

高混凝土面板堆石坝变形安全内涵及其工程应用

郦能惠¹, 王君利², 米占宽¹, 李登华¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 在分析国内外高混凝土面板堆石坝出现的严重问题的原由的基础上, 摒弃几十年来面板堆石坝经验设计的概念, 指出高混凝土面板堆石坝除了通常土石坝要求的抗滑稳定安全和渗流稳定安全以外还必须满足变形安全的要求。建立了高混凝土面板堆石坝设计的变形协调新理念, 包括坝体沉降协调、坝体水平位移协调、面板法线方向和坝轴线方向的坝体变形和面板变形同步协调, 提出了高混凝土面板堆石坝变形安全设计的内涵包括变形协调准则、判别标准、计算方法和对策, 以 203.5 m 高的 Bakun 坝为例, 阐明变形协调设计新理念替代经验设计概念的必要性。

关键词: 高混凝土面板堆石坝; 变形安全; 经验设计; 变形协调; 准则; 判别标准; 计算方法; 对策

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)02-0193-09

作者简介: 郦能惠(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岩土力学和水工结构研究工作。E-mail: nhli@nhri.cn。

Connotation of deformation safety of high concrete face rockfill dams and its application

LI Neng-hui¹, WANG Jun-li², MI Zhan-kuan¹, LI Deng-hua¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. China Hydro Northwest Investigation Design & Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the analysis of causes for serious damages of worldwide high concrete face rockfill dams (CFRDs), it is indicated that the empirical design concept of CFRDs should be discarded. The deformation safety is necessary besides the stability safety and seepage safety for high CFRDs. A new deformation coordination concept for high CFRDs comprising dam settlement coordination, dam displacement coordination, dam deformation in face slab normal direction and dam axis direction synchronously coordinating with face slab deformation is established. The connotation of deformation safety design of high CFRDs including deformation coordination standards, judgment criteria, calculation methods as well as counter measures, is put forward. The necessity of replacing the empirical design concept by the new deformation coordination concept is explained through the case study of Bakun Dam, 203.5 m in height.

Key words: high concrete face rockfill dam; deformation safety; empirical design; deformation coordination; standard; judgment criterion; calculation method; counter measure

0 引言

以薄层填筑、用振动碾分层压实的堆石(或砂砾石)作为坝体的现代混凝土面板堆石坝只有40多年历史, 据不完全统计全世界已建和在建的混凝土面板堆石坝就达到500多座。中国自1985年开始建造, 至今已建和在建有270多座, 其中坝高等于或高于100 m的高混凝土面板堆石坝有72座, 中国混凝土面板堆石坝的总数和高混凝土面板堆石坝的数量都占全世界的50%以上, 水布垭面板堆石坝坝高233 m, 居世界第一; 中国设计建造的Bakun坝, 居世界第二; 坝高156 m的紫坪铺面板堆石坝经受了汶川8级大地震的考验。由于这种坝型的安全性和经济性良好, 能适应不良的气候

条件、地形条件和地质条件, 软岩、特硬岩和砂砾石都可用作面板堆石坝的筑坝材料, 可以充分利用枢纽各建筑物的开挖料来填筑坝体, 尽量做到挖填平衡, 既节省投资, 又利于环境保护。在强地震区、深覆盖层、深厚风化岩和高陡岸坡的坝址, 混凝土面板堆石坝往往成为最有竞争力的坝型^[1]。

纵观历史, 数百座混凝土面板堆石坝的建造一直都采用经验设计的方法, 正如面板堆石坝专家J B Cooke指出: 自首批混凝土面板堆石坝以来, 设计混凝土面板堆石坝的基本做法是以先例——类似工程

的样例为基础的经验设计。“经验”一词是“以实际经验作指导而非由理论指导”的意思^[2-3]。

可能是正如Cooke所言：由于“跟先例太紧”、简单照搬的经验设计导致国内外一批高混凝土面板堆石坝出现了严重问题，概括如下^[1, 4-6]：

(1) 垫层区裂缝

天生桥一级坝（坝高178 m），Xingo坝（坝高140 m）等垫层区都产生斜向裂缝或水平裂缝，最大缝长60 m，最大缝宽180 mm。

(2) 面板脱空

天生桥一级坝一、二期面板有85%面板脱空，三期面板有52%面板脱空。

(3) 面板裂缝

天生桥一级坝的面板产生近6000条挠曲应力裂缝，最大缝宽4 mm，Aguamilpa坝（坝高187 m）的面板产生数百条裂缝，导致渗漏量达260 L/s，Ita坝（坝高125 m）的面板裂缝导致严重渗漏，渗漏量达1700 L/s。

(4) 面板混凝土挤压破坏

天生桥一级坝、Mohale坝（坝高145 m）、Barra Grande坝（坝高185 m）和Campos Novos坝（坝高202 m）河谷中央部位面板混凝土都发生挤压破坏，导致产生严重渗漏。水布垭坝（坝高233 m）面板混凝土也发生挤压破损。三板溪（坝高185.5 m）一、二期面板施工缝附近面板破坏，渗漏量315 L/s。

(5) 严重渗漏

面板混凝土挤压破坏造成上述各坝的渗漏量分别是：600 L/s（Mohale坝）、1000 L/s（Barra Grande坝）、1300 L/s（Campos Novos坝），面板裂缝或接缝止水损坏造成多座高面板坝严重渗漏，分别是6400 L/s（Turimiquire坝，坝高115 m）、1700 L/s（Ita坝）、1900 L/s（Shiroro坝，坝高130 m）、2200 L/s（Khao Laem坝、坝高130 m）和2500 L/s（株树桥坝，坝高84 m）。

2002年笔者指出导致高混凝土面板堆石坝出现上述严重问题的原因主要有3个^[4-6]：

(1) 主堆石区变形模量高、下游堆石区变形模量低、坝体变形不协调是导致垫层区裂缝、面板脱空和面板裂缝的主要原因。从原型观测资料得出Aguamilpa坝主堆石区和下游堆石区的变形模量分别为260 MPa和47 MPa，两者相差5.5倍；坝体向下游的变形造成面板脱空和裂缝，其第18块面板法向位移的实测结果见图1所示。天生桥一级坝主堆石区和下游堆石区的变形模量相差1.9倍，该坝垫层表面测点在1999年坝体填筑完成后的沉降增量达36 cm，水平位移增量达15 cm，导致面板脱空、挠曲，从而产生数千条水平状挠曲应力裂缝。

(2) 堆石坝体在自重和水荷载的作用下在坝轴线方向的变形是朝着河谷中央，必然在面板和垫层的接触面产生相当大的朝着河谷中央的摩擦力，在河谷中央面板的坝轴向应力超过面板混凝土强度时，导致面板混凝土挤压破坏。Mohale坝河谷中央面板应力24 MPa，压应变 650×10^{-6} ，因此造成河谷中央垂直缝两侧面板超叠120 mm，错台75 mm，面板混凝土挤压破坏。

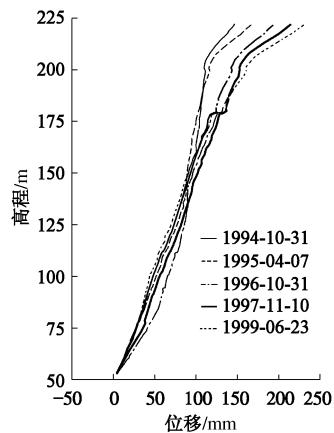


图 1 Aguamilpa 坝第 18 块面板法向位移

Fig. 1 Normal displacement of L-18 concrete face slab of Aguamilpa Dam

(3) 堆石坝体变形远大于面板的变形，高面板堆石坝的坝体沉降达2~3 m，水平位移达40~120 cm，当面板、趾板或接缝止水结构不能适应坝体如此大的变形时，面板开裂、坍塌或止水结构破坏会导致严重渗漏。

从上述原因分析可以看出高混凝土面板堆石坝除了通常土石坝要求的抗滑稳定安全和渗流稳定安全以外还必须满足变形安全的要求，为此笔者提出高混凝土面板堆石坝设计新理念，设计新理念包括抗滑稳定安全、渗流稳定安全和变形安全，堆石坝体各区的变形协调、堆石坝体变形与面板变形的同步协调是变形安全的核心^[1, 6]。

1 高混凝土面板堆石坝变形安全内涵

1.1 变形协调准则

(1) 坝体变形协调准则

坝体变形协调准则包括坝体沉降协调准则、坝体上下游方向位移协调准则和坝体坝轴向位移协调准则。

a) 坝体沉降协调准则

坝体沉降协调准则可用下列两式表示：

$$\left| \frac{S_{i+1} - S_i}{y_{i+1} - y_i} \right|_{\max} < [I] , \quad (1)$$

$$\left| \frac{S_{i+1} - S_i}{x_{i+1} - x_i} \right|_{\max} < [I] . \quad (2)$$

式中 S_i, S_{i+1} 为坝体 i 点, $i+1$ 点的沉降 (cm); y_i, y_{i+1} 为坝体 i 点, $i+1$ 点在上下游方向的坐标 (cm); x_i, x_{i+1} 为坝体 i 点, $i+1$ 点在坝轴向的坐标 (cm); $[I]$ 为坝体材料允许倾度。

b) 坝体水平位移协调准则

坝体水平协调准则包括坝体上下游方向位移协调准则和坝体坝轴向位移协调准则, 可用下列两式表示:

$$\left| \frac{D_{Byi+1} - D_{Byi}}{y_{i+1} - y_i} \right|_{\max} < [T] , \quad (3)$$

$$\left| \frac{D_{Bxi+1} - D_{Bxi}}{x_{i+1} - x_i} \right|_{\max} < [T] . \quad (4)$$

式中 D_{Byi}, D_{Byi+1} 为坝体 i 点, $i+1$ 点上下游方向水平位移 (cm); D_{Bxi}, D_{Bxi+1} 为坝体 i 点, $i+1$ 点坝轴向水平位移 (cm); $[T]$ 为坝体材料允许变位差。

(2) 坝体变形和面板变形同步协调准则

a) 面板法线方向坝体变形和面板变形同步协调准则为

$$(D_{Bfi}|_j - d_{fi}|_j)_{\max} < [H_s] . \quad (5)$$

式中 $d_{fi}|_j$ 为面板 i 点在 j 时刻的挠度 (cm); $D_{Bfi}|_j$ 为相应的坝体 i 点在 j 时刻的在面板法线方向的位移 (cm); 面板浇筑后面板下面的坝体 i 点的变形 $D_{Bfi}|_j$ 变形包括坝体继续填筑的上覆荷载引起的变形和坝体的流变变形; $[H_s]$ 一面板允许脱空高度, 视面板适应坝体变形的能力而定。

b) 面板坝轴向 (或顺坡向) 坝体变形和面板变形同步协调准则为

$$(D_{Bxi}|_j - d_{xi}|_j)_{\max} < [J] , \quad (6)$$

$$[J] = f(1/E_c, f_{cc}, t_f, C_f) . \quad (7)$$

式中 $d_{xi}|_j$ 为面板 i 点在 j 时刻的坝轴向 (或顺坡向) 位移 (cm); $D_{Bxi}|_j$ 为相应的坝体 i 点在 j 时刻的坝轴向 (或顺坡向) 位移 (cm); $[J]$ 为坝体与面板在坝轴向 (或顺坡向) 允许变位差 (cm)。

坝体与面板在坝轴向 (或顺坡向) 允许变位差 $[J]$ 视面板混凝土抗压弹性模量 E_c 、面板混凝土抗压强度 f_{cc} 、面板厚度 t_f 和面板与坝体之间约束程度或摩擦系数 C_f 而定。

坝体在坝轴向变形远大于面板在坝轴向变形, 导致坝体对面板产生摩擦力, 摩擦力引起河谷中央面板产生坝轴向压应力, 若压应力超过面板混凝土允许抗压强度 f_{cc} , 则造成河谷中央面板混凝土挤压破坏。摩擦力引起两岸坝肩附近面板产生坝轴向拉应力, 若拉应力超过面板混凝土允许抗拉强度 f_{ct} , 则会造成两岸

坝肩附近面板产生拉裂缝。同样坝体的沉降远大于面板在顺坡向变形, 两者之间摩擦力会引起顶部面板产生顺坡向拉应力, 底部面板产生顺坡向压应力, 若顺坡向应力超过面板混凝土允许强度, 则产生拉裂缝或挤压损害。可用下式表示:

$$\left\{ \frac{\sigma_s}{\sigma_x} \right\}_{\max} < f_{cc} , \quad (8)$$

$$\left\{ \frac{\sigma_s}{\sigma_x} \right\}_{\min} < f_{ct} . \quad (9)$$

式中 σ_s 为面板顺坡向应力 (MPa), 以压应力为正, 拉应力为负, 下同; σ_x 为面板坝轴向应力 (MPa); f_{cc} 为面板混凝土抗压强度 (MPa); f_{ct} 为面板混凝土抗拉强度 (MPa)。

从上述准则可以看出: 要达到坝体变形和面板变形同步协调, 可以从下列5方面着手: ①增加面板垂直缝的坝轴向允许位移, 采用新型止水材料和结构; ②设置面板永久水平缝, 采用新型止水材料和结构; ③减小坝体变形, 提高堆石坝体的变形模量; ④减小面板与堆石坝体之间的约束; ⑤选择合理的面板浇筑时间和坝体填筑形象面貌。

1.2 变形协调判别标准

变形协调判别标准包括坝体材料允许倾度 $[I]$ 、坝体材料允许变位差 $[T]$ 、面板适应坝体变形的面板允许脱空高度 $[H_s]$ 和坝体与面板在坝轴向 (或顺坡向) 允许变位差 $[J]$ 。都可以通过室内试验或原型观测资料分析得到。

(1) 坝体材料允许倾度 $[I]$

面板堆石坝坝体分区包括垫层料区、过渡料区、堆石料区和排水体材料区, 这些材料都是颗粒状材料, 只是其最大粒径和颗粒级配不同, 这些材料几乎没有抗弯曲的能力, 但是这些材料可以产生较大的变形 (沉降) 而不产生连续贯穿的裂缝, 也就是有适应一定不均匀变形 (不均匀沉降) 的能力, 这个能力称为坝体材料允许倾度 $[I]$ 。坝体材料允许倾度 $[I]$ 取决于坝体应力状态和坝体材料的物理力学特性, 包括其颗粒组成 (最大粒径和颗粒级配)、干密度 (或孔隙率、相对密度)、变形特性和强度特性。

室内试验可采用大型单剪仪, 用坝体材料 (垫层料) 或缩制的坝体材料 (过渡料、堆石料或排水体料) 制成与坝体填筑密度 (或孔隙率、相对密度) 相同的试样, 试样先处于坝体该点 (i 点) 相同的应力状态, 使试样发生剪切, 在试样剪切变形发生突变或试样产生裂缝时的最大剪切应变, 可视为坝体材料的允许倾度 $[I]$ 。

选取坝体产生裂缝的面板堆石坝, 例如垫层区产

生裂缝的天生桥一级坝和Mohale坝等，堆石区产生裂缝的株树桥坝，分析该坝因变形不协调而产生裂缝时坝体沉降观测资料，可以得到这类坝体材料的允许倾度 $[I]$ 。

(2) 坝体材料的允许变位差 $[T]$

坝体材料的允许变位差 $[T]$ 取决于坝体材料的物理力学特性，包括其颗粒组成(最大粒径和颗粒级配)、干密度(或孔隙率、相对密度)、变形和强度特性，特别是坝体材料一定应力状态下抵御拉伸变形的能力。

室内试验可采用应力控制式大型三轴试验仪，用坝体材料或缩制的坝体材料制成与坝体填筑密度相同的试样，试样先处于与坝体该点(i 点)相同的应力状态，减小轴向应力即大主应力 σ_1 或增加小主应力 σ_3 ，使试样产生拉伸的轴向应变，在试样轴向拉伸应变发生突变时的拉伸应变，可视为坝体材料的允许变位差 $[T]$ 。

选取坝体产生裂缝的面板堆石坝，例如垫层区产生裂缝的天生桥一级坝和Mohale坝等，坝体堆石区产生裂缝的株树桥坝，分析该坝因变形不协调而产生裂缝时坝体水平位移观测资料，可以得到这类坝体材料的允许变位差 $[T]$ 。

(3) 面板允许脱空高度 $[H_s]$

一般来说面板法线方向的坝体变形较大，而面板挠度较小，两者不协调时面板脱空，面板是一块钢筋混凝土薄板，它具有一定的抗挠曲能力，即只有面板脱空长度到某一定值以后，面板在其自重和水压力作用下产生的挠曲变形到一定程度，挠曲应力使面板的拉应力超过钢筋混凝土的允许拉伸强度才会引起面板裂缝，因此面板允许脱空高度 $[H_s]$ 是与面板不产生裂缝的脱空长度有关的参数，它表征着面板抵御挠曲应力的能力，主要是取决于面板的几何尺寸、面板混凝土的强度等级(拉伸强度)和面板配筋，一般可以通过钢筋混凝土板的计算来得到面板不产生挠曲应力裂缝的面板允许脱空长度 $[L_p]$ ，面板允许脱空长度 $[L_p]$ 越大，面板允许脱空高度 $[H_s]$ 越大，面板适应坝体变形的能力越强。

选取面板产生或未产生挠曲应力裂缝的面板堆石坝，例如天生桥一级和洪家渡坝，分析对比它们在面板法线方向的坝体位移、面板挠度和面板脱空的观测资料，可以得到面板允许脱空高度 $[H_s]$ 。

(4) 坝体与面板在坝轴向(或顺坡向)允许变位差 $[J]$

坝体与面板在坝轴向(或顺坡向)允许变位差 $[J]$ 的内含包括面板混凝土抵御挤压破坏能力和面板受坝体约束的程度，前者随着面板混凝土抗压强度 f_{cc} 的增加、抗压弹性模量 E_c 的降低和面板厚度 t_f 的增加而增

大，后者取决于面板混凝土表面与坝体垫层区的光滑程度或接触介质的性能。

室内试验可采用大型接触面试验仪或改进的大型单剪仪，模拟混凝土面板堆石坝具有垂直缝(或水平缝)及缝间止水材料的面板与垫层区的接触形态，测定在不同垂直荷载(模拟面板承受的库水荷载)作用下在面板与垫层区不同变位差情况下垂直缝(或水平缝)止水材料的压缩变形，在止水材料压缩变形急剧增加时的变位差可视为坝体与面板在坝轴向(或顺坡向)允许变位差 $[J]$ 。

选取河谷中央面板产生挤压破坏的面板堆石坝，例如天生桥一级坝、水布垭坝、Mohale坝、Barra Grande坝和Campos Novos坝等，分析其因坝体变形与面板变形在坝轴向不同步协调时产生混凝土挤压破坏时坝体变形、面板变形和面板应力的观测资料，可以得到坝体与面板在坝轴向允许变位差 $[J]$ ，作为判断类似面板堆石坝是否满足坝体变形与面板变形同步协调准则的依据。

1.3 变形协调计算方法

变形协调计算方法主要采用三维有限元计算方法，通过计算可以得到混凝土面板堆石坝的应力变形性状。运用坝体沉降协调准则和坝体水平位移协调准则(1)～(4)来判断堆石坝体是否符合变形协调，运用坝体变形与面板变形同步协调准则(5)和(6)来判断面板变形与堆石坝体变形是否符合同步变形协调。要正确地预测面板堆石坝的应力变形性状，应正确掌握筑坝材料的物理力学特性包括流变特性、本构模型及其参数以及筑坝材料的允许倾度 $[I]$ 和允许变位差 $[T]$ 。要建立正确的面板与垫层之间的接触面模型及其参数以及面板允许脱空高度 $[H_s]$ 和允许变位差 $[J]$ 。

1.4 变形协调计算方法的技术支撑

高混凝土面板堆石坝变形协调的核心之一是混凝土面板变形与堆石坝体变形的同步协调，因此研究面板与垫层之间的接触面特性，建立接触面模型是进行变形协调计算的主要技术支撑。

采用专门研制的接触面试验仪研究了猴子岩(坝高223.5 m)和金川(坝高112 m)两座高混凝土面板堆石坝垫层料与混凝土面板之间的接触面特性，试料最大粒径10 mm和5 mm，采用混合法缩制试料的级配。采用数字图像位移量测技术从宏观和细观两个方面研究了接触区应力变形性状，定量测定接触区垫层料颗粒位移的典型试验结果见图2^[7]。

接触面试验研究了垫层料最大粒径、混凝土面板表面粗糙度、剪切位移和应力状态对接触区厚度和接触区力学特性的影响，典型的试验结果见图3、4。

表 1 接触面损伤本构模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of contact surface damage constitutive model

试料名称	混凝土面板粗糙度	K_I	n	δ_i	δ_d	c_n	a	n_1	n_2
猴子岩坝垫层料 ($d_{\max}=5 \text{ mm}$)	人工粗糙面	25	0.39	1.19	0.56	18.96	0.003	2.6	-0.95
	普通浇筑面	25	0.30	1.06	0.53	12.62	0.060	1.6	-0.75
猴子岩坝垫层料 ($d_{\max}=10 \text{ mm}$)	人工粗糙面	39	0.25	0.96	0.66	21.45	0.020	2.0	-1.5
	普通浇筑面	23	0.49	1.20	0.50	5.42	0.040	2.0	-0.95
金川坝垫层料 ($d_{\max}=5 \text{ mm}$)	人工粗糙面	29	0.40	1.03	0.60	38.89	0.024	1.3	-0.1
	普通浇筑面	21	0.55	1.30	0.48	8.57	0.040	1.6	-0.3
金川坝垫层料 ($d_{\max}=10 \text{ mm}$)	人工粗糙面	18	0.74	0.95	0.56	43.78	0.041	1.3	-0.46
	普通浇筑面	20	0.55	1.20	0.47	2.02	0.045	1.6	-0.34

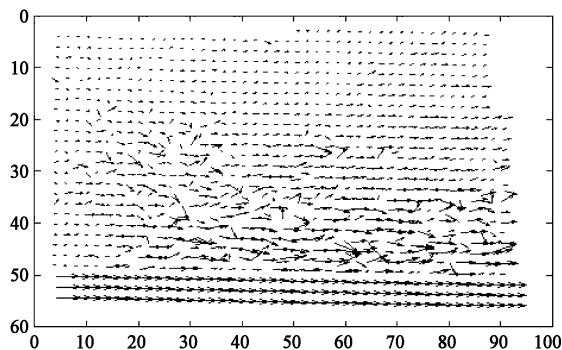


图 2 接触面剪切位移为 6.6 mm 时猴子岩坝层料位移矢量实测结果

Fig. 2 Measured results of displacement vectors of cushion materials at shear displacement of 6.6 mm in contact surface for Houziyan Dam

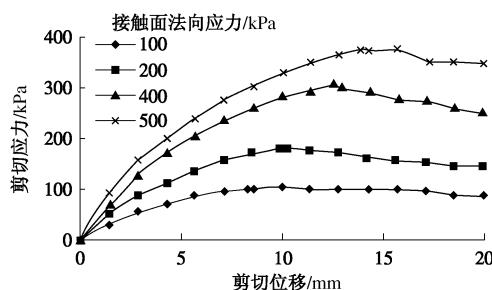


图 3 猴子岩坝垫层料 ($d_{\max}=5 \text{ mm}$) 与人工粗糙面板接触面剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress - shear strain curves of contact surface between cushion materials ($d_{\max}=5 \text{ mm}$) and rough concrete face slab for Houziyan Dam

根据接触面试验结果、基于损伤理论建立了接触面损伤本构关系, 如下式所示:

$$\tau = \left(\frac{2 \cdot e^{-\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}}}{e^{\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}} + e^{-\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}}} \right) \cdot \frac{\gamma}{K_I \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n} + \frac{1}{\sigma_n \tan \delta_i}$$

$$\frac{e^{\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}} - e^{-\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}}}{e^{\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}} + e^{-\alpha \gamma^{\eta_1} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{n_2}}} \cdot (\sigma_n \tan(\delta_d) + c_n), \quad (10)$$

式中, τ 为接触面剪应力, σ_n 为接触面法向应力, r 为接触面剪应变, α , δ_i , δ_d , C_n , K_I , n , n_1 , n_2 为本构模型参数, p_a 为标准大气压。

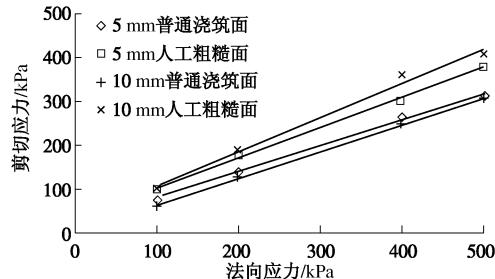


图 4 猴子岩坝垫层料 - 面板接触面抗剪强度与法向应力关系

Fig. 4 Shear strength - normal stress curves of contact surface between cushion materials and concrete face slab for Houziyan Dam

接触面损伤本构模型计算参数见表 1, 接触面损伤本构模型的拟合结果见图 5。

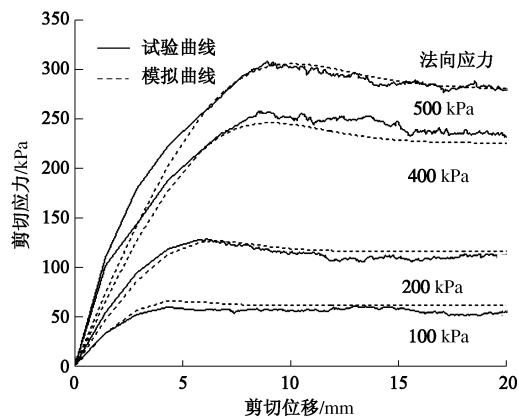


图 5 猴子岩坝垫层料 ($d_{\max}=10 \text{ mm}$) 与普通浇筑面板接触面模型拟合结果

Fig. 5 Results of fitting contact surface model to contact surface test on cushion materials and average concrete face slab for Houziyan Dam

表 2 经验设计与变形协调设计 Bakun 坝工程实例对比

Table 2 Comparison between empirical method and new deformation coordination concept for Bakun Dam

设计思想	经验设计	变形协调设计
国别、单位	德国 H.S.Chi	中国
坝高/m	205	203.5
坝坡 上游坡/下游坡	1:1.4/1:1.4	1:1.4/马道间 1:1.3
坝体分区	图 6	图 7
压实标准	过渡层 干密度 2.16 g/cm ³ 、振动碾 6~8 遍 主堆石区 干密度 2.09 g/cm ³ 、振动碾 6~8 遍 次堆石区 干密度 2.09 g/cm ³ 、振动碾 6~8 遍	孔隙率≤18%、干密度≥2.27 g/cm ³ 、振动碾>8 遍 孔隙率≤20%、干密度≥2.22 g/cm ³ 、振动碾>8 遍 孔隙率≤20%、干密度≥2.22 g/cm ³ 、振动碾>8 遍
面板垂直缝止水	经验型止水、沥青木板	新型止水, Pulai 可变形软木板
坝体最大沉降/cm	竣工期 376.4 蓄水期 406.4	230.6 (原型观测值 227.5) 245.3 (原型观测值 259.6)
顺河向 水平位移/cm	向上游 竣工期 -35.4 蓄水期 -20.3 向下游 竣工期 65.8 蓄水期 79.2	-27.6 -15.2 41.6 48.9 (原型观测值 10.6)
面板挠度/cm	蓄水期 105.7	84.7 (原型观测值 9.4)
蓄水期面板 轴向位移/cm	指向右岸 6.1 指向左岸 -6.1	5.2 -5.1
面板坝轴向应力/MPa	拉应力 -2.23 压应力 19.2	-1.94 18.3
面板顺坡向应力/MPa	压应力 31.2	28.5
坝体最大沉降差/10 ⁻²	上游坝体 4.55 下游坝体 -3.71	3.18 -2.39
坝体最大水平位移差/10 ⁻²	-2.94	-2.19
面板法向位移与垫层面法向位移差/cm	113.5	71.0
面板最大坝轴向压应变/10 ⁻⁶	670	619 (原型观测值 565)

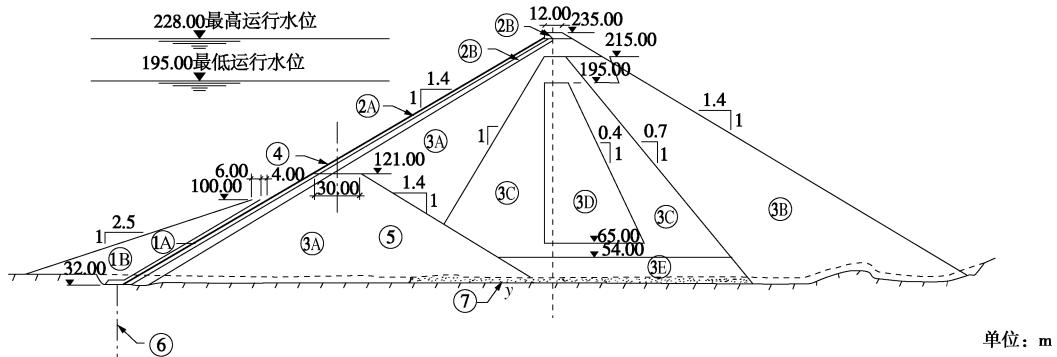


图 6 德国经验设计 Bakun 坝的坝体分区图

Fig. 6 Zoning of Bakun Dam designed by empirical method

2 变形协调新理念的工程应用实例

高混凝土面板堆石坝变形协调新理念结构设计应用于巴贡 (Bakun)、猴子岩等高混凝土面板堆石坝工程, 以Bakun坝为例说明。

Bakun坝位于马来西亚沙捞越州, 坝高203.5 m, 为世界第二高坝, 2008年7月底大坝基本完工, 2008年11月21日水库下闸蓄水。该工程原由德国咨询公司设计, 德国设计的Bakun坝的坝体分区断面见图6。

在该工程复工后中国水利水电集团公司中标, 西

北勘测设计研究院承担该工程主体的设计, 南京水利科学研究院承担该工程科学的研究工作。基于变形协调新理念进行大坝设计提出的坝体分区图见图7。

Bakun坝三维有限元法计算结果对比见表2和图8~10。

从表2和图8~10可以看出Bakun坝若采用德国设计方案, 一期填筑区顶部和中部坝体变形很不协调, 坝体沉降差达到 4.55×10^{-2} , 一期面板浇筑后随着坝体的继续填筑, 面板顶部与垫层区的法向位移差达到113.5 cm, 很可能造成垫层区裂缝、面板脱空甚至面

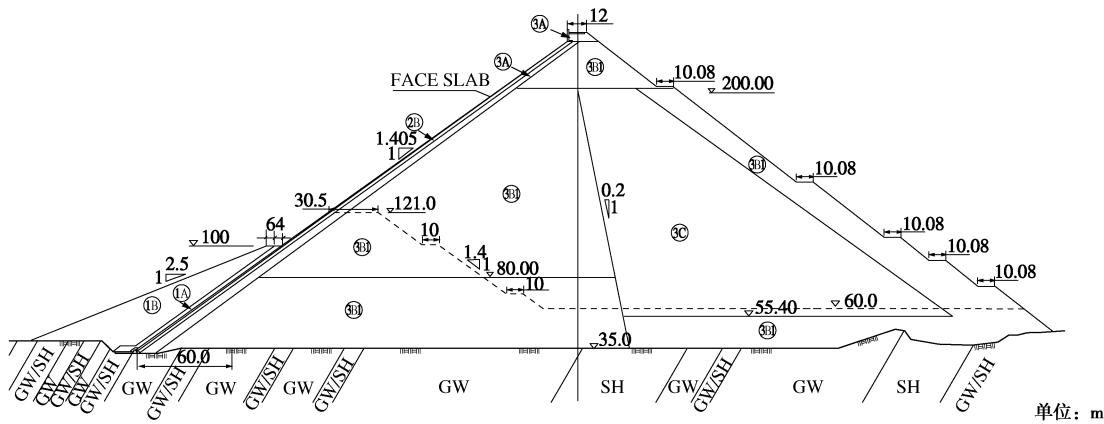


图 7 中国变形协调设计 Bakun 坝的坝体分区图

Fig. 7 Zoning of Bakun Dam designed by new deformation coordination concept

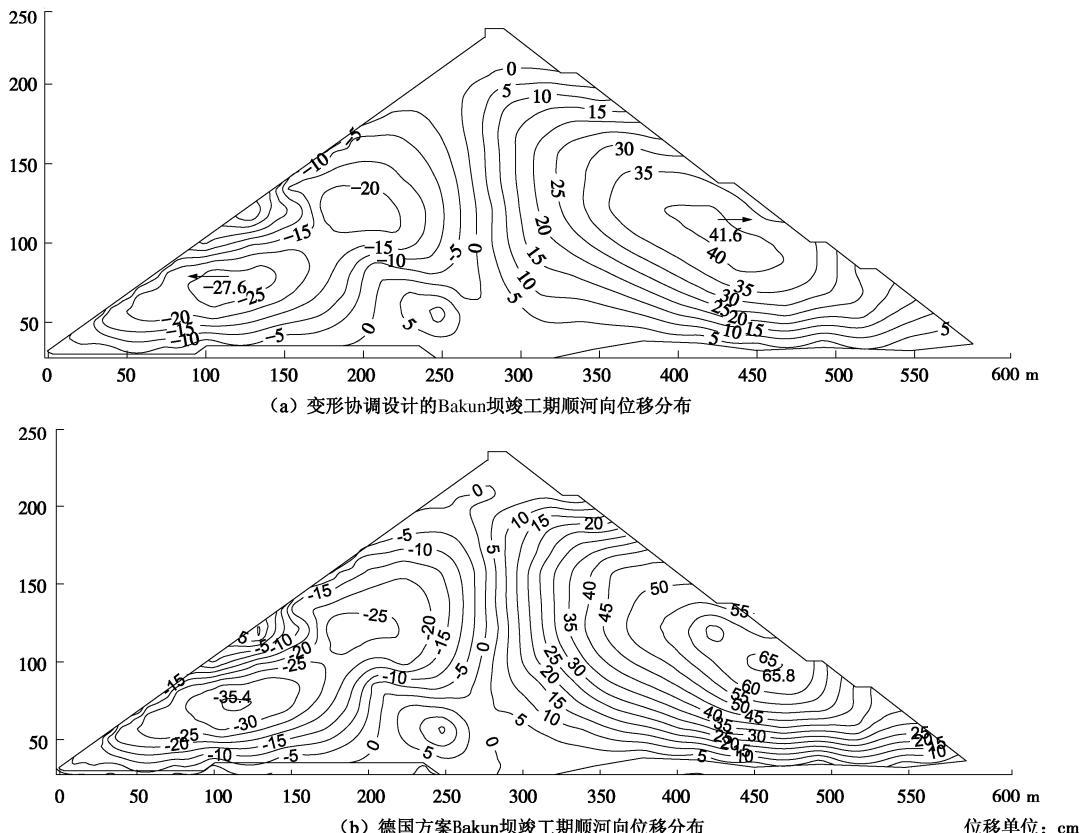
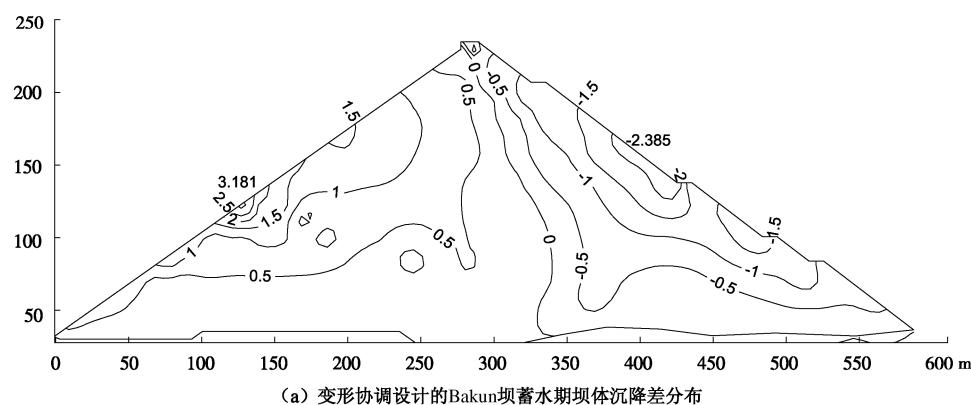


图 8 经验设计与变形协调设计 Bakun 坝竣工期顺河向位移对比

Fig. 8 Comparison of displacements along direction of river of Bakun Dam at completion time between empirical method designed and new deformation coordination concept method designed



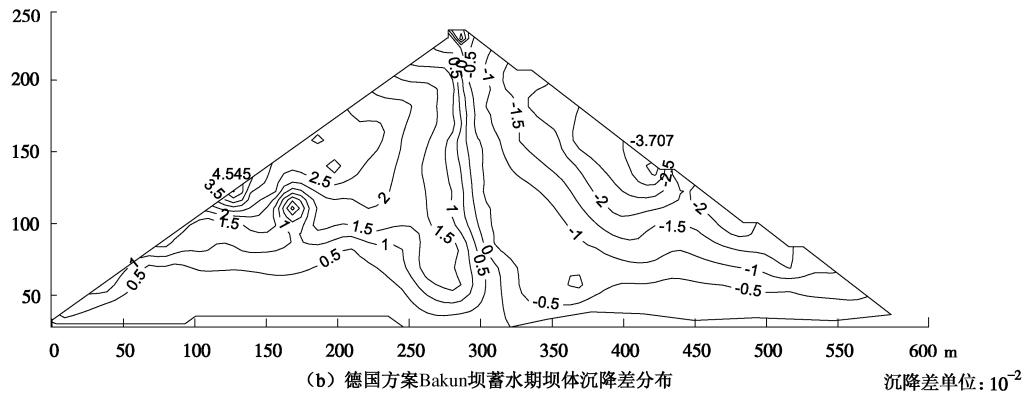


图 9 经验设计与变形协调设计 Bakun 坝蓄水期坝体沉降差对比

Fig. 9 Comparison of settlements of Bakun Dam at water impoundment between empirical method designed and new deformation coordination concept method designed

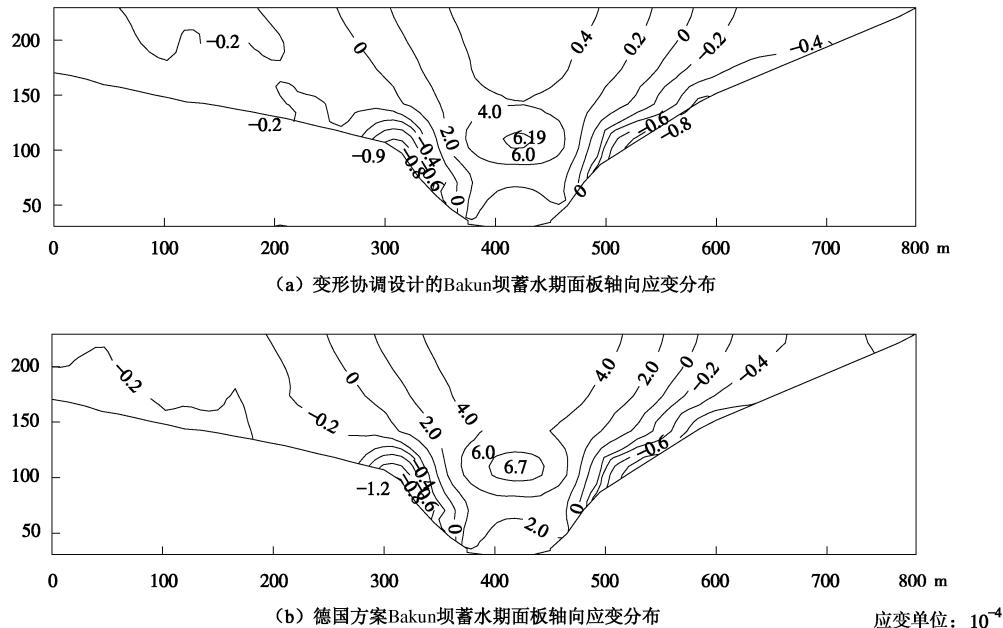


图 10 经验设计与变形协调设计 Bakun 坝蓄水期面板轴向应变分布对比

Fig. 10 Comparison of strains along dam axis direction in concrete face slab at water impoundment of Bakun Dam between empirical method designed and new deformation coordination concept method designed

板挠曲应力裂缝, 河谷中央面板最大压应变 670×10^{-6} , 超过Mohale坝发生面板混凝土挤压破坏时的压应变, 很可能也发生面板挤压破坏。采用中国方案的Bakun坝的坝体变形则比较协调, 坝体沉降差仅为 3.18×10^{-2} , 减小了51%, 小于从天生桥一级坝垫层裂缝推断出的允许沉降差。一期面板浇筑后随着后期坝体填筑面板顶部与垫层区的法向位移差只有 71.0 cm , 减小了60%, 从而大大减小了面板脱空现象, 避免了面板产生结构性裂缝。中国方案河谷中央面板最大压应变只有 619×10^{-6} (不设置新型止水) 和 540×10^{-6} (设置新型止水), 分别减少了8%和24%。都小于从Mohale坝得到的允许压应变 650×10^{-6} , 从而避免了面板混凝土挤

3 结语

水电是可再生的清洁能源, 中国水电资源的蕴藏量居世界第一, 但是已开发的仅占总量的20%, 2020年中国水电装机容量将达到3.8亿kW, 在中国西部金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河、怒江和黄河(上游)等河流有许多地方适宜建设高坝大库和大型水电站, 笔者在分析了高混凝土面板堆石坝严重问题产生机理和经验设计的不完全性的基础上, 指出简单地照搬经验设计的方法是不够的, 提出了高混凝土面板堆石坝设计—变形安全新理念, 阐述了变形协调准则、判别

标准、计算方法及其技术支撑, 介绍了变形协调结构设计思想指导下的Bakun坝工程实例。中国坝工界专家为建设300 m级高混凝土面板堆石坝提出了许多真知灼见^[8-9], 期望中国水利水电行业共同努力, 沿着实践—认识—再实践的道路, 在不远的将来完成一批高坝和超高坝建设的同时, 形成中国自己的高混凝土面板堆石坝的设计理论。

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] COOKE J B. Progress in rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(10): 1383 - 1414.
- [3] 库 克. 混凝土面板堆石坝的经验设计[J]. 水利水电快报, 1999, 20(5): 7 - 11. (COOKE J B. Empirical design of concrete face rockfill dams[J]. International Water Power& Dam Construction, 1999, 20(5): 7 - 11. (in Chinese))
- [4] 郦能惠, 张建宁, 熊国文, 等. 中国面板坝运行情况及监测资料分析[M]// 中国混凝土面板堆石坝 20——综合·设计·施工·运行·科研. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (LI Neng-hui, ZHANG Jina-ning, XIONG Guo-wen, et al. Operation feature and monitoring data analysis for concrete face rockfill dams in China[M]// Concrete Face Rockfill Dams in China for Twenty Years-Summarization, Design, Construction, Operation, Research. Beijing: China Water Power Press, 2005: 31 - 47. (in Chinese))
- [5] 郦能惠, 胡庆余, 张兴栋, 等. 高面板堆石坝施工关键技术[C]// 2002 年水工专委会学术交流会议学术论文集. 北京, 2002: 97 - 102. (LI Neng-hui, HU Qin-yu, ZHANG Xin-dong. Key construction technology of high concrete face rockfill dams[C]// 2002 Proceedings of Symposium on Hydraulic Structure. Beijing, 2002: 97 - 102. (in Chinese))
- [6] 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, 13(3): 12 - 18. (LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(3): 12 - 18.(in Chinese).)
- [7] 李登华, 郦能惠. 土与混凝土结构接触面力学特性研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 114 - 118. (LI Deng-hua, LI Neng-hui. Experimental study on mechanical behavior of interface between soil and concrete slab[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(5): 114 - 118. (in Chinese))
- [8] 马洪琪, 曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[M]// 中国大坝技术发展水平与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 52 - 61. (MA Hong-qi, CAO Ke-ming. Key technology of supper-high CFRD[M]// Large Dam Construction in China, State of the Art and Case Histories. Beijing: China Water Power Press, 2007: 56 - 61. (in Chinese))
- [9] 杨泽艳, 周建平. 我国特高面板堆石坝的建设与技术展望。[C]// 土石坝技术——2008 年论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 18 - 25. (YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping. Construction and technical prospects for super-high CFRD in China[C]// 2008-Proceeding of Technology for Earth-rockfill Dams. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 18 - 25. (in Chinese))