



# 塑性混凝土防渗体系 在高水头差船闸施工围堰中的应用

陈明华

(中交四航局第三工程有限公司，广东 湛江 524005)

**摘要：**为研究塑性混凝土防渗体系在高水头差船闸施工土石围堰中应用时，其渗透坡降、应力应变及围堰填筑材料、所处地层渗透系数对防渗墙渗透坡降的影响机理，结合万安二线船闸工程中应用的土石围堰监测结果，对塑性混凝土防渗墙的应力、应变进行有限元计算分析。采用不同的本构模型对土石围堰不同填筑区的填筑料进行模拟，结果表明：塑性防渗墙具有良好地防渗降压作用，所起作用的大小与围堰填筑材料及地层的渗透系数有关。应变监测结果表明，防渗墙在工作阶段主要受压应力作用，压应变值为 $-247.8 \times 10^{-6} \sim 0$ ，处于 $-750 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 允许应变范围，确保了防渗墙在工作阶段的安全可靠。

**关键词：**塑性混凝土；防渗墙；土石围堰；有限元分析；施工监测

中图分类号：U641.5

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)11-0218-07

## Application of plastic concrete anti-seepage system in construction cofferdam of ship lock with high head difference

CHEN Minghua

(The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China)

**Abstract:** To study the mechanism of the influence of the plastic concrete anti-seepage system on the seepage gradient of the anti-seepage wall in the earth-rock cofferdam construction of the ship lock with high head difference, including its seepage gradient, stress, strain, cofferdam filling materials, and permeability coefficient of the formation, this paper calculates and analyzes the stress and strain of the plastic concrete anti-seepage wall by finite element method in combination with the monitoring results of the earth-rock cofferdam applied in the Wan'an second-line ship lock project. The calculation analysis simulates the filling materials in different filling areas of the earth-rock cofferdam with different constitutive models. The results show that the plastic anti-seepage wall plays a good role in seepage prevention and pressure reduction, and its effect is related to the permeability coefficient of the cofferdam filling materials and the formation. The strain monitoring results show that the anti-seepage wall is mainly subjected to compressive stress at the working stage, and the compressive strain value is  $-247.8 \times 10^{-6} \sim 0$ , which falls into the allowable strain range of  $-750 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ , ensuring the safety and reliability of the anti-seepage wall during the working stage.

**Keywords:** plastic concrete; anti-seepage wall; earth-rock cofferdam; finite element analysis; construction monitoring

防渗墙是为实现土石围堰基本挡水功能所采取的主要技术手段，塑性混凝土渗透系数小、弹

性模量低、强度相对黏土而言较高且能承受一定范围的拉应力，在土石围堰应用中起到显著的防

收稿日期：2023-02-06

作者简介：陈明华（1990—），男，硕士，工程师，从事岩土工程及临时结构工程设计、施工管理工作。

渗作用，并较好地适应土石围堰的变形，因此塑性混凝土防渗墙已成为一种新型的防渗技术，在不少围堰工程中得以应用，保证主体工程施工的顺利开展。作为土石围堰防渗系统的重要组成部分，研究塑性混凝土的工程特性具有重要意义，目前在塑性混凝土的试验、数值分析、施工技术方面均有很多研究<sup>[1-5]</sup>，但对塑性混凝土防渗墙进行使用期监测并结合有限元计算分析其渗透坡降、应变及变形规律的研究较少，本文结合工程应用的土石围堰监测结果对塑性混凝土防渗墙的渗透坡降、应力应变进行有限元计算分析。

## 1 工程概况

万安二线船闸工程位于赣江中上游，在江西省

吉安市万安县城上游 2 km 处，枢纽工程为大(I)型工程，工程等别为一等，大坝为 1 级建筑物，为创造干地施工条件，施工临时建设挡水土坝，其建筑物级别为 1 级建筑物，与水电站原土石坝一致，设计洪水重现期为 1 000 a，校核洪水重现期为 1 万 a，其中二期围堰最大挡水高度约 20 m，最高水位与基坑底高程差 50 m。二期围堰采用黏土心墙、塑性混凝土防渗墙、帷幕灌浆的复合防渗体系，高程 96.5 ~ 103.6 m 范围内采用黏土心墙；高程 98.5 m 至全风化、剧烈强风化下限以下 1 m 范围采用厚度为 80 cm 塑性混凝土；全风化、剧烈强风化下限至透水率小于 5 Lu 顶界线以下 1.0 m 范围采用帷幕灌浆防渗结构，设计断面见图 1，塑性混凝土的设计指标见表 1。

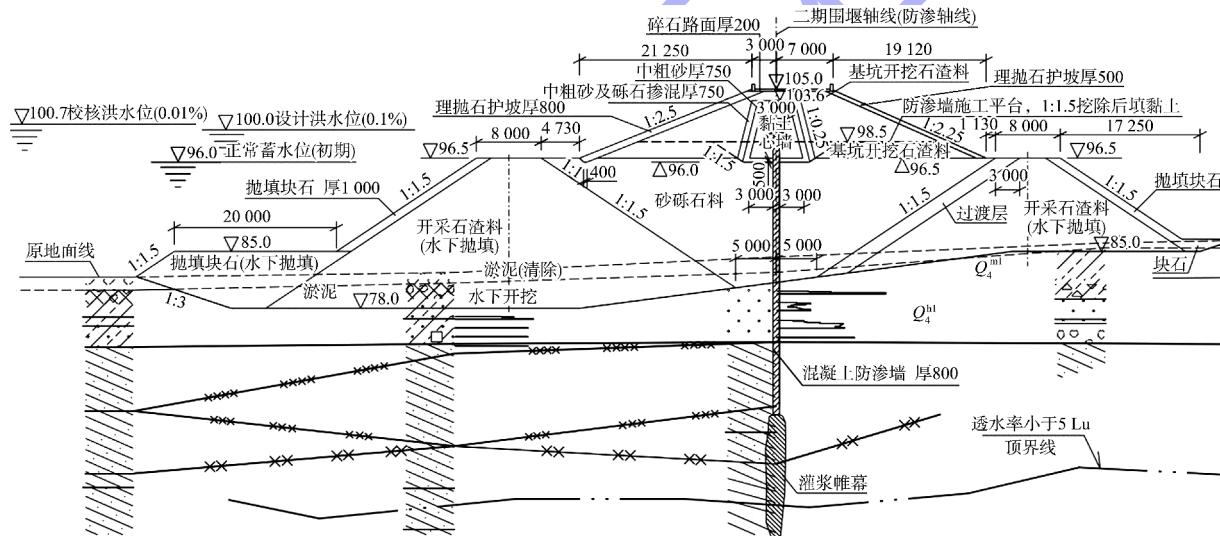


图 1 二期围堰设计断面 (尺寸: mm; 高程: m)

表 1 塑性混凝土指标

塌落度/mm	扩展度/mm	混凝土密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	弹性模量/MPa	28 d 抗压强度/MPa
180~220	340~400	≥2 100	≤1×10 <sup>-7</sup>	≤2 000	3~5

## 2 有限元仿真计算及分析

### 2.1 仿真计算本构模型及参数设置

#### 2.1.1 本构模型的选择

应力、变形计算宜采用非线性弹性应力-应变关系或者弹塑性应力-应变关系，并推荐采用  $E\text{-}B$ ( $E\text{-}\mu$ )、 $K\text{-}G$ 、双屈服面弹塑性模型。非线

性弹性模型以 Duncan( $E\text{-}B$ )、( $E\text{-}\mu$ )模型为代表，在中国土石坝数值计算中，通常认为  $E\text{-}\mu$  模型计算结果更好<sup>[6]</sup>，但  $E\text{-}B$  本构模型可反映堆石体的主要变形特性，且参数测定简单，应用方便，在实际工程中应用较为广泛<sup>[7]</sup>。因此，采用 Duncan( $E\text{-}B$ ) 非线性弹性模型对坝体材料的石渣料、砂砾石料及塑性混凝土材料进行模拟，作为地基的强风化岩和中风化岩则采用 Mohr-Coulomb 模型进行模拟，计算模型中相关参数见表 2、3。

表 2 Duncan 模型计算参数

材料	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/ (cm·s <sup>-1</sup> )	抗剪强度指标				E-B 模型参数				
			C <sub>d</sub> /kPa	φ <sub>d</sub> /(°)	φ <sub>0</sub> /(°)	Δφ/(°)	K	n	R <sub>f</sub>	K <sub>b</sub>	
塑性混凝土	2.15	1.50×10 <sup>-8</sup> ~7.39×10 <sup>-8</sup>	605	38.0	—	—	5 200	0.11	0.78	1 560	0.10
基坑开挖石渣料	2.20	1.00×10 <sup>-2</sup> (水平) 5.00×10 <sup>-3</sup> (竖向)	26	37.2	40.1	2.4	705	0.22	0.82	289	0.22
砂砾石料	2.00	1.00×10 <sup>-2</sup> (水平) 5.00×10 <sup>-3</sup> (竖向)	31	38.1	41.2	2.3	476	0.26	0.82	170	0.27

表 3 Mohr-Coulomb 模型计算参数

材料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比
强风化岩	2.12	1.0×10 <sup>-2</sup>	36.5	17.5	31	0.33
中风化岩(5 Lu 线以上)	2.10	1.0×10 <sup>-3</sup>	150.0	50.0	33	0.30
中风化岩(5 Lu 线以上)	2.10	1.0×10 <sup>-4</sup>	150.0	50.0	33	0.30

以靠近二线船闸基坑处横剖面作为研究断面，建立平面应变计算有限元模型，采用三角形和四边形单元进行网格划分，共有单元数 21 664 个，节点 21 923 个，有限元网格见图 2。有限元模型中垂直于坝轴线从上游到下游规定为 X 坐标正向，

沿大坝高程方向规定为 Z 坐标 (Z 为高程) 正向，坝体上游面和下游面为已知水头边界，上游水位取设计蓄水位 96 m，下游水位取基坑底部高程 48 m，围堰后所有坡面均取为出渗边界。

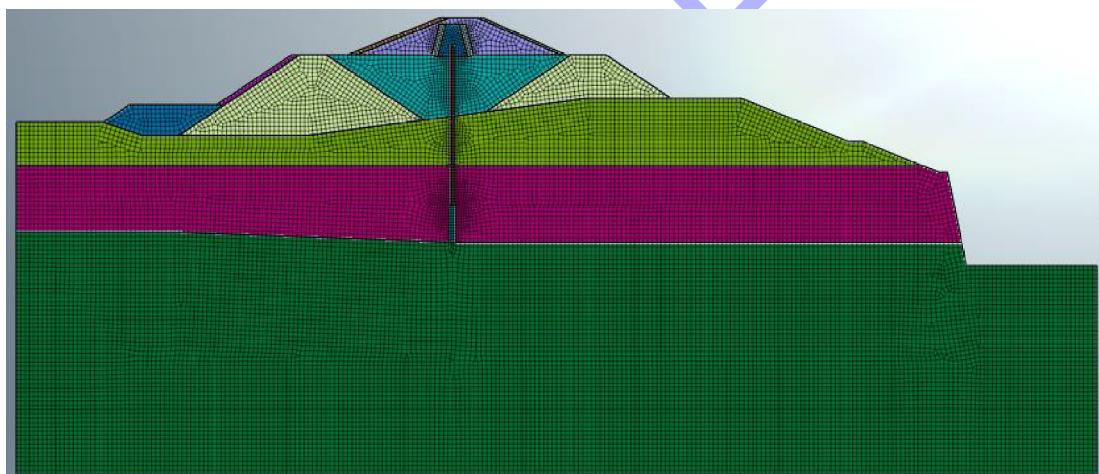


图 2 二期围堰渗流应力分析有限元网格

### 2.1.2 渗透系数的确定

有限元计算的参数宜由试验测定，并结合工程类比选用。临时挡水土坝坝体材料有限元计算所采用的渗透系数值主要参考勘察资料中覆盖层水文地质试验的统计结果、其他类似水库工程的计算分析成果<sup>[8]</sup>以及工程设计手册<sup>[9]</sup>进行取值。用作坝体材料的石渣料、砂砾石料经过分层铺筑及分层碾压施工，其层间竖向渗透系数应比水平渗透系数小，考虑渗透系数的各向异性<sup>[10]</sup>，计算参数见表 2、3。

### 2.2 防渗墙渗透坡降及应力计算

#### 2.2.1 塑性混凝土防渗墙渗透坡降计算结果

塑性混凝土的渗透坡降有限元计算结果以及对应的浸润线见图 3。计算工况为水库处于正常运行期，上游为正常蓄水位 96.00 m。由计算结果可知，防渗墙承受的渗透坡降最大值为 35.27，小于其允许渗透坡降 50.00，该工况下无渗流通过黏土心墙，此处无坡降。围堰及地基的总水头分布见图 4，防渗墙附近水头等值线分布密集，从防渗墙的上游侧到下游侧，总水头从 92.00 m 下降至 68.00 m，

占总水头差的 50%，表明塑性防渗墙起到了很好的防渗、降压作用。围堰内浸润线在背水面边坡的出渗高程为 59.40 m，位于中风化岩内透水率 5 Lu 分

界线上，单宽流量为  $4.32 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。渗流场在防渗墙、防渗帷幕、黏土心墙等防渗结构的作用下得到了有效控制，渗漏量较小。

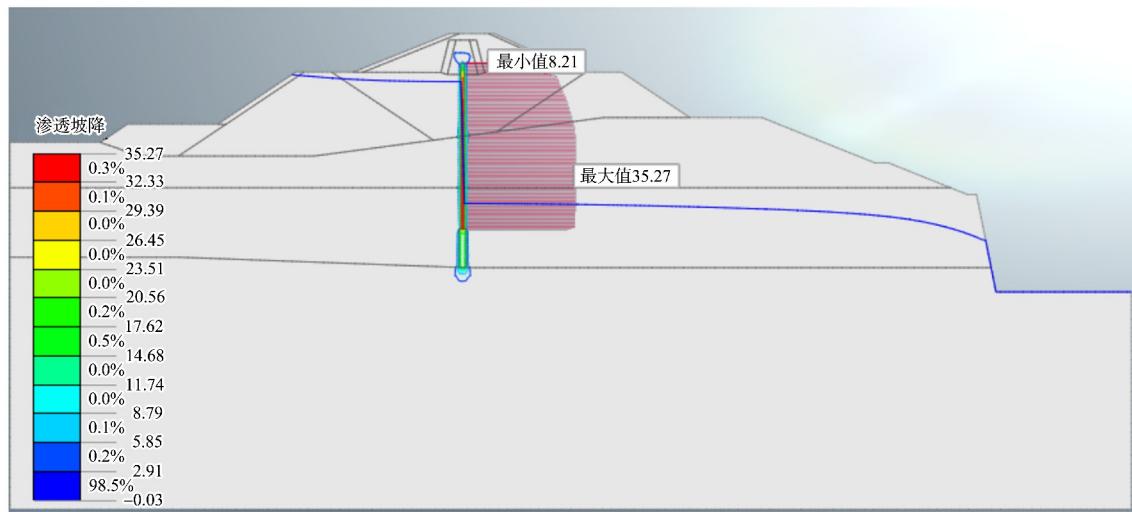


图 3 塑性混凝土防渗墙渗透坡降

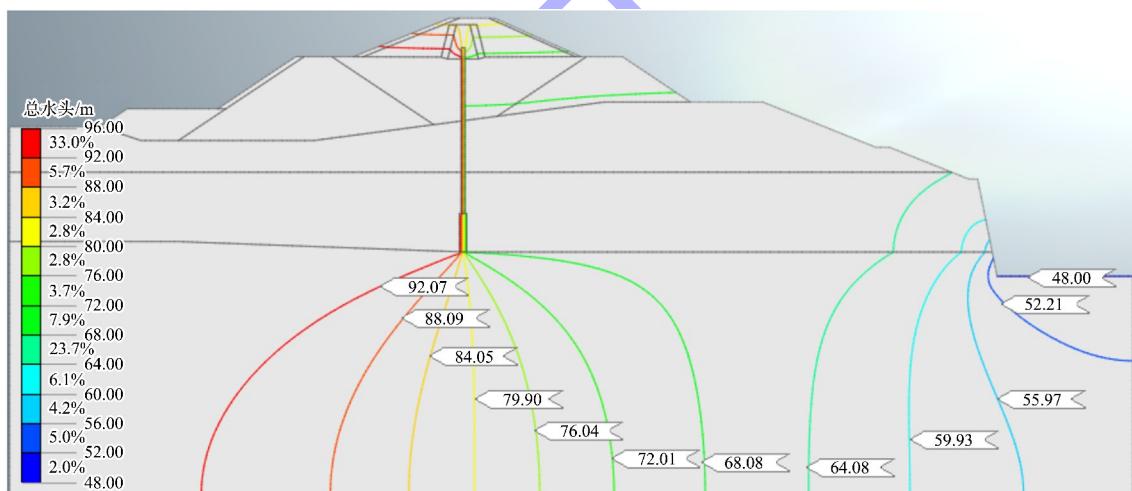


图 4 围堰及地基的渗透坡降

## 2.2.2 坎壳料及地层渗透系数对防渗墙渗透坡降的影响

为分析塑性混凝土的渗透系数对其渗透坡降的影响，在计算模型中对塑性混凝土渗透系数设置为  $1.50 \times 10^{-8}$  和  $7.39 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ，结果表明：塑性混凝土渗透系数在实测数值  $1.50 \times 10^{-8} \sim 7.39 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  范围内变化时，塑性混凝土防渗墙的渗透坡降变化较小。在石渣料、砂砾石料、强风化岩、中风化岩的渗透系数经验数值范围内，通过调整其渗透系数分别进行计算，结果表明：用作

围堰填筑料的石渣料、砂砾石料的渗透系数减小导致塑性混凝土防渗墙的渗透坡降增大，强风化岩、中风化岩的渗透系数增大使得塑性混凝土防渗墙的渗透坡降计算结果增大。分析其原因可能是石渣料、砂砾石料渗透系数的减小导致渗流在塑性混凝土防渗墙前的入渗角发生变化，在防渗墙中渗流路径增大进而导致水头损失增大。在渗透模拟计算中定义了上游的水位和下游的渗出面，渗流的总水头损失已确定，计算模型中强风化岩、中风化岩的渗透系数相对实际偏小，经拉普拉斯方

程计算后, 中强风化岩、中风化岩渗流段所产生的水头损失偏大, 导致在防渗墙中的水头损失偏小。因此, 防渗墙所起作用的大小与其所处的坝壳料及地层的渗透系数有较大关系, 当满足“前堵后导”的规律时, 可提升防渗墙的截水作用。

### 2.2.3 塑性混凝土防渗墙应力

塑性混凝土防渗墙小主应力计算结果见图 5, 防渗墙在 48 m 计算水头差作用下的小主应力为

-210 kPa, 小于设计抗压强度 300 kPa。防渗墙的最大压应力出现位置接近于围堰与强风化岩接触面处, 进入强风化岩后防渗墙的压力急剧减小。表明在实际施工过程中, 需关注防渗墙在围堰底、岩面处的压力, 因为防渗墙在此部位受到的上游水压力及围堰的土压力相对较大, 受力情况复杂, 可埋设应变计对防渗墙的应变进行监测。

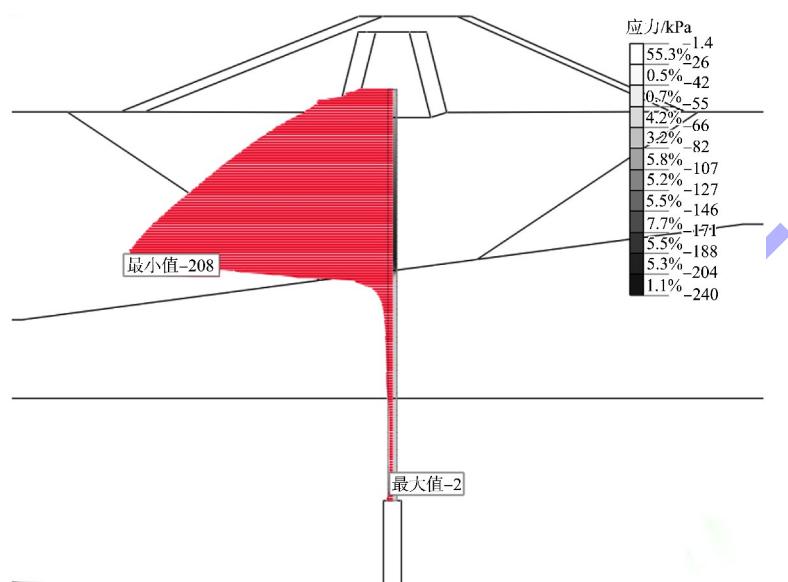


图 5 塑性混凝土小主应力

## 3 围堰应变及位移监测

### 3.1 应变结果

在围堰相应断面的塑性混凝土防渗墙中 3 个不同高程、上下游两侧共埋设 6 支应变计, 其中  $S_{01}$  和  $S_{02}$  埋设在高程 83.00 m (防渗墙中部),  $S_{03}$  和  $S_{04}$  埋设在高程 89.00 m,  $S_{05}$  和  $S_{06}$  埋设在高程 95.00 m。塑性混凝土防渗墙应变监测结果见图 6, 塑性混凝土防渗墙应变有限元分析结果见图 7。从观测过程线可以看出, 处于同一高程的混凝土应变随时间的发展趋势一致, 防渗墙的压应变在施工完成后呈增大趋势, 前 12 个月压应变增加较快, 随后增长速度减缓。增长速度最快及应变计最大测值所处位置均为防渗墙中部高程 83.00 m 处, 最大增长速率为  $12.8 \times 10^{-6}/\text{月}$ , 最大压应变为  $-247.8 \times 10^{-6}$ , 应变值在塑性混凝土的允许压应变范围内 ( $-750 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ ), 防渗墙应变状

态正常, 表明混凝土防渗墙处于安全状态。压应变增加的原因可能是塑性混凝土施工完成后继续填筑防渗墙上部的黏土心墙, 黏土心墙及防渗墙两侧砂砾石填料沉降对防渗墙产生了负摩阻力作用, 在沉降稳定后, 防渗墙压应变的变化趋于平缓。浸水饱和后防渗墙对其弹性模量也可能产生一定影响, 其压缩性趋于稳定后应变变化亦趋于平缓。

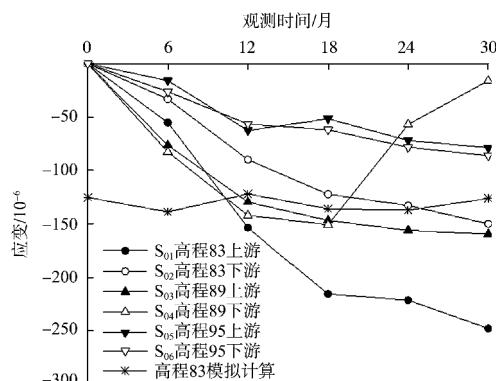


图 6 塑性混凝土防渗墙应变监测结果

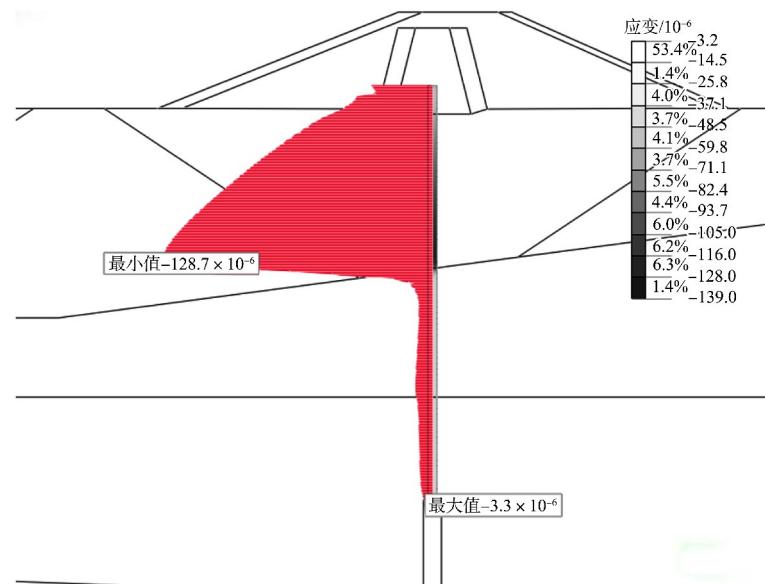


图 7 塑性混凝土防渗墙应变有限元分析结果

### 3.2 位移结果分析

围堰位移水平及竖向监测结果见图 8, 围堰竖向位移有限元分析结果见图 9。围堰竖向沉降变化曲线显示, 在填筑完成后 0~6 个月竖向沉降速率为 10 mm/月, 填筑完成后 6~9 个月沉降速率为 73 mm/月, 可能是进入雨季降雨量增加所致。在填筑完成 9 个月后, 沉降变形发展缓慢, 判断其已进入蠕变阶段, 蠕变沉降量为 30 mm。仿真分析围堰填筑完成后的沉降为 283 mm, 竖向位移监测与仿真分析的围堰弹性变形结果相符。图 6 防渗墙应变监测结果显示防渗墙在施工完成 12 个月后应变发展趋于平缓, 最终应变值约为围堰坚

向位移的 50%, 因围堰填筑完成比防渗墙施工完成晚 2 个月, 防渗墙的应变发展平缓阶段即为围堰主体的竖向变形蠕变阶段。

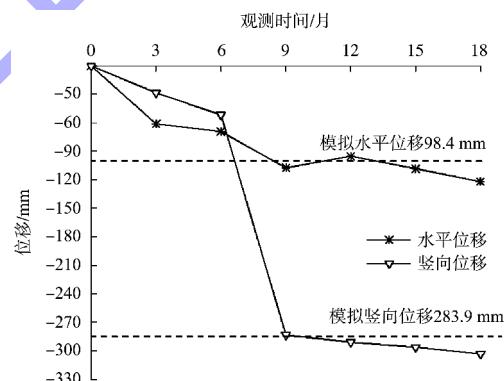


图 8 二期围堰位移水平及竖向监测结果

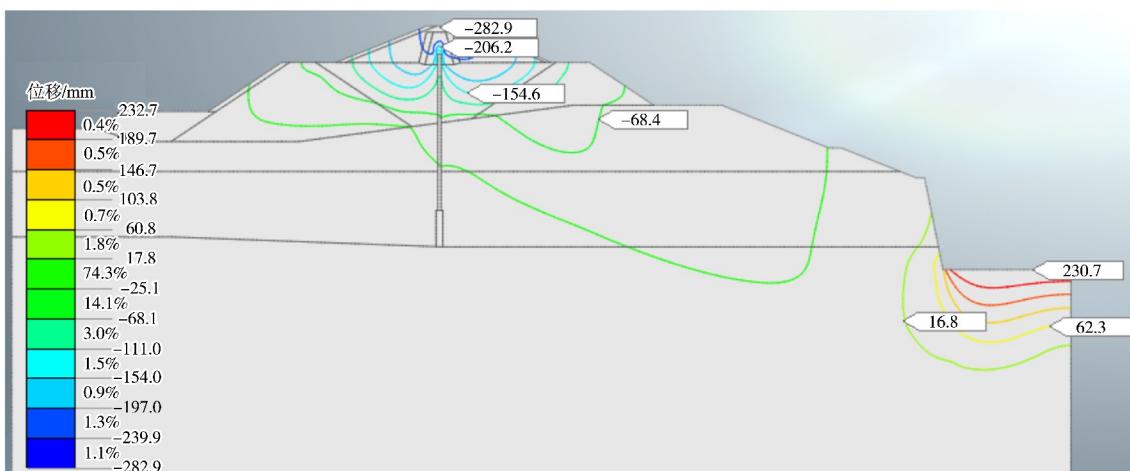


图 9 二期围堰竖向位移有限元分析结果

### 3.3 渗流渗出点观测分析

施工前通过仿真分析计算渗流在基坑内的出渗位置，在渗流出渗点高程附近设置排水管，基坑内渗流出渗点实景见图 10。水迹顶端所在高程为 53.50 m，比计算的出渗点高程 59.40 m 低 5.90 m。可能是强风化砂岩及透水率 5 Lu 分界线以上的中风化砂岩实际的渗透系数与计算模型中所设置的渗透系数有差异。在围堰自身重力作用下，岩体中的裂隙可能有一定程度的闭合，导致其渗透系数降低，从而使得渗流出渗点比仿真计算结果低，降低渗流出渗高程有利于围堰的稳定。



图 10 渗流溢出点实景

## 4 结论

1) 对高水头差土石围堰中应用塑性混凝土防渗体系的性能进行了有限元仿真分析。计算结果表明渗流通过塑性混凝土后水头损失达 24 m，占围堰前后总水头差的 50%，对围堰挡水防渗的功能发挥起到了关键作用。塑性防渗墙防渗性能的发挥程度与所处的坝壳料及地层的渗透系数有关，当满足“前堵后导”的规律时，防渗墙能更好地发挥截水作用。

2) 对土石围堰塑性混凝土防渗墙的应变进行监测，应变值在塑性混凝土的允许压应变范围内 ( $-750 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ )，防渗墙应变状态正常，表面混凝土防渗墙处于安全状态。防渗墙压应变的发展规律与围堰竖向沉降的发展规律一致，防渗墙的应变发展平缓阶段为围堰主体的竖向变形

蠕变阶段，因此可通过提高压实标准，严格控制压实度等措施来减小围堰蠕变沉降量，对控制塑性混凝土防渗墙的压应变具有重要意义。

3) 土石围堰塑性混凝土防渗墙的应变监测为高水头差施工挡水围堰防渗墙的安全监测积累了经验，试测结果表明：应变计适用于土石围堰中塑性混凝土防渗墙的应变监测，但塑性混凝土的应变受到土石围堰沉降的影响，在填筑高度较大的土石围堰防渗墙中使用时建议选用大量程的应变计。

### 参考文献：

- [1] 史迅. 塑性混凝土防渗墙在三峡二期围堰中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5): 47-49, 70.
- [2] 熊欢, 王清友, 高希章, 等. 沙湾水电站一期围堰塑性混凝土防渗墙应力变形分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 197-203, 189.
- [3] 程金标, 王瑞骏, 郭兰春, 等. 塑性混凝土心墙坝应力变形特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 189-193.
- [4] 陆嘉伟, 张继勋, 任旭华. 深厚覆盖层塑性混凝土心墙坝应力变形特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 19-24.
- [5] 李林恩, 鲁舟. 高水头差船闸围堰防渗墙塑性混凝土试验研究[J]. 水运工程, 2023(1): 180-185, 190.
- [6] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 李炎隆. 混凝土面板堆石坝应力变形数值计算方法及应用研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [8] 谭健波. 漢河某水利枢纽工程防渗墙塑性混凝土配合比设计[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S2): 108-110.
- [9] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] 黄河勘测规划设计研究院有限公司. 碾压式土石坝设计规范: SL 274—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

(本文编辑 赵娟)