

文章编号: 1000-7598(2012)增2-0338-07

南水北调西线工程坝区初始地应力场反演分析

裴启涛, 李海波, 刘亚群

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 依据南水北调西线工程阿达坝区工程地质条件以及实测地应力资料, 采用多元线性回归分析理论以及FLAC^{3D}计算程序, 对建立的坝区三维地质概化模型进行计算, 求出最优回归系数。对比回归计算值与现场实测值发现, 二者量值相当且方向上接近, 表明经过回归得到的地应力场是合理的, 从而获得坝区较为准确的初始地应力场分布规律。进一步分析结果表明, (1) 谷底应力集中现象明显, 应力集中区的垂直深度达80 m, 应力峰值约为15 MPa; (2) 相距仅350 m 左右的两个钻孔, 其最大水平主应力方向差异较大, 反映出河谷区地形地貌对岩体应力方向强烈的控制作用; (3) 坝区为中等地应力区, 在浅部以构造应力为主, 随着埋深的增加, 自重应力场控制作用逐渐增强。研究成果可为坝址及引水隧洞轴线布置的设计与施工提供重要依据。

关键词: 南水北调; 初始地应力场; 反演分析; 多元线性回归; 河谷

中图分类号: TV 64

文献标识码: A

Back analysis of initial geostress field of dam site in west route of South-to-North water transfer project

PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the site measurements of geostress and engineering geological conditions in Ada dam area of west route of South-to-North water transfer project, the established 3D simplified geological model of the dam is calculated by FLAC^{3D} combined with the linear multivariate regression analysis principle. Then, the optimum regression coefficients have been achieved. Comparing the computed results with the measured geostress data, it is found that the two are very close in values and directions, which suggests the accuracy and reasonability of the geostress field regression. Therefore, the distribution rule of the initial in-situ stress field can be obtained accurately. The further analysis is shown as follows: (1) The stress concentration at the bottom of the river valley is obvious; and the vertical depth of the zone is about 80 m with the peak value of 15 MPa. (2) There exists considerable difference between the maximum horizontal principal stress direction of two boreholes which are only 350 m apart, which reflects the control action of the direction of compressive principal stress by geographical and topographic features of the river valleys. (3) The initial geostress field in dam area is a medium stress field which is dominated by tectonic stress field at the shallow parts; but control action of gravity field increases gradually with the increment of buried depth. The results above provide important reference for design and construction of Ada dam and its diversion tunnel axis layout.

Key words: South-to-North water transfer; initial geostress field; back analysis; linear multivariate regression analysis; river valleys

1 引言

南水北调西线工程位于青藏高原东北部, 是我国水资源优化配置, 解决北方地区缺水的一项战略性基础设施工程。经多方案比选, 选择雅砻江干流

阿达水库输水到黄河支流贾曲的自流线路作为第二期工程, 调水总量达 50 亿 m³。阿达坝区位于甘孜县扎柯乡阿达村上游约 1 km 处, 坝高 250 m。坝段河谷为峡谷, 相对高差 600~1 000 m, 山顶浑圆, 河流两岸坡度一般为 30°~40°, 沟谷形态为不对称

收稿日期: 2012-05-31

基金项目: 国家 973 国家重点基础研究发展计划项目资助(No. 2010CB732001); 国家杰出青年基金资助(No. 51025935)。

第一作者简介: 裴启涛, 男, 1986 年生, 博士研究生, 从事岩土工程与地质灾害方面的研究。E-mail: pqt01@163.com

“V”型。阿达坝区地形切割较深,基岩岩性为花岗岩。河床覆盖层厚度为 0~20 m,强、中风化带深度大约 50 m。

为解坝址区的地应力情况,受水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院委托,采用水压致裂法进行现场地应力测量。由于场地和经费等原因,现场的实测数据有限,如何利用少量的实测数据来获得该坝区较准确的初始地应力场分布规律,对于坝址及引水隧洞轴线布置的设计与施工具有重大意义。

目前,国内外大多采用以现场的实测资料为基础来反演河谷区岩体初始地应力场的应力回归分析法。许多专家和学者在该方法上从不同的角度进行了有益的探讨:庞作会等^[1]提出复杂初始地应力场的力学模型,并通过有限元求解构造应力在边界上的节点力,来求解初始地应力场;胡斌等^[2]、张建国等^[3]、刘允芳等^[4]采用三维有限元回归分析方法,在实测地应力值与计算应力值之间建立多元回归模型;王涛等^[5]采用正交回归设计和三维有限元相结合的数值模拟方法,对某电站地下厂房岩体三维地应力场进行了分析和评价;蔡美峰等^[6]提出了结构面节点偶对分析原理和方法,并采用三维有限元拟合方法用以模拟断层对地应力场分布的影响;付成华等^[7]将多元线性回归方法、神经网络方法和遗传算法这 3 种反演方法进行了比较,发现回归方法具有更方便快捷、易于掌握、惟一解的优势。此外,近年来,随着计算机技术的发展,将灰色理论、神经网络法、遗传算法等应用于岩体初始地应力场反分析领域也取得了丰硕的成果^[8-12]。

本文结合南水北调西线工程——阿达坝区工程地质背景,考虑了河谷岸坡强风化、中风化和微风化地层对应力场的影响,采用三维有限元和多元线性回归方法,对坝区深切河谷地应力场进行了回归分析。计算结果表明,回归计算值与实测值吻合较好,且获得的初始地应力场分布规律,能够满足坝址及引水隧洞轴线布置的设计与施工。

2 初始地应力场反演分析方法

地应力的分布状况与地下工程的空间位置、岩性、岩体自重、地质构造、地形地貌等因素有关,实测地应力就是这些因素综合作用的反应,反演地应力场就是对诸因素模拟再现的过程^[13]。鉴于多元线性回归法地应力场反演,概念清晰,在许多工程中已得到了成功的应用和推广,本文采用该方法进行地应力反演。

2.1 地应力场的反演计算原理

多元回归法原理是将地应力回归计算值 $\hat{\sigma}_k$ 作为因变量,把数值计算求得的自重应力场和构造应力场相应于实测点的应力计算值 σ_k^i 作为自变量,则回归方程的形式为

$$\hat{\sigma}_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \quad (1)$$

式中: k 为观测点序号; $\hat{\sigma}_k$ 为第 k 观测点的回归计算值; L_i 为相应于自变量的多元回归系数; $\hat{\sigma}_k$ 、 σ_k^i 为相应应力分量计算值的单列矩阵; n 为工况数量。

对于 m 个观测点,最小二乘法残差平方和为

$$S_{残} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i)^2 \quad (2)$$

式中: σ_{jk}^* 为 k 观测点 j 应力分量的观测值; σ_{jk}^i 为 i 工况下 k 观测点 j 应力分量的数值计算值, $j=1\sim 6$ 对应初始应力的 6 个分量。

解此方程,得 n 个待定回归系数 $L=(L_1, L_2, \dots, L_n)^T$,则计算域内任一点 P 的回归初始应力,可由该点各工况有限元计算值迭加而得

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jp}^i \quad (3)$$

2.2 初始地应力场影响因素及边界约束条件

阿达坝区属于深切河谷区域,该坝区地应力场受构造、风化剥蚀等因素作用明显,其地应力场分布规律较为复杂。结合该区域的工程条件及技术要求,本文选择以下 6 种因素作为回归岩体初始应力场的基本因素:自重应力状态、东西向水平挤压构造运动、南北向水平挤压构造运动、水平面内均匀剪切构造运动、东西向垂直平面内的竖向均匀剪切构造运动和南北向垂直平面内的竖向均匀剪切构造运动。

考虑到地质构造运动作用大小的不确定性,根据文献^[2, 14],采用位移法来模拟地质构造运动。在上述各基本因素单独作用下,相应的荷载及边界约束条件如图 1 所示。

综合以上分析,回归地应力场表达式为

$$\sigma_{地} = (L_1 \sigma_{构1} + L_2 \sigma_{构1\Delta}) + (L_3 \sigma_{构2} + L_4 \sigma_{构2\Delta}) + (L_5 \sigma_{构3} + L_6 \sigma_{构4}) + L_7 \sigma_{构5} + L_8 \sigma_{构6} + L_9 \sigma_{自} + \varepsilon_k \quad (4)$$

式中: $\sigma_{地}$ 为初始地应力值; $\sigma_{构1}$ 、 $\sigma_{构2}$ 分别为沿东西向、南北向水平边界施加的 1 cm 均匀挤压位移; $\sigma_{构1\Delta}$ 、 $\sigma_{构2\Delta}$ 分别为沿东西向、南北向水平边界施加的垂直深度变化梯度为 10^{-2} cm/m 的三角形分布挤压位移; $\sigma_{构3}$ 、 $\sigma_{构4}$ 分别为在水平面内施加沿东西

向、南北向的 10 cm 均匀切向分布位移; $\sigma_{\text{构}5}$ 、 $\sigma_{\text{构}6}$ 分别为在东西向、南北向垂直平面内施加的 10 cm 竖向均匀切向分布位移; $\sigma_{\text{自}}$ 为自重应力值; ε_k 为随机变量; $L_1 \sim L_9$ 为回归系数。

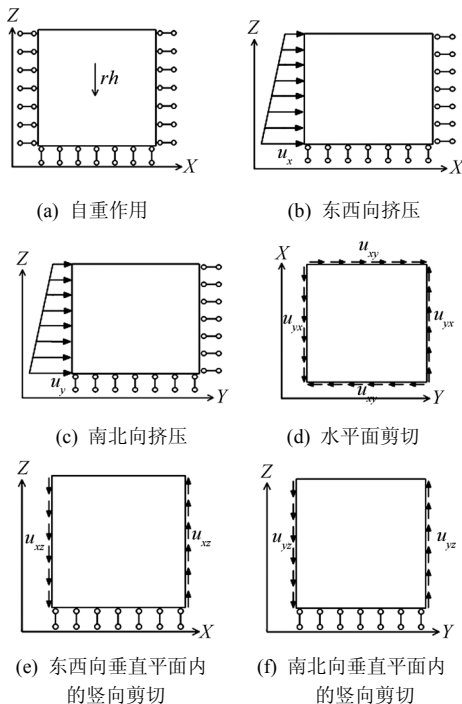


图1 施加的荷载和边界约束条件示意图
Fig.1 Sketch of applied load and boundary constrained condition

3 坝区地应力反演分析模型

3.1 计算范围及计算模型

根据坝区工程地质条件、水文条件及实测点的分布情况,为了消除人工边界误差在重要结构部位的影响,计算范围确定如下:以河谷为中心区域,垂直于河谷走向为 x 轴,沿河谷走向为 y 轴,竖直向上为 z 轴; x 、 y 轴的计算范围为 2 000 m \times 1 000 m, z 轴方向从高程 2 810.2 m 一直延伸到自然边坡坡顶。计算区域及测点平面布置如图 2 所示。共划分六面体单元 126 000 个,节点 134 028 个,计算网格划分见图 3。计算区域模拟了河谷岸坡强风化、中

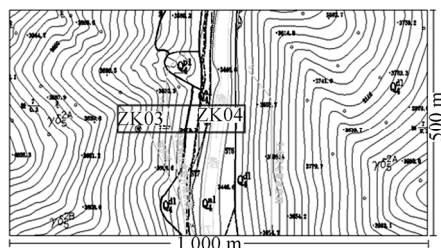


图2 计算区域及测点平面布置图
Fig.2 Calculation range and plane location of measuring points

风化和微风化地层,根据试验结果,坝区各层岩层材料力学参数见表 1。

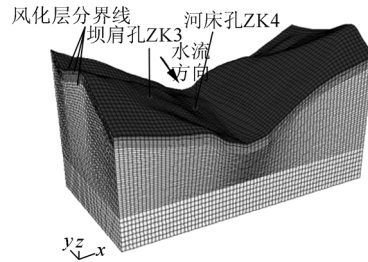


图3 计算网格图
Fig.3 Meshes for numerical calculation

表1 陈述坝区岩体力学参数
Table 1 The mechanical parameters of rock masses in Ada dam area

类别	地质特征	密度 (g/cm ³)	变形模量 /GPa	泊松比	抗剪(断)强度	
					内摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c / MPa
I	新鲜块状花岗岩	2.75	30	0.22	58.8	2.2
II	微风化块状花岗岩	2.65	20	0.26	54.5	1.7
III	中风化花岗岩	2.50	10	0.30	46.4	1.0
IV	强风化花岗岩	2.35	6	0.36	33.0	0.5

3.2 地应力实测成果分析

阿达坝区现场地应力测试采用水压致裂法,其中钻孔 ZK3 位于阿达坝址坝肩部位,孔口高程 3 693 m,孔深 160.3 m。钻孔 ZK4 位于阿达坝址河床部位,孔口高程 3 464 m,孔深 100.5 m。为确保资料的可靠性,综合考虑水压致裂应力测量的技术要求以及河谷浅表部应力卸荷作用的影响,本文选取 9 个代表性测试段作为研究坝区初始地应力场的依据,见表 2^[15]。

表2 坝区水压致裂法应力测量结果
Table 2 The results of geostress measurement by hydraulic fracturing technique in Ada dam area

测试 钻孔	测点 编号	压裂段深度 /m	高程 /m	应力值/MPa			破裂方位
				σ_H	σ_h	σ_v	
ZK3 (坝肩孔)	1-1	71.17	3 613.44	4.06	2.99	1.78	NE15
	1-2	99.81	3 584.8	4.33	3.15	2.5	
	1-3	120.05	3 564.56	4.65	3.54	3.00	
	1-4	138.71	3 545.9	5.04	3.79	3.48	
ZK4 (河床孔)	2-1	50.53	3 413.47	4.09	3.07	1.28	NE79
	2-2	65.82	3 398.18	9.85	6.44	1.65	
	2-3	70.65	3 393.35	10.11	6.43	1.78	
	2-4	75.98	3 388.02	10.62	7.08	1.90	
	2-5	80.54	3 383.46	12.32	7.91	2.03	

4 反演计算及结果分析

对式(4)确定的9种工况利用FLAC^{3D}分别进行模拟计算,然后以实测地应力结果(见表2)在计算坐标系下的应力分量为回归目标。利用最小二乘法对式(4)进行多元线性回归,求得复相关系数为0.874。考虑到实测点1-1、1-2、2-1这3个测点深度较浅,实测值受河谷卸荷作用影响较大,将它们剔除后再进行回归,求得复相关系数为0.986,表明回归公式的相关性较好。则该坝区初始地应力场回归方程为

$$\sigma_{地} = 19.442\sigma_{构1} + 1.860\sigma_{构1\Delta} + 9.339\sigma_{构2} + 2.173\sigma_{构2\Delta} - 1.165\sigma_{构3} + 1.959\sigma_{构4} + 0.802\sigma_{构5} - 1.437\sigma_{构6} + 1.079\sigma_{自} - 0.0513 \quad (5)$$

此外,回归残差平方和 $S = 11.57$, 回归平方和 $U = 440.72$, 显著度检验观测值 $F = 110.04$, 大于显

著性水平 0.05 时的临界值 $F(9, 36-9-1) = 2.28$ 。因此,可以认为该 9 个自变量的总体效果显著。

通过应力场平衡计算,得到计算坐标系下各测点的回归应力值,测点的地应力实测值与回归主应力值及应力分量对比分别见图 4 和表 3、4。

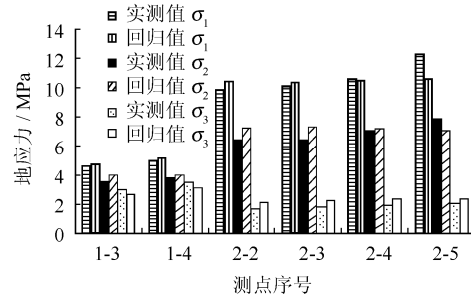


图 4 测点地应力实测值与回归值主应力对比直方图
Fig.4 Comparison histograms of measured and calculated geostresses of measuring points

表 3 测点的实测与回归主应力值对比
Table 3 Comparison between measured and regressive principal stresses of measuring points

测点 编号	σ_1 / MPa		σ_2 / MPa		σ_3 / MPa		倾角及方位角计算值/(°)			
	实测	回归	实测	回归	实测	回归	α_1	α_2	α_3	β
1-3	4.65	4.79	3.54	4.04	3.00	2.68	9.16	15.04	72.26	13.41
1-4	5.04	5.25	3.79	3.98	3.48	3.11	12.42	7.98	75.19	7.82
2-2	9.85	10.43	6.44	7.25	1.65	2.09	0.35	-4.05	85.95	89.04
2-3	10.11	10.40	6.43	7.32	1.78	2.24	-1.92	-1.83	87.31	88.36
2-4	10.62	10.52	7.08	7.16	1.90	2.36	3.39	0.31	86.56	89.44
2-5	12.32	10.63	7.91	7.09	2.03	2.38	-5.39	3.22	83.72	89.30

注: $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 为主应力的水平面倾角, 正为上倾, 负为下倾; β 为最大水平主应力的方位角, 以正北顺时针转为正。

表 4 各测点实测与回归应力分量对比
Table 4 Comparison between measured and regressive geostress components of measuring points

测点 编号	σ_x		σ_y		σ_z		τ_{xy}		τ_{yz}		τ_{xz}	
	实测	回归	实测	回归	实测	回归	实测	回归	实测	回归	实测	回归
1-3	4.58	4.72	3.61	3.96	3.00	2.83	0.28	-0.13	0.00	0.41	0.00	-0.23
1-4	4.96	5.14	3.87	3.97	3.48	3.22	0.31	-0.09	0.00	0.16	0.00	-0.43
2-2	9.62	10.43	6.67	7.22	1.65	2.12	0.85	0.05	0.00	-0.36	0.00	-0.04
2-3	9.86	10.39	6.68	7.32	1.78	2.25	0.92	0.09	0.00	-0.15	0.00	0.28
2-4	10.38	10.49	7.32	7.16	1.90	2.39	0.89	-0.03	0.00	-0.03	0.00	0.48
2-5	12.02	10.56	8.21	7.08	2.03	2.47	0.70	-0.02	0.00	0.26	0.00	0.77

4.1 反演计算结果比较分析

由图4及表3、4可见,大部分测点的主应力回归值与实测值在数值上相接近,且应力分量平均绝对误差为0.46 MPa,测点的误差较小;在主应力

倾角上,测点的最大、最小水平主应力倾角绝对值平均为5.42°(近似水平),第三主应力倾角的平均值为81.83°(近似垂直),这与水压致裂法的假设趋于一致;在主应力方向上,各测点的最大水平主应力

方位角,与实测值吻合较好。因此,本文采用的反演方法能较好地模拟坝址区的初始地应力场。

4.2 坝区初始应力场的分布规律

通过对现场测试结果和有限元数值计算结果分析研究,阿达坝址区的地应力场分布规律如下。

4.2.1 地应力沿水平埋深变化规律

钻孔横剖面 ($y = 559.7019\text{ m}$) 高程分别为 3330、3560、3660、3760 m 上的各点第一主应力值 σ_1 随水平埋深的变化曲线如图 5 所示。图 5(a) 中,高程 3300 m 第一主应力 σ_1 的变化曲线从左岸向右岸穿越了河谷应力集中区,其量值在河谷中部达到峰值,并向左右两岸以较大应力梯度降低,此后则脱离应力集中区而基本趋于平稳。图 5(b) 中,第一主应力 σ_1 量值从谷坡向山体内部沿水平埋深呈“阶梯状”缓慢增加,在风化界线附近应力值变化较大,最后趋于平稳,且随着高程的增加其应力值明显减小。

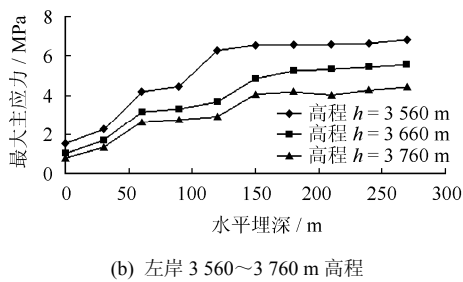
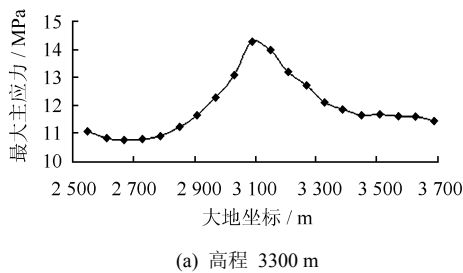


图 5 坝区不同高程下的第一主应力 σ_1 随水平埋深变化曲线
Fig.5 Variation of σ_1 with horizontal depths at different elevations in dam area

4.2.2 地应力沿垂直埋深变化规律

图 6 为河床部位垂直应力 σ_z 及第一主压应力 σ_1 值沿垂直埋深的变化曲线。图中显示, σ_1 在河床表层(应力释放区)岩体中量值较小,且随着埋深增加的幅度较小;当埋深超过 60 m (应力集中区)后, σ_1 值迅速上升并达到峰值,然后迅速减小,并逐渐与垂直应力 σ_z 的变化趋于一致。

4.2.3 测压系数变化规律

图 7 为坝肩和河床部位(剖面 $y = 559.7019\text{ m}$)

高程分别为 3760 m 和 3450 m 的最大水平主应力与铅垂向应力比值(侧压系数)随深度的变化曲线。从图中可以看出,河床、坝肩部位的侧压系数随深度的增加均减小,且侧压系数均大于 1,表明坝区地应力以水平构造应力为主;河床部位在应力集中区附近的测压系数值明显大于同深度处的坝肩部位值,且变化较大;当垂直埋深超过 200 m 时,河床的测压系数小于坝肩部位,且二者均靠近 1。可见,随着垂直埋深的增加,构造应力场的控制作用减弱,自重应力场作用逐渐增强。

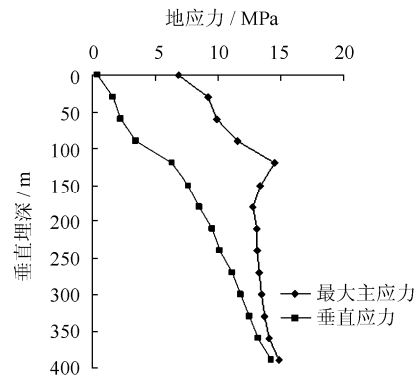


图 6 河床垂直应力 σ_z 和第一主应力 σ_1 随垂直埋深变化曲线
Fig.6 Variation of σ_1 and σ_z with the vertical depths at the middle point located at the riverbed

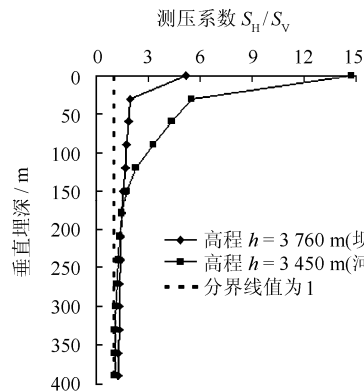


图 7 坝区不同高程下的测压系数随垂直埋深变化曲线
Fig.7 Variation of lateral pressure ratio with depth at different elevations in dam area

4.2.4 关键区等值线图

取工程区钻孔 ZK3 及 ZK4 的横剖面(倾向 NE84°, 倾角 90°, 贯穿两测量钻孔截面)上主应力等值线如图 8 所示。由图可见,坝区为中等地应力区,主应力值随着水平和垂直埋深的增大而增大,岸坡浅表部存在应力释放现象,谷底应力集中,量级约为 15 MPa,呈现出河谷地区初始应力场分布的显著特征。

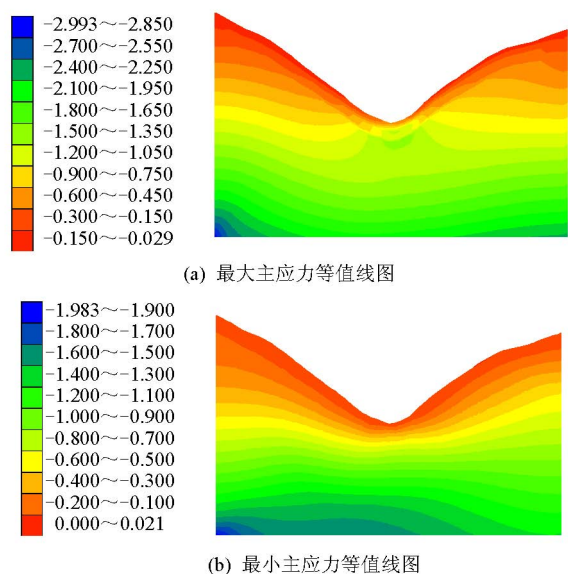


图 8 钻孔横剖面主应力等值线图(单位: 10^4 MPa)
Fig.8 Contour diagrams of principal stresses at the bore-hole transverse section (unit: 10^4 MPa)

5 结 论

(1) 采用多元线性回归分析理论, 结合FLAC^{3D}计算程序, 对南水北调西线工程阿达坝区初始地应力场进行反演分析。反演回归应力值与实测应力值拟合较好, 为坝址及引水隧洞轴线布置的设计与施工提供了合理的三维初始地应力场。

(2) 水压致裂法测试结果表明, 坝区的坝肩孔与河床孔的最大水平主应力方向差距较大, 二者相差近 64° , 反映出河谷区地形地貌对岩体应力方向强烈的控制作用。

(3) 谷底应力集中现象明显, 应力集中区垂直深度达80 m。第一主应力在河床中部以下110 m处达到峰值, 然后沿左右两岸以较大的应力梯度递减, 此后脱离应力集中区而趋于平稳。

(4) 坝区的侧压系数均大于1, 表明坝区地应力以水平构造应力为主。此外, 河床部位在应力集中区附近的侧压系数明显大于同深度处的坝肩部位值, 且变化较大。

(5) 阿达坝区为中等地应力区, 在浅部以构造应力为主, 随着埋深的增加, 自重应力场控制作用逐渐增强, 为坝址及引水隧洞轴线布置的设计与施工提供了重要依据。

参 考 文 献

[1] 庞作会, 陈文胜, 邓建辉, 等. 复杂初始地应力场的反演分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(7): 44—47.

PANG Zuo-hui, CHEN Wen-sheng, DENG Jian-hui, et al. Back analysis for complex initial geo-stress field[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(7): 44—47.

[2] 胡斌, 冯夏庭, 黄小华, 等. 龙滩水电站左岸高边坡区初始地应力场反演回归分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 22(11): 4055—4064.

HU Bin, FENG Xia-ting, HUANG Xiao-hua, et al. Regression analysis of initial geo-stress field for left bank high slope region at Longtan hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 22(11): 4055—4064.

[3] 张建国, 张强勇, 杨文东, 等. 大岗山水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3071—3076.

ZHANG Jian-guo, ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, et al. Regression analysis of initial geostress field in dam zone of Dagangshan hydropower station[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3071—3076.

[4] 刘允芳, 龚璧新, 肖本职, 等. 广州抽水蓄能电站地下厂房区地应力场分析[J]. 长江科学院院报, 1993, 4(4): 45—53.

LIU Yun-fang, GONG Bi-xin, XIAO Ben-zhi, et al. Analyses of ground stress field in underground excavation of Guangzhou pumped storage power station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1993, 4(4): 45—53.

[5] 王涛, 周先前, 田树斌, 等. 基于正交设计的河谷地应力场数值模拟方法及应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 831—835.

WANG Tao, ZHOU Xian-qian, TIAN Shu-bin, et al. Numerical simulation method for rock natural stress field of a valley and its application based on orthogonal experiments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 831—835.

[6] 蔡美峰, 熊顺成, 乔兰, 等. 地应力场三维有限元拟合研究[J]. 中国矿业, 1997, 6(1): 42—45.

CAI Mei-feng, XIONG Shun-cheng, QIAO Lan, et al. A

- regression technique for determining in-situ stress field with 3-D FE analysis[J]. **China Mining Magazine**, 1997, 6(1): 42—45.
- [7] 付成华, 汪卫明, 陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2305—2312.
- FU Cheng-hua, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Back analysis study of initial geostress field of dam site for Xiluodu hydropower project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2305—2312.
- [8] 戚蓝, 丁志宏, 马斌, 等. 初始地应力场多元方程回归分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 137—139.
- QI Lan, DING Zhi-hong, MA Bin, et al. Regression analysis of initial in-situ stress field with multiple variables and equations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 137—139.
- [9] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] 易达, 徐明毅, 陈胜宏, 等. 人工神经网络在岩体初始应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 943—946.
- YI Da, XU Ming-yi, CHEN Sheng-hong, et al. Application of artificial neural network to back analysis of initial stress field of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 943—946.
- [11] 易达, 徐明毅, 陈胜宏. 遗传算法在岩体初始应力场反演中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1618—1622.
- YI Da, XU Ming-yi, CHEN Sheng-hong. Application of genetic algorithm to back analysis of initial stress field of rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1618—1622.
- [12] YANG Y, ZHANG Q. The application of neural networks to rock engineering systems[J]. **Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.**, 1998, 35(6): 727—745.
- [13] 张延新, 宋常胜, 蔡美峰, 等. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 779—785.
- ZHANG Yan-xin, SONG Chang-sheng, CAI Mei-feng, et al. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modeling predictions of stress field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 779—785.
- [14] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 南水北调西线二期工程地应力测试报告(II)[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.