

## 新疆某面板堆石坝三维有限元数值分析

李瑞

新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**为了解面板堆石坝在建设和运行阶段坝体的应力水平情况,文章通过三维有限元计算软件,采用邓肯-张  $E-\mu$  模型对某面板堆石坝进行了竣工期和满蓄期两种工况下的三维有限元分析。得出了坝体砂砾石料、坝基、库盘和分离式面板在两种工况下的位移、应力和应力水平等,坝体的应力与变形均在正常范围内,并且坝体有较高的安全储备,不易发生破坏;库盘中复合土工膜在满蓄期时受到了纵向拉应力作用,但远小于其安全系数的容许值,不会对土工膜造成破坏;分离式面板产生了较小的挠曲变形,但不会对面板的防渗性能造成影响。数值分析结果为大坝的建设和安全运行提供理论依据,同时对同类工程的设计施工具有一定的指导意义。

**[关键词]**面板堆石坝; 应力水平; 分离式面板; 有限元分析

DOI: 10.33142/hst.v5i4.6602

中图分类号: TV641.43

文献标识码: A

### Three Dimensional Finite Element Numerical Analysis of a Concrete Face Rockfill Dam in Xinjiang

Li Rui

(Xinjiang Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower, urumqi 830000,China)

**Abstract:**In order to understand the stress level of the concrete face rockfill dam in the construction and operation stages, the three-dimensional finite element analysis of a concrete faced rockfill dam under the completion period and full storage period is carried out by using the three-dimensional finite element calculation software and Duncan Chang  $e-\mu$  model. The results show that the displacement, stress and displacement of sand gravel, dam foundation, reservoir plate and separated face slab under two working conditions are obtained. The stress and deformation of the dam body are within the normal range, and the dam body has a high safety reserve and is not easy to be damaged; the composite geomembrane in the reservoir plate is subjected to longitudinal tensile stress during the full storage period, but it is far less than the allowable value of its safety factor, so it will not affect the soil. The results show that the working membrane is damaged, and the separated panel has a small deflection deformation, but it will not affect the impermeability of the panel. The results of numerical analysis provide theoretical basis for the construction and safe operation of the dam, and have certain guiding significance for the design and construction of similar projects.

**Keywords:** Concrete face rockfill dam; Stress level; Separate panel; finite element analysis

### 引言

随着中国近年来经济的飞跃发展,国家对水利工程的重视程度与经济投入也越来越大,使得水利工程得到了迅速发展。混凝土面板堆石坝因具有安全性高、筑坝材料广、适应变能力强、施工方便等优点,受到国内外坝工界普遍重视,并被越来越多的应用于高坝大库<sup>[1-2]</sup>。伴随着面板堆石坝的建设,面板堆石坝坝高已达数百米级,这使得混凝土面板之间的板间应力与整个坝体的应力水平都变得越来越复杂<sup>[3-5]</sup>。为了清楚的了解面板堆石坝坝体、坝基以及库盘的应力应变情况,笔者结合新疆目前新建的某水库工程,采用有限元软件对其进行了三维有限元分析。

### 1 计算模型建立

#### 1.1 工程概况

新疆某新建水库工程坝顶高程 968.2m, 防浪墙高 1.2m, 坝顶宽 5.0m, 坝高 41.0m, 坝顶长 524.75m, 坝顶公路为沥青路面。坝体上游采用分离式混凝土面板砂砾石坝和土工膜全库盘防渗, 混凝土防渗面板厚度 30cm, 坡

比为 1: 1.6, 下游坡比为 1: 1.6, 混凝土面板每 12m 设置纵向伸缩缝, 伸缩缝宽度为 2cm, 伸缩缝防水采用混凝土面板设两道止水, 上层采用橡胶止水, 下层采用紫铜片止水。泄洪兼导流洞是位于砂砾石坝体中, 进口高程为 930.00, 整个涵洞由进水口、有压涵洞段、闸井段、无压隧洞段和消能段组成, 其中有压涵洞段长 41.5m, 闸井段长 15.60m, 无压涵洞段长 78.9m 和消能段 54m。

#### 1.2 几何模型

根据坝址区地形条件和标准设计剖面图,考虑分离式面板、砂砾石坝体、导流泄洪洞及原河床(坝基)对水库进行模型建立,以铅垂方向为 Z 轴,顺河向为 Y 轴,垂直于水流方向为 X 轴。

大坝模型采用三维自动剖分方法进行坝体单元剖分,有限元网格采用六面体单元,为了解坝体与分离式面板的应力变形情况,在坝体砂砾石与面板交界面之间设置接触面单元。有限元网格剖分如图 1 所示。大坝的有限元网格共有单元 13412 个, 结点 15484 个。

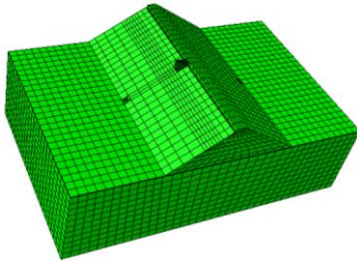


图1 坝体三维网格剖分图

### 1.3 筑坝材料的本构模型

砂砾石坝料、混凝土面板是大坝的主体，其应力应变关系的合理模拟直接关系到对坝体工作性状评估准确性[6]。大量的研究表明混凝土面板和砂砾石坝料的变形，不仅随剪应力水平而变化，也与加载应力路径密切相关，应力应变关系表现出明显的非线性特性[7-10]，目前国内外均通过坝料的三轴试验的剪应力与应变的关系来反映材料的非线性，比较多的选用邓肯-张模型，也有一些工程采用南水模型，研究发现邓肯-张模型计算的变形数值较南水模型偏大[11]。为安全起见，大多数混凝土面板坝较为普遍的采用邓肯-张的  $E \sim \mu$  模型进行有限元分析，以切线变形模量  $E_t$  和切线泊松比  $\mu_t$  为计算参数，其中切线变形模量  $E_t$  的表达式为：

$$E_t = K p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 \quad (1)$$

切线变形模量  $E_t$  的公式中共包括 5 个材料常数  $K$ 、 $n$ 、 $\phi$ 、 $c$ 、 $R_f$ ，式 (1) 将变形与坝料的强度统一到一起，充分反映了材料的本构关系。

邓肯等人根据大量三轴试验中轴应变  $\epsilon_1$  与侧向应变  $\epsilon_3$  之间存在的双曲线关系，提出了切线泊松比的数学表达式：

$$\mu_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3 / p_a)}{\left[ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]} \right]^2} \quad (2)$$

$\mu_t$ ——切向泊松比，它不是常量，而是应力的函数，由参数  $G$ 、 $F$ 、 $D$  来确定。

式 (1)、式 (2) 就构成邓肯-张的  $E \sim \mu$  模型，其 8 个参数通过三轴试验来获取。由于该模型及其参数具有明确的物理意义，易为工程技术人员所接受，而且现已应用了多年，积累了较为丰富的运用经验和资料，可以获得基本满意的土石坝应力应变分析结果，能够反映出坝体的工作性状。但式 (1) 的模型是针对平面应变问题提出的，推广于三维问题时，可以用广义剪应力  $q$  代替  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ，用平均主应力  $p$  代替  $\sigma_3$ ，用三维的 Mohr-Coulomb 准则  $q_f$

代替  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

$$q_f = \frac{3 \cdot c \cdot \cos \phi + 3 \cdot p \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cos \theta_\sigma + \sin \theta_\sigma \cdot \sin \phi} \quad (5)$$

式中的  $\theta_\sigma$  为应力 Lode 角，如下式所示

$$\theta_\sigma = \arctan \left( \frac{\mu_t}{\sqrt{3}} \right), \quad \mu_t = 1 - \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (6)$$

将公式 (3)、(4) 和 (5) 代入原来的 Duncan-Chang 模型中，土体的空间切线模量  $E_t$ ：

$$E_t = k \cdot p_a \left( \frac{p}{p_a} \right)^n \cdot (1 - R_f \cdot S)^2 \quad (7)$$

式中的  $S$  为剪应力水平，反映了土体抗剪强度发挥的程度。

砂砾石材料三轴试验参数见表 1，混凝土和钢筋混凝土结构均采用线弹性模型计算，其参数选取见表 2。

表 2 线弹性材料参数

材料名称	弹性模量 (MPa)	泊松比
混凝土 C25	22500	0.2
基岩	25000	0.21

### 1.4 坝体填筑与蓄水过程模拟

采用邓肯-张  $E \sim \mu$  模型进行三维有限元模拟坝体填筑及蓄水过程，计算分为竣工期和满蓄期两种工况。坝基砂砾石作为已存在部分（只具有初始应力）。加载过程采用大坝填筑分为 7 级，蓄水加载过程分为 4 级。蓄水时上游水下部分施加浮托力；同时，水压力以面力的形式施加到混凝土面板上。

## 2 结果分析

### 2.1 砂砾石坝体

图 2、图 3 为坝体填筑到坝顶时竣工期涵洞坝段最大剖面砂砾石坝体水平位移和竖向位移等值线图。砂砾石坝体随坝基沉降导致上下游坝坡产生水平位移，分别指向坝体外部（即指向上下游方向），位移并基本呈对称分布。其中上游体向下游方向最大水平位移极值为 5.24 cm，位于上游坝壳坝踵与坝基结合面处；下游坝体向下游方向最大水平位移极值为 2.66 cm，位于下游坝趾与坝基结合面处（图 1）。竖向位移极值达 33.91 cm，发生在大坝坝基表面靠近轴线中央位置。考虑到坝基为可压缩的覆盖层，这一结果符合沉降位移的分布的一般规律。竖向位移约占坝高的 0.81%，占总压缩层厚度（坝高与坝基）的 0.28%。

图 4、图 5 为水库蓄水时满蓄期涵洞坝段砂砾石坝体最大剖面的上下游方向水平位移和竖向位移等值线图。水库蓄水后，在水荷载作用下，上游坝体向上游方向最大水平位移极值为 2.38 cm，发生在上游坝体底部并靠近上游坝基二

表1 坝体材料邓肯 E ~ μ 模型力学参数

材料名	C (kPa)	$\varphi_0$ (°)	K	n	$R_f$	G	F	D	$K_{ur}$	$n_{ur}$	$\Delta\varphi$ (°)
坝壳料	130	42.2	960	0.46	0.83	0.44	0.24	0.44	1920	0.46	0
垫层过渡料	150	40.6	850	0.50	0.80	0.44	0.25	0.44	1700	0.50	0
坝基	142	42.4	900	0.40	0.77	0.45	0.23	0.45	1800	0.40	0
接触单元	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-

分之一部位；大坝下游坝坡向下游产生位移的极值为 4.13cm，位于坝趾处。蓄水过程所以竖向位移比竣工期略有增加，发生在坝基表面位于坝轴线附近（见图 5），竖向位移极值为 38.16cm，这也是大坝各种工况下所发生的最大位移，竖向位移约占坝高的 0.93%，占坝基与坝高总压缩层厚度的 0.32%。

无论是竣工期和满蓄期，坝体和坝基的相对于总压缩层厚度竖向位移量均在 0.35%以下，这一量级不大，在国内外覆盖层上面板堆石坝经验范围之内。而且主要沉降位移均发生在坝体填筑的施工期，施工期的沉降位移约占总沉降位移的 89%，蓄水所引起的沉降位移甚小。这对于在坝体填筑完成后所施工的分离式混凝土防渗面板不会产生负面影响。

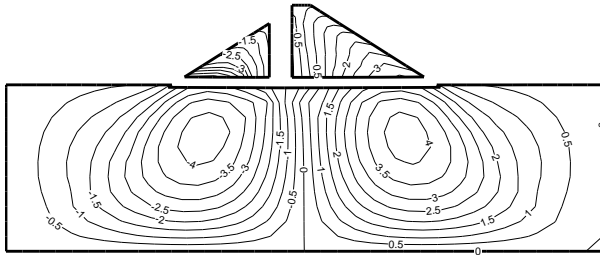


图2 涵洞坝段竣工期水平位移等值线图

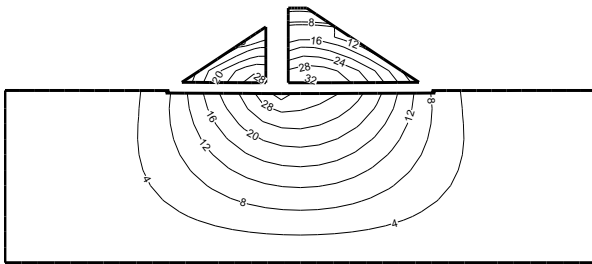


图3 涵洞坝段竣工期竖向位移等值线图

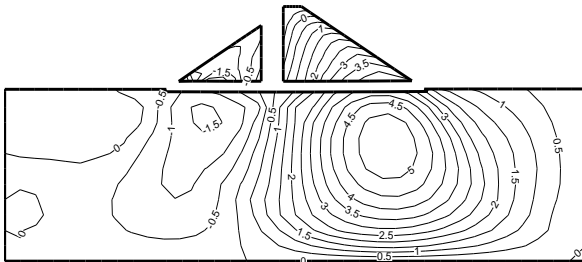


图4 涵洞坝段满蓄期水平位移等值线图

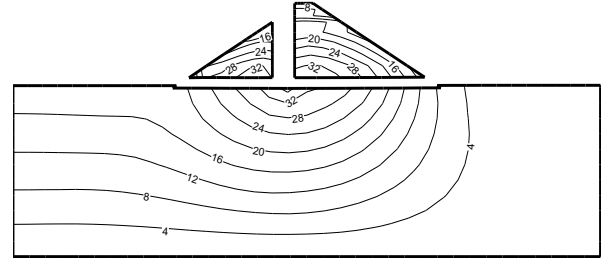


图5 涵洞坝段满蓄期竖向位移等值线图

图 6、图 7 为竣工期涵洞坝段剖面砂砾石坝体大主应力和小主应力等值线图。坝体大主应力等值线与坝坡基本平行，而且由坝顶至坝基呈逐渐增大趋势，符合应力分布规律。竣工期砂砾石坝体的大主应力在  $-0.02 \sim -0.83$  MPa 范围内，其极值为  $-0.83$  MPa，全部为压应力；小主应力的范围为  $0.08 \sim -0.32$  MPa，其极值为  $-0.32$  MPa。大、小主应力的极值均发生在坝体内接近坝基表面处。

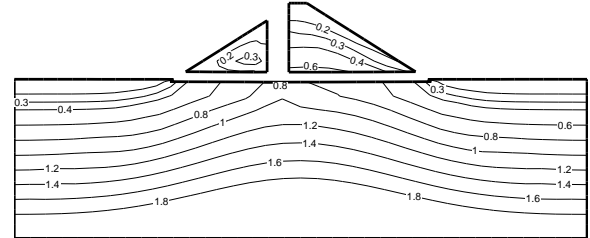


图6 涵洞坝段竣工期大主应力等值线图

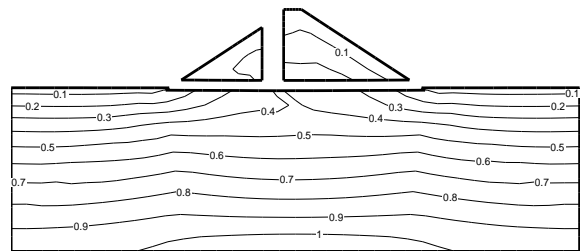


图7 涵洞坝段竣工期小主应力等值线图

图 8、图 9 为坝体满蓄期砂砾石坝体最大剖面的大及小主应力等值线图。满蓄期，受作用在面板上水压力的影响，坝体大主应力略有增加。砂砾石坝体的大主应力范围为  $-0.02$  MPa  $\sim$   $-0.96$  MPa，其极值为  $-0.96$  MPa；小主应力的范围为  $0.02 \sim -0.35$  MPa，其极值为  $-0.35$  MPa。大主应力及小主应力的极值均发生在坝体底部的坝基表面，并靠近坝轴线处。

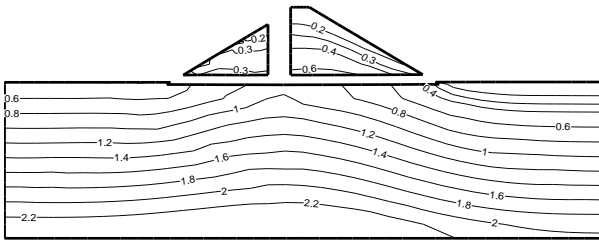


图8 涵洞坝段满蓄期大主应力等值线图

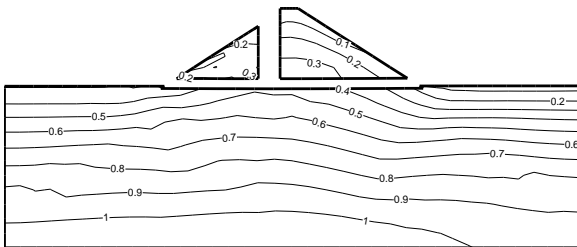


图9 涵洞坝段满蓄期小主应力等值线图

图10、图11分别给出了坝体在竣工期和满蓄期的剪应力水平的等值线图。竣工期整个坝体的剪应力水平极值为0.65；满蓄期应力水平极值为0.80，发生在坝踵处很小的区域内，这是受单元体形的影响，不能反映实际情况。整体上看砂砾石坝体应力水平均不高，特别是在坝坡附近区域的应力水平更低，表明坝体具有很高的安全储备，故不会对坝体稳定产生不利的影

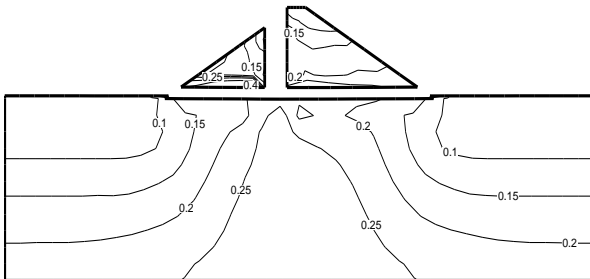


图10 涵洞坝段竣工期剪应力水平云图

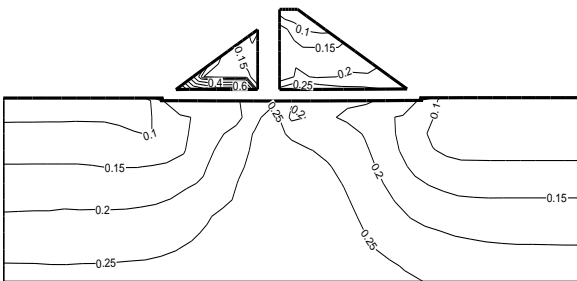


图11 涵洞坝段满蓄期剪应力水平等值线图

## 2.2 坝基

坝基是坝体下部的基础部分，坝基的应力应变特性直接影响工程的运行性状。竣工期在填筑坝体自重作用下，坝基分别向上下游方向产生水平位移。坝轴线下游坝基产

生向下游的水平位移，其极值为5.24cm；坝轴线上游坝基，向上游方向产生的水平位移，其极值为4.24cm；竣工期坝基的竖向位移为34.16cm，发生在靠近坝轴线附近的坝基表面处。满蓄期由于坝体自重与水荷载共同作用下，坝基的水平位移进一步向下游发展，水平位移的极值为5.43cm，发生在坝基下游部分覆盖层中部区域内。受作用在混凝土防渗面板水荷载的影响，竖向位移较竣工期略有增加，其值为37.4cm，发生在坝轴线附近的坝基表面处。

竣工期坝基的大主应力及小主应力极值分别为2.46MPa和1.09MPa，所有极值均位于坝基覆盖层底部与基岩接触面上。满蓄期各应力的极值分别为2.58MPa和1.12MPa。所有极值均位于坝基覆盖层底部与基岩接触面上。坝基的大主应力由坝基表面向坝基基岩面呈逐步加大分布。坝基中大主应力与小主应力均为压应力，无论竣工期和满蓄期坝基的应力均较低，不会引起坝基失稳等负面作用。

竣工期的坝基应力水平极值为0.31，满蓄期的应力水平极值为0.29。无论是竣工期或满蓄期应力水平均较低，表明坝基不可能产生剪力破坏，安全能力储备很高。

## 2.3 库盘

坝体填筑完成时，其重量作为库盘的边荷载，在其作用下将拖动库盘发生沉降，在靠近坝踵附近库盘的竖向沉降大于远离坝踵处的库盘的竖向沉降。竣工期坝体自重引起坝踵处库盘的竖向沉降达2.0cm；当水库蓄水后，在水荷载作用下，将引起坝基和库盘竖向位移增大，其量值为9.21cm，因蓄水坝踵处引起的竖向位移增量为7.21cm。的这样沉降变形差能够为松弛叠铺的库盘防渗土工膜所吸收，保证土工膜不会因基础沉降而拉裂。图12为大坝库盘、坝基竣工期、满蓄期竖向位移及位移差（图中坝体位置为148~258m），可已经看出坝体填筑荷载对库盘竖向位移的影响仅局限在距坝踵40m范围内，约为坝高的1倍；水库蓄水以后，库盘竖向位移增量为7.21cm。在距坝踵40m范围以外，各点的竖向位移量相等，不存在沉降差，因此，不会因蓄水导致库盘中防渗土工膜破坏；而在距坝踵40m范围以内，各相邻点间存在着沉降差，其梯度约为0.18cm/m，说明此区域在蓄水后可产生一定的变形，建议施工中应保证铺设的土工膜有足够的松弛度，以适应库盘地基变形，防止被拉裂。

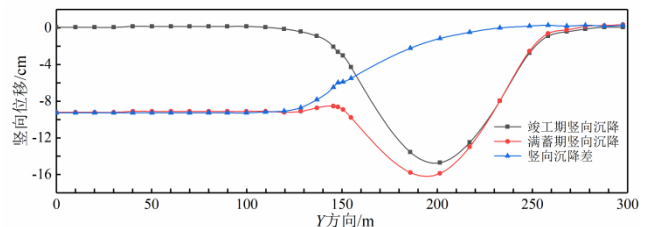


图12 大坝库盘、坝基竣工期、满蓄期竖向位移及位移差曲线图

竣工期与满蓄期库盘中的大主应力由坝基表面向坝



基岩面呈逐步加大分布。坝基中大主应力与小主应力均为压应力,无论竣工期和满蓄期坝基的应力均较低,不会引起坝基失稳等负面作用。竣工期的应力水平极值为 0.25;满蓄期的应力水平极值为 0.27。无论是竣工期或满期应力水平均较低,表明坝基不可能产生剪力破坏,安全能力储备很高。

## 2.4 分离式面板

由于本工程采用分离式面板,每块板自身刚度较大,因此各块板的位移变形沿坝坡方向呈线性分布变化,部分板之间在板间缝处产生位移突变,两点间的位移突变差即为板间缝的形变值。

图 13 为分离式混凝土面板在水荷载作用下的挠曲变形,由该图可以看出:分离式混凝土面板在水荷载作用下的法向最大位移是 8.9cm,面板全长 48.4m,面板挠曲度为 0.18%,完全可以为分离式面板所承受而不会引起折断。

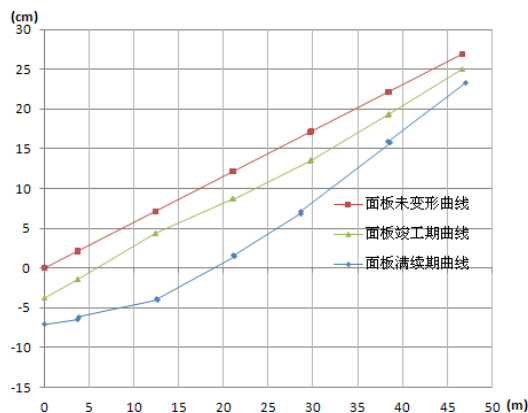


图 13 竣工期与满蓄期防渗面板挠曲线图(竖向放大 100 倍单位: cm)

混凝土面板中最大拉应力为 0.44MPa,小于 C25 混凝土的极限拉应力为 1.2MPa,挠曲变形和应力条件均不会导致面板开裂而失去防渗功能。分离式混凝土面板中的拉应变仅为  $25 \times 10^{-6}$ ,一些研究表明<sup>[12]</sup>,三级配混凝土的极限拉应变为  $71 \times 10^{-6}$ ,二级配混凝土可达  $140 \times 10^{-6}$ 。根据长江科学院的研究<sup>[13]</sup>,采用快速拉伸试验时,混凝土的极限拉伸应变值为  $58.7 \times 10^{-6}$ ,而采用缓慢拉伸试验所得极限拉伸应变比快速拉伸试验值提高一倍以上,达到  $133 \times 10^{-6}$ 。因此,本工程的分式面板不会产生裂缝而失去防渗功能。

## 3 结论

本文通过三维有限元计算软件,采用邓肯-张 E- $\mu$  模型对新疆某面板堆石坝进行了竣工期和满蓄期两种工况

下的三维有限元分析。得到了坝体砂砾石料、坝基、库盘和分离式面板在两种工况下的位移、应力和应力水平。

(1) 坝体在竣工期和满蓄期的剪应力水平,整个坝体的应力水平均小于 0.85,坝基的应力水平为 0.31,坝体具有很高的安全储备,不会对坝体稳定产生不利的影响。

(2) 分离式混凝土面板在水荷载作用下的挠曲度为 0.18%,这样量级的挠曲变形较小,完全可以为分离式面板所承受。分离式面板水平接缝张开 12.7mm,沉降 17mm,这样的开度完全可以为柔性嵌缝密封膏所吸收,不会失去防渗性能,接缝止水是有保证的。

## [参考文献]

- [1] 蒋国澄,傅志安,凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.
  - [2] 马铁龙. 世界高混凝土面板堆石坝的发展[D]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
  - [3] 万学渊. 坝体有限元分析在工程中的应用[J]. 中国水利,2020(1):16-18.
  - [4] 邢建营,关志诚,吕小龙. 面板堆石坝深覆盖层处理技术研究及在河口村水库工程中的应用[J]. 岩土工程学报,2020,42(7):1368-1376.
  - [5] 王玉才,黄彩霞. 覆盖层面板堆石坝三维有限元数值模拟[J]. 中国水运(下半月),2017,17(11):89-91.
  - [6] Hydropower and Dams. Updates on some major CFRD projects[J]. Hydropower and Dams,2004(3):109-113.
  - [7] 丁树云,刘桂香,比庆涛. 某面板堆石坝应力及变形的有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(5):17-22.
  - [8] 刘宏,刘日项. 面板堆石坝应力变形特性有限元分析[J]. 水科学与工程,2017(5):50-53.
  - [9] 张伟,陆佳华,冯威等. 基于 ABAQUS 有限元分析的大坝变形混合模型[J]. 水电能源科学,2011,29(6):80-82.
  - [10] 於文欢,任建民,王晓丽. 坝体-库水-地基流固耦合有限元分析的地基模拟[J]. 水电能源科学,2014,32(12):75-77.
  - [11] 刘相斌,赵国藩. 用不同模量有限元分析坝体应力和变形[J]. 力学与实践,2001(4):39-42.
  - [12] 张帮强. 三级配矿渣混凝土力学性能尺寸效应试验研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2016.
  - [13] 王仲华,陈如华. 三峡大坝全级配混凝土力学性能试验研究[J]. 长江科学院院报,1998(1):3-5.
- 作者简介:李瑞(1986.11-)男,本科,工程师,从事水利水电工程勘测设计工作。