第38卷第10期 岩 土 力 学 Vol.38 No. 10
2017年10月 Rock and Soil Mechanics Oct. 2017

DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.016

钙质砂的渗透特性及其影响因素探讨

胡明鉴[1]，蒋航海[1, 2, 3]，朱长歧[1]，翁贻令[1, 2, 3]，阮 洋[1]，陈伟俊[1, 2, 3]

（1. 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，湖北 武汉 430071；
2. 广西大学 土木建筑工程学院，广西 南宁 530004；3. 广西大学 海洋学院，广西 南宁 530004）

摘 要：钙质砂在沉积过程中大多保持着原生生物骨架中的细小孔隙，多孔隙且含内孔隙、形状不规则、强度低易破碎、颗粒棱角度高、会胶结等特殊性质。其工程力学性质较一般陆相、海相沉积物有较大的差异，尤其多孔性和形状高度不规则性致使其渗透性与其他岩土介质差异明显。针对钙质砂的渗透特性开展现场多组双环渗透试验，分析密实度和颗粒级配对钙质砂渗透性的影响。现场渗透试验显示，钙质砂中的渗流速度先缓慢增大再趋于稳定，最后稳定在小幅度波动范围内；钙质砂的渗透系数 K 与不均匀系数 C_u 呈负相关关系；由于颗粒分析曲线上小于有效粒径 d_{10} 的曲线拐点多出现在小于某粒径土重累计百分含量为4%对应的粒径 d_4 附近，以新变量 d_4 与限制粒径 d_{60} 之比 d_4/d_{60} 分析其与钙质砂渗透性的关系，并经指数函数拟合得一定干密度 ρ_d 和压实度 δ 下的钙质砂的渗透系数关系式 $K=4.75\mathrm{e}^{2d_4/d_{60}^n/\lg C_u/\delta}$ 或 $K=4.74\mathrm{e}^{3.374d_4/d_{60}^n/\lg C_u/\rho_d}$，根据 $C_u\leqslant5$、$5<C_u\leqslant10$、$10<C_u\leqslant20$ 和 $C_u\geqslant20$ 的取值，n 分别取值2、5、4、3。

关 键 词：钙质砂；双环渗透试验；密实度；不均匀系数；指数函数
中图分类号：TU 43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2017) 10－2895－06

Discussion on permeability of calcareous sand and its influencing factors

HU Ming-jian[1], JIANG Hang-hai[1, 2, 3], ZHU Chang-qi[1], WENG Yi-ling[1, 2, 3], RUAN Yang[1], CHEN Wei-jun[1, 2, 3]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
3. College of Ocean, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China）

Abstract: In the deposition process, the calcareous sand, mostly retaining tiny pores of the protozoan skeleton, shows hierarchical porosity, irregular shape, high angular edge, low strength and fragile, cemented property of particles. Therefore calcareous sand are different from general terrestrial and marine sediments in its engineering properties especially the permeability due to the hierarchical porosity and highly-irregular shape. In this study, the double-ring permeation experiments are carried out to analyze the effect of density and particle size on the permeability of calcareous sand. Test results show that the seepage rate of calcareous sand increases gradually and then stabilizes within a range of small fluctuation. The permeability coefficient of calcareous sand is negatively correlated with the nonuniformity coefficient C_u. As the inflection points of particle-size distribution curve become smaller than effective diameter d_{10} appear near the weight-accumulative 4% percent diameter d_4 of soil, the ratio of d_4 to constrained diameter d_{60} is adopted to analyze the relationship between the dry density and the permeability of calcareous sand. An exponential function is fitted between permeability coefficient with dry density ρ_d and compaction degree δ. The fitting exponential function of the calcareous sand permeability coefficient is $K=4.75\mathrm{e}^{2d_4/d_{60}^n/\lg C_u/\delta}$ or $K=4.74\mathrm{e}^{3.374d_4/d_{60}^n/\lg C_u/\rho_d}$. If the values of $C_u\leqslant5$, $5<C_u\leqslant10$, $10<C_u\leqslant20$ and $C_u\geqslant20$ are recommended, the corresponding values of n are 2, 5, 4, 3, respectively.

Keyword: calcareous sand; double-ring permeation experiment; degree of compaction; nonuniformity coefficient; exponential function

1 引 言

多孔介质可定义为复杂孔隙体中骨架由固体承担，流体可以在相互连通的孔隙中流动的物质空间，而渗透系数反映的是流体通过孔隙骨架的能力[1]。砂性土属典型的多孔介质，其渗透性与土的粒度、

收稿日期：2017-04-07
基金项目：国家自然科学基金面上项目(No. 41572304，No. 41372313)；中科院科技先导专项A类子课题(No. XDA13010301)。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572304, 41372313) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13010301).
第一作者简介：胡明鉴，男，1974年生，博士，副研究员，主要从事地下水动力学和滑坡泥石流方面的研究工作。E-mail: mjhu@whrsm.ac.cn

矿物成分、土的结构和土中气体密切相关[2]。而钙质土，通常是指海洋生物成因（珊瑚、海藻、贝壳等）的富含碳酸钙或其他碳酸盐类物质的特殊岩土介质，由于在沉积过程中大多未经长途搬运，保持了原生生物骨架中的细小孔隙，土颗粒具有多孔隙（含有内孔隙）、形状不规则、强度低易破碎、颗粒棱角度高、颗粒会胶结等特征，其物理力学特性和工程力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有较大的差异[3]。在海洋环境下的灰沙岛上，降雨入渗涵养的淡水资源是动植物维持生命和勃勃生机的必须条件，因而研究钙质砂的渗透性[4]有助于灰沙岛地下水体运移和淡化过程分析，对我国海岛建设有重要意义。

自法国工程师 Darcy 提出达西定律以来，国内外学者对土的渗透性开展了大量的研究，从宏观的密实度、颗粒级配等到微观的空间结构、颗粒形状、颗粒成分等，得出了不同类别的土体在不同条件下渗透系数公式,对理论和工程建设发挥了重要作用。朱崇辉等[5]研究粗粒土的渗透系数与土的级配和孔隙比的定量关系，推导出渗透系数 $K=2\sqrt{C_u/C_c}\,d_{10}^2e^2$，得出普通粗粒砂土的渗透系数与不均匀系数 C_u、有效粒径 d_{10}、孔隙比 e 呈线性正相关，与曲率系数 C_c 呈线性负相关。太沙基等[6]提出的渗透系数表达式 $K=2\,d_{10}^2e^2$ 也与粒径和孔隙比相关。钱琨等[4]通过钙质砂室内渗透试验，建立钙质砂渗透系数公式为 $K=R(\eta_{20}/\eta_T)10^eC_cC_u\,d_{10}^2$，其在试验过程中控制孔隙比和曲率系数为定值，仅不均匀系数 C_u 发生变化。许多渗透系数表达式均与颗粒级配、孔隙率或孔隙比等相关，且诸多公式中都引用有效粒径 d_{10}。但室内试验因试样的分选重组，已不能完全反映和重现现场钙质砂的实际结构和性质，因而既有的渗透系数计算公式对于现场非扰动钙质砂地层并不一定准确合理[2]。王磊[7]在研究陆源土层的双环渗透试验时认为，渗透速度具有随时间增加而减小并逐渐趋于稳定的整体变化趋势；对于这一现象，刘忠玉等[8]认为，组成无黏性土的 3 种颗粒（骨架颗粒、阻塞颗粒、可动颗粒），可能流失的仅是可动颗粒；随着可动颗粒的流失，渗透系数越来越大，当可动颗粒全部流失后，渗透系数不再变化。然而，钙质砂的很多特性与陆源砂差异较大，钙质砂具有易胶结、孔隙率高（含内孔隙）和易破碎等特点，在较小冲击力情况下还会发生破碎的现象。由于钙质砂地层现场渗透试验开展得很少，本文针对钙质砂的特殊性，开展钙质砂现场渗透试验，并以室内不同干密度、颗粒分选重组下的渗透试验进行比对和参考，分析密实度和颗粒级配等因素对钙质砂渗透特性的影响。

2 钙质砂现场双环渗透试验

根据《岩土工程试验监测手册》[9]，结合现场实际，在近期填筑的人工灰沙岛进行试坑开挖前先除去表面 30 cm 的松散部分，将直径分别为 25、50 cm，高为 20 cm 的两个同心圆环压入坑底，环周以黏土固定且封漏，确保环内钙质砂层不受扰动。在内环及内、外环之间铺设厚约 2 cm、粒径为 5～10 mm 的细砾作为缓冲层。试验过程中保持内、外环水位高度均为 10 cm，按时间间隔 5、5、5、5、10、10、10、10、20、20、20 min 记录该段时间的内环渗水量；当连续两次流量之差不大于 5%时结束试验，并以最后一次注入水量进行计算。渗透流量为

$$Q=KAh/L=KAi \quad (1)$$

式中：Q 为渗透流量；A 为过水断面（内环的截面积）；h 为水头损失；L 为渗透长度；i 为水力梯度，当渗流时间足够长，$i=h/L=1$；K 为渗透系数。

$$v=Q/A\approx K \quad (2)$$

式中：v 为渗透流速，即 v 近似等于 K。

因此，可以通过渗流量、内环的截面积和渗透时间进行计算得到 K。根据钙质砂现场双环试验绘制各测点（CSD1～CSD12）单位时间的流量 Q 与时间 t 的曲线见图 1。从钙质砂现场各测点实际试验曲线来看，除个别测试点符合王磊[7]所述外，其余试验则是开始时渗流速度非常缓慢，经过一段时间后渗透流量逐渐增大并趋于稳定，该渗透过程较为符合刘忠玉等[8]所述的情况，即随着钙质砂中的可动颗粒流失，渗透系数逐渐增大，当可动颗粒全部流失后，渗透系数不再变化而趋于稳定。

3 密实度对钙质砂渗透性的影响

密实度是影响土体渗透性的重要指标，在实验室和工程上分别以干密度和压实度进行衡量。在现场双环渗透试验点以灌水法测得钙质砂的密度和干密度，并将试坑挖出的土样再进行室内击实试验和颗粒分析试验。由于钙质砂地层珊瑚礁块、礁碎石、珊瑚断枝和碎屑等含量和分布差异大，试验结果较为离散。去除个别特异数据后干密度与双环渗透试验所得的渗透系数关系曲线见图 2。从图中可以看出，渗透系数随着干密度的增大而减少，用指数关系拟合度较高。

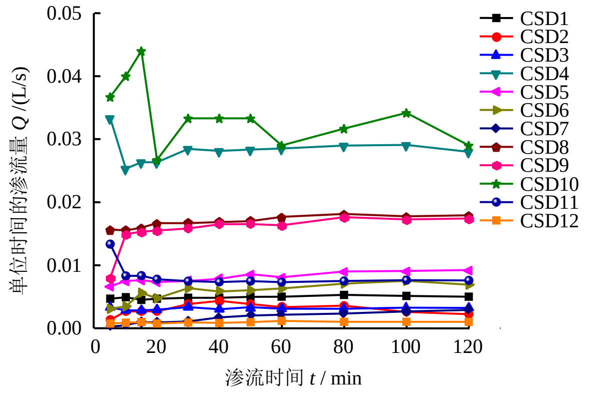

图 1　双环试验流量 Q 与时间 t 曲线

Fig.1　Q-t curves of double-ring tests

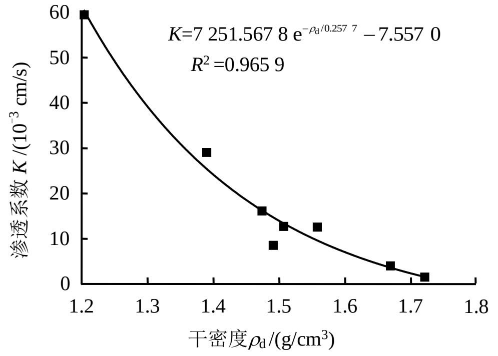

图 2　钙质砂的干密度ρ_d与渗透系数 K 的关系

Fig.2　Relationship between dry density and permeability coefficient of calcareous sand

对应室内渗透试验和标准击实试验确定的最大干密度，结合不同压实度δ下的室内渗透试验结果，绘制渗透系数与压实度的关系曲线见图 3。从图中可以看出，钙质砂渗透系数随着压实度的增大而减小，同样服从指数分布。对比干密度和压实度与渗透系数的关系曲线可见，干密度比压实度具有更高的拟合度，主要在于干密度来自试验实测，未经重击而破碎；而压实度经干密度换算，且钙质砂颗粒形状不规则且易碎，在室内击实试验的重击下颗粒破碎，结构重组。这在一定形式上体现出钙质砂本身的特异性。

4　颗粒级配对渗透性的影响

在一定程度上颗粒级配可以反映土的孔隙结构等性质，对于级配良好的砂土，粗颗粒构成的骨架结构而细粒充填其中，颗粒间的孔隙越小或充填越充分，密实度越高，渗透性越小。实际应用时常采用不均匀系数 C_u 反映土类颗粒大小和均匀程度，一般情况下，当 C_u<5 时为级配不良土，当 C_u>10 时为级配良好土。若缺少某些粒径，单从 C_u 判别土体级配是否良好则不恰当，常需要以 C_u 与 C_c 共同判别：如 C_u ≥5 且 C_c =1～3 时，属于级配良好。

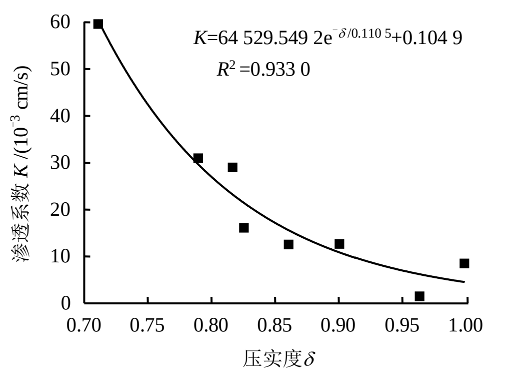

图 3　钙质砂压实度δ 与渗透系数 K 的关系

Fig.3　Relationship between compaction degree and permeability coefficient of calcareous sand

为分析颗粒级配对渗透性的影响，在双环试验后除测试干密度外，还将各测点的土样筛分进行颗粒分析，以分析渗透系数与颗粒级配参数间的关系，物理性质参数见表 1，级配曲线见图 4。

表 1　钙质砂特征粒径及物理性质指标

Table 1　Characteristic diameters and physical parameters of calcareous sand

测点编号	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c
CSD1	0.134	0.325	0.775	5.784	1.071
CSD2	0.090	0.245	1.033	11.478	0.646
CSD3	0.100	0.275	2.972	29.720	0.255
CSD4	0.056	0.219	0.515	9.204	1.672
CSD5	0.068	0.180	0.546	8.041	0.874
CSD6	0.048	0.154	0.527	11.070	0.945
CSD7	0.192	0.600	14.081	73.339	0.133
CSD8	0.094	0.180	0.376	3.992	0.915
CSD9	0.101	0.260	0.625	6.188	1.071
CSD10	0.084	0.182	0.555	6.5836	0.708
CSD11	0.109	0.239	1.332	12.220	0.393
CSD12	0.140	0.691	10.580	75.571	0.322

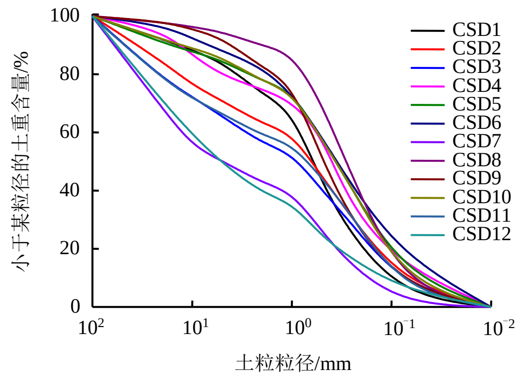

图 4　钙质砂的颗分曲线

Fig.4　Grain size curves of calcareous sand

4.1　不均匀系数 C_u 对渗透系数的影响

C_u 反映大小不同粒组的分布情况，可据此判断土粒级配是否良好。C_u 越大，表示粒组分布越广。根据表 1 及对应的双环渗透试验结果，绘制 $\lg C_u$ 与 K 关系曲线见图 5。

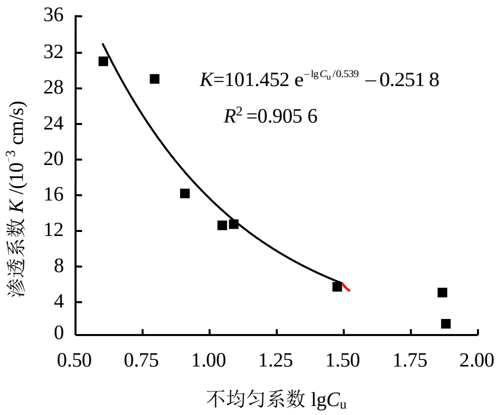

图 5　不均匀系数 $\lg C_u$ 与渗透系数的关系
Fig.5　Relationship between nonuniformity coefficient $\lg C_u$ and permeability coefficient

从图中可以看出，虽然各试坑土样的 C_u 离散性很大，但 K 和 C_u 总体呈反比关系，说明 C_u 越大，土粒越不均匀，细颗粒越有可能填充到较大颗粒形成的骨架空间里，形成较为密实的结构，渗透性也就越低，这与文献[5]中陆源砂的 K 与 C_u 呈正相关有显著差异。

4.2　$d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$对渗透系数的影响

从试验的颗粒分析曲线（见图 4）可以看出，粒径小的曲线段较陡，小于 d_{10} 的曲线拐点多出现在 d_4 附近，d_4 为小于某粒径土重累计百分含量为4%对应的粒径。作者料想，以 d_4 代替 $C_u=d_{60}/d_{10}$ 中的 d_{10}，新变量 d_4/d_{60} 与渗透系数是否存在一定的相关性？前面已经证实 K 分别与 d_4/d_{60}、$\lg C_u$ 的倒数呈正相关关系，综合这两个因素对渗透系数的影响又将如何？通过绘制 K 与 $d_4/(d_{60}\lg C_u)$关系曲线（见图 6），由图可以看出，两者具有正相关关系，但数据总体较离散，拟合度不高。其中的圆形数据点代表离散性大的特异点，拟合时未将该部分数据点纳入，后面图中圆形数据点的含义相同。

齐俊修等[10]参考前苏联学者 B.C.伊斯托明娜 1957 年试验研究成果，通过对 C_u 划分取值范围来研究无黏性土的渗透变形，渗透变形改变着土体的空间结构，且细粒随着渗流力迁移。当 C_u≤10 时将产生流土破坏，C_u≥20 时将产生管涌破坏，当 10< C_u <20 时既可产生流土破坏，也可产生管涌破坏。受此启发，本文对颗分结果按 C_u≤5、5<C_u≤10、10<C_u≤20 和 C_u＞20 进行分组，针对各组对应 d_4/d_{60}^n 中 n 取不同值后进行分析（见表 2）。

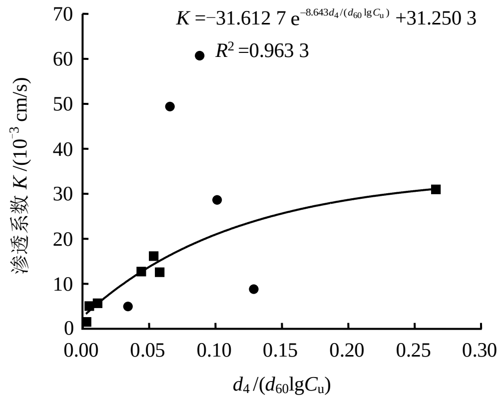

图 6　钙质砂 $d_4/(d_6\lg C_u)$与渗透系数的关系
Fig.6　Relationship between $d_4/(d_6\lg C_u)$ and permeability coefficient

表 2　钙质砂物理性质参数指标
Table 2　Physical parameters of calcareous sand

测试点	C_u	$1/\lg C_u$	d_4/d_{60}^n	n 的取值	$d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$
CSD8	3.991 5	1.663 5	0.424 50	2	0.706 1
CSD1	5.783 6	1.312 0	0.273 30	5	0.358 6
CSD9	6.188 1	1.263 3	0.524 30	5	0.662 3
CSD10	6.583 6	1.221 8	0.759 90	5	0.928 5
CSD5	8.041 2	1.104 6	0.540 10	5	0.596 6
CSD4	9.203 9	1.037 4	0.901 50	5	0.935 2
CSD6	11.070 1	0.957 7	0.410 30	4	0.392 9
CSD2	11.477 8	0.943 5	0.033 29	4	0.031 4
CSD11	12.220 2	0.919 9	0.020 10	4	0.018 5
CSD3	29.720 0	0.678 9	0.001 80	3	0.001 2
CSD7	73.338 5	0.536 1	4.23×10^{-5}	3	2.27×10^{-5}
CSD12	75.571 4	0.532 4	4.10×10^{-5}	3	2.18×10^{-5}

根据表中的 C_u 分组数据以及对 d_4/d_{60}^n 中 n 取相应值，绘制钙质砂 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$与 K 的关系曲线如图 7 所示。在选取表中所示的 n 值时，K 与 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$呈指数相关性，拟合度也高。当 C_u＞20、10<C_u≤20 和 5<C_u≤10 时，对应的 n 值分别取 3、4、5，呈现的规律是：C_u 阶梯递减，n 值递增；但对于 C_u≤5，n 值却取值 2。分析认为，在 d_{10} 相同的情况下，C_u 越大，d_{60} 越大，对应的土样粒径平均值也越大。

一般而言，土体由粗颗粒组成空间骨架，中细颗粒填充其中使土体有着紧密的结构。然而钙质砂不同于陆源砂，形状不规则且表面粗糙，因而颗粒之间更易锁固咬合；颗粒粒粒径越小，这种咬合接触越多。若以比表面积来表达这种颗粒间的咬合接触，C_u 越大，则比表面积越小。d_{60}^n 中的 n 取值可

类似于土体粗颗粒的比表面积大小对整体咬合情况的反映，故 $C_u \geqslant 20$、$10<C_u\leqslant 20$ 和 $5<C_u\leqslant 10$ 时对应 d_4/d_{60}^n 中 n 值分别取 3、4、5；而对于 $C_u<5$，颗粒分布较均匀，粗颗粒含量较少，n 取值 2 时可以实现较高的拟合。

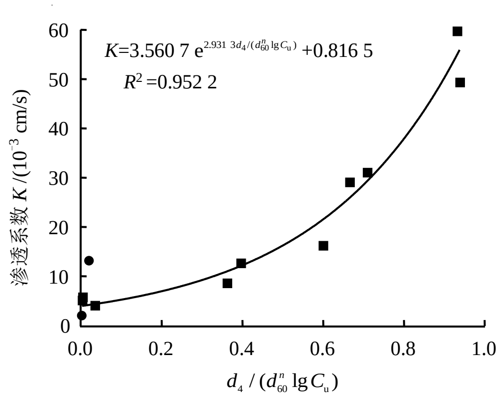

图 7　钙质砂 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$与渗透系数的关系
Fig.7　Relationship between $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$ and permeability coefficient

将干密度 ρ_d 和压实度 δ 指标分别与 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$ 进行联合分析，考虑颗粒比表面积和颗粒接触对渗透性的影响，绘制 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \rho_d)$和 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \delta)$ 与实测渗透系数关系曲线（见图 8、9）并进行拟合得到钙质砂渗透系数关系式为

$$K = 4.75\mathrm{e}^{2d_4/(d_{60}^n \lg C_u \delta)} \tag{3}$$

$$K = 4.74\mathrm{e}^{3.374d_4/(d_{60}^n \lg C_u \rho_d)} \tag{4}$$

上述两拟合关系式分别对应于试验干密度指标和工程上的压实度指标，拟合得到的指数函数基本一致。因压实度这个工程指标实际上是建立在干密度和最大干密度基础之上的，拟合指数的差异主要是考虑的影响因素不同。

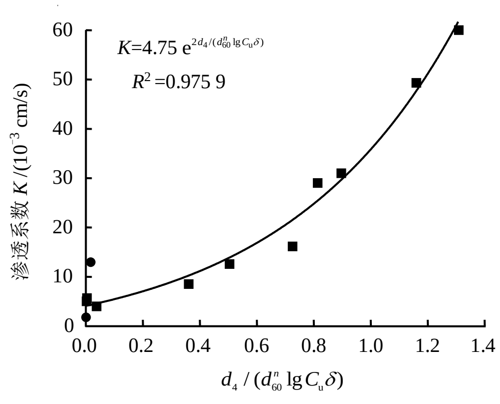

图 8　钙质砂 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \delta)$与渗透系数的关系
Fig.8　Relationship between $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \delta)$ and permeability coefficient

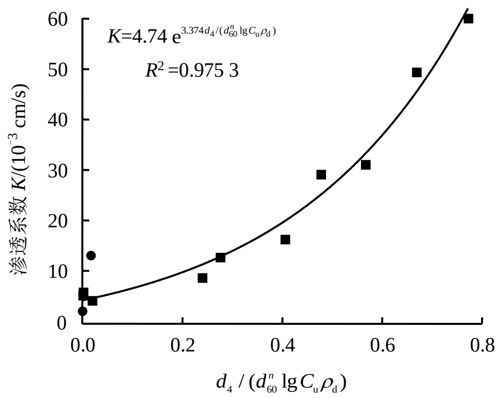

图 9　钙质砂 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \rho_d)$与渗透系数的关系
Fig.9　Relationship between $d_4/(d_{60}^n \lg C_u \rho_d)$ and permeability coefficient

5　结　论

（1）钙质砂的渗透系数 K 与不均匀系数 C_u 为负相关关系。钙质砂表面粗糙，形状不规则且颗粒易碎等特点，需要更多地考虑细粒成分对渗透系数的影响。本文对比常规无黏性土 d_{10} 对渗透性的影响，提出了考虑小于某粒径土总质量为 4%对应的粒径 d_4 并分析其对渗透性的影响和规律。

（2）类似于钙质砂的比表面积，根据 $C_u\leqslant 5$、$5<C_u\leqslant 10$、$10<C_u\leqslant 20$ 和 $C_u>20$，n 分别取值 2、5、4、3 时钙质砂的 K 与 $d_4/(d_{60}^n \lg C_u)$呈明显的指数关系并具有较高的拟合度。

（3）干密度和压实度对钙质砂的渗透系数的具有相同的影响和规律，拟合得出钙质砂的渗透系数公式 $K = 4.75\mathrm{e}^{2d_4/(d_{60}^n \lg C_u \delta)}$ 或 $K = 4.74\mathrm{e}^{3.374d_4/(d_{60}^n \lg C_u \rho_d)}$，指数相关性高。

参 考 文 献

[1]　王俊杰，卢孝志，邱珍锋，等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013, (6): 16－20.
WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2013, (6): 16－20.

[2]　陈海洋. 钙质砂的内孔隙研究[D]. 武汉：中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
CHEN Hai-yang. Study of the inner pore in calcareous sand[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.

[3]　杨靖，汪吉林. 砂性土渗流的分形特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2): 42－45.
YANG Jing, WANG Ji-lin. Research on fractal characteristics of permeability of sandy soil[J]. **Coal**

Geology & Exploration, 2010, 38(2): 42－45.

[4] 钱琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1557－1564, 1572.
QIAN Kun, WANG Xin-zhi, CHEN Jian-wen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1557－1564, 1572.

[5] 朱崇辉, 刘俊民, 王增红, 等. 粗粒土的颗粒级配对渗透系数的影响规律研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(12): 79－81.
ZHU Chong-hui, LIU Jun-min, WANG Zeng-hong, et al. Study on the influence of particle gradation on permeability coefficient of coarse-grained soil[J]. **Yellow River**, 2005, 27(12): 79－81.

[6] 太沙基, 帕克. 工程实用土力学[M]. 蒋彭年译. 北京: 水利电力出版社, 1960.
TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. Translated by JIANG Peng-nian. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1960.

[7] 王磊. 双环法测定单一均质土层渗透曲线的变化规律[J]. 科技创新与生产力, 2015, (1): 119－120.
WANG Lei. Analysis of determination transformation law of permeability curves of single homogeneous soil layer with double-loop test[J]. **Sci-Tech Innovation and Productivity**, 2015, (1): 119－120.

[8] 刘忠玉, 魏建东. 考虑细颗粒流失时无粘性土的渗透性[J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(增刊 1): 347－353.
LIU Zhong-yu, WEI Jian-dong. Permeability of noncohesive soils considering washout of fine grains[J]. **Journal of University of Science and Technology of China**, 2004, 34(Supp.1): 347－353.

[9] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
LIN Zong-yuan. Geotechnical engineering test and monitoring handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[10] 齐俊修, 赵晓菊, 刘艳, 等. 不均匀系数 C_u≤5 的无黏性土的渗透变形类型统计分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2554－2562.
QI Jun-xiu, ZHAO Xiao-ju, LIU Yan, et al. Statistical analysis of seepage deformation type of noncohesive soil with uniformity coefficient C_u≤5[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2554－2562.

上接第 2894 页

[11] 袁巧霞. 温度和含水率对土壤比热容影响的神经网络预测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 108－111.
YUAN Qiao-xia. Prediction for the effect of temperature and water content on the soil specific heat by BP neural network[J]. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, 2008, 39(5): 108－111.

[12] NIKOLAEV IVAN V, LEONG WEY H, ROSEN MARC A. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range[J]. **International Journal of Thermophysics**, 2013, 34(6): 1110－1129.

[13] NERADOVSKII L G. Calculation of the effective volume heat capacity from the wave characteristics of frozen soils[J]. **Measurement Techniques**, 2013, 56(6): 664－673.

[14] 涂新斌, 戴福初. 土体一维传热方程解析解及热扩散系数测定[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 652－657.
TU Xin-bin, DAI Fu-chu. Analytical solution for one-dimensional heat transfer equation of soil and evaluation for thermal diffusivity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(5): 652－657.

[15] 国家林业局. GB 50324-2001 冻土工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
State Forestry Administration. GB 50324-2001 Code for engineering geological investigation of frozen ground[S]. Beijing: China Planning Press, 2001.

[16] 黑龙江省寒地建筑科学研究院. JGJ 118−98 冻土地区建筑地基设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute. JGJ 118−98 Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.