三軸圧縮試験による締固めたバライト粉末の強度変形特性の定量評価

早稲田大学 学生会員 〇宮路将人 学生会員 吉川絵麻 早稲田大学 正会員 小峯秀雄 フェロー会員 後藤茂 正会員 王海龍 NB研究所 正会員 長江泰史 正会員 氏家伸介

1. 研究背景·目的

2011年の福島第一原子力発電所の事故以来,放射線遮蔽や放射性物質拡散抑止の技術が必要とされている. 著者らは土質系材料で放射性物質を覆うことでこれらの課題解決が可能と考え、特にガンマ線の遮蔽に有効 な高湿潤密度 Dを実現するため、高い土粒子密度(4.337 g/cm³)を有するバライト粉末を用いた遮蔽体を提案 している²⁾. この遮蔽体の形成では、バライト粉末を泥水の状態で充填して沈降させることで広範囲かつ均一 厚さの遮蔽体(バライト沈降層)を構築可能と考えており、その湿潤密度は平均 3.1 g/cm³程度となる. 遮蔽 体を実際に使用する際には力学的な安定性が必要と考えられるが、バライト粉末の地盤材料試験を実施した 例は少なく,その力学特性は知られていない.そこで本研究ではバライト沈降層と同程度の乾燥密度に締固め たバライト粉末の供試体を作製し、圧密非排水三軸圧縮試験(CU 試験)を実施した.

2. バライト粉末の基本的性質と圧密非排水三軸圧縮試験(CU 試験)の詳細

バライトは硫酸バリウム(BaSO₄)を主成分とする鉱物で、高比重かつ水や各 種塩類溶液に不活性なことから泥水等の加重材として用いられる材料である.本 研究では一般的に使用されるバライト粉末としてテルバー (テルナイト製)を使 用した.表1はバライト粉末の基本的性質を示したものである.また,図1は粒 径加積曲線,図2はJGSA1210A-a法による締固め曲線を示したものである.

本研究では図3に示す三軸圧縮試験装置を使用してCU 試験を実施した. 試験 の諸条件は表2に示す通りである.供試体は寸法を \$50×100 mm とし、最適含水 比 7.0%程度に調整したバライト粉末を 5 層で突固めることで作製した.供試体 の乾燥密度は事前に実施したバライト沈降層の湿潤密度分布に関する実験を参

考に2種設定し、沈降層下部の大部分を占める比較的 密な部分(飽和湿潤密度 3.15 g/cm³)に相当する締固め 度 94%と、表層の比較的緩い部分(飽和湿潤密度 2.90) g/cm³) に相当する締固め度 82%に密度を調整した.供 試体飽和方法は二重負圧法である.また,載荷速度は 0.05 mm/min とし、載荷と共に供試体の上下面に繋が る圧力計を用いて間隙水圧を測定した. 使用計測器の 最大容量と最小目盛りは図3中に示す通りである.



載荷装置

表1 使用したバライト粉末の

4.34

NP

NP

-

基本的性質 土粒子密度 (g/cm³)

液性限界(%)

塑性限界(%)

塑性指数

表 2 三軸圧縮試験を実施した締固めたバライト粉末供試体の詳細							載荷装置 (モータ回転制御) 005 mm (min)
条件	密締め供試体 (締固め度 94%)		緩締め供試体 (締固め度 82%)			変位計(共和電楽) DTK-A-30,最大30 nm 0005382 nm/ μ 5 ロードなり(声音討趣工業)	
側圧 (kPa)	100	200	299	99	199	300	H F (2) (東京 6) (Δ-2) 最大10 kN 3.249 N/με 間隙水圧計(共和電業)
背圧 (kPa)	100	99	101	100	100	100	JC8380002 最大1.0 0.2383 kPa/μ ε
乾燥密度 (g/cm ³)	2.80	2.78	2.80	2.46	2.45	2.45	セル圧計(共和電業) JC8380001 最大10MPa
飽和湿潤密度 (g/cm ³)	3.16	3.14	3.15	2.90	2.88	2.88	供試体 φ50×100mm
間隙比	0.548	0.560	0.551	0.760	0.773	0.773	(カトウノ製作所) (カトウノ製作所) (カトウノ製作所)
相対密度 (%)	105	104	105	89	88	88	0.1184 em ³ /με 図3三軸圧縮試験装置の構成 および計測器の最大容量・最小目盛
B 值	0.94	0.91	0.86	0.98	0.99	0.98	

キーワード バライト,三軸圧縮試験, CU試験, せん断強度, 強度定数

連絡先

100

8 80 谼

40 雪節

20 通過

0

0.001

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院 社会環境工学科 TEL 03-5286-2940



3. 比較的密に締固めたバライト粉末(締固め度94%)の強度変形特性

図4は、締固め度を94%(目標飽和湿潤密度3.15 g/cm³)としてバライト 粉末を締固めた場合における主応力差-軸ひずみの関係と間隙水圧の変化を 示したものである.図より、3種類の側圧条件のいずれの場合にも降伏応力 が認められ、特に側圧100 kPaの条件で、最終的に軸ひずみに依らず主応力 差が一定値を取る限界状態の挙動が確認された.間隙水圧の変化に注目する と、側圧200 kPa、300 kPaにおいて載荷と共に負の間隙水圧を発生し、せん 断と共に体積を膨張させようとする正のダイレイタンシーの挙動を有する ことが示唆された.以上の主応力差-軸ひずみ関係、間隙水圧の変化より、締 固め度94%のバライト粉末は、密な砂や硬質な粘土に類似したせん断挙動を 示すことが確認された.図5は、同試験における有効応力の応力経路を示し たものである.応力経路は主応力差のピークの直後に1つの直線に漸近する 形を示し、限界状態線に近づく挙動が認められた.また、応力経路から主応 力差の最大値の値に最小二乗法を用いることで、締固め度94%のバライト粉 末の強度定数としてφ'=34.7°(c'=6.48 kPa)が算出された.

4. 比較的緩く締固めたバライト粉末(締固め度82%)の強度変形特性

図 6 および図 7 は、締固め度を 82%(目標飽和湿潤密度 2.90 g/cm³)とし てバライト粉末を締固めた場合における同様の関係を示したものである. 図6より,締固め度82%の条件では密に締めた場合と比べ同拘束圧での強度 発現が約1/5程度となり,軸ひずみ0.3%以下の範囲で降伏応力に達する傾向 が認められた、これはバライト粉末の非塑性に起因すると考えられ、締固め 度82%程度では、間隙水圧の増加に伴い比較的小さい軸応力でせん断剛性を 失うためと考えられる.一方,間隙水圧の変化から,載荷中は負のダイレイ タンシーが継続し、軸ひずみ 5~10%以上の範囲では主応力差・間隙水圧に 変化が生じない限界状態に達する様子が確認された. 試験終了時の終局状態 を限界状態における応力状態とすると,有効応力の応力経路における限界状 態線は図7中に示すようになった.また、応力経路上の終局の値から最小二 乗法により強度定数を算出するとϕ'=30.8°(c'=3.97kPa)が得られた.図8に 示す, 密に締めた条件と緩い条件における終局状態のモールの応力円・破壊 基準線を重ねて比較すると,締固め条件に依らずほぼ共通の破壊包絡線を有 することが確認され、以上より、バライト粉末が内部摩擦角 30° 前後、粘着 力をほぼ有さない砂試料に類似したせん断挙動を示すことが確認された.

5. 結論

本研究では放射線遮蔽体として使用を想定するバライト沈降層の強度変 形特性を予測するため,締固めたバライト粉末のCU試験を実施した.(1)バ ライト粉末は砂質土に類似したせん断挙動を有し,密な供試体では正のダイ レイタンシーの挙動を示す(2)締固めたバライト粉末の強度定数として, 締固め度 94%の状態に対し ¢'=34.7°, 82%に対し ¢'=30.8°が得られた.また, 緩い条件での降伏応力は密条件に対し 1/5 程度となった.



謝辞:本研究は文科省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成水深事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」採択課題「福島第一原子力発電所構内 環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的新技術開発と人材育成プログラム JPMX 15H15664915 (地盤工学会)」の支援により実施しまし た.各位に感謝申し上げます.参考文献: 1) 吉川絵麻,小峯秀雄,後藤茂,吉村貢,鈴木聡彦,成島誠一,新井靖典,氏家伸介,佐古田又規,長江泰史:土質 系材料の放射線遮蔽性能の定量評価,土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.73, No.4, pp.342·354, 2017, 2) 氏家伸介,長江泰史,成島誠一:福島第一原子力 発電所における沈降型重泥水を利用した燃料デブリ取出し回収法の検討,第13回環境地盤シンポジウム, pp.301·304, 2019