中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1688 ~ 1696
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

# 高混凝土面板堆石坝变形破坏机理与应对措施的新思考

贾金生[1,2], 徐耀[1*], 徐泽平[2], 窦向贤[3], 陈子玉[1], 邢帅[2]

1. 雅江清洁能源科学技术研究(北京)有限公司, 北京 100080
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072
* E-mail: xu_y@cyj.cn

收稿日期: 2025-12-29; 接受日期: 2026-04-16; 网络版发表日期: 2026-07-10
广东省水利科技创新项目(编号: 2025-06)和黄河实验室(河南)自主立项项目“堤坝与尾矿库胶结关键技术与设备研发”资助

**摘要** 为更安全地建设250 m级特高混凝土面板堆石坝及在超深覆盖层上建设高混凝土面板堆石坝, 本文对200 m级已建高混凝土面板堆石坝面板变形破坏机理进行了探讨, 提出了统一考虑堆石体填筑变形、蓄水变形及长期流变的坝体变形预测方法, 并以坝体变形预测及综合变形协调理念为基础, 提出大坝变形与变形协调双控制准则. 为提高防渗体系安全性, 文中提出用超高强超高韧混凝土增强面板抗裂和抗挤压破坏能力、用适应超大三向变位和承受高水压能力的高强柔性防渗复合板材增强止水结构、利用胶结料设置增模区降低大坝变形等高混凝土面板堆石坝设计和施工安全控制的新思路.

**关键词** 混凝土面板堆石坝, 变形与变形协调, 面板破坏, 增模区, 变形预测, 超高强超高韧面板混凝土, 高强柔性防渗复合板材

## 1 引言

现代混凝土面板堆石坝设计和施工的第一阶段以Cooke等人提出的经验设计方法为标志[1~3], 在施工上采用小吨位薄层碾压. 随着坝高增大, 坝体堆石变形和库水压力的影响愈发显著, 特别是坝高发展至200 m级后, 采用经验方法建设的巴西坎普斯诺沃斯面板堆石坝、我国建设的一些高面板坝工程出现了面板脱空、开裂、挤压破坏等问题. 之后, 在面板坝设计施工中开始强调加强坝体碾压、提高堆石体变形模量等变形控制措施, 表明面板坝建设已进入第二阶段即变形控制阶段, 典型工程如水布垭、三板溪等. 然而, 面板挤压破坏导致的防渗体系受损等问题在一些高面板坝工程中未得到根本解决, 需要建立新的理论和技术体系.

瞿能惠等人[4~6]和Xu等人[7,8]总结了国内外高面板坝出现开裂、挤压破坏的原因, 提出了高面板坝建设由变形控制阶段进入第三阶段的变形协调设计理念和准则, 其特点是以考虑变形协调为主要特征[9], 目前还在继续研究和实践过程中, 典型工程如中国猴子岩、

引用格式: 贾金生, 徐耀, 徐泽平, 等. 高混凝土面板堆石坝变形破坏机理与应对措施的新思考. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1688–1696
Jia J S, Xu Y, Xu Z P, et al. New thinking on deformation and failure mechanisms and corresponding measures of high concrete face rockfill dam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1688–1696, doi: 10.1360/SST-2025-0449

© 2026 《中国科学》杂志社 

马来西亚巴贡等高面板坝, 面板无结构性裂缝、未产生挤压破坏, 大坝运行良好, 详见表1.

此外, 随着我国西南、西北高原流域水电工程的大规模开发, 高原诸河普遍发育的细粒土覆盖层引发的工程问题日益突出. 细粒土覆盖层压缩性大、抗剪强度低, 筑坝期和运行期坝基不均匀沉降和长期变形产生对坝体变形的放大效应, 易诱发防渗面板的损伤; 加之高原区域地震活动活跃, 覆盖层在地震荷载下易发生液化与震陷, 进一步影响大坝结构安全. 更为关键的是, 坝基与坝体变形存在显著的耦合互馈作用, 坝基变形会使坝体产生附加变形与应力集中, 而坝体荷载反向改变坝基的应力与变形规律, 多重不利因素叠加, 使该类坝基工程问题更为复杂, 成为细粒土覆盖层上大坝安全建设与长期运行稳定性的关键制约因素.

拟建的坝高253 m的茨哈峡面板坝、在建的坝高247 m的大石峡面板坝和某超深厚覆盖层上高面板坝等复杂高面板坝工程, 面临更加严峻的面板防裂、防挤压破坏等挑战, 需要在变形预测的基础上实现大坝的变形和变形协调更精细的控制. 为进一步完善面板堆石坝第三阶段设计理论和技术, 更好地保障复杂高面板坝的安全建设, 本文提出了新的变形预测模型, 在变形协调理念的基础上, 提出了变形、变形协调双控准则和新的提高大坝安全裕度的思路.

## 2　高混凝土面板堆石坝变形破坏的总结与机理探讨

混凝土面板堆石坝承受的库水总推力与坝高呈三次方关系, 坝体沉降与坝高呈非线性递增关系, 因此高坝的变形和应力值显著增加. 现有研究成果表明, 坝体的最大沉降受到下游侧堆石区材料变形模量的影响, 下游堆石料变形模量偏低时最大沉降位置偏向下游, 同时, 坝体上部下游侧水平位移也将明显增加, 坝体呈

**表 1**　国内外部分高混凝土面板堆石坝施工与变形统计数据

**Table 1**　Statistical data of some high concrete face rockfill dams at home and abroad

| 阶段 | 工程名 | 地点 | 坝高 (m) | 沉降 (cm) | 渗漏 (L/s) | 填筑碾压控制孔隙率 (%) | | 施工参数 | 运行状态 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 主堆石区 | 下游堆石区 | | |
| 变形与变形协调双控 | 巴贡 | 马来西亚 | 203.5 | 259.6 | 170 | 20 | 20 | 25 t 碾压8遍 | 面板无结构裂缝, 无挤压破坏, 大坝运行良好 |
| | 南俄二级 | 老挝 | 182 | 160 | 40 | 20 | 20 | – | 面板无结构裂缝, 无挤压破坏, 大坝运行良好 |
| | 九甸峡 | 甘肃 | 136.5+56 | 138 | 65 | 17.3 | 19.1 | 25 t 碾压8遍 | 面板无结构裂缝, 无挤压破坏, 大坝运行良好 |
| | 猴子岩 | 四川 | 223.5 | 133.6 | 175 | 19 | 19 | 32 t 碾压10~12遍 | 面板无结构裂缝, 无挤压破坏, 大坝运行良好 |
| 变形控制 | 水布垭 | 湖北 | 233 | 262.1 | 81 | 19.6 | 20.7 | 25 t 碾压8遍 | 面板无结构裂缝, 有轻微挤压破坏 |
| | 三板溪 | 贵州 | 185.5 | 175.1 | 300 | 19.3 | 19.5 | 20~25 t 碾压8~10遍 | 面板结构出现裂缝, 面板严重挤压破坏 |
| | 紫坪铺 | 四川 | 156 | – | 51.2 | 20.6 | 21 | 25 t 碾压6~8遍 | 面板无结构裂缝, 有轻微挤压破坏 |
| 经验设计 | 天生桥一级 | 广西 贵州 | 178 | 367.1 | 150~70 | 22 | 22~24 | 18 t 碾压6遍 | 面板出现结构性裂缝, 局部挤压破坏 |
| | 阿瓜密尔帕 | 墨西哥 | 187 | 170 | 260 | – | 24 | 10 t 碾压4遍 | 面板出现结构性裂缝, 抛填减渗 |
| | 坎普斯诺沃斯 | 巴西 | 202 | >310 | 1400 | 22 | – | 9~12 t 碾压6遍 | 面板挤压破坏严重, 面板裂缝、断裂, 严重渗漏, 水库放空大修 |
| | 巴拉格兰特 | 巴西 | 185 | >300 | 1284 | 22 | – | 9~12 t 碾压6遍 | 面板裂缝, 面板挤压破坏, 严重渗漏 |

现“后仰”变形现象，从而导致混凝土面板在顺坡向出现较大范围的拉应力，水平裂缝也随之增加. 墨西哥阿瓜密尔巴坝(高185.5 m)和我国一些高面板坝均由于以上原因, 蓄水期面板出现了大量的水平向裂缝.

在坝体填筑期及蓄水期，两岸岸坡堆石体及面板向河谷中心方向移动. 在蓄水期，堆石体上游面会出现向内凹陷变形，导致河床中心部位的面板将承受挤压变形. 挤压应力的大小受到面板施工时机、坝体沉降、水平位移以及岸坡形态等因素的综合影响. 在蓄水期发生了河床段面板的挤压破坏和严重的钢筋受压屈曲变形现象的典型面板坝有高202 m的巴西坎普斯诺沃斯坝和高185 m的巴拉格兰特坝，我国也有部分高面板坝出现了上述面板受损的现象[9,10].

Pinto认为当坝高$H$不高时[11], 出于经济考虑, 下游坝体可以允许相对较大的变形; 但在高坝中应尽量避免. 对于峡谷地区的高面板坝($A/H^2$ < 4.75, 其中, $A$为面板面积), 堆石变形模量$E$与水压力的比值即$E/\gamma_w H$应大于120−20$A/H^2$, $\gamma_w$为水的容重. 对于其他形状的河谷, $E/\gamma_w H$应大于25. 作者比较研究了洪家渡、水布垭、巴贡等10座面板坝工程案例[12], 如图1所示, 发现巴贡虽在临界线以下, 由于采用了变形协调设计理念, 面板并未发生挤压破坏, 紫坪铺在临界线以上, 但由于仅考虑变形控制，面板仍有轻微挤压破坏. Pinto经验方法仅强调了堆石体变形模量单一因素，无法表达变形的时间、空间变异性. 当坝高达到300 m级时，依据Pinto经验方法，面板的挤压破坏将不可避免，这与当前对于高面板坝应力变形特性的认识并不相符. 为此，为了更好地解决高面板坝的安全建设问题，提高预测变形的精确度，作者提出，应将面板与坝体作为一个整体来分析，采用变形与变形协调双控制的方法和相关增强措施.

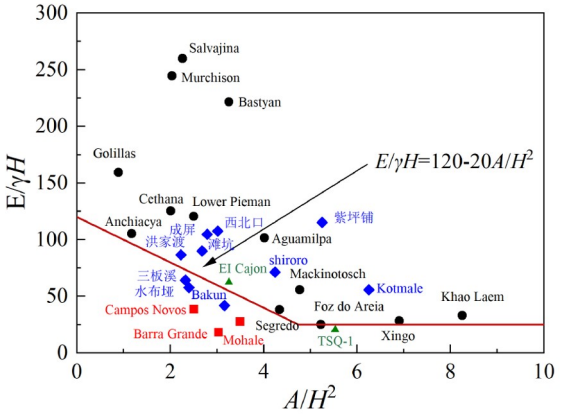



**图 1** (网络版彩图)堆石变形模量经验图

**Figure 1** (Color online) Empirical chart of rockfill deformation modulus.

## 3 高混凝土面板堆石坝变形预测方法和变形、变形协调双控准则

### 3.1 变形和综合变形模量预测模型

变形和变形协调控制的前提是对坝体变形的有效预测，本文综合考虑堆石体填筑压实、流变和蓄水压力的影响, 提出了基于物理力学分析的预测模型.

面板坝堆石体完成填筑时，堆石体最大沉降一般出现在坝高的1/2~2/3处，而此时的坝顶沉降理论值为0. 为与流变变形最大值发生位置协调，便于多种变形分量联合计算，这里按照上述范围的上限值即坝高的2/3计算，假定对应填筑期变形的堆石体压缩模量为$E_0$, 填筑期变形$S_{em}$可采用下式:

$$S_{em}=\frac{2\gamma H^2}{9E_0}, \tag{1}$$

式中, $\gamma$为堆石填筑天然容重.

高坝填筑完成后, 变形会持续相当长时间, 其中堆石料流变是主要成分之一. 当采用有限元数值计算时, 堆石体的流变变形计算可采用对数模型[13]:

$$\varepsilon^{\text{creep}}=\varepsilon_{10}\lg\frac{t}{t_0}, \tag{2}$$

式中，$\varepsilon_{10}$表示时间$t$(d)增大至初始时间$t_0$的10倍时的流变应变增量，实际计算中可分别计算$\varepsilon_{10}$的不同组成部分，即体积流变应变$\varepsilon_{v10}^{\text{creep}}$和剪切流变应变$\varepsilon_{s10}^{\text{creep}}$，并按Prandtl-Reuss流动规则分配至各方向.

以西龙池抽水蓄能电站下库面板堆石坝为例，采用上述流变变形计算模型，可以较好预测坝体变形的发展趋势, 见图2.

由于填筑后变形时间起点一致，变形为低高程应变的累积，因此，填筑完成后的流变变形最大值理论上应发生在坝顶，低于坝顶的位置流变变形依次减小. 考虑流变与填筑期变形的累加后，堆石体最大沉降量发生位置较填筑期变形最大值发生位置会略高. 为与前述填筑期变形统一考虑, 这里也仍按照坝高的2/3位置计算流变变形$S_{cr}$，并按照时间的对数关系描述流变

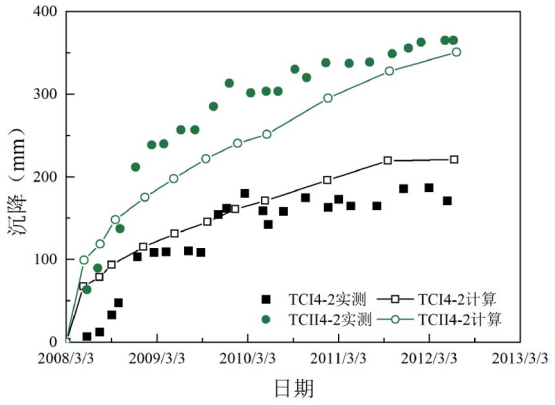



**图 2**　(网络版彩图)西龙池抽水蓄能电站下库面板堆石坝预测变形与实测变形的对比

**Figure 2**　(Color online) Comparison of predicted and measured deformations of the concrete-faced rockfill dam in the lower reservoir of Xilongchi Pumped Storage Power Station.

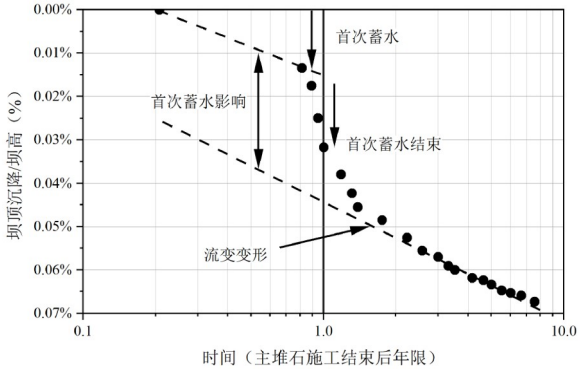



**图 3**　澳大利亚Bastyan面板坝的填筑完成后变形发展过程

**Figure 3**　Deformation development process after the completion of filling of the Bastyan concrete face dam in Australia.

变形, 即

$$S_{cr} = c_0 S_{em} \lg \frac{t}{t_0}, \tag{3}$$

式中, $c_0$为无量纲参数.

除了竣工后随时间发展的流变外，随着蓄水过程发展，混凝土面板堆石坝常经历显著的蓄水变形[14], 如图3所示. 蓄水变形$S_{im}$按填筑期变形$S_{em}$、流变变形$S_{cr}$的相同位置预测, 可采用下式:

$$S_{im} = c_1 \frac{2\gamma_w H^2}{9E_0\sqrt{1+n_f^2}}, \tag{4}$$

式中，$c_1$是无量纲参数，$\gamma_w$表示水的容重，$n_f$表示面板坡比.

所以，堆石体总沉降量$S$为填筑期变形$S_{em}$、流变变形$S_{cr}$以及蓄水变形$S_{im}$之和, 即

$$S = \left(1 + c_0 \lg \frac{t}{t_0} + c_1 \frac{\gamma_w}{\gamma\sqrt{1+n_f^2}}\right) \frac{2\gamma H^2}{9E_0}. \tag{5}$$

将$E$定义为考虑填筑期间变形、流变变形以及蓄水变形的综合变形模量, 即

$$E = E_0 \frac{\gamma\sqrt{1+n_f^2}}{\left(1 + c_0 \lg \frac{t}{t_0}\right)\gamma\sqrt{1+n_f^2} + c_1\gamma_w}. \tag{6}$$

可见, 该综合变形模量$E$在蓄水后会出现陡降, 之后随着时间发展逐步减小，体现了堆石料变形特性在面板坝建设过程中的变化规律, 如图3所示.

### 3.2　考虑首蓄作用的湿化变形预测统计模型

为确定坝体和面板在蓄水压力以及湿化作用下的变形增量, 还应在施工期监测资料的基础上, 对坝体的变形进行预测. 为此, 通过在水位、温度、时效因子集等传统模型之外增加首蓄因子集，提出了考虑首蓄影响的湿化变形统计模型；坝体变形中的首蓄分量属于不可恢复变形，受到库水位增量和最高水位的直接影响. 最终，考虑了水库首次蓄水情况下坝体变形增量预测的数学表达式如下:

$$\delta = \sum_{i=1}^{4} a_i H_i + \sum_{i=1}^{2} (b_{1i}\sin is + b_{2i}\cos is) + c_1 \mathrm{e}^{-kt} + c_2 t + c_3 \ln(1+t) + \sum_{i=1}^{7} d_i (DH_i), \tag{7}$$

式中各量含义如下. (1) 水位因子: $H_s$, $H_s^2$, $H_s^3$和$H_s^4$, $H_s = (h - h_{\min})/(h_{\max} - h_{\min})$, $h$指测时当日平均水位, $h_{\min}$和$h_{\max}$分别代表水库可能最低水位和可能最高水位. (2) 温度因子: $\sin s$, $\cos s$, $\sin^2 s$, $\sin s\cos s$, $s = 2\pi t'/365$, $t'$为测时日期距分析起始日期的时间长度(d). (3) 时效因子: $t$, $\mathrm{e}^{-kt}$, $\ln(1+t)$. $t = t'/30$, $t'$同前. (4) 首蓄因子: 若截至当日测次的最高水位超过截至上一测次的最高水位, 选入该项因子. $DH_i$包含$MH$和DMH的1~2次幂以及积的交叉项，其中$MH$为截至当日测次的最高水位, DMH为截至当日测次的最高水位比截至上一测次最高水位的超出部分.

从猴子岩面板堆石坝的监测数据看，考虑首蓄因

子的预测新模型比传统的统计预测模型具有更高的准确性, 如图4所示.

### 3.3 变形与变形协调双控准则及指标体系

高面板坝变形与变形协调的双控理念及相应的指标体系和控制标准的最终目的是基于变形和变形协调的控制, 实现防渗体系的整体安全, 可以归纳如下.

#### 3.3.1 变形总量控制

堆石体的变形特征与母岩自身物理力学特性、颗粒级配选择、压实质量控制水平密切相关, 同时还受坝体高度、河谷形态及坝基岩土体工程地质条件等外部因素的显著影响. 为实现坝体变形总量的有效控制, 并确保周边缝三向变位处于设计允许阈值内, 工程中应优先选用低压缩性、级配连续良好的堆石料, 且通过标准化碾压控制实现碾压密实度的控制. 具体如下式:

$$S=f\left(H,\frac{A}{H^2},n,S_c,C_u\right), \tag{8}$$

$$n\leqslant n_1, \tag{9}$$

式中, $S$为堆石体总沉降量(包括填筑期变形$S_{em}$、流变变形$S_{cr}$、蓄水变形$S_{im}$, 即$S=S_{em}+S_{cr}+S_{im}$), $n$为堆石体孔隙率(表征堆石的压实密度), $S_c$为表征母岩特性的堆石母岩饱和单轴抗压强度, $C_u$为堆石不均匀系数(表征堆石的级配特征), $n_1$为堆石碾压的孔隙率控制标准, 控制在18%~20%.

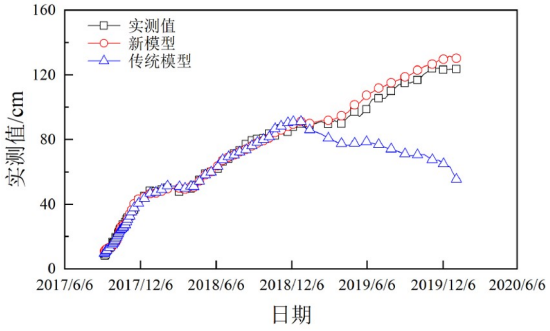



**图 4** (网络版彩图)猴子岩面板坝堆石体沉降预测传统模型和考虑首蓄因子新模型的预测效果比较

**Figure 4** (Color online) Comparison of prediction effects between traditional models and a new model considering the initial storage factor for settlement prediction of rockfill body in the Monkey Rock Face Slab Dam.

对于坝高200 m以上的高混凝土面板坝, 堆石体最大沉降与坝高的比例定义为特定百分数$d$, $d$应控制在0.8%~1.2%之间, 作为变形总量控制的关键控制标准, 即$S=dH$ ($d$ = 0.8%~1.2%).

#### 3.3.2 变形空间协调

(1) 坝体变形协调: 定义$G_c$为坝体横断面沉降曲线的梯度, $S_c$, $L_c$分别为沉降量及区间长度, 坝体上下游堆石区的变形协调可以表达为$G_c=\mathrm{d}S_c/\mathrm{d}L_c$, 且应小于上限值$G_{c\max}$.

在控制堆石体变形总量的同时, 应通过合理的材料分区设计, 实现坝体上下游堆石区的变形协调:

$$g\leqslant s_p, \tag{10}$$

$$\frac{E_u}{E_d}=r\leqslant r_{\max}, \tag{11}$$

式中, $g$为坝体上下游堆石区交界面的坡度, $s_p$为坝体上下游堆石区边界线的坡度, 坝体上下游堆石区变形模量$E_u$, $E_d$的比值应小于上限值$r_{\max}$.

上下游堆石边界线的坡度应倾向下游, 且$s_p\geqslant 0.5$. 上下游堆石区变形模量之比$r$应小于1.5, 即$r_{\max}=1.5$, 以保证上、下游堆石体的变形协调.

(2) 岸坡与河床区堆石变形协调: 定义$G_l$为坝体纵断面沉降曲线的梯度, $S_l$, $L_l$分别为沉降量及区间长度, 岸坡区堆石与河床区堆石的变形协调可以表达为$G_l=\mathrm{d}S_l/\mathrm{d}L_l$, 且应小于上限值$G_{l\max}$, $G_{l\max}$大小与面板和坝体材料特性、接缝止水结构设置有关.

(3) 面板与面板后堆石变形协调: 定义$s_f$为分期面板顶部沉降, $s_r$为相同位置堆石体沉降, 两者间的沉降差值为d$s$, 则面板与堆石体之间的脱空可表达为$\mathrm{d}s=s_r-s_f$, $\mathrm{d}s_{\max}$大小与面板材料强度、坝体材料和接缝止水结构有关.

#### 3.3.3 变形时间协调

为了给上游堆石区提供充足的变形稳定时间, 应当通过调整堆石填筑顺序使得上游堆石实现预沉降, 降低坝体分区间沉降时间的差异:

$$T\geqslant t_p, \tag{12}$$

式中, $T$为堆石沉降稳定时间, $t_p$为浇筑混凝土面板前, 上游堆石体沉降稳定时间.

### 3.4　变形与变形协调双控工程措施

在变形总量控制之外，还应通过从坝体上游区与下游区、岸坡区与河床区、堆石体与面板以及不同分区堆石的变形空间分布与变形速率等方面对大坝的变形协调进行有效的控制. 设计和施工可采取的措施主要包括以下方面.

(1) 堆石料岩性与级配: 应选择母岩为硬质岩以上的堆石料, 当现场料源不满足条件时, 软岩筑坝料的特性应开展充分的论证试验. 此外, 为保证堆石的压实密度和堆石颗粒的碾压质量，堆石材料宜具有良好级配且保持统一.

(2) 堆石料的填筑碾压标准: 提高堆石压实度是减少堆石体变形总量的控制性措施. 对于坝高200 m以上的特高混凝土面板堆石坝，堆石料填筑时应当对孔隙率(≤20%)、振动碾功率(25~35 t)和含水率(15%~20%)进行控制. 针对填筑方量大、施工周期长的面板堆石坝，还应严格控制堆石料压实度、孔隙率等关键参数的空间变异性，以削弱堆石料参数随机性诱发的坝体变形及变形梯度不协调现象.

(3) 堆石分区: 上、下游堆石区的边界应倾向下游，坡度控制在1:0.5以上，分区间材料性质应尽量保持一致，降低不同分区间变形模量差. 为降低狭窄河谷或岸坡陡峭的筑坝条件下岸坡段的变形梯度，应设置增模区(岸坡20~30 m范围)以提高局部堆石料材料强度. 在大坝顶部区域(1/5坝高)范围内应设置增模区, 以降低该区域蓄水后的变形总量和变形梯度，避免后期运行过程中面板顶部发生脱空. 针对深厚细粒土覆盖层地基上修建的面板堆石坝，可结合工程具体地质条件与受力特征，于坝体上下游坡脚处布设压重体, 通过增大覆盖层土体的有效应力，提升其地震荷载作用下的抗液化性能，进而有效降低坝基细粒土液化失稳对坝体结构及防渗体系产生的不利影响.

(4) 堆石填筑顺序: 坝体全断面的均衡上升是降低不均匀变形的有效措施. 在实际施工时, 应对结合实际施工需求设置的临时断面产生的填筑高差进行控制(<20~30 m). 同时, 为避免面板底部脱空, 堆石体的填筑高度应高于拟浇筑的混凝土面板顶部(不少于15~20 m).

(5) 堆石的预沉降稳定: 面板施工时机的合理选择可以有效降低因为坝体变形导致的面板受压破坏，可通过堆石料的预沉降，控制堆石料月沉降<5 mm，降低堆石料沉降变形对面板的不利影响；对于深厚覆盖层上筑坝，由于深厚覆盖层经历多次沉积和冲蚀作用, 覆盖层应力历史复杂，普遍存在软弱夹层或局部超固结状态，面板等关键防渗措施的施工还应监测坝基覆盖层变形是否趋于收敛.

(6) 深厚覆盖层坝基处理: 为有效降低深厚覆盖层变形对坝体结构及面板应力变形的不利影响，应在常规坝体建基面清理与坝基预处理的基础上，进一步增加坝基处理措施. 结合河床覆盖层地层岩性、物理力学特性及分布规律，可采用碎石桩等柔性复合地基处理措施，增加坝基在地震荷载下排水能力，提升抗液化能力；同时依据河谷地形地貌特征与坝体功能分区, 合理优化坝基处理深度, 精准控制坝基-坝体协调变形梯度. 对于覆盖层内防渗墙的设计与施工, 应结合数值模拟分析与施工期动态监测结果，动态调整防渗墙施工时序，以降低覆盖层变形对防渗墙产生的不利影响, 降低防渗墙结构安全风险；同时依据坝基渗透稳定性评价要求, 在覆盖层内可增设辅助防渗体系.

基于变形控制与变形协调控制的设计和施工理念，解决了猴子岩、巴贡等高面板坝因可能的变形总量过大或变形不协调所导致的面板结构裂缝和挤压破坏等难题. 不同阶段混凝土面板堆石坝的性态比较见表1，可见新理念在一系列工程中的应用显著提高了高面板坝的安全性.

## 4　增设胶结料增模区

胶结料是Jia等人提出的新的筑坝材料[15]，主要是解决土石坝洪水漫顶时因土石料不能抗冲蚀从而会发生淘刷、塌陷、溃决的问题. 胶结料通过采用土、砂、砾或开挖料，与水泥、粉煤灰、外加剂和水拌合形成的具有一定强度的非散离体，可以是胶结土、胶结砂砾石，也可以是胶结堆石，从而大大提升面板堆石坝抗冲蚀能力和变形性能，目前已在国内外多座胶结坝中应用. 对于超深覆盖层上的高面板坝或者250 m级特高面板堆石坝，由于面临复杂的抗震、长期变形、水位大变幅运行等条件，为了改善混凝土面板坝河床趾板区的周边缝三向变形、两岸堆石体变形梯度和不均匀沉降变形等，在连接板和趾板下及两岸陡坡部位设置胶结料增模区，有利于提高安全度. 大石峡面板坝采用了这一思路，河床趾板区域采用的增模胶

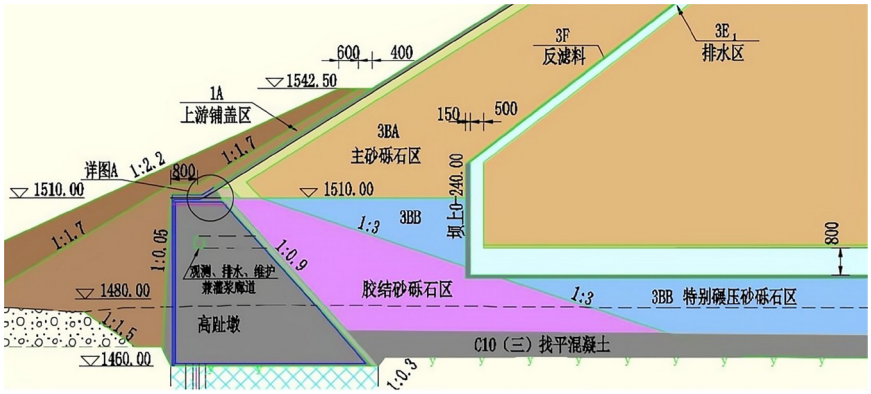



**图 5** (网络版彩图)大石峡面板坝河床高趾墩下游胶结砂砾石增模区

**Figure 5** (Color online) Stiffened zone of cemented sand and gravel downstream of riverbed high toe wall for Dashixia Concrete Face Rockfill Dam.

结料参数是90 d龄期80%保证率150 mm立方体标准块抗压强度10 MPa, 弹性模量≥15 GPa; 两岸陡岸坡补坡增模胶结料参数是90 d龄期80%保证率150 mm立方体标准块抗压强度6 MPa, 弹性模量≥8 GPa, 分别见图5和6.

## 5 新型面板混凝土与止水材料研发

目前高面板坝的面板抗裂、抗挤压破坏等问题虽然存在, 但是通过堆石体施工、面板施工期选择、面板抗裂和抗挤压破坏设计等办法, 能够得到较好的解决. 但对于超深厚覆盖层高面板坝和250 m级特高面板坝, 由于变形太大、水压高、地震作用等复杂工况, 要降低面板开裂、挤压破坏、止水破坏等问题, 尚需进一步研究混凝土与止水材料及其施工措施. 为此, 提出了超高强超高韧面板混凝土及保温防渗材料和高强柔性防渗复合板材研发. 通过针对性研发高面板坝的超高强高韧性新型混凝土材料, 以全面提高面板混凝土的抗裂、抗冻、抗挤压、抗碳化等性能; 研发出可大规模使用的保温防渗涂层材料, 使一定宽度裂缝在高水压作用下不被劈裂, 降低混凝土面板表面温度的日变梯度, 并在以上基础上兼具超疏水性、高反射率、低导热率等性能. 研发出能够承受高水压、适应超大三向变位的高强柔性防渗复合板材, 以提高面板接缝止水的安全性、可靠性与耐久性. 上述研究开发需紧密结合工程实践, 在实践中总结经验, 不断提升面板混凝土与止水以及保温防渗涂层材料的技术水平.

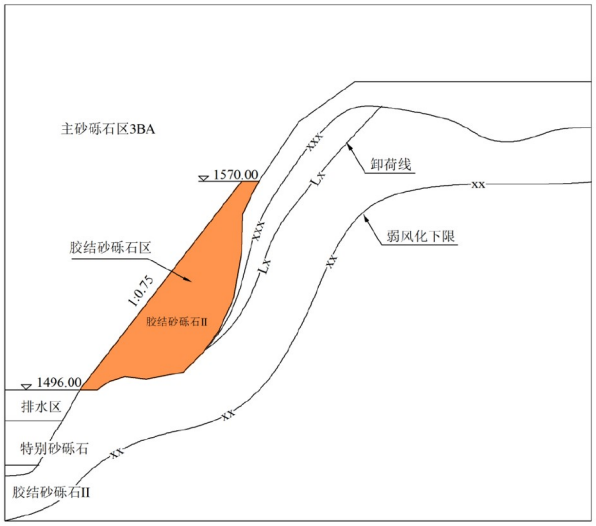



**图 6** (网络版彩图)大石峡面板坝右岸岸坡胶结砂砾石增模区

**Figure 6** (Color online) Stiffened zone of cemented sand and gravel at right bank slope of Dashixia Concrete Face Rockfill Dam.

## 6 总结

通过总结现有混凝土面板堆石坝的建设发展过程, 本文提出了大坝变形预测的新方法和变形与变形协调双控制准则, 相关研究成果已成功应用于国内外多座面板坝的设计与施工. 但目前在西南、西北诸河上建设超深厚覆盖层高面板坝或者250 m级特高面板坝, 尚没有成熟的工程案例可以借鉴, 需要基于现有设计和施工经验深化研究各种可能的办法和措施, 以尽量降低面板开裂、挤压破坏、止水破坏等风险.

## 参考文献


1 Cooke J B. Progress in rockfill dams. J Geotech Engrg, 1984, 110: 1381–1414

2 Cooke J B. The high CFRD dam. In: Proceedings of the International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dam. 2000. 1–315

3 Cooke J B, Sherard J L. Concrete-face rockfill dam: II. Design. J Geotech Engrg, 1987, 113: 1113–1132

4 Li N H. Discussion on the design concept of high concrete face rockfill dams (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2007, 29: 1143–1150 [郦能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨. 岩土工程学报, 2007, 29: 1143–1150]

5 Li N H. New design concepts for high concrete faced rockfill dams (in Chinese). China Eng Sci, 2011, 13: 12–18 [郦能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念. 中国工程科学, 2011, 13: 12–18]

6 Li N H, Wang J L, Mi Z K, et al. The connotation of deformation safety for high concrete face rockfill dams and its engineering application (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2012, 34: 193–201 [郦能惠, 王君利, 米占宽, 等. 高混凝土面板堆石坝变形安全内涵及其工程应用. 岩土工程学报, 2012, 34: 193–201]

7 Xu Z P, Jia J S. The concept on deformation control and integrated deformation coordination of high CFRD. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockfill Dams. 2011. 73–79

8 Xu Z P, Jia J S. The core concept of high concrete face rockfill dam construction—Deformation control and comprehensive deformation coordination (in Chinese). In: Proceedings of the 2012 Academic Annual Conference of the Concrete Face Rockfill Dam Professional Committee of the China Society for Hydropower Engineering and the Technical Seminar on Seismic and Deformation Characteristics Research of High Earth-Rock DAMS. 2012. 25–34 [徐泽平, 贾金生. 高混凝土面板堆石坝建设的核心理念——变形控制与综合变形协调. 见: 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会2012年学术年会暨高土石坝抗震和变形特性研究技术研讨会. 2012. 25–34]

9 Jia J S, Li N H, Xu Z P, et al. Research on Key Safety Technologies for High Concrete Faced Dams (in Chinese). Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2014 [贾金生, 郦能惠, 徐泽平, 等. 高混凝土面板坝安全关键技术研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2014]

10 Xu Y, Hao J T, Lu X, et al. Experimental study on the compression failure mechanism of the face slab of a concrete face rockfill dam in the slope direction (in Chinese). J Hydraul Eng, 2023, 54: 1038–1046 [徐耀, 郝巨涛, 陆希, 等. 面板堆石坝面板顺坡向挤压破坏机理的试验研究. 水利学报, 2023, 54: 1038–1046]

11 Pinto N L S. Very high CFRD dams-behavior and design features. In: Proceedings of the 3rd Symposium on CFRD. 2007. 43–49

12 Xiong H H, Xu Y, Jia J S, et al. Analysis of panel compression failure of high concrete face rockfill dam (in Chinese). Hydroelectric Power, 2015, 41: 27–30 [熊海华, 徐耀, 贾金生, 等. 高混凝土面板堆石坝面板挤压破坏分析. 水力发电, 2015, 41: 27–30]

13 Deng G, Xu Z P, Lv S X, et al. Calculation and analysis of long-term stress and deformation of high face rockfill dam in narrow river valleys (in Chinese). J Hydraul Eng, 2008, 39: 639–646 [邓刚, 徐泽平, 吕生玺, 等. 狭窄河谷中的高面板堆石坝长期应力变形计算分析. 水利学报, 2008, 39: 639–646]

14 Hunter G, Fell R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. J Geotech Geoenviron Eng, 2003, 129: 909–917

15 Jia J, Lino M, Jin F, et al. The cemented material dam: A new, environmentally friendly type of dam. Engineering, 2016, 2: 490–497

# New thinking on deformation and failure mechanisms and corresponding measures of high concrete face rockfill dam

JIA JinSheng[1,2], XU Yao[1], XU ZePing[2], DOU XiangXian[3], CHEN ZiYu[1] & XING Shuai[2]

[1] *Yajiang Clean Energy Science and Technology Research (Beijing) Corporation Limited, Beijing 100080, China*
[2] *China Academy of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*
[3] *China Power Construction Corporation Chengdu Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610072, China*

To improve the safety of constructing 250 m-level ultra-high concrete face rockfill dams (CFRDs) and high CFRDs on ultra-deep cover layers, this paper first explores the deformation and failure mechanisms of already built 200 m-level CFRDs. Based on this analysis, a dam deformation prediction method is proposed, considering rock fill compaction, water storage deformation, and long-term rheology. From the concept of comprehensive dam deformation prediction and coordination, a dual control criterion for both dam deformation and deformation coordination is introduced. Additionally, the paper proposes three further countermeasures: using cementitious materials to enlarge mold areas and reduce deformation, employing ultra-high strength and toughness concrete to increase crack resistance and extrusion failure resilience of the face slab, and using high-strength flexible anti-seepage composite board to strengthen the water stop structure to handle significant three-dimensional displacement and high water pressure.

**concrete face rockfill dam, deformation and deformation coordination, extrusion failure, bonding material expansion zone, deformation prediction, ultra-high strength and ultra-high toughness face concrete, high-strength flexible anti-seepage composite board**

doi: 10.1360/SST-2025-0449