

山口県内の地盤における土質特性値に関する考察

Consideration on Soil Characteristic values in Ground in Yamaguchi Prefecture

河村志朗 Shiro KAWAMURA ((株)ソイル・ブレーン)
 浴坂公博 Kimihiro EKISAKA ((株)ソイル・ブレーン)
 麻生健介 Kensuke ASO ((株)ソイル・ブレーン)

地盤に関する設計・解析を行うにあたっては、土質特性値を十分理解したうえで設計採用値を決定することが重要である。そこで、本報告では、山口県内の地盤における土質特性値について既往の室内土質試験結果及び原位置試験結果をもとに検討・評価した。その結果、多くのデータをもとに各土質特性値の関係を明らかにすることができた。また、透水係数の推定方法の精度向上に向けての提案を行い、間隙比や湿潤密度との相関性が高い自然含水比をもとに、概略の土質特性、強度特性、透水特性、圧密特性を推定することが可能なことを示した。

キーワード：物理特性, 自然含水比, 強度特性, 透水係数, 圧密特性 (IGC : D02, D04, D05)

1. はじめに

近年、地盤に関する設計等の実務において、数値解析を行う機会が増加している。この理由としては、地盤変形解析、浸透流解析等で比較的容易に解析が行えるソフトウェアが市販化され、ハードウェア性能も向上してきたことがあげられる。また、数値解析は外力の作用に対する応答が定量的に把握できるため、性能照査に用いられることも理由の一つである。一方、数値解析を実施するにあたっては、解析手法に関する知識を有することはもちろんであるが、解析に用いる土質定数を十分検討したうえで採用する必要がある。

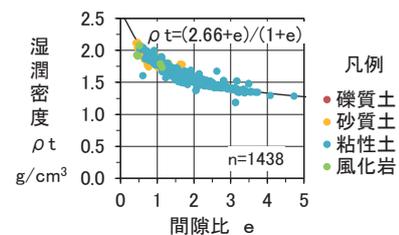
そこで、本報告では、山口県内の地盤における土質特性値について既往の室内土質試験結果及び原位置試験結果¹⁾ほかをもとに検討・評価することにした。参考文献 1)以外の室内土質試験結果及び原位置試験結果のデータに関しては、弊社で実施した国土交通省、旧道路公団、山口県、周南市ほかの市町村データを使用させていただいた。

また、検討・評価に使用した試験データは、個々に調査目的・試験内容等が異なるため、評価項目データの個数が不統一であるが、可能なデータはすべて使用した。

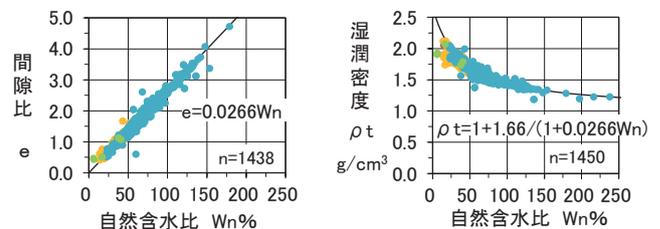
2. 物理特性値について

2.1 間隙比～湿潤密度～自然含水比の関係

間隙比 e ～湿潤密度 ρ_t ～自然含水比 W_n の関係を礫質土、砂質土、粘性土、風化岩の 4 つの土質に分類し、図-1 に



a) 間隙比と湿潤密度



b) 自然含水比と間隙比 c) 自然含水比と湿潤密度

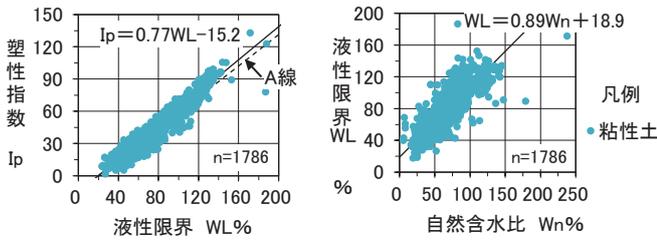
図-1 間隙比～湿潤密度～自然含水比の関係

示す。各土質の土粒子の密度の平均値が $\rho_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$ であること、ほとんどが地下水以深の土質試料であり飽和度 $S_r \approx 100\%$ であることから、基本的物理量の相互関係式より、各土質とも図-1 中に示す関係式で近似できる。

したがって、地下水以深の土質材料に関しては、土質の違いに関わらず、自然含水比をもとに間隙比あるいは湿潤密度を概略推定することが可能である。

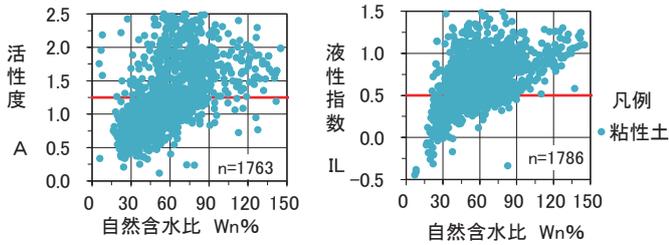
2.2 コンシステンシー特性値の関係

粘性土を対象とした液性限界 WL と塑性指数 IP 及び自然含水比 W_n の関係を図-2 に示す。図中には最小二乗法を用いて求めた関係式も示している。図-2a)より、液性限界



a) 液性限界と塑性指数 b) 自然含水比と液性限界

図-2 液性限界と自然含水比及び塑性指数の関係



a) 自然含水比と活性度 b) 自然含水比と液性指数

図-3 自然含水比と活性度及び液性指数の関係

と塑性指数の相関(以下、 r は相関係数を示す)は非常に良く、以下の式で表される。

$$Ip = 0.77WL - 15.2 \quad |r| = 0.96 \quad (1)$$

図-2a)中には、参考として塑性図のA線²⁾($IP = 0.73(WL - 20)$:破線)を示したが、やや高塑性側にあることがわかる。また、図-2b)より、自然含水比と液性限界の相関も比較的良好であり、以下の式で表される。

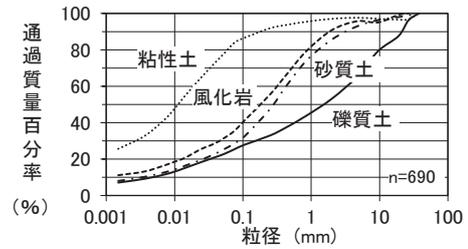
$$WL = 0.89Wn + 18.9 \quad (\%) \quad |r| = 0.83 \quad (2)$$

次に、自然含水比と活性度A及び液性指数ILとの関係を図-3に示す。図-3a)より、バラツキは大きいですが、自然含水比30%以下の粘性土は $A < 1.25$ の普通粘土～非活性粘土の性質を示すものが多く、図-3b)より、 $IL < 0.5$ の過圧密土の性質を示す³⁾ことが多い。したがって、自然含水比30%以下の粘性土は比較的強度を有する安定した粘性土であると推定できる。

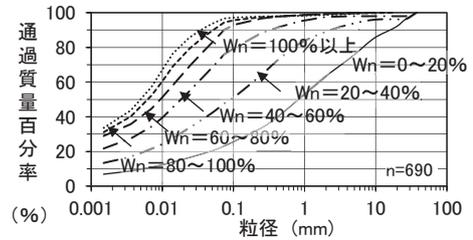
2.3 粒度特性の関係

土の粒度特性を把握するために、土質別及び自然含水比区分毎の平均粒径加積曲線を整理し、図-4に示す。なお、自然含水比は6段階に区分した。

図-4より、平均粒径加積曲線は自然含水比区分毎に傾向が認められ、 $Wn = 0 \sim 20\%$ の場合は礫質土、 $Wn = 20 \sim 40\%$ の場合は砂質土あるいは風化岩、 $Wn = 40\%$ 以上は粘性土の平均粒径加積曲線に相当することがわかる。これは、個々に見るとバラツキはあるものの、一般的に粒度試験結果から求まる土質(名)と土の湿潤密度の値が対比されることから、湿潤密度と相関性が高い自然含水比と粒度特性の

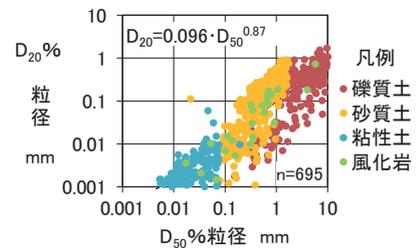


a) 土質別の平均粒径加積曲線

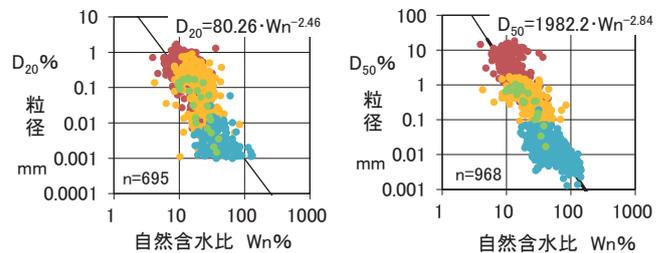


b) 自然含水比区分毎の平均粒径加積曲線

図-4 土質別及び自然含水比区分毎の粒径加積曲線



a) $D_{50}\%$ 粒径と $D_{20}\%$ 粒径の関係



b) 自然含水比と $D_{20}\%$ 粒径 c) 自然含水比と $D_{50}\%$ 粒径

図-5 自然含水比～ $D_{20}\%$ 粒径～ $D_{50}\%$ 粒径の関係

平均的な関係が求められたものとする。

次に、自然含水比 Wn と $D_{20}\%$ 粒径及び $D_{50}\%$ 粒径の関係を整理し、図-5に示す。図-5a)より、 $D_{20}\%$ 粒径と $D_{50}\%$ 粒径の間には、礫質土、砂質土の場合にややバラツキが大きいですが、全体としては比較的良い相関が認められる。また、自然含水比と $D_{20}\%$ 粒径及び $D_{50}\%$ 粒径の関係は、 $D_{50}\%$ 粒径の方が $D_{20}\%$ 粒径よりも自然含水比との相関が良いことがわかる。図中には最小二乗法を用いて求めた関係式も示しているが、各々の関係は以下のとおりである。

$$D_{20} = 0.096 \cdot D_{50}^{0.87} \quad (\text{mm}) \quad |r| = 0.84 \quad (3)$$

$$D_{20} = 80.26 \cdot Wn^{-2.46} \quad (\text{mm}) \quad |r| = 0.71 \quad (4)$$

$$D_{50} = 1982.2 \cdot Wn^{-2.84} \quad (\text{mm}) \quad |r| = 0.86 \quad (5)$$

3. 強度特性値について

3.1 一軸圧縮強さと変形係数及び圧密降伏応力の関係

一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} 及び圧密降伏応力 P_c の関係を粘性土を対象に整理し、図-6 に示す。図中には最小二乗法を用いて求めた式も示しているが、各々の関係は次式で表すことができる。なお、(7)式より、粘着力 $c(=q_u/2)$ と圧密降伏応力の関係より求められる強度増加率($m=c/P_c$)は、 $q_u < 50\text{kN/m}^2$ の場合、 $m < 0.25$ とやや低めの値となる。

$$E_{50} = 40.83 \cdot q_u \quad (\text{kN/m}^2) \quad |r|=0.89 \quad (6)$$

$$P_c = 3.7 \cdot q_u^{0.85} \quad (\text{kN/m}^2) \quad |r|=0.86 \quad (7)$$

3.2 N値と一軸圧縮強さ及び変形係数の関係

試験近傍で実施した標準貫入試験によるN値と一軸圧縮強さ q_u 及び変形係数 E_{50} の関係を図-7 に示す。図-7より、各々の関係は次式で表すことができる。

$$q_u = 14 \cdot N \sim 28 \cdot N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (8)$$

$$E_{50} = 700 \cdot N \sim 1400 \cdot N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (9)$$

一般にN値から q_u を推定する関係式としては、Terzaghi・Peckによる $q_u = 12.5 \cdot N$ ～洪積粘土を対象にした試験結果による $q_u = 25 \sim 50 \cdot N$ (kN/m^2) 等がある⁴⁾。したがって、沖積粘性土が主体の場合は、 $q_u = 14 \cdot N$ 程度を考えておくのが安全側と考えられる。

また、一般に E_{50} は、標準貫入試験のN値より $E_0 = 2800 \cdot N$ で推定した変形係数の1/4の値と同等⁵⁾であることから、 $E_{50} = 700 \cdot N$ で表されること、 $q_u = 14 \cdot N$ 及び(6)式の間隔比を考慮すると、 $E_{50} = 700 \cdot N$ 程度が妥当と判断される。

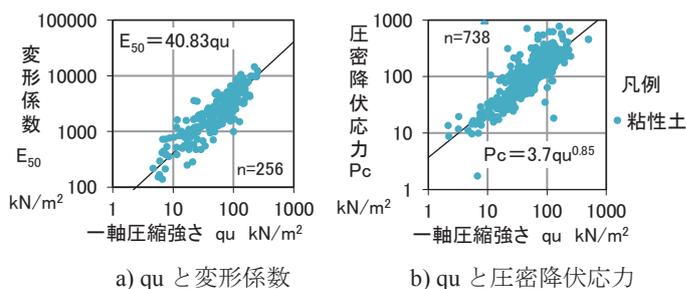
3.3 自然含水比と変形係数及び一軸圧縮強さの関係

自然含水比 W_n と変形係数 E_{50} 及び一軸圧縮強さ q_u の関係を図-8 に示す。図-8より、各々の関係は次式で表すことができる。関係式を求めるにあたっては、自然含水比との相関性が高い変形係数との関係式を最小二乗法により求めたのちに、(6)式の間隔比をもとに、自然含水比と一軸圧縮強さの関係式を決定した。なお、(10)、(11)中の e は間隔比ではなく自然対数の底である。

$$E_{50} = 10432 \cdot e^{-0.024W_n} \quad (\text{kN/m}^2) \quad |r|=0.59 \quad (10)$$

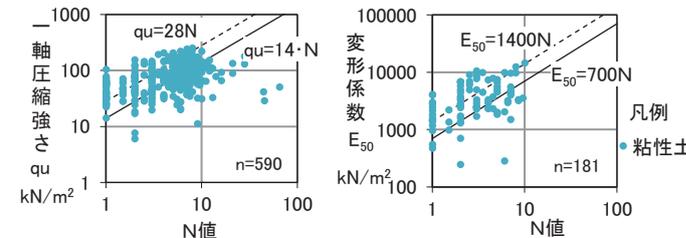
$$q_u = 255.5 \cdot e^{-0.024W_n} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (11)$$

図-7 及び図-8 より、N値や自然含水比と変形係数及び一軸圧縮強さの関係はかなりバラツキが大きく、相関係数も小さいことから、あくまでも目安として用いるべきであり、強度特性値を設計に適用する場合は、原位置試験や室内土質試験をもとに決定するのが望ましいと考える。



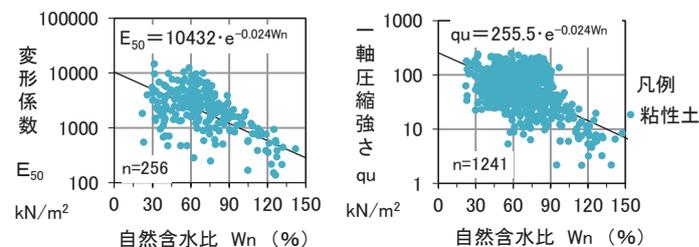
a) q_u と変形係数 b) q_u と圧密降伏応力

図-6 q_u と変形係数及び圧密降伏応力の関係



a) N値と一軸圧縮強さ b) N値と変形係数

図-7 N値と一軸圧縮強さ及び変形係数の関係



a) 自然含水比と変形係数 b) 自然含水比と q_u

図-8 自然含水比と変形係数及び一軸圧縮強さの関係

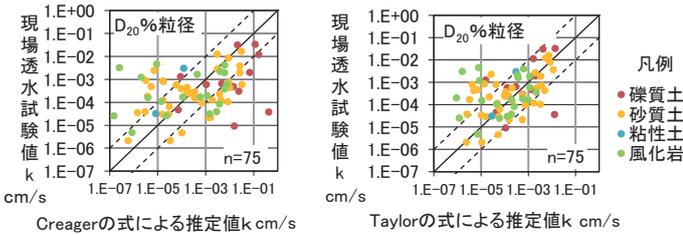
4. 透水係数について

4.1 Creager の式による推定透水係数の評価

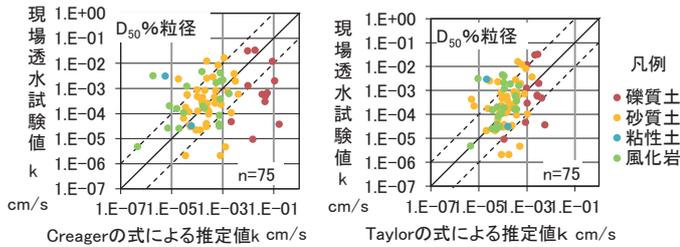
ここでは、Creager による実験値⁶⁾をもとにした近似式の評価・検討を行う。Creager により示された表をもとにした D_{20} % 粒径と透水係数 k の関係を近似式として表すと、 $k = 0.35 (D_{20})^{2.3}$ で近似(以下、Creager の式という)できる。

図-9a)に Creager の式で推定した透水係数と現場透水試験による透水係数の関係を示す。図-9a)より、透水係数が 10^{-3}cm/s より大きい場合は粒径からの推定透水係数が大きくなる傾向にあり、透水係数が 10^{-3}cm/s より小さい場合は粒径からの推定透水係数が小さくなる傾向にある。

この原因として、透水係数には粒径の違いだけでなく、間隙(密度)の違いによる影響があることが考えられる。Darcy による透水係数は、Taylor による(12)式で表される⁷⁾。そこで、間隙比を考慮した式である(12)式をもとに、間隙の形状係数、透過流体の粘性係数、透過流体の湿潤密度を各々1とし、等価粒子径を D_{20} % 粒径と仮定した式



a) Creager の式による推定値 b) Taylor の式による推定値
 図-9 D₂₀%粒径による推定値と現場透水試験値の関係



a) Creager の式による推定値 b) Taylor の式による推定値
 図-10 D₅₀%粒径による推定値と現場透水試験値の関係

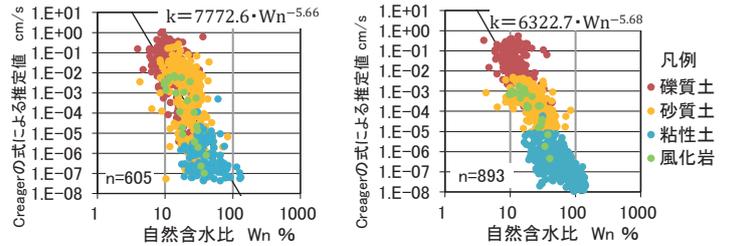
$k = e^3 / (1+e) \cdot D_{20}^2$ (以下, Taylor の式という)より推定した透水係数と現場透水試験による透水係数の関係を図-9b)に示す。なお, 用いた間隙比の値は, $e = 0.0266W_n$ により推定した値である。

$$k = C \frac{r_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_s^2 \quad (12)$$

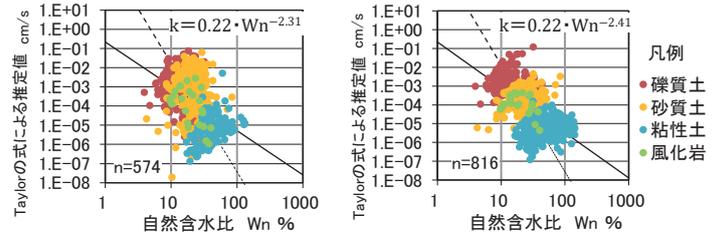
- ここに, C: 間隙の形状係数
- μ : 透過流体の粘性係数
- r_w : 透過流体の湿潤密度
- e: 間隙比
- D_s : 等価粒子径

図-9 中には推定値と試験結果が同じとなる 1:1 のラインを実線で, 上下 1 オーダー異なった場合のラインを破線で示しているが, 粒径から推定した透水係数が 10^{-3}cm/s より大きい場合に, Taylor の式による推定値の方のバラツキが小さくなる傾向を示している。なお, 上下 1 オーダー内に分布する割合は 45.3% から 66.7% に上昇している。

次に, D_{50} % 粒径から推定した場合の評価を行った。これは, D_{50} % 粒径は図-5c)に示したように自然含水比(間隙比)との相関が良く, D_{20} % 粒径に比ベシルト~粘性土に対する適用範囲が広がるからである。図-5a)に示した $D_{20} = 0.096 \cdot D_{50}^{0.87}$ の関係を Creager の式及び Taylor の式に代入し, 推定した透水係数と現場透水試験値の関係を図-10 に示す。図-10 より, D_{20} % 粒径の場合と同様の傾向を示すが, 上下 1 オーダー内に分布する割合は, D_{20} % 粒径を用いた Creager の式による推定値に比べ 45.3% から 65.3% に上昇し, Taylor の式の場合は 66.7% から 72.0% に上昇している。



a) D₂₀%粒径による推定値 b) D₅₀%粒径による推定値
 図-11 自然含水比と Creager の式による推定値の関係



a) D₂₀%粒径による推定値 b) D₅₀%粒径による推定値
 図-12 自然含水比と Taylor の式による推定値の関係

なお, Taylor の式による推定値の場合, バラツキが小さくなるものの透水係数の分布範囲が狭くなる傾向があるようにもみられる。

4.2 自然含水比をもとにした透水係数の評価

ここでは, 自然含水比と D_{20} % 粒径及び D_{50} % からの両式による推定透水係数の関係を整理し, 図-11~図-12 に示す。図中には, 最小二乗法で求めた関係式を示した(図-12 中には(13), (14)式を破線で示している)が, 各々の関係は次式で表すことができる。

(1) Creager の式による推定値との比較

① D_{20} % 粒径による式($k = 0.35 (D_{20})^{2.3}$) の場合

$$k = 7,772.6 \cdot W_n^{-5.66} \quad (\text{cm/s}) \quad |r|=0.72 \quad (13)$$

② D_{50} % 粒径による式($k = 0.0016 (D_{50})^{2.0}$) の場合

$$k = 6,322.7 \cdot W_n^{-5.68} \quad (\text{cm/s}) \quad |r|=0.86 \quad (14)$$

(2) Taylor の式による推定値との比較

① D_{20} % 粒径による式($k = e^3 / (1+e) \cdot D_{20}^2$) の場合

$$k = 0.22 \cdot W_n^{-2.31} \quad (\text{cm/s}) \quad |r|=0.44 \quad (15)$$

② D_{50} % 粒径による式($k = e^3 / (1+e) \cdot 0.0092 \cdot D_{50}^{1.74}$) の場合

$$k = 0.22 \cdot W_n^{-2.41} \quad (\text{cm/s}) \quad |r|=0.63 \quad (16)$$

図-11~図-12 及び(13)~(16) 式より, 自然含水比との関係は, 各土質及び両式とも D_{50} % 粒径の場合に相関が高く, Creager の式による推定値の方が Taylor の式による推定値よりも相関が高くバラツキが小さくなっている。また, Creager の式による D_{20} % 粒径による推定値の場合は, 自然含水比が 30% 以下の場合に推定値が大きく, 30% 以上の場合に推定値がやや小さい傾向があるが, D_{50} % 粒径によ

る推定値では各土質ともその傾向が改善されている。

一方、Taylor の式による推定値の場合、透水係数の分布範囲が狭まる傾向にある。このことから、 $e^3/(1+e)$ 部分の補正係数の設定部分に改善の余地があると考えられる。

以上より、現状での透水係数の推定手法としては、Creager の式をもとにして、自然含水比(=間隙比)との相関が高い D_{50} 粒径を用いた次式(等価粒子径を D_{50} 粒径と考えると補正係数 0.0016 の Taylor の式に相当)が妥当と考える。

$$k = 0.0016 \cdot D_{50}^{2.0} \quad (\text{cm/s}) \quad (17)$$

5. 圧密特性値について

5.1 圧縮指数の関係について

一般に圧縮指数 C_c を推定する物性値には、液性限界 WL と間隙比 e 等がある。ここでは、自然含水比も加え、砂質土と粘性土を対象にそれらの関係を検討する。

(1) 液性限界と圧縮指数の関係

液性限界 WL と圧縮指数 C_c の関係は、Skempton やわが国の土質や地域に応じて、いくつかの関係式が提案されている^{8),9)}。図-13a)に液性限界と圧縮指数の関係を最小二乗法により求めた関係式を示す。粘性土には海成の粘土だけでなく陸成の粘土も対象であるためか、バラツキがあるが、やや低圧縮性側の提案式に近い次式で表される。

$$C_c = 0.009 \cdot (WL - 4) \quad |r| = 0.78 \quad (18)$$

(2) 間隙比と圧縮指数の関係

間隙比 e と圧縮指数 C_c との関係式も多く提案されているが⁹⁾、図-13b)に間隙比と圧縮指数の関係を最小二乗法により求めた関係式を示す。図-13b)より、液性限界と同様にやや低圧縮性側の提案式に近い次式で表される。以上のことから、山口県内の地盤はやや圧縮性の小さい砂質土や粘性土を主体とすることがわかる。

$$C_c = 0.478 \cdot (e - 0.3) \quad |r| = 0.87 \quad (19)$$

(3) 自然含水比と圧縮指数の関係

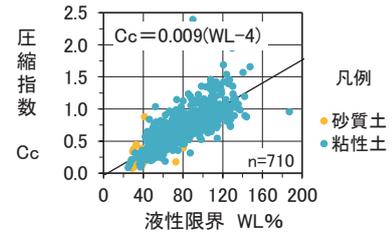
今まで述べたように、自然含水比は液性限界や間隙比と密接な関係がある。そこで、図-13c)には、自然含水比と圧縮指数の関係を最小二乗法により求めた関係式も示した。図-13c)より、関係は次式で表される。

$$C_c = 0.013 \cdot (W_n - 11) \quad |r| = 0.87 \quad (20)$$

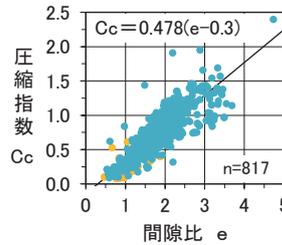
5.2 圧密特性値の関係について

(1) 自然含水比と圧密特性曲線の関係

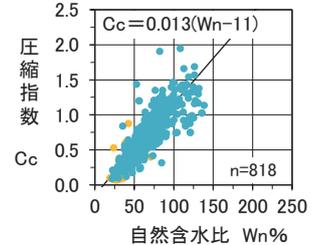
圧密係数 cv に関係すると思われる物理定数として塑性指数 Ip と自然含水比 W_n を選定し、圧密係数との関係を



a) 液性限界と圧縮指数

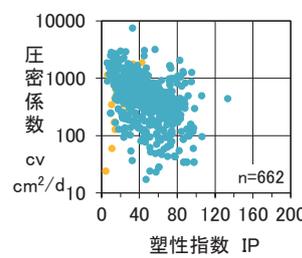


b) 間隙比と圧縮指数

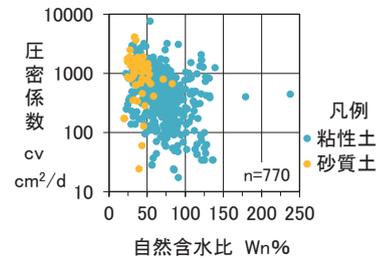


c) 自然含水比と圧縮指数

図-13 各土質特性と圧縮指数の関係



a) 塑性指数と圧密係数



b) 自然含水比と圧密係数

図-14 塑性指数及び自然含水比と圧密係数の関係

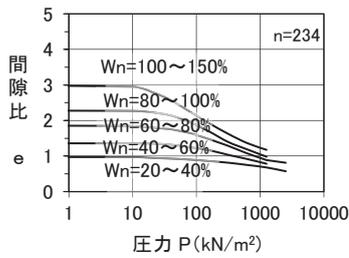
整理し、図-14 に示す。図-14 より、バラツキはあるものの塑性指数や自然含水比が大きくなると圧密係数が小さくなる傾向を示す。なお、圧密係数は圧密降伏応力 P_c 付近の荷重における値を採用している。

図-14 より、自然含水比は圧密係数と密接な関係があることがわかったが、間隙比 e 、及び透水係数 k と関連する体積圧縮係数 M_v も自然含水比と密接な関係があることが想定される。そこで、以下では自然含水比を 5 段階に区分し、区分毎の平均圧密特性曲線を求めた。その結果を図-15 に示すが、自然含水比区分毎の平均圧密特性曲線の変化の傾向が理解できる。

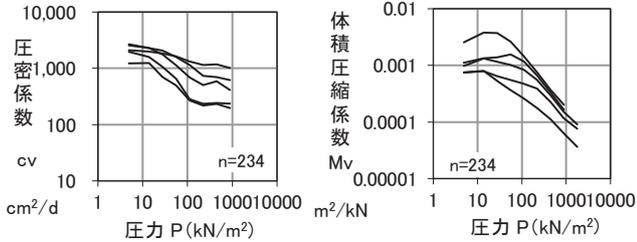
また、 $\log M_v - \log P$ 曲線の正規圧密領域での直線(勾配)を $M_v = B \cdot P^a$ の式で表した場合の係数 B 、 a を求め図-16 に示す。図-16 中には自然含水比区分毎の平均 $\log M_v - \log P$ 曲線で求めた各係数値を結んだラインも示している。図-16 より、バラツキはあるものの、自然含水比が大きくなると M_v の値が大きくなる(B の値が大きくなる)傾向にある。

(2) 圧縮指数及び自然含水比と膨張指数の関係

ここでは、圧縮指数 C_c 及び自然含水比 W_n と標準圧密

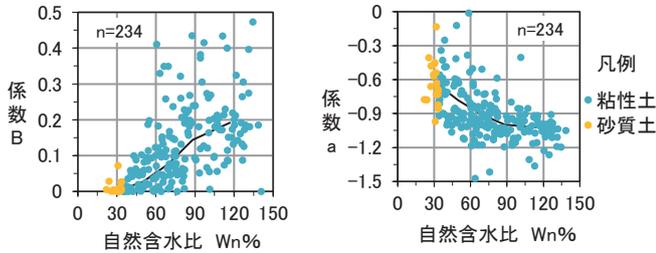


a) 平均 e-logP 曲線



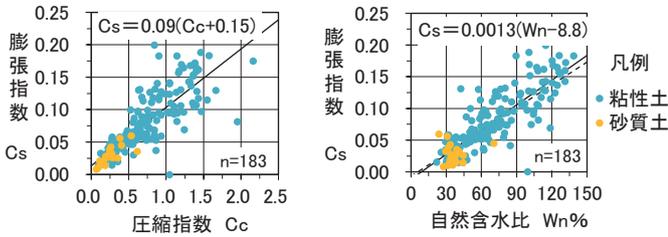
b) 平均 log cv-logP 曲線 c) 平均 log Mv-logP 曲線

図-15 自然含水比別の平均圧密特性曲線の関係



a) 自然含水比と係数 B b) 自然含水比と係数 a

図-16 自然含水比と log Mv-logP 曲線の係数の関係



a) 圧縮指数と膨張指数 b) 自然含水比と膨張指数

図-17 圧縮指数及び自然含水比と膨張指数の関係

試験時の除荷後の勾配である膨張指数(=膨潤指数, 以下膨張指数という)Cs の関係を最小二乗法により整理し, 図-17 に示す. 図-17 より各々の関係は次式で表されるが, 膨張指数は圧縮指数のほぼ 1/10 である. したがって, 過圧密領域での沈下量は正規圧密領域の沈下量の 1/10 程度であると予想される. なお, (22)式は(20)式を(21)式に代入した場合(図-17b)中に破線で表示)とほぼ整合性が取れている.

$$Cs = 0.09 \cdot (Cc + 0.15) \quad |r| = 0.82 \quad (21)$$

$$Cs = 0.0013 \cdot (Wn - 8.8) \quad |r| = 0.83 \quad (22)$$

6. まとめ

今回得られた知見を以下に述べる.

- (1) 地下水以深の土質材料に関しては, 自然含水比の値が間隙比あるいは湿潤密度を反映した値であることから, 自然含水比の値から概略の土質特性, 強度特性, 透水特性, 圧密特性を推定することが可能である. したがって, 自然含水比の値は非常に重要な物理特性値である.
- (2) 透水係数は粒径の違いだけでなく, 間隙(密度)の違いによる影響も受けることから, $D_{20}\%$ 粒径のみをもとにした Creager の式による推定値よりも, 間隙比を考慮した補正を行った場合にバラツキが小さくなる傾向を示した. また, $D_{50}\%$ 粒径は間隙比(自然含水比)との相関も高いことから, 今後のデータの蓄積が必要ではあるが, $D_{50}\%$ 粒径を用いた推定を行うことで推定値が改善されることを示した.
- (3) 地盤に関する設計・解析を行う際に使用する設計採用定数を設定する際には, 限られたデータだけでなく, 今回示したような対象地域に応じた各土質特性との関係を参考にしたうえで総合的に判断する必要がある. 今回は全般的な土質特性値の関係を把握を目的としたが, 今後は, 土質区分別あるいは地層別の土質特性値の違いについても検討・評価していきたい.

参考文献

- 1) 建設省計画局・山口県: 山口県周南地区の地盤, 都市地盤調査報告書, 第 13 巻, 1966.
- 2) 河野伊一郎, 八木則男, 吉国洋: 土の力学, 技報堂出版, p.11, 2001.
- 3) 山口伯樹: 土質力学, 技報堂出版, pp.24-25, 2002.
- 4) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説, 二分冊の 1 pp.308-309, 2004.
- 5) 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, p.285, 2012.
- 6) Creager, WP., J.D. Justin and J. Hind: Chap.16 Soil tests and their utilization, *Engineering for Dams*, Vol.III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John Wiley & Sons, pp.645-654, 1944.
- 7) 足立格一郎: 土質力学, 共立出版, p.37, 2002.
- 8) Skempton, A.W. and Henkel, D.J.: Tests on London Clay from deep borings at Paddington, Victoria and the South Bank, *Proc. 4th ICS MFE*, Vol.1, pp.100-106, 1957.
- 9) 地盤工学会編: 軟弱地盤の調査・設計・施工法, pp.93-107, 1966.

(2017年5月30日 受付)