

砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性

孔令伟, 李新明, 田湖南

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 利用常规渗透仪进行了不同细粒含量砂土的渗透性能试验, 通过引入粒间状态参量概念, 探讨砂土渗透系数的细粒效应及其与表征砂土各种状态参数的相互关联性。发现砂土渗透系数总体上随细粒含量增加而减小, 当细粒含量小于 5% 时影响较小; 细粒含量在 5%~10% 时, 渗透系数随细粒含量增加而急剧减小; 而当细粒含量大于 25% 后, 砂土的渗透系数则基本趋向相对稳定值。基于 5 种不同表征状态参数的拟合分析, 表明采用现有常用的经验模型尚难以简便、有效地预测各种细粒含量砂土的渗透系数, 而利用粉粒间孔隙比则能更好地反映细粒含量对渗透系数的影响, 且其与渗透系数在半对数坐标内基本呈现线性关系, 说明粒间状态参量适宜用来描述砂土渗透系数的细粒效应。

关 键 词: 细粒含量; 砂土; 渗透试验; 渗透系数; 细粒间孔隙比

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters

KONG Ling-wei, LI Xin-ming, TIAN Hu-nan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The permeability test of sand with different contents of fines is performed by conventional permeameter, the effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with various characterized state parameters are discussed, in which the concept of inter-particle state parameter is employed. It is found that the permeability coefficient of silty sand decreases with the fines content increasing, when the fines content is less than 5%, the effect is very small, while in the range of 5%-10%, the permeability coefficient decreases with increase of fines content sharply, and tends to a relatively stable value under the condition of fines content more than the 25%. Base on the fitting analysis by five types of various characterized state parameters, it is shown that the present common empirical models can not predict the permeability coefficient of sand with different fines content simply and effectively. However the state parameter of void ratio of inter-fines can reflect the effect of fines content on the permeability coefficient of sand better; and its relation of void ratio of inter-fines and permeability coefficient is presented linear correlation in the semi-logarithm coordinates, it is indicated that the void ratio of inter-fines state parameter is suitable for describing the effect of fines content on the permeability coefficient of sand.

Key words: fines content; sand; permeability test; permeability coefficient; void ratio of inter-fines

1 引 言

渗透性是岩土工程研究的关键问题之一, 而渗透系数作为表征渗透性的最重要参数, 其演化特性对土体强度与变形有重要影响, 也必然与工程安全紧密相关。由于砂具有良好透水性和较小压缩性, 在工程应用中非常广泛, 但自然界中的砂大多都不

是纯净砂, 均不同程度含有一定含量的细粒。细粒的存在改变了砂土孔隙特性, 而孔隙特性是影响砂土渗透性能的最重要因素^[1], 由此导致其严重偏离纯净砂的渗透系数。显然, 分析细粒对砂土孔隙特性的影响, 建立细粒等状态参量和砂土渗透系数之间的规律性关系, 进而揭示砂土渗透性能的细粒效应意义十分明确。

收稿日期: 2011-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40372128)。

第一作者简介: 孔令伟, 男, 1967 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性及灾害防治技术方面的研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

近年来, 细粒含量对砂土工程性状的影响已引起国内外的重视^[2-5], 普遍认为细粒掺入后引起的砂土孔隙比等的改变是其工程特性发生变化的重要原因之一。不少学者从不同角度进行了探讨, 目前大多聚集于评价细粒含量对砂土液化和强度特性的影响, 如 Naser^[6]针对不同黏粒含量与含水率的组合样品, 深入论证了黏-砂土结构的强度参数、应力-应变关系与水力特性, 认为当黏粒含量超过 40% 时, 黏粒含量不再明显影响上述指标参数与特性; Thevanayagam 等^[7-8]提出粒间状态参量的概念框架, 并用于分析含细粒砂土液化特性, 较好地解释了砂土液化的重要参数——界限细粒含量, 并得到其他学者的验证; 朱建群等^[9]通过固结不排水试验围绕细粒含量对砂土工程性质, 尤其是强度特性的影响进行了比较深入的探讨; 曾长女等^[10]则利用全自动多功能静动三轴仪, 对细粒含量对粉土液化及液化后的影响进行了系统的研究。

应该说, 国内外在细粒对砂土的强度和液化及液化后的影响已开展了大量深入的研究, 但在细粒对砂土渗透系数影响的精细分析尚不够充分。本文利用常规饱和渗透试验, 探讨砂土渗透特性的细粒效应, 在此基础上, 引入 Thevanayagam 提出的粒间状态参量作为参数, 用于表征砂土的渗透系数, 并初步探讨其机制。

2 试验方案与试验结果

取样地点位于钱塘江南岸的萧绍冲积平原, 地势较为平坦, 地貌形态单一, 属钱塘江河口冲海积平原地貌, 是典型的河口相沉积砂层且广泛分布。该地区地下 20~28 m 分布有典型的沉积粉细砂, 偶见黏土透镜体, 砂呈灰色且饱和, 试样细砂即取自该层。

试验采用砂样为重塑样, 为剔除取样过程中不慎带入的异常颗粒, 在试验前将砂样风干过 0.5 mm 筛。砂样的颗粒分析曲线见图 1。由图 1 可知, 试样中 0.25~0.075 mm 范围内的颗粒占 95%。按照《土工试验规程》^[11]对土样的划分, 砂样属于粉细砂, 其基本物理性质指标见表 1。

2.1 不同细粒含量砂样的制备

为制备不同细粒含量的试样, 对砂样的砂粒和细粒进行分选。砂样经风干过 0.25 mm 筛后在水中用 0.075 mm 筛子进行洗筛, 选取 0.075 mm 筛上的砂样, 粒径在 0.075~0.25 mm 范围内, 以此作为骨架砂 (纯净砂)。将 0.075 mm 筛下的水溶液静置到水变清后倒出清水, 晾干细颗粒土样即为粒径小于

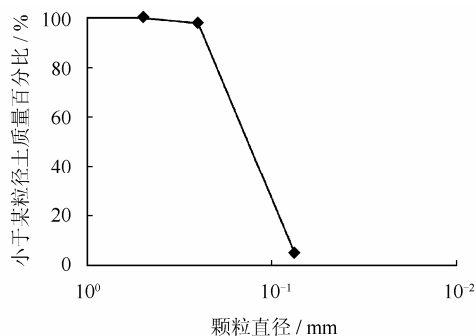


图 1 试样用砂的颗粒级配曲线
Fig.1 Gradation curve of test sand

表 1 砂样的物性指标
Table 1 Physical properties of test sand

平均粒径 D_{50} / mm	有效粒径 d_{10} / mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
0.135	0.018	1.9	0.87

0.075 mm 的细粒, 用碎土器磨碎、烘干, 小于 0.075 mm 的细粒颗粒级配曲线见图 2。由图可知, 试样中 0.075~0.002 mm 范围内的颗粒约占总细粒的 90% 以上, 粉粒占绝大多数, 添加的细颗粒实为粉粒, 以下所指的细粒皆为此样。试验所用土样掺入的细粒含量 (占试样总质量) 分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、40% 和 100%, 分别以 FC_{00} 、 FC_{05} 、 FC_{10} 、 FC_{15} 、 FC_{20} 、 FC_{25} 、 FC_{40} 和 FC_{100} 表示 (其中 FC 表示细粒含量, 数字表示细粒含量具体数值)。表 2 为各个含量的细粒砂土的基本物理性质指标, 图 3 为各试样的颗粒级配曲线。

2.2 试验过程与结果

试验的砂土用蒸馏水洗去盐分, 在渗透试验过程中保持室内温度恒定, 待试样渗透稳定后开始量测, 为减小试样的制备方法对土体性状的影响, 本研究各土样制备均采用湿压法, 以便较好地控制试样孔隙比。利用水在砂土颗粒间可形成“假”黏聚力这一特性顺利制样和装样, 先将不超过总质量的 7% 的水和砂样充分搅拌均匀, 然后置于密封袋静置

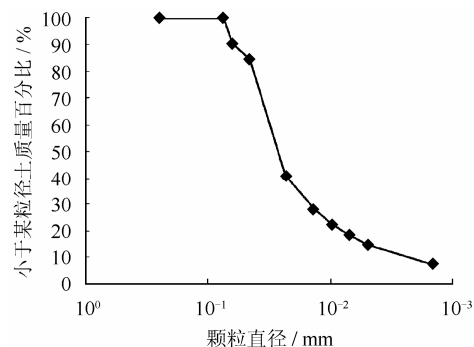


图 2 试验细颗粒级配曲线
Fig.2 Gradation curve of fine particle

表 2 各细粒含量砂试样的基本物理性质指标
Table 2 Physical properties of silty sand with different fines content

细粒含量 / %	孔隙比 e	土的相对密度 G_s	平均粒径 D_{50}/mm	曲率系数 C_c	不均匀系数 C_u
0	0.941	2.68	0.170	0.97	1.8
5	0.944	2.68	0.160	0.99	2.1
10	0.946	2.69	0.160	1.01	2.3
15	0.949	2.69	0.150	1.83	4.6
20	0.952	2.69	0.140	2.07	5.9
25	0.953	2.70	0.130	2.13	7.1
40	0.958	2.70	0.110	0.72	7.7
100	0.974	2.72	0.027	3.08	13.5

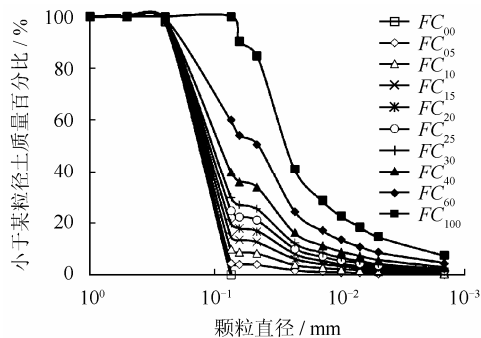


图 3 不同细粒含量砂样的颗粒级配曲线
Fig.3 Gradation curves of silty sand with different fines content

20 h 以上, 装样前测定袋内不同位置处砂样的含水率, 差值不应超过 1%, 以期达到试样均匀。

试验用砂干密度取 1.38 g/cm^3 , 利用千斤顶压制了 FC_{00} 、 FC_{05} 、 FC_{10} 、 FC_{15} 、 FC_{20} 、 FC_{25} 与 FC_{40} 等 7 种不同细粒含量的环刀试样, 其压实含水率平均为 6%, 然后抽真空浸水饱和装入渗透仪中, 量测渗透系数的常水头渗透试验具体步骤见文献[11]。

根据达西定律 $k = \frac{QL}{Aht}$, 以 Aht 为横坐标, QL

为纵坐标, 绘制不同细粒含量的渗透试验结果见图 4, 渗透系数见表 3。其中, A 为过水断面面积, k 为渗透系数(cm/s), Q 为时间 t 内的渗透水量(cm^3), L 为两测压孔中心间的试样高度(cm), h 为平均水位差(cm), t 为时间(s)。

3 结果分析与讨论

根据表 2 与表 3 的试验数据, 以下通过拟合分析分别论述含细粒砂土的状态参量(细粒含量、不均匀系数、平均粒径)与砂土渗透系数的关系, 然后通过引入粒间状态参量, 讨论粒间孔隙比、粉粒间孔隙比与砂土渗透系数的关联性。

3.1 细粒含量与砂土渗透系数的关系

不同细粒含量砂土与渗透系数关系如图 5 所示。

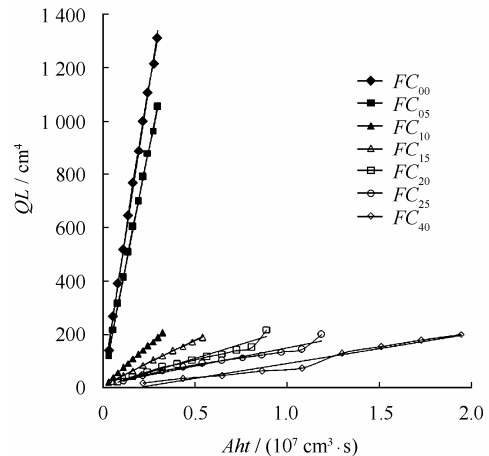


图 4 不同细粒掺量 Aht 与 QL 关系
Fig.4 Relationships between Aht and QL with different fines content

表 3 不同细粒含量砂土渗透系数的实测值
Table 3 Hydraulic conductivity of silty sand with different fines content

细粒含量 / %	室温渗透系数 $k_T / (\text{cm/s})$	20℃渗透系数 $k_{20} / (\text{cm/s})$
0	3.88×10^{-4}	4.42×10^{-4}
5	3.46×10^{-4}	3.94×10^{-4}
10	3.36×10^{-5}	3.82×10^{-5}
15	2.13×10^{-5}	2.42×10^{-5}
20	1.70×10^{-5}	1.93×10^{-5}
25	1.19×10^{-5}	1.35×10^{-5}
40	1.12×10^{-5}	1.27×10^{-5}

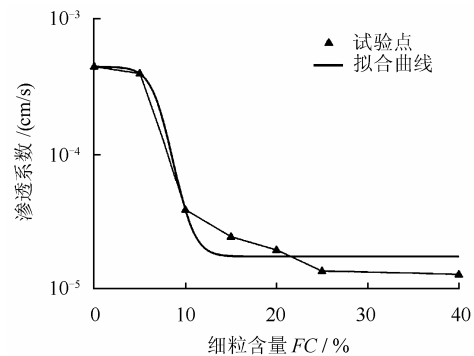


图 5 细粒含量与渗透系数的拟合曲线
Fig.5 Fitting curves between FC and hydraulic conductivity

从图 5 可看出, 细粒增加改变了砂土的孔隙性状, 随着细粒的增加砂土骨架孔隙逐渐被细颗粒填充, 砂土渗透性减小。在半对数坐标中, 渗透系数总体上随细粒增加而减小, 曲线可分为 $FC < 5\%$ 、 $FC = 5\% \sim 10\%$ 、 $FC = 10\% \sim 25\%$ 与 $FC > 25\%$ 四段。 $FC = 5\% \sim 10\%$ 时, 随细粒增加渗透系数急剧减小; $FC > 25\%$ 时, 细粒对渗透系数影响不明显, 曲线缓慢下降; $FC = 10\% \sim 25\%$ 段, 细粒对渗透系数的影响处于以上两者之间。Nagaraj^[12]和 Han^[13]认为细粒

含量超过 40%以后砂土的渗透系数变化不大,其渗透系数约比纯净砂减小两个数量级,这与本项试验结果基本一致。

Naser^[6]对不同黏粒含量砂土的渗透试验结果表明,在低黏粒含量下渗透系数的减小显著大于高黏粒含量,而黏粒含量小于 10%时对渗透系数的影响最为明显,且细粒含量大于 40%后渗透系数基本不变。本文掺合料为粉粒,其结果与黏粒试验的趋势一致,细粒含量 10%为渗透系数转折点,且细粒含量大于 25%后基本维持常数。图 5 的拟合方程为

$$k = 1.737\ 35 \times 10^{-5} + \frac{4.250\ 69 \times 10^{-4}}{1 + 10^{(FC - 3.610\ 92)/31.114\ 76}}$$

$$R^2 = 0.999\ 2 \quad (1)$$

3.2 不均匀系数与砂土渗透系数的关系

不均匀系数 C_u 可在一定程度上反映土的颗粒级配状况,是评定其渗透性能的重要指标之一。从图 6 可以看出,在半对数坐标中,渗透系数随着不均匀系数的增大而不断减小,这表明颗粒级配对渗透系数有一定的影响,不均匀系数越大,级配越好,渗透系数越小,但渗透系数在不均匀系数等于 2.5 时发生突变,不均匀系数大于 3 后,渗透系数变化较小。图 6 的拟合方程为

$$k = 1.746\ 83 \times 10^{-5} + 4.245\ 65 \times 10^{-4} / (1 + 10^{\frac{C_u - 2.197\ 46}{0.043\ 73}})$$

$$R^2 = 0.999\ 2 \quad (2)$$

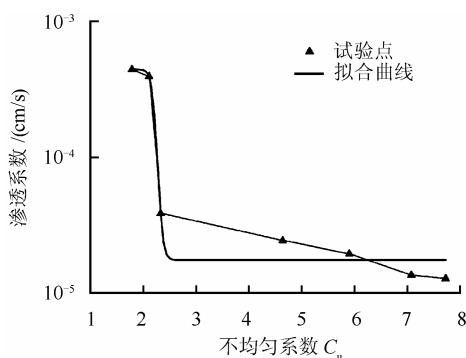


图 6 不均匀系数和渗透系数的拟合曲线
Fig.6 Fitting curves between C_u and hydraulic conductivity

3.3 平均粒径与砂土渗透系数的关系

平均粒径 D_{50} 与渗透系数的拟合曲线见图 7,不难看出,随平均粒径的增大,砂土的颗粒中骨架颗粒增多,骨架效应增强,土样的渗透性增强。当平均粒径 D_{50} 在 0.155 mm 附近时,曲线出现拐点, D_{50} 小于 0.155 mm 时渗透系数变化不大,曲线随粒径减小平缓下降,粒径大于 0.155 mm 时,土样中

大颗粒骨架形成通道,渗透系数快速增大,其拟合方程式为

$$k = 1.742\ 38 \times 10^{-5} + 4.252\ 53 \times 10^{-4} / (1 + 10^{(0.157\ 89 - D_{50}) \times 394.930\ 67})$$

$$R^2 = 0.999\ 2 \quad (3)$$

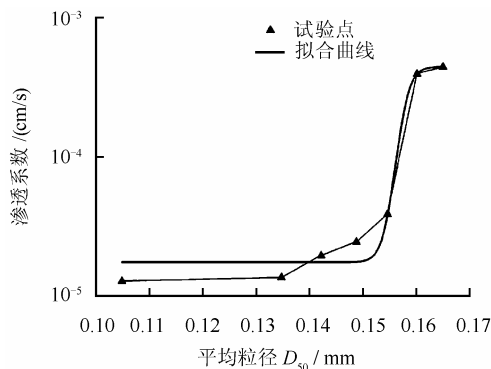


图 7 平均粒径与渗透系数拟合曲线
Fig.7 Fitting curves between D_{50} and hydraulic conductivity

3.4 (粉) 粒间孔隙比与砂土渗透系数的关系

不均匀系数和平均粒径等传统状态参量可以在一定程度上描述砂土的渗透性能,但对于细粒含量超过 20%以后砂土渗透系数的变化的描述效果一般,其拟合曲线非线性特征明显,不利于进行渗透系数的预测。这也说明其未能真实反映细粒对于砂土渗透特性的影响。以下引入粒间状态参数的概念,分析细粒在砂土内部扮演的角色及其宏观上对砂土渗透系数的影响。

土体在外力作用下各土粒或粒团间的连接方式或接触方式,被 Thevanayagam 等称为“力链”,且认为土体内部的力链具有颗粒尺寸效应,它们共同影响可表征含细粒砂土力学性能的宏观表象。已有孔隙比 e 不能描述其提出的“力链”的意义, Thevanayagam 以 $74\ \mu\text{m}$ 为界将土体颗粒划分为砂(粗)粒组和粉(细)粒组,将骨架孔隙比的概念扩展,定义了各粒间状态参量^[7-8]。

为分析方便,如图 8 所示将砂土的各相分离。假设在某粉粒含量下,粉粒组对含细粒砂土力学性状的宏观表象并未起作用或作用较小,则它的“力链”占土粒间相互作用比例不大。假定砂粒与粉粒具有相同的土粒相对密度,如图 8(b)所示,土体总孔隙体积为 e ,粉粒含量为 FC (质量百分比),则粉粒体积为 $f_c = FC/100$,砂粒体积为 $(1 - FC/100) = 1 - f_c$ 。骨架孔隙比为 e_s ,为统一在含细粒砂土中应用,称为粒间孔隙比:

$$e_s = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad (4)$$

当土体中粉粒含量显著增加而使其内部力链的

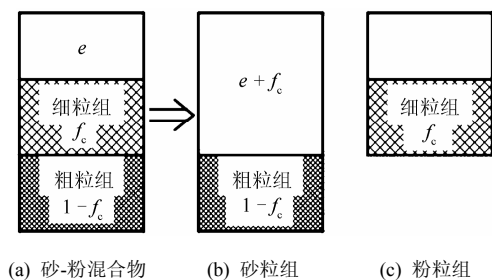


图 8 砂粉混合物两相示意图

Fig.8 Intergranular matrix phase diagram for the conceptual framework of Thevanayagam

形成和相互作用力的传递逐渐为粉粒所控制时, 砂粒被粉粒包围而成为悬浮颗粒, 其相互不接触或接触很少, 对土体性状的影响很小。尽管砂粒间的作用力可忽略不计, 但其体积却不可不计, 此时粉粒作为土体的主骨架如图 8(c)所示, 粉粒间孔隙比定义为

$$e_f = \frac{e}{f_c} \quad (5)$$

基于以上定义, 可方便给出粒间状态参量 e_s 、粉粒间状态参量 e_f 与砂土的渗透系数关系, 分别如图 9 与图 10 所示。

由 $e_s = \frac{e + f_c}{1 - f_c}$ 可以看出, 随细粒的增加, 细粒

组 f_c 增加, 孔隙比 e 变化并不明显, 因而 $e + f_c$ 与 $1 - f_c$ 的比值增大, e_s 增大说明粉粒的比重增大, 骨架孔隙被细粒填充, 砂土渗透性减小。图 9 的曲线转折点出现在 $e_s = 1.2$ 附近, $e_s < 1.2$ 时, 渗透系数受 e_s 影响剧烈, 渗透系数随 e_s 增大急剧减小; $e_s > 1.2$ 以后粒间孔隙比的增加对渗透系数的减小的贡献已经很小; $e_s > 1.6$ 以后对渗透系数几乎无影响。拟合方程式为

$$k = 1.743 \ 64 \times 10^{-5} + (4.251 \ 46 \times 10^{-4}) / (1 + 10^{\frac{(e_s - 1.093 \ 52)}{0.023 \ 14}}) \quad (6)$$

$$R^2 = 0.999 \ 2$$

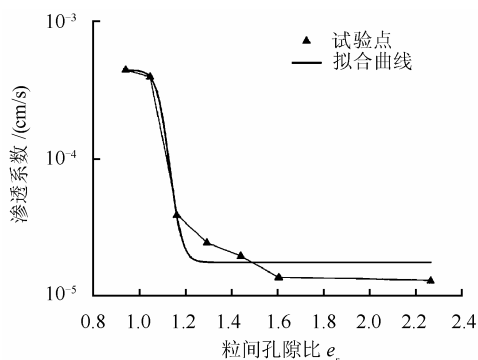


图 9 粒间孔隙比与渗透系数的拟合曲线

Fig.9 Fitting curves between inter grain void and hydraulic conductivity

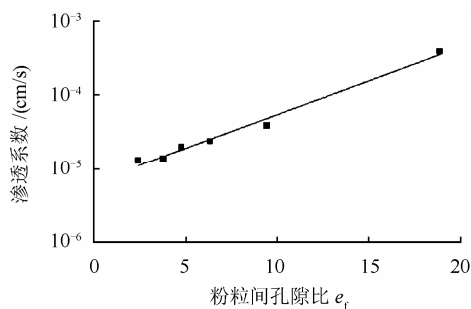


图 10 粉粒间孔隙比与渗透系数关系

Fig.10 Relationships between void ratio of inter-fines and hydraulic conductivity

粉粒间孔隙比是孔隙比与细粒的比值, 其没有考虑砂土骨架粗颗粒, 粉粒间孔隙与渗透系数在半对数坐标中具有良好的线性关系, 如图 10 所示。渗透系数与粉粒间孔隙比直接相关, 在孔隙比不变的情况下, 粒间孔隙比越大, 说明细粒组的含量越小, 渗透系数越大, 渗透系数的对数随粒间孔隙比的增大而呈线性增长。两者的拟合方程为

$$k = 7.0 \times 10^{-6} e^{0.211 e_f}, \quad R^2 = 0.988 \ 7 \quad (7)$$

通过上面的分析可以看出, 采用传统表征砂土的状态物性参数与渗透系数一般呈非线性关系, 而引入粒间状态参量表征含细粒砂土的渗透系数, 不仅物理概念清晰, 而且粉粒间孔隙比与渗透系数的关系在半对数坐标下呈现很好的线性关系, 便于应用, 适宜用来描述砂土的渗透系数。

3.5 渗透系数预估模型的适宜性讨论

渗透系数作为土性的一个基本参数, 其与多个物性参数 (颗粒组成、孔隙比) 等有关, 国内外诸多学者对其进行了研究, 以期能够建立渗透系数模型公式, 供工程计算参考。目前应用较广泛的 Amer 公式^[14]、Hazen 公式^[15]、太沙基公式^[16]等及本文拟合公式在给定的参数下, 对不同细粒含量砂土的渗透系数进行拟合与预测, 并与实测结果进行类比, 如表 4 和图 11 所示。从中可以看出:

(1) 从本文研究的前 4 种影响因素所得拟合结果看, 拟合效果较好。在相同细粒条件下的渗透系数均在一个数量级, 误差较小。但前 4 种的拟合结果在细粒含量大于 15% 之后, 渗透系数保持不变。从试验结果也可看出, 细粒含量大于 25% 之后砂土的渗透系数才变化较小, 说明这 4 种参数对于细粒含量大于 15% 后细粒的增大引起的渗透系数的变化不敏感。

(2) Hazen 公式计算结果比实际明显偏大 1~2 个数量级, 这可能与 Hazen 公式来源于极均匀砂砂有关, 不能反映与含细粒砂土的渗透性能有关。根据天然砂土和沙砾得到的 Amer 公式的计算结果与

实测的比较接近,但当细粒含量大于 25%时的计算值比实测值偏小一个数量级。而太沙基公式则明显偏大,不宜用来反映该类砂土。

(3) 利用粉粒间孔隙比状态参量,可以较好地反映各细粒含量下渗透系数的变化,这说明粉粒间孔隙比可以更好地反映试样的真实渗透性能。同时,粉粒间孔隙比和渗透系数在半对数坐标下基本呈线性关系,这对于渗透系数的预测有很大帮助。虽然粉粒间孔隙比无法反映细粒含量为 0 的情况,但根据细粒含量为 0 的真实渗透系数反算出试样的细粒含量为 4.79%,基本接近 5%,可以利用细粒 5% 的拟合结果近似代替,并不影响利用粉粒间孔隙比进行渗透系数的拟合或预测。

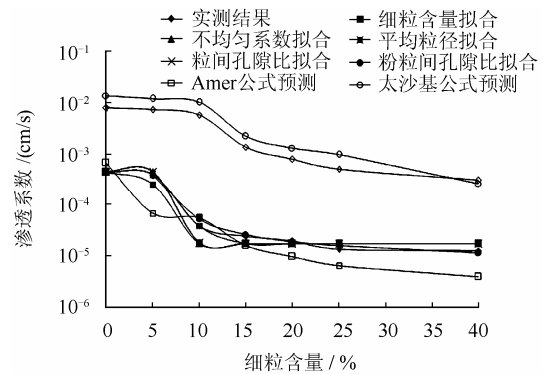


图 11 不同细粒含量砂土渗透系数的预测结果
Fig.11 Predictive results of hydraulic conductivity of sand with different fines content

表 4 不同细粒含量砂土渗透系数的实测值与基于状态参数的预测值对比
Table 4 Comparison between measured values and predictive results of hydraulic conductivity using different state parameters for silty sand with different fines content

细粒含量%	渗透系数/(cm/s)								
	实测结果	根据细粒含量预测	根据不均匀系数预测	根据平均粒径预测	根据粒间孔隙比预测	根据粉粒间孔隙比预测	Amer 公式	太沙基公式 ^[16]	Hazen 公式
0	4.42×10 ⁻⁴	4.42×10 ⁻⁴	4.42×10 ⁻⁴	4.42×10 ⁻⁴	4.43×10 ⁻⁴		6.64×10 ⁻⁴	1.37×10 ⁻²	7.74×10 ⁻³
5	3.94×10 ⁻⁴	2.55×10 ⁻⁴	4.38×10 ⁻⁴	3.94×10 ⁻⁴	4.39×10 ⁻⁴	3.76×10 ⁻⁴	6.81×10 ⁻⁵	1.17×10 ⁻²	7.21×10 ⁻³
10	3.82×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁵	3.84×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁵	5.15×10 ⁻⁵	5.45×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻²	5.63×10 ⁻³
15	2.42×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	2.66×10 ⁻⁵	1.58×10 ⁻⁵	2.21×10 ⁻³	1.34×10 ⁻³
20	1.93×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.91×10 ⁻⁵	9.75×10 ⁻⁶	1.32×10 ⁻³	7.77×10 ⁻⁴
25	1.35×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.57×10 ⁻⁵	6.57×10 ⁻⁶	9.61×10 ⁻⁴	5.02×10 ⁻⁴
40	1.27×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁵	1.16×10 ⁻⁵	3.92×10 ⁻⁶	2.65×10 ⁻⁴	3.04×10 ⁻⁴

注: Amer 公式: $k = 3.5 \times 10^{-4} \frac{e^3 \gamma_w}{(1+e) \mu} d_{10}^{2.32} C_u^{0.6}$; Hazen 公式: $k = C d_{10}^2$; 太沙基公式: $k = 2 d_{10}^2 e^2$ 。 γ_w 为水的重度 (kN/m^3); μ 为水的动力黏滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s} \times 10^{-6}$); C 为经验系数,一般取 1.0~1.5,本次 C 取 1.0; d_{10} 为有效粒径 (mm)。

4 结 论

(1) 砂土渗透系数的细粒效应明显,其渗透系数总体上随细粒增加而减小,当细粒含量小于 5% 时影响较小,细粒含量在 5%~10% 时,渗透系数随细粒含量增加而急剧减小;而当细粒含量大于 25% 后,砂土的渗透系数则基本趋向相对稳定值。

(2) 将实测结果与 Amer 公式、Hazen 公式、太沙基公式对砂土渗透系数的预测结果对比后表明,采用现有的经验模型尚难以简便有效预测各种细粒含量砂土的渗透系数,采用传统表征砂土的状态物性参数与渗透系数关系一般呈非线性,且难以反映细粒含量大于 15% 后引起的渗透系数变化性状。

(3) 粉粒间状态参量可以更好地表征渗透系数随细粒含量变化的演化规律,且其与砂土饱和渗透系数的关系在半对数坐标下呈现良好的线性关联性,便于应用,适宜用来描述砂土渗透系数的细粒效应。

参 考 文 献

- [1] 田湖南. 非饱和砂土工程性状的细粒效应试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [2] THEVANAYAGAM S, MARTIN G R. Liquefaction in silty soil-screening and remediation issues[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9-12): 1035-1042.
- [3] NAEINI S A, BAZIAR M H. Effect of fines content on steady state strength of mixed and layered samples of a sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(3): 181-187.
- [4] 朱建群. 含细粒砂土的强度特征与稳态性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [5] YIN J H. Properties and behavior of Hong Kong marine deposits with different clay contents[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(6): 1085-1095.
- [6] NASER A A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils[J].