

覆盖层上面板堆石坝趾板与基础连接方式的研究

沈婷¹, 李国英¹, 李云², 李娟², 冯业林²

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210024; 2. 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要:采用三维弹塑性有限元分析, 对那兰水电站混凝土面板堆石坝趾板与基础的两种连接方式——刚性连接与柔性连接进行了比选及技术论证。不同连接方式下的坝体应力与变形计算结果表明: 两种连接方式对坝体、坝基及混凝土面板的应力与变形影响很小; 但对防渗墙和趾板的变形有较大影响, 刚性连接下防渗墙与趾板的变形要小于柔性连接情况; 两种连接方式下防渗墙和趾板的应力总体上没有很显著的差异, 都在其应力允许范围内; 两种连接方式下, 面板周边缝变位差别较大, 采用刚性连接方式时, 面板周边缝有较大沉陷, 甚至超过一般止水构件所能承受的变形能力。综合对比两种连接方式下的坝体应力、变形计算结果, 建议采用柔性连接方式连接趾板与基础。

关键词:水电工程; 混凝土面板堆石坝; 趾板; 基础; 刚性连接; 柔性连接

中图分类号: TV 641.4⁺3; TV 242.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2005)14-2588-05

NUMERICAL ANALYSIS OF JOINT TYPES BETWEEN TOE SLAB AND FOUNDATION OF CFRD IN ALLUVIAL DEPOSIT LAYER

SHEN Ting¹, LI Guo-ying¹, LI Yun², LI Juan², FENG Ye-lin²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Kunming Investigation Design and Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: Two types of joints, the rigid joint and the flexible joint, between toe slab and foundation of the concrete-faced rockfill dam(CFRD) of the Nalan Hydropower Power Station are analyzed by 3D elastoplastic finite element method. Numerical results show that the joint types make small difference to stress-strain behavior of dam, dam foundation and face slab, and they have no obvious influence on stress behavior of toe slab and diaphragm wall, but obvious influence on deformation behavior of toe slab and diaphragm wall. The deformations of toe slab and diaphragm wall in the rigid joint are smaller than the flexible joint. The results of the rigid joint show that deformations of facing joint are quite big, even exceed the deformation capacity of common sealing structure. The flexible joint is recommended based on this numerical analysis.

Key words: hydraulic engineering; concrete-faced rockfill dam(CFRD); toe slab; foundation; rigid joint; flexible joint

1 引言

目前国内已建、在建的面板堆石坝已逾百座, 其中 100 m 以上的有 31 座, 2000 年建成的天生桥一级面板坝坝高 178 m, 高 233 m 的水布垭面板坝正在建设中^[1]。但在覆盖层上直接修建面板堆石坝

的则为数不多, 特别是在覆盖层上修建的坝高超过 100 m 的高面板坝实例则更少^[1-3]。对于在覆盖层上的混凝土面板堆石坝, 坝体防渗体系的应力与变形性状对工程成败有重大影响, 工程设计中应予认真研究。防渗体系应力与变形影响因素较多, 其中最主要的有覆盖层工程特性、趾板与基础连接方式、防渗墙与趾板连接方式等^[4-6]。一般趾板与基

收稿日期: 2004-04-13; **修回日期:** 2004-06-24

作者简介: 沈婷(1972-), 女, 硕士, 1995年毕业于中国地质大学(武汉)水文地质与工程地质专业, 主要从事岩土工程数值计算与理论分析方面的研究工作。E-mail: tshen@njhri.edu.cn.

础连接有刚性连接和柔性连接两种, 本文借助数值分析手段主要对那兰水电站面板坝的趾板与基础的连接方式进行了比选及技术论证, 为那兰水电站混凝土面板堆石坝的防渗体系设计提供了理论依据。

那兰水电站位于云南省红河州金平县境内藤条江下游河段, 为藤条江干流 5 梯级开发方案中的最后 1 个梯级。电站枢纽主要建筑物为混凝土面板堆石坝, 为 2 级建筑物, 最大坝高 108.7 m, 水库正常蓄水位 425 m, 相应库容为 $2.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。电站装机容量 150 MW, 年发电量 $6.73 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。覆盖层厚度 17~24 m。那兰水电站混凝土面板堆石坝标准剖面如图 1 所示。

2 计算方法及计算参数

计算采用三维总应力有限元方法进行^[7, 8]。堆石料和坝基砂砾料的应力-应变关系用沈珠江院士提出的“南水”双屈服面弹塑性模型模拟, 该模型

应用方便, 模型参数确定简单, 且可直接应用邓肯模型参数进行计算^[8]。各种筑坝材料的模型计算参数如表 1 所示。混凝土面板、趾板(连接板)、防渗墙应力应变关系采用线弹性模型模拟。混凝土面板弹性模量 $E = 24 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.167$; 趾板弹性模量 $E = 22 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.167$; 混凝土防渗墙弹性模量 $E = 18 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.167$ 。

图 2 为三维有限元网格剖分图。计算时在混凝土结构与坝料及覆盖层之间设置薄层单元以模拟两者之间的相互作用。面板周边缝用薄层单元模拟^[9, 10], 面板垂直缝用分离缝模型模拟^[8]。

3 不同趾板与基础连接方式下面板堆石坝应力与变形

趾板与基础连接方式有两种: 柔性连接与刚性连接。柔性连接即是趾板覆于基础上, 端部分别与

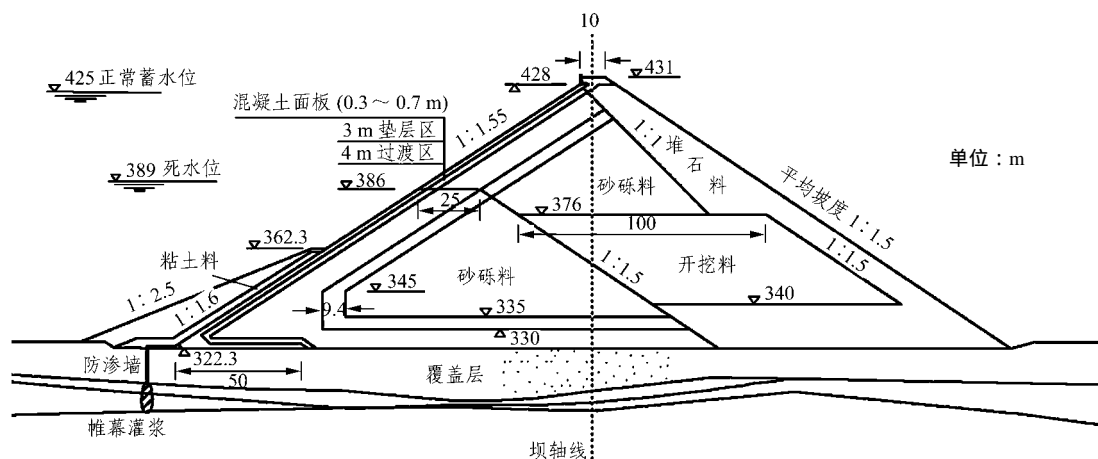


图 1 那兰水电站混凝土面板堆石坝标准剖面

Fig.1 Typical section of concrete-faced rockfill dam of the Nalan Hydraulic Power Station

表 1 坝料模型计算参数

Table 1 Model parameters of fill materials

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	K	K_{ur}	c / kPa	$\phi_b / (^\circ)$	$\Delta\phi / (^\circ)$	R_f	n	G	F	D
2A 垫层料	2.24	1 200	1 800	0	52	4.5	0.85	0.45	0.46	0.25	5.6
3A 过渡料	2.20	900	1 400	0	50	5.0	0.80	0.40	0.38	0.45	6.8
3B ₁ 砂砾料	2.20	1 100	1 600	0	49	6.0	0.78	0.42	0.44	0.19	4.1
3B ₂ 开挖料	2.20	850	1 300	0	48	8.0	0.75	0.40	0.42	0.45	6.8
3C 堆石料	2.18	900	1 400	0	51	7.5	0.80	0.46	0.40	0.42	6.5
排水体	2.10	700	1 200	0	53	8.5	0.75	0.45	0.39	0.40	6.0
覆盖层	2.00	800	1 200	0	47	5.5	0.78	0.40	0.43	0.40	7.0
薄层	2.10	1 000	1 500	0	48	4.5	0.80	0.40	0.44	0.20	4.5
泥皮	1.40	100	150	3	10	0.0	0.50	0.45	0.30	0.10	0.5
沉渣	1.60	700	1 200	6	36	0.0	0.70	0.50	0.36	0.10	1.2

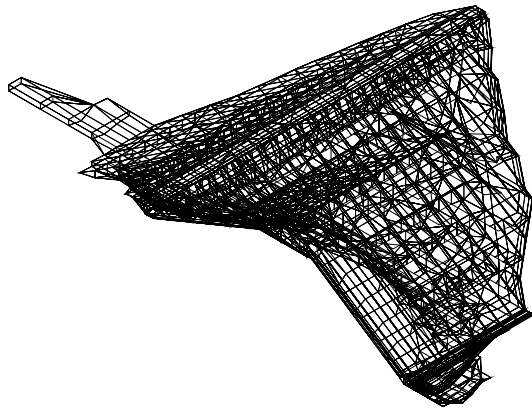


图 2 三维网格剖分图
Fig.2 Meshes of dam

防渗墙及面板柔性止水连接；刚性连接则是将趾板两端分别与防渗墙及钻孔灌注桩固定连接，混凝土防渗墙与钻孔灌注桩嵌入基岩 1 m。两种连接方式见图 3 所示。

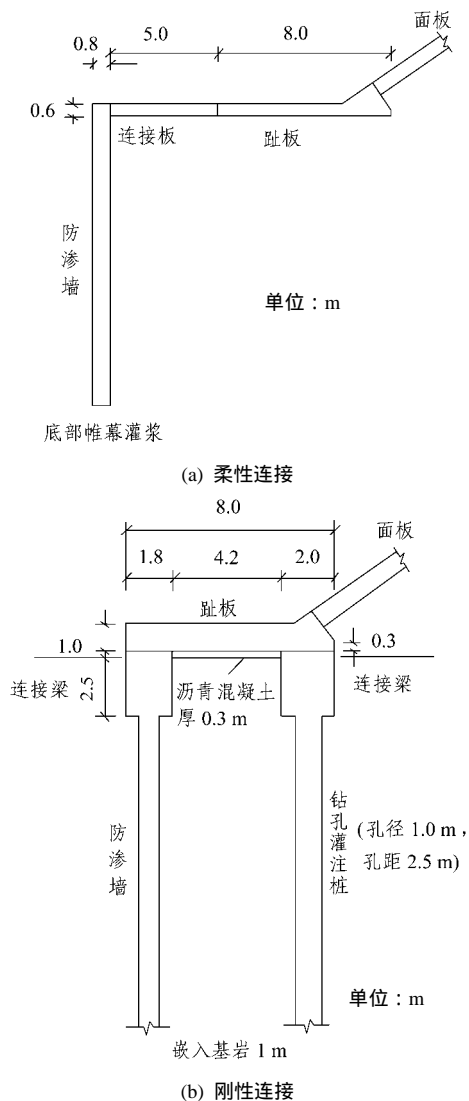


图 3 趾板与基础连接方式

Fig.3 Joints between toe slab and dam foundation

3.1 坝体变形

竣工时与蓄水至正常蓄水位时坝体最大剖面变形计算结果如表 2 所示。由表 2 可见，不同趾板与基础连接形式下，坝体、坝基的变形相近。

表 2 坝体最大剖面变形
Table 2 Deformation of dam body

连接方式	竣工期		蓄水期			
	水平位移/cm		沉降 /cm	水平位移/cm		沉降 /cm
	上游向	下游向		上游向	下游向	
柔性连接	6.0	10.3	40.1 (32.4)	2.6	11.1	42.8 (35.7)
刚性连接	6.1	10.3	40.0 (32.1)	2.6	11.1	42.6 (35.4)

注：括号内数值为坝基面最大沉降。

3.2 面板变形与应力

两种连接方式下面板的变形与应力计算特征值如表 3 所示。由表 3 可知，两种连接方式下，面板均随着坝体变形产生了一定挠度，而随着坝体向河谷中央的变形，两岸附近面板产生一定范围的拉应力区，从计算结果来看，柔性连接下面板应力与变形均比刚性连接略小。

表 3 面板挠度与顺坡向应力

Table 3 Deflection and stress of concrete face

连接方式	竣工期		蓄水期			
	顺坡向应力/MPa		挠度 /cm	顺坡向应力/MPa		挠度 /cm
	压应力	拉应力		压应力	拉应力	
柔性连接	3.6	-	3.9	7.14	0.95	13.0
刚性连接	3.6	-	4.0	7.40	1.21	13.2

3.3 面板周边缝与垂直缝变位

两种连接方式下面板周边缝均有张有压，错位基本上表现为向河谷错动，沉陷大多数指向坝内。

趾板与基础柔性连接时，面板周边缝三向变位最大值分别为张开 2.1 mm，沉陷 12.8 mm，错动 6.16 mm；面板垂直缝变形大体表现为两端为张开缝，中间为压紧缝，垂直缝最大张开量为 4.5 mm。柔性连接时防渗墙与连接板接缝、连接板与趾板接缝在蓄水期都处于压紧状态，这两条缝的错动很小，

但防渗墙与连接板接缝相对沉陷较大，最大沉陷达到 19.3 mm，连接板与趾板接缝也有少量的相对沉陷，计算所得的最大值为 2.6 mm。

趾板与基础刚性连接时，面板周边缝三向最大位移分别为张开 1.8 mm，错动 10.2 mm，沉陷 60.0 mm。

3.4 防渗墙变形与应力

不同趾板与基础连接方式下，防渗墙的变形状况不同。柔性连接方式下，竣工期防渗墙向上游变形，变形最大值为 -0.7 cm，蓄水期由于水压力作用，防渗墙向下游位移，最大值为 4.4 cm，最大挠度均位于墙顶，见图 4(a)。刚性连接情况下，防渗墙的挠度减小，竣工期和蓄水期防渗墙挠度最大值分别为 -1.7，1.75 cm，最大挠度位于防渗墙的墙顶，蓄水期挠度变形如图 4(b)所示。

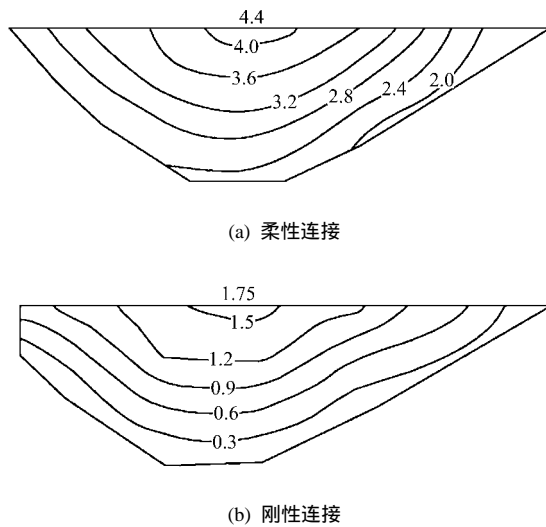


图 4 蓄水期防渗墙的挠度分布(单位：cm)

Fig. 4 Deflection of diaphragm wall during impoundment stage(unit : cm)

两种连接方式下防渗墙的最大主应力都随墙深度增加而增大，而在防渗墙底部均出现不同程度的拉应力区。表 4 给出了不同连接方式下防渗墙在竣工期与蓄水期时的拉压应力特征值。

3.5 趾板与连接板变形与应力

柔性连接下，趾板与连接板随坝基的沉降而下沉，趾板与连接板的沉降自上游向下游逐渐增加，近坝端沉降最大，靠防渗墙端最小，分别为 6.20，2.05 cm，如图 5 所示。此时，连接板和趾板的应力总体受压，但右岸附近连接板与趾板交接处有一个小的拉应力区域，最大拉应力为 0.7 MPa。

表 4 防渗墙应力

Table 4 Stress of concrete diaphragm wall

连接	竣工期		蓄水期	
	最大压应力 /MPa	最大拉应力 /MPa	最大压应力 /MPa	最大拉应力 /MPa
柔性连接	0.52	0.20	3.91	1.25
刚性连接	1.69	0.24	6.44	1.36

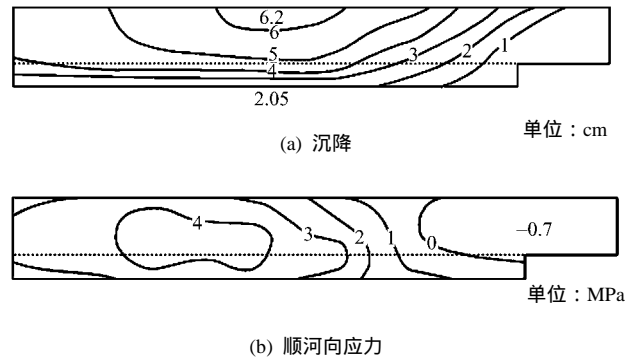


图 5 柔性连接方式下蓄水期趾板与连接板的沉降与顺河向应力分布

Fig.5 Settlement and horizontal stress of toe slab and joint slab during impoundment stage

刚性连接下，由于钻孔灌注桩的作用，趾板沉降大大减小，防渗墙顶趾板和灌注桩顶趾板最大沉降分别为 0.35，0.65 cm。由于趾板两端与防渗墙和灌注桩固定连接，在水荷载作用下，在蓄水期趾板两端出现了拉应力区域，靠防渗墙端最大拉应力为 0.55 MPa，靠灌注桩端最大拉应力为 0.68 MPa。

4 趾板与基础连接方式优选

由上述计算结果可以看到，无论趾板与基础采用柔性连接还是刚性连接，坝体、坝基的变形相近，且两种连接方式下面板的应力、变形也相近，不同之处主要在趾板与防渗墙的应力、变形及面板周边缝变形情况。

两种连接方式下，防渗墙、趾板虽然都有少量的拉应力区域，但拉应力值都不大，虽然刚性连接下防渗系统应力比柔性连接略大，但从总体上讲，两种连接方式坝基防渗系统的应力状态都较好，都在混凝土应力允许范围内。

两种连接方式下，防渗墙、趾板的变形有较大差异，刚性连接下蓄水引起的防渗墙水平变形要小于柔性连接，分别为 3.45，5.10 cm，刚性连接下的

趾板由于钻孔灌注桩的支撑作用，其沉降比柔性连接情况下小许多，因此，采用刚性连接时面板周边缝沉陷较大，周边缝最大沉陷达到 60.0 mm，而柔性连接面板周边缝最大沉陷只有 12.8 mm。

综合对比两种连接方式计算结果可以发现，柔性连接和刚性连接方式下面板和防渗墙的应力变形都较好，都能满足工程的要求，但是，采用刚性连接方式时，面板周边缝的位移很大，甚至超过一般止水构件所能承受的变形能力。同时，采用刚性连接方式时，要进行钻孔灌注桩的施工，工程复杂性和投资都将增加。因此，建议采用柔性连接方式。

5 结 论

(1) 趾板与基础之间无论是采用柔性连接方式还是刚性连接方式，对坝体、坝基的应力与变形影响不大。

(2) 两种连接方式下面板的应力与变形相近，而趾板与防渗墙的应力、变形有所不同。刚性连接下趾板与防渗墙变形要小于柔性连接情况，而应力比柔性连接情况要大，但应力状态总体较好，在混凝土的应力允许范围内，都能满足工程的要求。

(3) 两种连接方式下面板周边缝位移相差较大，刚性连接方案面板周边缝最大位移达到 60.0 mm，超过一般止水构件所能承受的变形能力。

(4) 综合对比两种连接方式计算结果，建议采用柔性连接方案。

参考文献(References)：

- [1] 邴凤山. 国家科技攻关与我国水利水电事业的发展[J]. 水力发电, 2004, 30(12) : 56-60.(Bing Fengshan. Key technological problems and achievements in hydropower development in China[J]. Water Power, 2004, 30(12) : 56-60.(in Chinese))
- [2] Cooke J B, Sherard J L. Concrete face rockfill dams : II. design[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 13(10) : 1 113-1 132.
- [3] Cooke J B. The development of today s concrete face rockfill dam[A]. In : Proceedings of Symposium on Concrete Face Rockfill Dams[C]. Brazil, Florianopolis : [s. n.], 1999. 3-11.
- [4] 顾淦臣, 迟世春, 朱 晟, 等. 深厚覆盖层地基上混凝土面板堆石坝的三维非线性有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报, 1992, 13(3) : 1-9.(Gu Ganchen, Chi Shichun, Zhu Sheng, et al. Analysis for concrete face rockfill dam on deep soft foundation by nonlinear 3D FEM[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1992, 13(3) : 1-9.(in Chinese))
- [5] 顾淦臣. 深厚覆盖层面板堆石坝的混凝土防渗墙[J]. 青海水力发电, 1996, (4) : 35-38.(Gu Ganchen. Concrete diaphragm wall of CFRD on deep soft foundation[J]. Qinghai Water and Hydroelectric Power, 1996, (4) : 35-38.(in Chinese))
- [6] 李国英. 覆盖层上面板坝的应力变形特性与影响因素[J]. 水利水运科学研究, 1997, (4) : 348-356.(Li Guoying. Stress-strain behavior and its affecting factor of CFRD built on riverbed alluvium[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1997, (4) : 348-356.(in Chinese))
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Qian Jiahuan, Yin Zongze. Geotechnics Theory and Numerical Method[M]. Beijing : China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [8] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1990.(Zhu Baili, Shen Zhujiang. Computational Soil Mechanics[M]. Shanghai : Shanghai Science and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [9] Desai C S, Zaman M M. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1) : 19-43.
- [10] Desai C S, Ma Y Z. Modeling of joints and interfaces using disturbed state concept[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(6) : 625-653.