

拓扑优化方法在面板堆石坝分区设计中的应用

高照良¹, 王正中², 史姣², 蔡坤^{2*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 面板堆石坝因其经济、可靠、广泛适应性和环保等显著优点受到坝工界的欢迎, 但面板坝尤其是高面板坝普遍存在面板断裂问题。故因面板断裂而造成的面板坝事故实例很多。面板断裂的主要原因之一是坝体内坝料分布不合理使得坝体与面板在自重与水压力作用下变形差异较大, 因此, 坝料在坝体内部的布局亦即坝料分区设计极为重要。该文以天生桥一级混凝土面板堆石坝为例, 以坝体刚度最大为目标, 根据坝料切线模量的差异, 将坝料分为多种材料, 建立材料集合, 采用连续体拓扑优化方法优化出高面板坝坝料的布局方案, 从而克服以往完全依赖经验给出的分区设计缺陷。另外, 在优化分析中, 以单元的材料号作为设计变量, 同时基于准则法给出了设计变量的更新方案, 即应变能密度大的单元须具有高模量材料。规避了传统梯度法或遗传算法无法解决离散设计变量数目庞大的困难。为确保算法稳定, 本方法迭代过程中每次仅更新不超过 5% 的总单元数的材料号。结果表明, 优化后的材料布局与传统分区存在明显差异: 高模量材料分布在上游下侧、各种材料分布随模量依次自上游向下游变化、材料边界坡比均不低于 1:0.8。与原设计相比, 优化后的面板在水压力作用下变形小, 分布均匀, 有利于阻止面板发生断裂。从而证明该方法可为此类工程实践提供具有理论基础的参考设计。

关键词: 坝, 拓扑, 断裂, 面板堆石坝, 坝料分区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.014

中图分类号: TV6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0112-07

高照良, 王正中, 史 姣, 等. 拓扑优化方法在面板堆石坝分区设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 112-118.

Gao Zhaoliang, Wang Zhengzhong, Shi Jiao, et al. Topology optimization method for zoning of high concrete face rockfill dam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 112-118. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

面板堆石坝因具有经济、可靠、广泛适应性和环保等显著优点而受到坝工界的欢迎。自第一座现代混凝土面板堆石坝——新国库坝(New Exchequer Dam, 150 m, 美国, 1966)建成以来, 目前全球已建成 300 余座混凝土面板堆石坝, 其中 150 余座分布在我国的大江、大河上。然而, 随着大量面板堆石坝的投入运营, 挡水面板的断裂^[1]以及由此引起的渗流、管涌等问题, 成为坝工界研究的焦点。

长期以来, 面板因坝体变形不均匀而产生裂缝极为常见^[2-4]。而控制坝体变形可从坝高、河谷形状、坝料物理特性及坝料分区、施工程序^[5]等角度入手。其中河谷形状和坝料物理特性为客观量, 而坝高、

坝料分区和施工程序为主观可变量。因此, 在坝高给定的情况下, 坝料分区和施工程序成为影响坝体变形的主要因素。

当前, 优化坝体的设计并预测坝体的变形受到普遍重视。在坝体优化设计方面, 郭兴文等^[6]将面板坝中关键参数作为设计变量, 以工程造价最低作为目标进行优化设计。蔡新^[7]采用区间优化方法优化堆石度作为设计变量, 以造价最低为目标坝断面, 蔡新等^[8]还将堆石坝上、下游进行优化设计。这些优化的共同特点是在已有设计(按规范设计)的基础上, 对主、次堆石区的坡度、高度等参数做调整, 此类结构优化可称之为尺寸优化。另外, 有些优化采用筛选法, 即直接分析几种不同分区方案, 后选取其中一种方案^[9]。上述优化工作仅对基于经验的原设计做适当的调整, 而原设计存在的缺陷无法在优化后得到有效解决, 结构的性能并不能得到明显改善。因此, 在尺寸优化前进行拓扑优化和形状优化, 有利于对设计从源头得到更好的优化。

本文针对坝体内坝料分区问题, 采用多相材料布局的拓扑优化方法^[10-12], 分析坝体断面坝料优化布局方案。在进行优化前, 无需复杂的初始设计,

收稿日期: 2012-12-10 修订日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(50908190, 51179164)、西北农林科技大学人才基金(QN2011125)项目资助。

作者简介: 高照良(1969—), 男, 河南灵宝人, 副研究员, 主要从事水土保持工程方面的科学研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: gzl@ms.iswc.cn

*通信作者: 蔡 坤(1978—), 男, 江苏宿迁人, 副教授, 博士生导师, 主要从事工程力学及水工结构工程学科教学科研工作。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: kuicansj@163.com

优化后即可得到最优材料布局方案，使结构在现有工况下表现出最大刚度。该方法可以根据坝体内各种材料的弹性模量及含量得到不同设计方案，从而保证开挖料得到充分利用。

1 多相材料优化布局算法

1.1 连续体拓扑优化的 ESO 方法

连续体拓扑优化自 1988 年 Bendsoe 和 Kikuchi^[13] 提出 HDM (homogenization design-based method) 方法以来，受到优化领域研究者的普遍重视。经过 20 多年的不断探索，目前已经逐步发展成熟，并被应用于航空航天结构、材料优化设计、汽车和微机电系统设计中。目前最为成熟的方法包括 SIMP (solid isotropic material with penalization)^[14] 和 ESO (evolutionary structural optimization)^[15] 方法。其中，ESO 方法属于准则法，其优点是无需敏度分析，设计变量更新速度快。本文以结构柔度最小化（刚度最大化）为目标，以单元材料号为设计变量，以单元应变能密度大小作为材料号更新准则，给出基于应变能密度 (strain energy density, SED) 排序的优化方法。材料号依次从 1 编码至结构中材料最大数。材料号低时，对应材料的弹性模量也低。对于含多相材料体积约束的连续体柔度最小化问题的数学列式为

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \{M_{e,m} | e \in \Omega_d, m \in 1, 2, \dots, N_m\} \\
 & \min c(\{M_{e,m}\}) = p^T \cdot U \\
 & \text{s.t. } \sum v_{e,l} \cdot \delta_{ml} - V_{cr,m} = 0, (m = 1, 2, \dots, N_m) \\
 & \quad K \cdot U = P
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中，设计变量 $M_{e,m}$ 表示单元 e 的材料号为 m ； Ω_d 为设计域； N_m 表示设计域内待布局材料总数， c 为结构平均柔度， $N \cdot m$ ， p 和 U 分别为总节点荷载矢量， N 和位移矢量， m 。 $v_{e,l}$ 表示单元 e 含 l 号材料号。仅当 $l=m$ 时， $\delta_{ml}=1$ ，否则为 0。 $V_{cr,m}$ 表示结构中含 m 号材料的体积约束临界值， m^3 。

1.2 单元应变能密度排序及材料号更新

结构受外力和约束共同作用后发生变形，在采用有限元方法分析时，可得到结构中各个单元的应变能密度 π 。如第 e 个单元线弹性变形时的应变能密度为

$$\pi_e = \int_e \sigma(\varepsilon) : d\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sigma_{e,i} \varepsilon_{e,i}
 \tag{2}$$

其中， σ 、 ε 分别为单元在加载过程中的应力和应变张量。 $\sigma_{e,i}$ 、 $\varepsilon_{e,i}$ 分别为第 e 个单元的主应力和主应变。对于非线性变形时，其应变能密度为单位体积内的弹、塑性应变能之和。

应变能密度排序是指将设计域内所有单元的应变能密度按照从小到大的顺序依次排列的过程

(0)。对于含多相材料的结构，为了提高结构刚度需将高模量的材料布置在有效的传力路径上。而应变能密度的大小确定了材料是否在传力路径上，低模量材料必不在有效传力路径上。为此，排序后的应变能密度也给出了各单元对结构刚度的贡献状态。对于低应变能密度的单元，有必要将其从高模量材料调整为低模量材料 (图 1b)，直至含高模量材料的单元体积之和达到其体积约束的临界值后，该种材料的更新才完成。下一步将结构中部分含新材料的单元按照应变能密度排序继续更新为更低模量材料。直至所有材料的体积均达到各自的约束临界值后，优化结束。

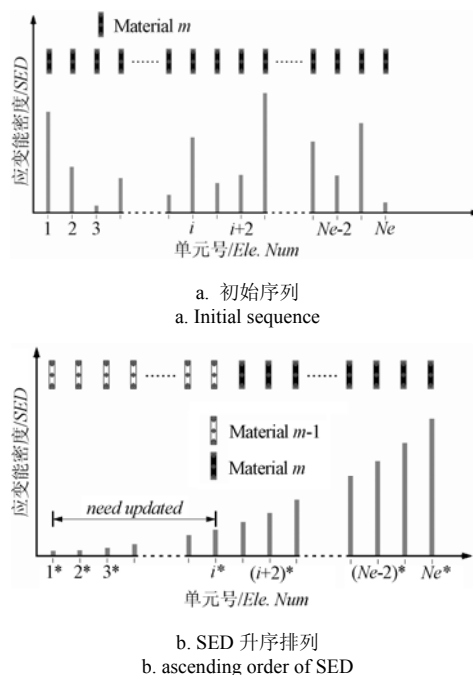


图 1 设计域内含 m 号材料的单元应变能密度排序
Fig.1 Sorting of the SEDs of elements with Material m in design domain

1.3 优化算法流程

1) 建立结构的有限元分析模型，初始化解法各参数，令 $m=N_m$ ；

2) 分析材料集合为 $\{M_{e,j}\}$ ($j \in \{m-1, m, \dots, N_m\}$) 的结构，获得各单元的应变能密度；

3) 升序排列单元的应变能密度，将序列前端一定数量的低应变能密度单元的材料由 $M_{e,m}$ 改变为 $M_{e,m-1}$ ，并累计含 $M_{e,m}$ 材料单元的体积；

4) 若含 $M_{e,m}$ 材料单元的体积没有达到其约束临界值，则返回到第 2) 步重分析，否则到第 5) 步；

5) 若所有材料均达到各自的体积约束临界值，则到第 6) 步；否则，令 $m=m-1$ ，返回到第 2) 步重分析；

6) 停止迭代。

第 1) 步中 $m=N_m$ 是指初始设计时将设计域内所有单元的材料均设定为模量最高材料。第 2) 步中 $M_{e,j}$ 中下标 e 是指单元号, j 指材料号。第 3) 步中“一定数量”的单元, 通常不超过总单元数的 5%, 其目的是为了保证算法稳定、得到最优解。一个单元内材料变更的最大次数为 N_m-1 。此外, 为了提高计算效率, 参与排序的材料仅为 $M_{e,m}$ 号材料, 已经变更材料号或在非设计域内的单元并不参与排序。因此, 算法在初始阶段计算量高, 随后不断降低。

2 算例—天生桥一级混凝土面板堆石坝坝料分区再研究

2.1 工程简介

天生桥一级混凝土面板堆石坝位于红水河上

游南盘江干流上。该坝于 1991 年开工, 2000 年建成, 最大坝高 178.0 m, 坝顶高程 791.0 m, 正常蓄水位 780.0 m, 坝顶宽 12 m, 上、下游坝综合坡比均为 1:1.4 (图 2), 总填筑方量 1 800 万 m^3 , 混凝土面板面积 17.3 万 m^2 。装机容量为 120×10^4 kW, 年发电量 52.3×10^8 kW·h。坝轴线上游为主堆石区, 下游为次堆石区。主堆石区 (IIIB 区) 为硬岩料。次堆石区, 即 IIIC 及 IIID 区, 分别为软、硬岩料。面板厚度 50 cm, 垫层宽度 2 m, 过渡区宽度 3 m, 其剖面示意图如图 2 所示^[4]。

天生桥一级混凝土面板堆石坝作为我国首座 200 m 级高面板坝, 倍受坝工界学者的关注^[4-5,16-20]。他们从施工、模拟、反演等方面进行了研究, 为后期超高坝的建造积累了大量的工程经验和理论基础。然而已有的工作并没有涉及坝料分区优化, 这也是本文选择该坝作为分析对象的主要原因。

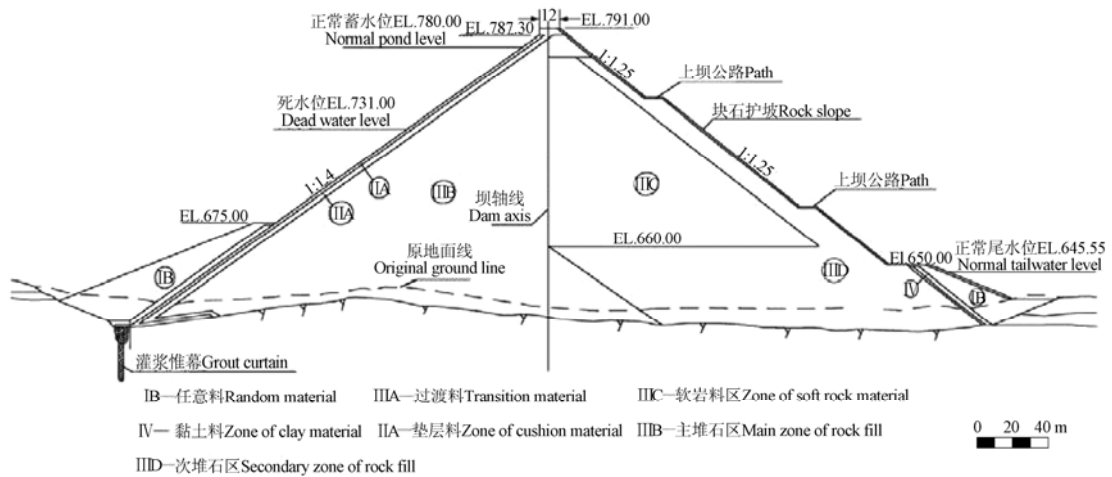


图 2 天生桥一级混凝土面板堆石坝剖面示意图
Fig.2 Cross section of TSQ-1 CFRD

2.2 结构几何及材料参数

坝体计算高程 787.3 至 791.0 m 处的防浪墙重作为荷载直接施加在当前坝顶。坝基宽度为坝底宽度的 2 倍, 以坝轴对分。坝基深度取为一倍坝高。面板厚度顶部为 0.3 m, 均匀变化至底部达到 0.9 m。垫层水平方向宽度 2.0 m (厚度 1.2 m)^[4]。由原始设计中坝料分区知主堆石区 (IIIB) 占坝体约 55%, 次堆石区 (IIIC) 材料占约 22%, 剩余部分约 23% 为 IIID 区、垫层区和过渡区填料。各材料的力学参数如表 1 所示^[20]。

根据邓肯 E-B 模型, 材料初始弹性模量可表示为

$$E_i = K \cdot Pa \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

其中, K 、 n 为模型参数, 各材料参数参见表 1 (K_b 、 m 也为模型参数)。Pa 为标准大气压, σ_3 为第三主应力。本文选择坝轴线底部的铅直方向压力为第三主应力, 即

$$\sigma_3 = \gamma \cdot h_{\max} \quad (4)$$

其中, h_{\max} 为坝最大高度, 取分析时所用高度, 即 167.3 m, 平均比重 γ 取值为 22 000 N/m³。故本文材料的弹性模量为最大值, 得到的弹性解为下限。

表 1 邓肯 E-B 模型中材料部分静力特性参数
Table 1 Some static characteristic parameters of materials in Duncan E-B model

材料名称 Material name	$\gamma/(N \cdot m^{-3})$	K	n	K_b	m
垫层料 Cushion material	19197	1100	0.4	200	0.34
过渡料 Transition material	21380	1050	0.4	200	0.34
主堆石料 Main material	22000	1000	0.47	335	0.21
次堆石料 Secondary material	21900	850	0.36	300	0.21

注: K 、 n 、 K_b 、 m 、 γ 均为邓肯 E-B 模型参数。

将垫层材料和过渡层材料视为一种材料, 取两

者参数的平均值作为相应参数，可确定垫层、主次堆石材料的弹性模量分别为

$$E_{\text{垫}} = K_{\text{垫}} \times p_a \times \left(\frac{\bar{\gamma} \times h_{\text{max}}}{p_a} \right)^{0.4} = 0.454 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{主}} = K_{\text{主}} \times p_a \times \left(\frac{\bar{\gamma} \times h_{\text{max}}}{p_a} \right)^{0.47} = 0.543 \text{ GPa} \quad (5)$$

$$E_{\text{次}} = K_{\text{次}} \times p_a \times \left(\frac{\bar{\gamma} \times h_{\text{max}}}{p_a} \right)^{0.36} = 0.311 \text{ GPa}$$

各材料的泊松比均取 0.13，略低于混凝土的泊松比 0.167。

计算模型中各材料的综合参数列于表 2。其中，面板材料（第 4 种材料）及垫层内材料（第 3 种材料）不参与变更。第 3 种材料的模量高于第 2 种材料的模量，更高于第 1 种材料的模量。

表 2 本计算模型中各区材料弹性参数及体积率

Table 2 Material elasticity and volume ratio in different zone in the present model

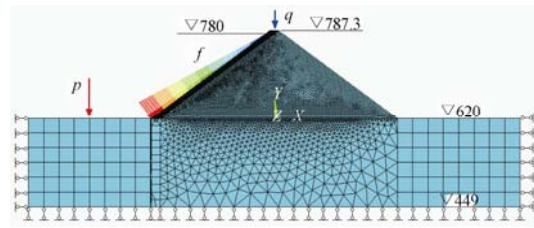
材料号 Material No.	原所在区域 Zone No.	弹性模量 Modulus /Gpa	泊松比 Poisson's ratio	设计域内比率 ^[4] Volume ratio in design domain ^[4]
1	IIIC	0.311	0.13	22%
2	IIID/IIIA	0.454	0.13	23%
3	IIIB	0.543	0.13	55%
4	面板 (Face plate)	31.5	0.167	Nondesign
5	坝基 (Foundation)	10.0	0.25	Nondesign

注：设计域内比率引自文献[4]；实际工程中 IIID 区材料的模量介于 IIIB 区和 IIIC 区材料模量之间。

2.3 拓扑优化分析结果

本算例中结构变形分析部分采用有限元软件 ANSYS (12.0 版^[21]) 实现，优化问题（公式 (1)）的算法通过 APDL 编写实现（二次开发）。采用平面应变单元离散结构，共含 9674 个节点、10417 个单元。其中，坝体部分含 8441 个单元。坝体及坝基的有限元模型如图 3 所示。 p 为上游坝基所受 160.0 m 水压力（单位：Pa）（正常蓄水位）， f 为坝上游面水压力（单位：Pa）， q 为顶部防浪墙重力（单位：N/m）。坝体高度与坝基深度相同，坝基上下游宽度分别为坝轴上下游两侧的坝底宽度。优化过程中，设计初定首次相变（材料号变更）次数为 40，二次相变次数为 20，亦即每次更新单元数占坝体内可变更材料单元总数的 1.1%。

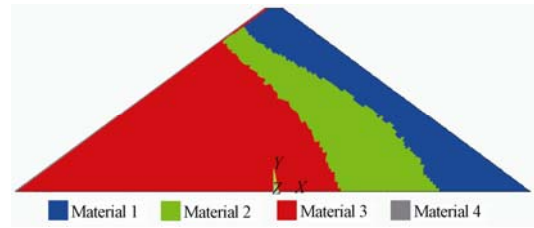
坝体结构中材料经优化后的布局方案（图 4）表明，高模量材料（硬质堆石）应布置在上游底部，并且其下游面（与第 2 种材料的交界面）的综合坡比在 1:0.82 附近，与第 2 种材料的边界较为平直。



注： p 为上游坝基所受 160.0 m 水压力，Pa（正常蓄水位）； f 为坝上游面水压力，Pa； q 为顶部防浪墙重力，N/m。

图 3 天生桥坝体断面分析的有限元模型

Fig.3 Finite Element model for main section of TSQ-1 dam



注：材料 1 为软岩料；材料 2 为过渡料；材料 3 为过渡料；材料 4 为砼（面板）。

图 4 拓扑优化后堆石体中材料布局方案

Fig.4 Layout of Materials in rockfill by topology optimization

第 2 种材料将第 1 种材料和第三种材料隔开。并且，第 2 种材料与第 3 种材料的界线也很明确，综合坡比约为 1:21。中部坡度略高于顶部和底部坡度。

通常，顶部为了提高抗变形能力，也可以限定一部分区域为非设计域，将硬质堆石材料作为该区域材料。但这样设置后，参与更新的第 3 种材料总量将降低。

由坝体及坝基结构在水压力作用下的第三主应力（压缩主应力）分布云图（见图 5）发现，最大值出现在上游坝体底部，并且随着水位上升不断降低。坝体内第三主应力分布边界与材料分布边界相似，高模量材料分布在高压应力区。这进一步表明前述优化准则选取恰当，高变形位置处需布置高模量材料。

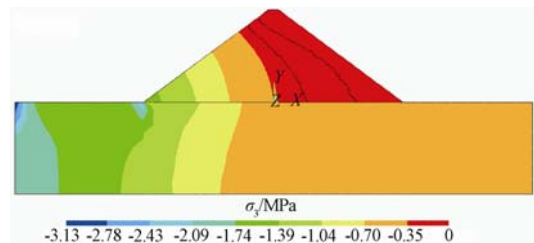


图 5 坝体第三主应力分布云图

Fig.5 Distribution of the 3rd principal stress in dam

上述结果进一步验证了许多学者的直观经验，比如梅锦焯^[5]的结论：①“从天生桥一级和洪家渡面板堆石坝的工程实践可以看出，坝轴线下游堆石体材料特性对面板工作性状影响不大的概念，不适

用于坝高大于 150 m 的 200 m 级高混凝土面板堆石坝”；②“为减少高面板堆石坝上、下游方向的不均匀沉降，主、次堆石区的堆石料特性差异不宜过大，应尽可能保持变形模量基本一致或逐步过渡”；③“即使干密度较大的软岩料，其压缩模量仍相对较小，不宜将软岩料布置在高压应力区，以免次堆石区发生较大压缩变形”；④“主、次堆石区的分

界应采取相对保守的坡比，其坡度不宜陡于 1:0.5”。

从给出的施工顺序图^[4]（图 6）可知，采用这种施工顺序布局上述材料更易操作，即：在第一到三期主要填筑硬岩坝料；第四、五期主要填筑中间强度（微风化）坝料；第六期主要填筑最弱坝料。这种设计和原始设计相比，最弱材料不是布局在坝体内下游中上部，而是布局在下游表面。

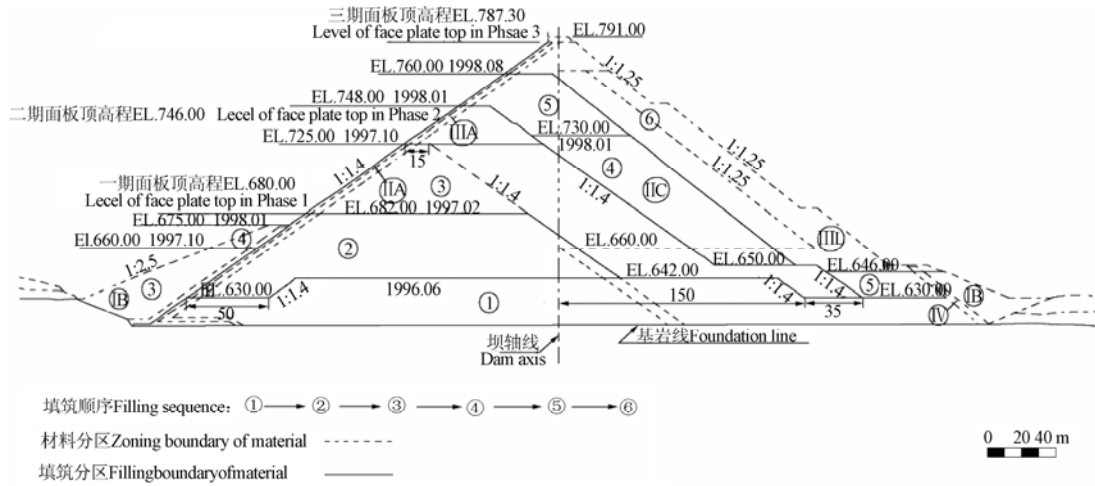
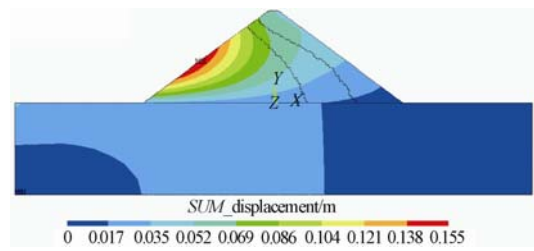


图 6 天生桥一级面板堆石坝填筑分区图
Fig.6 Placement zoning of TSQ-1 faced slab rockfill dam

在材料布局确定后，坝体位移云图（见图 7）表明，水平方向最大位移（图 7a）为 12.07 cm，发生在面板中部（EL681.4m 处）。底部水平位移变化较大，需设置趾板保护；竖直方向最大位移（图 7b）为 10.14 cm，发生在高程 701.9m 处；综合最大位移（图 7c）为 15.53 cm，出现在高程 691.2 m 处。

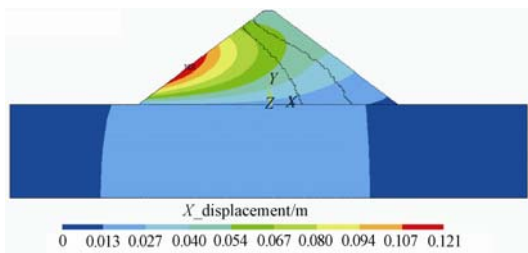


c. 综合位移云图
c. Integrated displacement contours
图 7 坝体位移云图

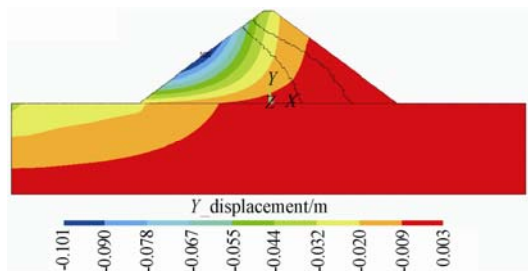
Fig.7 Distribution of displacement in dam

在水压力作用下面板上各点处的位移曲线（见图 8）表明，面板法向位移最大值出现在距底部高度 73.0 m 位置（EL693.0 m），法向最大位移为 15.04 cm。面板底部法向位移最小（3.05 cm）。表明面板上各点法向位移之差不超过 12 cm（计算模型中面板长度为 288 m）。有报道^[5]称，该坝“蓄水后，在水压力作用下，面板顺坡向发生了很大的法向挠曲变形，最大值达 73.3 cm。”，约为当前值的 5 倍。造成两个结果差别的原因包括材料参数和材料布局方式差异。

上述位移分析表明，仅在水压力作用下面板挠曲可经优化坝料分区得到显著改善。因重力作用引起的沉降对面板变形影响明显，面板挠度变化与施工过程相关。



a. 水平位移云图
a. Horizontal displacement contours



b. 竖直方向位移云图
b. Vertical direction displacement contours

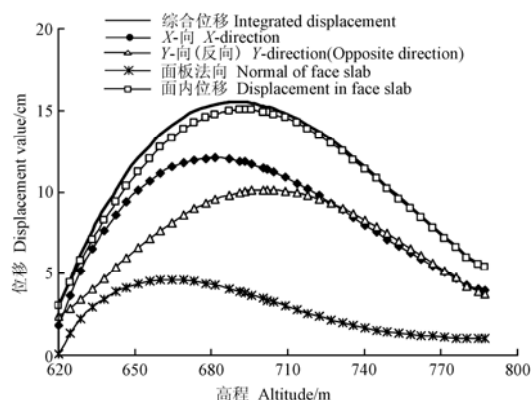


图 8 水压力作用下面板位移

Fig.8 Deflection of face slab under water pressure

3 结论

利用拓扑优化方法模拟了天生桥一级面板堆石坝断面坝料分区形式。结果表明,经拓扑优化后材料分布自上游向下游逐步由高模量材料到低模量材料过渡。各相材料边界较清晰,利于施工。各材料间的边界坡度均高于 1:0.8,可保证边坡稳定。模量最低材料不再是布局在坝体下游内部中间,而是在下游面外部。

[参 考 文 献]

- [1] 邴能惠. 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.
- [2] 邴能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143—1150.
Li Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143—1150. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐泽平, 郭晨. 高面板堆石坝面板挤压破坏问题研究[J]. 水力发电, 2007, 33(9): 80—84.
Xu Zeping, Guo Chen. Research on the concrete face slab rupture of high CFRD[J]. Water Power, 2007, 33(9): 80—84. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张宗亮. 超高堆石坝工程设计与技术创新[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1184—1193.
Zhang Zongliang. Design and technical innovation of rockfill dam projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1184—1193. (in Chinese with English abstract)
- [5] 梅锦煜. 高混凝土面板堆石坝堆石体施工期变形研究[J]. 水利水电技术, 2006, 37(7): 7—10.
Mei Jinyu. Study on deformation of rock-fill body during construction for high concrete face rock-fill dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(7): 7—10. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭兴文, 王德信, 蔡新. 覆盖层地基上混凝土面板堆石坝优化设计研究[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 53—58.
Guo Xingwen, Wang Dexin, Cai Xin. Study on optimal

- design of CFRD on alluvial deposit[J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(4): 53—58. (in Chinese with English abstract)
- [7] 蔡新. 混凝土面板堆石坝结构分析与优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [8] 蔡新, 施金, 郭兴文, 等. 凝面板堆石坝优化设计[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 43—45.
Cai Xin, Shi Jin, Guo Xingwen, et al. Optimal design of cemented concrete face rock-fill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1): 43—45. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王汝军, 高红民. 白沙面板堆石坝剖面优化设计[J]. 湖北水力发电, 2009, 5: 48—51.
Wang Rujun, Gao Hongmin. Optimal design on cross section of baisha CFRD[J]. Hubei Water Power, 2009, 5: 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shi J, Wang Z Z, Cai K. Effects of moduli differences on layout optimization of a continuum with multiple materials[J]. Advanced Materials Research, 2011, 217/218: 1414—1418.
- [11] Wang M Y, Wang X M. Color level sets: a multi-phase method for structural topology optimization with multiple materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(6/8): 469—496.
- [12] Ramani A. A pseudo-sensitivity based discrete-variable approach to structural topology optimization with multiple materials[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(4): 913—934.
- [13] Bendsoe M P, Kikuchi N. Generating optimal topology in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197—224.
- [14] GIN Rozvany, M Zhou, T Birker. Generalized shape optimization without homogenization[J]. Structural Optimization, 1992, 4: 250—252
- [15] YM Xie, GP Steven. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. Computers and Structures, 1993, 49(5): 885—896.
- [16] 许仲生. 天生桥一级水电站面板坝坝体变形特征[J]. 水力发电, 2000, 3: 18—22.
Xu Zhongsheng. The deformation features of the dam body of concrete facing rock-fill dam of Tianshengqiao first-cascade hydropower station[J]. Water Power, 2000, 3: 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [17] 高辉, 李守义. 面板堆石坝非线性有限元应力变形分析[J]. 西北水工程与水工程, 2000, 11(4): 33—37.
Gao Hui, Li Shouyi. Deformation and stress analysis on concrete deck rock fill dam by nonlinear finite element method[J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 2000, 11(4): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高莲士, 汪召华, 宋文晶. 非线性解耦 K-G 模型在高面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2001, 10: 1—7.
Gao Lianshi, Wang Zhaohua, Song Wenjing. The application of nonlinear uncoupled K-G model to deformation analysis of high concrete face rock-fill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 10: 1—7.

- (in Chinese with English abstract)
- [19] 高莲士, 宋文晶, 张宗亮, 等. 天生桥面板堆石坝实测变形的三维反馈分析[J]. 水利学报, 2002, 3: 26—31.
Gao Lianshi, Song Wenjing, Zhang Zongliang, et al. 3-D feedback analysis based on the observational deformation of concrete face rock-fill dam in Tianshengqiao project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 3: 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙大伟, 郦能惠, 田斌. 超高坝堆石分区问题二维有限元分析[J]. 固体力学学报, 2006, 27(S): 123—127.
Sun Dawei, Li Nenghui, Tian Bin. 2D finite element analysis on rock-fill zone problem of super-high concrete face rock-fill dam[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(S): 123—127. (in Chinese with English abstract)
- [21] <http://www.ansys.com> (2012-1-1)

Topology optimization method for zoning of high concrete face rockfill dam

Gao Zhaoliang¹, Wang Zhengzhong², Shi Jiao², Cai Kun^{2*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Concrete face rockfill dam (CFRD) is very popular in modern dam engineering applications due to its low cost, stability, adaptability and environment friendly. In CFRD engineering, many accidents are caused by the cracks of face plates. Especially, most of high CFRDs (over 100 m) have cracks in their face plates that reduce the safety of dams in operation. One of the main reasons for the cracks in face plates of a high CFRD is difference between the deformation of the face plates and dam body under gravity and upstream water pressure. Clearly, the deformation of dam body is determined by not only gravity and the water pressure, but also the distribution of filled materials. Therefore, the layout of the materials in dam body is essential to CFRD engineering. Taking TSQ-1 CFRD as an example, the best partition form of dam material within cross-section of a high CFRD was analyzed by continuum topology optimization. In traditional design, the zoning of material was given mostly according to designer's experiences and however, the intuitive method is not feasible because the height of CFRD is over 200 m. In this research, a continuum topology optimization method was proposed to find the optimal partition of the filled materials in CFRD. Considering the differences among the elasticity of materials in dam body, a material set was formed with the materials in respect to their tangential moduli. The deformation of structure was solved using finite element (FE) method and the material number of each FE was chosen within the material set. The purpose of the present research was to find the optimal material numbers in finite elements in design domain. A heuristic method was presented and similar to evolutionary structural optimization (ESO) as considering the update rule of material properties in optimization process. Here, a criterion was adopted to renew the design variables, i.e., the material numbers with respect to the tangential modulus of materials in dam body. To keep the stability of algorithm, no more than 5% of total elements' material number will be renewed in iteration. The results indicated that there were obvious differences between the layout of optimized material and that of the traditional partition. High modulus materials were located in the lower side of the upper reaches and various materials changed gradually with respect to the moduli from the upstream to downstream. And boundary slope ratios of materials were not lower than 1:0.8. Compared with the original design, deformation of panel in optimized dam was slighter and more uniform under water pressure, which helps to prevent face plate from breaking.

Key words: dam, topology, fracture, faced rock-fill dam, dam material partition

(责任编辑: 曾懿婷)