

## 18. 細粒分含有率の高い盛土材の力学特性を踏まえた施工管理基準に関する研究

研究予算：運営交付金

研究期間：平 27～平 29

担当チーム：土質・振動チーム

研究担当者：佐々木 哲也, 東 拓生

石原 雅則, 佐々木 亨

### 【要旨】

現在、道路盛土や河川堤防を施工する際には、一般的に盛土材料によらず締固め度等による品質管理・基準値が用いられており、必ずしも構造物の要求性能に応じた品質管理・基準値とはなっていない。一方、実際の現場で使用される盛土材は良質で均一なものとは限らず、発生土の有効活用の観点から細粒分を多く含み、施工し難い材料が用いられるケースが増えている。このようなことから、本研究は、細粒分を多く含む盛土材の力学特性を明らかにするとともに、盛土の要求性能や土質に応じた盛土の施工管理基準に関する検討を行うことを目的としている。そこで、盛土の要求性能と関連する指標として、繰返し三軸強度比と透水係数の2つを選定し、実際に盛土材として用いられた細粒分を多く含む土を対象として、これらの2つの指標と締固め条件の関係を調べた。キーワード：盛土、細粒分、締固め度、繰返し三軸強度比、透水係数

### 1. はじめに

現在、道路盛土や河川堤防を施工する際には、締固め度  $D_c$  による品質管理が一般的である。細粒分が多い場合には、空気間隙率  $V_a$  による管理も可能となっている。これらの締固め度  $D_c$  と空気間隙率  $V_a$  は何れも、盛土の要求性能に必ずしも直結しない指標であるが、盛土材が良質材と言われるような一定の範囲内であれば、品質と対応関係があると考えられる。

しかし、発生土の有効活用の観点から、多様な土を用いなければならない状態となっているが、このような状態では現在用いられている締固め度  $D_c$  や空気間隙率  $V_a$  と盛土の品質は、必ずしも1:1に対応しない。このため、様々な土に関して、例えば、剛性やせん断強度、繰返し三軸強度比、透水係数などの盛土の品質に関連する指標と締固め条件の関係を明らかにしていく必要がある。特に細粒分を多く含む土に関しては、施工管理が難しく、被災事例も比較的多い土であることも踏まえ、本研究では、細粒分を多く含む盛土材の力学特性を明らかにするとともに、盛土の要求性能や土質に応じた盛土の施工管理基準に関する検討を行うこととした。

### 2. 細粒分を多く含む盛土における被害事例

近年では細粒分を多く含む盛土の被災が複数確認されている。ここでは、過去地震により被災した道路盛土および宅地盛土等を対象に細粒分を多く含む盛

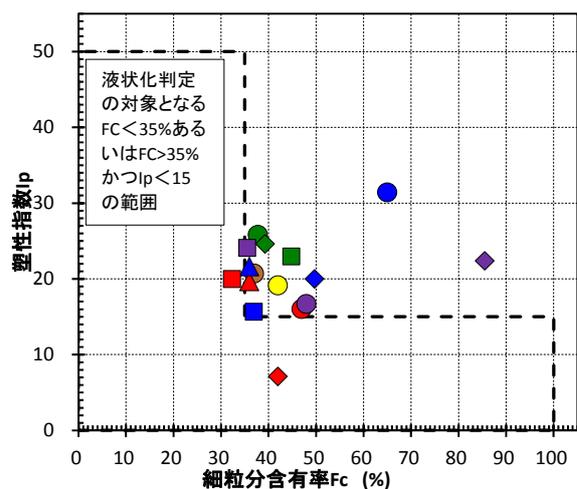


図-1 細粒分含有率を多く含む盛土の崩壊事例

土の被災事例について情報を収集し、整理を行った。図-1 に盛土の崩壊事例とその細粒分含有率および塑性指数を示す。細粒分含有率が高い砂質土で地震による崩壊が生じていることがわかる。これらの崩壊事例の多くは盛土の締固め度が低いことや崩壊箇所の泥濘化や地下水の湧出が確認されていることから、非排水状態での繰返しせん断による強度低下により崩壊した可能性が高い。このことから、細粒分を多く含む盛土の施工条件と繰返し荷重に対する強度特性の関係についての検証の必要性が伺える。

### 3. 細粒分の多い土に関する土質試験

関東地方整備局の協力により、実際の盛土材として利用された細粒分の多い土を2種類用意した。盛土材①、②の物理特性を表-1に示す。また、粒径加積曲線を図-2に示す。盛土材①は細粒分を40%程度含む材料であり、盛土材②は70%程度含む材料となっており、細粒分の割合が大きく異なる。その結果、図-3に示すとおり、締固め特性も違い、盛土材②の方がより最適含水比が高く、小さな最大乾燥密度となっている。

表-1 盛土材の物理特性

		盛土材①	土質②
土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.702	2.662
コンシステンシー特性	液性限界 %	NP	36.7
	塑性限界 %	NP	26.5
	Ip	NP	10.2
分類	分類名	細粒分質砂	砂質シルト(液性限界)
	記号	SF	MLS
最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	1.558	1.352

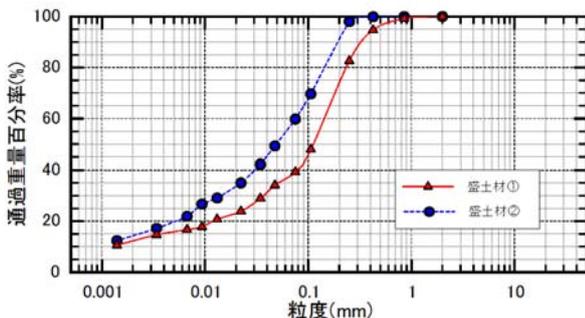


図-2 盛土材の粒径加積曲線

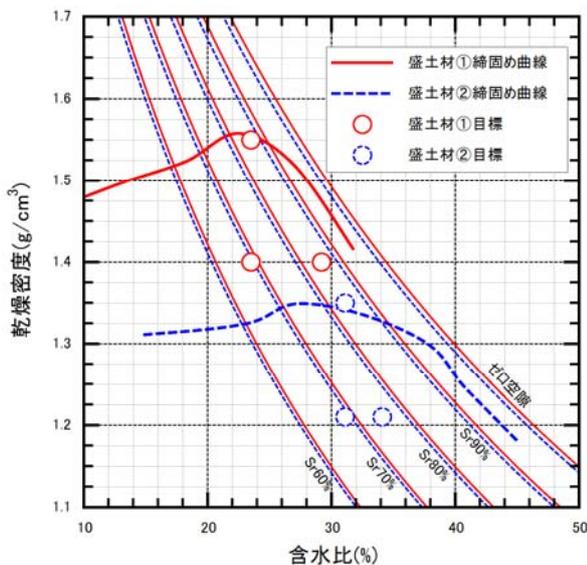


図-3 盛土材の締固め特性

まず、この2つの盛土材を対象に、締固め条件を大きく変化させた供試体を作成し、盛土の品質に関する指標である繰返し三軸強度比と透水係数を調べた(概略試験)。次に、盛土材①のみを対象として、より詳細に締固め条件を変化させ、同様に繰返し三軸強度比と透水係数を調べた(詳細試験)。

### 4. 概略試験

含水比と締固め度を大きく変化させ、表-3に示した組み合わせで、供試体を作成し、非排水繰返し三軸強度試験と透水試験を実施した。これらの締固め条件は、図-3上に○で表した。各盛土材について最適含水比で締固めた供試体を2本、最適含水率よりも高い含水比で締固めた供試体を1本作製した。

表-3 盛土材①、②の締固め条件

	盛土材①		盛土材②	
	含水比 %	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	含水比 %	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>
最適, Dc90%	23.5	1.40	31.1	1.21
最適, Dc100%	23.5	1.55	31.1	1.35
高含水, Dc90%	29.2	1.40	34.1	1.21

#### 4.1 供試体の作製方法

予め含水比調整を行い、十分に水をなじませた材料を締固め試験用のφ150mmの容器内で、高さ20mm毎に密度管理(投入質量と高さ管理)を行いながら突き固めによって土塊を作成した。突き固めの程度は、最適Dc90%では軽く押える程度、最適Dc100%では何度もしっかり押しこむ程度、高含水Dc90%は表面を均す程度である。高含水の材料は含水調整しただけで高い密度(Dc>90%)の塊の状態となっていたため、細かくほぐして、なるべく空気を含ませた状態となるよう容器の中に静かに入れないと所定の高さにならなかった。また、上部の層になるほど表面を均す作業中に弾力のある感触に変わっていった。細粒分の多い盛土材②の方が、このような傾向が顕著であった。測定はできていないが、過剰間隙水圧が上昇し、締固め施工における過転圧のような状態になっていたものと推測している。

作成した土塊は容器ごとビニール袋に入れて密閉した状態で放置し、1か月～2か月後に容器から抜き取り、整形し、非排水繰返し三軸試験及び透水試験を実施した。

## 4. 2 試験時の供試体の状態

供試体の整形後の初期状態及び非排水繰返し三軸試験の圧密（拘束圧 50kN/m<sup>2</sup>）後の状態を図-4 に示した。含水比が高いほど、目標密度が低いほど、初期状態の乾燥密度が大きく変化していた。土塊作成時に上昇した過剰間隙水圧が徐々に消散し、さらにサクシヨンの効果で、密度が大きくなったと考えられる。実際、含水比の高い土塊の入った容器からは、水がにじみ出ている様子が確認されている。しかし、盛土材②の高含水、Dc90%のように3割近くも密度が大きくなる理由は不明である。

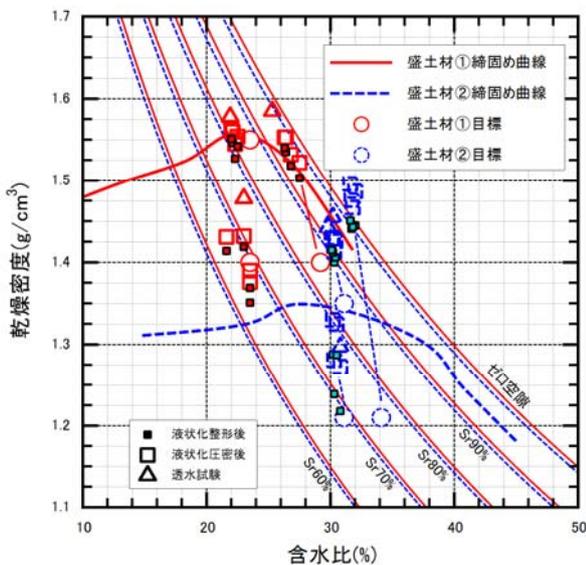


図-4 締固め特性と供試体の状態

土塊作成を施工時、試験時を供用時にあてはめて考えると、細粒分を多く含む土の場合には、高含水状態で施工することによって、放置するだけで、供用時には良く締まった盛土にすることも可能であると考えられる。一方で、盛土の性能は、密度だけで決まるものではないことから、非排水繰返し三軸試験と透水試験を実施した。

## 4. 3 非排水繰返し三軸試験

細粒分が多い土であるため、非排水繰返し三軸試験で過剰間隙水圧が十分に上昇する前にひずみ振幅が大きくなることが想定されたが、応力ひずみ関係に細粒分が多い土特有の形状が見られるものの、過剰間隙水圧は十分に上昇していることが確認できた。

繰返し三軸強度比と4本の供試体の圧密後の乾燥密度を平均した値の関係を図-5 に示す。盛土材①と②は全く違う材料であり、試験時の乾燥密度は、供試体作成時の目標乾燥密度から大きく変化したものもあ

るが、目標の締固め度によって2グループに分けることができる。

まず、目標の締固め度が90%のグループについて述べる。高含水状態で土塊を作成した方が、繰返し三軸強度比が大きくなっている。このグループ内の繰返し三軸強度比の増減は、乾燥密度の大小に対応しているように見える。土塊作成時から試験までの間で生じた密度の増加によって、繰返し三軸強度比も大きくなったことが推定されるが、その増加程度は僅かである。したがって、施工後に自然に締め固まることが実際に生じたとしても、この密度増加に過度な期待をしてはいけないことが分かる。また、このグループはいずれも繰返し三軸強度比は0.2前後であり、飽和した状態で地震動が作用すれば、大変形を起こしかねない。

次に、目標の締固め度が100%のグループであるが、繰返し三軸強度比が0.51と0.43といずれも十分に大きな値であり、地震動に対しても十分な抵抗が期待できる。90%と100%で数字上は僅かな違いであるが、繰返し三軸強度比の増加は劇的である。先に説明した目標締固め度が90%のグループと対比すると、繰返し三軸強度比の増減は、乾燥密度では説明できないことも分かる。密度調整時に土塊に加えたエネルギーの大きさが繰返し三軸強度比の増減に大きく影響することを示唆するものと考えられる。微視的には、粒子配列が締固めの程度によって大きく変わり、これが繰返し三軸強度比に影響したことが想像される。

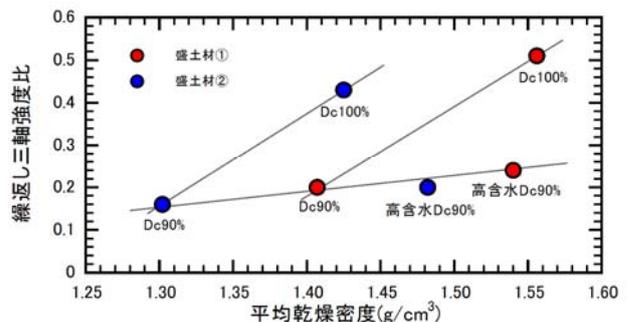


図-5 繰返し三軸強度比と平均乾燥密度の関係

## 4. 4 透水試験

透水係数と乾燥密度の関係を図-6 に示す。盛土材①、②ともに、試験時の乾燥密度が大きいほど、透水係数が小さくなっている。乾燥密度が大きくなると急激に透水係数が下がる傾向にも見える。盛土材①と②は、Creagerの方法で4倍程度透水係数が違う材料であるが、作り方ごとにほぼ同じ値となっている。盛土材の違いと間隙比の違いが相殺し、このような結果になっ

たことが考えられる。

このように透水係数に関しては、乾燥密度を大きくすることが重要であり、施工後に自然に生じる密度増加でもその効果は大きいと考えられる。

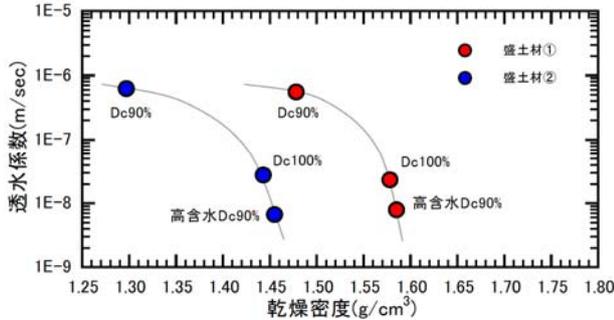


図-6 透水係数と乾燥密度の関係

## 5. 詳細試験

盛土材①を対象に、締固め条件を詳細に変化させ、繰返し三軸強度比と透水係数を調べた。

### 5.1 供試体の作製方法

締固め度を90%~105%まで、飽和度を60~90%までの間で変化させた、4×4の合計16種類の供試体を作製した。図-7に締固め曲線と併せて、★で供試体の締固め目標条件を示した。

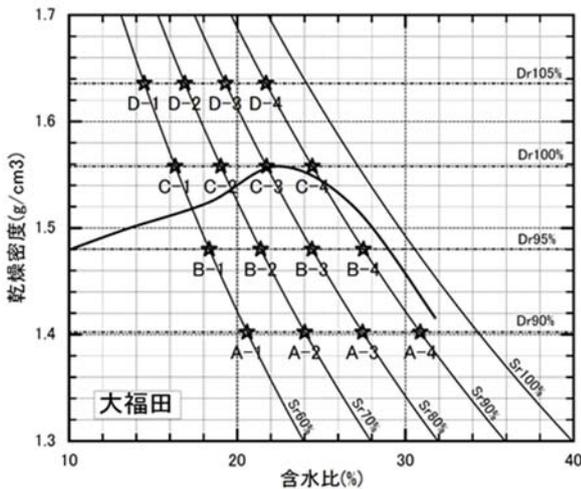


図-7 詳細試験の締固め目標条件

まず、試料を絶乾状態と仮定した上で目標含水率にするために必要な水を加え、攪拌し、なじませた試料を用いて、内径100mmの締固め用モールド内で供試体を作製した。実際には絶乾状態ではなく気乾状態であったため、目標の含水比よりも2~3%高い値となった。高さ20mm毎に密度管理を行い、高さ120mmの供試体を作製した。表面からの乾燥を防ぐためにラッ

プを被せたが、モールドと底板の間には、僅かな隙間があるため、余分な水は自然に排水される。飽和度が80%を超える供試体では、作製過程から水がにじみ出していた。作製後、2~3週間の間に、φ50mm×h100mmに整形し、試験を行った。

図-8、図-9は、供試体作製時と試験を行う直前における含水比及び締固め度の状態を比較したものである。供試体作製から試験を実施するまでの2~3週間の間で含水比・締固め度ともに変化している。特に、供試体作製時の含水比が高いものほど含水比は大きく減少しており、Sr=90%の供試体では3%程度の低下が見られる。また、作成時の締固め度が低く、飽和度が高いものほど、2~3週間経過後の試験前では、締固め度が高くなる傾向が見られた。一方、作成時の締め固め度が高く、飽和度が低い供試体では、作成後に膨張し、緩んだことが疑われる結果となった。

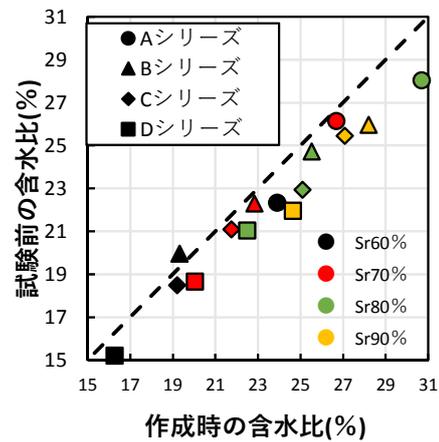


図-8 含水比の変化

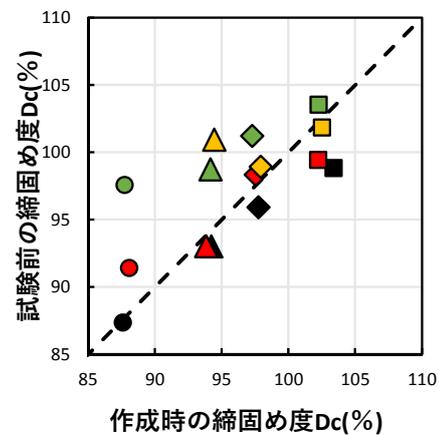


図-9 締固め度の変化

### 5.2 試験方法

繰返し三軸強度比は「繰返し段階载荷による試験法」

1)を用いて調べた。通常の非排水繰返し三軸試験(JGS0541)では、同一の試料から作製した4本の供試体を用意し、応力振幅を変化させてせん断試験を行うことにより、液状化強度曲線及び繰返し三軸強度比を求める。しかし、この方法では多くの供試体が必要になることに加え、供試体ごとの試験結果にバラツキが生じてしまう場合がある。一方、繰返し段階荷による試験法は、基本的には、非排水繰返し三軸試験と同じ作業工程であるが、繰返しせん断の方法のみ異なる。通常、繰返しせん断を一定応力幅で与え続けるところを、一定応力振幅10波を1段階として、徐々に応力振幅を増加させながら、数段階与える方法である。典型的な繰返し段階荷の試験結果を図-10に示す。この方法では、試験に使用する供試体が1本で済むことに加え、供試体ごとのバラツキの影響を受けないという利点がある。

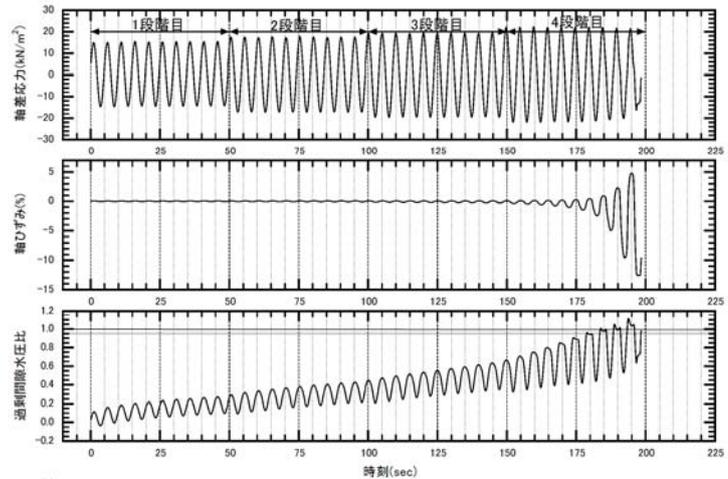


図-10 繰返し段階荷の典型的な試験結果

### 5. 3 試験結果

図-11に供試体作成時の締固め度と繰返し三軸強度比の関係を示した。締固め度の増加とともに繰返し三軸強度比が増加する傾向が見られるが、締固め度が高いほど飽和度による差が顕著に見られるようになる。同じ締固め度であっても、供試体作製時の飽和度が低いものほど繰返し三軸強度比は大きくなる傾向である。上述のとおり、供試体作成以降、締固め度と含水比が変化しているので、圧密後の締固め度と繰返し三軸強度比の関係を図-12に示した。例えばAシリーズ(Dc90%)では、圧密度の締固め度は90%弱から100%を大きく上回る範囲に分布しているが、繰返し三軸強度比は、いずれも0.2程度と小さい。概略試験と同様に、非排水繰返し三軸強度比に関しては、供試体作成時の状態が極めて重要であり、作成後の圧密等による密度変化が寄与しないことを表している。

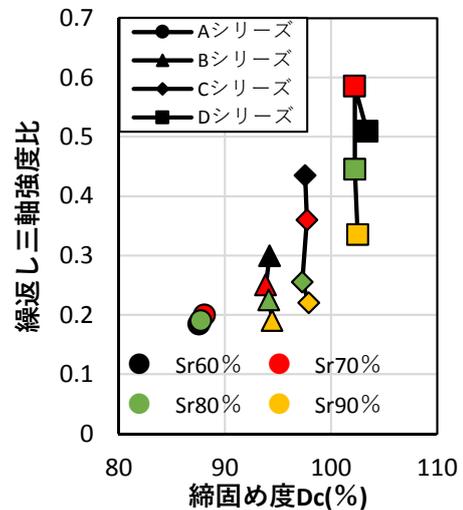


図-11 供試体作成時の締固め度と繰返し三軸強度比

図-13に供試体作成時の含水比と繰返し三軸強度比の関係を示す。含水比が小さいほど繰返し三軸強度比は大きくなる傾向が読み取れる。一方で、供試体の締固め度にかかわらず、含水比が大きくなるにつれて繰返し三軸強度比は0.2に収束している。供試体の作製時に高い含水状態の場合、圧密等により供試体作成後に密度が増加したとしても繰返し三軸強度比の増加は見込めないことがわかる。

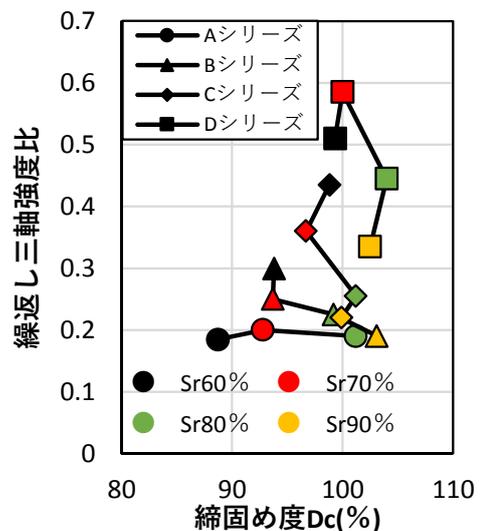


図-12 圧密後の締固め度と繰返し三軸強度比

透水係数と締固め度、飽和度、含水比の関係を図-13に示す。透水係数は、非排水繰返し三軸試験の繰返しせん断後に排水状態に切り替える際の、排水量の時刻

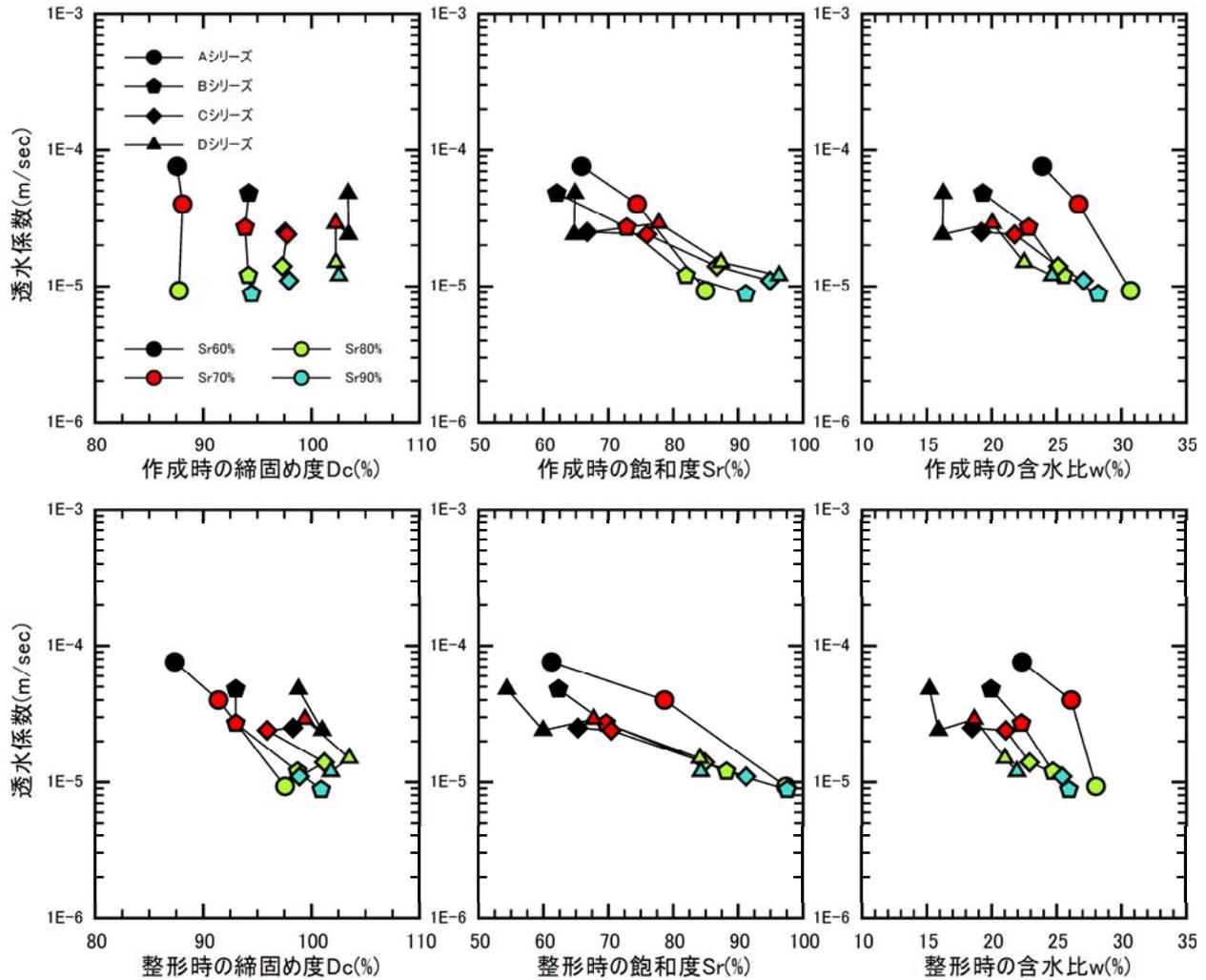


図-13 透水係数と締固め度、飽和度、含水比の関係

歴から算出したものである。そのため、繰返しせん断の影響を受けた透水係数であるが、透水性の大小の傾向程度は把握できると考えられる。一方、締固め度、飽和度、含水比は、作成時と整形時の2段階で示した。

作成時の締固め度では全く関係が見えないが、整形時の締固め度との関係では、締固め度が大きいほど透水係数が小さくなる傾向が見られる。概略試験と同様、作成後の密度増加が透水性には影響していることを表していると考えられる。ただし、この関係よりも、飽和度との関係の方が、右下がりの関係が明瞭であり、この場合には、作成時と整形時の差が見られない。これより、透水係数を管理するには、飽和度に着目した管理が必要であることが確認できた。

### 3. まとめ

本研究は、細粒分を多く含む盛土材の力学特性を明らかにするとともに、盛土の要求性能や土質に応じた

盛土の施工管理基準に関する検討を行うことを目的として、細粒分が多く含まれる土を用いて、締固め条件を変え、盛土の要求性能に直結する非排水繰返し三軸強度比と透水係数を調べた。その結果、非排水繰返し三軸強度比に関しては、施工時にできるだけ締固めを丁寧に行い、施工直後の締固め度を上げることが重要である。一方で、透水係数を下げるためには、施工時の飽和度をできるだけ大きくすることが重要であることが確認できた。

これらを両立するには、土質に応じた含水比管理と適切な締固め機械を用いた締固め施工が不可欠である。

### 参考文献

- 1) 石原雅規, 佐々木哲也: 繰返し段階載荷による三軸強度比の推定, 第73回年次学術講演会, 2018.8

# RESERCH ON EXECUTION MANEGEMENT STANDERDS BESED ON MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS CONTAINS MUCH FINE CONTENTS

Research Period : FY2015-2017

Research Team : Geology and geotechnical engineering research group (Soil mechanics and Dynamics research team)

Author : SASAKI Tetsuya

AZUMA Takuo

ISHIHARA Masanori

SASAKI Toru

**Abstract** : There are not quality management method and standards value depending on Required Performance of the structure. Therefor the uniform quality management methods and standards value based on degree of compaction is used when dike and road embankment is constructed. On the other hand, the embankment materials are not necessarily high quality and uniform. So, the cases which the soils which are hard to undertake construction are used for increase. This research was occurred to clarify mechanical properties of soil contains much fine contents and examination about execution management standards depending on Required Performance of embankment and quality of soil. Therefor this research focused on the cyclic triaxial strength and hydraulic conductivity, and researched about relations of these two indexes and degree of compaction.

**Key word** : embankment, fine contents, degree of compaction, cyclic triaxial strength, hydraulic conductivity