



四面六边透水框架坝模型试验及检验标准

况宏伟, 郑惊涛, 雷国平, 余 珍

(长江航道规划设计研究院, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430011)

摘要:四面六边透水框架坝利用四面六边透水框架抛投堆积成坝, 坝体横截面为梯形。通过在陆上和水槽中开展四面六边透水框架坝的抛投试验, 研究了四面六边透水框架的单位体积内框架个数、孔隙率, 分析了四面六边透水框架坝的施工工艺及其检验标准。研究成果提供了四面六边透水框架坝模型施工的质量控制范围, 为我国内河上构筑四面六边透水框架坝的施工及验收提供了依据和参考。

关键词:长江航道; 四面六边透水框架坝; 检验标准; 单位体积内框架个数; 孔隙率

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0140-07

Model experimental and inspection standard of tetrahedron-like penetrating frame dam

KUANG Hong-wei, ZHENG Jing-tao, LEI Guo-ping, YU Zhen

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: The tetrahedron-like penetrating frame dam, the cross section of which is trapezoid, is built by piling the tetrahedron-like penetrating frame. Through the dropping test of the tetrahedron-like penetrating frame dam on land and in flume, we study the number of frames in unit volume and the porosity and analyze the construction technology and inspection standard of the frame dam. The study provides not only a quality control range of frame dam construction, but also serves as a basis and reference on the construction and acceptance of tetrahedron-like penetrating frame dam in the inland river.

Keywords: Changjiang waterway; tetrahedron-like penetrating frame dam; inspection standard; number of frame in unit volume; porosity

2013年在长江下游东流水道航道整治二期工程中引进较为新颖的四面六边透水框架坝结构。在该工程中, 脊坝轴线右侧的1[#]、2[#]刺坝坝体前100 m段及坝头设计采用四面六边透水框架坝, 以期有效降低流速, 保持坝体的稳定, 并促进老虎滩低滩的淤积^[1]。在像长江这样的大江大河整治工程中, 对透水框架群的减速促淤效果研究和应用较多^[2-6], 主要是用于保护堤岸、丁坝、码头和滩地, 但是利用四面六边透水框架群来筑坝还属首次。然而采用四面六边透水框架构筑坝体无论从施工技术还是工艺均无经验可以借鉴, 尤其是

四面六边透水框架坝施工后的质量检验标准是一个难题。本文采用在室内陆地上和水槽中抛投四面六边透水框架筑坝的方法, 对透水框架坝的施工工艺进行分析, 并研究四面六边透水框架坝的质量检验标准, 为我国内河上构筑四面六边透水框架坝的施工及验收提供一定的参考和依据。

1 试验介绍

1.1 试验说明

在长江东流水道中采用长1 m、横截面边长为10 cm的6根杆件制作四面六边透水框架。本试验

收稿日期: 2014-12-09

作者简介: 况宏伟(1981—), 男, 博士, 工程师, 从事河流演变、航道工程的设计和研究工作。

所用的框架尺寸与原型比尺为1:20。模型框架采用铝杆制作、铝杆长5 cm,横截面边长为0.5 cm。原型的四面六边透水框架坝坝身长100 m、坝顶宽3 m、坝高8 m。上、下游侧坝面边坡分别为1:1.5和1:2。模型中受场地试验条件的限制,选取了原型中8 m的坝体进行模拟,即设计的模型坝是上游坝面坡度1:1.5、下游坝面坡度1:2、坝顶长15 cm、坝底长155 cm、坝高40 cm。

四面六边透水框架坝试验前开展了测定以框架长度为单位长度的单位体积内框架个数的抛投试验。试验分别采取将四面六边透水框架散体和三架捆绑体抛投进立方体木箱中,统计抛投的框架个数^[7],并据此计算透水框架的空隙率和单位体积中透水框架个数。立方体木箱的边长分别为30、35、40、45、50 cm。抛投中不震抖木箱直至装满,获得框架个数。另一种方法是抛投中震抖木箱,使框架紧密后继续边抛投边震抖使框架装满木箱,最后获得框架数目。

陆上抛投试验是在两块平行的透明玻璃形成的矩形槽中进行,矩形槽长170 cm、宽40 cm、高60 cm,槽中底面为硬质底板。水槽试验是在宽80 cm的玻璃水槽中进行,为了与陆上试验保持一

致,在水槽中放置一块玻璃,形成局部宽40 cm的水槽,局部水槽长170 cm、高50 cm。

1.2 试验测量

考虑框架加工的误差和试验的便利性,本试验测量四面六边透水框架坝深度采用在测杆头部放置一枚一元硬币使其不能下穿过框架空档。当头部为硬币的测针抵达框架时获得的深度即为框架坝测点处的深度,或再通过转换获得该测点处的高度。测杆安装在可移动的测架上量取。测量时,横向上每隔5 cm测一个点,也就是测约7个横断面,每个横断面也是每隔5 cm测一个点,这样在坝底宽方向上一个横断面共测约31个点。测量结果取平均值得到框架坝的坝型图,用于与框架坝设计图对比。

2 框架抛投木箱结果

抛投结果以单位体积内框架个数考量。

这里的单位体积是指以透水框架杆件长度为边长的立方体体积。单位体积内透水框架个数是指理论上在这个单位体积中可以容纳的框架个数。向不同边长的木箱中抛投框架,框架类型为框架单体和三架捆绑体,抛投方式为不震抖抛投和震抖抛投,试验结果见表1。

表1 以框架杆件长度为单位长度的单位体积中四面六边透水框架的个数

分类	结构	有无震抖	木箱边长/cm				
			30	35	40	45	50
框架个数	单个散体	无	378	621			
		有	432	687			
	三架捆绑体	无	108 × 3	188 × 3	282 × 3	390 × 3	546 × 3
		有	123 × 3	206 × 3	307 × 3	440 × 3	614 × 3
单位体积内框架个数	单个散体	无	1.75	1.81			
		有	2.01	2.00			
	三架捆绑体	无	1.50	1.64	1.65	1.61	1.64
		有	1.71	1.80	1.80	1.81	1.84

单位体积中的框架个数可以粗略估计在实际施工中需要的框架个数。结果显示震抖抛投得到的框架密实一些,单位体积框架个数要比未震抖抛投的多0.2个。单个框架抛投要比三架捆绑体的

框架抛投密实,单体抛投的单位体积框架个数要比三架捆绑体的多约0.2个。在木箱边长50 cm、震抖条件下的三架捆绑体的抛投得到的单位体积中的框架个数约为1.84个。

将透水框架堆积体的体积减去框架所占据的实体体积后除以透水框架堆积体的体积可得孔隙率。其中透水框架所占据的实体体积可理解为透水框架杆件所占据的体积（这里计算不考虑杆件搭接损失的体积），最后抛投所得孔隙率结果见表2。从表2可以看出：三架捆绑体的框架抛投在无震抖下孔隙率平均为90.35%，震抖后平均孔隙率为89.25%，震抖后框架更密实。

结构	有无震抖	木箱边长/cm				
		30	35	40	45	50
单个	无	89.50	89.14			
散体	有	88.00	87.98			
三架捆绑体	无	91.00	90.13	90.09	90.37	90.14
	有	89.75	89.19	89.21	89.14	88.95

3 框架坝抛投试验结果

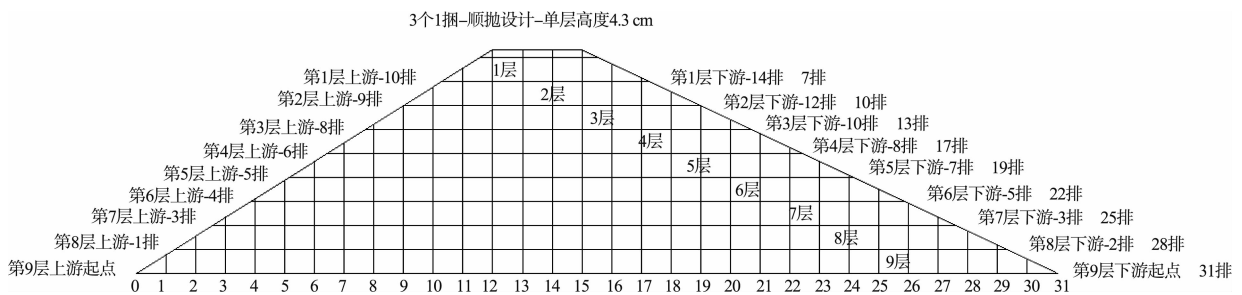
3.1 单层抛投高度

对四面六边透水框架的三架捆绑体，开展在

陆上抛投试验：共抛投10层，每层21排，每排4个三架捆绑体。最后成型的坝高度为43.1cm，即每层坝高4.3cm。同样，对四面六边透水框架的两架捆绑体和框架单体，也采取同样的每层21排、抛投多层的抛投方法，得到两架捆绑体和框架单体的单层坝高分别为4.1、3.5cm。

3.2 框架坝抛投方法

在抛投时在抛投方向每隔一个框架长度（5cm）做一个标记。抛投时每排的总框架个数是12个，即框架单体抛投是一排抛投12个单框架；两架捆绑体抛投是一排抛投6个两架捆绑体；三架捆绑体抛投是一排抛投4个三架捆绑体。对于三架捆绑体的框架坝，结合模型框架坝的设计，按照竖向每层4.3cm和横向每隔5cm画网格，见图1。其中竖向根据坝高40cm设计，可取9层，还差1.3cm。如果取10层，会超过坝高3cm。取离坝顶距离近的层数设计，即9层。



注：图中左边为上游方向。

图1 三架捆绑体的四面六边透水框架坝顺抛抛投设计

根据网格中每层与框架坝上下游坝面交汇的地方，确定抛投落点应在什么位置。以上游最底层的落点为0点位置，其它层的落点位置根据网格与坝上游面相交的位置而移动相应距离。对于交汇点在网格中间的，看其距前、后格哪个更近，如图中第4层，交点距前格近，则取前格即抛投落点相对0点后移6。其它依次类推，设计出上游的抛投落点位置（上游落点位置相对0点位置后移0、1、3、4、5、6、8、9、10），下游的抛投落点位置（下游最底层落点为31点位置，其它层相对31点位置需前移0、2、3、5、7、8、10、12、14），即可

得出每层应抛的排数依次为31、28、25、22、19、17、13、10、7。

抛投从上游向下游移动，每次移动一个框架杆件长度，第一个抛投的位置是1，即每层抛投位置为上游落点位置加1，得每层的抛投位置依次为1、2、4、5、6、7、9、10、11。这种抛投为顺抛设计。与顺抛投设计对应的是逆抛投设计，即将顺抛投设计的抛投顺序倒过来。逆抛投设计每层的抛投位置依次为11、10、9、7、6、5、4、2、1；每层应抛的排数依次为7、10、13、17、19、22、25、28、31，见图2。

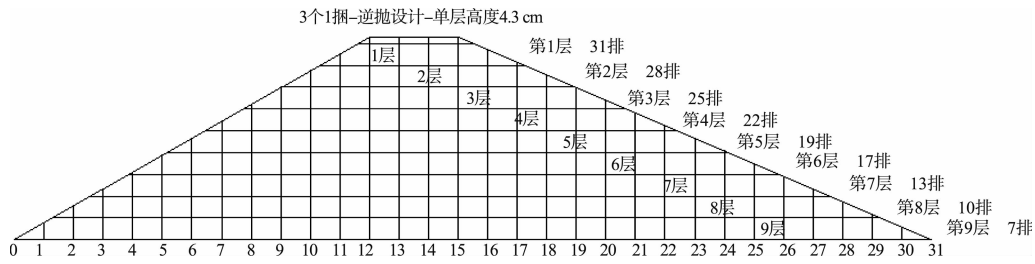


图 2 三架捆绑体的四面六边透水框架坝逆抛投设计

如同三架捆绑体的框架坝, 对于框架单体, 结合模型框架坝的设计图, 按照竖向单层高度 3.5 cm 和横向每隔 5 cm 画网格, 并取为 11 层。顺抛设计每层的抛投位置依次为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、11、12, 每层抛的排数依次为 31、29、26、24、21、19、17、14、12、8、6; 其逆抛设计每层的抛投位置依次为 12、11、9、8、7、6、5、4、3、2、1, 每层抛的排数依次为 6、8、12、14、17、19、21、24、26、29、31。对于两架捆绑体, 结合模型框架坝的设计图, 按照竖向单层高度 4.1 cm 和横向每隔 5 cm 画网格, 并取为 10 层。顺抛设计每层的抛投位置依次为 1、2、3、5、6、7、8、10、11、12, 每层抛的排数依次为 31、28、26、22、19、17、14、10、8、5; 其逆抛设计每层的抛投位置依次为 12、11、10、8、7、6、5、3、

2、1, 每层抛的排数依次为 5、8、10、14、17、19、22、26、28、31。

3.3 抛投框架个数验证

根据三架捆绑体的框架坝设计, 其所需框架个数为: $(31 + 28 + 25 + 22 + 19 + 17 + 13 + 10 + 7) \times 12 = 2\ 064$; 而在木箱边长 50 cm、震抖条件下抛投, 以框架杆件长度为单位长度的立方体体积内框架个数约为 1.84 个, 据此可以计算该设计模型坝所需的框架个数为: $\frac{(3 \times 5 + 31 \times 5) \times 40}{2} \times 40 \times \frac{1}{125} \times 1.84 = 2\ 002$ 。计算结果与实际抛投个数误差为 3.1%, 说明试验结果是基本准确的。

3.4 陆上抛投结果比较

不同捆绑方式的陆上顺抛投和逆抛投一起比较, 见图 3。抛投的测量比较见图 4。

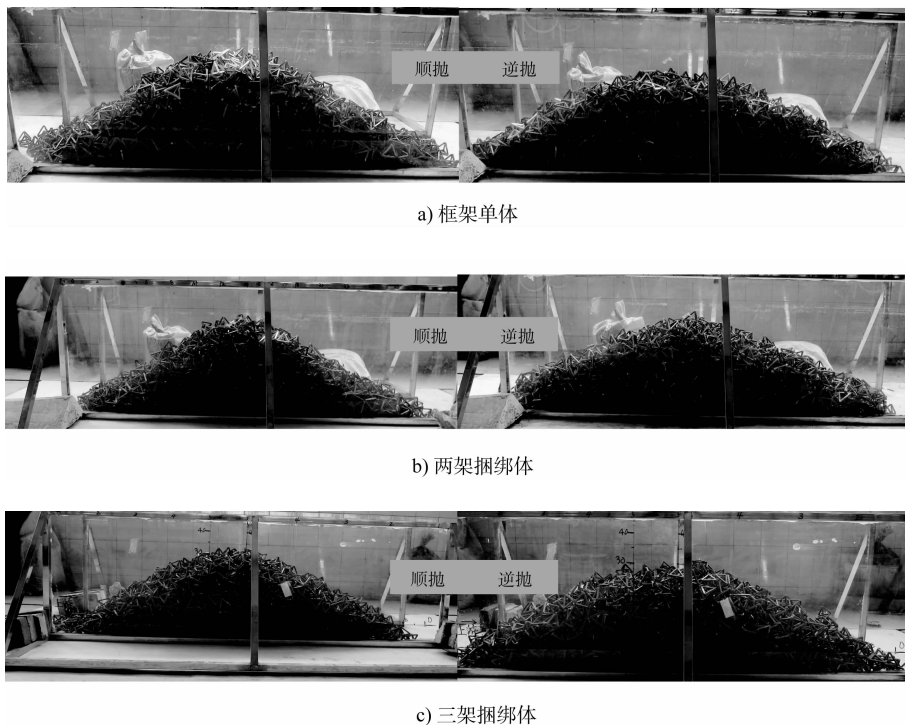


图 3 四面六边透水框架坝陆上顺抛投和逆抛投结果

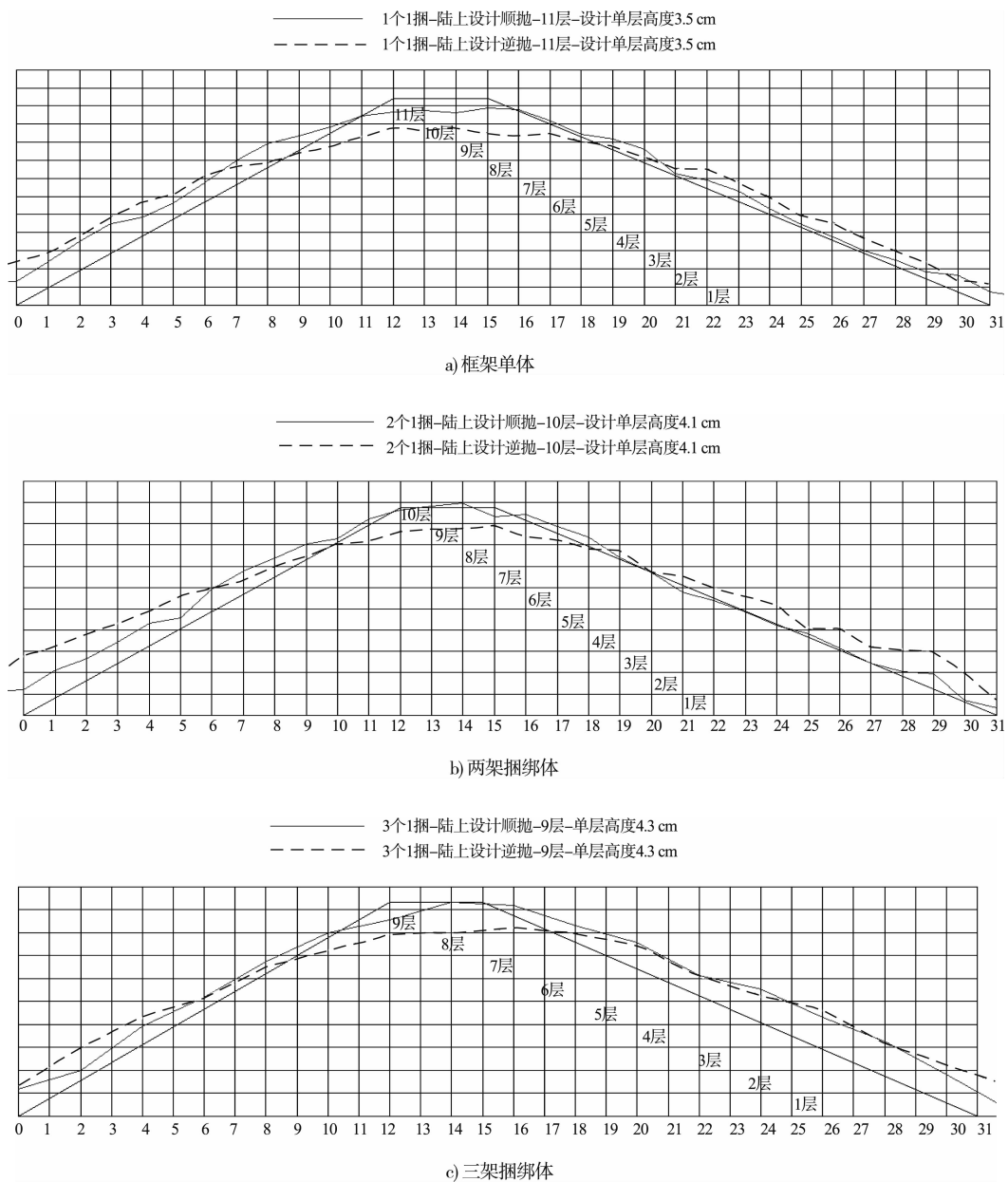


图4 框架-陆上设计顺抛和逆抛结果比较

从3种不同捆绑方式的抛投结果比较来看，相对逆抛，顺抛的测量结果都较接近模型坝设计。顺抛的坝高较好地吻合了设计坝高；而逆抛的坝高要小于设计坝高约一个层高，即对于框架单体的逆抛坝高仅达到设计11层的10层高度处；两架捆绑体的逆抛坝高仅达到设计10层的9层高度处；三架捆绑体的逆抛坝高仅达到设计9层的8层高度处。同时顺抛投的上下游坝面的坡度较好地吻合了设计坡度，尤其是下游坝面，而逆抛投的上游坝面要明显缓于设计坡面(1:1.5)。顺抛的上下游坝面位置与设计坝面位

置都较逆抛接近些。从上面的几点比较来看，顺抛的结果在坝高、上下游坝面坡度和坝面位置都优于逆抛的抛投效果。逆抛要达到设计坝高，还需补一层框架抛投。从施工的精度和施工的节约工程量来看，顺抛都有着非常显著的优势，因此推荐实际工程按照顺抛投设计、采用顺抛投施工方法。

3.5 水槽抛投结果比较

根据陆上抛投结果，水槽静水抛投试验也采用顺抛投设计。为了更直观地比较，将测量结果和陆上的顺、逆抛抛投结果放一起比较，见图5。

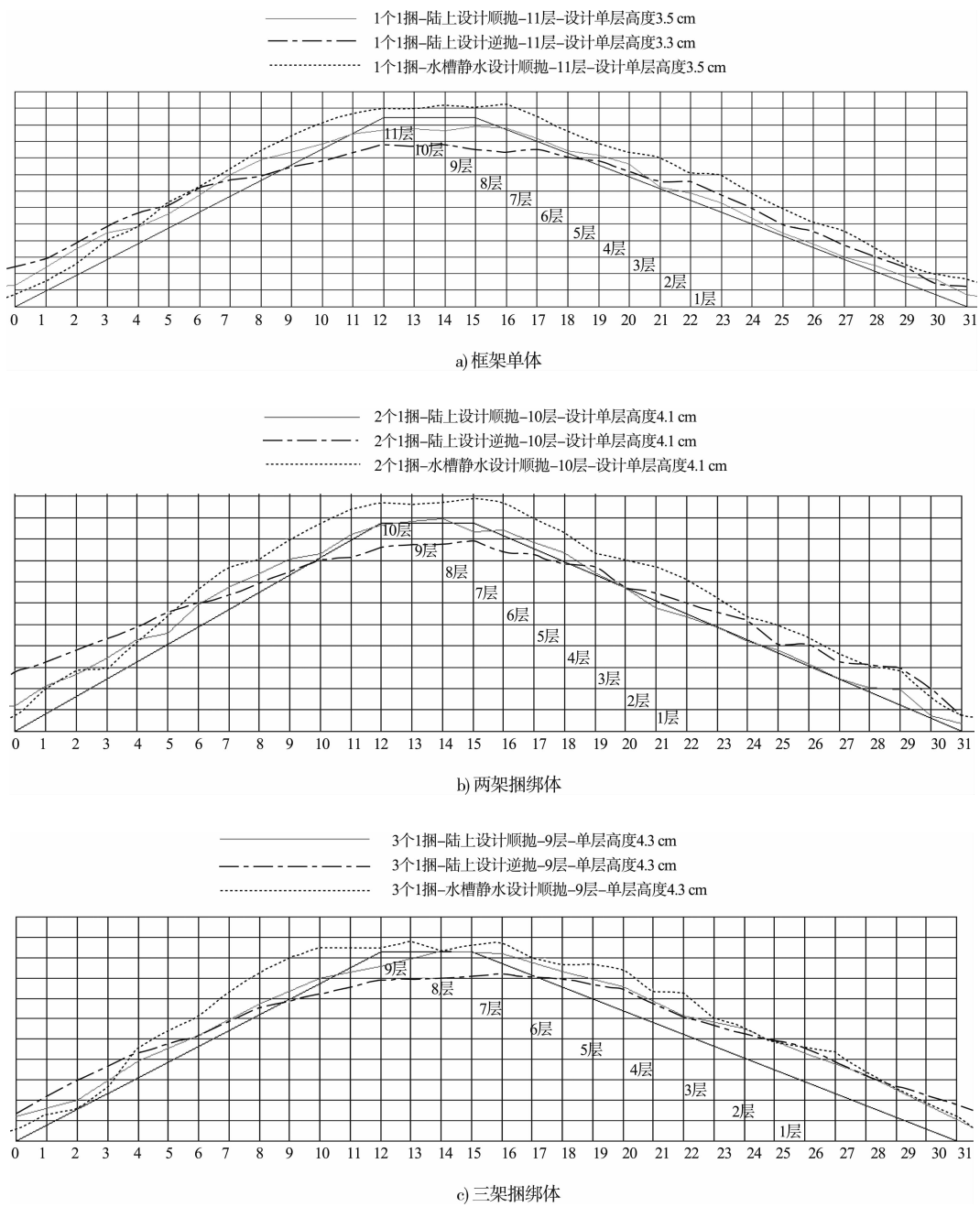


图 5 框架单体-水槽静水设计顺抛和陆上设计顺、逆抛结果比较

从水槽静水顺抛投与陆上顺、逆抛投比较结果来看: 不同捆绑方式设计的水槽静水顺抛的坝高要高于陆上的顺、逆抛投; 水槽静水顺抛的上下游坝面坡度基本吻合设计的坝面要求, 但对于三架捆绑体的水槽静水抛投, 由于框架间的勾连作用及水的托浮作用, 上下游坝面的平整度不够, 需要额外的抛投补平。而框架单体和两架捆绑体的静水抛投的坝面平整度好一些; 由于水的托浮

作用, 水槽静水顺抛的上下游坝面位置都要略高于抛投设计的坝面位置。静水抛投出现的坝宽、坝高和坝面坡度误差也是需要确定的抛投质量控制范围。

3.6 透水框架坝的检验标准

对于透水框架坝施工中的误差控制, 即检验标准, 参照其水槽静水抛投结果。水槽试验受外界因素影响较小, 可以认为水槽静水抛投结果误

差为施工中应控制的误差。

对于四面六边透水框架坝，目前还是一种较新的整治建筑物，在应用方面仅有长江下游东流水道的试验性工程，在检验标准方面还没有形成成熟和完备的检验标准体系。由于用于透水框架坝的四面六边透水框架和用于抛筑坝体的块石一样属于散体，是用于护脚和筑坝的材料，框架坝的检验标准可以参考块石抛筑坝体的检验来进行。根据《水运工程质量检验标准》第9篇中对块石抛筑坝体的允许偏差、检验方法^[8]，对于四面六边透水框架坝的检验也参照块石抛筑坝体的方法进行，即检验坝轴线、坝宽、坝高和坡度。

框架坝的坝轴线取用和块石坝体一样的允许偏差，即1 000 mm。对于四面六边透水框架坝坝顶高程的测量是纵向上量取坝顶点范围的4个点，即试验测量图上坝顶范围内网格上的4个点（图中点12、13、14和15）的高程范围。对于框架单体的静水抛投坝顶高程分别为41.94、41.99、

42.63、42.30 cm。与设计坝高40 cm比较，其误差为1.94 ~ 2.63 cm，约为0.4L ~ 0.6L（L为框架坝的杆件长度，单位：cm）。同理，可以得到两架捆绑体的静水抛投坝顶高程误差约为0.7L ~ L。对于三架捆绑体的静水抛投坝顶高程误差约为0 ~ 0.5L。综合考虑框架坝的坝顶高程误差，可以取为0 ~ L。

对于坝顶宽度的允许偏差，采取的是量取框架单体、两架捆绑体和三架捆绑体抛投的平均坝顶高度处的坝顶宽度，分别超出设计宽度6.4、6.2、6.8 cm。取框架坝宽度的误差上限为6.8 cm，约为1.4L。对框架坝宽度的误差下限可取0。即综合考虑框架坝宽度误差，其取值范围为0 ~ 1.4L。

对于三架捆绑体的水槽静水抛投坝体坝面测量见图6，其上游坡度为1:1.43，与设计坡度误差为4.90%；下游坡度为1:2.03，与设计坡度误差为-1.48%。对三架捆绑体的框架坝坡度的误差范围为-1.48% ~ 4.90%。

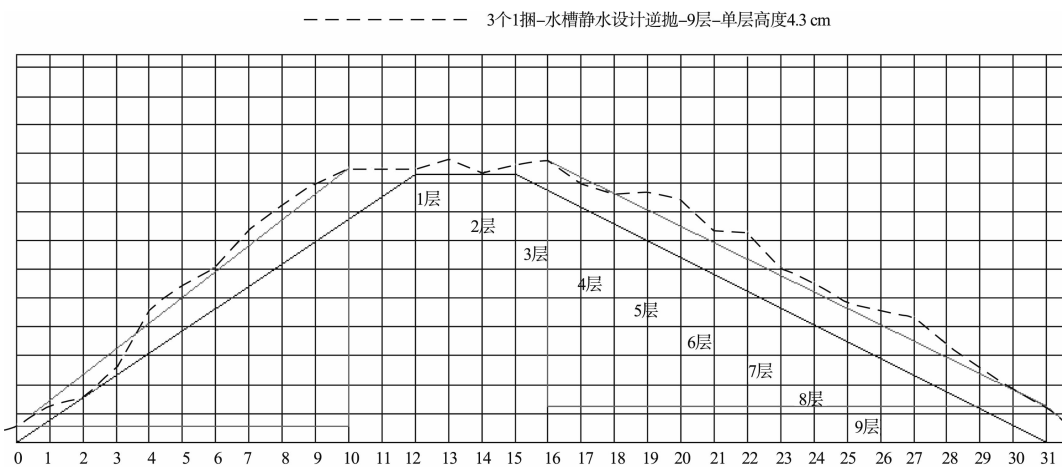


图6 三架捆绑体的静水抛投坝坝面测量

对于两架捆绑体的水槽静水抛投坝体上游坡度为1:1.38，与设计坡度误差为8.70%；下游坡度为1:1.83，与设计坡度误差为9.29%。对于框架单体的水槽静水抛投坝体上游坡度为1:1.30，与设计坡度误差为15.38%；下游坡度为1:2.05，误差为-2.44%。为控制实际施工质量，框架坝

坝面坡度的误差范围可以设定为-3% ~ 15%。框架坝的检验标准见表3。

表3 四面六边透水框架坝检验标准

项目	坝轴线	坝顶高程	坝顶宽度	坡度
允许偏差	1 000 mm	0 ~ 1L	0 ~ 1.4L	-3% ~ 15%

注：L为透水框架的杆件长度；坝顶高程和宽度只考虑坝面，不考虑坝心。

(下转第152页)