

DOI: 10.11779/CJGE201404025

# 复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究

杨杰<sup>1, 2</sup>, 李国英<sup>1, 3</sup>, 沈婷<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**河谷地形是影响面板堆石坝应力变形的重要因素之一, 河谷地形不同导致面板坝边界条件不同, 进而影响其应力变形状态。对某拟建坝高 256 m 的超高混凝土面板堆石坝在复杂地形条件下的应力变形进行分析, 得出不对称不规则河谷对面板堆石坝的应力变形协调性影响较大, 特别是右岸古河床阶地附近的坝体和面板应力变形梯度变化较大, 不利于面板的安全, 设计和施工时需采取措施进行处理。并通过与两种调整方案的结果进行对比, 针对性的分析了右岸古河床阶地的影响。同时左岸陡岸坡导致面板拉应力和周边缝位移较大, 通过与 3 种调整方案的结果进行对比, 分析了陡岸坡的影响程度。

**关键词:**河谷地形; 高面板堆石坝; 应力变形; 古河床阶地; 陡岸坡

中图分类号: TV641; TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)04-0775-07

**作者简介:**杨杰(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟分析研究。E-mail: yuzhou-x@163.com。

## Stress-deformation properties of super-high CFRDs under complex terrain conditions

YANG Jie<sup>1, 2</sup>, LI Guo-ying<sup>1, 3</sup>, SHEN Ting<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department; Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and

Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210028, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and

Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Valley terrain is one of the most important factors which affect the stress and deformation of CFRDs. Different valley terrains lead to different boundary conditions of CFRDs and further influence the state of stress and deformation. 3D-FEM is employed to analyze the stress and deformation of a super-high CFRD 256 m in height under complex topography. It is indicated that the asymmetric and irregular river valley has large influence on the stress and deformation coordination of CFRD, especially the change of stress and deformation gradient is larger near the ancient river terraces at the right bank, which is harmful to the safety of the concrete slab, and thus it is necessary to take measures during design and construction. By comparing the results of two adjustment schemes, the influence of the ancient riverbed on the right bank is analyzed. At the same time, the steep slope at the left bank causes the tensile stress of panel and large displacement of peripheral joints. Based on the results of three adjustment schemes, the influence degree of the steep bank slope is analyzed.

**Key words:** valley terrain; super-high CFRD; stress-deformation; ancient river terrace; steep slope

## 0 引言

面板堆石坝坝体施工自采用振动碾压技术以来, 得到了快速的发展<sup>[1]</sup>, 坝高已跨入 300 m 级, 且因其具有造价较低、地形适应性较好、取材方便, 与心墙坝和混凝土坝相比更环保等优点, 得到坝工界广泛的青睐。随着坝高的不断增加, 影响面板堆石坝应力变形的因素越发的引起技术人员的关注。这些因素可分为内因和外因两方面。内因是指人为控制的, 面板堆石坝自身所具备的特性, 如坝高、坝料等。坝体越高、堆石料材质越差, 面板和坝体的应力变形越大。外因

是指客观存在的, 不为设计者先期决定的因素, 如地形条件, 主要包括河谷形态、覆盖层等。

目前对面板堆石坝应力变形影响因素研究的文献以坝高和坝料方面居多, 如堆石料的破碎<sup>[2-3]</sup>、劣化<sup>[4]</sup>、湿化<sup>[5]</sup>, 坝体的长期变形<sup>[6-7]</sup>等。也有一些学者对在覆盖层上建设面板堆石坝进行了研究<sup>[8-9]</sup>, 但对于复杂地形条件如何影响高面板坝应力变形的研究较少见, 文

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基本科研业务费专项资金项目(10Y312011)

收稿日期: 2013-07-22

献[10~12]分别对狭窄河谷、高陡岸坡和不同河谷宽高比条件下的面板坝应力变形进行了分析,但研究的坝高较小,河谷地形较单一且呈对称性,无法完全适用于目前国内大坝建设的需要。以西北某拟建水电站为例,开展不对称河谷地形(不规则“W”型)对高面板堆石坝应力变形影响的研究。

西北某拟建水电站设计坝高 256 m,坝址河谷左岸地形坡高陡峻,右岸在高程 1610~1660 m 发育长约 480 m、深约 60 m、宽约 260 m 的古河床阶地,相对于左岸边坡较缓,为典型不对称河谷。古河床上部滑坡堆积块碎石层厚度 15~50 m,最大厚度 65 m 左右,下部弱胶结砂卵石层厚度 5~10 m,坝体与面板如图 1 所示,最大剖面如图 2 所示。

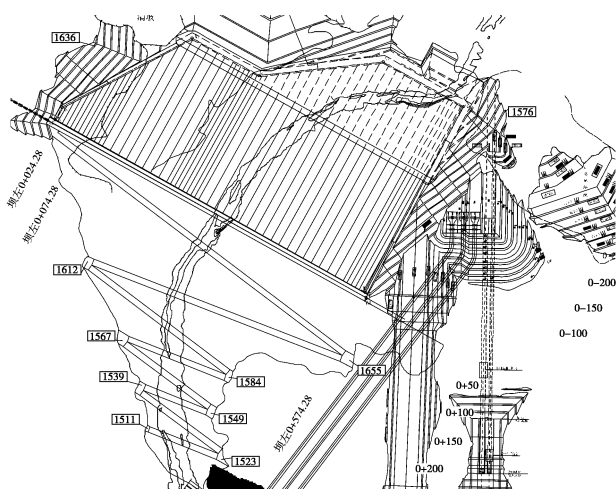


图 1 坝体面板示意图

Fig. 1 Dam body and panel of CFRD

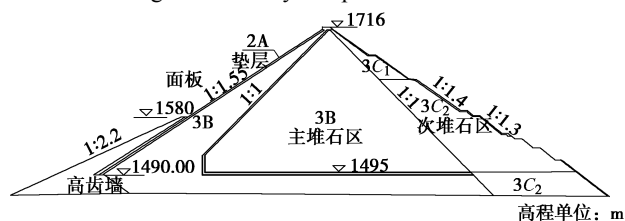


图 2 面板堆石坝最大剖面图

Fig. 2 Maximum cross-section of CFRD

## 1 计算模型及参数

### 1.1 几何模型

河谷形态一般分为“U”型和“V”型,本工程河谷形态较特殊,呈不对称的“W”型。根据地形条件、坝体填筑和蓄水过程建立三维有限元网格,单元形式以六面体单元及其退化单元为主,网格结点数为 11724,单元数为 9742,如图 3 所示。假设基岩无变形,分布在河床底部的节点约束其三向位移,分布在两侧岸坡上的节点约束其坝轴向位移,蓄水后,水荷载处理为点荷载作用在面板节点上。

### 1.2 本构模型

高面板堆石坝应力变形计算采用基于总应力法的

非线性有限元方法。其中,堆石料本构模型采用南水双屈服面弹塑性模型,混凝土面板采用线弹性模型,面板分缝采用分离缝模型,面板与垫层之间采用薄层单元模拟其接触性状。

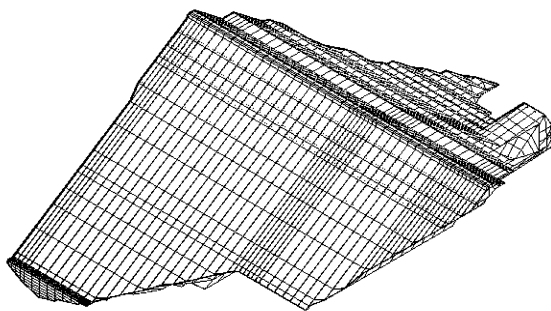


图 3 三维有限元网格

Fig. 3 3-D FEM mesh of dam

(1) 南水双屈服面弹塑性模型屈服面<sup>[13]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2 \\ F_2 &= q^s / p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $p$  为球应力,  $q$  为偏应力,  $r$  和  $s$  为屈服面参数,这里  $r$  和  $s$  可令其等于 2 或 3。

(2) 混凝土结构采用线弹性模型,其应力应变关系符合下列广义虎克定律:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2)$$

(3) 面板周边缝接缝材料采用连接单元模拟,其应力与位移的关系表示为

$$\begin{Bmatrix} \tau_{yx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{yz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{yx} \\ \delta_{yy} \\ \delta_{yz} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中  $\tau_{yx}$  为接缝连接单元顺缝向剪应力,  $\sigma_{yy}$  为接缝连接单元张拉方向正应力,  $\tau_{yz}$  为接缝连接单元垂直缝向剪应力;  $\delta_{yx}$ ,  $\delta_{yy}$ ,  $\delta_{yz}$  分别为周边缝连接单元在剪切向、张拉向和沉陷 3 个方向的位移。根据相关试验结果,刚度系数:

$$k_{yx} = \frac{225}{(1 - 40\delta_{yy})^2}, \quad k_{yy} = \begin{cases} \frac{175}{(1 - 47.6\delta_{yy})^2} & (\text{张开状态}) \\ \frac{650}{(1 - 41\delta_{yy})^2} & (\text{压紧状态}) \end{cases} \quad \text{和} \quad k_{yz} = \begin{cases} 608 & (\delta_{yz} \leq 12.5 \text{ mm}) \\ 560 & (\delta_{yz} > 12.5 \text{ mm}) \end{cases}$$

### 1.3 施工顺序及计算参数

大坝填筑和分期蓄水共分 33 级进行:覆盖层(第 1 级)、高齿墙和趾板(第 2 级)、I 期坝体填筑(第 3~10 级)、一期面板浇筑(第 11 级)、II 期坝体填筑(第 12~15 级)、二期面板浇筑(第 16 级)、提前发电蓄水水位高程 1645.00 m(第 17~22 级)、坝体填筑至高程 1685.0 m(第 23~24 级)、枯期渡汛水位高程

表1 坝体堆石料及覆盖层计算参数  
Table 1 Parameters of rockfills and alluvium

坝体分区	$\rho_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$\varphi_0$ /(°)	$\Delta\varphi$ /(°)	$K$	$n$	$R_f$	$c_d$ /%	$n_d$	$R_d$
垫层区(2A)	2.31	49.3	5.9	920.2	0.29	0.67	0.49	0.45	0.65
主堆石区(3B)	2.27	50.1	6.3	1294.1	0.32	0.74	0.30	0.67	0.72
次堆石区(3C1)	2.22	53.2	9.0	1104.4	0.22	0.65	0.40	0.72	0.64
次堆石区(3C2)	2.20	48.5	6.2	704.6	0.35	0.69	0.58	0.62	0.66
干贫混凝土	2.38	72.6	20.1	3397.2	0.24	0.69	0.24	0.26	0.08
覆盖层( $Q_3$ )	2.20	48.5	6.2	704.6	0.35	0.69	0.58	0.62	0.66
覆盖层( $Q_4$ )	2.10	46.4	6.3	401.6	0.37	0.60	0.72	0.63	0.63

注：混凝土面板和趾板、高齿墙按线弹性模型考虑， $\rho_d=2.4\text{ g/cm}^3$ ； $E=28\text{ GPa}$ ； $\mu=0.167$ 。

1654.0 m(第25级)、III期坝体填筑(第26~27级)；三期面板浇筑(第28级)；防浪墙施工及坝顶坝体填筑(第29级)；蓄水至正常水位(第30~33级)。坝体填筑分期如图4所示。

计算中涉及的材料参数选用南京水利科学研究院的试验成果<sup>[14]</sup>，见表1。

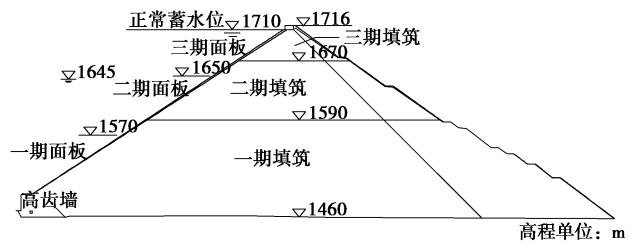


图4 混凝土面板坝填筑分期图  
Fig. 4 Construction stages of CFRD

2 计算结果及分析

基于现状地形条件(原方案)，按照上述方法对高面板堆石坝进行三维有限元模拟，并对坝体、面板应力变形和接缝位移进行分析。

2.1 坝体应力变形

图5(a)是蓄水后坝体纵轴面沉降等值线，从图中可看出，坝体最大沉降发生在最大横断面轴线约0.4倍坝高处，受覆盖层的影响，右岸古河床阶地有一个沉降极值，极值点位于覆盖层最大厚度断面的建基面处。左岸岸坡较陡，相对于右岸堆石料下滑的趋势较大，导致左岸中下部的沉降等值线较右岸沉降等值线密集，沉降梯度较大。右岸在古河床阶地的作用下，沉降梯度相对较小，但是沿坝轴线的水平位移趋势较大，从图5(b)中可看出指向左岸的水平位移略大于指向右岸的水平位移。受古河床阶地和覆盖层的影响，右岸阶地附近的沉降等值线有明显上凸趋势，导致阶地边缘两侧沉降梯度变化较大，对坝体变形不利，施工时需对其采取措施。

图5(c)是蓄水后坝体横剖面顺河向位移等值线，竣工时，指向上、下游的顺河向位移分别为12.3 cm

和38.5 cm；蓄水后，指向上、下游的顺河向位移分别为3.1 cm和42.8 cm。坝体指向上游的位移明显小于指向下游的位移，造成这种现象的原因有两方面：一是上游的主堆石料好于下游的次堆石料，二是二期面板浇注完毕后，为提前发电进行了蓄水，作用在面板上的水压阻止了坝体填料自重作用下向上游位移的趋势。

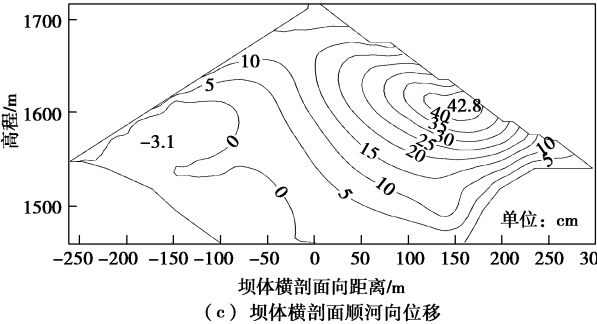
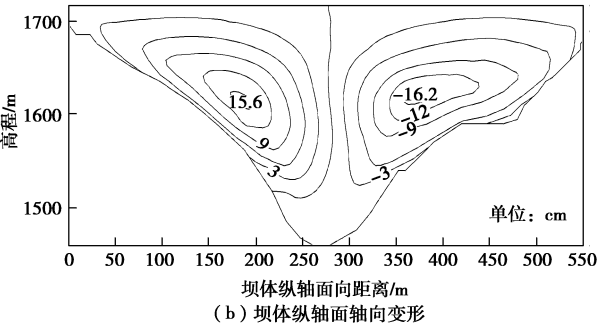
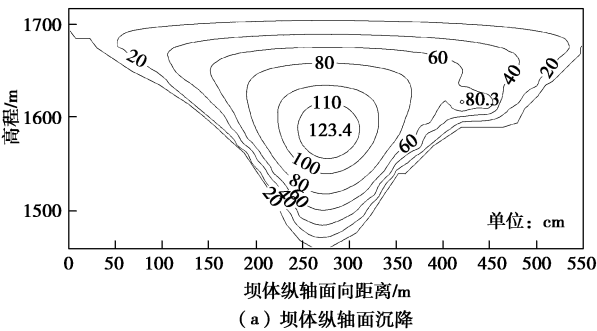


图5 坝体变形等值线图  
Fig. 5 Deformation contours of dam

坝体应力等值线基本平行于坝坡，但由于提前蓄水的缘故，上游坝体应力等值线抬头现象明显，说明

受水压的影响，上游坝体应力有所增大。坝料与基岩接触的边界个别部位出现应力集中，特别是右岸古河床平台转角处应力集中明显，施工时应进行处理，做好削坡，使其平缓过渡（图 6）。

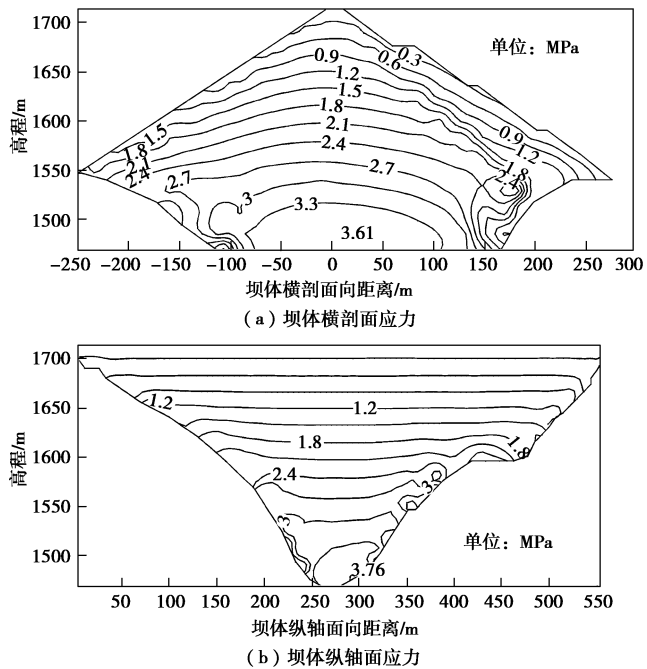


图 6 坝体应力等值线图  
Fig. 6 Stress contours of dam

2.2 面板应力变形

面板是薄型壳体结构，主要作用是防渗，其应力变形主要受坝体填料变形的影响。图 7 是面板挠度极值点随填筑过程的变化曲线，从图 7 中可看出，蓄水之前浇注的面板挠度方向指向坝外侧，随着蓄水高度的增加，面板挠度的方向在水压力的作用下转向坝内侧，并随蓄水高度的增加而增大。蓄水期间面板挠度增长速率明显大于筑坝期间增长速率，应合理控制蓄水高度的增长速率，以防面板挠度增长过快造成破坏，引起渗漏。

从图 8 (a) 中可看出，左岸面板挠度等值线较密，梯度较大，而右岸受古河床阶地的影响，挠度梯度较小，在古河床阶地左侧岸坡上挠度梯度变化剧烈，导致该位置面板内力较大，甚至出现拉应力，可能会造成面板破坏。受古河床阶地的影响，竣工期面板轴向位移有 3 个极值点，除面板两侧外在阶地左侧的岸坡上方存在一个极值点，位移量是 3 个极值中的最大值，蓄水结束后，在水压力的影响及面板应力自身的调整下，古河床阶地左侧岸坡上方的极值点消失。对应的面板轴向应力，古河床阶地及其左侧岸坡处出现较大的拉应力，可能造成面板周边缝和垂直缝张开较大，影响防渗体系，受左岸陡边坡的影响，左岸陡边坡上

部亦存在一拉应力区域。

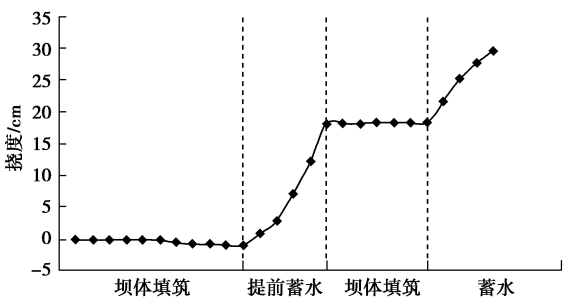
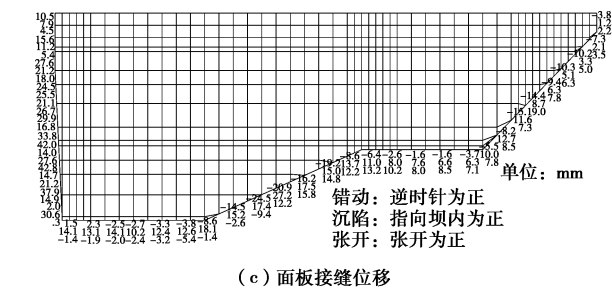
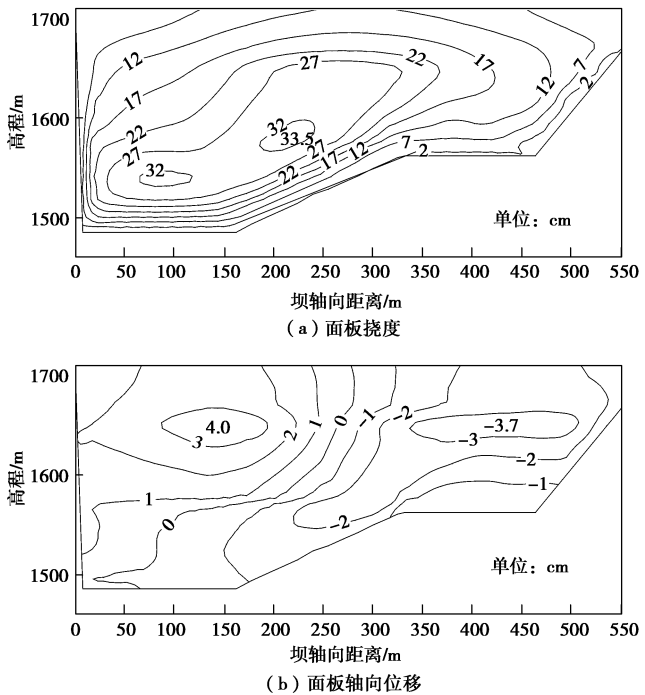


图 7 面板挠度变化曲线  
Fig. 7 Deflection change curve of concrete slab



(c) 面板接缝位移  
图 8 面板变形等值线图  
Fig. 8 Deformation contours of concrete slab

2.3 面板接缝位移

受面板应力变形的影响，不对称复杂河谷地形条件下，面板接缝变化较复杂，垂直缝中多以压性闭合缝为主，但在左岸陡峻边坡上部和右岸古河床阶地附近，垂直缝张开较多，左岸张开缝最大值为 5.8 mm，右岸张开缝最大值位于古河床阶地左边缘，亦即面板轴向拉应力最大值附近，最大值为 7.8 mm。由于左岸坡极其陡峻，面板周边缝错动、沉陷及张开变形较大，

最大值分别为沉陷 33.8, 42.8, 21.1 mm, 位于中下部。右岸地形虽然变化较剧烈, 但坡度较缓, 且古河床阶地起到一定的承接作用, 其周边缝变化没有左岸大, 最大值分别为 24.5, 27.2, 15.8 mm, 发生在古河床阶地左侧的斜坡上。

### 3 古河床阶地的影响分析

为更好的分析不对称不规则河谷地形对面板堆石坝应力变形的影响, 本节制定两种比较方案, 进行模拟分析。将右岸趾板线古河床高程以下坝轴线之前岸坡挖顺, 河谷呈“U”型(方案 R1); 将右岸古河床阶地高程以上填筑干贫性混凝土, 河谷呈“V”型(方案 R2)。图 9 是右岸古河床阶地不同处理方案的面板轮廓线。

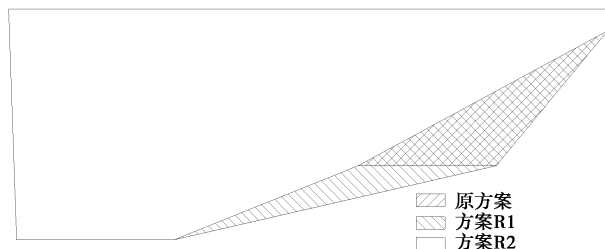


图 9 右岸古河床阶地地不同处理方案

Fig. 9 Treatment schemes of terrace at right bank

#### 3.1 坝体变形影响分析

将右岸古河床阶地进行处理后, 坝体的最大沉降和顺河向位移极值变化较小, 但右岸古河床阶地附近的沉降等值线具有较大改观, 变得较为平缓, 梯度差异减小, 有利于应力分布, 变形协调性较好。受干贫性混凝土的影响, 方案 R2 指向左岸的轴向位移较原方案和方案 R1 减小明显。

古河床阶地位置坝体沉降差别较大, 方案 R1 沉降最大 (75.6 cm), 沉降率约 0.49%; 方案 R2 沉降最小 (52.3 cm), 沉降率约 0.40%。分析沉降数据可知, 原方案古河床阶地断面沉降率与最大坝高断面沉降率较接近且略小, 符合高坝变形规律; 方案 R1 中古河床阶地断面沉降率略大于最大坝高断面沉降率, 原因是坝轴线前侧挖顺后填筑堆石料增多, 附加应力增大, 引起沉降增大; 方案 R2 中古河床阶地上部填筑的干贫性混凝土替代了部分堆石料, 该材料性质较好, 导致沉降减小, 图 10 中方案 R2 沉降等值线向左岸偏移亦说明了这点。原方案和方案 R1 古河床阶地位置指向下游的顺河向位移量较接近, 但方案 R1 为使岸坡平顺, 在坝轴线上游侧开挖一部分基岩, 增多了堆石料的填筑, 导致指向上游的顺河向位移量增大。方案 R2 由于古河床阶地上填筑了大量的干贫性混凝土, 材料性质较好, 使上下游顺河向位移均减小 (图 11)。

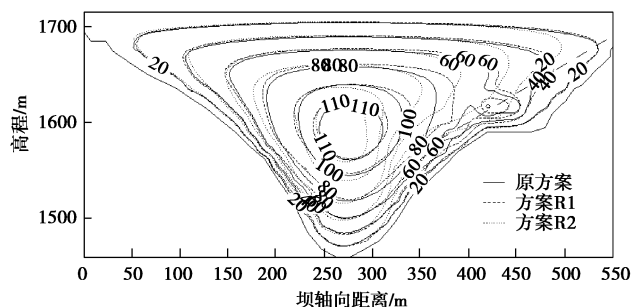


图 10 坝轴线断面沉降等值线图

Fig. 10 Settlement contours of dam axis section

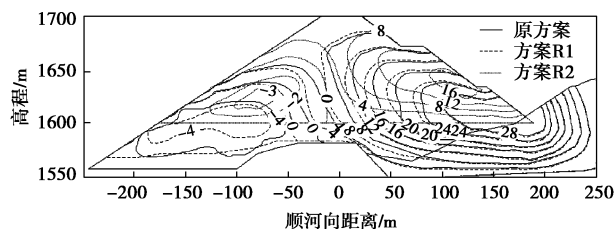
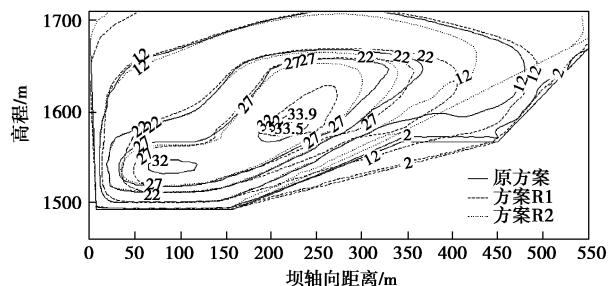


图 11 古河床阶地顺河向位移等值线图

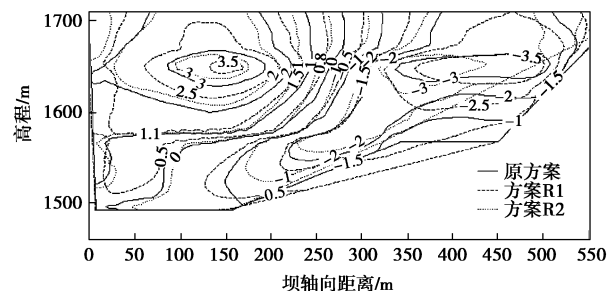
Fig. 11 Contours of longitudinal displacement of terrace

#### 3.2 面板应力变形及面板接缝变形影响分析

对右岸古河床阶地进行处理, 面板挠度和轴向位移等值线对比图如图 12 所示, 古河床位置面板应力变形计算结果列于表 2。面板应力变形极值和位置较接近, 但古河床阶地位置的面板挠度和顺坡向应力变化较大。面板的应力变形由坝体决定, 其应力变形规律与坝体基本相同。对右岸古河床阶地进行处理后的方案右岸坝体变形协调性得到改观, 使得面板应力分布较均衡, 拉应力区域有所减小。反映在接缝变形上, 垂直缝压性区域有所增大, 而张开性区域减小, 极值



(a) 面板挠度等值线图



(b) 面板轴向位移等值线图

图 12 面板变形等值线图

Fig. 12 Deformation contours of concrete slab

表 2 古河床阶地位置不同处理方案计算结果

Table 2 Calculated results of different treatment schemes at position of ancient river terraces

计算方案	坝体			面板		接缝			
	沉降 /cm	顺河向位移/cm		挠度 /cm	顺坡向 应力 /MPa	垂直缝 /mm	周边缝/mm		
		指向上游	指向下游				错动	沉降	张开
原方案	71.4	6.1	32.0	18.8	6.73	7.8	24.5	27.2	15.8
方案 R1	75.6	7.6	31.7	21.1	8.84	7.6	19.6	19.1	14.6
方案 R2	52.3	3.7	19.1	13.4	4.77	6.5	21.1	23.6	17.9

也降低；周边缝最大值依然坐落在左岸陡边坡的中下方，极值变化不大，右岸的周边缝减小量明显。

量有密切关系，岸坡坡比增大以后，沿岸坡方向切向力的分量减小，堆石料变形减小，导致面板周边缝位移减小。

4 陡岸坡的影响分析

高混凝土面板堆石坝周边缝允许最大位移一般为 30~50 mm，由上述计算结果可知，左岸坡面板拉应力、周边缝沉陷量和错动量较大，接近一般止水材料的允许变形上限值，这是左岸岸坡陡峻，坝体受到沿岸坡方向切向力的分量较大所致，为此本文假设 3 种改变左岸陡岸坡的方案进行模拟分析，讨论陡岸坡对周边缝和面板拉应力影响的程度。左岸趾板分别外移 30 m（方案 L1）、外移 60 m（方案 L2）、120 m（方案 L3），并在坝轴线上游沿岸坡挖顺。图 13 是左岸趾板线外移后的面板轮廓线。

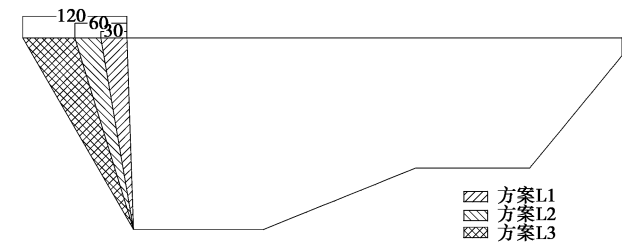


图 13 左岸陡岸坡不同方案

Fig. 13 Treatment schemes of steep slope at right bank

按照上述 3 种方案进行三维有限元分析，面板拉应力和周边缝计算结果列于表 3。随着左岸趾板线的外移，面板顺坡向和轴向拉应力均减小，且拉应力区有所增大，应力分布梯度减小，降低了面板出现裂缝的可能性。

表 3 左岸陡岸坡不同趾板线方案计算结果

Table 3 Results of different toe line schemes at left bank

计算方案	面板拉应力/MPa		周边缝/mm		
	顺坡向	轴向	错动	沉陷	张开
原方案	1.66	1.92	33.8	42.8	21.1
方案 L1	1.67	1.74	31.5	40.3	19.1
方案 L2	1.62	1.70	27.5	35.3	17.3
方案 L3	1.43	1.65	23.2	27.4	13.0

图 14 是左岸岸坡坡比与周边缝位移图，从图 14 中可看出，随趾板外移，岸坡坡比减小，周边缝位移减小，这一规律与坝体所受到沿岸坡方向切向力的分

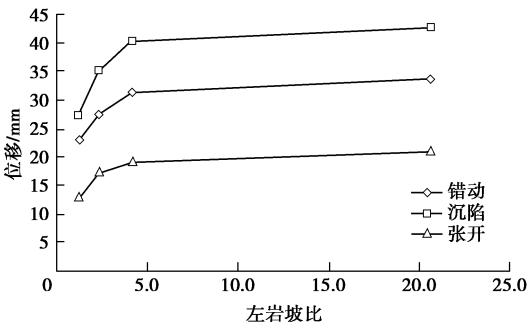


图 14 左岸陡岸坡比对周边缝的影响

Fig. 14 Effect of steep left-bank slope on peripheral joints

5 结 论

(1) 不对称不规则的河谷地形条件下，高面板堆石坝边界条件和应力路径较复杂，导致坝体和面板应力变形出现多个极值点，梯度变化较大，易对坝体和面板造成不利影响。

(2) 基于不规则“W”型河谷地形，面板张缝主要发生在左侧陡岸坡的中上部和右岸古河床阶地两侧的拐角处，与面板拉应力区相对应；面板周边缝受左岸陡岸坡和右岸古河床阶地影响较大，其量值较大，设计和施工时需进行合理的削坡，提高应力变形协调性，采用适应性好的止水材料。

(3) 通过对比 R1、R2 和原方案的模拟结果，古河床阶地位置，R1 和 R2 方案坝体和面板的应力变形协调性较原方案好，设计和施工时可结合其经济性进行适当的河谷形态处理，如刷坡、对覆盖层进行灌浆处理等，以提高坝体和面板的变形协调性。

(4) 对左岸陡岸坡的模拟分析可得出，岸坡坡比越大，面板周边缝缝位移越大，原方案中面板周边缝沉陷和错动量较大，接近一般止水材料的允许变形上限值，应采用适应性好的止水材料或采取一定的措施进行处理。

参考文献：

[1] 沈 婷, 李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影

- 响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1345 - 1349. (SHEN Ting, LI Guo-ying. Factors for stress behavior of concrete face slab of super-high CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1345 - 1349. (in Chinese))
- [2] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 循环荷载作用下考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 1972 - 1978. (LIU En-long, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. A constitutive model for rockfill materials incorporating grain crushing under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 1972 - 1978. (in Chinese))
- [3] 米占宽, 李国英, 陈生水. 基于破碎能耗的粗颗粒料本构模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1801 - 1811. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, CHEN Sheng-shui. Constitutive model for coarse granular materials based on breakage energy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1801 - 1811. (in Chinese))
- [4] 米占宽, 李国英. 堆石料劣化及其对大坝安全运行影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(11): 1588 - 1593. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying. Deterioration of rockfill and its effect on safe operation of dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(11): 1588 - 1593. (in Chinese))
- [5] FU Zhong-zhi, LIU Si-hong. Formulations of a hydromechanical interface element[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, **27**(5): 697 - 705.
- [6] 朱 晟. 水布垭面板堆石坝施工与运行性状反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊 2): 3689 - 3695. (ZHU Sheng. Back analysis on construction and operation properties of Shuibuya concrete face Rockfill DAM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3689 - 3695. (in Chinese))
- [7] 谢晓华, 李国英. 成屏混凝土面板堆石坝应力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(2): 243 - 246. (XIE Xiao-hua, LI Guo-ying. Stress-deformation analysis of Cheng ping concrete-faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(2): 243 - 246. (in Chinese))
- [8] 李国英. 覆盖层上面板坝的应力变形性状及其影响因素[J]. 水利水运科学研究, 1997, **4**: 348 - 356. (LI Guo-ying. Stress-strain behavior and its affecting factor of CFRD built on riverbed alluvium[J]. Study on Hydraulic Research, 1997, **4**: 348 - 356. (in Chinese))
- [9] 赵魁芝, 李国英. 梅溪覆盖层上混凝土面板堆石坝流变变形反馈分析及安全性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1230 - 1235. (ZHAO Kui-zhi, LI Guo-ying. Back analysis of creep deformation and study on safety of Meixi CFRD built on riverbed alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1230 - 1235. (in Chinese))
- [10] 徐泽平, 邵 宇, 胡本雄, 等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术, 2005, **36**(5): 30 - 33. (XU Ze-ping, SHAO Yu, HU Ben-xiong, et al. Study on stress and deformation properties of high concrete face rock-fill dam in narrow valley[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, **36**(5): 30 - 33. (in Chinese))
- [11] 岑威钧, 任旭华, 李启升. 复杂地形条件下高面板堆石坝的应力变形特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(4): 452 - 455. (CEN Wei jun, REN Xu-hua, LI Qi-sheng. Stress and deformation analysis of high CFRD under complicated topographic condition[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, **35**(4): 452 - 455. (in Chinese))
- [12] 程 嵩, 张 嘎, 张建民, 等. 河谷地形对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水利发电学报, 2008, **27**(5): 53 - 58. (CHENG Song, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, **27**(5): 53 - 58. (in Chinese))
- [13] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1990. (ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computational soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990. (in Chinese))
- [14] 傅 华, 凌 华, 韩华强. 新疆库玛拉克河大石峡水电站砼面板砂砾石坝筑坝材料工程特性试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011. (FU Hua, LING Hua, HAN Hua-qiang. Report of concrete face sand-gravel dam of dashixia hydroelectric power station on Xinjiang Kumalak River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))