

宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究

朱国胜^{1,2}, 张家发^{1,2}, 陈劲松^{1,2}, 胡智京^{1,2}

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2. 长江科学院 国家大坝安全工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘 要: 尺寸效应及边壁效应是粗粒土渗透试验中的常见问题。采用一系列渗透试验, 研究了粗粒料渗透试验的尺寸效应规律, 提出了渗透仪尺寸的选择原则, 即渗透仪直径与试验材料 d_{85} 之比值不宜小于 6; 研究了不同的超径颗粒处理方法对渗透试验成果的影响, 分析表明, 对超径颗粒可以适度采用等量替代法, 不宜采用相似级配法; 研究了仪器护壁处理厚度对仪器边壁处理效果的影响, 提出了确定护壁处理厚度的建议。

关 键 词: 渗透试验; 尺寸效应; 边壁效应; 超径处理

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials

ZHU Guo-sheng^{1,2}, ZHANG Jia-fa^{1,2}, CHEN Jin-song^{1,2}, HU Zhi-jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. National Research Center for Dam Safety Technology, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Size effect and wall effect are very common problems in seepage test of broadly graded coarse materials. A series of seepage tests are performed. The size effect is analyzed and the principle for apparatus size selection is studied. It is proposed that the apparatus diameter is not less than 6 times of test material's d_{85} . Effects of different methods for treating grains of size over limit on permeability test results are discussed. It is concluded that carefully taking equivalently alternative method is acceptable; while scale method is not. The wall effect is discussed and the thickness of wall treatment layer is proposed.

Key words: seepage test; size effect; wall effect; oversize treatment

1 引 言

宽级配粗粒土在自然界是很常见的, 人工爆破碎石料、岩石开挖料等也成为宽级配土。这些材料在工程建设中得到了广泛应用, 作为大坝填料, 其渗透系数是衡量材料适用性的重要参数。关于粗粒土的分类, 目前有多种方法。在我国, 习惯上用 5 mm 作为分界粒径, 将小于 5 mm 的颗粒称为细料, 大于 5 mm 的颗粒称为粗料, 含量用 P5 表示^[1]。土工试验规程中对于土的分类^[2]规定, 粗粒组 (粒径在 0.075~60 mm 之间) 质量大于 50% 的土为粗粒类土, 简称粗粒土。

关于粗粒土的渗透试验方法, 国内有相关规程规范可循^[2-3], 但现有试验规程远不能覆盖宽级配

粗粒料, 对渗透试验方法的论述也不够明确, 相关条款的理论依据或试验论证不足, 为此, 文献[4]对宽级配粗粒料渗透试验方法进行了探讨, 指出了研究工作的思路 and 目前主要存在的 3 方面的问题, 本文主要针对以下 2 方面的问题开展研究。

(1) 渗透试验的尺寸效应。由于粗粒料的宽级配特性和试验仪器尺寸的限制, 试验中超径问题几乎是不可避免的, 有文献资料对粗粒土尺寸效应进行了研究, 主要针对的是仪器尺寸对变形特性^[5]、压实密度^[6]、强度的影响^[7-8], 但对渗透性的影响研究却未见报导, 其主要原因是进行大尺度渗透试验存在较大的困难。为克服渗透试验尺寸效应, 首先必须有高压、大流量的供水设备, 对试验室供水、供压有非常高的要求, 一般试验室条件难以达到。

收稿日期: 2012-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50679004); 国家“十一五”科技支撑计划 (No. 2008BAB29B02); 国家“十二五”支撑计划课题 (No. 2011BAB10B04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (No. YWF0909)。

第一作者简介: 朱国胜, 男, 1972 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工渗流及地下水环境方面的研究工作。E-mail: aazhuu@126.com

其次,需要特制大型渗透试验仪,按规程^[3]规定,圆筒渗透仪内径应大于试样最大粒径的10倍。但这样苛刻的条件在实际工作中是难以达到的。行业试验规程^[2]规定,试验模型截面直径或边长应该不小于试样粒径特征值 d_{85} 的4~6倍(d_{85} 为粒径曲线纵坐标上小于某粒径含量为85%所对应的粒径,其余类推),当常规仪器尺寸不满足要求时,应设计加工大仪器,或根据试样情况,对最大允许粒径以上的粗粒进行处理。为此,试验规程基于力学强度等效的研究成果提供了剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法4种处理方法,同时规程也强调:“对于渗透变形等试验,超粒径颗粒处理是否可参照进行,尚有待于试验验证”。这说明,深入研究试验尺寸的确定原则和超粒径颗粒的处理方法是非常必要的。

(2) 仪器边壁效应。由于渗透仪光滑内壁与试样之间的接触远不同于试样内部颗粒之间的接触关系,可能在仪器壁面附近造成集中渗流,给试验结果带来影响。这种影响对粗粒土尤其明显,若不加处理,可能会成为影响试验成果的关键因素。试验规程^[3]的条文说明中也强调:“关于边壁处理的方法,目前均在摸索阶段”。对于粗粒土,在试验之前一般都会根据经验对渗透仪的边壁进行护壁处理,以尽量保证试验材料与仪器边壁接合紧密。但边壁处理的原则缺少相应的依据,本文尝试建立边壁处理厚度与试验材料的特征粒径之间的关系。

2 渗透试验尺寸效应研究

2.1 试验方法

针对同一种级配的材料及相应的密度,采用一系列不同尺寸渗透仪进行对比试验,探求渗透仪尺寸的变化对渗透系数的影响。长江科学院自2006年使用了高压力、大流量渗流试验供水设备,以及系列不同尺寸的渗透仪,针对水布垭面板坝、寺坪面板坝及以深厚覆盖层和围堰堰体材料的渗透特性进行了深入研究^[9-12]。

关于细粒土渗透系数的取值方法,试验规程^[3]规定,在测得的结果中取3~4个在允许差值范围内的数值,求其平均值(允许差值不大于 2×10^{-n} cm/s,其中 n 为渗透系数的量级)。而对于粗粒土则没有给出渗透系数的确定方法。由于粗粒土渗透系数的离散程度比细粒土要大些,按照细粒土渗透系数的确定方法显然有很大难度,其允许差值范围宜适当放宽。本文取在 $\lg J - \lg V$ 曲线直线段上的试验点渗透系数平均值作为渗透系数值,其中 J 为比降, V 为

流速。

为了进行对比,每组渗透试验试样装填密度、试样饱和、试验时间、渗透比降设定基本一致,以便消除试验过程不同而带来的影响。为了保证试验成果的可靠性,每组试验均进行两个以上的平行试验。为了消除边壁效应的影响,在渗透仪内表面涂上厚度约4 mm的水泥,待水泥半凝固后装入试样,水泥完全凝固后试样与仪器内表面则能较好地结合。

2.2 试验材料及仪器

试验材料的选取综合考虑了实验室的条件和试验的难度。定义渗透仪尺寸与试样 d_{85} 的比值为粒径比 S 。在实验室现有设备条件下,使 S 值超出现有试验规程的上限和下限,以便得到尺寸效应规律。本文采用的是一种典型的级配连续粗粒土,即水布垭面板堆石坝垫层料IIA下包线^[13],其级配特性见图1,最大粒径为80 mm, d_{85} 为54.29 mm,不均匀系数达53.65。采用的渗透仪直径 ϕ 分别为20.0、30.8、45.0、60.0、94.0 cm,相应的 S 值分别为3.63、5.67、8.05、11.05和17.31。试样按干密度为2.20 g/cm³击实。

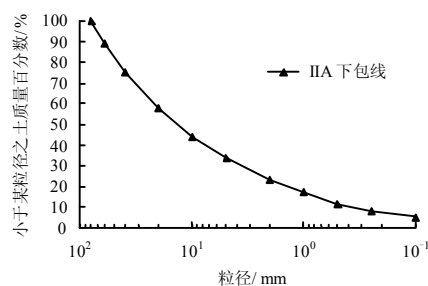


图1 尺寸效应研究试验用料级配曲线

Fig.1 Gradation curve of test material for size effect

2.3 试验成果及分析

本文以渗透性为主要研究对象,因此,试验不一定进行到试样发生渗透变形。但为了绘制比降-流速曲线($\lg J - \lg V$ 曲线),要求试验的水头不少于5级,且均为达西流,取 $\lg J - \lg V$ 曲线直线段上的试验点处的渗透系数平均值作为渗透系数值,典型 $\lg J - \lg V$ 曲线见图2(试验代号为C5),试验成果统计见表1。

从 $\lg J - \lg V$ 曲线以及试验现象来看,有一部分试样在结束时没有发生渗透变形,有一部分发生了渗透变形,但试样在发生渗透变形之前,有明显的直线段,倾斜角呈45°,表明渗流符合达西流。同

一组平行试验的差值不大，均在同一个量级，一般小于 2×10^{-n} cm/s，表明平行试验的离散度小，成果可靠，可以取平行试验渗透系数的算术平均值作为该组试验的渗透系数值。

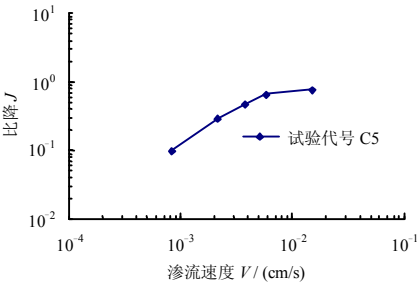


图 2 典型 $\lg J\text{-}\lg V$ 试验结果曲线
Fig.2 $\lg J\text{-}\lg V$ curve of typical test result

表 1 渗透性试验成果表
Table 1 Permeability test results

试验代号	渗透仪直径 / cm	渗透系数平均值 K_{20} / (cm/s)
C1	19.7	6.07×10^{-4}
C2	30.8	2.25×10^{-3}
C3	43.7	5.47×10^{-3}
C4	60.0	7.25×10^{-3}
C5	94.0	8.60×10^{-3}

以渗透仪的直径 ϕ 作为横坐标，渗透系数作为纵坐标，绘制成渗透仪直径与试样渗透系数关系曲线，见图 3。

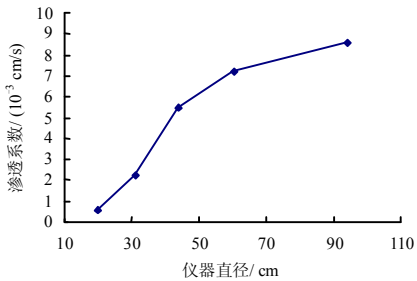


图 3 仪器直径与渗透系数测值关系曲线
Fig.3 Relationship curve of permeability coefficient vs. apparatus diameter

从图 3 中可以看出，材料的渗透系数随着 ϕ 的增大而增加，但增加的速率越来越缓。造成这种现象的原因，与粗颗粒在过水断面中占有的相对面积大小有关，由于粗颗粒自身的渗透性极小，当 S 值

较小时，单个粗颗粒的截面就可能在试样断面中占有较大比例，从而导致渗透系数偏低。随着 S 值增大，粗颗粒在试样断面中占有的面积相对减小，颗粒的分布对渗透系数的影响也越来越小，其渗透系数也越来越接近材料的真实值。

试验 C5 中， S 值为 17.31，比试验规程上限值的 10 倍还要超出许多，受尺寸效应的影响很小，因此，可以近似认为试验 C5 所测渗透系数是真实值，以此作为评价其他试验成果的参考，表 2 给出了真值与各组试验渗透系数的比值 R 。不妨称 R 为尺寸效应率， R 为大于或等于 1 的无量纲值， R 值越大，尺寸效应程度越大。

以 S 值作为横坐标，以尺寸效应率 R 为纵坐标，绘制成图 4 的曲线，可以看出尺寸效应规律。

表 2 渗透仪直径对渗透系数的影响关系表
Table 2 Relationship between diameter of seepage apparatus and permeability coefficient

试验代号	渗透仪直径 / cm	径径比 S	尺寸效应率 R
C1	19.7	3.63	14.2
C2	30.8	5.67	3.6
C3	43.7	8.05	1.6
C4	60.0	11.05	1.2
C5	94.0	17.31	1.0

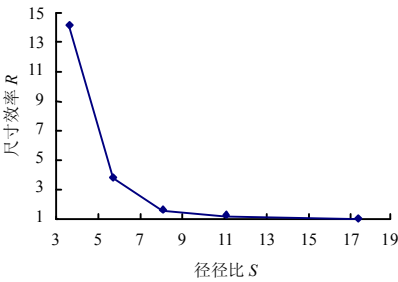


图 4 尺寸效应率 R 与径径比 S 的关系曲线
Fig.4 Relationship curve of size effect rate R vs. the ratio S between apparatus diameter and d_{85} of material gradation

从图 4 可以看出，尺寸效应率 R 随着 S 值的增大而减小，当 $S = 4.0$ 时，尺寸效应仍较明显， $R > 10$ ，说明渗透系数与真实值相差达一个数量级；当 $S = 6.0$ 时， $R < 3.8$ ，渗透系数与真实值的差别已经在一般成果的离散范围；当 $S = 8.0$ 时， $R < 2.0$ ，尺寸效应已不明显，渗透系数与真实值的差别可以忽略。可见，试验规程建议的 4~6 倍，其下限显得偏低。建议用上限控制，即渗透仪直径与试验材料 d_{85} 之比不小于 6.0，有条件时宜尽量采用 8.0。

3 渗透试验超径颗粒处理方法研究

由于剔除法和混合法在渗透试验中较少采用，本文主要针对其中的等量替代法和相似级配法的影响进行研究。为了使试验成果尽可能逼近填料的特性，在采用等量替代和级配相似方法时遵循两个重要原则：①替代处理后的 d_{85} 小于仪器直径或边长的 1/4；②尽量维持不均匀系数 C_u (d_{60}/d_{10}) 不变。由于超径处理方法研究与本文第 2 部分研究同时进行，第①条仍然沿用了现有规范的规定，第②条是为了维持材料的宽级配特性。

超径处理方法的研究以水布垭ⅢB 主堆石料为研究对象比较合适，级配见表 3，其上包线级配 d_{85} 为 168.1 mm，采用垂直渗透测试仪，对于内径为 94 cm 的大型渗透仪，采用全级配料试验（试验代号 SC1）也是基本满足试验规程要求的，不存在超径问题。

表 3 超径处理方法研究试验材料级配
Table 3 Gradation of materials in test of oversized treatments

粒径 /mm	土质量百分数 /%	粒径 /mm	土质量百分数 /%
400.0	100.0	32.00	42.0
200.0	91.8	20.00	34.1
150.0	81.2	10.00	23.1
100.0	70.5	5.00	15.6
60.0	56.3	2.00	8.8
40.0	47.2	<0.25	8.9

对于内径为 60.0 cm 的垂直渗透仪，存在超径问题，需要对超径颗粒进行处理。控制最大粒径不大于 200.0 mm，对超径颗粒的处理采用了 3 种方法，原级配和超径处理后的级配曲线见图 5，级配特征值见表 4。

第 1 种方法为局部替代，即对超过 100.0 mm 的部分颗粒以 100.0~200.0 mm 之间的颗粒按照比例进行替代（试验代号 SC2），替代后的 C_u 和 C_c 均未发生变化，而 d_{85} 则减小为 149.1 mm，采用直径为 60.0 cm 的渗透仪可满足规范要求。

第 2 种方法为规程推荐的等量替代法，即对超过 100.0 mm 的部分颗粒以 5.0~200.0 mm 之间的颗粒按照比例进行替代（试验代号 SC3）。这样替代后的 C_u 和 C_c 均发生了变化， d_{85} 减小为 121.6 mm，采用直径为 60.0 cm 的渗透仪可满足规范要求。

第 3 种方法为相似级配法，将最大粒径按 2 倍（试验代号 SC4）及 4 倍（试验代号 SC5）缩尺，最

大粒径由 400.0 mm 缩减为 200.0 mm 和 100.0 mm，缩尺后 d_{85} 分别减小为 84.0 mm 和 43.4 mm，分别采用直径为 60.0 cm 和 32.0 cm 的渗透仪可满足规范要求。虽然 C_c 未发生变化， C_u 的变化极小，缩尺后的级配与原级配的细粒含量有较大的差异，且缩尺倍数越大，差异越大。

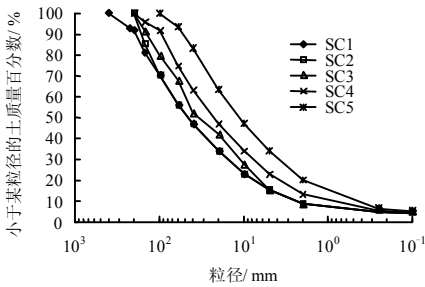


图 5 原级配和超径处理后级配曲线
Fig.5 Curves of original and treated gradation

表 4 原级配和超径处理后级配特征值
Table 4 Characteristic values of original and oversized treated gradation

级配线	d_{85} /mm	d_{60} /mm	d_{30} /mm	d_{10} /mm	C_u	C_c	<5 mm 颗粒 含量/%
SC1	168.1	70.4	16.3	2.5	27.8	1.5	15.6
SC2	149.2	70.4	16.3	2.5	27.8	1.5	15.6
SC3	121.6	49.7	11.5	2.5	19.6	1.1	15.6
SC4	84.0	35.8	8.1	1.3	28.2	1.5	23.1
SC5	43.4	17.9	4.1	0.7	25.6	1.4	34.1

为了保证试验成果的可靠性，每组试验均进行两个以上平行试验，超径处理方法对比试验成果统计见表 5。表中也列出了各试验的渗透系数测值与原级配（SC1）渗透系数测值的比值 R_s 。

表 5 超径处理方法渗透性对比试验成果表
Table 5 Permeability test results of different methods to treat grains of size over limit

试验代号	渗透仪直径 /cm	渗透系数平均值 K_{20} /(cm/s)	R_s
SC1	94.0	1.94×10^{-1}	1.00
SC2	60.0	2.30×10^{-1}	1.19
SC3	60.0	2.37×10^{-1}	1.22
SC4	60.0	3.62×10^{-2}	0.19
SC5	32.0	2.00×10^{-2}	0.10

试验 SC1 采用的是全级配料，渗透仪直径 ϕ 与 d_{85} 接近 6，可以认为，SC1 的成果代表了该种材料的真实渗透特性，从上述不同替代方法与 SC1 的成

果比较，可以得到如下规律：

（1）超径处理后的试验成果与真实值均有不同的差异，不同的替代方法对试验成果的影响不同。

（2）SC2 对含量为 8.2% 的 200.0 mm 以上颗粒进行替代处理，SC3 对含量为 29.5% 的 100.0 mm 以上颗粒进行替代处理。两种等量替代方法处理后的级配，渗透系数值差别很小，略大于原级配试验结果。一般认为，细粒料含量对渗透系数起控制作用^[14]，这两种替代方法都保持细料含量不变，只是用中间粒径替代了超径部分，这在一定程度上增加了试样的孔隙性，才使得渗透系数值大于原级配试验值，但差别在可接受范围内。在超径颗粒含量不大的情况下，采用局部替代方法可以尽量避免对材料特性带来的影响。毫无疑问，被替代的颗粒含量越大，超径处理后试验结果与原级配料特性的差异越大。

（3）采用相似级配法处理后测得的渗透系数值明显低于原级配试验值，相差达一个量级。缩尺 2 倍和 4 倍后，小于 5.0 mm 含量由 15.6% 分别增加到 23.1% 和 34.1%，小于 2.0 mm 含量也由原来的 8.8% 分别增加到 13.3% 和 20.1%。细粒含量的增加，对试样的孔隙性造成影响，因而对渗透性试验成果的影响很大，缩尺程度越大，影响就越大。可见，采用相似级配法处理超径颗粒得到的级配，在渗透性上不能代表原级配材料。

4 渗透试验边壁效应研究

试验用料仍采用图 1 所示的材料，采用内径为 30.8 cm 的垂直渗透仪，渗透仪直径与试样 d_{85} 的比值接近 6，为了得到不同护壁厚度对渗透系数的影响规律，按护壁材料的厚度共分为 5 组，每组试验均进行 2 个平行试验，在渗透系数的计算时，试样过水面积扣除了护壁材料所占的面积，试验成果见表 6。

表 6 边壁处理试验成果表
Table 6 Test results of wall treatment

试验代号	护壁水泥厚度	K_{20} 平均值
	/ mm	/ (10^{-3} cm/s)
B1	0.0	8.60
B2	0.5	8.86
B3	1.5	5.41
B4	4.0	2.37
B5	5.0	2.83

试验 B1 未对边壁进行处理。试验 B2 边壁水泥厚度为 0.5 mm，大致相当于试样的 d_{10} 值；试验 B3 边壁水泥厚度为 1.5 mm，相当于试样的 d_{20} 值；试验 B4 边壁水泥厚度为 4.0 mm，相当于试样的 d_{30} 值。以护壁厚度为横坐标，相应试验的渗透系数为纵坐标，绘制成曲线见图 6。

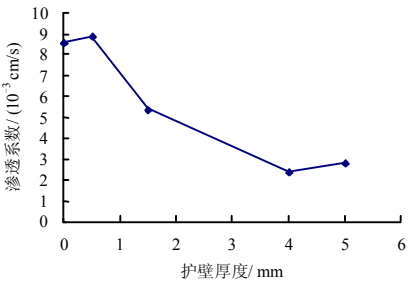


图 6 渗透系数与边壁处理层厚度关系图
Fig.6 Permeability coefficient vs. thickness of apparatus wall treatment layer

从图 6 可以看出，渗透系数随着护壁厚度的增加而减小，但护壁厚度大于 4.0 mm 时，渗透系数随着护壁厚度的增加变化极小，趋于稳定。其原因在于渗透仪内表面不进行处理时，试样与渗透仪边壁不能很好结合，存在一些微小的渗流通道，导致渗透系数略为偏大。由于本文所研究的材料是级配连续的材料，细粒含量较高（小于 5.0 mm 含量为 34%），因此，边壁效应不是特别明显，护壁厚度为 4.0 mm 时的渗透系数比不护壁时只减小了 3.6 倍。随着护壁材料厚度的增加，试验结果越来越接近于材料自身的渗透系数。当护壁厚度达一定值时，再增加护壁厚度的意义已经不大。对于这种级配连续的材料来说，护壁厚度可以取试样的 d_{30} 或 5.0 mm 中的较小值。

不同级配的试样，边壁效应的程度可能是不同的，对于级配不连续，或细粒含量较少的材料，其细粒料不足以填充粗颗粒中的孔隙。在试样装填时，粗颗粒极易与渗透仪边壁之间形成大的渗漏通道，上述研究结论对这种材料不一定适用，其护壁厚度需要进行深入的研究。

5 结 论

针对目前渗透试验方法研究的不足，通过一系列的渗透试验，研究了粗粒料渗透试验的尺寸效应、边壁效应以及超径颗粒处理方法对渗透试验成果的影响，取得了一些结论，并已经用于指导一系列工

程的粗粒料渗透试验,提高了试验成果的可靠性与合理性,主要结论如下:

(1) 渗透系数随着渗透仪直径与试验材料 d_{85} 比值的增大而增大,但增大的速率越来越缓,当渗透仪直径为试验材料 d_{85} 的 6 倍时,渗透系数尺寸效应影响已不明显。试验规程仪器内径按试样粒径 d_{85} 的 4~6 倍选择仪器偏小,建议按 d_{85} 的 6 倍选择仪器,有条件时可以取 8 倍。

(2) 渗透试验试样应尽量采用原级配。当需要对超径颗粒进行处理时,应遵循不改变细粒含量和宽级配特性的原则。对一定含量的超径颗粒采用等量替代法处理时,渗透试验成果可以近似反映原级配材料的特性。相似级配法处理后,材料的渗透性会严重偏离原级配材料特性,应避免采用。

(3) 渗透系数随着护壁厚度的增加而减小,但护壁厚度大于某一值时,渗透系数趋于稳定,接近于材料自身的渗透系数。连续级配料护壁厚度可以取试样的 d_{30} 或 5.0 mm 中的较小值。

(4) 由于研究采用的是一种典型的级配连续粗粒土,所得结论还有待更多试验资料的验证。

参 考 文 献

- [1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [2] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [3] 水利部国际合作与科技司. 水利技术标准汇编, GB9357—88 渗透仪[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988.
- [4] 朱国胜, 张家发, 张伟, 等. 宽级配粗粒料渗透试验方法探讨[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(Supp.): 10—13.
- [5] 王继庄. 粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 89—95.
- [6] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394—2398.
ZHU Jun-gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2394—2398.
- [7] 凌华, 殷宗泽, 朱俊高, 等. 堆石料强度的缩尺效应试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 540—544.
LING hua, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, et al. Experimental study of scale effect on strength of rockfill materials[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2011, 39(5): 540—544.
- [8] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 563—566.
LI Chong, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 563—566.
- [9] 张家发, 定培中, 张伟, 等. 水布垭面板堆石坝过渡料设计及其渗透变形特性研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 1—6.
ZHANG Jia-fa, DING Pei-zhong, ZHANG Wei, et al. Study on design requirements and seepage deformation characteristics of transition zone material for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, 26(10): 1—6.
- [10] 朱国胜, 张伟. 寺坪混凝土面板坝过渡料反滤试验研究[J]. 湖北水力发电, 2007, (3): 14—16.
ZHU Guo-sheng, ZHANG Wei. Test on filter efficiency of transient materials of Siping concrete face sand-gravel fill dam[J]. **Hubei Water Power**, 2007, (3): 14—16.
- [11] 朱国胜, 张伟, 定培中, 等. 寺坪混凝土面板砂砾石坝填料渗透特性研究[C]//水工渗流研究与应用进展——第 5 届全国水利工程渗流学术研讨会论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [12] 饶锡保, 胡胜刚, 程永辉, 等. 深厚覆盖层及围堰堰体材料工程特性试验技术研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 118—121.
RAO Xi-bao, HU Sheng-gang, CHENG Yong-hui, et al. Technologies applied in tests on engineering properties of thick overburden and cofferdam materials[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(10): 118—121.
- [13] 张家发, 定培中, 张伟, 等. 水布垭面板堆石坝垫层料渗透与渗透变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3145—3150.
ZHANG Jia-fa, DING Pei-zhong, ZHANG Wei, et al. Studies of permeability and seepage deformation characteristics of cushion material for Shuibuya concrete faced rockfill dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3145—3150.
- [14] 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.

删除的内容:

删除的内容: 南京电力自动化设备厂.