

· 地基与基础 ·



## 航道骨架护岸结构的稳定性影响规律及其优化\*

梅蕊<sup>1</sup>, 王法鑫<sup>1</sup>, 张薇<sup>1</sup>, 李昂<sup>1</sup>, 孙阳<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210024;

2. 河海大学淮安研究院, 江苏淮安 223005)

**摘要:** 为探究不同结构形式航道骨架护岸结构的稳定性影响规律, 选择出最佳护岸结构形式, 并对该形式进行结构优化, 结合沙河溧河—平顶山航运工程的实际情况, 利用 PLAXIS 3D 分别建立了几种护坡的三维结构模型。结果表明: 在人字形、菱形、拱形骨架 3 种形式中, 使用拱形骨架时, 岸坡的滑动破坏面范围最小, 岸坡的安全系数最大; 在设计拱形骨架护岸结构时, 应首先考虑不同拱径对岸坡土体位移的影响, 在对岸坡土体沉降控制较严格的工程上, 可进一步考虑不同拱宽的设计取值对其不同影响; 本工程建议拱形骨架护岸结构的设计参数由原设计方案(拱径 2.5 m、拱宽 0.05 m、埋深 0.300 m)优化为正交方案(拱径 4.5 m、拱宽 0.05 m、埋深 0.450 m), 在减小岸坡土体位移的同时仅增加不到 55 m<sup>3</sup> 的混凝土用量。

**关键词:** 拱形岸坡骨架护岸; 正交优化; 稳定性分析; 岸坡安全系数

中图分类号: TV14; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0200-07

### Stability influence laws and optimization of channel skeleton shore protection structures

MEI Rui<sup>1</sup>, WANG Faxin<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LI Ang<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>1,2</sup>

(1. College of Harbor, Costal and Off-shore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Huai'an Research Institute of Hohai University, Huai'an 223005, China)

**Abstract:** To investigate the stability influence law of different structural forms of channel skeleton bank protection structure, we select the best bank protection structure form, and carry out structural optimization of this form, combined with the actual situation of the Shahe Luohe to Pingdingshan shipping project, and establish several kinds of three-dimensional structural model of the bank protection slope by PLAXIS. The results show that among the three forms of herringbone, rhombus and arch skeleton, when using arch skeleton, the sliding damage surface range of the bank slope is the smallest, and the safety coefficient of the bank slope is the largest. When designing an arch skeleton bank protection structure, the influence of different arch diameters on the soil displacement of the bank slope should be considered firstly, and in the project with stricter control of the soil settlement on the bank slope, the different effects of different arch widths can be further considered. In the case of this project, it is recommended to optimize the structure of several kinds of berms by using PLAXIS 3D. This project suggests optimizing the design parameters of the arch skeleton bank protection structure from the original design scheme (arch diameter 2.5 m, arch width 0.05 m, burial depth 0.300 m) to the orthogonal scheme (arch diameter 4.5 m, arch width 0.05 m, burial depth 0.450 m), while reducing the displacement of the bank slope soil, only increasing the amount of concrete by less than 55 m<sup>3</sup>.

**Keywords:** arch slope skeleton bank protection; orthogonal optimization; stability analysis; bank slope safety factor

收稿日期: 2023-08-30

\*基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2022Y13); 中建七局科技研发课题(CSCEC7b-2022-Z-6)

作者简介: 梅蕊(2000—), 女, 硕士研究生, 从事港口海岸及近海工程研究。

通讯作者: 孙阳(1979—), 男, 博士, 副教授, 从事地下工程、结构可靠度等方面的研究。E-mail: 20140023@hhu.edu.cn

在航道护岸工程中,传统的护岸手段有块石、石笼、沉排、水泥搅拌桩、模袋混凝土等,随着中国绿色发展理念的提出,现有的航道护岸工程正积极向环境友好型转变。骨架干砌石植被护岸结构作为一种抗冲刷能力与生态恢复能力强的生态护岸,其骨架的存在可以提高护岸的整体稳定性,同时骨架内部的植物可以保证河流生态系统的完整性,具有广泛的应用前景。

骨架护坡在我国公路、铁路路基边坡工程中的使用较多。魏静等<sup>[1]</sup>于青藏铁路格拉段冻土地区使用预制拼装式菱形骨架进行公路路基护坡,对实际工程的坡面进行变形监测,发现骨架护坡表现出温度升高下沉、温度降低回升的特点;陈龙等<sup>[2]</sup>通过室内试验研究浆砌片石骨架连接处的应变规律,并对拱形骨架拱顶、拱脚和拱柱处的三向应变进行了研究;聂忆华等<sup>[3]</sup>通过室内试验和三维数值模型分析3种不同的人字形骨架护坡结构关键点的应力大小;Xu等<sup>[4]</sup>通过数值模型研究竖向加载下砂浆拱形护坡的应变及位移;申文军<sup>[5]</sup>通过数值模型分析矩形骨架、菱形骨架、人字形骨架的应力分布及变形;陈超<sup>[6]</sup>提出人字形骨架护坡尺寸设计及布置间距的优化方案,但该方案主要依据过往的工程经验,缺少相关的理论分析依据;Lee等<sup>[7]</sup>同样指出结合植被护坡可以减少骨架位移;Chehlafi等<sup>[8]</sup>在Fez-Taza公路斜坡处使用混凝土拱以实现公路边坡的保护,并指出骨架与植被结合护坡的方案兼具安全性与经济性;夏微等<sup>[9]</sup>在航道护岸工程中也尝试使用拱圈结构,通过三维数值模型研究发现随着拱圈高度的增加,成形混凝土温度第一主应力随之增长。

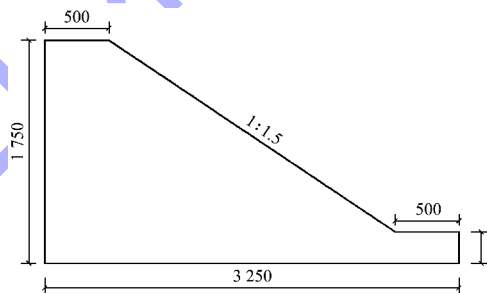
综上,国内将骨架结构应用于航道护岸的实例较少,在设计阶段缺乏相应理论支撑。国内学者对于骨架的尺寸设计及布局方案等关键问题仍然依靠工程经验,缺少系统的理论研究。本文开展骨架护坡应用于航道工程相关研究,通过数值模拟分析人字形、菱形、拱形3种骨架护岸结构在坡顶静载作用下的力学响应机制,论述骨架结构应用于航道护岸工程中的优劣性,探究拱形骨

架结构各设计参数对岸坡稳定性的影响规律以及拱形骨架护岸设计参数关联机制。

## 1 骨架护岸结构下航道边坡稳定性模型验证

### 1.1 试验设计

选取骨架护坡结构应用于路基的缩尺试验<sup>[10]</sup>作为参照,采用PLAXIS 3D建立的三维骨架护坡结构模型验证。缩尺试验模型的尺寸为:高1.75 m、宽(横马路向)3.25 m、长(顺马路向)3 m、边坡坡度1:1.5,模型侧面及坡面骨架平面见图1,试验所用土体最大干密度为 $1.83 \text{ g/cm}^3$ ,最佳含水率为7.3%。在坡顶处使用钢块进行加载,加载压强分别为7.35、14.70、22.10、33.80、49.50 kPa,分析5级加载情况下骨架位移及关键点位(拱顶、拱脚、拱柱)处的应变情况。



a) 模型侧面(单位: mm)



b) 模型平面

图1 模型侧面及坡面骨架平面

### 1.2 数值模型建立

模型采用笛卡尔坐标系,以坡脚线中心线为坐标原点, $X$ 为横马路方向, $Y$ 为顺马路方向, $Z$ 为高度方向。模型所用土体的弹性模量为5 MPa,由于不考虑土体的长期固结作用,因此土体排水类型设为不排水。模型土体的HSS参数取值见表1。

表 1 试验土体的 HSS 参数

种类	$E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oced}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$m$	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$
黏土	5	5	20	20	0.8	10	28	60	0.000 1

注： $E_{s0.1-0.2}$  为土样在室内压缩仪(固结仪)的侧限(无侧胀)压缩试验条件下应力与应变的比值， $E_{50}^{\text{ref}}$  为标准三轴排水试验割线刚度， $E_{\text{oced}}^{\text{ref}}$  为侧限压缩试验切线刚度， $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为工程应变( $\varepsilon$  在  $10^{-3}$  到  $10^{-2}$ ) 范围内卸载/重加载刚度， $m$  为刚度的应力相关幂指数， $c'$  为有效黏聚力， $\varphi'$  为有效摩擦角， $G_0$  为小应变参考剪切模量， $\gamma_{0.7}$  为剪切应变。

对于拱形骨架结构，将浆砌块石采用板单元模拟为弹性材料，法向刚度为 3 GN/m，等效厚度为 25 cm，泊松比为 0.2，单元类型为 10 节点正四面体单元。除了土体和实体单元外，12 节点的界面单元用于模拟土与结构物的相互作用。为便于计算，模型全局疏密度设为中等，对拱形骨架范围内的土体和结构物进行等倍数网格加密，建立三维有限元模型见图 2。

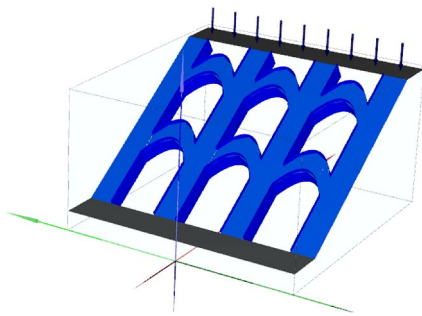


图 2 三维有限元模型

### 1.3 计算结果

计算得到坡面竖向位移最大沉降值出现在坡顶 7.5 mm 处，与试验测量值误差为 6.25%。坡脚处出现隆起，最大隆起值为 3.5 mm，与试验测量值误差为 14.63%。

将关键点位处的数值计算得到的骨架结构的应变结果与试验测量得到的骨架结构应变数据进行比较，见表 2。可以发现，无论是数值模拟还是试验模型，距离坡顶距离越大，竖向位移越大，且任一位置处数值计算的横向位移值小于试验测量值，而竖向位移则相反，两者的相对误差均小于 30%。因此，可以认为数值模型能够合理地模拟骨架护岸结构下边坡的稳定性。

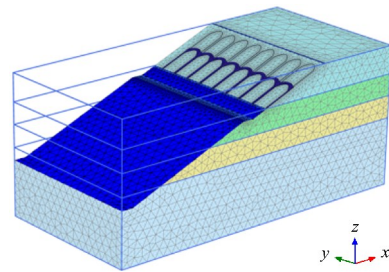
表 2 骨架结构关键点位移对比

测点位置	距离坡顶距离/cm	位移方向	应变/ $10^{-6}$		相对误差/%
			数值模型计算	试验测量	
拱顶	32	竖	94	89	5.62
		横	106	109	2.75
拱脚	44	竖	127	121	4.96
		横	31	39	20.51
拱顶	53	竖	178	138	28.99
		横	130	168	22.62
拱脚	105	竖	208	172	20.93
		横	43	47	8.51
坡脚	123	竖	376	319	17.87
		横	206	291	29.21

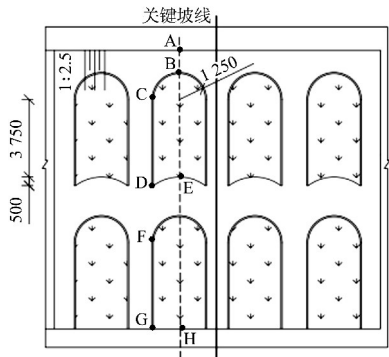
## 2 不同骨架形式护岸结构对比

### 2.1 三维有限元模型

结合沙河漯河—平顶山航运工程中已有的 3 种骨架护岸方案，即拱形骨架、菱形骨架和人字形骨架，分别通过 PLAXIS 3D 软件建模分析，建立的有限元模型及关键点位与关键坡线见图 3。



a) 拱形骨架有限元模型



b) 拱形骨架关键点与关键坡线(单位: mm)

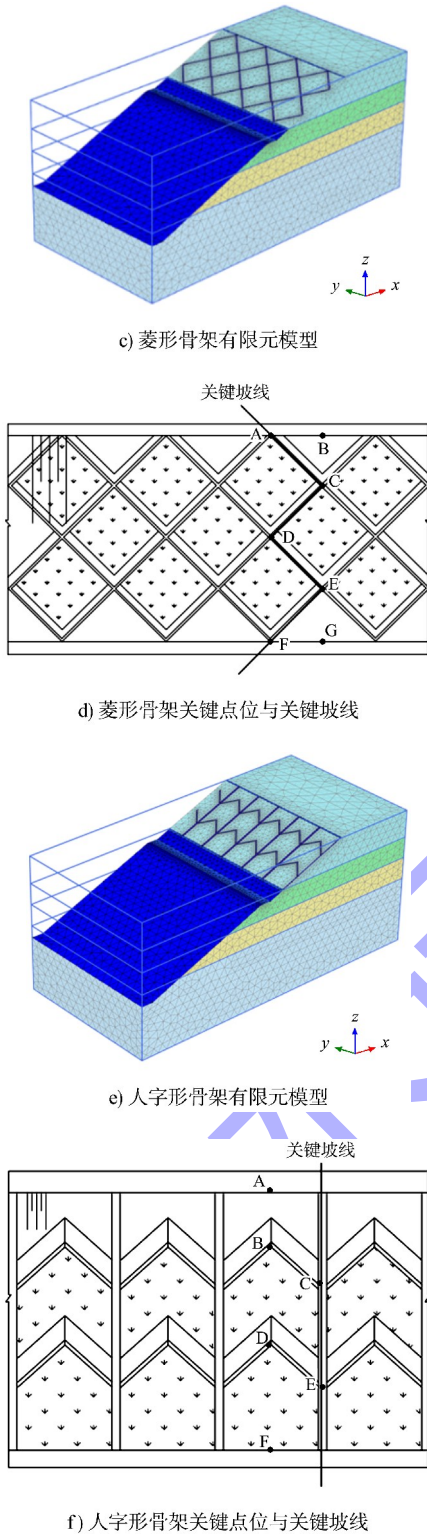


图 3 有限元模型及关键点位与关键坡线

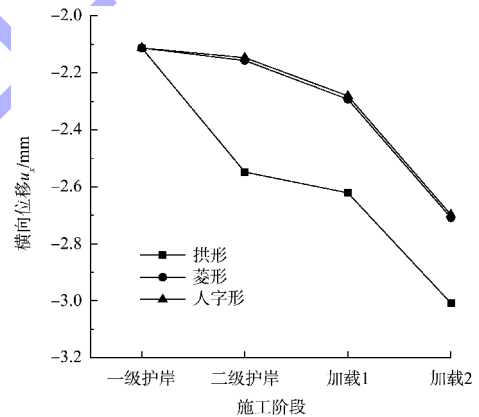
假定土层是水平均匀连续且各向同性的弹塑性材料, 土体的本构模型采用小应变土体硬化模型; 骨架结构采用弹性材料板单元, 法向刚度为 3 GN/m, 等效厚度为 25 cm, 泊松比为 0.2。C25 模袋混凝土护坡, 同样采用板单元, 等效厚度为 18 cm; 不

考虑土体的固结和蠕变的影响, 土体设置为不排水形式, 河底高程取 58.9 m, 蓄水位取 66.0 m, 护坡平台顶高程取 67.0 m, 护坡坡顶高程取 72.5 m。

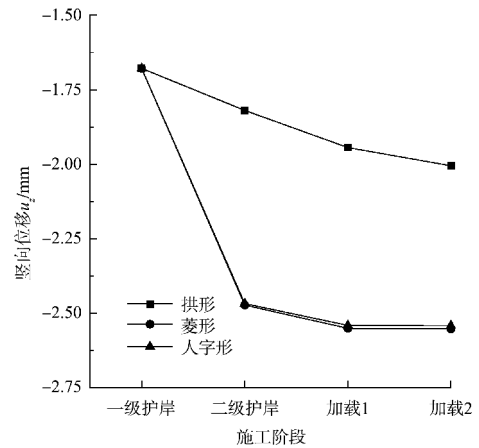
### 2.2 各形状骨架护岸结构稳定性对比

采用不同的骨架结构进行护岸后坡顶处土体的横向位移见图 4a), 发现随着护岸的施工以及荷载的施加, 坡顶土体均出现向航道侧的位移。对比不同的护岸结构, 发现菱形与人字形骨架结构可以更好地控制坡顶处土体的横向位移, 相较于拱形骨架结构, 坡顶土体的横向位移值减小了 14.5%~17.6%。

采用不同的骨架结构进行护岸后坡顶处土体的竖向位移见图 4b), 发现随着护岸的施工以及荷载的施加, 坡顶土体出现沉降。对比不同的护岸结构, 发现与另外两种形式的骨架结构相比, 拱形骨架结构很好地控制了坡顶土体的沉降, 可以减少 20%以上的坡顶土体沉降。



a) 横向位移



b) 竖向位移

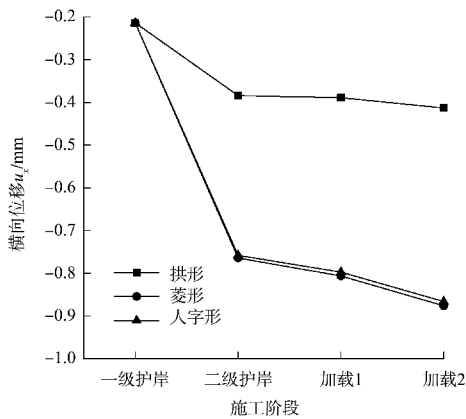
图 4 不同护岸结构坡顶位移



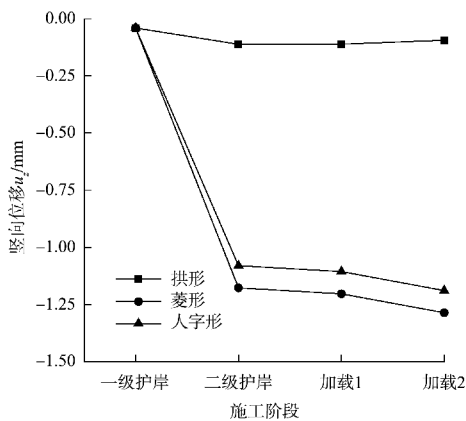
采用不同骨架结构进行护岸后，坡脚处土体的横向位移，见图 5a)，发现随着护岸的施工以及荷载的施加，坡脚土体也出现向航道侧的位移，但位移值比坡顶处的土体位移值约小 70%。与坡顶处相反，拱形骨架结构可以很好地控制坡脚处土体的横向位移，相较于另外两种骨架结构，坡脚土体的横向位移值减小了 46.7%~53.5%。

采用不同的骨架结构进行护岸后，坡脚处土体的竖向位移见图 5b)，随着护岸的施工以及荷载的施加，坡脚处土体均出现隆起，但使用拱形骨架，坡脚处的隆起值远小于另外两种骨架结构。且随着面荷载的施加，使用拱形骨架后坡脚处隆起值有微小的降低趋势，而另两种呈现明显的增大趋势。

总体而言，拱形骨架结构可以有效控制航道两侧岸坡土体的位移，相较于菱形与人字形骨架结构，岸坡出现整体滑动破坏的可能性更小。



a) 横向位移



b) 竖向位移

图 5 不同护岸结构坡脚位移

不同骨架形式的护岸结构的岸坡安全系数(横坐标为循环计算的位移叠加值)见图 6，根据 GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》<sup>[11]</sup>，工程边坡稳定系数  $F_s$  可取 1.25。因此使用拱形骨架结构时，岸坡的滑动破坏面范围最小，岸坡的安全系数最大，约为 1.62。

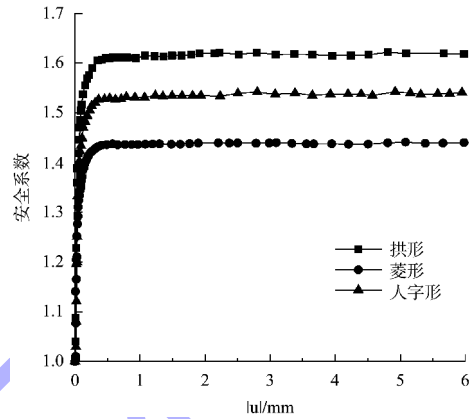


图 6 安全系数对比

### 3 拱形骨架护岸设计参数关联机制及优化

#### 3.1 正交优化方案设计

选取拱径、拱深度、拱宽度为试验因素，每个因素对应选取 3 个水平，指标为施工过程中岸坡最大的横向/竖向位移以及骨架结构的最大竖向位移。参照张建国<sup>[12]</sup>给出的拱形骨架的设计参数，并结合本工程，建立正交试验 L16(4<sup>3</sup>)，各试验因素的水平设计见表 3。

表 3 正交试验因素及其水平设计

试验水平	拱径/m	拱深度/m	拱宽度/m
1	4.0	0.40	0.040
2	4.5	0.45	0.045
3	5.0	0.50	0.050

#### 3.2 优化计算结果与敏感性分析

有限元数值模拟计算结果见表 4。对 3 个试验指标分别进行极差与方差分析，得出试验指标对于各设计参数及其水平的响应。方差分析选取 3 个指标进行衡量， $S_T$  为试验因素的总偏差方差和， $M$  为试验因素的均方差， $F$  为统计量。 $S_T$  由  $S_{因素}$  (各列因素的偏差平方和) 与  $S_{误差}$  (误差的偏差平方和) 构成，反映各试验因素有效应力间差异； $F$  由  $M_{因素}$  与  $M_{误差}$  作商得到。

表 4 正交试验

方案	试验因素				计算结果		
	拱径/m	拱深度/m	拱宽度/m	误差列	土体横向位移/mm	土体竖向位移/mm	骨架竖向位移/mm
1	4.0	0.40	0.040	1	-3.56	-2.49	-1.01
2	4.0	0.45	0.045	2	-3.57	-2.48	-1.10
3	4.0	0.50	0.050	3	-3.57	-2.46	-1.18
4	4.5	0.40	0.045	3	-3.50	-2.30	-0.88
5	4.5	0.45	0.050	1	-3.46	-2.22	-1.06
6	4.5	0.50	0.040	2	-3.41	-2.13	-1.56
7	5.0	0.40	0.050	2	-3.55	-2.44	-0.65
8	5.0	0.45	0.040	3	-3.54	-2.42	-0.86
9	5.0	0.50	0.045	1	-3.57	-2.47	-0.72

极差分析参数  $K_i$  表示任一系列水平号为  $i$  时, 所对应的试验结果之和; 极差  $R$  为  $\max(k_1, k_2, k_3)$  与  $\min(k_1, k_2, k_3)$  的差值, 其中  $k_i$  为  $K_i$  除以水平数  $s$ 。极差  $R$  越大对指标的影响越显著。根据  $R$  值确定各影响因素之间的敏感性序列, 挖掘其内部关联机制并确立最优的骨架护岸结构体设计参数。但极差分析方法不能区分由于试验条件改变引起的数据波动与试验误差引起的数据波动, 因此可结合方差分析, 弥补其缺陷。

土体横向位移的响应分析见表 5, 极差分析的结果表明岸坡土体横向位移对各因素的敏感性响应依次为拱径、拱宽度、拱深度。拱径的设计取值是影响岸坡土体横向位移的主要因素, 拱宽度的影响其次, 拱深度的影响可忽略不计。

表 5 土体横向位移的响应分析

分析 方法	统计 参数	试验因素		
		拱径	拱深度	拱宽度
极差分析	$K_1$	10.695 0	10.611 0	10.511 0
	$K_2$	10.374 0	10.577 0	10.646 0
	$K_3$	10.663 0	10.544 0	10.575 0
	$R$	0.107 0	0.022 3	0.045 0
方差分析	$S_{因素}$	0.271 4	0.000 7	0.020 8
	$M_{因素}$	0.135 7	0.000 4	0.010 4
	$S_{误差}$	-	0.001 1	-
	$M_{误差}$	-	0.000 6	-
	$F$	245.803 4	0.677 6	18.875 6

土体竖向位移的响应分析见表 6, 极差分析的结果显示岸坡土体的竖向位移对各设计因素的敏感性响应程度依次为拱径、拱宽度、拱深度。为控制岸坡土体的竖向位移, 应着重考虑拱径的

设计取值, 其次是拱宽度的设计取值, 拱深度的设计取值可以不考虑。

表 6 土体竖向位移的响应分析

分析 方法	统计 参数	试验因素		
		拱径	拱深度	拱宽度
极差分析	$K_1$	10.429 0	10.232 0	10.046 0
	$K_2$	9.645 0	10.115 0	10.243 0
	$K_3$	10.331 0	10.058 0	10.116 0
	$R$	0.261 3	0.058 0	0.065 7
方差分析	$S_{因素}$	0.473 6	0.005 2	0.141 7
	$M_{因素}$	0.236 8	0.002 6	0.060 8
	$S_{误差}$	-	0.004 0	-
	$M_{误差}$	-	0.002 0	-
	$F$	118.967 9	1.317 9	30.560 4

骨架结构竖向位移的响应分析见表 7, 极差分析的结果显示骨架结构对各设计因素的敏感性响应程度依次为拱径、拱深度、拱宽度。方差分析的结果表明拱径、拱深度、拱宽度对骨架结构竖向位移的影响程度均低于  $F_{90\%}$ , 均不是影响骨架结构竖向位移的主要因子。

表 7 骨架结构竖向位移的响应分析

分析 方法	统计 参数	试验因素		
		拱径	拱深度	拱宽度
极差分析	$K_1$	3.291 0	2.536 8	3.436 7
	$K_2$	3.492 8	3.017 7	2.698 1
	$K_3$	2.237 0	3.466 3	2.886 0
	$R$	0.418 6	0.309 8	0.246 2
方差分析	$S_{因素}$	0.303 2	0.144 1	0.159 2
	$M_{因素}$	0.151 6	0.072 0	0.079 6
	$S_{误差}$	-	0.048 8	-
	$M_{误差}$	-	0.024 4	-
	$F$	6.207 6	2.949 4	3.259 0

综上,拱径的设计取值对3个考察指标的影响最大,在边坡护岸结构设计时,应优先考虑不同拱径的土体位移情况,得到最优的拱径取值。若工程位于降雨较多的地区,还应进一步考虑不同骨架埋深时的情况,使得骨架结构的竖向位移最小,避免骨架结构因冲刷而损坏,进而导致坡面失稳的情况。

与工程原设计方案相比,方案6土体的位

移最小,方案5土体位移略大于方案6,但骨架位移减小30%,因此选择方案5作为工程的优化方案,即拱径4.5 m,埋深0.45 m,拱块宽度0.05 m。优化后,土体横向位移最大值由3.71 mm减小至3.46 mm,竖向位移由2.12 mm增加至2.22mm。

进一步将原设计方案与优化方案的经济性进行比较,见表8。

表8 原方案与优化方案经济性比较

方案	单个预制直线型拱块体积 (长×宽×高)/(mm×mm×mm)	单个预制弧型拱块体积 (弧长×宽×高)/(mm×mm×mm)	每拱用块体 个数	每100 m 拱跨数/个	拱形骨架使用 混凝土体积/m <sup>3</sup>
原设计方案	500×50×350	320×50×350	14个直线型+12个弧型	34跨×2	12.899 6
优化方案	500×50×450	320×50×450	14个直线型+22个弧型	24跨×2	13.473 6

结果表明:每100 m航道护岸工程中,原设计方案拱形骨架使用混凝土约12.9 m<sup>3</sup>,优化方案中拱形骨架则使用混凝土约13.5 m<sup>3</sup>,仅增加0.6 m<sup>3</sup>用量。沙河漯河—平顶山航运工程A、B型护岸工程全长4 521 m,计算得出拱形骨架使用的混凝土量共计增加54.3 m<sup>3</sup>,对工程的经济性影响微小。

#### 4 结论

1) 对使用不同骨架结构岸坡的应力场和位移场进行分析,发现在坡顶土体的横向位移控制方面,菱形与人字形骨架结构控制效果更好。在坡顶土体的竖向位移、坡脚土体的横向/竖向位移控制方面,拱形骨架结构控制效果更好。使用拱形骨架时,岸坡的滑动破坏面范围最小,岸坡的安全系数最大。

2) 第一有效主应力最大值出现的位置在采用拱形、菱形骨架结构护岸的坡脚处以及采用人字形骨架结构护岸的岸坡中部;横向位移最大值出现的位置为采用拱形、人字形骨架结构护岸的岸坡中部以及采用菱形骨架结构护岸的坡脚处;竖向位移最大值出现的位置均为护岸的坡顶处。

3) 土体横向位移对荷载的施加更加敏感,位移的增加与荷载的施加大致呈正相关趋势;竖向位移与第一有效主应力对荷载的施加敏感性较弱,因此在控制岸坡的横向位移时,应着重考虑

岸坡受到的荷载大小。

4) 在拱形骨架结构的设计参数选取上,拱径的设计值对土体的横向位移、竖向位移均有显著影响,相较于拱埋深与拱宽度,拱径对骨架结构的竖向位移影响也更大;其次,拱的宽度设计对土体竖向位移有较大影响。因此在设计拱形骨架护岸结构时,应首先考虑不同拱径对岸坡土体位移的影响,在对岸坡土体沉降控制较严格的工程上,可进一步考虑拱宽度设计取值的影响。

5) 就沙河漯河—平顶山航运工程而言,建议拱形骨架护岸结构的设计参数由原设计方案(拱径2.5 m、拱宽0.05 m、埋深0.300 m)优化为正交方案5(拱径4.5 m、拱宽0.05 m、埋深0.450 m),在减小岸坡土体位移的同时,仅增加混凝土用量不到55 m<sup>3</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 魏静,许兆义,葛建军,等. 青藏铁路路基预制拼装式骨架护坡试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 329-333.
- [2] 陈龙,聂忆华,彭立,等. 浆砌片石拱形骨架护坡实体模型加载分析[J]. 湖南交通科技, 2014, 40(1): 7-9, 79.
- [3] 聂忆华,唐赛乾,徐暘,等. 人字形骨架路基护坡模型试验及数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 114-120.