

# 拱座斜井柱和竖直井柱在倾倒岩体中应用研究

韩晓荣, 杨莉, 何岚, 王栋

(陕西省水利电力勘测设计研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710001)

**摘要:** 倾倒岩体是地表岩体蠕变产生的一种自然地质现象, 容易发生变形破坏, 对工程建设具有一定危害。为了研究在倾倒岩体中建设水工建筑物的可行性和安全性, 以某拱式渡槽为例, 论述其基础处理措施。采用在拱座边墩布置斜井柱和竖直井柱穿透倾倒岩体, 可将上部荷载和拱端推力传递至下部稳定岩体中, 既减小荷载对倾倒岩体的作用, 又对倾倒岩体的蠕变变形起到抵抗作用。通过有限元分析计算, 拱座、井柱和拱端位移较小, 拱圈和拱座均处于稳定状态。研究结果表明, 斜井柱和竖直井柱在倾倒岩体中的应用是可行和有效的。

**关键词:** 倾倒岩体; 拱座边墩; 斜井柱; 竖直井柱; 有限元分析

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0162-07

## Application of Abutment Inclined Shaft Columns and Vertical Shaft Columns in Toppling Rock Masses

HAN Xiaorong, YANG Li, HE Lan, WANG Dong

(Shaanxi Province Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and Design (Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710001, China)

**Abstract:** The toppling rock mass is a natural geological phenomenon caused by surface rock creep, which is prone to deformation and failure, posing certain risks to engineering construction. To analyze the feasibility and safety of constructing hydraulic structures in toppling rock masses, the foundation treatment measures of a certain arch aqueduct are discussed as a case study. The treatment involves arranging inclined and vertical shafts at the abutment side pier to penetrate the toppling rock mass. This method transfers the upper load and arch thrust to the stable underlying rock mass, therefore can reduce the impact of the load on the toppling rock mass and resisting its creep deformation. Through finite element analysis, it is found that the displacement of the abutment, shaft column, and arch ends is minimal, and both the arch ring and abutment are in a stable state. The results indicate that the application of inclined and vertical shaft columns in toppling rock masses is feasible and effective, which can provide valuable reference for foundation treatment in toppling rock masses.

**Keywords:** toppling rock mass; abutment side pier; inclined shaft column; vertical shaft column; finite element analysis

随着我国基础设施建设向复杂地质区域延伸, 倾倒岩体环境下的工程稳定性问题日益突出<sup>[1]</sup>。倾倒岩体是地表岩体原地蠕变产生的一种特殊自然地质现象, 具有层理倒转、结构面发育、应力场复杂等特点<sup>[2-4]</sup>。作为层状碎裂结构的典型代表, 广泛分布于高陡边坡、水利水电工程及交通隧道等场景中。其特有的渐进式弯曲-折断破坏机制, 导致岩

体自稳能力显著降低, 对拱座等关键工程结构的稳定性构成严重威胁<sup>[5]</sup>, 作为拱座地基时易引发基础滑移、偏压破坏等工程病害。据统计, 我国西南地区超过60%的水电工程面临倾倒岩体治理难题, 其中拱座基础的失稳问题尤为突出。传统的竖直井柱支护体系虽在常规岩层中表现良好, 但在倾倒岩体复杂的应力重分布与非对称变形条件下, 常因抗弯刚

度不足引发颈部断裂或界面滑移失效,例如乌溪江大桥 3 号拱座在未加固前因岩体节理发育导致边坡失稳,最终需采用锚筋桩组合加固方案<sup>[6-7]</sup>。传统竖直井柱体系在应对这类非对称荷载时存在应力集中显著、抗倾覆能力不足等问题,而倾斜井柱体系通过调整荷载传递路径,展现出独特的力学优势<sup>[8-9]</sup>,近年来,斜向支护技术因其“压-剪”复合传力路径的优势受到关注。张文渊<sup>[10]</sup>认为在拱式桥梁工程中斜桩受力比竖桩受力有利,可采用斜桩来承受拱座垂直反力与水平推力。李栋等<sup>[11]</sup>研究表明斜桩支护能有效的控制基坑位移。周德泉等<sup>[12]</sup>提出特定倾斜方向的倾斜桩比竖直桩具有更好的水平承载性能。同时斜桩可采用大直径桩基,能有效解决上部荷载较大的基础承载问题,黄志鹏<sup>[13]</sup>提出大直径灌注桩具有施工质量容易控制、承载能力大等显著优点。朱斌等<sup>[14]</sup>研究了大直径单桩在水平静力和循环荷载作用下的受力特性,为大直径桩基础设计提供理论依据。研究表明,斜井柱通过调整倾角可优化荷载传递方向,例如在澜沧江某拱坝工程中,斜桩结构显著提升了抗倾覆效率。

当前研究多聚焦于单一井柱形式的力学特性分析,如崔秀平<sup>[15]</sup>对竖井支护体系的优化研究、张明远等<sup>[16]</sup>对大倾角斜井井壁稳定性分析与支护技术研究以及人们对大倾角斜井受力特征的探讨,而针对倾倒岩体特殊地质条件下两种井柱体系的协同作用研究仍存在空白,特别是在以下三方面亟待突破:①斜井柱与竖直井柱协同作用匹配机制;②复合应力场中井柱-围岩协同变形规律;③异形井柱体系对拱座不均匀沉降的调控效应。

本研究基于石门水库灌区沥水沟渡槽震后改建

工程,渡槽进出口边坡均为倾倒岩体,其产状较乱,裂隙发育,岩层破碎,承载力及抗滑稳定指标低,在此地质条件下修建拱式渡槽,基础处理是工程建设的关键。若采取清除倾倒岩体回填混凝土的方法,则基础处理工程量巨大工程费用极高,经分析研究,提出在拱座边墩设置竖直井柱和斜井柱穿透倾倒岩体的基础处理措施,井柱采用大直径人工挖孔桩,通过传统稳定计算与有限元分析相结合的方法,系统研究斜井柱与竖直井柱在倾倒岩体中的承载协同作用。分析了拱座边墩、井柱、拱圈的稳定性及应力状态,验证了井柱协同作用的可行性和有效性。研究结果可为复杂地质区拱座基础设计提供理论依据,对提升倾倒岩体工程处治技术水平具有重要意义。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

某渡槽为 3 级建筑物,设计输水流量  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ,在震后恢复重建中,采用拱式渡槽改线方案,渡槽所在沟道两岸边坡均为千枚岩倾倒岩体。渡槽总长 169.13 m,沿主河谷布置 3 跨各 43 m 跨径的板式拱圈,拱圈采用变截面抛物线板拱型式,矢高 12.53 m,矢跨比为 1/3.43,拱顶厚度 0.8 m,拱脚厚度 1.2 m,拱圈上布置排架支撑上部槽箱。拱座墩台与拱圈之间采用刚性连接,布置 2 个边墩和 2 个中墩,拱座边墩坐落于两岸倾倒岩体中,承受来自单侧的巨大的拱端推力作用,其稳定性是工程设计中的关键问题,关系渡槽整体结构安全。边墩采用 C20 混凝土大体积重力墩型式,水平截面尺寸  $8.0 \text{ m} \times 9.0 \text{ m}$ ,高度 7.0 m。渡槽结构见图 1。

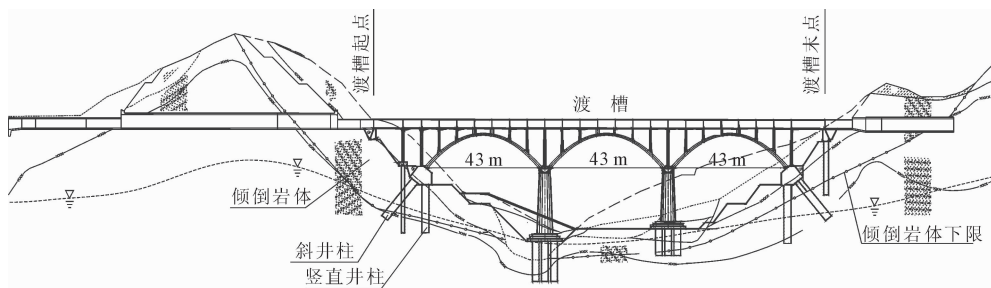


图 1 渡槽结构图

### 1.2 工程地质条件

渡槽所在沟道两岸岩体原生结构面为千枚岩构造面,前寒武系千枚岩为一单斜岩层,具轻微褶曲。其上部厚约 10 m~20 m 的岩层在重力作用下,顺层或逆层向坡外倾倒,形成地表岩层呈拖拉式变形或

地表挠曲,岩体破碎、软弱,风化强烈,张裂隙发育,雨季岩石处于饱和状态。工程区范围内分布的基岩倾倒地体有两处:①渡槽起始端倾倒地体,长 210 m,宽 90 m,厚度 7 m~22 m;②渡槽末端倾倒地体,长 235 m,宽 100 m,厚度 5 m~33 m,约  $43.7 \text{ 万 m}^3$ 。岩层

倾倒后产状较乱,为  $352^\circ \angle 34^\circ$  (正常岩层的产状为  $340^\circ \sim 355^\circ \angle 70^\circ \sim 80^\circ$ ),渡槽两岸边坡稳定性及拱座基础岩体物理力学指标较差。

从地质条件对工程建设的影响分析,影响拱座边墩安全的主要因素有两个方面,一是边坡的抗滑稳定性,二是地基的承载能力。

1.2.1 边坡稳定性分析与评价

渡槽两端边坡倾倒体已产生变形,边坡整体稳定性差,各地层岩土体抗剪强度指标见表 1。边坡破坏形式为局部崩塌或滑动,最不利滑面位于倾倒岩体中,采用条块分割法对自然边坡稳定性进行计算。沟道边坡滑弧典型剖面见图 2,稳定性计算结果见表 2。

表 1 岩土体抗剪强度指标

岩性	天然密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗剪强度	
		内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	凝聚力 $c / \text{kPa}$
人工堆积土	2.01	15.7	26.7
壤土	1.77	13.0	22.0
砂卵砾石	2.00	28.0	0.0
倾倒岩体	2.31	22.9	29.0
强风化千枚岩	2.53	23.4	34.0

表 2 自然边坡稳定性计算结果表

位置	安全系数 $K$	
	非地震	地震
左岸边坡	1.08 ~ 1.14	0.95 ~ 1.01
右岸边坡	1.05 ~ 1.12	0.93 ~ 0.99

3 级边坡抗滑稳定安全系数标准值在非地震工况下为 1.20~1.15,地震工况下为 1.10~1.05。在非地震工况下,安全系数偏低,边坡处于极限状态;在地震工况下,边坡整体稳定性差,边坡沿倾倒岩体下限向沟道方向滑动。

1.2.2 基础岩体物理力学指标

渡槽两端拱座边墩均位于倾倒岩体中,倾倒岩体为绢云母千枚岩,强度低,遇水易软化,构造发育,岩体破碎,属软岩,其物理力学指标见表 3。

受布置空间和高程的限制,拱座边墩基底置于全风化和强风化基岩界限处,其基础承载力和抗剪强度指标较低,而拱座边墩处竖向荷载和拱端推力分别达到 11 430 kN、12 600 kN,拱座边墩稳定不能满足要求。

基于以上边坡稳定性差和基础岩体物理力学指标低的特点,需采取工程措施对边坡及拱座基础进行处理,保障拱座边墩的稳定。

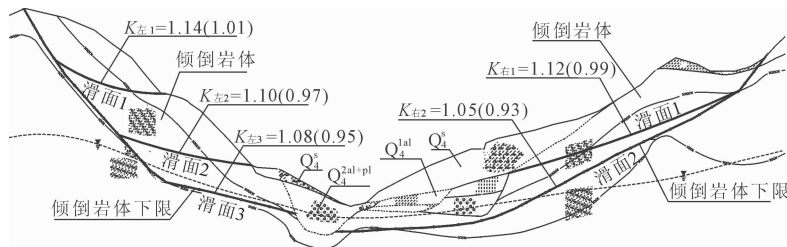


图 2 沟道边坡滑坡典型剖面

表 3 基础岩体物理力学指标

岩石类别	岩体质量分级	抗剪强度				承载力 $f_0$ /MPa	备注
		岩体/岩体		混凝土/岩体			
		摩擦系数 $f'$	黏聚力 $c' / \text{MPa}$	摩擦系数 $f'$	黏聚力 $c' / \text{MPa}$		
全风化岩体	V				0.1	左、右岸分别厚 13 m、10 m	
强风化岩体	V	0.45	0.06	0.45	0.10	0.4 左、右岸分别厚 4.5 m、20 m	
弱风化岩体	IV	0.55	0.10	0.55	0.10	1.0 厚层	
倾倒岩体	V	0.40	0.00	0.40	0.05	0.3 位于强风化岩体中,底部接近强风化下限	

2 工程措施

针对渡槽两端位于倾倒岩体中地质条件差、安全隐患大的特点,设计从两个方面解决,一是维持边坡稳定,避免因边坡失稳下滑威胁工程安全,二是进

行基础处理,满足对上部荷载的承载要求。

边坡处理首先采用削坡减载的处理方式,一定程度上预防或制止两岸倾倒岩体滑坡的发生和发展。

基础处理是设计中的关键,需解决倾倒岩体不能承受较大的拱端推力和上部荷载而引起的拱座边

墩失稳破坏问题,并且还需对倾倒岩体的缓慢蠕动起到一定阻止作用,以减小边墩的位移对拱圈内力造成的不利影响,使渡槽两端边坡及拱座边墩保持稳定。设计中就这一问题展开研讨,查阅相关参考资料进行了详细的计算论证,采取在边墩基础布置垂直井柱和斜井柱均穿透倾倒岩体,端部置于下部稳定岩体中,一方面承担上部竖向荷载及拱端推力,一方面抵抗倾倒岩体的蠕动变形作用,从而消除影响拱座边墩安全的不利因素。

大流量、大跨度拱式渡槽在拱座处产生巨大的拱端推力,推力达到 12 600 kN,在承受较大荷载的工程结构中,常采用大直径灌注桩,特别是大直径嵌岩桩,具有施工质量易于控制,承载力高等特点。考虑到拱座边墩基础置于全风化与强风化分界处倾倒岩体中,且拱端对基础有较高要求的特点,在拱座边墩下设置垂直井柱和斜井柱穿透倾倒岩体,以承受上部较大的竖向荷载和拱端推力,减小荷载对倾倒岩体的不利影响,并对倾倒岩体的蠕动变形具有一定的抵抗作用。分析计算后在上下游拱座边墩基础底面各需布置 2 根直径 2.7 m 垂直井柱,长度分别为 18.0 m、22.0 m;2 根直径 2.7 m 斜井柱,长度均为 18 m。井柱穿透倾倒岩体,端部镶嵌于下部弱风化岩体中,锚固长度 6.0 m,将荷载传至下部完整岩体中。考虑斜井柱在施工开挖过程中易坍塌、掉块,开挖后及时进行钢拱架和喷锚挂网联合支护措施<sup>[17]</sup>。斜井柱与垂直井柱布置见图 3。

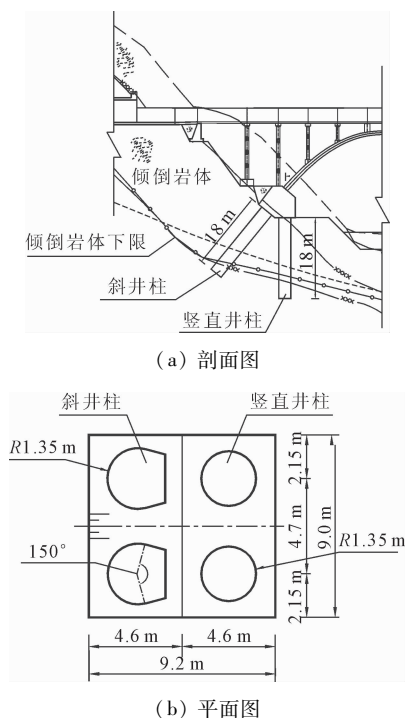


图 3 斜井柱与垂直井柱布置图

### 3 有限元计算分析

参考刘祖军等<sup>[18]</sup>、韩璇等<sup>[19]</sup>对拱式渡槽三维有限元分析方法,对拱座边墩采用垂直井柱和斜井柱穿透倾倒岩体基础处理措施的可行性及有效性进行分析。

计算参数:

拱座边墩采用 C20 混凝土,重度  $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$ ,泊松比  $\mu = 0.167$ ,弹性模量  $E = 25.5 \text{ GPa}$ 。

渡槽进出口边坡岩石为绿泥石绢云母千枚岩,为 IV~V 类岩体,上部发育有倾倒地,下面依次为强风化和弱风化层,工程地质条件相对比较复杂;具体岩体物理力学指标见表 4。其中上层倾倒体的变形模量为 0.3 GPa,承载力仅为 0.3 MPa。计算时用不同分区的实体单元分别模拟倾倒地、强风化、弱风化层,以了解施加荷载后各个岩层的应力和位移情况。

#### 3.1 拱端位移计算分析

设计中边坡进行削坡减载,并在拱座边墩设置垂直井柱和斜井柱后,对渡槽边墩和拱端位移进行有限元计算分析,选择最不利的工况:渡槽设计水位 + 人群荷载 + 地震力<sup>[20]</sup>。

##### 3.1.1 计算模型

有限元模型仅取边墩和边墩周围的地质边界,边墩所受荷载主要为边墩上部排架作用的竖向荷载和拱端的斜向推力(地震作用产生的力已经包含在斜向推力中)。

单元类型:混凝土用实体单元。

网格剖分:采用映射法。

边界条件:整体模型底部用固定约束,四周采用相应方向的法向约束。

本构模型:采用线弹性模型。

计算模型取边墩为主模型,边墩地基在深度方向取 40.0 m,顺沟道方向长度取 90 m,顺渡槽方向取 95 m。采用的坐标系为:边墩底面中心点为坐标原点,水平顺渡槽方向为 X 轴,向渡槽下游为正方向;竖直方向为 Y 轴,向上为正;沿沟道方向为 Z 轴,向下游为正。

建立的三维有限元计算模型见图 4—图 5。

##### 3.1.2 计算结果

###### (1) 空间位移

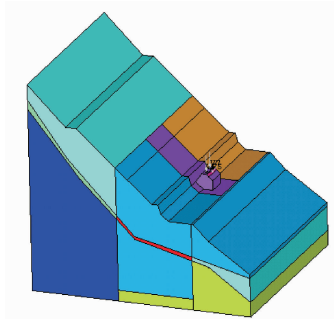
计算得边墩、井柱的空间位移最大为 37.7 mm,发生在斜井柱底端处。另外拱端处的空间位移为 6.0 mm,见图 6。

###### (2) X 轴方向位移

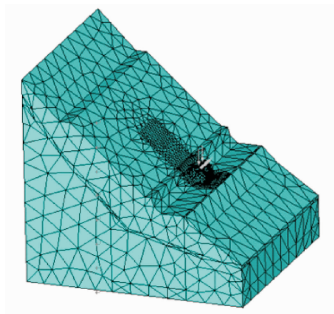
表 4 岩体物理力学指标

岩石名称	风化程度	物理性质				力学性质						泊松比	岩体质量分级	地基承载力基本值 $f_0$ /MPa	
		比重	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )		岩石抗压强度/MPa		抗剪强度				变形				
			干	湿	干	湿	岩体/岩体		混凝土/岩体		弹性模量 /GPa				变形模量 /GPa
						摩擦系数 $f'$	黏聚力 $c'$ /MPa	摩擦系数 $f'$	黏聚力 $c'$ /MPa						
绿泥石	倾倒体	2.31	2.08	2.31	5.0	2.0	0.40	0.00	0.40	0.05	—	0.3	0.45	V	0.3
绢云母	强风化	2.53	2.57	2.53	10.0	18.0	0.45	0.06	0.45	0.10	0.7	0.5	0.40	V	0.4
千枚岩	弱风化	2.77	2.72	2.74	61.1	30.4	0.55	0.10	0.55	0.10	4.0	3.0	0.32	IV	1.0
断层带破碎带							0.50	0.05	—	—	—	1.2	—	V	0.1
裂隙面结构面抗剪强度							$f=0.35 \sim 0.45$								

9.35 MPa,其发生在斜井柱和边墩连接处的上侧,第一主应力大小和分布范围具体见图 9。



(a) 有限元模型图



(b) 有限元网格图

图 4 整体有限元图

通过计算可得边墩、井柱的  $X$  轴方向位移最大为 26.5 mm,方向朝渡槽下游,发生在斜井柱底端处。拱端处的  $X$  轴方向平均位移为 4.5 mm,方向为  $X$  轴负方向,如图 7 所示。

### (3) $Y$ 轴方向位移

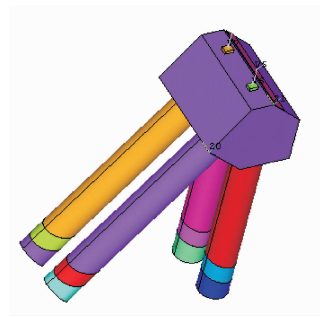
通过计算可得边墩、井柱的  $Y$  轴方向位移最大为 30.0 mm,方向竖直向下,发生在斜井柱底端处。拱端处的  $Y$  轴方向平均位移为 4.0 mm,方向竖直向下,具体如图 8 所示。

## 3.2 渡槽边墩、井柱应力计算分析

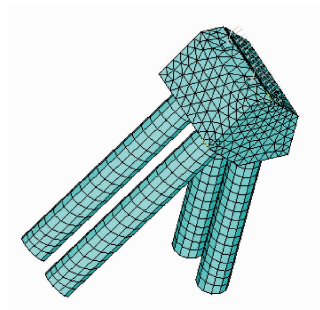
计算工况:渡槽设计水位+人群荷载+地震力。

### 3.2.1 第一主应力计算(主压应力)

通过计算可得边墩、井柱的第一主应力最大为



(a) 有限元模型图



(b) 有限元网格图

图 5 边墩和井柱有限元图

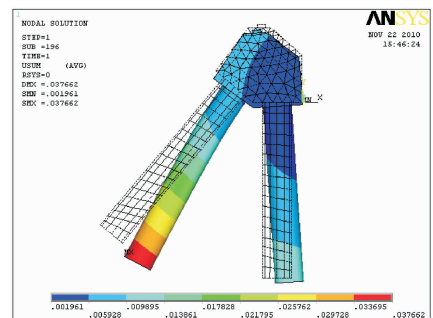


图 6 边墩和井柱综合位移图

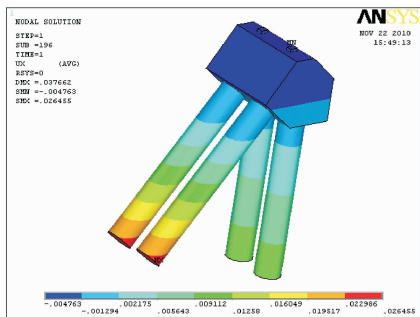


图 7 边墩和井柱 X 轴方向位移图

生在斜井柱和边墩连接处,这个部位应该加强配筋。

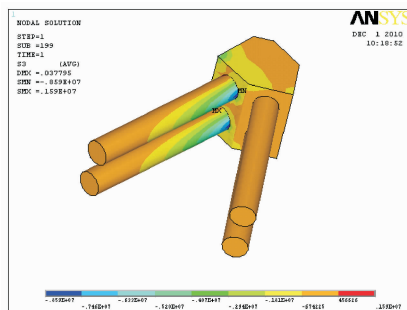


图 10 边墩和井柱第三主应力图

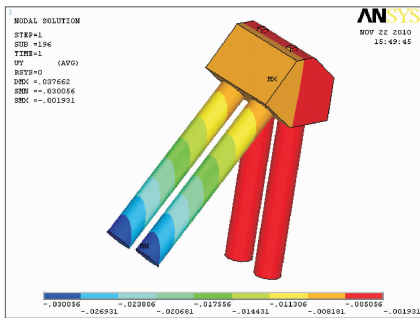


图 8 边墩和井柱 Y 轴方向位移图

### 3.3 拱端位移对拱圈内力的影响分析

从前述,拱端处的 X 轴方向平均位移为 4.5 mm,方向朝渡槽上游,拱端处的 Y 轴方向平均位移为 4.0 mm,方向竖直向下。

对比在同一工况下,拱端不发生位移和发生上述位移情况下的拱圈内力变化情况。

#### 3.3.1 计算简图

无铰拱结构计算简图见图 11。

#### 3.3.2 结果对比

通过对比,渡槽无铰拱结构,在发生 X 轴方向 -4.5 mm,Y 轴方向 4.0 mm 位移时,有的部位虽然变化比率较大,但其本身值并不大,所以对拱圈配筋的整体影响并不大,拱圈配筋可根据增大后的内力进行计算,拱圈内力结果对比见表 5。

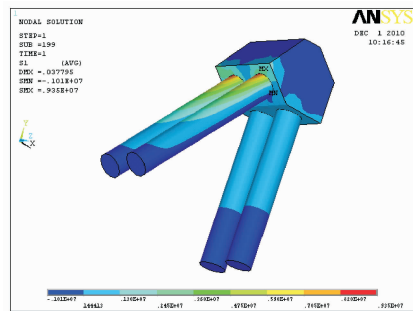


图 9 边墩和井柱第一主应力图

#### 3.2.2 第三主应力计算(主拉应力)

通过计算可得边墩、井柱的第三主应力最大为 -8.59 MPa,其发生在斜井柱和边墩连接处的下侧,第三主应力大小和分布范围具体见图 10。

从第一、第三主应力分布图可以看出,最大值均发

### 3.4 结果分析

从以上有限元计算结果来看,边墩、井柱的空间位移、X 轴方向、Y 轴方向最大位移分别为 37.7 mm、26.5 mm、30.0 mm,发生在斜井柱底端处,位移不大,根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014),单桩抗压试验沉降量一般在 30 mm ~ 50 mm 之间范围之内。而由边墩、井柱位移引起的拱端空间位移 6.0 mm,水平和竖向位移分别为 4.5 mm 和 4.0 mm,拱端位移较小,对拱圈应力的影响不大。拱座和拱圈均处于稳定状态。

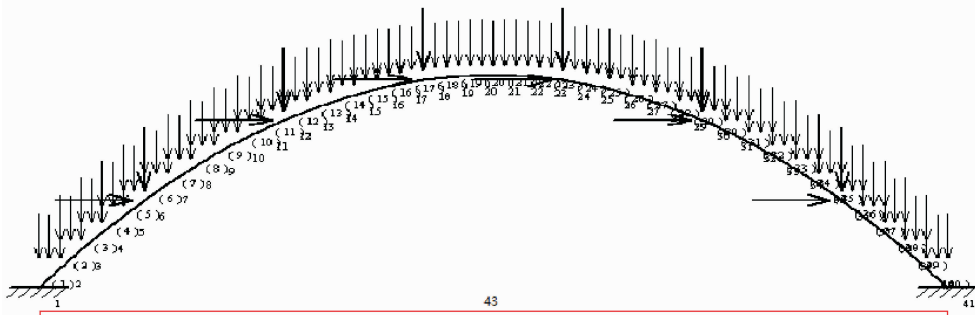


图 11 无铰拱结构计算简图

表 5 拱圈内力结果对比表

部位	未发生位移内力			发生位移内力			变化率/%		
	轴力 /kN	剪力 /kN	弯矩 /(kN· m)	轴力 /kN	剪力 /kN	弯矩 /(kN· m)	轴力	剪力	弯矩
拱端	-11465	676	-4697	-11412	727	-5231	-0.5	7.6	11.4
1/4 拱跨	-8933	527	903	-8867	561	937	-0.7	6.4	3.8
拱顶	-7731	-261	-483	-7657	-266	-229	-1.0	1.6	-52.6

### 3.5 渡槽运行情况

渡槽自 2014 年建成至今已运行十年,通过监测数据和分析成果显示,沟道两岸边坡稳定,岩体没有明显滑动迹象,拱座边墩没有出现较大的水平、竖向位移和转角,拱圈应力变化不大,上部槽箱无明显位移、错台、漏水现象,渡槽运行状况良好。

## 4 结 论

(1) 在倾倒岩体中修建拱式渡槽,基础处理方法可以采用在拱座边墩布置斜井柱和竖直井柱穿透倾倒岩体,使其端部置于下部稳定岩体中以承受上部荷载作用,井柱同时抵抗倾倒岩体的蠕动变形。

(2) 采用有限元进行模拟计算边墩和井柱应力及位移较小,拱座和拱圈均处于稳定状态,验证了所采用基础处理措施的可行性和有效性。

(3) 该基础处理方法有效解决了倾倒岩体边坡的稳定性及拱座基础承载力不足、抗滑稳定不满足的问题,从而解决了在倾倒岩体地质条件中建筑拱式渡槽的制约性问题。

### 参考文献:

[1] 黄振伟,茆金柱,蒲进,等.在倾倒边坡中建设地下调压室的工程地质研究[J].人民长江,2024,55(7):130-137.

[2] 张丙先.西藏玉曲河下游岸坡倾倒变形机制及稳定性分析[J].吉林大学学报,2018,48(5):1539-1545.

[3] 张御阳,裴向军,唐皓,等.反倾岩坡倾倒变形结构面影响效应研究[J].工程地学报,2018,26(4):844-851.

[4] 黄润球,李渝生,严明.斜坡倾倒变形的工程地质分析[J].工程地质学报,2017,25(5):1165-1181.

[5] 唐刚,廖军,邓涛,等.库水浸泡下全-强风化千枚岩桥基岸坡稳定性分析[J].人民珠江,2023,44(3):104-109.

[6] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.

[7] 张红星,古海东.乌溪江大桥拱座基础加固[J].城市道桥与防洪,2017,4(4):104-106,115.

[8] 王淞,刘永超,张建新,等.倾斜桩水平承载变形特性现场试验研究[J].建筑结构,2025,55(1):139-144.

[9] 叶青,郭伟,任宇晓,等.基于内聚力模型的嵌岩双斜桩水平承载特性分析[J].岩土工程学报,2025,46(S1):233-238.

[10] 张文渊.竖桩和斜桩在拱式桥梁工程中的应用比较[J].城市道桥与防洪,2002(2):36-39.

[11] 李栋,余振锡,郑军.直-斜桩中斜桩桩长与桩径的影响研究[J].山西建筑,2023,49(2):98-101.

[12] 周德泉,王创业,周毅,等.被动倾斜桩应用研究与展望[J].中外公路,2023,43(2):1-10.

[13] 黄志鹏.大直径人工挖孔桩深井岩基载荷试验及研究[J].地下空间,2001,21(5):578-580.

[14] 朱斌,熊根,刘晋超,等.砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J].岩土工程学报,2013,35(10):1807-1815.

[15] 崔秀平.竖井施工及井壁支护[J].应用技术,2012(7):145-146.

[16] 张明远,李红伟.大倾角斜井井壁稳定性分析与支护技术研究[J].岩土工程学报,2023,45(3):456-463.

[17] 罗平南,洪昶森.千枚岩地层大深度钻孔灌注桩施工关键技术[J].江西建材,2022(6):145-146,149.

[18] 刘祖军,李军,赵顺波.拱式渡槽结构受力性能三维有限元分析[J].水利水电技术,2006(9):30-32.

[19] 韩璇,赵妍,刘佳特,等.某大型拱式渡槽动力三维有限元分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(4):99-103.

[20] 谢小雨,李睿,李晓章,等.考虑水-结构相互作用的大跨度、大断面拱式渡槽结构地震响应分析[J].施工技术(中英文),2023,52(12):49-54.