

# モンモリロナイト含有量および静置条件の違いがベントナイト・カオリン混合試料土の強度，変形特性に及ぼす影響

INFLUENCE OF MONTMORILLONITE CONTENT AND ELAPSED CONDITIONS ON STRENGTH-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOILS WITH MIXTURES OF BENTONITE AND KAOLIN CLAY

佐野博昭\*・山田幹雄\*\*・出村禧典\*\*\*

by Hiroaki SANO, Mikio YAMADA and Yoshinori DEMURA

## 1. まえがき

地盤には上部構造物を支える強度，支持力，変形特性が求められ，これが不足する場合には，上部構造物の設計変更あるいは地盤の改良を行うなどの方策が検討される．地盤改良を行う方法が採用されると，次に，目的，施工場所，改良の手段，改良の作用および改良効果の時期などを基にして最適な工法が検討される<sup>1)</sup>．

改良の手段としては，置換，高密度化，排水，補強，固結があり，地盤の強度，支持力，変形特性は含水比や乾燥密度などによって異なるため，これを改善するために，例えば締め固めによる「高密度化」やセメントや石灰などの固化材を混入する「固結」が用いられる．なお，これらを改良の作用によって分類すると，前者は「物理的な作用による改良」，後者は「化学的な作用による改良」となる<sup>1)</sup>．

一方，乱さない土を練り返すと一時的に強度の低下が生じる．ここで，乱さない土の強度に対する練り返した土の強度の比は鋭敏比と定義され，この値が大きいほど練り返しによる強度の低下割合が大きいことを意味する．鋭敏比は，粘性土を扱う土工事における施工機械のトラフィカビリティーに大きく関係しており，この程度を判定するために「締め固めた土のコーン指数試験<sup>2)</sup>」が行われている．

しかしながら，一度，強度低下が生じた土を含水

る．

村山・柴田<sup>4)</sup>によれば，粘性土地盤に杭を打ち込んだ後の日数の経過にともなって支持力が増加することが報告されている．また，森<sup>5)</sup>の研究によれば，締め固めた不飽和土においてもシキソトロピーによって生じる強度の増加が指摘されている．

先に述べた地盤改良は，強度，支持力，変形特性を改善するために地盤に対して何らかの改良を行うものであるが，シキソトロピーによる強度増加は自然に発生するものであり，その程度も一般の土ではあまり大きくなく，定量的な評価は困難であるとされている．しかしながら，シキソトロピーによる強度あるいは変形特性の改善効果がある程度正確に，かつ簡単に推定できるようになれば，盛土のような締め固め土構造物において，シキソトロピー効果を安全率に見込むことが可能になるものと思われる．

シキソトロピー特性に影響を及ぼす要因として，含水比の高低と含有鉱物の種類が挙げられる．含水比が液性限界付近の土においてシキソトロピーによる強度の増加が顕著であり，塑性限界付近あるいは液性限界を大きく超える含水比では少ないこと，鉱物としてモンモリロナイトを含有する場合には顕著であるが，カオリンナイトではそのような性質を示さないことなどが示されている<sup>3)</sup>．

しかしながら，モンモリロナイト含有量や静置条件の違いによる強度，変形特性にどの程度影響を及ぼすかは不明な点が多い．

本研究では，締め固めた土のモンモリロナイト含有量や静置日数，静置温度の違いが強度，変形特性に及ぼす影響を調べることを目的に，モンモリロナイトを主成分とするベントナイトにカオリンを割合で混合した試料土に対して一軸圧縮試験を行った．

## 2. 試料土の基本的性状

2.1. 試料土の性状  
試料土は，モンモリロナイトを主成分とする市販

表1 試料土の物理的性質

試料土	ベントナイト	カオリン
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.74	2.73
液性限界 (%)	448.6	52.8
塑性限界 (%)	60.2	40.6
塑性指数	388.4	12.2
砂分 (%)	0.3	0.0
シルト分 (%)	30.1	3.0
粘土分 (%)	69.6	97.0

表2 試料土の化学成分組成

試料土	ベントナイト	カオリン
SiO <sub>2</sub> (%)	68.9	69.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13.7	24.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1.69	0.15
CaO (%)	2.62	0.08
MgO (%)	2.54	0.08
K <sub>2</sub> O (%)	0.36	0.09
Na <sub>2</sub> O (%)	2.72	0.87
Li (%)	5.33	3.74

の粉末試料であるベントナイト (Na型) とカオリンを用いた。表1は、試料土の物理的性質を、表2は、化学成分組成を示す。

一軸圧縮試験の実施に先立って、ベントナイトとカオリンの2つの試料土の混合性を確認してみることにした。具体的には、まず、ベントナイト混合率  $M_B$  が20~80%となるように自然含水比状態で計量したベントナイトとカオリンを容量50lのポリエチレン製蓋付き容器に投入し、最長20分間連続して振とうした。ここで、ベントナイト混合率  $M_B$  とは、ベントナイトとカオリンの合計乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率を示している。また、作業効率の観点から、1回当たりの混合試料土の投入量を1kgと2kgとで比較してみることにした。

次に、作製した混合試料土において、ベントナイトとカオリンとが均一に混合しているかどうかを確認するために、振とうが終了した時点で容器内の任意の3箇所から混合試料土を採取し、日本ベントナイト工業会標準試験方法<sup>6)</sup>に準拠してメチレンブルー吸着量試験を行った。この試験は、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトが他の粘土鉱物よりも多量のメチレンブルーを吸着できるという性質を利用するものであり、特殊な装置や知識を必要とせ

表3 メチレンブルー吸着量試験結果

ベントナイト混合率 $M_B$ (%)	混合試料土質量 (kg)	振とう時間(分)				
		1	2	5	10	20
20	1	◎	◎	◎	◎	◎
	2	○	◎	◎	◎	◎
40	1	×	◎	◎	◎	◎
	2	◎	◎	◎	◎	◎
60	1	×	◎	◎	◎	◎
	2	◎	◎	◎	◎	◎
80	1	×	×	◎	◎	◎
	2	○	×	◎	◎	◎

※混合試料において3箇所より試料土を採取し、1箇所につき2回のメチレンブルー吸着量試験を実施。

◎同一箇所より採取した試料土の2回の測定結果の差が1ml以下であるとともに、3箇所の測定結果(計6個)の差が1ml以下である。

○同一箇所より採取した試料土の測定結果の差は1ml以下であるが、3箇所の測定結果の差が2ml以上である。

×同一箇所および3箇所の測定結果の差が2ml以上である。

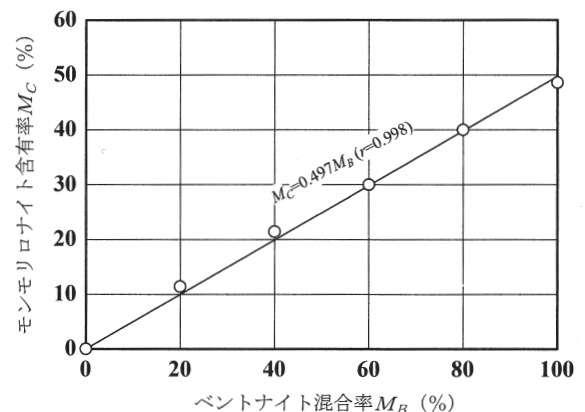


図1 ベントナイト混合率とモンモリロナイト含有率との関係

ず、比較的簡便な方法によりモンモリロナイト含有量を求めることができる。また、この試験によって得られた結果は、X線回折によって求められた結果と良く一致することも報告されている<sup>7)</sup>。

表3は、メチレンブルー吸着量試験結果を示す。なお、試験法に拠れば、測定は1つの試料土に対して2回行うものとし、2回の誤差が1ml以下となっている。そこで、本研究では上記の規定を準用するものとし、混合性の評価は、任意の3箇所において採取した試料土のメチレンブルー吸着量の差によって行うものとした。なお、表中の◎は十分に混合されている、×は混合が不十分であると判断したことを示すものである。

表より、振とう時間が1分ではベントナイト混合率

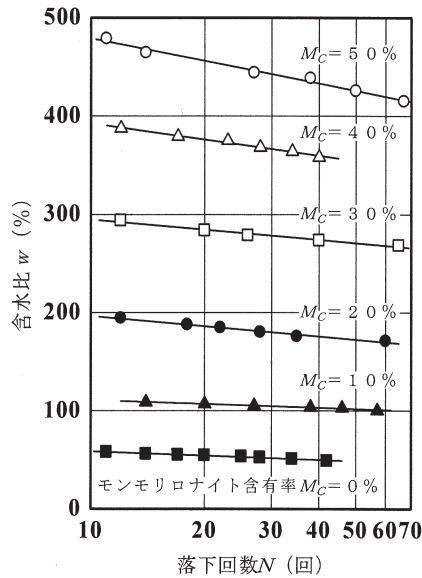


図2 ベントナイト・カオリン混合試料土の流動曲線

40~80%, 混合試料土質量が1kgでメチレンブルー吸着量にばらつきが認められ, 2分ではベントナイト混合率80%でばらつきが認められたが, 5分以上振とうするとベントナイト混合率や混合試料土質量によらず測定結果の差が1ml以下となり, 2つの試料土の混合が十分に行われていることが明らかとなった. そこで, 混合試料土の作製においては, 上記の容器に所定の配合割合となるように計量した1.5kgの試料土を投入し, 5分間連続して振とうすることによって行うものとした.

図1は, ベントナイト混合率  $M_B$  とモンモリロナイト含有率  $M_C$  との関係を示す. ここで,  $M_B = 0\%$  はカオリン単体を,  $M_B = 100\%$  はベントナイト単体を意味する. なお, モンモリロナイト含有率  $M_C$  は, それぞれのメチレンブルー吸着量をモンモリロナイトが100%含まれている試料土のメチレンブルー吸着量140meq/100gで除することによって算出した<sup>8)</sup>.

図より, カオリン単体 ( $M_B = 0\%$ ) の場合, モンモリロナイト含有率  $M_C = 0\%$ , ベントナイト単体 ( $M_B = 100\%$ ) の場合,  $M_C = 49\%$  となっており, 双方の間には式 (1) に示すような関係が認められ,  $M_B$  の概ね半分が  $M_C$  に対応していることがわかる.

$$M_C = 0.497 \cdot M_B (r = 0.998) \quad (1)$$

そこで, 本研究では, モンモリロナイトがどの程度含まれているかを表す指標としてモンモリロナイト含有率  $M_C$  を採用することにした.

先にも述べたように, シキソトロピー現象による強度の増加傾向は含水比の高低に深く関わっており, 含水比が液性限界付近の土において強度の増加が顕

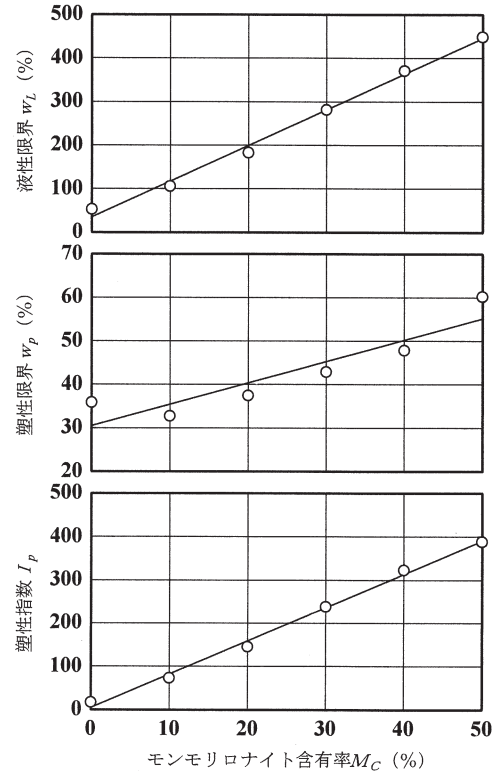


図3 モンモリロナイト含有率とコンシステンシー限界との関係

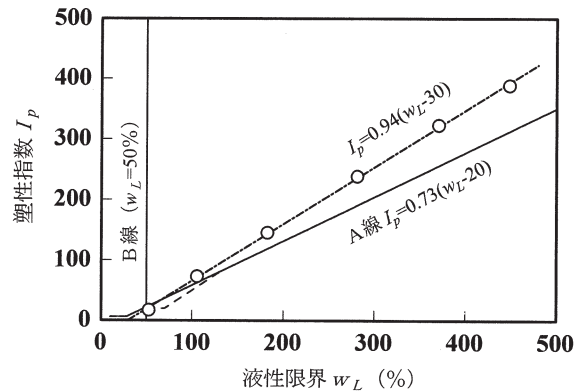


図4 塑性図

著であり, 塑性限界付近あるいは液性限界を大きく超える含水比では少ない. 前出表1によれば, ベントナイトの液性限界は448.6%, 塑性限界60.2%, カオリンでは52.8%, 40.6%となっており, ベントナイト・カオリン混合試料土の液性限界や塑性限界を把握しておくことは重要である. そこで, ベントナイト・カオリン混合試料土のコンシステンシー限界について検討してみることにした.

図2は, ベントナイト・カオリン混合試料土の流動曲線を示す. 図より, モンモリロナイト含有率が増加すると流動曲線は上方へ移動し, 曲線の傾き, す

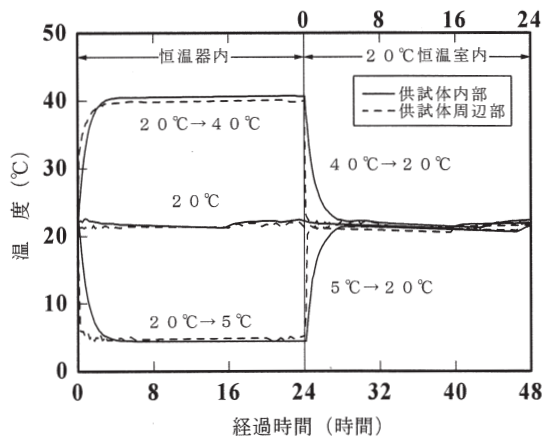


図5 供試体周辺部および内部温度の推移

なわち流動指数も徐々に大きくなる傾向が認められる。

図3は、モンモリロナイト含有率とコンシステンシー限界との関係を示す。図より、モンモリロナイト含有率の増加にともなって液性限界、塑性限界、塑性指数ともほぼ直線的に増加していることがわかる。

図4は、モンモリロナイト含有率の違いによる塑性図を示す。ベントナイト・カオリン混合試料土はA線よりもやや上方に位置しており、塑性指数と液性限界との間には次式(2)の相関性が認められる。

$$I_p = 0.94 \cdot (w_L - 30) (r = 1.000) \quad (2)$$

### 3. ベントナイト・カオリン混合試料土の強度、変形特性

前章では異なるモンモリロナイト含有率を有するベントナイト・カオリン混合試料土の作製方法およびコンシステンシー限界について検討したわけであるが、ここではモンモリロナイト含有率が締固め土の強度、変形特性に及ぼす影響を調べるために行った一軸圧縮試験の結果について述べる。

試験にあたっては、まず、モンモリロナイト含有率を0~50%に調整した混合試料土にイオン交換水を加えて約32%の含水比に調整した後ビニール袋に入れて厳封し、試料土と水とのなじみをよくするために20°Cの恒温室内で14日間放置した。なお、混合試料土の液性限界は52.8~448.6%、塑性限界は40.6~60.2%であり、設定含水比である約32%はいずれの混合試料土においても液性限界はもとより塑性限界よりも低い値となっている。

次に、供試体の寸法は直径5cm、高さ10cmとし、作製にあたっては乾燥密度1.3g/cm<sup>3</sup>、飽和度80%を目標として静的に締め固めた。作製した供試体をラッ

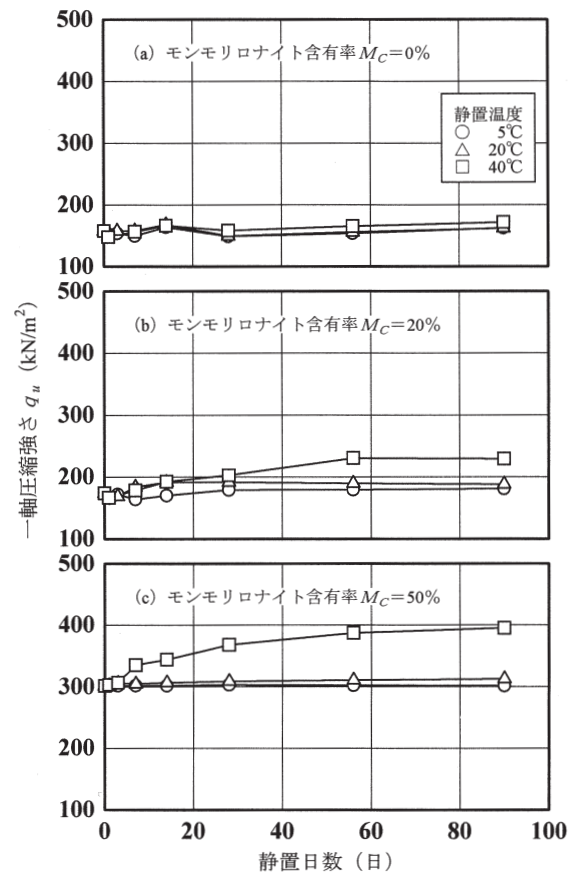


図6 静置日数と一軸圧縮強さとの関係

プで包み、パラフィンでシールし、温度5、20、40°Cに設定した恒温器内に最長90日まで静置した後、温度20°Cの恒温室内においてひずみ速度1%/分の条件下で一軸圧縮試験を行った。

ここで、5、40°Cに設定した恒温器内で静置されていた供試体を取り出し、直ちに温度20°Cの恒温室内で一軸圧縮試験を行うと供試体内部の温度分布が不均一となっており、一軸圧縮試験結果に影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、温度の影響を取り除くために供試体の温度を均一にした後、一軸圧縮試験を行うために以下の要領で予備試験を行うことにした。

まず、供試体内部の温度を測定するために、供試体上端から2.5cm間隔の3箇所(上部、中央部、下部)に供試体側面から供試体中心部まで小孔をあけ、その中に温度測定用端子を刺込み、さらに外気の影響が内部に及ばないように端子周辺に試料土を充填した。次に、供試体を20°Cの恒温室内に静置して内部温度が20°Cになったことを確認した後、この供試体を直ちに5、20、40°Cに設定した恒温器内に静置し、時間の経過にともなう供試体周辺部および内部(上部、中央部、下部)の温度を24時間継続して測定し

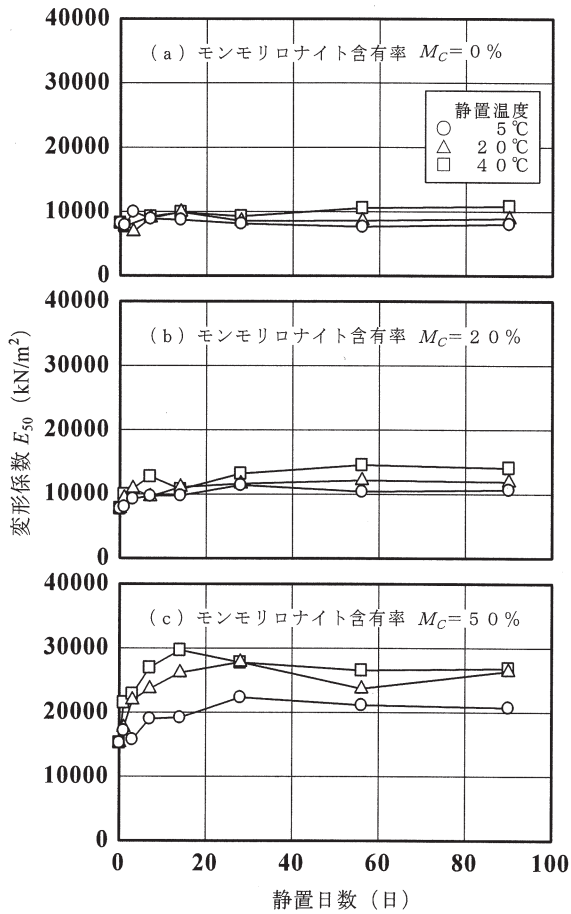


図7 静置日数と変形係数との関係

た. 24時間が経過した時点で今度は供試体を20°Cに設定した恒温室内に直ちに移動させ, 先ほどと同様に温度の計測を24時間行った.

図5は, 経過時間と供試体周辺部および内部温度の推移を示しており, 内部温度は上部, 中央部, 下部の平均値を示す. 図より, 供試体を20°Cから5, 40°Cおよび5, 40°Cから20°Cの温度環境下にそれぞれ静置すると, 概ね2時間ほどで供試体内部の温度が設定温度に等しくなることがわかる.

この結果を受けて, 所定の温度条件下で静置した供試体の一軸圧縮試験は, 温度20°Cの恒温室内で約2時間静置してから行うこととした.

図6は, モンモリロナイト含有率が0, 20, 50%の場合の静置日数の経過にともなう一軸圧縮強さ  $q_u$  の推移を静置温度ごとに示す. なお, 静置期間中における供試体の質量変化を調べることを目的として, 供試体作製時と一軸圧縮試験時とに質量を測定したところ, 質量の減少は0.09~1.84gであり, 静置期間中, 供試体の含水比はほぼ一定 (30.1~33.7%) に保たれていた.

図より, モンモリロナイト含有率  $M_c$  が0%の場合

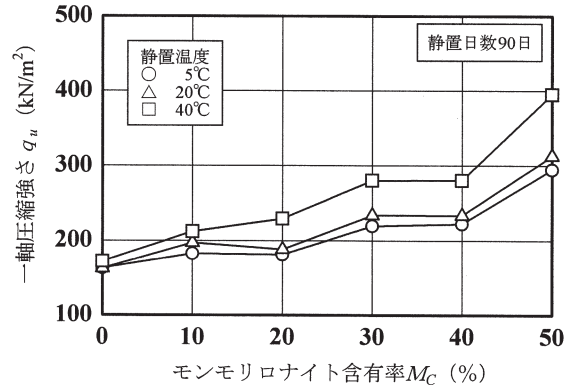


図8(a) モンモリロナイト含有率と一軸圧縮強さとの関係 (静置日数90日)

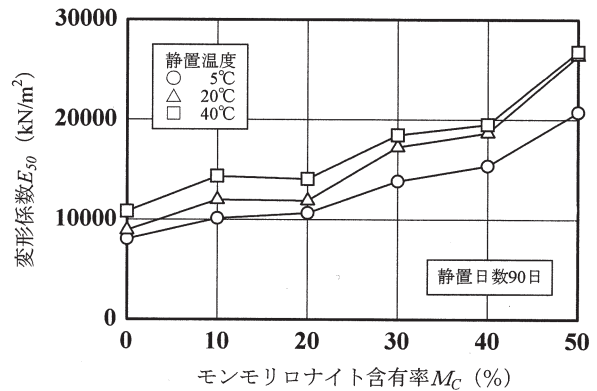


図8(b) モンモリロナイト含有率と変形係数との関係 (静置日数90日)

(カオリン単体), 静置温度の高低や静置日数の長さによらず,  $q_u$  の変化はほとんど認められない.  $M_c$  が20%および50% (ベントナイト単体) と大きくなると, 静置温度が5°C, 20°Cでは静置日数の経過にともなう  $q_u$  の増加は僅かであるが, 40°Cでは  $q_u$  が大きくなる傾向にあり,  $M_c$  が50%で静置90日における40°Cの  $q_u$  は5°C, 20°Cの  $q_u$  の約1.3倍となっている. また, 静置日数56日以降では  $q_u$  がほぼ一定になっていることがわかる.

正垣ら<sup>9)</sup>は, 練り返し土の強度・圧密特性に及ぼすシキソトロピーの影響を検討した結果, 一軸圧縮強さや変形係数の回復が60日ごろまでにほぼ終了していると報告しており, 今回, 締固め土に対して行った結果と一致するものである.

以上の結果より, 液性限界 (52.8~448.6%) はもとより塑性限界 (40.6~60.2%) よりもさらに低い含水比 (約32%) で締め固めた供試体においても, 締固め後の静置日数の経過にともなう  $q_u$  の増加が生じていることが明らかとなった. また, この推移にはモンモリロナイト含有率や温度の高低が深く関与

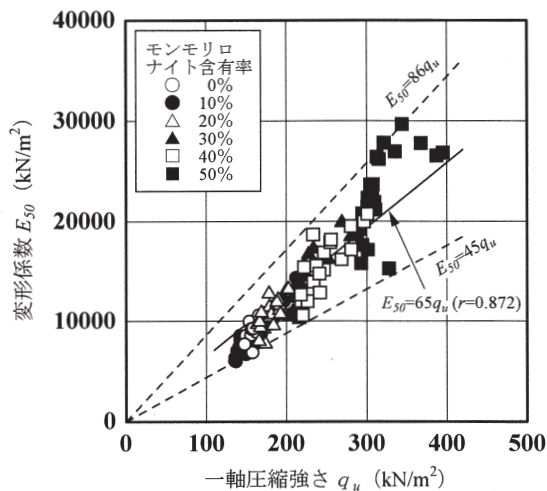


図9 一軸圧縮強さと変形係数との関係

していることも示された。

図7は、モンモリロナイト含有率が0, 20, 50%の場合の静置日数の経過ともなう変形係数  $E_{50}$  の推移を静置温度ごとに示す。図より、一軸圧縮強さと同様、モンモリロナイト含有率、静置温度、静置日数の影響を受けていることがわかる。

図8(a), (b)は、モンモリロナイト含有率と静置日数90日時点での一軸圧縮強さ、変形係数との関係を静置温度ごとに示す。図より、モンモリロナイト含有率が増えるにつれて、静置温度が高くなるにつれて一軸圧縮強さと変形係数は漸次増加しており、モンモリロナイト含有率50% (ベントナイト単体) の  $q_u$  は0% (カオリン単体) の  $q_u$  の1.8~2.3倍、 $E_{50}$  は2.6~3.0倍となっていることがわかる。

図9は、モンモリロナイト含有率が0, 10, 20, 30, 40, 50%の一軸圧縮強さと変形係数との関係を示す。図より、 $E_{50}/q_u$  の値は、45から86の範囲にあり、モンモリロナイト含有率が50% (■) と高くなるとデータが若干ばらつく傾向にあるが、両者の間には次式(3)の比較的相関性の高い直線関係が成立していることがわかる。

$$E_{50} = 65 \cdot q_u \quad (r = 0.872) \quad (3)$$

以上の結果より、締め固めたベントナイト・カオリン混合試料土の一軸圧縮強さ、変形係数は静置日数の経過ともなう増加することが示された。また、モンモリロナイト含有率や静置温度によって強度、変形特性も大きく異なることが明らかとなった。

#### 4. まとめ

本研究では、モンモリロナイト含有量および静置条件の違いが締め固めた土の強度、変形特性に及ぼ

す影響を調べることを目的に、異なるモンモリロナイト含有率を有するベントナイト・カオリン混合試料土に対して一軸圧縮試験を行った。本研究により得られた主要な結果を以下に列挙する。

- (1) モンモリロナイト含有率が増加すると、液性限界、塑性限界、塑性指数は増加する。
- (2) 液性限界はもとより塑性限界よりもさらに低い含水比で締め固めたベントナイト・カオリン混合試料土において、静置日数の経過ともなう一軸圧縮強さ、変形係数の増加が認められる。
- (3) モンモリロナイト含有率の大小のみならず、静置日数の長短や温度の高低によっても強度、変形特性は異なる。

#### 謝辞

本研究を遂行するに当たり、各種の室内試験および結果の整理には石川工業高等専門学校技術職員・能澤真周氏および環境都市工学科卒業研究生諸君のご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 澤孝平, 渡辺康二, 沖村孝, 青木一男, 佐野博昭: 地盤工学, 森北出版株式会社, pp. 237-252 (2004)
- 2) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), pp. 266-273 (2003)
- 3) 嘉門雅史, 浅川美利: 新体系土木工学 16 土の力学 (I) -土の分類・物理化学的性質-, 技報堂出版, pp. 118-120 (1988)
- 4) 村山朔郎, 柴田徹: 粘土中の摩擦グイの支持力とその新測定法, 土木学会論文集, 第59号, pp. 49-56 (1958)
- 5) 森麟: 土のシキソトロピーと路床支持力, 土木学会論文集, 第57号, pp. 7-11 (1958)
- 6) 日本ベントナイト工業会: 日本ベントナイト工業会標準試験方法, ベントナイト (粉状) のメチレンブルー吸着量測定法, JBAS-107-77 (1977)
- 7) 土居茂雄, 鈴木哲也, 針谷宥: 変質安山岩質骨材に含まれているスメクタイトの含有量の測定, 土質工学と粘土科学の接点をさぐる-粘土鉱物試験結果の活用-共催シンポジウム発表論文集, pp. 37-42 (1991)
- 8) 小峯秀雄, 緒方信英: 塑性限界を導入した粘土の締め固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集, No. 436/III-16, pp. 103-110 (1991)
- 9) 正垣孝晴, 三原政治, 須藤剛史: 土の強度・圧密特性に及ぼすシキソトロピーの影響, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, III-450, pp. 954-955 (1993)

(2009年11月30日受付 2010年1月16日受理)