

DOI: 10.11779/CJGE202008024

# 基于级配方程的粗粒土渗透系数经验公式及其验证

包孟碟<sup>1, 2</sup>, 朱俊高<sup>\*1, 2</sup>, 吴二鲁<sup>1, 2</sup>, 王龙<sup>1, 2</sup>, 陈鸽<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210024; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210024)

**摘要:** 粗粒土广泛应用于土石坝工程和道路工程, 其渗流特性关系到工程的稳定性和安全性, 渗透系数是衡量其渗流特性的重要参数, 其中级配是影响渗流的关键影响因素。为研究级配对粗粒土渗透系数的影响, 基于已有研究的渗透试验成果, 采用连续级配方程对级配连粗粒土试验级配进行定量描述, 研究级配与渗透系数的关系, 建立了考虑级配曲线面积的渗透系数经验公式, 并用现有其它文献的渗透试验成果验证所建立公式的适用性。结果表明, 采用连续级配方程可以较好地定量描述级配连粗粒土的级配曲线; 基于级配面积建立的渗透系数经验公式适用于不同最大粒径及不同级配的粗粒土。

**关键词:** 粗粒土; 级配方程; 渗透系数; 级配曲线面积; 适用性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)08-1571-06

作者简介: 包孟碟(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝渗流方面的研究工作。E-mail: bmdyt@hhu.edu.cn。

## Empirical formula for permeability coefficient of coarse grained soil based on gradation equation and its verification

BAO Meng-die<sup>1, 2</sup>, ZHU Jun-gao<sup>1, 2</sup>, WU Er-lu<sup>1, 2</sup>, WANG Long<sup>1, 2</sup>, CHEN Ge<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The coarse-grained soil is widely used in earth-rock dams and road projects. Its seepage characteristics are related to the stability and safety of the projects. The permeability coefficient is the basic parameter of seepage characteristics, and the gradation is the key factor affecting seepage. In order to study the effect of gradation on the permeability coefficient of the coarse-grained soil, based on the results of permeability tests in the existing literatures, a continuous gradation equation is used to describe the gradation of quantitatively graded coarse-grained soil, the relationship between the gradation and the permeability coefficient is studied, and an empirical formula for the permeability coefficient considering the area of gradation curve is established, and other literatures are used to study the relationship between the gradation and the permeability coefficient. The results show that the gradation curve of graded continuous coarse-grained soil can be quantitatively described by the continuous gradation equation, and the empirical formula for the permeability coefficient based on gradation area can be applied to the coarse-grained soil with different maximum particle sizes and gradations.

**Key words:** coarse-grained soil; gradation equation; permeability coefficient; area of gradation curve; applicability

## 0 引言

在土力学中将粗粒粒组(0.075~60 mm)含量超过全重50%的土称为粗粒土。粗粒土具有压缩性低、抗剪强度高等特点, 被广泛应用于土石坝工程和道路工程中。对粗粒土而言, 渗透特性是其重要的力学特性, 其对土石坝工程和道路工程的渗流稳定性有着决定性影响, 主要包括渗透性和渗透变形两个方面。渗透系数是土体渗透性强弱的定量指标, 也是渗流分析的最基本参数<sup>[1]</sup>。因而, 粗粒土的渗透系数研究是粗粒土渗透特性研究的重点和热点。

粗粒土渗透系数影响因素很多, 如土体类型、土

的矿物成分、颗粒级配、孔隙比、颗粒形状、渗流液性质等<sup>[2-8]</sup>。王俊杰等<sup>[4]</sup>、邱珍锋等<sup>[6]</sup>通过研究颗粒形状、颗粒级配和试样密实度等对粗粒土渗透系数的影响, 表明颗粒级配是影响粗粒土渗透特性的主要因素。许多学者研究了级配对土体渗透性的影响。朱崇辉等<sup>[9]</sup>通过不均匀系数和曲率系数研究级配对粗粒土的影

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508505); 国家自然科学基金委员会—雅鲁藏布江流域水电开发有限公司雅鲁藏布江联合基金项目(U1865104); 国家自然科学基金项目(51479052)

收稿日期: 2019-08-14

\*通信作者(E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)

响, 并对太沙基公式进行了改进。邱贤德等<sup>[10]</sup>通过不均匀系数研究级配对堆石体渗透性的影响。杨兵等<sup>[11]</sup>通过曲率系数、不均匀系数和平均粒径研究级配对砂土渗透系数影响。任玉宾等<sup>[12]</sup>通过不均匀系数、曲率系数和颗粒形状研究级配对南海钙质砂渗透性的影响。刘一飞等<sup>[13]</sup>基于离散元数值模拟方法通过不均匀系数、曲率系数和粒径等研究粒径及级配对土体渗透系数的影响。从以上研究不难发现, 针对级配对土体渗透系数影响的研究多是通过特征粒径、不均匀系数和曲率系数等参数来开展的。

但是王双等<sup>[14]</sup>、饶云康等<sup>[15]</sup>通过神经网络方法研究级配对粗粒土渗透系数影响的结果表明, 采用某一个或者几个级配特征参数预测粗粒土的渗透系数具有不确定性, 全级配预测效果比较好。究其原因, 上述几个参数并不能充分表述级配, 因此也就不能准确描述级配和渗透系数之间的定量关系。

实际上, 从 20 世纪 50 年代, 国外学者就采用级配曲线对土体渗透特性进行了研究。如 Kondoatchev 研究了考虑土的粒径分布曲线形状和混合料中粗颗粒含量下粗粒土的渗透规律<sup>[16]</sup>。Lubochkov<sup>[17]</sup>基于颗粒级配曲线研究土体渗流规律。随后, 采用级配曲线对土体渗流规律的研究不断深入。Kenney 等<sup>[18]</sup>、Skempton 等<sup>[19]</sup>、Aberg<sup>[20]</sup>都基于级配曲线进行了进一步研究。近些年, Chang 等<sup>[21]</sup>结合级配曲线对级配连续和间断级配土体的渗透特性进行研究, 分析土体的内部侵蚀。Wan 等<sup>[22]</sup>、Benamar 等<sup>[23]</sup>和 Chapuis 等<sup>[24]</sup>结合级配曲线对分析土体的内部侵蚀的判断方法进行了研究。但由于缺少对级配曲线的定量描述, 目前关于基于级配方程对粗粒土渗透系数的研究成果鲜见报道。

鉴于此, 本文基于连续级配方程, 结合现有渗透试验成果, 分析级配对粗粒土渗透系数影响规律, 寻找级配与渗透系数间的关系, 并对经验公式进行验证。

## 1 连续级配方程的选取及适用性验证

要建立级配与渗透系数的联系, 首先需要可以定量描述级配曲线的级配方程。目前, 常用的级配方程有 Talbot 分形级配方程<sup>[25]</sup>和 Fuller 抛物线级配方程<sup>[26]</sup>。但是这些级配方程并不能完全反映粗粒土的级配曲线特性。首先, 这些级配方程要么只能表示双曲线形级配曲线, 要么只能表示反 S 形级配曲线, 而实际工程采用的粗粒土级配曲线既有双曲线形, 也有反 S 形。其次, 目前的反 S 级配方程不能反映最大粒径的影响。鉴于此, 朱俊高等<sup>[27]</sup>通过对大量实际工程中应用的土体级配曲线形态进行了研究, 提出了对一般连续级配土体普遍适用的连续级配方程, 该级配方程可以反映

出双曲线形和反 S 形的级配曲线, 同时也能反映土体最大粒径影响。连续级配方程如下:

$$p = \frac{1}{(1-b)\left(\frac{d_{\max}}{d}\right)^m + b} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $p$  为小于某粒径的颗粒含量;  $d$  为粒径,  $b$  和  $m$  为级配参数,  $b$  和  $m$  决定级配曲线形态;  $d_{\max}$  为最大粒径。

本节基于式 (1), 对文献[2]的试验级配曲线进行拟合, 根据拟合效果对连续级配方程的适用性进行验证。文献[2]通过常水头试验研究了不同含砾石量对土石混合体渗透系数的影响。试验土料来自于当时正在修建的上瑞高速公路贵州段晴隆隧道出口处典型性土石混合体, 对不同  $P_5$  含量的砾石 (分别为 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) 进行了常水头渗透试验。试验采用的土石混合体基本物理指标如表 1 所示。

表 1 土石混合体天然状态的基本物理指标

Table 1 Basic physical parameters of soil-rock mixture

天然密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	天然 含水 率/%	相对 密度 $G_s$	孔隙 比 $e$	最大干 密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最优含 水率/%
1.64	28	2.778	1.17	1.733	18

采用方程 (1) 对文献[2]中的 10 组级配进行拟合, 拟合结果如图 1 所示。将相应的级配参数  $m$  和  $b$  以及文献[2]中渗透试验结果列于表 2 中。

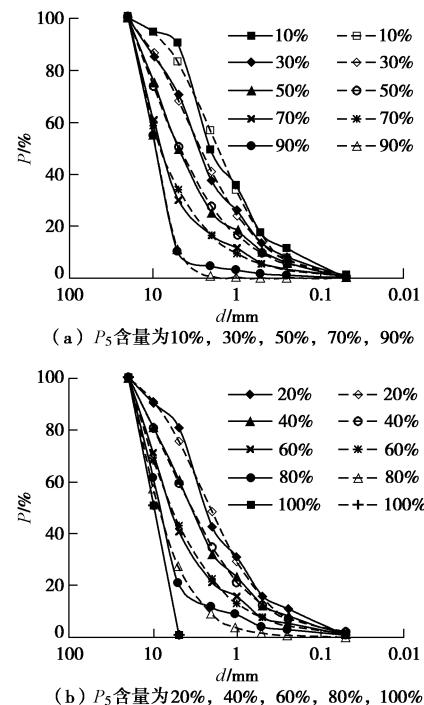


图 1 不同  $P_5$  含量试验级配曲线及拟合级配曲线

Fig. 1 Fitting and test gradation curves with different  $P_5$  contents

表2 级配参数及试验实测渗透系数

Table 2 Gradation parameters and test permeability coefficients

砾石含量 /%	级配参数		渗透系数 k/(cm·s <sup>-1</sup> )
	<i>m</i>	<i>b</i>	
10	1.296	0.958	0.0014
20	1.136	0.915	0.0032
30	1.020	0.850	0.0081
40	0.880	0.715	0.0194
50	0.828	0.546	0.0494
60	0.841	0.403	0.1114
70	0.780	0.001	0.2844
80	1.370	0.520	0.6966
90	3.152	0.895	1.6028
100	7.225	0.993	3.5377

为了方便进行比较, 图1(a)给出了砾石含量为10%, 30%, 50%, 70%, 90%时的级配曲线。图1(b)给出了20%, 40%, 60%, 80%, 100%的级配曲线。其中, 实线表示试验级配曲线, 虚线表示级配方程拟合曲线。从图1可知, 级配方程级配曲线相对试验级配曲线较为平滑, 围绕试验级配曲线上下波动, 在个别粒径处拟合结果有一定差异, 整体而言拟合效果较好, 这说明连续级配方程可以描述级配连续粗粒土级配, 具有较强的适用性。

## 2 渗透系数经验公式的建立

在前文基础上, 进一步寻找粗粒土级配与渗透系数关系, 并建立描述渗透系数与级配之间的经验公式。表2给出了不同 $P_5$ 含量的砾石土的渗透系数以及相应的连续级配方程级配参数。

将表2中的级配参数与渗透系数进行对比可以看出, 级配参数*m*和*b*与渗透系数*k*关系比较复杂, *m*和*b*先增大后减小, 而渗透系数不断增大, 因此定量描述级配参数和渗透系数的关系有一定难度。郭万里<sup>[24]</sup>提出了级配曲线面积的概念, 即最大粒径线、级配曲线、横坐标轴和*d*=*d<sub>k</sub>*围成的面积(如图2所示)。从图1也可以看出, 如果采用级配曲线面积表示级配的影响, 可以减小试验级配曲线相对于拟合级配曲线的上下波动而不能完全重合的差异, 即采用级配方程拟合得到的级配曲线面积表示试验级配曲线面积的差异性较小。基于以上考虑, 本文采用级配曲线面积研究粗粒土的渗透系数。

郭万里<sup>[28]</sup>基于连续级配方程(1)推导级配曲线面积*S*的计算公式为

$$S = \frac{\ln(1-kb) - \ln(1-b)}{mb \ln 10} \quad (2)$$

其中,

$$k = \frac{1}{(1-b)(d_{\max}/d_k)^m + b} \quad (3)$$

式中, *m*, *b*为级配参数, *d<sub>max</sub>*为级配最大粒径, *d<sub>k</sub>*

为级配面积计算时取的最小颗粒粒径, *k*为颗粒粒径为*d<sub>k</sub>*时颗粒含量。郭万里<sup>[28]</sup>研究表明, 将颗粒含量为0.1%对应的粒径作为*d<sub>k</sub>*比较符合土体粒径分布实际情况, 即取为*k*为0.1%。

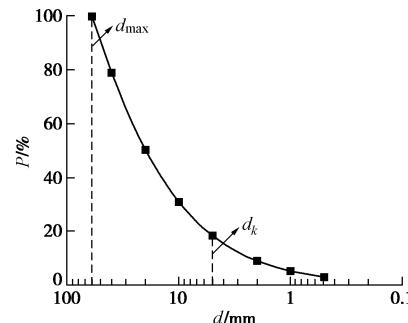
图2 级配曲线面积*S*

Fig. 2 Areas of gradation curves

运用级配面积计算公式(2), 求出各个级配的级配曲线面积*S*, 计算结果如表3所示。

表3 不同砾石含量级配曲线面积与渗透系数拟合值

Table 3 Areas of gradation curve with different gravel contents and fitting values of permeability coefficients

砾石含量 /%	级配曲线面积 <i>S</i>	渗透系数拟合值 /(cm·s <sup>-1</sup> )
10	1.074	0.0116
20	0.990	0.0175
30	0.906	0.056
40	0.815	0.0427
50	0.705	0.0788
60	0.608	0.1411
70	0.501	0.2944
80	0.415	0.6113
90	0.333	1.6398
100	0.294	3.5321

将表2中的试验实测渗透系数*k*与表3中相应的级配曲线面积*S*进行拟合, 可得到考虑级配曲线面积的渗透系数经验公式:

$$k = \frac{e^{aS}}{f + cS} \quad (4)$$

式中, *a*, *f*, *c*为拟合参数, 其值分别为-3.57, -0.57, 2.27。经验公式渗透系数拟合值列于表3中。需要强调的是, 这些参数值与孔隙比、颗粒形状等影响渗透系数的因素有关, 本文主要研究级配与渗透系数的关系, 其它因素将在以后工作中进一步研究, 本文不予以定量研究。

通过对表2, 3中的试验实测和经验公式拟合的渗透系数值, 可以看出, 当砾石含量较大时经验公式得到的渗透系数和试验实测的渗透系数之间差距较小, 砾石含量较小时两者的差距较大。究其原因, 一方面进行粗粒土渗透试验时存在较多不确定性, 如饱和不充分、制样不均匀等, 使得试验结果有一定波动性; 另一方面, 本文仅考虑了级配一个因素的影响,

因此, 实测渗透系数和拟合渗透系数存在一定偏差。

进一步, 将经验公式拟合的渗透系数与文献[2]中试验实测的渗透系数进行对比, 如图 3 所示。从图 3 可知, 整体拟合效果而言, 笔者所建立的经验公式整体上有一定适用性, 具体适用性将在后文进行进一步验证。

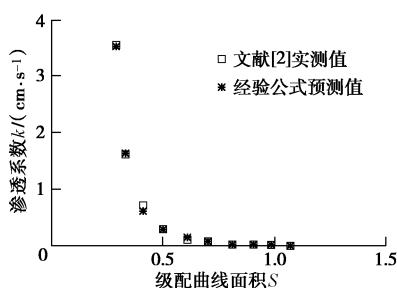


图 3 文献[2]渗透系数的实测值和预测值与级配面积间关系

Fig. 3 Measured and predicted values of permeability coefficient with area of gradation curve in Literature 2

### 3 渗透系数经验公式的验证

针对上一节所提出渗透系数经验公式, 本节分别利用文献[3, 5, 9]中的渗透试验成果进一步验证其适用性。为了验证经验公式对不同最大粒径粗粒土的适用性, 采用的验证文献[3]、文献[5]和文献[9]中进行渗透试验时采用的最大粒径分别为 20, 40, 60 mm。需要强调的是, 文献[3, 5, 9]渗透试验均主要研究级配对渗透系数的影响, 因此, 孔隙比等影响渗透系数的其他参数均各自保持一致, 同时本文也仅限于研究连续级配的粗粒土。文献所采用试验土料和试验方法等详细信息, 本节不再赘述。

本节的研究过程及研究方法为: 先采用连续级配方程对文献的试验级配曲线进行拟合, 得到相应的级配参数  $m$  和  $b$  的值; 再通过公式(3)求出相应的级配曲线面积  $S$ ; 接着, 基于本文建立的渗透系数经验公式(4)对文献中渗透试验的实测渗透系数进行拟合, 将渗透系数实测值和本节的经验公式拟合值进行对比, 根据相应的拟合效果来验证渗透系数经验公式的适用性。

文献[3, 5, 9]试验级配曲线的拟合参数级配  $m$  和  $b$  以及级配曲线面积  $S$  的具体结果如表 4 所示。其中, 文献[3]中的拟合参数  $a, f$  和  $c$  的值分别为 -11.38, 7.08 和 -5.31, 文献[5]中的拟合参数  $a, f$  和  $c$  的值分别为 -3.44, 0.68 和 -6.36, 文献[9]中的拟合参数  $a, f$  和  $c$  的值分别为 2.07, -642.21 和 1063.23。文献[3]、文献[5]和文献[9]渗透系数实测值和拟合值的具体结果也列于表 4 中。文献[3, 5, 9]渗透系数实测值和拟合值的对比结果分别如图 4~6 所示。

表 4 文献[3, 5, 9]级配参数及级配曲线面积与渗透系数实测值和拟合值及误差分析

Table 4 Gradation parameters and areas gradation curve of Literature 3, 5 and 9 and test and fitting values of permeability coefficients with error analysis

文 献	试 验 编 号	$d_{\max}$ /mm	级配参数		渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$	误差 /%
			$m$	$b$		
[3]	3-1#	20	1.280	0.860	0.740	0.5122 0.5123 0.02
	3-2#-1		0.880	0.760	0.875	0.0804 0.0792 1.49
	3-3#-1		0.730	0.740	1.021	0.0055 0.0106 92.73
	3-4#		0.690	0.790	1.178	0.0046 0.0012 73.91
[5]	1	40	0.173	-10.283	0.419	0.331 0.347 4.83
	2		0.890	0.57	0.518	0.56 0.247 75.3
	3		1.677	0.9072	0.651	0.192 0.156 11.91
	8		1.234	0.834	0.791	0.047 0.097 106.4
[9]	TYU1	60	0.387	-1.06	0.658	0.067 0.067 0
	TYU2		0.476	-0.33	0.697	0.045 0.042 6.67
	TYU3		0.582	0.18	0.747	0.028 0.031 10.71
	TYU4		0.668	0.451	0.798	0.024 0.025 4.17
	TYU5		0.858	0.735	0.862	0.023 0.022 4.35
	TYU7		1.175	0.928	1.010	0.019 0.019 0

注: 误差=|预测值-试验值|/试验值×100%。

通过图 4~6 可以看出, 对于最大粒径相同的渗透试验, 均呈现出渗透系数随着级配曲线面积的增大而减小的趋势。这是由于, 对粒径分布固定且仅考虑级配影响情况下(其他情况暂不考虑)级配连续的粗粒土而言, 级配曲线面积越大, 小粒径颗粒含量就越多, 相应的渗透系数也就越小, 这符合渗透试验的实际情况。同时也可看出, 渗透试验实测渗透系数和经验公式拟合渗透系数在级配面积较小的情况下, 结果吻合度较高, 随着级配曲线面积的增加, 两者之间的差距稍大一些。

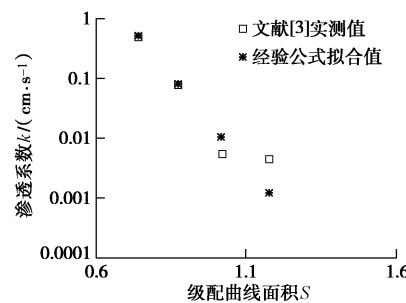


图 4 文献[3]渗透系数的实测值和预测值与级配面积间关系

Fig. 4 Measured and predicted values of permeability coefficient with area of gradation curve in Literature 3

同时, 由表 4 中渗透系数实测值和拟合值的具体结果可知, 文献[3]中的试验 3-3#-1 及文献[5]中的试验 3 和 8 误差较大, 分别为 92.73%, 73.91%, 106.4%, 其他试验误差均在 12% 之内, 精确度较高。考虑到渗透试验结果本身较大的波动性和仅考虑级配一个因素影响的情况, 这样的结果对于渗透试验而言是可以接受的, 渗透系数试验值和拟合值吻合度是比较高的。

以上分析表明, 对不同的最大粒径和不同级配的粗粒土, 本文所建立的渗透系数经验公式可以用来描述级配面积与渗透系数之间的关系, 该经验公式具有较强的适用性。

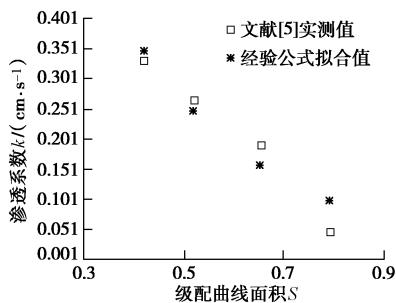


图 5 文献[5]渗透系数的实测值和预测值与级配面积间关系  
Fig. 5 Measured and predicted values of permeability coefficient with area of gradation curve in Literature 5

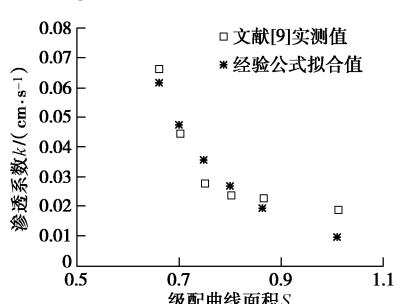


图 6 文献[9]渗透系数的实测值和预测值与级配面积间关系  
Fig. 6 Measured and predicted values of permeability coefficient with area of gradation curve in Literature 9

## 4 结 论

目前级配对粗粒土渗透系数的研究多通过粒径、不均匀系数和曲率系数等几个参数展开, 具有一定局限性。本文基于连续级配方程, 对现有文献中的渗透试验级配曲线进行拟合, 得到相应的级配参数  $m$  和  $b$ , 并采用级配面积计算公式得出级配曲线面积, 建立反映级配曲线面积和渗透系数关系的渗透系数经验公式, 并用其他文献中的渗透试验成果, 对所得渗透系数经验公式的适用性进行进一步验证。结果表明:

(1) 连续级配方程可以较好地拟合连续试验级配曲线, 实现了对试验级配曲线的定量描述; 采用级配曲线面积可以较好地减小试验级配曲线和拟合级配曲线之间的差异, 对于粒径分布范围确定并且级配连续情况下, 采用级配面积来反映渗透系数比较符合实际。

(2) 基于连续级配方程, 建立粗粒土级配曲线面积和渗透系数的经验公式, 通过不同最大粒径和不同级配下粗粒土渗透实验实测值和拟合值的对比, 发现所建立的渗透系数计算公式具有较强的适用性。

## 参考文献:

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. (MAO Chang-xi. Seepage Computation Analysis & Control[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990. (in Chinese))
- [2] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 25–28. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Experimental study of the permeability of soil-rock-mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2006, 33(6): 25–28. (in Chinese))
- [3] 刘黎. 粗粒料渗透特性及渗透规律试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (LIU Li. Testing Study on Seepage Property and Seepage Law of the Coarse Grain[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese))
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 唐晓松, 郑颖人, 董诚. 应用神经网络预估粗颗粒土的渗透系数[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 133–143. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, DONG Cheng. The prediction of seepage coefficient of coarse-grained soil by neurotic network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 133–143. (in Chinese))
- [6] 邱珍锋, 卢孝志, 伍应华. 考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 102–106. (QIU Zhen-feng, LU Xiao-zhi, WU Ying-hua. Experimental research on the permeability property of coarse grained soils considering the particle shape[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 102–105. (in Chinese))
- [7] 黄达, 曾彬, 王庆乐. 粗粒土孔隙比及级配参数与渗透系数概率的相关性研究[J]. 水力学报, 2015, 46(8): 900–907. (HUANG Da, ZENG Bing, GU Dong-ming. Estimation of critical hydraulic gradient of coarse-grained soils based on Copula theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(8): 900–907. (in Chinese))
- [8] 彭家奕. 颗粒形状对粗粒土渗透特性影响的研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2017. (PENG Jia-yi. Study on the Effect of Particle Shape on the Permeability of Coarse-Grained Soil[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2017.

- (in Chinese))
- [9] 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. (ZHU Chong-hui, LIU Jun-min, WANG Zeng-hong. Influence of particle size distribution of coarse grained soils on permeability coefficient[J]. Yellow River, 2005, 27(12): 79 - 81. (in Chinese))
- [10] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 102 - 105. (QIU Xian-de, YAN Zong-ling, LIU Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 102 - 105. (in Chinese))
- [11] 杨兵, 刘一飞, 万奋涛, 等. 级配特性对砂土渗透系数影响试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 855 - 861. (YANG Bing, LIU Yi-fei, WAN Fen-tao, et al. Experimental study on influence of particle-size distribution on permeability coefficient of sand[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 855 - 861. (in Chinese))
- [12] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491 - 497. (REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 491 - 497. (in Chinese))
- [13] 刘一飞, 郑东生, 杨兵, 等. 粒径及级配特性对土体渗透系数影响的细观模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 403 - 412. (LIU Yi-fei, JENG Dong-sheng, YANG Bing, et al. Study on influence of particle size and gradation on permeability coefficient of soil by meso-scale simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 403 - 412. (in Chinese))
- [14] 王双, 李小春, 王少泉, 等. 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 4394 - 4402. (WANG Shuang, LI Xiao-chun, WANG Shao-quan, et al. Study on gravel-soil gradation characteristics influence on the permeability coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 4394 - 4402. (in Chinese))
- [15] 饶云康, 丁瑜, 倪强, 等. 基于 GA-BP 神经网络的粗粒土渗透系数预测[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 92 - 97. (RAO Yun-kang, DING Yu, NI Qiang, et al. Prediction of permeability coefficients of coarse-grained soil based on GA-BP neural network[J]. Hydro-science and Engineering, 2018(6): 92 - 97. (in Chinese))
- [16] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (LIU Jie. Permeating Stability of Soil and Permeating Control[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))
- [17] LUBOCHKOV E A. Graphical and analytical methods for the determination of internal stability of filters consisting of non cohesive soil[J]. Izvestia, Vnig, 1965, 78: 255 - 280. (in Russia)
- [18] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(2): 215 - 225.
- [19] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Géotechnique, 1994, 44(3): 49 - 460.
- [20] ABERG B. Void ratio of non-cohesive soil and similar materials[J]. Journal Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9): 1315 - 1334.
- [21] CHANG D S, ZHANG L M. Extended internal stability criteria for soils under seepage[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(4): 569 - 583.
- [22] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(3): 401 - 407.
- [23] BENAMAR A, CORREIA dos SANTOS R N, BENNABI A, et al. Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 815 - 823.
- [24] CHAPUIS R P, SAUCIER A. Assessing internal erosion with the modal decomposition method for grain size distribution curves[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(6): 1595 - 1605.
- [25] TALBOT A N, RICHART F E. The strength of concrete: its relation to the cement aggregates and water[J]. Bulletin, 1923, 137: 1 - 116.
- [26] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907, 33: 222 - 98.
- [27] 朱俊高, 郭万里, 王元龙, 等. 连续级配土的级配方程及其适用性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931 - 1936. (ZHU Jun-gao, GUO Wan-li, WANG Yuan-long, et al. The research on equation of soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2015, 37(10): 1931 - 1936. (in Chinese))
- [28] 郭万里. 粗粒土颗粒破碎演化规律及本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2018. (GUO Wan-li. Study on the Particle Breakage Evolution and Constitutive Model of Coarse-Grained Soils[D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese))