

马鞍山长江大桥近岸桥墩岸坡防护方案的水槽试验研究

黄卫东, 姚仕明, 沈之平, 廖小永

(长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要:在建的马鞍山长江大桥江中共设有6个主墩,其中有4个桥墩距左右岸堤防、江心洲圩堤较近。通过概化水槽模型试验,研究了近岸桥墩在不同的流量和水文过程条件下河床变形的趋势,并在此基础上对岸坡防护方案、防护标准进行了有益的探索。该模型充分考虑了模型比尺、模型沙选择和水流验证等因素,并以数学模型计算相互印证,为研究成果的可靠性提供了保证,亦对其他跨河桥梁近岸桥墩选址和防护工程实施具有重要的参考价值。

关键词:马鞍山大桥;近岸桥墩;河床变形;岸坡防护;水槽试验

中图分类号:TV54;TV83;TV81

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2013)01-0052-05

1 概述

在桥梁的水毁事件中,桥墩冲刷是最主要的原因,冲刷严重影响着桥梁的整体稳定。桥墩周围河床的冲刷深度决定了桥墩基础的安全埋置深度,冲刷范围决定了桥墩基础的防护范围。桥墩的修建改变了原有的水流结构,其周边会产生强烈涡流,水流冲刷河床形成冲刷坑,进而造成近岸边坡变陡,导致河岸的稳定性降低,当稳定性降低到一定程度后,河岸便会在重力作用下发生崩塌。崩岸将给河流沿岸带来巨大的经济损失,如岸边耕地流失、交通运输设施破坏等。岸滩的不断崩退,直接威胁堤防及两岸建筑物的安全。崩岸产生的大量土体滑到河道内,使河床淤积抬高;崩岸使河宽增加,在退水期不能冲刷成槽时往往会形成浅滩,不利于维持良好的航道条件。

在建的马鞍山长江大桥共设有四个近岸桥墩,其中主汊(左汊)两边墩的尺寸为:承台标高7 m,厚6 m,迎水面宽31.7 m,顺水长69.2 m,承台下迎水面中布设排桩,共48根桩。受近岸水流冲刷和近岸岸坡相对不稳定性的共同影响,近岸桥墩河床变形影响因素和趋势更具复杂性,进而对岸坡防护方案、防护标准也提出了新的要求。

2 模型情况

马鞍山长江大桥近岸桥墩岸坡防护方案的水槽试验采用断面正态模型,模型几何比尺定为1:100。桥墩局部冲刷试验在长约30 m、宽3 m、

高1 m的水槽中进行,水槽铺沙段长7 m,铺沙厚0.4 m(图1)。试验采用合成塑料沙作为模型沙,计算得模型沙的设计中值粒径为 $d_{50} = 0.25 \text{ mm}$ 。试验放水要素见表1。

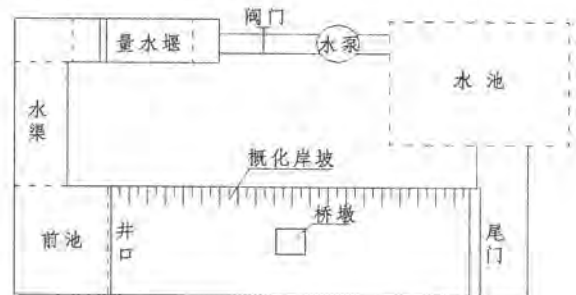


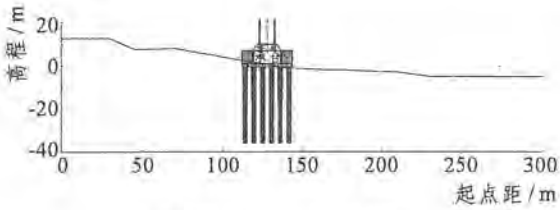
图1 马鞍山长江大桥桥墩局部模型示意图

表1 试验放水要素表

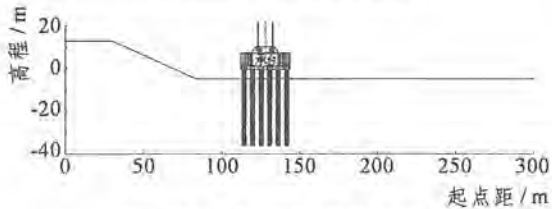
特征流量	流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
平滩流量	45 000
多年平均洪峰流量	56 800
20 a一遇洪峰流量	85 000
100 a一遇洪峰流量	95 000
300 a一遇洪峰流量	102 500

需要指出的是:由于在建的马鞍山长江大桥左汊两边墩均位于地势较高且坡度相对较缓的岸坡上,为了使研究的问题一般化,也为了更直观地研究近岸桥墩附近的岸坡变形并对比各种岸坡防护措施的效果,还进行了岸坡(1:3)概化模型试验,模型起始地形见图2。为了研究极限不利水文条件下近岸桥墩河床的变形情况,参照原型岸坡的流速,研究了水深5~10 m,流速在2 m/s左右的工况。

收稿日期:2012-11-17



(a) 桥址断面概化模型起始地形



(b) 岸坡(1:3)概化模型起始地形

图2 概化模型起始地形图

3 试验成果分析

3.1 近岸桥墩周围水流分析

桥墩周围的水流结构主要包括墩前水面涌波、桥墩迎水面向下水流和尺度很大的紊流区。紊流区具有复杂的综合水流结构,包括桥墩迎水面向下的水流和两侧绕流在床面附近形成的马蹄形涡流、桥墩两侧分离形成的尾流涡流以及在桥墩两侧和桥墩后由床面附近释放的小涡流。同时,桥墩周围的流场与桥墩周边的河床局部变形有着密不可分的关系。桥墩周围的流场触发并控制着局部冲刷模式,反之,局部冲刷的发展也影响着桥墩周围的水流结构。桥墩紊流系造成桥墩局部冲刷的重要因素。试验过程中观测到的水流现象如下:(1)表面水流受到桥墩的顶冲作用往两侧分流,正对桥墩的水流遇到桥墩后转变为垂直向下的水流,淘刷墩前的局部河床;(2)水流经过桥墩时的左侧绕流抵达岸边的位置与墩前的行近流速有着密切关系,流速越大,水流抵达岸边的位置越靠上游;(3)在桥墩尾部也形成较明显的回流区。在距墩尾较远的位置,被桥墩分开的水流有合并的趋势,断面流速分布逐步恢复到桥墩上游的状态;(4)桥墩前有明显的水面涌波和壅水现象,流量较大时,水位亦相对较高,整个承台位于水面以下,表层水流受到桥墩的阻力相对较小,壅水现象没有低水位时明显,但水面涌波和水流紊动却十分清晰。此类型桥墩附近的水流结构见图3。

3.2 近岸桥墩的近区冲刷坑

桥墩局部冲刷深度影响因素众多,与桥墩形

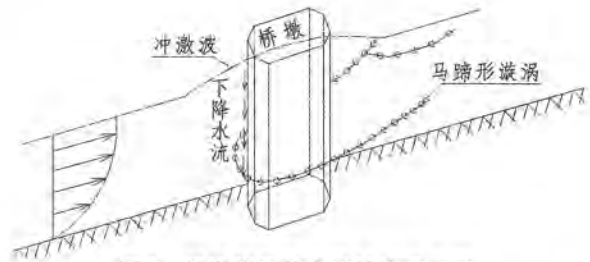


图3 桥墩附近的水流结构示意图

状、桥墩附近的水流强度以及河床组成密切相关,其机理十分复杂,概括起来,主要有以下三种观点:(1)墩周流场的涡流体系;(2)墩前下降水流的冲击作用;(3)水流受桥墩的压缩作用。

影响冲刷坑深度的因素主要包括行近流速、水深、泥沙中值粒径、泥沙级配、桥墩形状、桥墩尺寸和水流冲击角等。局部冲刷可分为清水冲刷和动床冲刷两种类型。清水冲刷是指进入局部冲刷坑的来流不携带泥沙情况下的冲刷,而动床冲刷是指局部冲刷坑可以持续地获得来流挟沙水流的泥沙补给。有关研究表明:清水冲刷下的桥墩最大冲深值比动床冲刷下的桥墩最大冲深值约大10%。为了偏于安全考虑,局部冲刷试验一般采用清水冲刷。

在试验过程中,可以观察到以下情况:流向桥墩的水流受到承台及桩柱的阻挡,桥墩两侧的绕流使水流急剧弯曲,床面附近形成漩涡剧烈淘刷着桥墩的迎水端床面和周边的泥沙,形成局部冲刷坑。随着冲刷坑的不断加深和扩展,坑底流速逐渐降低,水流挟沙能力随之减弱,上游进入冲刷坑的泥沙与水流冲走的泥沙相平衡。同时,冲刷坑底的泥沙逐渐粗化,留下较粗颗粒铺盖在冲刷坑表面,使坑底粗糙程度增大,抗冲能力增强,水流的冲刷作用与床沙的抗冲作用趋向平衡,局部冲刷坑达到最深。试验观测到的最大冲深点位于桥墩迎水面中间略微偏深槽侧的位置。冲刷坑特征值和冲刷坑范围见表2、3。

3.3 近岸桥墩岸坡防护工程试验研究

在分析近岸桥墩对河床及岸坡变形影响的基础上,先后分别进行了土工织物砂枕(排)护岸、四面六边透水框架护岸、纤维模板护坡、混凝土铰链排护岸、土工布压载软体排护岸、抛石护岸等工程实施后的局部冲刷试验。防护前和防护后冲刷坑特征值及范围见表4、5。

从表2~5中可以看出:在岸坡(1:3)概化模型试验中,土工织物砂枕(排)护岸、四面体防护、土工布压载软体排护岸、抛石护岸等四种护岸工程实施后最大冲刷坑明显较小,初步分析其原因

表2 桥址断面概化模型各种水文条件下桥墩冲刷坑特征值表

水文条件	流量 /m ³ ·s ⁻¹	项 目	左汊 左边墩
平滩流量	45 000	最深点高程 /m	-1.74
		最大冲刷深度 /m	0.74
多年平均洪峰流量	56 800	最深点高程 /m	-3.19
		最大冲刷深度 /m	2.19
20 a一遇洪峰	85 000	最深点高程 /m	-3.86
		最大冲刷深度 /m	2.86
100 a一遇洪峰	95 000	最深点高程 /m	-4.75
		最大冲刷深度 /m	3.75
300 a一遇洪峰	102 500	最深点高程 /m	-7.55
		最大冲刷深度 /m	6.55

表3 桥址断面概化模型各种水文条件下桥墩冲刷坑范围表

水文条件	流量 /m ³ ·s ⁻¹	局部冲刷坑范围 /m			
		上游侧	左侧	右侧	下游侧
平滩流量	45 000	5.2	6.7	11.2	12
多年平均洪峰流量	56 800	6.5	7	12.5	14
20 a一遇流量	85 000	8.9	11.1	17.4	49
100 a一遇流量	95 000	15	16.5	23.5	65
300 a一遇流量	102 500	20	21	28	85

为:(1)四面体具有较好的缓流促淤作用;(2)以上护岸形式整体性相对较差,个体的自由度较大,流量较大时,护岸材料容易被冲动,部分滑落至桥墩附近,在桥墩周边间接形成了保护层,阻止了冲刷进一步向下发展。在同等水流条件下(行近流速 $V=2\text{ m/s}$),实施岸坡防护后的冲坑范围远小于防护前的冲坑范围,多种护岸形式实施后,其冲刷过程、冲刷形态、范围及最大冲深点等基本类

表4 岸坡(1:3)概化模型桥墩冲刷坑特征值统计表

工 况	墩前流速 /m·s ⁻¹	尾门水位 /m	冲坑特征值	
			最深点高程 /m	最大冲刷深度 /m
1:3岸坡概化(无防护)	2	10	最深点高程 /m	-25.28
			最大冲刷深度 /m	20.28
土工织物砂枕(排)护岸	1.49→1.83→2.13→1.83→1.49	5→7→10→7→5	最深点高程 /m	-24.68
			最大冲刷深度 /m	19.68
四面体防护	2	10	最深点高程 /m	-23.14
			最大冲刷深度 /m	18.14
纤维模板护坡	2	10	最深点高程 /m	-22.57
			最大冲刷深度 /m	17.57
混凝土铰链排护岸	2	10	最深点高程 /m	-25.38
			最大冲刷深度 /m	20.38
土工布压载软体排护岸	2	10	最深点高程 /m	-25.38
			最大冲刷深度 /m	20.38
抛石护岸	2	10	最深点高程 /m	-23.19
			最大冲刷深度 /m	18.19
四面体(原型概化)	1.8	11.27	最深点高程 /m	-23.35
			最大冲刷深度 /m	18.35
			最深点高程 /m	-6.74
			最大冲刷深度 /m	5.74

表5 岸坡(1:3)概化模型桥墩冲刷坑范围统计表

工 况	行近流速 /m·s ⁻¹	尾门水位 /m	局部冲刷坑范围 /m			
			上游侧	左侧	右侧	下游侧
1:3岸坡概化(无防护)	2	10	36	35	35	125
			35	34	34	113
土工织物砂枕(排)护岸	1.49→1.83→2.13→1.83→1.49	5→7→10→7→5	38	22	32	115
			35	21	30	110
四面体防护	2	10	37	25	30	113
			37	22	33	118
纤维模板护坡	2	10	37	22	33	118
			37	22	33	118
混凝土铰链排护岸	2	10	37	22	33	118
			37	22	33	118
土工布压载软体排护岸	2	10	38	27	30	112
			38	27	30	112
抛石护岸	2	10	39	26	29	114
			39	26	29	114
四面体(原型概化)	1.8	11.27	18	17	18	68
			18	17	18	68

注:冲刷坑范围均自桥墩边界算起,不包括墩基本身。

似,冲刷范围和最大冲深只是在量值上有所区别。通过比较试验数据发现,四面体防护工程实施后,其冲坑范围较其他防护方式的冲坑范围略微偏小。

从试验过程和试验结果看,对岸坡变形较明显的桥址上游70 m至桥址下游190 m实施岸坡防护工程后,岸坡的冲淤变形远较防护前的冲淤变形为小。放水后的冲刷地形表明,防护工程的头部及桥址附近交接处的局部岸坡变形较为显著,尤其是采用发布护坡、混凝土铰链排护岸、土工布压载软体排护岸等护岸方式的护岸前沿冲刷幅度最大,局部岸坡较陡,有的甚至成悬吊状;而对于桥址附近的局部岸坡,由于水流流经桥墩的绕流作用,对其产生顶冲作用,造成位于桥墩中下部附近的岸坡明显冲刷,岸坡变陡,甚至出现工程局部被掀起或翻卷的现象。由于实体抗冲防护工程本身具有阻水性,导致工程上下游交接处及坡脚处也发生了冲刷变形,形成较明显的冲坑,从而对局部防护工程的稳定性及护岸效果会产生不利影响。尤其是在已防护工程的下游,存在冲刷下延的现象。

在选择防护措施时,应综合考虑岸坡防护和桥墩局部防护两个方面。当采用阻水作用较大的实体抗冲防护工程时,岸坡加固后,近岸流速普遍增大,近岸桥墩局部冲刷会进一步加剧,冲刷坑有可能波及到坡脚,进而引起实体防护工程的破坏。因此,鉴于马鞍山长江公路大桥近岸桥墩所在的河岸具有较顺直、水流流速小(300 a一遇流量条件下桥墩附近流速在2 m/s以下)、河床易冲动的特点,建议采取减速促淤防护工程措施,倾向于采取研究较多且在实际工程中取得成功经验的四面六边透水框架护岸工程。

4 防护工程方案合理性分析

马鞍山长江大桥所在河段的岸坡较缓,坡度远小于临界岸坡,岸坡变形主要是因桥墩局部冲刷和桥墩绕流水流顶冲附近岸坡所致。因此,岸坡防护应充分考虑桥墩附近紊流、局部冲刷坑及流量集中三个因素,逐一分析如下:

(1) 桥墩紊流。

在进行流速 $V=2$ m/s(高于300 a一遇标准)时,靠岸边一侧的最大紊流宽度为 $1B$ (B 为桥墩宽度),靠深槽一侧的最大紊流宽度为 $0.7B$ 左右,上游侧紊流长度约为 $0.5L$ 。垂向平均流速 $\bar{\omega}$

最大值一般出现在桥头迎水面中心点处,自该点至桥墩靠深槽一侧边缘为冲刷最为严重的区域。马鞍山长江大桥左汊近岸桥墩的宽度 $B=31.7$ m,长度 $L=69.2$ m,故依据紊流宽度确定的防护范围为桥墩靠岸边侧宽度31.7 m,上游侧34.6 m,靠深槽侧22.19 m。

(2) 局部冲刷坑。

桥墩最大局部冲刷深度公式采用清水冲刷情况下的冲深公式,即:

$$h_j = 1.05K_g B^{0.75}$$

式中 K_g 为墩形系数。对于圆形墩, $K_g=1$;对于与水流成直线的长方形墩, $K_g=1.4$ 。

大量研究结果表明:清水冲刷下的桥墩最大冲深值比动床冲刷下的桥墩最大冲深值约大10%。根据该清水冲刷深度公式计算的极限冲深为19.639 m,与表3概化岸坡模型中所测得的最大冲深值基本相当。从实测的冲刷坑形态看,桥墩局部冲刷最严重的区域集中在墩头位置,墩头两翼的冲刷坑宽度在墩头与桥墩直线段交接处达到最大,冲刷坑宽度可用极限冲深大致估计。假设冲深在靠近桥墩边缘处达到最大,且冲刷平衡后泥沙的斜坡大致等于泥沙的水下休止角,由于该河段泥沙的中值粒径约为0.182 mm,故水下休止角可采用熊绍隆公式 $\varphi = 36.45 + 4.294 \lg d_{50}$,由此算得水下休止角约为 33.273° 。桥墩两侧冲刷坑宽度 $L_f = h_j \text{ctg} \varphi$,经计算得 $L_f = 29.93$ m,与试验实测的靠深槽侧的极限冲刷坑宽度较为吻合。由此可见,通过水下休止角推求冲刷坑的极限宽度具有一定的现实意义。故依据冲刷坑的极限状态,桥墩上游侧、左右侧护岸的长度、宽度均取30 m。

(3) 流量集中的影响。

由于近岸桥墩对水流的导流作用,在桥墩近岸一侧易发生水流集中现象,单宽流量集中系数可采用下式计算:

$$A = (\sqrt{B_d/H})^{0.15}$$

式中 B_d, \bar{H} 为造床流量的河宽和平均水深,一般取值为 $A=1.13 \sim 1.5$ 。为了安全起见,这里一律考虑 $A=1.5$ 的情形,以提高岸坡防护的标准。另外,根据梅诺德的研究,桥墩附近最大流速与断面平均流速的比值为 $V_{\max}/V=1.25 \sim 1.5$,亦为提高桥墩附近区域的防护标准提供了佐证。

综合考虑以上因素和水槽试验观测成果,并根据桥墩附近紊流及局部河床变化情况,确定马鞍山大桥采取的初步防护方案为桥位上游70 m~桥位下游190 m实施岸坡防护,其中桥址上游70 m~下游67 m护岸宽度为136 m,下游67~190 m护岸宽度为55 m(图4),并对该防护方案



实施后的流态和地形进行了重点观测。在此需要说明的是:由于护岸工程会加剧护岸工程区域外的冲刷,因此,桥墩靠深槽一侧的护岸宽度不宜过宽,故设定防护方案采取相对较小值。

5 实施方案中的创新点

(1)用光栅式水位仪实时测量模型水位变



图4 防护工程布置方案及试验后冲刷情况

化,采用小型光电旋桨式传感器和多普勒超声波流速仪(ADV)对比测量桥墩周边的特征流速,对桥墩周边的三维流场进行了观测。

(2)在1:3岸坡概化模型试验中,对现阶段常见的几种护岸型式在同一水沙条件下的防护效果和优缺点进行了对比分析,并推荐了适合马鞍山长江大桥所在河段的护岸型式。

(3)研究了近岸桥墩对岸坡变形的影响程度和范围,提出了近岸桥墩影响岸坡稳定的几个最主要因素,并通过水槽模型试验,建立了初步估计岸坡防护范围的方法。该方法形式简单、计算方便,根据墩型、有效墩宽和床沙的中值粒径即可推算大致的防护范围。防护措施效果验证试验表明:按该方法确定的岸坡防护范围与标准基本能满足工程需要。

(4)根据水下地形变化及河床冲淤幅度的大小,对岸坡防护的不同区域区别对待,在可能受到桥墩绕流水流顶冲易发生崩岸的岸坡区域设置了重点防护区。

6 结语

(1)同等水流条件下的岸坡防护措施对比试验表明:多种防护方式实施后均能起到一定的防护效果,但由于桥墩近岸(或在岸坡上),实体抗冲防护工程本身具有阻水性,在其周边易形成局

部冲坑,可能与桥墩的局部冲刷形成叠加,进而导致岸坡的二次破坏。因此,在岸线顺直、流速相对较小的近岸区采取减速促淤的防护方式为宜。

(2)在桥址断面概化模型实施了拟定的防护工程方案后,防护区岸坡流速减小明显,促淤效果显著,岸坡未见明显破坏,较好地达到了预期的工程效果,证明该方案可行。

(3)建议以后在建类似近岸桥墩时,应将桥墩轮廓优化为更加圆滑的形式,以减小其对水流的顶冲作用,使其形成的绕流能够紧贴墩壁,减小水流对附近岸坡的顶冲作用。

(4)对于在岸坡上新建工程的情况,岸坡防护应首先考虑采用减速、不冲的防护措施。由于堤岸附近水流与固体边界相互作用的复杂性,使用实体抗冲防护措施,有可能加剧局部河床的冲刷,造成二次破坏,增加护岸的难度。但由于四面体的抗冲性能较差,在近岸流速大于2.5 m/s、坡度较陡的岸坡仍应考虑采用抛石护岸的方式。

(5)笔者虽然给出了适合马鞍山长江大桥岸坡防护的一些原则和标准,但对于在复杂、敏感河段修建工程的情况,防护工程的范围和标准应根据物理模型试验或类似河段上的工程成功经验加以确定。另外,还应注意抛投时机的选择。

(下转第63页)

表8 大坝混凝土耐久性能表

混凝土等级	抗渗等级		抗冻等级	
	28 d	90 d	28 d	90 d
C ₉₀ 10W6F50	W6	≥ W8	F25	≥ F50
C ₉₀ 15W6F50	W6	≥ W8	F25	≥ F50
C ₉₀ 20W6F50	W6	≥ W8	F25	≥ F50

表9 大坝混凝土热学性能表

混凝土等级	导温系数 /m ² ·h ⁻¹	导热系数 (kJ/m·h·°C)	比热系数 (kJ/kg·°C)	线膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	绝热温升 /°C
C ₉₀ 10W6F50	0.003 2	8.02	1.12	11.73	29
C ₉₀ 15W6F50	0.003 1	7.76	1.1	/	30.1
C ₉₀ 20W6F50	0.003 1	7.76	1.08	11.66	32.4

土等级的增加,混凝土绝热温升值也随之增高。

4 结 语

(1)采用瀑布料场砂岩料加工的人工骨料具有饱和面干、表观密度小、吸水率和坚固性质量损失大、微粒含量多等特点,在混凝土配合比设计时应加以重视。

(2)鉴于采用瀑布料场砂岩骨料配制的混凝土存在用水量大、胶凝材料多和混凝土干缩、湿胀变形较大等缺陷,同时使用该砂岩人工骨料配制的混凝土具有低弹和高极限拉伸值的特性,因此,

工地现场在使用硅酸盐水泥(当时柬埔寨国内没有中热水泥生产厂家)进行混凝土配合比设计的同时,建议采用减水率更高的缓凝高效减水剂;同时,还应加大粉煤灰掺量,以达到抑制骨料碱硅酸反应,减少混凝土胶凝材料用量,降低混凝土水化热温升,减少混凝土的收缩变形,提高混凝土的抗裂性能和耐久性能。

作者简介:

邓长军(1977-),男,四川广安人,工程师,学士,从事水工混凝土试验研究工作。(责任编辑:胡友权)

(上接第56页)

参考文献:

[1] 余文畴,卢金友.长江河道崩岸与护岸[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
 [2] 唐洪武,李福田,肖 洋,等.四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究[J].水运工程,2002,344(9):25-28.

作者简介:

黄卫东(1981-),男,湖南会同人,工程师,硕士,从事泥沙基本理论、长江中下游河道演变及整治、河工模型试验等相关工

(上接第59页)

该项试验工作已于2012年11月初完成,试验成果已经通过业主、设计、监理审批。目前长河坝项目正在按照试验确定的粗料厚度0.5~0.7m、细料厚度1~1.2m进行备料。但应注意在备料过程中根据开采区粗、细土料级配变化及掺拌料取样级配试验结果及时进行调整。

7 结 语

通过汤坝土料场粗、细料掺拌试验,取得了满足设计要求的掺拌混合料及最优掺拌配比,确定了合理的掺拌粗、细土料铺料厚度,大大提高了土

作;

沈之平(1959-),男,浙江嵊州人,高级工程师,学士,从事泥沙基本理论、长江中下游河道演变及整治、河工模型试验等相关工作;

廖小永(1975-),男,江西新余人,高级工程师,硕士,从事泥沙基本理论、长江中下游河道演变及整治、河工模型试验等相关工作。

(责任编辑:胡友权)

料开挖的利用率,减少了开挖弃料,降低了施工成本,为电站其它料场超标骨料掺配提供了参考经验。

参考文献:

[1] 康世荣,陈东山.水利水电施工组织设计手册(2)施工技术[M].北京:水利电力出版社,1990.

作者简介:

杨永林(1982-),男,甘肃天水人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

杨玉银(1968-),男,河北遵化人,副主任,教授级高工,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:胡友权)