

DOI: 10.11779/CJGE201502023

# 粗粒土渗透试验缩尺原则与方法探讨

谢定松, 蔡 红, 魏迎奇, 李维朝

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘 要:** 试验规程规范对渗透试验的超粒径缩尺方法没有明确规定。探讨渗透试验超粒径缩尺方法具有现实意义。通过室内试验, 揭示了粗粒料不同缩尺方法对渗透试验结果的影响, 提高试验成果的合理性。试验结果表明: 相似级配法常用于力学强度试验, 但不适用于渗透试验; 等量替代法只是用中间粒径替代了超粒径部分, 建议渗透试验缩尺时能尽量保持 30%~40% 细粒含量不变, 以减少细粒含量变化对渗透系数的影响。

**关键词:** 渗透试验; 超径处理; 缩尺方法; 渗透系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)02-0369-05

**作者简介:** 谢定松(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程渗流控制及安全评价方面研究。E-mail: xieds@iwhr.com。

## Scaling principle and method in seepage tests on coarse materials

XIE Ding-song, CAI Hong, WEI Ying-qi, LI Wei-chao

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** China's code for seepage tests does not specify the scaling method for oversize treatment, and this problem will disturb testers. The discussion of scaling method for the oversize treatment is of practical significance. The impact of scaling method for the oversize treatment of the results of seepage tests is revealed through laboratory experiments so as to improve the rationality of the test results. The results show that the similar grading method is commonly used in the mechanical strength tests, but not suitable for seepage tests. The equivalent alternative method is only used in the situation that the middle size substitutes the oversize portion. It is suggested that the oversize treatment of seepage tests should keep 30%~40% of fine content unchanged in order to reduce the impact of changes of the fine content on permeability coefficient.

**Key words:** seepage test; oversize treatment; scaling method; permeability coefficient

## 0 引 言

土工试验规程中对于土的分类规定, 粒径在 0.075~60 mm 之间的粗粒组质量大于总质量 50% 的土称为粗粒类土, 简称为粗粒土。这类材料广泛用于工程建设中, 如堆石坝中的各类堆石料, 面板坝中的各类堆石料, 作为大坝填筑料, 其渗透系数是大坝设计分区方案及渗流计算分析的重要参数。渗透稳定是土的重要性质之一, 包括渗透变形型式和抗渗强度两个方面, 变形型式反映内部结构的稳定程度, 抗渗强度代表土体承受水头的能力, 是渗流控制设计方案的依据。

现在大坝填筑材料或坝基覆盖层料最大粒径可达 800 mm, 而试验室中的渗透变形试验仪器直径一般为 30 cm 或 40 cm, 若不对试验级配曲线进行缩尺, 试验室将无法开展试验工作。现有试验规程基于力学强度等效的研究成果对缩尺问题提供了剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法 4 种处理方法, 并在条文说明中提出“对于渗透变形等试验, 超粒径处理是否可

参照进行, 尚有待于试验验证”。目前, 有关缩尺方法对力学强度影响的研究成果比较多, 而对渗透试验的超粒径缩尺方法的研究至今很少, 傅华等<sup>[1]</sup>研究了堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响, 朱国胜等<sup>[2-3]</sup>研究了宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究, 已有的研究成果主要探讨了等量替代法、相似级配法、混合法对渗透试验结果的影响<sup>[5]</sup>, 但对渗透试验的缩尺方法没有明确而且可靠的论述, 因而渗透试验的缩尺方法是困扰试验人员多年的技术难题, 试验方法的正确与否直接影响试验成果的可靠性, 探讨超粒径缩尺方法具有现实意义。

本文主要探讨渗透试验的超粒径缩尺方法。首先论证土中细颗粒含量对渗透系数的影响分析, 其次通过不同缩尺方法渗透试验结果分析, 最后提出适合渗

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB047004)

收稿日期: 2014-05-20

透试验的超粒径缩尺方法。

## 1 土中细颗粒对渗透系数的影响分析

### 1.1 渗透系数影响因素

近几十年来,许多学者在揭示影响和决定土的渗透系数内在因素及其相互关系方面进行了大量工作,其中研究的核心问题是对天然不均匀土,如何概化为等效的均匀土,并取得了一些成果,比较能够反映土的上述特性,而且具有一定适用价值的有以下4种方法<sup>[4]</sup>。

#### (1) 哈增公式(1911年)

$$K = Cd_{10}^2, \quad (1)$$

式中,  $d_{10}$  为有效粒径 (cm),  $C$  为系数,  $C=AB$ , 其值为 100~150。本法适用于  $C_u < 5$  的均匀中细砂。

#### (2) 扎乌叶布列公式(1932年)

$$K_{18} = C \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2 (C=135-350)。 \quad (2)$$

#### (3) 巴甫契奇公式(1976年)

$$K_{15} = (93 \sim 267) \sqrt[3]{C_u} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2。 \quad (3)$$

#### (4) 刘杰公式(1982年)

$$K_{10} = (106 \sim 234) n^3 d_{20}^2, \quad (4)$$

式中, 系数 106 适用于人工碎石土, 系数 234 适用于天然砂砾土,  $K_{10}$  为温度为 10℃ 时的渗透系数 (cm/s);  $d_{20}$  为等效粒径 (cm)。

从上述计算公式可知, 渗透系数的主要影响因素是等效级配和压实干密度, 同时表明, 颗粒组成中决定渗透系数的关键粒径是细粒部分。

### 1.2 <5 mm 颗粒含量对渗透性影响分析

工程实践中多习惯以 <5 mm 粒径的含量评定粗粒土的渗透性质, 为了摸清天生桥面板坝碎石料渗透性与细粒含量的关系, 专门对粒径 <5 mm 的颗粒含量相同, 但 <5 mm 颗粒级配不同的碎石料进行了渗透试验。粒径 <5 mm 颗粒含量分别为 55% 和 35%, 但特征粒径  $d_{20}$  各不相同的各类土料, 图 1 为渗透试验用料级配曲线, 其渗透及渗透变形试验结果见表 1。从试验结果可知, 粒径 <5 mm 颗粒的含量虽然相同, 随着 <5 mm 颗粒含量的增加, 它的细料组成的变化范围增大, 致使各试样的渗透系数差别很大。如图 1, 当粒径 <5 mm 颗粒含量为 55%, 若 <5 mm 的颗粒组成不同时渗透系数可相差 2 个数量级。随着粒径小于 5 mm 颗粒含量的减小, <5 mm 的细料组成的可能变化范围相应减小, 当 <5 mm 的颗粒含量为 35%, 但粒径组成并不相同, 此时各类土的渗透系数也就趋于接近, 这一结果与砂砾石料的渗透特性相一致, 表明碎石料的渗

透系数主要取决于 <30% 的粒径组成, <5 mm 的颗粒含量不能准确地反映土的渗透系数。各类粗粒土的渗透系数主要决定于 <30% 细粒土的渗透系数。

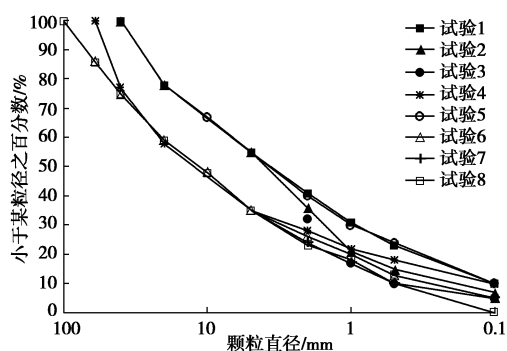


图 1 各类土试验用料级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of test materials

### 1.3 土中 30% 的细粒含量对土的渗透系数影响分析

如前所述, 对多级配的不均匀土, 在土体的孔隙大小方面, 颗粒组成中起决定作用的是细颗粒的粒径。细料中掺入适当的粗颗粒, 只起增加土的密度, 减小孔隙率的作用, 对渗透系数的大小, 起主要作用的仍然是细颗粒。用两种均匀土的掺合试验就可阐明这一问题。图 2 为两种级配完全不同的土料相互掺合后渗透系数试验结果, 充分表明了细颗粒在土体中对渗透系数占有的主导作用。图 2 表明了 3 个问题: ①粗料 5~10 mm 的砾石中掺入 0.2~1.0 mm 的中砂, 含量达 28%~33%, 细颗粒完全充满了粗颗粒孔隙, 此时混合土体密度最大最密实, 细料开始起主要作用, 但孔隙率小于中砂, 因而渗透系数稍小于中砂; ②细颗粒含量为 28%~33% 时粗细混合体的渗透系数最小, 表明土体的组成处于最佳状态; ③当中砂含量大于 28%~33% 时中砂开始起主导作用, 继续掺入中砂, 渗透系数不再有明显变化, 当中砂含量 > 70% 后, 混合体的渗透系数即为中砂的渗透系数。这一试验结果表明, 土的渗透系数决定于 30% 的细料的渗透系数。

### 1.4 控制土的渗透系数的代表性粒径

如上所述, 决定土的渗透系数的主要粒径是 <30% 的细粒粒径, 细粒粒径中能起控制作用是 70% 的粒径, 它在混合料中所占比例是  $0.7 \times 0.3 = 0.21$ , 因此等效粒径应为占 21% 含量的粒径, 即  $d = d_{21} \approx d_{20}$ 。

## 2 渗透试验缩尺的原则与方法

通常土料中超粒径颗粒 (超过试验仪器允许的粒径) 的处理方法有剔除法、等量替代法、相似级配法、混合法 4 种方法。由于剔除法和混合法在渗透试验缩尺中将大大改变细粒含量, 这两种方法在渗透试验中基本不使用。相似级配法尽管能保持土体不均匀系数  $C_u$  不变, 但改变了细粒含量, 对渗透系数将产生影响。

表 1 各类试样的渗透特性试验结果  
Table 1 Seepage results of test materials

试验编号	<5 mm 含量/%	<0.1mm 含量/%	$d_{20}$ /mm	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$n/\%$	$k / (10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$
试验 1	55	10	0.35	2.00	25	7.04
				2.13	20	3.13
				2.15	19	1.18
试验 2	55	7	0.80	2.01	24	12.2
试验 3	55	5	1.10	2.15	19	9.8
试验 4	35	5	1.35	2.11	20	27.0
试验 5	55	10	0.30	2.15	19	8.82
试验 6	35	5	1.00	2.17	20	0.44
				2.17	20	0.76
				2.22	19	4.01
试验 7	35	10	0.72	2.22	19	5.28
				2.28	15	1.28
				2.32	15	1.05
				2.32	15	3.74
试验 8	35	0	1.35	2.18	20	31.5
				2.22	19	26.3

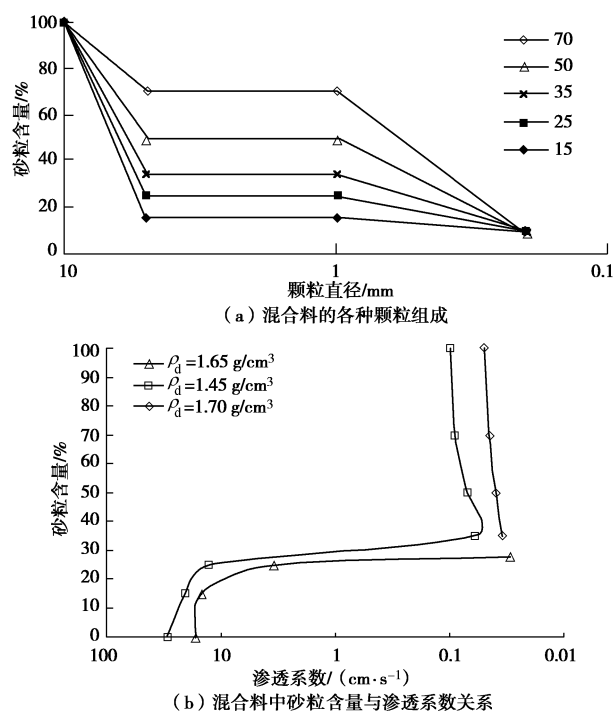


图 2 土的渗透系数与细颗粒含量的关系

Fig. 2 Distribution of permeability coefficient along fine particle content of test materials

对于等量替代法, 规程建议<5 mm 细粒含量不变, 超径部分根据仪器直径确定代替土的  $d_{85}$  粒径, 然后等量代替。由于 30%细粒含量是影响渗透系数的重要因素, 由上述可知当<5 mm 细粒含量小于 30%时, 用这种等量替代法将影响  $d_{20}$  的含量, 将改变渗透系数。因此, 渗透试验试样应尽量采用原级配曲线, 若受仪器尺寸的影响需进行缩尺处理时, 应遵循尽量保持 30 %细粒含量不变的原则, 对一定含量的超径颗粒采用等量替法处理, 保证做到 30%的细粒含量不变。本文主要研究相似级配法及等量代替法。等量代替法主要研究合理的代替粒径及最大的允许代替量。试验仪器

为  $\phi 30 \text{ cm}$  的管涌渗透仪, 代替后的颗粒级配中  $d_{85}$  的粒径应是  $d_{85} \leq 60 \text{ mm}$ 。

3 不同缩尺方法渗透试验结果

以清远抽水蓄能心墙堆石坝上库过渡料为研究对象, 原级配曲线 (S1) 见图 3, 最大粒径为 200 mm, <5 mm 细粒含量为 17.0%, 不均匀系数  $C_u$  为 17.2。室内仪器为  $\phi 30 \text{ cm}$  的垂直渗透变形仪, 存在超径问题, 对超径颗粒的处理采用了上述方法, 原级配和缩尺后的试验级配曲线见图 3, 级配特征表见表 2。

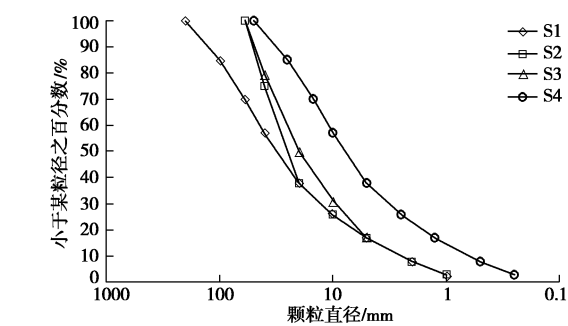


图 3 原级配及缩尺后试验级配曲线

Fig. 3 Original and scaled gradation curves  
表 2 原级配及缩尺后试验级配曲线特征粒径

Table 2 Characteristic particle sizes of original and scaled gradation curves

级配 曲线	$d_{85}$ /mm	$d_{20}$ /mm	$d_{15}$ /mm	$d_{10}$ /mm	$C_u$	<5 mm 含量/%
S1	100.0	6.5	4.1	2.5	18.0	17.0
S2	48.0	6.5	4.1	2.5	12.0	17.0
S3	45.0	5.7	4.1	2.5	10.0	17.0
S4	26.0	1.6	1.0	0.6	18.0	38.0

第一种缩尺方法是<20 mm 细粒含量不变的等量

替代法, 即对超过 60 mm 的颗粒用 20~60 mm 等量替代 (级配曲线 S2), 替代后  $d_{85}$  为 48.0 mm。

第二种缩尺方法是<5 mm 细粒含量不变的等量替代法, 即对超过 60 mm 的颗粒用 5~60 mm 等量替代 (级配曲线 S3), 替代后  $d_{85}$  为 45.0 mm。

第 3 种缩尺方法是相似级配法, 即满足不均匀系数不变的方法, 两曲线的不均匀系数为 18, 将最大粒径按 4 倍缩尺 (级配曲线 S4), 替代后  $d_{85}$  为 26.0 mm。这种方法缩尺后级配曲线的颗粒组成跟原级配曲线差异较大, 级配明显变细, 缩尺后<5 mm 的细粒含量达 38.0%, 远大于原级配含量 17.0%。

表 3 为原级配及缩尺后渗透试验结果表。表 3 表明, 采用相似级配法, 渗透系数明显减小, 相差一个数量级之多, 显然该方法是不合理的。

表 3 原级配及缩尺后渗透试验结果表

Table 3 Test results of original and scaled gradation curves		
级配曲线编号	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数 $k_{20}$ /(cm·s <sup>-1</sup> )
S2	2.10	0.950
S3	2.10	0.730
S4	2.10	0.066

图 4 为文献[3]原级配及超径处理后级配曲线, 表 4 为超径处理方法渗透性对比试验成果表, 其中 SC1 为原级配曲线, SC2 只代替 30% 的粗颗粒, 70% 的细粒不变, SC3 为规程推荐的等量替代法, 其结果是保持 15% 的细颗粒含量不变, 以上部分按相应的比例缩小, 但 30% 的粒径缩尺只 1.3 倍, 变化不大, SC4 为最大粒径按 2 倍缩尺的相似级配法, SC5 为最大粒径按 4 倍缩尺的相似级配法。

由于等量代替法中 SC2 只代替了 30% 的粗料, 因而渗透系数没有变化, SC3 虽然 85% 的粗颗粒都有变化, 但 30% 细粒粒径只缩小约 1.3 倍,  $d_{20}$  变化不大, 因而渗透系数同样无明显的变化。相反, 相似级配法的差别比较显著, 最大差值达到 10 倍之多, 进一步说明相似级配法对渗透试验是不适用的。

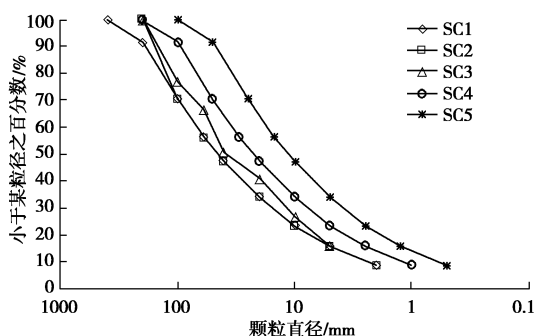


图 4 原级配及缩尺后试验级配曲线  
Fig. 4 Original and scaled gradation curves

表 4 原级配及缩尺后渗透试验结果表

Table 4 Test results of original and scaled gradation curves			
级配曲线 编号	渗透仪直径 /cm	渗透系数 $k_{20}$ /(cm·s <sup>-1</sup> )	$R_s$
SC1	94.0	0.194	1.00
SC2	60.0	0.230	1.19
SC3	60.0	0.237	1.22
SC4	60.0	0.362	0.19
SC5	32.0	0.200	0.10

## 4 不同缩尺方法渗透试验结果分析

### 4.1 试验结果分析

从表 3 及表 4 原级配及缩尺后渗透试验结果可知:

(1) 不同的缩尺方法造成试验级配不同, 从而影响渗透系数。

(2) 采用相似级配法缩尺后, 这种缩尺方法后测得的渗透系数明显低于保持细粒含量不变的缩尺方法得到的渗透系数, 相差约 10 倍。主要原因在于级配曲线跟原级配曲线差异较大, 虽然  $C_u$  保持不变, 但细粒含量及细粒粒径均产生了很大的变化, 进一步表明, 决定渗透系数的主要因素是细粒粒径, 而细粒含量是影响渗透系数的重要因素。缩尺倍数越大, 差异就越大。因此, 相似级配法常用于力学强度试验, 但不适用于渗透试验。

(3) 等量代替法只要保证 30% 的细粒粒径不变, 其渗透性与原级配可以达到基本相一致。若保证 40% 的细颗粒粒径不变, 则可保证用等量代替法求得的渗透系数与原级配相一致。

### 4.2 等量代替方法结果综合分析

在以上试验资料所得结果的基础上, 并作以下综合分析:

已有研究结果表明<sup>[6]</sup>, 粗粒土的性质, 可由 30% 的粒径含量将其分为粗粒和细粒两部分, 其中 70% 是粗粒, 按照建议, 等量代替法只能采用适合仪器尺寸的较小粒径相代替, 粗粒代替量只占 60%, 这表明, 代替后的混合料中, 粗粒部分中仍有 10% 的原有的颗粒组成。分析代替料 70% 的粗粒料中原有粒径所占的比重, 亦即可起的作用。以 70% 的粗粒料为母体, 其中只有 10% 是原有的颗粒粒径, 10% 的原始颗粒组成了 70% 粗粒中原细粒粒径。若以 70% 的粗粒作为总体, 分析 10% 在其中的作用, 可得细料的作用为  $\frac{10}{70} \approx 15\%$ 。

对粗粒土由 30% 将其分成粗细两部分后, 粗粒部分的不均匀系数一般都是  $C_u < 10$ , 由太沙基的反滤设计准则<sup>[7]</sup>可知, 对于均匀土,  $d_{15}$  可以作为确定土的孔隙大小的等效粒径。由此分析可知, 粗粒土中将粗粒中的 60% 由较细的粒径来代替, 不会影响粗粒土的孔

隙尺寸, 也不会影响粗粒土本身的渗透系数, 因而不会影响整个混合料的原始渗透系数。

## 5 结 论

规程规范对渗透试验的超粒径缩尺方法没有明确规定, 这问题将困扰试验人员, 影响试验成果, 探讨超粒径缩尺方法具有现实意义。通过对比不同缩尺方法对渗透试验结果的影响分析, 得出渗透试验缩尺应遵守的基本原则:

(1) 采用相似级配法缩尺后测得的渗透系数明显低于原级配土的渗透系数, 主要原因在于级配曲线中细粒的颗粒组成跟原级配曲线差异较大, 缩尺倍数越大, 细粒的组成差异就越大。因此, 相似级配法不适用于渗透试验。

(2) 土的渗透系数主要取决于土的颗粒组成, 特别是含量<30%的细粒颗粒组成。为确保缩尺方法求得的渗透系数等于原级配的渗透系数, 等量代替法必须至少保持30%的细颗粒级配不变化。从安全可靠出发, 建议等量代替法最多只能代替60%的粗颗粒, 保证40%的细粒粒径不变化。

(3) 试验缩尺后的颗粒组成应是 $5d_{85}$ 等于试验仪器的最大尺寸, 颗粒粒径 $d_{40\text{试}}=d_{40\text{原}}$ 。

(4) 由于研究的试样有限, 所得结论还需更多的试验资料来验证。

### 参考文献:

- [1] 傅 华, 韩华强, 凌 华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2645 - 2649. (FU Hua, HAN Hua-qiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2645 - 2649. (in Chinese))
- [2] 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 Guo-sheng, ZHANG Jia-fa, CHEN Jin-song, et al. Study of size of wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2569 - 2574. (in Chinese))
- [3] 朱国胜, 张家发, 张 伟, 等. 宽级配粗粒料渗透试验方案探讨[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(增刊): 10 - 13. (ZHU Guo-sheng, ZHANG Jia-fa, ZHANG Wei, et al. Discussion of seepage test method for broadly graded coarse material[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(S0): 10 - 13. (in Chinese))
- [4] 刘 杰. 土的渗透稳定性与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (LIU Jie. Seepage stability and seepage control of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 酆能惠, 朱 钱, 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, **19**(2): 40 - 43. (LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, **19**(2): 40 - 43. (in Chinese))
- [6] 刘 杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams theoretical basis, engineering experiences and lessons[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [7] 太沙基 K, 泼克 R. 工程实用土力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1960. (TERZAGHI Karl, PECK Ralph B. Soil mechanics in engineering practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 1960. (in Chinese))