

東北新幹線トンネル施工現場より採取した砂の不飽和せん断特性

地盤研究室 三村 八一
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

近年、わが国では局地的な集中豪雨による地盤災害が発生し、自然斜面や盛土などの土木構造物が被害を被っている。また、東北新幹線トンネル施工区間では、掘削工事中にトンネルが陥没した。これは、地下水の上昇が原因だと言われている。このような地盤や切羽の崩壊を予防することは重要である。本研究では、切羽の安定性について検討するため、東北新幹線（八戸－新青森間）三本木原トンネルより採取した砂を用いて飽和砂および不飽和砂の三軸圧縮試験を行った。密度の異なる3種類の供試体を作製し、サクシオンを変え、それぞれのせん断特性について調べた。

これらの試験結果を利用して、トンネル切羽の安定解析を実施した。さらに、不飽和土の強度試験を実施しなくても、強度定数の概略値が利用できるように、細粒分調整を行った砂質土について強度定数を求めた。

2. 試験試料について

試験には、東北新幹線三本木原トンネルより採取した砂を使用した。乾燥させた後、2mmふるいを通したものを試験試料とした。物性値を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。表-1より、土粒子密度は 2.745g/cm^3 であり、砂としては若干大きめの値である。砂の最大密度・最小密度試験より、最大間隙比 1.150、最小間隙比 0.671 という結果が得られた。JISA1224 に基づいて行ったが、細粒分が 20%弱含まれているので、試験方法の適用範囲外となる。また、図-1 より三本木原砂は砂が大部分を占めているが、細粒分も 20%弱含まれていることがわかる。

3. 試料作製方法

ゆる詰め、中密詰め、密詰めの3種類の供試体

表-1 試料の物性値

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.745
最大間隙比 e_{\max}	1.150
最小間隙比 e_{\min}	0.671

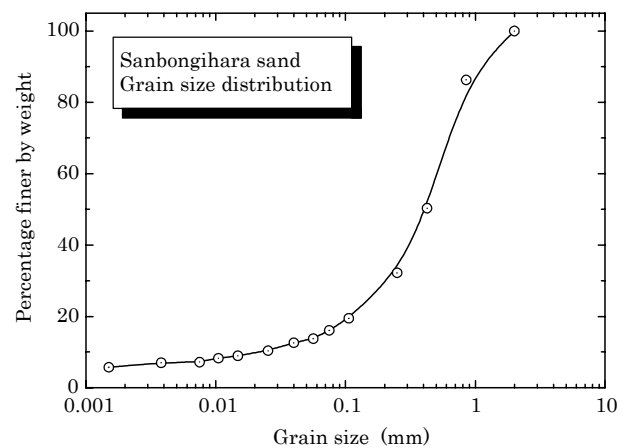


図-1 三本木原砂の粒径加積曲線

を作製し試験を行うこととした。原位置での試料は相対密度 100%を越えており、試料が乾燥している状態では十分に密な供試体を作製することができない。そこで、供試体作製は試料の含水比を 10%に調整し 5 層に分け、ランマーによる打撃で締固めて作製した。それぞれの落下高さや打撃回数（1層あたり）を以下に述べる。まず、ゆる詰めはランマー落下高さ 10cm・打撃回数 10 回、中密詰めはランマー落下高さ 15cm・打撃回数 15 回、密詰めはランマー落下高さ 20cm・打撃回数 20 回とした。

4. 試験方法

3 種類の間隙比の異なる供試体を用いて試験を行った。まず、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。 $p'=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3$ (平均有効主応力) は、50kPa、100kPa、150kPa の 3 ケースであり、バックプレッ

表-2 試験ケース

density	p', p_{net} (kPa)	suction(kPa)
loose, medium dense, dense	50,100,150	saturated
		10
		50
		100
		200

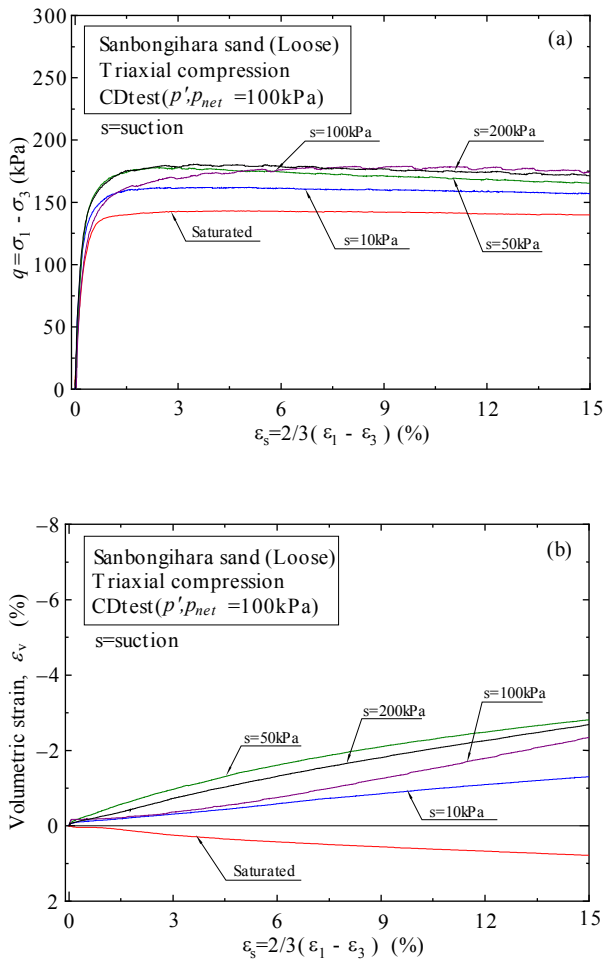


図-2 ゆるい三本木原砂の三軸圧縮挙動
(a) 応力-ひずみ関係, (b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

シャー (B.P) は、200kPa 载荷した。軸ひずみ速度 $0.0417\%/mm$ 、 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, 150kPa の各ケース毎に、サクシオン 10kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa の4ケースで供試体の不飽和化を行った。軸ひずみ速度は $0.0104\%/min$ 、 $p_{net}=(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 - u_a$ は一定、排気排水 (サクシオン一定) 条件でせん断を行った。

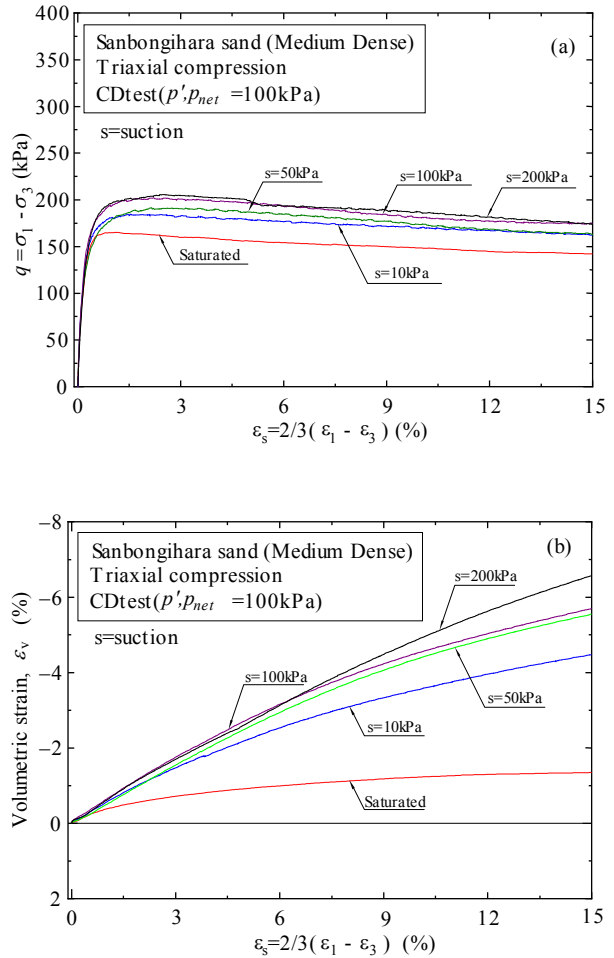


図-3 中密三本木原砂の三軸圧縮挙動
(a) 応力-ひずみ関係, (b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

以上の各試験ケースは表-2 に示す通りである。

5. 試験結果

5.1 せん断特性

図-2 にゆる詰め供試体の三軸圧縮試験結果を示す。図-2(a) は拘束圧に関係なく緩やかな曲線を描き、サクシオンが大きいと少し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が軟化傾向を示している。図-2(b) より、ゆる詰め供試体は飽和試験では負のダイレイタンスーが発生し、サクシオンが 10kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa では正のダイレイタンスーが生じている。このことから、サクシオンが大きいと膨張傾向を示すと言える。

図-3 に中密詰め供試体の三軸圧縮試験結果を示

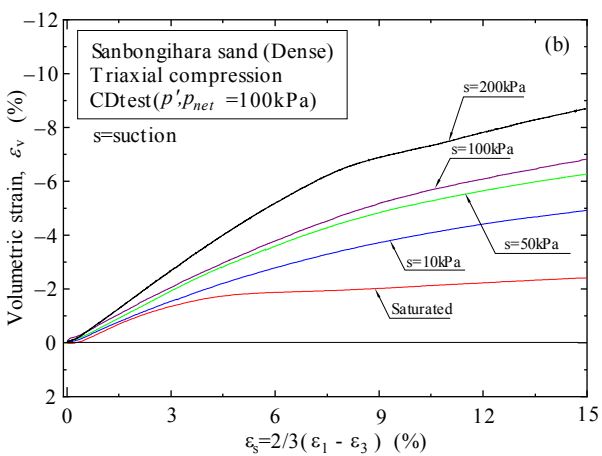
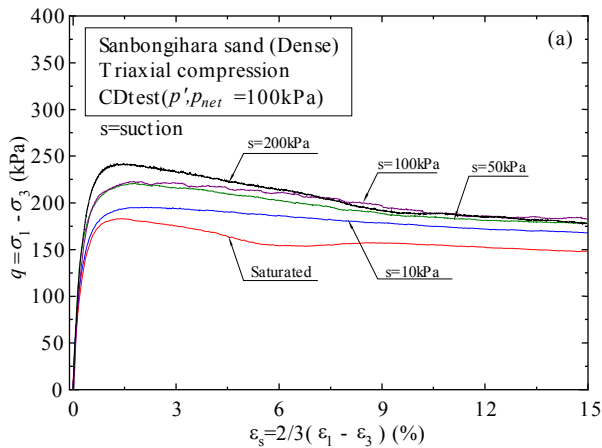


図-4 密な三本木原砂の三軸圧縮挙動
(a) 応力-ひずみ関係, (b) 体積ひずみ-せん断ひずみ関係

す。図-3(a)より、サクシオンが大きいほど強度も大きいことがわかる。図-3(b)からゆるい砂と同様にサクシオンが大きいとダイレイタンスーも大きくなっていることがわかる。

図-4 に密詰め供試体の三軸圧縮試験結果を示す。図-4(a)より、明確なピークが現れ、せん断ひずみが $\epsilon_s = 10\%$ くらいで定常状態を示している。図-4(b)より、 $s = 200\text{kPa}$ 以外は、中密詰め供試体のダイレイタンスーの大きさと同じような大きさであり曲線の傾向も似ていることがわかる。

5. 2 せん断強度

図-5(a), (b), (c)にゆる詰め, 中密詰め, 密詰め破壊線を示す。まず、サクシオンの大きさでまとめた不飽和土の破壊線は、飽和土の破壊線とほぼ平行になっている。図-5(c)の密詰めにおいて

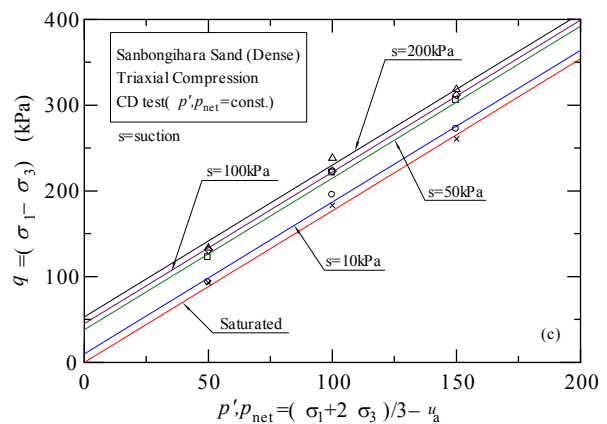
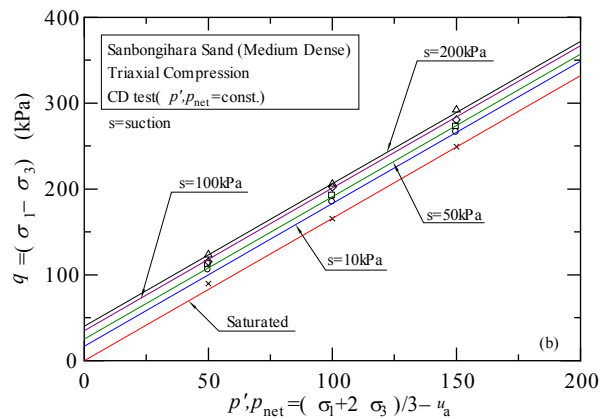
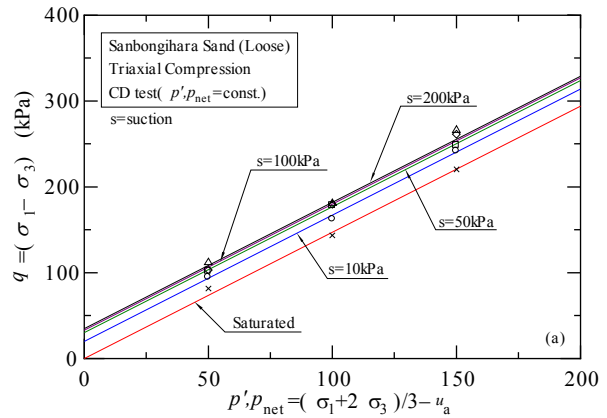


図-5 三本木原砂の破壊線

(a) ゆるい場合, (b) 中密の場合, (c) 密な場合

の破壊線では、飽和土と $s = 10\text{kPa}$ の場合にほとんど差がない。密になるとサクシオンが低い場合に水が十分排水されず、不飽和化の程度が低いと考えられる。密になるほど三本木原砂の破壊線の傾きは大きくなっている。強度定数は以下の結果が得られた。ゆるい砂の内部摩擦角 ϕ は約 38.5° , 中密詰めは約 40.5° , 密詰めは約 43.1° であった。 $s = 200\text{kPa}$ の粘着力 c はゆる詰めの場合で 17kPa , 中

密詰めで 20kPa, 密詰めで 28kPa ほどである。

5.3 内部摩擦角と粘着力について

図-5 に粘着力とサクシジョンの関係を示す。どの密度でもサクシジョンが大きければ粘着力も大きくなる傾向が見て取れる。図-6 に、内部摩擦角と間隙比の関係を示す。間隙比が小さいほど内部摩擦角は大きい。以上よりサクシジョンや間隙比の大きさによって供試体の強度が変わり、これら进行评估していくことが必要であることがわかる。

6. 強度定数の概略値について

既往の研究では、地下水位の影響として地下水位のみを考慮していた。しかし、本研究より、不飽和土の c (粘着力), ϕ (内部摩擦角) を考慮して解析を行うと、既往のものより数倍安定した切羽になるという結果が得られた。これより、地下水位の低下により、切羽の高い安定性が得られることがわかる。しかしながら、毎回不飽和土の力学試験を実施して、強度特性を得るのは、多大な時間と労力を要する。そこで、細粒分含有率の違う砂を使用して、サクシジョンと強度の関係を求めた。これにより、試験をしなくても、強度定数の概略値が推定できる。

今回は、以下に試料と試験方法及び試験結果について述べる。

豊浦標準砂を用いて、モールドを組んでゆるい ($e=0.88$)・中密($e=0.8$)・密($e=0.7$)の 3 種類の供試体を作製した。中密の破壊線を図-8 に示す。図から、強度が増加し不飽和化の効果が得られたといえる。また、強度定数は、ゆるい詰めの場合 ϕ は約 33.6° 、中密詰めは約 35° 、密詰めは約 37° となった。サクシジョン 10kPa の c はゆるい詰めの場合で 2.4kPa, 中密詰めで 3.4kPa, 密詰めで 4.5kPa である。

7. おわりに

- 1) 応力-ひずみ関係において、ゆるい砂でありサクシジョンが小さい程ピークが不明確で、密でありサクシジョンが大きい程ピークが明確になり、後に強度が緩やかに軟化傾向を示す。
- 2) ゆるい砂でありサクシジョンが小さい程ダイレイタンスーが小さく、密な砂でありサクシジョンが

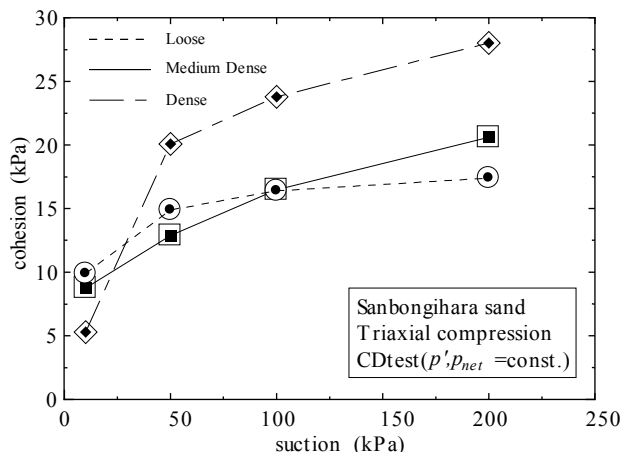


図-6 粘着力とサクシジョンの関係

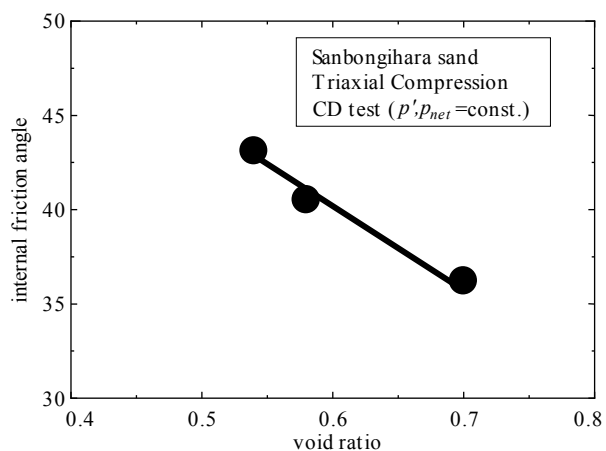


図-7 内部摩擦角と間隙比の関係

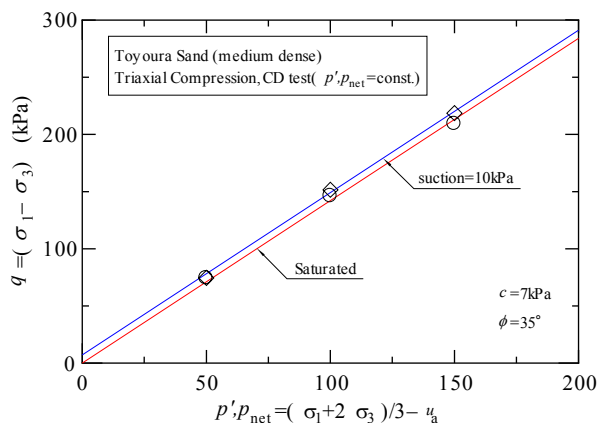


図-8 豊浦砂の破壊線

大きい程ダイレイタンスーが大きくなる。

- 3) 密度で内部摩擦角が、サクシジョンで粘着力が増加する結果が得られた。
- 4) 不飽和砂質土の強度定数の概略値を推定するための基礎データが得られた。