

西南地区深厚覆盖层第四纪沉积物抗渗特性及参数的选择

葛 明 明， 李 小 泉， 鲁 涛

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要:以现场大型原位渗透变形试验为基础,通过对大量参数进行统计分析,提出了在深厚覆盖层上建高土石坝之第四纪沉积物土层的渗透变形参数建议值。通过现场试验,探讨了深达百余米的覆盖层物理力学参数及试验方法,为设计提供了可靠的依据,对即将或正在施工的大渡河流域双江口、金川等工程的勘察设计具有较好的指导和参考价值。

关键词:深厚覆盖层;原位试验;抗渗特性;参数选择;西南地区

中图分类号:TV7;TV223.2;TV223.6;[TV221.2] **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2022)01-0001-04

Study on Impermeability Characteristics and Parameter Selection of Quaternary Sediments in Deep Overburden in Southwest China

GE Mingming, LI Xiaoquan, LU Tao

(PowerChina Chengdu Engineering Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610072)

Abstract: Based on large-scale in-situ seepage deformation test on site, and through statistical analysis of a large number of parameters, this paper proposes the suggested value of seepage deformation parameters of the quaternary sedimentary soil layer for construction of high earth-rockfill dams on deep overburden. Through field test, the physical and mechanical parameters and test methods of overburden with a depth of more than 100 meters are discussed, which provides a reliable basis for the design, and has good guidance and reference for the survey and design of the upcoming projects or projects under construction such as Shuangjiangkou Hydropower Station and Jinchuan Hydropower Station in the Dadu River.

Key words: deep overburden; in-situ test; impermeability characteristics; parameter selection; Southwest China

1 概 述

碳中和大背景下,作为清洁能源的水电是实现碳中和的最佳电源之一。根据已有的河流综合规划及水电开发规划,我国西南地区诸河还将建设一批调节性能好的高坝大库工程,这些高坝大库工程不可避免地将遇到深厚覆盖层地基问题。而在河床深厚覆盖层上建高土石坝遇到的主要工程地质问题是因其结构不连续造成的差异沉降、坝基渗漏、渗透变形、地震液化和软弱夹层的剪切破坏,尤以坝基渗流控制和渗透安全至关重要。阐述了围绕西南地区影响土石坝渗透、稳定、变形及坝基处理方式的深厚覆盖层设计参数这一关键因素开展的系统现场及室内试验研究工作,并对所取得的试验成果进行了统计分析研究工作,分土层提出了具体的物理力学试验统计成果。

从研究深厚覆盖层抗渗特性及工程实际应用

角度出发,重点研究了第四纪沉积物漂卵砾石土的渗漏和渗透稳定问题,采用将现场渗透变形试验和室内渗透变形试验取得的成果进行对比的方式获取安全且经济的允许坡降。对照规范、手册并结合工程经验及参数统计值,提出了西南地区第四纪沉积物漂卵砾石层渗透变形参数建议值。

2 深厚覆盖层渗透变形参数测试方法探讨

2.1 常见的深厚覆盖层渗透变形参数测试方法
深厚覆盖层渗透系数的测试方法^[1]通常包括:(1)室内试验(包括常水头和变水头渗透试验);(2)现场试验(包括开挖井、钻孔抽水和注水,单环、双环试坑注水;原状样渗透试验)。其中抽水试验可分为单孔抽水、多孔抽水、孔群互阻抽水试验;钻孔注水试验通常用于地下水位埋藏较深、不便进行抽水试验的钻孔中;单环、双环注水试验可方便地测试出原位土体的渗透系数;原状样渗

透试验可将土层切取脱离体、现场浇筑封装作短距离搬运后开展试验。原状样渗透试验既能测试土体的渗透系数,亦能获取土体的抗渗临界坡降和破坏坡降,能够很好地克服室内重塑试样无法模拟原状土的天然结构和水流通道特征,尤其是很难再现天然地基土的非均匀性和各向异性的缺点^[2];另外,钻孔抽水、注水试验由于其边界条件无法得到较好的控制,所测得的渗透系数甚至会有2个数量级的误差,故设计人员仅将其作为参考。文中仅重点介绍了深厚覆盖层渗透变形参数采用的现场测试方法。

2.2 深厚覆盖层渗透允许坡降的选取

一般情况下,砂土、黏性土的渗流速度很小,可以认为其流动形式为层流,渗流运动的规律符合达西定律。深厚覆盖层(漂卵砾石、砾)的典型*v-i*曲线见图1。由于其孔隙很大,当水力坡降较小时流速不大,其渗流可以认为是层流,达西定律依然适用。当水力坡降较大时,流速增大,渗流形式将变为紊流,此时的*v-i*曲线呈非线性关系,达西定律不再适用。

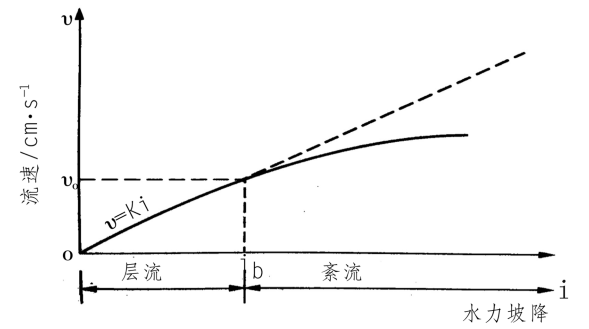


图1 深厚覆盖层(漂卵砾石、砾)的典型*v-i*曲线图

渗透破坏的两种常见破坏形式为:

(1)流土:也称流砂,是指在渗流作用下某一范围内土体的表面隆起、浮动或某一颗粒群的同时起动而流失的一种沙沸现象。在渗透力作用下,土体中的颗粒群同时启动而流失,它可以发生在无黏性土中,也可以发生在黏性土中。在渗流力作用下,粒间有效应力为零时,颗粒群发生悬浮、移动的现象称为流土现象。

(2)管涌:在渗透作用下,无黏性土中的细小颗粒通过大颗粒孔隙时发生移动或被带出现象,致使土层中形成通道而产生集中涌水的现象。

土料的渗透稳定由容许水力梯度表示,其值与一系列因素有关,包括土中细颗粒料的比例、细

粒物质的含量和土的级配特征、密实程度等。提高土的抗渗强度的最有效措施是在渗流出逸处设置反滤层,以防止在水工建筑物的渗流出口发生渗流破坏。

3 第四纪沉积物的抗渗特性及试验参数

3.1 基本物理试验参数

西南地区深厚覆盖层中存在大量的第四纪沉积物,一般而言,西南地区河床覆盖层的颗粒组成^[3]可归类为以下四类:(1)颗粒粗大、磨圆度较好的第四纪沉积物,以漂石、卵砾石层为主;(2)块、碎石层;(3)颗粒细小的中粗-粉细砂层;(4)黏土、粉质黏土、粉土层。各种颗粒的组成界限往往不明显,漂石、卵砾石层常夹有砂层;块、碎石与细土相互填充,其以漂卵砾石层为主,厚度、结构特征、埋深、工程地质问题大致相同,强度和变形特征基本能满足高坝建设要求,主要存在渗漏问题。研究时考虑到常规试验一般在10 m左右深度进行,故将覆盖层浅部和深部的分界定为埋深10 m。将埋深≤10 m的部分统称为浅部漂卵砾石,埋深>10 m的部分统称为深部漂卵砾石^[4]。

研究中统计了深溪沟、猴子岩、双江口、长河坝、硬梁包、巴底、金川等水电工程第四纪沉积物大量漂卵砾石层土料的基础物理性质及变形试验成果(包含浅部试样和深部试样)。深厚覆盖层砂卵石浅部、深部、钻孔取样物理性质颗粒包络线对比情况见图2。

浅部(埋深≤10 m)干密度在1.89~2.41 g/cm³之间,平均为2.18 g/cm³。其包络线中粒径大于5 mm的颗粒含量平均为76.4%,粒径小于5 mm的颗粒含量平均为23.6%,粒径为2~0.075 mm的颗粒砂含量平均为17.5%;包络线分类定名为卵石混合土~混合土漂石。

深部(埋深>10 m)探坑取样干密度在1.95~2.45 g/cm³之间,平均为2.25 g/cm³。其包络线中粒径大于5 mm的含量平均为77.9%,粒径小于5 mm的颗粒含量平均为22.1%,粒径为2~0.075 mm的砂含量平均为14.4%。包络线分类定名为卵石混合土~混合土漂石。

钻孔取样干密度在1.73~2.3 g/cm³之间,平均为2.11 g/cm³,其包络线中粒径大于5 mm的颗粒含量平均为66.4%,粒径小于5 mm的颗粒含量平均为33.6%,粒径2~0.075 mm的砂

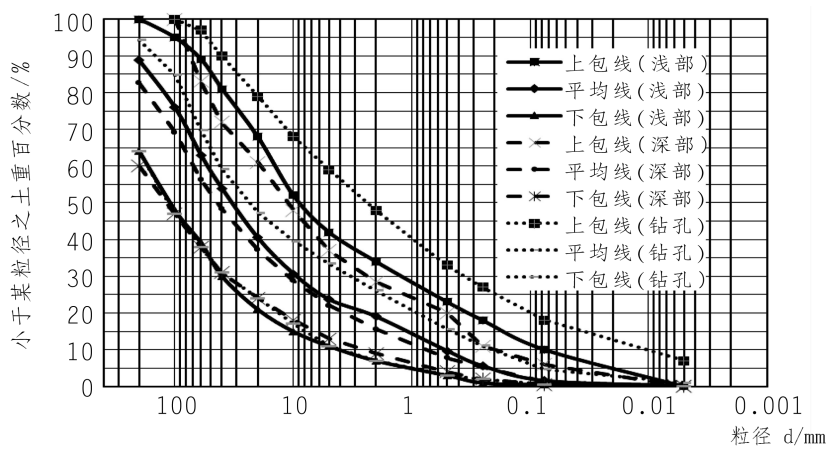


图 2 深厚覆盖层砂卵石浅部、深部、钻孔取样物理性质颗分包络线对比示意图

含量平均为 21.4%。包络线分类定名分别为粉土质砾~卵石混合土~混合土漂石。

3.2 抗渗特性参数研究

现场试验浅部和深部渗透系数的平均值基本为 10^{-2} cm/s 数量级,差别不大,但浅部的渗透系数离散性大。从临界坡降看,深部成果基本为浅部的 2 倍左右。结合物理性质成果看,深部的密实度更大,故其临界坡降大大高于浅部是合理的。现场试验浅部、深部渗透系数分布百分比情况见表 1,现场试验浅部、深部临界坡降对照情况见表 2。

土体类别	渗透系数分布范围划分 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$			
	$>10^0$	$10^0 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
浅部砂卵石	0	5.5	63.6	30.9
深部砂卵石	0	0	58.3	41.7

表 2 现场试验浅部、深部临界坡降对照表	
临界坡降(浅部)	临界坡降(深部)
0.15~1.19/0.54/49	0.59~1.91/1.29/6

注:范围/平均值/统计组数。

室内试验中浅部渗透系数的主要分布数量级为 $10^0 \sim 10^{-2}$ cm/s,占比达 88.6%。深部渗透系数的主要分布数量级为 $10^0 \sim 10^{-2}$ cm/s,占比达 87.5%。

对浅部和深部渗透系数的成果进行对比可知:渗透系数平均值大致为 10^{-1} cm/s 数量级,差别不大,但浅部的渗透系数离散性大。从临界坡降看,深部为浅部的 2 倍左右。室内渗透变形试验浅部、深部渗透系数分布百分比情况见表 3,室内渗透变形试验浅部、深部临界坡降对照情况见表 4。

表 3 室内渗透变形试验浅部、深部渗透系数分布百分比表 /%

土体类别	<渗透系数分布范围划分 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$			
	$>10^0$	$10^0 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
浅部砂卵石	3.8	44.3	44.3	7.6
深部砂卵石	0	37.5	50	12.5

表 4 室内渗透变形试验浅部、深部临界坡降对照表	
临界坡降(浅部)	临界坡降(深部)
0.06~0.54/0.19/74	0.13~1.08/0.43/36

注:范围/平均值/统计组数。

本次研究对西南地区第四纪沉积物漂卵砾石层现场和室内渗透试验成果进行了对比分析,浅部试样现场与室内渗透变形试验成果对比情况见表 5。结果表明:现场渗透变形试验和室内试验取得的结果存在较大差异,主要反映在抗渗临界坡降上。现场试验取得的抗渗临界坡降约为室内试验值的 2 倍以上。

首先,从试验方法的差异看:现场试验以原位试验或取原状试样为主,尽量避免了对土体原始结构的扰动。成都院从 20 世纪 80 年代开始在大渡河流域的冶勒水电站覆盖层(厚度达 400 多 m)开始取原状试样进行现场试验,至今已积累了一套较为完整的现场原状渗透变形试验方法并已列入电力行业规范;而室内试验样品一般采用扰动样并根据现场密度和含水率配制。

另外,从理论分析的角度出发,推测该结果可能由以下 2 个原因造成:①原状漂卵砾石层地质沉积历史复杂,物质组成复杂,其中含有少量化学胶结物质,结构扰动后导致其孔隙结构改变,某些化学物质或细颗粒流失,在室内难以复原;②原状

表 5 浅部试样现场与室内渗透变形试验成果对比表

项 目	现 场			室 内		
	临界坡降	破坏坡降	渗透系数 K_{20} / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	临界坡降	破坏坡降	渗透系数 K_{20} / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
统计组数	49	49	49	74	74	77
最大值	1.19	4.08	2.01×10^{-1}	0.54	1.98	1.3×10^0
最小值	0.15	0.41	1.09×10^{-3}	0.06	0.13	1.69×10^{-3}
平均值	0.54	1.77	2.76×10^{-2}	0.19	0.52	1.62×10^{-1}
标准差	0.18	1.4	1.12×10^{-1}	0.1	0.41	1.03×10^{-1}
变异系数	0.33	0.79	0.30	0.53	0.79	1.4

漂卵砾石土巨粒组含量较高、通常最大粒径大于 200 mm;受制于仪器尺寸,室内试验的最大粒径一般为 80 mm 或 60 mm,试样试验级配必须经过缩尺处理,而缩尺后的试样试验级配与原级配存在一定差异。已有研究资料^[5]表明:土体的渗透试验成果存在显著的缩尺效应,经过缩尺后的砂砾石料渗透试验结果与原型料的渗透性和抗渗破坏坡降存在较大差异,同时,其制样密度难以达到现场密度。

4 物理力学试验参数统计值与建议值

经过大量的统计分析工作,形成了一套完整的深厚覆盖层第四纪沉积物抗渗参数统计值,第四纪沉积物漂卵砾石层渗透变形参数对照情况见表 6。统计过程中,对大量的数据运

用概率与统计分析的方法进行了筛选,力求去伪存真。但是,因覆盖层本身性质的复杂性,加之资料来源的时间跨度大,有些试验资料甚至经过几代人的整理,故某些统计值具有较大的变化幅度。

这些统计参数针对具体的工程可直接参考应用,但若要运用到类比的工程时仅统计值尚嫌不够。故此次研究在试验统计值的基础上,依照物理力学参数相关性分析,对试验参数的统计值进行了重新审视、甄别,提出了在深厚覆盖层(漂卵砾石层)上建高土石坝的渗透变形参数试验建议值(表 6)。同时列入了《水力发电工程地质手册》建议值,以供直观对比。第四纪沉积物漂卵砾石层渗透变形参数对照表见表 6。

表 6 第四纪沉积物漂卵砾石层渗透变形参数对照表

土体类别	参数类别	干密度 ρ_d / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重 Gs	小于 5 mm 含量 $\leq 5\%$	小于 0.075 mm 含量 ≤ 0.075 /%	小于 0.005 mm 含量 ≤ 0.005 /%	渗透系数 K_{20} / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	容许 渗透坡降
漂卵砾石	浅部试验统计值	1.89~2.41	2.62~2.87	11~42	0.5~10	—	$1.1 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^0$	0.21~1.19
	浅部试验建议值						$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^0$	0.15~0.45
	深部试验统计值	1.95~2.45	2.7~2.84	13~32.5	0.5~5	—	$1.2 \times 10^{-3} \sim 8.2 \times 10^{-1}$	0.59~1.91
	深部试验建议值						$3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^0$	0.4~0.8
	地质手册建议值						$>10^{-2}$	0.1~0.25

注:物理性质参数由于可直接获取,仅具统计概念,故仅列入了试验统计值或试验控制值。表 6 中的容许渗透坡降值参照规范,在试验临界渗透坡降基础上按安全系数 1.5 计算。

5 结 语

(1)对比研究了西南地区深厚覆盖层中深部和浅部、现场原状试样和室内扰动样第四纪沉积物砂卵石试样的渗透稳定特性试验成果,结果表明:浅部和深部的渗透系数平均值基本处于同一数量级(10^{-2} cm/s),差别不大;从临界坡降看,深部成果约为浅部的 2 倍左右。现场试验结果表明:浅部渗透系数低于室内约 1 个数量级,现场试

验的浅部临界坡降大约为室内试验浅部临界坡降的 2 倍以上;室内扰动试样比现场原状试样具有更强的透水性和更低的临界坡降。现场渗透变形试验取得的成果更具参考价值。

(2)现场或原状样渗透变形试验方法是中国电建成都院在本行业具有特色或长期探索后总结出的试验方法,现已列入土工试验规程。通过总

(下转第 9 页)

洛渡水电站坝基渗压受水压作用较为显著,库水位升高,坝基渗压水位升高;库水位下降,则坝基渗压水位降低,坝基渗压水位的变化基本同步于库水位的变化^[6]。研究表明:时效也是影响坝基渗压的因素之一,时效分量已逐渐趋于收敛。温度分量采用周期函数相比采用实测温度的温度分量占比要大一些。降雨分量均较小或几乎不产生影响。

由以上分析可知:温度分量采用实测温度,其统计模型的复相关系数较高,坝基渗压预测成果和监测实测值较接近,说明温度分量采用实测温度具有较强的预报精度,对大坝安全监测具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 李雅静,张志诚,陈广洲. 渗压监测统计模型欠拟合问题及因子的扩充[J]. 长江科学院院报,2009,26(6):13-14.



(上接第 4 页)

结覆盖层现场渗透变形试验成果,所得出的允许坡降较原经验值有较大幅度的提高,已成功应用于冶勒、太平驿、瀑布沟、长河坝等工程,尤其对坝基覆盖层现场渗透变形试验进行了研究论证,在太平驿工程设计中将全封闭式防渗墙改为悬挂式,所取得的工程效益十分显著。

(3)太平驿水电站是中国电建成都院在岷江流域深厚覆盖层上通过现场原状样渗透变形试验论证后、对渗透变形和渗漏量进行充分计算、论证分析后建成的第一个悬挂式防渗墙(原方案为插入基岩全封闭),建成后几乎滴水不漏,经历了2008年“5·12”地震至今运行良好。

参考文献:

[1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北

[2] 李姝昱,张伟,姚远,顾伊娜. 丰满大坝坝基扬压力安全监控指标拟定[J]. 人民黄河,2011,33(4):124-126.
[3] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006.
[4] 刘天祥,包腾飞,宋锦焘,沈寿亮,梁睿斌,姜彦作. 基于遗传算法的 LIBSVM 模型大坝扬压力预测研究[J]. 三峡大学学报,2013,35(6):24-28.
[5] 包腾飞,吴中如. 新安江大坝岸坡坝段扬压力偏高成因及其影响[J]. 水力发电,2003,29(2):103-106.
[6] 於三大,陈绪春,冯兴常. 三峡工程大坝混凝土施工及监测成果分析[J]. 水力发电,2009,35(12):40-42,69.

作者简介:

张超萍(1988-),女,湖南邵阳人,工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作;
冯宇强(1984-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,从事工程安全监测设计与评价研究工作;
代乔亨(1997-),男,四川乐山人,助理工程师,学士,从事水利水电工程安全监测工作. (责任编辑:李燕辉)

京:中国建筑工业出版社,2007.
[2] 吕衡. 太平驿水电站闸基覆盖层渗透及渗透变形试验研究[J]. 水电站设计,1995,11(3):111-112.
[3] 许强,陈伟,张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因吉利的新认识[J]. 地球科学进展,2008,23(5):449-450.
[4] 余挺. 深厚覆盖层工程勘察研究与实践[M]. 北京:中国电力出版社,2019.
[5] 陈生水,凌华,米占宽. 大石峡砂砾石坝料渗透性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):26-31.

作者简介:

葛明明(1982-),男,甘肃平凉人,工程师,学士,从事岩土工程试验研究工作;
李小泉(1965-),男,重庆万州人,教授级高级工程师,副专业总工程师,学士,从事岩土工程试验研究工作;
鲁涛(1987-),男,湖北宜昌人,工程师,硕士,从事岩土工程试验研究工作. (责任编辑:李燕辉)



由电建成都院参建的郑州地铁 8 号线一期工程土建施工 01 标首台盾构机顺利掘进贯通

2021 年 9 月 22 日,由成都院工程测试科学研究院负责施工监测及控制测量的郑州地铁 8 号线一期工程土建施工 01 标首台盾构机在梧桐街入场线成功接收,标志着郑州地铁 8 号线一期首台盾构圆满完成掘进任务,平安到达梧桐街入场线。

梧桐街入场线右线盾构区间长度为 907.553 m,区间隧道侧穿加油站,距离油库水平距离约为 16.4 m,隧道上覆土层厚度约为 7.4 m,施工监测及控制测量项目部沿盾构区间线路共布设了地表沉降、地下水位、建筑物沉降、洞内收敛等各类监测点 260 个,全方位对盾构区间地表及周边建筑进行监测和控制测量。特别是在郑州“7·20”特大洪水受灾过程中,施工监测及控制测量项目部克服重重困难,对失效损坏的监测点进行及时恢复并加密观测,为盾构的顺利掘进贯通保驾护航。

(供稿:朱厚耀 朱德华)