

中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示

郇能惠

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 阐述了中国高混凝土面板堆石坝(坝高 129 m 以上)安全监测布置、监测仪器选型和数量以及监测主要成果,在分析了高混凝土面板堆石坝监测资料的基础上指出筑坝材料的变形特性、坝高和河谷形状是影响混凝土面板堆石坝工作形状的主要因素,提出了坝体沉降特征值 C_s 、坝体水平位移特征值 C_{Du} 和 C_{Dd} 、周边缝位移特征值 C_{DS} 、面板垂直缝位移特征值 C_{DV} 和面板挠度特征值 C_d 的概念与表达式,目的是以利于表征面板堆石坝性状及其影响因素,研究了中国高混凝土面板堆石坝工作性状各特征值的分布规律,据此预估了 300 m 超高混凝土面板堆石坝坝体和面板变形性状以及接缝位移,指出建设 300 m 超高面板堆石坝在技术上是可行的,提出了 300 m 级超高面板堆石坝的设计理念、关键技术和研究重点。

关键词: 高混凝土面板堆石坝; 安全监测; 工作性状; 特征值; 设计理念; 可行性

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2011)02 - 0165 - 09

作者简介: 郇能惠(1940 -), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事水利水电工程和电力建设工程中水工结构和岩土力学研究工作。E-mail: nhli@nhri.cn。

Performance of high concrete face rockfill dams in China and its inspiration

LI Neng-hui

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The safety monitoring layout, instrumentation and results of high concrete face rockfill dams (more than 129 m in height) in China are presented. Based on the studies on the monitoring results, it is found that the deformation property of the dam material, the dam height and the valley shape have important effects on the performance of the dams. The concept and representation of characteristic values (C_s for settlement of dam body, C_{Du} and C_{Dd} for displacement of dam body, C_{DS} for displacement of perimeter joint, C_{DV} for displacement of vertical joint of face slab and C_d for deflection of face slab respectively) are put forward, which is of great help to the description of the dam performance and its influencing factors. The deformation behaviors of dam body, face slab and joints of 300 m super-high concrete face rockfill dams are predicted by using the characteristic value method. The feasibility, design concept, key technology and further research direction for 300 m super-high concrete face rockfill dams are also proposed.

Key words: high concrete face rockfill dam; safety monitoring; performance; characteristic value; design concept; feasibility

0 引 言

20 世纪末 21 世纪初中国相继建成了一批高混凝土面板堆石坝,大致可以分为两个阶段,先期是 1998 年建成的高 178 m 的天生桥一级面板堆石坝,在天生桥一级坝的工程经验基础上,在 21 世纪第一个十年内建设了水布垭(高 233 m)、三板溪(高 185.5 m)、洪家渡(高 179.5 m)、滩坑(高 162 m)、紫坪铺(高 158 m)、吉林台一级(高 157 m)和马鹿塘二期(高 154 m)等。坝高 219 m 的江坪河面板堆石坝已经开工,坝高 223.5 m 的猴子岩面板堆石坝将要兴建,总结已建的高混凝土面板堆石坝的成功经验,研究其工作性状的基本规律,对于在建的 200 m 以上的高混凝土

面板堆石坝和将要兴建的 300 m 级超高混凝土面板堆石坝工程有一定的指导意义。

1 中国高混凝土面板堆石坝安全监测

大坝安全监测的目的是及时监测和分析大坝性状,指导工程安全施工和安全运行,充分发挥工程效益,同时为评价施工质量和优化设计进而提高筑坝技术水平提供资料和依据。混凝土面板堆石坝可以看作以面板—趾板—接缝止水组成的防渗体系和堆石(或砂砾石)坝体两部分构成,面板与堆石坝体又是两个

材料不同、刚度与质量相差悬殊的结构物，因此面板与堆石坝体的变形协调及其相互作用是影响面板工作性状的关键；混凝土面板堆石坝渗流安全是指有无发生通过面板裂缝或破碎、接缝张开或损坏造成的严重渗漏，以及渗流对坝体材料的冲蚀；所以混凝土面板堆石坝安全监测的重点是^[1]坝体变形，接缝位移，面板变形和应力以及渗透压力和渗流量。

中国高混凝土面板堆石坝工程安全监测布置见表1所示^[1-4]。水布垭混凝土面板堆石坝安全监测布置如图1, 2所示。“八五”和“九五”国家科技攻关项目立项由南京水利科学研究院主持研究开发了混凝土面板堆石坝安全监测仪器^[1, 5, 6]，可以说中国混凝土面板堆石坝工程的安全监测分项工程基本上都采用或仿制此攻关研究成果的安全监测仪器。主要有：①监测堆石

坝体内部沉降的水管式沉降计，“九五”期间又开发了量测范围520 m、N2000型遥测遥控垂直位移计^[5-6]；②监测堆石坝内部水平位移的引张线式水平位移计，“九五”期间又开发了量测范围520 m、N2000型遥测遥控水平位移计^[5-6]；③监测接缝位移和面板脱空位移的电位器式测缝计^[6]；④监测面板挠度的固定式测斜仪和斜测斜仪，“九五”期间又开发了高精度双向固定式测斜仪^[5-6]。

2 中国高混凝土面板堆石坝性状

2.1 坝体变形

(1) 坝体沉降

中国高混凝土面板堆石坝坝体沉降及其特征值和

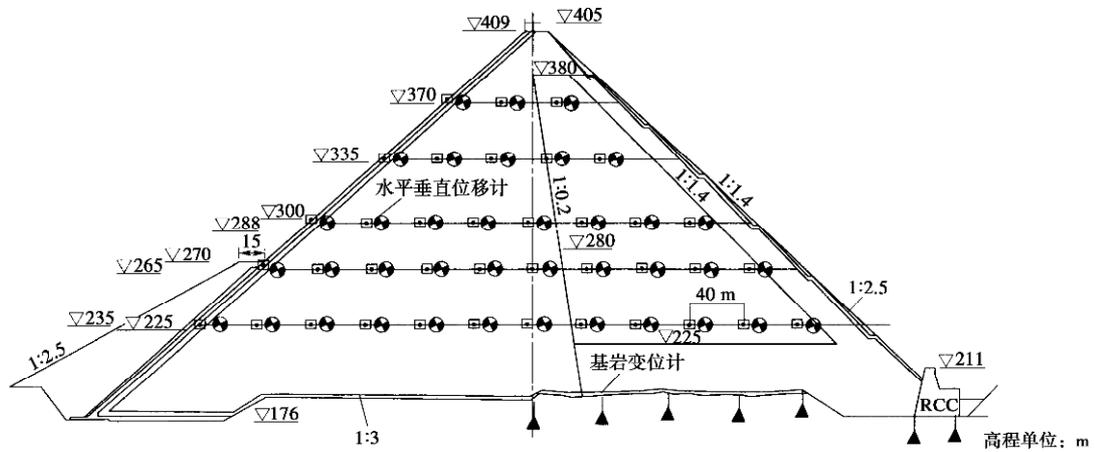


图1 水布垭混凝土面板堆石坝 0+212 m 断面安全监测布置

Fig. 1 Layout of dam safety monitoring for section 0+212 m of Shuibuya CFRD

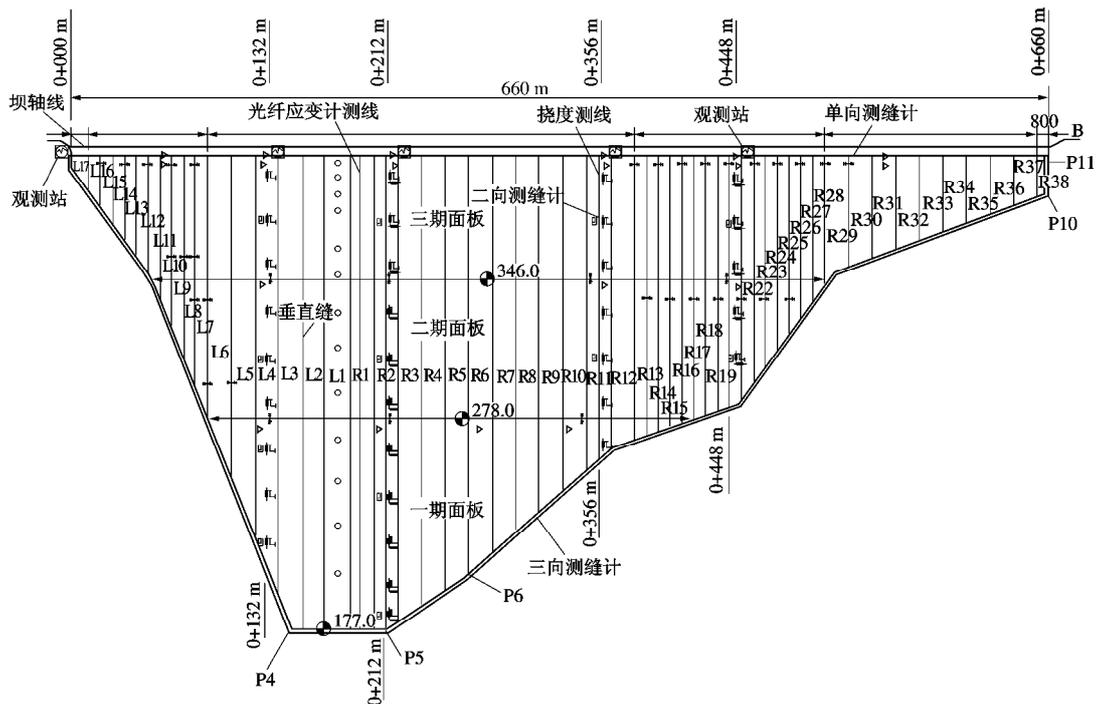


图2 水布垭面板堆石坝面板安全监测布置

Fig. 2 Layout of safety monitoring for face slab of Shuibuya CFRD

表 1 中国高混凝土面板堆石坝安全监测布置和监测仪器数量
Table 1 Layout and instruments of dam safety monitoring of high CFRD in China

坝名	坝高 /m	坝体内部垂直位移(沉降)监测				坝体内部水平位移监测				面板垂直缝位移监测	
		断面数	测线数 (断面)	测点数 (测线)	测点总数	断面数	测线数 (断面)	测点数 (测线)	测点总数	断面数	测点总数
水布垭	233.0	3	3~5	3~12	73	3	3~5	3~12	73	15	30
猴子岩	223.5	3	3~5	5~22	104	3	3~5	5~22	86	7	24
三板溪	185.5	2	4	3~9	48	2	4	2~8	40	7	20
洪家渡	179.5	3	5	4~9	62	3	5	4~6	48		16
天生桥一级	178.0	3	2~4	3~9	51	3	2~4	2~7	31		26
滩坑	162.0	3	2~5	2~5	30	3	2~5	2~5	30	19	48
紫坪铺	158.0	2	4	3~9	56	2	4	2~4	37		15
吉林台一级	157.0	2	3	3~8	33	2	3	3~7	30	9	35
马鹿塘二期	154.0	3	2~3	4~8	24	3	2~3	3~6	40	8	18
董菁	149.5	3	4	3~9	46	3	4	3~5	28		3 个高程
珊溪	132.5	2	4	3~6	23	2	2	3~4	15	3	19
公伯峡	132.2	3	3	3~7	26	3	3	3~7	26	5	27 组 2 向
引子渡	129.5	3	3	3~7	42	3	3	3~7	42	4	10 支单向 4 组 2 向

坝名	周边缝位移监测测点数	渗透压力监测测点数	面板挠度监测		面板应力监测				
			断面数	测点总数	断面数	混凝土应变计	无应力计	温度计	钢筋计
水布垭	13	26+13	2	70		4 组×3 向 30 组×2 向	14	15	74
猴子岩	20	49	1	41		15 组×2 向	15	18	50
三板溪	12	21	2	31	7	5 组×3 向 16 组×2 向 3 支单向	9	6	26
洪家渡	10	15	4	56	4	5 组×3 向 7 组×2 向	8	24	24
天生桥一级	12	24	3	64	8	9 组 4 向 12 组 3 向 6 组 2 向	15	27	72
滩坑	12			50	6	20 组×2 向	20	15	15
紫坪铺	15	30	3		4	6 组×3 向 9 组×2 向	15	15	15
吉林台一级	11	36+30	3	27	3	4 组×3 向 8 组×2 向	12	8	19
马鹿塘二期	9	19	3	37		3 组×4 向 6 组×3 向 3 组×2 向	9	12	24
董菁	3 个高程	25+6	3	电水平仪光纤陀螺	3	3 组×3 向 6 组×2 向	9	6	
珊溪	10	14				1 组×3 向 9 组×2 向	7		9
公伯峡	17 组 3 向	33	3	41	4	26 组×3 向	26		42
引子渡	8 组 3 向	32	1	30		6 组×3 向	6		20

注：水布垭、三板溪、洪家渡、天生桥一级、吉林台一级、董菁和马鹿塘二期用双向测缝计观测面板脱空；水布垭和董菁坝用光纤陀螺（FOG）系统观测面板挠度；三板溪、洪家渡和董菁坝用位移计观测坝体纵向位移；三板溪、天生桥一级、滩坑、紫坪铺、吉林台一级和马鹿塘二期坝用土压力计观测坝体应力；紫坪铺、吉林台一级和公伯峡坝用强震仪观测坝体地震反应；珊溪坝用沉降仪观测覆盖层表面沉降。

垂直压缩模量如表 2 所示^[1-2, 7-10]，典型的水布垭坝坝体沉降过程线如图 3 所示。

以往常用坝体最大沉降量 S_{max} （或坝轴线坝体沉降 S ）与最大坝高 H_{max} （或坝轴线处坝高含覆盖层厚度 H ）的比值来评价坝体变形性状。笔者建议用坝体沉降特征值 C_s 来评价坝体变形性状更为合适，

$$C_s = \frac{S}{H^2} \text{ 或 } C_s = \frac{S_{max}}{H_{max}^2} \quad (1)$$

式中， C_s 为坝体沉降特征值， S 和 S_{max} 为坝轴线处坝体沉降和坝体最大沉降， H 和 H_{max} 为坝轴线处坝高含覆盖层厚度和最大坝高。

从表 2 可看出天生桥一级坝的坝体沉降特征值在 1.0×10^{-4} 左右，21 世纪建造的 200 m 级高面板堆石坝（水布垭、三板溪和洪家渡）的 C_s 值在 $0.4 \times 10^{-4} \sim 0.5 \times 10^{-4}$ 。天生桥一级坝产生了垫层区裂缝、面板脱空与裂缝以及面板混凝土挤压破坏等现象，21 世纪建

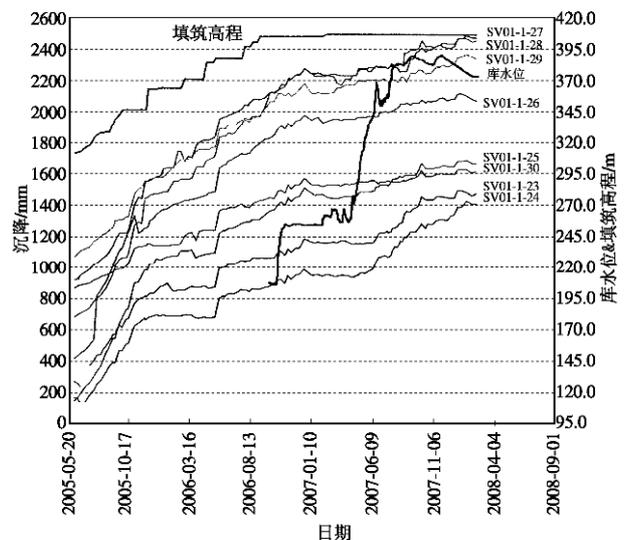


图 3 水布垭坝 0+212 m 断面 300 m 高程坝体沉降过程线
Fig. 3 Settlement curves of El.300 m 0+212 m section of dam body for Shuibuya CFRD

表2 中国混凝土面板堆石坝坝体沉降及其特征值和垂直压缩模量

Table 2 Settlements, characteristic values and vertical compression moduli of dam body of high CFRD in China

坝名	最大坝高 H_{\max} /m	坝轴线处坝高 (含覆盖层) H/m	坝体最大沉降 S_{\max} /cm	最大沉降点位置/m			$\frac{S_{\max}}{H_{\max}}$ / 10^{-2}	沉降特征值 $(C_s = \frac{S_{\max}}{H_{\max}^2})$ / 10^{-4}	施工期坝轴线处坝体最大沉降 S/cm	(S/H) / 10^{-2}	沉降特征值 $(C_s = S/H^2)$ / 10^{-4}	坝轴线处垂直压缩模量 E_v /MPa	最大沉降处垂直压缩模量 E_{vmin} /MPa
				距坝轴线	高程	该点坝高							
天生桥一级	178.0	172.0	354.0	35.0	725.0	144.0	1.99	1.12	280.0	1.63	0.95	50.9	22.9
水布垭	233.0	223.0	247.3	40.0	300.0	158.8	1.06	0.46	221.1	0.99	0.45	118.6	53.7
三板溪	185.5	165.0	175.4	-38.9	404.0	139.0 ^①	0.95	0.51	104.9 ^①	0.75	0.54	96.7	48.1
洪家渡	179.5	177.5	135.6	60.0	1055.0	177.5	0.76	0.42	124.4	0.70	0.39	135.2	58.3
滩坑	162.0	147.0	81.6	0	84.0	147.0	0.50	0.31	73.6	0.50	0.34	132.7	132.7
紫坪铺	158.0	145.0	94.4	0	790.0	145.0	0.60	0.38	88.4	0.61	0.42	110.1	110.1
吉林台一级	157.0	145.0	76.9	70.0	1350.0	145.0	0.49	0.31	59.0	0.41	0.28	191.0	70.4
马鹿塘二期	154.0	119.0 ^②	132.6	70.0	556.0	96.0	0.86	0.56	104.3	0.88	0.74	65.0	33.6
董菁	149.5	138.5	178.0	0	425.0	138.5	1.19	0.80	178.0	1.29	0.93	57.9	57.9
珊溪	132.5	132.5	95.3	0	70.0	132.5	0.72	0.54	90.7	0.68	0.52	85.9	85.9
引子渡	129.5	124.0	110.0	0	998.0	124.0	0.85	0.66	110.0	0.89	0.72	53.5	53.5

注：①此为2005年5月9日测值，此时坝轴线处坝体沉降最大，最大沉降点高程379.0m，当时坝体填筑高度139.0m；②马鹿塘二期坝轴线上下游各有一条冲沟，最大沉降点在坝轴线下游70m处，该处冲沟建基面高程495.0m、坝高 H 为96.0m。

表3 中国高混凝土面板堆石坝蓄水后坝体水平位移及其特征值

Table 3 Horizontal displacements and characteristic values after impoundment of high CFRD in China

坝名	最大坝高 H_{\max}/m	坝顶高程/m	坝轴线处覆盖层底面高程/m	覆盖层厚度/m	坝轴线处坝高(含覆盖层) H/m	蓄水后坝体水平位移/cm		水平位移特征值	
						向上游水平位移 D_u	向下游水平位移 D_d	$(C_{Du} = D_u/H_{\max})$ / 10^{-4}	$(C_{Dd} = D_d/H_{\max})$ / 10^{-4}
天生桥一级	178.0	791.0	619.0	0	172.0	-4.8	116.6	2.7	65.5
水布垭	233.0	409.0	181.0	14.0	228.0	-37.8	23.5	16.2	10.1
三板溪	185.5	482.5	320.0	0	162.5	-20.0	8.1	10.8	4.4
洪家渡	179.5	1147.5	970.0	0	177.5	-6.7	25.8	3.7	14.4
滩坑	162.0	171.5	9.5	23.5	162.0	-6.0	7.3	3.7	4.5
紫坪铺	158.0	884.0	739.0	11.0	145.0	—	23.6	—	14.9
吉林台一级	157.0	1425.8	1280.8	0	145.0	—	10.4	—	6.6
马鹿塘二期	154.0	634.0	515.0	0	119.0	-13.2	36.1	11.1	30.3
董菁	149.5	494.5	356.0	0	138.5	-15.7	16.8	11.3	12.1
珊溪	132.5	156.8	24.3	20.2	132.5	-8.0	9.1	6.0	6.9
公伯峡	132.2	2010.0	1881.0	0	129.0	-1.5	13.4	1.1	10.1
引子渡	129.5	1092.5	968.5	0	124.0	—	21.6	—	17.4

造的200m级高面板堆石坝则基本没有出现这些现象，说明坝体的变形量值与分布及其产生的过程是影响面板的变形与应力状态，即其工作状态的主要因素，这就是说高面板堆石坝的设计必须遵循变形协调的原则^[11]。

影响坝体沉降的主要因素是堆石体的堆石料母岩的性质及其密实度，天生桥一级坝的堆石体孔隙率 n 为22.5%~24%，下游堆石料是砂泥岩，坝体沉降特征值 C_s 为 $0.95 \times 10^{-4} \sim 1.12 \times 10^{-4}$ ；董菁坝堆石料也是砂泥岩，堆石体孔隙率 n 提高到19.4%，其坝体沉降特征值 C_s 为 $0.80 \times 10^{-4} \sim 0.93 \times 10^{-4}$ ，说明堆石料的密实度决定着坝体的沉降。马鹿塘二期下游堆石体也是砂泥岩与强风化下部砂岩，孔隙率为23%；引子渡坝下游堆石体是泥质灰岩与灰岩，孔隙率为21%，这两座坝坝体沉降特征值 C_s 为 $0.56 \times 10^{-4} \sim 0.74 \times 10^{-4}$ 。滩坑和吉林台一级坝体堆石料是较好的火山集块岩、凝灰岩和砂砾石，坝体沉降特征值为 0.3×10^{-4} 左右，相应的垂

直压缩模量为130~190MPa，而其他灰岩、砂岩坝料的面板堆石坝沉降特征值为 $0.4 \times 10^{-4} \sim 0.5 \times 10^{-4}$ ，相应的垂直压缩模量为97~130MPa^[1-2, 7-10]。

从表2可以看出，21世纪建造的水布垭、洪家渡和吉林台一级等高面板堆石坝重视了坝体变形协调原则，提高了下游堆石区的填筑标准或采用相同的填筑标准，但是填料性质的差异或填筑标准的差异，仍使坝体最大沉降点在坝轴线下游40~70m左右的位置，坝轴线处的坝体沉降要小于坝体最大沉降值。滩坑、紫坪铺、珊溪和董菁面板坝坝轴线上游与下游堆石坝的坝料、填筑标准和碾压参数无明显差别，坝体最大沉降点在坝轴线附近。

(2) 坝体水平位移

中国高混凝土面板堆石坝蓄水后坝体水平位移及其特征值如表3所示^[1-2, 7-10]，水布垭坝坝体水平位移过程线见图4所示。

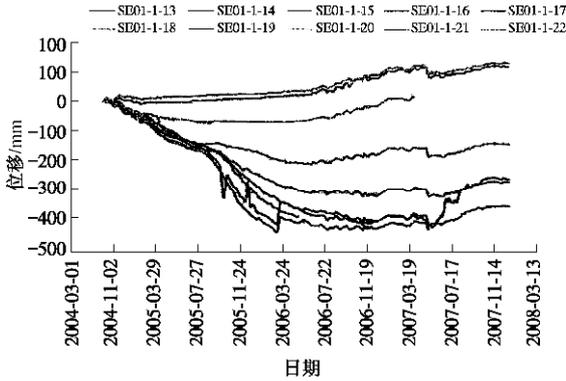


图 4 水布垭坝 0+212 m 断面 265 m 高程坝体水平位移过程线
Fig. 4 Curves of horizontal displacement of El.265 m 0+212 m section of dam body for Shuibyia CFRD

笔者建议用坝体水平位移特征值 C_{Du} 和 C_{Dd} 来评价坝体变形性状,

$$C_{Du} = \frac{D_u}{H} \text{ 或 } C_{Du} = \frac{D_u}{H_{max}} \quad (2)$$

$$C_{Dd} = \frac{D_d}{H} \text{ 或 } C_{Dd} = \frac{D_d}{H_{max}} \quad (3)$$

式中, C_{Du} 和 C_{Dd} 分别为坝体向上游水平位移特征值和坝体向下游水平位移特征值, D_u 为坝体向上游水平位移, D_d 为坝体向下游水平位移。

从表 3 可以看出: 影响坝体水平位移的主要因素仍然是堆石体的密实度和堆石料性质, 天生桥一级坝水平位移特征值为 65×10^{-4} , 而 21 世纪建造的 200 m

级高面板堆石坝水平位移特征值只有 $4 \times 10^{-4} \sim 16 \times 10^{-4}$; 堆石料是火山集块岩、凝灰岩和砂砾石的滩坑坝和吉林台一级坝特征值为 $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$, 比天生桥一级坝小一个数量级。董菁坝和马鹿塘二期坝下游堆石与天生桥一级坝下游堆石都是砂泥岩, 3 座坝的填筑标准高低顺序是董菁坝 ($n=19.4\%$)、马鹿塘二期 ($n=21\% \sim 23\%$) 和天生桥一级坝 ($n=22\% \sim 24\%$), 坝体水平位移特征值依次为 12.1, 30.3 和 65.5。

2.2 接缝位移

(1) 周边缝位移

混凝土面板堆石坝周边缝位移主要取决于坝体变形, 一般来说坝越高、筑坝材料的变形模量越小(堆石母岩较差、颗粒级配较差、碾压密度较低), 坝体变形越大, 导致周边缝位移越大。周边缝位移尤其是剪切位移也与河谷形状、岸坡坡度及其变化密切相关, 一般来说, 岸坡陡峻则周边缝位移较大。中国高混凝土面板堆石坝周边缝位移实测值及其特征值见表 4^[1-2, 7-10]。

笔者建议采用考虑坝高和岸坡等影响因素的周边缝位移特征值,

$$C_{DS} = \frac{D_s \cos \alpha_{max}}{H} \quad (4)$$

式中, D_s 为周边缝位移的模,

$$D_s = \sqrt{O^2 + S^2 + T^2} \quad (5)$$

式中, O, S, T 分别为周边缝张开位移、沉降和剪切位移, H 为坝高, α_{max} 为最陡段岸坡坡角。

表 4 中国高面板堆石坝周边缝位移实测最大值及其特征值

Table 4 Displacements of perimeter joints and characteristic values of high CFRD in China

坝名	完工时间	坝高 H/m	坝体堆石	河谷和岸坡	周边缝位移/mm			坡角取值 α_{max}	周边缝最大位移的模 D_s	$(C_{DS} = \frac{D_s \cos d_{max}}{H}) / 10^{-3}$
					O	S	T			
天生桥一级	1998 年	178.0	灰岩、砂泥岩	宽 V 形河谷, 左岸 $20^\circ \sim 30^\circ$, 右岸 $18^\circ \sim 30^\circ$	20.9	28.5	20.8	30°	41.0	0.20
水布垭	2008 年	233.0	灰岩	不对称 V 形河谷, 左岸平均 52° , 右岸平均 35°	13.0	45.7	43.7	52°	64.6	0.17
三板溪	2007 年	185.5	粉砂岩、凝灰质砂岩夹板岩	稍不对称 V 形河谷, 左岸 $40^\circ \sim 45^\circ$, 右岸 $45^\circ \sim 60^\circ$	71.8	50.2	58.6	60°	105.4	0.28
洪家渡	2005 年	179.5	灰岩、泥质砂岩	不对称 V 形河谷, 左岸陡 70° , 右岸 $25^\circ \sim 40^\circ$	13.9	26.6	34.8	70°	46.0	0.09
滩坑	2009 年	162.0	砂砾石、火山集块岩	对称 V 形河谷, 左岸 $35^\circ \sim 50^\circ$, 右岸 $45^\circ \sim 52^\circ$	13.8	39.8	11.8	50°	48.3	0.19
紫坪铺	2006 年	158.0	灰岩、砂砾石	不对称 V 形河谷, 左岸 $40^\circ \sim 50^\circ$, 右岸 $20^\circ \sim 25^\circ$	15.2	10.8	27.4	50°	33.1	0.14
吉林台一级	2006 年	157.0	砂砾石、凝灰岩	对称 V 形河谷, 两岸 $35^\circ \sim 45^\circ$	11.9	35.1	3.5	45°	37.1	0.17
董菁	2009 年	149.5	砂泥岩	稍不对称 V 形河谷, 左岸 35° , 右岸 $25^\circ \sim 28^\circ$	18.4	34.3	20.8	35°	44.1	0.24
龙首二级	2004 年	146.5	辉绿斑岩、流纹斑岩、砂砾石	稍宽、稍不对称 V 形河谷, 左岸 70° , 右岸陡缓交替	15.0	15.5	16.5	70°	21.6	0.05
珊溪	2001 年	132.5	灰岩、砂砾石	稍不对称 U 形河谷, 左岸 $30^\circ \sim 40^\circ$, 右岸 $40^\circ \sim 45^\circ$	6.2	15.0	8.1	45°	18.1	0.10
公伯峡	2005 年	132.2	花岗岩、片岩	不对称 V 形河谷, 左岸 30° , 右岸 $40^\circ \sim 50^\circ$	26.1	45.4	21.4	50°	56.6	0.27
引子渡	2004 年	129.5	灰岩、泥质岩	稍不对称 U 形河谷, 左岸 $70^\circ \sim 80^\circ$, 右岸 45°	24.7	26.0	30.7	70°	47.2	0.13

表5 中国高混凝土面板堆石坝面板垂直缝位移实测最大值及其特征值

Table 5 Displacements of vertical joints of face slab and characteristic values of high CFRD in China

坝名	最大坝高 H_{\max}/m	坝体 最大沉降 S_{\max}/cm	施工期垂直 压缩模量 E_v/MPa	河谷和岸坡	面板垂直缝位移最大值		垂直缝位移特征值	
					D_v/mm		$C_{Dv}/10^{-4}$	
					闭合 D_{vc}	张开 D_{vo}	闭合 C_{Dvc}	张开 C_{Dvo}
天生桥一级	178.0	354.0	50.9	宽V形河谷,左岸20°~30°,右岸18°~30°	—	32.90	—	1.60
水布垭	233.0	247.3	118.6	不对称V形河谷,左岸平均52°,右岸平均35°	6.7	18.70	0.180	0.49
三板溪	185.5	175.1	96.7	稍不对称V形河谷,左岸40°~45°,右岸45°~60°	2.7	11.75	0.070	0.32
洪家渡	179.5	135.6	135.2	不对称V形河谷,左岸陡70°,右岸25°~40°	5.0	35.00	0.095	0.67
滩坑	162.0	81.6	132.7	对称V形河谷,左岸35°~50°,右岸45°~52°	3.4	8.40	0.130	0.33
紫坪铺	158.0	88.8	110.1	不对称V形河谷,左岸40°~50°,右岸20°~25°	11.5	8.00	0.470	0.33
吉林台一级	157.0	76.9	191.0	对称V形河谷,两岸35°~45°	2.7	8.16	0.120	0.37
马鹿塘二期	154.0	132.6	65.0	不对称V形河谷,左岸40°,右岸25°~40°	—	12.80	—	0.64
董菁	149.5	194.5	57.9	稍宽、稍不对称V形河谷,左岸35°,右岸25°~28°	5.2	12.30	0.280	0.67
珊溪	132.5	95.3	85.9	稍不对称U形河谷,左岸30°~40°,右岸40°~45°	—	17.70	—	0.94
公伯峡	132.2	48.7	171.1	不对称V形河谷,左岸30°,右岸40°~50°	11.0	2.30	0.530	0.11
引子渡	129.5	110.0	53.5	稍不对称U形河谷,左岸70°~80°,右岸45°	—	<2.00	—	0.27

考虑了岸坡坡角对周边缝剪切位移影响的周边缝位移特征值 C_{DS} 较好地凸现了堆石坝体变形对周边缝位移的影响程度,高坝的 C_{DS} 值在 0.05~0.28 较小范围内变化,筑坝材料较差,变形模量较小的天生桥一级坝、董菁坝和公伯峡等坝 C_{DS} 值大于 0.20,龙首二级和珊溪等坝筑坝材料较好,变形模量较大,周边缝位移特征值 C_{DS} 小于 0.10,其它各坝的周边缝位移特征值为 0.10~0.20。

(2) 面板垂直缝位移

面板的轴向变形乃至垂直缝位移取决于堆石坝体向河谷中央变形时坝体与面板之间的摩擦力,因此坝越高、河谷越窄、岸坡越陡、堆石坝体变形模量越小,面板垂直缝的位移就越大。中国高混凝土面板堆石坝面板垂直缝位移最大值及其特征值见表 5^[1-2, 7-10]。

同样可采用类似形式的面板垂直缝位移特征值,

$$C_{Dv} = \frac{D_v \cos a_{\max}}{H_{\max}}, \quad (6)$$

式中, D_v 为面板垂直缝位移, a_{\max} 为最陡段岸坡坡角,见表 4, H_{\max} 为最大坝高。

从表 5 所列的面板垂直缝位移特征值 C_{Dv} 可以看出:天生桥一级坝的 C_{Dv} 值等于 1.60,21 世纪建造的高混凝土面板堆石坝的 C_{Dv} 值为 0.11~0.94,比天生桥一级坝小一倍至一个数量级,这说明提高堆石坝体的填筑密实度和变形模量,减小堆石坝体的变形,从而会减小面板垂直缝位移,这也说明了天生桥一级坝会产生面板垂直缝两侧混凝土的挤压破坏,而其他面板堆石坝则没有出现这种现象的原因是天生桥一级坝

的坝体坝轴向变形较大,导致河谷中央面板的压应力过大,该坝面板垂直缝结构无法承受较大的轴向变形。

2.3 面板挠度

面板是浇筑在堆石坝体上的钢筋混凝土板,面板浇筑后以及蓄水时面板的挠度是与堆石体的变形、面板混凝土浇筑和分期蓄水过程密切相关,一般来说堆石坝体变形越大,面板挠度越大。中国高混凝土面板堆石坝面板挠度实测值及其特征值如表 6 所示,天生桥一级坝面板挠度分布如图 5 所示^[1-2, 7-10]。

面板挠度特征值 C_d 可采用以下两种形式:

面板挠度特征值 1

$$C_{d1} = d_f / L_i; \quad (7)$$

面板挠度特征值 2

$$C_{d2} = d_f E_v / L_i。 \quad (8)$$

式(7)、(8)中, d_f 为面板挠度最大值 (cm), L_i 为发生面板挠度最大值的该期面板长度 (m), E_v 为堆石坝体的垂直压缩模量。

从表 6 可看出,天生桥一级面板堆石坝面板挠度特征值 C_{d1} 是 1.40,21 世纪建的高面板堆石坝面板挠度特征值 C_{d1} 只有 0.13~0.79,即比天生桥一级坝小一倍或一个数量级,这说明堆石坝体的变形是影响面板挠度的主要因素,天生桥一级面板堆石坝的坝体变形较大、导致面板挠度较大。若从考虑了坝体堆石坝垂直变形模量 E_v 的面板挠度特征值 C_{d2} 可看出,天生桥一级坝的 C_{d2} 是 71.3,其他高坝的 C_{d2} 为 11.2~70.3,天生桥一级坝、董菁坝和引子渡坝是砂泥岩和泥质灰岩等较差的筑坝材料,这 3 座坝的面板挠度特征值 C_{d2}

表 6 中国高混凝土面板堆石坝面板挠度实测最大值及其特征值
Table 6 Deflections of face slab and characteristic values of high CFRD in China

坝名	最大坝高 H_{max}/m	面板底部 高程/m	各期面板顶部高程/m				坝体最大沉降 S_{max}/cm	垂直压缩模量 E_v/MPa	面板挠度最大值 d_f (cm) 及其位置(期)	面板挠度特征值 $C_d/10^{-2}$	
			一期	二期	三期	四期				$C_{d1} = \frac{d_f}{L_f}$	$C_{d2} = \frac{d_f E_v}{L_f}$
天生桥一级	178.0	617.5	680.0	746.0	787.3	354.0	50.9	81.0(三期)	1.40	71.3	
水布垭	233.0	177.0	278.0	340.0	405.0	247.3	118.6	57.3(一期)	0.41	48.6	
三板溪	185.5	298.0	385.0	430.0	478.0	175.4	96.7	16.8(三期)	0.25	24.2	
洪家渡	179.5	978.2	1025.0	1095.0	1142.7	135.6	135.2	35.0(三期)	0.52	70.3	
滩坑	162.0	9.9	115.0	171.0		81.6	132.7	21.5(一期)	0.15	19.9	
紫坪铺	158.0	729.0	796.0	840.0	880.4	88.8	110.1				
吉林台一级	157.0	1270.8	1340.0	1360.0	1385.0	1421.0	73.0	23.4(一期)	0.24	45.8	
马鹿塘二期	154.0	480.0	565.0	629.5		132.6	65.0	15.5 ^② (二期)	0.10 ^②	6.5 ^②	
董普	149.5	345.0	415.0	477.0	491.2	194.5	52.9	59.7(二期)	0.69	40.0	
珊溪	132.5	25.0	108.0	153.3		90.7	85.9	20.0(一期)	0.13	11.2	
公伯峡	132.2	1878.6	2006.0			48.7	171.1	3.82 ^① (不分期)	0.02 ^①	3.4 ^①	
引子渡	129.5	963.0	1070.0	1088.0		27.8	53.5	20.0(一期)	0.79	42.3	

注：①公伯峡坝面板挠度测值可能偏小；②马鹿塘二期坝 2009 年 11 月 10 日蓄水，2010 年 1 月库水位仅为 569.8 m，面板挠度将会继续增大。

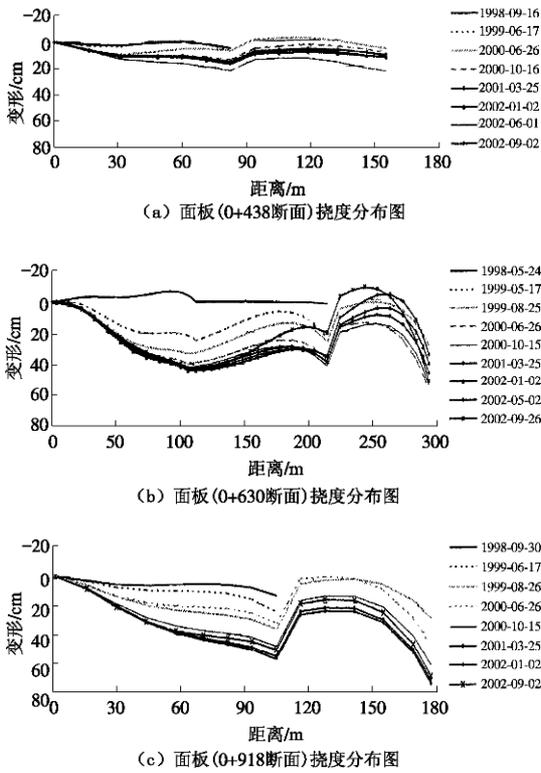


图 5 天生桥一级坝面板挠度分布图

Fig. 5 Deflection distribution of face slab of Tianshengqiao-I CFRD

相差不多，进一步说明坝体变形是影响面板挠度的主要因素。综合比较表 3 和表 6 看出，滩坑、三板溪、吉林台一级、珊溪等坝的筑坝材料变形特性较好，坝体填筑全断面均衡上升，坝体水平位移较小，因此面板挠度特征值 C_{d2} 较小，只有 11.2~24.2，即面板挠度最大值 20 cm 左右。

2.4 渗流量

混凝土面板堆石坝坝体渗流量取决于面板是否存在贯穿性裂缝以及接缝止水的防渗性能，坝基和两岸坝肩的渗流量取决于趾板与两岸帷幕灌浆与固结灌浆

效果。除了株树桥面板堆石坝外，中国的混凝土面板堆石坝的渗流量均较小，一般小于 100 L/s，洪家渡、天生桥一级和三板溪坝为 135~303 L/s，吉林台一级面板坝由于存在右岸绕渗，渗流量为 286 L/s。说明中国高混凝土面板堆石坝的面板和接缝止水的防渗性能以及趾板与坝基灌浆的质量均良好。

3 中国高混凝土面板堆石坝性状分析

高混凝土面板堆石坝坝体沉降的特征值 C_s 与坝轴线处垂直压缩模量 E_v 的关系见图 6，可看出两者密切相关，混凝土面板堆石坝性状其它特征值 C_{Du} 、 C_{Ds} 和 C_{Dv} 也与垂直压缩模量 E_v 密切相关，都随着 E_v 增大而减小，不一一详述。但坝体沉降特征值 C_s 、坝体水平位移特征值 C_{Du} 、 C_{Dd} 、周边缝位移特征值 C_{Ds} 、面板垂直缝位移特征值 C_{Dv} 和面板挠度特征值 C_{d2} 都与坝高 H 没有密切关系。例如坝体沉降特征值 C_s 与坝高 H 的关系见图 7 所示，可以看出：坝体沉降特征值取决于筑坝材料，当坝体由砂泥岩、泥质灰岩等较差的堆石料填筑， $C_s (=S/H^2)$ 值较大，为 0.72~0.95，当坝体由灰岩、砂岩甚至火山集块岩、凝灰岩、流纹斑岩堆石料和砂砾石料填筑， C_s 值较小，为 0.20~0.52。

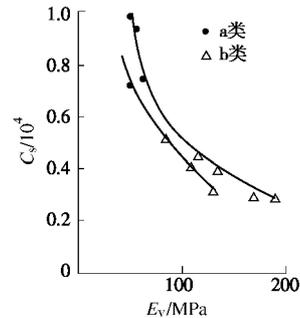


图 6 坝体沉降特征值 C_s 与垂直压缩模量 E_v 的关系

Fig. 6 Relationship between settlement characteristic value of dam body C_s and vertical compression modulus E_v

表 7 300 m 超高混凝土面板堆石坝性状预估

Table 7 Performance prediction for 300 m super-high CFRD

筑坝材料	垂直压缩模量 E_v/MPa	高混凝土面板堆石坝性状特征值					300m 面板堆石坝性状预估				
		坝体沉降 $(C_s=S/H^2)$ / 10^{-4}	坝体水平位移 $(C_{Dd}=D_d/H^2)$ / 10^{-4}	周边缝位移 $(C_{Ds}=D_s \cos \alpha_{\max})$ $\frac{D_s \cos \alpha_{\max}}{H}$ / 10^{-3}	垂直缝位移 $(C_{Dv}=D_v \cos \alpha_{\max})$ $\frac{D_v \cos \alpha_{\max}}{H}$ / 10^{-4}	面板挠度 $(C_{d2}=\frac{d_s E_v}{L_i})$ / 10^{-2}	坝体沉降 /m	坝体水平位移/cm	周边缝位移/mm	面板垂直缝位移/mm	面板挠度/cm
a 类	50.9~65.0	0.72~0.95	12.1~65.5	0.13~0.27	0.27~1.60	6.48~8.55	109~589	78~162	16~96	112~200	
b 类	85.9~191	0.28~0.54	4.4~14.9	0.05~0.28	0.11~0.94	2.52~4.68	39~139	30~168	7~56	16~98	

注：a 类为砂泥岩、泥质灰岩、板岩、强风化花岗岩；b 类为灰岩、砂岩、火山集块岩、凝灰岩、流纹斑岩、砂砾石。假定 300 m 超高混凝土面板堆石坝的岸坡最大坡角 α_{\max} 为 60°，面板最大长度 140 m；a 类堆石料 E_v 取 50 MPa，b 类堆石料 E_v 取 100 MPa。

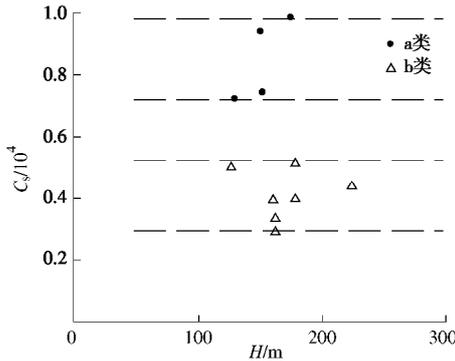


图 7 坝体沉降特征值 C_s 与坝高 H 的关系

Fig. 7 Relationship between settlement characteristic value of dam body C_s and dam height H

130~233 m 高混凝土面板堆石坝工作性状的特征值都与坝高没有密切关系，但是都与筑坝材料的变形特性即垂直压缩模量 E_v 有密切关系，这就意味着可以根据这些特征值来预估 300 m 级超高混凝土面板堆石坝的性状，详见表 7。从表 7 可得出初步结论：300 m 超高混凝土面板堆石坝在技术上是可行的，但是不宜采用砂泥岩、泥质灰岩、板岩、强风化下部花岗岩、片岩等较差的堆石料。采用中等坚硬或硬岩堆石料以及砂砾石料填筑时，要采用大吨位（25~35 t）振动碾，每层铺厚 0.8 m，进行碾压试验，使其孔隙率不大于 19%~20%，坝体垂直压缩模量 E_v 不小于 100 MPa，每期面板长度宜在 140 m 左右，此时面板堆石坝的性状在可以接受的范围之内。在岸坡陡峻的河谷中建造 300 m 超高面板堆石坝应慎重，局部陡峭段岸坡宜适当修整或采用新的趾板与周边缝结构型式。

4 结 论

(1) 已建的中国高混凝土面板堆石坝工作性状良好，运行正常。坝高 158 m 的紫坪铺面板堆石坝经受了 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震（震级 8 级、坝址地震烈度 10 度）的考验。中国形成了完整的高水平的高面板堆石坝安全监测仪器系列和监测分析技术。这说明中国高混凝土面板堆石坝筑坝技术，包括高混凝土面板堆石坝安全监测技术已经达到国际领先水平。300 m 级超高混凝土面板堆石坝在技术上是可行的。

(2) 为适应 300 m 超高混凝土面板堆石坝建设的需要，应开始开发研制大量程（量测范围 700~1000 m）、高耐水压（3~4 MPa）精密的新型安全监测仪器设备。

(3) 坝体变形沉降特征值 C_s 和垂直压缩模量 E_v 、坝体水平位移特征值 C_{Du} 和 C_{Dd} 、周边缝位移特征值 C_{Ds} 、垂直缝位移特征值 C_{Dv} 以及面板挠度特征值 C_{d1} 可以表征混凝土面板堆石坝性状，也反映了河谷形状、岸坡陡缓、堆石坝体变形特性等对混凝土面板堆石坝性状的影响，可以用于判断混凝土面板堆石坝工作性状良好程度。

(4) 堆石坝体变形是影响高混凝土面板堆石坝的主要因素，因此高混凝土面板堆石坝的设计理念之一是要保证大坝变形安全，在坝体分区设计、筑坝材料选择、开挖料利用、坝体填筑标准和形象进度、面板浇筑与坝体填筑两者在时间与空间上的关系等设计施工理念中变形协调原则极为重要^[11]。

(5) 高混凝土面板堆石坝性状实测结果与设计时预测结果有一定差别，除了施工时实际筑坝材料、填筑标准和形象进度、面板浇筑和分期蓄水与设计要求有一定差别之外，目前混凝土面板堆石坝性状预测技术有待进一步发展，为适应 300 m 级超高面板堆石坝建设需要，应开展大尺寸、高应力下筑坝材料试验，建立考虑高应力、复杂应力路径、室内试验缩尺效应、筑坝材料颗粒破碎、流变和劣化等因素的更合理的本构模型，更合理精确地预测 300 m 级超高面板堆石坝的性状，确保其变形安全、稳定安全和渗流安全^[11-12]。

致 谢：感谢马洪琪院士、水电水利规划设计总院专家以及文中涉及的高坝工程的建设、设计和安全监测单位和专家的支持与帮助，在此谨表谢意。

参考文献：

[1] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2007. (LI Neng-hui. Recent technology for high concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water Power

- Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院. 200 m级高面板堆石坝技术总结报告[R]. 贵阳: 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 2009. (Guiyang Hydroelectric Investigation Design & Research Institute. Summarization of technology for 200 m high concrete face rockfill dams[R]. Guiyang: Guiyang Hydroelectric Investigation Design & Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [3] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 大渡河猴子岩水电站可行性研究报告[R]. 成都: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2009. (Chengdu Hydroelectric Investigation Design & Research Institute. Report of feasibility research on Dadu River Houziyan Hydroelectric Power Station[R]. Chengdu: Chengdu Hydroelectric Investigation Design & Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [4] 欧红光, 殷彦高. 江坪河水电站面板堆石坝筑坝材料与坝体分区设计[M]// 混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (OU Hong-guang, YIN Yan-gao. Design of dam materials and dam zoning for the CFRD of Jiangpinghe Hydroelectric Power Station[M]// Study on Technology of CFRD. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [5] 郦能惠, 李泽崇, 李国英. 高面板坝的新型监测设备及资料反馈分析[J]. 水力发电, 2001(8): 46 - 47. (LI Neng-hui, LI Ze-chong, LI Guo-ying. New monitoring instrumentation and back analysis for high CFRD[J]. Water Power, 2001(8): 46 - 47. (in Chinese))
- [6] 郦能惠. 高堆石坝原位观测和反馈分析研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1995. (LI Neng-hui. Prototype observation and back analysis of high rockfill dams[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute. 1995. (in Chinese))
- [7] 彭 育, 陈振文. 滩坑水电站混凝土面板堆石坝施工期坝体变形特征[C]// 土石坝技术 2008 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008. (PENG Yu, CHEN Zheng-wen. Dam deformation behavior during construction of the CFRD of Tanken Hydroelectric Power Station[C]// 2009 Proceeding of Technology for Earth-rockfill Dams. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese))
- [8] 云南华昆水电水利科学研究所有限公司. 云南盘龙河马鹿塘二期工程大坝监测 2009 年度总结报告[R]. 昆明: 云南华昆水电水利科学研究所有限公司, 2009. (Yunnan Huakun Hydropower and Water Resource Research Ltd. Co. 2009-Report of dam monitoring for Malutang II CFRD of Yunnan Panlong River, 2009[R]. Kunming: Yunnan Huakun Hydropower and Water Resource Research Ltd, 2009. (in Chinese))
- [9] 湛正刚, 等. 董菁水电站面板堆石坝运行状态初步分析[R]. 贵阳: 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 2010. (ZHAN Zheng-gang, et al. Analysis on performance of the CFRD of Dong-jing Hydroelectric Power Station during operation[R]. Guiyang: Guiyang Hydroelectric Investigation Design & Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [10] 朱锦杰, 陈振文, 杜雪珍. 珊溪混凝土面板堆石坝五年来运行实测性态评价[C]// 土石坝技术 2007 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2007. (ZHU Jin-jie, CHEN Zhen-wen, DU Xue-zhen. Evaluation of performance during 5 years operation of Shanxi CFRD[C]// 2007-Proceeding of Technology for Earth-rockfill Dams. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese))
- [11] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. 中国工程科学, 2011, 3(3). (LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J], Engineering Sciences, 2011, 3(3). (in Chinese))
- [12] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[C]// 土石坝技术 2008 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008. (MA Hong-qi, CAO Ke-ming. Key technology of super-high CFRD[C]// 2008-Proceeding of Technology for Earth-rockfill Dams. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese))