

不飽和砂質土の強度評価手法に関する基礎的研究

地盤工学研究室 河野 敬
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

土の強度定数 c , ϕ は、各種構造物の基礎の設計や地盤・地山の安定性において最も重要なパラメータである。強度定数は、砂や粘土といった様々な土の種類や環境条件によって異なることに加えて、間隙比、飽和度、応力履歴などの土の状態によって変化する。したがって、各種構造物の基礎の設計や地盤の安定性の検討に用いる土の強度定数を唯一に決定することは容易ではない。トンネル掘削などを行うたびに、実験結果を

基に沈下予測や切羽の安定についての解析を行うことは、時間的な問題が発生する。そこで、一般的に試験で使用されている豊浦砂や、その他様々な試料で試験を行うことで、不飽和砂質土の強度発現機構の一般化を試みる。その結果より、密度・細粒分含有率などの物理試験から、容易に粘着力や内部摩擦角などの地盤強度を算定できる指標の構築を目指す。本研究では、地下水位を下げることにより、容易に飽和度が変化する砂質土を主な対象とする。用いた試料は、純粋な砂で

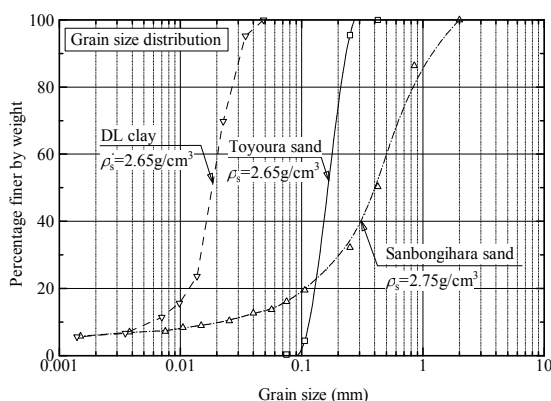


図.1 粒径加積曲線

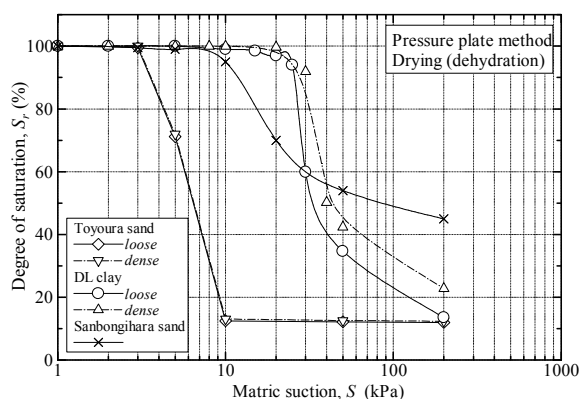


図.2 水分特性曲線

表.1 豊浦砂試験ケース

sample	density	condition	B.P., Suction (kPa)	p', p_{net} (kPa)	
Toyoura sand	loose ($e=0.84$)	saturated	B.P200	50	
		unsaturated	S 10		
		unsaturated	S 50		
		unsaturated	S200		
		saturated	B.P200		
		saturated	S 10		
	dense ($e=0.66$)	unsaturated	S 50	100	
		unsaturated	S200		
		saturated	B.P200		
		unsaturated	S 10		200
		unsaturated	S 50		
		unsaturated	S200		

表.2 DL クレイ試験ケース

sample	density	condition	B.P., Suction (kPa)	p', p_{net} (kPa)
DL clay	loose ($e=0.95$)	saturated	B.P200	50
		unsaturated	S 30	
		unsaturated	S 50	
		unsaturated	S200	
		saturated	B.P200	
		unsaturated	S10*	
	dense ($e=0.75$)	unsaturated	S20*	100
		unsaturated	S 30	
		unsaturated	S40*	
		unsaturated	S50	
		unsaturated	S200	
		saturated	B.P200	
	dense ($e=0.75$)	saturated	B.P200	200
		unsaturated	S 30	
		unsaturated	S 50	
		unsaturated	S200	

(*印:denseのみ実施)

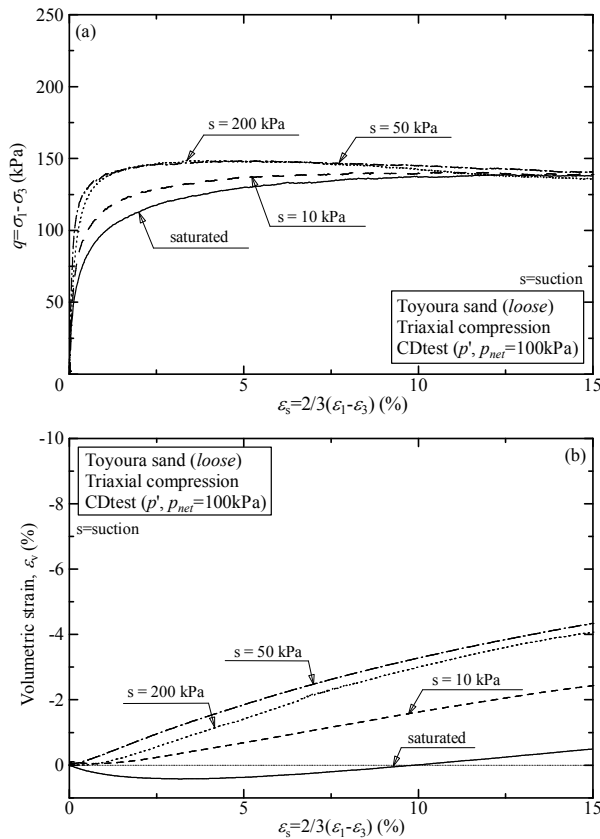


図3 ゆるい豊浦砂の三軸圧縮挙動
 (a) 応力-ひずみ関係
 (b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

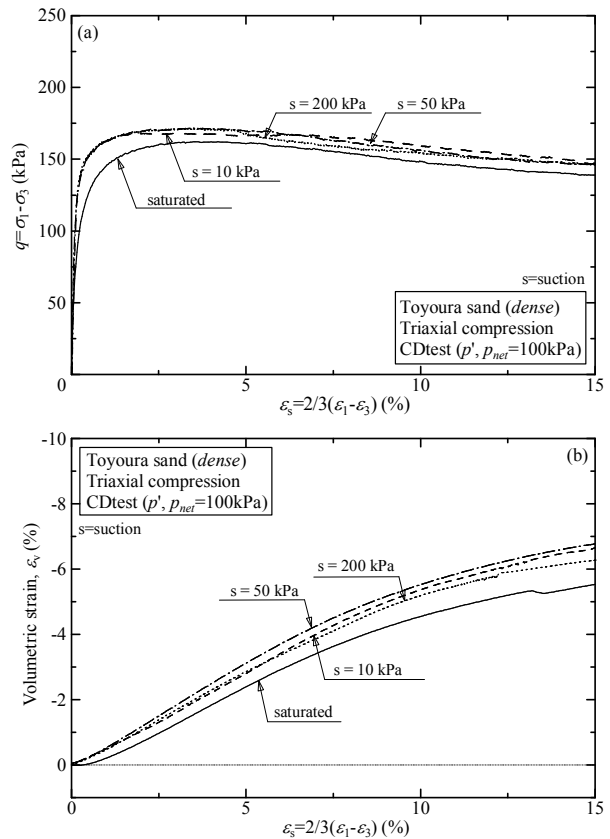


図4 密な豊浦砂の三軸圧縮挙動
 (a) 応力-ひずみ関係
 (b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

ある豊浦砂，非塑性シルトである DL クレイ，実際の施工現場である東北新幹線三本木原トンネルより採取した砂を用いて試験を行った。

2. 試験試料

試験に用いた試料は，豊浦砂，DL クレイ，東北新幹線トンネル三本木原トンネルより採取した砂である。図.1 に，各試料の粒径加積曲線と土粒子密度を示す。図.1 より，豊浦砂は土粒子密度が 2.65g/cm^3 となっており，ほぼ中砂で構成された，純粋な砂であることがわかる。DL クレイは土粒子密度 2.65g/cm^3 ，ほぼシルトで構成された非塑性細粒分試料である。三本木原砂は，乾燥させた後 2mm ふるいを通過したものを試験試料としており，砂が大部分を占めているが，細粒分も 20% 弱含まれており，広い粒径分布の試料となっている。

3. 試料作製方法

現場の様々な密度に対応できるように，ゆる詰め供試体，密詰め供試体を作製し，試験を行うこととした。豊浦砂は含水比を 5% 程度に調整した後，突き棒で所定の間隙比となるように作製した。DL クレイは，含水比を 10% 程度に調整した後，所定の間隙比となるように突き棒で作製した。比較対象の三本木原砂は，含水比を 10% 程度に調整した後 5 層に分け，所定の間隙比となるようにランマーによる打撃で作製されている。

4. 試験方法

各試料ともに，2種類の間隙比の異なる供試体を用いて試験を行った。飽和三軸圧縮試験は，三軸試験装置に設置した供試体を，二重負圧法を用いて飽和させた。 $p' = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ は， 50kPa ， 100kPa ， 200kPa の3ケースであり，バックプレッ

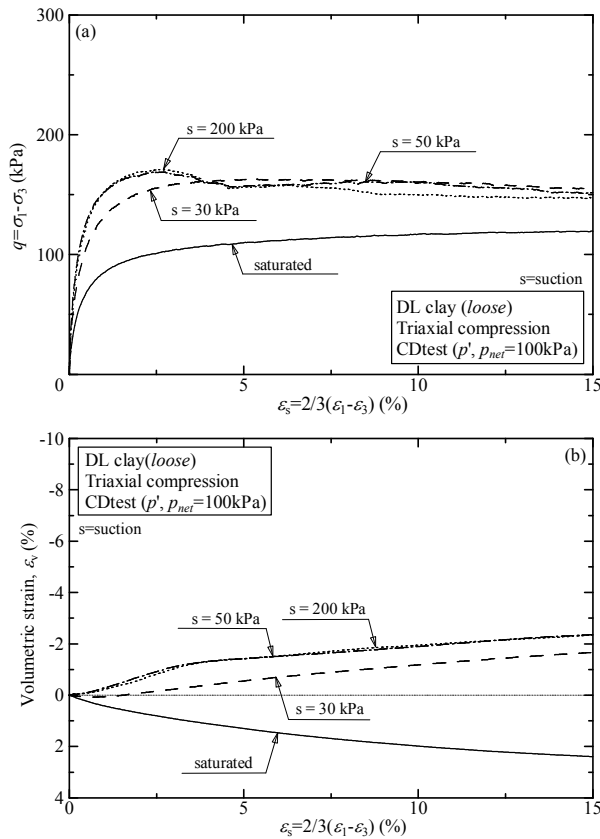


図.5 ゆるい DL クレイの三軸圧縮挙動

(a) 応力-ひずみ関係

(b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

シャー(B.P)は 200kPa 載荷した. 軸ひずみ速度 0.04%/min, p' 一定のもと, 排水条件でせん断を行った.

不飽和砂の三軸圧縮試験に関しては, p_{net} が 50kPa, 100kPa, 200kPa の各ケースで, サクシオンをかけて供試体の不飽和化を行った. 軸ひずみ速度は 0.01%/mm, $p_{net} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 - u_a$ 一定, 排気排水(サクシオン一定)条件でせん断を行った.

表.1 に豊浦砂の, 表.2 に DL クレイの試験ケースを示す.

5. 試験結果

5.1 豊浦砂の試験結果

図.3 に, ゆる詰め供試体の試験結果を示す.

図.3(a)は, サクシオン 50kPa, 200kPa では若干ピークが見られるが, せん断ひずみが大きくなるにつれて緩やかに強度軟化している. 図.3(b)より,

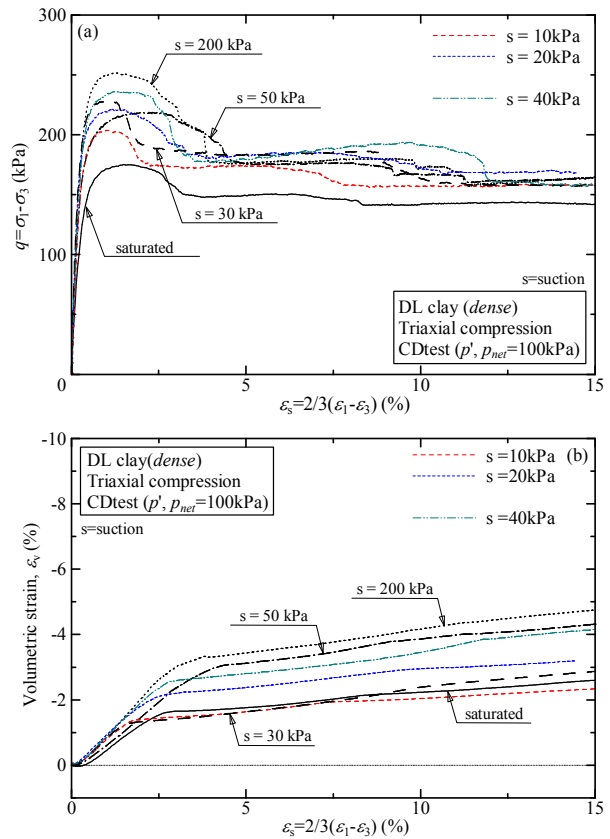


図.6 密な DL クレイの三軸圧縮挙動

(a) 応力-ひずみ関係

(b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

ゆる詰め供試体は飽和試験では負のダイレイタンスが発生し, 不飽和試験では正のダイレイタンスが生じている. また, サクシオンが大きいと膨張傾向を示す.

図.4 に, 密詰め供試体の試験結果を示す.

図.4(a)より, 飽和・不飽和試験ともにピークが現れた後に軟化傾向を示し, せん断ひずみが $\epsilon_s = 10\%$ 程度で定常状態を示している. 図.4(b)より, 飽和・不飽和試験ともにせん断開始直後より正のダイレイタンスが発生している.

5.2 DL クレイの試験結果

図.5 に, ゆる詰め供試体の試験結果を示す.

図.5(a)は, 飽和試験はひずみ硬化型を示し, 不飽和試験では, サクシオン 30kPa でははっきりとしたピークを見ることができないが, サクシオン 50kPa, 200kPa でははっきりとしたピークが現れている. ピークを迎えた後, 大きく強度軟化し,

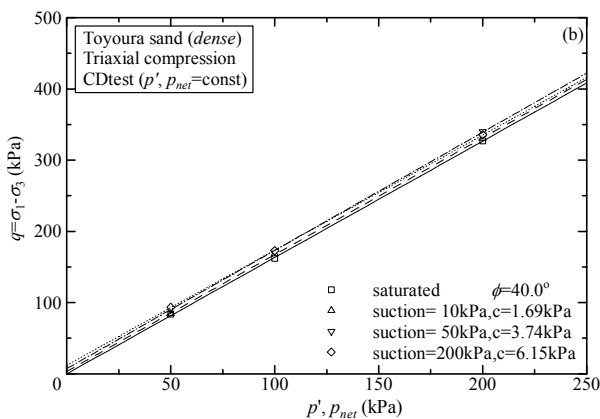
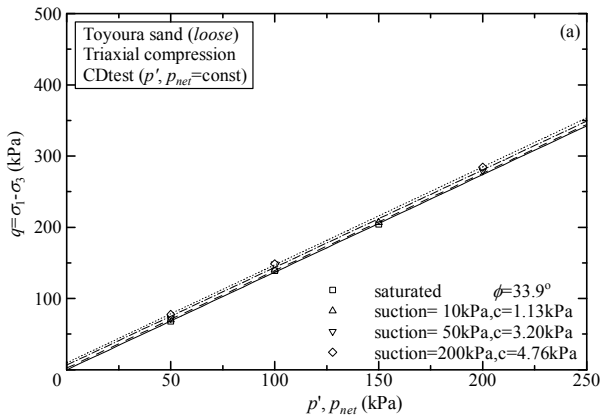


図.7 豊浦砂の破壊線

(a) ゆる詰め供試体 (b)密詰め供試

その後定常状態となっている。図.5(b)より，飽和試験では負のダイレイタンスが発生し，不飽和試験では正のダイレイタンスが発生している。また，サクシオン 50kPa と 200kPa は同じような挙動を示している。

図.6 に，密詰め供試体の試験結果を示す。

図.6(a)では，不飽和試験サクシオン 30kPa, 50kPa, 200kPa に加えて，サクシオン 10kPa, 20kPa, 40kPa の試験結果もプロットした。飽和試験より不飽和試験の方が，ピーク値が大きくなっている。また，サクシオンが大きいくほど，ピーク値が大きくなっていく。図.6 (b)より，サクシオンが大きくなるにつれて膨張傾向が強くなっていくが，サクシオンが小さい場合，飽和試験と同じような曲線の傾向であることがわかる。

6. せん断強度

6.1 豊浦砂のせん断強度

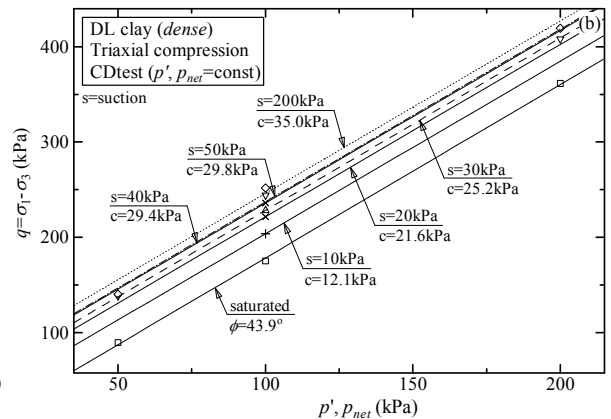
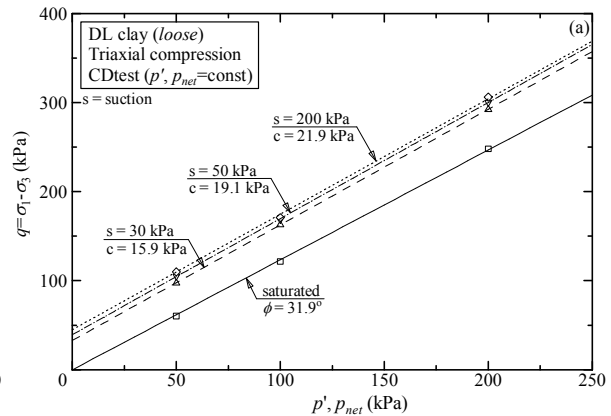


図.8 DL クレイの破壊線

(a)ゆる詰め供試体 (b) 密詰め供試体

図.7 に豊浦砂の破壊線を示す。

図.7(a)のゆる詰めの破壊線を見ると，サクシオンが大きくなるにつれ粘着力が増加している。しかし，サクシオン 200kPa でも粘着力の増加は 4.8kPa と小さい。サクシオン 10kPa では粘着力は 1.1kPa と小さく，サクシオンによる強度増加がほとんど得られていない。

図.7(b)の密詰めの破壊線においても，サクシオン 10kPa での粘着力は 1.7kPa と若干ゆる詰めよりは大きい，サクシオンによる強度増加は小さい。密になるほど豊浦砂の破壊線の傾きは大きくなっている

6.2 DL クレイのせん断強度

図.8 に DL クレイの破壊線を示す。

図.8(a)のゆる詰め供試体の破壊線では，飽和試験と不飽和試験では約 15~20kPa の強度差があり，大きく強度が異なる。サクシオン 50kPa, 200kPa

にはそれほど大きな強度差が見られない。そのため、サクシオン 50kPa でもサクシオン 200kPa と同じ脱水効果が期待できるといえる。比較的粒径がそろっているため、あるサクシオンになると急激に脱水され、その後のサクシオンによる差が生じないと考えられる。

図.8(b)については、飽和試験と不飽和試験で約 12kPa~35kPa 程度の強度差がある。密になるほど DL クレイの破壊線の傾きは大きくなっている。

7. 地盤強度指標

7.1 粘着力とサクシオン

図.9(a)に豊浦砂, (b)に DL クレイ, (c)に三本木原砂の粘着力とサクシオンの関係を示す。どの試料, 密度においても, サクシオンが大きければ粘着力も大きくなる傾向が見て取れる。また, DL クレイと三本木原砂では, 空気侵入値 AEV までは, 内部摩擦角 ϕ に沿って粘着力が増加している。豊浦砂では, 空気侵入値 AEV が 3kPa と低く, サクシオン 3kPa で試験を行っていないが, 豊浦砂でも AEV 以下のサクシオンでは, 内部摩擦角 ϕ に沿って粘着力が増加すると推察できる。よって, 比較的短時間で試験を終えることのできる飽和三軸試験で内部摩擦角 ϕ を求め, 保水性試験で空気侵入値 AEV を求めれば, おおよその粘着力を推量することができる。

7.2 内部摩擦角と間隙比

図.10 に, 内部摩擦角と間隙比の関係を示す。すべての試料で, 間隙比が小さいほど, 内部摩擦角が大きくなることがわかる。

7.3 粘着力と間隙比

図.11 に, 粘着力と間隙比の関係を示す。豊浦砂では, 若干間隙比が大きくなると粘着力が小さくなっているが, その差は小さい。DL クレイでは, 各サクシオンともほぼ同じ角度で, 間隙比が大きくなるにつれて粘着力が低下している。三本木原砂では, サクシオン 10kPa が, 他のサクシオンに比べて, 粘着力の低下が小さい。

7.4 粘着力と細粒分含有率の関係

図.12 に, 粘着力と細粒分含有率の関係を示す。図.12 より, 細粒分が多くなるほど, 供試体密度が大きくなるほど, 粘着力が大きくなることがわかる。

7.5 粘着力と飽和度の関係

図.13 に, 粘着力と飽和度の関係を示す。全ての試料が, 図.2 水分特性曲線と似た傾向を示している。DL クレイでは, AEV 以降は飽和度が低下

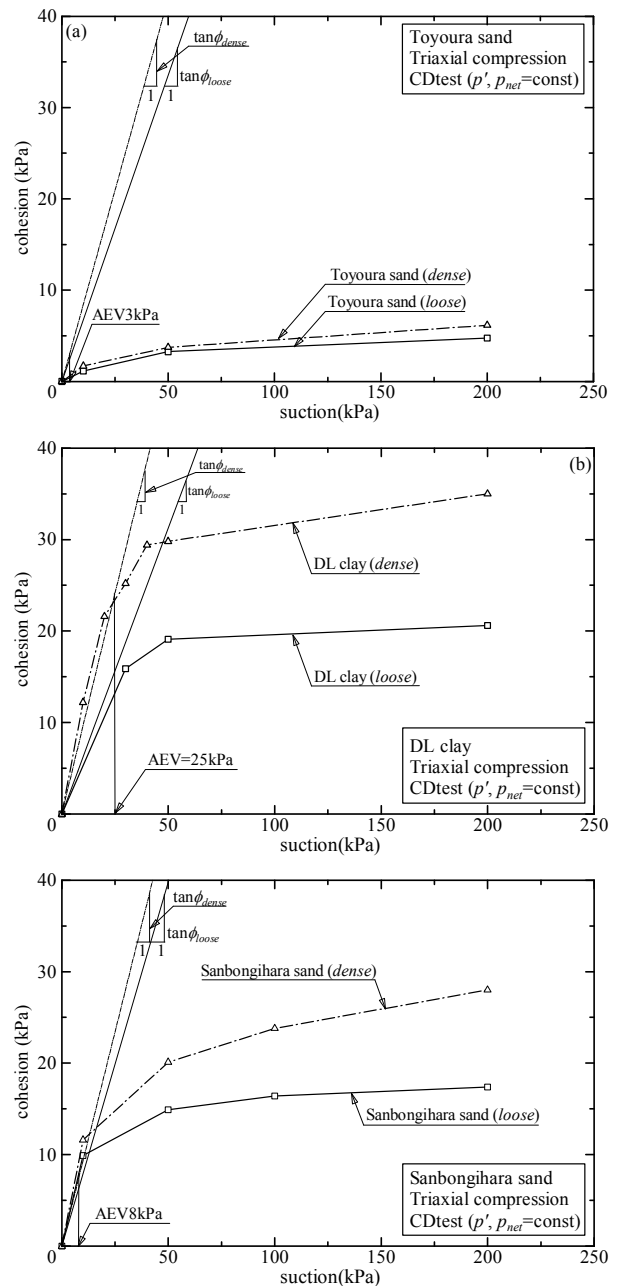


図.9 粘着力とサクシオンの関係

(a) 豊浦砂, (b) DL クレイ, (c) 三本木原砂

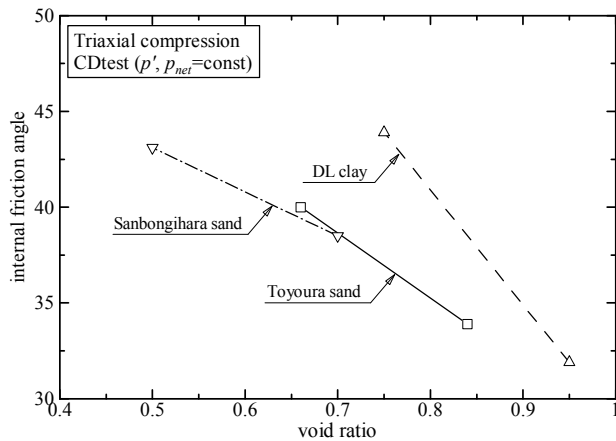


図.10 内部摩擦角と間隙比の関係

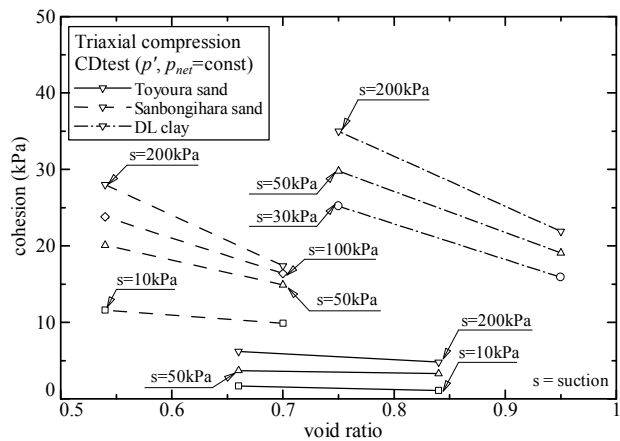


図.11 粘着力と間隙比の関係

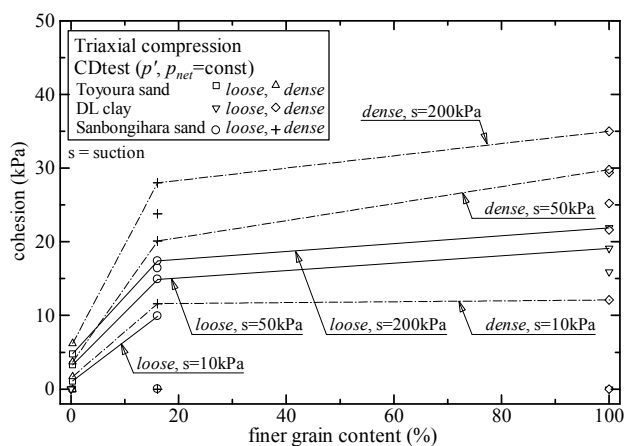


図.12 粘着力と細粒分含有率の関係

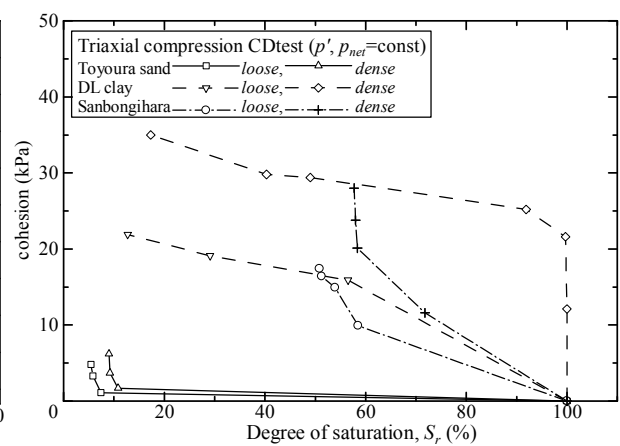


図.13 粘着力と飽和度の関係

しても、AEV 以前と比べると粘着力の増加が小さい。豊浦砂は、AEV が 3kPa と低く、粘着力の増加自体が小さい。三本木原砂では、飽和度が低下するにしたがって AEV 以降も粘着力が増加している。これは、豊浦砂、DL クレイは粒径が均一であることに比べ、三本木原砂は粒度が良いためだと考えられる。

8. おわりに

- 1) 応力-ひずみ関係において、ゆるい砂、サクシオンが小さいほどピークが不明確である。また、密になるほど、サクシオンが大きいほどピークが明確になり、後に強度が軟化傾向を示す。
- 2) ゆるい砂の飽和試験では負のダイレイタンスが発生する。不飽和試験、密な砂では正のダイレイタンスが発生する。密な砂ほど、サク

シオンが大きいほどダイレイタンスが大きい。

- 3) 密度が等しければ、飽和砂と同一サクシオンの不飽和砂の内部摩擦角 ϕ は、ほぼ平行となった。
- 4) 不飽和土において、細粒分が多く、密度が大きく、サクシオンが大きくなるほど粘着力が増加した。
- 5) サクシオンが空気侵入値 AEV までは、飽和土の内部摩擦角 ϕ に沿って粘着力が大きくなっていく。AEV 以降は、粒度が均一であれば粘着力の増加は小さく、粒度が良ければ粘着力の増加は大きい。この粘着力の増加は、粒度や水分特性曲線と似た傾向を示している。

以上の結果を用いることにより、実施工の管理図等の作成が容易になることが期待できる。