

# 碎石土级配特征对渗透系数的影响研究

王 双<sup>1</sup>, 李小春<sup>1</sup>, 王少泉<sup>2</sup>, 石 露<sup>1</sup>, 崔银祥<sup>1</sup>, 陈 隼<sup>1</sup>

(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. 中冶北方工程技术有限公司, 辽宁 大连 116622)

**摘要:**采用神经网络研究碎石土级配对渗透系数的影响。收集 92 组碎石土渗透试验数据, 训练并测试神经网络。采用该神经网络, 分别利用全级配( $d_{10} \sim d_{\max}$ , 全部粒径)和若干级配特征预测碎石土渗透系数进行对比分析; 然后, 采用平均影响值法分析并给出各粒径对渗透系数的影响程度; 最后, 通过室内试验验证以上分析的可靠性。样本分析结果表明: 由全级配可以较好地预测碎石土渗透系数, 由某一或某几个级配特征预测碎石土渗透系数具有一定的不确定性, 现有经验公式存在适用局限性;  $d_{10}$  为关键粒径, 不同于粗粒土中一般认为  $d_{20}$  是关键粒径; 渗透系数随  $d_{\max}$  增大而减小, 粗颗粒的骨架作用对控制渗透系数起重要作用;  $d_{50}$  是分界粒径, 增大  $d_{50}$  及以下粒径时, 渗透系数将增大, 增大  $d_{50}$  以上粒径时, 渗透系数将减小。

**关键词:**土力学; 碎石土; 级配; 渗透系数; 神经网络; 平均影响值法

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)增 2-4394-09

## STUDY OF GRAVEL-SOIL GRADATION CHARACTERISTICS INFLUENCE ON THE PERMEABILITY COEFFICIENT

WANG Shuang<sup>1</sup>, LI Xiaochun<sup>1</sup>, WANG Shaoquan<sup>2</sup>, SHI Lu<sup>1</sup>, CUI Yingxiang<sup>1</sup>, CHEN Quan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Northern Engineering and Technology Corporation, Metallurgical Corporation of China, Dalian, Liaoning 116622, China)

**Abstract:** Based on neural network method, the influence of gravel-soil gradation on permeability coefficient was studied. Obtaining 92 groups seepage test data of gravel-soil, a neural network was trained and tested. Based on this neural network, permeability coefficient of gravel-soil was predicted and compared by full gradation( $d_{10} - d_{\max}$ , all particle size) and a few gradation character respectively. Then mean impact value method was used to analyze the influence of each particle size on the permeability coefficient, and the degree of influence was given. At last, the reliability of the above analysis was verified by a set of laboratory test. The following conclusions were obtained: the permeability coefficient of gravel-soil predicted by full grade can be more accurate, while with great uncertainty by one or a few gradation character. There are limitations in the application of current empirical formulas.  $d_{10}$  is the key grain, which is different from coarse particle soli generally with  $d_{20}$  the key particle size. Coefficient permeability of gravel-soil decreases with the increase of  $d_{\max}$ , coarse particles play an important role in the control of permeability coefficient.  $d_{50}$  is the boundary particle size, increasing the particle size below or above  $d_{50}$ , the permeability coefficient will increase or decrease correspondingly.

**Key words:** soil mechanics; gravel-soil; gradation; permeability coefficient; neural network; mean impact value(MIV) method

**收稿日期:** 2014-09-27; **修回日期:** 2015-03-29

**基金项目:** 中国中冶“三五”重大科技专项项目; 国家自然科学基金资助项目(51209199)

**作者简介:** 王 双(1985-), 男, 2008年毕业于南昌大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事无网格粒子法、非饱和土渗流及粗粒料方面的研究工作。E-mail: supergeo@qq.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1306

## 1 引 言

渗透系数是进行渗流分析的关键参数。影响渗透系数的因素很多,如介质的类型、级配及孔隙比等。渗透系数主要由孔隙结构特征决定,级配是影响碎石土的孔隙结构特征的主要因素。碎石土(李镜培等<sup>[1]</sup>定义:棱角形为主,粒径大于 20 mm 的颗粒质量超过总质量 50%)是同时含有碎石和细颗粒(粉黏砂粒)的岩土材料,其级配一般超宽超限,需要特制大型仪器测量其渗透系数,成本较高。

为了方便工程应用,许多学者研究了级配特征对渗透系数的影响,一些学者提出了由级配特征预测渗透系数的经验公式。K. Terzaghi 和 R. B. Peck<sup>[2]</sup>早在 40 年代就指出,土的性质主要由相当于 20% 的细粒土确定,并且最好是以  $d_{20}$ ( $d_m$  为累计质量含量为  $m\%$  对应的颗粒粒径)和  $d_{70}$  作为特征粒径,刘杰<sup>[3]</sup>认可这一观点,并提出了以  $d_{20}$  和孔隙率作为参数的经验公式。后来许多学者自然地将  $d_{20}$  作为经验公式中的关键参数。由于粗粒土(根据郭庆国<sup>[4]</sup>对粗粒土定义的分析,以下特指最大粒径  $d_{\max} < 76.2$  mm 的土类)渗透试验较易进行,研究较成熟。郭庆国<sup>[4]</sup>在其研究中总结了粗粒土的各种经验公式,这些公式采用了不同的级配特征(曲率系数  $C_c$ 、不均匀系数  $C_u$ 、 $d_{10}$ 、 $d_{20}$ 、 $P_5$ ( $P_x$  为粒径为  $x$  mm 时对应的累计质量含量百分比),孔隙比  $e$ 、水力梯度  $J$  中之一或组合)。由于粗粒土与碎石土在粒径上相差较大,碎石土的经验公式与关键级配特征应该有不同于粗粒土的特点。于是许多人开始研究碎石土级配与渗透系数之间的关系,通过试验结果拟合经验公式。经验公式的一般形式为

$$K = F(C_c, C_u, d_m, P_x, e, J, t) \quad (1)$$

式中: $K$  为渗透系数; $t$  为其他影响系数,包括颗粒形状及粗糙度、温度等。其中, $d_m$  常采用  $d_{10}$ 、 $d_{20}$ ;  $P_x$  一般采用  $P_5$ , 认为 5 mm 是细粒与粗粒间的临界粒径,可换算为粗细比。

经验公式一般选定式(1)中的若干个自变量,通过拟合试验数据给定  $F$  的函数形式。朱崇辉等<sup>[5]</sup>通过分析拟合 12 组粗粒土(最大粒径达 40 mm,可看作碎石土)试验数据,提出了包含  $C_c$ 、 $C_u$ 、 $d_{10}$  及孔隙比 4 个特征的经验公式  $K = 2\sqrt{C_u/C_c} d_{10}^2 e^2$ 。周中等<sup>[6]</sup>拟合土石混合体的 9 组正交试验数据,认为土石混合体的渗透系数与  $d_{20}^2 c_c$  成正比,与  $e^3/(1+e)$  成正比。鲁华征<sup>[7]</sup>总结了级配碎石的各种经验公式,

这些公式使用了孔隙率,  $P_{9.32}$ 、 $P_{2.36}$ 、 $P_{0.075}$  等级配特征。

粗粒土研究经验认为细粒含量或粗细比是影响渗透系数的关键因素,一些学者按照这一思路研究了碎石土中的细粒含量对渗透系数的影响。邱贤德等<sup>[8]</sup>在对堆石体的研究中发现堆石体细颗粒含量与渗透系数之间存在负指数关系。孔令伟等<sup>[9-10]</sup>研究结果表明砂土及碎石土的渗透系数总体上随细粒的增加而减小。樊贵盛等<sup>[11]</sup>通过大量砂砾石室内试验发现渗透系数与有效粒径  $d_{10}$  呈密切的二次多项式相关关系。许建聪和尚岳全<sup>[12]</sup>通过分析 40 多组文献试验数据,认为碎石土的渗透系数随土中碎块砾石粒组含量的增加而呈自然指数增大,随土中小于粒径 2 mm 或随小于 0.1 mm 的细粒土粒组含量的增加而呈自然指数降低。

碎石土的各经验公式所选择的级配特征自变量各不相同,函数形式  $F$  也多种多样,且至今没有可靠的得到公认的经验公式。唐晓松等<sup>[13]</sup>认为经验公式仅仅单一的考虑颗粒级配中某一粒径颗粒的含量是不准确的,必须充分考虑各个粒径颗粒含量的影响,现有的经验公式无法充分考虑各个粒径颗粒含量的影响。唐晓松等<sup>[13]</sup>利用神经网络较好地预测了粗粒土的渗透系数,证明采用神经网络方法,由全级配( $d_{10} \sim d_{\max}$  全部粒径)可以较准确地预测渗透系数。其试样级配  $d_{\max}$  均为 40 mm,未考虑不同  $d_{\max}$  的影响。研究者普遍认为细粒含量是影响渗透系数的关键级配特征,但是关于具体各粒径对渗透系数的影响程度的研究很少。

本文利用从朱崇辉等<sup>[5, 7-8, 11, 13-14]</sup>中摘录的 92 组碎石土试验数据,采用神经网络预测渗透系数并采用平均影响值(mean impact value, MIV)法找出各粒径对渗透系数的影响程度。

## 2 神经网络及 MIV 值法预测渗透系数

BP(back propagation)神经网络<sup>[15]</sup>,是目前应用较广泛的神经网络之一。BP 网络能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系,而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程。本文使用 BP 神经网络学习并存储所有样本级配-渗透系数的映射关系,这一映射关系相当于总结了所有样本中级配-渗透系数映射关系的复杂预测公式,经由样本学习训练形成这一预测公式后,可以用于由级配预测渗透系数。

2.1 渗透试验数据样本

收集朱崇辉等<sup>[5, 7-8, 11, 13-14]</sup>碎石土试验资料, 获得 92 组级配试样及其渗透系数试验数据(见表 1), 整理后随机抽取 86 组作为训练样本, 剩下 6 组作为测试样本。表 1 中所选样本渗透系数均大于  $10^{-4}$  cm/s。

原级配关系为粒径 - 累计质量百分数。这 92 组试验数据的  $d_{max}$  差别较大,  $d_{max}$  最小为 31.5 mm, 最大为 800 mm。为保持样本格式的统一性, 粒径 - 累计质量百分数关系转换为累计质量百分数 - 粒径。这一转换可以在神经网络中体现  $d_{max}$  对渗透系数的影响。显然,  $d_{max}$  的差别可以影响到岩土材料的分类 ( $d_{max}$  较小时材料可视为土,  $d_{max}$  较大时材料可视为块石), 对渗透系数的影响较大, 而以前的研究很少

关注不同  $d_{max}$  级配与渗透系数之间的关系。

样本均来自文献试验资料, 一般试验时试样均经过分层压实, 故认为其孔隙比均达到该级配下的密实状态, 可以忽略孔隙比的影响。邱贤德等<sup>[8]</sup>在对堆石体的研究中发现, 在水力坡降小于 3~5 时, 堆石体的渗透遵守达西定律, 以下所有试验数据及分析均针对线性达西流, 即不考虑  $J$  的影响。这些试验的试样不含卵石, 均为常见的粗粒料(碎石粒、堆石料等), 认为其形状比较接近, 均为不规则块体, 且均在室温下进行试验, 故可忽略其他影响因素  $t$  的影响(后续分析结果也表明, 忽略这些影响因素后, 预测误差仍在可接受范围内)。

利用训练样本训练 BP 神经网络, 得出映射关系。采用测试样本检验这一映射关系的预测能力。

表 1 92 组级配 - 渗透系数数据  
Table 1 92 groups of gradation-permeability relation data

编号	来源	累计质量百分数/%										$P_s/$ mm	$K/(cm \cdot s^{-1})$
		粒径 10 mm	粒径 20 mm	粒径 30 mm	粒径 40 mm	粒径 50 mm	粒径 60 mm	粒径 70 mm	粒径 80 mm	粒径 90 mm	粒径 100 mm		
1	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.6	3.0	5.0	10.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	30.0	0.030 0
2	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.9	4.0	6.0	10.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	25.0	0.130 0
3	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	6.0	16.7	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	16.7	2.200 0
4	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	6.0	8.7	16.7	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	8.3	3.660 0
5	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	10.0	16.7	23.3	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	8.3	5.630 0
6	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.7	3.0	5.0	10.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	30.0	0.030 0
7	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.9	4.5	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	21.7	0.070 0
8	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	20.0	0.200 0
9	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	4.0	6.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	15.0	0.970 0
10	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	6.0	8.7	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	8.3	2.100 0
11	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	6.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	8.3	3.690 0
12	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	6.0	16.7	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	16.7	2.200 0
13	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.9	6.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	63.3	76.7	90.0	18.3	1.100 0
14	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.7	3.0	6.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	70.0	90.0	26.7	0.200 0
15	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.7	3.0	6.0	16.7	30.0	40.0	50.0	63.3	76.7	90.0	26.7	0.150 0
16	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	6.0	10.0	16.7	23.3	30.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	10.0	0.920 0
17	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	6.0	10.0	16.7	23.3	30.0	50.0	63.3	76.7	90.0	16.7	1.230 0
18	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	2.4	6.0	10.0	16.7	23.3	30.0	60.0	70.0	80.0	90.0	15.0	0.860 0
19	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.9	4.0	6.0	10.0	16.7	23.3	30.0	40.0	50.0	90.0	25.0	0.140 0
20	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	0.8	3.0	6.0	10.0	16.7	23.3	30.0	36.7	43.3	50.0	26.7	0.080 0
21	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	1.6	3.0	5.0	16.7	30.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	30.0	0.140 0
22	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	1.6	3.0	5.0	16.7	30.0	36.7	43.3	50.0	70.0	90.0	30.0	0.070 0
23	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	1.3	2.4	4.0	6.0	10.0	23.3	33.3	40.0	46.7	50.0	35.0	0.040 0
24	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	1.6	3.0	5.0	10.0	16.7	23.3	30.0	40.0	50.0	90.0	30.0	0.020 0
25	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	1.6	3.0	5.0	7.3	10.0	16.7	23.3	30.0	70.0	90.0	30.0	0.010 0
26	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	16.7	28.0	39.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	20.0	1.670 0
27	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	10.0	17.0	24.0	30.0	50.0	63.3	76.7	90.0	20.0	1.020 0
28	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	12.2	16.7	21.1	25.6	30.0	63.3	76.7	90.0	20.0	0.680 0
29	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	12.2	15.2	18.2	21.1	30.0	36.7	43.3	50.0	20.0	0.340 0
30	樊贵盛等 <sup>[11]</sup>	3.0	5.0	8.0	12.2	16.7	21.1	25.6	30.0	40.0	50.0	20.0	0.270 0
31	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	1.5	2.6	3.8	5.0	6.3	7.5	8.8	10.0	40.0	50.0	0.016 0
32	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	1.2	2.4	3.7	5.0	6.6	8.1	9.7	16.2	40.0	50.0	0.023 0
33	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.9	2.1	3.5	5.0	6.7	8.5	10.8	18.5	40.0	50.0	0.037 0
34	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.5	1.8	3.3	5.0	6.9	8.9	13.1	21.8	40.0	50.0	0.046 0
35	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.4	1.4	3.1	5.0	7.2	9.4	15.4	25.7	40.0	50.0	0.059 0
36	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.4	1.0	2.8	5.0	7.5	10.0	17.7	28.2	40.0	50.0	0.080 0

续表

编号	来源	累计质量百分数%										$P_s / \text{mm}$	$K / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
		粒径 10 mm	粒径 20 mm	粒径 30 mm	粒径 40 mm	粒径 50 mm	粒径 60 mm	粒径 70 mm	粒径 80 mm	粒径 90 mm	粒径 100 mm		
37	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.4	0.7	2.3	5.0	7.9	12.3	20.0	30.0	40.0	50.0	0.100 0
38	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.4	0.5	1.8	5.0	8.6	14.6	22.6	31.3	40.0	50.0	0.121 0
39	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.3	0.5	1.2	5.0	9.6	16.9	24.6	32.3	40.0	50.0	0.202 0
40	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.3	0.4	0.9	5.0	11.5	19.2	26.2	33.1	40.0	50.0	0.266 0
41	朱崇辉等 <sup>[5]</sup>	0.2	0.3	0.4	0.6	5.0	15.0	21.3	27.5	33.8	40.0	50.0	0.291 0
42	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.4	3.5	10.0	34.3	86.7	176.3	307.9	492.3	800.0	33.0	0.045 0
43	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.4	3.5	6.8	9.3	14.7	22.0	32.0	43.3	60.0	33.0	0.020 0
44	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	3.5	17.5	60.0	150.0	306.3	447.1	564.7	682.4	800.0	22.0	0.350 0
45	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	3.5	6.8	9.1	13.5	19.4	26.9	34.6	44.6	60.0	22.0	0.400 0
46	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	6.7	40.0	130.0	292.9	429.6	503.7	577.8	651.9	725.9	800.0	9.0	2.000 0
47	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	5.3	7.8	10.5	15.8	21.3	27.5	33.8	40.0	50.0	60.0	9.0	1.400 0
48	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.3	2.8	8.3	22.0	42.9	73.3	110.0	212.5	800.0	36.0	0.022 0
49	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.3	2.8	6.5	10.7	17.3	25.7	35.2	46.7	60.0	36.0	0.018 0
50	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	2.0	9.0	27.5	60.0	114.3	263.6	466.7	633.3	800.0	26.0	0.510 0
51	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	2.0	6.3	9.7	14.3	19.1	26.7	35.0	45.7	60.0	26.0	0.250 0
52	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.8	10.0	50.0	130.0	292.9	436.4	527.3	618.2	709.1	800.0	16.0	1.000 0
53	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.8	6.3	9.4	13.8	18.6	25.4	33.1	41.0	50.5	60.0	16.0	1.400 0
54	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.3	2.0	9.3	22.5	55.0	107.1	200.0	325.0	800.0	34.0	0.065 0
55	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.1	0.3	2.0	6.7	9.4	14.0	19.0	28.9	40.0	60.0	34.0	0.019 0
56	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	2.0	11.7	36.7	85.0	161.4	275.0	388.6	589.5	800.0	23.0	0.900 0
57	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.2	2.0	6.7	9.1	12.9	17.6	24.8	34.3	45.7	60.0	23.0	0.330 0
58	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	1.5	17.5	65.7	128.6	222.9	327.1	436.4	557.6	678.8	800.0	13.0	1.200 0
59	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	1.5	6.6	8.9	12.3	16.8	22.2	29.6	37.0	47.5	60.0	13.0	2.100 0
60	邱贤德等 <sup>[8]</sup>	0.8	2.7	6.1	10.2	13.2	16.6	20.1	23.8	27.5	31.5	27.6	0.794 0
61	鲁华征 <sup>[7]</sup>	0.6	2.3	5.4	9.8	12.9	16.3	19.8	23.6	27.5	31.5	28.8	0.789 0
62	鲁华征 <sup>[7]</sup>	0.4	2.0	4.8	9.3	12.6	16.0	19.6	23.5	27.4	31.5	30.2	0.510 0
63	鲁华征 <sup>[7]</sup>	0.3	1.6	4.4	8.8	12.3	15.7	19.4	23.3	27.3	31.5	31.6	0.350 0
64	鲁华征 <sup>[7]</sup>	0.2	1.3	3.9	8.2	11.9	15.4	19.1	23.2	27.2	31.5	33.0	0.070 0
65	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	0.2	1.2	3.8	8.0	11.8	15.3	19.1	23.1	27.2	31.5	33.3	0.010 0
66	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	0.4	0.8	3.7	8.3	14.7	22.4	34.1	46.7	60.0	80.0	34.0	0.008 6
67	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	0.4	1.7	4.1	7.3	11.8	17.9	27.2	38.3	55.5	100.0	34.0	0.020 0
68	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	0.5	3.8	8.0	14.3	22.6	35.5	51.8	72.9	96.5	200.0	24.0	0.036 0
69	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	2.0	6.7	11.5	18.9	36.2	50.0	67.0	102.4	150.0	200.0	16.0	0.237 0
70	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	2.0	7.5	16.0	28.9	45.6	71.1	102.6	134.2	166.7	200.0	16.0	0.230 0
71	朱国盛等 <sup>[14]</sup>	2.0	7.5	16.0	28.9	45.6	72.6	108.6	144.6	192.5	400.0	16.0	0.194 0
72	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	2.0	5.0	10.0	20.0	25.0	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	20.0	0.331 0
73	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	2.0	5.0	7.5	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	20.0	0.266 0
74	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	2.0	5.0	6.3	7.5	8.8	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0	20.0	0.192 0
75	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.1	2.0	5.0	7.5	10.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	30.0	0.115 0
76	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.4	2.6	3.8	5.0	20.0	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	40.0	0.096 0
77	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.4	2.6	3.8	5.0	10.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	40.0	0.074 0
78	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.4	2.6	3.8	5.0	7.5	10.0	16.7	23.3	30.0	40.0	40.0	0.059 0
79	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.4	2.4	3.3	4.1	5.0	10.0	16.7	22.5	27.5	40.0	50.0	0.047 0
80	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.7	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	60.0	0.027 0
81	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.7	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	7.5	10.0	25.0	40.0	60.0	0.011 0
82	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.7	1.4	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	20.0	40.0	60.0	0.007 0
83	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	2.0	5.0	15.0	25.0	40.0	70.0	0.000 2
84	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	2.0	3.5	5.0	20.0	40.0	80.0	0.000 9
85	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.7	2.0	4.0	10.0	40.0	85.0	0.000 6
86	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	5.0	40.0	90.0	0.000 2
87	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	2.0	6.7	10.0	16.7	23.3	30.0	32.5	35.0	37.5	40.0	15.0	0.210 0
88	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.9	5.0	6.4	7.8	9.2	11.4	14.5	17.6	22.7	40.0	20.0	0.105 0
89	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	1.0	1.9	3.5	5.0	6.9	8.7	11.4	15.6	19.7	40.0	40.0	0.041 0
90	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.8	1.6	2.5	3.8	5.0	7.3	9.5	13.9	18.9	40.0	50.0	0.039 0
91	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	0.7	1.3	1.9	2.9	4.0	5.0	7.8	11.4	17.6	40.0	60.0	0.008 3
92	唐晓松等 <sup>[13]</sup>	2.0	3.5	5.0	6.7	8.3	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	30.0	0.081 0

注：通用级配关系为粒径 - 累计质量百分数，由于最大粒径不一致，为统一本数据格式，此处转换为累计质量百分数 - 粒径关系。

### 2.2 神经网络学习预测级配-渗透系数关系

BP 神经网络学习预测的基本步骤如下：

(1) 建立 BP 神经网络(见图 1)。将各指标进行归一化处理，即用每一样本的指标项  $x_i$  除以样本集中  $X$  的最大值，即  $x_i/\max(X)$ ，按此方式对粒径或级配特征进行归一化： $d_i/\max(d_i)$ 。确立输入层与输出层，将级配或级配特征(归一化后的指标)作为输入，将对对应渗透系数作为输出。建立 2 个隐含层，各有 7 个神经元，作用函数<sup>[15]</sup>分别为双曲正切 S 形 tansig 函数与 purelin 函数。

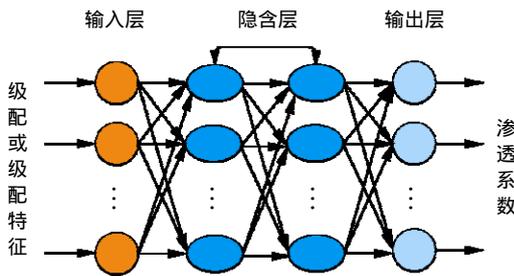


图 1 神经网络示意图

Fig.1 Sketch of neural networks

(2) 利用训练样本训练建立好的神经网络。网络训练规则<sup>[15]</sup>为 Levenberg-Marquart，最大训练步数定为 1 000 步，误差指标为  $10^{-4}$ 。

(3) 利用测试样本检查训练后的神经网络的预测精度。

### 2.3 平均影响值法评价级配特征敏感性

采用平均影响值<sup>[15]</sup>(mean impact value, *MIV*)算法可以评价级配特征对渗透系数的影响敏感性。*MIV* 是变动自变量后对输出产生的影响变化值。*MIV* 值可作为确定输入神经元对输出神经元影响大小的指标，其符号代表相关方向，绝对值大小代表影响的相对重要性。*MIV* 方法清晰明了，其实施过程为：

(1) 将测试样本中的某一个粒径或级配特征大小在原值的基础上分别加减 10%构成增量样本与减量样本，其他粒径或级配特征大小保持不变。

(2) 采用增量样本与减量样本在节 2.2 中训练好的神经网络中进行仿真，对应得到 2 组预测渗透系数  $K_1, K_2$ 。

$$(3) MIV = K_1 - K_2。$$

(4) 重复步骤(1)~(3)，直到获得每一组测试样本所有粒径或级配特征的 *MIV* 值，每一粒径或级配特征的 *MIV* 值最后取 6 组测试样本相应粒径或级配特征 *MIV* 值平均值。

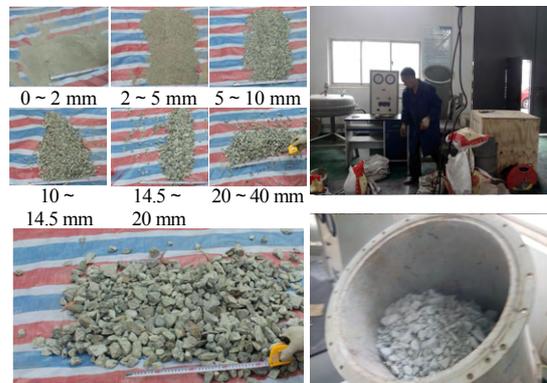
(5) 为获得更有代表性的 *MIV* 值，将步骤(4)重复 10 次，取 10 次平均值。

### 2.4 验证试验

试验采用 ZDY-10 型粗粒土大型渗透仪，仪器直径为  $\phi 500$  mm，有效试样最大粒径为 100 mm。试样采自于海南石碌铁矿排土场废石，为透辉石透闪石岩，碎石形状不规则，含砂土细颗粒(见图 2)。试样制备时，剔除 60 mm 以上粒径的大块，由于筛格最大为 40 mm，故图 2 中未列出 40~60 mm 组，后期按比例人工添加 40~60 mm 组，由此得到的原始级配(见表 2 中试样 T1)。按照 *MIV* 定义，在试样 T1 的基础上，对某一累计质量百分数对应的粒径  $d_i$  加减 10%，同时保证其他累计质量百分数对应的粒径保持不变，构成新的级配试样 T2~T5(表 2 中，“/”左边为减量 10%新粒径及其对应的渗透系数，“/”右边为增量 10%后的新粒径及其对应的渗透系数)。加减 10%改变相应粒径时，对于  $d_{50}$  (累计质量为



(a) 现场筛分试验



(b) 筛分粒组及室内渗透试验

图 2 现场筛分、分级后的粒组及渗透试验

Fig.2 Sieving, particle grades after sieving and seepage test

表 2 室内试验  
Table 2 Laboratory test

试样	累计质量百分数/%										渗透系数试验值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	渗透系数预测值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/%
	粒径 10 mm	粒径 20 mm	粒径 30 mm	粒径 40 mm	粒径 50 mm	粒径 60 mm	粒径 70 mm	粒径 80 mm	粒径 90 mm	粒径 100 mm			
T1	1.2	2.6	4.6	7.0	13.2	21.0	25.8	31.0	39.4	60.0	0.57	0.62	9
T2	1.2	2.6	4.6	7.0	12/14.5	21.0	25.8	31.0	39.4	60.0	0.56/0.58	0.61	7
T3	1.2	2.6	4.6	7.0	13.2	19/23	25.8	31.0	39.4	60.0	0.59/0.56	0.55	4
T4	1.2	2.6	4.6	7.0	13.2	21.0	25.8	28/34	39.4	60.0	0.57/0.57	0.54	5
T5	1.2	2.6	4.6	7.0	13.2	21.0	25.8	31.0	39.4	54/66	0.58/0.57	0.59	3
MIV	-	-	-	-	0.04	-0.05	-	0	-	-0.04	-	-	-

注：误差 = (预测值 - 试验值)/试验值×100%，下同。

50%时)，采用对应规格(筛格尺寸为 12 及 14.5 mm，刚好与加减 10%后的新粒径接近，参考土工筛规格标准)筛子筛分；大于  $d_{50}$  时，由于粒径达到 19~60 mm，无对应规格筛子(自制土工筛筛格尺寸与加减 10%后的新粒径差距过大)，故采用直尺量测并采用等体积法换算；小于  $d_{50}$  时，粒径小于 10 mm，量测精度低且无对应规格筛子，暂不考虑。这样处理获得的粒径的改变量接近 10%，满足要求。

### 3 结果分析

#### 3.1 由全级配预测渗透系数

为研究全级配与渗透系数之间的映射关系及粒径对渗透系数的影响程度，采用表 1 数据(不考虑  $P_5$ )，按照节 2.2 和 2.3 中步骤，计算结果见表 3。表中，全级配的测试精度为利用训练的神经网络预测组渗透系数，比较其与试验值的误差，误差 = (预测值 - 试验值)/试验值×100%。

表 3 测试中，各测试试样的渗透系数预测值与试验值很接近，误差在可接受范围，精度较高。此结果表明：级配与渗透系数之间存在映射关系，由

全级配预测渗透系数是可行的。测试编号 TS1, TS3, TS4, TS6 试验值与预测值十分接近甚至相同；受误差计算方式影响，测试编号 TS2 与 TS5 误差较大(由于级配是反映渗透系数的一个重要表征，但不是唯一决定表征，故神经网络预测结果与试验结果存在一定误差是正常的)，但其测试值与预测值的差别较小，在工程中是可以接受的。这一结果说明神经网络预测渗透系数精度是可行的。收集各工程碎石土渗透试验资料，建立大量样本的神经网络数据分析平台，用来较精确的预测渗透系数，可以大幅度减少测量碎石土渗透系数的成本，提高工程效率。

表 3 中给出了各累积质量百分数对应粒径的 MIV 值(粒径增加 10%后的渗透系数减去粒径减少 10%后的渗透系数)。在一确定级配内，当粒径在  $d_{50}$  以下时，表中各粒径的 MIV 为正，表明此时增大累计质量百分数对应粒径时，渗透系数增大；MIV 绝对值越大表明其增大越明显， $d_{10}$  增大最显著，其  $MIV = 0.13$ ，远比其他粒径影响值大，因此  $d_{10}$  是影响渗透系数的关键粒径； $d_{20}$  次之， $MIV = 0.06$ ；随粒径增大至  $d_{50}$ ，影响逐渐减小。这一结果与前人研究结论一致，增大细颗粒粒径，渗透系数也会增大。

表 3 全级配的测试精度及各粒径的 MIV 值  
Table 3 Test accuracy of full grade and MIV values of granular size

测试编号	累计质量百分数/%										试验值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	预测值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/%
	粒径 10 mm	粒径 20 mm	粒径 30 mm	粒径 40 mm	粒径 50 mm	粒径 60 mm	粒径 70 mm	粒径 80 mm	粒径 90 mm	粒径 100 mm			
TS1 10	6.00	8.70	16.70	30.0	36.70	43.30	50.00	63.30	76.70	90.00	2.10	2.15	2
TS2 38	0.20	0.30	0.50	1.8	5.00	8.60	14.60	22.60	31.30	40.00	0.12	0.20	67
TS3 51	0.20	2.00	6.30	9.7	14.30	19.00	26.70	35.00	45.70	60.00	0.25	0.23	8
TS4 39	0.20	0.30	0.50	1.2	5.00	9.50	16.90	24.60	32.30	40.00	0.20	0.20	0
TS5 69	2.00	6.70	11.50	18.9	36.20	50.00	67.00	102.40	150.00	200.00	0.24	0.32	33
TS6 9	4.00	6.00	16.70	30.0	36.70	43.30	50.00	63.30	76.70	90.00	0.97	1.04	7
MIV	0.13	0.06	0.05	0.05	0.03	-0.03	-0.02	-0.01	-0.03	-0.04	-	-	-

注：TS1|10 为测试编号 TS1 与对应试样编号 10(即表 1 第 10 编号试样)，下同。

应指出,在碎石土级配中  $d_{10}$  是显著的关键粒径,而非  $d_{20}$ , 这一点与很多粗粒土经验公式选用  $d_{20}$  作为关键粒径是不同的。朱崇辉等<sup>[5]</sup>的试验结论证明了这一点。

在一确定级配内,当粒径在  $d_{50}$  以上时,  $MIV$  为负,表明此时增大累计质量百分数对应的粒径时,渗透系数在减小,但其影响相对于  $d_{50}$  以下的中小颗粒而言较小( $MIV$  绝对值相对较小)。这说明在碎石土中,细颗粒是影响渗透系数的相对主要因素。同时说明,粗颗粒的骨架作用对控制渗透系数也起重要作用,渗透系数随  $d_{max}$  增大而减小(一般容易形成平均粒径越大或最大粒径越大,渗透系数越大的误解)。增大  $d_{50}$  以上颗粒粒径,不均匀系数  $C_u = d_{60} / d_{10}$  将会增大,颗粒大小的分布范围更大且更加不均匀,级配更加良好,同时大块较多,减小了有效渗透面积,渗透系数会有所降低。邱贤德等<sup>[8]</sup>在对堆石体的研究中发现细颗粒含量在 30%~40%以下时,堆石体中的粗颗粒形成骨架,细粒料充填孔隙,此时堆石体的渗透率最低。这一试验结果证明了粗颗粒的骨架作用配合细颗粒的填充效应可以减小渗透系数。

图 3 给出了  $d_m$  增加 20%(按照节 2.3 中  $MIV$  定义,粒径增加 10%后的渗透系数  $K_1$  减去粒径减少 10%后的渗透系数  $K_2$ ,相当于在  $K_2$  的基础上,粒径增加 20%时,渗透系数改变的程度)对渗透系数的影响程度曲线。由曲线可知,  $d_{10}$  对渗透系数的增大效果最显著;  $d_{50}$  是界限粒径,粒径大于  $d_{50}$  时,增加粒径将使渗透系数减小,但其影响程度比小于  $d_{50}$  的细颗粒要小;增加  $d_{max}$  对减小渗透系数有较大影响。对于需要控制渗透系数的排水体或防渗体,根据图 3 可以有针对性的调整级配中某一或某些粒径来获得相应的渗透调控效果。注意到曲线是平均 6 组不同级配  $MIV$  值的结果,揭示了粒径影响渗透系数的普遍规律,具体到每一特定级配其影响程度值会略有

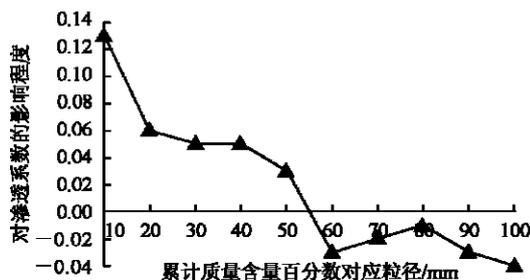


图 3  $d_m$  增加 20%对渗透系数的影响程度曲线

Fig.3 Curve of the influence on permeability from increasing  $d_m$  by 20%

差别,且适用于级配与本神经网络的学习样本差异较小时。更普适、更准确的规律需要更大量的渗透试验样本支持,需要进一步研究。

### 3.2 由某一或几个级配特征预测渗透系数

为研究常用级配特征与渗透系数之间的映射关系及其对渗透系数的影响程度,采用表 1 数据(仅选用  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $P_5$ ),按照节 2.2 和 2.3 中步骤,得到级配特征的测试精度及各特征值的  $MIV$  如表 4 所示。

表 4 级配特征的测试精度及各特征值的  $MIV$

Table 4 Test accuracy of gradation characteristics and  $MIV$  of eigenvalue

测试编号	级配特征及对应粒径/mm				试验值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	预测值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/%
	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$P_5$			
TSC1 10	6.00	16.67	43.33	8.33	2.10	6.66	217
TSC2 38	0.20	0.50	8.20	50.00	0.12	0.22	83
TSC3 51	0.18	6.33	19.05	26.00	0.25	0.28	13
TSC4 39	0.20	0.43	9.50	30.00	0.20	0.22	10
TSC5 69	2.00	11.48	50.00	16.00	0.24	0.43	79
TSC6 9	4.00	16.67	43.33	15.00	0.97	1.32	36
MIV	0.04	0.05	0.06	-0.06	-	-	-

表 4 中,测试编号 TSC3, TSC4, TSC6 三组测试样本中渗透系数预测值与试验值较接近,误差较小,表明部分级配特征可以在某些情况下较准确地预测渗透系数;测试编号 TSC1, TSC2, TSC5 三组测试样本中渗透系数预测值与试验值误差极大,已不能在工程中使用。粗粒土研究中,粒径跨度小,骨架空隙主要由细粒填充,细粒影响很大;在碎石土中,粒径跨度很大,大颗粒组成骨架,骨架孔隙先由中等粒径填充,再由细粒填充次一级空隙。碎石土中的填充效应是分层次的(见图 4,当然粗粒土的填充效应也是分层次的,只是其层次可简单的划分为粗颗粒骨架与细粒填充),各粒径颗粒均发挥填



(a) 碎石土

(b) 粗粒土

图 4 碎石土的逐级填充效应与粗粒土的细粒填充效应

Fig.4 Gradual filling effect in gravel-soil and small particles filling effect in coarse particle soil

充作用(见图 3, 各粒径均对渗透系数有影响), 以  $P_5$ 、特征粒径  $d_m$ 、不均匀系数或曲率系数等级配特征来预测渗透系数, 不能体现其他粒径的填充作用, 尤其不能体现  $d_{max}$  的骨架作用。这也是为什么采用某一个或几个级配特征来预测碎石土渗透系数的经验公式时常失准, 而采用全级配预测碎石土渗透系数较为准确的重要原因。

表 4 测试结果中,  $P_5$  的  $MIV$  值为 -0.06, 绝对值较大, 且为负值, 这表明:  $P_5$  是影响渗透系数的关键级配特征,  $P_5$  增加, 渗透系数减小。这与多位学者对粗粒土及碎石土的研究结论是一致的。注意到  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  是计算  $C_c$ ,  $C_u$  的关键粒径, 在 BP 神经网络中已通过这 3 种粒径自动反映  $C_c$ ,  $C_u$  的影响。同时, BP 神经网络在训练过程中已包含了所有由  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $P_5$  等单项或多项级配特征组合成的映射关系, 即包含相应各类经验公式。因此, 本节分析结论是具有普遍意义的。

### 3.3 全级配与级配特征预测渗透系数的比较

分析比较表 3 与 4, 表 3 中渗透系数预测值与试验值较接近, 误差较小, 表明由全级配预测碎石土渗透系数的结果是较为可信的; 表 4 中部分渗透系数预测值与试验值误差极大, 表明由某一个或几个级配特征预测碎石土渗透系数存在较大的不确定性, 较难在工程应用中推广。由于表 3 中预测精度高, 认为其  $MIV$  值反映了真实情况; 表 4 预测存在不测定性, 认为其  $MIV$  值未能反映真实情况; 故表 4 中  $d_{10}$  的  $MIV$  与  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  相比, 未体现出其关键粒径的影响。这也说明由某一个或几个级配特征预测碎石土渗透系数不太准确。在粗粒土及细粒土中, 一些经典的经验公式预测效果较好, 对于碎石土, 其级配远宽于粗粒土级配, 填充效应、细粒效应均有较大差别, 现有碎石土经验公式, 存在适用局限性。当预测级配超出拟合经验公式的试验级配范围时, 准确性较低; 对于各种级配组成(包括超宽超限,  $d_{max}$  差异大, 粒级缺失等, 经验公式通常会失效), 试验样本足够时, 采用神经网络法可以由全级配较好地预测碎石土渗透系数。

### 3.4 由试验验证神经网络预测结果

采用节 2.3 中所使用的同一训练好的神经网络, 预测表 2 中试样 T1 各级配的渗透系数, 预测值与试验值十分接近, 由此可说明神经网络的预测结果是较可信的。比较表 2 与 3 中  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$ ,  $d_{100}$  各粒径的  $MIV$  值, 大小较接近(粒径改变量较小,

带来的渗透系数改变量较小, 试验误差相对变大, 在可接受范围内), 正负关系一致, 增减趋势一致, 说明利用神经网络获得的  $MIV$  值是较可信的。

## 4 结 论

K. Terzaghi 和 R. B. Peck<sup>[2]</sup>提出的由级配特征预测渗透系数的经验公式得到推广应用, 说明级配是反映渗透系数的重要表征。但影响渗透系数的还包括孔隙比、颗粒形状、粗糙度等, 因此级配不是反映渗透系数唯一决定表征。仅由级配来预测渗透系数与试验结果存在一定误差是正常的, 本文研究表明预测精度符合一般工程初步需要。

本文利用大量碎石土渗透试验数据样本, 采用神经网络及  $MIV$  法分析级配与渗透系数之间的关系, 并进行试验验证。得到以下结论:

(1) 对于碎石土材料, 由全级配预测渗透系数是较精确的; 由少量级配特征预测渗透系数存在不确定性; 经验公式存在适用局限性。

(2) 针对碎石土:  $d_{10}$  是关键粒径, 应注意这一点与很多粗粒土经验公式选用  $d_{20}$  作为关键粒径是不同的;  $d_{50}$  是分界粒径, 增大  $d_{50}$  及以下粒径时, 渗透系数将增大, 增大  $d_{50}$  以上粒径时, 渗透系数将减小; 对于一给定级配, 渗透系数随  $d_{max}$  增大而减小, 粗颗粒的骨架作用对控制渗透系数也起重要作用。对于需要控制渗透系数的排水体或防渗体, 根据图 3 规律可以有针对性的调整级配中某一或某些粒径, 形成次第填充效应, 获得相应的渗透调控效果。

建立神经网络大数据平台, 收集各工程渗透试验数据进行学习, 可以为后续工程渗透系数取值提供较准确的参考。

### 参考文献(References):

- [1] 李镜培, 梁发云, 赵春风. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 21-25.(LI Jingpei, LIANG Fayun, ZHAO Chunfeng. Soil Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 21-25.(in Chinese))
- [2] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley, 1948: 19-20.
- [3] 刘 杰. 土的渗流稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 1-20.(LIU Jie. Permeating stability of soil and permeating control[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Electric Power Press, 1992: 1-20.(in Chinese))

- [4] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998: 286 – 314.(GUO Qingguo. Engineering properties and application of coarse grained soil [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998: 286 – 314.(in Chinese))
- [5] 朱崇辉, 刘俊民, 王增红. 粗粒土的颗粒级配渗透系数的影响规律研究[J]. 人民黄河, 2006, 27(12): 79 – 81.(ZHU Chonghui, LIU Junmin, WANG Zenghong. Research on the law of influence of Grain gradation on the coefficient of permeability of coarse grained soil[J]. Yellow River, 2006, 27(12): 79 – 81.(in Chinese))
- [6] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134 – 1138.(ZHOU Zhong, FU Helin, LIU Baochen, et al. Orthogonal tests on permeability of soil rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134 – 1138.(in Chinese))
- [7] 鲁华征. 级配碎石设计方法研究[硕士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2006.(LU Huazheng. Design method of graded gravel[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.(in Chinese))
- [8] 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): 950 – 954.(QIU Xiande, YAN Zongling, LIU Li, et al. Effect of particle size characteristics on seepage property of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 950 – 954.(in Chinese))
- [9] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 21 – 26.(KONG Lingwei, LI Xinming, TIAN Hunan. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 21 – 26.(in Chinese))
- [10] 魏进兵, 邓建辉, 谭国焕, 等. 泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和水力学参数的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 327 – 330.(WEI Jinbing, DENG Jianhui, TAN Guohuan, et al. Field tests of saturated and unsaturated hydraulic parameters of gravelly soil in Xietan landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 327 – 330.(in Chinese))
- [11] 樊贵盛, 邢日县, 张明斌. 不同级配砂砾石介质渗透系数的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(3): 374 – 378.(FAN Guisheng, XING Rixian, ZHANG Mingbin. Experimental study on permeability of the sandy gravel media with different gradation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3): 374 – 378.(in Chinese))
- [12] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264 – 2271.(XU Jiancong, SHANG Yuequan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264 – 2271.(in Chinese))
- [13] 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): 133 – 136.(TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, DONG Cheng. The prediction of seepage coefficient of coarse-grained soil by neurotic network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.): 133 – 136.(in Chinese))
- [14] 朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2569 – 2574.(ZHU Guosheng, ZHANG Jiafa, CHEN Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2569 – 2574.(in Chinese))
- [15] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB神经网络43个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 207 – 211.(WANG Xiaochuan, SHI Feng, YU Lei, et al. 43 cases of MATLAB neural network analysis[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013: 207 – 211.(in Chinese))