

飽和・不飽和状態における ベントナイト混合砂の力学特性

兵動正幸 (社会建設工学科) 村田秀一 (社会建設工学科)
中田幸男 (社会建設工学科) 吉本憲正 (社会建設工学科)
佐川 修 (社会建設工学専攻)

Mechanical characteristics for bentonite mixed sand under saturated and unsaturated conditions

Masayuki HYODO (Department of civil engineering)
Hidekazu MURATA (Department of civil engineering)
Yukio NAKATA (Department of civil engineering)
Norimasa YOSHIMOTO (Department of civil engineering)
Osamu SAGAWA (Graduate student, Department of civil engineering)

Abstracts

A series of triaxial compression tests were carried out for bentonite mixed sand under saturated and unsaturated conditions in order to clarify the mechanical behavior. As a result, the saturated specimen had lower shear strength than unsaturated one. The strength decreased rapidly with increasing bentonite content and were dependent upon confining pressure as expressed by the terms of internal friction angle and cohesion.

Key Words : Bentonite mixed sand, saturation, unsaturated, bentonite content ratio, shear strength, confining pressure

1. はじめに

近年、原子力発電所から排出される各種放射性廃棄物の処分技術の確立が、日本のみならず世界各国の取り組みのもと行われている^{1), 2)}。放射性廃棄物はその放射能レベルによって高レベル、低レベルに分類される。その処分方法として、前者は宇宙空間への処分、南極大陸などの氷床への処分、海洋底又は海洋底堆積物への処分、深地層への処分等が考えられており、後者は地層処分される。高レベル放射性廃棄物の処分方法において、宇宙空間への処分は事故が起きた場合のリスクが大きく、南極大陸や海洋底への処分も国際条約(南極条約, ロンドン条約)により禁止されており、低レベル放射性廃棄物同様、地層処分が考えられている。

地層処分において、放射性廃棄物と岩盤との間の充填材としてベントナイトと砂を混合した複合材料の利用が考えられている。ベントナイト混合砂の受ける環境履歴として、施工初期段階では不飽和状態であり、その後、地下水の上昇に伴い飽和状態へと移行するものと考えられる。したがって、想定される状態下でのベントナイト混合砂の力学特性を把握しておくことは重要である。

本研究では、ベントナイトの配合を変えた試料に対し、飽和・不飽和状態下で静的三軸試験を行い、配合率および飽和条件がベントナイト混合砂のせん断特性に及ぼす影響について検討を行った。

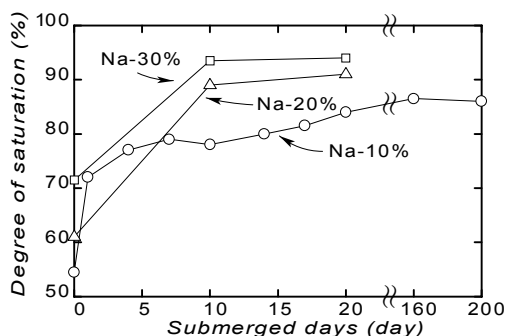


Fig.1 Relationships degree of saturation and submerged days

2. 試験方法

2.1 試料

2.1.1 試料調整方法

試験に用いた試料は、三河珪砂製の珪砂およびNa型ベントナイト(クニゲルV1;クニミネ工業製)である。珪砂はV5, V3, V6, R5.5及び細粒珪砂を重量比で1:2:2:2:3となるようミキサーにより数分間混合する。混合した後、珪砂とベントナイトが所定の重量比(9:1, 8:2, 7:3)となるように配合する。以下、この供試体をそれぞれNa-10%, Na-20%, Na-30%供試体と称する。上述した試料が均一となるようさらに数分間混合するとともに、最適含水比となるよう水を加える。このような試料をビニール袋に入れ1日以上冷蔵庫で保管した後、試験に用いた。

2.1.2 供試体作製方法

供試体作成用モールド(d=5cm, h=10cm)に試料を8~10層に分けて入れ、所定の密度($0.95 \rho_{dmax} \sim \rho_{dmax}$)になるよう各層につき15回ずつタンパーで突き固めた。このような供試体に対し飽和状態で試験を行う場合は、水浸させることにより飽和化を試みた。Fig.1に、水浸日数と飽和度の関係を示す。これよりNa-10%供試体においては、約5ヶ月後の飽和度が20日後と比較してもあまり変化しておらず、また、Na-20%, 30%供試体については20日時点での飽和度が90~95%となっており、いずれの場合も20日以降飽和度に変化がみられないことから、20日以上水浸させたものを飽和供試体として試験に用いた。不飽和状態のものは最適含水比となるよう加水し、所定の密度で締め固めた状態とする。

2.1.3 試料の物理的性質

Table 1に試料の指数的性質、Fig.2に用いた試料の粒径加積曲線を示す。これより、比重はベントナイト混合砂の配合によらず、2.653~2.655とほぼ同じであることがわかる。

Table1 Physical property of Bentonite mixed sand

Na-Bentonite content		10 (%)	20 (%)	30 (%)
specific gravity		2.655	2.655	2.653
texture	gravel sand (%)	10	8	6
	coarse sand (%)	55	44	44
	fine sand (%)	23	29	21
	silt (%)	5	7	8
	clay (%)	7	12	21

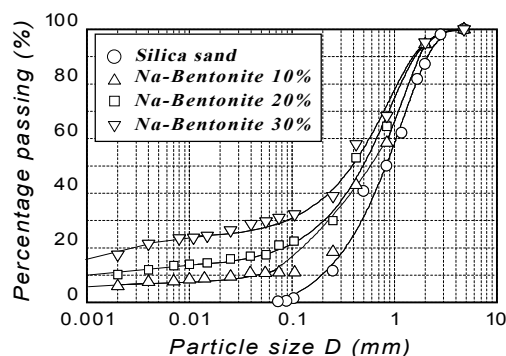


Fig.2 Particle size distribution curve

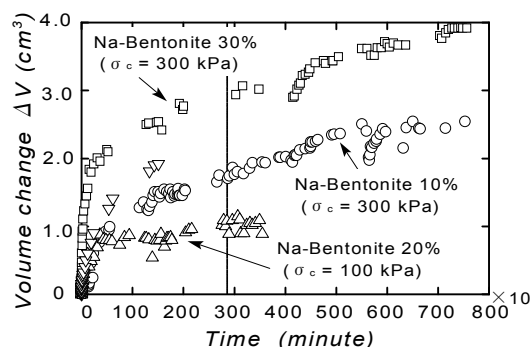


Fig.3 Relationships volume change and consolidation time

2.2 実験方法

用いた試験機はひずみ制御式三軸試験機であり、所定の拘束圧で等方圧縮した後、側圧一定で排水排気せん断試験を行った。せん断はひずみ制御式(ひずみ速度0.05%/min)で、軸ひずみが20%に達するまで行った。ここで、圧縮過程における圧密時間について述べる。Fig.3は、Na-10%, 20%, 30%供試体における時間と体積変化の関係である。ここで、横軸の時間は所定の拘束圧まで圧密した後からの時間のことで、縦軸の体積変化量は所定の拘束圧まで載荷した後からの体積変化である。いずれの供試体も圧密時間が2880min経過してからは体積変化の勾配が一定となっているので、圧密時間は2880min以上とした。なお、本論文で用いた主要なパラメータは、平均有効主応力 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$, 軸差応力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$, 応力比 $\eta = q/p$, 軸差ひずみ $\epsilon = 2(\epsilon_1 - \epsilon_3) / 3$, 体積ひずみ $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ である。

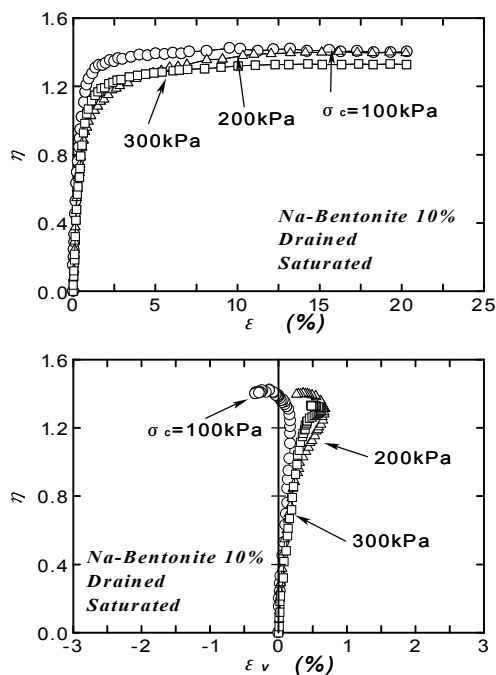


Fig.4 strain path with various confining pressure (Na-10%)

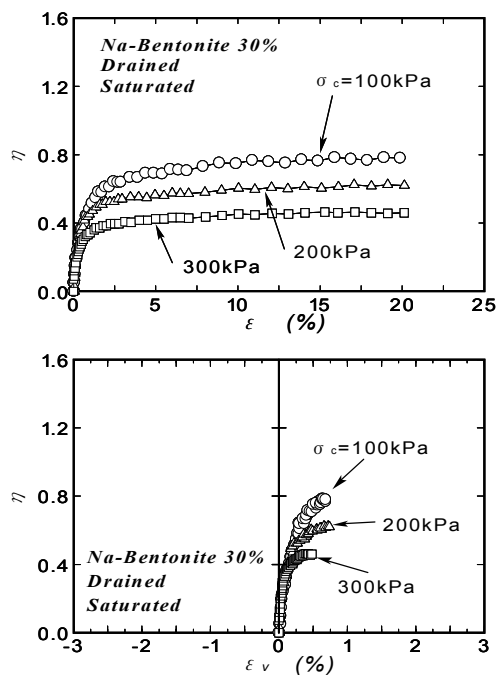


Fig.5 strain path with various confining pressure (Na-30%)

3. ベントナイト混合砂のせん断特性

3.1 飽和状態におけるベントナイト混合砂のせん断挙動

3.1.1 拘束圧による影響

Fig.4 は、拘束圧の違いがせん断挙動に与える影響について検討したものであり、Na-10%供試体における有効応力比 η - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係を各拘束圧でまとめたものである。 η - ϵ 関係より、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$, 200kPa , 300kPa の時の最終的な応力比は 1.4 で、拘束圧によらずほぼ同程度であることがわかる。また、 $\sigma_c = 300\text{kPa}$ におけるせん断初期での強度発現は $\sigma_c = 200\text{kPa}$ と同じ傾向にあり、最終的な応力比は 1.3 と若干低下しているものの、拘束圧による強度の違いはみられない。 η - ϵ_v 関係において、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$, 200kPa の場合、体積ひずみは収縮 (+) から膨張 (-) へと転じているものの、 $\sigma_c = 300\text{kPa}$ では収縮傾向にあり拘束圧依存性がみられる。 Fig.5 は、Na-30%供試体における η - ϵ - ϵ_v の関係である。 η - ϵ 関係において、各拘束圧においてせん断初期にピーク強度に達し、その後は一定の応力比を保ったまません断が進行していることがわかる。また、拘束圧が増大するに従い最終的な応力比は低下しており、拘束圧依存性がうかがえる。 η - ϵ_v 関係においては、いずれの供試体も一様な収縮挙動を示していることがわかる。これは、ベントナイト配合率が 30% と増加したのに伴い、珪砂のかみ合いによるダイレイタンスが抑制されたためと

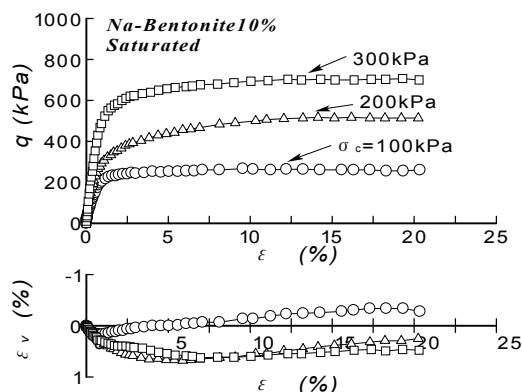


Fig.6 stress-strain curve with various confining pressure

考えられる。 Fig.6 は、Na-10%供試体における軸差応力 q - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係を示したものである。 q - ϵ 関係において、拘束圧が増大するに従い、せん断初期における曲線の勾配が急となっており、初期剛性が高くなる傾向にあることがわかる。

3.1.2 ベントナイト配合率による影響

Fig. 7 は、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$ のもとで行った三軸圧縮試験より得られた軸差応力 q - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係を示したものである。 q - ϵ 関係において、配合率が増大するに従い、軸差応力が低下していることが見てとれる。また、せん断初期における剛性も配合率が増大することにより低下していることがわかる。 ϵ_v - ϵ 関係において、Na-10%供試

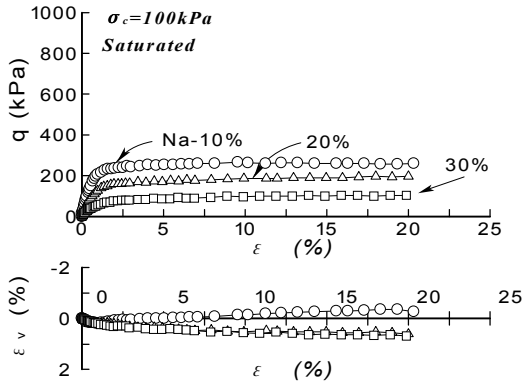


Fig.7 stress-strain curve with various bentonite mixture ratio

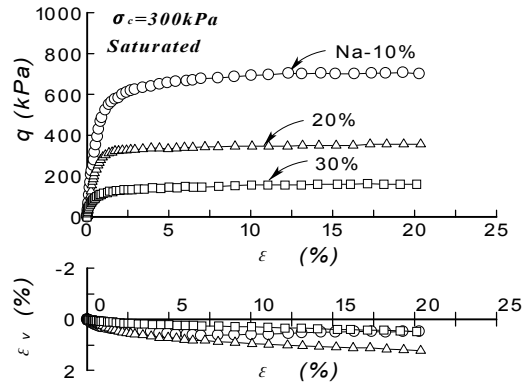


Fig.8 stress-strain curve with various bentonite mixture ratio

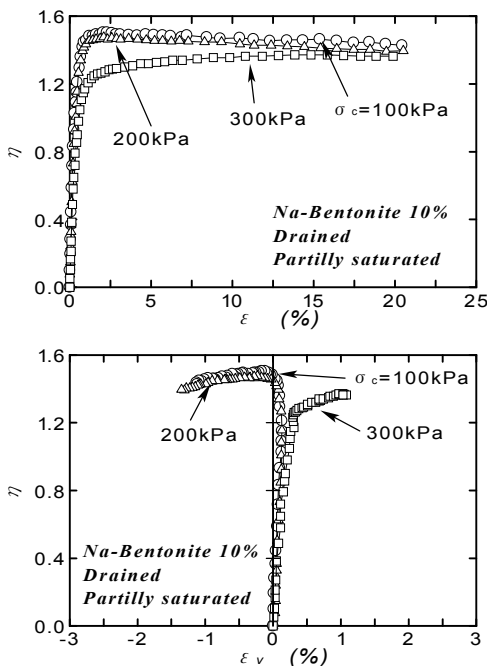


Fig.9 strain path with various confining pressure (Na-10%)

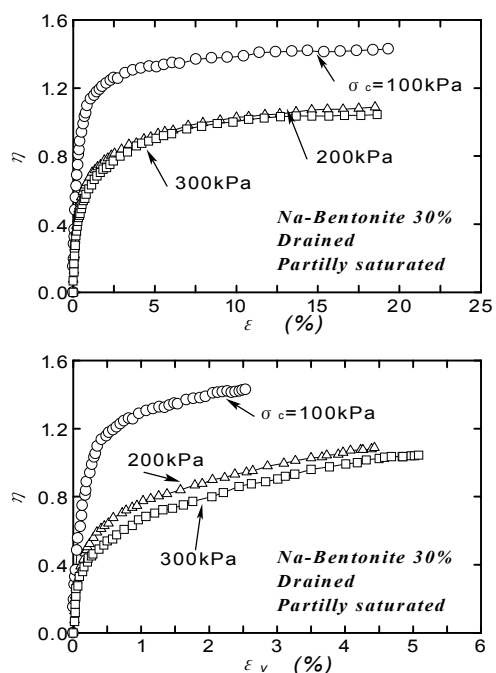


Fig.10 strain path with various confining pressure (Na-30%)

体は収縮から膨張へと転じ、Na-20%, 30%供試体においては一様な収縮挙動を示していることがわかる。Fig.8は、 $\sigma_c=300\text{kPa}$ における三軸圧縮試験の結果を各配合率でまとめたものである。 $q-\varepsilon$ 関係において、 $\sigma_c=100\text{kPa}$ と同様に配合率が増大するに伴い、せん断初期剛性が低下しているのがわかる。また、 $\varepsilon_v-\varepsilon$ 関係においては、いずれの供試体も収縮挙動を示している。以上より、ベントナイト配合率が増大する事により、ベントナイト混合砂のせん断挙動は砂質土的なものから粘性土的なものへと変化しており、強度の発現の仕方、体積ひずみの生じ方に配合率依存性が見られる。

3.2 不飽和状態におけるベントナイト混合

砂のせん断挙動

3.2.1 拘束圧による影響

放射性廃棄物処分施設建設初期段階においては、地下水を止水し建設が行われるものと考えられることから、ベントナイト混合砂の飽和履歴として不飽和状態であることが予想される。また、ベントナイト混合砂の透水係数は配合率 10%–30%では $10^{-7} \sim 10^{-10}$ と非常に小さいため³⁾、飽和化には長期間を有すると考えられ、約 100 年という評価結果がある⁴⁾ ことより、不飽和状態下でのせん断特性を把握しておくことは重要である。ここでは、最適含水比で作製した供試体を対象に、拘束圧と配合率の違いが不飽和供試体のせん断挙動に及ぼす影響について検討をする。Fig.9は、Na-10%供試体における応力比 η

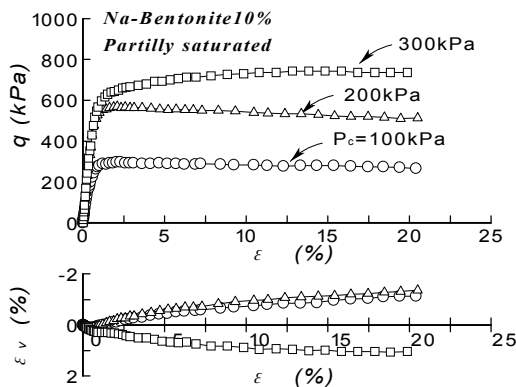


Fig. 11 stress-strain curve with various confining pressure

一軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係について、各拘束圧でまとめたものである。 $\eta - \epsilon$ 関係において、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$, 200kPa の場合、ともにせん断初期にピークに達した後応力比が低下しており、 $\sigma_c = 300\text{kPa}$ においては強度が一定値に収束していることがわかる。また、せん断初期における応力比に着目してみると、 100kPa の方が 300kPa と比較して 0.2 程度応力比が大きくなっており、初期剛性の発現に拘束圧依存性が見られる。 $\eta - \epsilon_v$ 関係においては、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$, 200kPa の時、体積ひずみは収縮から膨張へと転じ、正のダイレイタンス挙動を示していることが見てとれる。 Fig. 10 は、 Na-30% 供試体における応力比 η - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係について示したものである。 $\eta - \epsilon$ の関係において、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$ と 200kPa , 300kPa では強度に明確な差がみられ、拘束圧依存性が見られる。 $\eta - \epsilon_v$ 関係においては、各拘束圧とも一般的な収縮傾向を示し、負のダイレイタンス挙動となっていることがわかる。これらの結果より、 Na-10% 供試体と比較して、ひずみの生じ方、強度の発現により顕著な拘束圧依存性が見られる。 Fig. 11 は、 Na-10% 供試体における軸差応力 q - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係を示したものである。 $q - \epsilon$ 関係より、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$, 200kPa の場合、せん断初期でピークに達した後、一定値に収束する傾向にあるが、 300kPa の場合はせん断の進行とともに軸差応力が増大する傾向にあることが見てとれる。 $\epsilon_v - \epsilon$ 関係において、 $\sigma_c = 300\text{kPa}$ は $\epsilon = 20\%$ 時におけるダイレイタンス特性として収縮傾向にあるのが見てとれる。

3.2.2 ベントナイト配合率による影響

Fig. 12, 13 は、所定の拘束圧で排水せん断した結果をそれぞれ軸差応力 q - 軸差ひずみ ϵ - 体積ひずみ ϵ_v の関係にまとめたものである。 $\sigma_c = 100\text{kPa}$ における $q - \epsilon$ 関係において、 Na-10%, Na-30% 供試体

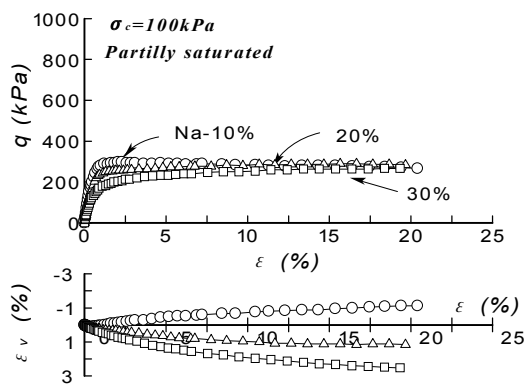


Fig. 12 stress-strain curve with various bentonite mixture ratio

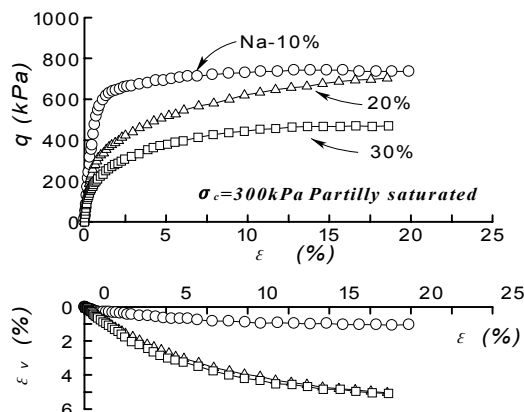


Fig. 13 stress-strain curve with various bentonite mixture ratio

では軸差ひずみが 3% 付近では強度に多少の差が見られ、 Na-10% 供試体はひずみ軟化型、 Na-30% 供試体はひずみ硬化型の挙動を示していることが見てとれる。 $\epsilon_v - \epsilon$ 関係において Na-10% 供試体は収縮から膨張挙動へと転じ、ベントナイト配合率が増加するに伴い収縮傾向が顕著に現れ、配合率依存性が見てとれる。 $\sigma_c = 300\text{kPa}$ の場合、ベントナイト配合率が 10%, 20%, 30% と増加するのに従い、ピーク強度は 750kPa , 730kPa , 450kPa と低下しており、強度の発現に配合率依存性があることがわかる。体積ひずみに着目すると、いずれの供試体もせん断中に体積は収縮挙動を示しており、飽和供試体と同様な傾向となっているが、最終的なひずみ量は飽和供試体と比較して大きくなっている。以上より、ベントナイト配合率が増大する事による体積変化の傾向として、収縮挙動を示していることがわかるが、これは、配合率が増大することで珪砂のみの密度は相対的に減少し、せん断によってベントナイトが珪砂の隙間に入り込むためと考えられる。

3.3 飽和状態の違いがベントナイト混合砂のせん断特性に及ぼす影響

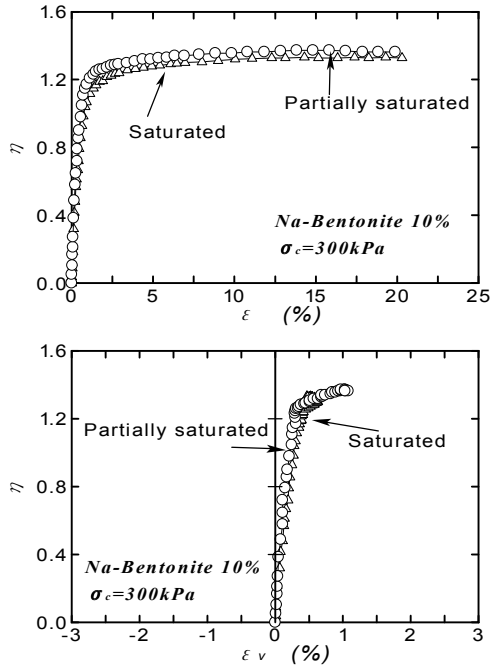


Fig.14 In view of water content condition for stress path (Na-10%)

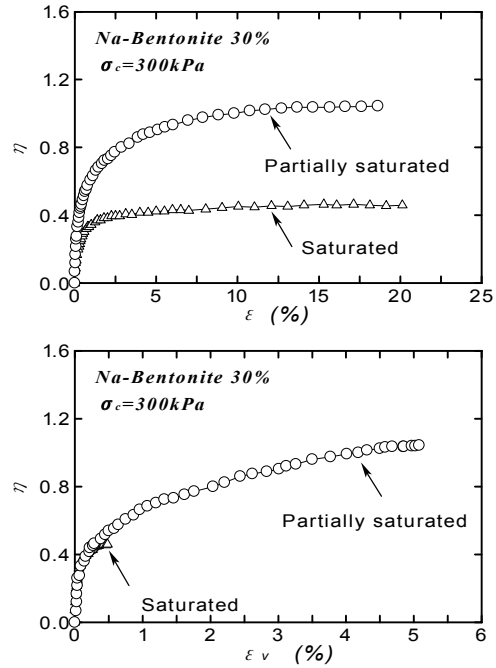
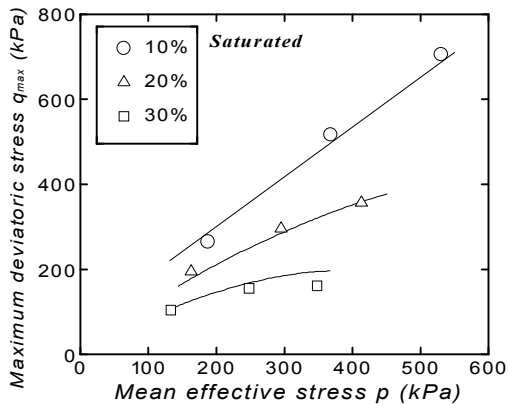
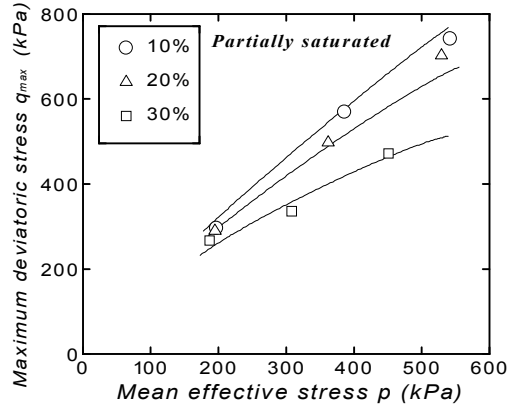


Fig.15 In view of water content condition for stress path (Na-30%)



Figs.16(a) Failure envelopes of saturated condition



Figs.16(b) Failure envelopes of unsaturated condition

3.3.1 応力-ひずみ関係

ここでは、飽和状態の違いが Na-10%, Na-30% 供試体のせん断特性に与える影響について検討する。

Fig.14 は、飽和状態の異なる Na-10% 供試体を $\sigma_c = 300 \text{ kPa}$ まで等方圧縮、せん断した結果を応力比 η - 軸差ひずみ ε - 体積ひずみ ε_v の関係にまとめたものである。 $\eta - \varepsilon$ 関係、 $\varepsilon_v - \varepsilon$ 関係より強度の発現、体積ひずみの生じ方に若干の含水比依存性が見られるものの拘束圧が同じであれば、飽和、不飽和状態に拘わらず軸差ひずみと体積ひずみの生じ方、最終的な応力比の値は同程度であり、10%程度のベントナイトの配合では、含水比状態の違いによる影響は小さいと言える。 Fig.15 は、Na-30% 供試体における $\eta - \varepsilon - \varepsilon_v$ 関係であるが、配合率が増加すると飽和、不飽和供試体の強度の発現、体積ひずみの生じ方に

顕著な含水比依存性がみられ、飽和供試体における最終的な応力比は不飽和供試体のそれと比較して0.6程度小さなものとなっている。これは、飽和化することでベントナイト混合砂の挙動が粘性土的特性を有することを示唆するものである。

3.3.2 強度特性に及ぼす飽和状態、配合率の影響

ここでは、ベントナイト混合砂における飽和状態および配合率の違いが、強度特性に及ぼす影響について考察する。 Figs.16 (a), (b) は、それぞれ Na-10%, 20%, 30% 供試体におけるせん断過程での最大軸差応力 q_{max} と平均有効主応力 p の関係を示したものであり、 (a) は飽和状態、 (b) は不飽和状態の結果である。 Figs.16 (a) で示した $p-q$ 空間における破壊

Table2 Results of triaxial compression test

Saturated condition	Bentonite content	Confining pressure (kPa)	Secant angle ϕ_s (°)	Cohesion c_d (kPa)	Internal friction angle ϕ_d (°)	
Saturated drainage	10%	100	35.1	21.6	31.2	
		200	34.6			
		300	33.0			
	20%	100	30.0	51.0	16.0	
		200	25.4			
		300	22.1			
		30%	100	20.3	35.3	7.0
			200	16.4		
			300	12.5		
Unsaturated drainage	10%	100	37.0	21.6	32.1	
		200	36.2			
		300	33.9			
	20%	100	36.6	21.6	30.9	
		200	34.0			
		300	33.0			
	30%	100	35.2	54.9	19.7	
		200	27.4			
		300	26.4			

包絡線を比較すると、Na-20%、Na-30%供試体の破壊包絡線は Na-10%供試体のそれに比べて、顕著な拘束圧依存性を示し、上に凸の曲線となっていることがわかる。一方、不飽和供試体 Fig.16 (b) における p-q 空間での破壊包絡線は、飽和供試体の結果ほど顕著ではないが、配合率が増加すると若干上に凸の曲線となっていることが見てとれる。また、飽和、不飽和供試体ともにベントナイト含有率の増加は、強度を小さくする傾向にあるといえる。Fig.17 は、Na-10%、30%供試体におけるセカント・アングルの ϕ_s と拘束圧の関係を示したものである。○、●は不飽和状態、△および▲は飽和状態の結果をプロットしたものである。Na-10%供試体の場合、いずれの拘束圧においても不飽和状態の方が飽和状態よりも 2° 程度セカント・アングルの大きくなっていることがわかる。また、Na-30%供試体においては飽和状態におけるセカント・アングルの値は、不飽和状態に比べいずれの拘束圧下においても 15° 程度低くなっており、Na-10%供試体の結果と比較しても ϕ_s の値が小さいことがわかる。従って、不飽和状態から飽和状態へと変わる遷移状態では、配合率の多いベントナイト混合砂の場合は強度の発現において注意が必要である。

3.4 強度定数

Table 2 にベントナイト混合砂の三軸圧縮試験よ

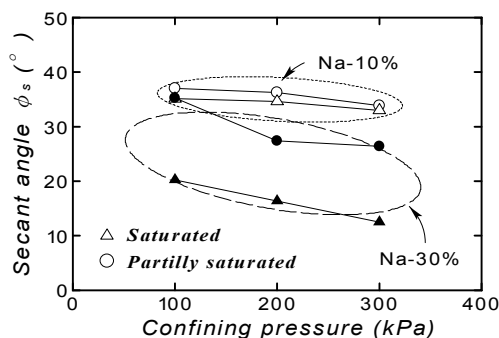
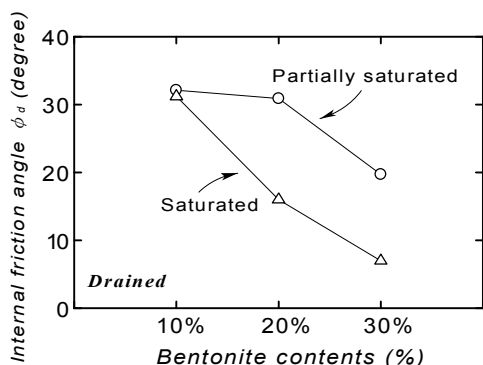
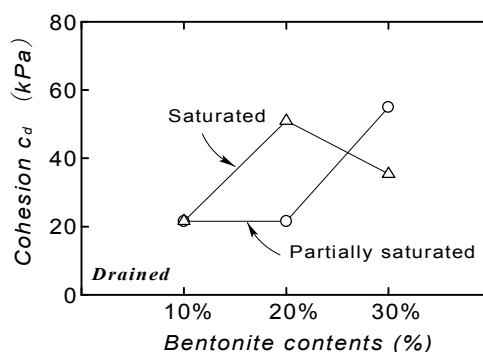


Fig.17 Relationships secant angle and confining pressure

り得られたセカント・アングルの ϕ_s 、粘着力 c_d 及び内部摩擦角 ϕ_d の結果を示す。Fig.18 (a)、(b) は、モールの応力円により得られた (a) ベントナイト配合率と ϕ_d の関係、(b) ベントナイト配合率と c_d の関係を示したものである。Fig.18 (a) より Na-10%、20%、30%供試体の飽和状態における ϕ_d はそれぞれ、32°、31° および 20° であり、不飽和状態における ϕ_d はそれぞれ 31°、16° および 7° であったので、不飽和状態から飽和状態に移行することで、強度が低下する傾向にあることが見てとれる。Na-10%供試体の ϕ_d は飽和・不飽和供試体ともほぼ同程度であるが、Na-20%、Na-30%供試体の飽和・不飽和状態における ϕ_d は、配合率が増加するとともに顕著に低下しており、配合率依存性が見てとれる。Fig.18 (b) より、Na-10%、Na-20%、Na-30%供試体における c_d



(a) Relationships ϕ_d and bentonite contents



(b) Relationships c_d and bentonite contents

Fig.18 Relationships ϕ_d , c_d and bentonite contents in view of water content condition

は飽和・不飽和状態には依存しておらず、その大小関係に一義的な関係は見られない。しかし、不飽和状態の場合、ベントナイト配合率が増加するのに伴って c_d は増加する傾向にあることが伺える。

4. 結論

本研究では、ベントナイト混合砂を対象に、放射性廃棄物貯蔵施設の建設時に受ける環境履歴を想定し、飽和・不飽和状態でのせん断特性を三軸圧縮試験により調べた。本研究で得られた知見は以下のようである。

- 1) 飽和状態における $\eta - \epsilon$ 関係は配合率が増大するにつれ、拘束圧依存性を示し、 $\eta - \epsilon_v$ 関係においても収縮挙動を示す。また $q - \epsilon$ 関係においては配合率が増加するにつれ、砂質土的な挙動から粘性土的な挙動を示す。
- 2) 不飽和状態における $\eta - \epsilon$ 関係において、せん断初期における強度に明確な拘束圧依存性が見られ、同一の拘束圧のもとでは配合率依存性があり、Na-30%供試体における体積ひずみの絶対的な発生量は飽和供試体に比べ大きい。
- 3) Na-10%供試体の場合、 $\eta - \epsilon$ 関係は含水比状態の影響が小さいが、Na-30%供試体においては、最終的な応力比に明確な差が見られる。

- 4) 強度特性に関して、Na-10%、20%、30%供試体における $p-q$ 空間の破壊包絡線は、いずれの場合も配合率が増大するのに伴って上に凸の曲線を示すとともに、顕著な拘束圧依存性を示す。
- 5) 強度定数に及ぼす影響として、配合率の増加および飽和状態である場合著しく ϕ_d が減少するが、 c_d においては飽和・不飽和状態に依らず配合率によって影響を受ける。

参考文献

- 1) 高橋美昭, 出口朗, 樋田吉造: 高レベル放射性廃棄物処分場の概念設計, 土と基礎, Vol.46-No.10, pp.7-9, (1998)
- 2) 田辺博三, 稲垣裕亮: 高レベル放射性廃棄物処分に関する諸外国の取組み状況, 土と基礎, Vol.46-No.10, pp.15-18(1998)
- 3) 五十嵐孝文, 水品知之, 今村聡, 末岡徹: ベントナイト・砂混合土の透水特性, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp.329-330(1996)
- 4) 動力炉・核燃料開発事業団: 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 (平成3年度), PNC TN1410 92-081, pp.3-24(1992)

(平成13年8月31日 受理)