**文章编号:**1000-8608(2009)05-0675-05

# 钉结护面板对高土石坝坝坡地震稳定性影响研究

邹德高<sup>1,2</sup>,徐斌<sup>\*1,2</sup>,孔宪京<sup>1,2</sup>

(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:建立了考虑钉结护面板作用的土石坝坝坡地震稳定和滑移计算方法.在此基础上,对 比分析了无加固措施和采用钉结护面板两种工况下 295 m 级两河口心墙堆石坝的坝坡稳定 性.结果表明:采用钉结护面板后,坝坡最小安全系数对应的滑弧加深,安全系数明显提高,滑 移量减小,有效地增加了坝顶的整体稳定性;随输入地震动峰值增加,钉结护面板对坝坡稳定 安全系数的贡献逐渐增大.

关键词:钉结护面板;高土石坝;坝坡稳定;动力有限元时程法;滑移 中图分类号:TU4 文献标志码:A

# 0 引 言

我国迄今为止已建和在建的近百座百米级高 土石坝多位于高地震烈度区.随着我国经济建设 的迅速发展和西部大开发战略的实施,一大批高 土石坝还将兴建,高度也不断增加,其中双江口心 墙堆石坝高度已达 312 m,两河口、古水、马吉等 坝高也接近 300 m,这些高坝一旦因地震失事,其 后果将是灾难性的.因此,采取有效的抗震措施保 障大坝地震时的稳定性是十分必要的.

## 1 钉结护面板抗震措施

振动台模型试验结果表明<sup>[1~5]</sup>:土石坝由于 坝体结构对地震波的放大效应,坝体上部加速度 反应往往较大,若大坝遭遇强震而发生破坏,则破 坏将首先从坝顶部开始,坝顶部堆石体将最先失 去平衡而产生松动、滑动乃至坍塌等.汶川地震 中,紫坪铺面板堆石坝下游坝坡也发生了局部的 滑动.因此,在地震区修建高土石坝时应特别重视 坝顶区土体的稳定."八五"期间孔宪京根据大型 振动台模型试验结果,提出了钉结护面板加固方 案(图 1、2),并采用二维弹塑性有限元分析方法 分析了钉结护面板加固技术对坝体沉降及坝坡永 久变形的抑制效果<sup>[6]</sup>,计算结果显示,采用钉结护 面板抗震方案可以使坝顶区的永久位移明显减 小.钉结护面板技术已经逐渐被工程单位认可,并 在新疆吉林台面板坝和糯扎渡心墙堆石坝等工程 中进行了应用.



钉结护面板技术作为一种有效的抗震措施,

**收稿日期**: 2009-04-20; 修回日期: 2009-08-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(重大项目 90815024);国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金资助项目 (50679093);国家自然科学基金青年基金资助项目(50808032);"十一五"国家科技支撑计划资助项目(2009BAK56B02). 作者简介:邹德高(1973-),男,博士,副教授,E-mail;zoudegao@dlut.edu.cn;徐 斌\*(1981-),男,博士,讲师,E-mail;xubin@dlut. edu.cn;孔宪京(1952-),男,教授,博士生导师.

目前多采用工程类比进行设计,缺乏计算方法,不 便于工程应用.稳定安全系数和基于 Newmark 法的滑移量作为坝坡稳定性的综合评价指标,很 容易为工程技术人员理解,但迄今为止,尚未见到 有关钉结护面板加固方案对坝坡稳定性影响的研 究成果.因此,本文试图建立考虑钉结护面板作用 的动力有限元稳定性计算方法,在此基础上,结合 300 m级的两河口心墙堆石坝进行钉结护面板对 强震区高土石坝坝坡稳定的影响研究.

# 2 考虑钢筋作用的安全系数和滑移 量计算方法

### 2.1 安全系数计算方法

土石坝动力稳定安全系数的计算方法主要有 拟静力极限平衡法和动力有限元时程法.考虑地 震过程中坝体应力的瞬时变化,计算出每一时刻 坝坡抗滑稳定安全系数,称之为动力有限元时程 法.动力有限元时程法可以考虑岩土材料的不均 匀性以及其非线性的应力-应变特性,从合理性而 言,其优于拟静力极限平衡法,但目前广泛采用的 动力有限元时程法<sup>[7]</sup>没有考虑加筋的作用.本文 在常规动力有限元时程法的基础上,考虑了钢筋 的作用,如图 3 所示.即将堆石体和护面板用平面 等参单元离散,钢筋采用杆单元离散,建立加固后 大坝的有限元模型,分别计算出大坝的震前应力 和地震时每一瞬时的动应力.假定破坏时钢筋拉 力沿滑弧的切向作用,根据单元的静、动应力叠加 结果可对大坝进行稳定计算,其安全系数为

$$F_{s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (c_{i} + \sigma_{i} \tan \varphi_{i}) l_{i} + \sum_{j=1}^{m} F_{j}}{\sum_{i=1}^{n} \tau_{i} l_{i} + \sum_{j=1}^{m} f_{j}}$$
(1)

式中: $c_i \, \varphi_i \, \beta$ 别为第 $i \, \hat{\mu}$ 元土体的凝聚力和内摩 擦角, $l_i \, \beta$ 第 $i \, \hat{\mu}$ 元滑弧面的长度, $f_j \, \beta$ 滑弧穿过 的第 $j \, \gamma$ 钢筋的拉力, $F_j \, \beta$ 滑弧穿过的第 $j \, \gamma$ 钢 筋的抗拉力, $\sigma_i \, \tau_i \, \beta$ 别为第 $i \, \hat{\mu}$ 元滑弧面上法向 应力和切向应力,由下式表示:

$$\sigma_{\rm n} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha \qquad (3)$$

式中: $\sigma_x = \sigma_x^s + \sigma_x^d$ , $\sigma_y = \sigma_y^s + \sigma_y^d$ , $\tau_{xy} = \tau_{xy}^s + \tau_{xy}^d$ ; $\sigma_x^s$ 为单元的静水平应力, $\sigma_x^d$ 为单元的动水平应力, $\sigma_y^s$ 为单元的静竖向应力, $\sigma_y^d$ 为单元的动竖向应力,  $\tau_{xy}^s$ 为单元的静剪应力, $\tau_{xy}^d$ 为单元的动剪应力.

稳定计算中,在每一个时刻均采用枚举法根 据单元应力自动搜索最危险滑弧,可以考虑最危 险滑弧随时间的变化,这种方法比通常用拟静力 法确定最危险滑弧更为合理和精确.



Fig. 3 Schematic diagram of slope stability analysis

## 2.2 Newmark 滑移量计算方法

对于任意滑弧(如图 3 所示),可通过下式计 算滑块绕圆心的滑动角加速度:

$$\ddot{\theta}(t) = M/I$$
 (4)

$$M = \left(\sum_{i=1}^{n} \tau_i l_i + \sum_{j=1}^{m} f_j - \sum_{i=1}^{n} (c_i + \sigma_i \tan \varphi_i) l_i - \sum_{j=1}^{m} F_j\right) R$$
(5)

式中:I为滑动体的转动惯量; $\theta(t)$ 为滑动体瞬时 失稳后的滑动角加速度;M为作用在滑动体上的 转动力矩.

当某时刻出现瞬时滑动时,滑弧的滑动量为

$$D_i = R\theta_i = R \iint \ddot{\theta}_i \, \mathrm{d}t \tag{6}$$

在整个时间段里可能出现多次瞬时滑动,则 累计滑动量为

$$D = \sum_{i=1}^{n} D_i \tag{7}$$

## 3 计算模型

#### 3.1 有限元模型

本文采用了两河口水电站心墙堆石坝作为计 算算例,大坝最大坝高为 295 m. 图 4 为采用钉结 护面板加固后的大坝网格图,图 5 为大坝加筋和 护面板示意图.其中钢筋采用杆单元模拟,沿坝高 方向和轴向间距均为 4 m.

## 3.2 有限元模型和计算方法

静力计算时,筑坝材料采用邓肯 E-B 模型, 计算参数见表 1. 动力计算时,筑坝材料采用沈珠 江等改进的等效线性模型<sup>[8]</sup>,计算参数见表 2. 钢 筋和护面板均采用线弹性模型,见表 3. 静力计算 考虑了大坝填筑和蓄水过程.



图 4 两河口大坝网格 Fig. 4 Mesh of Lianghekou dam



图 5 大坝加筋及护面板图 Fig. 5 Schematic diagram of the nail and panel

表 1 筑坝材料邓肯 E-B 模型参数 Tab. 1 Parameters of Duncan E-B model of dam materials

材料	$R_{ m f}$	Κ	п	$K_{ m ur}$	$arphi/(^{\circ})$	$c/(t \cdot m^{-2})$	$ ho/(t \cdot m^{-3})$	$arphi_0$	$\Delta \varphi$	$K_{\rm b}$	m
反滤料	0.78	850	0.30	1 700	41	40	2.20	52	11	340	0.25
过渡料	0.78	950	0.25	1 900	40	25	2.17	51	10	380	0.14
主堆石	0.76	1 100	0.27	2 000	42	40	2.23	49	6	450	0.24
心墙料	0.72	650	0.36	1 300	31	40	2.16	43	11	500	0.20

静力计算方法采用了中点增量法,动力计算 采用了等效线性粘弹性方法.有限元静力分析和 动力反应分析均采用了 GEODYNA<sup>[9]</sup>,有限元稳 定分析采用了 FEMSTABLE<sup>[10]</sup>.

表 2 筑坝材料动力特性试验模型参数 Tab. 2 Parameters of dynamic model of dam materials

试样	$K_2'$	n	$K_2$	$K_1'$	$K_1$	$\lambda_{\rm max}$
反滤料	3 234.3	0.321	1 216	15.4	11.60	0.23
过渡料	5 312.0	0.328	1  997	20.8	15.70	0.22
堆石	6 213.0	0.268	2 336	25.0	18.80	0.19
心墙料	2 941.0	0.556	1 106	28.4	21.35	0.25

表 3 钢筋和护面板模型参数

Tab. 3 Parameters of reinforcement and panel

名称	E/	ho/	A/	抗拉强度/	抗剪强度/	厚度/
	MPa	$(kg \cdot m^{-3})$	$\mathrm{cm}^2$	MPa	MPa	cm
钢筋	$2 \times 10^5$	7 800	12.56	215	_	_
护面板	$2\! imes\!10^4$	2 350	—	_	0.1	10

## 3.3 地震输入

地震输入采用了两河口场地谱人工波进行计算,地震波时程曲线见图 6 和图 7,地震波水平向加速度峰值分别调整为 0.2g、0.3g、0.4g 和 0.5g,竖向加速度峰值取为水平向 2/3.



图 8 为无加固措施工况下计算得到的大坝水 平向加速度分布,从图中可以看出坝顶加速度反 应较大,在坝顶局部范围进行加固处理是合理的.



图 7 输入竖向地震加速度时程

Fig. 7 Input acceleration time history of vertical direction



- 图 8 水平向地震加速度分布(输入地震动峰值 0.3g)
- Fig. 8 Horizontal earthquake acceleration response (input earthquake peak acceleration:0.3g)

图 9 为两种工况最小安全系数所对应的滑弧,可以看出,无加固措施情况下,滑弧较浅,坝坡 表现为浅层滑动;而采用钉结护面板后滑弧加深.



Fig. 9 The slip surface corresponding to the minimal safety factor

图 10 分别给出了输入加速度峰值 0.3g 时, 无加固措施和采用钉结护面板两种工况下计算得 到的上游坝坡最小安全系数 F<sub>smin</sub>时程曲线.从图 中可以看出:采用钉结护面板后,坝坡安全系数明 显提高,且小于1的累积时间减少.



图 11 为无加固措施和采用护面板情况下上、 下游坝坡最小安全系数与输入地震动峰值的关 系.可以看出,钉结护面板方案增加了坝顶的整体





稳定性,提高了坝坡安全系数,随着输入地震动峰 值 a<sub>p</sub> 增加,钉结护面板对坝坡稳定性贡献增大.

图 12 为输入地震动峰值为 0.5g 时,采用 Newmark滑块法分别计算无加固措施和采用护面板 情况下上游坝坡全时程中安全系数小于 1.0 时的滑 动量 D<sub>i</sub>.无加固措施和采用钉结护面板加固所对应 的上游坝坡累积滑动量分别为 74.4 cm 和 19.4 cm, 可见钉结护面板方案明显抑制了坝坡滑动位移.



图 13 坝坡累积滑动量与输入地震动峰值关系 Fig. 13 The relationship between the accumulated displacement of dam slope with earthquake peak acceleration

和采用护面板情况下上、下游坝坡累积滑动量与 输入地震动峰值的关系.可以看出:随着输入地震 动峰值的增加,钉结护面板对坝坡滑动的抑制效 果更加明显,这说明该方案非常适用于强震区大 坝的抗震加固.

# 4 结 论

(1)本文建立的坝坡稳定分析方法考虑了钢筋 和护面板对大坝地震稳定性的作用,计算方法简单 有效,可用于优化高土石坝钉结护面板设计方案.

(2)采用钉结护面板,增加了坝顶整体稳定性,最小安全系数和最危险滑弧深度均明显增大, 其"由表及里"的加固方法效果是显著的.

(3)输入地震动峰值越大,钉结护面板对坝坡 稳定性贡献越大,表明钉结护面板非常适用于强 震区大坝坝坡的抗震加固.

(4)汶川地震震害现象和振动台模型试验结 果表明,土石坝顶部是抗震设计的着力点,因此, 钉结护面板抗震技术将有很广泛的应用前景.

# 参考文献:

- [1] 大连理工大学工程抗震研究所.面板堆石坝动力模型试验与动力分析方法研究[R] // 国家"七五"科技 攻关项目研究报告.大连:大连理工大学工程抗震研 究所,1989
- [2] 韩国城,孔宪京,李俊杰,等. 面板堆石坝动力破坏性 态及抗震措施试验研究[J]. 水利学报, 1990 (5):

61-67

- [3]田村重四郎,孔憲京,小长井一男,等. コンクリート 表面遮水壁 ロックフイルダムの 破壊性状 に 間 する 基 礎 的 研 究 I - 型 式 がことなるロックフイルダムの 破壊試験[J]. 生産 研究, 1992, 44(5):27-32
- [4] 田村重四郎,孔憲京,小长井一男,等. コンクリート 表面遮水壁 ロックフイルダムの 破壊性状 に 間 する 基礎的研究 Ⅱ-破壊性状 に及 ほす 断面形状 の 影響[J]. 生産研究, 1992, 44(6):1-6
- [5] 田村重四郎,孔憲京,小长井一男,等. コンクリート 表面遮水壁 ロックフイルダムの 破壊性状 に 間 する 基礎的研究 Ⅲ— 破壊性状 に及ほす 鉛直地震 動の影響[J]. 生産研究, 1992, 44(6):7-12
- [6] 孔宪京,邹德高,邓学晶,等.高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J].水利学报,2006(12): 1489-1495
- [7] 赵剑明,常亚屏,陈 宁. 强震区高混凝土面板堆石 坝地震残余变形与动力稳定分析[J]. 岩石力学与工 程学报,2004,23(增1):4547-4552
- [8] 沈珠江,徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水 运科学研究, 1996, 6(2):143-150
- [9] 邹德高,孔宪京. Geotechnical Dynamic Nonlinear Analysis — GEODYNA使用说明[R].大连:大连理 工大学土木水利学院工程抗震研究所,2003
- [10] 邹德高,孔宪京,徐 斌. Finite Element Method Stable Analysis — FEMSTABLE 使用说明[R].大 连:大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所, 2009

# Study of effects of nail-tied panel on stability of high earth-rockfill dam slope

ZOU De-gao<sup>1, 2</sup>, XU  $Bin^{*1, 2}$ , KONG Xian-jing<sup>1, 2</sup>

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

2. School of Givin and Tydraulic Engineering, Danar University of Technology, Danar 11024, Ohing

**Abstract:** Considering nail-tied panel effect, a method of calculating rockfill dam slope seismic stability and slippage was established. Based on the method, the slope stability of the Lianghekou core dam with 295 m in height was analyzed, and the effects of nail-tied panel on the stability of high earth-rockfill dam slope were studied. The results show that with nail-tied panel, the slip surface corresponding to the minimum safety factor becomes deeper, the dam slope safety factors are improved obviously, and the dam stability is enhanced effectively. With the increase of the earthquake peak acceleration, the dam slope stability can benefit from nail-tied panel significantly.

Key words: nail-tied panel; high earth-rockfill dam; dam slope stability; dynamic FEM (finite element method) time history method; slippage