

東北新幹線トンネル施工現場より採取した砂の力学特性

地盤工学研究室 北村 秀一
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

本研究では、現在着工中の東北新幹線（八戸～新青森間）において、六戸トンネルより採取した砂を用いて密詰めとゆるぎめの供試体をそれぞれ間隙比が一定になるように作製し、同一の排水条件で飽和砂の三軸圧縮試験を行い、せん断特性を調べた。また、クリープ試験も行ってさまざまなひずみレベルにおけるクリープ挙動についても検討した。これらの結果は、現在行われているトンネル掘削に伴う地表面沈下シミュレーション解析に必要なパラメータとなる。密な砂のせん断挙動から、沈下勾配の適切な評価が期待される「ひずみ軟化を考慮した非線形解析」（ひずみ軟化モデル）について、その実用化を検討し、また別途、弾性定数のひずみ依存性を考慮した変形解析も行う予定である。

2. 試料の物性値

試験には、東北新幹線六戸トンネル施工現場より採取した砂を使用した。原位置より採取した六戸砂を乾燥させた後、2mmふるいを通過したものを試験試料とした。表-1に土粒子の密度、最大・最小間隙比を、図-1に粒径加積曲線を示す。表-1より、土粒子の密度は 2.710g/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・最小密度試験はJIS A 1224に基づいて行ったが、原位置密度が相対密度100%を越えるなど、最大密度試験では試料があまり密に詰まらなかった。これはJIS A 1224の適用範囲として、細粒分が5%以下で最大粒径が2.00mm以下と定められているが、図-1よりわかるように六戸砂には細粒分が10%強含まれているためではないかと考えられる。

表-1 試料の物性値

土粒子の密度 ρ_s	2.710(g/cm^3)
最大間隙比 e_{\max}	1.449
最小間隙比 e_{\min}	0.885

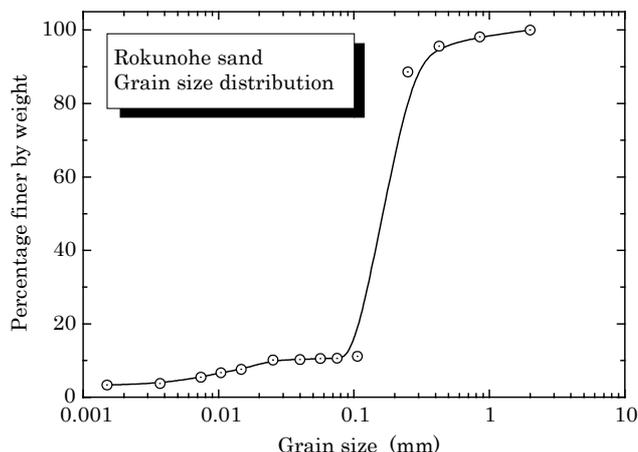


図-1 六戸砂の粒径加積曲線

3. 試料作製方法

密詰めとゆるぎめの2種類の供試体を作製し試験を行った。試料は原位置では相対密度100%を越えており、試料が乾燥している状態での打撃振動締め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、密な供試体は試料の含水比を10%に調整してランマーを20cmの高さから自由落下させ、1層20回、5層で突固めをして作製した。ゆるい供試体は、三軸試験機にモールドを組み、漏斗を用いて乾燥試料を堆積させる方法を用いた。

4. 試験方法

供試体は二重負圧法を用いて飽和させ、バックプレッシャーはすべての試験ケースにおいて、200kPa 載荷した。 $p' = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$ (平均有効主応力)は、25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPaの4ケースである。試験は軸ひずみ速度0.0417%/min、 p' 一定のもと、排水条件でせん断を行った。試験ケースは表-2に示す。

表 - 2 試験ケース

	P'(kPa)	B.P.(kPa)
Dense	25	200
	50	
	100	
	200	
Loose	25	
	50	
	100	
	200	

5. 試験結果

5. 1 せん断特性

図-2 に密な六戸砂の三軸圧縮試験結果を示す. 図-2(a)の応力 - ひずみ関係は, ピーク値を示したあと, ゆるやかに軟化し, その後ほぼ定常状態に至っている典型的なひずみ軟化型である. 拘束圧が大きいほどピーク値が大きいことは明らかであり, 拘束圧が小さいほどピーク値を早い段階で示し, 定常状態に至るのも早い傾向がある. また, 図-2(b)の体積ひずみ - せん断ひずみ関係を見ると, 拘束圧が小さいほど

ダイラタンシーが大きくなり, 拘束圧が小さいほど膨張挙動を示している.

図-3 にゆるい六戸砂の三軸圧縮試験結果を示す. 図-3(a)の応力 - ひずみ関係は, 明確なピークを示さない典型的なひずみ硬化型である. また, 図-3(b)では常に負のダイラタンシーを示し, 拘束圧が大きいほど収縮挙動を示している.

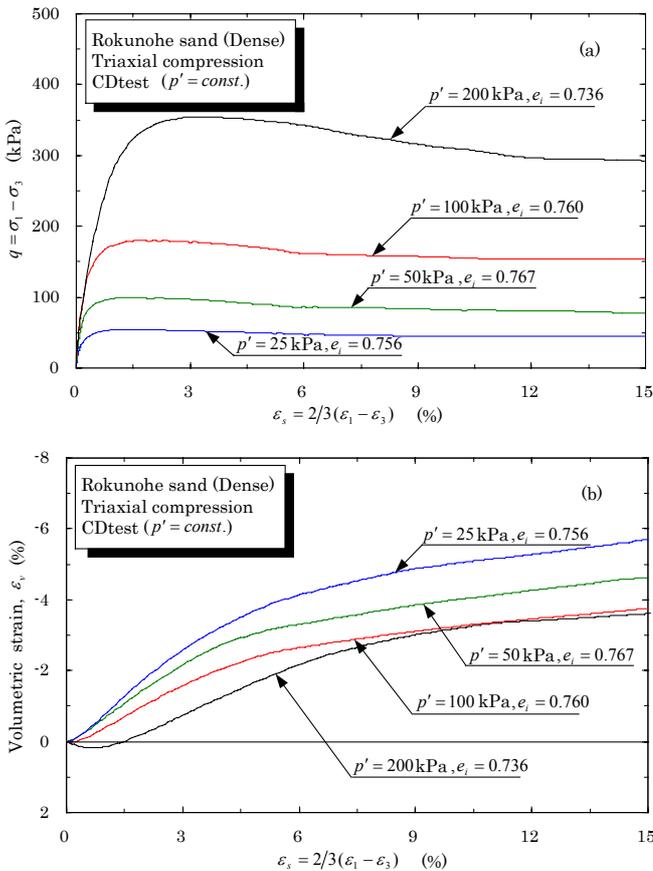


図 - 2 密な六戸砂の三軸圧縮挙動

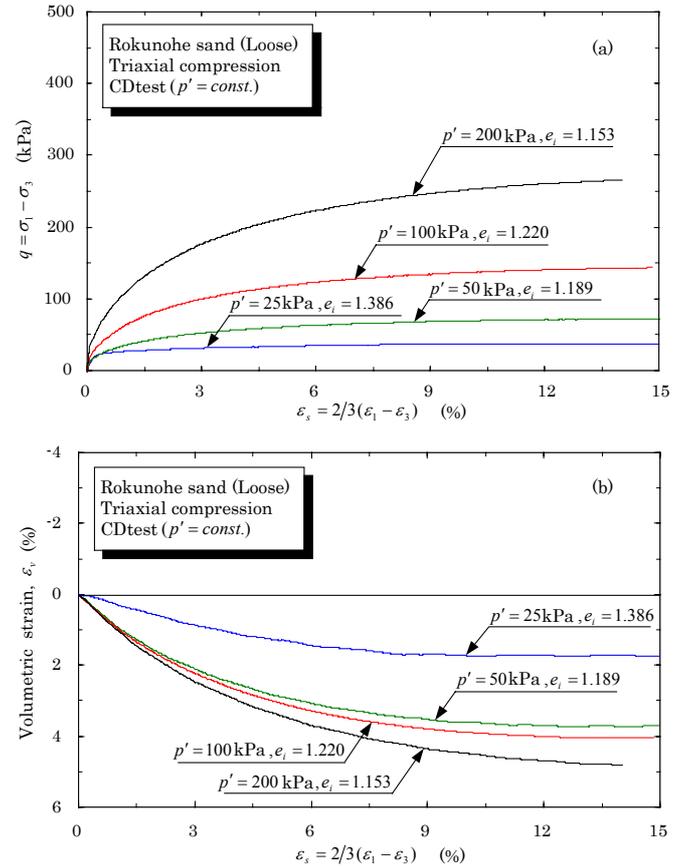


図 - 3 ゆるい六戸砂の三軸圧縮挙動

5. 2 破壊線

図 - 4 に密な六戸砂の破壊線と定常状態線, ゆるい六戸砂の破壊線を示す.

図 - 4 をみると少し粘着力が存在していることがわかる. 密な六戸砂の定常状態線とゆるい六戸砂の破壊線はほぼ一致している. つまり, 密な六戸砂はピークのあと軟化し, ゆるい六戸砂の強度に近づく. 密な六戸砂のせん断抵抗角 ϕ_d は約 41.4° , ゆるい六戸砂は約 32.2° , 粘着力 c は 5kPa 程度である. 定常状態の ϕ_d は約 34.7° なので, 密な六戸砂の ϕ_d はひずみ軟化により 2 割弱低下している. c に関し

ては強度低下はほとんどみられない。

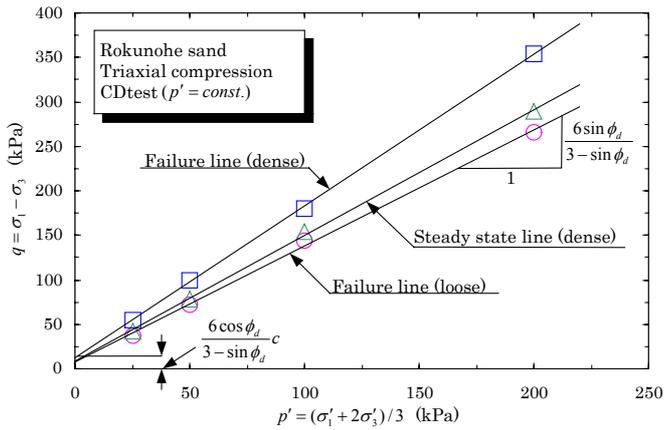


図 - 4 六戸砂の破壊線

5. 3 せん断剛性について

図 - 5(a), (b)にそれぞれ密な六戸砂とゆるい六戸砂のせん断剛性のひずみ依存性を示す。なお、このせん断剛性の測定では、局所ひずみ測定による詳細な計測は行っていないため、真の弾性領域は捉えられておらず、0.01%程度からのひずみレベルとなっ

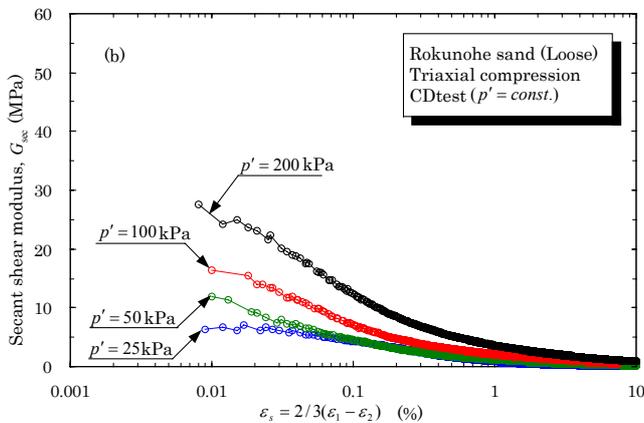
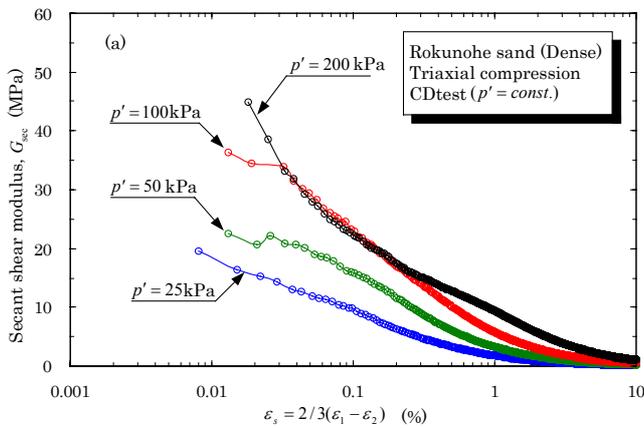


図 - 5 六戸砂の剛性

ている。密な六戸砂のせん断剛性は、ゆるい六戸砂のせん断剛性に比べ、0.01%のひずみレベルで約2倍強の値になっていることがわかる。ただし、密な六戸砂のひずみ増分による剛性低下は大きく、ひずみが大きくなると両者の差は小さくなっている。

5. 4 クリープ試験について

密な六戸砂のクリープ挙動について検討する。試験方法は以下の通りである。

- 1) $p'=100\text{kPa}$ の等方圧密状態からの初期せん断载荷で、 q が 90kPa (せん断強度のほぼ半分) になったら、その状態で1時間待つ (1st stage) .
- 2) せん断载荷を続行し、 ϵ_s が約4%になったら q を 90kPa まで除荷して、その状態で1時間待つ (2nd stage) .
- 3) せん断载荷を続行し、 ϵ_s が約8%になったら q を 90kPa まで除荷して、その状態で1時間待つ (3rd stage) .

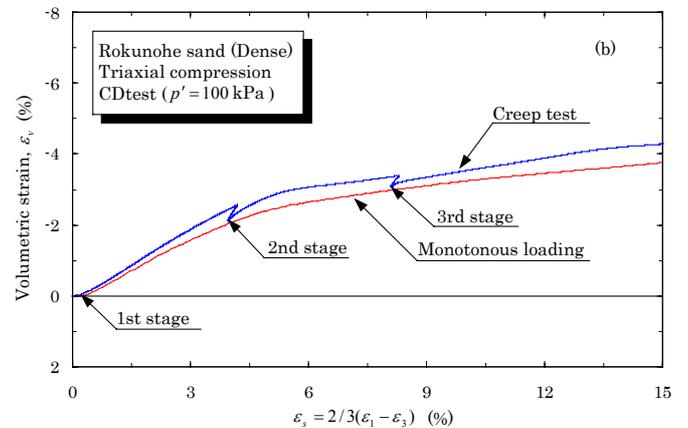
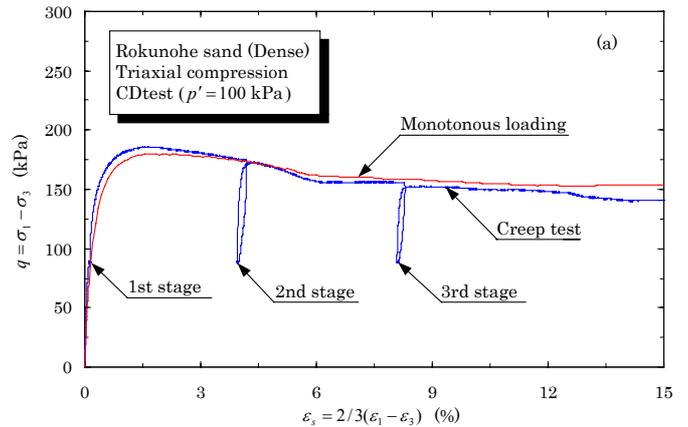


図 - 6 六戸砂のクリープ試験 (全体表示)

4) 所定のせん断ひずみまでせん断荷重を継続する。

図-6 に密な六戸砂の単調荷重試験とクリープ試験の結果を示す。クリープの影響は小さく、クリープ後の荷重では、単調荷重の応力 - ひずみ曲線に戻る傾向にある。

1st stage, 2nd stage, 3rd stage におけるクリープ挙動の詳細を、それぞれ図-7(a), (b), (c)に示す。0.05%ほどのせん断ひずみであるが、それぞれのステージでクリープ変形が起こっていることがわか

る。2nd stage と 3rd stage のクリープ変形はほぼ等しいが、1st stage では若干クリープ変形は小さい。

図-8 に、それぞれのステージにおける軸ひずみ変化を示す。軸ひずみは、1st stage では収縮、2nd, 3rd stage では膨張挙動であることがわかる。この傾向は、単調荷重時のダイレタンシー挙動と一致している。軸ひずみは、1st stage で最も収束に時間がかかっているが1時間ほどで落ち着いていると考えられる。

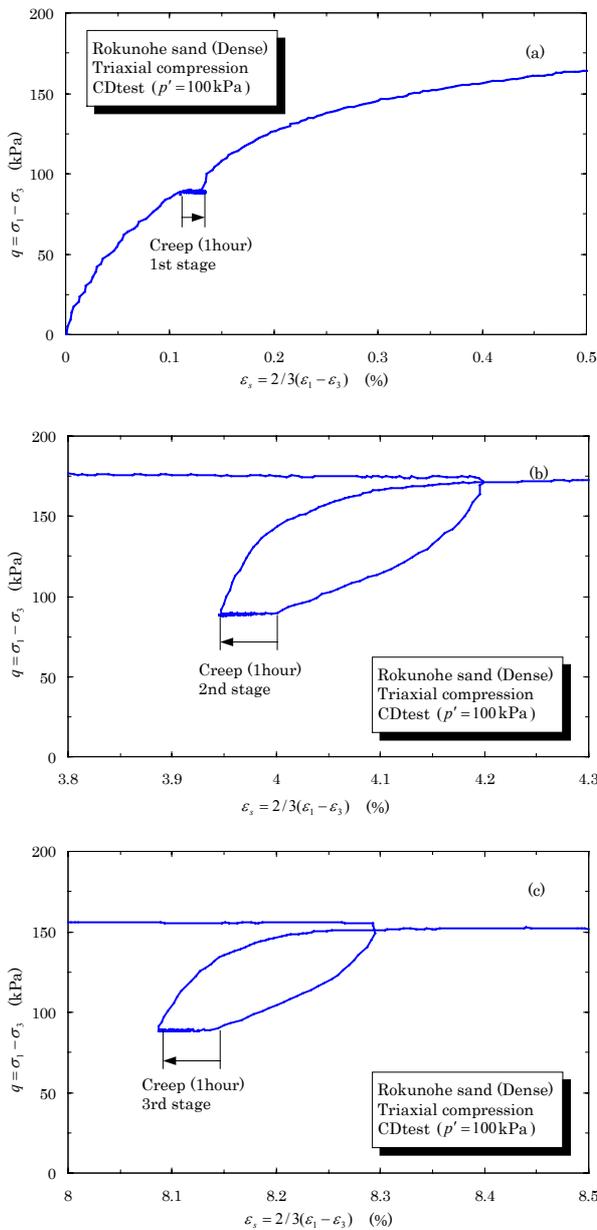


図 - 7 六戸砂のクリープ試験 (詳細表示)

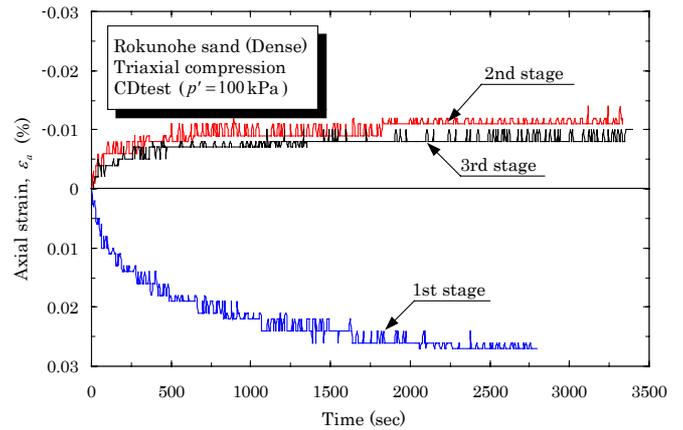


図 - 8 クリープ試験時の軸ひずみ挙動

6. 結論

- 1) 密な六戸砂のせん断抵抗角 ϕ_d は約 41.4° ゆるい六戸砂の ϕ_d は約 32.2° , 粘着力 c は 5kPa 程度である。
- 2) 密な六戸砂のせん断抵抗角 ϕ_d は、ひずみ軟化により 2 割弱低下している。粘着力 c はひずみ軟化による強度低下はほとんどみられない。
- 3) 密な六戸砂のせん断剛性は、ゆるい六戸砂のせん断剛性に比べ、0.01%のせん断ひずみレベルで約 2 倍強の値を示す。
- 4) 密な六戸砂のひずみ増分による剛性低下が大きい。
- 5) 六戸砂のクリープ挙動については、クリープの影響は小さく、単調荷重の応力 - ひずみ曲線に戻る傾向にある。