

DOI: 10.11779/CJGE201707018

面板堆石坝性状的初步统计分析

温立峰¹, 柴军瑞^{1, 2}, 许增光¹, 覃源¹, 李炎隆¹

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048; 2. 西京学院土木工程学院, 陕西 西安 710123)

摘要: 在很多情况下面板堆石坝已经成为优选坝型, 但其设计很大程度上仍然依赖于工程经验。目前很少有文献基于大量工程实例数据对面板堆石坝的性状展开研究。收集和统计过去 50 a 已建的 87 个面板堆石坝的建设信息和性状监测记录, 从统计学的角度分析面板坝性状特征。基于工程实测数据对填筑完工后坝顶沉降、面板挠度和应力、竣工时坝体最大沉降进行统计分析和规律总结。重点讨论了堆石母岩饱和状态抗压强度、地基特性、河谷形状和渗流对大坝性状的影响。结果可以进一步加强对面板堆石坝性状的深入理解, 同时为面板堆石坝的设计、施工和运行管理提供指导和参考。

关键词: 面板堆石坝; 性状; 工程实例; 监测; 统计分析

中图分类号: TV311

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)07-1312-09

作者简介: 温立峰(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事水工结构数值仿真方面的研究。E-mail: wenxuan89@126.com。

Preliminary statistical analysis of behavior of concrete face rockfill dams

WEN Li-feng¹, CHAI Jun-rui^{1, 2}, XU Zeng-guang¹, QIN Yuan¹, LI Yan-long¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: The concrete face rockfill dam (CFRD) has become a preferred dam type, yet its design is still largely based on the past experience. However, few studies have been conducted on the behavior of CFRDs on the basis of reliable case history data. A compendium of monitoring records and construction details of 87 case histories of in-service CFRDs constructed in the past 50 years is collected for analyzing the behavior of CFRD from the perspective of statistical analysis. The post-construction crest settlement, deflection and stress of face slab and the maximum settlement at completion time are analyzed. The effects of intact rockfill strength, foundation characteristics, valley shape and seepage flow on behavior of dams are discussed. A summary of the findings from the case histories is put forward to enhance the understanding of behavior of CFRDs. These results may help guide the design, construction and operation of CFRDs.

Key words: concrete face rockfill dam; behavior; case history; monitoring; statistical analysis

0 引言

由于振动碾压技术的采用, 过去 50 a 面板堆石坝(简称面板坝)已经成为一种优选坝型^[1]。面板坝具有众多优点, 很多大坝建在复杂坝址条件上^[2], 如建于覆盖层上的 Alto Anchicaya 坝和强地震地区的紫平铺坝。目前面板坝正在由 200 m 级向 300 m 级突破。复杂地质条件和超高坝高度可能引起不利的工作性状, 比如过大的沉降、面板严重开裂和过大的渗漏量^[1-2]。

面板坝的设计和施工很大程度上仍然依赖于工程经验^[3], 有必要采用已建大坝性状监测数据评估大坝的性状。Clements^[4]、Cooke^[3]以及 Sherard 等^[5]基于已建大坝资料系统地早期面板坝的性状进行过总结。Hunter^[6]、Pinto 等^[7]以及 Won 等^[8]基于少量工程实例数据对面板坝变形展开统计分析。邴能惠^[9]对中国坝

高 129 m 以上的高面板坝性状特征进行系统总结, 研究了高面板坝工作性状及其影响因素。另外也有一些学者采用已建大坝数据来评价面板坝性状^[10-12]。上述研究所采用的工程实例数据往往相对较少, 部分只针对早期大坝或者高坝, 有必要对面板坝展开进一步的统计分析。

本文收集整理 87 个已建面板坝的性状监测记录。从统计的视角对工后坝顶沉降、面板挠度和应力以及竣工时坝顶最大沉降进行统计和分析, 重点考虑堆石母岩饱和状态抗压强度(以下简称堆石强度)、地基特性、河谷形状和渗流作用对大坝性状的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679197, 51679193, 51579207);

陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015)

收稿日期: 2016-05-26

1 面板堆石坝工程实践和数据统计

1.1 面板堆石坝工程实践

Cooke^[3]对现代面板坝的工程设计进行了系统总结和描述。图1所示为面板坝的典型分区示意图。坝体往往根据不同的材料类型、颗粒尺度和目的划分为不同的分区。随着施工技术的改进和能源的需求,很多大坝不得不修建在可压缩的覆盖层地基上。覆盖层主要由砾石、块碎石和细砂等组成,具有结构松散,岩性不连续和不良粒径分布等特性。目前对覆盖层上面板坝的研究并不多^[13]。面板坝的施工参数由堆石质量和类型以及堆石细粒含量所决定。主堆石碾压层厚一般为0.9~2.0 m,它与堆石强度有关。堆石的碾压参数一般为至少10 t 振动碾碾压4~8遍,具体的碾压遍数和层厚、加水量等根据实际堆石材料特性确定。

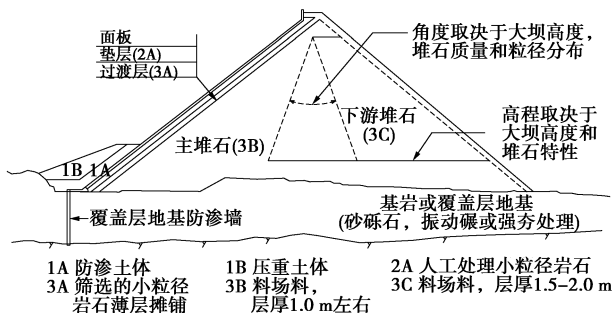


图1 面板堆石坝典型分区

Fig. 1 Zoning of a typical CFRD

1.2 工程实测数据统计

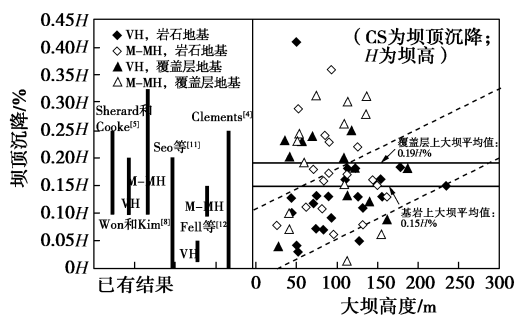
表1为过去50 a中19个不同国家87个大坝的建设信息和性状监测数据。大部分大坝的监测时间（施工完成到大坝性状监测的时间）小于10 a。大坝高度主要在50~200 m范围内。表中包含56个（No.1~No.56）修建在基岩上的大坝和31个（No.57~No.87）修建在可压缩地基上的大坝。覆盖层上大坝孔隙率范围大致为0.15~0.25,小于基岩上大坝范围0.15~0.30。覆盖层地基厚度主要为30~50 m。堆石的强度一般归类为VH（无侧限压缩强度UCS=70~240 MPa），MH（UCS=20~70 MPa），M（UCS=6~20 MPa）^[6]。碾压堆石的强度一般在M~MH之间,由表1可以发现,修建在覆盖层上或者大坝高度超过100 m的大坝堆石强度多为VH。

2 面板堆石坝性状统计分析

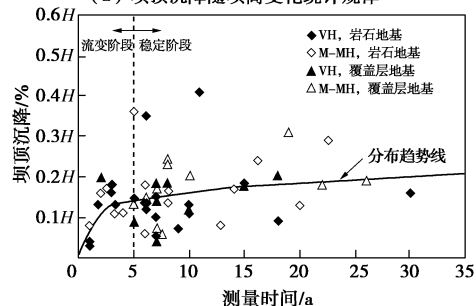
2.1 坝顶沉降

为了协调填筑完工后坝顶沉降,坝顶预留沉降一般为 $1.0H\%$ （ H 为大坝高度）。图2为最大坝顶沉降相对于坝高和监测时间的统计分布规律。为了比较方

便,其它学者统计的长期坝顶沉降范围也包含在图中。由于没有详细区分考虑影响坝顶沉降的其它因素,比如粒径分布、施工方法、河谷形状以及监测时间等,图2(a)直观上没有呈现明显规律性。但是进一步深入分析发现,除了宽河谷的Buan坝以及堆石不良级配和复杂分区的万安溪坝,基本上所有坝顶沉降均小于或等于 $0.3H\%$ 。对于基岩上的大坝,坝顶沉降呈现随坝高和监测时间逐渐增加的趋势,特别是堆石强度为VH的大坝。堆石强度为VH时,坝顶沉降范围为 $(0.03H\sim 0.18H)\%$,而堆石强度为M-MH时,相应范围主要为 $(0.05H\sim 0.25H)\%$,接近90%的数据点位于该范围之内,平均值为 $(0.17H)\%$,比VH堆石强度大坝大 $(0.03H)\%$ 。对于覆盖层上的大坝,坝顶沉降随坝高没有明显的规律性。堆石强度为VH时,坝顶沉降范围为 $(0\sim 0.25H)\%$ 。堆石强度为M-MH时,相应范围大约为 $(0\sim 0.3H)\%$,平均沉降为 $(0.22H)\%$,比VH堆石强度大坝大 $(0.02H)\%$ 。受地基变形的影响,覆盖层上大坝坝顶沉降平均大于基岩上大坝沉降 $(0.04H)\%$ 。图2(b)显示面板坝沉降稳定时间大约为5年。很多数据的监测时间明显小于大坝稳定需要的时间,因此这些数据相对较小,只包含不完全的后期沉降。Won等^[8]结果只区分堆石强度,可能高估基岩上大坝坝顶沉降而低估覆盖层上大坝沉降。其它学者建议的范围可以总结为小于 $(0.25H)\%$,只与基岩上大坝的数据较为吻合,主要是因为这些结果多来源基岩上大坝。



(a) 坝顶沉降随坝高变化统计规律



(b) 坝顶沉降相对于监测时间的统计规律

图2 坝顶最大沉降相对于坝高和时间的统计规律

Fig. 2 Crest settlements with respect to dam height and time

为了进一步分析堆石强度对大坝变形的影响,图

表 1 87 个已建大坝建设信息和性状监测数据统计

Table 1 Summary of case history data and behavior measurements of 87 in-service CFRDs

No	大坝	国家	年度	坝高 /m	坝顶 长度 /m	地基特 性及 厚度	堆石 岩性	堆石 强度 分类	孔隙 率	河谷形 状因子 $/(A \cdot H^2)$	竣工时坝体		工后最大		最大面板		渗漏 $/(l \cdot s^{-1})$	监测 时间 /a
											最大沉降		坝顶沉降		挠度			
											/m	/%	/m	%	/m	%		
1	Tullabardine	澳大利亚	1982 年	26	214	R	砂岩	MH	0.23	8.1	—	—	0.02	0.08H	—	—	0.75	12.8
2	Namgang	韩国	2001 年	34	1126	R	片麻岩	—	0.27	36.2	0.11	0.32H	0.01	0.04H	0.06	0.17H	4	6
3	White Spur	澳大利亚	1989 年	43	146	R	凝灰岩	VH	0.22	2.3	0.07	0.15H	0.06	0.13H	0.04	0.09H	2	5.9
4	Dongbok	韩国	1985 年	44.7	188	R	花岗岩	VH	0.27	3.5	0.33	0.74H	0.04	0.09H	0.04	0.09H	—	7
5	Buan	韩国	1996 年	50	410	R	流纹岩	VH	0.25	7.3	0.44	0.88H	0.20	0.41H	—	—	—	11
6	Daegok	韩国	2006 年	52	190	R	片麻岩	VH	0.25	3.7	0.11	0.21H	0.02	0.04H	0.01	0.02H	—	1
7	Little Para	澳大利亚	1977 年	53	225	R	粉砂岩	M	—	—	—	—	0.15	0.29H	—	—	19.2	22.6
8	Jangheung	韩国	2005 年	53	403	R	凝灰岩	VH	0.28	10.7	0.44	0.83H	0.02	0.04H	0.03	0.06H	—	1
9	Cheongsong (L)	韩国	2004 年	62	300	R	花岗岩	MH- VH	—	6.7	—	—	0.07	0.11H	—	—	1.5	3.2
10	Cabin creek	美国	1969 年	64	350	R	片麻岩	MH	0.33	—	—	—	0.11	0.17H	—	—	—	10
11	Yongdam	韩国	2001 年	70	498	R	页岩	MH	0.32	8.8	0.35	0.50H	0.12	0.17H	0.01	0.01H	—	6
12	Sancheong (L)	韩国	2002 年	70.9	286	R	花岗岩	VH	0.27	6.3	0.27	0.37H	0.09	0.13H	0.01	0.01H	—	6
13	成屏	中国	1989 年	74.6	325	R	凝灰岩	VH	0.28	2.8	0.28	0.38H	0.10	0.13H	0.19	0.25H	33	10
14	Bastyan	澳大利亚	1983 年	75	430	R	流纹岩	VH	0.23	3.4	0.17	0.23H	0.05	0.07H	0.07	0.09H	5	9
15	蒲石河	中国	2012 年	78.5	395	R	凝灰岩	VH	0.22	3.8	0.33	0.42H	—	—	0.12	0.15H	50	2
16	泽雅	中国	1998 年	78.8	312	R	石灰岩	VH	0.25	3.7	0.40	0.51H	0.12	0.15H	0.14	0.18H	—	15
17	Mangrove creek	澳大利亚	1981 年	80	380	R	粉砂岩	MH	0.26	4.5	0.43	0.54H	0.08	0.10H	0.10	0.13H	2.5	4
18	Pyonghwa (1st)	韩国	1988 年	80	590	R	片麻岩	VH	0.40	7.1	0.41	0.51H	1.17	1.46H	—	—	—	5
19	Crotty	澳大利亚	1990 年	83	240	R	砂砾石	VH	0.20	1.9	0.18	0.22H	0.06	0.07H	0.05	0.06H	32.5	9
20	Cokal	土耳其	2010 年	83	605	R	石灰岩	MH	0.20	6.2	0.50	0.60H	0.13	0.16H	0.15	0.18H	—	2
21	Sugaroaf	澳大利亚	1979 年	85	1050	R	粉砂岩	MH	0.30	11.5	0.20	0.24H	0.21	0.25H	0.16	0.19H	13	15
22	Sancheong (U)	韩国	2002 年	86.9	360	R	花岗岩	VH	0.27	3.1	0.39	0.44H	0.30	0.35H	0.01	0.01H	—	6
23	Miryang	韩国	2001 年	89	535	R	粉砂岩	—	0.18	6.8	0.43	0.48H	0.09	0.10H	0.16	0.18H	9	6
24	Kotmale	斯里兰卡	1984 年	90	560	R	片麻岩	MH- VH	0.27	7.4	0.86	0.96H	0.15	0.17H	0.10	0.11H	—	2.5
25	Cheongsong (U)	韩国	2004 年	90	400	R	花岗岩	VH	—	3.7	—	—	0.12	0.13H	—	—	10	3.3
26	大拗	中国	1999 年	90.2	424	R	砂岩	MH	0.21	3.6	0.92	1.02H	0.21	0.23H	0.23	0.25H	61	8
27	万安溪	中国	1995 年	93.8	210	R	花岗岩	MH	0.26	2.0	0.21	0.22H	0.34	0.36H	0.10	0.11H	5.62	5
28	Murchison	澳大利亚	1982 年	94	200	R	流纹岩	VH	0.23	1.9	0.20	0.21H	0.08	0.09H	0.09	0.10H	2	18
29	西北口	中国	1989 年	95	222	R	石灰岩	M	0.28	3.3	0.32	0.34H	0.06	0.06H	0.08	0.08H	35.3	6

续表 1

No.	大坝	国家	年度	坝高 /m	坝顶 长度 /m	地基特 性及厚 度	堆石 岩性	堆石 强度 分类	孔隙 率	河谷形 状因子 $/(A \cdot H^2)$	竣工时坝体		工后最大		最大面板		渗漏 $/(l \cdot s^{-1})$	监测 时间 /a
											最大沉降 /m	/%	坝顶沉降 /m	/%	挠度 /m	/%		
30	R.D. Bailey	美国	1979 年	96	420	R	砂岩	M	0.27	3.5	—	—	0.42	0.44H	—	—	—	10
31	洞巴	中国	2006 年	105.9	467	R	砂岩	M	—	—	2.30	2.18H	—	—	—	—	—	—
32	Cethana	澳大利亚	1971 年	110	213	R	石英岩	VH	0.26	2.5	0.50	0.46H	0.18	0.16H	0.17	0.1H	7.5	30
33	Glevard	伊朗	2012 年	110	275	R	石英岩	VH	0.25	—	0.75	0.68H	—	—	0.25	0.23H	—	3
34	Khao Laem	泰国	1984 年	113	1000	R	石灰岩	MH	0.29	8.3	1.37	1.21 H	0.19	0.17H	0.13	0.12H	53	14
35	潘口	中国	2011 年	114	292	R	硅质岩	VH	—	—	0.27	0.25H	0.20	0.18H	—	—	—	3
36	Turimiquire	委内瑞拉	1982 年	115	410	R	灰岩	VH	0.32	2.7	—	—	0.27	0.23H	0.25	0.22H	—	5
37	Lower Pieman	澳大利亚	1986 年	122	360	R	辉绿岩	M	0.24	2.5	0.23	0.19H	0.22	0.18H	0.27	0.22H	—	15
38	Shiroro	尼日利亚	1984 年	125	560	R	花岗岩	VH	0.20	4.2	0.94	0.75H	0.17	0.14H	0.09	0.07H	100	1.8
39	Cirata	印尼	1988 年	125	453	R	安山岩	M-M H	0.24	3.9	0.63	0.50H	0.27	0.22H	0.35	0.28H	60	10
40	Ita	巴西	1999 年	125	880	R	玄武岩	MH- VH	0.31	7.0	—	—	0.60	0.48H	0.51	0.41H	200	4
41	Golillas	哥伦比亚	1978 年	127	107	R	砾石	VH	0.24	0.9	0.39	0.31H	0.05	0.04H	0.16	0.13H	385	7
42	引子渡	中国	2004 年	129.5	276	R	灰岩	VH	0.21	2.1	1.10	0.85H	—	—	0.20	0.15H	—	5
43	公伯峡	中国	2002 年	132.2	429	R	花岗岩	VH	0.17	2.5	0.35	0.26H	0.15	0.11H	0.18	0.14H	—	10
44	Kurtun	土耳其	1999 年	133	300	R	石灰岩	MH	0.22	2.2	2.02	1.50H	0.11	0.08H	—	—	—	1
45	Segredo	巴西	1993 年	145	720	R	玄武岩	MH- VH	0.37	4.1	2.22	1.53H	0.23	0.16H	0.34	0.23H	45	8
46	董菁	中国	2009 年	149.5	566	R	砂岩	VH	0.19	3.7	1.78	1.19H	—	—	0.60	0.40H	—	3
47	Mesochora	希腊	1995 年	150	340	R	石灰岩	M	0.23	1.6	2.10	1.40H	0.22	0.15H	0.33	0.22H	—	5
48	马鹿塘	中国	2009 年	154	493	R	花岗岩	VH	0.19	2.4	1.50	0.97H	0.25	0.16H	0.28	0.18H	137	3
49	紫平铺	中国	2006 年	156	664	R	石灰岩	VH	0.26	4.8	0.71	0.46H	0.21	0.13H	0.25	0.16H	—	6
50	吉林台	中国	2006 年	157	445	R	凝灰岩	VH	0.23	3.1	0.59	0.38H	—	—	0.24	0.15H	—	7
51	Foz do Areia	巴西	1980 年	160	828	R	玄武岩	MH- VH	0.33	5.4	3.58	2.34H	0.21	0.13H	0.78	0.49H	70	20
52	天生桥	中国	2000 年	178	1104	R	石灰岩	M-VH	0.31	4.9	3.28	1.84H	1.06	0.60H	1.14	0.64H	70	1.5
53	洪家渡	中国	2005 年	179.5	428	R	灰岩	VH	0.20	2.4	1.24	0.69H	0.32	0.18H	0.35	0.19H	140	6
54	三板溪	中国	2007 年	185	423	R	粉砂岩	MH	0.22	2.5	1.05	0.57H	—	—	0.17	0.10H	100	5
55	Bakun	马来西亚	2007 年	205	740	R	砂岩	VH	0.20	2.8	2.27	1.10H	—	—	0.80	0.39H	—	4
56	水布垭	中国	2007 年	233	675	R	石灰岩	VH	0.22	2.3	2.30	0.98H	0.35	0.15H	0.28	0.12H	20	3
57	Pappadai	意大利	1992 年	27	890	G, 50 m	灰岩	VH	—	—	0.07	0.26H	0.01	0.04H	—	—	—	7
58	梁辉	中国	1997 年	35.4	410	G, 25 m	凝灰岩	VH	0.23	8.8	0.21	0.59H	0.08	0.23H	0.06	0.17H	—	8
59	楚松	中国	1998 年	40	308	G, 35 m	砂卵石	MH	0.21	13.7	0.16	0.40H	0.04	0.10H	—	—	48	9
60	梅溪	中国	1998 年	41	652	G, 30 m	凝灰岩	MH	—	22.2	0.20	0.48H	0.08	0.20H	0.13	0.32H	—	10

续表 1

No.	大坝	国家	年度	坝高 /m	坝顶 长度 /m	地基 特性 及厚度	堆石 岩性	堆石 强度 分类	孔隙 率	河谷形 状因子 $/(A \cdot H^2)$	竣工时坝体		工后最大		最大面板		渗漏 $/(l \cdot s^{-1})$	监测 时间 /a
											最大沉降 /m	/%	坝顶沉降 /m	/%	挠度 /m	/%		
61	柯柯亚	中国	1981 年	42	123	G, 37.5 m	砂砾石	M	—	6.8	—	—	0.03	0.07H	—	—	26.01	7
62	铜街子副坝	中国	1992 年	48	434	G, 71 m	玄武岩	VH	—	—	0.45	0.94H	—	—	0.120.25H	—	8	
63	大河	中国	1998 年	50.8	168	G, 37 m	石灰岩	M	0.21	4.1	0.25	0.49H	0.12	0.23H	0.130.25H	—	8	
64	双溪口	中国	2009 年	52.1	426	G, 15.4 m	凝灰岩	MH	0.20	10.2	0.46	0.94H	—	—	0.170.32H	—	2	
65	Pichi-Picun Leufu	阿根廷	1999 年	54	1045	G, 28 m	砂砾石	M	0.19	9.1	0.50	0.90H	0.13	0.24H	0.160.30H	18	8	
66	汉坪嘴	中国	2006 年	57	202	G, 45 m	砂砾石	VH	0.22	4.0	0.33	0.58H	0.12	0.21H	0.130.23H	—	5	
67	Kangaroo Creek	澳大利亚	1969 年	60	178	R, G, 20 m	页岩	M-M H	—	—	—	—	0.12	0.19H	—	—	2.5	26
68	横山坝	中国	2006 年	70.2	210	G, 72.3 m	凝灰岩	MH	0.23	2.9	0.50	0.71H	0.17	0.24H	0.180.25H	—	5	
69	天荒坪	中国	1998 年	72	503	WR, 35 m	凝灰岩	MH	—	—	0.64	0.89H	—	—	—	—	—	—
70	Mackintosh	澳大利亚	1981 年	75	465	WR	砂岩	M-M H	0.24	4.9	0.48	0.64H	0.24	0.32H	0.490.65H	9	19	
71	Puclaro	智利	1999 年	83	640	G, 113 m	砂砾石	M	0.20	2.4	0.67	0.81H	0.11	0.13H	0.120.14H	—	5	
72	老渡口	中国	2009 年	96.6	172	G, 29.6 m	砂砾石	MH	—	2.1	0.34	0.35H	—	—	0.110.11H	—	2	
73	那兰	中国	2005 年	109	333	G, 24.3 m	砂砾石	MH	0.19	2.9	0.31	0.28H	0.16	0.15H	0.160.15H	115	6	
74	察汗乌苏	中国	2009 年	110	338	G, 46.7 m	砂砾石	VH	0.17	3.7	0.53	0.48H	0.22	0.20H	0.300.27H	15	2	
75	苗家坝	中国	2011 年	110	348	G, 48 m	凝灰岩	VH	0.20	2.8	0.91	0.83H	0.28	0.26H	0.300.27H	—	1	
76	多诺	中国	2012 年	112.5	220	G, 35 m	砂岩	VH	0.21	2.2	1.10	0.98H	0.33	0.30H	0.230.20H	—	2	
77	Santa Juana	智利	1995 年	113.4	390	G, 30m	砂砾石	M	—	3.1	—	—	0.01	0.01H	—	—	50	4
78	Potrerrillos	阿根廷	2003 年	116	395	G, 35 m	石灰岩	VH	0.21	3.1	0.82	0.70H	0.29	0.25H	0.300.26H	—	6	
79	Reece	澳大利亚	1986 年	122	374	G	辉绿岩	VH	0.24	—	0.23	0.19H	0.22	0.18H	0.260.21H	1	15	
80	珊溪	中国	2000 年	132.5	448	G, 24 m	凝灰岩	VH	0.20	3.4	0.95	0.72H	—	—	0.200.15H	—	6	
81	九甸峡	中国	2008 年	136	232	G, 56 m	石灰岩	VH	0.17	2.0	1.24	0.91H	0.42	0.31H	0.840.62H	136	3	
82	Los Caracoles	阿根廷	2009 年	136	605	G, 28 m	石灰岩	MH	0.23	4.5	1.01	0.80H	0.38	0.28H	0.410.30H	130	4	
83	Alto Anchicaya	哥伦比亚	1974 年	140	260	G, 34 m	角岩	VH	0.22	1.1	0.63	0.45H	0.17	0.12H	0.160.11H	180	10	
84	Xingo	巴西	1994 年	150	850	R, G, 41 m	花岗岩	M-V H	0.28	6.0	2.90	1.93H	0.53	0.35H	0.510.34H	140	6	
85	Salvajina	哥伦比亚	1983 年	154	362	G, R, 30 m	砂砾石	MH- VH	0.21	2.4	0.30	0.20H	0.09	0.06H	0.060.04H	60	7.5	
86	滩坑	中国	2008 年	162	507	G, 30 m	凝灰岩	VH	—	3.7	0.81	0.50H	0.15	0.09H	0.170.10H	80	5	
87	Aguamilpa	墨西哥	1993 年	187	475	R, G	砂砾石	VH	0.18	3.9	—	—	0.34	0.18H	0.320.17H	160	7	

注：R 为岩石地基；G 为砂砾石（覆盖层）地基；WR 为风化岩石地基；M，MH，VH 为堆石强度分类。

3 为基岩上面板坝长期（超过 5 a）坝顶沉降与堆石强度分类关系图。堆石强度为 M 大坝坝顶沉降平均为 VH 大坝的 2.1 倍，这是因为在碾压作用下较弱的堆石颗粒容易破碎达到较高堆石密度。基本上所有点子均在图 3 范围线之内，除了西北口大坝（数据点 29），坝顶沉降显然较小。该大坝坝料为砂砾石，砂砾石颗粒强度大并且孔隙率较小，致使坝顶沉降较小。

面板坝工后沉降由蓄水作用、水位波动、堆石流变等多个机理引起，其中流变是长期沉降的主要原因。图 4（a）为 11 个大坝实测坝顶最大沉降随时间变化

过程。0 时刻为坝体填筑完成时间。大部分曲线均在 Clement^[4]建议沉降范围内。坝顶沉降随时间逐渐增加, 稳定时间为 2000 d 左右, 与图 2 (b) 结果较为一致。

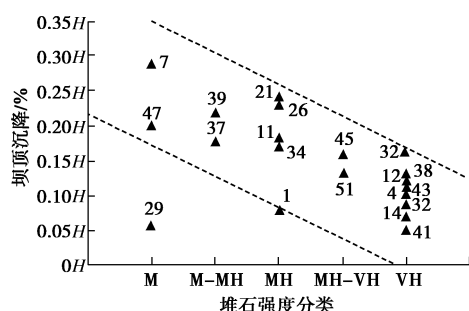


图3 长期坝顶沉降随堆石强度分类变化统计规律(图中的系列号为表1中大坝的编号, 其它图相同)

Fig. 3 Long-term crest settlements with respect to classification of intact rockfill strength

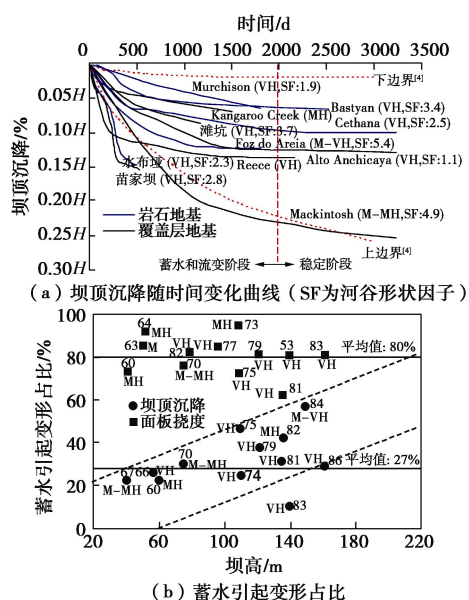


图4 若干大坝坝顶最大沉降演化过程以及蓄水引起变形占比
Fig. 4 Crest maximum settlements as functions of time, and ratio of deformation during reservoir filling to total deformation

图4 (b) 为蓄水引起覆盖层上大坝坝顶沉降和面板挠度占总变形的比值。大约 10%~60% (平均 27%) 的沉降发生在蓄水期, 相对于基岩上大坝 (平均 22%) 较大。蓄水引起沉降占比随坝高和覆盖层相对厚度的增加以及堆石强度的降低而增加。堆石强度为 M-MH 的大坝蓄水引起沉降增量占比平均为 32%, 比 VH 堆石强度大坝大 7% 左右。在蓄水作用下, 坝顶沉降随时间变化曲线一般呈现 S 型, 图 4 (a) 中由于时间跨度较大, 且各坝变形相差较大, 因此上述规律不明显。有些学者^[5-6]发现, 在对数坐标下坝顶沉降随时间变化

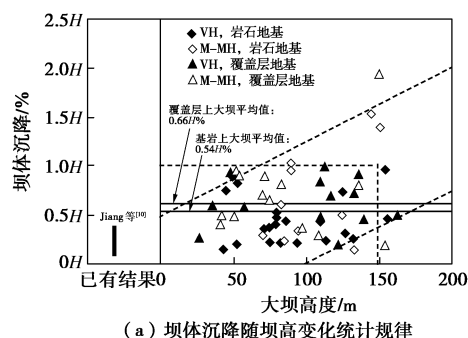
曲线为一条直线, 该结论可以用来预测坝顶长期沉降。

在相似坝高和堆石强度情况下, Cheongsong 坝 (SF: 3.7) 比 Murchison 坝 (SF: 1.9) 坝顶沉降大 0.04H%, 沉降随河谷形状因子增加。其它因素相同时, 堆石强度较低的万安溪坝比强度较高的 Murchison 坝, 沉降大 0.27H%, 说明堆石强度对基岩上大坝沉降的影响更加显著。坝高和河谷形状均相似情况下, 覆盖层上苗家坝比基岩上堆石强度为 M 的 Lower Pieman 坝沉降大 0.08H%, 说明地基变形是覆盖层上大坝影响坝顶沉降的主导因素。在低堆石强度和覆盖层地基复合因素作用下, Mackintosh 坝坝顶沉降较大, 甚至超出建议上边界, 竣工 3000 d 后也未明显稳定。

2.2 坝体沉降

图 5 (a) 为竣工时坝体最大沉降统计图。几乎所有沉降均小于 1.0H%, 除了一些坝高超过 150 m 的大坝, 比如 Segrado (1.53H%), Mesochora (1.4H%) 和 Xingo (1.93H%)。大部分 (接近 80%) 大坝沉降范围为 (0.2H~0.5H)%。堆石强度为 M-MH 大坝平均沉降为 0.62H%, 比堆石强度为 VH 大坝大 0.17H%。对于覆盖层上大坝, 坝体沉降范围为 (0.2H~1.0H)%。堆石强度为 M-MH 大坝平均沉降为 0.70H%, 比 VH 大坝大 0.07H%。覆盖层上大坝沉降平均比基岩上大坝大 0.12H%。对于覆盖层上大坝, 考虑大坝高度和覆盖层厚度情况下, 大坝沉降小于总高度的 0.8%。Jiang 等^[10]统计的最大坝体沉降范围与本文基岩上堆石强度为 VH 大坝的结果较为吻合, 但是明显小于堆石强度为 M-MH 或覆盖层上大坝的结果。

为了进一步分析覆盖层地基上大坝沉降规律。图 5 (b) 为 18 个大坝坝体最大沉降随覆盖层相对厚度关系图。沉降随覆盖层相对厚度增加而增加, 趋势线斜率为 0.6。但是当覆盖层厚度大于 0.5H 时, 沉降不再有明显增加, 可能是底部覆盖层变形较小, 对大坝影响有限。两个大坝在趋势线外, 可能是因为低堆石模量 (Xingo 坝: 32 MPa) 和高地基变形模量 (大河坝: 55~60 MPa)。在相同覆盖层相对厚度情况下, 覆盖层变形模量越小, 坝体沉降越大。



(a) 坝体沉降随坝高变化统计规律

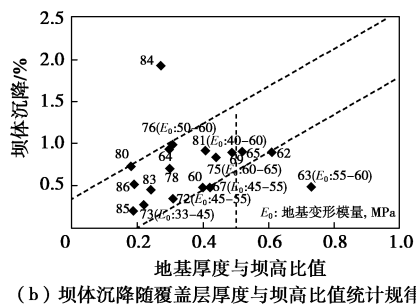


图 5 竣工时坝体最大沉降与坝高和地基相对厚度的统计规律
Fig. 5 Maximum dam settlements at completion time with respect to dam height and relative thickness of alluvium

若干大坝沉降与高度归一化关系表明,在覆盖层压缩变形影响下,最大沉降发生在 $0.2H \sim 0.4H$ 位置,低于基岩上大坝位置 ($0.4H \sim 0.6H$)。随着覆盖层相对厚度增加,最大沉降位置向下移动。当厚度为大于 $0.5H$ 时,最大值发生在 $0.2H$ 处并趋于稳定,这是因为超过 $0.5H$ 厚的覆盖层对变形影响较小。

图 6 为 13 个大坝最大沉降随时间变化曲线。施工期沉降快速增加,超过 90% 发生在蓄水完成前。对于基岩上大坝,与坝顶沉降相似,坝体沉降随河谷形状因子呈现增加的趋势,但是堆石强度对坝体沉降影响更明显。比较覆盖层上堆石强度为 VH 大坝和基岩上堆石强度为 M-MH 大坝平均沉降可知,两者比较接近,说明覆盖层和堆石强度均对坝体沉降具有较大影响。在较大坝高、低堆石强度及宽河谷复合因素作用下,水布垭和天生桥坝均产生大于 $1H\%$ 的沉降。

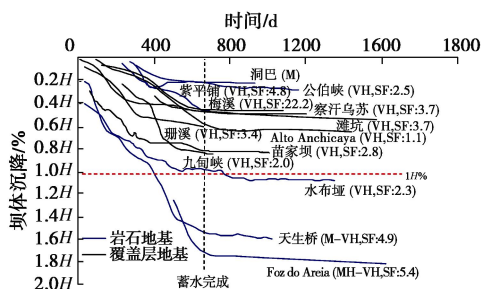


图 6 若干大坝坝体最大沉降随时间变化过程

Fig. 6 Evolution of maximum dam settlements of several dams

2.3 面板性状分析

图 7 (a) 为面板挠度监测结果随坝高统计规律。超过 90% 大坝的面板挠度小于 $0.4H\%$, 并且超过一半的数据点小于 $0.2H\%$ 。但是某些大坝挠度显然较大, 主要由低堆石模量 (Mackintosh 坝: 30 MPa), 覆盖层厚度 (九甸峡坝: 56 m) 以及较大坝高 (天生桥坝: 178 m) 引起。对于基岩上的大坝, 面板挠度呈现随坝高增加的趋势, 特别是堆石强度为 VH 的大坝。堆石强度为 VH 的大坝挠度范围为 ($0 \sim 0.2H$) %, 强度

为 M-MH 时范围为 ($0.1H \sim 0.3H$) %, 平均值为 $0.25H\%$, 比 VH 强度大坝大 $0.13H\%$ 。覆盖层上大坝, 堆石强度为 VH 时, 挠度范围为 ($0.1H \sim 0.3H$) %, 强度为 M-MH 时, 范围为 ($0.05H \sim 0.4H$) %, 平均值为 $0.28H\%$, 比 VH 强度大坝大 $0.05H\%$ 。覆盖层上大坝挠度平均大于基岩上大坝 $0.08H\%$ 。其它学者建议的挠度范围 (总结为 ($0H \sim 0.5H$) %), 与覆盖层上 M-MH 堆石强度大坝的范围较为吻合, 但是大于 VH 堆石强度和基岩上大坝的范围。

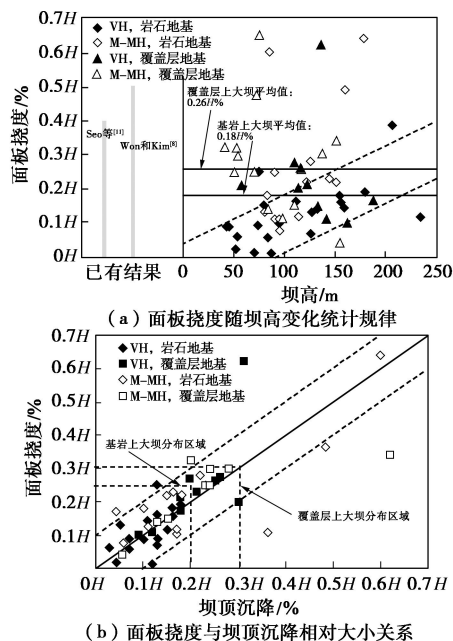


图 7 最大面板挠度随坝高变化的统计规律以及面板挠度与坝顶沉降相对大小的比较

Fig. 7 Deflections of face slab with respect to dam height and comparison between deflections of face slab and crest settlements

Sherard 等^[5]认为面板坝最大面板挠度为坝顶沉降的 2~4 倍。Won 等^[8]认为面板挠度和坝顶沉降基本相近, 当大坝高度超过 100 m 时, 面板挠度相对较大。如图 7 (b) 所示, 面板挠度与坝顶沉降非常接近。超过 80% 的数据点在图中范围内。覆盖层上以及低堆石强度大坝, 面板挠度相对于坝顶沉降较大, 但相差不会超过 $0.1H\%$, 面板挠度平均为坝顶沉降的 1.1 倍。这些较大面板挠度主要由较大坝体变形引起。

如图 4 (b) 所示, 对于覆盖层上面板坝大约 80% 的挠度由蓄水引起, 大于基岩上大坝的 74%, 水荷载对面板变形的影响显然大于对坝顶沉降的影响。若干大坝面板挠度变形分布如图 8 所示。一般来说最大面板挠度发生在地基以上 $1/3H \sim 1/2H$ 位置, 并且面板变形呈 D 型分布^[7]。如图 8 所示面板挠度分布规律呈现明显的 D 型。覆盖层上大坝面板挠度相对基岩上大坝较大并且最大值发生位置较低 ($0.2H \sim 0.3H$)。

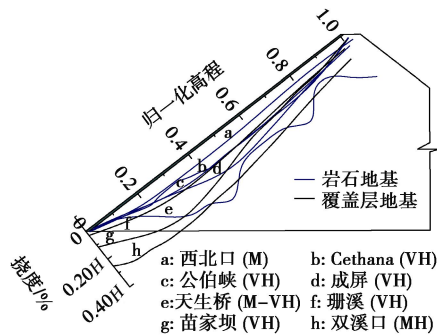


图8 若干大坝面板挠度典型断面归一化面板挠度分布

Fig. 8 Normalized face deflection distributions at typical section

对于基岩上大坝, 在其它因素相同情况下, 河谷系数较大的 Miryang 坝面板挠度比 Murchison 坝大 $0.08H\%$, 而堆石强度较低的大拗坝挠度比 Murchison 坝大 $0.15H\%$, 说明堆石强度对面板挠度的影响更加显著。对于覆盖层上大坝, 堆石强度为 VH 时平均挠度为 $0.23H\%$, 小于基岩上堆石强度为 M-MH 大坝的平均值, 说明对于覆盖层上面板坝, 面板挠度主要受覆盖层和堆石强度影响, 其中堆石强度影响相对较大。

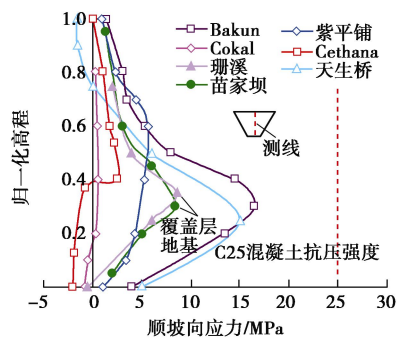


图9 若干大坝面板蓄水后实测典型断面顺坡向应力分布

Fig. 9 Measured slope-direction stresses in face slab

若干大坝蓄水后实测面板顺坡向应力分布如图9所示。最大压应力 ($1.0 \sim 17.0$ MPa) 发生在底部, 在某些工程面板顶部和底部产生拉应力。覆盖层上大坝面板应力分布结果与基岩上大坝结果较为相似。引起面板产生拉应力的机制可以总结为: ①面板挠度在两侧和底部引起较大弯矩, 促使产生拉应力; ②堆石较大变形拖曳面板向中间变形, 在四周引起拉力, 促使额外的拉应力。蓄水过程中, 水压力增加面板和堆石的剪切阻力, 促使面板底部产生拉应力。

2.4 河谷形状和渗流作用对大坝性状的影响

(1) 河谷形状的影响

图10为竣工期坝体最大沉降随河谷形状因子 (A/H^2) 统计规律。总结基岩上典型大坝结果可知, 在狭窄河谷中 ($A/H^2 < 3$), 蓄水后坝体沉降和面板挠度分别平均占总变形的10%和18%, 并持续较长时间。

图10显示, 河谷形状因子小于3时, 坝体沉降相对较小并具有较大变化, 特别是基岩上堆石强度为VH的大坝, 上述结果主要由狭窄河谷拱效应引起。拱效应作用使坝体部分荷载传递到两岸, 发生不完全沉降。

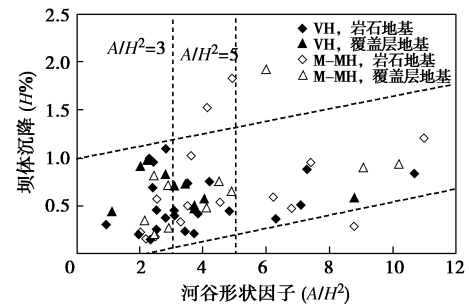


图10 竣工时坝体最大沉降与河谷形状因子关系

Fig. 10 Dam settlements with respect to valley shape factor

两个典型坝 (Kurtun 坝和苗家坝) 的竣工期监测应力显然小于计算土柱压力, 应力最大削减量分别达30%和22%。基岩上大坝拱效应比覆盖层上大坝更加明显, 可能是因为地基压缩变形可以一定程度上释放拱效应。Hunter^[6]发现, 河谷宽度小于 ($30H \sim 40H$)%, 岸坡角大于 50° 时, 拱效应造成应力削减超过20%。

(2) 渗流作用的影响

Freitas 等^[14]发现, 在若干实际工程中, 大坝渗漏并没有引起显著沉降增量。很多学者^[8,14]认为面板坝的渗漏并不会对大坝安全和稳定造成威胁。这些结论可以进一步通过图11进行验证, 大坝沉降没有随着渗漏量的增加产生显著增加。这是因为碾压的堆石通过颗粒骨架结构支撑上部坝体重量。骨架颗粒之间接触面积较小因此接触力非常大 (接近岩石压缩强度)。这些较大接触力引起的颗粒之间的摩擦阻力显著大于堆石孔隙中渗流引起的拖曳力。面板坝中浸润线较低, 渗流分布在底部区域, 这是影响不明显的另一个原因。对于覆盖层上面板坝, 坝顶沉降具有随渗漏量增加而增加的趋势, 这可能是因为渗流作用造成覆盖层结构松弛和地基侵蚀, 进而引起额外沉降。

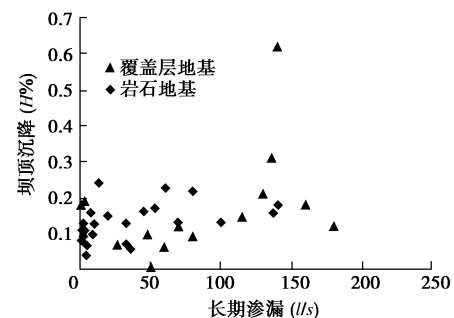


图11 坝顶最大沉降随长期渗漏量变化的统计规律

Fig. 11 Relationship between crest settlement and long-term leakage

3 结 论

(1) 竣工时面板坝坝体最大沉降一般均小 $1.0H\%$, 坝顶最大沉降的范围一般为 $(0 \sim 0.3H)\%$ 。面板挠度与坝顶沉降非常接近, 大部分大坝面板挠度均小于 $0.2H\%$ 。蓄水过程对大坝性状特别是面板变形具有显著影响。面板挠度和堆石拖曳作用引起的拉力是引起面板拉应力的主要原因。

(2) 面板坝性状主要受坝高, 堆石强度, 地基特性以及河谷形状等因素影响。对于基岩上的面板坝, 堆石强度是影响大坝变形的关键因素, 堆石强度为 M-MH 大坝的沉降和面板挠度均可能大于堆石强度为 VH 大坝的 $0.1H\%$ 。对于覆盖层上的大坝, 地基压缩变形和堆石强度是影响大坝变形的决定性因素。大坝最大沉降和面板挠度均超过基岩上大坝的 $0.1H\%$, 而且最大值位置下移量可以达到 $0.2H$ 。坝体和面板变形均随覆盖层相对厚度的增加而增加。当河谷形状因子小于 3 时, 将引起明显拱效应。在堆石颗粒骨架结构作用下, 渗流作用对面板坝变形影响较小。

参考文献:

- [1] 郇能惠, 杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1361 - 1368. (LI Neng-hui, YANG Ze-yan. Technical advances in concrete face rockfill dam in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1361 - 1368. (in Chinese))
- [2] 邓铭江. 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 985 - 996. (DENG Ming-jiang. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 985 - 996. (in Chinese))
- [3] COOKE J B. Progress in rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**: 1381 - 1414.
- [4] CLEMENTS R P. Post-construction deformation of rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **110**(7): 821 - 840.
- [5] SHERARD J L, COOKE J B. Concrete-face rockfill dam: I assessment[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**: 1096 - 1112.
- [6] HUNTER G J. The pre- and post-failure deformation behaviour of soil slopes[D]. Sydney: University of New South Wales, 2003.
- [7] PINTO N L S, MARQUES F P. Estimating the maximum face deflection in CFRDs[J]. International Journal of Hydropower Dams, 1998, **5**: 28 - 31.
- [8] WON M S, KIM Y S. A case study on the post-construction deformation of concrete face rockfill dams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**: 845 - 852.
- [9] 郇能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 165 - 173. (LI Neng-hui. Performance of high concrete face rockfill dams in China and its inspiration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 165 - 173. (in Chinese))
- [10] JIANG G, CAO K. Concrete face rockfill dams in China[C]// Proceedings of International Symp on High Earth-Rockfill Dams. Beijing, 1993: 25 - 37.
- [11] SEO M W, HA I S, KIM Y S, et al. Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**: 1070 - 1081.
- [12] FELL R, MACGREGOR P, STAPLEDON D, et al. Geotechnical engineering of dams[M]. London: Baikema/Taylor & Francis, 2005.
- [13] 温立峰, 柴军瑞, 王 晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(8): 2386 - 2394. (WEN Li-feng, CHAI Jun-rui, WANG Xiao. Stress-deformation behavior of a concrete-faced rockfill dam with a deep overburden foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(8): 2386 - 2394. (in Chinese))
- [14] FREITAS M S, CRUZ P T. Unpredicted cracks and repures at face slab in CFRDs-reparing works and treatment[C]// Proceeding of the Workshop on High Dam Know-how. Yichang, 2007: 75 - 90.