

接缝简化模型及参数对面板堆石坝面板应力及接缝位移的影响研究

邹德高^{1,2}, 尤华芳^{1,2}, 孔宪京^{1,2}, 徐斌^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过大量的三维面板堆石坝有限元分析, 研究不同止水结构形式对面板堆石坝面板应力和接缝位移的影响。在此基础上, 建议简化的面板堆石坝接缝模型, 简化模型具有简单的表达形式和较少的参数, 方便面板堆石坝的有限元计算分析, 可满足精度要求。通过对简化模型参数进行敏感性分析, 建议简化模型参数取值范围和改善面板应力的工程措施。

关键词: 水利工程; 混凝土面板堆石坝; 接缝模型; 面板应力; 接缝位移

中图分类号: TV 641.4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 3257 - 07

RESEARCH ON JOINT SIMPLIFIED MODEL AND EFFECTS OF JOINT PARAMETERS ON PANEL STRESS AND JOINT DISPLACEMENTS OF FACED ROCKFILL DAM

ZOU Degao^{1,2}, YOU Huafang^{1,2}, KONG Xianjing^{1,2}, XU Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The effects of different water seal structures on stress of facing slab and joint displacements of concrete-faced rockfill dam(CFRD) are studied through a large number of three-dimensional finite element analyses. Furthermore, a joint simplified model which is simpler and has fewer parameters is proposed. And it has a good accuracy. Therefore, it makes finite element analysis of CFRD easier. In addition, a range of parameters of simplified model and engineering measures for improving the stress of facing slab are proposed by a sensitivity analysis of parameters.

Key words: hydraulic engineering; concrete-faced rockfill dam(CFRD); joint model; stress of facing slab; joint displacements

1 引言

混凝土面板堆石坝由于其安全性良好、适应性

强、工期短和造价低等特点成为高坝建设中最富竞争力的坝型之一^[1]。目前, 已建成的面板堆石坝的高度已达 200 m; 300 m 级的面板堆石坝也在规划研究中。随着面板堆石坝高度的不断增加, 其面板应

收稿日期: 2009 - 02 - 09; **修回日期:** 2009 - 03 - 12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(50808032); 国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金项目(50679093); 国家自然科学基金重大研究计划项目(90815024); 教育部创新团队发展计划(IRT0518)

作者简介: 邹德高(1973 -), 男, 博士, 1995 年毕业于烟台大学工业与民用建筑专业, 现任副教授, 主要从事土动力学与高土石坝抗震、粗粒土力学特性、岩土工程数值分析及软件开发、核电厂构筑物抗震等方面的教学与研究工作。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn

力和接缝变形变得越来越复杂，为了更进一步了解混凝土面板堆石坝的应力应变状态，岑威钧和李星^[2]在二维及三维数值计算中对混凝土面板堆石坝进行了堆石模型、接触面模型和接缝模型的研究。由于接缝问题的复杂性，在接缝的模拟过程中对各种参数的选取目前尚未取得一致结论^[2, 3]。

“七五”，“九五”期间，在面板堆石坝攻关项目中进行了一些关于接缝止水结构的试验研究，同时对接缝数值模拟进行了探讨。其中河海大学所做的关于止水材料的试验研究，为接缝有限元数值模拟提供了计算参数，但其计算参数较多，给程序编写和计算带来许多不便。因此，本文在“七五”攻关所给模型^[4]的基础上，做了接缝模型计算参数的数值敏感性分析，在保证面板应力和缝位移计算精度的前提下，简化了计算模型和参数取值。在此基础上，建议了改善面板应力的工程措施。

2 接缝模拟方法

面板坝周边缝和垂直缝是由止水和木板组成的，因此研究缝的模型要同时考虑木板和止水的变形。由于木板的压缩模量较大，接缝受压时可仅考虑木板的作用，而当接缝张开和剪切时，可仅考虑止水的作用。目前，缝的模拟一般都采用无厚度 Goodman 单元和薄层单元等方法模拟^[5]。考虑止水时，可以根据止水材料试验成果，选用无厚度 Goodman 单元形式，止水应力和位移的关系可表示为

$$\begin{Bmatrix} F_{yx} \\ F_{yy} \\ F_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{yz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{yx} \\ \delta_{yy} \\ \delta_{yz} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： F_{yx} ， F_{yz} 均为缝切向应力； F_{yy} 为缝法向应力； k_{yy} 为缝的法向刚度； k_{yz} ， k_{yx} 均为缝的切向刚度； δ_{yx} ， δ_{yz} 分别为缝两边的切向相对位移； δ_{yy} 为缝两边的法向相对位移。

河海大学在“七五”攻关时根据试验结果建议了止水的受力与变形关系，其参数见表 1^[4]。其中参数 a ， b ， c 由试验确定，止水的刚度 k 由 $dF/d\delta$ 确定。

3 计算模型和参数

3.1 大坝模型

表 1 止水片应力与位移关系^[4]

Table 1 Relationship between stress and displacements of water seal^[4]

受力情况	止水铜片	橡胶止水片
受拉	$\delta = F/(a + bF)$	$F = k\delta$
	$a = 1.75, b = 4.76$	$k = 400(\delta < 0.0115)$ $k = 60(\delta \geq 0.0115)$
受压	$\delta = F/(a + bF)$	$F = k\delta$
	$a = 6.5, b = 4.1$	$k = 53(\delta < 0.0115)$ $k = 96(\delta \geq 0.0115)$
沿面板法向剪切	$\delta = F/(a + bF)$	$F = k\delta$
	$a = 22.5, b = 4.0$	$k = 0$
沿趾板走向剪切(周边缝)	$F = k\delta$	$F = k\delta$
	$k = 60.8(\delta < 0.0125)$	$k = 140$
沿顺坡向剪切(垂直缝)	$k = 56.0(\delta \geq 0.0125)$	

注： δ 单位为 m； F 单位为 10 kPa。

计算模型采用了均质面板堆石坝方案。坝高为 100 m，坝坡为 1：1.4，岸坡为 1：1.2，对称河谷，面板一次浇筑至坝顶，蓄水高度为 80 m，面板厚度为 0.300+0.003 5H。

大坝的三维有限元网格共有单元 2 086 个，节点 2 400 个。面板和坝体采用六面体等参元和少量退化的四面体单元(面板单元 140 个，堆石体单元 1 630 个)。在面板与堆石体交界面、趾板与堆石体交界面设置八节点空间 Goodman 单元(共计 163 个)，面板垂直缝、周边缝采用八节点空间 Goodman 单元(面板缝 130 个，周边缝 23 个)。三维空间网格如图 1 所示，接缝网格如图 2 所示。

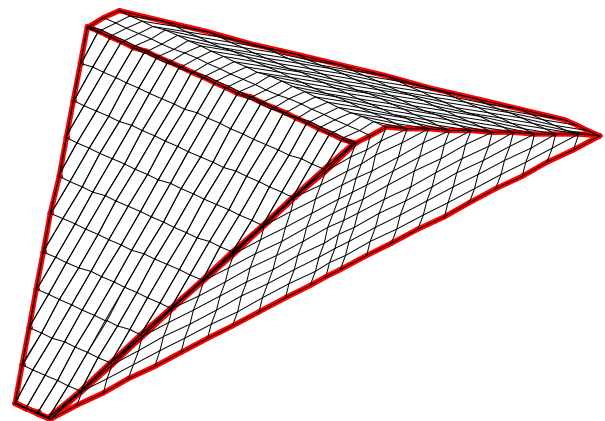


图 1 大坝三维网格图

Fig.1 Three-dimensional meshes of dam

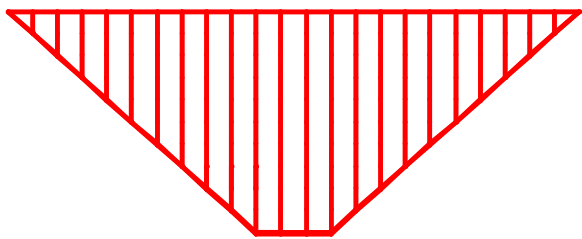


图 2 接缝网格图
Fig.2 Meshes of joints

3.2 堆石体材料参数

堆石体应力应变关系采用邓肯 E-B 模型, 本文采用水布垭主堆石料 E-B 模型参数^[6], 如表 2 所示 (ϕ_0 , $\Delta\phi$ 均为强度指标, R_f 为破坏比, K 为弹性模量系数, n 为弹性模量指数, K_b 为体积模量系数, m 为体积模量指数)。

表 2 邓肯模型 E-B 参数表^[6]
Table 2 Parameters of Duncan E-B model^[6]

填筑密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	$\phi_0(^{\circ})$	$\Delta\phi(^{\circ})$	K	n	R_f	K_b	m
2.15	52	8.5	1 100	0.35	0.82	600	0.10

3.3 接触面材料参数

面板与堆石之间接触面也采用无厚度 Goodman 单元进行模拟, 其计算模型采用邓肯和克拉夫提出的双曲线模型^[7]。对于三维问题, 2 个切线方向的刚度分别为

$$K_{yx} = k_1 \gamma_w \left(\frac{\sigma_y}{P_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f \tau_{yx}}{\sigma_y \tan \phi} \right)^2 \quad (2)$$

$$K_{yz} = k_1 \gamma_w \left(\frac{\sigma_y}{P_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f \tau_{yz}}{\sigma_y \tan \phi} \right)^2 \quad (3)$$

式中: γ_w 为水容重; P_a 为大气压力; K_{yx} , K_{yz} 均为切向剪切模量系数; k_1 为接触面弹性模量系数; σ_y 为接触面法向应力; τ_{yx} , τ_{yz} 均为接触面剪应力。

本文采用的试验参数见表 3^[4]。接触面的法向模量在受拉时取较小值(如 10 kPa/m), 受压时取较大值(如 10^7 kPa/m)。

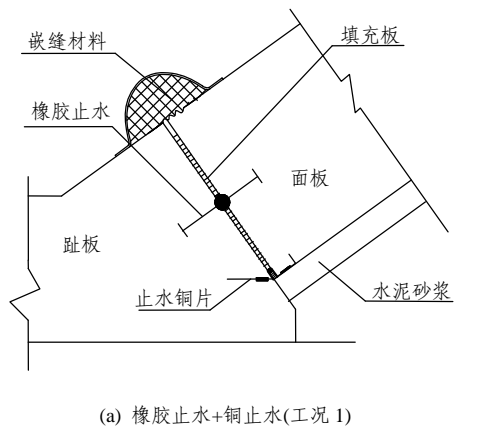
表 3 接触面模型参数^[4]
Table 3 Parameters of contact model^[4]

k_1	n	$\phi(^{\circ})$	R_f
4 800	0.56	36.6	0.74

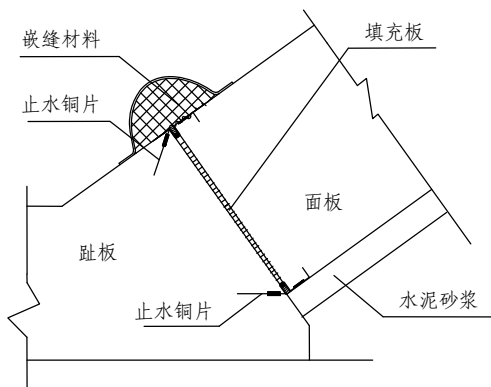
4 接缝模型简化研究

4.1 止水结构形式对面板应力和接缝位移的影响

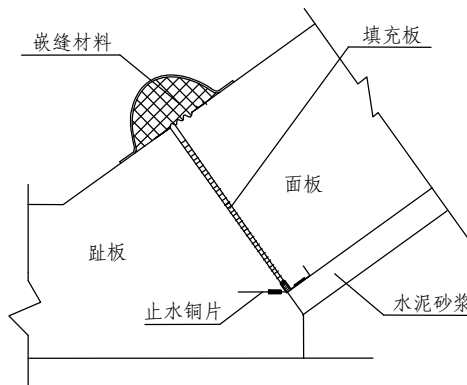
为了研究不同止水对面板坝面板应力和接缝位移的影响, 根据常见的止水结构形式^[8~12], 本文研究了下面的 3 种止水结构形式(见图 3): 橡胶止水+铜止水(工况 1); 两道铜止水(工况 2); 一道铜止水(工况 3)。



(a) 橡胶止水+铜止水(工况 1)



(b) 两道铜止水(工况 2)



(c) 一道铜止水(工况 3)

图 3 3 种止水结构简图

图 3 Simplified schemes of water seal structures for three cases

图4为工况2计算的满蓄期面板应力等值线图。面板顺河向最大压应力发生在河床部位约 1/2 坝高附近，最大拉应力发生在河床部位的面板底部；面板坝轴向最大压应力发生在河床部位约 1/3 坝高附近，基本没有出现拉应力。图5为工况2计算的满蓄期缝位移(张开(+)或压缩(-))，可以看出，周边缝和垂直缝的位移基本呈两岸对称分布。总体上看，计算的面板应力和缝的位移符合一般规律。

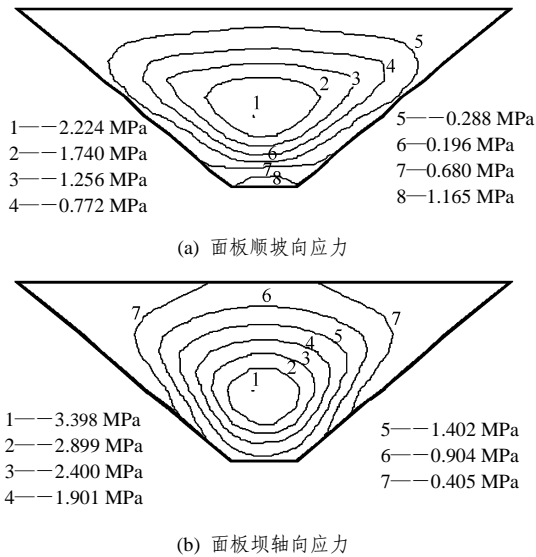


图4 工况2面板应力等值线图

Fig.4 Isolines of stress of facing slab for case 2

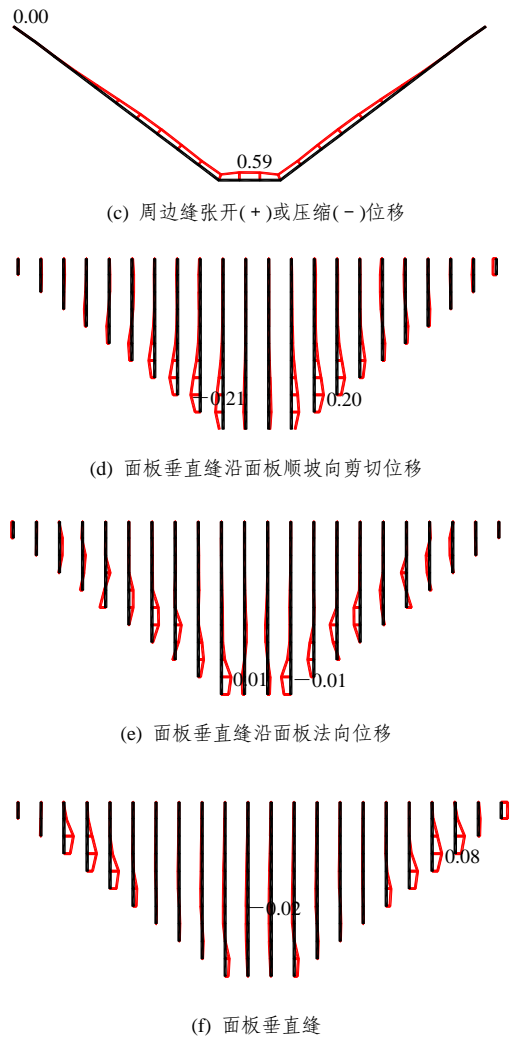
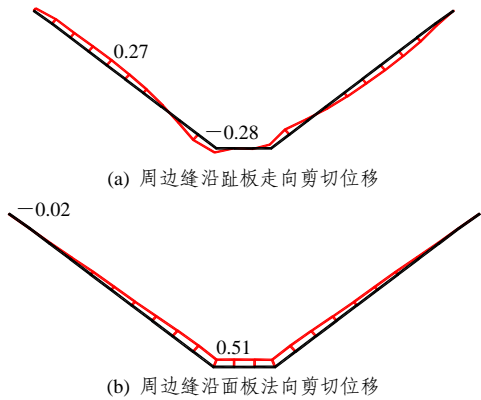


图5 工况2接缝位移(单位: cm)

Fig.5 Displacements of joints for case 2(unit: cm)

表4为3种工况下面板应力及接缝位移最大值汇总表。可以看出，3种工况计算得到的面板应力和缝位移十分接近，这说明止水的结构形式对于数值计算的结果影响不大，本文将3种工况计算结果进行平均，作为进一步简化模型时的精度比较基准值。

表4 3种工况下面板应力和缝位移的最大值

Table 4 The maximum stress of facing slab and displacements of joints for three cases

工况	面板轴向应力/MPa		面板顺坡向应力/MPa		周边缝位移/cm				面板垂直缝位移/cm			
	受压	受拉	受压	受拉	面板法向剪切	沿趾板走向剪切	压缩	张拉	面板法向剪切	顺坡向剪切	压缩	张拉
1	-3.392	0.098	-2.231	1.154	0.52	0.290	0	0.60	0.01	-0.21	0.02	0.090
2	-3.398	0.094	-2.224	1.165	0.51	0.280	0	0.59	0.01	-0.21	0.02	0.080
3	-3.401	0.093	-2.248	1.058	0.53	0.280	0	0.61	0.01	-0.21	0.02	0.080
平均值	-3.397	0.095	-2.234	1.126	0.52	0.283	0	0.60	0.01	-0.21	0.02	0.083

4.2 简化的接缝模型

止水材料 2 个剪切方向上的模量与面板模量相比均很小, 且 2 个方向的剪切特性大致相同^[1], 为便于研究, 将剪切参数均采用止水沿面板顺坡向的剪切参数。另外, 在数值计算中总是期望能够找到简单的模型来模拟材料的实际受力情况, 本文尝试运用最小二乘法将止水片受力与变形关系拟合为直线来近似模拟。这样, 接缝受压时取木板弹性模量(取 1 GPa)折算成 Goodman 单元的刚度, 缝受拉和剪切时则根据止水片拟合结果取线性关系。接缝简化后的模型及其参数见表 5, 简化后的模型参数只有 3 个, 分别为 k_1 , k_2 和 k_3 , 计算大为简化。

表 5 简化后接缝的应力 - 位移关系
Table 5 Simplified stress-displacement relations of joints

受力情况	力与位移关系
受压(考虑木板)	$F = k_1\delta$ ($k_1 = 25.000$ GPa/m)
受拉(考虑止水)	$F = k_2\delta$ ($k_2 = 0.282$ MPa/m)
剪切(考虑止水)	$F = k_3\delta$ ($k_3 = 1.190$ MPa/m)

表 6 为简化前后面板应力和缝位移计算最大值, 可以看出, 简化前后的计算结果差别很小, 简化后的最大计算误差仅为 3.6%, 在工程允许的误差范围之内。由于缝的拉伸模量和剪切模量均远远小于面板混凝土的弹性模量, 对整个刚度阵的贡献几乎可以忽略, 因此其模型可采用简单表达形式。

5 接缝简化模型的参数敏感性分析

为了进一步研究接缝简化模型的参数选取对面板应力及接缝位移的影响, 本文对简化后的参数进行了敏感性分析, 以便给出合理的参数选取范围,

为实际工程应用提供参考。

5.1 压缩参数的影响

为保证止水的正常工作, 缝一般都设计一定的缝宽, 并设置具有一定强度的填充板, 填充板压缩模量的高低对面板应力有着重要的影响。当填充板的压缩模量很大时, 其传递给面板的应力就会较大, 有可能造成位于河谷中央的面板应力集中, 从而导致面板挤压破坏^[13], 图 6 为一个面板挤压破坏的实例。因此选择合适的填充板对实际工程有着重要的指导意义。

接缝受压时的压力主要由缝中木板承受, 蒋国澄等^[1]建议木材的压缩模量取值为 0.8~1.0 GPa。为了研究不同压缩模量的填充板对面板应力及接缝位移的影响, 本文选取的压缩模量范围为 0.1~10.0 GPa。图 7, 8 给出了计算所得的面板应力和接缝位移与填充板压缩模量的关系。

从图 7, 8 可以看出, 接缝中间填充板的压缩模量对面板坝轴向压应力和压缩位移影响较为明显, 对其他结果影响很小。因此, 在实际工程中可以在河谷部位的选取压缩模量较低的填充板, 这样可适当减轻面板坝轴向的压应力集中, 避免面板发生挤压破坏。

5.2 拉伸参数的影响

本文简化后止水片的拉伸模量约为 0.28 MPa/m, 为了研究拉伸刚度对计算结果的影响, 将拉伸模量调整为原来的 0.1, 0.4, 4.0 和 10.0 倍进行计算分析。图 9, 10 给出了计算得到的不同拉伸模量与面板应力及接缝位移曲线。

从图 9, 10 可以看出, 拉伸模量对面板应力及接缝位移的影响都很小, 拉伸模量选取为 0.1~1.0 MPa/m, 其精度可控制在工程允许范围之内。

5.3 剪切参数的影响

简化后止水片剪切时模量约为 1.19 MPa/m, 为

表 6 简化前后面板应力和缝位移计算最大值

Table 6 The maximum stresses of facing slab and displacements of joints before/after models being simplified

工况	面板轴向应力/MPa		面板顺坡向应力/MPa		周边缝位移/cm				面板垂直缝位移/cm			
	受压	受拉	受压	受拉	面板法向剪切	沿趾板走向剪切	压缩	张拉	面板法向剪切	顺坡向剪切	压缩	张拉
模型简化前	-3.397	0.095	-2.234	1.126	0.52	0.283	0	0.60	0.01	-0.21	0.02	0.083
模型简化后	-3.399	0.094	-2.233	1.145	0.52	0.280	0	0.60	0.01	-0.21	0.02	0.080

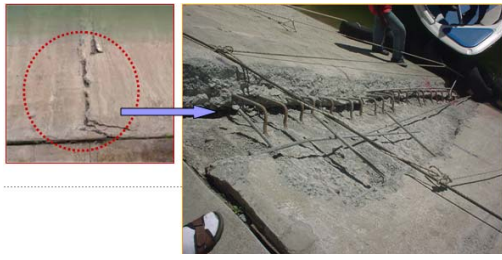


图6 面板坝面板挤压破坏实例

Fig.6 An example of the facing slab failure

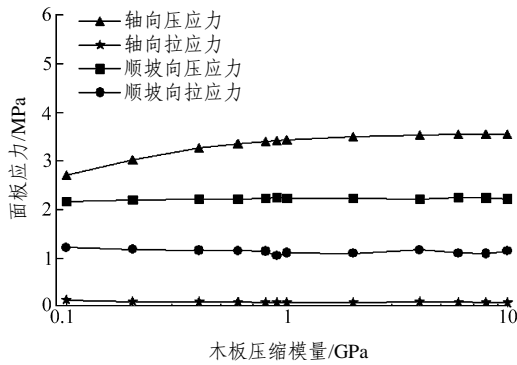


图7 木板压缩模量与面板应力关系

Fig.7 Relationship between wood block compression moduli and stress of facing slab

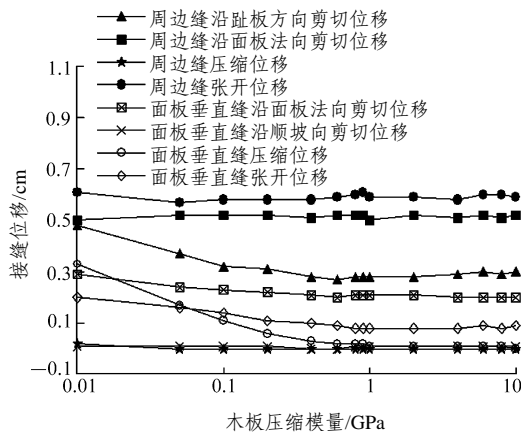


图8 木板压缩模量与接缝位移关系

Fig.8 Relationship between wood block compression moduli and displacements of joints

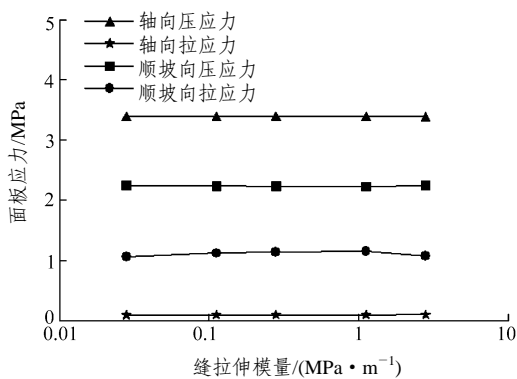


图9 缝拉伸模量与面板应力关系

Fig.9 Relationship between tensile moduli of joints and stress of facing slab

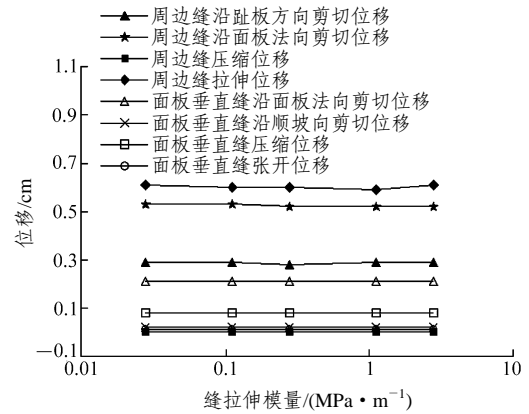


图10 缝拉伸模量与位移关系

Fig.10 Relationship between tensile moduli and displacements of joints

了研究剪切模量对计算结果的影响, 将剪切模量调整为原来的 0.10, 0.25, 2.00, 2.50, 4.00 和 10.00 倍进行计算分析。图 11, 12 分别给出了计算得到的不同剪切模量与面板应力及接缝位移曲线。

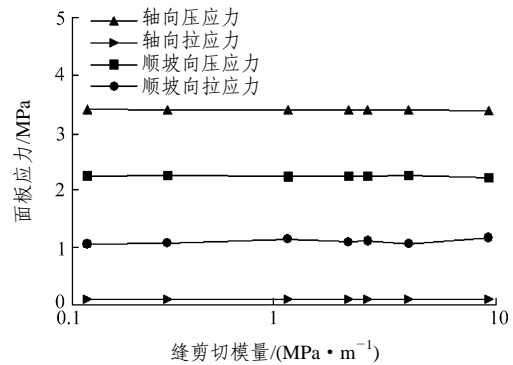


图11 缝剪切模量与面板应力关系

Fig.11 Relationship between shear moduli of joints and stress of facing slab

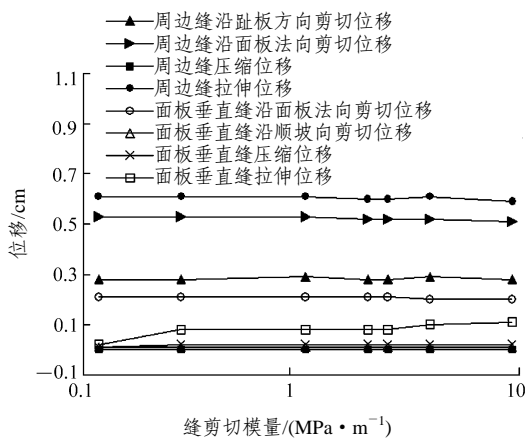


图12 缝剪切模量与位移关系

Fig.12 Relationship between shear moduli and displacements of joints

从图 11, 12 可以看出, 剪切模量的变化对面板应力的影响不大。根据计算结果, 本文建议剪切模量选取为 0.2~2.0 MPa/m。

6 结 论

本文以一个典型的混凝土面板均质堆石坝为例, 进行了面板接缝简化模型及参数选取的研究, 得出以下结论:

(1) 接缝中止水材料的变形特性对面板堆石坝面板应力和接缝位移的影响很小, 建议今后研究接缝模型时应重点关注止水材料的变形能力和止水效果。

(2) 经过本文简化后的接缝模型可以更加方便地用于面板堆石坝有限元计算中, 且不影响计算分析的精度。

(3) 在面板堆石坝的三维静力计算中, 接缝中填充板弹性模量的高低对面板坝轴向压应力的影响比较明显, 在面板压应力较大部位的接缝中可采用弹性模量较小的填充板, 这对改善面板应力, 防止出现挤压破坏是非常有利的。

参考文献(References):

- [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.(JIANG Guocheng, FU Zhi'an, FENG Jiaji. Concrete-faced rockfill dam engineering[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 岑威钧, 李 星. 面板数值分析中接触面模型与接缝模型评述[J]. 水力发电学报, 2007, 33(2): 38 - 41.(CEN Weijun, LI Xing. Review of the contact-surface model and joint model in numerical analysis of concrete-faced rockfill dam(CFRD)[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 33(2): 38 - 41.(in Chinese))
- [3] 詹达美, 卢廷浩. 面板坝周边缝结构模型试验及本构关系研究[J]. 红水河, 2002, 21(3): 50 - 53.(ZHAN Damei, LU Tinghao. Structure model test and constitutive relations on peripheral joint of concrete-faced rockfill dam(CFRD)[J]. Hongshui River, 2002, 21(3): 50 - 53.(in Chinese))
- [4] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.(GU Ganchen. Earth-rock dam in earthquake engineering[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988.(in Chinese))
- [5] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BRECKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1968, 94(3): 637 - 659.
- [6] 罗先启, 葛修润. 混凝土面板堆石坝应力应变分析方法研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.(LUO Xianqi, GE Xiurun. Research on the stress and strain analysis method of concrete-faced rockfill dam (CFRD)[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese))
- [7] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, 97(12): 1 657 - 1 672.
- [8] 闻晓莉. 九甸峡混凝土面板堆石坝接缝止水设计[J]. 甘肃水利水电技术, 2008, 44(3): 196 - 197.(WEN Xiaoli. Jiudianxia concrete-faced rockfill dam(CFRD) joints sealing design[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technologies, 2008, 44(3): 196 - 197.(in Chinese))
- [9] 熊泽斌, 黄良锐, 李晓鄂, 等. 水布垭大坝止水系统设计与试验研究[J]. 人民长江, 2007, 38(7): 33 - 34.(XIONG Zebin, HUANG Liangrui, LI Xiao'e, et al. Shuibuya dam waterstop system design and experimental study[J]. Yangtze River, 2007, 38(7): 33 - 34.(in Chinese))
- [10] 郝巨涛, 鲁一晖, 贾金生, 等. 混凝土面板堆石坝接缝止水技术的新进展[J]. 水力发电学报, 2005, 31(12): 77 - 79.(HAO Jutao, LU Yihui, JIA Jinsheng, et al. New advance on the joint watertight techniques of concrete-faced rockfill dam(CFRD)[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 31(12): 77 - 79.(in Chinese))
- [11] 刘先行, 杜丽惠. 高面板堆石坝混凝土面板与防渗设计总结[J]. 水力发电学报, 2008, 34(3): 37 - 39.(LIU Xianxing, DU Lihui. Summary of design of face slab and impervious measures for concrete-faced rockfill dam(CFRD)[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 34(3): 37 - 39.(in Chinese))
- [12] 宋永杰. 关于周边缝止水结构设计的探讨[J]. 水利水电技术, 1999, 30(3): 20 - 21.(SONG Yongjie. Design of peripheral water seal joint[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(3): 20 - 21.(in Chinese))
- [13] 徐泽平. 高面板堆石坝挤压破坏问题研究[J]. 水力发电学报, 2007, 33(9): 80 - 84.(XU Zeping. Research on concrete face slab rupture of high concrete-faced rockfill dam(CFRD)[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 33(9): 80 - 84.(in Chinese))