

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0327-05

# 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

魏进兵<sup>1,2</sup>, 邓建辉<sup>1</sup>, 谭国焕<sup>3</sup>, 李焯芬<sup>3</sup>(1. 四川大学 水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;  
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 3. 香港大学 土木工程系, 香港)

**摘要:** 碎块石土由于块石含量较高, 块石粒径较大, 其水力学参数的确定具有一定困难。首先, 采用双套环法对三峡库区泄滩滑坡的滑体碎块石土饱和和渗透系数进行了原位试验, 并根据土层孔隙率、颗粒级配等因素采用相关经验公式对试验结果进行了分析。其次, 结合使用张力计和体积含水率仪对其土水特征曲线进行了现场模拟试验, 并采用 Fredlund 模型对试验结果进行了拟合分析。最后, 根据土水特征曲线和饱和和渗透系数, 采用经验公式估算了其非饱和渗透系数。试验及分析表明, 该滑坡的碎块石土层的饱和渗透系数为  $(1.78 \sim 3.2) \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , 为强渗透性; 材料的细颗粒含量越少, 有效粒径及控制粒径越大, 不均匀系数越小, 相应的渗透系数越大。相关研究成果可以为泄滩滑坡非饱和和非稳定渗透计算提供参数依据, 并对同类型土体非饱和和水力学参数的确定具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 碎块石土; 非饱和水力学参数; 土水特征曲线; 颗粒级配; 泄滩滑坡

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

## Field tests of saturated and unsaturated hydraulic parameters of gravelly soil in Xietan landslide

WEI Jin-bing<sup>1,2</sup>, DENG Jian-hui<sup>1</sup>, Tham L. G.<sup>3</sup>, Lee C. F.<sup>3</sup>(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;  
3. Department of Civil Engineering, the University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** The hydraulic parameters of gravelly soil are difficult to determine due to its high gravel content and large grain size. The field permeability tests of gravelly soils layer of the slidebody of Xietan landslide have been carried out by double ring; and the test results are analyzed by empirical formulas, considering the soil porosity, grain-size distribution etc. Then, the soil-water characteristic curve (SWCC) is tested by the method of tensiometer-moisture content and fitted by Fredlund model. And finally, the unsaturated permeability coefficient of gravelly soil is calculated by empirical formulas based on its SWCC and saturated permeability coefficient. The test data demonstrate that, the saturated permeability coefficient of gravelly soil layer is quite good with permeability coefficient varied between  $1.78 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  to  $3.2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ; smaller fine grain content, bigger effective grain size and controlling grain size will lead to larger permeability coefficient. Through these works, the unsaturated hydraulic parameters are determined for the unsaturated seepage analysis of Xietan landslide; and the technique can be used as reference for similar soils.

**Key words:** gravelly soil; unsaturated hydraulic parameter; SWCC; grain-size distribution; Xietan landslide

## 1 前言

水库岸坡失稳是伴随水电工程建设而产生的一种地质灾害<sup>[1]</sup>。对水库滑坡而言, 由于降雨及库水位波动的影响, 坡体渗流场处于动态变化之中, 需要采用非饱和和非稳定渗流分析方法对坡体渗流场进行分析模拟。根据非饱和和渗流理论, 非饱和和非稳

定渗流分析与土体的土水特征曲线、非饱和渗透参数等因素密切相关, 因此准确测定坡体材料的土水特征曲线及渗透参数对水库滑坡渗流及稳定分析具有重要的意义。

目前土体饱和渗透系数和土水特征曲线一般采用试验方法或经验公式估算来确定, 非饱和渗透系数由于直接测定比较复杂, 往往采用间接方法来

收稿日期: 2005-11-07 修改稿收到日期: 2006-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50279051); 973 项目(No. 2002CB412702); 香港 RGC 基金(No. HKU7015/02ERGC)资助。

作者简介: 魏进兵, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事滑坡灾害及岩土工程方面的研究工作。E-mail: jbw@163.com

确定,即根据土体的饱和渗透系数和土水特征曲线进行估算<sup>[2,3]</sup>。对碎块石土而言,由于碎块石含量高,粒径及孔隙尺寸较大,难以取得大块的原状样,一般采用现场原位试验确定其渗透系数。本文分别采用现场原位试验及模拟现场试验对三峡库区泄滩滑坡滑体碎块石土的饱和渗透系数和土水特征曲线进行了测定,并根据土体的结构、颗粒成分、孔隙尺寸分布等因素以及相关经验公式对试验结果进行了分析。

## 2 泄滩滑坡滑体碎块石土的基本特征

泄滩滑坡位于湖北省秭归县境内,滑坡堆积体按成分与透水性大致可以划分为4层:耕植土层、碎块石土层、滑带和滑坡影响带。表层耕植土层厚4~6 m,透水性较差。碎块石土层位于表层耕植土层以下,土石比不同部位差别较大,从6:4到8:2不等。土体为可塑状黏土和粉质黏土,块石成分为粉砂岩、泥质粉砂岩、灰岩、石英砂岩和泥页岩等,块径为5~40 cm,以次棱角状为主,散乱堆积,大小混杂。该层透水性强,在地质勘探钻进过程中漏水、垮孔严重。滑带为灰黑色、浅绿色角砾土,土石比6:4到8:2,渗透系数较小,为相对不透水层,滑带上、下渗透系数较高,滑坡堆积体被滑带分隔为2个相对独立的水文地质单元。

泄滩滑坡作为一个典型的水库古滑坡体,对研究水库古滑坡的复活具有一定的代表性,湖北省地质灾害防治工程勘察设计院<sup>[4]</sup>通过地表试坑渗水试验,测得碎块石土渗透系数为 $(1.0\sim 3.33)\times 10^{-3}$  cm/s。三峡大学<sup>[5]</sup>在对泄滩滑坡进行三维有自由面稳定渗流计算时,对中前部滑体渗透系数取为 $1.5\times 10^{-2}$  cm/s,中后部滑体渗透系数取为 $3.0\times 10^{-2}$  cm/s。柴军瑞等<sup>[6]</sup>在对泄滩滑坡进行渗流-应力耦合分析时对滑体渗透系数取为 $1.0\times 10^{-3}$  cm/s。由此可见,各研究单位对泄滩滑坡滑体碎块石土渗透系数的取值具有一定的差异,且由于试验在地表进行,不一定能反映滑体内部的渗透系数,由于他们采用的是稳定渗流计算方法,无须得到坡体材料的土水特征曲线及非饱和渗透系数。为便于对滑坡渗流场进行非饱和和非稳定渗流分析,必须对滑体内部碎块石土的非饱和和水力学参数进一步地研究。

## 3 渗透系数现场试验研究

### 3.1 渗透系数现场试验

试验在滑坡中部勘探平洞内进行,平洞深约100 m,沿不同洞深进行了3组原位渗透试验。由于试验在平洞底板上进行,为减少因平洞施工期间

及施工完成后人为活动对碎块石土体结构的影响而给试验带来的误差,试验时将底板表面土体剔除,在底板下60 cm处进行。

试验采用双套环法,内环直径为26.2 cm,外环直径为47 cm,环高均为30 cm。试验时将内、外环打入土体10 cm,并保持内、外环同心。由于碎块石土体结构松散,为防止因环底边刀口与土体结合不好或刀口附近土体松动,环内水体通过接触缝向外渗漏而使测得的渗透系数偏高,沿内、外环外壁掏窄沟至环底边,用膨润土封住环底边刀口与土体接触缝,然后在外环外侧填筑10 cm厚土体并压实,以尽量减少因水体侧渗而导致的试验误差。

双套环试验常用试验方法有两种<sup>[7]</sup>:一种由马利奥特瓶做供水装置,定时读马利奥特瓶水量,试验至马利奥特瓶单位时间供水量稳定不变为止,计算稳定时单位面积的土壤入渗强度即为饱和渗透系数。另一方法采用测针控制水位,测量定量水下降至测针针尖所需时间,重复试验至入渗速度达到稳定。在对碎块石土层进行渗透试验时,由于该地层渗透系数太大,试验需水量大,采用上述两种方法水量均不好控制,根据实际情况对试验方法进行了调整。在内、外环均设置水位标尺,试验开始时在内、外环内注水至15 cm高,测定内环水位从15 cm下降至5 cm所需的时间,重复试验至入渗速度达到稳定。试验过程中根据内环水位及时补充外环水量,保持内、外环水位齐平。渗透系数可由水位下降值 $\Delta h$ 和相应的时间 $\Delta t$ 求得:

$$k_s = \Delta h / \Delta t \quad (1)$$

各点渗透试验过程线如图1所示。可见随着试验的进行,渗透系数逐渐变小并趋于稳定,取各点渗透系数过程线渐近值为饱和渗透系数值(表1)。滑体碎块石土饱和渗透系数范围为 $(1.78\sim 3.2)\times 10^{-2}$  cm/s,按《水利水电工程地质勘察规范》<sup>[8]</sup>的渗透

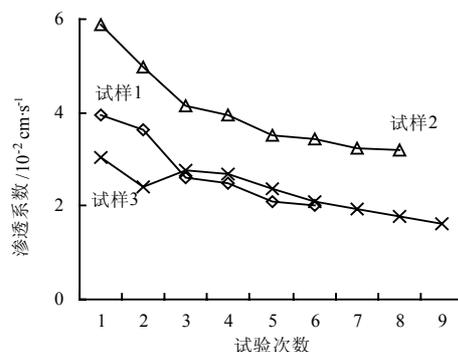


图1 渗透系数与试验次数关系  
Fig.1 Relation between permeability coefficient and test cycles

性分级方法，为强渗透性。

表 1 饱和渗透系数试验值

Table 1 Saturated permeability coefficients of test samples

编号	与平硐口距离 /m	上覆土层厚度 /m	渗透系数试验值 / $10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
试样 1	80.5	26	2.08
试样 2	48.7	20	3.20
试样 3	27.3	18	1.78

### 3.2 试验结果分析

为分析渗透系数与材料孔隙率、颗粒级配等因素的关系，对渗透试验部位土体进行了原位密度试验、含水率试验、比重试验及颗粒分析试验，试验得到的颗粒分配曲线见表 2 及图 2。从实验结果可以看出，由于各试样孔隙率比较接近，材料的细颗粒 ( $d < 0.075 \text{ mm}$ ) 含量越少，有效粒径 ( $d_{10}$ ) 及控制粒径 ( $d_{60}$ ) 越大，相应的渗透系数越大。另外，渗透系数与材料的不均匀系数 ( $C_u$ ) 也有关系，不均匀系数越小，渗透系数越大。

表 2 试样物理参数

Table 2 Physical parameters of test samples

编号	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重	孔隙率 /%	$d_{10}$ /mm	$d_{60}$ /mm	$d(<0.075 \text{ mm})$ /%	$C_u$	$C_c$
试样 1	1.88	2.72	31.98	0.049 2	14.75	11.08	299.7	13.3
试样 2	1.85	2.72	31.18	0.28	19.41	6.63	69.3	5.1
试样 3	1.87	2.72	31.14	0.025 6	11.36	13.31	443.2	16.2

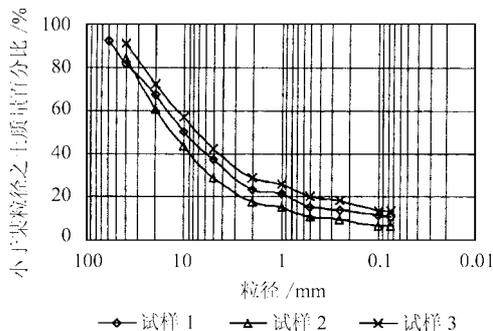


图 2 试样颗粒分析曲线

Fig.2 Grain-size distribution curve of test samples

根据试样的孔隙率、颗粒级配等基本物理参数，采用经验公式<sup>[9]</sup>对试样渗透系数进行了估算，经过与试验结果进行对比，Kruger 公式能较好地估算该土层的渗透系数：

$$k = 240 \times \frac{n}{(1-n)^2} d_e^2 \quad (2)$$

式中： $n$  为孔隙率系数； $d_e$  为有效粒径， $\frac{1}{d_e} =$

$$\sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^s + d_i^d}, \Delta g_i \text{ 为某一粒径范围材料重量占总}$$

重的比例， $d_i^s$  为该范围最大粒径； $d_i^d$  为该范围最小粒径。采用 Kruger 经验公式得到的饱和渗透系数计算值与试验值对比见表 3。

表 3 各点饱和渗透系数经验公式计算值与试验值对比

Table 3 Comparison of saturated permeability coefficients from test and empirical formulas

编号	计算参数 $d_e$ /mm	渗透系数 / $10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	
		试验值	计算值
试样 1	0.30	2.08	2.60
试样 2	0.48	3.20	6.39
试样 3	0.25	1.78	1.75

## 4 土水特征曲线试验研究

### 4.1 土水特征曲线试验

由于该层碎石含量多，原位埋设张力计及体积含水率仪也不方便，土水特征曲线测定具有一定的难度，而且由于该层位于表层根植土以下，在天然状态下基质吸力的变化幅度不大，即使能在原位安装张力计和体积含水率仪，测得的土水特征曲线范围也偏小。为测定该部位的土水特征曲线，在渗透试验 1# 样试验部位挖取土样，按其天然密度填入平硐外砌筑的池子中。池子尺寸（长×宽×高）为 35 cm×35 cm×45 cm，填筑过程中埋设 2 组张力计及体积含水率探头，并埋设一根 TRIME-T3 体积含水率测量探管，仪器埋设见图 3，其中张力计为德国 UMS 公司生产的 T4 型张力计，采用 INFIELD7 读数仪读数，测量范围为 -100~85 kPa；体积含水率探头是由英国 Delta-T 公司生产的  $\theta$ -probe，它根据土的介电常数与土中的体积含水率的密切关系，利用驻波技术量测土的介电常数来间接得到土中的含水率。

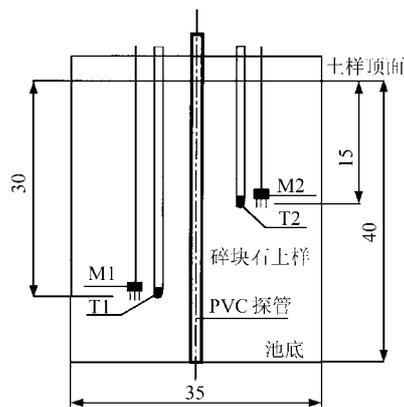


图 3 土水特征试验仪器埋设图（单位：cm）

Fig.3 Configuration of SWCC test (unit: cm)

试验时加水饱和土样，然后让其在自然状态下疏干，测量土体在排水过程中的体积含水率与基质吸力变化，根据体积含水率与基质吸力的对应关系得到试样的土水特征曲线。试验测得的基质吸力-体积含水率对比见图4，试验结果表明2组张力计-体积含水率仪的测量结果具有一致性。

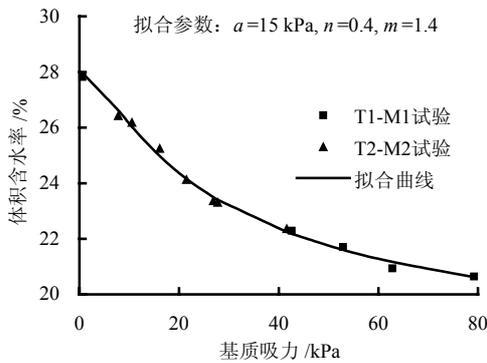


图4 土水特征现场试验及拟合结果  
Fig.4 Field test data and their fitted curve of SWCC

#### 4.2 试验结果拟和分析

受试验条件及张力计量程限制，现场试验只能在一定的基质吸力变化范围内对试样土水特征曲线进行测量，为得到试样在更大基质吸力范围内的试样土水特征曲线，并得到试样的残余含水率等参数，需要对试验结果做进一步的分析。采用 Fredlund 模型<sup>[10]</sup>，用 Origin 数值分析软件对试验得到的土水特征曲线进行非线性最小二乘法拟合分析。模型公式为

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + (\psi/a)^n \right] \right\}^m} \quad (3)$$

式中： $\theta$  为体积含水率； $\theta_s$  为饱和体积含水率； $\psi$  为基质吸力； $a$  为进气值近似值； $n$  为控制土水特征曲线拐点处斜率的参数； $m$  为与残余含水率相关的土性参数； $C(\psi)$  为校正函数， $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/C_r)}{\ln(1 + 1000000/C_r)}$ ； $C_r$  为与残余体积含水率处基质吸力相关的常数。

根据 Fredlund 模型，通过计算机模拟得到土水特征曲线的拟和结果见图4，可以看出碎块石土由于黏粒含量少，进气值较低，在基质吸力较低时土水特征曲线较陡。根据上述拟合得到的土水特征曲线和试验得到的饱和渗透系数，采用 Fredlund and Xing<sup>[3]</sup>提出的非饱和渗透系数计算公式，估算出滑体碎块石土的非饱和渗透函数，如图5所示。

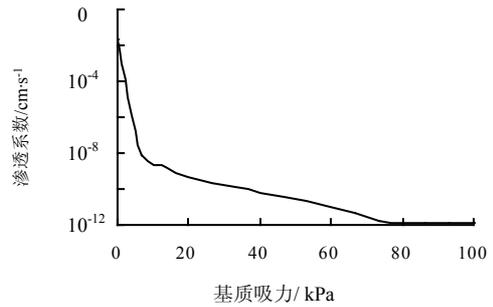


图5 碎块石土非饱和渗透系数计算值  
Fig.5 Unsaturated permeability coefficient of gravelly soil

### 5 结论

(1) 采用双套环法对泄滩滑坡滑体碎块石土饱和和渗透系数进行了试验，由于试验在滑体内部平洞内进行，试验结果更能代表滑体的渗透特性。试验表明该地层渗透系数为 $(1.78 \sim 3.2) \times 10^{-2}$  cm/s，为强渗透性。

(2) 饱和渗透系数与材料孔隙率、颗粒级配等因素密切相关，材料的细颗粒含量越少，有效粒径及控制粒径越大，不均匀系数越小，相应的渗透系数越大。Kruger 公式能较好地估算碎块石土的饱和和渗透系数，对该类型土渗透系数的计算具有一定的借鉴意义。

(3) 碎块石土由于黏粒含量少，孔隙尺寸大，进气值较低，在基质吸力很小时体积含水率和非饱和和渗透系数变化很快，基质吸力达到一定值后非饱和和渗透系数极小。

(4) 采用张力计-体积含水率仪法测定土水特征曲线，简便易行，测得的土水特征曲线用 Fredlund 模型可以较好地拟合。根据试验及拟合得到的滑体碎块石土饱和渗透系数和土水特征曲线，可以估算其非饱和渗透系数，从而为滑坡非饱和和非稳定渗透计算提供参数依据。

#### 参考文献

[1] 闵弘, 谭国焕, 戴福初, 等. 蓄水期库岸古滑坡的水动力学响应——以三峡库区泄滩滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 721—3 726.  
MIN Hong, THAM L g, DAI Fu-chu, et al. Hydrodynamic monitoring of a preexistent landslide during reservoir filling—— a case history of Xietan landslide, the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 721—3 726.

- Research and Development**, 2004, 21(4): 29—33.
- [2] 贾宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 755—760.  
JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hang-Yong Expressway[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 755—760.
- [3] 嵇如龙, 张永宏, 宋吉录. 软土地基上路基拓宽处理技术研究[J]. 华东公路, 2002, (5): 26—29.  
JI Ru-long, ZHANG Yong-hong, SONG Ji-lu. Treatment techniques for widened roadbed on soft ground[J]. **East China Highway**, 2002, (5): 26—29.
- [4] 黄琴龙, 凌建明, 唐伯明, 等. 旧路拓宽工程的病害和机理[J]. 同济大学学报, 2004, 32(2): 197—201.  
HUANG Qin-long, LIN Jian-min, TANG Bo-ming, et al. On distress characteristics and mechanism in road widening engineering[J]. **Journal of Tongji University**, 2004, 32(2): 197—201.
- [5] White David J, Suleiman, Muhannad T. Design of short aggregate piers to support highway embankments[J]. **Transportation Research Record**, 2004. 103—112.
- [6] 刘观仕, 孔令伟, 陈善雄, 等. 襄荆高速公路软弱地基高路堤填筑控制试验研究[A]. 第八届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会[C]. 岩土力学, 2004, (Sup.): 496—500.
- [7] 陈善雄, 刘观仕, 孔令伟, 等. 湖北省襄荆高速公路软土工程特性、路堤变形观测与控制研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
- [8] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82—88.  
KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Shuili Xuebao**, 2002, (9): 82—88.
- [9] 林彤. 粉喷桩加固软基的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 134—137.  
LIN Tong. An experimental study on DJM pile improving soft foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(2): 134—137.
- [10] 杨寿松, 刘汉龙, 周云东, 等. 薄壁管桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 750—754.  
YANG Shou-song, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, et al. Application of cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles in soft soil improvement of expressways[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 750—754.
- [11] JTJ017—96, 公路与软土地基路堤设计与施工技术规范[S].
- [12] 张留俊, 王福胜, 刘建都. 高速公路软土地基处理技术——试验研究与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

### 上接第 330 页

- [2] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] Fredlund D G, Xing A, Huang S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 533—546.
- [4] 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院. 三峡库区湖北省秭归县泄滩滑坡工程地质勘察报告[R]. 荆州: 湖北省地质灾害防治工程勘察设计院, 2002.
- [5] 三峡大学. 泄滩滑坡三维有限元分析[R]. 宜昌: 三峡大学, 2003.
- [6] 柴军瑞, 李守义. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 280—1 284.  
CHAI Jun-ru, LI Shou-yi. Couple analysis of seepage and stress fields in Xietan landslide in Three Gorges region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1 280—1 284.
- [7] SL109—95, 农田排水试验规范[S].
- [8] Milan Vukovic, Andjelko Soro. Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-size Composition[M]. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 1992.
- [9] GB50287—99, 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [10] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 521—532.