

粗粒土の物理的性質と透水係数との関係

On the Relationships between Permeability and Physical Properties of Coarse Grain Soils.

北海道工業大学
北海道工業大学
北海道工業大学
北海道工業大学
北海道開発コンサルタンツ(株)

学生員 ○近藤 岳人 (Takehito Kondo)
フェロー 土岐 祥介 (Shosuke Toki)
正 員 神谷 光彦 (Mitsuhiko Kamiya)
正 員 川端 伸一郎 (Shinichiro Kawabata)
正 員 本田 周作 (Shusaku Honda)

1. 研究目的

地盤内における地下水の挙動を解析するためには、地盤の透水特性を的確に把握する必要がある。このためには費用と時間がかさむ原位置試験、あるいは、高品質の乱さない試料による室内試験を行う必要がある。本研究では、透水係数と土の物理的性質(有効径、間隙比等)との関係を粗粒土の原位置試験結果の整理および室内試験を行って検討し、土の物理的性質から透水係数を求める在来の推定式の妥当性を検証する。その結果にもとづき、地盤材料の物理的性質から透水係数を推定するさらに実用性の高い方法を検討する。

2. 研究方法

代表的な透水係数の推定式には、Hazen, Creager, Kozeny らの式¹⁾²⁾がある。これらによって求めた透水係数を、原位置試験および室内試験から得た値と比較し、在来の推定式の妥当性を検証するとともに、各推定式の特性を考察する。

透水係数に影響を及ぼすと考えられる因子には、均等係数 U_c 、間隙比 e 、有効径($D_{10} \cdot D_{20} \cdot D_w$)、間隙の形状、粒子表面性状などがある。特に、有効径が支配因子であることは明らかにされているが、同じ有効径の土質で細粒分あるいは粗粒分の含有量が異なる場合は少なくない。そこで、本報告では、同一有効径で U_c が異なる試料についての試験も行って、この問題を検討する。室内実験は、定水位試験³⁾によった。

3. 実験に用いた試料および検討に用いた既存の資料

室内試験の試料には、珪砂($D_{10}=0.099\text{mm}$)・豊浦砂(0.125)・厚田砂(0.145)・鶴川砂(0.154)・勇払砂(0.160)・幕別砂(0.171)・青山砂(0.172)・別海砂(0.213)・常呂砂(0.218)・幌延砂(0.250)・相馬砂(0.460) および、ガラスビーズ(以後 G.B.)を用いた。また、 U_c の影響を調べるために、実験の容易な G.B.を配合して、有効径 D_{10} が等しく U_c の異なる試料を作成した。配合した G.B.試料は、99GB0.2-1.5 のように、試験年、GB、 D_{10} 、 U_c の順に記して呼称する。一試料に対しては、最大および最小間隙比の供試体を作成して試験を実施した。G.B.試料についての概要を表・1に示す。

原位置試験の値は、A コンサルタント(約 150 ケース)、B コンサルタント(約 900 ケース)保有の資料および、土質工学研究発表会講演集・地盤工学会論文報告集(約 100 ケース)であり、筆者らが行った室内試験のデータ('98・'99 約 150 ケース)を加え、それをもとにデータベースを

作成して、解析を行った。表・2にその資料数を示す。

表・1 有効径 D_{10} が等しく U_c の異なる試料(G.B.)

試料名	10%粒径 D_{10} (mm)	均等係数 U_c
GB0.2	0.2	1.5, 5.0, 10, 30
GB0.4	0.4	1.5, 5.0, 10, 30
GB0.8	0.8	1.5, 3.0, 5.0, 10
GB1.6	1.6	1.5, 3.0, 5.0

表・2 本報告で使用した資料の数

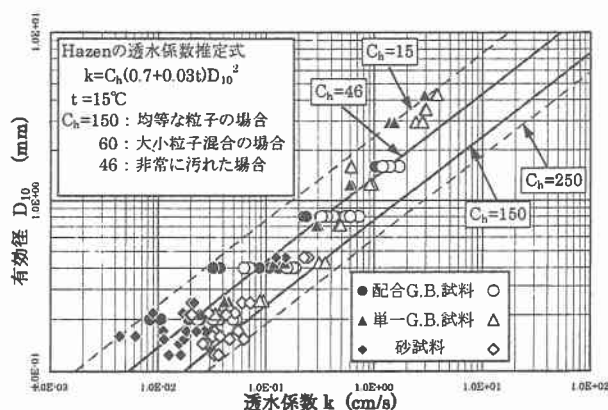
		透水試験結果		土質試験結果	粒度試験結果	ボーリング柱状図(枚数)
		原位置	室内			
Aコンサルタント	I	11	-	54	54	3
	II	45	-	174	115	48
	III	-	-	468	65	83
Bコンサルタント	H 4年	6	-	12	12	3
	H 5年	2	-	6	6	1
	H 6年	13	-	18	18	11
	H 7年	73	-	234	234	62
	H 8年	89	-	300	300	69
	H 9年	48	-	168	168	42
	H10年	35	-	226	226	41
室内試験	H10年	-	60	15	15	-
	H11年	-	84	21	21	-

4. 考 察

4.1 透水係数と有効径との相関および推定式との比較

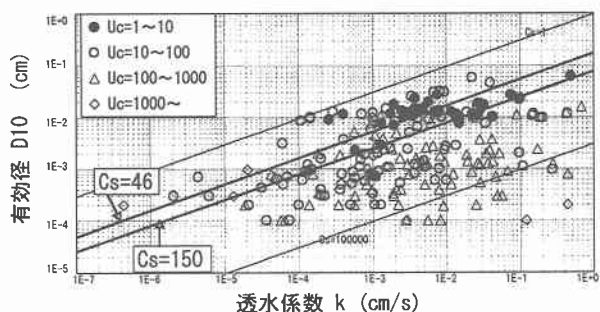
(1) Hazen の推定式について

図・1に Hazen の透水係数推定式とともに室内試験から得た D_{10} と透水係数との関係を示す。図中の●▲等は最小間隙比、○△等は最大間隙比での試験結果で

図・1 透水係数と D_{10} の関係および Hazen の式との比較

あり、各点は、提案されている範囲・傾向と合致している。

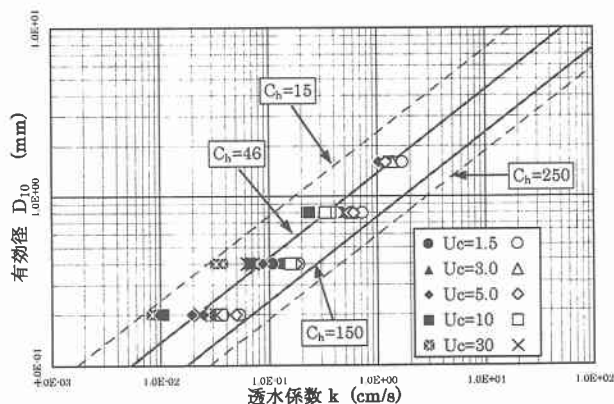
原位置試験で得られた結果においても、図・2のように U_c が 1～10 の資料については、Hazen の式の適用が十分可能である。



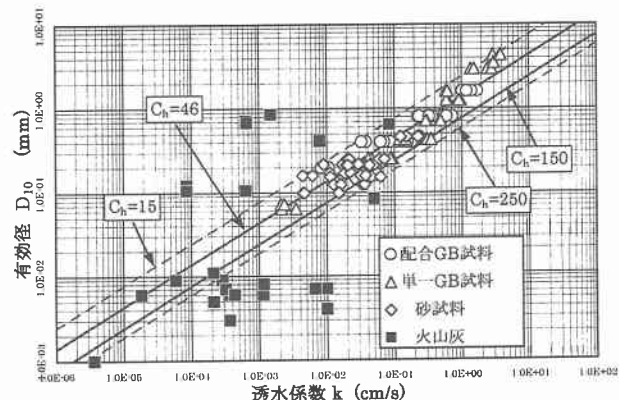
図・2 透水係数と D_{10} の関係 (原位置試験結果)

しかし、図・3に示すように、 U_c の影響を知るために行った D_{10} が等しい G.B. 試料の試験結果においては、 U_c が大きいほど、Hazen 式との差が大きくなっている。図・2 の原位置試験の結果を見ても、 U_c が 10 以上の資料では大きく外れている。 U_c の増大に伴い、一般に間隙比 e が減少すること、試料の U_c が Hazen 式が適用できる U_c の範囲を外れてしまったことが考えられる。 U_c が 10 以上の地盤材料への Hazen 式の適用は問題がある。

図・4に、原位置試験の資料の内、火山灰についての試験結果を、図・1に加えて示す。



図・3 G.B. についての透水係数と D_{10} の関係



図・4 火山灰の透水係数と D_{10} の関係

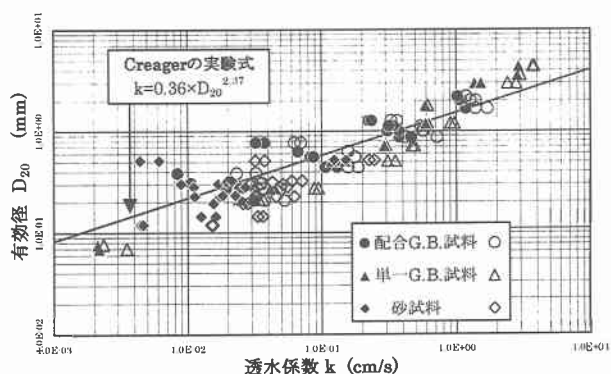
火山灰についての測定結果はばらつきが大きく、砂質土および G.B. と同じようには扱えず、Hazen 式との相関は小さい。理由は、本報告で使用した火山灰は細粒分が非常に多いこと、間隙比が大きいこと ($e=1.0 \sim 2.0$)、多孔質で表面性状が砂等に比べて粗いこと等、砂や G.B. とは物理的性質が多くの点で異なるためと考えられる。

(2) Creager の推定式について

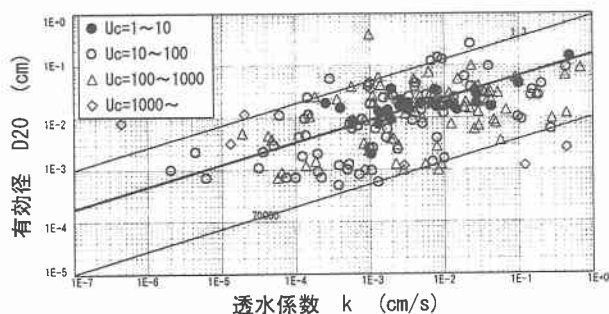
図・5に Creager の透水係数推定式とともに、 D_{20} と透水係数との関係を示す。全体的に見れば Creager 式と比較的高い相関を示している。図・6のように、原位置試験から得た値においても、 U_c が 1～10 の場合には十分適用可能である。しかし、 U_c が 10 以上では、Hazen 式と同様に推定式の適用に問題がある。

そこで、Creager 式と同型の実験式 1) を仮定した。

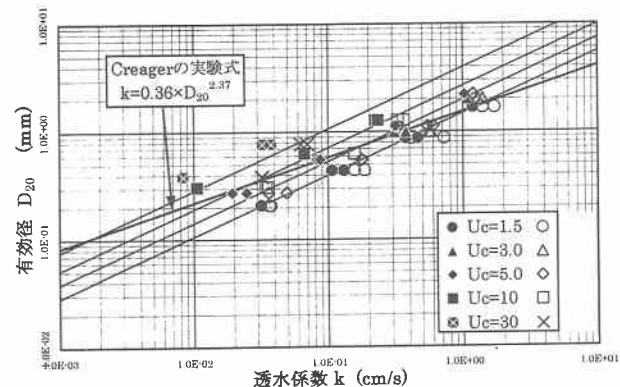
$$k = C_g D_{20}^{\lambda} \dots\dots\dots 1)$$



図・5 透水係数と D_{20} の関係および Creager の式との比較 (室内試験結果)



図・6 透水係数と D_{20} の関係 (原位置試験結果)



図・7 均等係数ごとの透水係数と D_{20} の関係 (G.B.)

有効径 D_{10} が等しく U_c が異なる G.B.試料についての D_{20} と透水係数との関係を図-7に示す。

U_c の等しい試料に注目すると、 D_{20} と透水係数との関係を表す勾配が Creager 式の勾配よりも大きくなっている。これに、注目して、 U_c ごとに定数 C_g を定め、 D_{20} の指数を実験結果より求めた。

C_g は定数で U_c ごとに異なっていて、本報告の試験範囲では 0.09~0.5 の値をとり、 U_c が小さいほど大きな値になる。 χ は 1.7~1.8 程度で、図-7 上の各 U_c ごとの線は $\chi=1.75$ にしたものである。

(3) Kozeny の推定式について

Kozeny が提案した平均径 D_w によって整理した図-8を見ると、 D_{10} 、 D_{20} を有効径として整理した場合と同様に、 U_c が 1~10 の場合には十分適用可能と考えられる。しかし、Hazen, Creager の式と同様に U_c が 10 以上の場合では、推定式の適用に問題がある。

以上を要約すると、いずれの推定式においても、適用可能範囲は、 U_c が 1~10 程度で、それ以上については適さないといえる。しかし、実際の地盤材料には U_c が 1~10 のものは、僅かしかない。

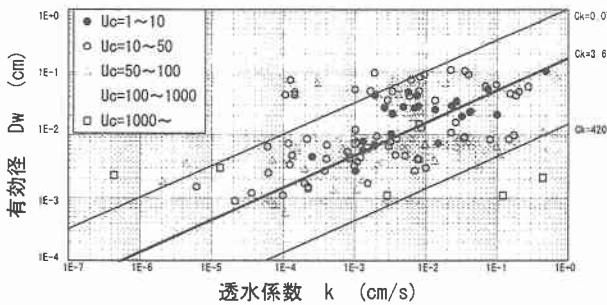


図-8 透水係数と D_w の関係および Kozeny の式との比較

4.2 透水係数と間隙比および均等係数との関係

(1) 均等係数の影響について

図-9 に透水係数と U_c との関係を示す。

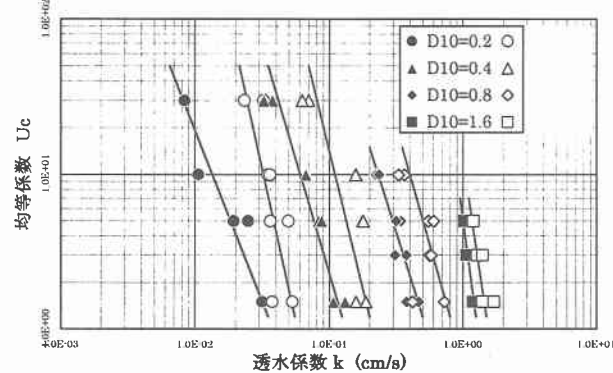


図-9 透水係数と U_c の関係 (G.B.)

U_c が大きいほど透水係数は小さくなっている。しかし、今回は試験を最大および最小間隙比の場合のみしか行っておらず、その値も試料ごとに異なり、均等係数の大小によって供試体の間隙比も異なっている。そのため、間隙比と有効径が同一の条件で透水係数と U_c の影響を比較する事ができない。したがって、透

水係数が U_c と間隙比のどちらの影響を大きく受けているか現時点では明確でない。

(2) 間隙比と均等係数に係る項を含む透水係数推定式

間隙比と透水係数の関係は、間隙比の関数 $e^3/(1+e)$ と相関が高いとされている。 D_{10} の異なる試料についての実験結果を比較した、 $k/D_{10}^2 \sim e^3/(1+e)$ の関係 (G.B.) を図-10 に示す。プロットした点が U_c ごとにほぼ直線に近い分布となり、 U_c の増加に伴って直線の傾きが大きくなる傾向がある。

そこで、Poiseuille 式⁴⁾および佐々木の式⁵⁾をもとに、間隙比と U_c の影響を含む推定式を検討する。

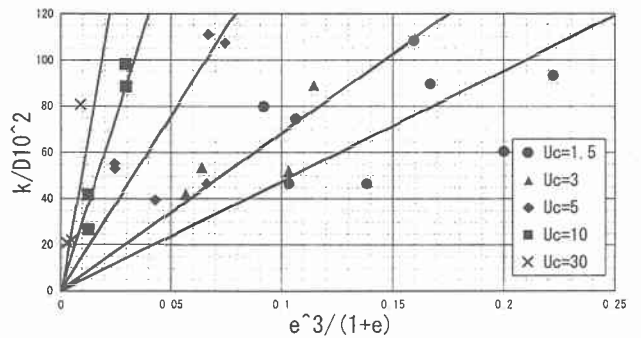


図-10 G.B.における k/D_{10}^2 と $e^3/(1+e)$ との関係

Poiseuille 式において、最も影響の大きいのは有効径 D_e であることに注目し、さらに D_e の異なる試料についての比較を行うため、2)式を得た。

$$\frac{k}{D_e^2} = \frac{C \cdot \gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad \dots\dots 2)$$

D_e を 10% 粒径 D_{10} として、2)式の両辺を図-11 にプロットした。

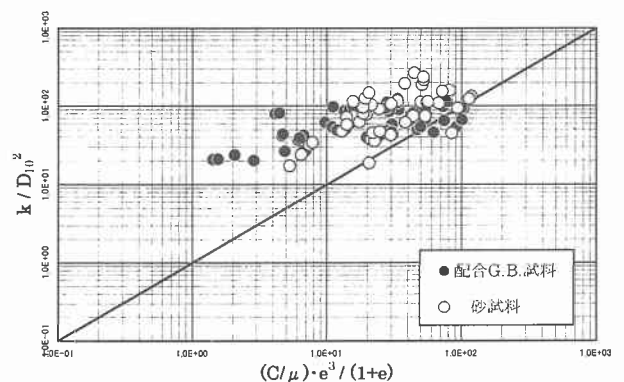


図-11 透水係数推定式の検討: 1

図に示すように、プロットした点は線上から大きく外れている。そこで、 U_c の影響を検討するため、2)式から 3)式を導いた。ここで、 C' は、 C/U_c である。

$$\frac{k}{D_{10}^2 \cdot U_c} = \frac{C' \cdot \gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad \dots\dots 3)$$

砂試料と G.B. とでは、 C' は異なる事が推測できるので、別々に求めた。

G.B. について $k/(D_{10}^2 \cdot U_c)$ と $e^3/(1+e)$ との関係を

図-12 に示す。両者のプロットは、多少ばらつきがあるものの直線関係を示す。これより、 $C' = 3.24$ が得られる。

図は示していないが、砂試料についても、同様に C' を求め、 $C' = 1.71$ となった。

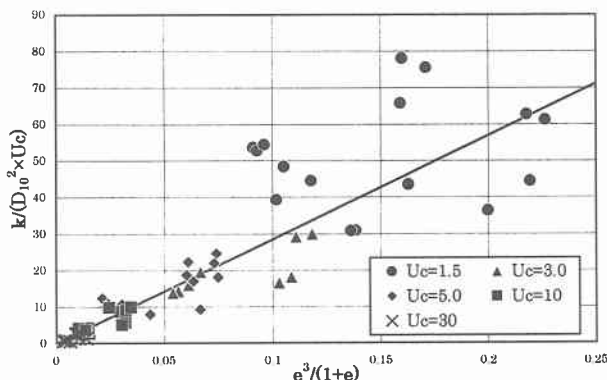


図-12 透水係数推定式の検討：2 (G.B.試料)

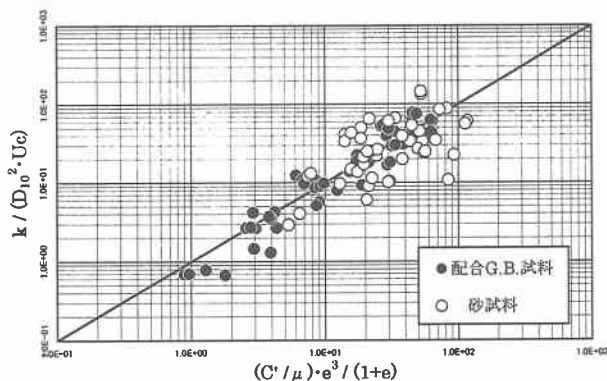


図-13 透水係数推定式の検討：3 (C' による値)

この C' を用いると図-13 のようになり、補正前(図-11)と比べると、プロットした点は 1 対 1 の直線に近い分布しているのがわかる。

以上のようにして、下記の実験式 4) を得た。

$$k = \frac{C' \cdot \gamma_w \cdot U_c}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_{10}^2 \quad \dots\dots 4)$$

C' : 粒子表面性状に係わる係数

砂試料 $C' = 1.71$, G.B.試料 $C' = 3.24$

γ_w : 水の単位体積重量

μ : 粘性係数

5. 結 論

本報告を要約すると以下のようである。

5.1 有効径と透水係数との関係について

- (1) 透水係数には、有効径 D_e が最も大きな影響を与えていることは明らかである。しかし、原位置試験あるいは室内試験によって求めた値には、 D_e が等しい場合でも透水係数に 4~5 オーダーにも及ぶ、大きな差異が見られた。
- (2) Hazen, Creager, Kozeny の透水係数推定式は、 $U_c = 1 \sim 10$ の地盤材料には実用上適用可能である。しかし、 U_c が 10 以上の地盤材料への適用には問題がある。 $U_c = 1 \sim 10$ の実際の地盤材料は僅かしか

ないので、より適用性の高い透水係数推定式の提案を検討する必要がある。

火山灰についても、同様に有効径との関係を調べたが、測定値の分散が大きい。火山灰への従来の透水係数推定式の適用は、難しいようである。

- (3) データの分散の面から見ると、Creager 式が最も小さく、次いで Hazen, Kozeny の式の順で分散が大きくなる。Kozeny 式は、有効性が高いとされる平均径 D_w を用いているにもかかわらず、本報告の範囲では、必ずしも妥当性が高いとはいえなかった。さらに合理的な D_w の設定方法を工夫する必要がある。
- (4) G.B.について、 U_c を変えて行った一連の実験から、クレーガー型の実験式 1) を得た。 α はクレーガー式では 2.37 であるのに対し、G.B.では 1.7~1.8 で、 C_g 値は $U_c = 1.5$ の時は 0.5, $U_c = 30$ の時は 0.09 であった。

5.2 間隙比および均等係数と透水係数との関係について

- (1) 有効径が同じであっても、均等係数 U_c が大きいほど小さい透水係数が得られた。しかし、今回の実験では、有効径とともに間隙比を同一にした条件で、透水係数と U_c とを比較する事ができなかった。したがって、透水係数が U_c と間隙比のどちらの影響を大きく受けているかは、現在のところ不明である。
- (2) 透水係数と間隙比の関数 $e^3/(1+e)$ の関係が、 U_c ごとに直線に近い分布を示している。このことから、透水係数には、間隙比だけでなく U_c も影響していると考えられ、推定式には U_c の影響を考慮する必要がある。
- (3) 上記(1)(2)より、Poiseuille 式および佐々木の式にもとづき、間隙比と U_c の影響を考慮した実験式 4) を導いた。
 C' は、G.B.で 3.24, 砂試料で 1.71 であり、他より適用性が高い。

謝 辞

本研究の実施にあたり、多くの機関から原位置および室内透水試験結果の資料を頂いた。また、室内試験の実施および資料の整理は、本学卒業生、名和紀貴、松本博志、尾上良、館寿史、今野哲也君の努力に負うところが大きい。深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学ハンドブック(土質工学会): 第 3 章, 浸透と地下水, pp.65 - 105, 1983.
- 2) 最上武雄(技報堂): 第 2 章 浸透に関する事象, pp.89 - 220, 1969.
- 3) 土質試験の方法と解説(土質工学会): 第 6 編 第 2 章, 土の透水試験, pp.331 - 347, 2000.
- 4) D.W.Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics, pp.97 - 123, 1948.
- 5) 佐々木八郎: 浸透係数を表す諸式について, 水道協会誌, No.237, pp.7 - 10, 1954.