

郑太文, 张建海, 熊影, 等. 重庆野茶水库大坝坝体分区方案研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 157-164.

ZHENG Taiwen, ZHANG Jianhai, XIONG Ying, et al. Study on dam zoning scheme of Yecha Reservoir dam in Chongqing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 157-164.

重庆野茶水库大坝坝体分区方案研究

郑太文¹, 张建海², 熊影¹, 李福霜¹

(1. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 重庆奉节野茶水库大坝最大坝高 90 m, 坝型为混凝土面板堆石坝, 大坝料场位于水库右侧支沟九洞溪库尾, 料场地层岩性为灰岩夹角砾岩, 其中灰岩为硬岩, 角砾岩为软岩。坝体分区及坝料设计是高面板堆石坝设计的关键内容, 为了合理利用料场资源, 减少料场弃方量进而降低工程投资, 利用有限元应力应变分析, 研究在主堆石区和次堆石区采用硬岩与软岩混合料的可行性及适宜配比。研究结果表明, 野茶水库面板堆石坝的主堆石区应选用灰岩作为坝料, 次堆石区坝料选用灰岩: 角砾岩 $\geq 60\% : 40\%$ 的混合料, 次堆石上部干燥区采用枢纽区弱风化砂页岩开挖料。

关键词: 面板堆石坝; 大坝分区; 灰岩; 混合料

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.032

中图分类号: TV641.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0157-08

Study on dam zoning scheme of Yecha Reservoir dam in Chongqing

ZHENG Taiwen¹, ZHANG Jianhai², XIONG Ying¹, LI Fushuang¹

(1. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, China;

2. Sichuan University College of water resource & Hydropower, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The maximum dam height of the Yecha Reservoir Dam in Fengjie, Chongqing is 90 m. The dam is designed as a concrete face rockfill dam. The material field for the dam is located at the tail end of Jiudongxi Creek, a tributary on the right side of the reservoir. The geological formations in the material field consist of limestone interbedded with breccia, where limestone is classified as hard rock and breccia as soft rock. The zoning and material design of the dam are crucial aspects in designing high concrete face rockfill dams. To optimize the utilization of material resources and reduce the amount of material waste, thereby lowering project costs, finite element stress-strain analysis was employed to study the feasibility and appropriate mixing ratios of hard and soft rock materials in the primary and secondary rockfill zones. The research findings indicate that limestone should be used as the dam material in the primary rockfill zone of the Yecha Reservoir Dam. In the secondary rockfill zone, a mixture of limestone and breccia with a ratio of at least 60% limestone to 40% breccia is recommended. Additionally, excavation material from the weakly weathered sandstone and shale in the core area should be used in the dry upper section of the secondary rockfill zone.

Keywords: concrete face rockfill dam; zoning design of dams; limestone; mixture of limestone and breccia

收稿日期: 2024-11-12

作者简介: 郑太文(1985—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事水利水电工程规划、设计、咨询及管理工作。E-mail: ztw@cmcu.cn

0 引言

面板堆石坝是土石坝工程中最具竞争力的坝型,其防渗系统通常由厚度不到 1 m 的混凝土趾板、面板及止水组成^[1]。对面板堆石坝坝体分区进行优化设计,合理利用枢纽区的开挖料,可减少弃渣,节约投资。

重庆市奉节县野茶水库位于甲高河上,是一座Ⅲ等中型水利工程,总库容为 1 038.4 万 m³,正常蓄水位 704.00 m。坝址区呈“V”形峡谷地貌,坝基为分布不均,厚度不等的砂页岩互层,变形模量差异较大,不均匀压缩变形问题突出。本研究综合比较建坝条件、工期和投资等因素,确定野茶水库挡水建筑物为混凝土面板堆石坝,并开展坝体分区研究。

1 大坝分区初步设计

1.1 分区设计原则

野茶水库坝体从上游至下游依次分为盖重区、上游铺盖区、混凝土面板、垫层区、过渡区、主堆石区、下游次堆石区和下游护坡。根据面板堆石坝的受力特点、渗透稳定性及耐久性要求,堆石坝坝体分区应满足以下原则^[2]:(1)从上游向下游坝料的渗透系数递增。(2)满足坝体各部位的变形协调,尽量减少(尤其是坝轴线上游部位)变形量。(3)合理利用开挖石渣。(4)分区尽可能简单。

1.2 筑坝料源情况

坝址区基岩主要为三叠系上统须家河组(T₃xj)砂岩夹页岩,弱风化明挖及石方洞挖量 12.17 万 m³(自然方),弱风化砂岩和页岩饱和抗压强度分别为

37.64 MPa、9.83 MPa,可用于坝体下游次堆石区上部。

灰岩料场距坝址区 2.5 km,出露地层为三叠系下统嘉陵江组第四段(T_{1j}⁴)和第三段(T_{1j}³),岩性为紫灰色微晶-粗晶灰岩,夹少量角砾岩及白云岩。灰岩为硬岩,弱风化灰岩饱和抗压强度平均值为 46.1 MPa,软化系数为 0.79,干密度 2.57 g/cm³,大于 2.4 g/cm³,质量及储量均满足要求,是理想的面板堆石坝坝料。

料场含少量角砾岩夹层,弱风化钙质角砾岩和泥质角砾岩饱和抗压强度平均值分别为 27.73 MPa、7.13 MPa,软化系数分别为 0.73、0.67,干密度均为 2.64 g/cm³,整个料场的角砾岩力学性能较低但剔除困难且投资过高。为了更大限度利用料场资源,参考其他工程^[3],设计在坝体下游次堆石区掺和部分角砾岩。

1.3 坝体分区初步设计及问题提出

野茶水库坝体初步分区结构如图 1 所示。盖重区(1B)设于铺盖区上游,采用开挖石渣;上游铺盖区(1A)为灰岩轧制粉细砂;垫层区(2A、2B)位于面板下部,是混凝土面板的支撑结构,采用料场灰岩料;过渡区(3A)可实现垫层与主堆石区的水力过渡,采用料场灰岩料;主堆石区(3B)、次堆石区(3C)是面板坝的主体,为承受水荷载及其他荷载的主要支撑体,考虑使用灰岩或灰岩和角砾岩的掺和料;位于下游次堆石区的上部干燥区(3D)(以下简称干燥区),考虑利用弱风化砂页岩开挖料或料场掺和料。

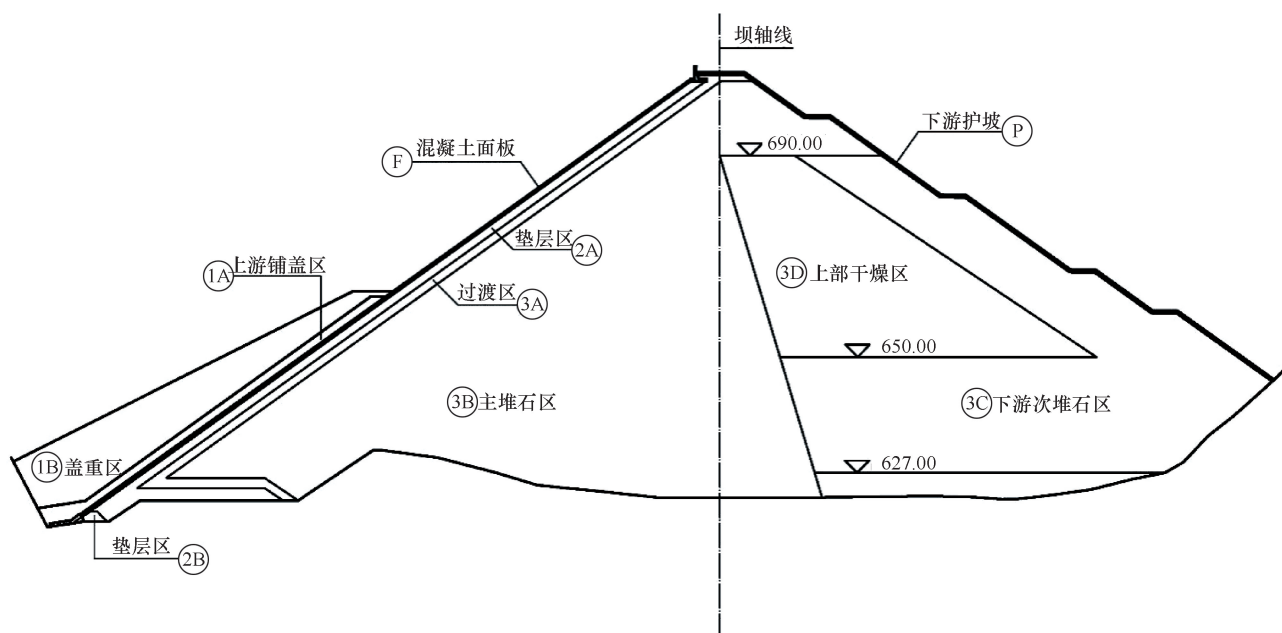


图 1 野茶水库面板堆石坝初步分区最大剖面示意(桩号 0+115.37 m)

主堆石区、次堆石区和干燥区是面板堆石坝中重要、用料最大的区域,若坝料掺和角砾岩或利用弱风化开挖料,可有效减少弃渣、节约投资。故本研究聚焦以下方面:主堆石区和次堆石区中掺和角砾岩的区域及掺和比例、干燥区采用弱风化砂页岩开挖料的

实际效果与可行性。

基于上述研究目的,针对灰岩(不掺和角砾岩)、灰岩:角砾岩=80%:20%和灰岩:角砾岩=60%:40%,开展筑坝料工程特性试验研究,成果如表1所列,以确定掺和区域与比例提供依据。

表1 筑坝料非线性弹性模型建议参数(饱和CD剪)

序号	坝料	坝体分区	岩性	E_t			μ_t			B_t		线性强度		非线性强度	
				K	n	R_f	G	F	D	K_B	m	C /kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi$ /($^\circ$)
1	主堆石料	主堆石区	弱风化灰岩	1 050	0.25	0.80	0.37	0.11	3.9	540	0.19	42	36.7	45.6	7.3
2	次堆石料	次堆石区	灰岩:角砾岩=80%:20%	920	0.25	0.80	0.38	0.11	3.2	480	0.18	37	35.3	43.8	7.0
3			灰岩:角砾岩=60%:40%	910	0.27	0.81	0.38	0.11	3.3	470	0.20	33	34.7	42.7	6.5
4	过渡料	过渡区	弱风化灰岩	980	0.26	0.82	0.38	0.12	3.7	480	0.19	38	36.0	43.7	6.4
5	垫层料	垫层区	弱风化灰岩	1 070	0.30	0.80	0.36	0.11	3.6	540	0.22	24	35.3	41.3	5.0
6	特殊垫层料	特殊垫层区	弱风化灰岩	1 080	0.30	0.78	0.36	0.10	3.5	550	0.23	29	35.6	42.6	5.8
7	排水带料	排水带	弱风化灰岩	800	0.23	0.82	0.38	0.12	3.1	400	0.16	30	34.4	41.9	6.2

2 有限元应力应变分析

2.1 研究方法

坝体材料及坝基覆盖层的应力应变曲线具有明显的非线性特征,其变形既随应力水平变化,还与加荷的应力路径相关,反映这种非线性行为的本构模型主要有弹性非线性模型与弹塑性模型^[4],其中以邓肯-张为代表的双曲线弹性非线性模型应用较为广泛,该方法涉及材料参数较少,使用简便,且较符合工程实际。

本次研究中,基岩、混凝土、防渗帷幕等材料采用弹塑性本构模型,坝壳料、垫层、过渡层等材料采用邓肯-张 $E-\mu$ 模型。面板垂直缝、趾板与面板(周边缝)、面板与防浪墙之间及面板与垫层之间采用接触单元(无厚度)以模拟相对错动滑移现象。面板堆石坝应力应变有限元分析计算采用二维和三维静动力非线性有限元分析程序 NASGEWIN。

2.2 模型建立及计算参数

本研究模型范围为顺河向坝轴线上下游 250 m 以

内,横河向为桩号 0-200.0 m 至桩号 0+450.0 m,铅直向为高程 520.0 m 至地表自由面。

坝体主要筑坝材料采用表 1 试验结果,坝体其他分区材料根据地质资料及室内试验成果的参数建议值,并参照其他类似工程选取,大坝弹性材料计算参数如表 2 所列,邓肯-张 $E-\mu$ 模型参数如表 3 所列,接触面模型参数如表 4 所列。

表2 大坝弹性材料计算参数

材料	天然密度 /g·cm ⁻³	凝聚力 /kPa	抗剪断强度 内摩擦系数	变形 模量/GPa	泊松比
面板	2.40	2 000	0.45	15.0	0.20
趾板	2.40	2 000	0.45	24.0	0.17
挤压边墙	2.40	1 000	0.45	5.0	0.20
固结灌浆	2.25	300	0.35	3.6	0.35
坝基(强风化)	2.25	300	0.35	3.0	0.35
坝基(弱风化)	2.45	550	0.50	5.5	0.23
坝基(微风化)	2.56	650	0.60	8.0	0.21

表3 野茶坝体材料参数($E-\mu$ 模型)

材料	干密度/t·m ⁻³	$\varphi_0/(^\circ)$	C /kPa	R_f	K	n	G	D	F
1A 上游铺盖区	1.42	31.0	0.0	0.72	350	0.43	0.38	2.7	0.15
1B 盖重区	2.08	38.3	0.0	0.75	695	0.29	0.42	7.0	0.08
2A 垫层区	2.23	35.3	24.0	0.80	1 070	0.30	0.36	3.6	0.11
2B 特殊垫层区	2.23	35.6	29.0	0.78	1 080	0.30	0.36	3.5	0.10
3A 过渡区	2.21	36.0	38.0	0.82	980	0.26	0.38	3.7	0.12
3B 主堆石区	2.19	36.7	42.0	0.80	1 050	0.25	0.37	3.9	0.11
面板缝、趾板缝	1.67	10.0	50.0	0.86	1 400	0.66	0.37	11.0	0.10
Q_{col+al}^4	2.09	42.6	85.0	0.70	752	0.29	0.40	6.5	0.08
Q_{col+dl}^4	1.42	31.0	0.0	0.72	350	0.43	0.46	0.05	0.58
Q_{el+dl}^4	1.42	31.0	0.0	0.72	350	0.43	0.46	0.05	0.58
灰岩:角砾岩=80%:20%	2.16	35.3	37.0	0.80	920	0.25	0.38	3.2	0.11
灰岩:角砾岩=60%:40%	2.17	34.7	33.0	0.81	910	0.27	0.38	3.3	0.11

表 4 材料的接触面模型参数

材 料	C'/kPa	$\varphi_d/(\text{°})$	R_f	K_1/kPa	n	K_n/kPa
面板与垫层	0	36.0	0.74	4 800	0.56	6×10^{-7}
面板与趾板	500	34.0	0.90	3 000	0.50	1×10^{-7}
趾板与地基	550	28.8	0.70	2 000	0.20	1×10^{-7}

2.3 工况设置

本研究设置 5 种主堆石区和次堆石区坝料组合情况, 开展各种分区组合下的不同工况的三维有限元应力应变分析, 计算工况如表 5 所列。

表 5 主次堆石区坝料组合及工况设置

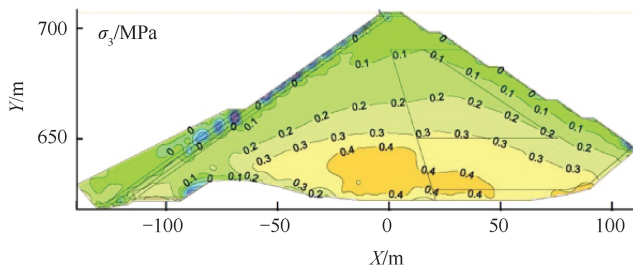
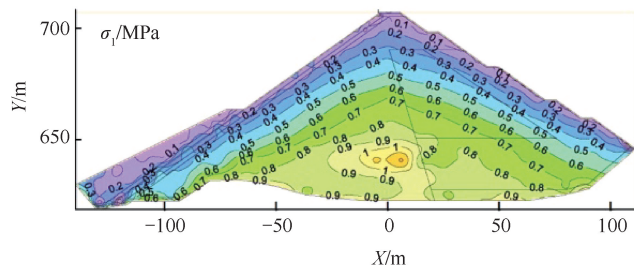
组 合	灰岩:角砾岩			工况设置	
	主堆石区(3B)	次堆石区(3C)	干燥区(3D)	工 况	计算情景
仅 3C、3D 区使用掺和料	100% : 0%	80% : 20%	60% : 40%	1	竣工期
3C 区掺和料增加 20%	100% : 0%	60% : 40%	60% : 40%	2	正常蓄水位
3B、3C 区掺和料增加 20%	80% : 20%	60% : 40%	60% : 40%	3	校核洪水位
组合 1 中 3C、3D 参数衰减 20%	100% : 0%	80% : 20%	60% : 40%	4	竣工期
组合 3 中 3B、3C、3D 参数衰减 20%	80% : 20%	60% : 40%	60% : 40%	5	正常蓄水位
				6	校核洪水位
				7	正常蓄水位
				8	正常蓄水位
				9	正常蓄水位

在本研究中, 认为组合 1 和 3 中灰岩和角砾岩岩性力学参数衰减 20% 后, 低于开挖弱风化砂页岩料的特性, 故对于干燥区(3D)采用枢纽区开挖料的情况不再进行单独分析。

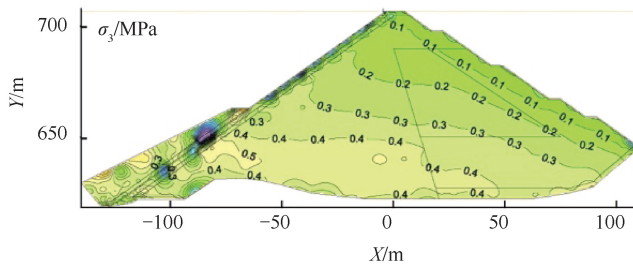
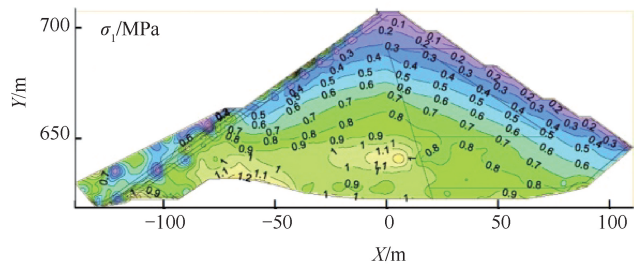
2.4 计算结果

2.4.1 坝体应力

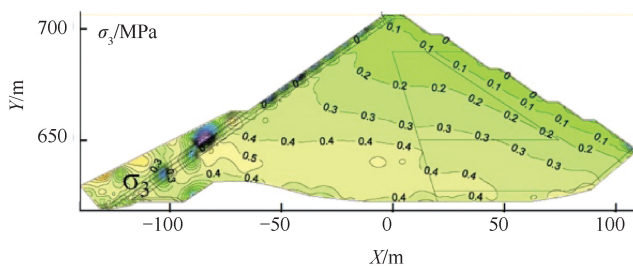
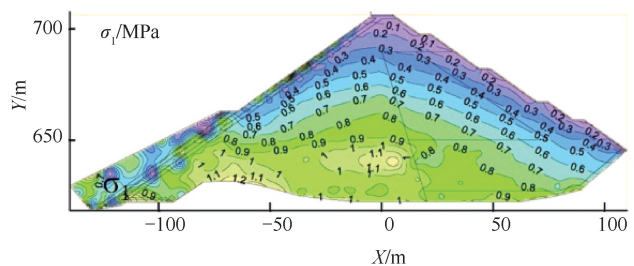
分区组合 1 时, 最大横剖面和坝体中心面的大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 (MPa) 如图 2 和图 3 所示, 选



(a) 工况1(竣工期)

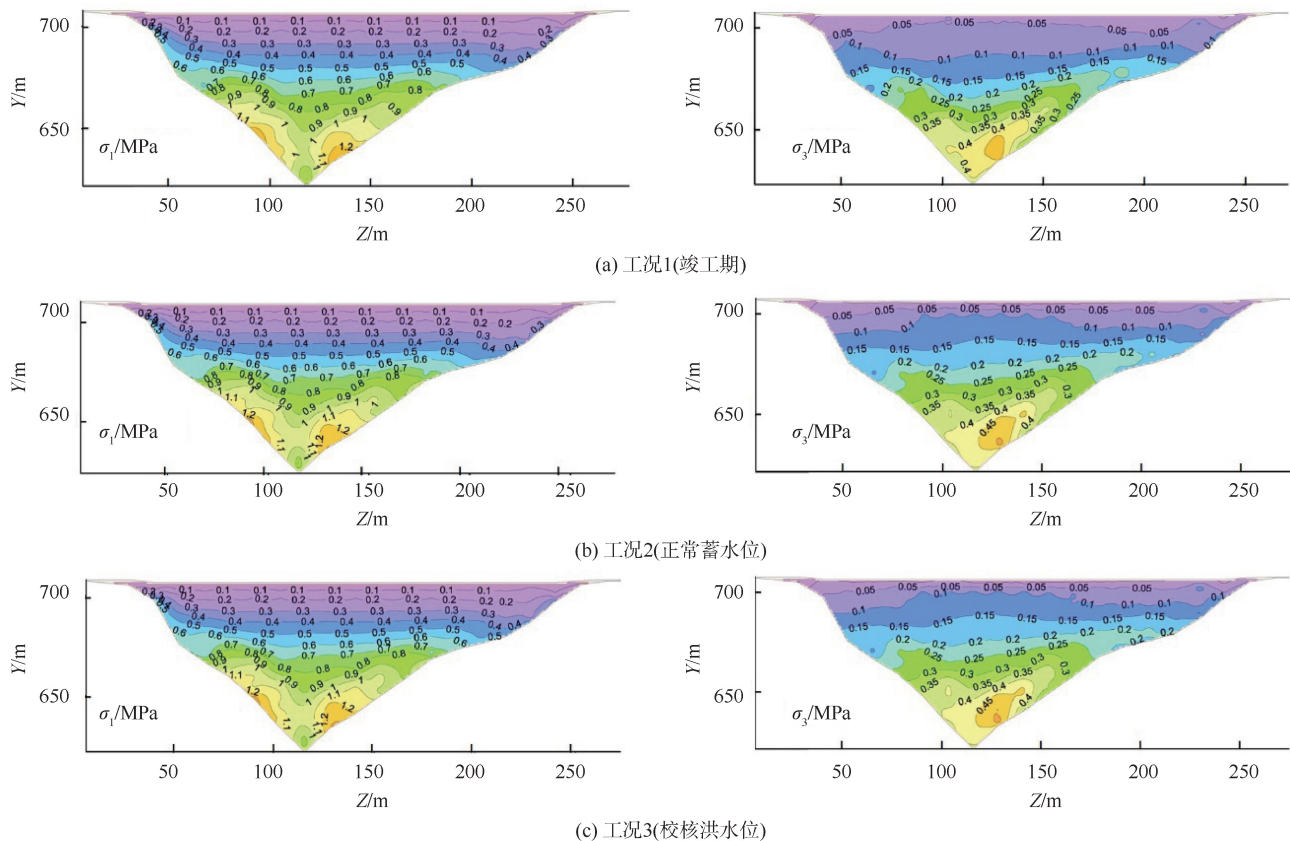


(b) 工况2(正常蓄水位)



(c) 工况3(校核洪水位)

图 2 分区组合 1 最大剖面 σ_1 和 σ_3 等值线图(单位: MPa)

图3 分区组合1坝体中心面 σ_1 和 σ_3 等值线图(单位:MPa)

取距坝轴线上/下游33 m、高程664.8 m处开展应力分布特征分析。对于大坝的最大横剖面,竣工期上游 $\sigma_1=0.524$ MPa、 $\sigma_3=0.169$ MPa,下游 $\sigma_1=0.565$ MPa、 $\sigma_3=0.218$ MPa。正常蓄水位和校核洪水水位情景下,上游 σ_1 较竣工期提升23%~25%(达0.643~0.654 MPa), σ_3 增幅75%~78%(达0.295~0.301 MPa);下游应力变化仅2%~6%。对于坝体中心面而言,3种工况的中上部高程 σ_1 分布平缓,同一高程河床坝段 σ_1 量值与左右岸坡坝段几乎一致, σ_3 随埋深递增且无拉应力区。表明水压的作用显著影响坝体上游侧应力,而对下游侧影响微弱。

正常蓄水位下各分区组合应力如图4所示,分区组合1时(工况2),上游 $\sigma_1=0.643$ MPa、 $\sigma_3=0.295$ MPa,下游 $\sigma_1=0.575$ MPa、 $\sigma_3=0.230$ MPa。分区组合2时(工况5),上游 $\sigma_1=0.643$ MPa、 $\sigma_3=0.294$ MPa,下游 $\sigma_1=0.576$ MPa、 $\sigma_3=0.230$ MPa,分别比工况2增加了0%、-0.1%、0.2%、0%。分区组合3时(工况7),上游 $\sigma_1=0.638$ MPa、 $\sigma_3=0.295$ MPa,下游 $\sigma_1=0.579$ MPa、 $\sigma_3=0.233$ MPa,分别比工况2增加了-0.8%、0%、0.7%、1.3%。

分区组合4时(工况8),上游 $\sigma_1=0.646$ MPa、 $\sigma_3=0.293$ MPa,下游 $\sigma_1=0.562$ MPa、 $\sigma_3=0.223$ MPa,分别比工况2增加了0.5%、-0.7%、-2.3%、-3.0%。分区组合5时(工况9),上游 $\sigma_1=0.629$ MPa、 $\sigma_3=0.277$ MPa,下游 $\sigma_1=0.581$ MPa、 $\sigma_3=0.235$ MPa,分别比工况2增加了-2.2%、-6.1%、1.0%、2.2%。可见,坝料参数的适度变化对坝体应力的影响较小,适当添加掺和料不会威胁坝体稳定性和安全性。

2.4.2 坝体位移

坝体最大横剖面中心线在各工况下位移、沉降随高程变化如图5所示。分区组合1时,正常蓄水位情景下(工况2)最大沉降量约-25.15 cm(占坝高的0.2794%),比竣工期(工况1)增大0.40 cm,可见在水推力作用下,坝体向下游变形增加。在正常蓄水位情景下,分区组合2时(工况5)最大沉降量较工况2增大0.23 cm,分区组合3时(工况7)最大沉降量比工况2增大1.99 cm,可见,主堆石区坝料参数下降时,坝体变形较大。组合4/5因参数衰减,最大沉降量显著增至-36.40 cm、-46.27 cm(较工况2分别增加11.25 cm、21.12 cm)。

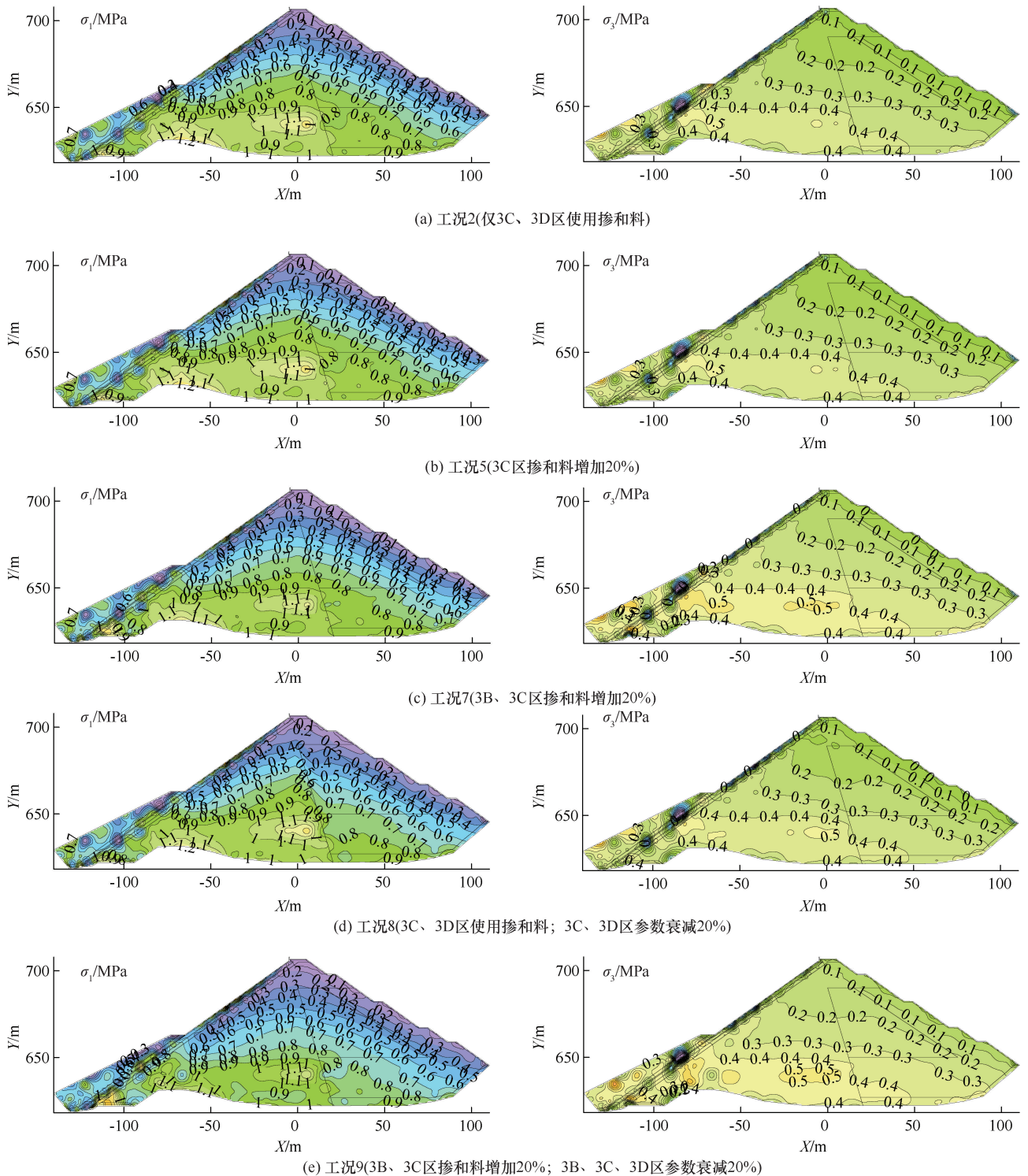


图4 正常蓄水位情景时最大剖面 σ_1 和 σ_3 等值线图(单位: MPa)

因此, 在野茶水库面板堆石坝在次堆石区及干燥区使用掺和料是可行的, 但应避免在主堆石区使用掺和料, 以确保水库运行时水平变位和垂直沉降分布均匀。

3 大坝分区定型

应力应变分析表明, 主堆石区对坝料参数变化较为敏感, 次堆石区对坝料参数变化敏感度较小, 故主堆石区采用灰岩料, 不掺和角砾岩, 下游次堆

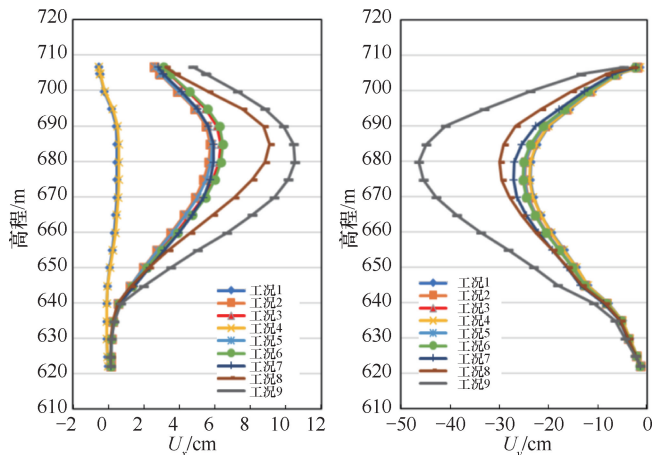


图5 最大剖面坝体中心线各工况下顺河向位移 U_x 、沉降 U_y 随高程变化

石料采用灰岩：角砾岩 $\geq 60\% : 40\%$ 。干燥区与次堆石区具有相同的规律，为节约投资减少开挖弃渣，该区采用开挖的弱风化砂页岩石渣填筑，开挖可利用料为 12.17万 m^3 (自然方)，干燥区底高程调整至 664.00m ，相应方量约 11万 m^3 (压实方)。坝体分区定型及材料参数如图 6 所示和表 6 所列，

筑坝料均应具有连续级配，填筑料级配如图 7 所示。

(1) 盖重区顶高程 663.00m ，顶宽 5m ，上游坡 $1:2$ ，采用开挖石渣料。

(2) 上游铺盖区顶高程 663.00m ，顶宽 3m ，上游坡 $1:1.406$ ，采用灰岩轧制粉细砂。

(3) 垫层区采用料场灰岩料，设计水平宽度 3m ，等宽布置，在垫层底部设置垫层小区，顶宽 1.5m ，高 2m ，采用灰岩料。

(4) 过渡区水平宽 3m ，等厚布置，采用灰岩料。

(5) 主堆石区位于坝体上游侧及下游河床 627.00m 高程以下，采用灰岩料。

(6) 下游次堆石区顶高程 690.00m ，底高程 627.00m ，次堆石区与主堆石区分界线倾向下游，坡比为 $1:0.3$ 。下游次堆石区采用混合比例为灰岩：角砾岩 $\geq 60\% : 40\%$ 的混合料。

(7) 干燥区利用弱风化砂页岩开挖料，该区域顶高程 690.00m ，底高程 664.00m 。

(8) 下游护坡范围为坝顶至坝脚排水棱体，护坡厚 0.50m ，采用干砌块石，块石石料采用灰岩料。

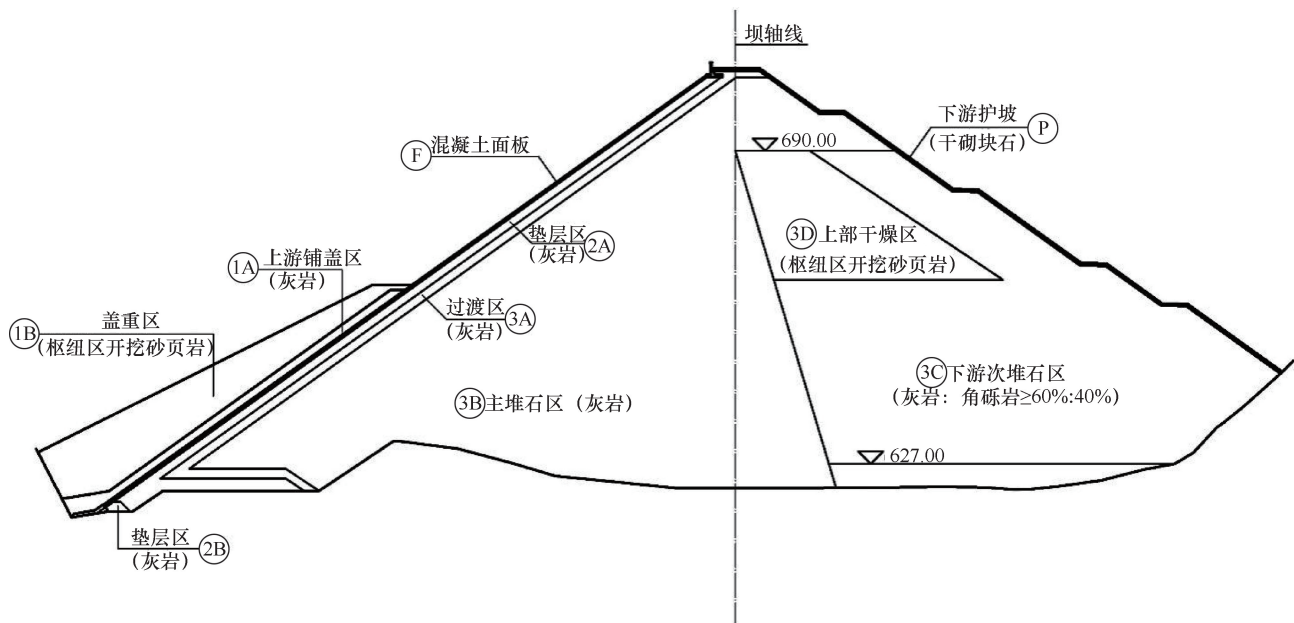


图6 分区定型示意

表6 筑坝料物理力学指标及填筑要求

坝体分区	材料类别	最大粒径/mm	设计干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙率/%	填筑层厚/mm
垫层区	灰岩	80	2.23	18.6	400
特殊垫层区	灰岩	40	2.23	18.6	200
过渡区	灰岩	300	2.21	20	400
主堆石区	灰岩	800	2.19	22	800
下游次堆石区	灰岩：角砾岩 $\geq 60\% : 40\%$	800	2.17	23	800
干燥区	弱风化开挖料	800	2.07	23	800

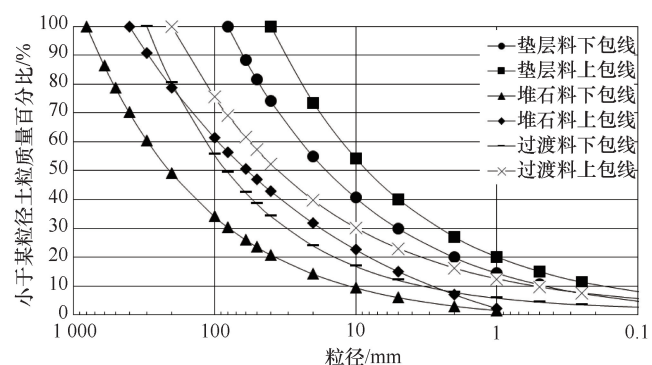


图7 坝体填筑材料级配曲线

4 结论

本文通过有限元应力应变计算, 研究了野茶水库不同坝料组合下的坝体应力应变变化, 确定主堆石区

采用灰岩料, 次堆石区采用灰岩: 角砾岩 $\geq 60\%$: 40%的混合料, 干燥区利用弱风化砂页岩开挖料。在该方案下, 坝体应力应变分布合理、变形协调, 优化料场剥采比并规避软岩夹层剔除难题, 为高面板坝掺用软岩提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 万云辉, 张超, 熊泽斌, 等. 缅甸道耶坎 II 级水电站混凝土面板堆石坝设计[J]. 水利水电快报, 2023, 44(12): 36-41.
- [2] 雷艳, 王康柱, 蔡新合. 积石峡水电站混凝土面板堆石坝坝体分区优化设计及坝料调整[J]. 西北水电, 2011(2): 19-23.
- [3] 赵文胜, 徐轶. 柬埔寨达岱水电站面板堆石坝变形分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 193-198.
- [4] 纪亮, 张建海, 何昌荣, 等. 双江口水电站心墙堆石坝应力应变数值分析[J]. 广西水利水电, 2008(4): 4-7.

(责任编辑 王 璐)