

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0097-06

坝体心墙与垫层混凝土结合处黏土 碾压和防渗现场试验

乔 兰¹, 庞林祥¹, 隋智力², 石 岩³

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 10083; 2. 北京城市学院 城建学部, 北京 10083; 3. 中国地质大学 长城学院, 河北 保定 071000)

摘 要: 对糯扎渡水电站心墙与垫层混凝土结合部位的高塑性黏土进行现场碾压与防渗试验, 采用沉降量、灌水法、环刀法等多种方法对黏土质量进行检测对比, 探讨高塑性黏土的压实机制以及颗粒级配、铺土厚度、碾压遍数等不同施工工艺参数及不同参数的组合对压实与防渗效果的影响, 提出结合施工工艺参数, 黏土现场压实质量控制应以沉降差或沉降率为主、渗透性可以采用压实度来进行控制, 该方法可有效地保证填筑质量, 加快施工进度, 并可对有压实机防渗要求的类似工程的质量控制、检测和评价提供参考, 具有重要的实用价值。

关 键 词: 土力学; 高塑性黏土; 压实特性; 防渗特性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Field test study of filling and penetration of highly plastic clay located between the dam core wall and cushion concrete

QIAO Lan¹, PANG Lin-xiang¹, SUI Zhi-li², SHI Yan³

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 10083, China;

2. Faculty of Urban Construction, Beijing City University, Beijing 100083, China;

3. Great Wall College, China University Geosciences, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: The compaction and penetration tests of highly plastic clay, located between the dam core wall and cushion concrete in Nuozhadu hydropower station, are performed. The compaction mechanism and the influence of different construction technological parameters such as grain composition, filling thickness and compaction times, etc. are discussed by the field roller compaction and penetration test. On the basis of the test, the optimal technological parameters and quality control specification of the given project are found by contrast tests for which various detection methods such as compaction settlement, watering method and cutting ring are adopted. And field compaction and penetration quality control method of highly plastic clay is put forward; namely, differential settlement and compaction is given priority but construction technological parameters must be considered at the same time. The method may insure filling quality effectively and quicken construction progress. And it also can provide scientific data, standards for the quality control, quality check, quality evaluation of the projects for which highly plastic clay soil is adopted as filling material. It has significant applicable value.

Key words: soil mechanics; highly plastic clay; compaction property; penetration property

1 引 言

堆石坝防渗墙两端与垫层混凝土之间的搭接部位, 常因填土沉降不均匀产生裂缝^[1], 对坝体的防渗、应力变形产生重大影响。高塑性黏土具有高液限、高塑性、高天然含水率等特征, 且具有优良的

压缩和适应大变形特性^[2], 填筑于大坝防渗墙周围, 能够防止裂缝的产生, 受剪切过程中能够延迟剪切破坏的发生^[1]以及防止沿高塑性黏土与混凝土的结合界面发生错动滑动^[3]。堆石坝利用高塑性黏土的这种特殊性质, 将其填筑于防渗心墙与坝体垫层混凝土的结合部位, 用于控制坝体应力、变形以及起

收稿日期: 2012-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助(No. 2010CB731501); 国家自然科学基金重点项目资助(No. 51034001)。

第一作者简介: 乔兰, 女, 1965年生, 博士, 教授, 主要从事岩土方面的教学研究。

通讯作者: 庞林祥, 男, 1986年生, 博士研究生, 从事岩土、防灾减灾等方面的研究。E-mail: plinx2011@sina.com

防渗作用。该位置的高塑性黏土,其性质与混凝土的力学性质相差很大^[4-5],对于防渗、压实、与土混的结合等要求较高。国内外学者^[6-8]对土与混凝土之间的力学关系进行了相关研究,文献[9-10]得到黏土压实研究的相应成果;胡黎明等^[11]、周志芳等^[12-14]、Zlotnik 等^[15]也对土体的渗透性进行了研究。但是,对于压实与防渗要求下的黏土填筑施工工艺参数、土体特殊性质要求、压实与防渗之间的相互关系、实现高塑性黏土与混凝土及心墙的有效连接等有待深入。

依托云南糯扎渡水电站大坝工程,本次开展高塑性黏土现场碾压防渗试验研究,详细探讨了高塑性黏土颗粒级配、含水率、铺土厚度、碾压遍数等因素对压实的影响以及碾压遍数及压实度对渗透性的影响,提出高塑性黏土压实与防渗现场实用质量控制指标与评定方法,建立高塑性黏土最佳施工工艺控制参数。针对高塑性黏土防渗及压实效果研究,并总结前人经验,取得某些共性的结论,对水利部门建立健全相应的规范、规程有着重要的现实意义。

2 现场碾压试验

2.1 实验条件

云南糯扎渡电站坝高 261.5 m,坝体采用砾质土心墙防渗(土体占 60%,砾石占 40%)。在防渗墙两端与垫层混凝土结合处,铺筑宽 3 m 高塑性黏土,实现坝体的变形协调。试验所用高塑性黏土为坡积层土,按沉积顺序自上而下分为坡积土(Qdl)、全风化残积土(CLS)和强风化砂、泥岩混合土(T2m1-3)。表 1 为现场筛分得到的典型颗粒级配组成。

表 1 典型颗粒级配组成
Table 1 Typical grain composition

粒径/mm	各级含量/%	累积含量/%
20~5	0.2	0.2
5~2	3.1	3.3
2~0.5	5.4	8.7
0.5~0.25	5.4	14.1
0.25~0.075	10.3	24.4
0.075~0.005	48.0	72.4
0.005~0.002	6.6	79.0
<0.002	21.0	100

用比重计法进行颗粒分析,其液限 $W_L = 42\%$,塑限 $W_P = 22\%$, $I_P = 20$,天然含水率介于 $18\% \sim 22\%$ 。从表 1 可见,砾粒含量仅为 3.3%,砂粒含量为 21.1%,黏粒含量为 27.6%,属于黏性较好的低

液限黏土。

2.2 试验参数确定

根据高塑性黏土防渗与压实的特殊试验要求,试验中确定的主要变动参数为:土料为高塑性黏土,铺料厚度分别为 20、25、30 cm,含水率为 19.1%,分别碾压 6、8、10 遍。碾压机械为国产 CLG-856 装载机,载重量为 4 500 kg,工作质量为 18 t,功率为 160 kW,碾压机械行走速度为 1.5 km/h;低档位为 0~2 km/h,轮胎宽 57 cm。

2.3 试验准备

试验前用推土机和压路机进行场地平整,保证基础面沉降小于 2 mm,消除对碾压试验的不利影响。在料场开采后,将高塑性黏土用自卸车运至试验场地内,人工平铺料,平料过程中在场地 4 角设置厚度控制点(分别高 20、25、30 cm)。

2.4 碾压试验

碾压试验采用 20、25、30 cm 三种铺土厚度,即对每种厚度的填料碾压至 10 遍,分别检测碾压 6、8、10 遍后的压实效果,计算沉降量、压实度、干密度及渗透系数。碾压时,直线段由两边向中间,小半径曲线由内侧向外侧,纵向进退式进行。每遍碾压时,横向之间要求有 5 cm 左右的搭接宽度。

2.5 质量检测

对每种试验组合,碾压完毕后都进行质量检测。现场碾压试验中进行了以下检测项目。

(1) 沉降量检测

在压实功的作用下填筑层的压缩变形量为该填筑层的沉降量,高塑性黏土从松散状态到致密状态,沉降量趋于无限小,填筑层厚度趋于一个稳定值。填筑体碾压前,在表面设置控制点测量标高,检查每次碾压后的沉降差,根据沉降值判定碾压质量。

(2) 现场密度试验

试坑灌水法和环刀法都是破坏性试验,填筑过程中该方法对于填筑体的整体结构整体不利,为此采用两种方法分别进行试验,并比较两种方法的检测效果,得出合理的检测方法。填筑体在不同深度上,其压实度是不一样的,所测定的是同一层的平均压实度,即试坑深度应与碾压层厚度相等。

(3) 现场渗透试验

采用原位渗透试验法(双环法)进行现场垂直渗透试验,外环直径为 50 cm,内环直径为 23 cm,高 15 cm。加水后测记渗透速度,当渗透稳定后,在 1 h 内测记渗入量 5~6 次,计算平均渗透系数。

3 试验结果与分析

3.1 碾压遍数与干密度的关系

现场干密度是控制压实是否满足设计要求的最直接指标,测定现场干密度一般采用灌水、环刀法或核子密度仪法等。灌水法、灌砂法是破坏性试验,劳动强度大,检测速度慢,核子密度仪解决了慢的问题,但却有成本、精度、安全和污染等问题,给现场大量测定干密度带来了一定的困难。结合具体试验条件,本次现场干密度检测通过试坑灌水法和环刀法来实现,图 1 为灌水法和环刀法的对比试验。



图 1 灌水法和环刀法的对比试验

Fig.1 Comparative test between irrigation method and cutting ring method

碾压遍数与干密度的关系因铺土厚度、黏粒的力学性质、级配等而有所不同。图 2 为不同施工参数下碾压遍数和干密度的关系。

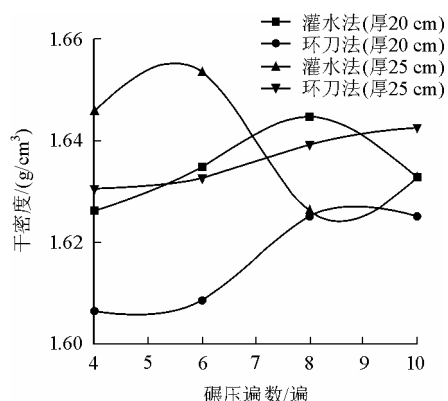


图 2 不同施工参数下碾压遍数和干密度的关系

Fig.2 Relationships between compaction times and dry densities under different construction parameters

从图 2 可以看出, (1) 对比两种测试方法对铺料厚度为 20 cm 和 25 cm 的检测发现碾压遍数小于 7 遍时, 无论是 20 cm 厚铺料还是 25 cm 厚铺料, 灌水法的测试结果都大于环刀法的测试结果。铺料厚度从 20 cm 增加到 25 cm 时, 随着碾压遍数的增加, 其干密度测试结果趋向一致; (2) 受试验

组数的影响, 在试验参数相同情况下两种检测方法所得干密度结果都比较离散, 规律性不强; (3) 根据最大干密度计算压实度, 各取样点压实度大于 95% 的达到 76%, 最大干密度范围在 1.656~1.720 g/cm³ 之间。

出现以上的现象的主要原因: (1) 灌水法取样土体为试坑内全部土体, 环刀法取样土体为试坑靠近底部 1/2 范围内压实土体, 压实层底部土体的压实度较其他部位压实度小, 所以灌水法测定值较环刀法大; (2) 灌水法及环刀法都是破坏性试验, 试验过程中, 在同一施工参数及不同碾压遍数后, 测定密度的位置不同。不同的测点位置, 其土体的级配、含水率就可能不一致, 甚至材料本身的类型就不一样, 导致压实效果的不一样及密度的区别;

(3) 土样在压实遍数超过 7 遍以后, 其压实效果非常好, 说表单一密度检测指标不能真实反映土体的压实状况, 很难评价土体的压实质量。

在相同的压实条件下, 铺土厚度越小, 干密度越大。研究结果表明, 对相同的铺土厚度, 同一摊铺层沿深度方向, 越往上部密度越大, 越往下部密度越小, 减小铺土厚度有利于提高填筑体的压实效果。但并不是铺土厚度越小越好, 选择铺土厚度的受很多因素影响, 关键的问题是经济因素。对不同的铺土厚度的填筑层, 经过一定的碾压遍数达到设计所要求的效果, 就可以计算出每立方米填料的碾压施工成本, 铺土厚度取成本较低那一种。

3.2 碾压遍数与沉降量的关系

对于一般的土体, 随着碾压遍数的增加, 填筑层的沉降量逐渐减小, 从而土体的密度逐渐增加, 当沉降量减小到一定程度, 就能达到规定的密度。因此, 在施工中控制沉降量与沉降率, 可以作为黏土填筑质量的间接控制指标。

图 3、4 为碾压遍数和沉降量、沉降率的关系。由两个图可以看出, (1) 3 种铺料厚度下碾压达到 2 遍和 8 遍时, 土体的沉降量增加最大。碾压 2~6 遍时, 土体的沉降量增加不明显。由于土体的压实特性较好, 随着碾压遍数的增加, 到达 8 遍后土体的沉降量趋向一稳定值; (2) 在其余施工参数相同的情况下, 碾压 8 遍之前, 铺土厚度越大, 沉降量也越大; (3) 与密度检测法相比, 用沉降法检测压实质量效果的规律性较好, 如用沉降率控制, 则沉降率控制在 7% 左右, 如用沉降差控制, 最后 2 遍的沉降差平均值控制在 5 mm 以内; (4) 在压实机械固定的情况下, 对不同的铺土厚度, 碾压到规定的遍数后, 其沉降差都小于某一值。也就是说, 压实

沉降差与被压实层厚之间并无明确关系,所以单独以沉降差或沉降率控制施工质量,也存在不足,必需与施工工艺参数,如铺土厚度、碾压遍数、压实机械等相结合来控制。

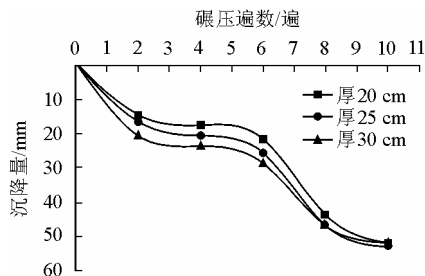


图3 碾压遍数和沉降量的关系

Fig.3 Relationships between compaction times and settlements

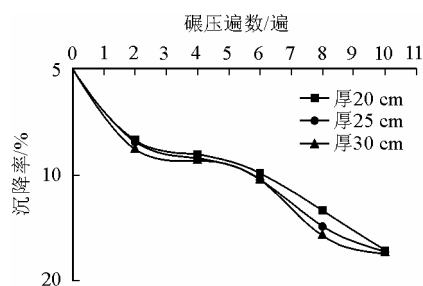


图4 碾压遍数和沉降率的关系

Fig.4 Relationships between compaction times and settlement rates

3.3 铺料厚度与压实度的关系

压实度不仅与碾压遍数有关,还与铺料厚度有关。研究铺料厚度、碾压变数及压实度之间的相互关系,对于降低成本、控制质量、加快进度具有重要的意义。为了检测灌水法与环刀法检测压实大小的准确性,进行对比试验结果如图5所示。

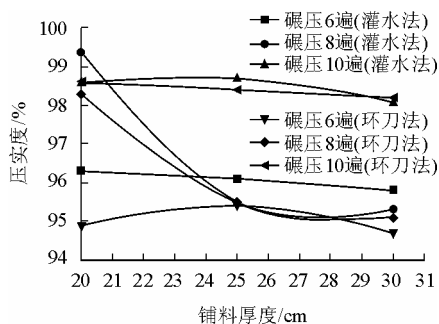


图5 铺料厚度与压实度的关系

Fig.5 Relationships between filling thicknesses and compactions

由图可以得出,(1)铺料厚度为20、25、30 cm

时,无论是环刀法,还是灌水法测试结果,压实度都随着碾压变数增多而变大,符合一般黏土碾压特性,但当铺料厚25 cm时,碾压至8遍,达到了最大压实度,继续碾压,压实度急剧降低。同一碾压遍数下呈现铺料厚度越大压实度越小,达到最大压实度的碾压变数也越多,因此,铺料厚度及碾压遍数是影响压实度的主要影响因素;(2)在压实功的作用下,越是靠近压实面,其压实效果越好,干密度也最大,对于该黏性土而言,灌水法较环刀法检测更准确。

3.4 碾压遍数与渗透性的关系

土体空隙的存在即其大小对于土体的渗透性有着较大的影响,根据电镜分析结果^[16],一般情况下粒间孔隙在土体内数量最多,连通性好,是渗流的主要通道。孤立孔隙直径虽较大,但数量较少,连通性差。粒内孔隙在单个集合体内连通性虽好,但从整体看,只是通过粒间孔隙来保持其间接联系,连通性也较差。降低渗透系数,需要结合碾压遍数进行控制。

作为混凝土(砿)与土石混合体接触部位的过渡性填充材料,在保证压实度的同时,其渗透性的大小也必须得到保证,防止管涌等情况的发生,采用双环法进行垂直渗透试验,结果如图6所示。

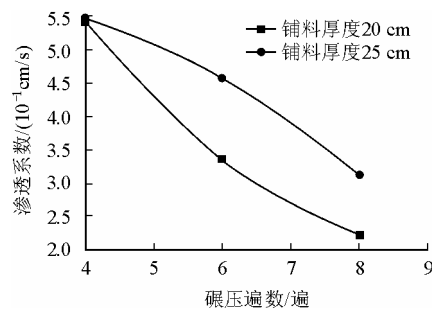


图6 碾压遍数和渗透系数的关系

Fig.6 Relationships between compaction times and permeabilities

从图6中可以看出,(1)随着铺料厚度的增加,在小于最优含水率碾压范围之内,其渗透性随着铺料厚度的增加而增加,但超过最优含水率碾压遍数后,其渗透性趋向一致;(2)无论是哪一种铺料厚度,其渗透性随着碾压遍数的增加而降低,即碾压变数越多,渗透性越小,对于土体的压实度及最优含水率将造成影响。为此,碾压8遍达到最优含水率及最大压实度时,其渗透性也降低至允许范围之内;(3)对于有压实度、最优含水率、渗透性要求的土体,土体性质、铺料厚度及碾压遍数是其主要的

影响因子, 施工中可以将压实度及含水率作为碾压控制性指标, 在确定最优碾压遍数的情况下, 以渗透性参数作为参考指标。该结论与文献[17]结论一致, 即控制黏土含水量在最优含水率附近, 经夯击后达到较佳的密实度, 土体的防渗性也达到最优。

3.5 压实度与渗透性的关系

水通过土体中的孤立空隙、粒间空隙和粒内空隙流动, 粒间空隙存在于粒状聚集体及黏粒组成的聚集体之间, 分布甚广, 数量较多, 连通性好, 形状各式各样, 在土体中占据主导地位, 对土体的渗透性起至关重要作用, 降低土体渗透性, 减少粒间空隙对于黏土来说具有重要意义。

从本文分析两种铺料厚度下渗透性与压实度的关系曲线(见图 7)可以看出, 土体的渗透系数均随着压实度的增大而呈现非线性减小趋势, 即压实度越大, 渗透系数越小, 且随着压实度的提高, 该趋势变化速率有所降低。压实度小于 96% 时, 土体压实性不佳, 粒间空隙定向性明显、空隙大, 压实度与渗透系数基本呈直线关系, 且铺料厚度越小, 渗透系数随压实度提高而下降的速率越快; 超过 96% 压实度后, 粒间空隙明显减少, 土颗粒滑移较难, 在静压下空隙减小, 但粒间空隙定向性减弱不明显, 故渗透性下降速度较小。所以, 土体渗透曲线以 96% 压实度为转折点。施工碾压过程中时, 为保持坝基较低的渗透性, 碾压应控制在最优压实度(96%)以上。

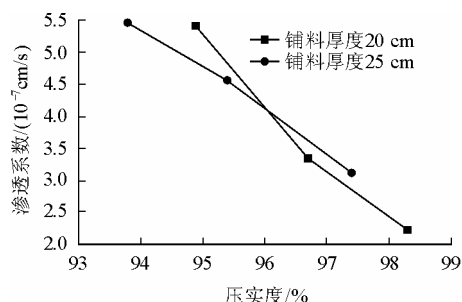


图 7 压实度与渗透系数的关系

Fig.7 Relationships between compactions and permeabilities

4 结 论

(1) 对国产 CLG-856 装载机, 本次的高塑性黏土(级配良好)填筑最佳工艺参数是铺土厚 25 cm, 8 遍碾压、低档位行驶。该工艺参数下的质量控制参数为压实度达 96%, 沉降率不超过 7%。

(2) 对高塑性黏土而言, 在其余施工参数相同情况, 不同的碾压遍数情况下测得的干密度值缺乏规律性, 单一的密度指标难以评价高塑性黏土的压实质量。

(3) 某一铺料厚度下, 高塑性黏土并不是碾压遍数越多, 压实度就越大。未达到最大压实度时, 压实度随着碾压遍数增加; 当压实度达到最大以后, 随着碾压的增加, 压实度降低。不同铺料厚度、同一碾压变数下, 铺料厚度越大, 压实度越小。

(4) 沉降量与碾压遍数有较好的相关关系, 并且测量快速简单, 但压实沉降差与被压实层厚之间无明确关系, 单独以沉降差或沉降率控制施工质量存在不足。碾压质量控制可以以沉降差或沉降率为主, 并结合施工工艺参数来控制。

(5) 高塑性黏土的渗透性, 随着压实度的增加, 渗透性逐步减低, 当压实度达到 96% 时, 其渗透性满足 1×10^{-6} cm/s 的要求, 对于有渗透性要求的高塑性黏土部位, 以该压实度为控制指标能够实现经济与效益的最大化。

理论上常常认为高塑性黏土用环刀法测量较灌水法准确。现场试验中, 灌水法比用环刀法测干密度时试样体积要大, 灌水法以整个碾压层取样, 环刀法取样则在碾压层的中下部, 所以灌水法比用环刀法测干密度时试验结果更接近实际。

参 考 文 献

- [1] 徐泽友, 卢廷浩, 丁明武. 高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 71—74.
XU Ze-you, LU Ting-hao, DING Ming-wu. Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2009, 37(1): 71—74.
- [2] 李剑峰, 葛和焰. 高塑性黏土填筑高速公路路堤技术研究[J]. 铁道建筑, 2003, 43(6): 38—40.
LI Jian-feng, GE He-yan. Research on the filling technology of highly plastic clay in expressway[J]. *Railway Construction*, 2003, 43(6): 38—40.
- [3] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42—46.
GAO Jun-he, YU Hai-xue, ZHAO Wei-bin. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical

- analysis[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(5): 42—46.
- [4] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149—153.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 25(2): 149—153.
- [5] ARTHUR J R F, DUNSTAN T. The engineering application of direct and simple shear testing[J]. **Geotechnique**, 1988, 42(4): 651—652.
- [6] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE**, 1971, 97(12): 1657—1673.
- [7] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling interface[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers**, 1985, 111(6): 793—815.
- [8] 李登华, 酃能惠. 土与混凝土结构接触面力学特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 114—118.
LI Deng-hua, LI Neng-hui. Experimental study on mechanical behavior of interface between soil and concrete slab[J]. **Water Resources and Power**, 2009, 27(5): 114—118.
- [9] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851—855.
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 851—855.
- [10] 郝中海, 崔江余. 黏土压实特性分析研究[J]. 工程力学, 2003, 20(增刊), 192—195.
HAO Zhong-hai, CUI Jiang-yu. Clay compaction characteristic analysis[J]. **Engineering Mechanics**, 2003, 20(Supp.), 192—195.
- [11] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性实验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435.
HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 23(4): 431—435.
- [12] 周志芳. 裂缝介质水动力原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] 周志芳, 滕建仁. 三峡工程大坝坝基渗控分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 700—704.
ZHOU Zhi-fang, TENG Jian-ren. Analysis of seepage control in dam foundation of the Three Groges Project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 700—704.
- [14] 周志芳, 金忠青. 解析裂隙含水层非稳定井流问题[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2000, 15(3): 329—336.
ZHOU Zhi-fang, JIN Zhong-qing. An analytical method for calculation of 3D unsteady well flow in leaky aquifers[J]. **Journal of Hydrodynamics(Series A)**, 2000, 15(3): 329—336.
- [15] ZLOTNIK V A, MCGUIRE V L. Multi-level slug tests in highly permeable formations. 1. Modification of the Springer-Gelhar(SG) model[J]. **Journal of Hydrology**, 1998, 204(1-4): 271—282.
- [16] 冯晓腊. 饱和黏性土渗透性的研究现状及其发展方向[J]. 地质科技情报, 1988, 7(3): 53—58.
FENG Xiao-la. Permeability research of saturated co-hesive soil and its future development[J]. **Geological Science and Technology Information**, 1988, 7(3): 53—58.
- [17] 刘杰. 土的渗流稳定与渗流控制[M]. 北京: 水力电力出版社, 1992.