

圆弧形挡墙稳定分析与加固措施研究

郑爱民

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]挡土墙设计时,平面布置体型如选用圆弧形挡墙,应采用合适的墙面圆弧半径,不宜过小。稳定计算建议结合挡墙分缝情况,采用挡墙整体稳定计算方法复核挡墙稳定和基底应力情况,并应满足规范规定。挡墙失稳加固应结合实际情况,选择合适的除险加固处理方案。

[关键词]挡土墙;稳定;计算;加固方案

DOI: 10.64635/ja.2026.1218

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

Research on Stability Analysis and Reinforcement Measures for Arc-Shaped Retaining Walls

Zheng Aimin

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China

Abstract: In retaining wall design, when an arc-shaped retaining wall is adopted in the plane layout, an appropriate wall arc radius should be selected and should not be too small. For stability calculation, it is recommended to consider the joint arrangement of the retaining wall and use an overall stability calculation method to check the stability of the retaining wall and the base stress conditions, which should meet the requirements of relevant codes. For reinforcement of unstable retaining walls, an appropriate risk-elimination and reinforcement treatment scheme should be selected according to actual site conditions.

Keywords: retaining wall; stability; calculation; reinforcement scheme

1 工程概况

新疆北部一渠道工程,位于阿勒泰地区福海县境内,是一项自水库引水解决渠道沿线农业与工业用水的输水工程。渠道每年5月初运行至当年10月底,冬季不运行。渠道及沿线交叉建筑物于1997年3月正式开工建设,2000年8月建成并通水,至2024年底工程已经运行25年。

输水渠道线路地域辽阔,地势平坦,气候干燥,多风少雨,远离海洋属大陆性寒温带气候,渠线四季中春秋两季不明显,大致可分为冷半年和暖半年。纬度高、气候低、少酷暑、多严寒。戈壁沙质下垫面气温变化剧烈,日较差明显。海拔在500~900m间,热量充足,年降水量小于100mm。

为满足渠道两侧牧民出行、转场和拉运生活物资等要求,渠道沿线每隔10km左右设一座跨渠交通桥,沿线共设有5座单跨混凝土桥,桥面宽度9.2m。桥面为预制钢筋混凝土T形梁结构,梁长13m,净跨12.5m,荷载标准为汽20。桥台结构为现浇钢筋混凝土半重力挡土墙型式,每座桥台两侧采用圆弧形现浇混凝土挡墙与上下游渠堤混凝土翼墙连接。圆弧形挡墙和上下游翼墙均采用半重力

式混凝土挡墙结构,圆弧形挡墙总高8.8m,墙底宽5m,墙顶宽0.5m,墙底前趾长0.5m,厚1m,迎水面圆弧半径6m。

近些年,渠道沿线5座单跨交通桥两侧圆弧形混凝土挡墙两端,与桥台和翼墙间的伸缩缝左右的两侧混凝土挡墙面部位出现了错台现象、伸缩缝宽度也发生了变化,宽度相较于交通桥建成时出现了一定程度的张开现象,缝内止水橡皮因为裂缝张开而拉裂。秋季停水后,运行管理人员将圆弧挡墙两端张开的伸缩缝表面用双组份聚硫密封胶封闭,但经过1~2年通水期后,伸缩缝部位聚硫密封胶修补好的伸缩缝再次被拉开,说明圆弧形挡墙向渠内“栽头”的变形趋势在持续,伸缩缝两侧挡墙迎水面最大错台超过了6cm,原设计仅为2cm宽的伸缩缝,变形最大处已经发展至5~8cm,若变形持续发展而不进行处理,将对交通桥安全运行产生不利影响。

2 原因分析

根据现场查看,跨渠交通桥两侧圆弧形挡墙混凝土挡墙自身结构完整,未发现有墙体开裂、破损现象,墙面平整光滑,无裂缝,挡墙混凝土结构完整性较好。经查阅原

设计资料,圆弧形挡墙为钢筋混凝土结构,挡墙表面均配置纵横向构造钢筋,经计算挡墙底板承受弯矩值不大,配筋满足结构受力要求。^[1]《水工挡土墙设计》中关于挡墙发生倾覆破坏的分析结论:“挡土墙的倾覆破坏对于土基抗倾稳定验算不是控制条件,因为土基上的挡土墙发生前倾破坏时,必要伴随前趾基底应力过大或前趾应力与后趾比值过大。应力大小比在地基应力验算中应受到严格控制,当应力大小比满足要求时,抗倾稳定必然满足要求。”“当挡墙基底应力过大,超过地基承载力,或前后趾应力大小比过大,将产生地基下沉,进而导致挡土墙下沉破坏”。基础存在软弱土层,基础出现下沉时也会引起挡墙倾斜。下面从挡墙地质条件和挡墙基底应力计算两方面进行分析:

2.1 挡墙基础地质条件分析

沿线跨渠交通桥基础主要为砂砾岩、砂岩夹膨胀性泥岩的互层结构,膨胀性泥岩以薄层状、片状、窝状分布于砂岩和砂砾岩中。

砂砾岩:干密度 1.8~1.9g/cm³,纵波速度 1000~1600m/s,抗剪强度 φ : 33~35°,饱和固结快剪 φ : 30~33°,C: 21~30kPa,压缩系数 0.067MPa⁻¹,压缩模量 20.6MPa,属低压缩性岩土,承载能力 300kPa;

砂岩:干密度 1.79~1.9g/cm³,干抗压强度 3.09MPa,饱和 0.1MPa,弹模 0.46GPa,变模 0.33GPa,泊松比 0.32,干抗剪强度 φ =35~38°,C=1.95MPa,承载能力 250~300kPa;

强膨胀性泥岩为土黄色、灰色,颗粒极细,粘粒含量 46~56%,胶粒含量 13~16%,液限 58~59%,塑限 24~25%,塑性指数 33~35,天然含水量 17~20%,干密度 1.8~1.9g/cm³,抗剪强度 φ : 20~25°,C: 37~50kPa,无荷载膨胀量 12~13%,自由膨胀率 100~110%,膨胀力 0.25~0.39MPa,属强膨胀岩。

中膨胀性泥岩,干密度 1.75~1.85g/cm³,干抗压强度 3.18~10.4MPa,饱和 0.05~0.24MPa,干抗剪强度 φ =35~38°,C=1.7~1.9MPa,饱和 φ =28~30°,C=0.35MPa,无荷载膨胀量 810%,自由膨胀率 68~77%,膨胀力 0.067MPa,属中等膨胀岩,饱和承载力 200~250kPa。

在初期建设时挡墙底部采取了 0.5m 厚的砂砾石换填处理,但换填厚度较小,渠道运行多年渗漏水对沿线跨渠交通桥建筑物基础的影响深度逐年加深,圆弧挡墙底部一定深度的泥岩很可能已经受渗水影响而软化,承载能力降

低。渠道初期投入运行至今已 20 余年,附近渠道边坡部位也曾多次发生因泥岩软化引起滑坡现象。

2.2 圆弧形挡墙稳定和基底应力分析

根据圆弧形挡墙结构尺寸及结构受力进行了以下稳定和应力计算。按照《挡土墙设计规范》SL379—2007 有关内容,挡墙稳定计算对于半重力式挡土墙可取 1 延米作为稳定计算单元,圆弧段挡土墙可按其整体进行计算。对于按圆弧形布置的挡土墙,根据土压力作用原理,水平力垂直于墙背方向,取永久缝伸缩缝隔开的独立墙体作为挡墙稳定计算单元进行计算较为合理。

根据挡墙结构尺寸及墙后填土有关参数,对圆弧挡墙分别按照 1 延米直挡墙和由伸缩缝隔开的独立圆弧形挡墙整体分别进行复核计算。

2.2.1 挡墙应力计算

按照《挡土墙设计规范》SL379-2007 挡土墙基底应力计算公式:

$$P_{\min}^{\max} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M}{W} \quad (1)$$

式中: $P_{\min}^{\max}$ ——挡土墙基底应力的最大值或最小值(kPa);

$\sum G$ ——作用在挡土墙上全部垂直于水平面的荷载(kN);

$\sum M$ ——作用在挡土墙上的全部荷载对水平面平行前墙墙面方向形心轴的力矩之和(kN·m);

A——挡土墙基底面的面积(m²);

W——挡土墙基底面对于基底面平行前墙墙面方向形心轴的截面矩(m³);

由伸缩缝隔开的独立圆弧形挡墙基面通过底板形心轴线距离圆弧挡墙圆心的距离,采用以下计算公式^[2]:

$$y_d = \frac{2\sin a}{3a} \times \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad (2)$$

$$I_{x0} = \frac{1}{4}(a + \sin a \cos a) \times (R^4 - r^4) - \frac{4\sin^2 a}{9a} \times \frac{(R^3 - r^3)^2}{R^2 - r^2} \quad (3)$$

式中: I_{x0} ——挡土墙基底面过形心点轴线的惯性矩(m⁴);

y_d ——挡土墙基底面过形心点轴线距离挡墙面圆心距离(m);

α ——圆弧形挡土墙圆心角 1/2(弧度)取 0.785;

R——圆弧挡墙基底面扇环外半径(m)取 6.5;

r——圆弧挡墙基底面扇环内半径(m)取 1.0;

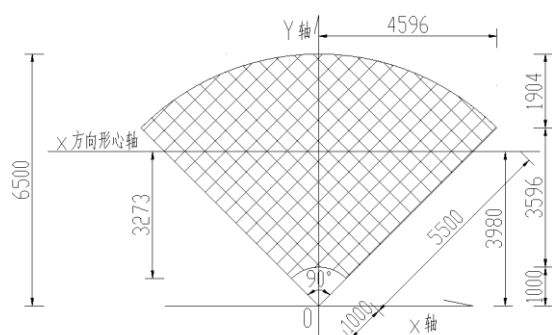


图 1 整体圆弧形挡墙基底面形心

圆弧形挡墙基底面对于基底面平行前墙墙面方向形心轴的截面矩 W 采用公式:

$$W = \frac{I_{x0}}{y_1} \quad (4)$$

式中: y_1 为圆弧挡墙基底面最远点距离形心轴距离, 为 3.273m。

经计算, 圆弧基底面扇环形形心位于圆心 $y_d=3.98m$ 的位置, 挡土墙基底面过形心点轴线的惯性矩 $I_{x0}=59.8m^4$, 截面矩 $W=18.26m^3$ 。稳定复核计算结果见表:

表 1 挡土墙基底应力计算成果表

计算工况	1延米计算单元			伸缩缝隔开的独立墙体整体计算单元			规范要求
	最大应力 (kPa)	最小应力 (kPa)	P_{max}/P_{min}	最大应力 (kPa)	最小应力 (kPa)	P_{max}/P_{min}	P_{max}/P_{min}
完建期	287.6	52.9	5.4	387.6	-92.1	4.21	2.0
正常运行期	240.5	38.7	6.2	316.5	-72.3	4.37	2.0
正常运行遇地震7度	266.4	12.9	20.7	340.5	-96.4	3.53	2.5

根据上表计算结果, 采用 1 延米挡墙作为计算单元时, 各种计算工况下基底应力值均为正值且最大应力不超过 300kPa, 最大/最小应力比值较大, 不满足现行规范要求。按照由伸缩缝隔开的独立挡墙整体计算时, 最小基底应力已经出现负值, 且最大基底应力均超过 300kPa, 说明挡墙已经处于不稳定状态, 并且墙底部最大应力较 1 延米挡墙作为计算单元的应力增加较大。

2.2.2 计算结论分析

根据以上计算结果分析, 当圆弧形挡土墙转弯半径较小时, 挡墙后趾基础面积减小较大, 后趾上部起到压重作用的填土自重相对于相同断面的直挡墙减小较多, 因此, 采用 1 延米直挡墙所计算的应力值和最大/最小应力比值均较圆弧形独立墙体计算值偏小, 说明圆弧形挡墙稳定计算采用 1 延米直挡墙作为计算单元, 计算结果偏于“不安全”, 不能准确反映墙体稳定状态。为准确计算圆弧形挡土墙稳定及应力, 宜选用整体计算方法。

3 加固方案选择

挡墙基础为砂岩和泥岩互层分布, 基础渗透系数为 $10^{-4} \sim 10^{-7}cm/s$, 不具备灌浆加固的地质条件。因此, 根据挡墙变形情况并结合挡墙实际地质条件, 初步拟定了三种改造方案, 分别是: 挡墙拆除重建、桩基础加固和挡墙顶部拉锚加固方案。

3.1 挡墙拆除重建方案

挡墙拆除重建方案是将交通桥桥墩两侧的圆弧形挡土墙及一字挡墙全部拆除, 调整挡墙尺寸及圆弧半径, 重新设计挡墙圆弧半径、挡墙断面结构尺寸及桥墩两侧挡墙

布置形式, 采用整体挡墙作为独立墙体进行计算, 保证挡墙在各种计算工况下稳定计算结果均满足规范要求。在桥墩两侧按照新的挡墙结构及布置形式浇筑混凝土挡土墙。同时, 将新建挡土墙底部基础进行砂砾石换填并夯实。

3.2 桩基础加固方案

为解决现状圆弧挡墙结构基底最大与最小应力比值偏大问题, 该方案是在将圆弧挡墙拆除, 并在挡墙原基础区域布设桩基础, 待桩顶承台浇筑完成后, 在承台顶面恢复原设计圆弧形混凝土挡墙。该方案实施完成后跨渠交通桥各结构布置形式与原结构相同。

3.3 挡墙顶部拉锚加固方案

为限制圆弧挡墙前倾变形, 拉锚加固方案是在圆弧形挡墙墙后 10m 的交通桥引道中心位置埋设混凝土锚墩, 每座圆弧形挡墙通过两组设在墙顶部位的拉杆与锚墩相连接, 每组拉杆末端在安装完成后均施加一定拉应力, 防止挡墙继续前倾变形。

经综合分析, 以上 3 种方案虽然均能解决目前挡墙前倾变形问题, 但由于输水渠道每年运行时间较长, 方案 1 和方案 2 的加固改造施工只能安排在秋末和初春进行。由于本工程地处严寒地区且冬季时间较长, 有效施工期较短, 施工外部条件恶劣, 施工质量不易保证, 挡墙拆除过程会对原有桥梁墩台结构产生损伤, 造成不利影响。同时, 方案 1 和方案 2 施工期相对较长, 施工过程中跨渠交通桥不能正常使用, 对两侧居民的正常生产生活影响相对较大。方案 3 无需拆除原有挡墙结构, 在墙后埋设锚墩后挖除墙顶后侧部分填土, 待拉杆完成安装后即可回填并恢复桥面

交通。改造措施简单，施工便捷难度不大，对原有交通形象较小且投资较省。因此，采用方案3对跨渠交通桥桥头部位挡墙进行改造加固。

4 加固改造实施方案

圆弧形挡墙墙后 10m 交通桥引道中心位置埋设素混凝土锚墩，锚墩尺寸 3.5m×3.5m×3.5m，埋深 5.5m，顶部覆土厚度 2m。在圆弧挡墙两端 1/4 圆弧长度位置的挡

墙上部分别安装 2 组拉杆与锚墩连接，两组拉杆水平夹角 22.5°。两组拉杆均位于挡墙顶 1.2m 位置，按照与水平面下倾 12° 的角度延伸至墙后混凝土锚墩。拉杆在锚墩端采用浇筑时埋入方式固定，另一端通过在墙面钻孔方式将拉杆穿过挡墙墙面进行张拉和固定。每组拉杆采用 3 根直径 25mm 的 HRB400 螺纹钢筋，3 根钢筋呈品字性焊接在一起。

表 2 拉锚加固方案挡土墙应力计算成果表

计算工况	应力计算							规范要求
	前倾力矩 (kN.m)	后倾力矩 (kN.m)	锚筋 合力 (kN)	锚筋抗倾力 矩 (kN.m)	最大应力 (kPa)	最小应力 (kPa)	Pmax/Pmin	Pmax/ Pmin
完建期	6880.4	3105.6	508	3774.8	163.9	163.9	1	2.0
正常运行期	7615.2	4148.5	466	3466.7	146.3	146.3	1	2.0
正常运行遇地震7度	8081.2	4148.5	529	3932.6	150.5	150.5	1	2.5

每座圆弧挡墙 2 组拉杆与锚墩连接，单组拉杆最大拉力为：

$$F = \frac{\frac{529}{2}}{\cos(\frac{22.5}{2})} = 269.7\text{kN} \tag{5}$$

钢筋最大拉应力为：

$$\sigma = \frac{269.7 \times 10^3}{1473} = 183.1\text{N/mm}^2 \tag{6}$$

渠道沿线 5 座跨渠交通桥两侧变形挡墙均进行了拉锚处理。通过 5 年多的运行，交通桥两侧挡墙前倾变形问题得到了很好的解决，桥墩两侧圆弧形挡墙端部的竖向伸缩缝宽度停止持续增大的进程，改造完成后伸缩缝表面封闭的双组份聚硫密封胶修补再未脱落，跨渠交通桥处于安全运行状态。

5 结论分析

5.1 稳定分析

本文工程实例中，渠道沿线跨渠交通桥两侧圆弧形挡墙圆弧半径过小，挡墙后趾顶面积减小较多，回填土压重不足，造成挡墙轻微前倾变形。根据挡墙稳定复核计算情况，采用单延米直挡墙作为计算单元与由伸缩缝隔开的独立墙体整体挡墙作为计算单元相比，基底应力值和最大/最小应力比值均偏小，不能准确反映当前受力实际情况，挡墙设计的稳定计算结果偏于不安全，采用整体计算虽然计算过程相对繁琐，但更能准确反映挡墙受力情况。

5.2 加固方案

根据本工程地质条件、挡墙变形程度和工程实际运行

要求，经综合比选采用了拉锚改造加固方式。本工程挡墙基础条件复杂，为泥岩砂岩互层结构，地基渗透系数小，无法采取常规基础灌浆加固措施，挡墙前倾程度尚不严重，如采取拆除重建方案不但投资大、工期长且施工时段为冬季和春季，施工条件差工程质量不易保证。通过在墙后埋置锚墩并用拉杆将挡墙顶部与锚墩相连，使挡墙停止前倾变形，保证了工程处于安全运行状态。此方案施工简单条件好、难度底且投资较省，对两岸正常交通影响不大。

6 结束语

挡土墙在水利工程建设中被广泛应用于水库枢纽、引水枢纽、水电站及各种渠系建筑物工程中。水闸进出口翼墙、渠道工程中的桥、涵洞、倒虹吸、渡槽等建筑物的进出口连接段，为使建筑物前后水流平顺，挡墙常常采用圆弧形。水利工程设计中对于圆弧形挡墙应合理控制圆弧半径，避免出现实际挡墙失稳变形。对于挡墙加固在进行多方案选择时，拉锚加固方案也是一种可选方案。

【参考文献】

[1]管枫年,薛广瑞,王殿印.水工挡土墙设计[M].北京:中国水利水电出版社,1995:41-42.
[2]索丽生,刘宁.水工设计手册:第 2 版 第 1 卷 基础理论[M].北京:中国水利水电出版社,2011:166.
作者简介：郑爱民（1974.01—），男，籍贯山东平邑，高级工程师，学士学位，主要从事长距离大流量输水明渠及渠系建筑物设计。