

文章编号:1001-4179(2013)05-0036-04

# 水电工程坝基砾卵石层工程地质特性研究

——以金沙江上江-其宗河段河床砾卵石层为例

闵 文, 孙 云 志, 王 启 国

(长江勘测规划设计研究院 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**砾卵石层是水电工程坝基经常遇到的地层之一,取砾卵石层原状样品进行室内物理力学性质试验比较困难,其工程地质特性指标通常是通过现场原位试验获得。以金沙江上江-其宗河段为例,开展了砾卵石层的工程地质特性研究。研究表明:金沙江上江-其宗河段砾卵石层整体上较均匀,粗颗粒在砾卵石层中起骨架作用,强度主要取决于粗颗粒的强度,砾卵石层的密实度随深度增加而逐渐增大,砾卵石层属于低压缩性土,具中等-强透水性,承载力、抗剪强度、变形模量、弹性模量等参数均较高,渗透破坏形式主要为管涌。砾卵石层坝基主要工程地质问题为沉降变形、渗漏及渗透稳定。

**关键词:**坝基;砾卵石层;工程特性;金沙江上游

中图分类号:P642 文献标志码:A

砾卵石是第四系土体中常见的一种粗粒土,广泛分布在大江大河、中小河流中上游地带的河床中,部分分布在河谷两岸阶地上。其成因以冲积为主,其次为洪积、冰川堆积等。

砾卵石层是水电工程坝基河床覆盖层中常遇到的重要地层之一。我国多数水电工程坝址河床覆盖层厚度不大,坝基处理多采取清除覆盖层的工程措施。但是,也有不少水电站坝址河床覆盖层深厚,若采取清除措施必将造成工期、投资等方面的不合理、不经济,尤其是清除超过100 m厚覆盖层的坝工技术在国内外未有先例,技术风险大<sup>[1-7]</sup>。因此,利用覆盖层筑坝是深厚覆盖层坝基设计的首选方案。

我国西南山区是水电资源最为丰富的地区,也是河床深厚覆盖层分布较为典型的地区。其中,金沙江、大渡河、岷江、雅砻江等河流中普遍分布深厚覆盖层。例如,金沙江虎跳峡龙蟠-其宗河段各比选坝址的河床覆盖层厚度达100~250 m;大渡河瀑布沟、长河坝、黄金坪水电站坝基河床覆盖层厚度分别为75,79,130 m;大渡河支流冶勒水电站坝基河床覆盖层厚度大于420 m,是我国目前已建或待建水电工程中发现的最深覆盖层;岷江钟坝、磨刀溪水电站坝基河床覆盖层厚度

分别为104,100 m;新疆塔什库尔干河下坂地水电站坝基河床覆盖层厚度150 m等。这些坝址砾卵石层均为河床覆盖层中的主要地层,因此研究砾卵石层的工程地质特性对水电工程大坝建基面的选择与利用意义重大。

砾卵石属于第四系松散堆积体,采取原状样品进行室内物理力学性质试验比较困难,其工程特性指标通常采用现场原位试验获得。由于砾卵石原位试验费时费事,试验条件复杂,相对而言,对其物理力学指标的研究相对较少。本文以金沙江上江-其宗河段为例,结合金沙江虎跳峡河段水电开发方案(即“一库八级”方案)开展了河床砾卵石层特性的研究工作。原位试验方法主要有颗粒分析、现场大容重、击实试验、超重型动力触探、抽水试验、钻孔声波、剪切波测试、现场旁压试验、现场荷载试验,以及模拟级配试样孔隙比测试、室内压缩、三轴剪切和渗透变形试验等,其成果可供类似工程参考。

## 1 砾卵石层基本特征

金沙江上江-其宗河段长约25 km,河床新近沉积的砾卵石层属冲积成因,厚度49.7~66.7 m。砾卵

表 1 砾卵石层颗粒组成

%

坝置	不同粒径组含量百分数													$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$C_u$	$C_c$
	200~100 mm	100~80 mm	80~60 mm	60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	<0.1 mm					
上江	17.5	9.7	10.4	9.9	18.0	10.6	8.5	2.9	1.2	2.6	4.1	3.2	1.4	0.7	16.5	55.0	83.3	7.5
德良	12.2	10.2	10.6	11.4	21.9	11.6	6.0	2.2	1.1	2.4	4.8	4.1	1.3	0.5	17.6	46.5	96.8	13.8
良美	25.6	11.6	15.3	11.0	20.1	6.8	3.4	1.2	0.8	1.0	1.0	1.2	1.1	10.0	32.0	76.0	7.6	1.3
塔城	21.8	9.7	15.0	13.0	25.9	8.1	2.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7	0.9	13.0	31.0	69.5	5.3	1.1
乌鲁	11.6	6.2	8.7	11.7	26.0	18.3	11.0	2.5	1.1	0.8	0.6	0.7	0.9	6.7	17.5	38.0	5.6	1.2
高别	13.2	6.5	11.1	10.2	26.5	18.3	8.9	1.7	0.7	0.7	0.6	0.9	0.9	7.0	18.0	41.0	5.8	1.1
其宗	24.1	11.8	15.6	13.6	20.9	5.2	1.6	0.5	0.4	1.0	1.5	2.4	1.5	15.0	35.0	75.0	5.0	1.1

石的母岩成分主要为石英砂岩、花岗岩、大理岩、石英岩, 偶见红色砂岩, 多呈次圆状, 少量扁圆状、次棱角状、针片状, 地表观察零星分布漂石, 最大粒径达 35 cm, 钻孔中取出的漂石呈短柱状。该层钻机钻进困难, 多数孔段漏浆、垮孔严重。

## 2 物理性质试验及成果分析

### 2.1 颗粒组成

在研究河段河床中, 从下游到上游依次选取上江、德良、良美、塔城、乌鲁、高别、其宗等 7 处, 通过地表采样、钻孔锤击法采样, 进行颗粒分析, 成果见表 1。根据试验结果定名为级配不良砾或级配良好砾。

结果显示, 砾卵石层中卵石含量 30.8% ~ 52.5%, 砾石含量 41.8% ~ 69.5%, 砂粒含量 1.6% ~ 8.3%, 细粒(粉粒、黏粒)含量 1.6% ~ 5.4%。可见, 砾卵石层以砾石、卵石居多, 总体含量在 85% 以上, 表明砾卵石层主要由粗料形成骨架, 之间被细料充填, 细料较少。因此, 砾卵石层的工程特性主要取决于粗料的特性。

### 2.2 密度与含水量

采用现场大容重试验测试表层砾卵石层的密度和含水量, 结果表明该层的天然密度为 2.12 ~ 2.30 g/cm<sup>3</sup>, 干密度为 2.06 ~ 2.21 g/cm<sup>3</sup>, 含水量一般为 4.29% ~ 9.70%。对深部砾卵石层通过锤击法取样测得干密度为 2.14 ~ 2.26 g/cm<sup>3</sup>。

### 2.3 孔隙比

采用原状土材料的现场级配和密实度制备试样, 在不同压力作用下测试砾卵石层的孔隙比, 成果见表 2。可见, 试样均有随压力增大孔隙比逐渐减小的趋势, 间接反映了砾卵石层有随深度增加上覆荷载变大从而使其孔隙比逐渐减小的规律。

### 2.4 击实试验

采用现场级配原土材料, 并控制试样的干密度与

各试点河床覆盖层的干密度一致, 对试件进行了击实试验。测试的含水量与干密度关系见表 3。最大干密度较天然干密度增大了 7% 左右, 表明砾卵石层具有一定的压实性, 当然这属于按原级配制作的样品的试验特征。

表 2 砾卵石层孔隙比测试成果

坝置	试验密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	各级压力下的孔隙比 $e$					
		0MPa	0.1MPa	0.4MPa	0.8MPa	1.6MPa	3.2MPa
德良	2.21	0.223	0.217	0.211	0.207	0.200	0.189
良美	2.22	0.219	0.217	0.213	0.209	0.203	0.201
塔城	2.14	0.262	0.259	0.255	0.252	0.246	0.238
高别	2.26	0.197	0.195	0.192	0.189	0.184	0.177
其宗	2.19	0.230	0.229	0.223	0.219	0.213	0.201

表 3 砾卵石层击实试验成果

坝置	试件干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/ %	最大干密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )
德良	2.21	5.00	2.37
良美	2.22	5.50	2.39
塔城	2.14	6.00	2.30
高别	2.26	4.80	2.43
其宗	2.19	6.50	2.35

## 3 力学性质试验及成果分析

### 3.1 承载力

采用超重型动力触探试验测试砾卵石承载力。超重型动力触探试验具有设备简单、操作容易的特点, 是国内外在工程地质勘察中广泛使用的原位试验方法之一。测试成果显示, 上江、塔城砾卵石层的承载力多数在 1 000 kPa 以上, 变形模量多大于 65 MPa, 强度较高, 是建筑物较好的地基持力层。

### 3.2 弹性模量

采用跨孔法剪切波测试砾卵石层的弹性模量。试验地点选择在上江河漫滩上的勘探钻孔中。测试结果显示, 砾卵石层的纵波波速是横波波速的 3 倍左右, 波

速总体上有随深度增加数值增大的趋势,间接反映了土层的密实度随深度增加而逐渐增大的规律。局部曲线的波动反映了层位中块石、漂石、砾砂等夹层的分布情况,数值大时表明此处分布块石或漂石,数值小时表明此处分布砾砂等细粒土夹层。根据剪切波测试的成果,采用经验公式计算得出砾卵石层的泊松比、剪切模量、弹性模量,相应均值分别为 0.43,394,1 104 MPa。

### 3.3 变形模量

旁压试验具有原位、准确、测试深度大等特点。它是利用可膨胀的圆柱形旁压器在钻孔内对孔壁施加压力,使孔壁产生变形,通过控制装置测出压力和相应的变形,从而得到旁压曲线,根据旁压曲线计算土层的旁压模量、极限压力及变形模量。

测试地点选择在塔城河漫滩上,在 ZK48 号孔中进行,试验深度 18.9~33.5 m,测试结果显示,砾卵石层的变形模量一般为 40.75~59.80 MPa,略显随深度增加数值增大的趋势;含块石的砾卵石层变形模量较大,这与块石强度较高有关;测试结果和超重型动力触探测算的变形模量平均值相比偏小,这表明旁压试验测试点的砾卵石层具密实度略小、强度较低的工程特点。

### 3.4 室内模拟级配试验

由于无法在砾卵石层中取得足够的室内试验所需的原始级配样,工程上经常进行室内模拟级配试验,以求得砾卵石层的某些强度指标,如抗剪强度及压缩性。级配控制方法,是将钻孔取得的砾卵石层试样,进行颗粒级配分析,根据颗粒级配分析试验成果,选择上包线级配、平均级配或下包线级配制备试样,再以现场测定的密度控制试样密度。对试样中超出仪器尺寸允许的部分颗粒,按试验规格进行等量替代。

(1) 抗剪强度。抗剪强度指标由三轴剪切试验获得,采用饱和固结排水剪。样品取自于塔城河漫滩上,对砾卵石层分别按 2.18,2.05,2.10 g/cm<sup>3</sup> 3 种不同密度进行试验。结果表明,砾卵石层的抗剪强度指标为:线性  $c' = 134 \sim 168$  kPa,  $\varphi' = 37.4^\circ \sim 38.1^\circ$ ;非线性  $\varphi_0 = 47.6^\circ \sim 49.2^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 6.6^\circ \sim 7.5^\circ$ 。可见,砾卵石层的抗剪强度较高,其中非线性较线性的抗剪强度大。

(2) 压缩性指标。压缩试验采用浮环式压缩仪,试验最大竖向压力为 3.2 MPa,试样饱和方法采用毛细饱和法。样品取自于塔城河漫滩上,对砾卵石层分别按 3 种不同密度进行试验,不同压力范围下的压缩模量试验成果显示,在不同密度下的砾卵石层均属低压缩性土,并均有随压力增大压缩模量逐渐增高的规律。

## 4 渗透特性

### 4.1 渗透系数

在河段内上江、塔城两地选择部分钻孔进行抽水试验,共测试 15 段。典型钻孔抽水试验成果显示,抽水试验流量  $Q \sim$  降深  $S$  曲线形态基本符合要求,试验成果可靠。砾卵石层测算的渗透系数为  $3.5 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-2}$  cm/s,具中等-强透水性。

### 4.2 渗透破坏比降

对研究河段内的砾卵石层在建坝后会产生何种类型的渗透变形,先根据颗粒级配进行初步判断,然后通过室内试验进行确认。试样取自于德良、良美、塔城、高别、其宗等 5 处河漫滩上的砾卵石层。这 5 处砾卵石层的细粒颗粒含量 ( $P_c$ ) 为 6.5%~21.9%,均小于规范 25% 的界定,渗透变形类型可初步判别为管涌。

通过模拟级配制样进行室内垂直渗透变形试验,所有试验均采用低水头浸润方式饱和,采用恒压供水筒系统供水。试样按试验干密度 93% 的压实度进行测试,测试成果显示,砾卵石层按模拟级配试样干密度 ( $2.14 \sim 2.26$  g/cm<sup>3</sup>) 93% 压实度时的渗透破坏形式均为管涌,和上述判别结果基本吻合。

进一步地,室内试验测得上述 5 处砾卵石层的临界比降为 0.20~0.52,根据规范规定“无黏性土的允许比降的确定以土的临界水力比降除以 1.5~2.0 的安全系数”,研究河段河床砾卵石层的渗透稳定对水工建筑物的危害较大,故安全系数取 2,可得砾卵石层的允许比降为 0.10~0.26。

## 5 工程意义

研究河段砾卵石层工程地质特性试验成果表明:

(1) 砾卵石层整体上土质较均匀,根据颗分试验结果,粗颗粒在砾卵石层中起骨架作用,土层强度主要取决于粗颗粒的强度,粗颗粒岩性主要为石英砂岩、花岗岩、大理岩、石英岩等。

(2) 根据钻孔声波、剪切波以及超重型动力触探试验成果,砾卵石层的密实度随深度增加有逐渐增大的趋势,整体上反映表层 10m 的砾卵石层多呈稍密~密实状态,以下主要呈很密状态,砾卵石的强度与密实度有较好的对应关系,即密实度越大砾卵石层强度越高;反之,密实度较差砾卵石层强度相对就较小。

(3) 砾卵石层属于低压缩性土,具中等-强透水性,承载力、抗剪强度、变形模量、弹性模量等参数均较高,渗透破坏形式主要为管涌,允许破坏比降为 0.10~0.26。

## 6 结论

通过对金沙江上江-其宗河段砾卵石层特性研究,得出以下结论:该河段砾卵石层整体上较均匀,粗颗粒在砾卵石层中起骨架作用,强度主要取决于粗颗粒的强度;砾卵石层的密实度随深度增加有逐渐增大的趋势,砾卵石层的强度与密实度有较好的对应关系;砾卵石层属于低压缩性土,具中等-强透水性,承载力、抗剪强度、变形模量、弹性模量等参数均较高,渗透破坏形式主要为管涌,允许破坏比降为0.10~0.26。砾卵石层坝基主要工程地质问题为沉降变形、渗漏及渗透稳定问题。由于砾卵石层整体上密实度较高,承载力、变形模量等较大,因此大坝的沉降变形量不会很大;对坝基渗漏及渗透破坏稳定方面的问题,应采取防渗墙等防渗工程措施对透水性较强的砾卵石层进行封

闭处理。

### 参考文献:

- [1] 王启国.金沙江虎跳峡河段河床深厚覆盖层成因及工程意义[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1455-1466.
- [2] 金辉.我国西南地区河谷深厚覆盖层基本特征与成因机制研究[D].成都:成都理工大学,2008.
- [3] 王启国,孙云志,刘高峰.金沙江上江坝址河床粘土层特性及工程意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):71-74,79.
- [4] 王启国.金沙江中游上江坝址河床深厚覆盖层建高坝可行性探讨[J].工程地质学报,2009,17(6):745-751.
- [5] 李建勇,顾少娟,韩旭.金沙江塔城水电站河床覆盖层的形成机制及空间分布特征的研究[J].资源环境与工程,2009,23(5):683-686.
- [6] 郭庆国.粗粒土的工程特性及应用[M].郑州:黄河出版社,1999.
- [7] 汪小刚,刑义川,赵剑明,等.西部水工程中的岩土工程问题[J].岩土工程学报,2007,29(8):1129-1134.

(编辑:赵凤超)

## Engineering geological characteristics of gravel layer at dam foundation of hydropower projects: case of gravel layer in riverbed of Shangjiang - Qizong reach of Jinsha River

MIN Wen, SUN Yunzhi, WANG Qiguo

(Yangtze Geotechnical Engineering Corporation, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The gravel layer is often encountered in dam foundation of hydropower projects, undisturbed samples - taking for testing physical and mechanical properties in lab is difficult, and the indicators of engineering geological characteristics are usually obtained through on - site and in situ test. Taking Shangjiang - Qizong section of Jinsha River as example, the geological engineering characteristics of gravel layer is studied. The study shows that the gravel layer is relatively uniform on the whole, and coarse particles play a significant role in it. Its strength depends mainly on the strength of coarse particles, and its compactness increases with the depth gradually. The gravel layer is classified as a kind of soil with low compressibility and moderate to strong water permeability. Moreover, the carrying capacity, shear strength, deformation modulus, elastic modulus and other parameters are higher; piping is the main seepage destruction form. Settlement and deformation, seepage and permeable stability are the main engineering geological problems of dam foundation of the gravel layer.

**Key words:** dam foundation; gravel layer; geological characteristics; upper Jinsha River

· 简讯 ·

### 长江科学院承担的普立特大桥隧道锚抗拉拔模型现场试验完成

由长江科学院岩土重点实验室工程技术学科承担的云南普立特大桥隧道锚抗拉拔模型现场试验已于近日完成,该项试验按照相似原理进行模型制作,对试验过程中产生的变形,尤其是围岩破坏过程和破坏面形态进行跟踪测试,为认识普立特大桥隧道锚变形破坏过程,研究隧道锚力学机理提供了试验依据。

该研究项目系云南省交通运输厅科技项目《高山峡谷地区悬索桥隧道锚设计施工关键技术研究》,项目依托工程为普宣高速公路普立特大桥(主跨628 m悬索桥,筒支钢箱梁,设计主缆荷载为 $2 \times 101\,341$  kN)。其试验包括1:25城门洞体双锚模型试验、圆柱体与圆台体模型“夹持效应”对比试验。试验布置

在75 m斜洞的中部,通过爆破开挖出4条试验平洞,在2条试验平洞中间预留的岩体上用风手钻和人工开凿隧道锚模型,浇筑钢筋混凝土,锚碇模型周围岩体安装了多点位移计、应变计、测缝计和千分表。试验内容包括不同荷载下的弹性试验、流变试验及破坏性试验。

试验从2012年6月23日开始,历经7个多月。长江科学院项目组克服了试验斜洞陡倾(40°)、坚硬岩体制样成型、设备超重移动、精密仪器安装,尤其是微小变形测试等方面的困难,顺利完成了隧道锚现场力学模型试验。试验期间,还开展了重力锚碇建基岩体力学参数试验复核与岩溶探测的科研服务工作。(长江)