水　利　学　报

2022 年 12 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 53 卷　第 12 期

文章编号：0559-9350(2022)12-1397-13

狭窄河谷中混凝土面板坝的应力变形规律及工程措施研究

徐泽平[1,3]，陆　希[2]，翟迎春[2]，严祖文[1,3]，姬　阳[2]，徐　耀[1,3,4]

（1. 中国水利水电科学研究院，北京　100038；2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安　710065；
3. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京　100038；4. 北京中水科海利工程技术有限公司，北京　100038）

摘要：为深入了解河谷地形因素对混凝土面板堆石坝应力变形特性的影响，采用一个典型的混凝土面板堆石坝三维有限元模型进行了不同岸坡坡度与河床宽度等影响因子的分析研究，并在总结已有相关研究成果的基础上，结合工程实例，探讨了改善峡谷地区混凝土面板堆石坝应力变形特性的工程措施。研究成果表明：河谷地形对大坝的作用主要表现在岸坡对坝体和面板的约束及顶托作用，这种作用随大坝长高比的增加而减弱。对于修建于狭窄河谷中的面板坝，其堆石体位移梯度和面板的压应力数值相对较大。工程上可采取提高堆石体压实密度，设置岸坡增模堆石区，以及合理确定面板浇筑时机和设置可吸收变形的面板纵缝填充材料等措施，以控制坝体变形并改善面板的应力状态。

关键词：混凝土面板堆石坝；河谷性状；应力变形；狭窄河谷

中图分类号：TV641.4　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20220778

1　研究背景

作为一种以堆石材料为主的土石坝坝型，混凝土面板堆石坝通常对坝址的地形条件具有较好的适应性。国内外工程实践表明，在狭窄河谷和宽阔河谷上均有修建混凝土面板堆石坝的成功案例[1]。哥伦比亚的安其卡亚(Alto Anchicaya)面板堆石坝，坝高 140 m，坝顶长 280 m，坝顶长与坝高的比值为 2.0。巴西的阿里亚(Foz do Areia)面板堆石坝，坝高 160 m，坝顶长 828 m，坝顶长与坝高的比值为 5.18。我国的天生桥一级面板堆石坝，坝高 178 m，坝顶长 1137 m，长高比 6.39。猴子岩面板堆石坝，坝高 223.5 m，坝顶长 278.35 m，长高比 1.25。安其卡亚大坝和猴子岩大坝的坝顶长与坝高的比值分别为 2.0 和 1.25，是典型的峡谷地形中的面板坝，而天生桥一级和阿里亚坝的坝顶长与坝高的比值分别为 6.39 和 5.18，是典型的宽河谷中的面板坝。

尽管混凝土面板堆石坝对坝址地形条件的适应有着较大的宽容性，但是，不同的地形条件对于混凝土面板坝坝体和面板的应力和变形仍会产生一定程度的影响。河谷的宽窄、岸坡的陡缓、两岸坡的对称性等均可直接影响坝体和面板的应力变形分布，以及面板周边缝的位移。近些年来，随着水电建设事业的发展，我国在复杂地形条件下的混凝土面板坝建设取得了长足的进展，相继建成了江坪河、猴子岩等狭窄河谷中的高混凝土面板堆石坝，同时，还有一批位于狭窄河谷中的混凝土面板堆石坝工程在建或待建。表 1 所列为部分已建和在建的狭窄河谷中的混凝土面板坝工程。

不同河谷地形条件下混凝土面板坝的应力变形特性主要通过数值分析或模型试验的方法进行研究。杨杰等[2]等结合青海茨哈峡混凝土面板坝研究了复杂地形条件下超高混凝土面板堆石坝的应力变形特性。徐泽平等[3]结合洪家渡混凝土面板堆石坝研究了狭窄河谷中高混凝土面板坝的应力变形特

收稿日期：2022-09-26；网络首发日期：2022-12-19

网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20221216.0929.002.html

基金项目：西藏自治区科技计划项目(XZ202101ZY0002G)；中国水科院基本科研业务费专项(SM0145B022021)

作者简介：徐泽平(1963-)，博士，正高级工程师，主要从事土石坝及岩土工程研究。E-mail：xuzp@iwhr.com

性。程嵩等[4]结合马来西亚巴贡混凝土面板坝研究了河谷性状对面板堆石坝应力位移的影响。朱晟等[5]，以及王国辉等[6-7]结合江坪河混凝土面板坝研究了河谷性状对 200 m 级高混凝土面板坝变形和应力的影响。朱永国等[8-9]结合猴子岩混凝土面板堆石坝工程研究了狭窄河谷中高混凝土面板坝的应力变形特性及变形控制措施。杨星等[10]结合猴子岩混凝土面板坝工程，分析了狭窄河谷中高混凝土面板坝的变形特性。卢羽平等[11]分析了建于狭窄河谷中的卡基娃混凝土面板坝的运行性状。王君利[12]结合羊曲混凝土面板坝工程，分析了特窄河谷中高混凝土面板坝的变形和防渗控制措施。王恩辉[13]介绍了新疆地区狭窄河谷中堆石坝工程的建设案例和工程经验。上述研究工作结合具体的工程实践，分别从不同的角度分析了狭窄河谷中混凝土面板坝的变形特性，研究成果表明，对于狭窄河谷中的混凝土面板坝，岸坡对坝体具有显著的约束作用，由于这种约束作用，狭窄河谷中的混凝土面板坝总体变形量相对较小，但岸坡变形梯度较大。坝体大主应力明显小于堆石体自重应力，坝体应力存在明显的应力拱效应。宋文晶等[14]针对狭窄河谷中的面板坝，提出了考虑堆石体与坝肩岸坡之间摩擦接触的分析模型，并研究了河谷性状对面板坝防渗体系安全性的影响。研究指出狭窄河谷中面板坝的堆石体将沿岸坡发生滑移，从而导致面板或止水的破坏。侯冰铃等[15]对比了考虑堆石体与岸坡分别采取固定约束和摩擦接触方式计算时，狭窄河谷中混凝土面板坝应力变形特征，计算结果表明，考虑摩擦接触后，堆石能够沿着岸坡滑动，岸坡对坝体堆石的拱效应减小。欧波等[16]采用数值分析方法对狭窄河谷中的平寨混凝土面板坝进行了考虑堆石流变的计算分析。邓刚等[17]等结合九甸峡混凝土面板坝，研究了狭窄河谷中高面板堆石坝的长期变形问题。研究成果表明，狭窄河谷高面板堆石坝考虑流变特性后，坝体后期变形明显增大，变形持续时间也有所增加。上述的研究工作分别从不同的角度分析、研究了河谷地形对混凝土面板坝应力变形特性的影响，但总体而言，这些研究都是针对狭窄河谷中某一具体工程的分析，其研究成果部分揭示了狭窄河谷岸坡对混凝土面板坝应力变形的影响规律。但是，对于河谷地形与混凝土面板坝应力变形作用的一般规律尚有待通过从宽河谷到窄河谷的变化，以及岸坡和河床宽度的变化进行深入的研究。

表 1　中国已建和在建的狭窄河谷中混凝土面板堆石坝工程

坝名	坝高/m	堆石料母岩岩性	坝顶长/坝高	建成时间
西北口	95.0	灰岩	2.34	1989
洪家渡	179.5	砾岩	2.38	2004
龙首二级	146.5	辉绿岩	1.30	2004
三板溪	185.5	砂岩	2.30	2007
九甸峡	133.0	灰岩	1.74	2008
猴子岩	223.5	灰岩、流纹岩	1.25	2017
江坪河	219.0	冰碛砾岩	1.89	2020
玛尔挡	211.0	二长岩、砂岩	1.60	在建
羊曲	150.0	灰岩	2.36	在建

采用理想化的典型模型研究混凝土面板坝的应力变形特性可以消除具体工程特定因素对分析结果的影响，从而更有利于对一般规律的分析研究[18]。党发宁等[19]以金川混凝土面板坝为依据，构建了一个简化的面板坝分析模型，通过河谷宽度系数、河谷边坡陡缓系数、河谷非对称系数研究了河谷形状对面板坝应力变形的影响。研究表明，河谷地形对坝体的约束作用减小了面板的挠度，而堆石体内部存在的应力拱效应则增大了坝体的后期沉降量。杨超等[20]等通过一个典型的面板坝分析模型，重点研究了狭窄河谷面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成机理及影响范围。为进一步研究河谷地形对混凝土面板坝应力变形特性的影响，本文将通过构建一个典型混凝土面板坝三维模型的方式，采用数值计算方法，分析从宽河谷到窄河谷混凝土面板坝应力变形特性的变化规律，并研究岸坡坡度、河谷宽度等因素对坝体和面板应力变形的影响规律，同时，结合实际工程，探索改善狭窄河谷中高混凝土面

板堆石坝应力变形状态的工程措施，为大坝的设计、施工提供指导。

2　河谷形状影响的分析模型

通常，对于混凝土面板堆石坝而言，较为有利的河谷形状应该是平整、对称的河谷，岸坡坡度平缓，同时，两侧坝肩能够为坝体提供坚固的支撑作用。反之，坝肩陡峭、河谷不对称、岸坡基岩表面不规则、河床深切等地形将对坝体和面板的应力变形产生不利的影响。

2.1　河谷形状参数　目前，对于如何采用一个单一的参数对河谷性状进行定义尚未有统一的规定。实际工程中，常规的做法是将大坝的建基面统一到同一高程，以坝轴线位置的纵断面进行比较。在混凝土面板堆石坝工程中，主要采用两种方式表示河谷形状：一种是以大坝的长高比(坝顶长/最大坝高)；另一种是以河谷形状系数(A/H^2，其中，A 为面板面积，H 为坝高)。

2.2　典型分析模型　为了系统地研究地形条件对面板堆石坝应力变形的影响，本文建立了一个理想化的混凝土面板堆石坝三维有限元模型，通过改变河谷宽度、岸坡坡比等地形条件，采用数值计算方法分析地形参数的变化对坝体和面板应力、变形的影响。

计算分析模型的基本特征参数为：

- 坝高：120 m；上游蓄水位：110 m。
- 坝体分区：面板、垫层区(2 m 等宽)、过渡区(3 m 等宽)、主堆石区、次堆石区。
- 面板宽度：上下等宽 12 m；面板厚度：上下等厚 50 cm。
- 岸坡：均一坡度；建基面：水平(高程：0.0 m)。

计算模型的最大横断面如图 1 所示，图 2 为该计算模型的三维网格图。计算中按 12 m 的层厚模拟坝体的分级填筑过程，混凝土面板按一层进行单元划分。

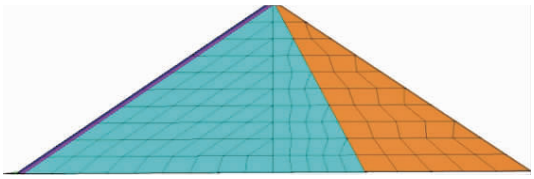


图 1　计算模型的最大横断面

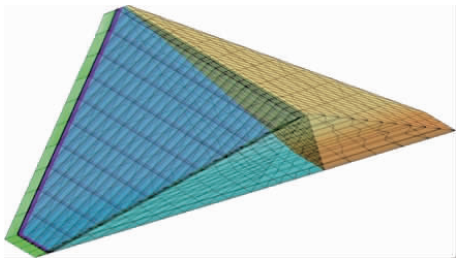


图 2　计算模型的三维网格图

计算分析中，筑坝堆石料采用邓肯 E-B 非线性弹性模型[21]，混凝土面板采用线弹性模型，堆石料的材料模型参数如表 2 所示，混凝土弹模取为 2.2×10^4 MPa，泊松比为 0.2。混凝土面板与堆石材料的接触采用薄层单元模拟，混凝土面板之间的纵缝采用无厚度接触面单元模拟，面板与趾板间的周边缝采用软单元模拟[22-24]。

表 2　材料的邓肯 E-B 模型参数

材料名称	γ/(kN/m^3)	K	K_{ur}	n	R_f	K_b	m	φ/(°)	$\Delta\varphi$/(°)
垫层	22.1	1100	2250	0.40	0.87	680	0.21	52.0	10.0
过渡	21.9	1050	2150	0.43	0.87	620	0.24	53.0	9.0
主堆石	21.8	1000	2050	0.47	0.87	600	0.40	53.0	9.0
次堆石	21.2	850	1750	0.36	0.75	580	0.30	52.0	10.0

2.3　计算方案　为比较河谷宽度、岸坡坡度等地形条件对坝体和面板应力、变形特性的影响，计算方案分为两组：其中，第一组为固定河床宽度，通过改变岸坡坡度以分析岸坡坡度的影响。第二组为固定岸坡坡度，通过改变河床宽度以比较河床宽度的影响。两组计算可以综合反映河谷形状对大坝应力

变形的作用。

(1)考虑岸坡坡度影响的计算方案(如图 3 所示)

方案 1-1：河床宽度 48.0 m，岸坡坡度 1∶0.5(大坝长高比为 1.4)。

方案 1-2：河床宽度 48.0 m，岸坡坡度 1∶1.0(大坝长高比为 2.4)。

方案 1-3：河床宽度 48.0 m，岸坡坡度 1∶1.5(大坝长高比为 3.4)。

方案 1-4：河床宽度 48.0 m，岸坡坡度 1∶2.0(大坝长高比为 4.4)。

方案 1-5：河床宽度 48.0 m，岸坡坡度 1∶3.0(大坝长高比为 6.4)。

(2)考虑河床宽度影响的计算方案(如图 4 所示)

方案 2-1：岸坡坡度 1∶1.0，河床宽度 48.0 m(大坝长高比为 2.4)。

方案 2-2：岸坡坡度 1∶1.0，河床宽度 96.0 m(大坝长高比为 2.8)。

方案 2-3：岸坡坡度 1∶1.0，河床宽度 192.0 m(大坝长高比为 3.6)。

方案 2-4：岸坡坡度 1∶1.0，河床宽度 288.0 m(大坝长高比为 4.4)。

方案 2-5：岸坡坡度 1∶1.0，河床宽度 384.0 m(大坝长高比为 5.2)。

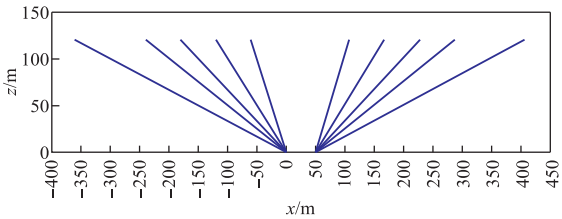


图 3　不同岸坡坡度的计算方案

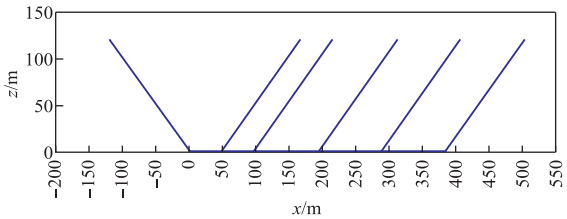
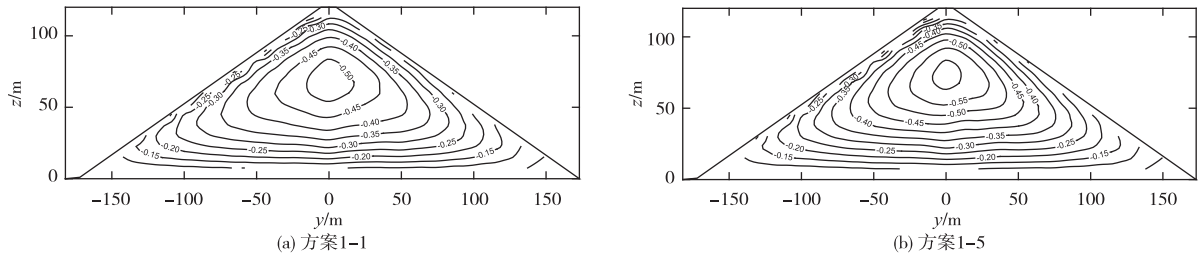


图 4　不同河谷宽度的计算方案

3　河谷地形因素的计算分析

3.1　考虑岸坡坡度影响的计算结果　不同岸坡坡度情况下，蓄水期坝体横断面的沉降如图 5 所示。为节省篇幅，以下的坝体位移分布和面板应力分布均仅给出了岸坡坡度最陡和最缓的两种极端情况。



(a) 方案1-1　　(b) 方案1-5

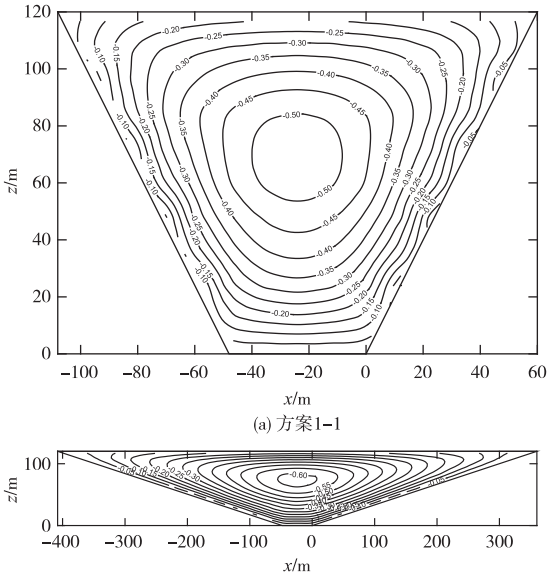
图 5　蓄水期坝体横断面沉降分布(不同岸坡坡度)(单位：m)

在不同岸坡坡度情况下，坝体最大横断面的沉降分布呈现出基本相同的分布规律，坝体最大沉降位于横断面坝轴线位置的坝体中上部，沉降分布对称于坝轴线。但从沉降量的数值看，陡峭岸坡情况下坝体的沉降量较小，而平缓岸坡情况下坝体的沉降量较大。

从图 6 坝轴线处纵断面的沉降分布看，坝体沿坝轴线处纵断面的沉降分布对称于河谷中心线，最大沉降位于坝体中上部。当河谷岸坡坡度较陡时，近岸坡处坝体的沉降在岸坡的约束作用下呈波动的分布，从岸坡至河谷中心，沉降变化的梯度较大。当岸坡坡度逐渐趋缓时，岸坡处的坝体沉降分布渐趋平顺。从数值上看，坝体沉降随河谷岸坡坡度由陡变缓而逐渐增大。各计算方案坝体近岸坡处的沉降沿坝轴线方向的变化梯度随岸坡坡度的变缓而逐渐减小。

从坝轴线处纵断面的水平位移分布(图 7)看，纵断面上的水平位移呈对称于河谷中心线的形式分布，两岸坡坝体的水平位移均指向河谷中央(左岸坝体水平位移指向右岸，右岸坝体水平位移指向左岸)，水平位移的最大值靠近岸坡处。但是，值得注意的是，当岸坡坡度陡峭时，河床段底部坝体的

水平位移方向呈与上部坝体相反的分布趋势(左岸坝体水平位移指向左岸，右岸坝体水平位移指向右岸)。这一特殊的位移现象在以往的研究中尚未涉及。从图 7(a)的坝体水平位移分布趋势分析，造成这一现象的原因，主要是坝轴线两侧的堆石由于受陡峭岸坡地形的影响形成了向河谷底部集中的位移趋势，而由于河谷较窄，加之底部岸坡的约束，因此，在较窄的河谷底部堆石体承受了来自对面一侧岸坡堆石体的强烈挤压作用，故而产生了与对其相对的岸坡堆石体挤压方向相同的位移。随着岸坡坡度的变缓，岸坡堆石体趋向河谷底部的位移趋势减弱，这一现象也随之消失。

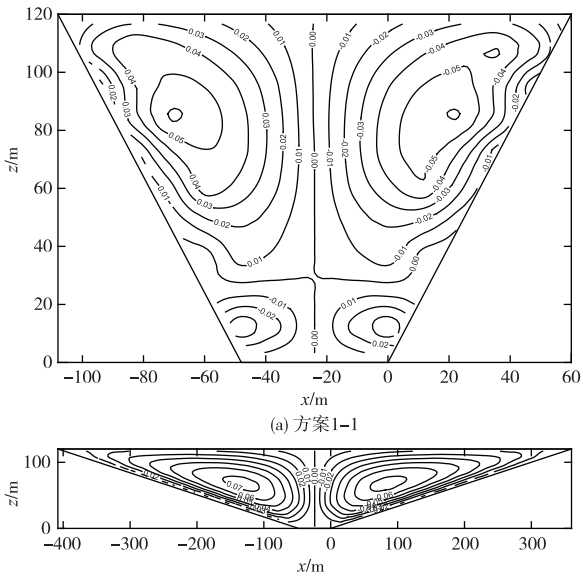


(a) 方案1-1

(b) 方案1-5

图 6　蓄水期坝体纵断面沉降分布(不同岸坡坡度)

(单位：m)



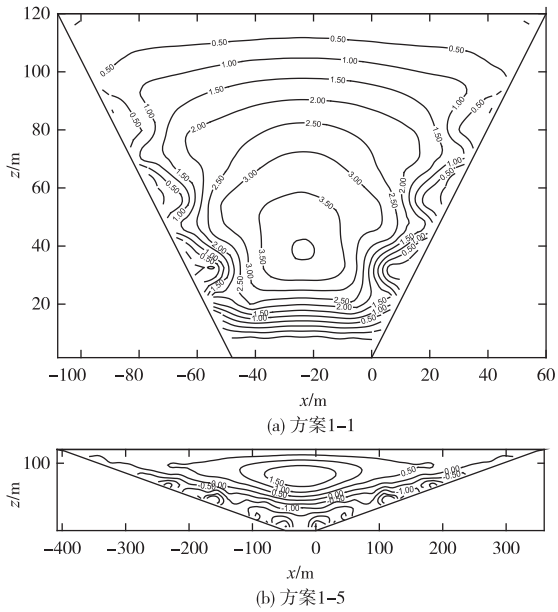
(a) 方案1-1

(b)方案1-5

图 7　蓄水期坝体纵断面沿坝轴线方向水平位移分布

(不同岸坡坡度)(单位：m)

蓄水期面板沿上游坝坡方向和沿坝轴线方向的应力分布是评价面板应力状况的重要指标。由图 8—9 可以看出，蓄水期河床段面板的中上部处于双向受压状态(顺坡向、坝轴向)，局部区域受拉。在顺坝坡方向，面板底部和两岸坡部位承受拉应力，其余部位受压，在沿坝轴线方向，岸坡处面板承受拉应力，其余大部分区域受压。

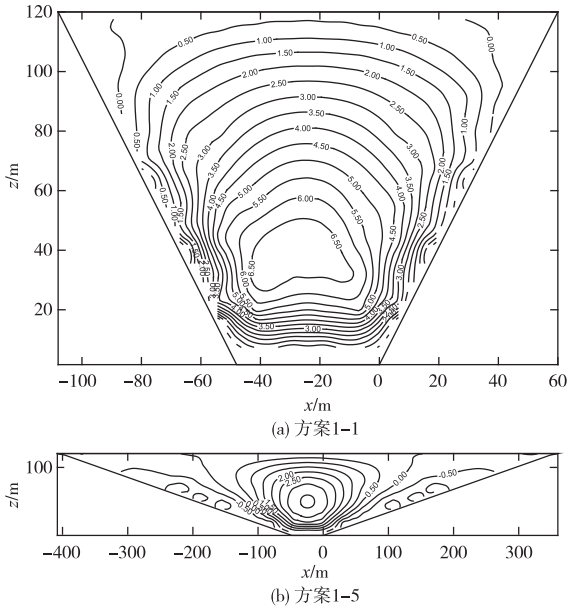


(a) 方案1-1

(b) 方案1-5

图 8　蓄水期面板顺坡向应力分布(不同岸坡坡度)

(单位：MPa)



(a) 方案1-1

(b) 方案1-5

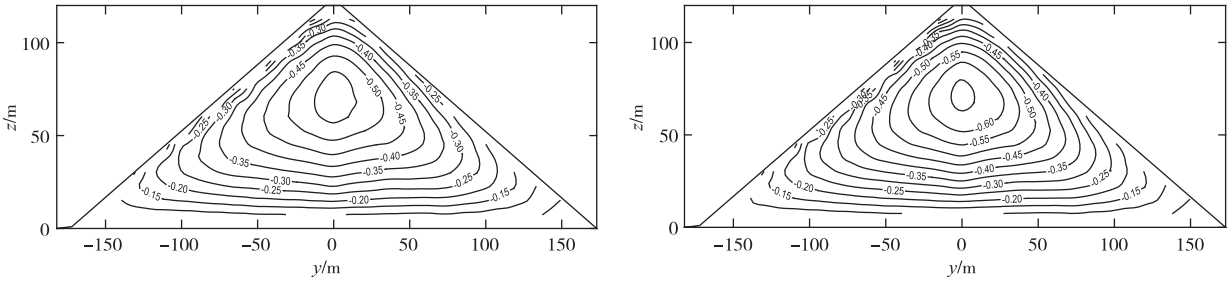
图 9　蓄水期面板沿坝轴线方向应力分布

(不同岸坡坡度)(单位：MPa)

在不同岸坡坡度情况下，面板底部沿坝坡方向均承受拉应力，当岸坡坡度较陡时，岸坡处面板的拉应力区范围相对较小，随岸坡坡度变缓，面板底部和两岸坝肩处面板顺坡向拉应力区范围扩大。但从数值上看，当岸坡坡度较陡时，面板所承受的压应力数值较大，随岸坡坡度变缓，面板的压应力数值减小。

不同岸坡坡度情况下，面板在两岸坝肩处沿坝轴线方向均承受拉应力。当岸坡坡度较陡时，拉应力区主要集中在坝肩上部，当岸坡坡度逐渐变缓，拉应力区范围沿岸坡向面板底部和河谷中心方向扩展。从应力数值上看，陡岸坡时，面板所承受的压应力数值较大，随岸坡坡度变缓，面板的压应力数值减小。

3.2　考虑河谷宽度影响的计算结果　不同河谷宽度情况下，蓄水期坝体横断面的沉降如图 10 所示。为节省篇幅，以下的坝体位移分布和面板应力分布均仅给出了河谷宽度最窄和最宽的两种极端情况。

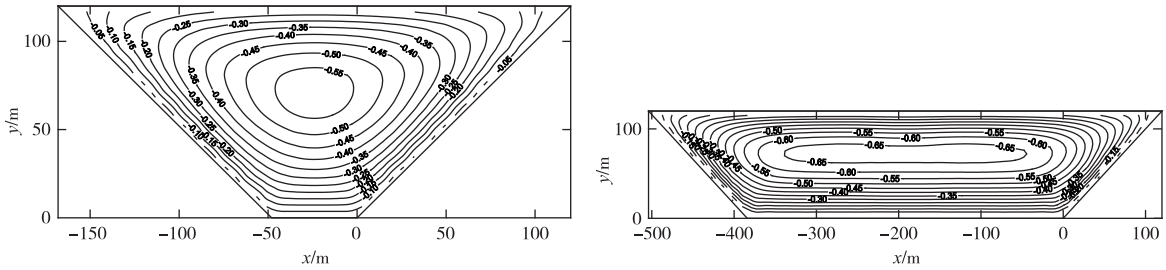


(a) 方案2-1　　(b) 方案2-5

图 10　蓄水期坝体横断面沉降分布(不同河谷宽度)(单位：m)

从坝体最大横断面的沉降分布规律看，第二组计算(考虑河谷宽度变化)与第一组计算(考虑岸坡坡度变化)的坝体沉降分布规律无显著变化。不同河谷宽度情况下坝体的沉降分布规律也基本相似。但是，随着河谷宽度的增加，坝体位移的数值也随之增大。对比第二组计算与第一组计算的结果，也可以看出，当河谷宽度增大时，第二组计算的坝体沉降数值要大于第一组计算的数值。

从沿坝轴向位置的纵断面坝体沉降分布(图 11)看，随着河谷宽度的增加，岸坡地形对于河床段坝体沉降的影响逐渐减小，当河谷宽度较宽时，河床段坝体沉降呈现出完全一致的分布，其数值也基本相同，岸坡段坝体变形的影响仅局限于近岸坡处的堆石体。

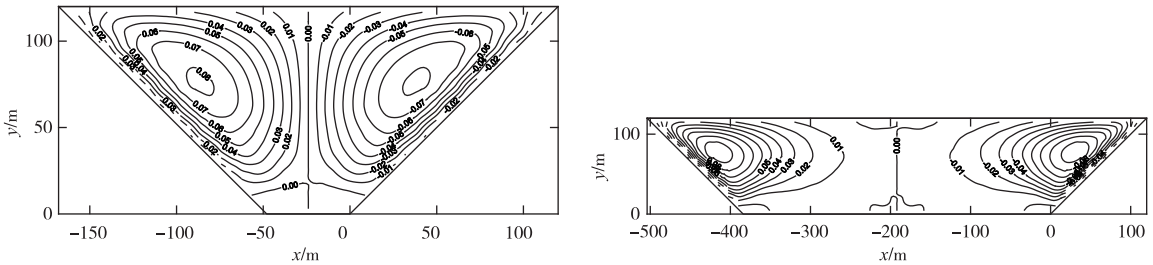


(a) 方案2-1　　(b) 方案2-5

图 11　蓄水期坝体纵断面沉降分布(不同河谷宽度)(单位：m)

坝体纵断面沿坝轴线方向水平位移分布(图 12)呈从两岸指向河谷中心的分布规律，这一变形的趋势主要由岸坡地形的影响所致。随着河谷宽度的增加，岸坡地形对于河床段坝体变形的影响逐渐减弱。当河谷宽度较大时，坝体水平位移主要集中于岸坡段，河床中心附近坝体的水平位移基本上接近于零。

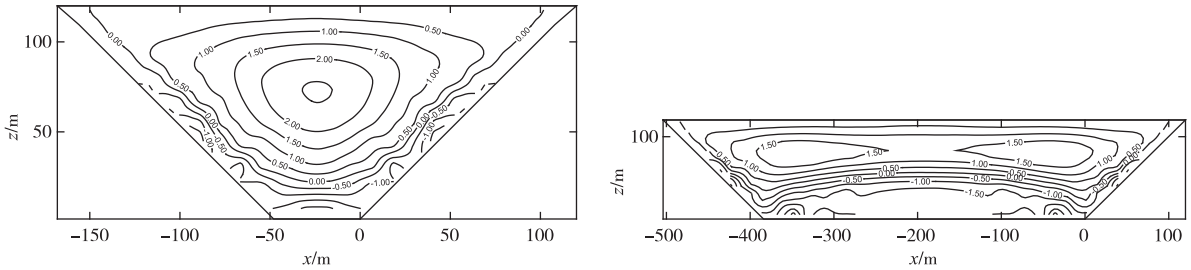
蓄水期面板顺坡向的应力分布(图 13)趋势为：在面板底部和沿岸坡位置处，面板主要承受拉应力，而在面板的其余位置，则主要承受压应力。当河谷宽度增大，面板底部拉应力区范围向上扩展，河谷中心部位面板的压应力数值相对于岸坡处有所减小，面板压应力最大值的区域趋向于岸坡。从应力数值上看，河谷宽度较窄时，面板的压应力相对较大，当河谷宽度增大时，面板压应力数值减小。



(a) 方案2-1　　(b) 方案2-5

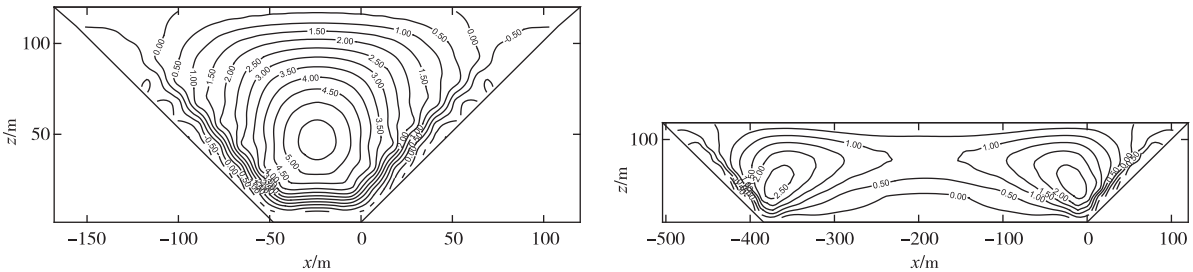
图 12　蓄水期坝体纵断面沿坝轴线方向水平位移分布(不同河谷宽度)(单位：m)

蓄水期面板沿坝轴线方向的应力分布(图 14)趋势为：在两岸坝肩处，面板主要承受拉应力，而在面板的其余位置，则主要承受压应力。对比各种河谷宽度情况下的计算结果，可以看出，随着河谷宽度的增大，两岸坝肩处面板拉应力区的范围没有明显的变化，但面板压应力最大值的区域逐渐趋向岸坡处。从应力数值上看，河谷宽度较窄时，面板应力相对较大，当河谷宽度增大时，面板应力数值减小。



(a) 方案2-1　　(b) 方案2-5

图 13　蓄水期面板顺坡向应力分布(不同河床宽度)(单位：MPa)



(a) 方案2-1　　(b) 方案2-5

图 14　蓄水期面板沿坝轴线方向应力分布(不同河床宽度)(单位：MPa)

3.3　岸坡坡度及河谷宽度影响的计算结果对比　为分析不同地形条件下河谷形状对混凝土面板坝应力变形特性的影响规律，对于不同岸坡坡度和不同河谷宽度采用大坝长高比作为河谷的形状参数，给出了各种不同工况下坝体位移和面板应力的变化趋势。

从图 15 和图 16 可以看出，随着岸坡坡度逐渐趋缓、或河谷宽度逐渐增加，岸坡对坝体的约束作用渐趋减弱，坝体位移增大。大坝长高比相对较小时，这种位移增大的趋势相对较为明显，如图 15 所示，当长高比从 1.4 变化至 2.4 时，最大沉降的增量为 5 cm。而大坝长高比增至一定程度，其变化趋势逐渐平缓，当长高比从 4.4 增至 6.4 时，最大沉降仅增加了 0.6 cm。显示出岸坡地形对坝体变形影响的弱化。对比岸坡坡度变化与河谷宽度变化的结果，可以发现，在同样长高比的情况下，宽河谷情况下的坝体位移数值大于缓岸坡情况下的坝体位移数值。

蓄水期面板在不同岸坡坡度和不同河谷宽度情况下的最大法向位移(挠度)变化分别如图 17 和图 18 所示。从图中可以看出，面板的法向位移随着大坝长高比的增加而增大，而且，当长高比增至一定程度后(大致为 3.5~4.0)，面板挠度的变化也是逐渐减缓，直至基本不变。

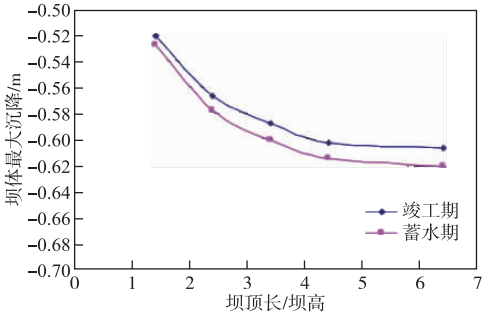


图 15　不同岸坡坡度情况下坝体的最大沉降

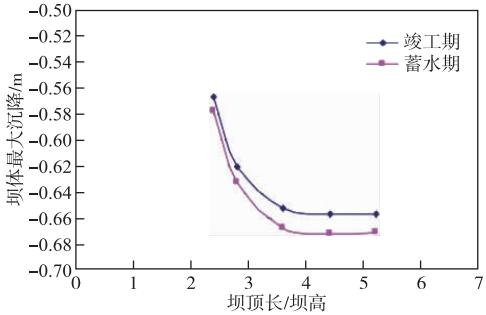


图 16　不同河谷宽度情况下坝体的最大沉降

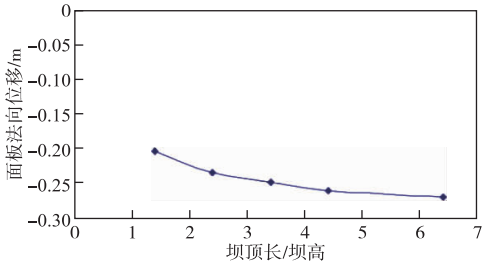


图 17　不同岸坡坡度情况下面板的法向位移

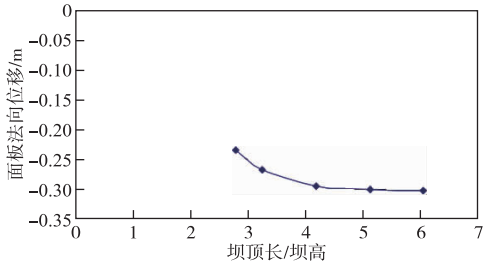


图 18　不同河谷宽度情况下面板的法向位移

蓄水期面板在不同岸坡坡度和不同河谷宽度情况下的应力变化如图 19—22 所示。

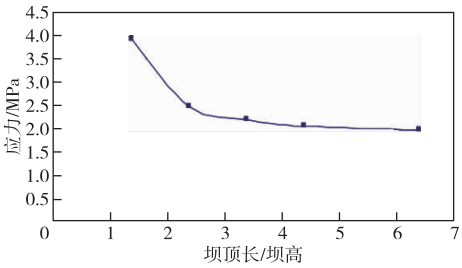


图 19　不同岸坡坡度情况下面板顺坡向应力

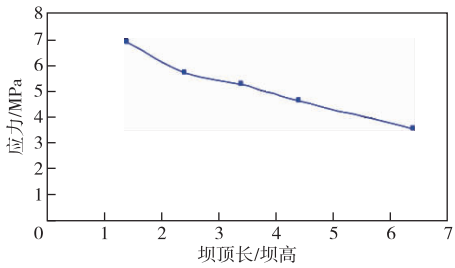


图 20　不同岸坡坡度情况下面板坝轴向应力

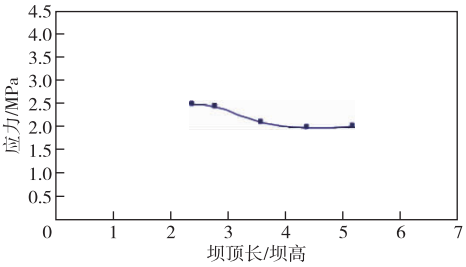


图 21　不同河谷宽度情况下面板顺坡向应力

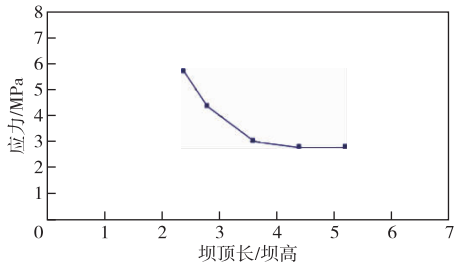


图 22　不同河谷宽度情况下面板坝轴向应力

从面板的应力变化趋势看，面板的应力基本上随坝体长高比的增大而减小。对于河谷宽度固定、岸坡坡度变化的情况，面板顺坡向的应力的变化在长高比大于 4 时基本趋于稳定，而面板沿坝轴向的应力变化则基本上一直随长高比的变化而变。对于岸坡坡度固定、河谷宽度变化的情况，面板沿坝坡向应力和沿坝轴向的应力均在长高比大于 3.5 时趋于稳定，这一规律与面板挠度的变化趋势基本一致。从应力的数值看，当河谷宽度不宽，岸坡坡度较陡时，面板的应力数值相对较大。

4　河谷地形因素的影响性分析

根据典型面板坝三维模型数值计算分析的结果，可以看出河谷的宽窄和岸坡的坡度对于混凝土面

板坝的应力变形特性有着一定程度的影响。这种影响主要表现在岸坡对于堆石变形的约束作用和因岸坡基岩对坝体顶托所产生的拱作用。岸坡对于堆石体的约束作用，使得狭窄河谷中面板坝的总体位移量值相较于宽河谷中的面板坝位移较小。而基岩对坝体的拱作用将导致堆石体竖向应力的减小。

综合计算分析结果看，河谷岸坡对坝体位移的约束作用随面板坝长高比的增加而减弱，当大坝长高比大于 4.0 时，岸坡对坝体位移的约束作用基本可以忽略。

岸坡坡度的变化对岸坡局部坝体的位移分布有较大的影响，陡岸坡情况下岸坡处坝体的变形梯度明显大于平缓岸坡情况下坝体的变形梯度。在同样岸坡坡度情况下，河床宽度较窄时，岸坡位移梯度变化较大的部位靠近坝体底部，对河床部位的坝体位移存在一定的影响。当河床宽度较宽时，岸坡位移梯度变化较大处位于坝坡中上部，岸坡部位的位移对河床段坝体的位移影响不大。

陡峭的岸坡会引起近岸坡部位堆石体沿岸坡方向形成滑动位移的趋势。当河床相对宽阔时，这种位移趋势仅局限于岸坡部位的堆石体，对坝体的整体变形影响不大。但当河床宽度较小时，陡峭的岸坡和较窄的河床宽度所形成的狭窄河谷将导致堆石体产生较为显著的趋向河谷中心的位移。这种位移趋势将因堆石体的拖曳作用，使得面板顺坡向应力增大。同样，由于狭窄河谷中坝体堆石自岸坡向河谷中心的位移趋势相对较大(趋向河谷中心、坝体底部)，由此也会导致面板沿坝轴向应力的增大。

位于狭窄河谷中的面板堆石坝，岸坡段堆石体与河床段堆石体会出现较大的不均匀位移。由于变形梯度较大，岸坡部位堆石体和面板将承受较大的剪应力，当剪应力过大时，会造成近岸坡部位混凝土面板出现平行于岸坡的斜向裂缝。

对于狭窄河谷中的面板坝，河谷底部的堆石是各种不利变形的主要汇集之处和承接体，这一部分堆石体的变形模量，对于狭窄河谷中面板坝的变形，以及混凝土面板的应力状态都会产生直接的影响。

5 改善狭窄河谷面板坝应力变形特性的工程措施

根据上述河谷地形因素对混凝土面板坝应力变形特性的影响分析，对于长高比大于 4.0 的宽河谷中的混凝土面板坝，河谷岸坡的作用不显著，大坝的变形控制按通常的做法即可。对于狭窄河谷中的面板坝(长高比小于 4.0 或 3.5)，则需要根据其受力和变形特点，采取针对性的坝体变形控制措施和面板应力改善措施[25-27]。

混凝土面板堆石坝因其结构上的特点，保障大坝结构安全的关键在于坝体堆石的变形控制，而堆石体的变形则主要取决于堆石的压实密度或变形模量。因此，改善狭窄河谷中混凝土面板坝应力变形状态的主要措施应该是通过合理选择母岩强度适中的中硬岩筑坝堆石料、提高堆石体的压实密度和压缩模量，以减小坝体堆石的位移量值，同时，还可以在岸坡附近设置高模量的堆石增模区，以降低自岸坡至河谷的堆石变形梯度。为改善面板的应力状态，避免面板裂缝和挤压破坏，应按照预沉降时间和上游坝坡沉降量值控制的原则确定混凝土面板的浇筑时间，岸坡段的面板施工工序可适当排后。同时，还可在河床段面板纵缝设置具有一定抗压强度的柔性填充材料，以吸收面板沿坝轴线方向变形而产生的挤压应力。

如前所述，狭窄河谷中的面板坝，河谷底部是变形集中之处。因此，对于狭窄河谷中的高混凝土面板堆石坝，在河谷一定高度范围内，采用级配良好的堆石料，经充分压实，形成一个高压缩模量区。这一高模量区将限制岸坡堆石体斜向位移的发展，从而有效改善坝体和面板的应力变形性态。

6 工程实例

为进一步验证前一节中提出的改善狭窄河谷中高混凝土面板坝应力变形性状的工程措施，以黄河上游玛尔挡水电站大坝为例进行了进一步的计算分析。玛尔挡水电站位于青海省玛沁县拉加乡上游约 5 km 的黄河干流上，是一个以发电为主的大型水电枢纽工程，工程规模为一等大(1)型。水库正常蓄

水位 3275 m，相应库容 14.82 亿m^3。电站装机容量 2200 MW，多年平均发电量 72.39 亿kW·h。枢纽大坝为混凝土面板堆石坝，坝高 211 m，大坝长高比为 1∶1.5，为典型的狭窄河谷区(图 23)高混凝土面板坝。大坝主要的筑坝料为二长岩和砂岩堆石料、及枢纽建筑物开挖料，岩石的饱和单轴抗压强度为 70~130 MPa。

根据前述分析，狭窄河谷的河谷束窄效应会使得坝体变形量相对较小，岸坡处变形梯度相对较大。另外，河谷的不对称性，会导致缓坡坝肩变形量相对较大，陡坡坝肩变形量相对较小，造成坝体变形不均匀。为减小坝体变形量以及变形的不均匀性，计算分析中研究采用提高堆石体压实度的措施降低河谷束窄效应的影响。同时，为降低岸坡堆石区的变形梯度，还对比了设置岸坡增模堆石区的影响(图 24 为增模区的设置范围)。

图 23　玛尔挡面板坝的坝址河谷

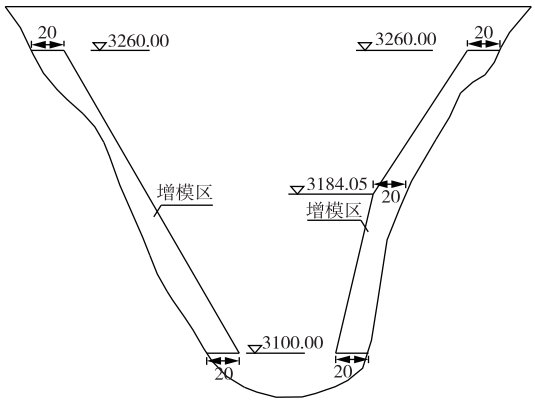


图 24　岸坡增模区的范围(单位：m)

各计算方案中，垫层料和过渡料的孔隙率(n)标准分别为 17%、18%，堆石区的孔隙率则由 21%逐步降低至 19%。表 3 所示为各计算方案的应力变形特征(最大)值。

表 3　堆石不同孔隙率条件下大坝应力变形特征值汇总

统计项目			n=21%	n=20%	n=19.5%（无岸坡垫层区）	n=19.5%（有岸坡垫层区）	n=19%
坝体	竣工期	顺河向变形/cm	18.3/-17.1	16.0/-15.3	14.4/-13.8	14.1/-12.9	13.4/-13.1
		轴向变形/cm	13.1/-10.6	11.7/-9.2	11.1/-8.6	10.8/-8.3	10.4/-7.7
		沉降/cm	126.1	110.1	100.1	96.8	92.7
		大主应力/MPa	2.95	2.97	2.98	2.94	3.00
		小主应力/MPa	1.4	1.41	1.42	1.38	1.42
	蓄水期	顺河向变形/cm	19.4/-9.0	17.7/-7.7	15.2/-7.0	15.0/-5.9	14.2/-6.5
		轴向变形/cm	13.7/-10.9	11.9/-9.4	11.4/-8.8	10.9/-8.5	10.5/-7.9
		沉降/cm	133.8	116.8	106.4	102.1	98.2
		大主应力/MPa	3.07	3.09	3.11	3.05	3.12
		小主应力/MPa	1.46	1.47	1.48	1.44	1.49
面板	蓄水期	挠度/cm	49.8	43.6	37.2	36.8	36.4
		轴向变形/cm	6.5/-3.4	6.0/-3.2	5.6/-2.8	5.4/-2.7	5.3/-2.7
		轴向应力/MPa	13.90/-2.47	12.90/-2.15	12.58/-2.08	12.54/-2.03	12.23/-1.80
		顺坡向应力/MPa	15.80/-0.55	14.41/-0.48	13.40/-0.43	12.49/-0.35	12.76/-0.37
止水接缝	蓄水期	面板周边缝 错动/mm	35.1	31.2	28.0	26.2	25.7
		面板周边缝 沉陷/mm	25.4	22.6	22.1	21.5	20.8
		面板周边缝 张开/mm	28.2	25.4	23.9	22.0	22.3
		垂直缝 张开/mm	18.4	15.7	14.2	13.7	13.2

注：顺河向变形指向下游为正，指向上游为负；轴向变形指向右岸为正，指向左岸为负；应力压为正，拉为负。

从表 3 计算成果看，通过改善堆石体的压实，降低堆石孔隙率，提高堆石体模量，可明显减小坝体、面板、接缝变形，有效改善防渗体系的应力变形状态。

从表 4 计算成果看，设置岸坡增模区对于岸坡处的坝体变形梯度和周边缝剪切变形减小明显，递减率分别为 18%和 10%左右。由此可见，岸坡增模区的设置可有效降低岸坡堆石体的变形梯度，改善周边缝的变形性态。

表 4　设置岸坡垫层区与不设置典型高程岸坡最大沉降变形梯度

工况	3125.00 m 高程			3152.00 m 高程		
	不设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层后降低率	不设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层后降低率
竣工期	0.047	0.041	11.9%	0.038	0.034	10.3%
蓄水期	0.048	0.042	12.3%	0.039	0.035	9.9%
运行期	0.050	0.043	13.0%	0.042	0.037	13.3%
工况	3177.00 m 高程			3215.00 m 高程		
	不设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层后降低率	不设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层区	设置岸坡垫层后降低率
竣工期	0.076	0.065	15.3%	0.062	0.050	18.7%
蓄水期	0.079	0.067	16.0%	0.063	0.052	17.7%
运行期	0.089	0.070	21.0%	0.067	0.055	17.3%

7　结论

通过针对不同地形条件下典型混凝土面板坝模型的应力变形分析，可以看出，尽管混凝土面板堆石坝对地形条件有着较好的适应性，但河谷的坡度和宽窄对于坝体和面板的变形仍有一定的影响，这种影响主要表现在岸坡对坝体和面板的顶托和约束作用上。总体而言，在坝体材料确定不变的情况下，狭窄河谷中坝体和面板的位移数值明显小于宽阔河谷中的情况，而面板的应力则是在狭窄河谷的情况下较大。

从坝体和面板位移的变化趋势看，位移随大坝长高比的增加而增大，当长高比增大至一定程度(3.5~4.0)后，坝体位移变化的趋势逐渐趋于平稳，岸坡对坝体位移的作用减弱。

狭窄河谷情况下，面板顺坝坡方向和沿坝轴线方向的压应力相对较大，但拉应力区分布范围相对较小，近岸坡局部部位面板的应力变化明显。在宽阔河谷情况下，面板的压应力相对较小，但拉应力区范围相对较大，岸坡对河床段面板应力的影响作用较弱。建于狭窄河谷中的混凝土面板坝需要更加严格地控制堆石体的变形。改善狭窄河谷中混凝土面板坝应力变形性状的主要工程措施包括：提高堆石体的压实密度、增加堆石体的压缩模量、在近岸坡区域设置增模过渡区、合理安排面板浇筑前的堆石预沉降时间、在河床段面板纵缝设置可吸收面板位移柔性填充材料等。

参　考　文　献：

[1]　杨泽艳，周建平，王富强，等. 中国混凝土面板堆石坝 30 年[M]. 北京：中国水利水电出版社，2016.

[2]　杨杰，李国英. 复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(7)：775-781.

[3]　徐泽平，邵宇，胡本雄，等. 狭窄河谷中高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水利水电技术，2005，36(5)：30-33.

[4] 程嵩，张嘎，张建民，等. 河谷形状对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水力发电学报，2008，27(5)：53-57.
[5] 朱晟，欧红光，殷彦高. 狭窄河谷形状对 200m 级高面板坝变形和应力的影响研究[J]. 水力发电学报，2005，24(4)：73-77.
[6] 王国辉，殷彦高，张嘉明. 江坪河水电站高面板堆石坝变形特点及设计研究[J]. 水力发电，2020，46(6)：20-25.
[7] 殷彦高，王国辉，李跃鹏. 江坪河水电站工程特点及关键技术研究综述[J]. 水力发电，2020，46(6)：19-25.
[8] 朱永国，严军. 猴子岩面板堆石坝的设计理念与技术创新[J]. 水力发电，2018，44(11)：56-59.
[9] 朱永国. 猴子岩水电站面板堆石坝堆石体变形控制措施[J]. 水力发电，2018，44(11)：60-63.
[10] 杨星，余挺，王平，等. 狭窄河谷高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 水电站设计，2017，33(3)：5-13.
[11] 卢羽平，周小来. 卡基娃面板堆石坝设计与运行状况分析研究[J]. 水电站设计，2021，37(2)：5-8.
[12] 王君利. 特窄河谷深卸荷岩体上高面板坝变形及渗流控制关键技术研究[C]//中国水利学会 2017 学术年会论文集，南京：河海大学出版社，2017.
[13] 王恩辉. 新疆狭窄河谷当地材料坝关键技术研究[J]. 陕西水利，2021(4)：180-181.
[14] 宋文晶，高莲士. 窄陡河谷面板堆石坝坝肩摩擦接触问题研究[J]. 水利学报，2005，36(7)：793-798.
[15] 侯冰铃，聂柏松. 狭窄河谷陡边坡高面板堆石坝应力变形研究[J]. 人民珠江，2022，43(4)：127-134.
[16] 欧波，袁丽娜，向国兴. 流变对狭窄河谷高面板堆石坝应力变形的影响[J]. 水利建设与管理，2021(4)：10-15.
[17] 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[J]. 水利学报，2008，39(6)：639-646.
[18] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝应力变形特性研究[M]. 郑州：黄河水利出版社，2005.
[19] 党发宁，杨超，薛海斌. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报，2014，45(4)：435-442.
[20] 杨超，薛海斌，党发宁，等. 狭窄河谷面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成机理及影响范围研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(S1)：214-218.
[21] DUNCAN J M，BYRNE P，WONG K S，et al. Strength，stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movement in soil masses[R]. Report No. UCB/GT/80-01，University of California，Berkeley，1980.
[22] 徐泽平. 中国水利水电科学研究院的面板堆石坝数值分析研究的回顾与展望[J]. 水利水电技术，2005，36(2)：39-43.
[23] GOODMAN R E，TAYLOR R L，BYEKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division，ASCE，1968，94(3)：637-660.
[24] DESAI C S. Thin layer element for interface and joints[J]. Inter. Journal for Num. & Meth. In Geomech，1984，8(1)：19-43.
[25] 柳莹，李江，杨玉生，等. 新疆高混凝土面板堆石坝筑坝标准及变形控制研究[J]. 水利学报，2021，52(2)：182-193.
[26] 温立峰，李炎隆，柴军瑞. 混凝土面板堆石坝地基防渗墙塑性损伤数值分析[J]. 水利学报，2021，52(6)：673-688.
[27] 朱银邦，郭宇，崔炜，等. 玉龙喀什枢纽超高面板堆石坝的渗控方案及渗流分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2020，18(3)：170-177.

Study on stress and deformation and engineering measures for concrete faced rockfill dam built in narrow valley

XU Zeping[1,3], LU Xi[2], ZAI Yingchun[2], YAN Zuwen[1,3], JI Yang[2], XU Yao[1,3,4]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*;
2. *Northwest Engineering Corporation Limited*, *Power China*, *Xi'an* 710065, *China*;
3. *State key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*, *Beijing* 100038, *China*;
4. *Beijing IWHR-KHL Co.*, *Ltd*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: In order to study the impacts of topography of river valley on the stress and deformation properties of concrete faced rockfill dam (CFRD), an ideal 3D finite element model was used for stress and deformation analysis. Based on the studies and the analysis of a real CFRD project, engineering measures for improving the stress and deformation status of CFRD built in narrow valley are proposed. Research results reveal that the main effects of river valley on CFRD are the restraint and supporting action of abutments on dam body and concrete face slabs, and this effect will be reduced with the increase of the valley shape factor, i.e. the ratio of crest length to the height of the dam. For CFRD built in a narrow valley, the displacement gradient of rockfill and the compressive stress of face slabs are relatively large. Engineering measures such as increasing the compaction density of rockfill, setting up the transition rockfill zone with increased modulus, reasonably determining the timing for face slab construction, and arranging filling material with the capacity to absorb the deformation of face slabs in vertical joints of the slabs, can be taken to improve the stress and deformation status of the dam and the face slab.

Keywords: concrete faced rockfill dam; shape of river valley; stress and deformation; narrow valley

(责任编辑：李福田)

2021 年度《水利学报》优秀论文公告

为不断提高《水利学报》的论文质量和学术影响力，鼓励学者们发表高质量、高影响的论文，促进水利科技的创新发展，我刊今年继续开展优秀学术论文评选活动。经《水利学报》编委会推荐、编委会主任审定，以下论文为 2021 年度《水利学报》优秀论文，现将论文名单公告如下：

2021 年度《水利学报》优秀论文

第一作者姓名	第一作者单位	论文题目	所在刊期
王　浩	中国水利水电科学研究院	城市水循环演变及对策分析	第 1 期
任秋兵	天津大学	水工建筑物安全监控深度分析模型及其优化研究	第 1 期
赵　勇	中国水利水电科学研究院	增长的规律：中国用水极值预测	第 2 期
徐宗学	北京师范大学	城市暴雨洪涝模拟：原理、模型与展望	第 4 期
孙昭华	武汉大学	江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系	第 5 期
张金良	黄河勘测规划设计研究院有限公司	黄河下游花园口-高村河段泥沙时空分布及地貌演变	第 7 期
殷亚娟	河海大学	基于分形维的混凝土裂纹扩展及损伤演化过程研究	第 11 期
李原园	水利部水利水电规划设计总院	新发展阶段中国水资源安全保障战略对策	第 11 期
蒋云钟	中国水利水电科学研究院	智慧水利解析	第 11 期
周建中	华中科技大学	广域预报信息驱动的水库群实时防洪全景调度研究	第 12 期

《水利学报》编辑部