

塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案

小峯秀雄*・緒方信英**

近年、膨潤性粘土材料を放射性廃棄物処分施設の処分坑を埋戻す材料等に利用しようとする考えがある。このような状況において、膨潤性粘土の基本的な物理諸問題の把握も含め、その締固め特性や膨潤特性等についての評価が急がれている。本研究では、ベントナイトを用いて膨潤性粘土材料の新しい物理試験方法の提案を行い、さらに各種粘土の静的締固め試験を行い、粘土の締固め特性について調査し、簡便な評価法を提案している。

Keywords : compaction characteristics, clay, bentonite, plastic limit, nuclear wastes disposal

1. まえがき

土の膨潤挙動は、地盤の不同沈下や道路舗装の破壊等をもたらす要因の一つであり、また新第三紀泥岩層のトンネル工事等のように膨潤性地山に掘削を行う際に、その膨潤挙動が大きな問題となるなど¹⁾、悪影響をもたらしていることが多い。しかし、最近ではこの特性を積極的に利用することも試みられ、幾つかの成果も挙げている²⁾。たとえば用水路等の漏水防止や泥水工法への利用がそれである。また最近検討が行われている高レベル放射性廃棄物の処分方法においても、この膨潤特性を利用しようとする考えがある。図-1に示すように廃棄物を入れた容器を地下岩盤中に掘削された坑内に納める方法が考案されており^{3),4)}、この容器周辺には周囲の環境から容器を隔離するために、高压で締固めたベントナイト(緩衝材)で埋戻すことが考えられている。これはベントナイトの膨潤変形により水みちとなり得る岩盤内の亀裂を充填すると共に、ベントナイトの難透水性により容器が地下水と長期間接触しないようにするためである。

このように膨潤性粘土材料の利用が多岐にわたって考えられているが、その物性には未解明な点が多い。またその特性を最大限に発揮させるために粘土材料を締固め、レンガ状の土質材料として用いることが考えられており、この土質材料を製作するに当り、その締固め特性についても把握することが重要になってきている。

土の締固め特性についての研究は、アースダム等の設計、施工や道路の路盤・路床支持力の設計への適用を目的として多数研究されているが、その目的から対象となる土は砂質土が中心である。近年では締固めの目的も多

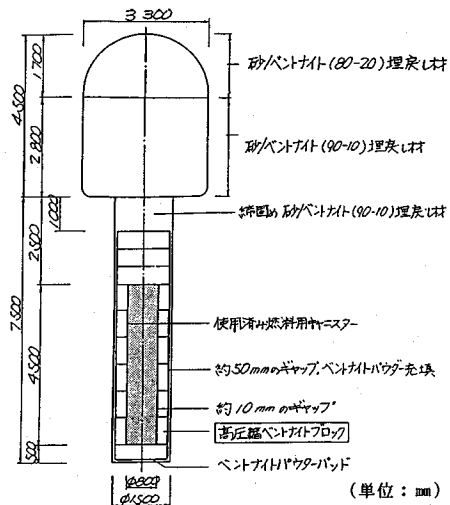


図-1 放射性廃棄物処分坑の概要図の一例(スウェーデン, Stripa計画⁴⁾)

様化し、ロームや礫の締固め特性についての研究が進められているが、粘土の締固め特性についての研究は少なく、未だ不明確な部分が多い。

本研究は、ベントナイト等の膨潤性土質材料の物理試験方法の提案を行うと共に静的締固め試験を実施し、各種粘土の物理定数とその締固め特性(最大乾燥密度と最適含水比)の関係について調査を行い、その締固め特性を評価することを目的としている。

2. 使用した試料およびその物理的性質

(1) 試料

本研究で使用した試料は、非常に高い膨潤性を示すモンモリロナイトを主な粘土鉱物とするベントナイトと膨潤性をほとんど示さないカオリナイトを主な粘土鉱物とする木節粘土である。ベントナイトにもかなりの種類が

*正会員 工修(財)電力中央研究所 土質研究室担当研究員

(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646番地)

**正会員 工修(財)電力中央研究所 土質研究室 専門役

あり、その分類法としてはベントナイトの膨潤特性を左右する交換性陽イオンの組成による分類が一般的である。以下に、その分類を示す⁵⁾。

① Na-型のベントナイト

交換性陽イオンが主にNa⁺イオンのベントナイトである。水中での膨潤性に富んでおり、ボーリング泥水等に利用される。

② Ca-型のベントナイト

交換性陽イオンが主にCa²⁺イオンのベントナイトである。通常、水中での膨潤性はNa-型のベントナイトと比べると小さく、一般には粘結剤として利用される。

③ 活性化ベントナイト

Ca-型のベントナイトに炭酸ナトリウムを加え、人工的にNa-型に変換されたベントナイトである。一般的な用途としては、泥水や鑄型粘結剤である。

本研究で使用したベントナイトは、Na-型のベントナイトとして月布鉾山産のベントナイト（以下、ベントナイトAと呼ぶ）とアメリカ ワイオミング産ベントナイト（以下、ベントナイトDと呼ぶ）、Ca-型のベントナイトとして土浮山鉾山産のベントナイト（以下、ベントナイトBと呼ぶ）および活性化ベントナイトとしてベントナイトBを炭酸ナトリウムで処理したもの（以下、ベントナイトCと呼ぶ）の四種類である（表-2参照）。さらに締固め試験についてはベントナイトAとDを同量ずつ混合したものをベントナイトEとして、またCとDを同量ずつ混合したものをベントナイトFとして使用した。一方、カオリナイトを主成分とする粘土としては、赤木節粘土および青木節粘土と呼ばれている市販の粉末粘土を用いた。

(2) 物理的性質

ベントナイトのような粘土材料は、水と接触すると非常に大きな膨潤性を示すので、『土質工学会基準』⁶⁾に記載されている物理試験方法では信頼性の高い結果が得られない場合が少なくない。

本研究では、まず『土質工学会基準』に従い、比重試験（土質工学会基準では密度試験となっているが、本研究では同じ試験方法により土粒子の比重を求めた）、粒度試験、液性限界、塑性限界試験を実施した。これらの試験方法のうち再現性の低い試験方法については、新たに工夫を加え新しい膨潤性土質材料の物理試験方法として提案し、得られた物理定数を提示した。

a) 膨潤性土質材料の比重試験

ゲーリュサック型比重びん（100 ml）を用いた土粒子の比重試験においては、比重びんに投入した土質量の測定精度や試料の脱気状態が、結果として得られる土粒子の比重を大きく左右している。特に、膨潤性に富んだ土粒子の場合、水と接触すると体積膨張を生じるので比重びんに投入できる土質量は10 g以下となり、測定精度

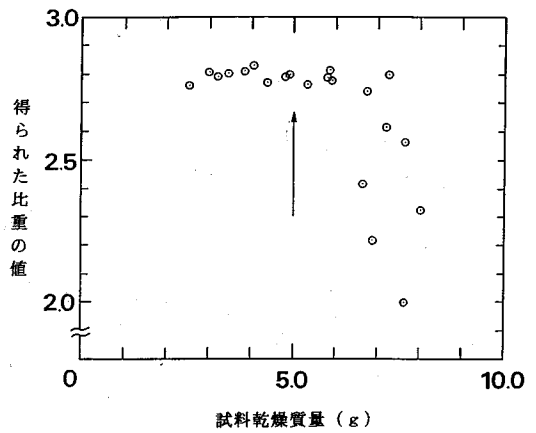


図-2 試料乾燥質量と得られた比重の値の関係

に問題が生じる。また、本試験で使用した試料は非常に粘性の高い材料であり、熱による試料の性質の変化も考えられるので、脱気方法に工夫が必要となる。このような問題点を解決するために、以下に示す方法で膨潤性土質材料の比重試験を実施した。

—膨潤性土質材料の比重試験手順—

① 所定の炉乾燥質量（後述）相当の気乾試料を70 mlの蒸留水に溶き、さらに試料を分散させるために、超音波により微振動を与えた水中に試料の入った容器を置き、試料の分散を促進させる。

② 蒸留水に溶いた試料を100 mlのゲーリュサック型比重びんに投入する。

③ 比重びんを真空槽内に入れ脱気（水銀柱で100 mm程度）を行い、同時に振とうすることにより脱気の促進を図る。これを気泡が出なくなるまで続ける（約3日間）。

④ 以下、従来の『土質工学会基準』で提案されている土粒子の密度試験方法に従うが、本論文では土粒子の密度の値を土粒子の比重G_sとして置き換えて用いた。なお、試験後に土の炉乾燥質量を測定する。

ここで比重の測定の精度上、重要となるのは、比重びんに投入される試料の炉乾燥質量である。そこで投入する試料の炉乾燥質量を2~8 gの間で変化させ、炉乾燥質量と上記の方法に従って得た比重の値との関係を調べた。試料としては非常に膨潤性に富んでいるNa-型のベントナイトAを用いた。図-2にその結果を示す。比重びんに投入される試料の炉乾燥質量が小さくなると質量測定の精度が低下し、大きくなると試料の脱気が困難になると考えられる。図-2から試料の炉乾燥質量として6.5 gを越えると、得られる比重の値にかなりのバラツキが生じることがわかる。これは、6.5 g以上の試料を70 mlの蒸留水に溶くと、その泥水が非常に高い粘性を有し、脱気が困難になるためと考えられる。それに

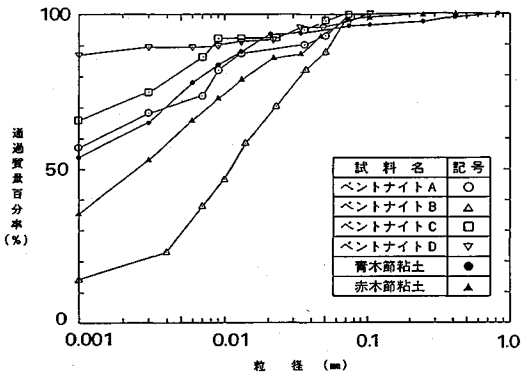


図-3 使用した試料の粒径加積曲線

対して試料の炉乾燥質量が小さくなくても、比重の値にそれほど大きな差異は生じなかった。その理由は本試験では最小目盛が0.0001gの天びんを使っており、かなり高精度の質量測定が行えたためと考えられる。しかし、測定精度の低下も試料質量測定の際、発生する可能性は十分考えられるので、上記の比重試験では図-2中に矢印で示されている5.0g程度を比重びんに投入するべき試料の炉乾燥質量と考えて行った。

表-2に上記比重試験で得られた各試料の比重を示している。

b) 膨潤性土質材料の粒度試験

粒度試験方法については、『土質工学会基準』にしたがい実施しても比較的再現性のある結果が得られた。分散剤にはヘキサメタリン酸ナトリウムを用いて実施した。各試料の粒度分布を図-3に示す。なお、今回実施した試験は、比重浮ひょう法による粒度試験であるが、図-3に示すようにこの試験では1μm以下の粒度分布が得られない。したがって、膨潤性土質材料のように微小な土粒子の多い試料に対しては、より微粒子領域が計測できる方法を適用し、1μm以下の粒度分布を得ることが今後必要であろう。

c) 膨潤性土質材料の液性限界・塑性限界試験

1) 液性限界試験

『土質工学会基準』による液性限界試験方法では、含水比の小さい試料から試験を開始し、加水することにより次第に含水比の大きい試料について試験していく方法(以下、方法Ⅰと呼ぶ)と含水比の大きい試料から開始し、空気乾燥させることにより次第に含水比の小さい試料について試験していく方法(以下、方法Ⅱと呼ぶ)とがある。いずれの方法も加水後の養生時間について具体的に記述されていない。ここに、加水した後30分間試料を養生することとし、方法Ⅰに従って得られるベントナイトAの流動曲線を図-4に示す。この図からベントナイトのような膨潤性土質材料には、上記の方法の液性限界試験では再現性のある試験結果は得られず、

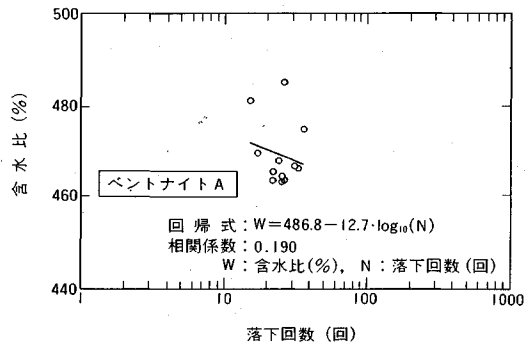


図-4 方法Ⅰによる液性限界試験で得られる流動曲線

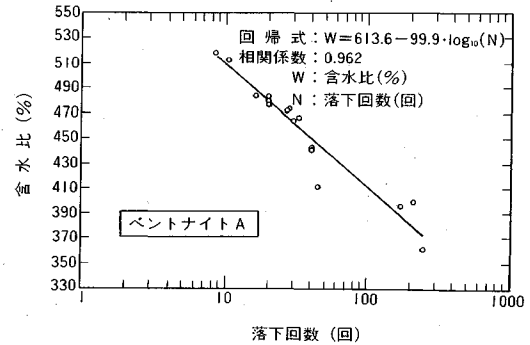


図-5 新しい液性限界試験法により得られる流動曲線

不適切であることがわかる。この原因としては、方法Ⅰでは加水する都度、試料の膨潤が生じ、試料の養生時間を十分にとれないことやシキントロピーが試験結果に影響したものと考えられる。

本研究では、方法Ⅱに膨潤やシキントロピーの影響をできるだけ小さくする工夫を行った次の方法で膨潤性土質材料の液性限界試験を実施し、再現性の高い試験結果を得た。

—膨潤性土質材料の液性限界試験手順—

- ① JIS A 1205-1980の液性限界試験法に定める測定器を用いた場合の、落下回数が10回前後になるまで試料に水を加える。
- ② 試料が乾燥しないように、試料の膨潤・養生を24時間行う。
- ③ 以上のように準備された試料を室内湿度で放置し、放置時間を長くすることにより試料を徐々に乾燥させていく。そして順次、試料の含水比とJIS A 1205-1980の液性限界試験測定器による落下回数との関係を求める。なお落下回数を得る前に、試料を5分間繰り返しシキントロピーの影響を小さくする。
- ④ 以下、『土質工学会基準』の液性限界試験方法に従う。

上記の方法により得られたベントナイトAの流動曲線を図-5に示す。この図と図-4とを比較すれば、上

表一 土の物理試験方法に関する土質工学会基準と本研究で提案した方法との比較

試験項目	新しく工夫を加えた点	土質工学会基準	本報告で提案した方法	
比重試験	1	ゾリチック型比重びんに投入する試料質量	容量100ml以上の比重びんに対し25g以上	100mlの比重びんに対し5.0g程度
	2	試料の分散方法	特に記載なし	超音波により攪拌動を与えることにより分散する。
	3	試料の脱気方法	消せん用具を用いて試料の入ったびんを10分以上静かに煮る。	気圧が水蒸気で100mm程度の状態で緩とうしながら3日間放置する。
塑性限界試験	試験手順	含水比の小さい試料から開始し、次に含水比の大きい試料について試験していく方法または、含水比の大きい試料から開始し、乾燥させることにより次に含水比の小さい試料について試験していく方法	含水比の大きい試料から開始し、含水比の小さい試料について試験していく方法	

表二 使用した試料の物理的性質

	ベントナイトA (Na-型)	ベントナイトB (Ca-型)	ベントナイトC (酸性化)	ベントナイトD (Na-型)	赤水層粘土 (カオリン系)	赤水層粘土 (カオリン系)
比重 G _s	2.79	2.71	2.68	2.64	2.71	2.62
塑性限界 w _p (%)	473.9	144.5	607.5	628.2	71.9	50.9
液性限界 w _L (%)	26.61	63.87	50.69	44.80	24.96	21.69
塑性指数 I _p (%)	447.3	80.8	556.8	583.4	46.9	35.1
粘性度 A	6.93	4.36	7.76	6.35	1.03	0.78
塑性比	16.81	1.26	10.98	13.02	1.86	1.62
粘土分 (<2μm)	64.5	18.5	71.5	91.9	45.7	45.0
含有率 C (%)						

記の試験方法で得られる結果の方が信頼性が高いことがわかる。

ii) 塑性限界試験

塑性限界試験については、『土質工学会基準』に従い実施しても比較的再現性のある結果が得られた。塑性限界試験は試料に加える水量が液性限界試験と比べて少ないので、膨潤やシキソトロピーの影響を受けにくいと考えられる。したがって、塑性限界試験は『土質工学会基準』にしたがって実施した。

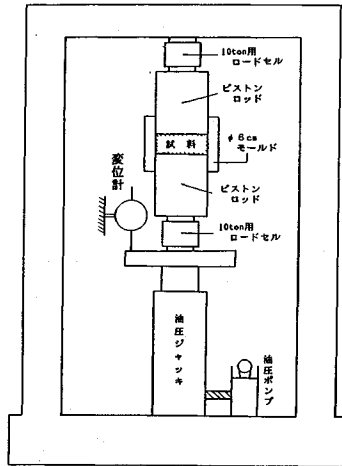
表一に土の物理試験方法に関する『土質工学会基準』と今回提案した方法との比較を示した。また表二に各試料の上記方法で得られた物理定数を示す。

表二に示した定数は土の分類や安定性の程度を示す指数であると考えられている。本来、粘土の力学的特性も物理的な要因のほかに化学的な要因により異なると考えられている。しかし、化学的な要因を示す指数(例えば、陽イオン交換容量(CEC)など)を用いて力学的な現象を表現するのは非常に困難である。化学的な要因に加えて、物理的要因を取り込んで力学的な現象を表現することはさらに難しくなる。表二に記した定数は化学的な要因の影響も取り込んだ物理定数であると考えられるので、次章からは粘土の締固め特性とこれらの諸定数との相関を調査し、締固め特性を評価することを試みている。

3. 各種粘土の静的締固め特性

(1) 試料の含水比調整法

試料の含水比を変化させて一定締固め圧力下で得られる乾燥密度を調査する締固め試験において、試料の水分



図一六 締固め試験装置概要図

調整方法が重要である。本試験では22°C一定温度下で保存したときの含水比を初期含水比として、それよりも湿潤側の試料は霧箱内に、また炉乾燥側の試料はほぼ真空状態にしたデシケータ内に、それぞれ所定日数放置する方法により、数種類の含水状態の試料を作成した。なお、霧箱は市販の超音波加湿器と密閉容器からなる。

(2) 締固め試験装置および締固め試験方法

本試験で使用した装置の概要を図一六に示す。この試験装置は締固め圧力載荷フレーム、円筒形モールド(内径6cm、高さ10cm)および締固めピストンから構成される。円筒形モールドの内壁面はテフロン加工を施し、試料とモールド内壁との間に生じるであろう摩擦を軽減している。

締固め試験方法は様々な機関で幾つかの方法が提案されているが、本試験では次に示す理由から静的荷重による締固め方法を採用した。

① 本試験で使用するベントナイトおよびカオリン系粘土に対して、衝撃的荷重による締固め方法では、締固めエネルギーの損失(細粒分の散乱等)があると考えられる。

② 粘土を対象に、高密度領域における締固め特性も調査する必要があるが、衝撃的荷重による締固め方法では所定の密度が得られない。

円筒形モールドに、締固めた後の供試体高さが、ほぼ1.0cmになるように所定の試料質量(約50g)を投入する。そして、均一な密度の試料を得るために二つのピストンロッドにより試料の上下端から一定の締固め圧力を作用させる。その際の変形の進行は数分で収束するが15分間放置する。締固め圧力はピストン部に設置されたロードセルにより計測する。15分経過後、モールドから供試体を脱型し供試体寸法と質量および含水比を計測する。なお、今回は締固め圧力を50, 100, 200

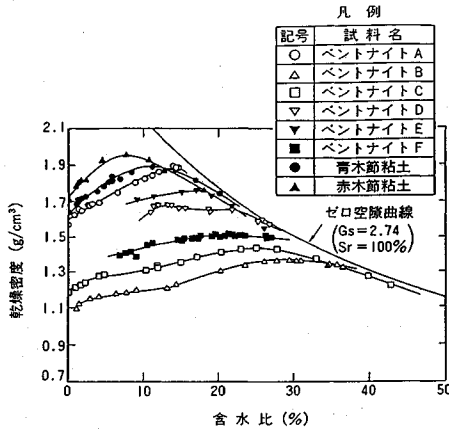


図-7 (a) 締固め圧力 200 kgf/cm² で得られる締固め曲線群

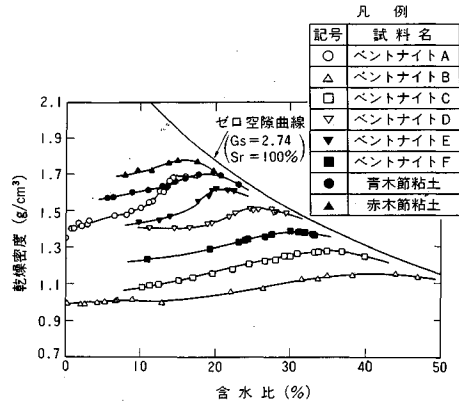


図-7 (c) 締固め圧力 50 kgf/cm² で得られる締固め曲線群

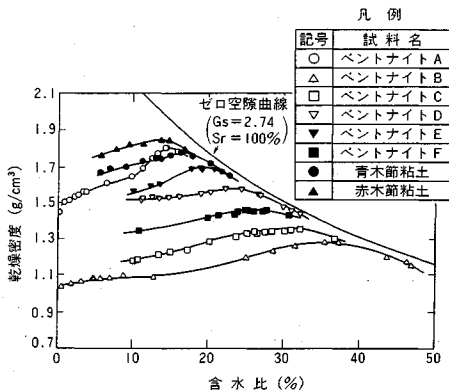


図-7 (b) 締固め圧力 100 kgf/cm² で得られる締固め曲線群

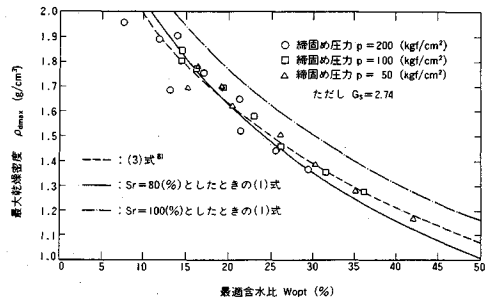


図-8 最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} との関係

kgf/cm² の三種類に変化させて実施した。上記の締固め圧力を採用した理由は、実際の緩衝材の製作にあたり、締固め圧力 $p=50\sim 200$ kgf/cm² が現実的なものと考えられるからである。

(3) 静的締固め試験結果

図-7 (a)~(c) に締固め圧力がそれぞれ 200, 100, 50 kgf/cm² の場合に得られる各試料の締固め曲線を例示する。突固め法による締固め試験では、一般に粘土の場合は比較的平滑な形状を示すと言われている。しかし、図-7 (a) 中のベントナイト A のように、高い圧力で静的に締固めると最大乾燥密度が大きく、締固め曲線の形も鋭角な曲線を描く粘土もあることがわかる。一般に、粒度配合の良い砂質土では最大乾燥密度が大きく、鋭角な締固め曲線を描き、一方、細粒土では最大乾燥密度が低く、締固め曲線は緩やかになると言われている。しかし今回の試料は、図-3 の粒径加積曲線に示すように 1 μ m 以下の粒子が全体の半分以上も占めているものが多く、その粒度配合については、比重浮ひよう法による粒度試験結果からは詳細な情報が得られない。また、1 μ m 以下の粒子が多い土質材料においては、締固め挙動

を支配する要因として、粘土粒子間の物理化学的作用等の影響も大きいと考えられる。松尾らはこの点に言及し、砂質土等では粒度配合がその締固め特性の大きな支配的要因となると考えられるが、粘土については、その締固め挙動を支配する要因として、粘土粒子間の物理化学的作用等の微視的要素が大きく影響すると述べている⁷⁾。以上のような理由から、粒度試験結果から粘土の締固め特性を推測するのは非常に困難と考えられる。

このような観点から、以下では粘土の締固め特性をその物理定数から予測することを試みる。

(4) 最大乾燥密度と最適含水比との関係について

図-8 に、締固め圧力に応じた全試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm³) と最適含水比 w_{opt} (%) との関係を示す。この図より、最大乾燥密度は最適含水比からほぼ一義的に決まると考えられる。そして両者の関係は式 (1) で表せることから、最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm³) を示すときの土の飽和度 S_r は締固め圧力 (50~200 kgf/cm²) や試料によらずほぼ等しいことが伺える。

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w_{opt}}{S_r}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度 (g/cm³)
 S_r : 土の飽和度 (%)

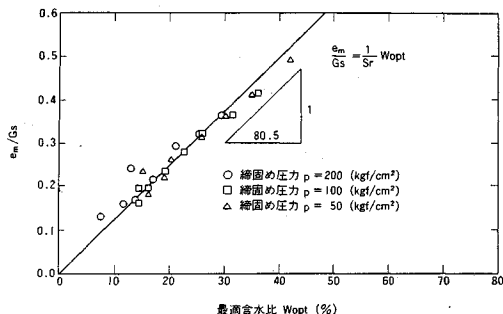


図-9 e_m/G_s と最適含水比 w_{opt} との関係

G_s : 土粒子の比重

一方、 ρ_{dmax} と最大乾燥密度時の間隙比 e_m との間には、 $e_m = G_s \cdot \rho_w / \rho_{dmax} - 1$ の関係があるので、これと式(1)から次式が得られる。

$$e_m = \frac{G_s}{S_r} \cdot w_{opt} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{e_m}{G_s} = \frac{1}{S_r} \cdot w_{opt} \dots \dots \dots (2)'$$

図-8に示した関係を式(2)'に基づき e_m/G_s と最適含水比 w_{opt} との関係に描き直すと図-9のようになる。この図から、 e_m/G_s と w_{opt} の勾配を最小二乗法により求め、 ρ_{dmax} を示すときの土の飽和度 S_r を算出すれば、締固め圧力によらず約80%の値が得られる。

森は種々の土(礫、砂およびローム等)について標準締固め試験(JIS A 1210)における最大乾燥密度と最適含水比の関係を調べており、式(3)の実験式を得ている³⁾。

$$\rho_{dmax} = \frac{1}{0.0107w_{opt} + 0.400} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots \dots \dots (3)$$

図-8には式(3)による ρ_{dmax} と w_{opt} の関係を併記した。これによると S_r が80%のときの関係とほぼ同じ傾向を示していると考えられる。このことから最大乾燥密度は最適含水比からほぼ一義的に決まるものと考えられる。ところで、上記の算定式では、いずれにしろ静的な締固め試験を実施しなければ最大乾燥密度や最適含水比は得られない。そこで、次章では簡易に得られる土の物理定数である塑性限界に着目して、最大乾燥密度や最適含水比が簡便に得られる算定式を提案することにする。

4. 塑性限界を導入した最大乾燥密度と最適含水比の算定式の提案

図-10には各締固め圧力に応じた全試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm³)と塑性限界 w_p (%)との関係を示す。この図より同じ締固め圧力であれば塑性限界が小さい土ほど高い締固め密度を発現する傾向にあることが分か

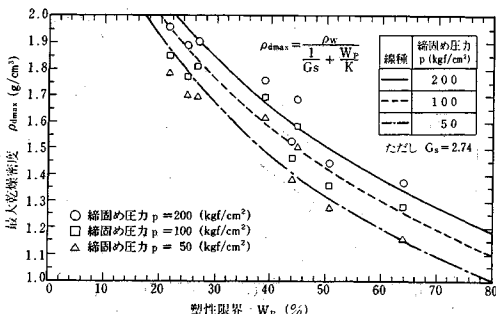


図-10 最大乾燥密度 ρ_{dmax} と塑性限界 w_p との関係

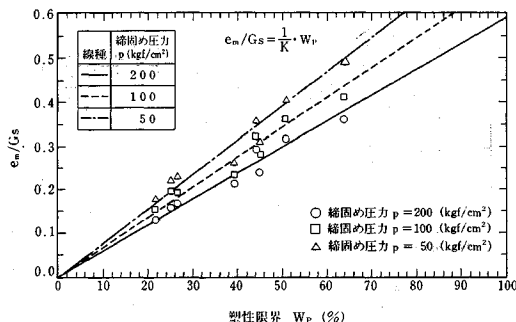


図-11 e_m/G_s と塑性限界 w_p との関係

る⁹⁾。また締固め圧力によらず、最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm³)と塑性限界 w_p (%)との関係は飽和度一定曲線の形状と非常に類似しているため、両者の関係を表示する式として次式を仮定した¹⁰⁾。

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w_p}{K}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 K は締固め圧力 p と土の飽和度 S_r により定まる値

ところで図-10に示す関係では、表-2に示すように各試料の比重の違いによる影響があるために、式(4)中の係数 K を合理的に決定するのが難しい。そこで式(2)、(2)'の誘導と同様に、最大乾燥密度を間隙比に換算することにより、試料比重の違いの影響を緩和することを試みた。最大乾燥密度 ρ_{dmax} のときの間隙比を e_m とすると式(4)は次のようになる。

$$e_m = \frac{G_s}{K} \cdot w_p \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{e_m}{G_s} = \frac{1}{K} \cdot w_p \dots \dots \dots (5)'$$

図-9に示した関係を式(5)'に基づき e_m/G_s と塑性限界 w_p との関係に描き直したものが図-11である。この図より e_m/G_s と w_p が高い相関を持って原点を通る直線関係にあることがわかる。このことから、 ρ_{dmax} と w_p との関係に式(4)を適用したことの妥当性がうかがえ

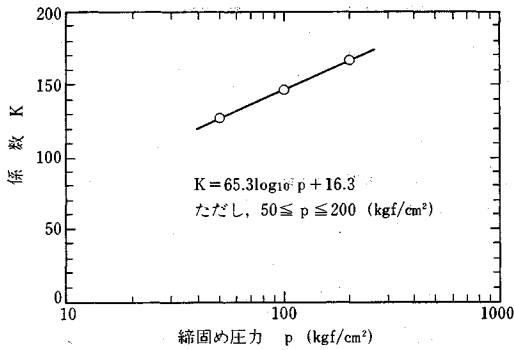


図-12 係数 K と締固め圧力 p との関係

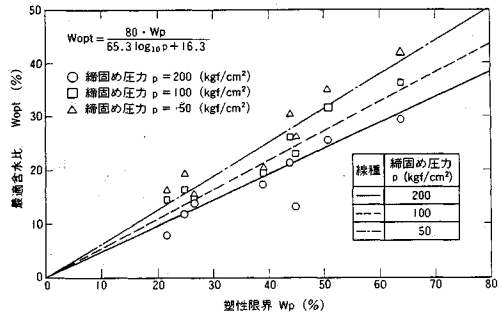


図-13 最適含水比 w_{opt} と塑性限界 w_p との関係

るものと思われる。図-11で、各締固め圧力ごとに e_m/G_s と w_p の関係から原点を通る一次回帰直線求めた。これらの直線勾配の逆数が係数 K に相当する。この係数 K と締固め圧力 p の関係を図-12に示す。この図より以下の式が得られる。

$$K = 65.3 \log_{10} p + 16.3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $50 \leq p \leq 200$ (kgf/cm²)

本試験結果では、図-9からもわかるようにいずれの試料においても、 ρ_{dmax} のときの飽和度 S_r はほぼ同一の値を示すので、式(6)においては S_r の影響は顕著でなくなっている。

式(4)に式(6)を代入することにより塑性限界を導入した最大乾燥密度の算定式(7)が誘導される。

$$\rho_{dmax} = \frac{\rho_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w_p}{65.3 \log_{10} p + 16.3}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $50 \leq p \leq 200$ (kgf/cm²)

また、最大乾燥密度が得られる土の含水比、すなわち最適含水比は式(1)もしくは、式(3)により求めることができる。したがって、式(1)と式(7)から ρ_{dmax} を消去することにより式(8)が得られる。

$$w_{opt} = \frac{w_p \cdot S_r}{65.3 \log_{10} p + 16.3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $50 \leq p \leq 200$ (kgf/cm²)

先にも述べたが、最大乾燥密度を示すときの土の飽和度 S_r (%) は、締固め圧力 (50~200 kgf/cm²) や試料によらずほぼ等しく、約80%であることから式(8)において $S_r = 80\%$ とし、塑性限界 w_p より最適含水比が得られる。図-13は、実験より得られた最適含水比 w_{opt} と塑性限界 w_p の関係を示しており、また $S_r = 80\%$ としたときの式(8)より得られる w_{opt} と w_p の関係を併記している。実際、最大乾燥密度のときの土の飽和度は試料によって若干違いがあるけれども、図-13からわかるように $S_r = 80\%$ としたときの式(8)から得られる w_{opt} と w_p の関係は実験から得られる w_{opt} と w_p の関係を近似的に表現できるものと考えられる。従って、

最適含水比は次に示す式(8)'より得ることができる。

$$w_{opt} = \frac{80 \cdot w_p}{65.3 \log_{10} p + 16.3} \quad \dots\dots\dots (8)'$$

ただし、 $50 \leq p \leq 200$ (kgf/cm²)

この式(7)と式(8)'により緩衝材の設計、製作の際に、各々の材料および締固め圧力に応じて最大どの程度の密度充填が可能か、またそのときの含水比はいくらか推測することができる。したがって、緩衝材の設計の第一段階である材料選定や ρ_{dmax} に締固める際の圧力の決定に利用することができる。

5. まとめ

今回行った物理試験および静的締固め試験から次の事項が明らかとなった。

(1) 従来の物理試験方法では信頼性の高いデータが得られなかった膨潤性土質材料を対象に、適切な試験方法を提案した。それにより比較的再現性の高い膨潤性土質材料の物理定数が得られた。

(2) 最大乾燥密度と最適含水比の関係は、ほぼ一義的に与えられる。そして、その時の土の飽和度 S_r として約80%が求められた。

(3) 土の物理定数のうち、塑性限界 w_p に着目すると w_p の小さい土ほど高い締固め密度を示すことがわかった。この実験事実より、塑性限界 w_p より最大乾燥密度 ρ_{dmax} を推定する算定式を式(7)で提案した。また、塑性限界より最適含水比を推定する算定式を式(8)'で提案した。この式(7)や式(8)'により、緩衝材の設計、製作にあたり、各々の材料および締固め圧力に応じた最大乾燥密度とそのときの最適含水比が推定できる。したがって緩衝材等の材料選定や ρ_{dmax} に締固める際の圧力の決定に利用することができる。

なお、緩衝材の製作方法や寸法については現在のところまだ明確には定まっていない。本結果は緩衝材の製作に有効に利用できると思うが、実際の大型緩衝材の製作に際しては製作装置の特性等も考慮して検証する必要がある。

最後に本研究を行うにあたり、茨城大学 高橋忠教授には種々御教示を賜りました。そして本論文をまとめるにあたり、(財)電力中央研究所 土質研究室長 西好一博士には多大なご指導をいただきました。また、実験を行うにあたり、矢作建設(株)野村 淳氏(元茨城大学学生)と前田建設工業(株)原 基博氏(元茨城大学学生)の助力を得ました。末筆ながら、ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、吉川恵也・朝倉俊弘・小島芳之：NATM のための膨潤性地山分類，日本応用地質学会，昭和 63 年度研究発表会講演論文集，pp. 25～28，1988。
- 2) 例えば、嘉門雅史・浅川美利：新体系土工学 16 土の力学 (I) —土の分類・物理化学的性質—，pp. 173～174，1988。
- 3) Brookins, D. G. (石原健彦，大橋弘士訳)：「放射性廃棄物処分の基礎<地球化学的アプローチ>」(第 13 章 工

学的埋戻し材とキャニスター)』，pp. 260～279，現代工学社，1987。

- 4) SKBF/KBS (1983) : Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3 III Barriers.
- 5) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第二版，技報堂出版，1987。
- 6) 土質学会編：土質試験の方法と解説，1990。
- 7) 松尾新一郎・宋 永焜：締固め土の構造と工学的性質の相関性に関する微視的研究，土木学会論文集，第 189 号，pp. 63～77，1971。
- 8) 森 満雄：土の最大乾燥密度と最適含水比について，土と基礎，Vol. 10, No. 9, pp. 12～16，1962。
- 9) 小峯秀雄・緒方信英・野村 淳：粘土の締固め特性とその物理化学的性質について，第 24 回土質工学研究発表会，pp. 1843～1846，1989。
- 10) 小峯秀雄・緒方信英・原 基博：塑性限界を導入した粘土の最大乾燥密度の算定式の提案，第 25 回土質工学研究発表会，pp. 1815～1816，1990。

(1990. 10. 1 受付)

EVALUATION OF CLAY COMPACTION CHARACTERISTICS BY MEANS OF THE PLASTIC LIMIT

Hideo KOMINE and Nobuhide OGATA

Expansive soils have recently attracted increasing attention as back filling (buffer) materials for repositories of high-level nuclear waste. However, since very little has been known concerning the physical and mechanical characteristics of such materials, it is necessary to clarify the swelling and compaction characteristics of expansive soils.

For this purpose, various kinds of index tests and a series of static compaction tests were performed using several kinds of swelling soils in order to investigate the relationship between the fundamental physical properties and the compaction characteristics.