは電圧を加えると変形し、逆に強制的に変形させると電圧を生じる性質がある。BE 試験もこの特性をうまく利用して、電圧を加えると振動する BE と、振動を電圧に変える BE の2種類を用いており、前者は起振に、後者は受振に用いられる。図-2.9 は、BE の一例を示したものである²⁴⁾。厚み方向に分極された圧電素子を弾性補強かつ電極の役割を果たすニッケルなどのシム材の両面に貼りあわせた構造 (バイモルフ) となっている。圧電素子の材質は一般に通称 PZT と呼ばれるチタン酸ジルコン酸鉛 ($Pb(Ti,Zr)O_3$) である。このような構造を持つバイモルフに電圧を印加すると上部の圧電素子は圧電横効果によって縮み、下部の圧電素子は伸びる。その結果、全体としては上部に曲がることとなる。また、変形を与えると電圧を発生する特性も有している。この特性を利用してキャップやペDESTALに取り付けた BE の一方に電圧を加え、土中にせん断波を発生させ、他方の BE でせん断波を受信することによって土中を伝播するせん断波速度を求めるものである。地盤材料の微小ひずみにおける変形特性を求める室内試験装置・方法の最適化に関して BE を用いた国際一斉試験²⁴⁾では、参加機関の全ての BE が図-2.9 に示すようなバイモルフタイプであり、その材質はすべての機関で PZT が用いられていたようである。また、せん断波を送信・受信するための結線方法には、パラレル型とシリーズ型がある。分極方向が同一方向になるように貼りあわせたパラレル型は、同じ印加電圧に対して、分極方向が異なる方向に貼りあわせたシリーズ型よりも大きく振動する特性を有しているため送信用に用いられる場合が多い。一方、シリーズ

型は、同じ振動に対して平行型よりも生じる電圧が高くなるので受信側に用いられることが多い。このことから国際一斉試験においても送信側に平行型 (P)、受信側にシリーズ型 (S) を用いている場合が主流のようである²⁴⁾ (図-2.10 参照)。

BE の最大の特徴は、それ自身が小さいため、比較的小さな供試体を有する室内試験でも容易に取り付けることが可能であり、周囲を拘束した圧密容器や側方の拘束が自由な三軸セル内において任意の時点で簡単にせん断弾性波速度を計測できることである。その一方で、問題点としてせん断波の到達時間を見極めることが必ずしも容易ではないことがある。BE によって生起される波にはせん断波以外の波も含まれており^{25),26)}、受信波形の読み取りを難しくしている。一斉試験においても伝播時間同定法の違いによって算出されるせん断波速度にばらつきがみられるため、平成 23 年に地盤工学会の理事会にて承認された「ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法」においては、基準本文ではなく注記として以下のように記載してある。

- (1) 送信電圧の周波数は、5 種類程度の異なる周波数で実施する。
- (2) 一つの周波数の試験結果に対して 2 種の方法で伝播時間を求め、その誤差を 3% 以内とする。

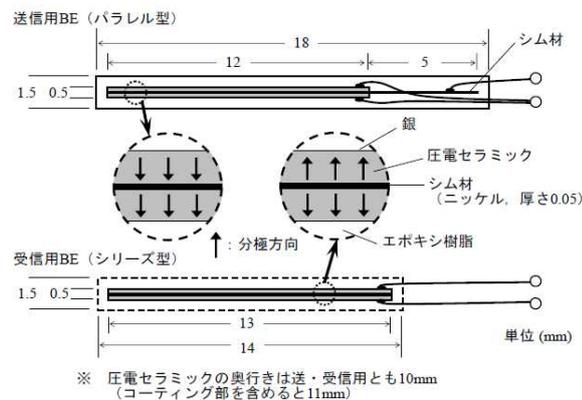


図-2.9 BE の一例²⁴⁾

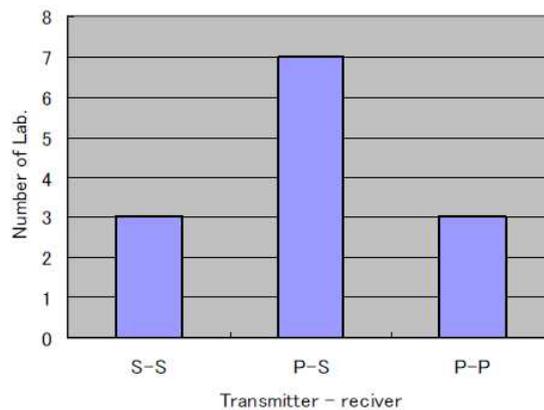


図-2.10 BE の結線方法²⁴⁾

- (3) 送信電圧の周波数と伝播時間の積を2倍以上とする。
- (4) せん断波の伝播時間は(2)と(3)の条件を満たした全ての値の平均値とする。

注記に記載した理由は、「規格・基準に関する細則」にある「技術向上を妨げないもの」という観点から、規定はせずに注記に示す方法を推奨することに留めた。上記の推奨する方法は、これまでの研究成果も踏まえてP波を除く弾性波の中で最も速度が大きいS波において、同一方向に振れる最初の到達点を読み取る方法を基本としているので、基準に示した適用範囲の土質材料に対して基準に示した方法を用いると、生起された波の中からS波の伝播速度を求めることができると判断している²⁷⁾。

2.4 混合土に関する研究

本研究では粒度分布と締固めた土の各種特性との関係を調べるため、砂分・シルト分・粘土分を混合して様々な粒度を持った試料を作製して試験を行っている。砂分や粘土分を任意の配合割合で混合した試料を用いた研究として、中間土の研究²⁸⁾や圧密時や締固め時の異方性に関する研究^{29)~31)}や内部の微視的構造に関する研究^{32)~38)}が行われている。

2.4.1 混合土中の構造に関する研究

混合土で各種特性に関して考察する際には内部の構造について述べられていることが多い。森・柴田による一連の研究^{33)~38)}によって砂と粘土の混合土について配合割合と構造の変化の関係について詳細に述べられている。まず、森・柴田は砂と粘土の混合土では図-2.11に示すような2種の基本構造に分けられ、締固めた混合土もこの基本構造の組み合わせで構成されるとしている。ここで、図-2.11に示すI構造は砂のみを締固めた時と同一の砂粒子の形成する骨格構造を持ち、粘土粒子はその骨格の形成する間隙に入り込んでおり、この粘土の密度はかなり小さい構造である。一方、II構造は粘土マトリクス中に砂粒子が種々の混入率で分散している状態であり、II構造内の粘土の密度は同一締固めエネルギーで粘土のみを締固めた時と等しくなっている。また、締固めた砂・粘土混合土を考えた場合は図-2.12のように、砂分が多い場合はI構造が主体となりII構造はその中に点在している状態となり、逆に粘土分が多い場合はII構造が主体となり、その中にI構造が点在すると考えた。ここで、各基本構造の砂及び粘土の混合率は、その土の中の各構造の平均値で表されることになり、I、II構造ともにそれぞれの構造を形成できる範囲内で砂分や粘土分の混合率にはばらつきがあるのが現実である。

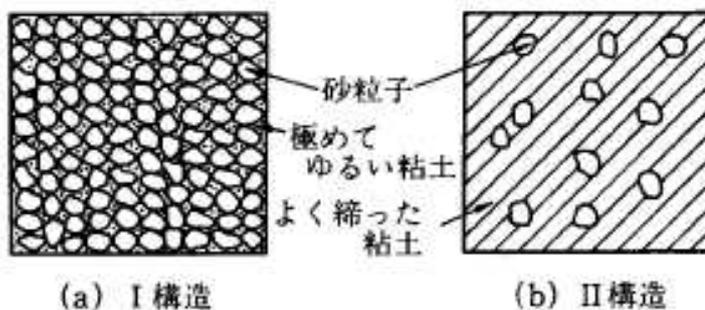


図-2.11 砂・粘土混合土の2種の基本構造(例えば38)

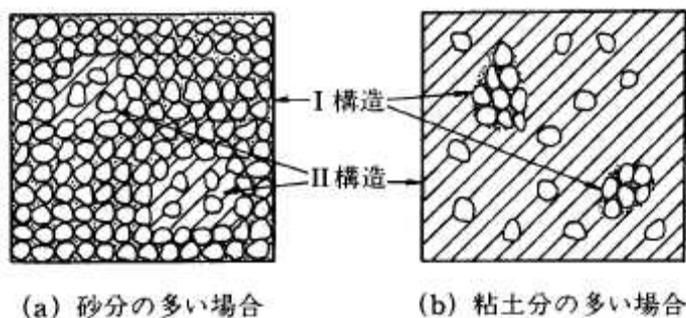


図-2.12 締固めた混合土内のI, II構造(例えば38)

以上の考えに基づき、混合土中における基本構造I, IIの混合比率について、次のように求めている。

$$\alpha = \frac{\text{I 構造群の体積}}{\text{混合土の全体積}} \times 100(\%) \quad \text{式-2.9}$$

ここで、 α : I 構造の混合比率

そこで、混合土中のそれぞれの構造について、図-2.13 に示すように重量及び体積について仮定し、各々について求め、 α について整理すると

V_{s1}	W_{s1}	I 構造群
V_{v1}	W_{c1}	
V_{s2}	W_{s2}	II 構造群
V_{v2}	W_{c2}	

(a) 体積 (b) 重量

図-2.13 砂・粘土混合土の重量及び体積³⁷⁾

$$\alpha = \frac{\rho_{dco} \{G_s - \rho_d(1-P)\} - G_s \cdot \rho_d \cdot P}{(G_s - \rho_{dso})(\rho_{dco} - \rho_{dvc})} \times 100(\%) \quad \text{式-2.10}$$

ここで、 α : I 構造の混合比率

P : 粘土混合率

ρ_d : 各粘土混合率の時の最大乾燥密度

ρ_{dco} : 粘土のみを締固めた時の最大乾燥密度

ρ_{dso} : 砂のみを締固めた時の最大乾燥密度

ρ_{dvc} : I 構造中の粘土の密度

G_s : 砂粒子の比重

この式-2.10 によって求められた I 構造の混合比率 α と粘土混合率 P の関係を数種の砂と粘土の組み合わせで作製した試料について示したのが図-2.14 である。図より、粘土混合率 P が 30%までの範囲では α は 70%以上となっており、この範囲では I 構造が混合土内の大半を占めている。また、 $P=30\sim40\%$ の範囲では α が 75%から 45%へと急激に減少している。 $P=40\%$ 以上では、 α は 45%以下になっており II 構造が過半数以上となっている。しかし、この関係は仮定に基づいた計算式から算出した α の値を用いている。そのため、 α の妥当性の検証のために水浸 CBR 試験を行った。水浸 CBR 試験を実施した理由としては、粘性土は水浸による飽和状態では CBR 試験に準じた貫入試験による強度が水浸前の強度に比べて極めて小さくなることが分かっている。逆に、砂質土では砂粒子の形成する骨格が加わるエネルギーに対して対抗するため、水浸後もそれほど強度低下は生じないといわれている。ここで、I 構造は砂質的性質を持つ構造であり、II 構造は粘性土的性質を持つとしているため、水浸時の CBR 試験結果は混合土内での主となる基本構造によって決定されると考えられる。すなわち、I 構造が混合土内で大半を占めるならば砂質土と同様の強度となり、II 構造が多くなれば粘性土と同様の結果となると予測できる。そこで、 P と水浸時と非水浸時の CBR 試験結果の関係を示したのが図

-2.15 である。図より、 P が 30%以下では非水浸、水浸 CBR 値はほぼ同等の値を示しており、 P の増加に伴って増加している。次に $P=30\sim40\%$ の範囲では非水浸 CBR 値は増加しているにも関わらず、水浸 CBR 値が急激に減少しており、40%では非水浸 CBR 値の半分以下になっている。 P が 50%以上になると、水浸 CBR 値は P の増加に伴って徐々に減少して一定値に漸近する傾向がある。非水浸 CBR 値も 50%で最大値となり、減少している。

以上の結果を、次のようにまとめている。

- (1) P が 30%以下の範囲では、非水浸 CBR 値、水浸 CBR 値ともにほとんど変わらず、これは混合土全体の性質が砂質土的となっていると考えられる。
- (2) $P=30\sim40\%$ の範囲では水浸 CBR 値が非水浸 CBR 値に比べて極端に小さくなる。これは混合土全体を構成する骨格構造がわずかな粘土量の増減によって I 構造から II 構造へと変化できる状態にあるためだと考えられる。
- (3) P が 50%以上の範囲では、水浸 CBR 値はほぼ一定の値を示している。これは混合土全体の性質が粘性土的になっていると考えられる。

(1) ~ (3) で述べている結果より、式-2.10 によって求められた I 構造の混合比率 α と粘土混合率 P の関係を表した曲線の妥当性は高いと考えられ、I 構造と II 構造の 2 種の基本構造とその仮定に基づいた式-2.10 は締固め土内の構造を表現することができているとしている。

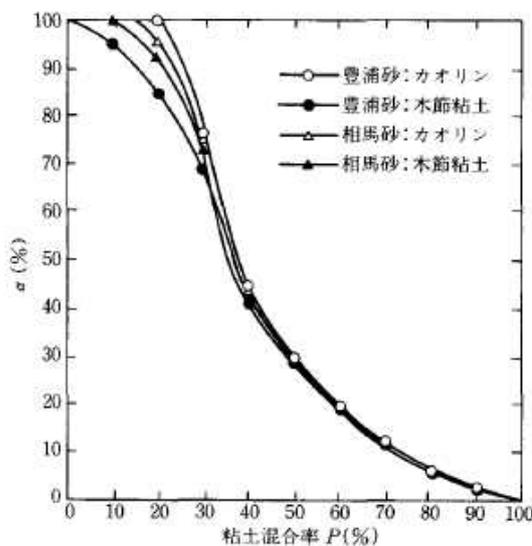


図-2.14 $P-\alpha$ 曲線³⁷⁾

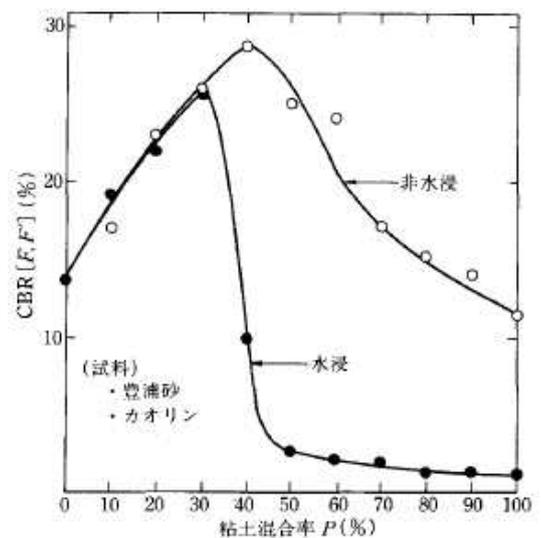


図-2.15 P -CBR 曲線³⁷⁾

2.4.2 混合土の構造主体について

前節で紹介した研究では、粘土混合率が30%~40%の範囲が構造の主体が砂質土的であるのか粘性土的であるかの境界であると述べられていた。他の混合土の研究においても、この構造の主体の違いは多く述べられており、主に細粒分含有率と物性値や強度特性など様々な値の関係における傾向の変化がみられる点を境界としている。表-2.2にいくつかの研究における結果を示す。表より、いずれの研究結果においてもおおよそ細粒分含有率が30%程度で傾向の変化がみられていることが分かる。

表-2.2 混合土中の細粒分による構造変化の境界

論文著者	試験	指標	境界となる細粒分含有率
落合ら ²⁸⁾	液性限界・塑性限界試験	非塑性	30%
兵動ら ²⁹⁾	三軸圧縮試験	非排水せん断強度	30%
金子ら ³⁰⁾	ベンダーエレメント試験	せん断弾性係数	15~30%
金山ら ³¹⁾	ポロシメータ	圧密による間隙の変化	40%

2.4.3 粗粒材料の締固め特性に関する研究

粒径が大きい材料で地盤を造成した場合、締固め不足となりやすく、陥没や沈下の問題となる空隙を地盤内に残すこととなる。粗粒分を細粒分で十分充填し、密な構造とすることはこれらの問題を解決することに効果的である。日笠丘³⁹⁾らは、礫分と砂分の配合比が粗粒材料の締固め特性に及ぼす影響を調べている。

産地の異なる3種類の岩砕を分粒することで得られた砂分(0~2mm)、礫分(2~53mm)を種々の混合比で再度粒度調整をした試料を用い、その混合比として砂分含有率 P_s を定義し、0,25,30,40,50,75,100%の7種とした。これらの試料に対して、振動締固め試験(以後、「振動法」)および大型突固め試験(以後、「突固め法」)を実施した。図-2.16に混合材料の砂分含有率と締固め密度(実測値)および砂分密度(算定値)の関係を示す。岩砕3種類ともに砂分含有率に対し、振動法や突固め法による締固め時の密度は、砂分含有率が0%から増えるにつれて増加し、30~40%でピークに達し、それ以上では減少することが分かった。

本研究で用いる三角座標上の粒度と最大乾燥密度の関係図では、礫分と砂分が主に含まれている右下の部分が空白になっており、その部分が砂分含有率30%~であるため、この報告から、本研究で得られた最大乾燥密度の推定式の適用範囲を考察する。

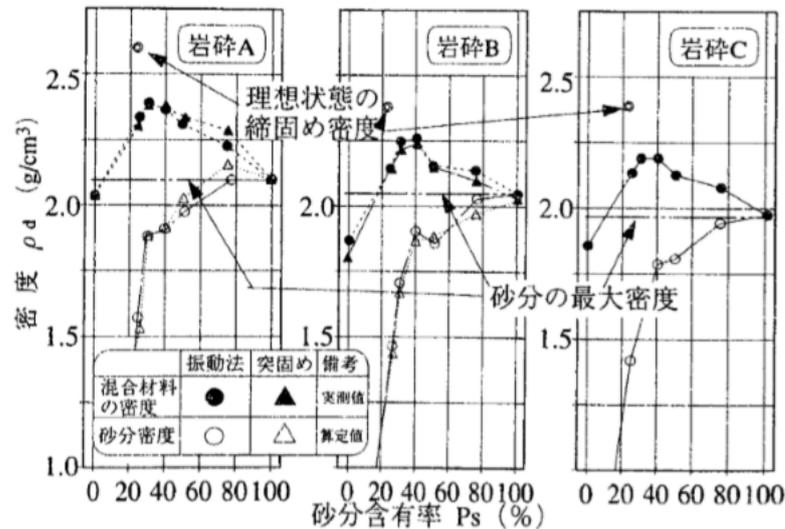


図-2.16 砂分含有率と締固め密度³⁹⁾

2.4.4 粗粒土の統一土質分類に関する考察

植下⁴⁰⁾らは、粗粒土の統一土質分類に関し、従来、わが国の土質資料によって検討されていなかった諸点について実験および収集資料によって考察している。その中でも特に、本研究の最大乾燥密度の推定式に関して必要な知見である、細粒分含有率についてこの節で述べる。

細粒分含有率が5%以下の状態は、きれいな礫、きれいな砂とみなしうる境界状態で、この程度までならば透水係数が 10^{-4}cm/sec 以上の透水性の良い場合が多いと考えられる。また、細粒分が15%以下の試料は、ほとんどの最大乾燥密度が $1.80\sim 2.25\text{g/cm}^3$ の範囲に分布している。細粒分含有率が15%の状態は、粗粒土に対し、細粒分の影響が目立ち始める境界である。最大乾燥密度、修正CBRは、細粒分が15%までは粗粒分の骨組に支配される値を示すが、細粒分が15%となると双方の値が低下していく。透水性については、細粒分が15%を越えると、透水係数が 10^{-3}cm/sec 以下となり、ほとんどが半透水性か不透水性となる。また、細粒分が15%を越えると、最大乾燥密度の値の上限と下限は減少し、50%以上になると最大乾燥密度はほとんどが $1.35\sim 1.90\text{g/cm}^3$ の幅に分布することとなる。図-2.17に細粒分含有率と最大乾燥密度の関係について示す。同一細粒分含有率における最大乾燥密度の値は幅の広い分布を示していることから、細粒分の性質の違い、砂と礫の区別または粒度分布の良否の影響も見る事が出来るよう統一土質分類別記号で示している。

本研究で用いる三角座標上の粒度と最大乾燥密度の関係図では、礫分や砂分が多く含む際、細粒分が15%を下回る部分で空白になっていることから、前節同様、この報告を用いて最大乾燥密度の推定式の適用範囲について考察する。

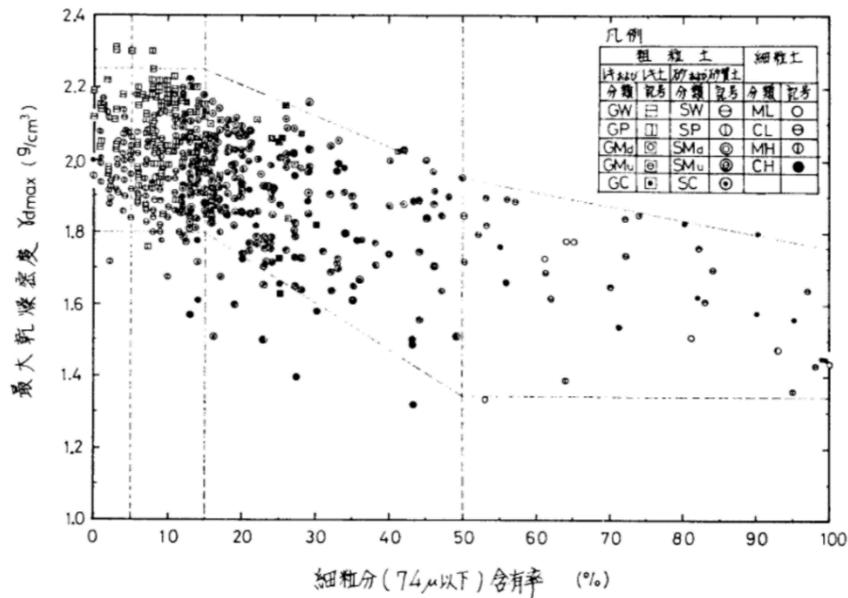


図-2.17 細粒分含有率と最大乾燥密度の関係⁴⁰⁾

2.5 粒度の三角座標を用いた各種特性の推定に関する研究

本研究では粒度分布に着目して試料を作製しており、粒度の三角座標上での分類を行うことであらゆる試料における適用を試みている。粒度の三角座標は地盤材料の工学的分類⁴¹⁾に用いられるのであるが、その分類を利用して各種特性を推定する研究も行われている。図-2.18は山本⁴²⁾が行った締固めた土の水浸沈下特性に関する研究の試験結果である。図より、締固め度と水浸沈下特性の関係は粒度と密接な関係があり、粒度の三角座標上で推定が可能である。また、山本はこの試験結果に則った粒度改善によって水浸沈下を防止できる可能性を示唆している。

土木工学における地盤工学の分野では、粒度の三角座標といえば通常は礫分・砂分・細粒分（シルト分+粘土分）の3種の粒度を軸に取るのであるが、農業土木分野における土壌研究においては砂分・シルト分・粘土分の3種の粒度を軸に取った三角座標が一般的に使用されている。図-2.16は土壌研究に用いられる有効水分量を三角座標上の等高線で示している⁴³⁾。有効水分量とは、圃場容水量（多量の降雨またはかんがい後、土層からの重力排水の速度が非常に小さくなった水分状態の土壌水分量）からしおれ点（土壌水分が低下し、植物が吸水できず枯れる状態の土壌水分量）の範囲の水分量であり、それぞれの土で固有の範囲を持つ水分量の表す指標という意味では、コンシステンシー限界にも共通する点を持ち、三角座標によってコンシステンシー限界を推定できる可能性があると考えられる。

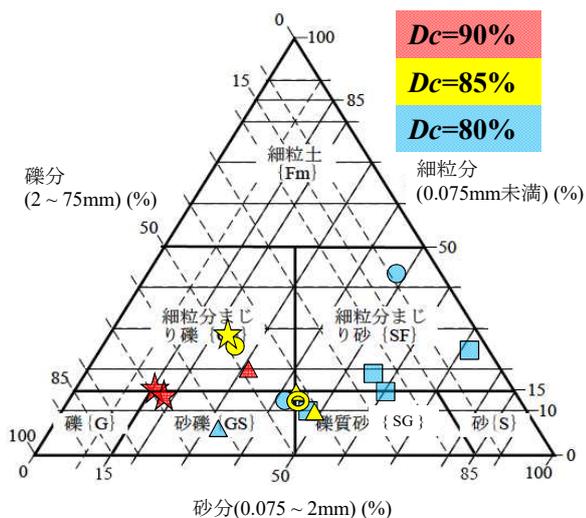


図-2.18 水浸沈下の発生しない締固め度 (山本⁴¹⁾に加筆修正)

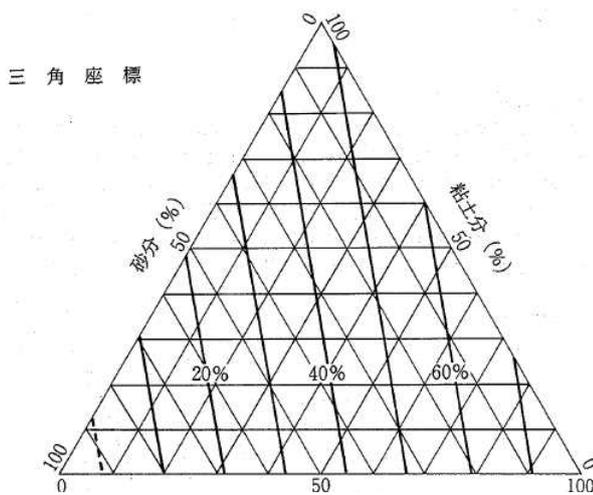


図-2.19 三角座標による有効水分量の予測⁴³⁾

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

3.1 はじめに

本章では、礫分を含まない土の粒度と締固め、コンシステンシー限界、変形・強度特性等の各種特性との関係について明らかにするために行った試験について述べる。試験概要としては、任意の割合で砂・シルト・粘土を混合した多数の試料に対して締固め試験、液性限界・塑性限界試験等の物理試験および一軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験といった力学試験を行い、結果に対して考察をしている。

3.2 試料の説明

本研究では、様々な粒度を持った試料に対して試験をするために3種類の市販土（以下、3種の原料土）を任意の割合で配合して使用している。3種の原料土は豊浦硅石鈇

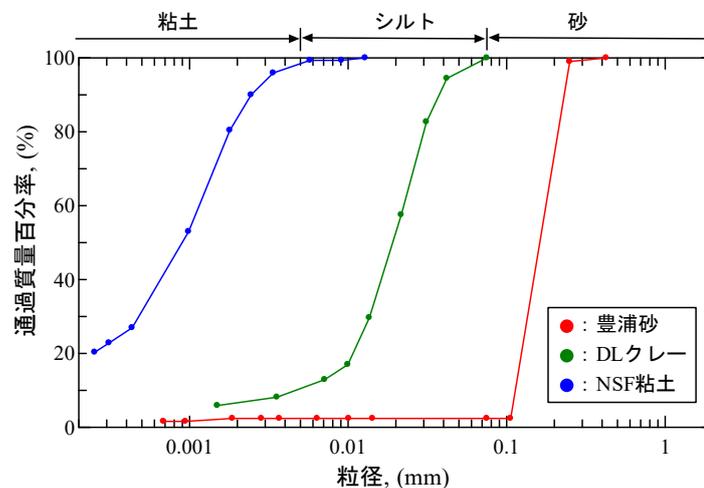


図-3.2.1 3種の試料の粒度曲線

表-3.2.1 3種の試料の粒度

		豊浦砂	DLクレー	NSF粘土
粒度 %	砂分	97.58	0	0
	シルト分	0	89.53	1.55
	粘土分	2.42	10.47	98.45

業株式会社の豊浦標準砂（以下，豊浦砂），昭和 KDE 株式会社の昭和 DL クレー（以下，DL クレー），カナヤ興産有限会社の NSF カオリンクレー（以下，NSF 粘土）である。

図-3.2.1，表-3.2.1 は土の粒度試験より得られた 3 種の原料土の粒度曲線と含まれる砂分，シルト分，粘土分の割合である。図および表より，豊浦砂，DL クレー，NSF 粘土はそれぞれ砂分，シルト分，粘土分を主な粒度としており，これらを混合することで容易に様々な粒度を持つ試料を作製することができる。

本研究では，この 3 種の原料土を重量比で 1 割ずつ変化させて全 66 種類の試料を作製している。以下，混合試料の名称は混合されている割合を豊浦砂：DL クレー：NSF 粘土の順番で○：×：△のように付けられている。例えば，NSF 粘土のみの場合は 0：0：10 となる。また，土粒子の密度試験より得られた 3 種類の試料の土粒子密度 ρ_s は豊浦砂 $\rho_s=2.641(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，DL クレー $\rho_s=2.655(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，NSF 粘土 $\rho_s=2.716(\text{g}/\text{cm}^3)$ であり，混合試料の土粒子密度および砂分，シルト分，粘土分は 3 種の原料土の混合割合の加重平均によって算出している。算出された全 66 種の試料の砂分，シルト分，粘土分から三角座標上にプロットしたものが図-3.2.2 である。通常，地盤工学の分野では粒度の三角分布には礫分（2~75mm），砂分（0.075~2mm），細粒分（0.075mm 未満）を軸とした座標を用いるのであるが，本研究では試験や粒度調整，試料入手の容易さや汎用性から 2mm 以下の粒径を対象としており，砂分（0.075~2mm），シルト分（0.005~0.075mm），粘土分（0.005mm 未満）の 3 軸を用いた三角座標を使用している。ここで，表-3.2.1 に示されているように 3 種の原料土には主となる粒度区分の粒径とは異なる粒径も含んでいるため，例えば 0：10：0 試料においても粘土分が 10.47%含まれることとなる。あくまでも

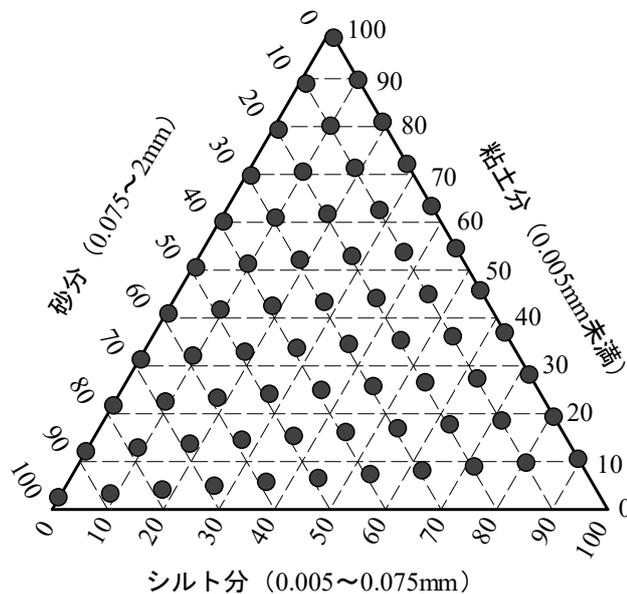


図-3.2.2 三角座標上の全 66 種の試料

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

試料名の○：×：△は豊浦砂，DL クレー，NSF 粘土の割合であり，砂分：シルト分：粘土分の割合とは多少異なっている．また，3 種の原料土を構成する粘土鉱物の種類によって粘土分の膨潤性や配向性といった土質が異なることも考えられるが，使用したDL クレー，NSF 粘土はともにカオリンを主な構成粘土鉱物としており，豊浦砂が含む細粒分は極微量なため，試験結果を粘土分含有率等で整理した場合には土質の違いが与える影響は粒度が与える影響に比べて小さいものとしている．

また，いずれの試験を行う場合においても混合土の作製は気乾状態の3 種の原料土のそれぞれの含水比を測定し，乾燥状態で指定の重量配合比となる重量を計算して混合している．さらに混合は必ず含水比調整用の蒸留水を添加する前に行うことで，NSF 粘土が単体で団粒化せずに均質な試料を作製している．

3.3 試験結果および考察

3.3.1 締固め試験

a) 試験条件と試験方法

締固め試験は全 66 種類の試料に対して行った．試験は JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」の A-a 法に準じて行い，描かれた締固め曲線よりそれぞれの試料における最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} を求めている．

b) 試験結果および考察

図-3.3.1 に 3 種の原料土の締固め曲線と土粒子密度 $\rho_s=2.65(g/cm^3)$ の場合のゼロ空気間隙曲線を示す．図より，3 種の原料土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} はおおよそ $1.5(g/cm^3)$ 程度で同等な値である．また，最適含水比 w_{opt} は豊浦砂 $w_{opt}=12.8\%$ ，DL クレー $w_{opt}=20.6\%$ ，NSF 粘土 $w_{opt}=26.9\%$ であり，粒径の小さい試料の方が w_{opt} の値が大きくなっている．これは，いずれの試料も粒径が偏った粒度分布を持つ試料であるが，粒径の大きさに比例して間隙も大きくなり，ゼロ空気間隙曲線から離れた（飽和度が低い）点で最適含水比となるためである．

次に，図-3.3.2，図-3.3.3 に全 66 種類の試料の試験結果より得られた ρ_{dmax} および w_{opt} を粒度の三角座標上にコンター（等値線）図として示したものである．まず， ρ_{dmax} に関しては値が最小となる 3 種が 10：0：0，0：10：0，0：0：10 試料であり，全ての配合割合において 2 種以上を配合すると値が大きくなっている．また，全体的な傾向として

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

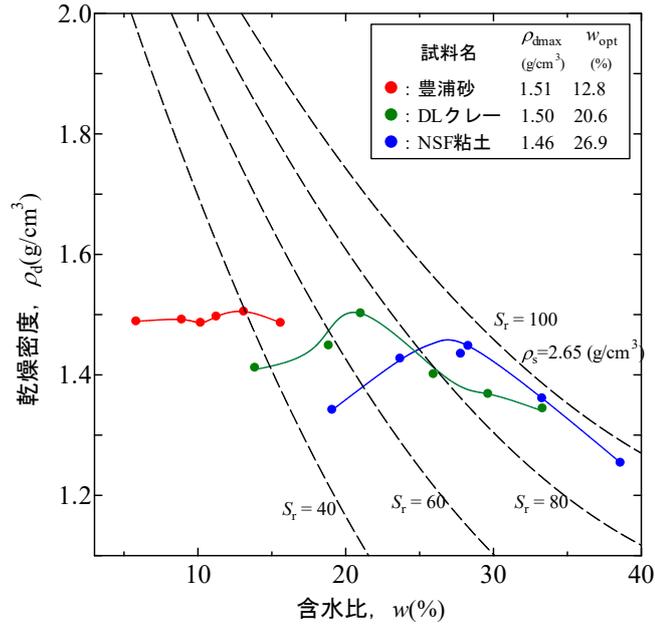


図-3.3.1 3種の原料土の締固め曲線

は ρ_{dmax} が大きくなると w_{opt} が小さくなり、 ρ_{dmax} の最大値は6:2:2試料で $\rho_{dmax} = 1.95(\text{g}/\text{cm}^3)$ ($w_{opt} = 10.6\%$)、 w_{opt} の最小値はその隣接する点である6:3:1試料で $w_{opt} = 9.22\%$ ($\rho_{dmax} = 1.91(\text{g}/\text{cm}^3)$)となった。

ρ_{dmax} , w_{opt} の値は ρ_{dmax} の最大値、 w_{opt} は最小値を中心としてはほぼ同心円状に分布しているのであるが、豊浦砂+DLクレーおよび豊浦砂+NSF粘土の2種配合試料では豊浦砂の割合が大きくなってくると w_{opt} が ρ_{dmax} の増加に伴って変化する傾向が無くなり、具体的には、豊浦砂+DLクレーの2種配合試料では砂分が7割以上、豊浦砂+NSF粘土の2種配合試料では砂分が6割以上で一定の w_{opt} となっている。このことについて考察するために、図-3.3.4~図-3.3.6に3種の原料土のうち、2種のみ配合によって作られた

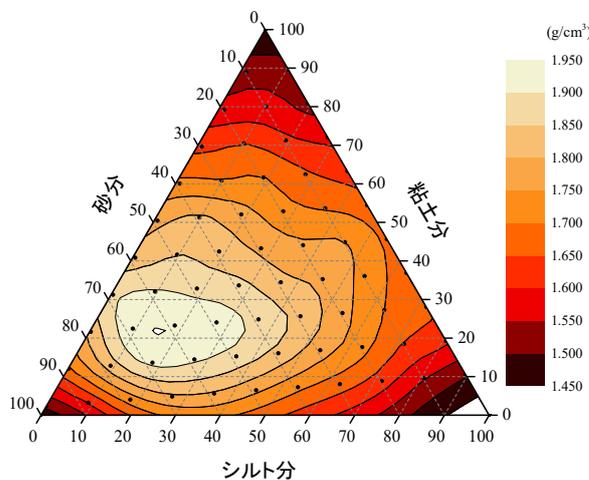


図-3.3.2 最大乾燥密度 ρ_{dmax} のコン

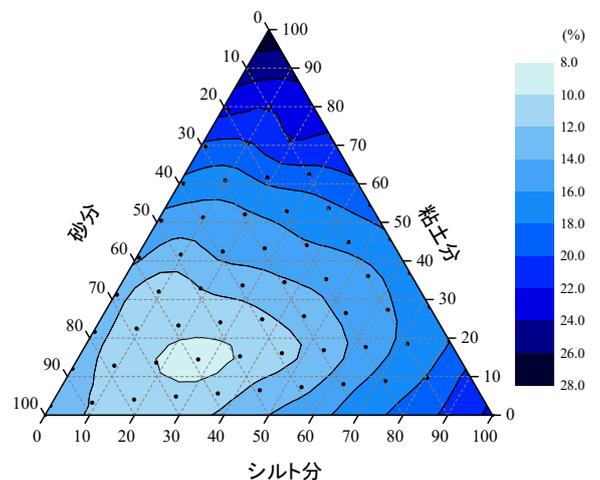


図-3.3.3 最適含水比 w_{opt} のコンター図

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

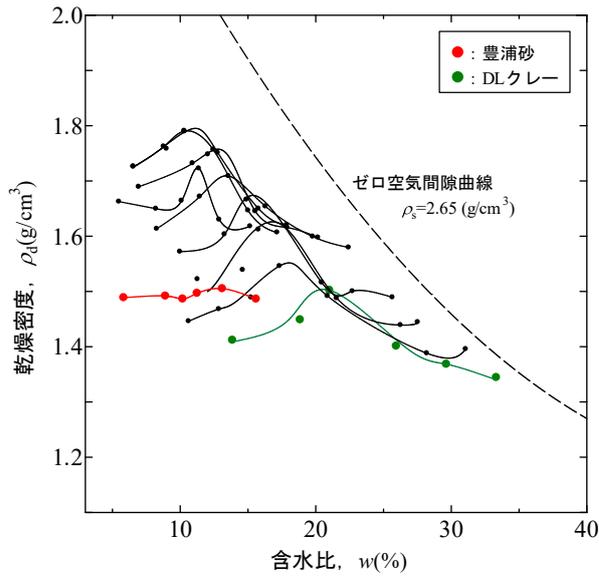


図-3.3.4 豊浦砂+DL クレー試料の
締固め曲線

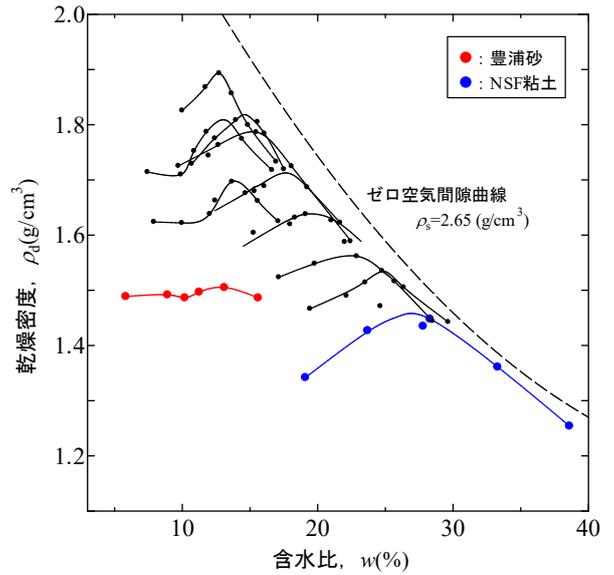


図-3.3.5 豊浦砂+NSF 粘土試料の
締固め曲線

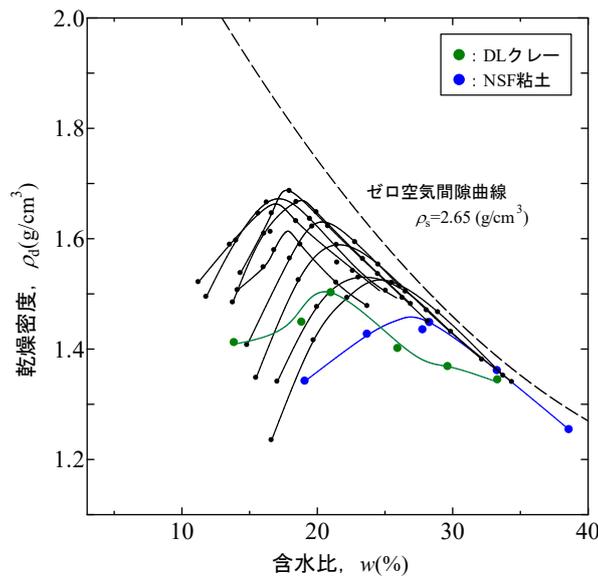


図-3.3.6 DL クレー+NSF 粘土試料
の

試料の締固め曲線を系統ごとに示す。図より、先述したように2種以上を混合すると原料土よりも ρ_{dmax} は大きくなる。 ρ_{dmax} の上昇の仕方は、粒度の小さな原料土に粒度の大きな原料土を加えると、はじめは粒度の大きな原料土の割合が多くなるとともに ρ_{dmax} は増加し、 w_{opt} は減少する。しかし、粒度の大きな原料土の割合が一定以上になると傾向は変化し、 ρ_{dmax} は減少する。その時、豊浦砂+DL クレーおよび豊浦砂+NSF 粘土の試料では w_{opt} はほぼ一定のままであり、DL クレー+NSF 粘土の試料ではある程度 w_{opt} が増加している。また、傾向が変化する時の配合割合は豊浦砂+DL クレーの試料では6:4:0(シ

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

ルト分含有率 36%), 豊浦砂+NSF 粘土では 7:0:3 (粘土分含有率 30%), DL クレー+NSF 粘土では 0:6:4 (粘土分含有率 45%) となっている。

ここで、**図-3.3.7**に混合した2種の原料土の内、粒度の小さな試料の主な粒度(豊浦砂+NSF 粘土および DL クレー+NSF 粘土では粘土分、豊浦砂+DL クレーではシルト分)の含有率と最大乾燥密度、最適含水比の状態での飽和度 S_r の関係を示したものである。飽和度 S_r は粘土分またはシルト分がある程度以上になると一定値となっている。また、その一定値は豊浦砂+NSF 粘土および DL クレー+NSF 粘土では 85%程度でおおよそ等しく、豊浦砂+DL クレーでは 65%程度である。このことから、2種の混合土では S_r の値はある程度以上になることはなく、その一定値は2種の内、粒度の小さな試料を単体で締固めた時の S_r と同程度になることが考えられる。また、 S_r が一定値となる粘土分またはシルト分の含有率は豊浦砂+DL クレーの試料では約 40%、豊浦砂+NSF 粘土では約 30%、DL クレー+NSF 粘土では約 45%であり、先述の締固め曲線の傾向が異なる点とおおよそ一致している。

次に**図-3.3.8**は縦軸を間隙比 e とした図である。縦軸を ρ_{dmax} としても土粒子密度の違いがわずかなため同様な曲線が得られるのであるが、粘土分とシルト分のわずかな違いをみるために間隙比 e としている。豊浦砂が含まれる混合土は同様な挙動を持っており、シルト分または粘土分含有率が約 30%をピークとしている。また、DL クレー+NSF 粘土では粘土分含有率が約 45%をピークとしている。ここで、2.4 節で述べたように砂・粘

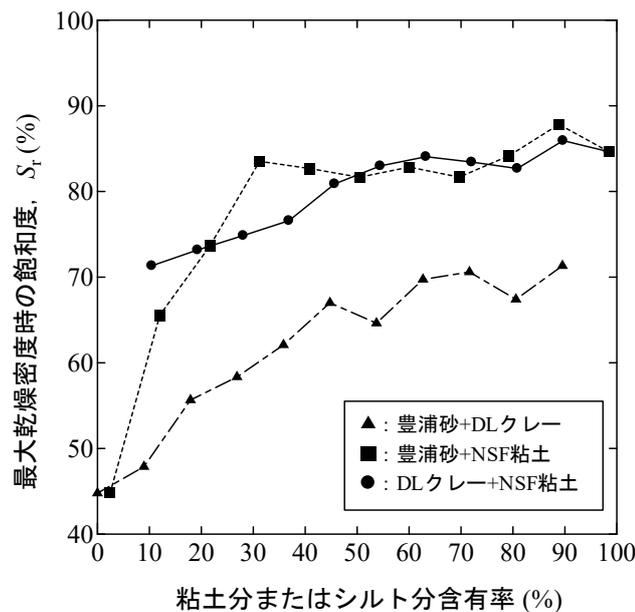


図-3.3.7 飽和度 S_r と粒度の関係

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

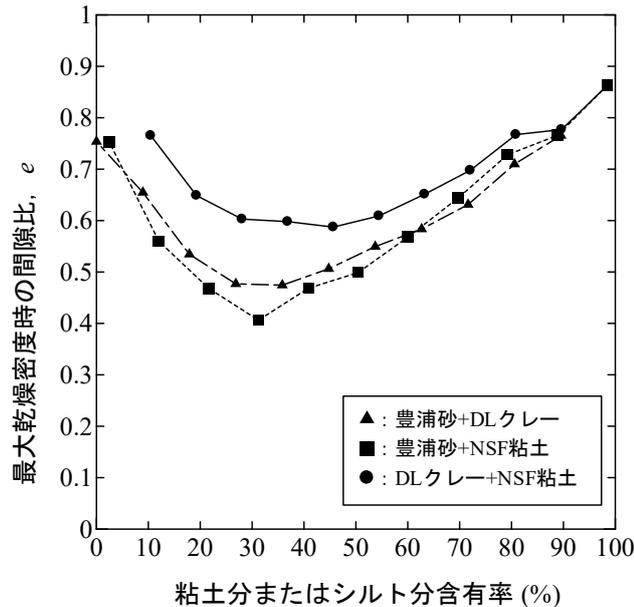


図-3.3.8 間隙比 e と粒度の関係

土混合土の過去の研究^{26)~29)}においても細粒分含有率が30%程度で構造主体が砂か粘土かの境界になるとされている。さらに、このピークとなるシルト分または粘土分含有率は締固め曲線の傾向が異なり、 S_r が一定値となる値とも同等であることから、構造主体が変わる境界であると考えられる。境界になる値が比較する諸量によって多少異なるのは、構造主体が変化する境界が点ではなく、ある程度の幅を持った遷移領域であるためだと考えられる。

また、図-3.3.8の曲線より豊浦砂を含む試料が同様の傾向を示していることから、密度に関しては混合した2種の内、粒度の小さい試料よりも粒度の大きい試料による傾向を持つことが考えられる。加えて先述したように図-3.3.7より、 S_r は粒度の小さい試料の影響を受けることが考えられるため、密度と関係する間隙比 e 、含水比と関係する飽和度 S_r を混合に用いる原料土の持つ値から推定できる可能性を示唆している。しかしながら、全66種で ρ_{dmax} が最大となったのは6:2:2試料であり、図-3.3.8をみる限り含まれると e が小さくならないDLクレーがNSF粘土と同量含まれているため、3種混合土になると各粒度の関係は複雑になり、推定は2種混合土より困難になるであろう。

3.3.2 液性限界・塑性限界試験

a) 試験条件と試験方法

液性限界・塑性限界試験は全66種類の試料に対して行った。試料は気乾状態で混合

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

した後、予想される塑性限界よりも少し大きめの含水比となるように蒸留水を添加・混合し、24時間以上放置して試験に用いている。試験方法は、はじめに JIS A 1205 に準じて塑性限界 w_p を求め、非塑性 (NP) とならず w_p の測定が可能であった試料に対してフォールコーンを用いた土の液性限界試験法によって液性限界 w_L を測定している。JIS 規格のキャサグランデ法ではなくフォールコーン法を行った理由としては、フォールコーン法は砂分が多い試料に対しても試験が比較的容易であり、結果の誤差も小さいためである。

図-3.3.9 にフォールコーン試験装置の概略図を示す。試験に用いたコーンの仕様は、JGS 基準に則したものであり、コーン重量 60g 、コーン先端角 60° 、液性限界時の貫入量は 11.5mm である。また、フォールコーン試験の適用範囲として w_L が 160% 以下である必要があり、それ以上の w_L では図-3.3.10 に示すように JIS 法との相関が悪いのであるが、用いた試料の w_L の最大値は $0:0:10$ 試料の 61.8% であるため、適用範囲は十分に満たしている。

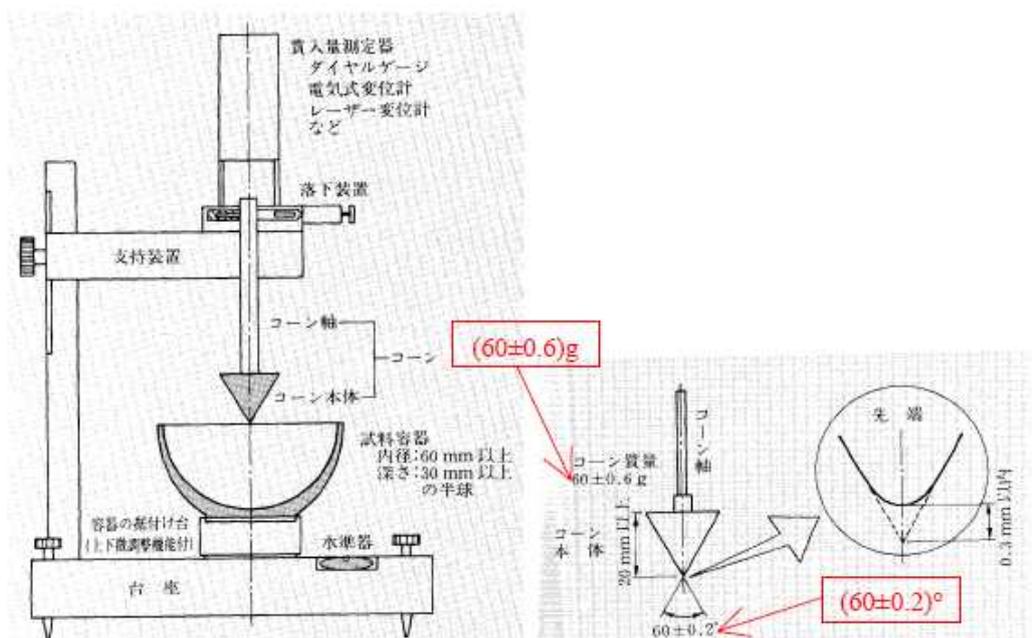


図-3.3.9 フォールコーン試験装置 44)

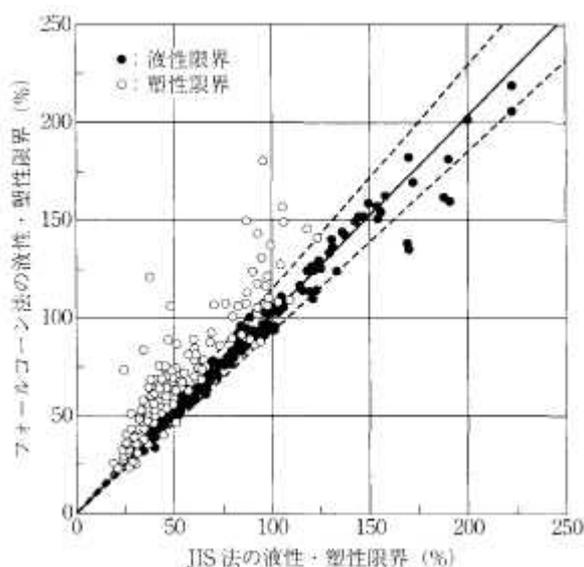


図-3.3.10 JIS法とフォールコーン法の相関図⁴⁵⁾

b) 試験結果および考察

図-3.3.11 に粒度の三角座標上の液性限界 w_L のコンター図を示す。図より、液性限界 w_L は全体的には粘土分の増加に伴って大きくなっている一定の傾向を持つことが分かる。しかし、図-3.3.2, 図-3.3.3 と比較しても、液性限界は最大乾燥密度、最適含水比とはあまり相関性がみられない。また、シルト分が 10%程度以下の試料では粘土分の割合による傾向が異なる。具体的には、シルト分が無い試料では他の粘土分が同等の試料よりも w_L は小さくなる。この傾向はシルト分に比べてやや小さいものの砂分が 10%以下となる試料でもみられる。このため、2 種混合土と 3 種混合土では傾向が異なることが考えられる。

図-3.3.12 に粒度の三角座標上の塑性限界 w_P のコンター図を示す。塑性限界 w_P は w_L に比べて全体的に明確な傾向がみられない。これは、 w_P は w_L よりも値の絶対値自体が小さく、試験法に関しても w_L を求めたフォールコーン試験よりも特に砂分を含む試料では誤差が大きくなりやすいことが考えられる。しかしながら、砂分が少なく、粘土分が多い試料の方が w_P の値は大きくなる傾向がわずかではあるがみられる。

図-3.3.13 に粒度の三角座標上の塑性指数 I_P のコンター図を示す。塑性指数 I_P は液性限界と塑性限界の差 ($I_P = w_L - w_P$) で求められ、土が塑性状態として存在する含水比の幅を表している。全体的な傾向としては w_L と同様な傾向がみられるのであるが、 w_L でみられたシルト分または砂分が 10%程度以下の試料では異なる傾向が顕著になっている。

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

これは、偶然ながら傾向が異なる試料は比較的砂分が少なく、 w_p の持つ傾向をうまく反映できていることが考えられる。

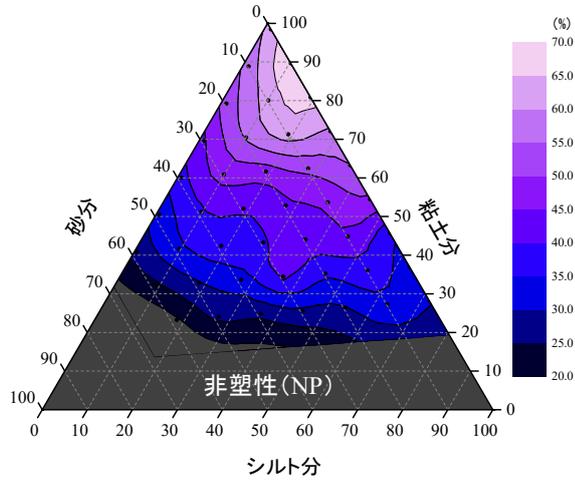


図-3.3.11 液性限界 w_L のコンター図

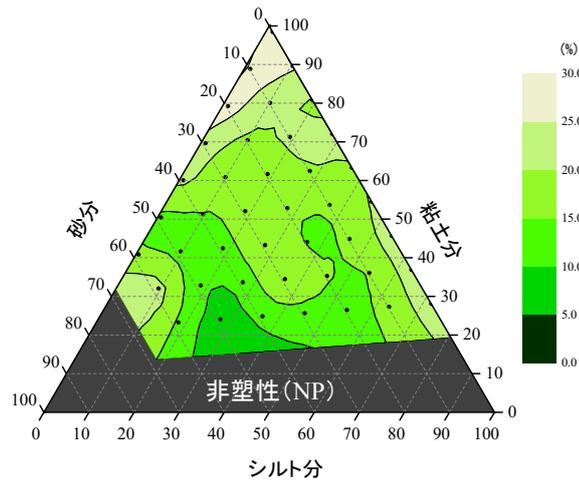


図-3.3.12 塑性限界 w_p のコンター図

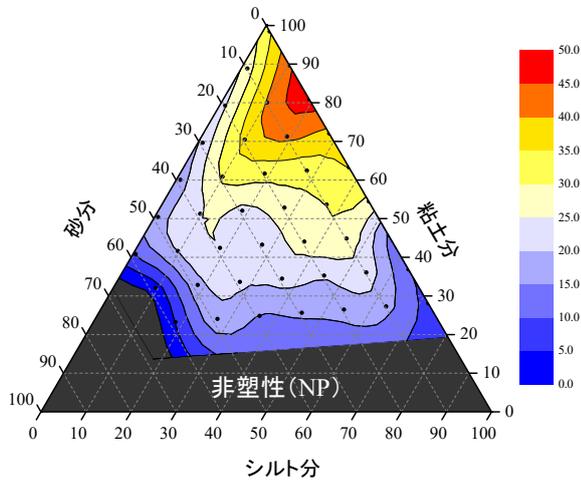


図-3.3.13 塑性指数 I_p のコンター図

3.3.3 一軸圧縮試験

a) 試験条件と試験方法

一軸圧縮試験は締固め試験結果より得られた傾向より、全 66 種類の内、12 種類を抽出して試験を行っている。図-3.3.14 に試験を行った試料を三角座標上に示す。図より、試料は ρ_{dmax} , w_{opt} の極値となった 6:2:2, 6:3:1 試料を中心に放射状に抽出している。また、表-3.3.1 に 12 種類の試料の粒度および ρ_{dmax} , w_{opt} をまとめた。表より、④ 1:5:4, ⑤ 2:2:6, ⑥ 2:7:1 の 3 種や⑦ 3:4:3:, ⑧ 4:2:4, ⑨ 4:5:1 の 3 種等、

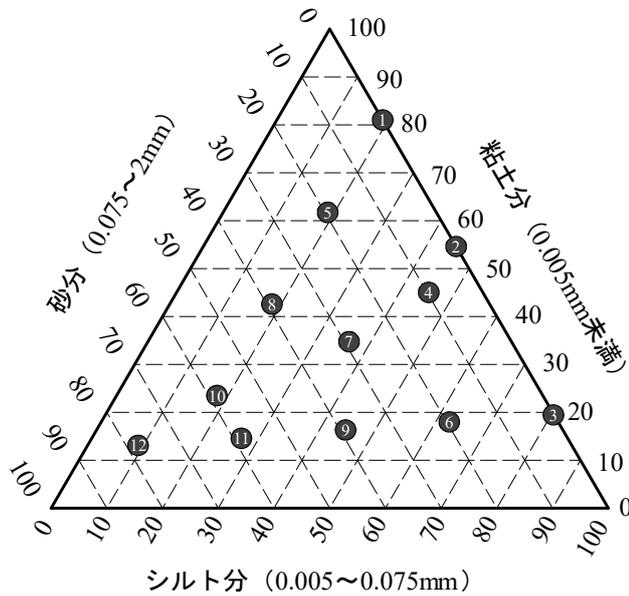


図-3.3.14 一軸圧縮試験を行った試料

表-3.3.1 試料の粒度および締固め特性

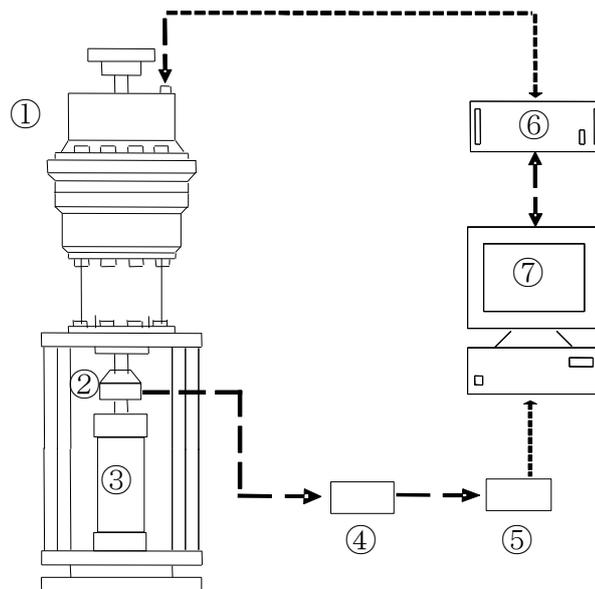
試料名	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)
① 0:2:8	0.0	19.1	80.9	1.53	23.5
② 0:5:5	0.0	45.5	54.5	1.67	18.8
③ 0:9:1	0.0	80.7	19.3	1.61	17.8
④ 1:5:4	9.8	45.4	44.9	1.76	16.5
⑤ 2:2:6	19.5	18.8	61.6	1.71	18.7
⑥ 2:7:1	19.5	62.8	17.7	1.72	14.9
⑦ 3:4:3	29.3	36.3	34.4	1.81	13.8
⑧ 4:2:4	39.0	18.5	42.4	1.82	14.8
⑨ 4:5:1	39.0	44.9	16.0	1.84	11.4
⑩ 6:2:2	58.5	18.2	23.2	1.95	10.6
⑪ 6:3:1	58.5	27.0	14.4	1.91	9.2
⑫ 8:1:1	78.1	9.1	12.8	1.83	10.4

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

ρ_{dmax} , w_{opt} が同等である組み合わせがあるため、それらの一軸圧縮強さを比較することで ρ_{dmax} , w_{opt} または粒度との関係を考察することができる。

供試体はそれぞれの試料に対して $D_c=100\%$ ($\rho_d = \rho_{dmax}$), $w = w_{opt}$ となるように作製している。作製方法としては、水分調整した試料を所定の ρ_d となるよう 3 層に分けてモールドへ投入し、油圧ジャッキを用いて静的に締固めることを行っている。また、試験はそれぞれの試料において 2 本の供試体に対して行っている。試験終了後には w の測定を行い、所定の条件に対して誤差が D_c は $\pm 2\%$, w は $\pm 1.5\%$ 以内であることを確認している。

図-3.3.15 に一軸圧縮試験システムの概略図を示す。試験には高精度三軸圧縮試験機を転用している。試験装置における軸方向の载荷は減速機を介して、高精度デジタルサーボモーターと直結したボールネジを回転させることを行っている。このサーボモーターは極めて高いトルクと分解能を有しているため、反力によらない一定速度での载荷が可能であり、モーターの回転量、減速比、ボールネジのリード長から任意時点における



- ①：高精度デジタルサーボモータ
- ②：荷重変換器
- ③：供試体
- ④：ストレインアンプ
- ⑤：A/D 変換ボード
- ⑥：ドライバボックス
- ⑦：パーソナルコンピュータ

図-3.3.15 一軸圧縮試験システムの概略図

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

高分解能の軸変位を計算することも可能である。計算された変位はキャップの変位と実質的に一致することを確認しており、本試験での軸変位は変位計を用いずにこの計算値を採用している。一軸圧縮試験における載荷速度は1%/minとした。

ここで、本試験で用いる供試体は不飽和状態にあり、一軸圧縮試験を行う場合には通常の飽和供試体に対して試験を行う場合よりも、せん断中に生じる間隙水圧が大きく影響を与えることが考えられる。そのため、試験のひずみ載荷速度が1%/minで妥当であるかの検証実験を行った。図-3.3.16にひずみ速度1%/minと0.1%/min試験結果を示す。試料はよりひずみ速度の影響を受けやすい、粘土分が多い2:2:6試料を用いて行った。結果より、応力-ひずみ曲線はひずみ速度の違いに依らないことが分かる。よって、本試験ではひずみ載荷速度を1%/minで行っている。

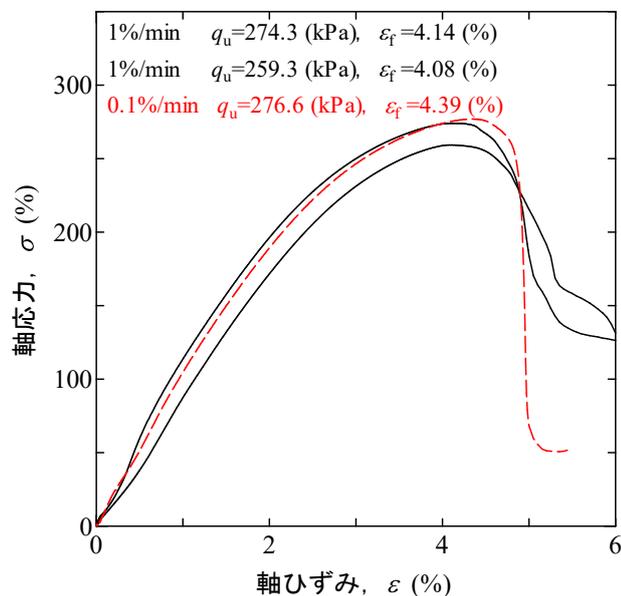


図-3.3.16 ひずみ速度による一軸圧縮試験結果への影響 (2:2:6 試料)

さらに、供試体の作製方法が与える影響についても検証実験を行っている。本試験では油圧ジャッキを用いて静的に締固めることで供試体を作製している。そのため、突き固めによって供試体を動的に作製した場合と応力履歴が異なり、強度に影響を及ぼすことが考えられる。締固め方法によって生じる違いとしては、粘土分の配向による異方性が報告²⁹⁾されているため、粘土分が多い2:2:6試料を用いて行った。試験結果を図-3.3.17に示す。結果より、強度には大きな違いが無かったが、ひずみに関しては動的締固めによる供試体の方が大きくなった。これは、動的締固めによる供試体では直径10cm、高さ12.7cmで締固められた試料をトリミングして直径5cm、高さ10cmの供試体を作製するために、乱れの影響を受けたことが考えられ、応力履歴の違いによる強度の差はあまり考えられない。よって本試験では作製が容易な静的締固めによる供試体を用

いている。

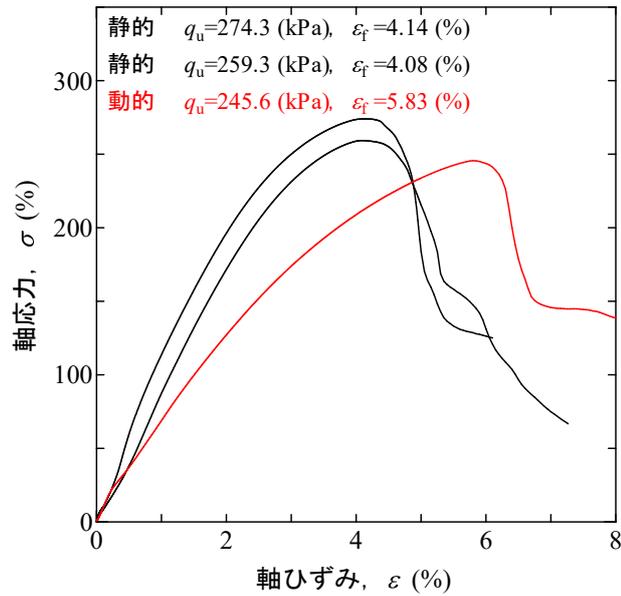


図-3.3.17 締め固め方法による一軸圧縮試験結果への影響 (2:2:6 試料)

b) 試験結果および考察

図-3.3.18 に試験より得られた一軸圧縮強さ q_u のコンター図を示す。一軸圧縮強さ q_u は同一試料で行った2本の供試体の平均値をとっている。図より、 q_u は2:2:6 試料付近を中心としてコンターを描いている。みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており、基本的には粘土分と相関を持ち、シルト分が20%程度以下になると傾向が変化するという

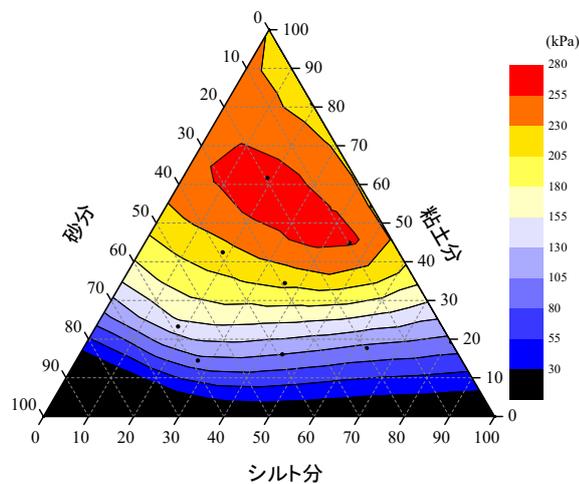


図-3.3.18 一軸圧縮強さ q_u のコンター図

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

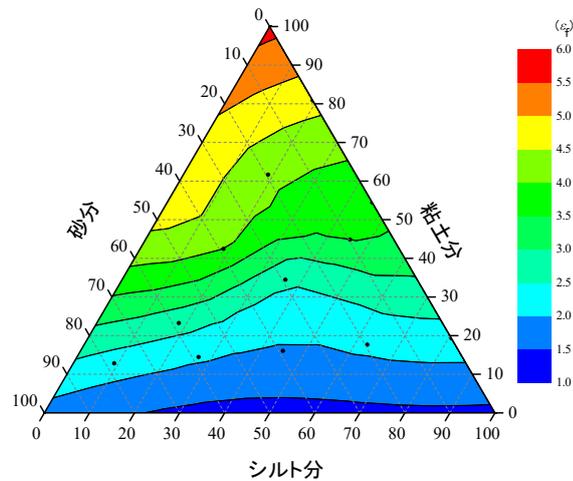


図-3.3.19 破壊ひずみ ϵ_f のコンター

う I_p に似た形となっている。また、図-3.3.19 は破壊ひずみ ϵ_f のコンター図である。破壊ひずみ ϵ_f のコンターも q_u と同じく基本的には粘土分との相関がありシルト分が20%程度以下になると傾向が変化するのであるが、傾向の変化の仕方が、 q_u や I_p とは相反する変曲がみられる。さらに、2:2:6 試料付近に中心点を持っていた q_u とは異なり、粘土分の増加に伴って ϵ_f も大きくなり続けている。

次に、図-3.3.20 および図-3.3.21 は ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度の試料の応力-ひずみ曲線である。図より、 ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度でも q_u の大きさや応力-ひずみ曲線の挙動は異なることが分かる。一般的に、応力-ひずみ曲線の挙動に関して影響を与える要因として粒度に由来する粘着力の影響が考えられる。さらに、2 図の 3 試料はそれぞれ砂分が同程度でありながら ϵ_f は大きく異なることから、 ϵ_f に影響を与えている要因はシルト分と粘土分であると考えられる。ここで、シルト分を担っている DL クレーは非塑性であるため、砂分と同様に粘着力には影響せず、粘土分のみが寄与しているとも考えられるが、粘土分が異なる 4:2:4 試料と 2:2:6 試料の ϵ_f が同等であることを考えると、シルト分の割合も何らかの影響因子であると考えられる。

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

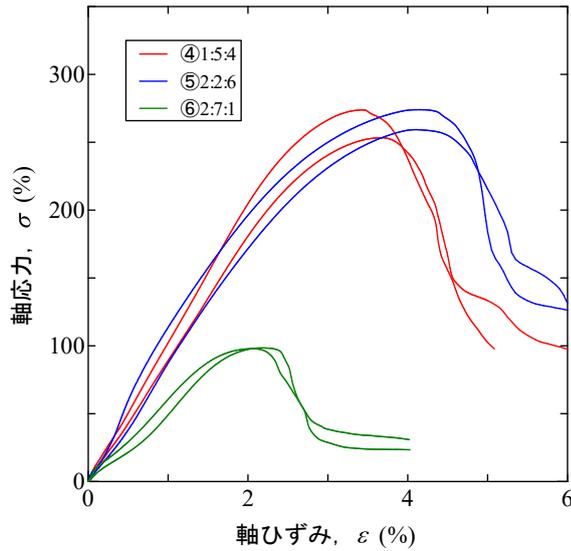


図-3. 3. 20 ρ_{dmax} , w_{opt} が同等試料の
応力-ひずみ曲線①

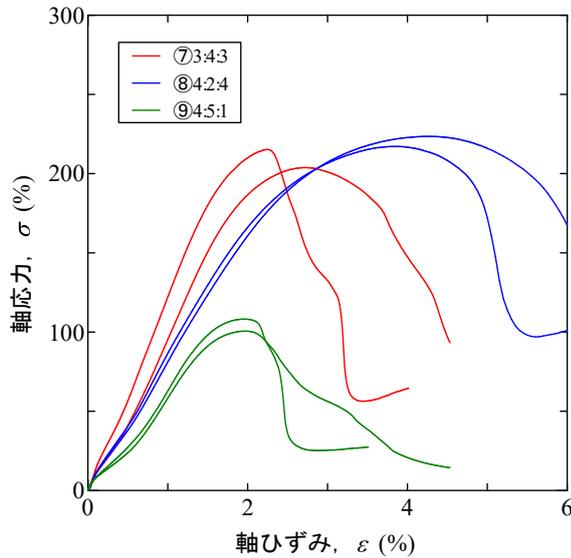


図-3. 3. 21 ρ_{dmax} , w_{opt} が同等試料の
応力-ひずみ曲線②

そこで、図-3. 3. 22 に ϵ_f とシルト分/粘土分の関係を示した。図より、 ϵ_f とシルト分/粘土分の関係は大きく2つの傾向に分かれる。まず、液性限界・塑性限界試験より非塑性 (NP) であると判断された試料はシルト分/粘土分の大きさに係らず ϵ_f は 2%程度になる。次に、非塑性ではなく塑性を有する試料では ϵ_f とシルト分/粘土分は直線的な関係を持つことが分かる。また、非塑性であるか否についても粒度に起因するものである。よって、締固めた混合土に対して一軸圧縮試験を行うと、せん断挙動は粒度と相関関係にあり、傾向が変化する境界も粒度に起因するコンシステンシー限界より判断することができるといえる。

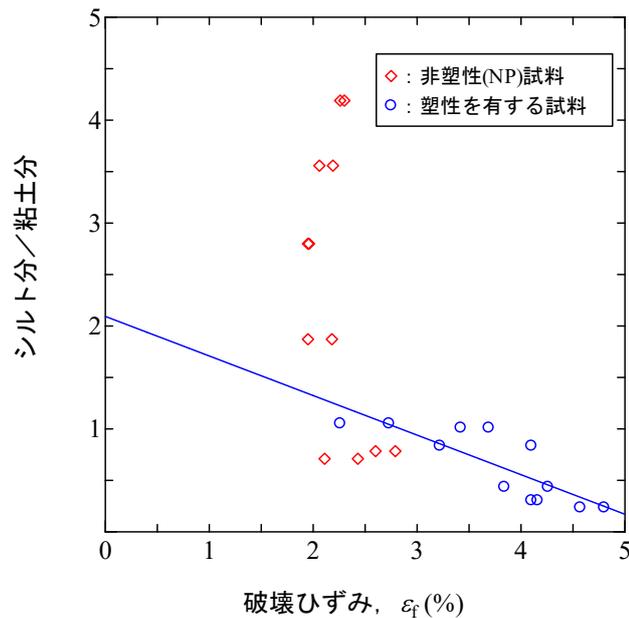


図-3.3.22 ϵ_f とシルト分/粘土分の関係

3.3.4 ベンダーエレメント試験

a) 試験条件と試験方法

ベンダーエレメント (BE) 試験は一軸圧縮試験を行う直前の供試体に対して行っている。そのため、用いた試料や供試体の作製条件に関しては 3.3.3 節と同様である。

図-3.3.23, 図-3.3.24 は、本研究で使用した BE 試験のシステムと供試体周辺を拡大した図である。送信用 BE への電圧波形供給にはファンクションシンジェネレータ、送・受信電圧信号の観察にはデジタルオシロスコープを用いた。オシロスコープに表示された電圧信号は USB ディスクに記録し、後にパソコンを用いて伝播時間の同定を行った。本試験機では载荷キャップに送信用 BE が、ペDESTAL に受信信用 BE が装着されている。これにより、送信用 BE により生じたせん断波は鉛直方向に進行し、土粒子の振動方向は水平方向であるため、本試験で得られるせん断波速度は V_{vh} に相当する。

BE 試験によって測定される受信波形の例を図-3.3.25 に示す。せん断波速度は図のように整理した後、送信側の波形に対応する受信側の波形の時間を読み取り、伝播時間としている。

伝播時間の道程に関しては、平成 23 年に地盤工学会の理事会にて承認された「ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法」において注記されている以下のよ

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

うな条件を用いている。

- (1) 送信電圧の周波数は、5種類程度の異なる周波数で実施する。
- (2) 一つの周波数の試験結果に対して2種の方法で伝播時間を求め、その誤差を3%以内とする。

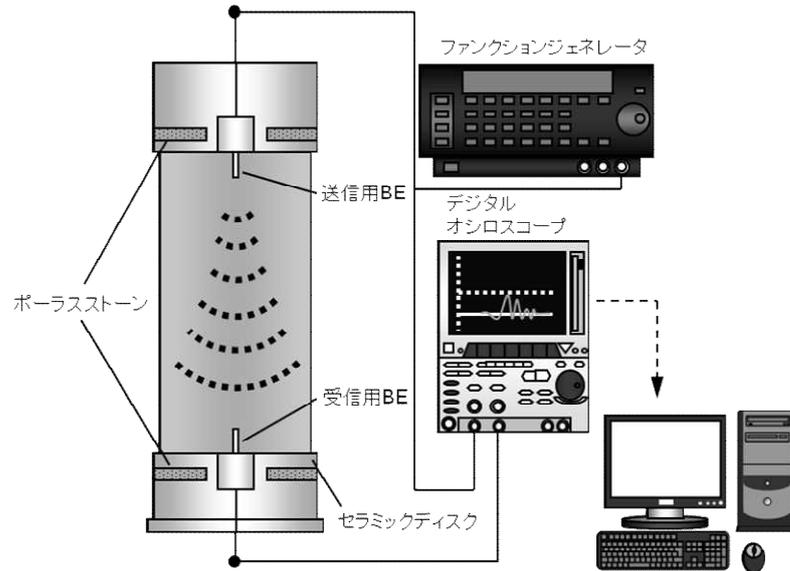


図-3.3.23 BE試験装置の概略図

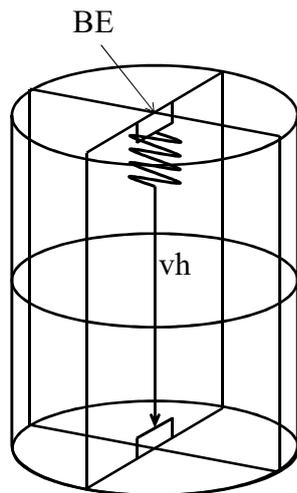


図-3.3.24 せん断波の振幅・伝播方向

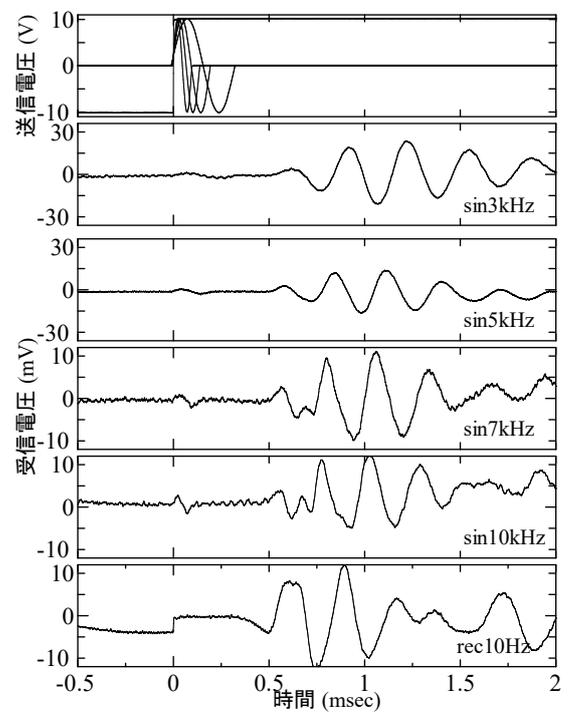


図-3.3.25 測定される受信波形の例

(3) 送信電圧の周波数と伝播時間の積を2倍以上とする。

(4) せん断波の伝播時間は(2)と(3)の条件を満たした全ての値の平均値とする。

また、伝播距離については供試体の高さとあらかじめ測定されている試験装置のBE長から、送信側BEの先端から受信側BEの先端までの距離を算出して用いている。このように求められた諸値を用いて以下の式によりせん断波速度 V_s は求めることができる。

$$V_s = L / \Delta t \quad \text{式-3.1}$$

ここで、 L ：せん断波の伝播距離

Δt ：伝播時間

また、 V_s よりせん断弾性係数 G が次式により算定する。

$$G = \rho_t \cdot (V_s)^2 \quad \text{式-3.2}$$

ここで、 ρ_t は土の湿潤密度である。

b) 試験結果および考察

図-3.3.26はせん断波速度 V_{vh} のコンター図である。せん断波速度 V_{vh} は一軸圧縮強さ q_u と同様に同一試料で行った2本の供試体の平均値をとっている。図より V_{vh} の分布は q_u のコンター図と類似している。具体的には、2:2:6 試料付近を中心としてコンターを描いている。さらに、みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており、基本的には粘土分と相関を持ち、シルト分や砂分が20%程度以下になると傾向が変化するという I_p に似た形となっている。図-3.3.27はせん断弾性係数 G_{vh} のコンター図である。せん断弾性係数 G_{vh} はほぼ V_{vh} と同じ傾向の分布となっている。

V_{vh} と q_u のコンター図の傾向が似ているため、両者の関係性について図-3.3.28に示す。 q_u と V_{vh} の関係は切片を持った2次曲線となっており、曲線の変曲点の前後で試料が非塑性であるか否かで分けることができる。

非塑性試料とは、液性限界・塑性限界試験で試験が不可能なため試験値が求められない試料であり、水を含んだ際に粒子が分離して土試料全体として固体を保てないことを意味している。具体的には粒子の保水性が低い砂分やシルト分を多く含み、保水性の高い粘土分が少ない場合が多い。また、保水性はサクシオンにも影響している。

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

また、 q_u の大きさは I_p と基本的には同様の傾向を示しているのであるが、粘土分が多い試料では q_u と I_p の関係が多少異なっており、これはサクシジョンの影響を受けていることが考えられる。さらに粘土分の多さは非塑性であるか否かにも大きな影響を与えている。よって、 V_{vh} と q_u ではサクシジョンによる影響を受ける度合いが異なるために両者の関係は途中で変曲点を持っていることが考えられる。図の傾きの変曲から考えると、 q_u の方が V_{vh} よりもサクシジョンによる影響を大きく受けていることになる。

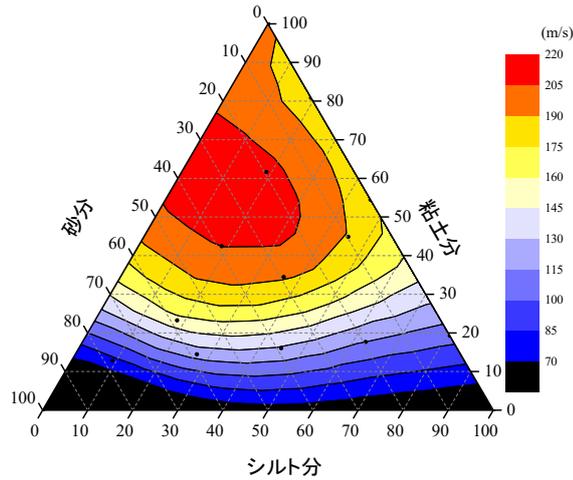


図-3.3.26 せん断波速度 V_{vh} のコンター図

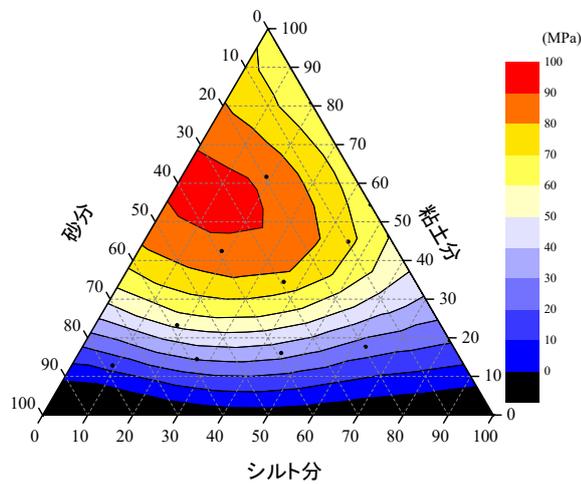


図-3.3.27 せん断弾性係数 G_{vh} のコンター図

次に図-3.3.29に ρ_{dmax} と q_u , V_{vh} の関係を示す。この関係からも全ての試料において $D_c=100\%$, $w=w_{opt}$ の状態の供試体であっても強度に違いがあり、その強度の大小関係は ρ_{dmax} , w_{opt} に係わらないことがわかる。また、 q_u (kPa)と V_{vh} (m/s)の絶対値の大小関係が $q_u < V_{vh}$ であるか $q_u > V_{vh}$ であるかは試料が非塑性であるか否かで分けることができる。これは、先述したように非塑性か否かは定性的な試料の保水性を示しており、保水性が高

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

い試料はサクシヨンの値が大きく、一軸圧縮強さに寄与することが知られている⁴⁶⁾ことから、 ρ_{dmax} の大小よりも粘土分含有量やサクシヨンの大きさが q_u に大きな影響を与えることが分かる。また、 q_u (kPa)と V_{vh} (m/s)の絶対値の大小関係には意味はなく、偶然に変曲点が $q_u=200$ (kPa)と $V_{vh}=200$ (m/s)である付近になった可能性もあるが、断定することは現時点では難しい。

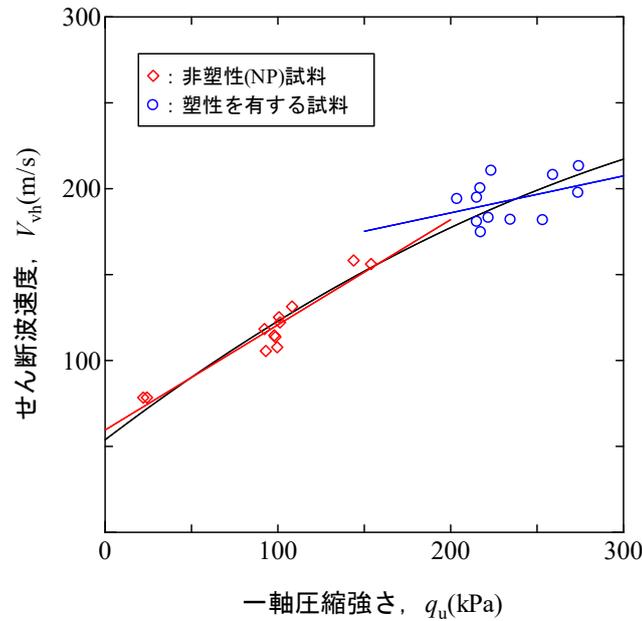


図-3.3.28 q_u と V_{vh} の関係

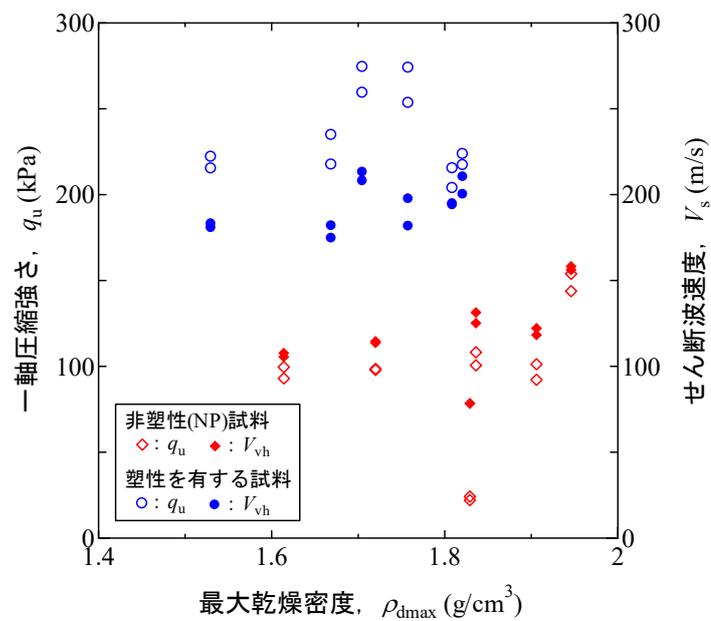


図-3.3.29 ρ_{dmax} と q_u , V_{vh} の関係

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

次に、図-3.3.30は q_u と V_{vh} から算出された $G_{vh}(=\rho \cdot V_{vh}^2)$ の関係を示している。 q_u と G_{vh} の関係は原点を通る直線で表されている。先述したように、粘土分が多い試料では q_u と I_p の関係が多少異なっており、サクシヨンの影響を大きく受けていることが考えられるのであるが、 q_u と G_{vh} の関係は全ての試料で一様となっているため、 G_{vh} はサクシヨンの影響も加味した q_u の大きさと良く対応していることが分かる。また、 V_{vh} を湿潤密度 ρ を考慮した G_{vh} にすることで一次直線に表すことが可能になったとも考えられる。しかし、サクシヨンの影響が小さいであろうセメント処理土を用いた過去の研究⁴⁷⁾で得られた q_u と V_{vh} 、 G_{vh} 関係においても本研究と同様な傾向が得られている。そのため、今後は各試料でのサクシヨンを測定することで、 q_u と V_{vh} の関係についてのさらなる検討を行う必要がある。

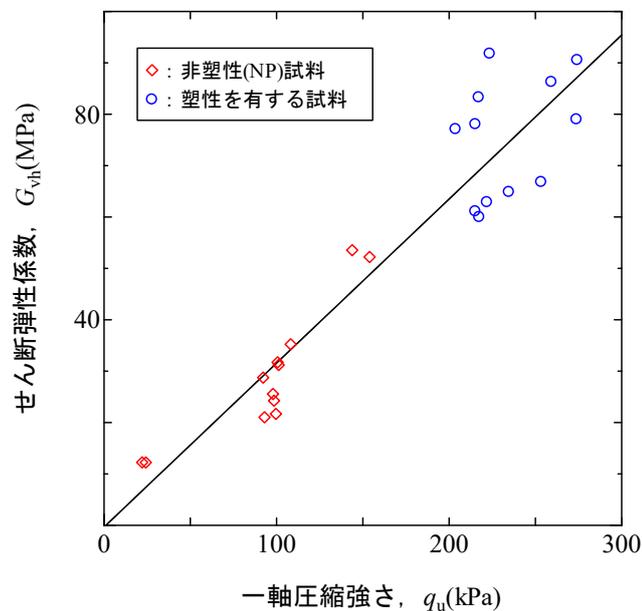


図-3.3.30 q_u と G_{vh} の関係

3.3.5 サクシヨン測定

a) 試験条件と試験方法

試験より得られた結果から、一軸圧縮強さやせん断波速度にはサクシヨンが影響していることが考えられたため、一部の試料に対してサクシヨンの測定を行った。試験を行った試料の各種試験結果を表-3.3.2にまとめる。また、図-3.3.31に試料の三角座標上の分布を示す。図および表より、0:2:8試料と0:5:5試料は q_u と V_{vh} が同程度ながらも粘土分含有量や I_p が異なる。6:3:1試料は密度が高く締固まっているが非塑性で

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

ある。供試体の作製方法や締固め条件に関しては一軸圧縮試験や BE 試験に用いたものと同様である。

次に、図-3.3.32 にサクシオン測定装置の概略図を示す。サクシオンはペDESTAL から間隙水圧測定用圧力変換器までの経路が脱気水で飽和された状態で供試体をセラミックディスク付きのペDESTAL に載せることで、セラミックディスクを通して測定する。測定に用いるセラミックディスクは事前に空気侵入値 (AEV) が 200kPa 以上であることを確認している。さらに試験前にはセラミックディスクを 24 時間以上真空引きする

表-3.3.2 試料の各種試験結果

試料名	ρ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)	I_p	q_u (kPa)	V_{vh} (m/s)
0 : 2 : 8	1.53	23.5	47.4	218.6	181.9
0 : 5 : 5	1.67	18.8	29.4	226.1	178.3
6 : 3 : 1	1.91	9.2	NP	96.7	120.5

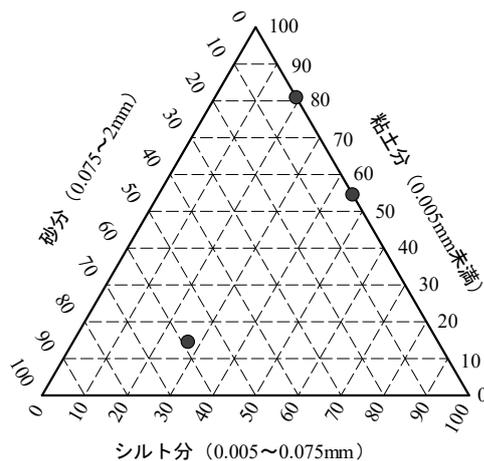


図-3.3.31 サクシオン測定試料の粒度

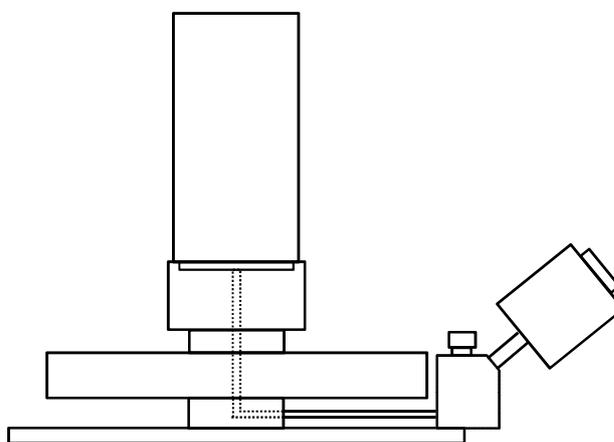


図-3.3.32 サクシオン測定装置の概略図

ことで内部を飽和化している。計測は1分間隔で行い、対数軸の測定時間に対してサクシオン S の値が落ち着いたら試験を終了している。

b) 試験結果および考察

図-3.3.33 にサクシオン測定結果を示す。結果より 0 : 2 : 8 試料と 0 : 5 : 5 試料は I_p に差があるものの、サクシオン S には大きな差はなかった。それに比較して、6 : 3 : 1 試料は S が他 2 試料よりも小さな値となった。しかしながら、3 試料の結果だけではどれ程の差が有意であるかを判断することは難しい。

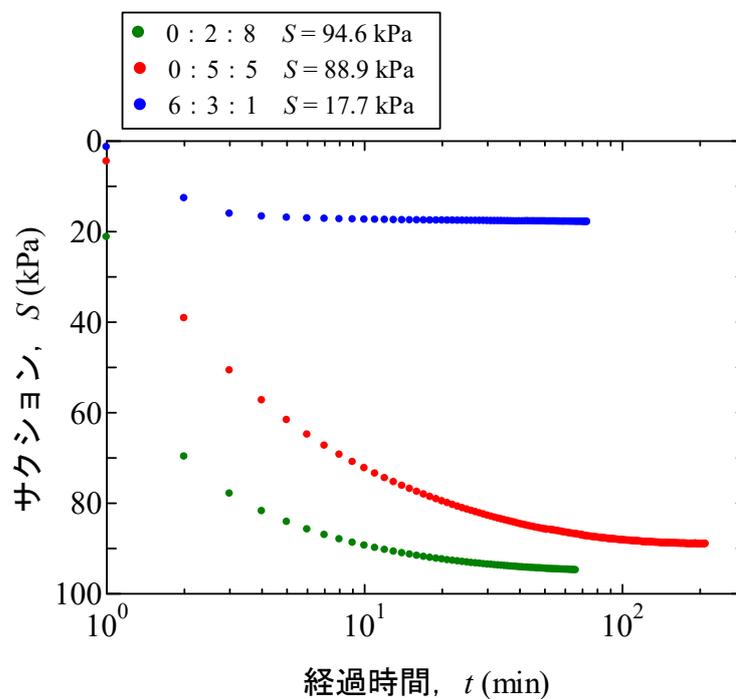


図-3.3.33 サクシオン測定結果

3.4 締固め条件の違いによって及ぼされる影響

3.4.1 はじめに

前節では、全 66 種類もの粒度の異なる試料に対して各種試験を行った。数多くの試料に対して試験を行うため、力学試験の供試体の締固め条件は最大乾燥密度かつ最適含水比の場合のみであった。しかしながら、実地盤を考えた場合、当然ながら密度や含水比は多種多様であり、最大乾燥密度かつ最適含水比であることはほとんどない。

よって、本節では締固め時の条件、具体的には締固め度 D_c と含水比 w を変えた数種類の試料の強度・せん断波速度を測定することで、粒度と締固め条件の関係が強度・せん断波速度にどのように影響を与えるか調べている。

3.4.2 試料の説明

本節では、混合する原料土を豊浦砂と NSF 粘土の 2 種として任意の重量配合比で混合することで粒度特性の異なる 11 種の試料を作製した。よって、本章における各混合試料の名称は豊浦砂 : NSF 粘土の順で 0 : 10, 1 : 9, …… , 9 : 1, 10 : 0 としている。各種物理試験および突き固めによる土の締固め試験を行った。前節では、混合試料の粒度、土粒子密度に関しては 3 種の原料土の混合割合から加重平均によって算出していたが、本章で用いた試料に関しては 11 種の試料に対してそれぞれ土の粒度試験、土粒子の密度試験を行っている。

図-3.4.1 は粒度試験から得られた粒径加積曲線を示している。図より、それぞれの配合比の試料の粒径加積曲線は 10 : 0 試料と 0 : 10 試料の間を配合比に応じておおよそ等間隔で並んでいることが分かる。また、0 : 10 試料の粒度分布は粒径約 0.01mm 以下であり、10 : 0 試料ではほとんど 0.85mm~0.1mm の範囲にあるため、全ての試料で粒径 0.1mm~0.01mm の粒子がほとんど無い状態となっている。

図-3.4.2 は土粒子密度 ρ_s および液性限界 w_L 、塑性限界 w_P を示している。これらも、 ρ_s は粒径加積曲線と同様に 0 : 10 試料 ($\rho_s = 2.716 \text{ g/cm}^3$)、10 : 0 試料 ($\rho_s = 2.641 \text{ g/cm}^3$) の間を配合比に従って一直線上の値となっている。 w_L , w_P も同様な傾向となっているが、7 : 3 試料~10 : 0 試料の w_L , w_P は非塑性 (NP) となっている。

図-3.4.3 は締固め曲線群を示している。締固め曲線は 0 : 10 試料~7 : 3 試料までは豊浦砂の割合が増えるにしたがって最適含水比 w_{opt} が低下して最大乾燥密度 ρ_{dmax} が増加し、締固め曲線がゼロ空気間隙曲線に沿って左上方向に移動している。詳細に観察すると、8 : 2 試料では 7 : 3 試料と比較して w_{opt} に変化は無いが ρ_{dmax} が低下しており、この傾向は 9 : 1 試料、10 : 0 試料の比較でも同様に確認できた。また、 w_L , w_P が非塑性となる境界も 7 : 3 試料、8 : 2 試料にあることから、用いた試料の中では配合比 7 : 3 と 8 : 2 を境界に粒度特性に大きな違いがあるものと考えられる。以上の結果と 9 : 1 試料、10 : 0 試料では自立する供試体を作製することが困難であったことから、本研究では豊浦砂と NSF 粘土の配合比が 0 : 10, 3 : 7, 5 : 5, 7 : 3, 8 : 2 の 5 種類の試料で力学試験を行った。表-3.4.1 にこの 5 種類の試料の物性値をまとめる。

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

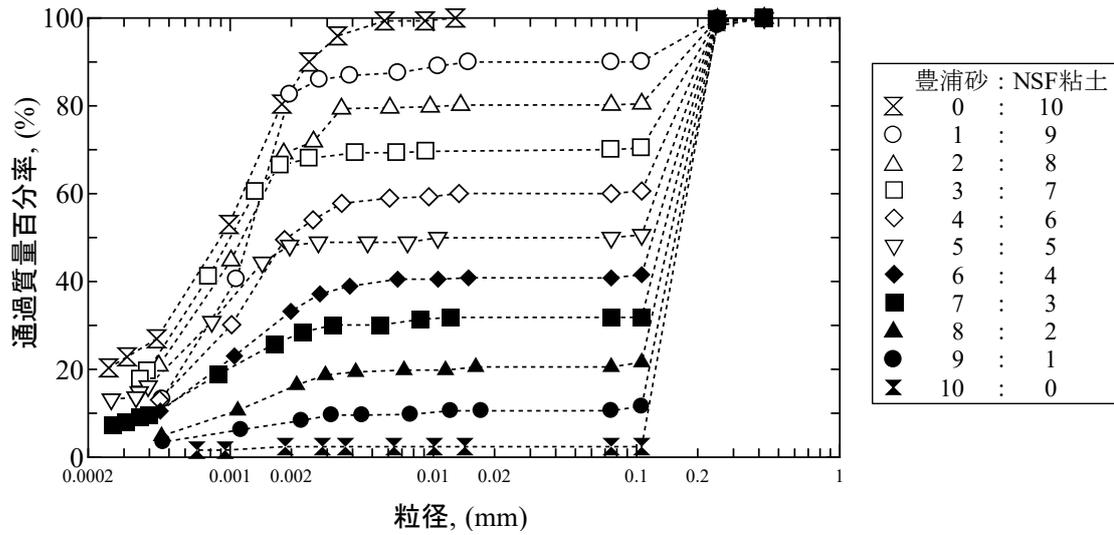


図-3.4.1 粒径加積曲線

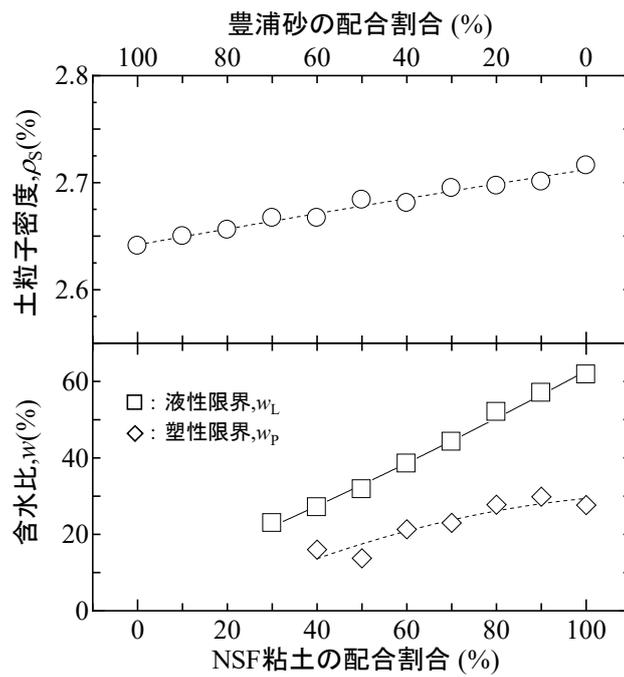


図-3.4.2 土粒子密度 (上) および液性限界, 塑性限界 (下)

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

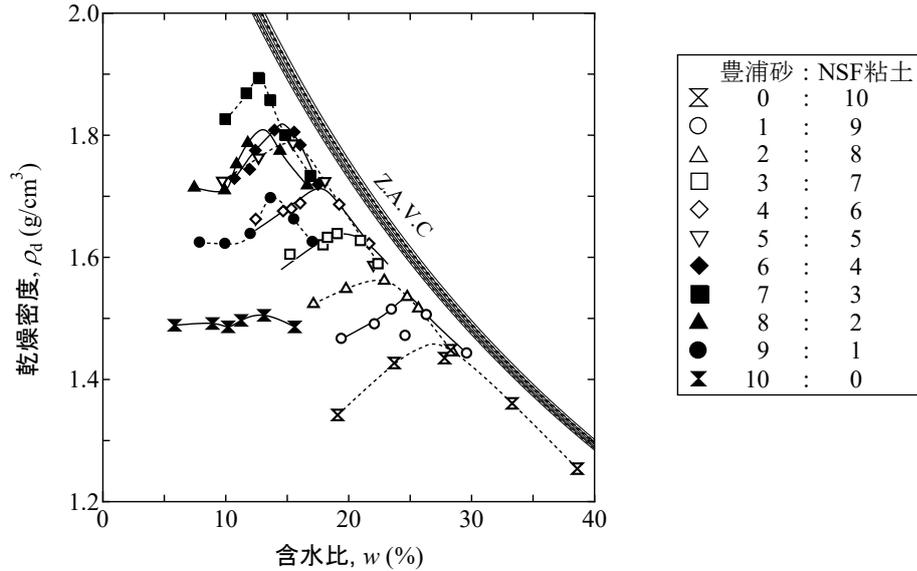


図-3.4.3 締固め曲線

表-3.4.1 力学試験を行った試料

配合比		ρ_s (g/cm^3)	w_L (%)	w_p (%)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)
豊浦砂	NSF 粘土					
0	10	2.716	61.8	27.7	1.46	26.9
3	7	2.695	44.2	23.0	1.64	19.5
5	5	2.684	31.2	13.7	1.78	15.2
7	3	2.667	NP	NP	1.89	12.7
8	2	2.656	NP	NP	1.81	13.0

3.4.3 試験条件と試験方法

供試体は、自然乾燥状態にある試料に蒸留水を加え、一様に混合して所定の含水比 w となるよう含水比調整を行った。その後、所定の締固め度 D_c (乾燥密度 ρ_d) となる量の試料を直径 5 cm および高さ 10 cm の供試体作製用モールドに 3 層に分けて投入し、載荷フレームに油圧ジャッキを取り付けた装置を用いて静的に締固めた。供試体は密度や水分量の影響を調べるために、それぞれの配合比で締固め度 D_c を 4 種類 ($D_c=85\%$, 90% , 95% , 100%)、含水比 w を 3 種類 (w_{opt} , $w_{opt}-3\%$, $w_{opt}+3\%$) の計 12 種類、1 種類につき 3 本の供試体に対して、それぞれ一軸圧縮試験および BE 試験を行った。

3.4.4 締固め度が一軸圧縮強さに及ぼす影響

図-3.4.4 (a), (b), (c), (d), (e) は、それぞれの配合比ごとに締固め度 D_c と一軸圧縮強さ q_u の関係を示している。8 : 2 試料に関しては、低い D_c または高い w 条件では供試体が自立せずに試験が行えなかったため、データが存在しない点がある。どの試料も

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

D_c が大きくなるに伴って q_u も大きくなっており、同等の D_c では w が低い試料の q_u が大きくなるという傾向がみられる。 q_u の大きさについては、0 : 10 試料~5 : 5 試料までは 100kPa~250kPa と同程度であり、7 : 3 試料では少し小さくなり、8 : 2 試料では最大でも 50kPa 程度と非常に小さくなっている。

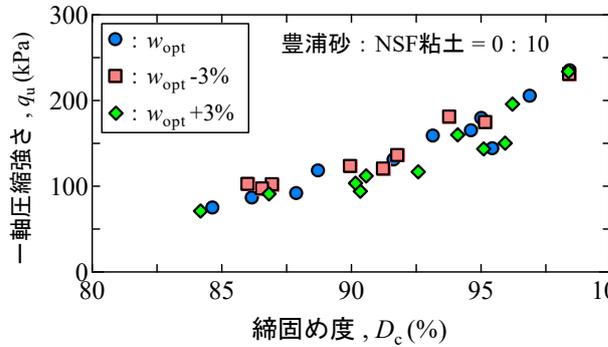


図-3.4.4(a) 0 : 10 試料

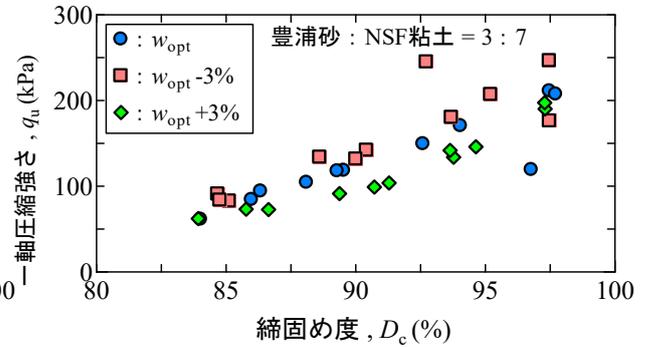


図-3.4.4(b) 3 : 7 試料

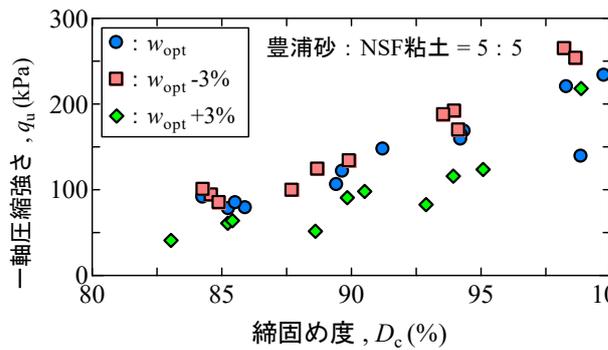


図-3.4.4(c) 5 : 5 試料

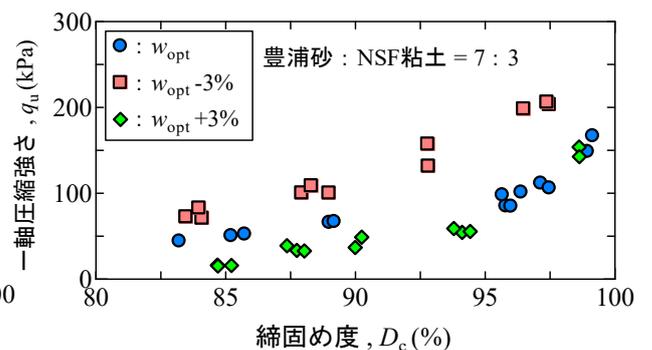


図-3.4.4(d) 7 : 3 試料

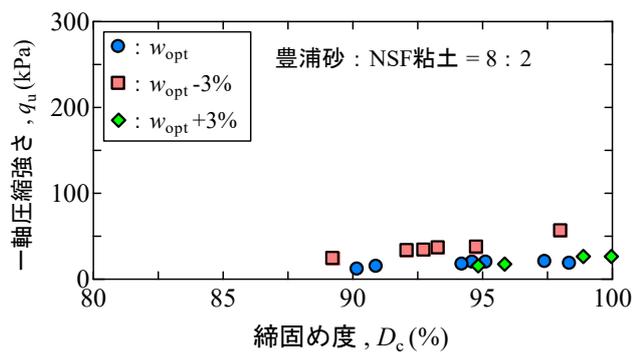


図-3.4.4(e) 8 : 2 試料

図-3.4.4 配合毎の D_c と q_u の関係

ここで、図-3.4.5 は全ての試料の D_c と q_u の関係をまとめたものである。図より、 D_c と q_u の関係は 0 : 10 試料~5 : 5 試料までは割と直線的に一樣な傾きを有しているが、7 : 3

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

試料，8：2 試料と豊浦砂の配合割合が増えると傾きが変化している．この傾きの変化の境界である 7：3 試料，8：2 試料は，物理試験の結果により粒度特性が異なると考えられる境界とも整合しており，粒度特性の違いに伴って変化したコンシステンシー限界や締固め曲線の変化が q_u に大きく影響したと考えられる．つまり，この結果はある程度限定された粒度分布の範囲内であれば，原位置において含水比に多少のばらつきがあったとしても，強度情報のみから D_c を十分に評価できることを意味していると解釈できると考えられる．

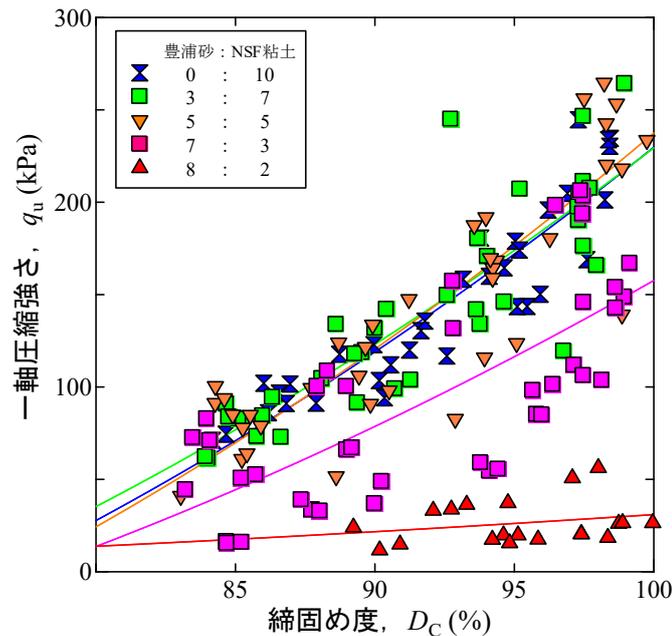


図-3.4.5 D_c と q_u の関係

一方で，図中におけるは 7：3 試料，8：2 試料は液性・塑性限界が非塑性となった試料でもある．3.3 節で述べたように試料が非塑性となるかは一軸圧縮強さに大きな影響を与えるが，最大乾燥密度の大小には直接的な関係性は見られない．しかし，液性・塑性限界やサクションといった値は三角座標でコンターを描くため，粒度分布に影響を受けていることが分かる．よって，強度の推定に関しては粒度情報からの推定の可能性が示唆される．また，本章の研究においては，一軸圧縮試験のみ行っているが，実際の盛土の施工を考えると三軸圧縮試験によって得られる強度特性が求められることが多い．三田地らの研究⁴⁸⁾によると圧密非排水条件での三軸圧縮試験で得られるせん断強度は，一軸圧縮強さとサクション値より供試体の乱れや圧密状態を加味することで推定が可能である．三田地らの研究では自然地盤より採取された試料と実験室で再構成された試料を対象としているため，締固めて作成した不飽和供試体でのデータでの確認は今後の課題として取り組む必要があるが，強度特性の推定に関しても多いに可能性があるといえる．

3.4.5 締固め度がせん断波速度に及ぼす影響

図-3.4.6 (a), (b), (c), (d), (e)は、それぞれの配合比ごとに締固め度 D_c とせん断波速度 V_{vh} の関係を示している。どの試料でも D_c と q_u の関係と同様に D_c が大きくなるに伴って V_{vh} も大きくなり、同等の D_c では w が低い試料の q_u が大きくなる傾向がみられる。

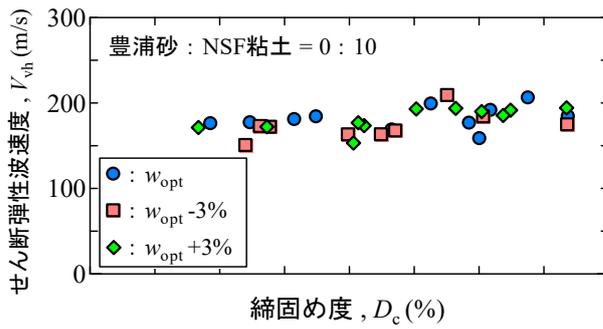


図-3.4.6(a) 0 : 10 試料

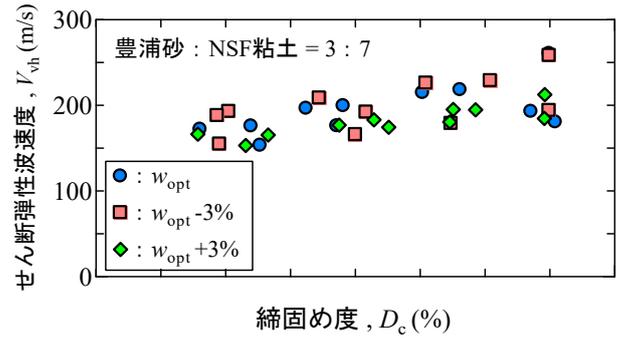


図-3.4.6(b) 3 : 7 試料

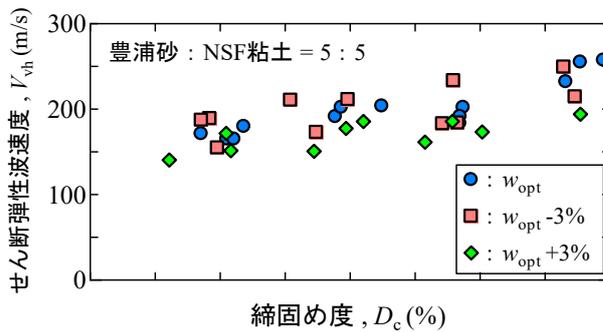


図-3.4.6(c) 5 : 5 試料

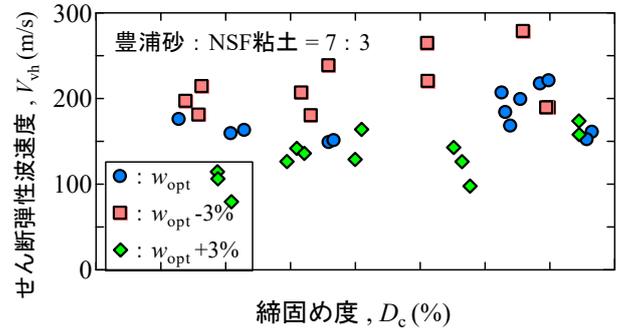


図-3.4.6(d) 7 : 3 試料

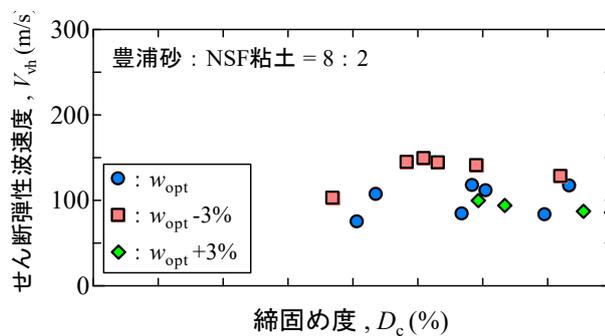


図-3.4.6(e) 8 : 2 試料

図-3.4.6 配合毎の D_c と V_{vh} の関係

一方、図-3.4.7 は全ての試料の D_c と V_{vh} の関係をまとめたものである。図-3.4.5 に示した D_c と q_u の関係と比べると全体的にばらつきが大きく、特に 7:3 試料と 8:2 試料で大きいことが確認できる。この理由について、せん断波は供試体内の限定された領域を伝播するため、局所的な配合のばらつきが大きく反映しやすいといったことも考えられるが、図-3.4.4 および図-3.4.6 に示した結果を踏まえると、 V_{vh} が q_u に比べて含水比の違いをより強く反映しやすいことも要因の一つだと考えられる。さらに、供試体間のサクシオン等の違いも影響していると考えられる。特に 7:3 試料の低含水比の試料は V_{vh} 、 q_u ともに他の含水比と比べた時に非常に大きくなっており、サクシオンが大きくなりやすい配合と含水比の組み合わせであることも考えられる。

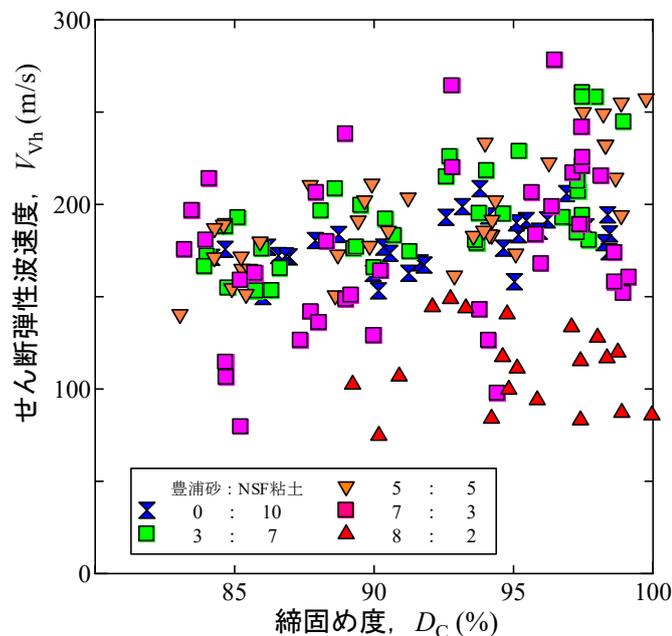


図-3.4.7 D_c と V_{vh} の関係

3.4.6 含水比が一軸圧縮強度に及ぼす影響

図-3.4.8 は、0:10 試料と 7:3 試料の含水比 w と一軸圧縮強度 q_u の関係を示している。図に示していない他のいずれの試料においても、含水比が低下すると q_u も低下する傾向がみられた。また、 q_u と D_c の関係と同様に 0:10 試料～5:5 試料では同等の傾きを持つものの、7:3 試料では大きく異なっている。

3.4.7 含水比がせん断波速度に及ぼす影響

図-3.4.9は、0:10試料と7:3試料の含水比 w とせん断波速度 V_{vh} の関係を示している。 q_u と同様に図に示していない他のいずれの試料においても、含水比が低下すると q_u も低下する傾向がみられた。しかし、 V_{vh} は q_u に比べて D_c による差がほぼなくなっていることが分かる。

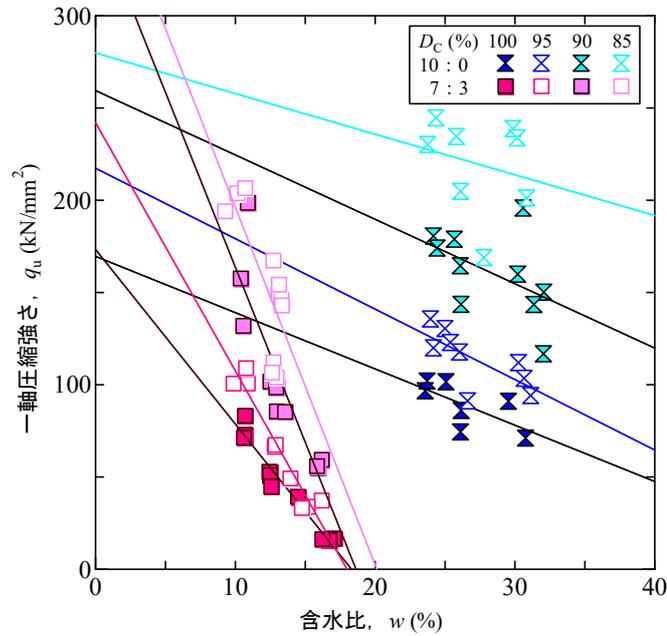


図-3.4.8 w と q_u の関係

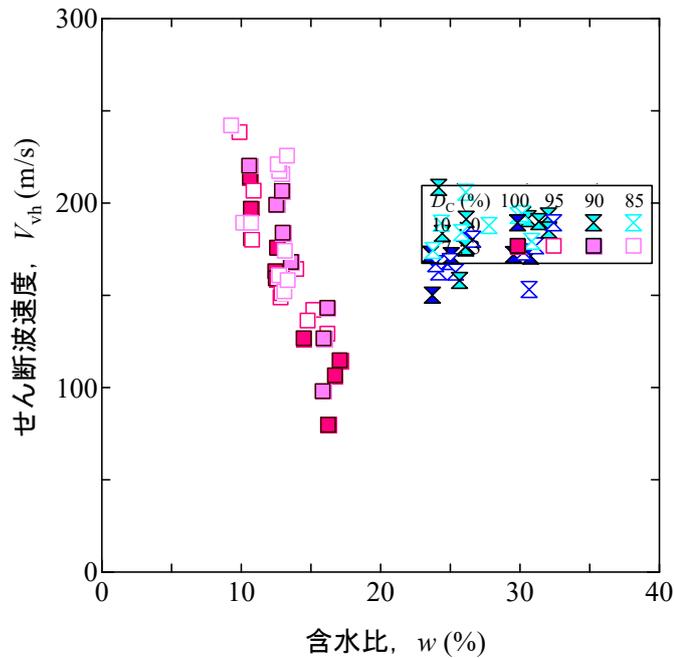


図-3.4.9 w と V_{vh} の関係

3.4.8 一軸圧縮強度とせん断波速度およびせん断弾性係数の関係

図-3.4.10 に一軸圧縮強度 q_u とせん断波速度 V_{vh} の関係を示す. 図より q_u と V_{vh} の関係は前章で得られた結果と同様に2次曲線で表すことができる. しかしながら, その曲線は前章で得られた結果と大きく異なり, 締固め度や含水比が多種に渡る結果を同一な傾向で示すのは難しいと考えられる.

図-3.4.11 一軸圧縮強度 q_u とせん断弾性係数 G_{vh} の関係を示す. 図より, q_u と G_{vh} の関係は前章で得られた結果と同様に, q_u と V_{vh} の関係に比べて直線的であることが分かる. しかし, V_{vh} と同様に締固め度や含水比が多種に渡る結果を同一な傾向で示すのは難しいと考えられる.

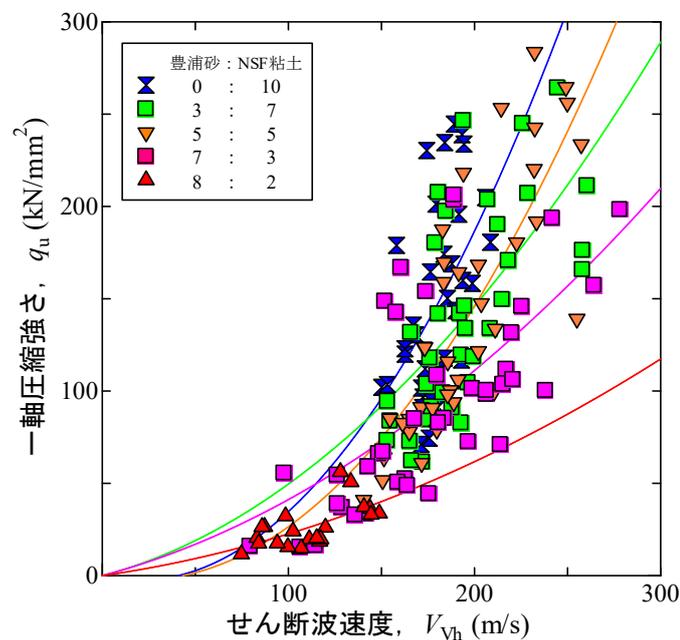


図-3.4.10 q_u と V_{vh} の関係

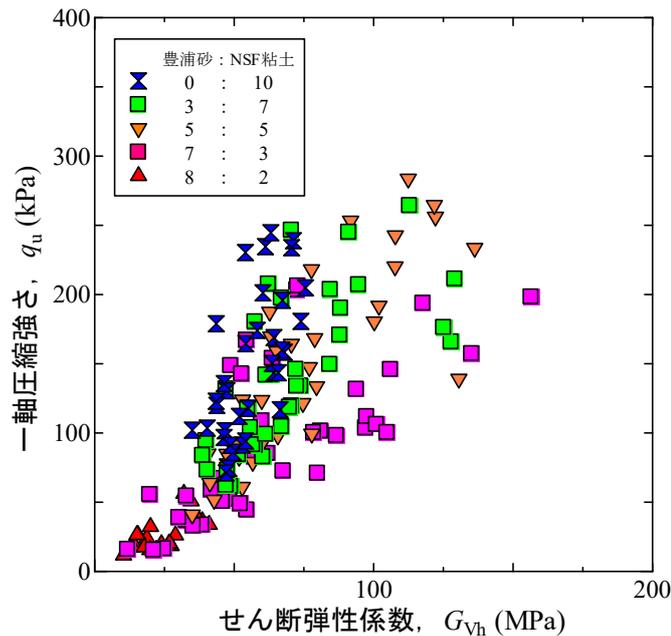


図-3.4.11 q_u と G_{vh} の関係

3.5 第3章のまとめ

- (1) 締固め試験より得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} より、 ρ_{dmax} に関しては値が最小となる3種が 10 : 0 : 0, 0 : 10 : 0, 0 : 0 : 10 試料であり、全ての配合割合において2種以上を配合すると値が大きくなっていることが分かった。さらに、粒度の三角座標上にコンター（等値線）図として最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} を示すと、 ρ_{dmax} の最大値、 w_{opt} は最小値を中心としてはほぼ同心円状に分布している。 ρ_{dmax} の最大値は 6 : 2 : 2 試料で $\rho_{dmax} = 1.95(\text{g}/\text{cm}^3)$ ($w_{opt} = 10.6\%$)、 w_{opt} の最小値はその隣接する点である 6 : 3 : 1 試料で $w_{opt} = 9.22\%$ ($\rho_{dmax} = 1.91(\text{g}/\text{cm}^3)$) となった。
- (2) 2種混合土では、最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} の時の飽和度 S_r は粒径が小さい方試料の特性に、間隙比 e は粒径が大きい方の試料の特性に依存することが分かった。飽和度 S_r 、間隙比 e はそれぞれ、最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} に関係する値であるため、粒度によって最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} が推定できる可能性が示唆された。
- (3) 粒度の三角座標上の液性限界 w_L のコンター図より、液性限界 w_L は全体的には粘土分の増加に伴って大きくなっている一定の傾向を持つことが分かった。しかし、液性限界は最大乾燥密度、最適含水比とはあまり相関性がみられなかつ

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

た. 塑性限界 w_p は w_L に比べて全体的に明確な傾向がみられなかった. しかしながら, 砂分が少なく, 粘土分が多い試料の方が w_p の値は大きくなる傾向がわずかではあるがみられた.

- (4) 三角座標上の塑性指数 I_p のコンター図より. 全体的な傾向としては w_L と同様な傾向がみられるのであるが, w_L でみられたシルト分または砂分が 10%程度以下の試料では異なる傾向が顕著になっている. これは, 偶然ながら傾向が異なる試料は比較的砂分が少なく, w_p の持つ傾向をうまく反映できていることが考えられる.
- (5) 一軸圧縮試験より得られた一軸圧縮強さ q_u のコンター図より, q_u は 2:2:6 試料付近を中心としてコンターを描いている. みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており, 基本的には粘土分と相関を持ち, シルト分が 20%程度以下になると傾向が変化するという I_p に似た形となっている. また, 破壊ひずみ ϵ_f のコンターも q_u と同じく基本的には粘土分との相関がありシルト分が 20%程度以下になると傾向が変化するのであるが, 傾向の変化の仕方が, q_u や I_p とは相反する変曲がみられる. さらに, 2:2:6 試料付近に中心点を持っていた q_u とは異なり, 粘土分の増加に伴って ϵ_f も大きくなり続けている.
- (6) ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度の試料の応力-ひずみ曲線より, ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度でも q_u の大きさや応力-ひずみ曲線の挙動は異なることが分かった. ϵ_f とシルト分/粘土分の関係は大きく 2 つの傾向に分かれ, 液性限界・塑性限界試験より非塑性 (NP) であると判断された試料はシルト分/粘土分の大きさに係らず ϵ_f は 2%程度になる. 次に, 非塑性ではなく塑性を有する試料では ϵ_f とシルト分/粘土分は直線的な関係を持つことが分かる. また, 非塑性であるか否についても粒度に起因するものである. よって, 締固めた混合土に対して一軸圧縮試験を行うと, せん断挙動は粒度と相関関係にあり, 傾向が変化する境界も粒度に起因するコンシステンシー限界より判断することができるといえる.
- (7) V_{vh} のコンター図の分布は q_u のものと類似している. さらに, みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており, 基本的には粘土分と相関を持ち, シルト分か砂分が 20%程度以下になると傾向が変化するという I_p に似た形となっている. また, せん断弾性係数 G_{vh} はほぼ V_{vh} と同じ傾向の分布となっている.

- (8) q_u と G_{vh} の関係は全ての試料に対して原点を通る直線で表された。粘土分が多い試料では q_u と I_p の関係が多少異なっており、サクシヨンの影響を大きく受けていることが考えられるのであるが、 q_u と G_{vh} の関係は全ての試料で一様となっているため、 G_{vh} はサクシヨンの影響も加味した q_u の大きさと良く対応していることが分かる。また、 V_{vh} を湿潤密度 ρ を考慮した G_{vh} にすることで一次直線に表すことが可能になったとも考えられる。
- (9) q_u と V_{vh} が同程度ながらも粘土分含有量や I_p が異なる 2 種の試料と密度が高く締固まっているが非塑性である試料に対して行ったサクシオン測定結果より、2 種試料は I_p に差があるものの、サクシオン S には大きな差はなかった。それに比較して、非塑性である試料は S が他 2 試料よりも小さな値となった。しかしながら、3 試料の結果だけではどれ程の差が有意であるかを判断することは難しく、今後の追加試験が必要である。
- (10) 一軸圧縮強さ q_u とせん断波速度 V_{vh} には配合比や含水比の変化によらず、ある程度の相関があることが確認された。
- (11) q_u および V_{vh} はそれぞれ締固め度 D_c の増加に伴って大きくなることが確認された。
- (12) q_u は砂質土の配合比がある割合以上になるまでは、多少の含水比変化に影響されることなく、一様な傾きで D_c との関係を持つことが分かった。また、その配合比の境界は粒度特性の違いで生じるコンシステンシー限界や締固め曲線の変化に影響されると考えられ、本研究の場合では豊浦砂 : NSF 粘土の割合が 7 : 3 程度であった。
- (13) V_{vh} は q_u に比べて含水比やサクシオン等の違いをより強く反映しやすいと考えられ、せん断弾性波速度を用いて q_u と同程度に D_c を推定・評価するためには配合比に加えて、含水比やサクシオン等の影響についても加味する必要があることが分かった。

本章で行った試験結果より、粒度の三角座標上において傾向が変化する点が多々見受

3. 礫分を含まない締固めた土の粒度が各種特性に与える影響

けられた。その変化の要因としては粒度の変化に伴う構造主体の違いが考えられる。締固め試験結果においては特に2種混合土で構造主体による影響が顕著に見られ、締固め曲線、飽和度、間隙比からそれぞれ主体が変わる配合割合が推察された。液性限界・塑性限界試験結果から得られる塑性指数もしくは非塑性(NP)か否かは一軸圧縮試験、BE試験より得られる変形・強度特性に対して重要な指標になることも示唆された。また、一軸圧縮試験時のせん断挙動に関してはシルト分と粘土分の比を指標と用いて整理することができた。

砂分・シルト分・粘土分の3種混合土では、第一に非塑性か否か強度・せん断波速度に大きな違いがあることがいえ、主に粘土分が支配的な粒度領域が大きい。しかし、細かいところをみると一義的な相関関係ではない。特に3種混合土と2種混合土の遷移領域では土の構造の変化に伴い、各種特性との相関はそれぞれ個別に変化することが分かった。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

4.1 はじめに

前章までで、礫分を含まず細粒分が主となる土に関して粒度と各種特性について述べた。本章では主に盛土施工現場より採取した礫分を含む試料に対して土の粒度と締め固め、変形・強度特性等の各種特性との関係について明らかにするために行った試験について述べる。試験概要としては、締め固め試験、粒度等の物理試験および三軸圧縮試験といった力学試験を行い、結果に対して考察をしている。

4.2 試験試料

4.2.1 粒度調整試料（彩都）

本節では、三角座標上にコンター図を描くため、母材を粒度調整することで広範囲の粒度を持つ試料について試験を行った彩都試料について述べる。この彩都試料は、1つの現場の試料をふるい分けや市販の試料と混合させることで、所定の粒度を再現している。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（表-4.2.1）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「良く締め固まる」盛土に適した材料である。表の右端列に示している「距離」という項目は、後述する彩都試料の粒度と最大乾燥密度の関係性を示すコンター図における中心点（礫分：砂分：細粒分＝0:44:56）からの三角座標上の直線距離である。



図-4.2.1 彩都現場の試料採取

表-4.2.1 彩都試料の物性値

試料名	粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最適含水比 $W_{opt}(\%)$	粘着力 Cd(kPa)	内部摩擦角 $\phi_d(^{\circ})$	中心点から の距離r	土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$
	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)						
①-19mm	47.0	24.5	28.4	1.820	15.6	30.8	32.1	41.0	2.7
②-9.5mm	34.9	30.2	35.0	1.800	15.7	17.0	34.5	30.4	
③-2mm	0.0	46.3	53.7	1.669	18.9	15.0	32.6	2.3	
④合成A	100.0	0.0	0.0	1.911	14.0	10.6	38.4	86.8	
⑤合成B	18.0	63.0	19.0	1.931	12.2	33.2	35.2	32.0	
⑥合成C	17.4	15.1	67.5	1.817	14.3	8.5	30.1	25.2	
⑦合成D	80.0	9.3	10.7	1.901	14.3	27.7	34.7	69.4	

次に、彩都試料7種類の粒径加積曲線（図-4.2.2、図-4.2.3）と礫分・砂分・細粒分の三軸からなる三角座標上の粒度（図-4.2.4）、締固め曲線（図-4.2.5、図-4.2.6）を示す。

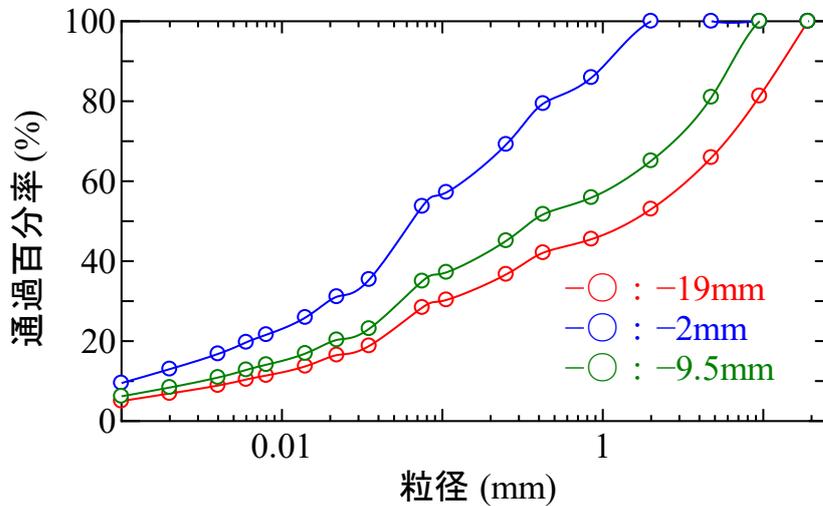


図-4.2.2 彩都試料 (-19mm, -2mm, -9.5mm) の粒径加積曲線

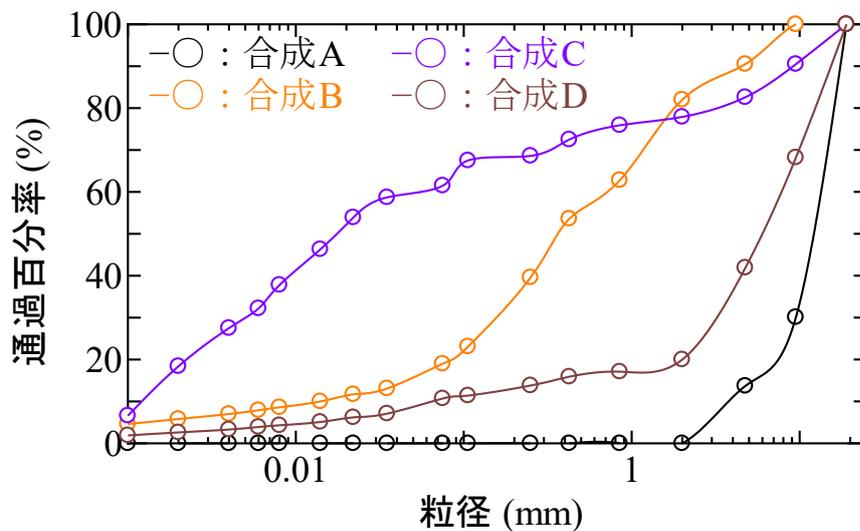


図-4.2.3 彩都試料 (合成 A,B,C,D) の粒径加積曲線

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

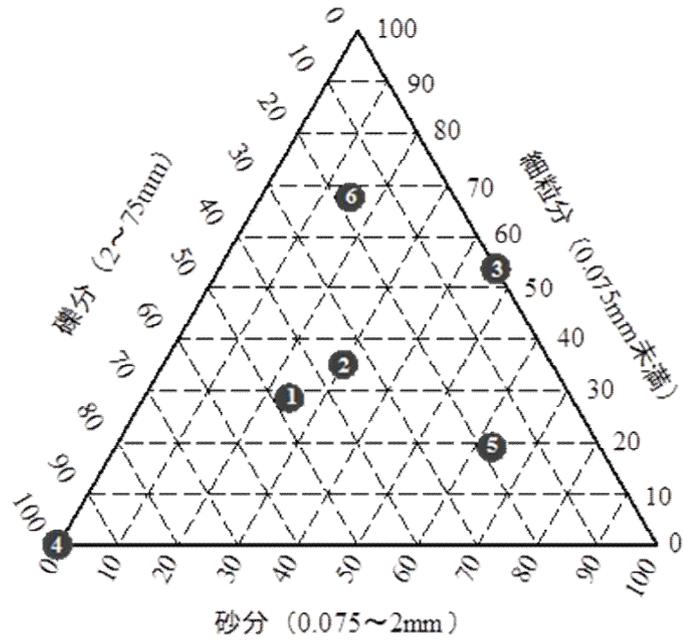


図-4.2.4 三角座標上の彩都試料の座標点

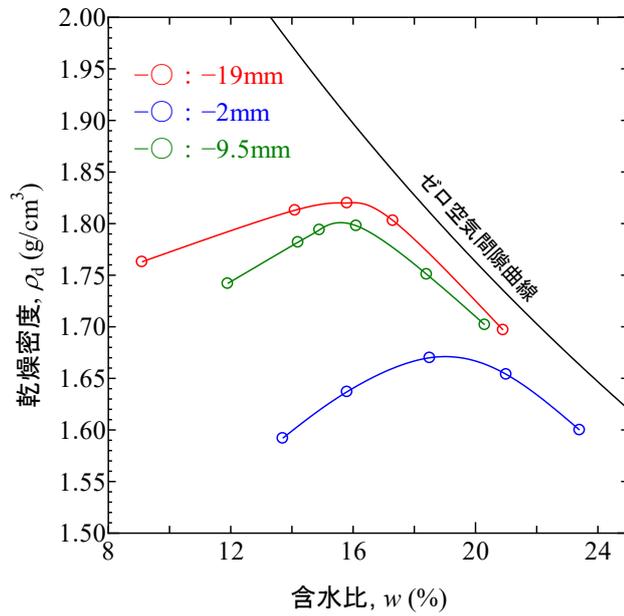


図-4.2.5 彩都試料 (-19mm, -2mm, -9.5mm) の締め固め曲線

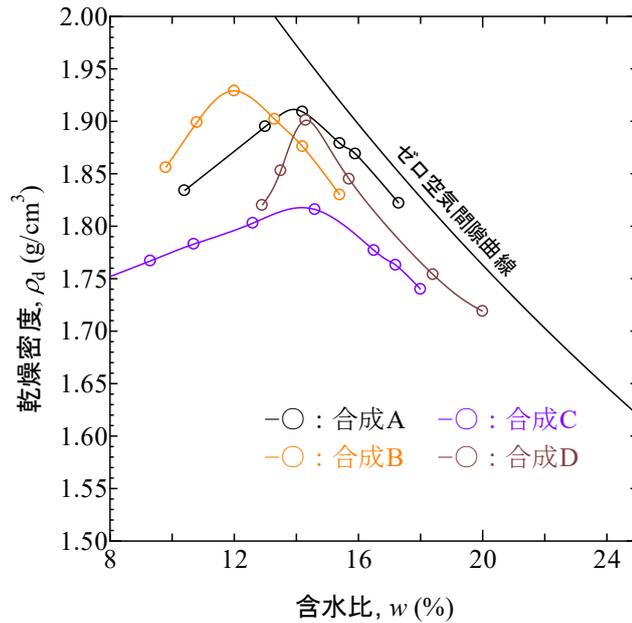


図-4.2.6 彩都試料（合成 A,B,C,D）の締め固め曲線

彩都試料のみで調整された-19mm, -9.5mm, -2mm, 合成 A の 4 つの試料に関しては、粒径が大きいほど最大乾燥密度 ρ_{dmax} は大きくなり、最適含水比 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最大乾燥密度 ρ_{dmax} は大きくなる⁴⁵⁾という傾向と同じ傾向である。

4.2.2 同一現場内で採取位置を変えた試料（土岐）

本節では、岐阜県土岐市の盛土造成現場から得られた試料（土岐試料）について述べる。前節の彩都試料は、一つの試料を市販の試料のものと混合、ふるい分けなどを行って作成されているのに対して、土岐試料は、同一現場内で5回に渡って位置を変えて採取することで、より粒度の自然なばらつきにおける締め固め特性の変化を調べている。土岐試料の特徴として、切盛土施工量が約100万 m^3 の広大な現場から採取され、定期的な試料採取が可能であること、粒径が広い範囲にわたって分布するため、よく締め固まる土であることが挙げられる。また、雨が降ってから3日以内は避け、地下水位より上で採取している。図-4.2.7に実際の採取場所を示す。採取したのは赤線で示す自然堆積土で全体約20万 m^3 の地山である。施工計画では、1か月で数万 m^3 採取されている。

次に、5種類の試料について述べる。5種類の試料とは、①6/22に採取されたもの（以下、①6.22）、②7/12に採取されたもの（以下、7.12）、③8/7に採取されたもの（以下、③8.7）、④9/17に採取されたもの（以下、④9.17）、⑤9/26に採取されたもの（以下、⑤9.26）である。各試料の原粒度と、19mmせん頭粒度での粒度試験から得られた、粒径加積曲線（図-4.2.8、図-4.2.9）および物性値（表-4.2.2）を示す。粒径加積曲線より、

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

①と②の試料は細粒分が多く、③・④・⑤の試料は礫分が多いことが視覚的に読み取ることができる。



図-4.2.7 土岐採取現場の様子

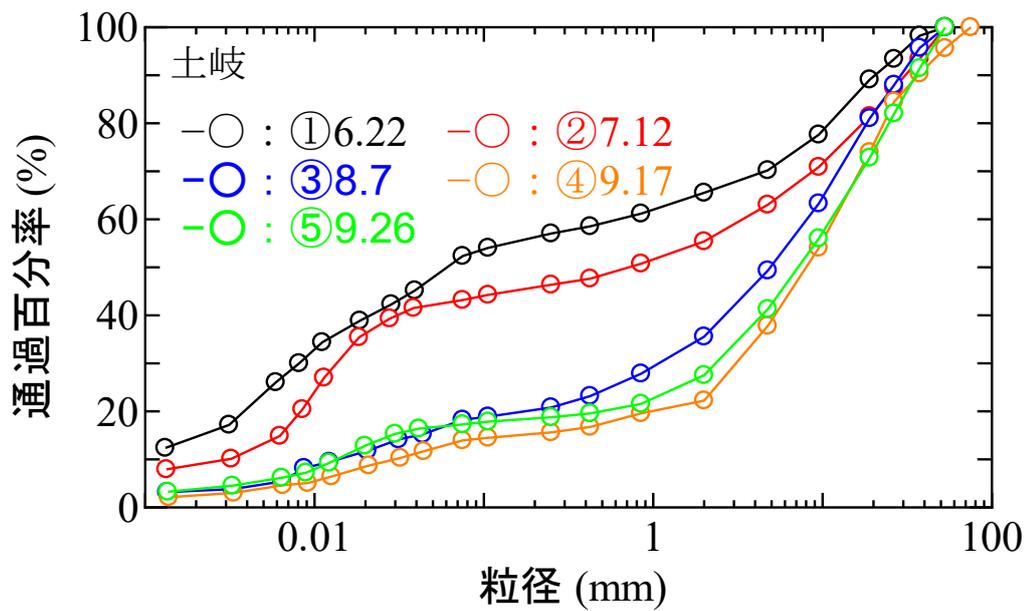


図-4.2.8 土岐試料の原粒度での粒径加積曲線

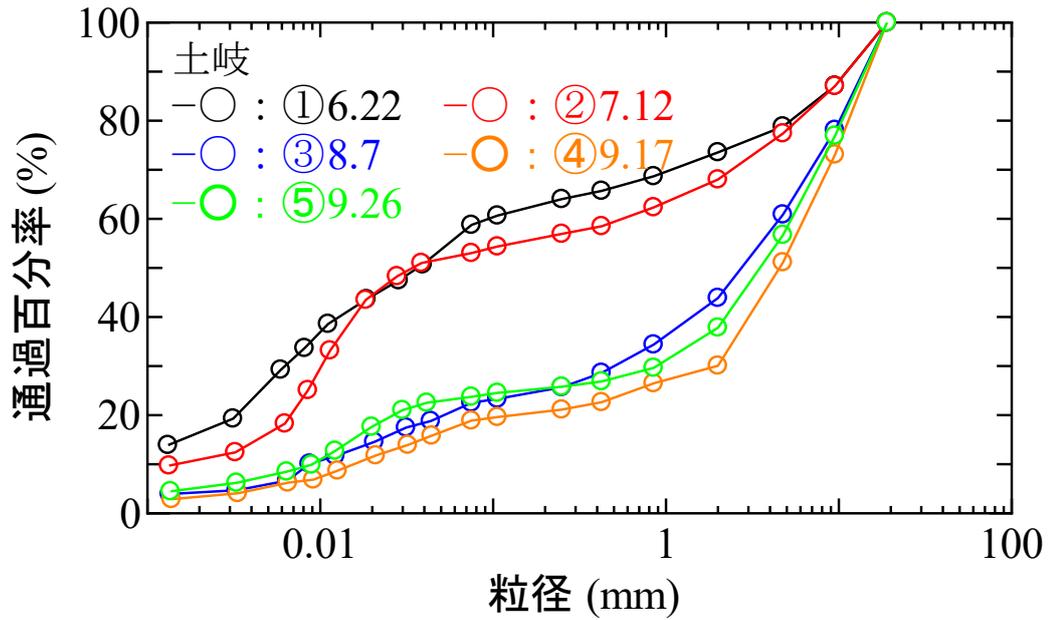


図-4.2.9 土岐試料のせん頭粒径 19mm での粒径加積曲線

表-4.2.2 土岐試料の物性値

試料名	粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	粘着力 Cd(kPa)	内部摩擦角 $\phi_d(^{\circ})$	中心点から の距離r	土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$
	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)						
①6/22	26.5	14.7	58.8	1.798	16.3	16.4	30.6	28.0	2.724
②7/12	32.0	15.0	53.0	1.859	13.4	23.3	30.3	30.6	2.681
③8/7	56.1	21.4	22.5	2.129	9.2	18.5	37.2	48.9	2.685
④9/17	69.9	11.2	18.9	2.154	9.1	20.2	34.9	60.6	2.691
⑤9/26	62.2	14.1	23.7	2.008	11.5	18.6	34.9	53.9	2.694

以上に述べた 5 種類の試料の三角座標での座標点を図-4.2.10 に示す。図-4.2.10 からわかるように、三角座標上でみると、砂分約 10~25% で一定で、礫分・細粒分の含有率が変化している。また、5 種類の試料の締固め曲線を図-4.2.11 に示す。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

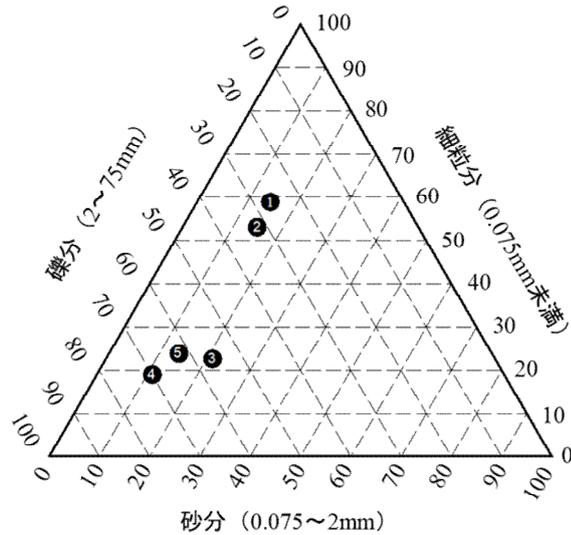


図-4.2.10 土岐5種類の試料の座標点

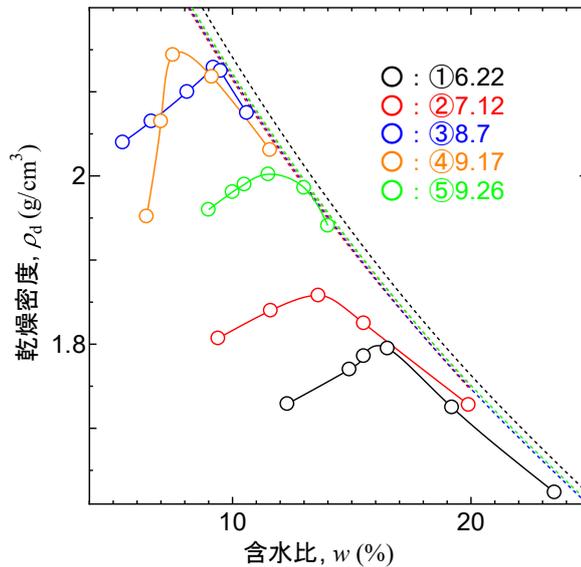


図-4.2.11 土岐5種類の試料の締め固め曲線

礫分が比較的多い③～⑤の試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} は大きくなり、細粒分が比較的多い①、②の試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} は小さくなった。この結果は、彩都試料同様、一般に広く認知されている傾向と同じであることが分かる。これらの土岐試料も彩都試料と同様に、試験結果の汎用性確認のために用いた。また、新たに礫分の粒径ごとに自然含水比試験と礫の吸水率試験も行い、自然含水比と粒度の関係性についても調べている。

4.2.3 その他の盛土材料試料（堤沢，大原，大分，小野）

本節では、これまでの研究結果の汎用性を確認するために新たに用いた4現場の盛土材料試料（堤沢，大原，大分，小野）について述べる。以下に小野を除く3現場の試料

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

の物性値, 粒径加積曲線, 三角座標上での粒度分布を示す. (表-4.2.3, 図-4.2.12~図-4.2.17)

表-4.2.3 3現場の試料の物性値 (堤沢, 大原, 大分)

試料名		粒度			最大乾燥密度	最適含水比	中心点からの距離r	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$
		礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)	$\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	$w_{opt}(\%)$		
堤沢	①-19mm	1.5	78.3	20.2	1.663	20.0	35.1	2.620
	②-2mm	0.0	79.4	20.6	1.675	19.3	33.8	
大原	①-19mm	30.2	48.5	21.3	1.892	12.7	32.7	2.627
	②-2mm	0.0	66.5	33.5	1.838	14.7	25.6	
	③合成A	60.1	27.7	12.1	1.989	11.2	53.9	
大分	①-19mm	25.6	50.9	23.5	1.653	18.7	29.6	2.641
	②-2mm	0.0	68.4	31.6	1.498	23.5	24.4	

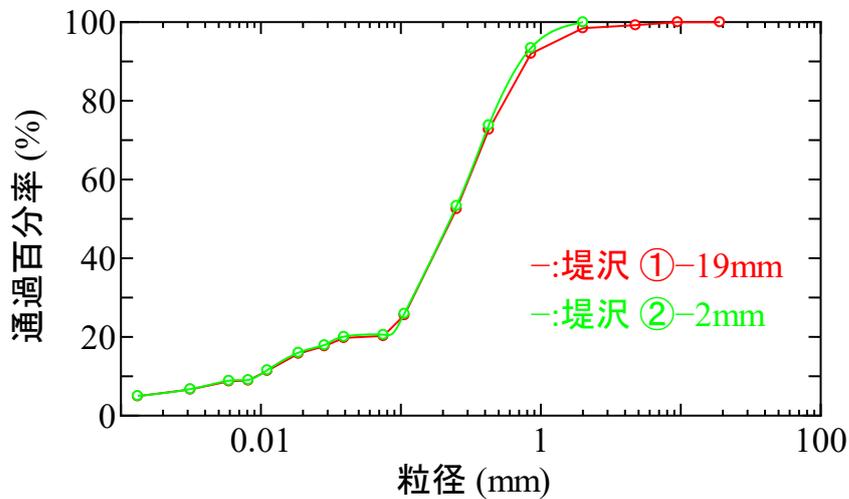


図-4.2.12 堤沢の粒径加積曲線

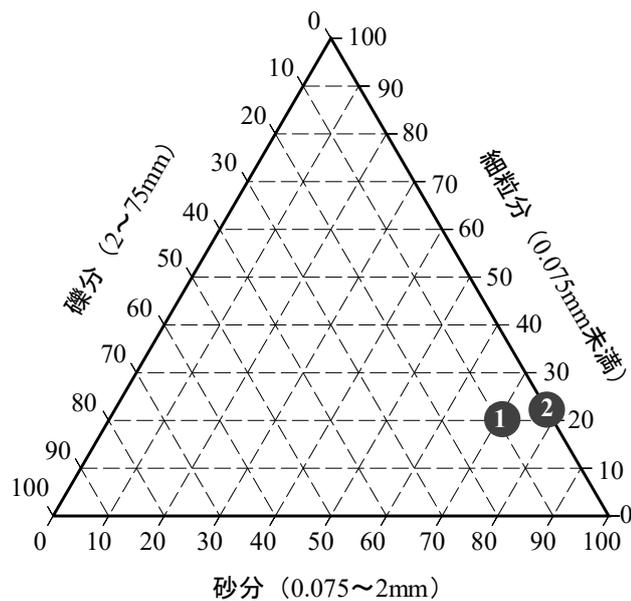


図-4.2.13 堤沢試料の三角座標上での粒度

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

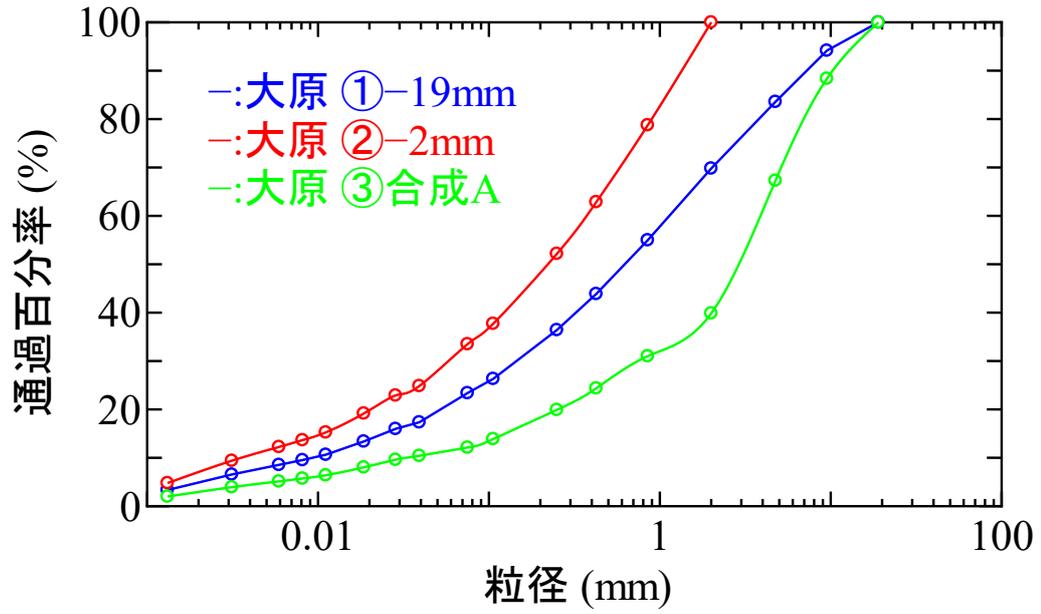


図-4. 2. 14 大原試料の粒度加積曲線

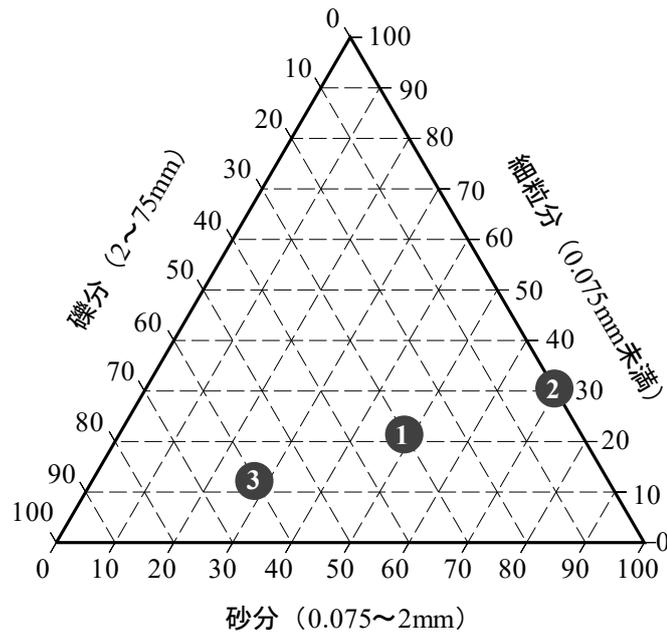


図-4. 2. 15 大原試料の三角座標上での粒度

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

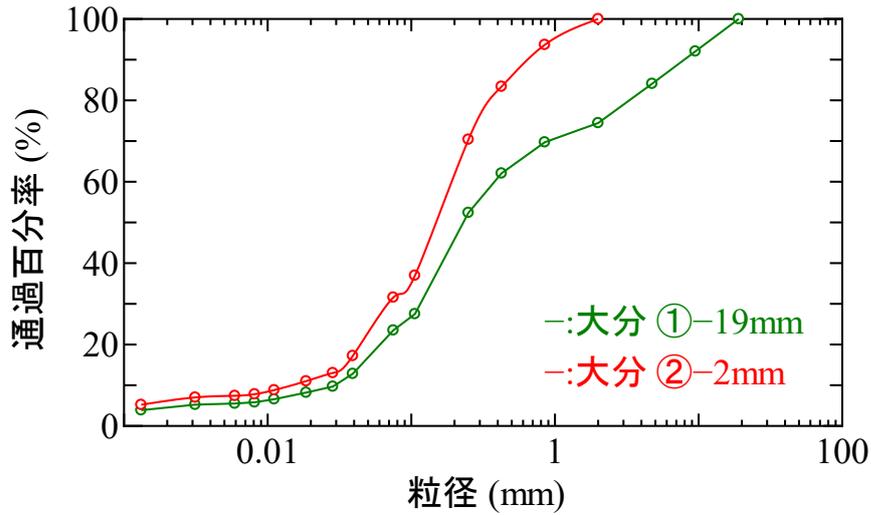


図-4.2.16 大分の粒度加積曲線

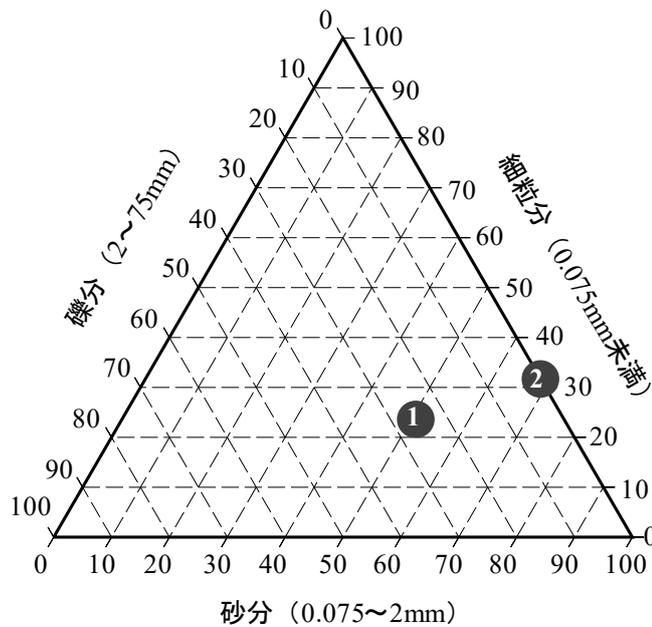


図-4.2.17 大分試料の三角座標上での粒度

堤沢・大原試料は堤体に用いられた盛土材料である。堤沢試料は、-19mm と-2mm の試料を用いており、粒度にほとんど差がないことが分かる。大原試料は、-19mm と-2mm の試料に加えて、-19mm と+2mm を 4 : 3 で混ぜ合わせて粒度調整をした合成 A を作製している。大分試料は、-19mm と-2mm の試料を用いている。

次に、小野試料の物性値、粒度加積曲線、三角座標上での粒度分布を示す(表-4.2.4, 図-4.2.18, 図-4.2.19)。合成 A は、礫分：砂分：細粒分含有率を粒度調整をした試料である。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

表-4.2.4 小野試料の物性値

試料名 (小野)	粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	中心点から の距離r	土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$
	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)				
①-19mm	24.1	34.1	41.8	1.774	16.4	20.9	2.662
②-9.5mm	19.1	36.4	44.5	1.764	16.4	16.6	
③-2mm	0.0	45.0	55.0	1.710	18.7	1.0	
④合成A	54.2	15.9	29.9	1.881	13.7	46.9	

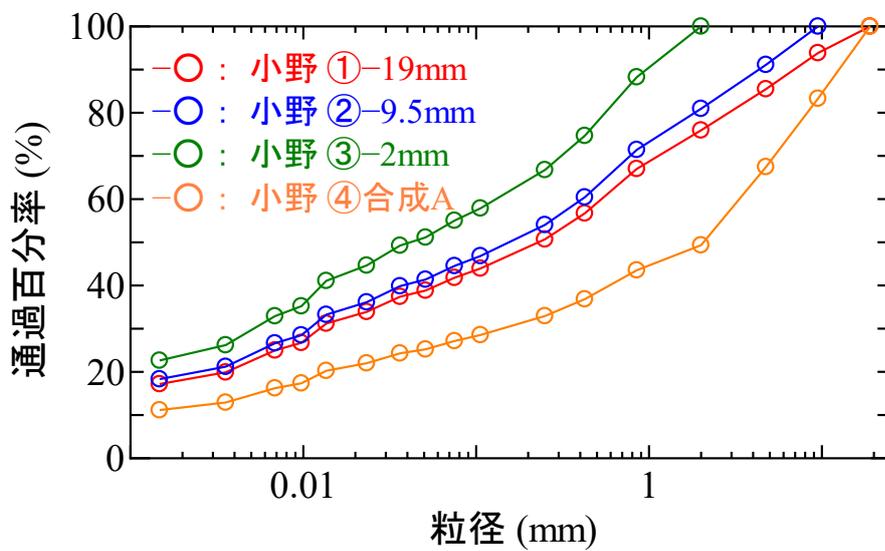


図-4.2.18 小野試料の粒径加積曲線

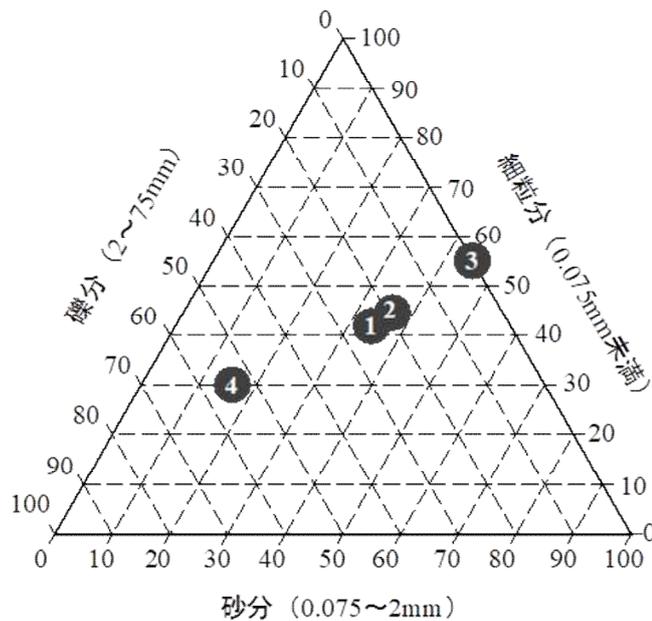


図-4.2.19 小野試料の三角座標上での粒度分布

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

本研究では、この4現場・合計11試料を用いて締め固め試験を行い、小野を除く3現場の-19mm試料で三軸圧縮試験を行っている。

4.2.4 比較検討に用いた文献試料

本節では、既往の研究で用いた試料、新たに用いた試料で得られた結果や考察の汎用性を検証するため引用した、過去の研究や論文の試料について述べる。

はじめに、著者らの研究室で蓄積された研究⁴⁰⁾から引用した9現場の試料について以下に示す(表-4.2.4)。この9現場の試料は、それぞれ採取場所が異なっており、-19mmと-2mmにふるい分けされた試料を用いて物性試験が行われている。

表-4.2.4 研究室に蓄積された研究から引用した試料の物性値

試料名	礫分 -19mm(%)	砂分 -19mm(%)	細粒分 -19mm(%)	礫分 -2mm(%)	砂分 -2mm(%)	細粒分 -2mm(%)	実験値 ρ_{dmax} -19mm(g/cm ³)	実験値 ρ_{dmax} -2mm(g/cm ³)
多可町A-2	39.0	51.3	9.7	0	84.1	15.9	2.050	1.860
豊楽公園	19.5	64.8	15.7	0	80.5	19.5	1.936	1.870
剣谷第六公園	22.8	57.2	20.2	0	74	26	1.954	1.881
新池北公園	25.1	62.1	12.8	0	82.9	17.1	1.935	1.863
仮置土A-下	35.2	30.8	34	0	47.5	52.5	1.800	1.773
仮置土C	50.3	24	25.7	0	48.3	51.7	1.957	1.855
No.62盛土材	50	28.1	21.9	0	56.2	43.8	2.118	2.037
額田	34.8	49.8	15.4	0	76.4	23.6	1.937	1.783
佐保	29.1	33.4	37.5	0	47.1	52.9	1.780	1.715

$\rho_s(g/cm^3)$	距離 (-19mm)	距離 (-2mm)	傾き	切片
2.627	43.1	40.1	0.063	-0.680
2.646	34.9	36.5	-0.041	3.382
2.639	31.5	30	0.047	0.463
2.622	37.6	38.9	-0.054	3.978
2.695	30.8	3.5	0.001	1.770
2.69	43.9	4.3	0.003	1.844
2.734	44.2	12.2	0.003	2.006
2.688	38.0	32.4	0.027	0.897
2.699	25.5	3.1	0.003	1.706

次に、論文集等の文献⁴⁵⁾⁻⁴⁹⁾から引用した7現場の試料について以下に示す(表-4.2.5)。これらはそれぞれ異なる盛土造成現場から採取されたものであり、物性試験が行われている。

表-4.2.5 論文集等から引用した試料の物性値

試料名	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	中心点から の距離	傾き	切片
御殿場①	44.8	39.9	15.2	1.001	43.0	0.00066	0.71800
御殿場②	53.6	37.4	9.0	1.051	50.6		
小山①	66.7	24.5	8.8	1.086	59.4	-0.00110	1.15000
小山②	44.6	38.4	17.0	1.105	42.1		
材料A	36.0	43.0	21.0	2.023	35.5	-0.02662	2.91800
材料B	20.0	65.0	15.0	1.845	35.5		
材料C	22.0	66.0	12.0	1.773	38.1		
材料D	36.0	46.0	18.0	2.006	37.0		
材料E	29.0	57.0	14.0	2.063	37.2		
甲山試料(相似粒度)	40.0	53.0	7.0	1.930	45.2	0.00492	1.70770
甲山試料(-19mm)	54.0	38.0	8.0	1.960	51.3		
千種川試料(相似粒度)	53.0	46.0	1.0	1.915	54.0	-0.00031	1.93188
千種川試料(-19mm)	74.0	26.0	0.0	1.911	66.8		
BC19(-19mm)	18.0	61.0	21.0	1.856	30.3	0.17000	-3.29500
BC2(-2mm)	0.0	74.0	26.0	1.805	30.0		
瀬戸層群土岐砂礫層63.5max	54.9	24.1	21.0	2.020	48.1	0.00581	1.72000
瀬戸層群土岐砂礫層(-19mm)	42.0	31.0	27.0	1.930	37.2		
瀬戸層群土岐砂礫層(-2mm)	0.0	52.0	48.0	1.780	8.0		

以上に述べた、計 16 現場・36 試料を用いて結果を整理し、既往の研究での試料、新たに用いた試料と比較検討することで締め固め特性の推定方法の考察を行う。

4.3 試験結果および考察

4.3.1 礫の吸水率・自然含水比試験

前述している 5 種類の土岐試料に対して、新たに礫の粒径ごと (2~19mm) に自然含水比を調べた。手順としては、礫と細粒分の重量を先に測定し、乾燥させた後で礫のみの重量を測定することで、礫の粒径ごとの自然含水比を算出している。以下にその試験概要を示す。

a) 試験概要

- ・ 礫と細粒分の重量の計測
 - ①試験試料の全体重量の計測
 - ②水洗いせずにふるい分け、湿潤重量を計測
 - ③110°C±5°Cの乾燥炉で 24 時間乾燥させ、重量を計測
- ・ 礫のみの重量の計測
 - ④水洗いによる細粒分の除去

⑤110℃±5℃の乾燥炉で24時間乾燥させ、重量を計測

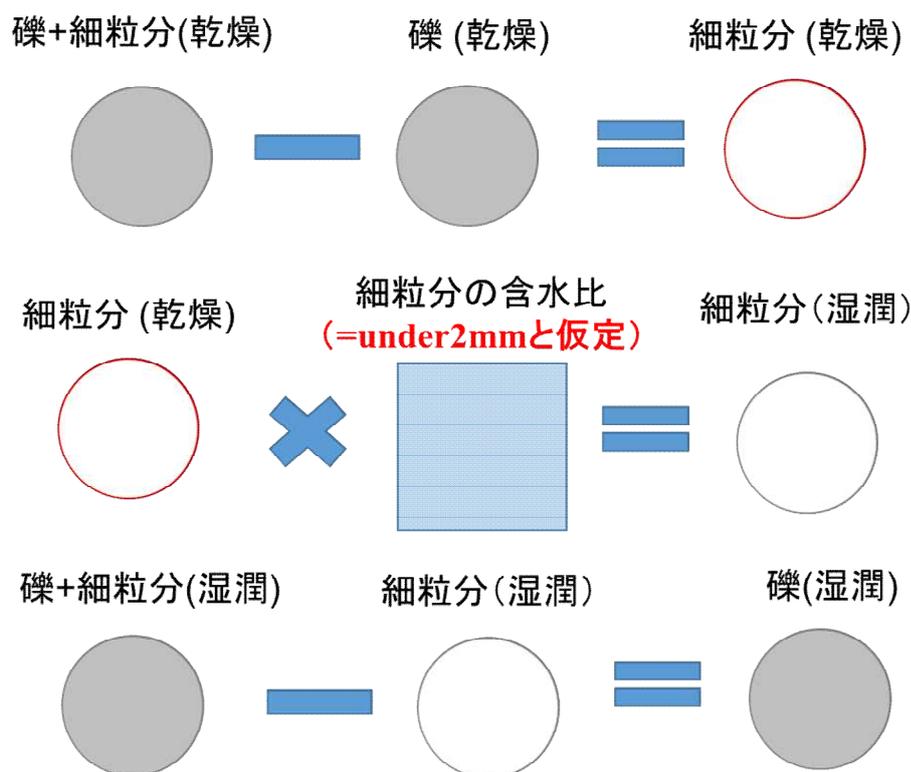


図-4.3.1 礫の粒径ごとの自然含水比の求め方の概念図

以上の試験手順で重量を測定した後、以下の式により礫の粒径ごとの自然含水比を求める。

$$\text{礫の粒径ごとの自然含水比} = \frac{(\text{湿潤重量} - \text{乾燥重量})}{(\text{乾燥重量} - \text{ふるいの重量})}$$

礫の吸水率はコンクリート粗骨材に対して行われる「JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験方法」を適用して測定した。礫の吸水率においても、自然含水比と同様に礫の粒径ごと（2~19mm）に測定している。

b) 試験結果および考察

以下に、土岐試料に対して行った礫の自然含水比試験の結果を示す（図-4.3.2）。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

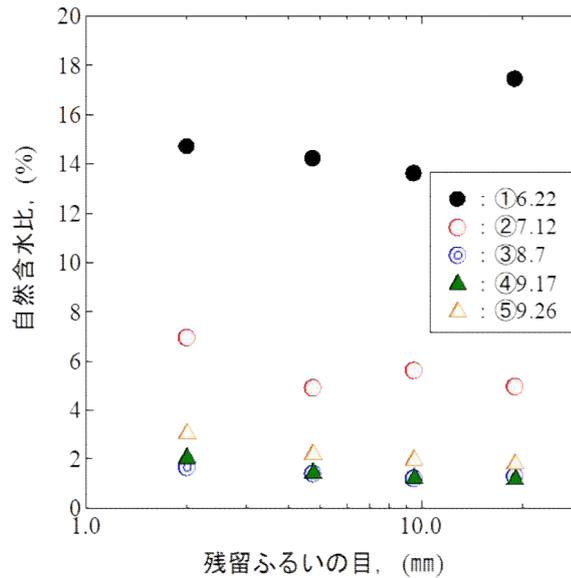


図-4.3.2 粒径の大きさごとの自然含水比

今回用いた5つの試料は同一現場内であり、鉱物由来はあまり変わらないことから礫の粒径ごとの自然含水比はあまり変わらないと推測していた。しかし、図-4.3.2を見ると、試料によって自然含水比の差が生じていることが分かる。さらに、礫分が多い③、④、⑤の3つは比較的自然含水比が小さく、細粒分が多い①、②は自然含水比が比較的大きくなっている。これは、細粒分を多く含んでいる試料（①、②）では風化がより進んでいることや礫分の亀裂等により、自然含水比が上がっていると考えられる。このように試料によって含水比に差が生じていることから、粒度の違いが自然含水比の差に影響していると考えられる。

本研究で求めた礫の粒径ごとの吸水率試験の結果を示す（図-4.3.3）。吸水率においても、自然含水比と同様に試料によって差が生じていることが分かる。さらに、礫分が比較的多い③、④、⑤が似たような値になり、細粒分が多い①、②が近い値となった。このことから、礫の吸水率においても粒度の差が吸水率に影響していることが分かる。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

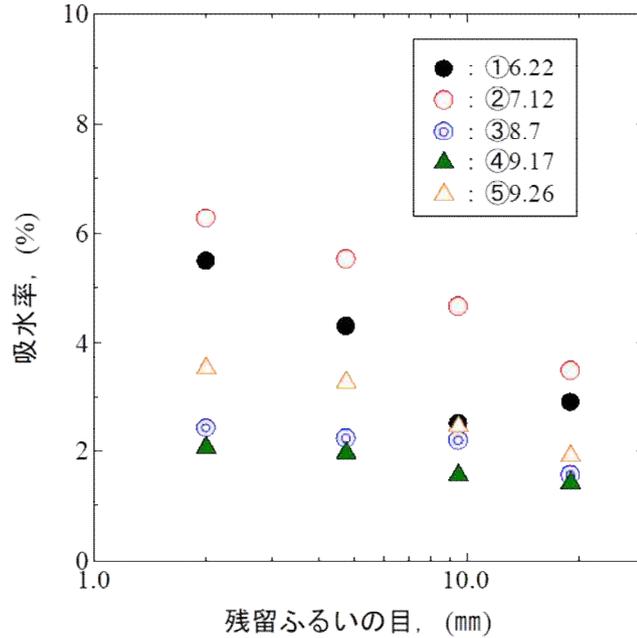


図-4.3.3 粒径の大きさごとの吸水率

次に、礫の粒径ごとの自然含水比と吸水率を並べた図を以下に示す (図-4.3.4)。

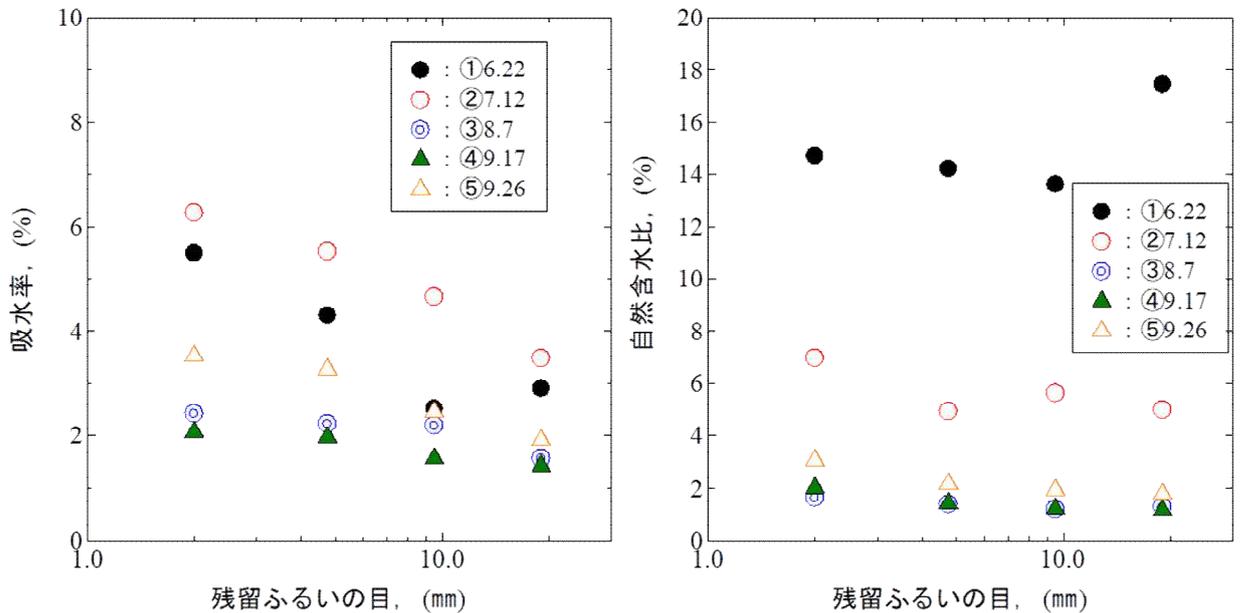


図-4.3.4 粒径の大きさごとの吸水率と自然含水比

図-4.3.4を見ると、5つの試料は同一現場内で採取された鉱物由来が同じだと考えられる試料でも違いが生じ、礫分が比較的が多い③、④、⑤は自然含水比と吸水率は小さくなっており、細粒分が比較的多い①、②は大きくなっている。これは、細粒分を多く

含んでいる③, ④, ⑤では風化がより進んでいることや礫分の亀裂等から吸水率が大きくなり, 結果的に自然含水比も上がっていることが考えられる. また, これらにより, 単純に礫の自然含水比から粒度を推定することは困難で, 風化の程度などを考慮しなければならないと考えられる.

以上より, 同一現場内の試料であっても, 風化具合や礫分の亀裂などが原因で粒度の推定は困難であるということが分かった. そこで, 試料全体の自然含水比に着目して, ρ_{dmax} との関係について述べる. 以下に, 5つの試料の全体の自然含水比と ρ_{dmax} についてのグラフを示す (図-4.3.5).

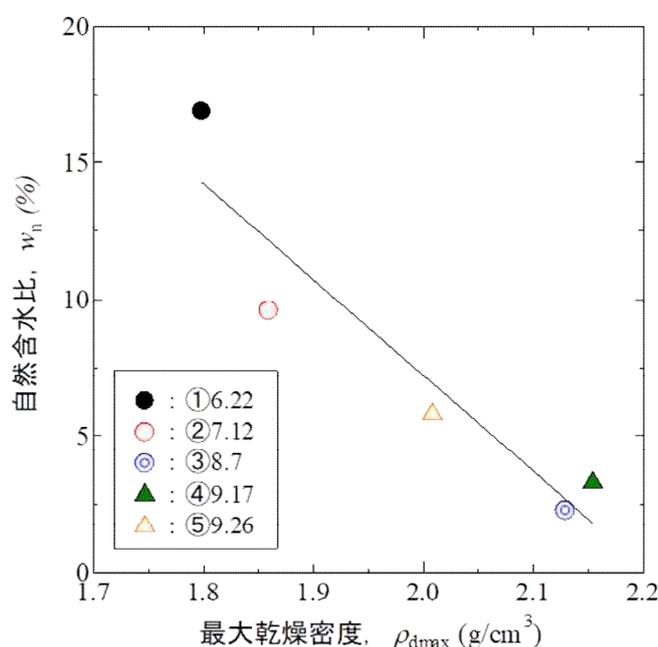


図-4.3.5 試料全体の自然含水比と最大乾燥密度

図-4.3.5より, 5つの試料は風化の進行具合から礫分の特性 (自然含水比や吸水率) は異なっているが, 試料全体の自然含水比で見ると, 最大乾燥密度とほぼ直線的な関係があることが分かる. このことから, 粒度および ρ_{dmax} を推定する場合, 礫分の特性 (自然含水比や吸水率) を用いるのではなく, 試料全体の自然含水比を用いることである程度の推定ができる可能性が示唆された.

4.3.2 締め固め試験

図-4.3.6は, 6種類の彩都試料の締め固め試験から得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} の値を, 礫分・砂分・細粒分を三軸とした粒度の三角座標系上にプロットしてコンター (等値線) を描いたものである. 図-4.3.6から, プロット点数が6点と少ないために滑らかな曲線

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

ではないものの、 ρ_{dmax} は三角座標系上で全体の傾向をある程度把握できるようなコンター図を描くことが可能である。コンターの傾向としては細粒分含有率が 10%以下となる範囲では大きく異なっているが、それ以外の範囲では大まかに ρ_{dmax} が最小となる点を中心としている。

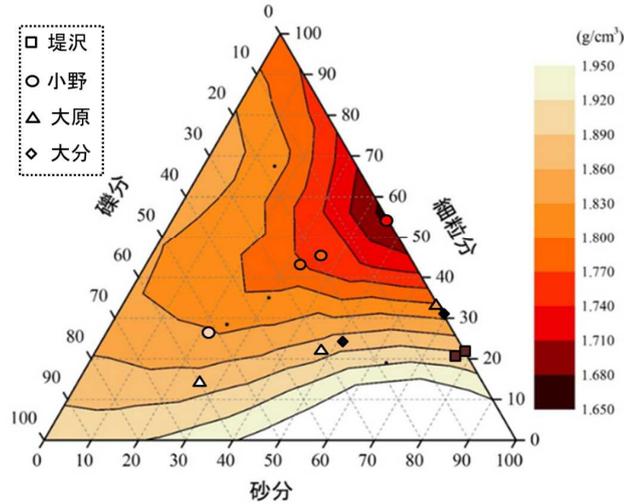


図-4.3.6 彩都試料のコンター図に 4 現場の試料の ρ_{dmax} をプロットした図

次に、この彩都試料の締め固め特性が他の研究の締め固め特性に合致するかどうかを調べるため、図-4.3.6 である。には他試料の ρ_{dmax} の値についてプロットしている。

図中、□が堤沢試料、○が小野試料、△が大原試料、◇が大分試料の粒度と ρ_{dmax} を表しており、各図形の色は、各試料の ρ_{dmax} の値を、図中の右側にある凡例の色に当てはめたものである。この図より、 ρ_{dmax} の中心点（礫分：砂分：細粒分=0：44：56）からの距離が小さい粒度においては比較的コンター図の ρ_{dmax} の値との差が小さいが、中心点からの距離が大きくなると、コンター図の ρ_{dmax} の値との差が大きくなることが分かる。以上より、コンター図を利用して粒度から ρ_{dmax} を推定することは現段階では難しいことが分かった。しかしながら、中心点から離れば離れるほど、 ρ_{dmax} が大きくなっていくという傾向は彩都試料と同様にみられる。そこで、「コンター図の中心点は試料によらず同じである」という仮定をし、コンター図の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係性について整理した。中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係について、中心点からの距離の求め方について説明する。

まず、三角座標上の距離の概念図を以下に示す。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

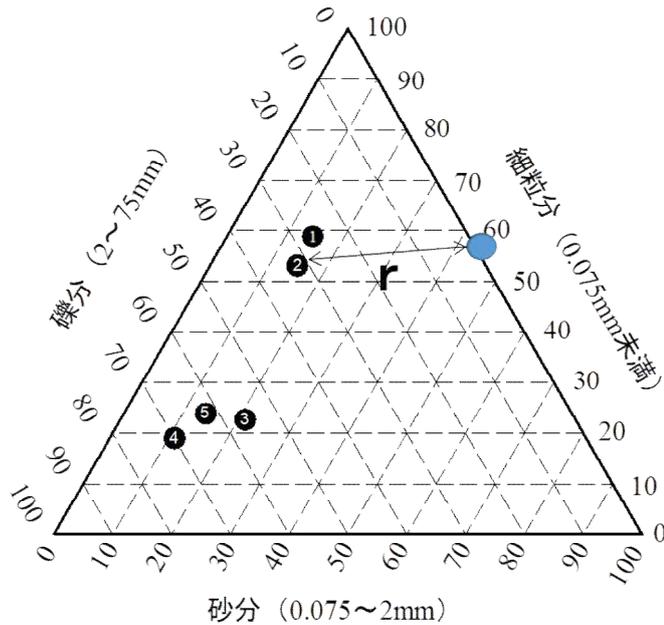


図-4.3.7 三角座標上の距離の概念図

図-4.3.7 に示した r を三角座標上の直線距離と定義する (以下, 距離). しかし, 三角座標で距離を算出するのは複雑であるため, 三角座標を二軸の座標に置き換える. 具体的な手順は以下の通りである. (図-4.3.8)

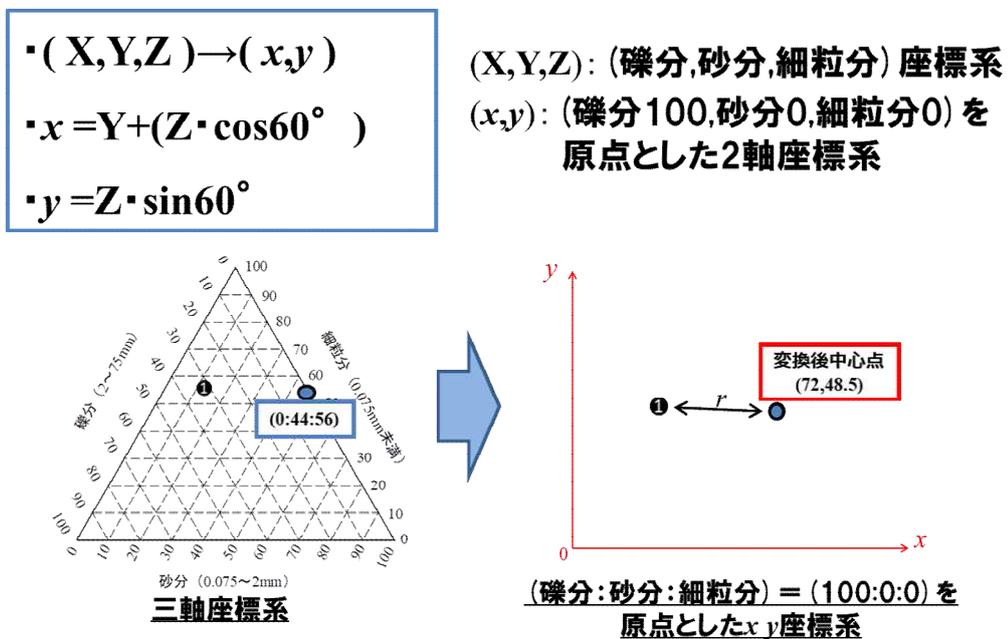


図-4.3.8 三角座標から二軸座標系への変換式

① 三角座標上の (礫分 : 砂分 : 細粒分) = (100 : 0 : 0) を, 二軸座標系の原点とする.

② 三角座標上の点を，三角関数を用いて二軸座標系へ変換する．変換後の中心点と変換後の粒度の座標の距離を三平方の定理を用いて算出する．

この変換式を用いて，4現場の試料の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係を図-4.3.8に示す．

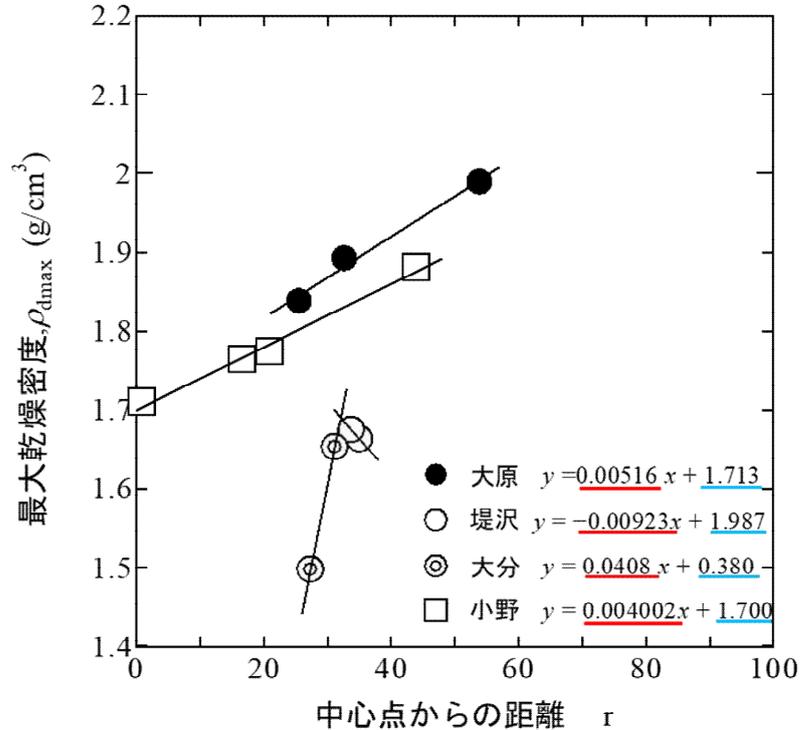


図-4.3.9 各現場の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係

図より，どの現場においても，中心点からの距離と ρ_{dmax} には直線的な相関関係があることが分かった．ここで，近似直線の傾きはコンター図の ρ_{dmax} の変化の割合を，切片は中心点での ρ_{dmax} の値となっており，傾き，切片は現場ごとに固有の値となっている．また，この関係式を定式化すると，「 $\rho_{dmax} = \text{傾き} \cdot \text{中心点からの距離} + \text{切片}$ 」と置くことができる．このことから，同一現場内であれば，粒度，中心点からの距離を求めることで ρ_{dmax} の推定ができる可能性が示唆された．

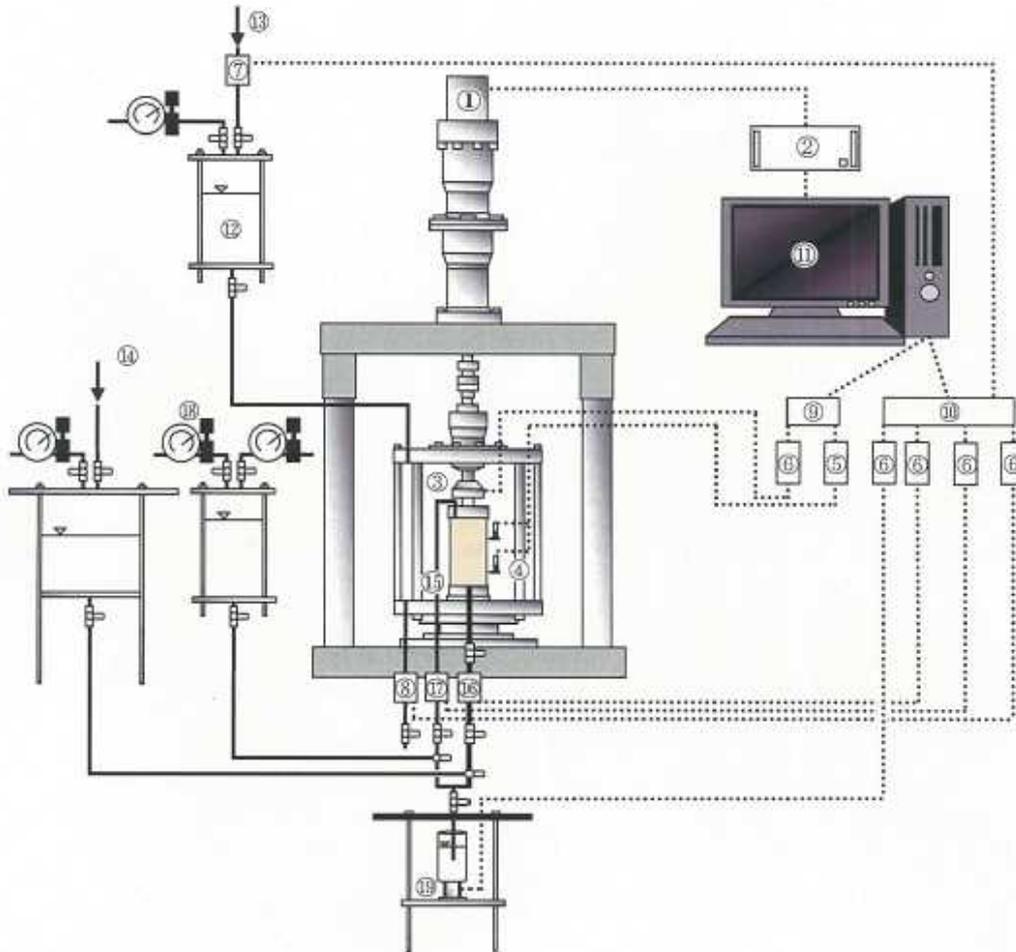
4.3. 三軸圧縮試験

a) 試験機概要

本研究では，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．これは堤沢，大原，大分の3種類の試料に対して行い，試験条件としては圧密排水条件（CD）とし，粘着力 c_d ，内部摩擦角 ϕ_d を求めた．また，供試体作製時は，締

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

固め度 $D_c=100\%$ 、乾燥密度 ρ_d =締め固め試験で求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、含水比=締め固め試験で求めた最適含水比 w_{opt} となるように含水比調整を行い供試体を作製した。有効拘束圧は 50kpa,100kpa,200kpa とし、せん断速度は 0.05mm/min とし試験を行った。図-4. 3. 10 に中型三軸圧縮試験機の概要を示す。



- | | |
|----------------|----------------|
| ①ダイレクトドライブモニター | ⑪パーソナルコンピューター |
| ②ドライブユニット | ⑫セル圧供給小型セル |
| ③ロードセル | ⑬セル圧および背圧供給用元圧 |
| ④非接触式変位計 | ⑭背圧調節用超精密減圧弁 |
| ⑤専用アンプ | ⑮ペDESTAL |
| ⑥ストレイアンプ | ⑯間隙水圧測定用圧力変換機 |
| ⑦セル圧制御用電空変換機 | ⑰背圧測定用圧力変換機 |
| ⑧セル圧測定用圧力変換機 | ⑱間隙水圧調整用超精密減圧弁 |
| ⑨DA/AD 変換ボード | ⑲体積変化計測用ロードセル |
| ⑩AD 変換ボード | |

図-4. 3. 10 三軸圧縮試験機の概要

b) 試験結果および考察

図-4.3.11, 図-4.3.12, 図-4.3.13 に堤沢, 大原, 大分の3つの試料に対して行った三軸圧縮試験の結果を示す. また, 表-4.3.1には3つの試料の粒度と強度特性の関係について示す. 軸ひずみ-偏差応力関係において, 黒が50kPa, 赤が100kPa, 緑が200kPaでせん断した時のグラフである.

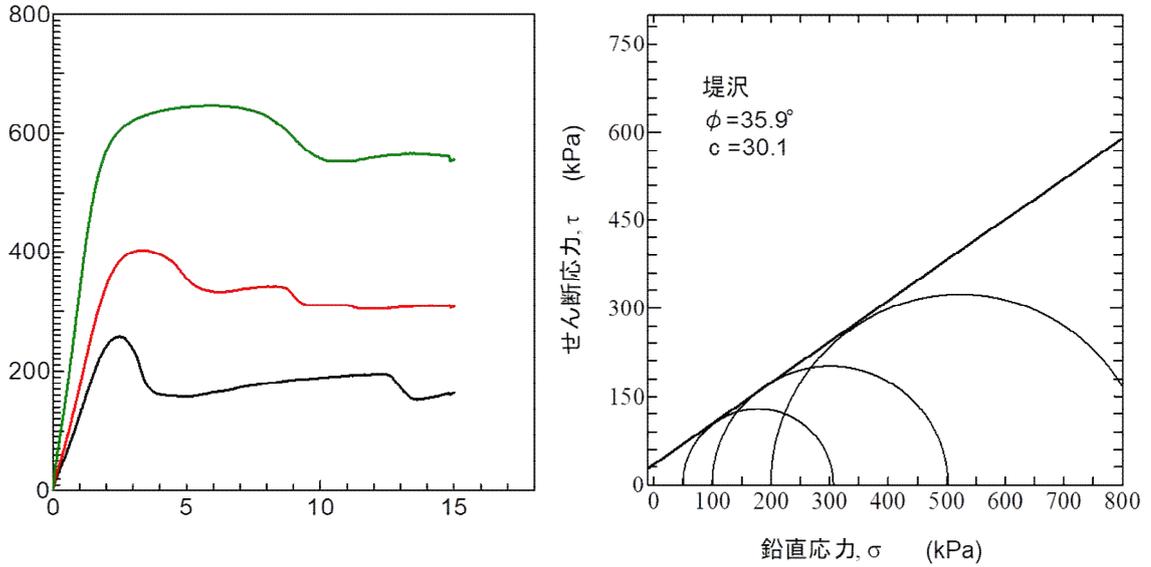


図-4.3.11 堤沢の軸ひずみ-偏差応力関係およびモールの有効応力円

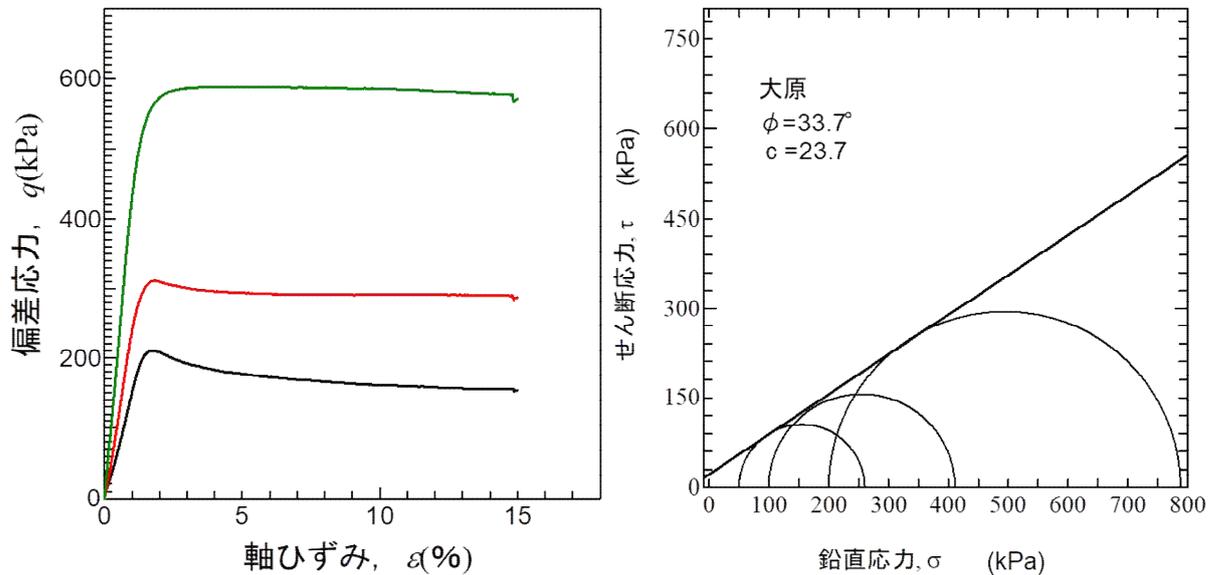


図-4.3.12 大原の軸ひずみ-偏差応力関係およびモールの有効応力円

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

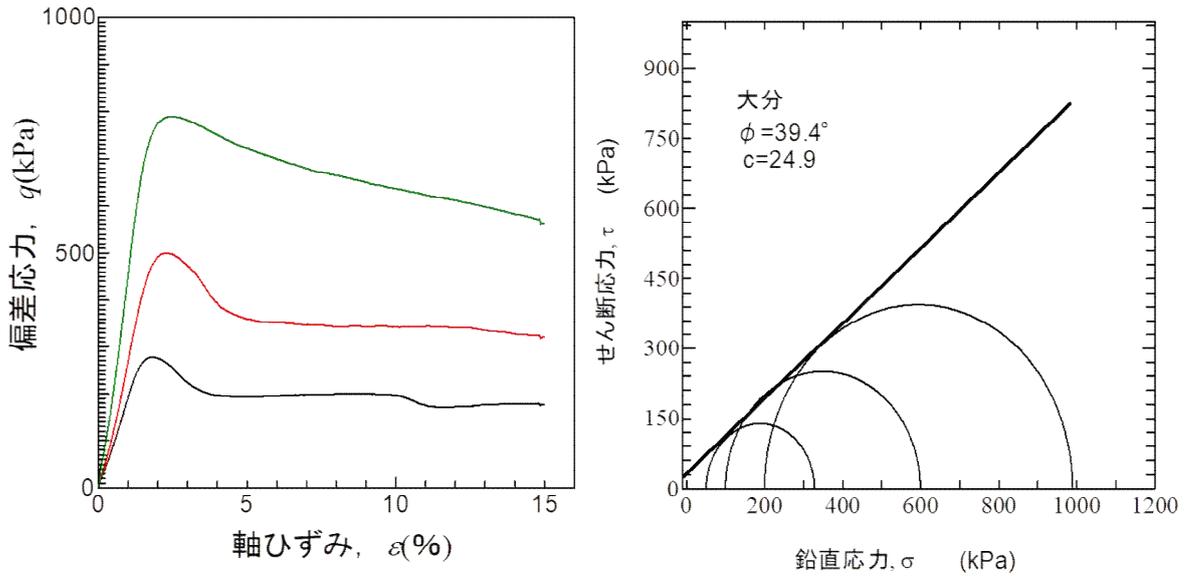


図-4.3.13 大分の軸ひずみ-偏差応力関係およびモールの有効応力円

表-4.3.1 堤沢，大原，大分試料の強度特性

試料	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)	C_d	ϕ_d
堤沢	1.5	78.3	20.2	30.1	35.9
大原	30.2	48.5	21.3	23.7	33.7
大分	25.3	61.5	13.2	24.9	39.4

粒度と強度定数の関係性について述べる。様々な現場の試料として、彩都試料，土岐試料，堤沢，大原，大分試料を用いて検討している。図-4.3.14に礫分含有率および細粒分含有率と c_d の関係を，図-4.3.15に礫分含有率および細粒分含有率と ϕ_d の関係を示す。それぞれ左図は土岐試料のみの関係，右図は5現場の試料を合わせて整理した関係を示している。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

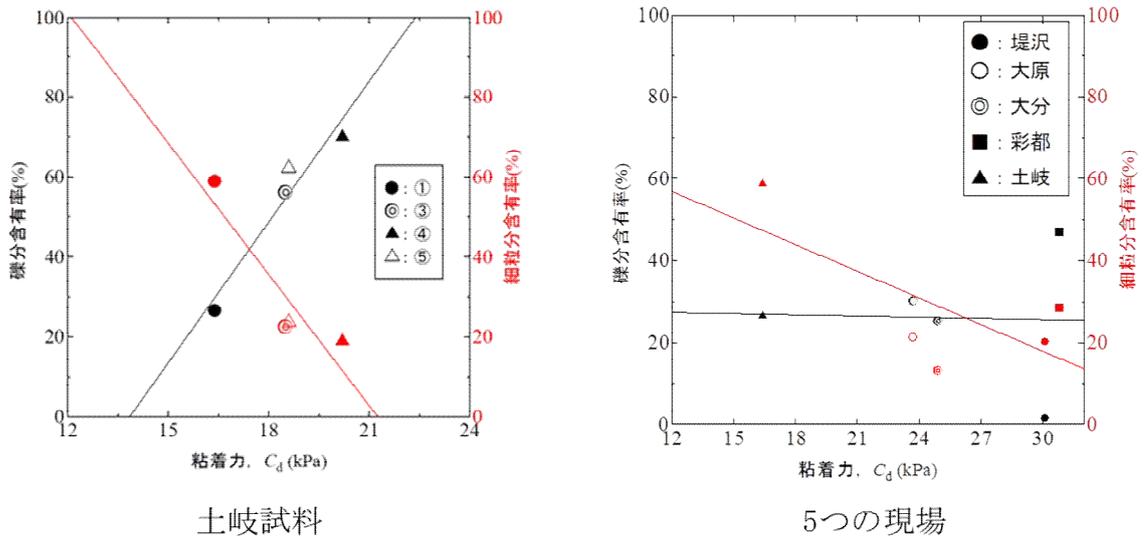


図-4.3.14 礫分含有率および細粒分含有率と c_d の関係

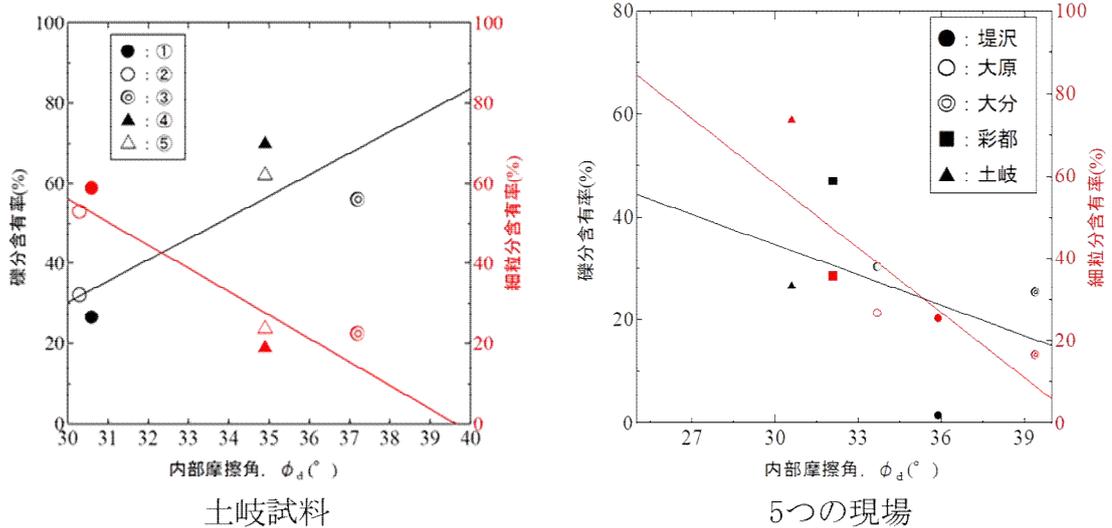


図-4.3.15 礫分含有率および細粒分含有率と ϕ_d の関係

図-4.3.14, 4.3.15 より, c_d , ϕ_d とともに左の 1 つの現場内の試料のみでまとめた土岐試料のグラフでは, 礫分含有率が大きくなると増加し, 小さくなると減少している. また, 細粒分含有率で見ても, 細粒分含有率が大きくなると減少し, 小さくなると増加している. しかし, 右の 5 つの様々な現場の試料を用いた図では, 相関関係を得ることはできなかった. このことから, 礫分含有率および細粒分含有率から強度定数を推定する方法では, 1 つの現場内のみが範囲であることが分かる. 1 つの現場内であれば, 礫分含有率もしくは細粒分含有率と強度定数の相関関係の直線を求めることで他の粒度試料の強度定数を推定できる可能性がある.

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

次に、図-4.3.16、図-4.3.17に粒度との関係性を見るために三角座標上に5つの試料（彩都，土岐，堤沢，大原，大分）の c_d 、 ϕ_d をプロットしたコンター図を示す。

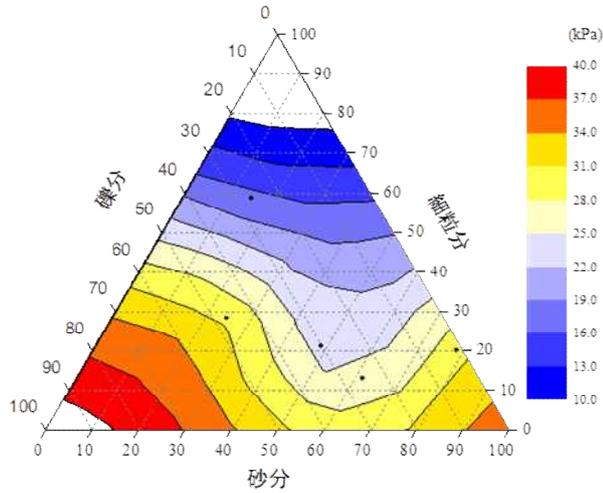


図-4.3.16 5つの試料をプロットした c_d のコンター図

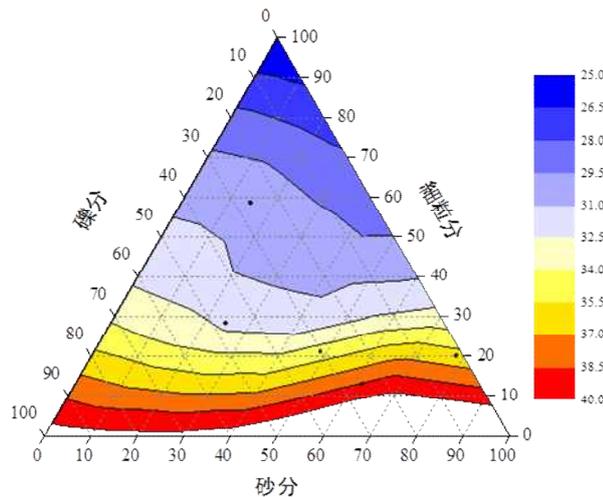


図-4.3.17 5つの試料をプロットした ϕ_d のコンター図

5つの異なる現場の試料を用いても、粒度との関係性を示す c_d 、 ϕ_d のコンター図を描くことができた。図-4.3.16の c_d のコンター図から、細粒分が30%以上の部分では、細粒分の軸に沿って色が変わっていることから、細粒分の増減に依存していることが分かる。言い換えると、細粒分が30%を超えると c_d の傾向が変化している。この傾向は、兵藤²⁹⁾らが報告している「非排水せん断強度は細粒分含有率30%付近で傾向が変化する」という報告と同じ傾向をとっているため、細粒分含有率が30%を超えるか超えないかでコンター図の傾向が変化したと考えられる。

次に、図-4.3.17の ϕ_d のコンター図から、こちらも細粒分が30%を超えるか超えない

かでコンター図の傾向が変化していることが分かる。特に、細粒分が30%以下の部分では、細粒分の軸に沿って色が変化しているため、細粒分に依存していることが分かる。 ϕ_d に関しても、「非排水せん断強度は細粒分含有率30%付近で傾向が変化する」という報告と同じ傾向のため変化したと考えられる。

一方で、 c_u 、 ϕ_d ともに本研究では5種類の試料のみでコンター図を作っており、汎用的に扱うには試料数が少ないと考えられる。特に ϕ_d に関しては軽部らの研究⁴⁹⁾によると粗粒分の粒子形状が大きな影響を与えており、粒子形状の違いはダイレイタンシー量として表されるとしている。さらに野並ら⁵⁰⁾は粒子形状を粒子の丸さFU値として表現し、FU値が圧縮強度に影響を与えるとしている。このため、同一現場で採取された試料では粒度分布に変化があっても粗粒土の形状は大きな違いはなく、強度定数で一定の傾向をみせるが、他現場で採取した試料では傾向が異なると考えられる。今後の展望としては、粒度情報のみからの強度定数の推定は難しく、粒子形状やその他の指標を加味した指標を検討するため、実験データの追加が必要である。

4.4 第4章のまとめ

・粒度と礫の吸水率・自然含水比の関係

- (1) 礫の粒径ごとの自然含水比を調べたところ、同一現場内であり鉱物由来はあまり変わらないことから、礫の粒径ごとの自然含水比は変わらないと推測していたが、試料によって差が生じた。細粒分を多く含んでいる試料の自然含水比が大きかったことから、礫分の風化や亀裂などが大きな要因となり、粒度の違いが自然含水比の差に起因したと考えられる。
- (2) 礫の吸水率においても、自然含水比と同様に試料によって差が生じた。また、礫分が比較的多い③8.7、④9.17、⑤9.26の3つと、細粒分が比較的多い①6.22、②7.12が近い値を示したため、礫の吸水率においても粒度の差が起因していることが分かった。
- (3) (1)および(2)から、単純に礫の含水比や吸水率から粒度を推定することは困難であり、風化具合などを考慮しなければいけないと考えられる。

4. 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響

(4) 試料全体の含水比と ρ_{dmax} では、(1)および(2)から分かるように礫分の特性は異なっているにも関わらず、相関関係を見ることができた。よって、試料全体の含水比を用いれば、一次的なフルイとして ρ_{dmax} を推定できる可能性が示唆された。

・粒度と締め固め特性の関係

(5) その他の盛土材料試料で得られた締め固め試験結果を、既往の研究にならい「中心点からの距離 r 」と ρ_{dmax} で整理すると、すべての試料において固有の傾きと切片を持つ式「 $\rho_{dmax} = \text{傾き} \cdot \text{中心点からの距離} + \text{切片}$ 」を得ることが出来、相関関係があることがわかった。このことから、少なくとも同一現場内であれば、粒度から中心点からの距離を求めることで、 ρ_{dmax} の推定が可能になる。

・粒度と強度特性の関係

(6) 様々な現場の試料の結果を用いた粒度と強度特性のコンター図では、 c_d , ϕ_d ともに細粒分が30%を超えるか超えないかで傾向が変わっており、既往の研究と同じ傾向を見ることができた。

5. 粒度に着目した締固め特性の推定方法

5.1 はじめに

本章では、第3章および第4章で得られた知見より、粒度に着目した締固め特性の推定方法について検討する。

5.2 礫分を含まない土の締固め特性の推定方法

5.2.1 塑性図を用いた推定方法

3章で得られた結果より、締固め特性の推定方法について考察する。図5.2.1は、 ρ_{dmax} ~ I_p 関係および w_{opt} ~ I_p 関係である。この図より、これらの関係にはそれぞれかなり強い相関性があり、 I_p がおよそ 10~50 の範囲において、破線で囲んだデータを除けば、つぎの一次近似式が得られる。

$$\rho_{dmax} = 2.04 - 0.012 \times I_p \quad (\text{g/cm}^3) \quad \text{式-5.2.1}$$

$$w_{opt} = 5.97 + 0.4 \times I_p \quad (\%) \quad \text{式-5.2.2}$$

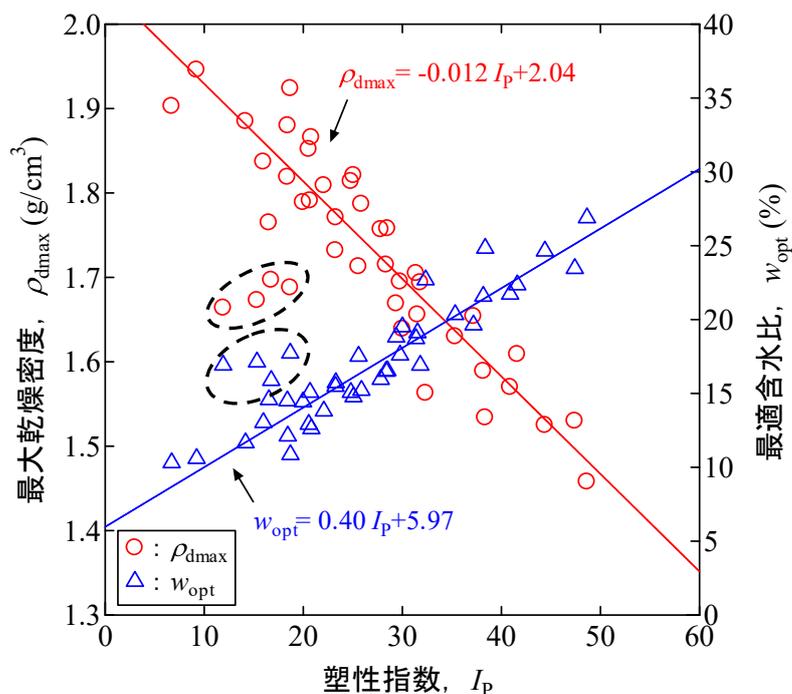


図 5.2.1 I_p と ρ_{dmax} および

5. 粒度に着目した締固め特性の推定方法

ここで、フィッティングから除外したデータは、 I_p のコンターの傾向が異なる試料の中で、粘土分がおおよそ50%以下の試料群に相当する。何れにしても、母土の種類が同じ混合土を用いた本実験から、塑性を有する試料の最大乾燥密度と最適含水比は、共にコンシステンシー限界と密接に関連していることが分かった。

つぎに、本実験結果の他の各種地盤材料への適用性を検証した。表5.2.1は、検証に用いた起源が異なる13種類の試料の詳細である。ここで、試料1~4は文献⁵⁰⁾より引用し、試料5~13は、著者らの研究室で独自に得たデータである。また、平荘ダム表層試料と多可町C（試料番号7, 10）を除いては、それぞれの原試料をふるい分けし、最大粒径2mmと19mmの2通りの試料を準備している。

まず、塑性図上に本実験から得られた ρ_{dmax} のコンターを描いた（図5.2.2, 5.2.3）。この作業には、本実験から得られた細粒土試料（細粒分含有率 $F_c \geq 50\%$ ）のデータ（図中の●印）を用いた。コンターの作成には市販ソフトを活用し、 $I_p \sim w_L$ 直交座標上にプロットしたデータポイント（●印）に対して、三角分割法により、線形補間とスムージングを適用して描いた¹⁰⁾。図中に $0.1g/cm^3$ 刻みで色分けしたコンターより、おおよそA線に沿って I_p と w_L がともに大きくなるほど、つまり粘土らしい土であるほど、 ρ_{dmax} が小さくなることが分かる。

つぎに、図5.2.2, 5.2.3から表5.2.1の13種類の盛土材料それぞれの推定値 ρ_{dmax}^E を読み取った。図5.2.4, 5.2.5は、それぞれ最大粒径2mm（11試料）と19mmの試料群（9試料）の推定値 ρ_{dmax}^E と実測値 ρ_{dmax}^M との比較である。図5.2.2, 5.2.3では、この比較を塑性図上に凡例の種類で示している。図5.2.2, 5.2.3より、最大粒径2mm以下の起源が異なる11種類の砂質土試料に関する限り、1つの試料（試料番号11.まさ土）

表5.2.1 推定値の検証に用いた試料

試料番号. 試料名	1.A	2.B	3.C	4.D	5.高塚町K		6.平荘ダムC.S		7.平荘ダム表層		8.設楽原		9.多可町B2		10.多可町C		11.まさ土		12.佐保工事		13.豊楽公園	
最大粒径	-	-	-	-	19mm	2mm	19mm	2mm	19mm	19mm	2mm	19mm	2mm	2mm	19mm	2mm	19mm	2mm	19mm	2mm	19mm	2mm
工学的分類	(SFG)	(CH)	(ML)	(MH)	(SG-F)	(SF)	(SFG)	(CL)	(CL)	(SF-G)	(SF)	(GS-F)	(S-F)	(SF)	(GFS)	(CL)	(GFS)	(CL)	(SFG)	(SF)	(SFG)	(SF)
土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$	2.73	2.68	2.68	2.72	2.611		2.655		2.649	2.664		2.646		2.678	2.690		2.699		2.646			
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	1.78	1.55	1.50	1.38	1.97	1.85	1.93	1.86	1.74	1.66	1.61	2.07	1.89	1.87	1.96	1.86	1.78	1.72	1.94	1.87		
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	17	22	26	30	9.8	13.2	12.2	13.9	17.2	18.0	21.4	8.7	11.6	13.3	11.9	14.6	15.8	17.7	11.0	12.5		
礫分(2mm以上) (%)	35	100	100	100	42.9	-	20.8	-	6.3	8.8	-	54.5	-	-	50.3	-	38.1	-	19.5	-		
砂分(2~0.075mm) (%)	-	-	-	-	45.7	80.1	37.8	47.8	15.6	47.4	52.0	38.9	85.5	70.0	23.9	48.7	29.2	47.1	64.8	80.4		
細粒分(0.075mm以下) (%)	16	85	94	99	11.4	19.9	41.4	52.2	78.1	43.8	48.0	6.6	14.6	30.0	25.8	51.8	32.7	52.9	15.7	19.6		
0.425mm以下 (%)	23	99	94	99	27.9	48.8	63.2	79.8	88.1	79.4	87.1	15.0	33.0	54.2	35.0	70.3	45.5	73.5	34.9	43.4		
液性限界 $w_L(\%)$	47	60	43	81	23.7		31.2		39.5	39.4		21.1		25.5	33.2		33.0		26.1			
塑性指数 I_p	22	30	12	48	7.4		17.2		20.6	8.8		3.0		7.3	13.6		12.1		11.6			

を除く 10 種類の試料の ρ_{dmax} を $\pm 0.1 \text{g/cm}^3$ の精度で推定できていることが分かる。一方、レキ分が混在する最大粒径 19mm の試料に対しては、もともと最大粒径 2mm 以下の試料の突き固め試験から得られたコンター図を用いおり、塑性指数も細粒分が主となる指標のため、礫分を含む試料の ρ_{dmax} を実用に供する精度で推定することはできない（図 5.2.3, 図 5.2.5 参照）。

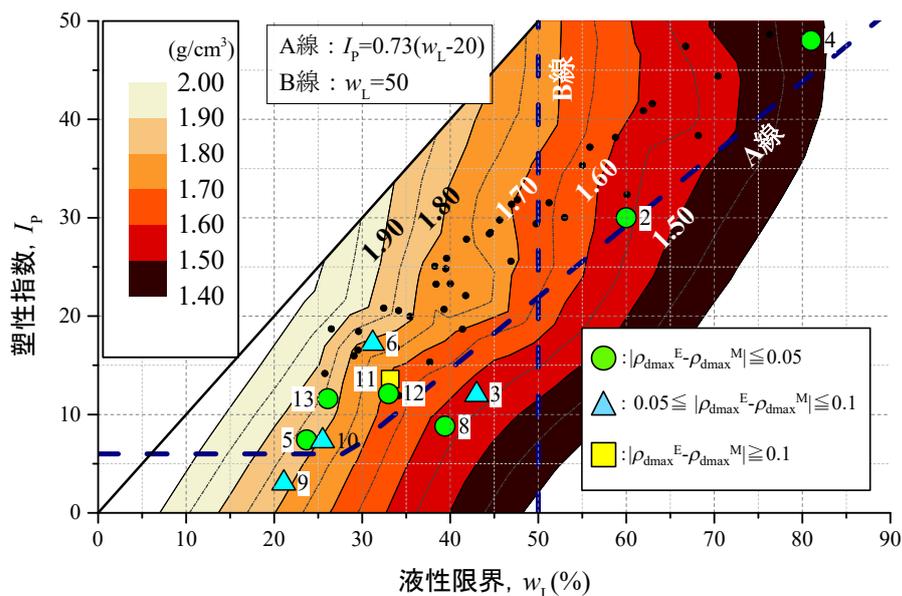


図 5.2.2 塑性図による ρ_{dmax} の推定：最大粒径 2mm 試料

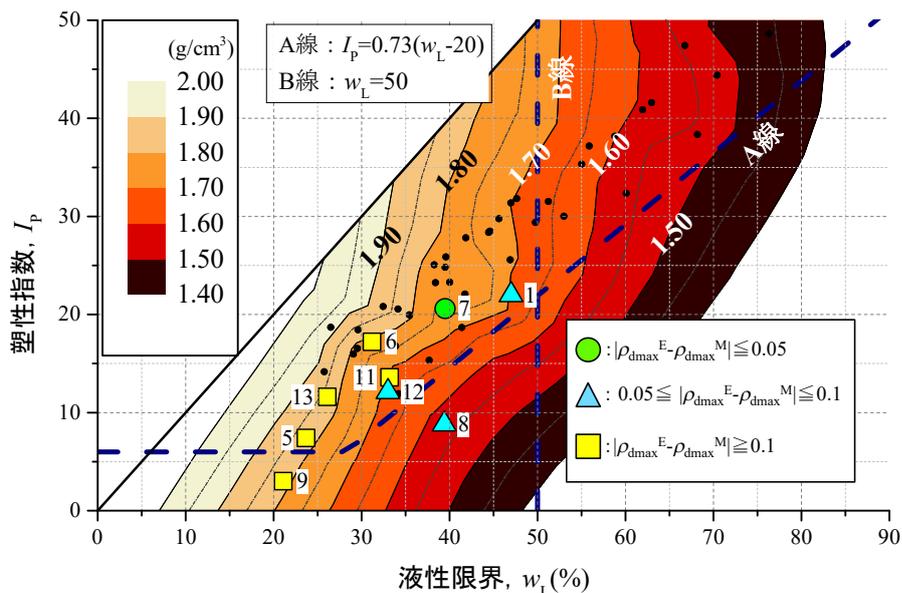


図 5.2.3 塑性図による ρ_{dmax} の推定：最大粒径 19mm 試料

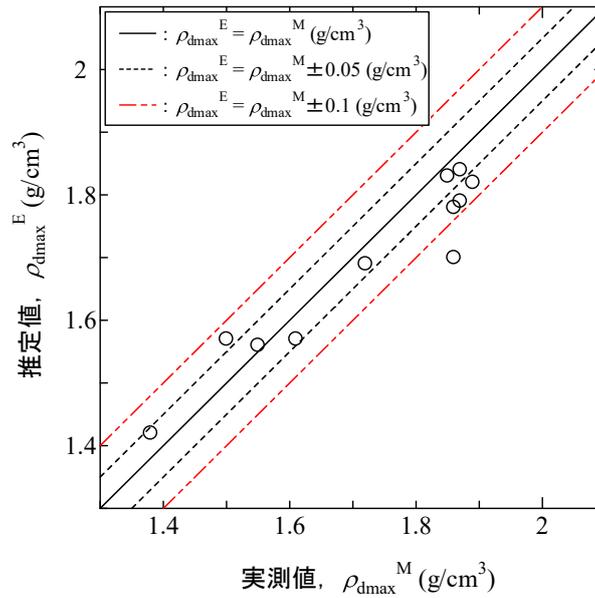
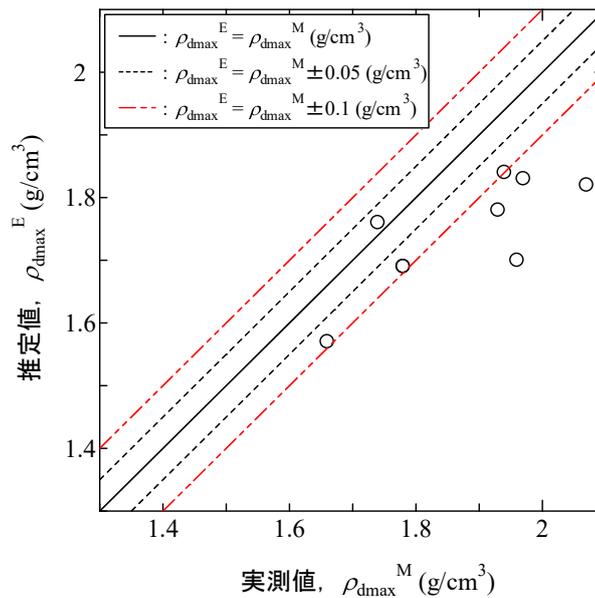
図 5.2.4 ρ_{dmax} の実測値と推定値の関係：最大粒図 5.2.5 ρ_{dmax} の実測値と推定値の関係：最

図 5.2.6, 5.2.7 は, 図 5.2.2, 5.2.3 と同様な手法を適用して求めた w_{opt} のコンターである. 図 5.2.8, 5.2.9 には, このコンター図から求めた推定値 w_{opt}^E と実測値 w_{opt}^M の比較を示している. 図 5.2.6, 5.2.8 から, 最大粒径 2mm 以下の砂質土試料では, 2つの試料を除く 9つの試料の w_{opt}^M を $\pm 1.5\%$ の精度で推定できていることが分かる. 一方, レキ分が混在する試料では, 実用に供する精度で w_{opt} を推定することはできない (図 5.2.7, 5.2.9 参照).

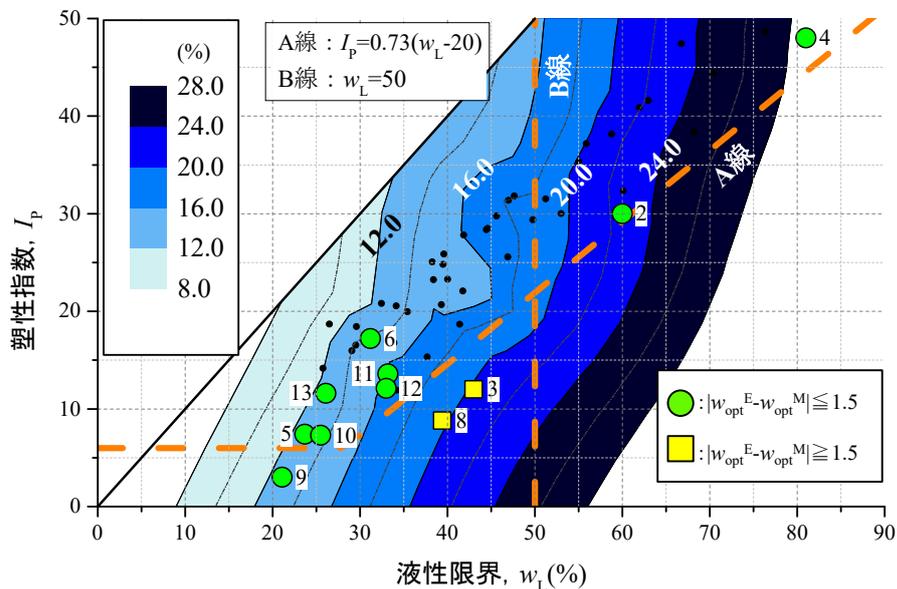


図 5.2.6 塑性図による w_{opt} の推定：最大粒径 2mm 試料

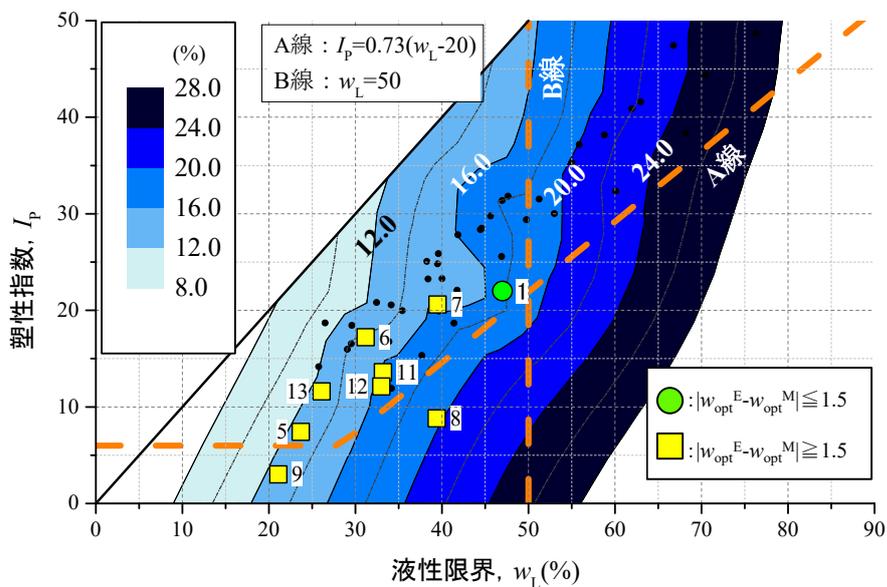


図 5.2.7 塑性図による w_{opt} の推定：最大粒径 19mm 試料

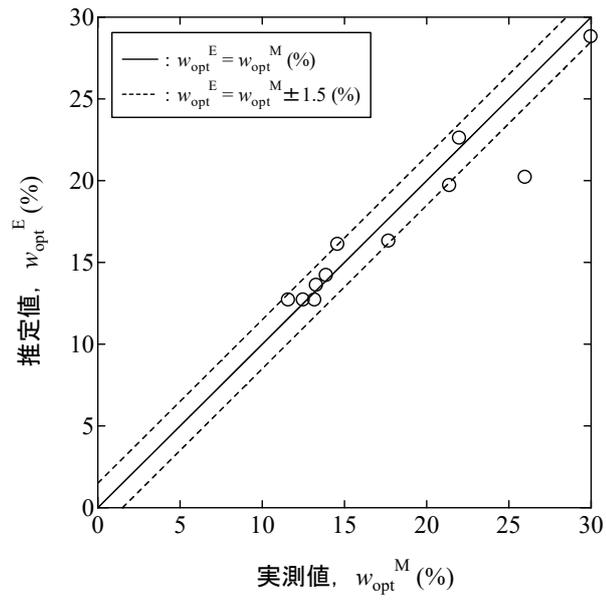


図 5.2.8 w_{opt} の実測値と推定値の関係：最大粒径 2mm 試料

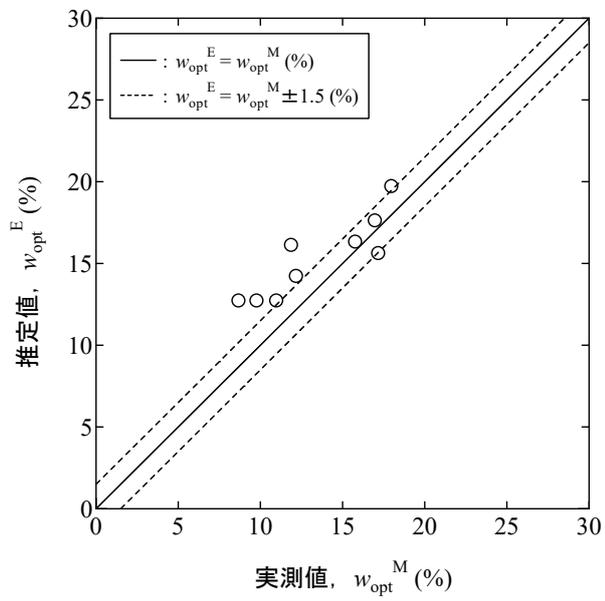


図 5.2.9 w_{opt} の実測値と推定値の関係：最大粒径 19mm 試料

5.3 礫分を含む土の締固め特性の推定方法

5.3.1 三角座標の図上距離を用いる推定方法

第4章では、鉱物組成等が同等と考えられる同一現場内で粒度と ρ_{dmax} の関係性を示した。そこで、コンター図の中心点からの距離を用いて、粒度から ρ_{dmax} の推定方法を検討する。著者の所属する研究室に蓄積された研究データや、論文から引用したデータの計16現場・36試料を用いて、様々な現場の試料でも同様な関係性を確認することができるかを調べ、汎用性を持つ粒度から ρ_{dmax} を推定方法の定式化を検討した。その定式化する方法として、本研究では中心点からの距離と ρ_{dmax} における相関関係から表す直線の傾きと切片に着目した。以下に、研究室の蓄積データである9つの試料の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係性を示す。方法としては、-19mmと-2mmの粒度試験と締固め試験の結果を用いて直線を算出している。-19mmと-2mmの粒度試験結果から、三角座標上の礫分：砂分：細粒分の位置を定める。そしてその点と中心点との距離を求め、中心点からの三角座標上の直線距離と ρ_{dmax} のグラフとして表している。

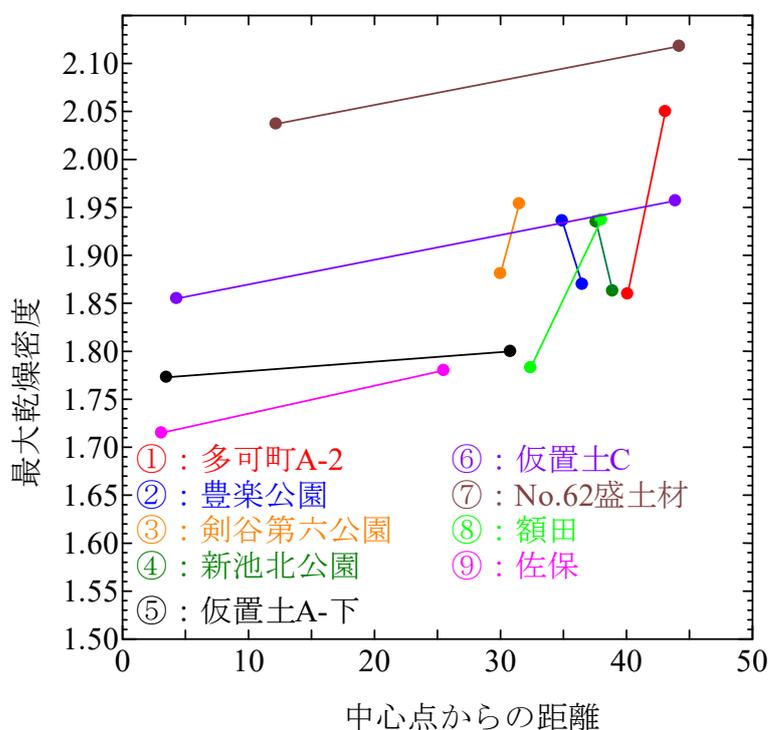


図-5.3.1 9つ試料の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係

図-5.3.1に示したものが既往の研究で結果が得られている9つの試料のコンター図の中心点からの距離(-19mmと-2mm)と ρ_{dmax} の関係を表したものである。この直線から、

前項同様に「 ρ_{dmax} =直線の傾き・中心点からの距離+切片」の式を求めることができ、粒度から ρ_{dmax} を推定できる。次に、この直線の傾きと切片を一般化するために、先ほど述べた16現場36試料に加え、既往の研究の彩都試料、土岐試料、そして本研究で用いた堤沢試料、大原試料、大分試料、小野試料を用いて傾きと切片の関係を整理した。その結果と16現場36試料の各物性値を以下に示す(図-5.3.2, 表-5.3.1, 表-5.3.2)。なお、御殿場試料、小山試料においては、スコリアと称される火山砕屑物であり、 ρ_{dmax} が極端に小さいためこの関係式には反映していない。

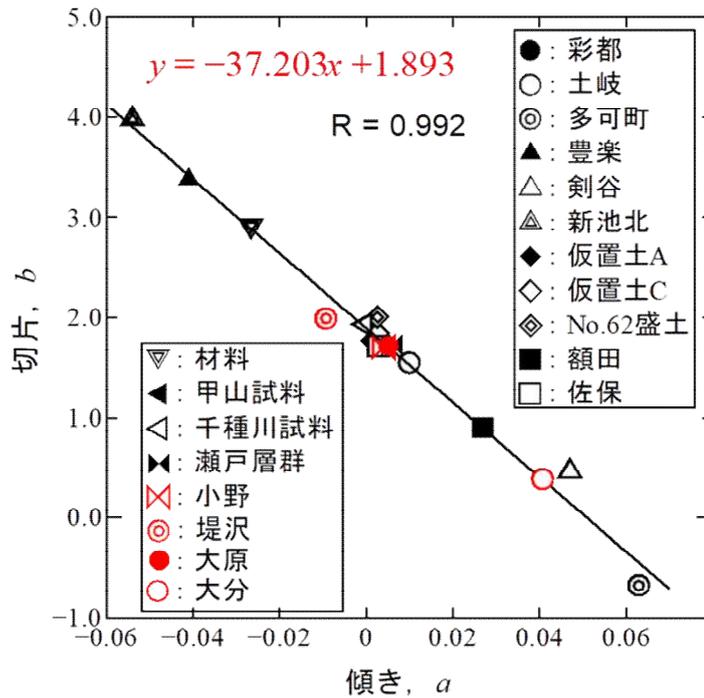


図-5.3.2 19現場におけるコンター図の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係から得る事ができる直線の傾きと切片の関係

表-5.3.1 研究室の蓄積データから引用した9種類の試料の物性値

試料名	礫分 -19mm(%)	砂分 -19mm(%)	細粒分 -19mm(%)	礫分 -2mm(%)	砂分 -2mm(%)	細粒分 -2mm(%)	実験値 ρ_{dmax} -19mm(g/cm ³)	実験値 ρ_{dmax} -2mm(g/cm ³)
多可町A-2	39.0	51.3	9.7	0	84.1	15.9	2.050	1.860
豊楽公園	19.5	64.8	15.7	0	80.5	19.5	1.936	1.870
剣谷第六公園	22.8	57.2	20.2	0	74	26	1.954	1.881
新池北公園	25.1	62.1	12.8	0	82.9	17.1	1.935	1.863
仮置土A-下	35.2	30.8	34	0	47.5	52.5	1.800	1.773
仮置土C	50.3	24	25.7	0	48.3	51.7	1.957	1.855
No.62盛土材	50	28.1	21.9	0	56.2	43.8	2.118	2.037
額田	34.8	49.8	15.4	0	76.4	23.6	1.937	1.783
佐保	29.1	33.4	37.5	0	47.1	52.9	1.780	1.715

$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	距離 (-19mm)	距離 (-2mm)	傾き	切片
2.627	43.1	40.1	0.063	-0.680
2.646	34.9	36.5	-0.041	3.382
2.639	31.5	30	0.047	0.463
2.622	37.6	38.9	-0.054	3.978
2.695	30.8	3.5	0.001	1.770
2.69	43.9	4.3	0.003	1.844
2.734	44.2	12.2	0.003	2.006
2.688	38.0	32.4	0.027	0.897
2.699	25.5	3.1	0.003	1.706

表-5.3.2 論文から引用した7種類の試料の物性値^{51~55)}

試料名	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	中心点から の距離	傾き	切片
御殿場①	44.8	39.9	15.2	1.001	43.0	0.00066	0.71800
御殿場②	53.6	37.4	9.0	1.051	50.6		
小山①	66.7	24.5	8.8	1.086	59.4	-0.00110	1.15000
小山②	44.6	38.4	17.0	1.105	42.1		
材料A	36.0	43.0	21.0	2.023	35.5	-0.02662	2.91800
材料B	20.0	65.0	15.0	1.845	35.5		
材料C	22.0	66.0	12.0	1.773	38.1		
材料D	36.0	46.0	18.0	2.006	37.0		
材料E	29.0	57.0	14.0	2.063	37.2		
甲山試料(相似粒度)	40.0	53.0	7.0	1.930	45.2	0.00492	1.70770
甲山試料(-19mm)	54.0	38.0	8.0	1.960	51.3		
千種川試料(相似粒度)	53.0	46.0	1.0	1.915	54.0	-0.00031	1.93188
千種川試料(-19mm)	74.0	26.0	0.0	1.911	66.8		
BC19(-19mm)	18.0	61.0	21.0	1.856	30.3	0.17000	-3.29500
BC2(-2mm)	0.0	74.0	26.0	1.805	30.0		
瀬戸層群土岐砂礫層63.5max	54.9	24.1	21.0	2.020	48.1	0.00581	1.72000
瀬戸層群土岐砂礫層(-19mm)	42.0	31.0	27.0	1.930	37.2		
瀬戸層群土岐砂礫層(-2mm)	0.0	52.0	48.0	1.780	8.0		

図-5.3.2 から分かるように、19種類の現場におけるコンター図の中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係から得る事ができる直線の傾きと切片から、1次式「切片=-37.203・傾き+1.893」を得ることが出来、さらに $R=0.992$ という非常に強い相関関係をみることができた。このことから、「コンター図の中心点は試料によらず同じである」という最初の仮定がおおむね正しいことが示唆された。この19種類の試料は、場所も違えば鉱物組成などの要因も違うことから、やはり傾きと切片は各現場の固有の値であることが分かる。また、傾きと切片の大小関係を見ると傾きが大きければ切片は小さく、傾きが小さければ切片は大きくなっている。すなわち、中心点における ρ_{dmax} が小さい試料ほど粒度変化した場合の ρ_{dmax} の変化量が大きいということが分かる。

さらに、中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係の式である、「 $\rho_{dmax}=\text{傾き} \cdot \text{中心点からの距}$

離+切片」(以下、式①とする)と、得られた傾きと切片の関係の式である、「切片= $-37.203 \cdot \text{傾き} + 1.893$ 」(以下、式②とする)を、傾きと切片に関する連立方程式として解くと、「傾き= $(\rho_{dmax} - 1.893)/(r - 37.203)$ 」と「切片= $-37.203(\rho_{dmax} - 1.893)/(r - 37.203) + 1.893$ 」の2式が得られ、傾きと切片を個別に表すことが出来る。すなわち、ある同一現場内で採取された等の粒度のみが異なる試料群において、1つの試料から中心点からの距離 r と ρ_{dmax} からその1現場の傾きと切片を算出することが出来る。そこで得られた傾きと切片を式①に入れ戻すことで、同一現場内であれば粒度を調べるだけで ρ_{dmax} を推定することが出来ることが示唆された。

しかし、表-5.3.1, 表-5.3.2を見ると、千種川試料, 豊楽公園試料, 新池北公園試料, 材料試料, 堤沢試料の傾きが負になっており, 多可町 A-2 試料, BC 試料の切片が負の値となっている。傾きが負ということは, 中心点から離れると ρ_{dmax} が小さくなることを示している。また, 切片が負ということは, 中心点における ρ_{dmax} が負であることを示している。特に, ρ_{dmax} が負になるということは物理的にありえないため, 式①と②をそのまま利用することが出来ず, 粒度の適用範囲を設定する必要がある。傾きおよび切片が負になった原因として, 用いた試料の粒度が2点しかないことである。傾きが負になっている試料の共通点として, ρ_{dmax} が大きい試料の方が中心点からの距離が小さくなってしまっていることが挙げられる。切片が負になってしまっている試料の共通点としては, 2点の粒度の ρ_{dmax} の差が大きいということが挙げられる。しかし, 3点以上の粒度がある試料でも, その中で選ぶ2点だけで傾きと切片を算出すれば負になる場合がある。このことから, 単純に試料数不足が考えられる。ゆえに, 試料数を増やして傾きおよび切片を求めれば, 正の値をとる可能性がある。

また, 複数の粒度での試験を行っていることから, どの粒度と ρ_{dmax} を代表として連立方程式に適用すればよいのかを考察する必要がある。この問題を考察するために, 最も試料数の多い彩都試料を用いた。1点の粒度で求めた傾きと切片を式①に代入して他の粒度の ρ_{dmax} を算出し, 実験値とどの程度の誤差が出るのかを調べたものが図-5.3.3, 図-5.3.4, 図-5.3.5である。

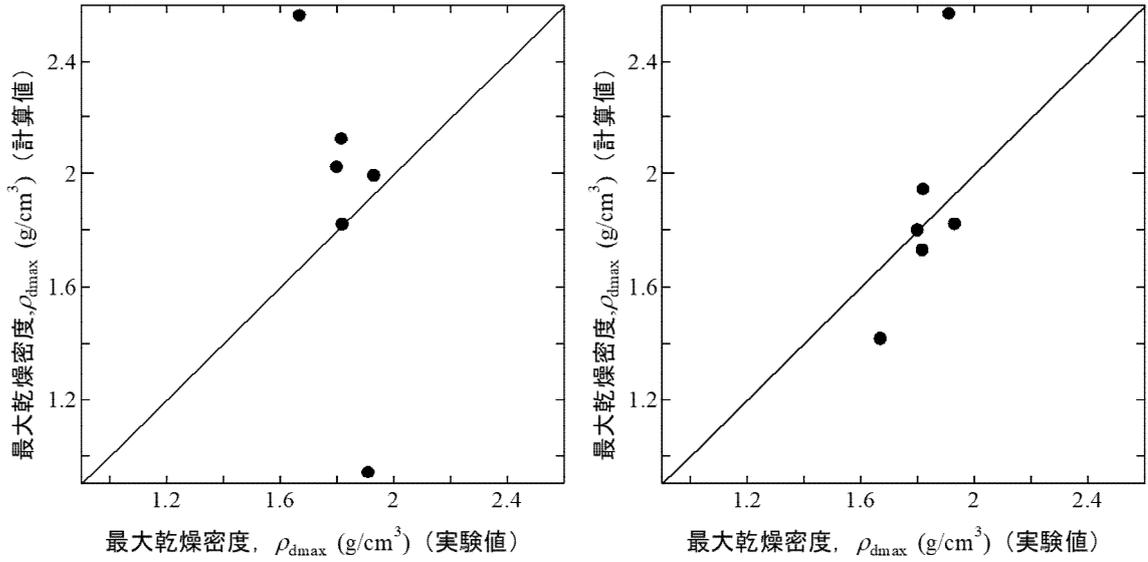


図-5.3.3 左) -19mm の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの
 右) -9.5mm の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの

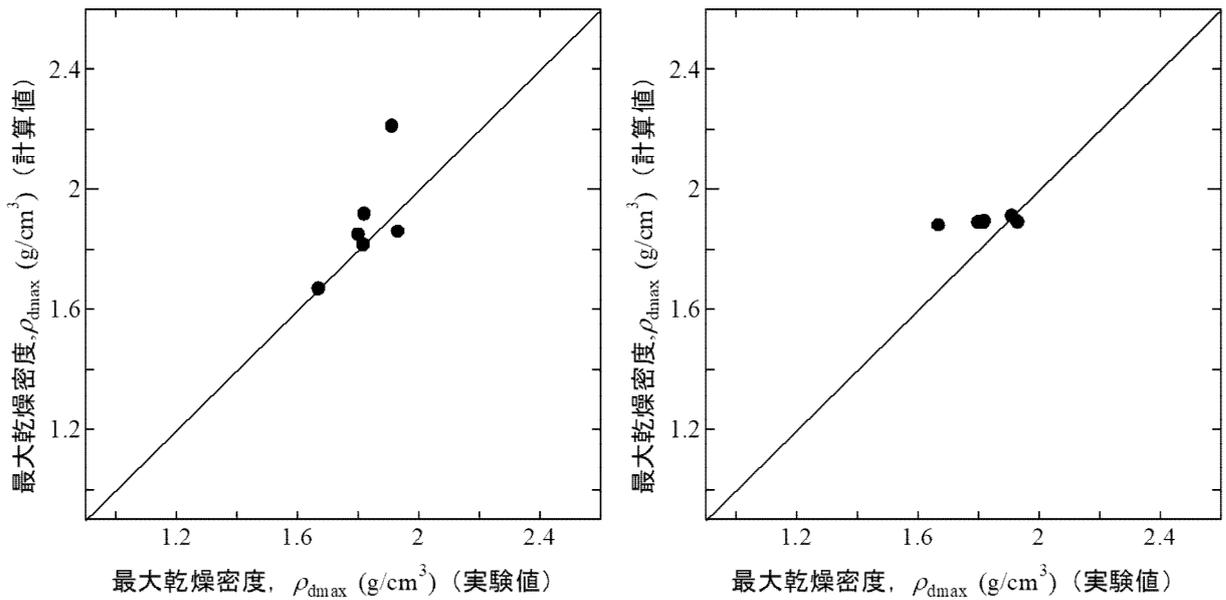


図-5.3.4 左) -2mm の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの
 右) 合成 A の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの

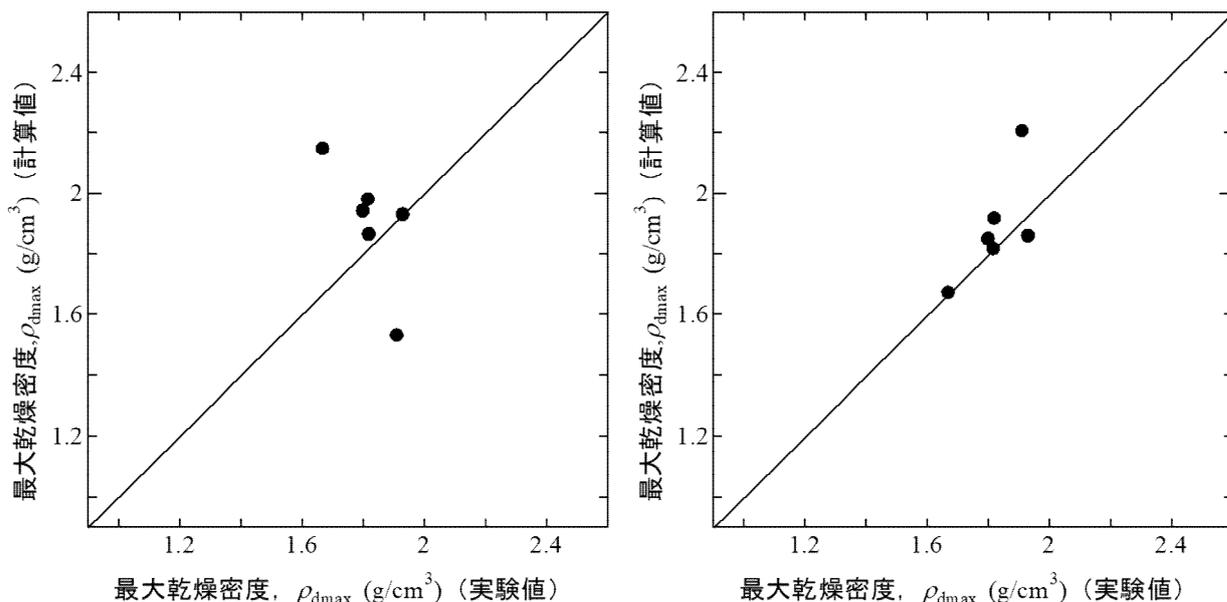


図-5.3.5 左) 合成 B の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの
 右) 合成 C の粒度と ρ_{dmax} で求めた傾きと切片で各粒度の ρ_{dmax} を計算したもの

また、彩都試料の各粒度での傾きと切片，平均絶対誤差を示す（表-5.3.3）．平均絶対誤差とは，各粒度での傾きと切片を用いて他の粒度の ρ_{dmax} を算出した際，その計算値と実験値の誤差の絶対値をデータ数で割ったものである．

表-5.3.3 彩都試料の各粒度での傾きと切片，平均絶対誤差

試料名	粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	連立傾き	連立切片	平均絶対誤差 (%)
	礫分 (%)	砂分 (%)	細粒分 (%)				
①-19mm	47.0	24.5	28.4	1.820	-0.019226	2.6082539	19.6
②-9.5mm	34.9	30.2	35.0	1.800	0.0136704	1.3844186	9.1
③-2mm	0.0	46.3	53.7	1.669	0.0064178	1.6542391	4.0
④合成A	100.0	0.0	0.0	1.911	0.0003629	1.8794981	2.8
⑤合成B	18.0	63.0	19.0	1.931	-0.007303	2.1647113	8.6
⑥合成C	17.4	15.1	67.5	1.817	0.0063318	1.6574399	3.9

表より，実験値と計算値との誤差が5%以内に収まる傾きと切片になるのが，-2mm，合成 A，合成 C の3 試料である．しかし，この3 試料には共通点がなく，粒度もばらばらであるため，関係性を見つけることが困難であり，代表する粒度にどれを選ぶかはさらに試料数を増やして検討する必要がある．

ここまでで，ただ1 点の粒度と ρ_{dmax} から求めた傾きと切片で，現場内のすべての ρ_{dmax} を推定することは現時点では難しいことが分かった．そこで，現場内の数点の粒度と ρ_{dmax} から算出することが出来る，式①「 $\rho_{dmax} = \text{傾き} \cdot \text{中心点からの距離} + \text{切片}$ 」だけ

を用いたときの ρ_{dmax} の実験値と計算値の精度について考察する。

表-5.3.4に、彩都試料以外で試料数の多い土岐試料と小野試料に式①を用いて得られた ρ_{dmax} の計算値と実験値を示す。

表-5.3.4 土岐・小野試料の ρ_{dmax} の実験値と計算値

試料名		粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	中心点から の距離 r	計算後最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	計算値/実験値 の誤差(%)
		礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)				
土岐	①6/22	26.5	14.7	58.8	1.798	28.0	1.821	101.28
	②7/12	32.0	15.0	53.0	1.859	30.6	1.847	99.35
	③8/7	56.1	21.4	22.5	2.129	48.9	2.030	95.35
	④9/17	69.9	11.2	18.9	2.154	60.6	2.147	99.68
	⑤9/26	62.2	14.1	23.7	2.008	53.9	2.080	103.59
小野	①-19mm	24.1	34.1	41.8	1.774	20.9	1.784	100.55
	②-9.5mm	19.1	36.4	44.5	1.764	16.6	1.767	100.14
	③-2mm	0.0	45.0	55.0	1.710	1.0	1.704	99.64
	④合成A	50.7	22.2	27.1	1.881	44.0	1.876	99.74

計算値に用いられている中心点からの距離 r は、彩都試料より得られた中心点から算出しているにも関わらず、計算値と実験値の誤差は5%以内に収まっていることが分かる。この結果より、1つの試料群で5試料程度のデータ数から傾き、切片を求めることが出来れば、 ρ_{dmax} の精度の高い推定が可能になることが分かる。しかしながら、土岐試料・小野試料には、彩都試料で得られたコンター図で大幅に傾向が異なる、砂分と細粒分が多く占める範囲を含んでいない。そこで、式①の適用範囲を定めるため、少なくとも同一現場内で3点以上の試料数があるものを用いて考察した。

図-5.3.6に、彩都試料のコンター図に3点以上の試料数を持つ6現場の粒度と ρ_{dmax} の計算値と実験値の誤差をプロットしたものを示す。青は誤差が3%以内、黄色が誤差3~5%以内、赤が誤差5%以上のものである。また、表-5.3.5に誤差が比較的大きい黄色と赤の試料を示す。

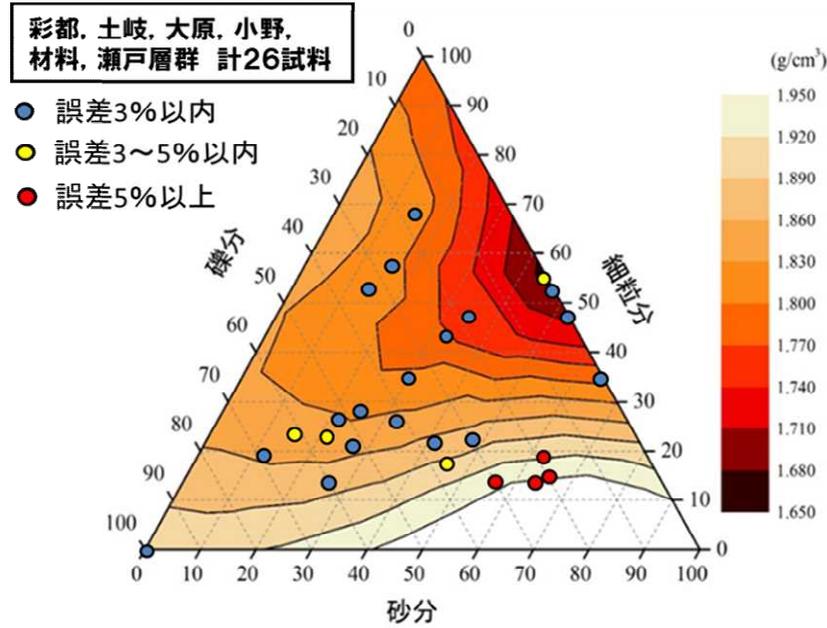


図-5.3.6 彩都試料のコンター図に各現場試料の粒度と ρ_{dmax} の計算値と実験値の誤差を乗せたもの

表-5.3.5 ρ_{dmax} の誤差が比較的大きい試料

試料名	粒度			中心点から の距離r	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	計算値	計算値/実験値	比	誤差 (%)	
	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)							
彩都	③-2mm	0.0	46.3	53.7	2.3	1.669	1.744	1.045	104.46	4.46
土岐	③8/7	56.1	21.4	22.5	48.9	2.129	2.030	0.953	95.35	4.65
	⑤9/26	62.2	14.1	23.7	53.9	2.008	2.080	1.036	103.59	3.59
材料	D	36.0	46.0	18.0	37.0	2.006	1.932	0.963	96.31	3.69
彩都	⑤合成B	18.0	63.0	19.0	32.0	1.931	1.815	0.940	93.98	6.02
材料	B	20.0	65.0	15.0	35.5	1.845	1.973	1.069	106.92	6.92
	C	22.0	66.0	12.0	38.1	1.773	1.904	1.074	107.37	7.37
	E	29.0	57.0	14.0	37.2	2.063	1.93	0.934	93.39	6.61

図-5.3.6より、 ρ_{dmax} の計算値と実験値の誤差が大きい範囲は細粒分が25%以下を占める部分である事がわかる。特に、彩都試料のコンター図で描画できていない右下の部分では、誤差が5%以上となっており、試料によって異なるが、 ρ_{dmax} の計算値と実験値の差が0.1以上となる。既往の研究²⁷⁻²⁹より、砂分が30%以上、または細粒分が15%を境界として締固め特性の傾向が変化していると報告されているが、本研究において細粒分が25%以下の場合に誤差が大きいという結果は、既往の研究と同様に締固め特性の変化が生じたためと考えられる。言い換えると、細粒分が25%以上であれば、 ρ_{dmax} の推定は誤差が3%以内に収まり、精度の高い推定であると言え、式①を用いた ρ_{dmax} の推定が可能であることが示唆された。

ρ_{dmax} の推定誤差が大きい粒度範囲については、4.3節で述べた粗粒分の粒子形状の影

響が考えられる。推定誤差が大きい細粒分が25%以下の範囲では相対的に礫分・砂分の割合が大きくなり、最大乾燥密度は強度と同様に粒子の摩擦やかみ合わせの影響を受けるため、同一現場であっても誤差が大きくなったと考えられる。このことから、今後の展望として強度と同様に粗粒分の粒子形状を加味する指標を用いることで、細粒分が25%以下の範囲に関しても推定精度を上げられることが示唆される。また、強度の推定に関して研究を進めるにあたって細粒分が25%以下の範囲に関して着目する必要性があるともいえるだろう。

5.3.2 締固め特性と均等係数・曲率係数の関係

粒度に関する別の簡易な値からでも ρ_{dmax} を推定できるかを調べるために、均等係数と曲率係数に着目して検討した。表-5.3.6に、これまで述べてきた試料の中で、均等係数と曲率係数の双方が算出できるものとその値を示す。また、図-5.3.7に均等係数と ρ_{dmax} の関係、図-5.3.8に曲率係数と ρ_{dmax} の関係を示す。

表-5.3.6 各試料の均等係数と曲率係数

試料名		最大乾燥密度	均等係数	曲率係数	試料名		最大乾燥密度	均等係数	曲率係数
		$\rho_{dmax}(g/cm^3)$	Uc	U'c			$\rho_{dmax}(g/cm^3)$	Uc	U'c
彩都	①-19mm	1.820	442.9	1.0	多可町 A-2	-19mm	2.050	20.0	1.3
	②-9.5mm	1.800	350.0	1.1		-2mm	1.860	33.3	6.1
	③-2mm	1.669	700.0	14.3	豊楽 公園	-19mm	1.936	65.0	5.6
	④合成A	1.911	3.4	1.6		-2mm	1.870	95.2	8.1
	⑤合成B	1.931	54.7	1.8	剣谷第六公 園	-19mm	1.954	129.0	6.3
	⑥合成C	1.817	265.0	2.7		-2mm	1.881	227.3	15.4
	⑦合成D	1.901	145.5	32.8	新池北 公園	-19mm	1.935	37.0	0.9
土岐	②7/12	1.859	333.3	0.2		-2mm	1.863	56.4	8.4
	③8/7	2.129	470.6	6.8	仮置土 A-下	-19mm	1.800	851.0	0.9
	④9/17	2.154	38.2	3.6		-2mm	1.773	114.3	0.9
	⑤9/26	2.008	577.8	17.3	仮置土C	-19mm	1.957	700.0	8.4
	①堤沢	-19mm	1.663	31.6	5.9	No.62盛土材	-19mm	2.118	375.0
-2mm		1.675	31.6	5.9	額田	-19mm	1.937	73.0	0.1
②大原	-19mm	1.892	120.0	1.9		-2mm	1.783	5.2	0.8
	-2mm	1.838	105.3	2.4	佐保	-19mm	1.780	1324.0	0.9
	合成A	1.989	108.6	4.2		甲山	相似粒度	1.930	75.9
③大分	-19mm	1.653	12.7	1.5	-19mm		1.960	19.3	1.3
	-2mm	1.498	13.3	1.6	千種川	相似粒度	1.915	16.3	1.1
						-19mm	1.911	8.6	1.3

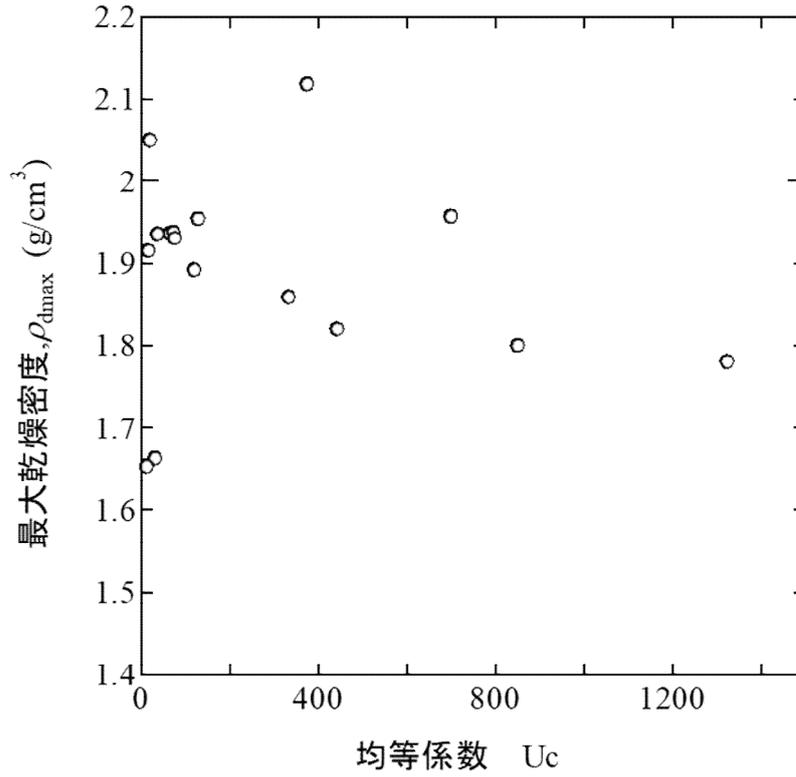


図-5.3.7 均等係数と ρ_{dmax} の関係

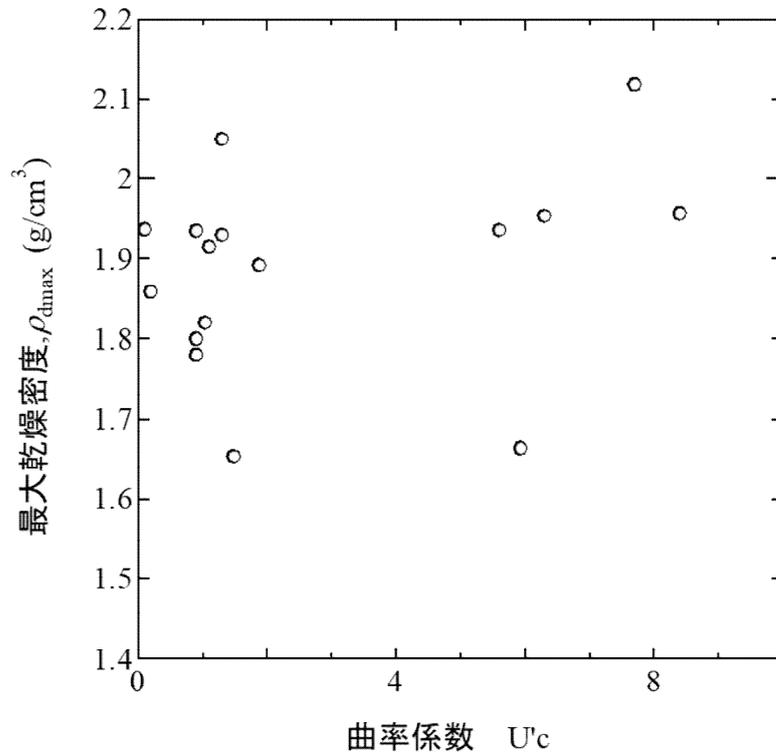


図-5.3.8 曲率係数と ρ_{dmax} の関係

図-5.3.7, 図-5.3.8 より, 均等係数・曲率係数ともに, プロットが散在しており, ρ_{dmax}

との関係は見る事が出来なかった。故に、粒度から ρ_{dmax} を推定する際は、中心点からの距離と ρ_{dmax} の関係を用いる方法が推奨される。

5.3.3 最大乾燥密度と最適含水比の関係

最適含水比 w_{opt} の推定方法について考察する。前項の ρ_{dmax} と同様に粒度から w_{opt} を求めるために、彩都試料の w_{opt} コンター図(図-5.3.9)にこれまで述べてきた試料の粒度と w_{opt} をプロットしたところ、 ρ_{dmax} とは異なり、全く関係性を見ることはできなかった。そこで、中心点からの距離と w_{opt} の関係を整理した。図-5.3.10に示す。

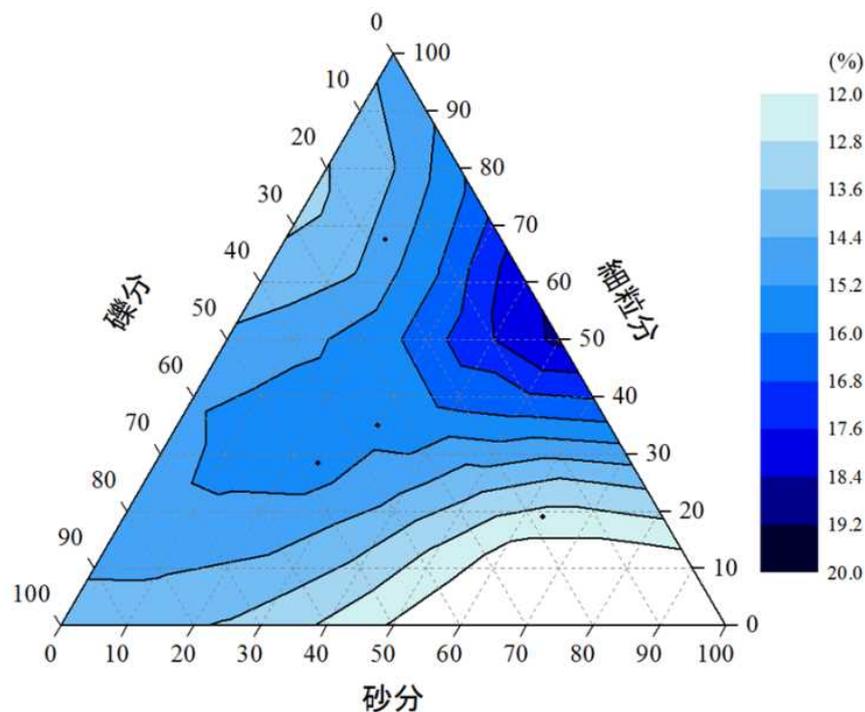


図-5.3.9 彩都試料の w_{opt} のコンター図

図-5.3.10より、中心点から離れるほど w_{opt} は小さくなる傾向があることが分かるが、相関係数が $R=0.507$ であり、中心点からの距離から w_{opt} を推定できるということは言えず、 ρ_{dmax} の傾向とは異なり、具体的な関係性を見ることはできなかった。つまり、粒度から w_{opt} を推定することは困難であることが分かった。

そこで、前項で ρ_{dmax} は推定することが可能であることが示唆されたことから、 ρ_{dmax} から最適含水比を推定することが可能かどうかを検討した。図-5.3.11に ρ_{dmax} と最適含水比の関係について示す。ここでの ρ_{dmax} は実験値である。

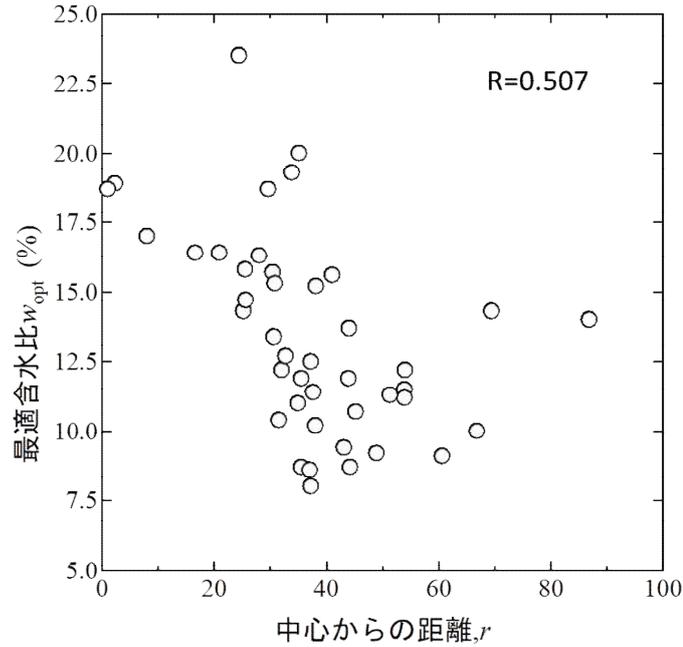
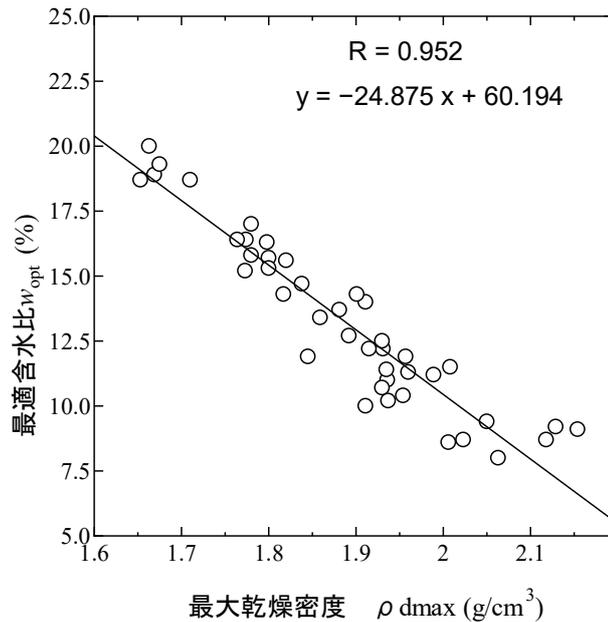
図-5.3.10 中心からの距離と w_{opt} の関係図-5.3.11 ρ_{dmax} と最適含水比の関係

図-5.3.11 より、 ρ_{dmax} が増加すると、最適含水比は減少していくことが分かり、相関係数も $R=0.952$ と強い相関関係を得ることが出来た。また、近似線を書くことが出来、その式を定式化すると「 $y=-24.875x + 60.194$ 」となる。各試料の ρ_{dmax} を得られた式に代入して計算した最適含水比の値はほとんどの試料において、実験値の最適含水比の値と2%の誤差（実験値と計算値の差）で収まった。 ρ_{dmax} の値を前項の計算値を適用して式

に代入すると、実験値と計算値の最適含水比の差は3%以内に収まった。このことから ρ_{dmax} から最適含水比は推定することが可能であり、締固め特性は粒度から ρ_{dmax} を算出したのち、 ρ_{dmax} の計算値から最適含水比を推定することで、一連の試験を行う手間を省いて求めることが出来ることが示唆された。

5.4 推定法の有用性

これまで述べたように、盛土材の締固め特性に関して、礫分の有無で大別して2通りの推定法を提案する。推定に関するフローチャートを図-5.4.1に示す。また、現行の施工管理では2.2.4節に示したように、一定の施工数量ごとに材料試験として、締固め試験、粒度試験を含む一連の試験が実施されている。材料試験の項目には力学試験等10種類以上の試験が含まれていることや、現時点での本研究におけるデータ数を鑑みると、推定法によって材料試験自体を省略することは現実的ではない。そのため、本研究で得られた推定法は材料試験よりも短い間隔で、簡易に実施可能で品質事故を防ぐための補助的な活用が有効と考えられる。塑性図を用いた推定法では液性限界・塑性限界試験が、粒度の三角座標を用いた推定法では締固め試験と礫分・砂分・細粒分含有率が必要となるが、いずれも試験器具が容易に入手でき施工現場で実施可能な試験である。

簡易とはいえ、実質的に試験数量が増えることに対するコスト面での優位性については仮に材料試験の半分の施工量毎に推定法による確認を行うとして1回の試験に必要な費用は数万円であり、工事全体としては数十万円規模であろう。大規模盛土施工での品質事故が生じた場合、盛土施工のやり直しやそれに伴う他工種の遅延を含めると数千万～数億円の損失になり、総合評価方式での入札工事における提案技術の加点等も考慮すると費用面では十分に優位性があると考えられる。

また、本研究では現行の密度管理を背景としているが、今後進められるであろうICT技術を活用した施工仕様管理では、原則として日常管理で施工後の現場密度を測定しないため、施工前の材料確認がより重要となる。そういった状況においても本研究で得られた簡易にできる推定法は有効であると考えられる。

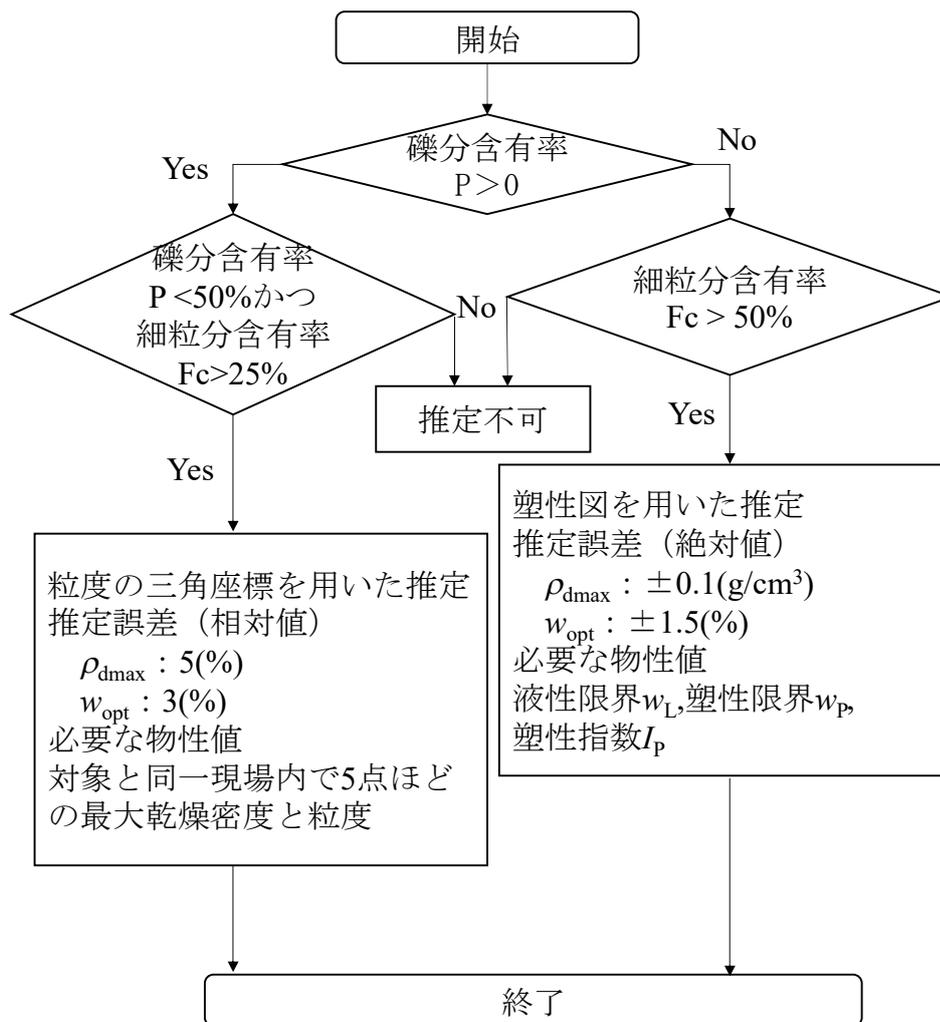


図-5.4.1 推定法のフローチャート

実質的に現場での適用事例となっている土岐試料について、表-5.3.4に推定精度を示す。土岐試料では3カ月で約10万 m^3 の盛土の施工を定期的に取り扱った試料であり、途中で粒度分布も変化している試料である。表より、推定値は粒度の変化に関わらず高い精度を保っていることが分かる。

表-5.3.4 土岐試料の ρ_{dmax} の実験値と計算値（再掲）

試料名	粒度			最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g}/\text{cm}^3)$	中心点から の距離 r	計算後最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g}/\text{cm}^3)$	計算値/実験値 の誤差(%)	
	礫分(%)	砂分(%)	細粒分(%)					
土岐	①6/22	26.5	14.7	58.8	1.798	28.0	1.821	101.28
	②7/12	32.0	15.0	53.0	1.859	30.6	1.847	99.35
	③8/7	56.1	21.4	22.5	2.129	48.9	2.030	95.35
	④9/17	69.9	11.2	18.9	2.154	60.6	2.147	99.68
	⑤9/26	62.2	14.1	23.7	2.008	53.9	2.080	103.59

5.5 第5章のまとめ

・ 礫分を含まない土の締固め特性の推定方法

- (1) 塑性図上に描いた ρ_{dmax} および w_{opt} のコンターを用いて、起源の異なる13種類の各種盛土材料の ρ_{dmax} と w_{opt} の推定を試みた。その結果、最大粒径2mm以下の全11種類の試料の内、実に10種類の試料の ρ_{dmax} を $\pm 0.1\text{g/cm}^3$ の精度で、9種類の試料の w_{opt} を $\pm 1.5\%$ の精度で、それぞれ推定できた。一方、レキ分が混在する場合には、実用的な精度で、 ρ_{dmax} と w_{opt} を推定することはできなかった。

・ 礫分を含む土の締固め特性の推定方法

- (1) 汎用的な ρ_{dmax} の推定法を得るために、第4章で得られた三角座標上の距離と最大乾燥密度の関係における傾きと切片に着目し、著者の所属する研究室の過去の文献や論文等のデータを用いて、整理すると、様々な現場試料を用いているにも関わらず、相関関係を得ることができた。
- (2) 推定における適用範囲を求めるために、彩都試料のコンター図に ρ_{dmax} の実験値と計算値の誤差をプロットしたところ、細粒分が25%以下の部分で誤差が大きくなる傾向があることがわかった。細粒分を25%以上含むような現場であれば、 ρ_{dmax} の推定誤差が5%以内に収まることになり、非常に高い精度で推定をすることができると考えられる。
- (3) 粒度から w_{opt} を推定することは困難であるが、 ρ_{dmax} と w_{opt} には、 ρ_{dmax} が大きくなればなるほど w_{opt} は小さくなるという傾向が見られ、「 $w_{opt} = -24.875 * \rho_{dmax} + 60.194$ 」という式を得ることが出来た。また、 ρ_{dmax} の計算値を用いてこの関係式を用いても、 w_{opt} は計算値と実験値で3%の差に収まった。故に、この関係式を用いることで、 ρ_{dmax} から w_{opt} を推定できると考えられる。

6. 結論

6.1 礫分を含まない締め固めた土の各種特性の関係についてのまとめ

第3章では、土の粒度と締め固め、コンシステンシー限界、変形・強度特性等の各種特性との関係について明らかにするために試験を行った。試験概要としては、任意の割合で砂・シルト・粘土を混合した多数の試料に対して締め固め試験、液性限界・塑性限界試験等の物理試験および一軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験といった力学試験を行い、以下のように結果を考察している結果に対して考察をしている。

- (1) 締め固め試験より得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} より、 ρ_{dmax} に関しては値が最小となる3種が10:0:0, 0:10:0, 0:0:10 試料であり、全ての配合割合において2種以上を配合すると値が大きくなっていることが分かった。さらに、粒度の三角座標上にコンター（等値線）図として最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} を示すと、 ρ_{dmax} の最大値、 w_{opt} は最小値を中心としてはほぼ同心円状に分布している。 ρ_{dmax} の最大値は6:2:2 試料で $\rho_{dmax}=1.95(\text{g/cm}^3)$ ($w_{opt}=10.6\%$)、 w_{opt} の最小値はその隣接する点である6:3:1 試料で $w_{opt}=9.22\%$ ($\rho_{dmax}=1.91(\text{g/cm}^3)$) となった。
- (2) 2種混合土では、最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} の時の飽和度 S_r は粒径が小さい方試料の特性に、間隙比 e は粒径が大きい方の試料の特性に依存することが分かった。飽和度 S_r 、間隙比 e はそれぞれ、最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} に関係する値であるため、粒度によって最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} が推定できる可能性が示唆された。
- (3) 粒度の三角座標上の液性限界 w_L のコンター図より、液性限界 w_L は全体的には粘土分の増加に伴って大きくなっている一定の傾向を持つことが分かった。しかし、液性限界は最大乾燥密度、最適含水比とはあまり相関性がみられなかった。塑性限界 w_p は w_L に比べて全体的に明確な傾向がみられなかった。しかしながら、砂分が少なく、粘土分が多い試料の方が w_p の値は大きくなる傾向がわずかではあるがみられた。
- (4) 三角座標上の塑性指数 I_p のコンター図より、全体的な傾向としては w_L と同様な傾向がみられるのであるが、 w_L でみられたシルト分または砂分が10%程度以下

の試料では異なる傾向が顕著になっている。これは、偶然ながら傾向が異なる試料は比較的砂分が少なく、 w_p の持つ傾向をうまく反映できていることが考えられる。

- (5) 一軸圧縮試験より得られた一軸圧縮強さ q_u のコンター図より、 q_u は 2:2:6 試料付近を中心としてコンターを描いている。みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており、基本的には粘土分と相関を持ち、シルト分が 20%程度以下になると傾向が変化するという I_p に似た形となっている。また、破壊ひずみ ϵ_f のコンターも q_u と同じく基本的には粘土分との相関がありシルト分が 20%程度以下になると傾向が変化するのであるが、傾向の変化の仕方が、 q_u や I_p とは相反する変曲がみられる。さらに、2:2:6 試料付近に中心点を持っていた q_u とは異なり、粘土分の増加に伴って ϵ_f も大きくなり続けている。
- (6) ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度の試料の応力-ひずみ曲線より、 ρ_{dmax} , w_{opt} が同程度でも q_u の大きさや応力-ひずみ曲線の挙動は異なることが分かった。 ϵ_f とシルト分/粘土分の関係は大きく 2 つの傾向に分かれ、液性限界・塑性限界試験より非塑性 (NP) であると判断された試料はシルト分/粘土分の大きさに係らず ϵ_f は 2%程度になる。次に、非塑性ではなく塑性を有する試料では ϵ_f とシルト分/粘土分は直線的な関係を持つことが分かる。また、非塑性であるか否についても粒度に起因するものである。よって、締固めた混合土に対して一軸圧縮試験を行うと、せん断挙動は粒度と相関関係にあり、傾向が変化する境界も粒度に起因するコンシステンシー限界より判断することができるといえる。
- (7) V_{vh} のコンター図の分布は q_u のものと類似している。さらに、みられる傾向は ρ_{dmax} , w_{opt} とは異なっており、基本的には粘土分と相関を持ち、シルト分か砂分が 20%程度以下になると傾向が変化するという I_p に似た形となっている。また、せん断弾性係数 G_{vh} はほぼ V_{vh} と同じ傾向の分布となっている。
- (8) q_u と G_{vh} の関係は全ての試料に対して原点を通る直線で表された。粘土分が多い試料では q_u と I_p の関係が多少異なっており、サクシヨンの影響を大きく受けていることが考えられるのであるが、 q_u と G_{vh} の関係は全ての試料で一様となっているため、 G_{vh} はサクシヨンの影響も加味した q_u の大きさと良く対応していることが分かる。また、 V_{vh} を湿潤密度 ρ を考慮した G_{vh} にすることで一次直線に表

すことが可能になったとも考えられる。

- (9) q_u と V_{vh} が同程度ながらも粘土分含有量や I_p が異なる 2 種の試料と密度が高く締固まっているが非塑性である試料に対して行ったサクシオン測定結果より、2 種試料は I_p に差があるものの、サクシオン S には大きな差はなかった。それに比較して、非塑性である試料は S が他 2 試料よりも小さな値となった。しかしながら、3 試料の結果だけではどれ程の差が有意であるかを判断することは難しく、今後の追加試験が必要である。
- (10) 一軸圧縮強さ q_u とせん断波速度 V_{vh} には配合比や含水比の変化によらず、ある程度の相関があることが確認された。
- (11) q_u および V_{vh} はそれぞれ締固め度 D_c の増加に伴って大きくなることが確認された。
- (12) q_u は砂質土の配合比がある割合以上になるまでは、多少の含水比変化に影響されることなく、一様な傾きで D_c との関係を持つことが分かった。また、その配合比の境界は粒度特性の違いで生じるコンシステンシー限界や締固め曲線の変化に影響されると考えられ、本研究の場合では豊浦砂：NSF 粘土の割合が 7：3 程度であった。
- (13) V_{vh} は q_u に比べて含水比やサクシオン等の違いをより強く反映しやすいと考えられ、せん断弾性波速度を用いて q_u と同程度に D_c を推定・評価するためには配合比に加えて、含水比やサクシオン等の影響についても加味する必要があることが分かった。

本章で行った試験結果より、粒度の三角座標上において傾向が変化する点が多々見受けられた。その変化の要因としては粒度の変化に伴う構造主体の違いが考えられる。締固め試験結果においては特に 2 種混合土で構造主体による影響が顕著に見られ、締固め曲線、飽和度、間隙比からそれぞれ主体が変わる配合割合が推察された。液性限界・塑性限界試験結果から得られる塑性指数もしくは非塑性 (NP) か否かは一軸圧縮試験、BE 試験より得られる変形・強度特性に対して重要な指標になることも示唆された。また、一軸圧縮試験時のせん断挙動に関してはシルト分と粘土分の比を指標と用いて整理す

ることができた。

砂分・シルト分・粘土分の3種混合土では、第一に非塑性か否か強度・せん断波速度に大きな違いがあることがいえ、主に粘土分が支配的な粒度領域が大きい。しかし、細かいところをみると一義的な相関関係ではない。特に3種混合土と2種混合土の遷移領域では土の構造の変化に伴い、各種特性との相関はそれぞれ個別に変化することが分かった。

6.2 礫分を含む締め固めた土の粒度が各種特性に与える影響についてのまとめ

第4章では、同一の施工現場から構成鉱物の由来は同じで粒度分布のみが異なる試料群に対して土の粒度試験、締め固め試験および三軸圧縮試験を実施している。その結果を以下に述べる。

・粒度と礫の吸水率・自然含水比の関係

- (1) 礫の粒径ごとの自然含水比を調べたところ、同一現場内であり鉱物由来はあまり変わらないことから、礫の粒径ごとの自然含水比は変わらないと推測していたが、試料によって差が生じた。細粒分を多く含んでいる試料の自然含水比が大きかったことから、礫分の風化や亀裂などが大きな要因となり、粒度の違いが自然含水比の差に起因したと考えられる。
- (2) 礫の吸水率においても、自然含水比と同様に試料によって差が生じた。また、礫分が比較的多い③8.7, ④9.17, ⑤9.26の3つと、細粒分が比較的多い①6.22, ②7.12が近い値を示したため、礫の吸水率においても粒度の差が起因していることが分かった。
- (3) (1)および(2)から、単純に礫の含水比や吸水率から粒度を推定することは困難であり、風化具合などを考慮しなければいけないと考えられる。
- (4) 試料全体の含水比と ρ_{dmax} では、(1)および(2)から分かるように礫分の特性は異なっているにも関わらず、相関関係を見ることができた。よって、試料全体の含水比を用いれば、一次的なフルイとして ρ_{dmax} を推定できる可能性が示唆された。

・粒度と締固め特性の関係

- (5) その他の盛土材料試料で得られた締固め試験結果を、既往の研究にならい「中心点からの距離 r 」と ρ_{dmax} で整理すると、すべての試料において固有の傾きと切片を持つ式「 $\rho_{dmax} = \text{傾き} \cdot \text{中心点からの距離} + \text{切片}$ 」を得ることが出来、相関関係があることがわかった。このことから、少なくとも同一現場内であれば、粒度から中心点からの距離を求めることで、 ρ_{dmax} の推定が可能になる。

・粒度と強度特性の関係

- (6) 様々な現場の試料の結果を用いた粒度と強度特性のコンター図では、 c_d, ϕ_d ともに細粒分が 30% を超えるか超えないかで傾向が変わっており、既往の研究と同じ傾向を見ることができた。

6.3 粒度に着目した締固め特性の推定方法についてのまとめ

第 5 章では、第 3 章および第 4 章で得られた一連の実験から得た知見から、幅広い粒径の土への適用を念頭において、土の粒度特性から締固め特性を予測する簡易推定法を提案している。

・礫分を含まない土の締固め特性の推定方法

- (1) 塑性図上に描いた ρ_{dmax} および w_{opt} のコンターを用いて、起源の異なる 13 種類の各種盛土材料の ρ_{dmax} と w_{opt} の推定を試みた。その結果、最大粒径 2mm 以下の全 11 種類の試料の内、実に 10 種類の試料の ρ_{dmax} を $\pm 0.1 \text{g/cm}^3$ の精度で、9 種類の試料の w_{opt} を $\pm 1.5\%$ の精度で、それぞれ推定できた。一方、レキ分が混在する場合には、実用的な精度で、 ρ_{dmax} と w_{opt} を推定することはできなかった。

・礫分を含む土の締固め特性の推定方法

- (1) 汎用的な ρ_{dmax} の推定法を得るために、第 4 章で得られた三角座標上の距離と最大乾燥密度の関係における傾きと切片に着目し、著者の所属する研究室の過去の文献や論文等のデータを用いて、整理すると、様々な現場試料を用いているにも関わらず、相関関係を得ることができた。

- (2) 推定における適用範囲を求めるために、彩都試料のコンター図に ρ_{dmax} の実験値と計算値の誤差をプロットしたところ、細粒分が25%以下の部分で誤差が大きくなる傾向があることがわかった。細粒分を25%以上含むような現場であれば、 ρ_{dmax} の推定誤差が5%以内に収まることになり、非常に高い精度で推定をすることができると思われる。
- (3) 粒度から w_{opt} を推定することは困難であるが、 ρ_{dmax} と w_{opt} には、 ρ_{dmax} が大きくなればなるほど w_{opt} は小さくなるという傾向が見られ、「 $w_{opt} = -24.875 * \rho_{dmax} + 60.194$ 」という式を得ることが出来た。また、 ρ_{dmax} の計算値を用いてこの関係式を用いても、 w_{opt} は計算値と実験値で3%の差に収まった。故に、この関係式を用いることで、 ρ_{dmax} から w_{opt} を推定できると考えられる。

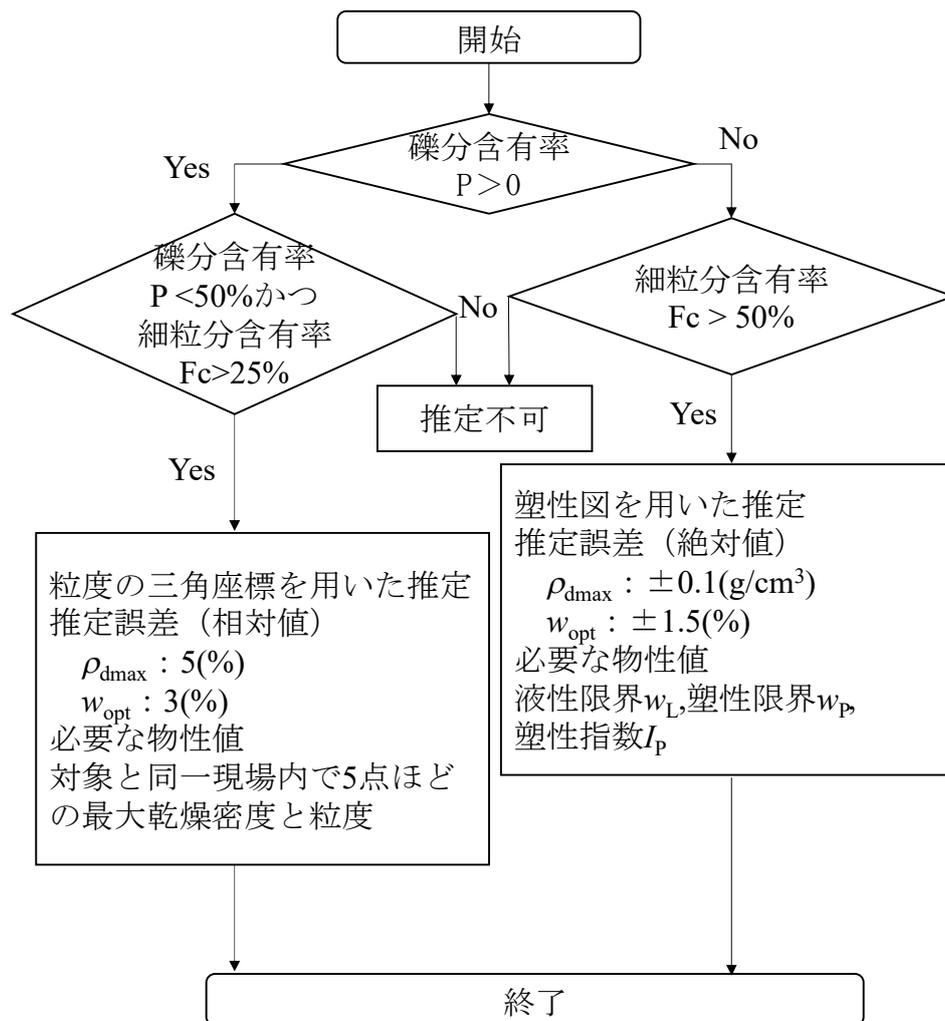


図-6.1 推定法のフローチャート

参考文献

- 1) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の協働の必要性，特集:盛土の設計と締固め，基礎工，Vol.37，pp.2-9，2009.
- 2) 川尻峻三，澁谷啓，鳥居宣之：ジオテキスタイル補強土壁の変状メカニズムに関する事例研究，地盤工学ジャーナル Vol. 6，No. 1，pp.15-25，2010.
- 3) 竹園紘樹，三浦みなみ，高橋正和，澁谷啓，川尻峻三：締固め度及び含水比が土のせん断弾性波速度に与える影響，地盤工学会北海道支部技術報告集，No.52，pp.117-122，2012.
- 4) 谷本喜一，渋谷平八郎，岩崎照昌：盛土地盤の 2，3 の特性，土と基礎，Vol.9，NO.4，pp.12-15，1961.
- 5) 三国英四郎：フィルタイプしゃ水壁材料の性質と締固めに関する研究（その 1）土と基礎，Vol.10，NO.1，pp.4-12.1962.
- 6) 国土交通省：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説，2012.
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善出版，2007.
- 8) 東日本高速道路，中日本高速道路，西日本高速道路：設計要領第一集土工編，2009.
- 9) 平川大貴，川原園美幸，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.
- 10) 龍岡文夫，DUTTINE Antoine，原大地，望月勝紀，望月一宏，奥野大輔，平川大樹，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.
- 11) 龍岡文夫，望月勝紀，望月一宏，國廣勇三：砂礫盛土材の強度・剛性関係と影響因子，第 46 回地盤工学研究発表会，pp.1771-1772，2011.
- 12) Proctor.R.R.：Fundamental principles of soil compaction, Eng. News Rec. Vol.111, 1933.
- 13) 久野悟郎：締固めと力学特性の相関，土と基礎，Vol.22，NO.4，pp.5-10，1974.
- 14) 龍岡文夫，藤代健司，須藤雅人，建山和由，根本忠：乾燥密度と飽和度の関数としての締固めた土の物性，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.575-576，2013.
- 15) 藤代健司，須藤雅人，龍岡文夫，川辺翔平，菊池喜昭：乾燥密度と飽和度に基づく盛土締固め管理について，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.577-578，2013.
- 16) Walker, F.C. and Holtz W.G: Control of embankment material by laboratory testing, Proc. ASCE, No.108, pp.1~25, 1951.
- 17) NEXCO 総研：土工施工管理要領，p.2-30,2020.
- 18) 公益社団法人日本道路協会：道路土工－盛土工指針（平成 22 年度版），p.217,2010.

- 19) 澁谷啓, 川口貴之: 17. 土質試験法・地盤材料の変形特性, 地盤工学会誌, Vol.58, No.1, pp.36-37, 2010.
- 20) 林宏一, 鈴木晴彦: 二次元表面波探査の地盤調査への適用, 第38回地盤工学研究発表会講演集, pp.33-34, 2003.
- 21) 川尻峻三, 澁谷啓, 川口貴之, 鳥居宣之: 現場調査および室内試験による砂丘斜面の安定性の評価, 地盤工学ジャーナル Vol. 4, No. 3, pp.233-244, 2009.
- 22) 鈴木晴彦, 林宏一: 表面波を用いた地震探査—二次元探査への応用—, 物理探査学会第103回学術講演会講演論文集, pp.221-225, 2000.
- 23) 桑野二郎: 補強土壁工法の耐震性に関する課題, 基礎工, Vol.38, No.2, pp.12-17, 2010.
- 24) 山下聡, 中田幸男, 川口貴之, 三上武子, 藤原照幸, 澁谷啓: ベンダーエレメント試験方法の標準化に関する研究, 科学研究費補助金 研究成果報告書, 2006.
- 25) 稲崎富士, 西沢修, 竹原直人, 山本洋, 山口和郎: LDV 同時計測による BE 試験の計測技法の検討, 第46回地盤工学研究発表会, pp.241-242, 2011.
- 26) Salinero, I. S. Roesset, J.M. and Stokoe, K. H. : Analytical studies of body wave propagation and attenuation , Report GR86-15, University of Texas at Austin, 1986.
- 27) 山下聡, 川口貴之: ベンダーエレメント試験の基準作成過程における諸話題, 地盤工学会誌土と基礎, Vol.61, No.10, pp.6-9, 2013.
- 28) 落合英俊, 大嶺聖: 砂と粘土の混合土の圧縮および強度特性, 土と基礎 Vol.41, No.7, pp.11-16, 1993.
- 29) 兵動正幸, 金郁基, 中田幸男, 吉本憲正: 砂・粘土混合土の非排水せん断強度特性に及ぼす細粒分の影響, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.215-225, 2010.
- 30) 金子崇, 兵動正幸, 立場晴司, 山田卓, 中田幸男, 吉本憲正: 含水比の異なる粘土を混合した砂・粘土混合土の初期せん断弾性係数, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.1, pp.188-198, 2012.
- 31) 鬼塚克忠, 吉武茂樹: 締固めた混合土の強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.4, pp.149-156, 1983.
- 32) 金山素平, 大平剛士, 小川靖弘, 東孝寛, 大坪政美, 中野晶子: 圧密による砂 - 粘土混合土の微視的構造の変化, 粘土科学, 第48巻, 第1号, pp.1-8, 2009.
- 33) 森麟, 柴田英明: 締固めた砂・粘土混合土の構造についての考察, 第14回土質工学研究発表会, pp.685-688, 1979.
- 34) 森麟, 柴田英明: 締固めた砂・粘土混合土の構造についての考察 (第2報), 第15回土質工学研究発表会, pp.693-696, 1980.

- 35) 柴田英明, 森麟: 締固めた砂・粘土混合土の構造と水浸 CBR, 第 16 回土質工学研究発表会, pp.745-748, 1981.
- 36) 柴田英明: 土の締固めによる密度増加と締固め土の構造に関する研究, 国土館大学工学部紀要, 第 13 号, pp.30-35, 1980.
- 37) 柴田英明: 締固め土の構造に関する一考察, 国土館大学工学部紀要, 第 15 号, pp.27-33, 1982.
- 38) 柴田英明: 微視的観察による締固め土の構造についての一考察, 国土館大学工学部紀要, 第 17 号, pp.31-40, 1984.
- 39) 日笠丘徹巳, 西林清茂: 粗粒材料の締固め特性に関する研究 (その 1), 大林組技術研究所報 (5 1), pp.39-42.1995.
- 40) 植下協, 野々垣一正, 浅井武彦: 粗粒土の統一土質分類に関する考察, 土木学会論文報告書第, No.194, pp.103-112.1971.
- 41) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, -二分冊の 1-, 丸善出版, pp.53-80, 2009.
- 42) 山本拓: 締固めた各種盛土材料の沈下特性に関する研究, 修士論文, 神戸大学大学院工学研究科博士課程前期課程市民工学専攻, 2013.
- 43) 山田宣良: 土壌の基本的物理性による力学性・構造的性の予測, 香川大学農学部学術報告集第 50 巻, 第 1 号, pp.49-55, 1998.
- 44) (社)地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, -二分冊の 1-, 丸善出版, pp.142-149, 2009.
- 45) 風間秀彦, 小田恭子, 藤田龍之, 古河幸雄: 液性・塑性限界に対応するフォーロコーンの貫入量, 第 30 回土質工学研究発表会講演集, pp.373-376, 1995.
- 46) 加藤正司, 吉村優治, 河合克之, 寸田亘: 不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼすサクシジョンの影響, 土木学会論文集, No.687,III-56,pp.201-218,2001.
- 47) 堀田崇由, 片岡沙都紀, 川口貴之, 田中政典, 富田龍三, 中島美代子: 原料土内の鉱物組成と気泡混合処理土の強度・剛性との関係, 地盤工学会北海道支部技術報告集, pp.63-70, 2012.
- 48) 三田地利之, 工藤豊: サクシジョンと一軸圧縮強度に基づく粘土の非排水強度推定法, 土木学会論文集, III-35,pp.147-157,1996.
- 49) 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, 土木学会論文集, No.617,III-46,pp.201-211,1999.
- 50) 野並賢, 加藤正司, 吉村優治, 前田健一, 山本修一: 粒状体の変形・強度特性に与える粒子形状の影響に関する二次元個別要素法による検討, 土木学会論文集,

No.799,III-72,pp.51-63.2005.

- 51) 西岡孝尚, 澁谷啓: 富士山周辺における「スコリア」の地盤工学的特性, 地盤工学ジャーナル Vol.9,No.3,pp.397-415, 2014
- 52) 村田曄昭, 建山和由, 山本拓治, 吉田輝, 川野健一: 現場締固め効果の実用的な実験的予測手法, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.4, 589-601, 2010.
- 53) 上本雄也, 澁谷啓, 橋元洋典, 川尻峻三: 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, 地盤工学ジャーナル Vol.6, No.2, 181-190, 2011.
- 54) 高橋正和, 川口貴之, 鳥居宜之, 澁谷啓: 締固め方法が細粒分礫質砂の三軸試験結果に及ぼす影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集第 52 号, pp.109-116,2012.
- 55) 大東憲二, 李弘揆, 植下協: 室内試験にもとづく現場締固め礫質土のせん断強度定数推定法, 土木学会論文集 No.493/III-27,pp.31-37, 1994.
- 56) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, pp.373-385, 2009.

謝辞

本論文は著者が修士課程より 10 年来続けてきた土の締固め特性に関する研究をまとめたものです。現在までの間、多くの人との出会いに恵まれ研究を続けてこられたことに感謝いたします。

神戸大学大学院工学研究科 澁谷啓教授には、本論文の主査を御担当頂き、また本研究の遂行にあたってはもちろんのこと、修士学生時代から、就職後も人生に対する心得に至るまで大変貴重な御意見を賜りましたに感謝いたします。特に博士課程においてはお忙しい中、様々な迷惑をかける筆者に対して寛大なお心で接していただき、改めて人としての大きさを感じました。

神戸大学大学院工学研究科 森川英典教授ならびに芥川真一教授には、本論文の副査を御担当頂き、惜しみない御力添えを賜りましたに心より御礼申し上げます。

神戸大学大学院工学研究科 片岡沙都紀助教は、高専時代も含め、最も長い時間に渡り指導を行っていただいた先生です。時には愚痴や弱音を言える理解者として応援していただき感謝いたします。

(株)フジタ 北島明主席研究員には、筆者が社会人となってから、職場の上司として研究のみならず人としての生きる手本を見せていただきました。筆者の博士課程への進学に関しても様々なサポートをしていただき感謝しております。

南海電気鉄道(株) 高島光平氏、松田健斗氏には、学生時代に共同研究者として本研究を共に遂行できたことに感謝と喜びを申し上げます。研究テーマのリーダーとしては至らない点が多かった筆者についてきていただき、卒業後の現在も良き友人として支えてくれることに感謝いたします。

北見工業大学、川口貴之教授並びに川尻峻三准教授には函館高専に在籍時より現在に至るまで常に温かく、時には厳しく見守って頂き感謝しております。

ここには書ききれませんが、学生時代から社会人となっても数多くの先輩・友人・後輩の皆様から多くのことを教えていただきました。それら全てが糧となり、今日に至っていることに感謝いたします。

最後に、研究活動と私生活を支えてくれ、多くの勇気と安らぎを与えてくれた妻 紀子と息子 英佑に感謝する次第です。

神戸大学博士論文「粒度分布に着目した土の締固め特性の簡易推定方法に関する研究」全 111 頁
提出日 2021年7月14日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリ
ポジトリの該当 ページ上に掲載されます。

© 堀田 崇由

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。