

短文

瘦型面板堆石坝的新型结构——预应力加筋面板坝

Thin concrete-faced rockfill dam—concrete-faced prestressed rockfill dam

刘浩吾

(四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

中图分类号: TV 641.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0500-04

作者简介: 刘浩吾(1935-), 男, 四川大学水利水电学院教授, 博士生导师。

0 前言*

土石坝是应用最广(80%以上)的坝型, 而体积庞大则是其首要弱点所在。在压缩其体型和断面方面, 现代面板堆石坝型实现了一次重要突破, 把传统土石坝的宽大断面压缩了约一半, 坝坡从1:(2~2.5)加陡为1:1.4。这是面板坝型竞争力强的首要因素, 并由此导致工期短、造价低等连带优势。但是, 面板坝型的常规断面仍然比重力坝、拱坝的体型约大3~10倍。体型大不仅制约了大坝本身, 而且制约了导流洞、输水道、泄洪洞的工程量、工期和造价。面板坝技术需要新发展和新突破。

本文旨在探讨大幅度压缩面板坝体型、构建小体型的瘦型面板堆石坝的新途径。在这方面, 国外提出了所谓硬填方面面板坝, 这是P. Londe(龙德, 法国人, 国际大坝会议名誉主席)等倡导的技术发展方向^[1,2], “硬填方认为是一种土石坝”, 断面比面板坝小一半^[2]。此坝型已完成10座工程的设计, 其中高25m的司特麦森德兰蒂斯坝已在法国建成。

预应力加筋面板坝型是另一种技术方向^[3]。本文依据70m高预应力加筋堆石面板坝型的数值仿真, 论证了该坝型的可行性。

1 硬填方材料试验与硬填方坝型特点分析

我们完成了4种配合比的硬填方材料试验。配料中有意让骨料含泥(约1%), 以体现适度放松骨料制备的要求。结果, 胶材单耗水平为水泥40 kg, 粉煤灰30 kg, 90 d龄期强度3.1~5.1 MPa, 这与国外的水泥用量(50~60) kg/m³时90 d强度约5 MPa的结果相一致^[2]。90 d弹模达3.8~5.8 GPa, 且其应力—应变关系与常规混凝土相近。

上述初步试验表明, 硬填方材料是一种低强度的混凝土材料, 这表现在: ①材料的基本组成(胶材、粗细

骨料)和混凝土相同; ②材料的强度来自材料的化学变化; ③应力—应变关系类同于脆性固体材料。因而, 不能把硬填方材料看作一种散粒体的土石料。事实上, 硬填方的施工工艺, 包括粗、细骨料的制备, 按设计配合比的拌和等也都是混凝土的基本工艺。总之, 硬填方坝并非土石坝类型, 不宜作为压缩面板坝型的技术发展方向。

2 预应力加筋堆石坝可行性的数值试验

2.1 应用预应力技术的意义

加筋堆石是加筋土的形式之一, 其基材为堆石, 筋材用钢筋、高强钢丝束、镀锌钢条、玻纤等刚性筋材。加筋堆石用于坝工的工程实例是Congueyrac(康柯耶拉克, 法国)面板加筋堆石坝(图1), 高21.2 m, 底宽21 m, 建于1982年^[4]。在碾压堆石层上加铺钢筋(垂向、水平向间距分别为2.0, 1.45 m), 直径由下而上为40, 32, 25 mm。筋材上下游端各系于面板和混凝土挡板上。

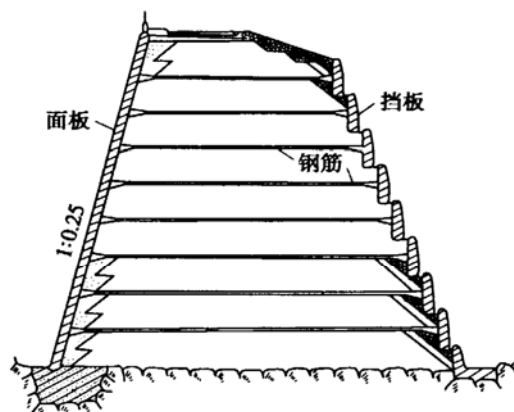


图1 Congueyrac 面板加筋堆石坝(法国)

Fig. 1 Congueyrac concrete-faced rockfill dam

采用考虑基材—筋材联合作用的非线性有限元方法对该坝进行了分析^[3], 得各层(编号由下而上)钢筋

* 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (98061020)

收稿日期: 2002-07-25

表 1 有预应力和无预应力情况的钢筋受力计算值

Table 1 Computed values of tensile force of steel bars with and without prestress

钢筋层号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
无预应力	钢筋直径/mm	40	40	40	40	32	32	32	25	25	25	
	受力/kN	160	162	152	140	125	110	95	80	60	40	
	承载率/%	45.5	46.0	43.2	39.8	53.8	47.4	40.9	58.2	43.7	29.1	44.8
有预应力	钢筋直径/mm	32	32	32	32	28	28	28	22	22	22	
	受力/kN	201	222	206	189	169	138	120	93	76	50	
	承载率/%	89.3	98.6	91.5	74.4	98.0	80.0	69.6	87.4	71.4	47.0	80.7

表 2 堆石料与接触面计算参数

Table 2 Computational parameters of rockfill and contact interface

材料	$c/10^2 \text{ kPa}$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f	G	F	D	K_{ur}
堆石料	0.40	23.7	44.0	1650	0.573	0.86	0.49	0.24	1.0	2500
接触面	0.0	—	28	62000	0.95	0.85				

的蓄水期受力如表 1。表明筋材受力(控制在蓄水期)仅达到其允许承载能力的 44.8%，尚有很大潜力，据此提出了预应力加筋方式。利用同一断面计算了钢材用量减少 30% 的布筋方案(见表 1)，坝体应力-变形状态与无预应力方案基本一致，其堆石体应力水平的峰值仅稍有增加(从 0.46 变为 0.52)，仍处于低水平，强度和稳定性储备大。

预应力加筋土技术近年在国内的路基工程中已得到实际应用，如南昆铁路的贵州安龙石头安车站填方路基采用了预应力加筋堆石，高 29 m，长 200 m，1996 年底建成。筋材用高强钢丝束，外套塑料管加以保护。采用邓肯-张双曲 $E-\mu$ 模型进行了非线性有限元分析，并进行沉陷、水平位移、土压力、钢丝束拉力等原型观测，观测结果与有限元分析基本相符，钢索实际受力中预应力部分约占 60%，其余 40% 由土体侧向变形所致^[5]。

综上，运用预应力加筋堆石可望将加筋钢材减少 30%~50%。我国南昆铁路 29 m 填方路基中预应力加筋的成功应用和现场观测，为预应力加筋面板坝型的可行性提供了佐证。

2.2 70 m 预应力加筋面板坝数值分析要点

上述高 21 m 已建加筋面板坝的高度有限，为探讨预应力加筋的新坝型在通常条件下的技术可行性，有必要对较大坝高进行论证。鉴于加筋堆石物理模型试验的模型律尚未解决，现采用数值分析的方法，由基于邓肯-张(Duncan-Chang)双曲模型的非线性有限元数值仿真加以实现。模型 8 参数与堆石-面板接触面参数值见表 2。其中 c 为内聚力， γ 为容重， φ 为内摩擦角， R_f 为破坏比， K, n, G, F, D, K_{ur} 为试验确定的参数。混凝土和钢筋作为线弹性材料，后者处理为受拉杆单元。堆石与面板离散为二维等参元。

70 m 高面板坝的瘦型与常规断面对比示意图

2。坝顶宽均取为 8 m，面板厚 0.3~0.6 m，双向含筋率 0.4%。瘦型坝上下游坝坡 1:0.6，1:0.8，下游挡板厚 0.2~0.4m，采用贯通式布筋，垂向、水平向间距 2.0 m；常规坝型坡 1:1.4。计算中，填筑期坝体逐层上升，荷载按增量方式施加，直到竣工。蓄水期分期蓄至高水位。

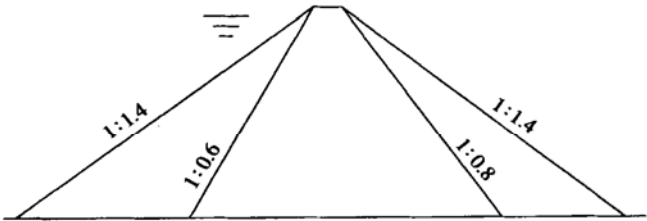


图 2 瘦型坝与常规坝断面对比

Fig. 2 Section comparison between thin dam and standard dam

2.3 数值试验结果

竣工期与蓄水期水平位移、垂直位移(单位 cm)分布见图 3、4。竣工期与蓄水期大小主应力(单位 10 kPa)分布见图 5、6。图 7 给出各层钢筋的受力。堆石体应力水平普遍比较低，最大值仅 0.41，位于约 1/5 坝高处的中部。最大水平位移 0.12 m，最大垂直位移 0.18 m，分别仅为坝高的 0.17%，0.26%。大小主应力分布匀称，规律性良好。特别是坝体应力水平普遍较低(≤ 0.41)，表明安全储备潜力大。各层钢筋的受力分布与高 21 m 坝的预应力方案的规律性一致^[3]，即最大受力出现在蓄水期，位于 1/5 坝高处。

2.4 预应力加筋面板坝型的经济技术特性分析

Congueyrac 加筋堆石坝工程的造价比之重力坝方案还低 20%^[3]，显示了加筋坝型对低坝情况的经济性。依据上述 70 m 瘦型面板坝的计算结果，易得单宽加筋量为 83.2 kN。新坝型与常规面板坝型相比，三材(钢筋、混凝土、堆石等)耗用的增减框算对比见表 3。

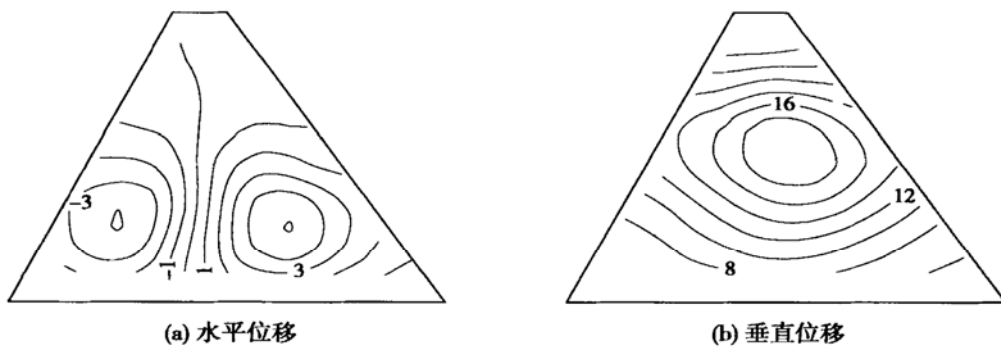


图3 竣工期水平、垂直位移

Fig. 3 Horizontal and vertical displacement contours at the end of construction

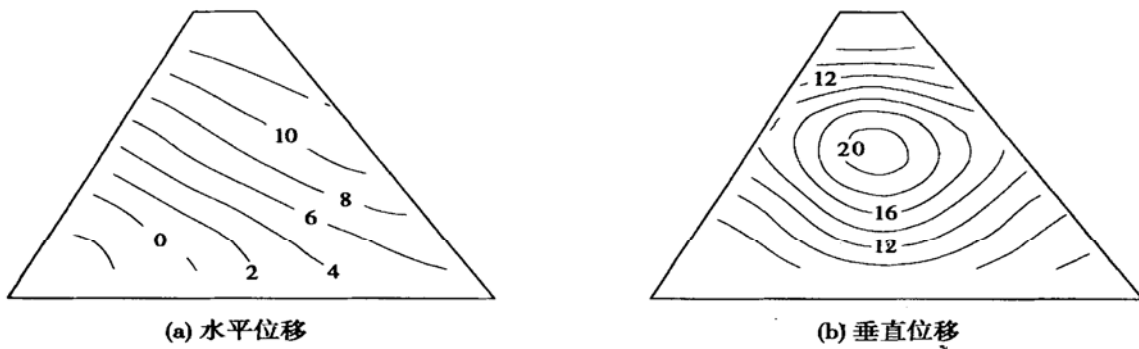


图4 蓄水期水平、垂直位移

Fig. 4 Horizontal and vertical displacement contours during impounding

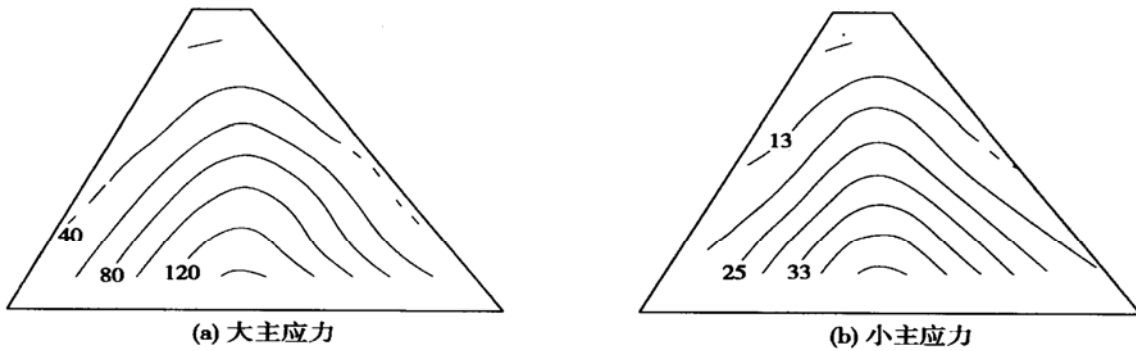


图5 竣工期大、小主应力分布

Fig. 5 Major and minor principal stress contours at the end of construction

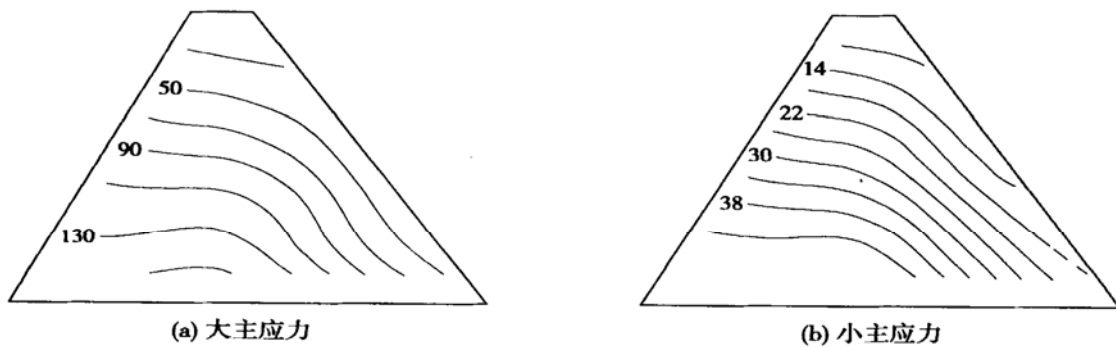


图6 蓄水期大、小主应力分布

Fig. 6 Major and minor principal stress contours during impounding

表3 瘦型面板坝与常规面板坝单位坝长的三材用量对比

Table 3 Comparison between material volume of thin dam and standard dam

坝型	钢材/t				混凝土/m ³			坝体堆石/m ³
	堆石加筋	面板配筋	档板配筋	合计	面板	档板	合计	
瘦型面板坝	8.32	2.29	0.41	11.02	36.7	21.0	57.7	3937.5
常规面板坝	0	3.38	0	33.8	54.2	0	54.2	7108.5

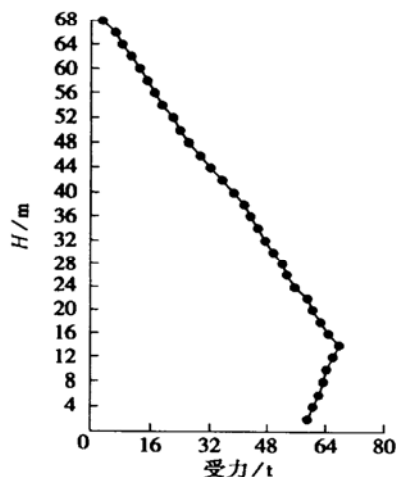


图7 蓄水期各层钢筋受力值

Fig. 7 Tensile forces of steel bars at different elevation

可见,新型坝的底宽减少48%,单宽堆石量减少45%,即压缩约一半,代价仅为增加7.64 t 钢筋和3.5 m³ 混凝土。新型坝还可缩短工期,提前发挥工程效益,缩小输水洞、泄洪道、导流洞等的长度。再计入这诸多连带效益,其技术经济效益十分显著。

3 结 论

(1) 水泥、粉煤灰单耗各约40, 30 kg。可配制抗压强度4~6 MPa的硬填方材料。按其材料性质应为脆性固体材料,即低品位碾压混凝土,而非散粒体的土石料。故硬填方坝不属于土石坝的范畴,也不是发展小体型面板坝的途径。

(2) 提出了瘦型面板坝型——预应力加筋堆石坝型及坝高70 m的典型断面,体型比常规面板坝缩小了一半。非线性有限元分析表明,其变形、应力状态匀称,规律性良好,应力水平低(≤ 0.41),安全储备大,其可行性得到了初步的理论论证。

(3) 70 m 瘦型面板坝与常规坝型相比,单宽堆石量节省3171 m³,仅多耗钢筋7.6 t 和混凝土3.5 m³。可缩短工期并减少输水、泄水、导流工程长度,技术经济特性明显优越。

(4) 综上所述,预应力加筋堆石坝型有望成为土石坝工程技术发展的一个新方向和新途径。

参考文献:

- [1] Londe P, Lino M. The faced symmetrical dam: a new concept for RCC[J]. Water Power and Dam Construction, 1992, 44(2): 19-24.
- [2] 龙德 P, 林诺 M. FSHD, 对称硬填方面板坝[A]. 国际高土石坝学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水力发电工程学会, 1993.
- [3] 刘浩吾, 王雪松. 论土石坝的新型结构——加筋堆石坝[J]. 水利水电技术, 2000, 31(4): 19-21.
- [4] Loudiere D, Planaud A, Duranto R, Lassagne J, Bertrund J. Auscultation de cinq barrages en remalai[A]. 15th International Congress on Large Dams(Q56-R80). Lausanne, 1985. 1565-1588.
- [5] 李 彤. 新型锚拉式桩板墙的三维有限元及地基约束系数法分析[D]. 成都: 四川大学, 1998.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由冶金勘察研究总院主办的学术—技术类双月刊,是中国科技论文统计源期刊,中国地质文摘引用期刊,中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员

员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大16开本,双月20日出版。每期定价5.0元,全年30元。从2004年起由邮局发行,邮发代号18-153。全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址: 河北省保定市东风中路13号《勘察科学技术》编辑部, 邮编: 071069; Tel: 0312-3020887, 3094054; Fax: 0312-3034561; E-mail: kckxjs@sohu.com, kckx@163.com