

# 如何用 Autobank7.7 进行防渗墙应力变形分析

## 1 简述

为了降低土石坝浸润线，增强坝体渗透稳定性和坝坡稳定性，采用混凝土防渗墙是一种常用的加固措施。设计人员对防渗墙的应力状态比较关心，需要在应力变形分析的基础上对防渗墙进行强度设计，同时需要了解坝体中浇筑防渗墙以后的渗流状态和应力状态。由于防渗墙施工和受力状态的特殊性，其应力变形分析需要专用的计算工具和计算方法。为了解决这一问题，Autobank7.7 版增加了几项功能，可以对土石坝防渗墙进行合理的应力变形分析。7.7 版新增功能包括：

（1）多工况渗流计算中，可以进行分区渗透材料的置换，用于模拟防渗墙部位由渗透材料转变为防渗材料。

（2）应力变形计算中，可以进行分区应力变形材料的置换，用于模拟防渗墙部位由土质材料转变为混凝土材料。

（3）增加了接触面单元，接触面材料，能够自动生成接触面单元。用于模拟土-混凝土界面的错动位移。

（4）后处理模块可以对部分材料分区进行等值线、变形图绘制，用于关注重点部位的结果显示（例如仅显示防渗墙的变形）。

（5）后处理模块可以显示各个加载步荷载增量的分布情况，并给出荷载增量的合力数值。用于了解断面上荷载分布，帮助解读计算结果。

## 2 防渗墙应力变形定性分析

防渗墙从无到有、到受力,经历以下几个典型阶段：

0 防渗墙浇筑前的初始状态：库水位为施工水位，尚无防渗墙；

1 防渗墙浇筑后：库水位为施工水位，但墙前-墙后水位差尚未形成，防渗墙仅自重应力，无弯曲应力；

2 防渗墙浇筑后：库水位为施工水位，墙前-墙后水位差形成，防渗墙出现弯曲应力和变形；

3 防渗墙浇筑后：库水位上升到正常水位，墙前-墙后水位差进一步增加，防渗墙弯曲应

力和变形也进一步增加；

结构的应力状态与其施工方法、和周围材料的相互作用、荷载的大小及其施加方式有关。防渗墙施工一般有成槽（泥浆护壁）、钢筋笼入槽、混凝土灌注、灌浆填充等主要步骤。防渗墙施工时，周围土体一般已经固结完成不再发生沉降，所以防渗墙不承担周围土体的自重荷载，同时墙前、墙后的土压力也是基本平衡的。在坝体渗流状态改变前，墙前、墙后的水位基本相同，水压力也是平衡的，防渗墙所受荷载就是它自身的重力，一般不会出现弯曲应力。

在应力变形分析时，不能对坝体和防渗墙同时施加重力荷载，不然防渗墙因为刚度较大将承担周围土体的部分重量，造成计算结果失真。根本原因是防渗墙和坝体的“龄期”不一样，是坝体固结沉降完成后浇筑的，在计算中一定要考虑这一特殊性。

当防渗墙混凝土固化而发挥防渗作用后，坝体的渗流状态随之发生改变，墙前浸润线有所抬高、水压力增加，墙后浸润线降低、水压力减小，造成防渗墙前后面的水压力不平衡而发生弯曲变形。同时墙前土体有所上浮，墙后土体下沉。墙前、墙后土体的变形将带动防渗墙发生变形，这种变形也可能是弯曲变形。所以，渗流状态变化是防渗墙产生弯曲应力的主要原因，进行防渗墙应力变形分析必须和渗流分析相结合。

### 3 防渗墙应力变形分析步骤

#### 3.1 渗流多工况分析

计算渗流工况：

工况 0：防渗墙施工前的渗流场——取库水位为施工期水位，防渗墙尚未浇筑，防渗墙处为透水的土体材料；

工况 1：施工后渗流场——取库水位为施工期水位，但防渗墙已经发挥作用，防渗墙处土体置换为防渗材料(混凝土)；

工况 2：施工后库水位为正常水位——取库水位为正常蓄水位，防渗墙发挥作用；

### 3.2 坝体应力变形分析

模拟防渗墙浇筑前、后的实际顺序，从 0 开始逐步加载，如下表：

加载步	说明	防渗墙位置的材料	对应渗流工况	位移修正
0	防渗墙尚未施工，作为计算起点，不计算位移，但计算应力	土体	工况 0	所有位移修正为 0
1	防渗墙施工结束，但渗流场尚未发生变化	混凝土	工况 0	不需要修正
2	防渗墙发挥作用，渗流场改变	混凝土	工况 1	不需要修正
3	库水位变化，渗流场进一步改变	混凝土	工况 2	不需要修正

## 4 软件操作

### 4.1 建立计算模型，填写材料表

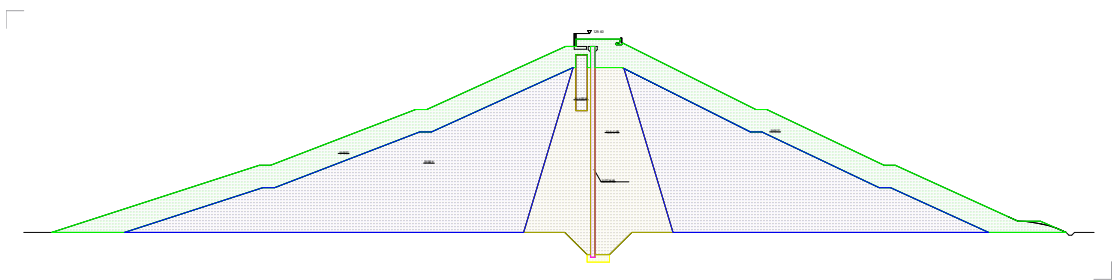
土体材料建议使用邓肯-张非线性弹性模型，混凝土材料可以采用弹性模型，另需要设置接触面材料参数。

参数	材料名称/值	注
> 邓肯-张(Eb)	砂砾石坝壳	RGB=[0,255,0]
> 邓肯-张(Eb)	沙壤土	RGB=[0,0,255]
> 弹性材料	防渗墙c25	RGB=[255,0,255]
> 薄层接触面	接触面	RGB=[170,0,0]
> 邓肯-张(Eb)	心墙	RGB=[255,255,0]
> 邓肯-张(Eb)	粘土	RGB=[128,0,0]
> 弹性材料	防渗墙底座	RGB=[255,255,0]
> 弹性材料	防渗墙置换前土体	RGB=[255,0,127]

本文应力变形参数采用软件的默认取值。渗透系数取值如下：

渗透系数材料参数表

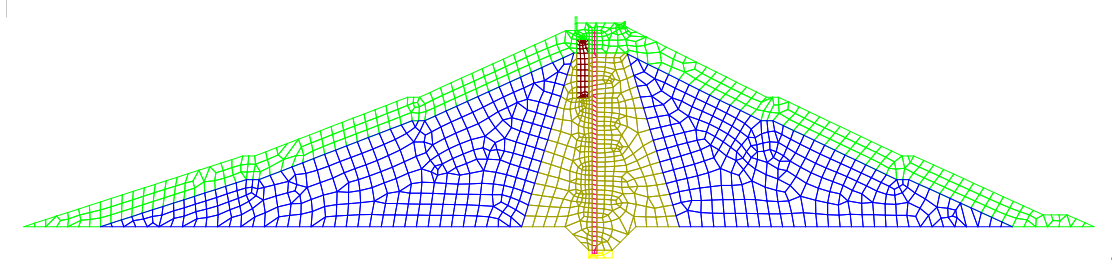
材料名	Kx (m/s)	Ky (m/s)
砂砾石坝壳	0.001	0.001
沙壤土坝壳	1e-05	1e-05
c25 防渗墙	0	0
粘土心墙	1e-06	1e-06
粘土套井	1e-05	1e-05
底座	1e-06	1e-06
防渗墙置换前土体	1e-06	1e-06



本算例是在粘土心墙内浇筑混凝土防渗墙，在进行分区时，应该对防渗墙单独分区，防渗墙的材料设置为和粘土心墙变形模量一致的“置换前土体”，因为材料置换不能改变材料类型（弹性模型不能置换为邓肯张模型，反之亦然），所以“置换前土体”应该为和混凝土一致的弹性材料，但是弹模按照土体进行取值。

#### 4.2 划分网格，并生成接触面单元

设置适当的单元边长，划分网格如下：



生成接触面单元，在“计算模型”菜单下，按“定义接触面”，出现类似于下图的界面，按照下图操作：

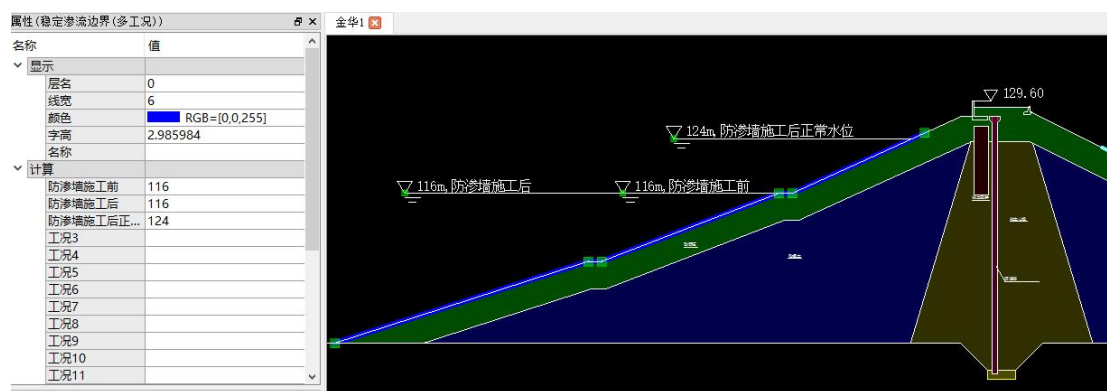


完成上图操作后，可见接触面位置已经生成接触面单元：



### 4.3 施加渗流边界条件

设防渗墙施工时库水位为 116m，施工后库水位逐渐上升到正常水位为 124m，按“渗流计算”菜单下的“稳定渗流边界(多工况)”，设置如前文 3.1 所述的三种工况，绘制边界线后如下图。下游按照一般的出逸边界计算。



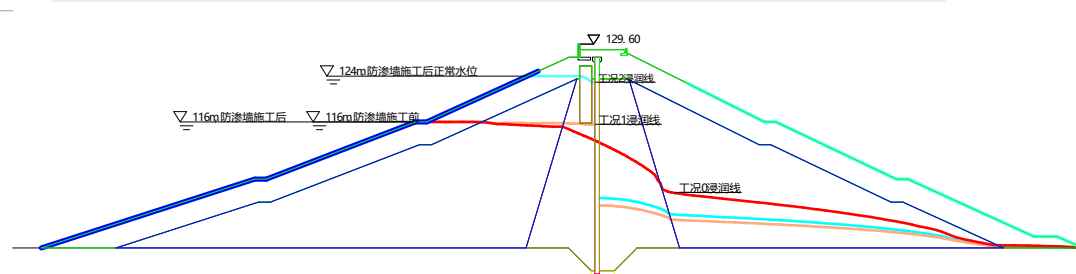
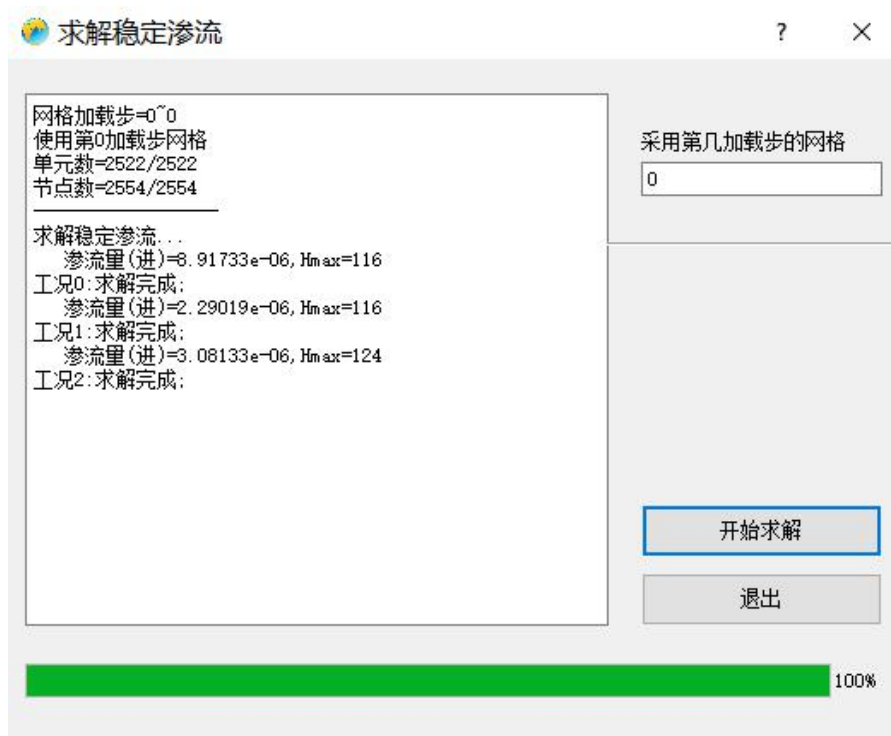
### 4.4 设置渗流材料置换

按“渗流计算”菜单下的“渗透材料置换”，



置换后可见工况 0 时的“防渗墙置换前土体”，从工况 1 开始转为“c25 防渗墙”。按“OK”保存。

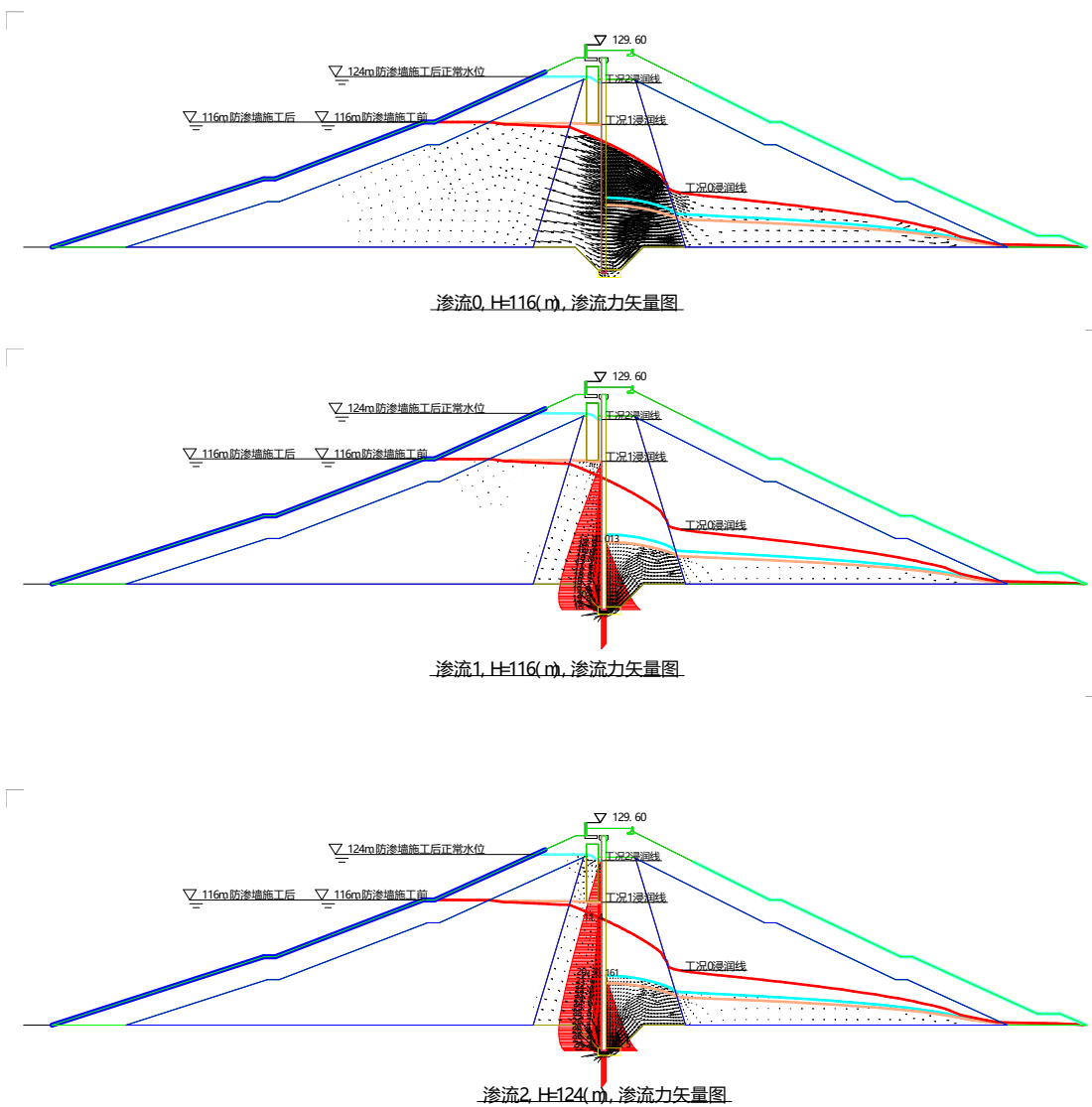
#### 4.5 求解多工况渗流、查看浸润线



可见工况 0 浸润线在防渗墙处连续，防渗墙尚未发挥作用。工况 1、工况 2 浸润线在防渗墙处中断形成水位差，防渗墙已经发挥作用（本例假定防渗墙为不透水材料，如果假定为渗透系数很小的渗透材料，计算结果也是类似的，不同的

是几种工况的浸润线在防渗墙中保持连续)。

如果觉得必要,可以在渗流后处理界面中查看各个工况下渗流力荷载的分布情况。对于本例,三种渗流工况的渗流力分布图如下。工况 0 的渗流力全部为渗透材料中的体积力(图中黑色箭头,在心墙处较大,坝壳处较小)。工况 1 防渗墙已经发挥作用,除了体积力以外,防渗墙上出现面力(图中红色部分);工况 2 和工况 1 情况类似。



至此渗流分析已经完成, 以下进行应力变形分析。

#### 4.6 应力变形分析

由于应力变形需要的加载步数量和渗流分析所需工况数量未必相同(本例渗



流工况数为 3 个，应力变形加载步为 4 步），故需要单独进行材料置换设置，根据前文 3.2 表格，在第 0 加载步为防渗墙尚未施工的初始状态，第 1 加载步模拟防渗墙施工（也就是材料置换），但渗流状态尚未改变，第 2 加载步渗流状态变化，第 3 加载步模拟库水位变化。进行如下操作：

- 1 进入应力变形分析界面；
- 2 按“应力变形”菜单下的“应力材料置换”，从第 1 加载步将“防渗墙置换前土体”置换成“c25 防渗墙”；



- 3 按“应力变形”菜单下的“求解应力变形”，添加 4 个加载步，并设置表中内容如下表，按“求解”等待计算完成。



求解完成后，程序输出各个加载步的荷载增量信息,其中  $F_x, F_y$  分别为水平和竖直方向合力， $F_y$  向上为正，解释如下：

LOADID=0,荷载合力  $F_x=2502.99\text{KN}, F_y=-45599.9\text{KN}$  (防渗墙施工前渗流力和坝体自重)



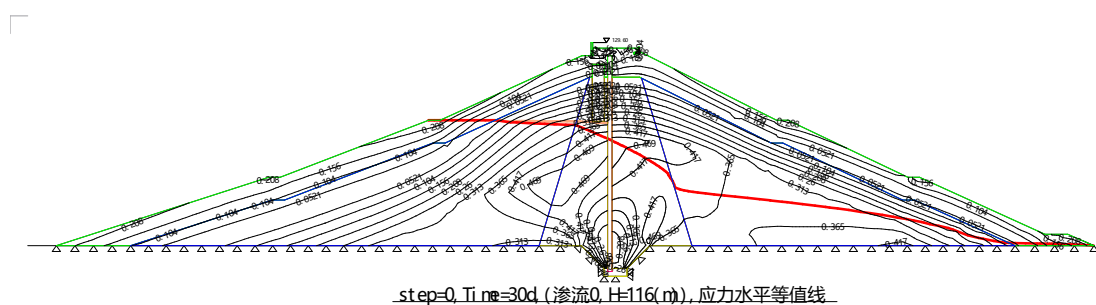
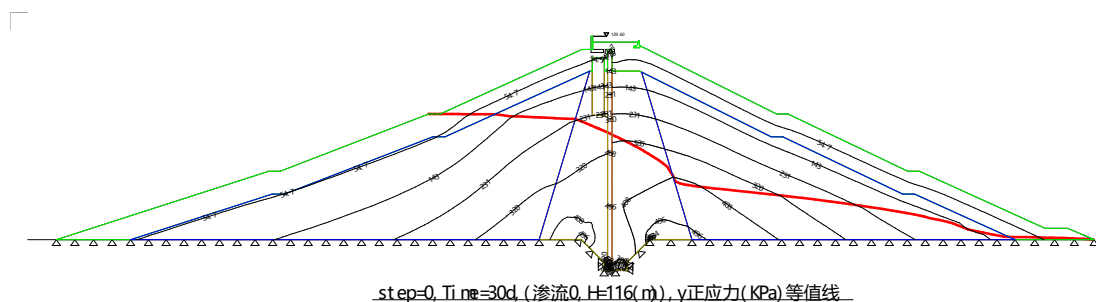
LOADID=1,荷载合力  $F_x=0\text{KN}$ ,  $F_y=-120.96\text{KN}$  (混凝土自重比原土体增加 120.96KN)

LOADID=2,荷载合力  $F_x=382.718\text{KN}$ ,  $F_y=-2057\text{KN}$  (浸润线降低造成坝体有效重量增加)

LOADID=3,荷载合力  $F_x=2288.64\text{KN}$ ,  $F_y=2190.97\text{KN}$  (浸润线上升造成渗流作用增加、坝体有效重量减小)

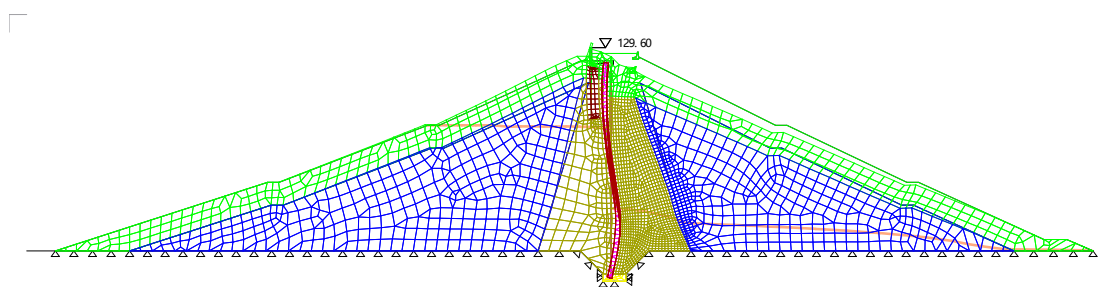
#### 4.7 查看应力变形分析结果

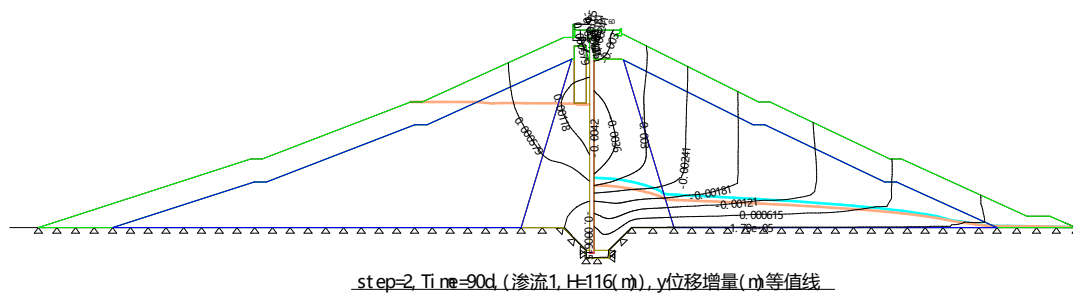
第 0 加载步：初始状态，防渗墙尚未施工，无位移，仅列出自重应力和应力水平。



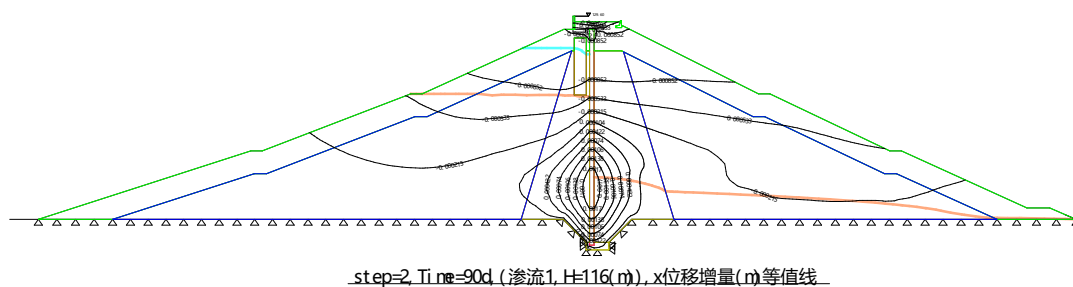
第 1 加载步：防渗墙已经存在，渗流状态尚未改变，坝体受力状态变化很小，略去计算结果；

第 2 加载步：防渗墙已经存在，渗流状态改变，坝体和防渗墙出现较大变形和应力，主要计算结果如下；

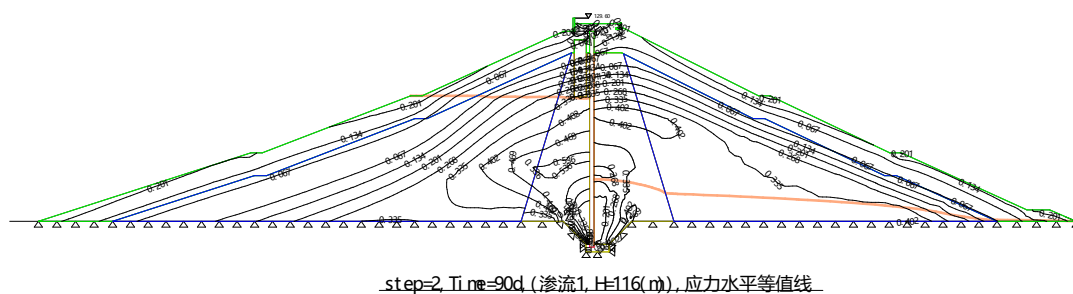




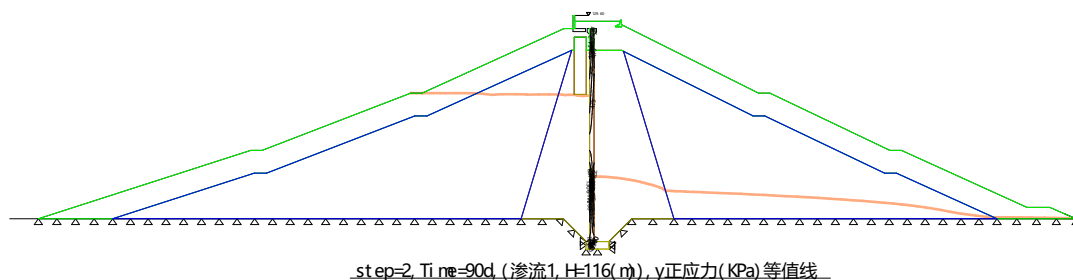
可见防渗墙上游坝体有所抬升（最大值 1.1mm），下游坝体有所下沉（最大值 3.6mm）。



可见最大水平位移 1.7mm，位于防渗墙下部约坝高 1/5 处

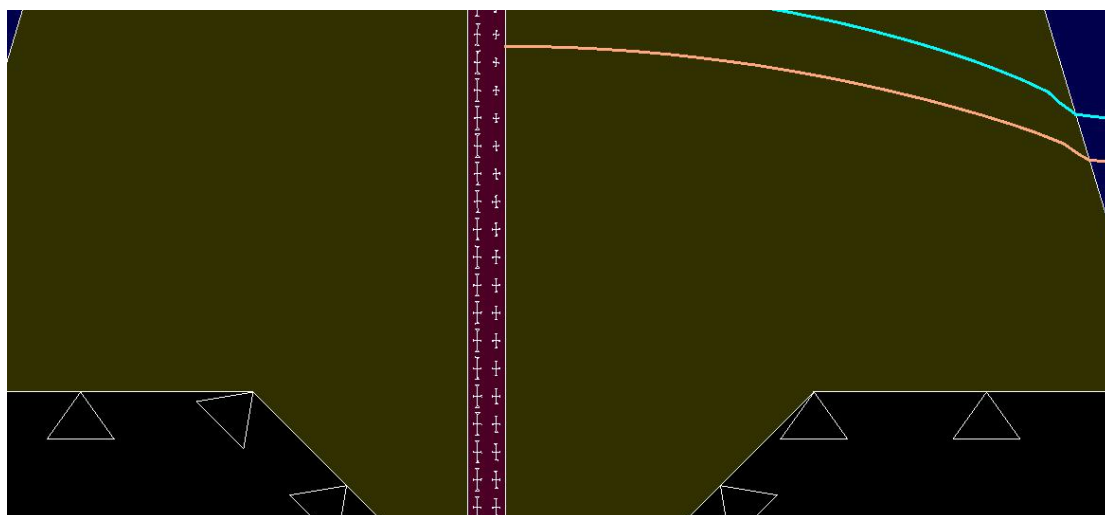


可见应力水平最大值位于防渗墙上游侧底部，此处防渗墙向下游移动，土体围压减小，剪应力增加，造成应力水平上升。

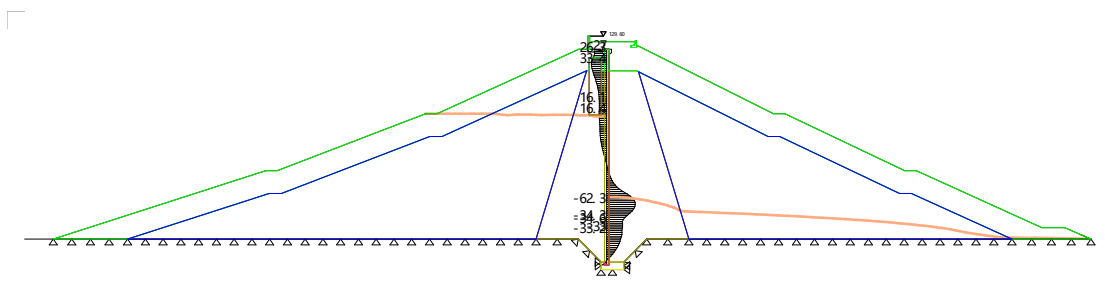




防渗墙底部竖向应力等值线(KPa)，未出现拉应力

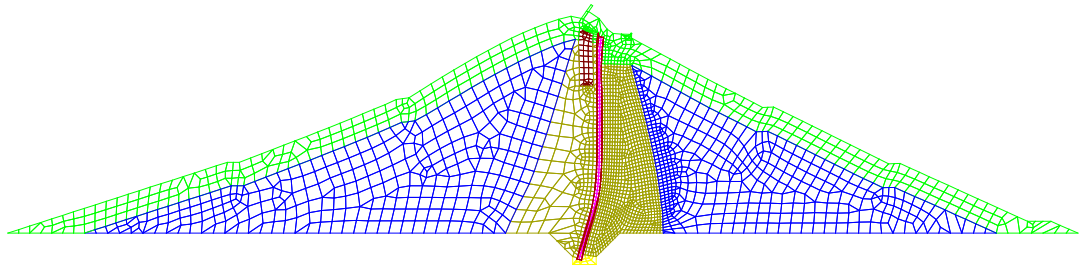


防渗墙底部主应力矢量图，防渗墙处于偏心受压状态，未出现拉应力

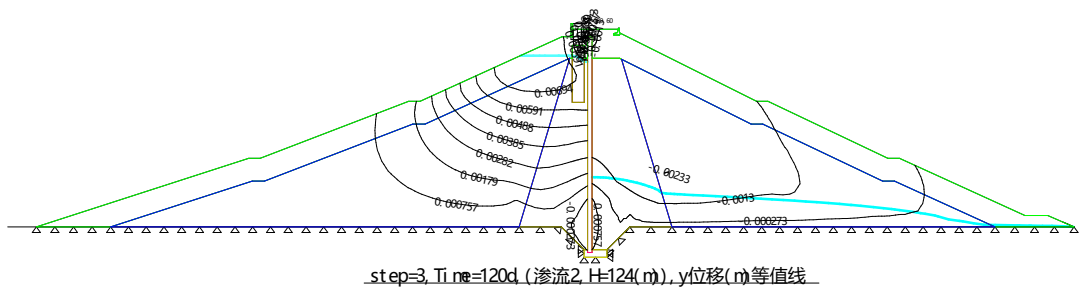


防渗墙弯矩图 (KN-m)

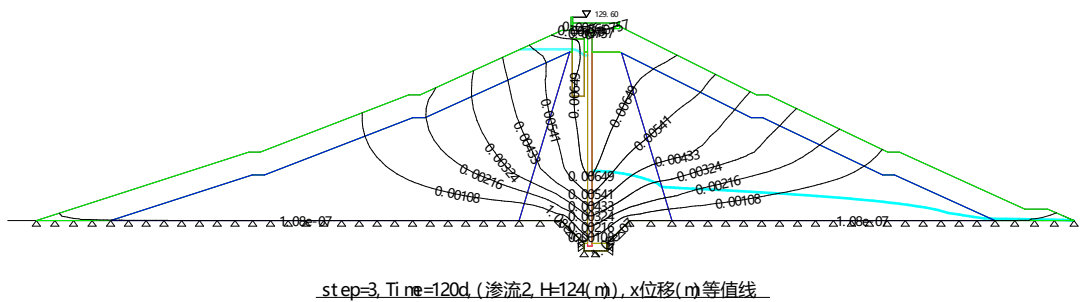
第 3 加载步：库水位上升到正常水位，主要计算结果如下；



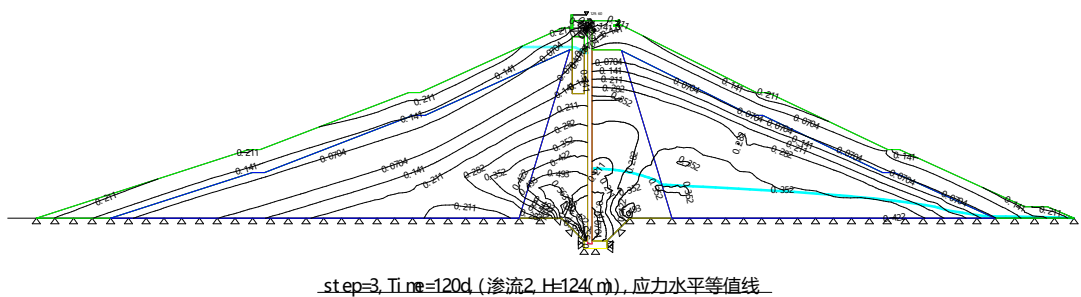
坝体变形图（500 倍）



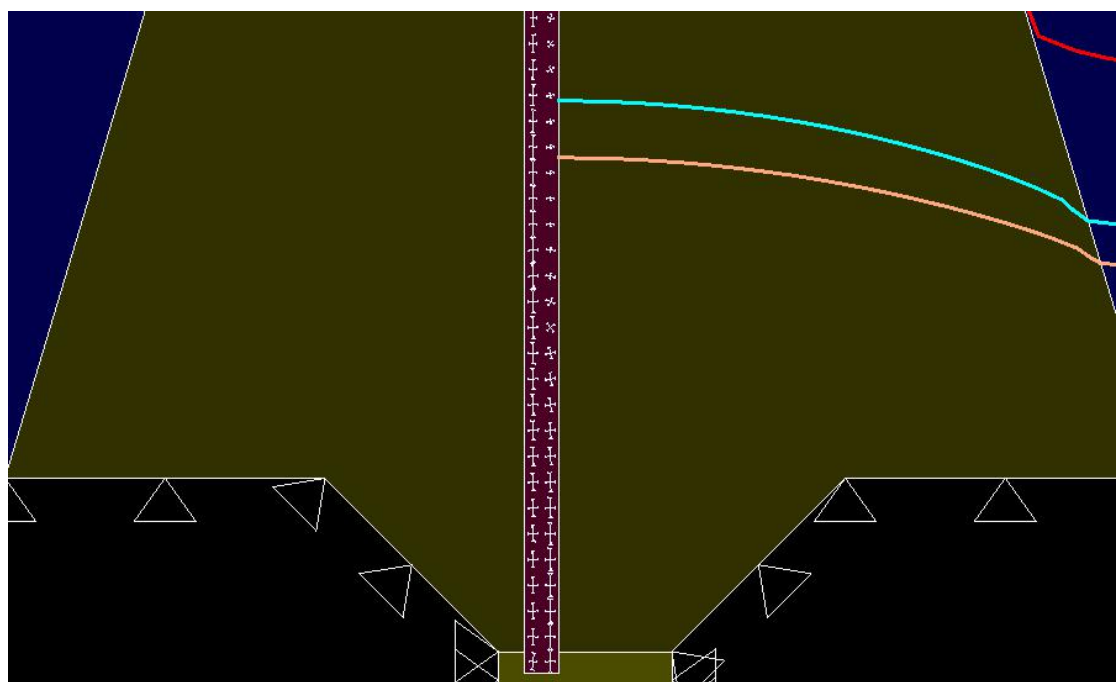
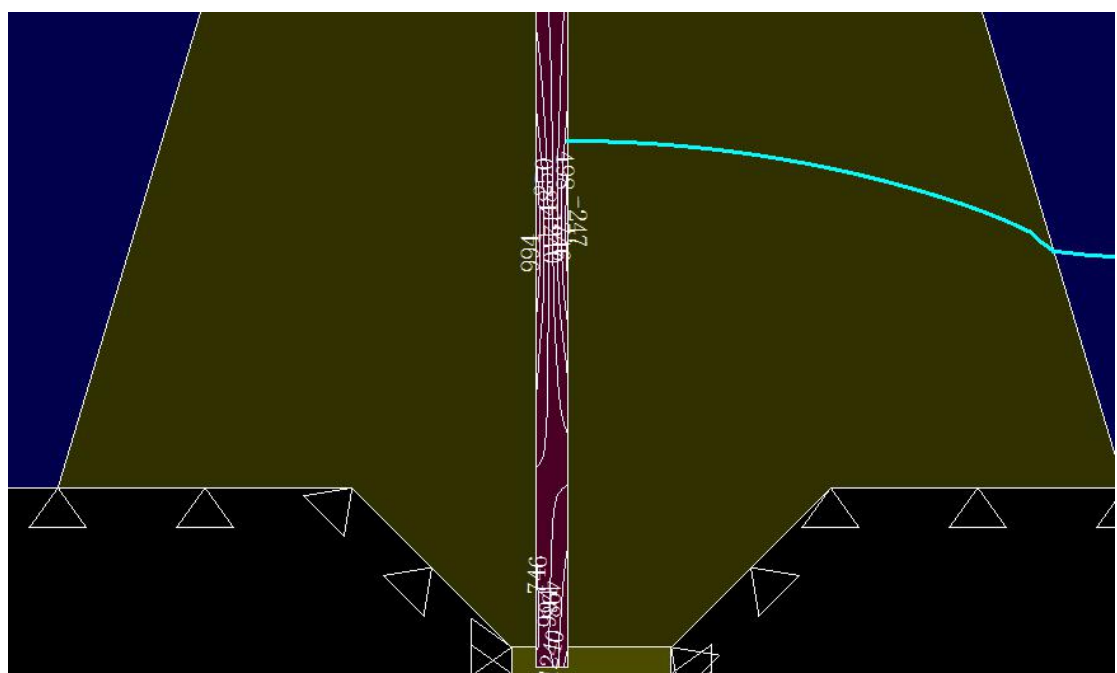
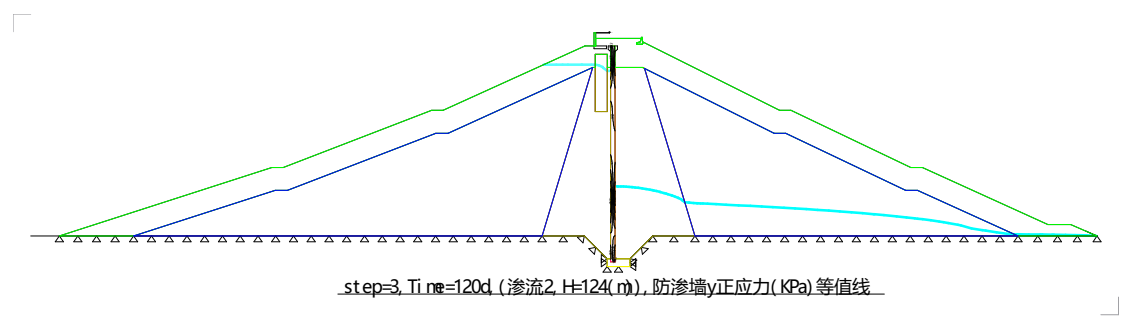
可见防渗墙上游坝体有所抬升（最大值 6.9mm），下游坝体有所下沉（最大值 2.3mm）。

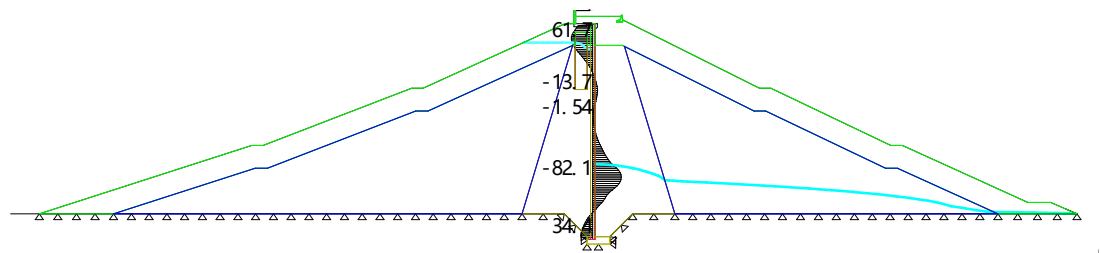


可见最大水平 8.6mm，位于防渗墙顶部



可见应力水平最大值位于防渗墙上游侧底部，此处防渗墙向下游移动，土体围压减小，剪应力增加，造成应力水平上升。





防渗墙弯矩图 (KN-m)

## 5 小结

本文以浙江金华地区某心墙坝加固工程为例，给出了加固工程中防渗墙的受力特点分析，计算方法、软件操作步骤和主要计算结果。要点包括：

- 渗透材料置换、应力变形材料置换；
- 接触面单元形成；
- 渗流多工况设置；
- 应力变形加载步和渗流工况的对应；

关于文中未尽事项或疑问，欢迎与软件开发者联系：

13809028397, zgqin@hhu.edu.cn