

砂砾土孔隙特征对渗透系数的影响研究

宿辉¹,王晓伟¹,石明宇²

(1. 河北工程大学水电学院,河北邯郸056021;2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院,内蒙古呼和浩特010020)

摘要:通过改变细颗粒含量分析了孔隙率、不均匀系数以及曲率系数与渗透系数的相关关系,建立了砂砾土的渗透系数与三个孔隙特征参数的多元回归模型,探讨了砂砾土渗透系数与孔隙特征参数的相互关联。研究表明,砂砾土的渗透系数与三个孔隙特征参数具有综合相关关系,单个参数对渗透系数的影响具有随机性;40%的细粒含量可作为砂砾石渗透系数的界限含量,细粒含量高于40%后,渗透系数随细粒含量的减小而平缓增大,当细粒含量低于40%时,渗透系数随细粒含量的增大而迅速减小。采用相同骨架结构特征的土体,才能得到一致性的渗透系数变化规律。

关键词:细粒含量;渗透系数;孔隙率;不均匀系数;曲率系数

中图分类号:TU435

文献标识码:A

The study of the gravel soil pore characteristics' impact on permeability coefficient

SU Hui¹, WANG Xiao-wei¹, SHI Ming-yu²

(1. School of Water Conservancy and Electric Power, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056021, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Inner Mongolia Huhehaote 010020, China)

Abstract: The relation between the porosity, nonuniformity coefficient, curvature coefficient and permeability coefficient was analyzed by changing the fine particle content. The relationship between the gravel soil permeability coefficient and porosity feature parameters was discussed. The gravel soil permeability coefficient and three pore characteristic parameters of multivariate regression model were established. Research results show that gravel soil coefficient of permeability and the three pore characteristic parameters is comprehensive, the individual parameters' influence on the permeability coefficient is random; 40% of the fine particle content can be used as the boundaries of the coefficient of permeability of sand gravel content, when the fine particle content higher than 40%, the permeability coefficient decreases smoothly along with the increase of fine particle content; When the fine particle content is less than 40%, the permeability coefficient decreases rapidly along with the increase of fine particle content. Only using the same skeleton structure characteristics of the soil could meet the consistency change law of permeability coefficient.

Key words: fine particle content; porosity; proportion; uneven coefficient; permeability coefficient

水利工程地层的渗透特性是水利工程安全运行的重要影响因素,渗透系数作为渗透性的表征参数表示饱和多孔介质单位水势梯度时的渗流速度,是反映地层透水性强弱的重要指标,渗透系数

越大,透水性越强。砂砾土地层在我国分布广泛,由于其中的细颗粒含量不同,砂砾土层的孔隙率、孔隙分布特征会有很大的变化,从而影响砂砾层的渗透特性^[1]。深入分析砂砾土层的孔隙率及孔

隙分布特性,可以揭示地层的渗透性能的变化规律。

土层渗透特性直接关系到坝基堤防的渗透稳定和安全,一直是水利工程重点研究的领域。孔隙率是影响土层渗透系数的最直接因素,近年来通过掺入细颗粒改变砂砾土孔隙率来研究其渗透特性的变化规律得到了许多学者的重视,孔令伟等引入了粒间状态参量概念,探讨了砂砾土渗透系数的细粒效应,发现砂砾土渗透系数总体上随细粒含量增加而减小^[2]。朱崇辉等通过对不同级配粗粒土的渗透试验,指出了粗粒土的渗透系数与反映其颗粒级配特征的不均匀系数和曲率系数存在较大的相关性^[3]。Shafiee 对土石坝的砾石和粘土混合料的渗透特性进行了研究,认为土层的渗透性会随砂石尺寸减小而减小^[4]。魏进兵等通过现场试验对泄滩滑坡土体的渗透特性进行了研究,结果表明土体的不均匀系数越小,相应的渗透系数越大^[5]。大量研究表明,反映土层孔隙特性的孔隙率、不均匀系数与曲率系数三个参数间是相互关联的^[6-7],只研究渗透系数与孔隙率、不均匀系数、曲率系数等单因素间的相关关系,难以反映渗透特性的内在变化规律。本研究以岳城水库坝基下砂砾石层为研究对象,通过室内试验,建立起砂砾层渗透特性与孔隙率、不均匀系数、曲率系数的综合回归模型,探讨砂砾层孔隙及其分布特征对地层渗透系数的影响,为进一步研究砂砾层的渗透特性提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验试样取自位于岳城水库主坝右岸段,其直接坐落在第四纪全新统和上更新统黄土状低液限粘土上,其下为第四纪全新统和上更新统砂卵石,厚约4~9 m。试样为重塑样,同时超粒径颗粒的含量小于5%,故将超径颗粒剔除,试样经过去杂、风吹、晾干,通过筛分分为粗颗粒和细颗粒两个组别。粗颗粒组中的颗粒粒径均在2~11 mm间,按照《土工试验规程》对土样的划分,属中细砾;细颗粒组中的颗粒粒径在0.25~1.00 mm范围内的占80%,基本属于中粗砂。

试验中通过在砂砾石试样进行筛分分选,取2 mm以上的颗粒作为试样的骨架颗粒,在此基础上通过加入不同含量0.074~0.250 mm细颗粒,细

颗粒的掺入含量分别0%、5%、10%、15%、20%、30%、40%、100%共制成了8种试样,其基本物理性质指标和试样的颗粒级配曲线分别见表1和图1。

表1 各细粒含量砂试样物理性质指标

Tab.1 Physical properties of silty sand with different fines content

编号	细颗粒含量 %	孔隙率	不均匀系数	曲率系数
S1	0	0.560 0	1.500 0	7.500 0
S2	5	0.478 0	7.400 0	4.625 0
S3	10	0.475 0	14.400 0	8.402 8
S4	15	0.461 0	23.330 0	12.877
S5	20	0.468 0	27.600 0	13.356 5
S6	30	0.459 0	31.000 0	0.835 2
S7	40	0.457 0	32.630 0	0.305 6
S8	100	0.414 0	2.500 0	0.625 0

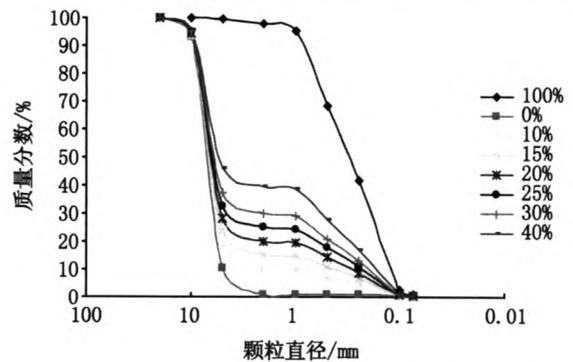


图1 不同细粒含量的颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curves of silty sand with different fines content

1.2 渗透试验过程与结果

由于试样基本属于砾-粗中砂,在水力梯度不大的情况下,认为试样的渗流服从达西定律,故在试验中采用常水头试验测定试样的渗透系数,试验过程中保持室内恒温,各组试样的渗透试验分别进行三次,结果求平均值作为各组试样的渗透系数,其结果见表2。

表2 渗透系数的试验结果

Tab.2 The test results of permeability

编号	渗透系数/cm·s ⁻¹	编号	渗透系数/cm·s ⁻¹
S1	9.293 0	S5	3.219 3
S2	9.228 2	S6	1.172 0
S3	3.512 5	S7	0.201 4
S4	4.473 7	S8	0.033 5

2 实验数据处理及分析

砂砾石层是由固体颗粒、孔隙、气体等组成的

多相分散体,固体大颗粒构成了土体的骨架,小颗粒对骨架间的孔隙进行了填充,颗粒间孔隙的大小及其孔隙级配是影响土体渗透特性的主要因素^[8],因此对砂砾层的特性可以由孔隙率来表征,孔隙级配特性则可以通过不均匀系数和曲率系数来反应。

由于根据相关性理论,经验公式越简单,实用性越强,曲线拟合过程中,在考虑回归系数的基础上,尽可能采用线性回归公式。然而孔隙率表示仅能表示在土体内颗粒间空隙体积占土体体积的百分比,而不能确定颗粒间空隙的大小、分布及连通情况,一个大孔隙和多个总体积与之相等小孔隙的流体通过能力是不同的,不均匀系数可以反映孔隙的均匀程度,而曲率系数则可以评价孔隙的大小分布是否连续。显然要建立合理的土体渗透系数模型,就必须同时考虑这三个因素的作用。因此本文对试验数据进行了一元线性回归和多元回归处理讨论砂砾石的孔隙率、不均匀系数及曲率系数与渗透系数的关系。

2.1 一元回归分析

2.1.1 渗透系数与孔隙率的关系

土的孔隙率是反应土密实程度的指标,对同一种土,孔隙率越大则表明土愈疏松。根据表1及表2可以得出渗透系数与孔隙率的关系曲线,渗透系数采用对数坐标,见图2,变化规律见式1。

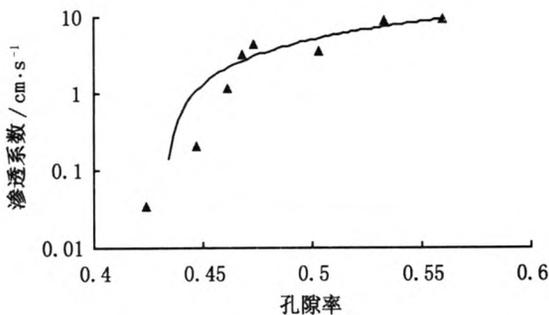


图2 渗透系数 k 与孔隙率 n 关系曲线

Fig.2 The cures of the relationship between permeability coefficient and porosity

渗透系数总体上随孔隙率的增大而增大,从拟合曲线上可以看出,当孔隙率小于0.45时,渗透系数随孔隙率的增大而急剧增大,其变化超过1个数量级;当孔隙率超过0.46后,渗透系数依然随孔隙率的增大而增大,但其增幅明显减小。当细颗粒超过40%后砂土的渗透系数变化会明显减小^[9],而本研究中砂砾试样孔隙率0.46所对应的

细颗粒含量为约为40%,两者的研究结果基本是一致的。

$$\left. \begin{aligned} k &= 76.3070 \cdot n - 33.0120 \\ R^2 &= 0.8881 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: k - 砂砾土的渗透系数; n - 砂砾土的孔隙率。

2.1.2 渗透系数与不均匀系数的关系

不均匀系数是限制粒径与有效粒径的比值,反应组成土的颗粒均匀度,是评定渗透系数的重要指标之一,不均匀系数愈接近1,表明土愈均匀,不均匀系数愈大,则表明土的级配良好。根据表1及表2可以得出渗透系数与不均匀系数的拟合曲线,见图3,变化规律见式2。在半对数坐标图中,渗透系数随不均匀系数的增大而减小,当不均匀系数超过30时,渗透系数急剧减小,甚至达到两个数量级,说明土的颗粒级配对土的渗透性有重要影响。

$$\left. \begin{aligned} k &= -0.2676C_u + 9.7732 \\ R^2 &= 0.8897 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: k - 砂砾土的渗透系数; C_u - 砂砾土的不均匀系数。

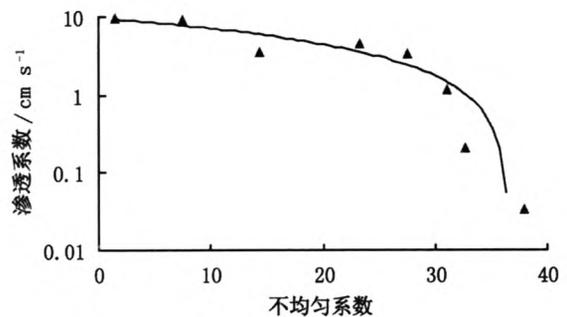


图3渗透系数 k 与不均匀系数 C_u 的关系曲线

Fig.3 The curves of the relationship between permeability coefficient and uneven coefficient

2.1.3 渗透系数与曲率系数的关系

曲率系数是反映土的粒径级配累计曲线的斜率是否连续的指标系数,对渗透系数有重要的影响。根据表1及表2可以得出渗透系数与曲率系数的拟合曲线,见图4,变化规律见式3。当曲率系数 C_c 小于5时,渗透系数 k 随 C_c 增长而增大,尤其是曲率系数小于2时,渗透系数 k 随 C_c 增长明显,其后增大速度逐渐放缓,当曲率系数 C_c 约为5时渗透系数 k 取得最大值。当曲率系数 C_c 大于5后,渗透系数 k 随 C_c 增长反而减小。

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.032 2C_c^3 - 0.796 9C_c^2 + 5.305 5C_c - 1.537 9 \\ R^2 &= 0.847 7 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: k - 砂砾土的渗透系数; C_c - 砂砾土的不均匀系数; R^2 - 两变量的相关系数。

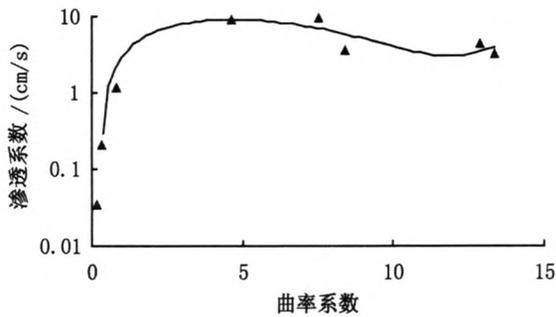


图4 渗透系数 k 与曲率系数 C_c 的关系曲线

Fig.4 The curves of the relationship between permeability coefficient and coefficient of curvature

2.2 渗透系数多元非线性模型

2.2.1 模型建立

渗透系数作为土体的基本性质之一,主要由土体内孔隙的特性来决定^[10],包括孔隙的多少、孔隙的大小、孔隙的分布等,可以分别由孔隙率、不均匀系数和曲率系数来表征。根据公式(1)、(2)和(3),可以认为渗透系数与孔隙率、不均匀系数呈线性相关关系,与曲率系数的关系可以三次多项式来表达,可以假定渗透系数的多元非线性模型可以由式4来表征:

$$k = a + b \cdot n + c \cdot C_u + d \cdot C_c^3 + e \cdot C_c^2 + f \cdot C_c \quad (4)$$

式中: a - 渗透系数的多元非线性模型的常数项; b, c - 渗透系数的多元非线性模型中孔隙率 n 、

比重 C_u 的一次项系数; d, e, f - 分别为不均匀系数 C_c 的三次项、二次项和一次项系数。

编制 Matlab 多元非线性回归程序,采用最小二乘法原理,经过拟合得渗透系数与孔隙率、不均匀系数、曲率系数的回归关系,见式5:

$$\left. \begin{aligned} k &= 34.434 9 - 42.285 4n - 0.442 5C_u + \\ &0.011 8C_c^3 - 0.214 4C_c^2 + 0.829 0C_c \\ R^2 &= 0.997 8 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2.2 验证分析

对上述4个渗透系数回归公式根据表1给定的参数进行渗透系数的拟合,并与实测结果进行比较,其结果如表3所示。

根据表3的结果可以看出,对于4种渗透系数模型对渗透系数的预测平均误差分别为13.24%、19.80%、28.93%和6.27%,式5的结果要明显优于前3种模型。式1、式2和式3仅考虑了单一土体因素,对渗透系数的预测结果误差起伏很大,且没有规律性,说明土体的孔隙率、不均匀系数或曲率系数均无法单独表征土体的渗透性能。式5综合考虑了孔隙率、不均匀系数和曲率系数三种因素,预测值误差仅为6.27%,能更好地反映试样的真实渗透性能。

根据式5的渗透系数预测误差统计,在细颗粒含量不超过30%时,预测值与实测值均不超过10%,而当细粒含量达到40%时,误差突然增大到30.04%,这也进一步说明了细颗粒含量达到40%,细颗粒参与到土体骨架构成中,土体的结构会发生突变,使得土体的渗透规律也显著改变。因此在进行建立不同细颗粒含量的土体渗透系数模型时,以细颗粒含量40%为界建立分段模型,其结果会更精确。

表3 渗透系数的预测与实际比较

Tab.3 The comparison of the permeability coefficient between prediction and reality

细粒含量 /%	渗透系数/cm·s ⁻¹					渗透系数预测误差/%			
	实测结果	式1结果	式2结果	式3结果	式5结果	式1结果	式2结果	式3结果	式5结果
0	9.293 0	9.719 9	9.359 2	7.017 7	9.227 0	4.590 0	0.710 0	24.480 0	0.710 0
5	9.022 8	7.659 6	7.730 8	9.141 6	9.037 7	15.110 0	14.320 0	1.320 0	0.160 0
10	5.512 5	5.370 4	5.798 8	5.887 6	5.622 0	2.580 0	5.190 0	6.800 0	1.990 0
15	4.473 7	3.081 2	3.334 1	3.412 2	4.429 9	31.130 0	25.470 0	23.730 0	0.980 0
20	3.219 3	2.699 7	2.155 6	3.903 5	3.373 2	16.140 0	33.040 0	21.250 0	4.780 0
30	1.871 2	2.165 5	1.217 2	2.356 2	1.773 5	15.730 0	34.950 0	25.920 0	5.220 0
40	1.021 4	1.097 2	0.767 3	0.010 0	1.328 2	7.420 0	24.880 0	99.020 0	30.040 0
100	0.033 5	-0.657 8	-0.714 8	-0.696 7	-0.180 0	/	/	/	/

4个渗透系数模型在对100%细颗粒的渗透系数的预测均为负值,这与实际事实相悖^[11]。这主要是模型是建立在以粗颗粒为骨架、细颗粒为填充的土体上的,而100%细颗粒的土体结构显然与之完全不同。在研究不同细粒含量在粗颗粒中的填充对土体渗透系数的影响时,可不对100%的细粒土的渗透特性进行研究,否则会对试验结果产生干扰。本研究中,将100%细粒含量组的数据去除,重新进行数据拟合,得到渗透系数与孔隙率、不均匀系数、曲率系数的回归关系,见式6:

$$\left. \begin{aligned} k &= 28.5156 - 32.0694n - 0.4075C_u + \\ &0.0123C_c^3 - 0.2272C_c^2 + 0.9262C \\ R^2 &= 0.9876 \end{aligned} \right\} (6)$$

根据式6,对不同细颗粒含量下的渗透系数重新进行预测,其结果见表4。由表4看出,在去除100%细粒含量组的数据干扰后,式6对渗透系数的预测呈现了较强的规律性,即细粒含量越小,预测误差越小,随细粒含量的增加,预测的误差也逐渐增加,但对40%细粒含量的渗透系数预测误差小于式5的结果。

表4 不同细粒含量的渗透系数预测

Tab.4 The prediction of permeability coefficient with different fine content

细粒含量 /%	渗透系数实 测值/cm·s ⁻¹	渗透系数预 测值/cm·s ⁻¹	渗透系数预 测误差/%
0	9.293 0	9.301 0	0.090 0
5	9.022 8	9.047 7	0.280 0
10	5.512 5	5.555 0	0.770 0
15	4.473 7	4.356 1	2.630 0
20	3.219 3	3.407 1	5.830 0
30	1.871 2	1.721 3	8.010 0
40	1.021 4	1.146 0	12.200 0

3 结论

1) 细颗粒的含量对砂砾石的渗透性能有重要的影响,孔隙率、不均匀系数与渗透系数基本呈线性相关,曲率系数则与渗透系数表现出三次多项式相关,单一参数很难准确表征砂砾石的渗透性能,而通过三个参数来综合建立渗透系数多元非线性模型,则能达到较好的效果。

2) 渗透系数随细颗粒的含量增大而减小,

40%的细粒含量是一个界限值,当细粒含量大于40%以后,渗透系数随细粒含量的减小而增大,变化幅度比较平缓;当细粒含量小于40%时,渗透系数随细粒含量的增大而减小,变化幅度比剧烈,40%的细粒含量可作为砂砾石渗透系数的界限含量。

3) 土体骨架结构特征是影响土体渗透特性的关键因素,采用实验数据回归拟合来研究渗透系数时,采用相同骨架结构特征的土体的数据,得到的预测结果有较好的规律性。

参考文献:

- [1] 蒋严, 蒋欢. 土体渗透稳定性的填充系数分析计算方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(03): 372-376.
- [2] 孔令伟. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2134-2138.
- [3] 朱崇辉, 刘俊民, 王增红. 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.
- [4] SHAFIEE A. Permeability of compacted granule - clay mixtures [J]. Engineering Geology, 2008, 97(3-4): 199-208.
- [5] 魏进兵, 邓建辉, 谭国焕, 等. 泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和和水力学参数的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 327-330+335.
- [6] 丁凯. 电场作用下土的粘性试验分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 89-92.
- [7] 杨枫, 毕贤顺, 罗才松. 闽南地区水泥土工程特性实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012, 22(3): 343-346.
- [8] 郭爱国, 凤家骥, 汪洋, 等. 砂砾石坝料渗透特性试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(03): 94-98.
- [9] ASSOULINE S. Modeling the relationship between soil bulk density and the Hydraulic Conductivity Function [J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2): 697-705.
- [10] 许旭堂, 吴能森, 崔广强, 等. PHC管桩极限承载力影响因素敏感性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(2): 23-25.
- [11] 郭国强. 注水试验与放水试验求取渗透系数的差异[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(8): 97-99.

(责任编辑 马立)