

重錘落下式変形係数測定装置を用いた セメント安定処理土の変形・強度特性の評価

属 寛¹・落合英俊²・安福規之³・大嶺 聖⁴

¹学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 博士(工学) 九州大学大学院助手 工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

セメント安定処理土の変形・強度特性は、含水比、セメント添加量、養生日数など様々な影響を受ける。本報では、安定処理土の変形係数を、非破壊で経時的に測定することができる重錘落下式変形係数測定装置(FWDM装置)を開発し、変形係数に及ぼす様々な配合条件および拘束圧の影響を調べ、セメント安定処理土の変形・強度特性の評価を行った。その結果、FWDM装置によって得られる変形係数の測定値をもとに、配合条件の異なる安定処理土の改良効果の評価できることが確認された。さらに、この非破壊試験によって測定される養生初期の変形係数の経時変化から、養生28日強度の推定を行うための手法を提案した。強度の推定値と実測値とは、比較的良好な対応をしており、強度推定法の妥当性が示された。

Key Words : cement-stabilized soil, deformation modulus, nondestructive testing apparatus, curing time, strength prediction

1. はじめに

我が国では、大都市の多くが、軟弱な沖積地盤の上に発達している。軟弱地盤を対象とした地盤改良工法として、セメントなどの固化材を混合・攪拌し必要な強度の確保を行うセメント安定処理工法が幅広く用いられている。そのような背景には、建設事情の多様化、ことにリサイクルとしての現地発生土の有効利用、軟弱粘性土である浚渫埋立地盤の改良、環境保全のための土質改良などが考えられる。このセメント安定処理工法は、深層混合処理や事前混合処理工法などの技術開発によって発展し¹⁾、近年では、浚渫土を混合処理後、再び海底に圧送するプレミックス工法等の新たな工法においても適用例が増加している²⁾。

原位置の安定処理地盤においては、原料土である軟弱粘性土の性状が品質管理の精度に対して重要な要因となっており、原料土の粒度組成や含水比の違いが、強度の発現に大きな影響を与える³⁾。そのため、セメント安定処理土の変形・強度特性を評価するためには、セメント添加量、養生日数に加え、原料土の初期含水比など様々な影響要因について明ら

かにする必要がある。これらの影響要因に対して、安定処理土の変形・強度特性を評価する研究が新たな視点で行われている⁴⁾⁵⁾。また近年では、都市部における地下空間利用や近接施工においても、安定処理土を活用する事例が増加している。近接施工などの実際の地盤変形問題においては、0.1%以下のひずみが重要になること⁶⁾から、安定処理地盤の微小変形特性の評価に関する研究が行われている⁸⁾⁹⁾。

セメント安定処理土は、軟弱粘性土試料とセメントとの化学的な結合により、改良効果が発揮される材料である。そのため、セメント安定処理土の特徴の一つとして、強度が時間と共に変化していくことが挙げられる。安定処理土の変形・強度特性の経時変化を測定することは、原位置の品質管理において重要であるが、その調査法は、未だに確立されていないのが現状である。また、この特徴を用いて、安定処理土の養生初期における強度の変化から改良効果を判定し、その後の強度の増加を推定することは施工性や経済面から有用であると考えられる¹⁰⁾。

本報では、セメント安定処理土の変形係数を測定することができる重錘落下式変形係数測定装置(以下、FWDM装置)¹¹⁾¹²⁾を開発し、変形係数に及ぼす

各パラメータの影響を調べ、セメント安定処理土の変形・強度特性の評価を行う。さらに、この試験装置の特徴を用いて、養生初期の変形係数の増加傾向から養生28日強度の推定を行い、FWDM装置を用いた強度推定法を提案する。FWDM装置の特徴および利点として、非破壊で変形係数を経時的に測定することができ、セメント安定処理土が固化していく傾向を比較的簡便に把握できることが挙げられる。また、一般的に微小変形特性の測定法として用いられる、ひずみ制御の静的な微小繰返し载荷に比べて、FWDM装置は载荷フレームなしで、動的荷重を作用させることによって変形特性を測定できるため、今後現場で適用するのに有利である。

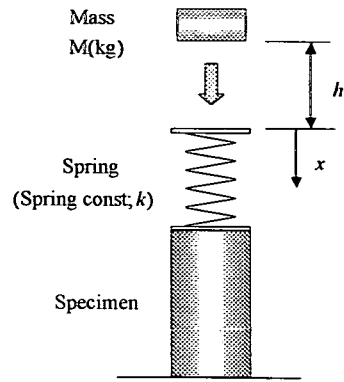


図-1 重錘落下モデル

次の式で表される。

$$x = \frac{Mg}{k} \left(1 - \cos \omega t + \sqrt{\frac{2kh}{Mg}} \sin \omega t \right) \quad (3)$$

このとき角振動数 ω は、

$$\omega = \sqrt{k/M} \quad (4)$$

一方、図-1に示す供試体上面に作用する圧縮力 P は次式で表される。

$$P = kx = Mg \left(1 - \cos \omega t + \sqrt{\frac{2kh}{Mg}} \sin \omega t \right) \quad (5)$$

式(5)に示されるように、重錘の質量 M 、ばね定数 k 、落下高さ h を自由に变化させることにより、供試体に作用する圧縮力 P を任意に設定することができる。また、圧縮力 P の最大値 P_{max} は、

$$P_{max} = Mg + \sqrt{M^2 g^2 + 2Mgkh} \quad (6)$$

式(6)で求められる最大圧縮力 P_{max} を供試体上面に加えることで応力とひずみの経時変化を測定する。なお、 P_{max} は M 、 k および h を変えらることによって、調整することが可能である。

(2) 重錘落下式変形係数測定装置について

セメント安定処理土の変形係数の経時変化を測定するために作製した、重錘落下式変形係数測定装置(FWDM装置)の概略図を図-2に示す。重錘を载荷軸に沿って自由落下させ、弾性ばねを介して重りによるエネルギーを供試体上部に伝達する。重錘の質量 M 、ばね定数 k 、および落下高さ h を変えて、供試体に作用する圧縮力を設定する。ロードセルによ

2. 重錘落下式変形係数測定装置の開発

安定処理土の変形係数を測定するために開発した重錘落下式変形係数測定装置(FWDM; Falling Weight Deformation Measurement apparatus)は、弾性ばねを介して重錘を供試体に落下させることによって非破壊で変形係数の測定を行うものである。そこで、重錘を落下させることによる、変形係数の測定の原理について示す。次に、FWDM装置の概要および変形係数の測定手順について説明する。また、供試体に作用する微小ひずみを測定する際に使用した、LDT(局所変位測定装置)について述べる。

(1) 重錘落下モデル

重錘落下による変形係数測定の原理について考える。重錘落下モデルを図-1に示す。ある高さから重錘を、供試体上部にある弾性ばねの上に自由落下させる。ばねの剛性が供試体の剛性に比べて非常に小さい場合、落下荷重のエネルギーは、ばねによってほとんど吸収されると考えられるため、エネルギー保存則より以下の式が成り立つ。

$$Mgh = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} M\dot{x}^2 - Mgx \quad (1)$$

ここに、 M は重錘の質量、 g は重力加速度、 h は重錘の落下高さ、 k はばね定数、 x はばね上部の初期高さを原点として下向きの変位、 \dot{x} は $\dot{x} = dx/dt$ で表される速度とする。式(1)を x について微分すると、

$$M\ddot{x} + kx = Mg \quad (2)$$

$t=0$ のとき $x=0$ 、 $\dot{x} = \sqrt{2gh}$ であることから、変位 x は

表-1 試料の諸特性および実験条件

試料	関門粘土	有明粘土	カオリン
土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.64	2.61	2.70
液性限界 w_L (%)	77.5	86.5	50.6
塑性指数 I_p	50.2	51.3	19.6
初期含水比 w_0 (%)	80, 120, 160	160	100
セメント添加量 C (kg/m ³)	60, 80, 100, 150, 200	60, 80, 100	100, 200, 300
圧密圧力 p_c (kPa)	49, 98, 147	—	—

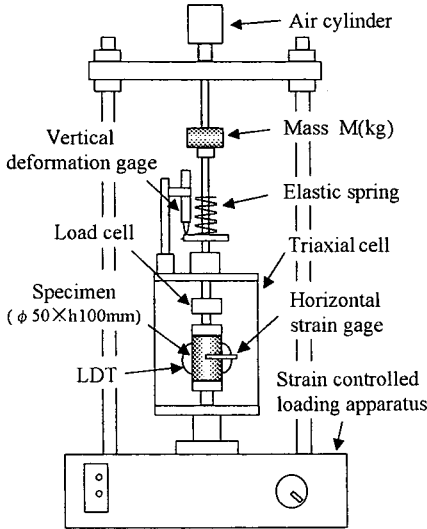


図-2 重錘落下式変形係数測定装置の概略図

り、供試体上部に加わる荷重を測定する。また、鉛直変位計を設置して鉛直変位を測定し、供試体側面の中央部分にクリップゲージを取り付け、水平変位を測定する。鉛直変位については、ベディングエラーの影響をなくすため、供試体側面の左右に一对取り付けたLDT（局所変位測定装置；Local Deformation Transducer）¹³⁾によっても測定を行っている。荷重と変位の測定により得られる応力とひずみの波形の最大値から、変形係数を算出する。LDTは、鉛直変位の測定精度が外部変位計よりも優れている。そこで本報では、変形係数の算出は、LDTから測定される鉛直変位を用いる。FWDM装置は、一軸状態において測定可能であるが、拘束圧の影響を考慮した三軸状態においても、試験が可能である。

微小ひずみの測定においては、LDTが用いられる例が増加している¹⁴⁾。LDTの特徴として、供試体端面に直接取り付けるため、供試体上下端面とペダスタルの間の不完全接触によるベディングエラーの影響が取り除かれるという点が挙げられる。LDTを設置した供試体の詳細を図-3に示す。供試体端面の不整形に伴う偏心載荷を防ぐために、供試体上下端面

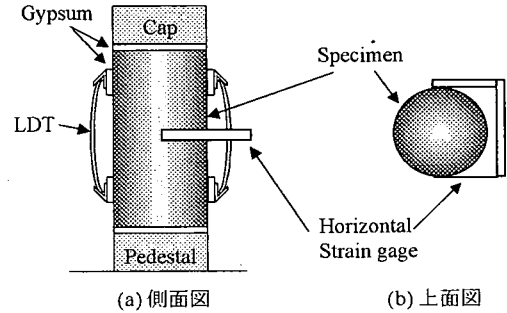


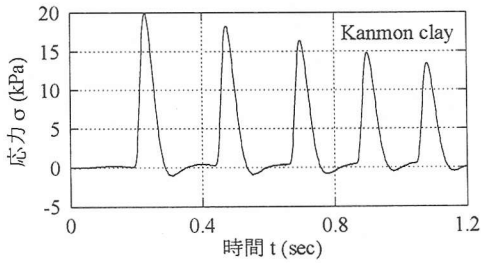
図-3 LDTの設置状況

には石膏によるキャッピングが施してある。また、若材齢時など供試体が十分に固結していない場合、LDTのフックが供試体に接着できないケースが考えられる。そこで、LDTフックについても石膏を使用して供試体に接着している。FWDM装置によって求められる変形係数は、弾性領域のひずみレベルを対象としているため、LDTについては、ひずみレベル 10^{-6} ~ 10^{-4} の微小ひずみ領域において測定している。

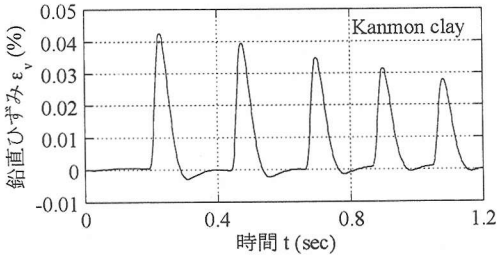
3. FWDM装置を用いた変形係数の測定

(1) 実験概要

本実験で用いた試料および実験条件を表-1に示す。関門粘土、有明粘土、およびカオリンの3種類の試料を用いる。各試料について所定の初期含水比に調整した後、水セメント比1でスラリー状にした普通ポルトランドセメントを所定量添加し、約10分間攪拌装置により十分に攪拌する。その後、内径50mm、高さ100mmの亚克力製のモールドに気泡が混入しないように流し込み、セメント安定処理供試体を作製し、この供試体を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室内で養生する。所定の日数養生後、FWDM装置を用いて変形係数の測定を行う。なお、落下荷重は、重錘 $M=200,400,800(\text{g})$ 、落下高さ $h=50 \sim 200(\text{mm})$ 、ばね剛性 $k=0.5,1.0(\text{kg/mm})$ の範囲で調整し、小さい荷重から徐々に大きな荷重へと圧縮力を増加させていき、ひずみレベル 10^{-6} ~ 10^{-4} の微小変形を測定する。



(a) 応力-時間関係



(b) 鉛直ひずみ-時間関係

図-4 応力と鉛直ひずみの波形

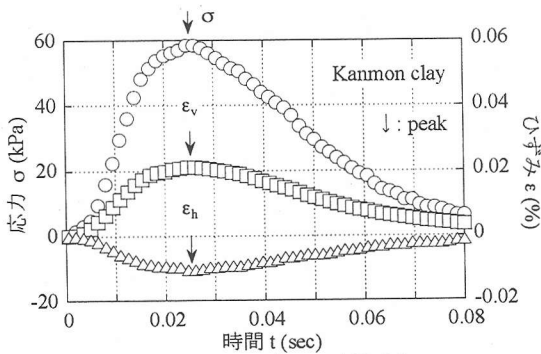


図-5 応力とひずみの時間変化

そのときの圧縮応力 P_{max} は、供試体の固さによって重錘の質量 M 、ばね定数 k 、および落下高さ h を変えることで $P_{max}=8\sim 64(\text{kgf})$ の範囲で作用させる。また、養生 3, 7, 28 日において、せん断速度 $1.0\%/min$ で一軸圧縮試験を実施し、圧縮強度と変形係数の関係について検討を行う。

次に、安定処理土の変形係数に及ぼす圧密圧力の影響を検討するため、 \overline{CU} 試験に基づいて所定の拘束圧で等方圧密を行う。圧密終了後、FWDM装置を用いて荷重と変位を測定し変形係数を算出する。その後、軸ひずみ速度 $0.088\%/min$ でせん断を行い、変形係数および圧縮強度の測定を行う。

(2) 変形係数とポアソン比

FWDM装置を用いて測定される応力と鉛直ひずみの時間変化の一例を図-4(a), (b)に示す。応力の変化に伴い鉛直ひずみが発生しており、いずれの波

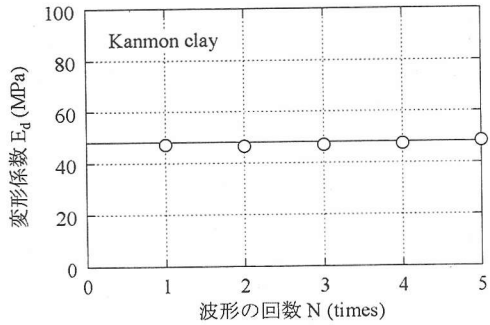


図-6 波形のピーク時の変形係数

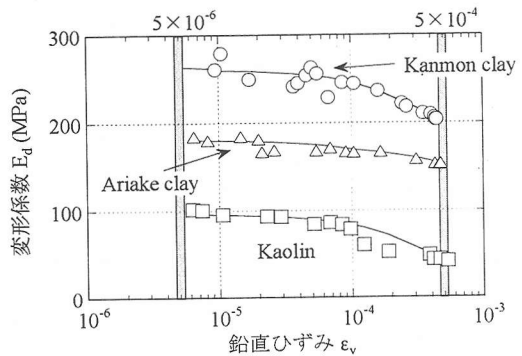


図-7 変形係数と鉛直ひずみの関係

形も明確なピークが現れる。次に、FWDM装置より測定される第一波の応力と鉛直ひずみ、水平ひずみの時間変化を図-5に示す。供試体に作用する圧縮応力 σ 、鉛直ひずみ ϵ_v 、および水平ひずみ ϵ_h ともにほぼ同時に明確なピークが現れ、いずれの波形も類似した曲線形状を示している。

変形係数 E_d 、ポアソン比 ν は次式で定義される。

$$E_d = \frac{\sigma}{\epsilon_v}, \quad \nu = -\frac{\epsilon_h}{\epsilon_v} \quad (7)$$

ここに、 σ は圧縮応力の最大値、 ϵ_v 、 ϵ_h は σ の最大値に対応する鉛直ひずみ、および水平ひずみとする。図-4 および図-5 より、圧縮応力のピークに対応する鉛直ひずみ、および水平ひずみの値は、鉛直ひずみ、水平ひずみの最大値と一致することが確認できる。ここでは、最大圧縮応力時の値で求めた変形係数に着目して、考察を進める。

各波形のピーク時の変形係数を図-6に示す。変形係数 E_d はいずれの波形においてもほぼ一定の値であるため、最初の一つ目の波形を変形係数の代表値と見なしてよいことがわかる。

FWDM装置を用いて測定される変形係数 E_d と、鉛直ひずみ ϵ_v の関係を図-7に示す。変形係数 E_d は、式(7)より算出している。鉛直ひずみ ϵ_v は、図-5にお

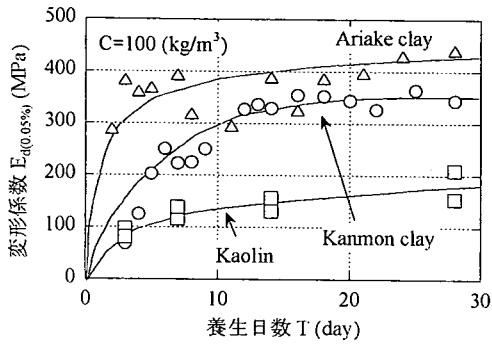


図-8 変形係数の経時変化

ける最大圧縮応力に対応する鉛直ひずみを、LDTによって測定した値である。ひずみレベル $10^{-6} \sim 10^{-4}$ においては、いずれの安定処理土についても、鉛直ひずみ ϵ_v が増加するにしたがって変形係数が減少しており、変形係数のひずみレベル依存性を示している。通常、ひずみレベル 10^{-6} 程度の微小ひずみを測定することが可能であるが、セメント安定処理供試体が十分に固結していない状態では、 10^{-6} レベルの微小ひずみを精度良く測定することは困難になってくる。そこで、このような供試体においても測定することができ、さらに弾性的な挙動を示す範囲内の鉛直ひずみとして 5×10^{-4} (0.05%)程度の変形係数を用いて結果の整理を行う。ここでは、鉛直ひずみが 5×10^{-4} (0.05%)程度のときの変形係数を $E_{d(0.05\%)}$ とする。

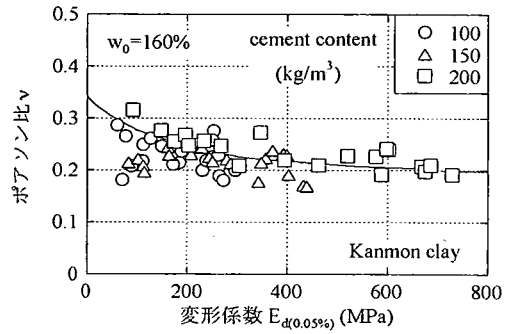
4. セメント安定処理土の変形・強度特性

(1) 変形係数の経時変化

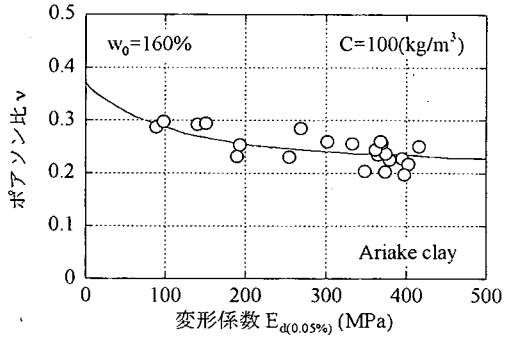
セメント安定処理土の改良効果を評価するために、FWDM装置を用いて変形係数およびポアソン比の経時変化について測定を行った。

関門粘土、有明粘土およびカオリンのセメント添加量 100 kg/m^3 における変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ の経時変化を図-8に示す。養生日数が経過するにつれて変形係数が増加している。また、変形係数の増加傾向は、養生日数が1週間を過ぎると次第に緩やかになる傾向が見られる。このことから、FWDM装置を用いることによって、セメント安定処理土の変形係数の増加傾向を測定することが可能である。

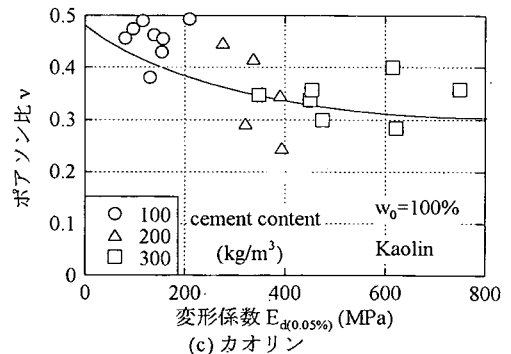
次に、関門粘土、有明粘土、およびカオリンにおけるポアソン比 ν と変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ の関係を図-9(a)~(c)に示す。値にばらつきは見られるものの、セメント添加量に関係なく、変形係数が増加するにつれてポアソン比が徐々に減少していることがわかる。



(a) 関門粘土



(b) 有明粘土



(c) カオリン

図-9 ポアソン比と変形係数の関係

(2) 初期含水比およびセメント水比の影響

セメント安定処理土は、試料の初期含水比やセメント添加量、養生日数など様々な要因によりその変形・強度特性が変化する。また、このような影響要因について、変形・強度特性を効率的に評価するパラメータとして、安定処理土のセメント水比が注目されている¹⁵⁾¹⁶⁾。そこで、安定処理土の変形特性に影響を及ぼす要因について、条件を変えて実験を行い、変形係数と評価パラメータの関係を考察する。

関門粘土における各養生日数の変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ と初期含水比 w_0 の関係を図-10(a)~(c)に示す。同一のセメント添加量では、含水比が小さいほど変形係数は増加する傾向にある。また、同一の含水比で

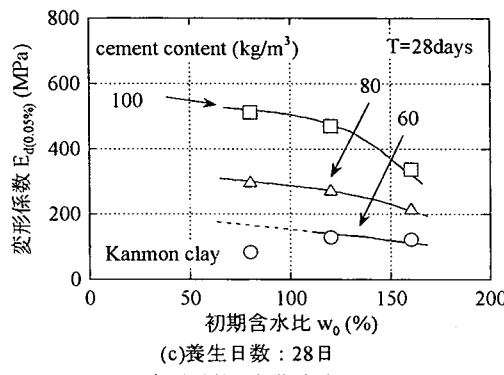
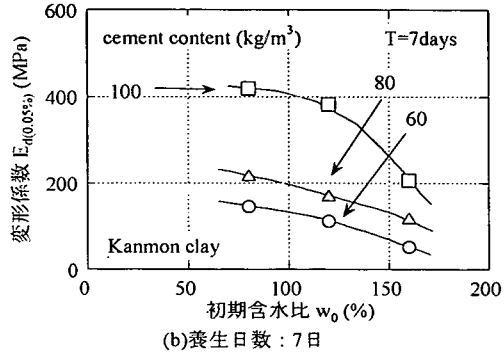
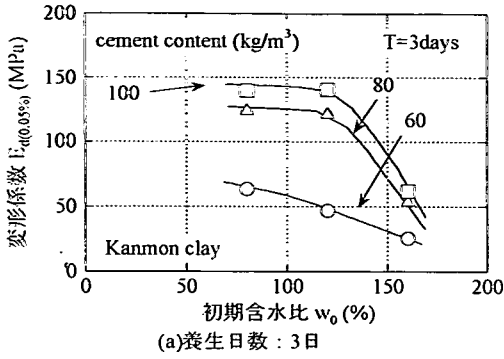


図-10 変形係数と初期含水比の関係

は、セメント添加量が大きいほど変形係数は増加する。セメント添加量 60kg/m^3 のプロットが全体の傾向から推定される破線の値よりも小さな値を示しているのは、試料の初期含水比が低くセメントとの攪拌が不均質になり、値にばらつきが生じたためであると考えられる。このような特性は、従来のセメント安定処理土の強度特性と同様である。この図より、セメント改良に使用する原料土の初期含水比が、安定処理土の変形特性に対して大きく影響していることがわかる。

次に、関門粘土における、変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ とセメント水比 $(C/W)_{\text{total}}$ の関係を図-11 に示す。なお、セメント水比 $(C/W)_{\text{total}}$ はセメント安定処理土に含まれる水の総量に対するセメント添加量の重量比と

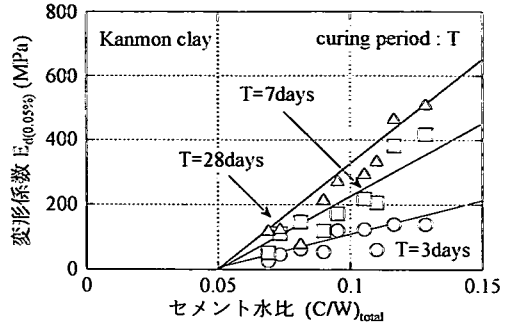


図-11 変形係数とセメント水比の関係

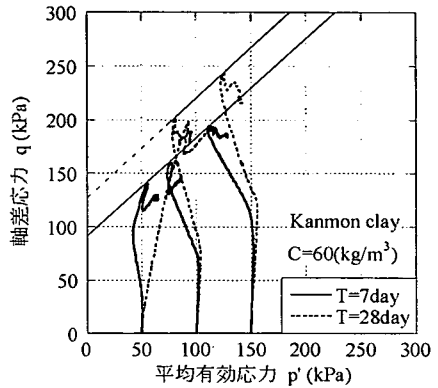


図-12 有効応力経路

する。セメント水比が $0.06\text{--}0.14$ の範囲においては、いずれの養生日数においても、変形係数はセメント水比の増加にともないほぼ直線的に増加しており、養生日数を経るにつれて直線勾配が大きくなると考えられる。この直線勾配は、養生日数ごとのセメント安定処理土の改良効果の程度を表しており、セメント水比に対して、ほぼ一本の直線で近似できる。また、セメント水比 $0.06\text{--}0.14$ の範囲では、横軸の切片は養生日数に関係なくある一つの値に定まると考える。ここでは、この直線と横軸の切片を、原試料ごとに安定処理土の改良効果が発揮される限界のセメント水比と考える。

以上のことから、変形係数はセメント量が同一であっても、原試料の初期含水比に大きく依存し、その影響は安定処理土に含まれる水の総量に対するセメントの重量比であるセメント水比 $(C/W)_{\text{total}}$ によって評価できることが示される。

(3) 圧密圧力の影響

安定処理土は地盤材料であり、変形・強度特性に及ぼす拘束圧依存性の影響を把握する必要がある。そこで、三軸応力状態で非破壊試験を実施し、変形特性に及ぼす圧密圧力の影響について考察する。

関門粘土の養生 7 日および 28 日における有効応

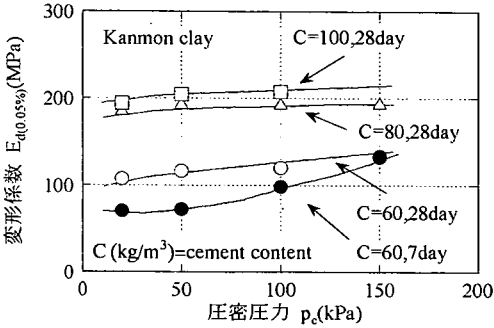


図-13 変形係数と圧密圧力の関係

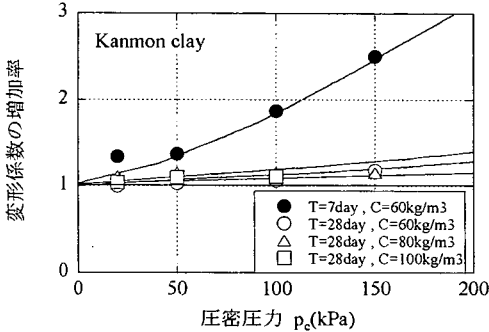
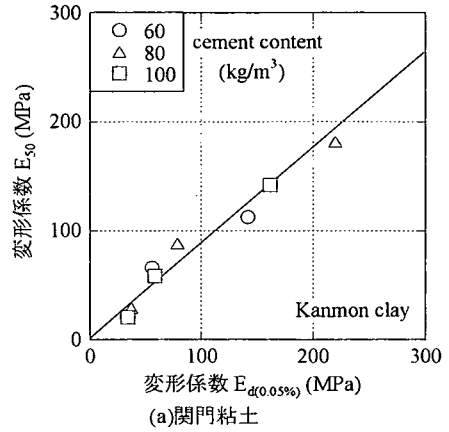


図-14 変形係数の増加率

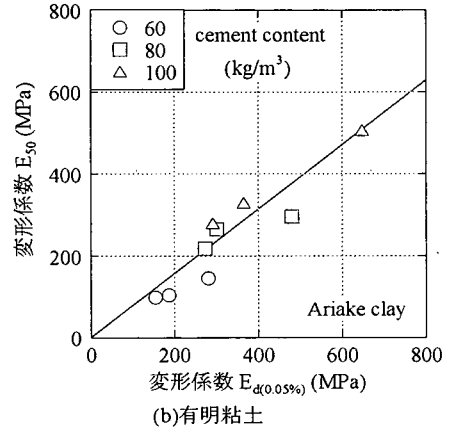
力経路を図-12 に示す。最大主応力を σ'_1 、最小主応力 σ'_3 とすると、平均有効応力は $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 、軸差応力は $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ で定義される。圧密圧力 98kPa および 147kPa の応力経路についてはほぼ同様の経路を示しており、養生日数が長くなるほど、また圧密圧力が大きくなるほど軸差応力 q が増加している。一方、養生 28 日、圧密圧力 49kPa の経路はせん断が進むにつれて p' 、 q ともに増加する傾向を示している。これは比較的圧密圧力が低い領域において、供試体が十分に固結した状態では見かけの過圧密度が大きくなり、間隙水圧があまり発生しないためであると考えられる。そこで、養生 28 日の最大強度線は、 $p' = 98, 147\text{kPa}$ の応力経路から引いている。養生日数ごとの最大強度線を比較すると、正規圧密領域では養生 28 日の強度線は養生 7 日の強度線の傾きとほぼ等しいことから、破壊線の傾きは養生日数に対してはあまり影響を受けないと考えられる。

変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ と圧密圧力 p_c の関係を図-13 に示す。圧密圧力が増加するにつれて変形係数が増加していることがわかる。養生 28 日の供試体は、固結がかなり進行しており、圧密圧力の増加に対して変形係数の増加が緩やかであるが、養生 7 日においては、固結途上であると考えられるため変形係数が大きくなっており、圧密の効果を確認できる。

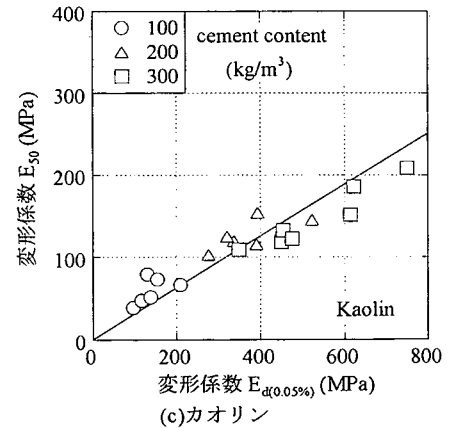
各圧密圧力における変形係数の増加率を図-14 に示す。ここで、変形係数の増加率は変形係数



(a) 関門粘土



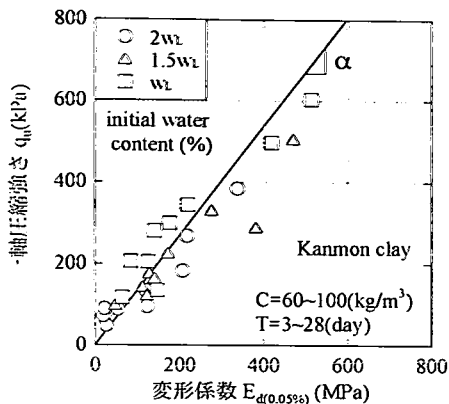
(b) 有明粘土



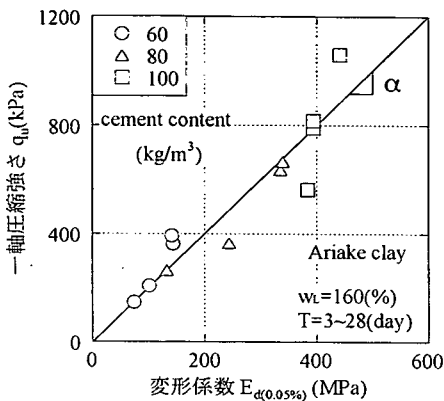
(c) カオリン

図-15 変形係数 E_{50} と $E_{d(0.05\%)}$ の関係

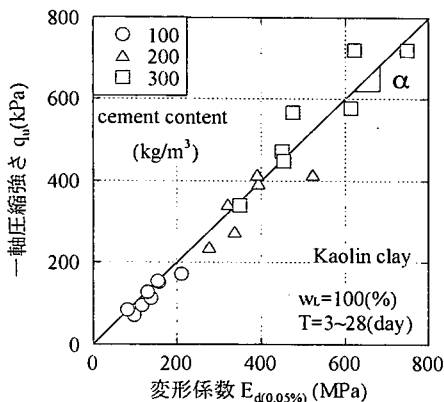
$E_{d(0.05\%)}$ を、拘束圧を受けない一軸応力状態の変形係数で除して無次元化した値である。養生 28 日においては、圧密圧力が増加しても変形係数の増加率はほとんど影響を受けない。一方養生 7 日では、安定処理供試体が十分に固結していないため、圧密圧力が高くなるにつれて増加率が大きくなり、圧密の効果により大きく発揮されることを示している。



(a) 関門粘土



(b) 有明粘土



(c) カオリン

図-16 一軸圧縮強さと変形係数の関係

(4) 一軸圧縮強さと変形係数の関係

一軸圧縮試験より求められる変形係数 E_{50} と FWDM 装置によって測定される変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ の関係を図-15(a)~(c)に示す。ここで、変形係数 E_{50} は一軸圧縮試験における $q_{max}/2$ の点での割線係数であり、変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ は鉛直ひずみが 5×10^{-4} における値である。セメント添加量や初期含水比に関係なく変形係数 E_{50} と $E_{d(0.05\%)}$ は比例関係にある。また、

表-2 各配合条件の T_0 , a および b

試料	セメント量 (kg/m ³)	T_0 (day)	a (day/MPa)	b (1/MPa)
関門粘土	60	2.5	1.9×10^{-3}	8.9×10^{-3}
	80	2.5	9.1×10^{-3}	3.5×10^{-3}
	100	2.5	6.2×10^{-3}	2.8×10^{-3}
有明粘土	60	1.0	1.3×10^{-2}	6.3×10^{-3}
	80	1.0	4.3×10^{-3}	3.8×10^{-3}
	100	1.0	6.4×10^{-4}	2.5×10^{-3}

原試料によって E_{50} と $E_{d(0.05\%)}$ の関係における直線勾配が異なることがわかる。これは、変形係数がひずみレベルに依存するため、ひずみレベルの大きい E_{50} が、ひずみレベルの小さい $E_{d(0.05\%)}$ よりも小さい値をとることによる。また、原試料ごとに傾きが異なるのは、原試料の鉱物組成や粒度分布の影響であると考えられるが、今後明らかにする必要がある。

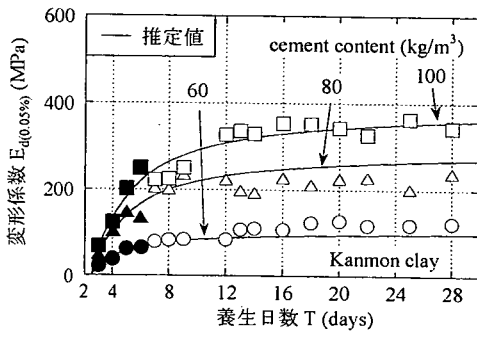
次に、関門粘土、有明粘土、およびカオリンにおける一軸圧縮強さ q_u と変形係数 $E_{d(0.05\%)}$ の関係を図-16(a)~(c)に示す。多少のばらつきが見られるものの、初期含水比、セメント添加量および養生日数によらず、一軸圧縮強さと変形係数の間には比例関係があると考えられる。このことから、図-16における直線勾配を α とすると、実験的に次式が成り立つ。

$$q_u = \alpha E_{d(0.05\%)} \quad (8)$$

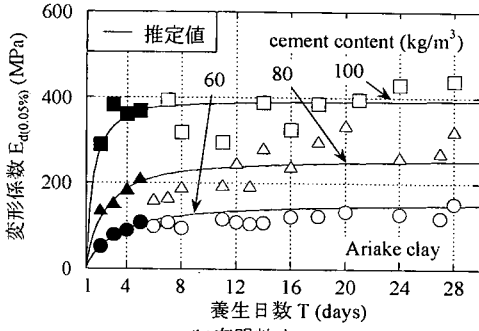
直線勾配 α は、同一のひずみレベルにおいては、各材料に対して一つ決まる固有の値である。ここでのひずみレベルは 10^{-4} のオーダーである。関門粘土については、 $\alpha = 1.3 \times 10^{-3}$ 、有明粘土は、 $\alpha = 2.0 \times 10^{-3}$ 、カオリンは、 $\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$ となっている。このことから、FWDM装置を用いて変形係数を測定することによって、試料の初期含水比やセメント添加量の異なるセメント安定処理土の一軸圧縮強度を式(8)の近似式によって推定することができる。

5. FWDM装置を用いた安定処理土の強度の推定

FWDM装置の特徴の一つとして、安定処理土の変形係数の経時変化を測定できることが挙げられる。そこで、この特徴を生かして、養生初期の変形係数の増加傾向から、養生28日の変形係数の推定を行う。さらに、一軸圧縮強さと変形係数の関係から28日の一軸圧縮強さの推定を行い、FWDM装置による強度の簡易推定法の適用性について検討する。



(a) 関門粘土



(b) 有明粘土

図-17 変形係数の経時変化と推定値

(1) 強度推定の流れ

FWDM装置を用いて、非破壊で変形係数の経時変化を養生5日ないし6日程度まで細かく測定する。この時の変形係数の増加傾向は、図-8の結果を参照すると次の双曲線関数で表されることが考えられる。

$$E_d(0.05\%) = \frac{T - T_0}{a + bT} \quad (9)$$

ここで、 T は養生日数、 T_0 は変形係数と時間の曲線における最急勾配から求められる修正原点、 a および b は定数である。この関係をもとに、養生初期の変形係数の増加傾向から変形係数の経時変化の評価を行う。各配合条件の T_0 、 a および b を表-2に示す。次に、式(8)の一軸圧縮強さと変形係数の関係から、養生28日における一軸圧縮強さの推定を行う。

(2) 変形係数の経時変化の推定

関門粘土および有明粘土における、変形係数の経時変化と、双曲線近似により得られた変形係数の推定値を図-17(a)、(b)に示す。ここで、変形係数の推定値は図-17の養生5-6日までの試験結果(●▲■のプロット)から、式(9)をもとに算出している。双曲線近似を用いた変形係数の経時変化の推定値は、実際の測定値と比較的良好な対応を示している。

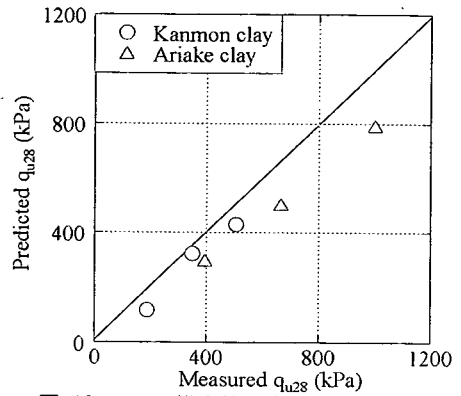


図-18 q_{u28} の推定値と実測値の関係

(3) 一軸圧縮強さの推定

養生28日における一軸圧縮強さ q_{u28} の推定値と実測値の比較を図-18に示す。なお、一軸圧縮強さの推定値は、式(9)をもとに推定した養生28日の変形係数を式(8)に代入し、前述のパラメータ α を用いて求められる。実測値は、養生28日の一軸圧縮試験結果である。養生28日の一軸圧縮強度の推定値は、実測値よりも多少小さい値を示しているが、概ね推定することができる。

6. 結論

セメント安定処理土の変形係数を非破壊で測定することが可能な重錘落下式変形係数測定装置を開発し、様々な試料および配合条件における安定処理土の変形・強度特性について実験および考察を行った。また、この装置の特徴を生かして、養生初期における変形係数の増加傾向から、養生28日の一軸圧縮強さを推定し、その妥当性についての検討を行った。本報で得られた知見をまとめると、次の通りである。

- 1) 新たに作製した重錘落下式変形係数測定装置を用いた非破壊試験によって、初期含水比およびセメント添加量の異なるセメント安定処理土の変形係数が養生初期から増加していく傾向を、比較的精度よく把握することができる。
- 2) 安定処理土の変形係数は、原試料の初期含水比に大きく依存し、その影響は安定処理土中に含まれる水の総量に対するセメント添加量の重量比で定義されるセメント水比によって評価できる。
- 3) セメント安定処理土の一軸圧縮強さと変形係数は、同一の試料においては、原試料の初期含水比、セメント添加量、および養生日数に関わらずほぼ比例関係にある。また、この比例関係は安定処理に用いられる試料によって異なる。
- 4) 安定処理土における養生初期の変形係数の増加

傾向から、その後の変形係数の経時変化を予測し、変形係数の実測値と推定値とは、比較的よい対応を示していることを確認した。さらに、変形係数と強度の相関性を考慮して、養生 28 日における一軸圧縮強さを推定できることを示した。

以上のことから、セメント安定処理土の変形係数を非破壊で測定することができる重錘落下式変形係数測定装置は、変形・強度特性の評価および強度の推定に適用することが可能であることを示した。セメント改良に使用される原試料によって、変形・強度特性が変化することから、今後は試料の違いの影響について定量的な評価を行っていきたい。

参考文献

- 1) セメント協会編：セメント系固化材によるセメント改良マニュアル第2版，セメント協会，pp.31-48, 1994.
- 2) 湯 怡新，中林 進，藤村浩幸，福浜健二，酒井敏明，柳原勝也：プレミックス処理土の水中打設特性，第33回地盤工学研究発表会，pp.2255-2256, 1998.
- 3) 馬場崎亮一，寺師昌明，鈴木健夫，前川 淳，川村政史，深沢栄造：安定処理土の強度に及ぼす影響因子，セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.20-41, 1996.
- 4) 木幡行宏，前川晴義，矢島寿一，村本勝巳，馬場崎亮一：セメント安定処理土の強度・変形特性について，セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.1-19, 1996.
- 5) 善 功企，山崎浩之，佐藤 泰：事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性，港湾技術研究所報告，第29巻，第2号，pp.85-118, 1990.
- 6) 上 俊二，藤原東雄，竹内 潤，福田 靖，酒井敏明，柳原勝也：セメント系固化材により安定処理されたカオリン粘土の力学的性質，土木学会論文集，No.582/III-41, pp.217-228, 1997.
- 7) Burland, J. B. : Small is beautiful -the stiffness of soils at small strains, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, No.4, pp.499-516, 1989.
- 8) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Dong, J., Teachavorasinskun, S. and Mizumoto, K. : Stress status affecting elastic deformation moduli of geomaterials, *Pre-failure deformation of Geomaterials*, Vol1, pp.3-9, 1994.
- 9) Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim, Y. S. and Park, C. S. : Elastic deformation properties of geomaterials, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.3, pp.26-46, 1992.
- 10) Omine, K., Ochiai, H., Yasufuku, N. and Sakka, H. : Prediction of strength-deformation properties of cement-stabilized soils by nondestructive testing, *Pre-failure deformation characteristics of Geomaterials*, pp.323-329, 1999.
- 11) 堀尾大輔，落合英俊，安福規之，大嶺 聖：セメント安定処理土の動的弾性係数を求める簡便な非破壊試験装置の開発，セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.149-154, 1996.
- 12) 属 寛，落合英俊，安福規之，大嶺 聖，宮崎良彦：非破壊試験による安定処理土の変形係数の測定と強度の推定，第3回地盤改良シンポジウム発表論文集，日本材料学会，pp.97-102, 1998.
- 13) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T. : A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.160-180, 1991.
- 14) Tatsuoka, F. : Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, *Pre-failure deformation of Geomaterials*, Vol.2, pp.947-1053, 1995.
- 15) 御手洗義夫，岸田隆夫，田口博文，土田 孝：各種原料土を用いて作製した気泡混合土の品質に関する考察，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.163-168, 2000.
- 16) 榮永晋也，白川英司，山田清臣，鎌尾彰司，齋藤聡：セメント改良土の強度の予測，第35回地盤工学研究発表会，地盤工学会，pp.1209-1210, 2000.

(2001. 3. 14 受付)

EVALUATION OF DEFORMATION-STRENGTH PROPERTIES OF CEMENT-STABILIZED SOILS BY FALLING WEIGHT DEFORMATION MEASUREMENT APPARATUS

Hiroshi SAKKA, Hidetoshi OCHIAI, Noriyuki YASUFUKU and Kiyoshi OMINE

The strength of cement-stabilized soils depends on many influencing factors and in particular, the mechanical properties change for curing time due to a chemical reaction of cement. It is therefore important to investigate those influences on the deformation-strength properties efficiently. The Falling Weight Deformation Measurement apparatus was developed for measuring deformation modulus of cement-stabilized soils as a nondestructive testing. In this study, this apparatus is applied to soft clay samples with different water content, cement content and curing period. The deformation modulus of the cement-stabilized soils at various mixing condition is predicted from the change in the deformation modulus for early curing time.