文章编号：1000－7598－(2008) 08－2037－06

采用挤压边墙技术的高面板坝裂缝成因分析

周 伟[1]，花俊杰[1]，常晓林[1]，曹艳辉[2]

（1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室，武汉 430072；2. 长江水利委员会设计院，武汉 430010）

摘 要：为加快施工进度，国内很多高面板堆石坝都采用了挤压边墙技术，用上游坡面的挤压边墙代替传统的垫层。挤压边墙的施工特点决定了其与上覆面板之间的结构关系将与传统的面板-垫层有很大差别。虽然目前面板坝的施工技术和施工水平较以前有较大的提高，但少数工程仍然出现了比较严重的面板裂缝，而采用挤压边墙技术的面板坝施工期出现的裂缝分布规律与采用面板-垫层施工方法有明显的不同。面板裂缝的产生与面板施工期的应力变形状态密切相关，目前面板堆石坝计算中采用的整体模型方法对面板的概化较多，得到的面板应力精度较差。根据挤压边墙实际的施工特点，提出采用子模型法分析面板的应力变形，对某面板坝工程裂缝成因的分析结果表明，温降和上游坡面局部高程不平整引起的面板与挤压边墙之间的局部约束过大是导致面板裂缝的主要原因。

关 键 词：面板堆石坝（CFRD）；挤压边墙；面板裂缝；子模型；接触单元

中图分类号：TV 641 **文献标识码：**A

Cause analysis of cracking of concrete slab for high CFRD based on concrete crushing-type side wall technology

ZHOU Wei[1], HUA Jun-jie[1], CHANG Xiao-lin[1], CAO Yan-hui[2]

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to simplify the construction procedure and shorten the construction period, the concrete crushing-type side wall(CSA) technology is widely adopted during constructing many concrete face rockfill dams(CFRD), in which the CSA replaces the traditional cushion as the contact interface with concrete slab. The construction specificity of CSA decides that the larger difference will exist between the contact relation between CSA and concrete slab and the one between cushion and concrete slab. Although recent construction technology has greater development than before, concrete slabs' cracks of a few CFRD still occur seriously. Distributing rule of cracks for CFRD with CSA is not same with ones which adopt traditional cushion. The cracking of concrete slab has great relation with its stress state during construction period. At present the whole computation method of concrete slab stress analysis exists more simplification assume, which results in pour stress accuracy of concrete slab from computation results. Submodeling method is presented to compute the stress and deformation of concrete face slab considering CFRD constructed by stages. A contact friction element with no thickness based on coulomb friction model is applied to simulate the special boundary between CSA and concrete face slab. The actual project analysis result shows that the temperature decrease and the intense constrain with not flattening of upstream slope at some altitude bring about cracking of concrete slab.

Key words: concrete face rockfill dam; concrete crushing-type side wall; concrete slab crack; submodeling method; contact element

1 引 言

混凝土面板堆石坝是目前水电工程中应用较广泛的一种坝型，其结构设计理念就是面板防渗，由堆石体碾压填筑而成的大坝承受上游水荷载。从面板堆石坝的结构设计特点可以看出，面板是整个大坝的关键部位，如果面板发生贯穿性裂缝，则导致大坝漏水，堆石体中的渗流将带走小颗粒，造成大的堆石颗粒出现架空，危及大坝的稳定安全，因此面板的防裂是设计和施工中一个重要的问题。

收稿日期：2006-10-08
基金项目：国家杰出青年科学基金（No.50725931）；国家自然科学基金项目（No.50509019，50779047）。
作者简介：周伟，男，1975 年生，博士，副教授，主要从事高坝结构数值仿真方面的研究和教学工作。E-mail: zw_mxx@163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于各种原因，我国已经建成的一些面板堆石坝的面板出现了裂缝。我国第一座面板堆石坝西北口面板坝在施工期出现了比较严重的裂缝（图 1 图中右 L1 表示右岸第一条面板，左 L1 表示左岸第一条面板，其他以此类推）。面板裂缝大部分发生在面板浇筑后但还没有蓄水的第一年冬天，主要为贯穿裂缝。裂缝几乎遍布整个上游坝面，裂缝的方向基本上是水平的[1]。根据计算分析，西北口堆石坝面板的裂缝主要是由于温度应力和干缩应力引起，而垫层的切向约束为裂缝的产生提供了必要条件。

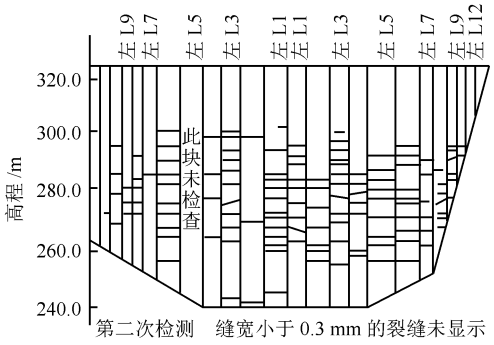


图 1 西北口堆石坝面板的裂缝[1]
Fig.1 The slab crack of Xibeikou CFRD

除了温度裂缝以外，还有一些面板堆石坝发生了面板结构性裂缝，发生的原因主要是堆石流变产生的脱空引起，如我国已经竣工的天生桥一级面板坝[2]就是其例。

文献[3]求出了在均匀温降下面板收缩后受堆石体及侧面先浇块约束时沿断面拉应力分布的解析解。当整个上游面垫层与面板的摩擦约束分布均匀时，这种方法可以求出面板的最大拉应力及其发生位置。文献[4]采用基于罚函数法的接触摩擦处理方法，模拟计算了温降时坝体垫层摩擦约束引起的面板拉应力，主要探讨了拉应力与摩擦角的关系，而凝聚力对面板约束的影响在文中没有考虑。

为了加快施工进度，我国很多高面板堆石坝（如公伯峡、水布垭、芭蕉河）都采用了挤压边墙技术，在每填筑一层垫层料之前，沿着坝轴线方向用挤压边墙机制做出一个半透水的连续的混凝土小墙（图 2），待混凝土凝固后在其内侧按设计要求铺填入坝垫层料，接着用振动碾平面碾压垫层料。

挤压边墙的施工特点决定了其与上覆面板之间的结构关系将与传统的面板-垫层有很大差别。传统的垫层料施工完毕以后，在面板铺设以前还需进行超填、削坡、修整、碾压以及坡面防护等施工程序，以保证上游坡面的平整，而采用挤压边墙施工

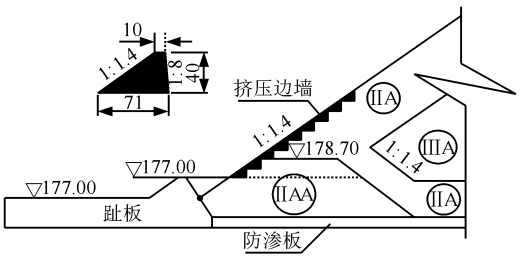


图 2 典型的挤压边墙布置图（单位：m）
Fig.2 The concrete crushing-type side wall of a CFRD (unit: m)

技术以后，由于挤压边墙相对于分段预制的上游坡，对于施工质量良好的挤压边墙，虽然可能会出现比较大的坡面沉陷，但不会导致面板的裂缝，所以一般不进行上述修坡工作。正是由于挤压边墙是沿坝轴线方向一层一层施工完成的，因此或多或少地会出现上下错层的现象（图 3），从接触摩擦的角度来讲，这种上下挤压边墙的错层，会增大挤压边墙对面板的约束作用，是采用挤压边墙施工与传统的垫层施工的主要差别。上下挤压边墙的错层导致的上游坡面不平整度沿顺坡向的分布与挤压边墙的施工质量密切相关的、不均匀的。对于某些高程来讲，可能不平整度较小，坡面比较平顺，而对于某些局部高程不平整度较大。总之，对于采用挤压边墙技术的面板坝，由于其对面板约束的不均匀性，分析面板的应力变形时必须同时考虑摩擦角和凝聚力对面板的约束作用，这样就使得采用上述文献介绍的方法计算面板应力均存在一定的困难。

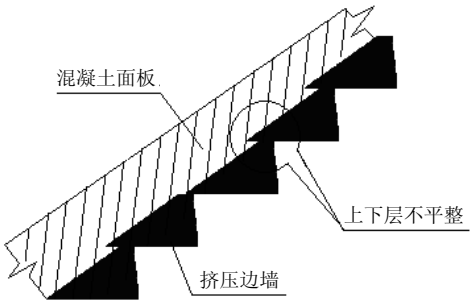


图 3 上下层挤压边墙出现的错层
Fig.3 The concrete crushing-type side wall with no flattening

除了挤压边墙的不均匀约束外，面板本身的模拟方法也对面板应力变形的计算精度有很大影响，在数值计算中直接影响对面板裂缝产生部位及裂缝深度的分析和判断。目前面板堆石坝计算中采用的整体模型方法对面板的概化较多，得到的面板应力精度较差。本文根据挤压边墙实际的施工特点，拟采用基于扩展 Lagrange 乘子法的接触摩擦单元模

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

拟挤压边墙与面板之间的接触关系，采用子模型法分析面板的应力变形，以某个实际工程为例分析其面板裂缝产生的原因。

2　面板-挤压边墙的接触摩擦模型

2.1　摩擦接触问题的变分提法

由弹塑性接触分析的最小位能原理：在所有满足求解区域内的应力-应变关系和位移边界条件的可能增量位移场中，其真实解使弹塑性系统的总势能取驻值[5−9]：

$$\Pi = \Pi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{u}, \boldsymbol{\lambda}) =$$

$$\int_V \left(\frac{1}{2} D_{ijkl}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kl} - \bar{f}\cdot\boldsymbol{u} \right) \mathrm{d}V - \int_S \bar{\boldsymbol{T}}\cdot\boldsymbol{u}\mathrm{d}S - \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{u}) \quad (1)$$

式（1）可取最小值。式中：$\bar{f}$ 为体积力；$\bar{\boldsymbol{T}}$ 为边界上的面力；$\boldsymbol{\lambda}$ 为拉格朗日乘子向量；$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{u})$ 为约束矩阵：

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{u}) = \boldsymbol{u}\boldsymbol{n} - g_0 \quad (2)$$

式中：g_0 为接触面的初始间隙。

2.2　接触单元接触状态的判定

在基于扩展 Lagrange 乘子法求解接触摩擦问题时，存在分离、粘合、滑动 3 种接触状态，计算中按以下顺序进行判断：首先判别接触面法向应力是否为拉应力，是则接触面为分离张开状态；如果接触面法向应力为压应力且接触面切向剪应力小于摩尔-库仑准则所规定的允许剪应力，则接触面处于粘合状态；如果接触面切向剪应力大于摩尔-库仑准则所规定的允许剪应力，则接触面处于滑移状态。接触面张开时所不能承担的应力和接触面发生滑移时超过抗剪强度的那部分将通过扩展 Lagrange 乘子，经过增量迭代转移并重新分配给周围单元。

3　面板-挤压边墙的子模型

子模型法把面板、挤压边墙以及面板周边的混凝土趾板从面板堆石坝的整体模型中脱离出来作为研究对象（图 4），在挤压边墙的底部施加与其相连的已知垫层料位移，在面板的表面施加水压力，进行数值分析。这个方法首先在“九•五”攻关课题“200 米级高混凝土面板堆石坝研究”的水布垭混凝土面板堆石坝应力变形分析中提出[10]。

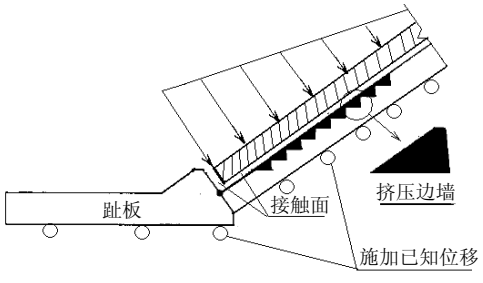


图 4　面板子模型
Fig.4　Submodeling of concrete face

由于子模型的单元网格规模相对较小，因而混凝土面板可以采用精细的单元网格以真实模拟面板沿厚度方向的应力梯度分布，面板也可以采用复杂的非线性本构模型，同时，也可以对面板的竖缝和周边缝进行模拟。

4　某工程面板裂缝的成因分析

4.1　面板裂缝的基本情况介绍

某面板堆石坝分 3 期浇筑，2005 年 1 月浇筑的一期面板（图 5），9 月检查时发现出现了一些有规律分布的水平微裂缝，主要分布在 260 m 至 269 m 高程之间，沿坝轴线贯穿整个一期面板。另外，在高程 240 m 几条面板也出现了类似的水平微裂缝（图 6）。一期面板代表性的浇筑块 L1 的实测温度历程曲线见图 7，可以看出在面板浇筑完毕后，由于混凝土水化热作用导致面板经历了一次温升过

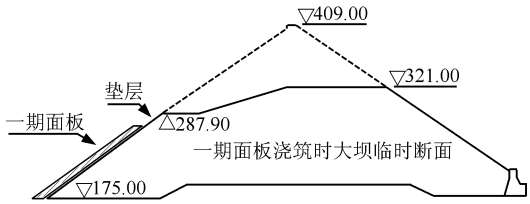


图 5　一期面板浇筑时的大坝临时断面（单位：m）
Fig.5　Temperature dam in the constructing process of first-period concrete slab (unit: m)

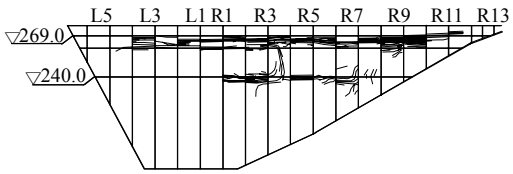


图 6　一期面板的裂缝分布示意（单位：m）
Fig.6　Crack distribution of first-period concrete slab (unit: m)

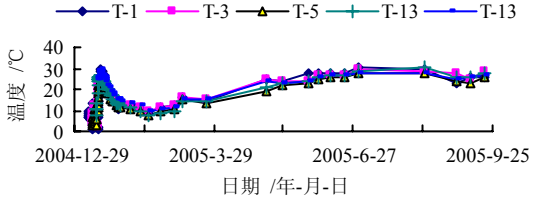


图 7　一期面板 L1 块温度变化过程线
Fig.7　Temperature-time curves of first-period concrete slab L1

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

程，实测最高温度达 30 ℃。最高温度过后，面板在外界气温的影响下温度逐渐下降，不到一个月的时间内面板平均温度下降了近 20 ℃。

4.2 面板裂缝成因分析的计算方案

根据类似工程经验以及该坝面板裂缝的具体情况，可以初步判断面板裂缝是由温降荷载、面板与挤压边墙之间的局部不均匀强约束、面板浇筑完毕后的一期堆石体施工过程中产生的附加变形（本文是指一期面板竣工后堆石体的流变变形）等因素引起的。

关于温降荷载，根据实测的温度历程曲线，本文分别采用均匀温降 5，10，15 ℃以及 30 ℃（极端情况）进行计算，考察不同温降荷载对面板拉应力和裂缝的影响。

面板与挤压边墙之间的局部不均匀强约束，分析前先假定面板的裂缝部分由于上下层挤压边墙不平整引起的强约束导致。根据该工程挤压边墙的力学试验参数（弹性模量为 5.0~7.0 GPa，泊松比为 0.25~0.30，抗压强度为 5.0 MPa，内摩擦角为 30~40°）计算可知挤压边墙属于柔性材料，抗压强度较小。据此，本文在计算时面板-挤压边墙的库仑摩擦接触模型选用刚-柔接触模型，对于挤压边墙施工质量良好的上游坡面部位（240 m 高程以下），接触面的摩擦角取挤压边墙摩擦角的下限，即取 30°，凝聚力取 0。对于上下层挤压边墙不平整引起的强约束部位（260~269 m 高程），就不同的接触面强度参数进行了敏感性分析，其中摩擦角分别取 30°，55°，65°，凝聚力取 0.0，0.2，1.0，5.0 MPa。

对于面板浇筑完毕后的一期堆石体施工过程中产生的附加变形，本文采用实测的垫层位移作为子模型的边界条件。

为了客观判断究竟哪一个因素或者哪几个因素的组合导致了面板的裂缝，本文组合了以下几个工况，采用子模型和接触面单元对一期面板进行了应力变形分析，即工况 1：不考虑一期堆石体引起的附加变形和温降荷载，考虑面板自重。面板与挤压边墙的凝聚力取 0.0，高程 260.0 m 以下面板与挤压边墙之间的摩擦角取 30°，高程 260.0 m 以上分别取 30，55，65°进行比较。工况 2：不考虑一期堆石体引起的附加变形，考虑面板自重。面板与挤压边墙的的摩擦角取 30°，面板与挤压边墙之间的凝聚力取 0。考虑面板均匀温降 5，10，15 ℃和 30 ℃进行比较。工况 3：不考虑一期堆石体引起的附加变形和温降荷载，考虑面板自重。面板与挤压边墙的的摩擦角取 30°，高程 260.0 m 以下面板与挤压边墙之间的凝聚力取 c = 0.0 MPa，高程 260.0 m 以上分别取分别取 0.0，0.2，1.0 MPa 和 5.0 MPa 进行比较。工况 4：不考虑一期堆石体引起的附加变形，考虑面板自重。面板与挤压边墙的的摩擦角取 30°，高程 260.0 m 以下面板与挤压边墙之间的凝聚力取 0.0 MPa，高程 260.0 m 以上取 c = 5.0 MPa。考虑面板均匀温降 5，10，15 ℃和 30 ℃进行比较。工况 5，考虑一期堆石体引起的附加变形（根据文献[11]的计算结果得出），考虑面板自重。面板与挤压边墙的的摩擦角取 30°，高程 260.0 m 以下面板与挤压边墙之间的凝聚力为 0.0，高程 260 m 以上取 5.0 MPa，考虑面板均匀温降 5，10 ℃和 15 ℃进行比较。

4.3 面板应力的子模型计算结果

工况 1~5 不同情况下的面板最大拉应力见表 1 和表 2，限于篇幅，本文只给出了工况 4 不同温降条件下的面板顺坡向拉应力分布图（图 8）。

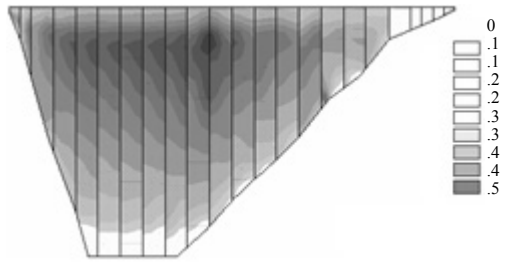
表 1 不同摩擦角、不同凝聚力下的面板最大拉应力
Table 1 Maximal tensile stress for different angle of friction and cohesiveness

工况	260 m 高程以上摩擦角 /（°）	260 m 高程以上凝聚力 /kPa	顺坡向最大拉应力 /kPa
1	30		20
	55		230
	65		310
3		0	10
		200	180
		1 000	190
		5 000	190

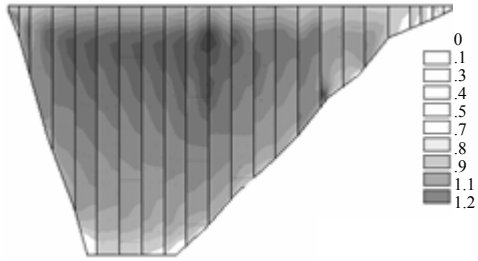
表 2 不同面板均匀温降下的面板最大拉应力
Table 2 Maximal tensile stress for different uniformity reduction of teperature

工况	面板均匀温降 /℃	顺坡向最大拉应力 /kPa
2	5	140
	10	180
	15	300
	30	650
4	5	500
	10	850
	15	1 220
	30	2 700
5	5	310
	10	450
	15	600
	30	2 050

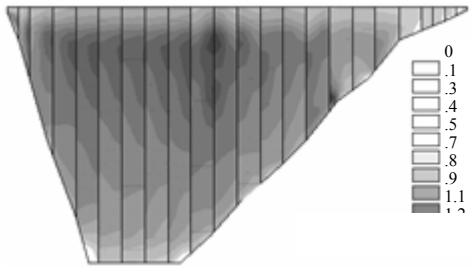
© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



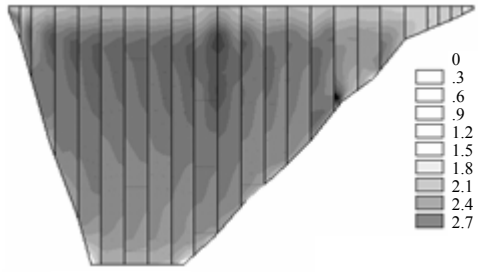
（a）温降 $\Delta T = 5°$



（b）温降 $\Delta T = 10°$



（c）温降 $\Delta T = 15°$



（d）温降 $\Delta T = 30°$

图 8　工况 4 面板顺坡向拉应力分布（单位：MPa）
Fig.8　The tensile stress along dam slope direction of slab for case 4 (unit: MPa)

计算结果说明，对于不考虑二期堆石体引起的附加变形和温降荷载的工况 1 和工况 3，在没有温降荷载时面板与挤压边墙之间的局部约束程度对一期面板的裂缝影响不大。

对于工况 2，面板与挤压边墙的的摩擦角取 30°，不考虑凝聚力，仅考虑面板自重荷载，在均匀温降作用下面板的拉应力随温降有缓慢的增加，说明面板与挤压边墙的接触条件没有突变时，温降荷载对一期面板的裂缝贡献不明显。混凝土面板最大温降 30 ℃时，最大面板顺坡向拉应力不超过 0.65 MPa，此值不足以引起面板的开裂。

对于工况 4，在温降荷载和面板与挤压边墙之间的局部强约束的综合作用下，一期面板在 206.0~269.0 m 高程范围内将产生大于 2.0 MPa 的拉应力，最大拉应力达到 2.7 MPa，此拉应力值与实测的面板最大拉应变 136×10^{-6} 折合的拉应力 2.8 MPa 非常吻合，且计算中局部强约束的假定部位与实际裂缝发生的位置趋于一致，证明温降荷载和面板与挤压边墙之间的局部强约束是导致一期面板发生裂缝的主要原因。

另外，工况 5 的结果表明，堆石体自身的流变附加变形（图 9）对一期面板由于挤压边墙错层产生的局部强约束有削弱作用，表现在面板的最大拉应力上，在温降为 30 ℃时面板的最大拉应力为 2.05 MPa，比工况 4 的最大拉应力小 0.65 MPa。

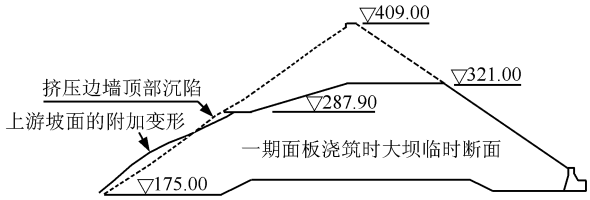


图 9　一期大坝上游坡面的附加变形（单位：m）
Fig.9　The addition deformation of first-period concrete slab (unit: m)

5　结　论

（1）从挤压边墙的施工特点分析了其与上覆面板之间的结构关系与传统的面板-垫层有很大差别。对于传统的垫层料在面板铺设以前还需进行超填、削坡、修整，以保证上游坡面的平整，而采用挤压边墙施工技术以后小于 20 mm 坡面跌坎，一般不进行上述修坡工作。

（2）采用基于扩展 Lagrange 乘子法的接触摩擦单元，模拟了挤压边墙与面板之间的接触关系，用子模型法分析面板的应力变形，可提高面板应力变形的计算精度。

（3）某面板坝工程裂缝成因的分析结果表明，温降和上游坡面局部高程不平整引起的面板与挤压边墙之间的局部约束过大，是导致面板裂缝的主要原因，因此控制坡面的不平整度是保证面板不发生贯穿性裂缝的必要条件。

（4）为了减少由于上游坡面不平整产生的局部强约束，应该在挤压边墙的施工中严格控制施工质

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量，尽量避免上下错层现象发生，对于已经发生错层部位，建议采取局部磨平或者用砂浆填补摸平。

参 考 文 献

[1] 麦家煊，孙立勋. 西北口堆石坝面板裂缝成因的研究[J]. 水利水电技术，1999，30（5）：32－34.
MAI Jia-xuan, SUN Li-xun. Research on causes of fractures of concrete plates faced on Xibeikou rockfill dam[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 1999, 30(5): 32－34.

[2] 曹克明，汪易森，张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J].水力发电，2001，10：49－52.
CAO Ke-ming, WANG Yi-sen, ZHANG Zong-liang. Design and construction of high concrete face rockfill dam[J]. **Water Power**, 2001, (10): 49－52.

[3] 张国新，厉易生. 堆石坝面板收缩性贯穿裂缝的理论分析及防裂措施[J]. 水力发电学报，2005，24（3）：30－33.
ZHANG Guo-xin, LI Yi-shen. Theoretical analysis of through shrinkage cracks in the face slabs of concrete face rockfill dam and the preventive measures[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(3): 30－33.

[4] 张国新，彭静. 考虑摩擦约束时面板温度应力的有限元分析[J]. 水利学报，2001，11：75－79.
ZHANG Guo-xin，PFNG Jinn. Finite element analysis for thermal stress of concrete slabs with friction constraint[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001, 11: 75－79.

[5] CHANG Xiao-lin，ZHOU Wei. A contact model on basis of the augmented lagrange method and engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, (9): 1 568－1 572.

[6] PERIC D, OWEN D R J. Computational model for 3-D contact problems with friction based on the penalty method[J]. **International Journal for Numercial Methods in Engineering**, 1992, 35: 1 289－1 309.

[7] CESCOTTO S, CHARILIER R. Frictional contact finite elements based on mixed variational principles[J]. **International Journal for Numercial Methods in Engineering**, 1992, 36: 1 681－1 701.

[8] SIMO J C, LAURSEN T A. An augmented lagranian treatment of contact problems involving friction[J]. **Computers and Structures**, 1992, 42(1): 97－116.

[9] LAURSEN T A, SIMO J C. Algorithmic symmetrization of coulomb frictional problems using augmented lagrangians[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1993, 108(1 & 2): 133－146.

[10] 长江委规划勘测设计研究院.“九·五”攻关课题“200米级高混凝土面板堆石坝研究”——水布垭混凝土面板堆石坝应力变形分析[R]. 武汉：长江科学院，1999.

[11] 周伟. 高混凝土面板堆石坝流变本构模型理论及其应用[博士学位论文 D]. 武汉：武汉大学，2004.

上接第 2015 页

[4] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. **Journal Geotechnical Engineering**, ASCE, 1977, 103(9): 971－986.

[5] BALIGH M M, AZZOUZ A S. End effects on cohesive slopes[J]. **Journal Geotechnical Engineering**, ASCE, 1975, 101(11): 1 105－1 107.

[6] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimension[J]. **Geotechnique**, 1987, 37: 113－117.

[7] HUNGR O, SALGADO F M, BYRNE P M. Evaluation of a three dimensional method of slope-stability analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1989, 26: 679－686.

[8] XING Z. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. **Journal Geotechnical Engineering**, 114(6): 658－671.

[9] LAM L, FREDLUND D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30: 905－919.

[10] 冯树仁，丰定祥，葛修润，等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报，1999，21（6）：657－661.
FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 657－661.

[11] 陈祖煜，弥宏亮，汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报，2001，23（5）：525－529.
CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 525－529.

[12] ZHU D Y, LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2002, 26: 1 573－1 590.

[13] ZHU D Y, LEE C F, JIANG H D. Generalised framework of limit equilibrium methods and numerical procedure for slope stability analysis[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(4): 377－395.

[14] HOEK E, BRAY J. Rock Slope Engineering[M]. Revised 2nd ed. London: The Institution of Mining and Metallurgy, United Kingdom, 1977.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net