

DOI: 10.11779/CJGE201405021

长大深埋隧道工程区地应力状态预测与实例分析

王成虎¹, 邢博瑞^{1, 2}, 陈永前¹

(1. 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学实验室), 北京 100085; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 深埋隧道工程区地应力场的预测一直是工程技术人员所需迫切解决的难题。针对此问题提出了解决方案, 即利用世界应力图、中国大陆地壳应力环境数据库以及前人研究成果可获得工程区应力场方向的初步认识, 同时还可以利用 Anderson 断层力学理论分析工程区可能的主应力方向。在获得原地应力实测资料后, 利用较为翔实的工程地质资料基于 Hoek-Brown 强度理论估算工程区范围内的岩体强度, 然后利用修正 Sheorey 模型和数值模拟手段开展工程区深埋区域的地应力状态的预测分析。某水电站工程区位于青藏高原西缘。3 个钻孔的水压致裂原地应力实测数据显示三向主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_V$ 或 $S_H > S_V > S_h$, 表明最大水平主应力占主导地位, 水平构造作用力明显。实测所得到的测区最大水平主应力方向为 NEE 向($N70.3^\circ - 89^\circ E$); 而世界应力图给出的区域应力场方向为 NE 向。通过修正 Sheorey 模型对深埋引水隧洞沿线的工程区应力状态进行了预测, 结果显示, 埋深最大的地方, 最大最小水平应力值分别为 56.70, 40.14 MPa。

关键词: 应力场预测; 修正 Sheorey 模型; 世界应力图; 应力测量; 青藏高原西缘

中图分类号: TU459.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)05-0955-06

作者简介: 王成虎(1978-), 男, 陕西定边人, 从事地应力测试及其在地质科学中的应用研究。E-mail: huchengwang@163.com。

Prediction of stress field of super-long deep-buried tunnel area and case analysis

WANG Cheng-hu¹, XING Bo-rui^{1, 2}, CHEN Yong-qian¹

(1. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China; 2.

School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The prediction of stress field of deep-buried tunnel area is a tough problem that many scientists and engineers have to face with. Herein, a solution is put forward for this problem. The databases from the WSM and the Crustal Stress Environment of China Mainland and the previous research findings can offer indications of stress orientations of an engineering area; at the same time, the Andersonian theory can be used to analyze the possible stress orientation of an engineering area. After the limited in-situ stress measurements are obtained, the Hoek-Brown criterion can be used to estimate the strength of rock mass in the engineering area by utilizing the geotechnical investigation data, and then the modified Sheorey model can be employed to predict the stress field of areas without stress data by taking the existing in-situ stress measurements as input parameters. One planned hydroelectric power plant is located on the western edge of Tibet Plateau. Three hydro-fracturing stress measurement campaigns indicate that the stress state of the engineering area is $S_H > S_h > S_V$ or $S_H > S_V > S_h$. The measured orientation of S_H is NEE ($N70.3^\circ - 89^\circ E$), and the regional orientation of S_H from WSM is NE, which may imply that the stress orientation of shallow crust may be affected by landforms. The modified Sheorey model is utilized to predict the stress state along the water sewage tunnel for the plant. The predicted results indicate that the maximum and minimum horizontal principal stresses of the place with the greatest burial depth are up to 56.70 and 40.14 MPa, to which the relevant organizations pay more attention. According to the application case, the proposed method works well.

Key words: prediction of stress field; modified Sheorey model; world stress map; stress measurement; western edge of Tibet Plateau

0 引言

原地应力场的确定与分析对于地下工程稳定性分析和设计都具有举足轻重的作用。在勘察阶段, 工程

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(41274100, 51038009); 中央级科研院所基本科研业务专项项目(ZDJ2012-20)

收稿日期: 2013-09-17

师们要面临很大的困难来开展相应的地应力测量，如锦屏二级水电站一般埋深 1500~2000 m，最大埋深达 2525 m，引汉济渭工程引水隧洞长度 97.37 km，最大埋深 2012 m，秦岭隧道最大埋深 1700 m 等。对于这种深埋工程，勘察单位只能有选择地在交通条件和地形条件较好的区域布设钻孔并开展相关测试，这些勘察工作都无法涉及地下工程的最深部位区域。而这些工程的最深部位均是整个项目的控制性区域，需要对这些工程区的应力状态有详细了解。在这种情况下，就需要利用其它区域得到的地质勘察资料和原地应力实测资料对深部核心区的应力状态予以估算和预测。

关于工程区原地应力状态的预测，国内外科学家均开展了大量的研究工作。最常见的预测方法就是利用自重应力进行预测。但是很明显，这种预测方法有很大的局限性，众多研究也表明，水平应力普遍存在于地壳岩体中，而且大于自重应力^[1-4]。随着测试数据的增多，国内外科学家们根据自己收集积累的应力数据编辑了很多侧压力系数(水平应力与垂直应力之比)和水平应力量值随深度变化的经验公式，具体的数据汇总可参考文献[3, 4]，这些经验公式均可以用来预测相应区域的地应力状态。McCutchen 构建了自重球壳模型来预测地壳中水平应力随深度的分布关系^[5]。Shoerey 在 McCutchen 研究成果的基础上，提出了静态黏弹热应力模型^[6]。由于 Shoerey 模型中包括了多个参数，特别是相对于 McCutchen 模型，增加了岩石弹性模量和地温梯度 2 个参数，其预测结果与实际的观测结果更为吻合，例如利用 Shoerey 模型计算得到的地表附近的应力为 11 MPa，与测量得到的地表最大水平应力 10 MPa 结果十分接近^[4,5]。

本文针对国内的工程实践环境提出一种方便简洁的深埋隧道工程区地应力场预测方法和可实现的执行步骤，利用有限的实测资料对隧道工程区未开展实测工作的区域开展较为可靠的地应力状态预测，为其它工程实践提供一些参考。关于工程区地应力状态的预测，笔者曾在文献[7, 8]中展开过一些论述，但是不够全面。

1 深埋隧道工程区地应力状态预测理论与方法

地应力参数是一个张量，因此关于工程区地应力的状态的预测包括 6 个参数的估算和预测，即 3 个主应力(σ_1 , σ_2 , σ_3 或者 S_H , S_h , S_V) 和 3 个主应力方向的预测。实际上，对地应力状态准确测量和预测是不可能的，Haimson^[9]在不同场合强调这个观点，所有的应力测量和估算方法只能尽可能地揭示工程区地应力状态。因此在开展工程区地应力场预测时需要做以

下假设：①地应力张量中的其中一个主应力为垂直应力，等于上覆岩体自重；②工程区岩体可以近似地看作连续介质，介质内存在的应力状态是相对稳定且连续的；③工程岩体的不均质性和各向异性属性对工程区地应力场的影响程度相对较小且为局部影响。这 3 个假设也限定了本方法的应用范围。关于假设①，文献[2~4]均对该问题进行了详细的论述，在此不再进行介绍。

工程区地应力场的预测分析流程以及各个步骤中所采用的方法如图 1 所示。下面将分别按照各个步骤所应该采用的方法和所执行的工作内容对笔者所提出的工程区地应力场预测方法进行论述，论述过程中对假设②和假设③再进行进一步的分析论述。

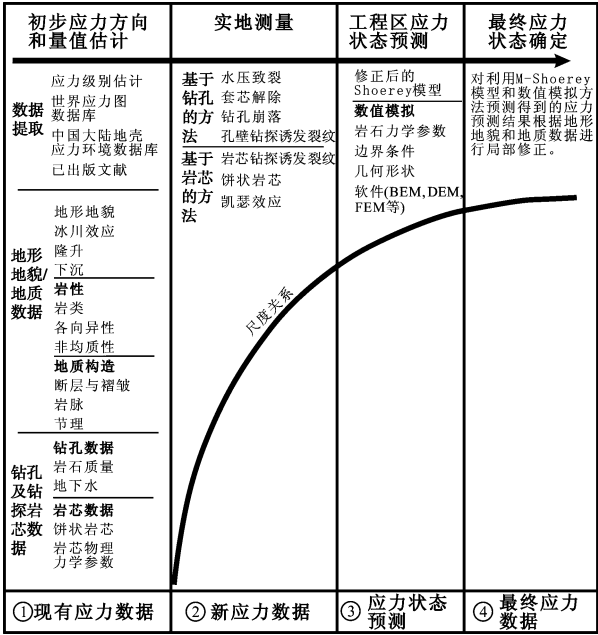


图 1 工程区原地应力场预测技术路线图

Fig. 1 Technical flow chart for prediction of in-situ stress state of an engineering area

在预测过程中，首先对工程区所述的应力分区特征进行判断。该项工作可以参考世界应力图(WSM)^[3]项目和大陆地壳应力环境数据库^[10]，通过这 2 个数据库，就能大概获得工程区所属的应力分区以及该区域的断层应力状态^[4, 10]，同时可以得到工程区周边区域的地应力场方向。同时还可以通过已出版文献的搜集，初步得到该区域的应力状态的认识。地质数据对利用 Anderson 理论^[4, 10]推测区域地应力场方向很有帮助。Anderson 理论同时也是前面理论假设②的重要理论基础，即对于一个相对独立的地质块体，应力状态是相对稳定的，并且与断层的空间分布密切相关且可以定量描述。符合 Anderson 理论的断层，中间主应力与断层面共面，断层面的摩擦系数为 0.6~1.0 之间，最大主应力与断层面的夹角较小，一般为 23°~30°^[3-4]。地形地貌、地质数据、钻孔及钻孔岩芯数据有助于在第四步校正局部区域的应力状态预测数据。

这里采用的是有限度的预测和估算,故还是需要能开展地应力测量的区域尽可能地开展原地应力测量。原地应力测量方法中最常见的方法为水压致裂法和套芯应力解除法,可以参见文献[11, 12],对于图1中涉及的其它几种方法,可以参考文献[3, 4]。测量得到的应力数据可以与构造应力分区特征和区域断层应力特征相对照,如果比较得到的结果是一致的,那么可以认为测点的应力状态与区域应力状态是一致的;如果不一致,那么就需要分析造成这种偏差的原因。

对于第3步,笔者这里推荐采用修正后的 Shoerey 模型及数值模拟方法。关于数值模拟方法笔者在文献[8]中已有过详细论述,也是大家所常用的工程区地应力场预测方法,但这种方法仅适合于面状工程区地应力场的预测,例如水电站坝址区或厂房区的应力场预测^[8]。对于长大深埋隧道,由于工程地质勘察工作相对来说是粗线条的,而且勘察钻孔布设十分离散,数值模拟方法由于比例尺和地质模型构建的问题,不是很适合于深埋隧道工程区地应力场预测,故这里笔者推荐修正后的 Shoerey 模型,后续的实例也基于修正后 Shoerey 模型来开展深埋隧道工程区应力预测。为了引述方便,这里简单回顾一下修正后的 Shoerey 模型^[6]。

对于各向同性材料 Shoerey 模型可表达为

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma z + \frac{\beta EG}{1-\nu} (z+1000), \quad (1)$$

式(1)可以转换为

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \frac{\beta EG}{1-\nu} (z+1000)。 \quad (2)$$

式中 S_h 为地壳中的水平应力; β 为岩石线性热膨胀系数; ν 为泊松比; γ 为岩石重度; z 为埋深; E 为岩石弹性模量; G 为地壳中地温梯度; $S_v = \gamma z$ 。

对于浅层地壳,各类岩石的线性热膨胀系数一般为 $8.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。一般岩层中的地温梯度为 $0.024^\circ\text{C}/\text{m}$,煤炭中的地温梯度为 $0.03^\circ\text{C}/\text{m}$ 。将以上参数代入式(2),并略加转换,浅层地壳水平应力均值与垂直应力的比值 k (平均侧压力系数)随深部的变化可以表达为

$$k = 0.25 + 7E(z)(0.001 + 1/z), \quad (3)$$

式中, $E(z)$ 表示特定深度上岩石的平均弹性模量。此处要说明的是 Shoerey 在研究过程中并没有明确岩石弹性模量和岩体弹性模量和变形模量的区别,Shoerey 也意识到了弹性模量对水平应力分布的影响^[13],并对这一问题进行了深入研究,但其研究工作还是没有很好地解决该问题。通过文献[3, 4, 13]研究成果可知,到了地壳内的一定深度,水平应力和垂直应力之间的比值接近一个常数,也就是式(4)中的 E 到达一定的地壳深度以后,值会缓慢增加,而且不小于一个常数。按照 Shoerey 模型的基本原理和对原地应力场的

认识,笔者认为式(4)中的 E 应使用“原位岩体”的弹性模量。由于 Shoerey 模型是一个理论模型,所有的参数都是基于弹性力学解得到的,理论值与实测值有较大的差别,而且原地应力实测通常在岩体中进行,测试数据包含了大量的岩体结构面和地质历史信息,故需要将 Shoerey 模型中的理论值和原地应力实测值通过部分参数的修正来建立联系。在所有的岩体力学参数中,岩体弹性模量是唯一能表征这些信息的参数,故需要对其进行修正。Hoek 等对岩体的变形模量进行了详细的分析研究,并利用大量的统计分析得出原位岩体的变形模量与岩体 GSI 指标之间的关系^[14]:

$$E_m = 1000 \left(\frac{1-D/2}{1 + e^{(75+25D-GSI)/11}} \right)。 \quad (4)$$

式中 E_m 为原位岩体变形模量; D 为岩体扰动指数, D 值的范围为 $0 \sim 1$, 取决于外界因素对原位岩体的扰动程度,如爆破、岩体开挖、岩体卸荷等行为; GSI 为地质体强度指标,见文献[14]。式(4)补充了 Shoerey 模型在岩体弹性模量上的考虑不周。

对于同一构造区域,如果岩性不同,深度不同,可以利用式(5)和有限的原地应力实测数据进行原地应力状态的预测,并利 E_m 代替 $E(z)$,进而得到

$$k_2 = k_1 \frac{0.25 + 7E_{m2}(0.001 + 1/z_2)}{0.25 + 7E_{m1}(0.001 + 1/z_1)}。 \quad (5)$$

式中 k_1, k_2 分别是第1个地点和第2个地点的平均侧压力系数; E_{m1}, E_{m2} 分别指第1个地点和第2个地点的岩体弹性模量; z_1, z_2 分别指第1个地点和第2个地点的埋深。式(5)即为修正后的 Shoerey 模型,可以用于浅表地壳工程区地应力场的预测和分析。式(5)考虑了深度 z 和岩体弹性模量 E_m 两个参数,而且 E_m 也是一个随深度变化的参数,同时又包括岩性、结构面等信息,就能很好地拟合和预测原地应力分布随深度和位置变化的趋势。而 k 也反映了部分区域断层应力状态和 Anderson 理论的信息,故能非常好地开展线状深埋隧道工程区的地应力状态的预测。

最后一个步骤是利用工程地质资料对预测得到的应力量值和方向进行适当地调整和校正。例如在小规模的断层或者岩脉附近,应力方向可能会发生偏转^[2-3],在地质褶皱核部,应力量值会高于其它部位^[3]等,这个可以参考文献[2, 3]对这些问题的研究结论。但是对于一般的结构面,可以不进行校正,因为式(5)中的岩体强度已经考虑了结构面对量值的影响,而结构面对应力场方向的影响一般可以忽略不计。下面就通过一个线状深埋隧道工程实例来展示工程区应力场预测的思路和方法。

2 工程区概况

某水电站工程位于巴基斯坦东北部的巴控克什米

尔 (AJK) 地区。电站坐落在印度河支流吉拉姆河上, 为长隧洞引水式水电站。工程区附近主要出露岩性为上第三系穆里 (Murree) 组。穆里 (Murree) 组地层年代为下中新统 (N_1^1), 由砂岩、泥质粉砂岩、泥岩、页岩组成。在坝址区、隧洞中下游段和厂房区出露该组岩层, 砂岩、泥质粉砂岩、泥岩、页岩互层状展布, 厚达几千米, 其中砂岩可以分为 I 类砂岩和 II 类砂岩。

工程区隶属于青藏高原西缘, 在该区域内, 印度板块向东北方向俯冲推挤, 是该区域构造应力场的主要力源。在这一力源的作用下, 工程区周边范围内形成了一系列的逆冲断层和轴向 NW 倾向 NE 的褶皱。工程区位于 Kashmir-Hazara 共轴体上, 主边界断裂 (MBT) 将之包围成环形带, 在并合构造周围还有数条其它逆冲断层, 其中大的断层有: 东侧的喜马拉雅前缘断层 (HFT) 和西侧的吉拉姆断层 (JF), 这些断层走向近平行, 均为 NW—SE 向, 倾向 NE, 如图 2 所示。

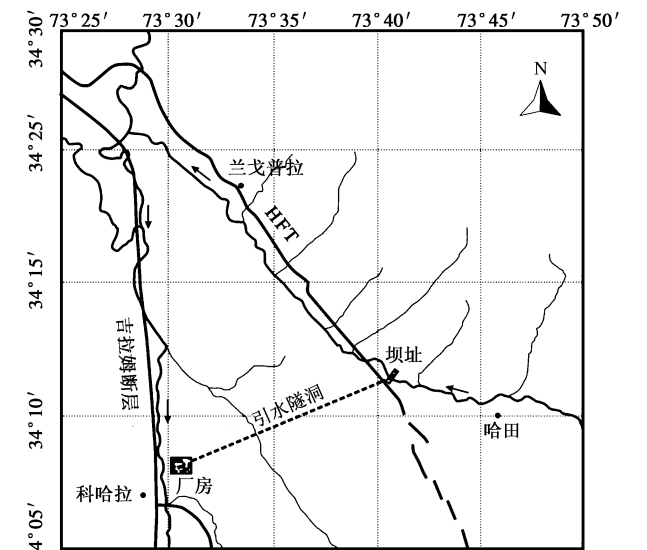


图 2 工程区地理位置及周边地质构造纲要图
Fig. 2 Geographical location of engineering area and surrounding geotectonic structure

引水隧洞为双洞平行布置, 单洞长约 17.5 km, 圆形, 开挖洞径约 10.5 m, 最大埋深为 1150 m。隧洞岩体结构类型以层状 (中厚层—互层) 结构为主, 部分为薄层状结构, 在断层发育地段为镶嵌结构或碎裂结构。综合分析岩体强度、结构面发育程度、地下水等因素, 初步分类洞室围岩以 III—IV 类为主; 但在穿越 HFT 断层段、穿越 Agar 峡谷等段, 估计洞室围岩为 IV—V 类。

3 工程区原地应力实测情况简介

在工程初勘可研阶段, 工程设计单位在厂房区、坝址区和隧道所穿越的 Agar 峡谷布置了 3 个浅钻孔

($<300\text{ m}$) 进行地应力测量, 钻孔所揭露的岩性为前面介绍的 I 类砂岩和 II 类砂岩。测试设备、测试步骤和参数计算严格执行国际岩石力学学会推荐的技术标准^[1]和中国国标。原地应力测量参数取值和计算严格按照文献[11]所提供的公式和原则执行, 垂直应力 S_v 由上覆岩体重度估算, 其中 ρ 取 2.50 g/cm^3 , 计算公式及过程下同。测量结果详见表 1。

表 1 3 个钻孔 ZK1、ZK2 和 ZK3 的应力测量值统计表
Table 1 Summary of maximum and minimum horizontal principal stresses from Boreholes ZK1, ZK2 and ZK3

钻孔 编号	岩性	深度	S_H	S_h	S_v	k_H	k_h	S_H 方位
坝址 ZK1	砂岩 泥岩	125.8	5.40	3.74	3.09	1.75	1.21	N85° E
		127.4	6.22	4.55	3.13	1.99	1.45	N89° E
		129.4	6.54	4.47	3.18	2.06	1.41	N87° W
	均值	岩芯多呈碎块状, 掉块严重				1.93	1.36	N89° E
引水隧 洞 ZK2	砂岩 泥岩	221.4	7.20	4.99	5.43	1.33	0.92	
		229.0	7.37	4.56	5.62	1.31	0.81	
		230.6	7.52	4.74	5.66	1.33	0.84	N70° E
		234.8	7.78	4.63	5.76	1.35	0.80	
		254.1	9.17	5.71	6.24	1.47	0.92	N81° E
		264.2	9.36	5.65	6.48	1.44	0.87	
		271.0	9.49	6.08	6.65	1.43	0.91	
		284.0	10.12	6.49	6.97	1.45	0.93	N60° E
厂房 ZK3	砂岩 泥岩	均值	岩芯呈短柱状及碎块状			1.39	0.88	N70° E
		250.9	8.73	4.96	6.16	1.42	0.81	
		296.3	9.68	5.81	7.27	1.33	0.80	N72° E
		325.6	11.26	6.69	7.99	1.41	0.84	N81° E
	均值	岩芯呈短柱状及碎块状				1.45	0.86	N76° E

注: $k_H = S_H/S_v$, $k_h = S_h/S_v$ 。
由表 1 可知, 在钻孔 ZK1 的测试深度范围内, 三向主应力之间的大小关系表现为 $S_H > S_h > S_v$; 而钻孔 ZK2 和 ZK3 在测量深度范围内反应的三向主应力之间的大小关系表现为 $S_H > S_v > S_h$; 这表明该地区在地壳浅部水平应力占主导地位, 现今地应力作用较为强烈。同时由表 1 可知, 实测最大主应力方向 (即破裂方位), 优势方位为 $N70.3^\circ - 89^\circ\text{ E}$ 。

由于开展工程区应力实测所在钻孔的深度均较浅, 需要其它方面的研究成果来对该工程区域的应力状态予以确认。与此同时, 引水隧道长达 17.5 km, 大部分深埋洞段均无法直接开展地应力测量工作, 因此需要通过预测对深埋地段的应力量值和方向进行估计以方便工程设计单位开展后续的研究工作。

4 工程区原地应力状态的预测

4.1 工程区应力方向的分析

为了更好地了解该区域的区域应力场状态, 笔者查阅了世界应力图数据库^[3]关于该区域应力状态的数

据, 数据显示该水电站附近区域的震源机制解给出的最大水平主应力方向为 NE 向, 断层应力状态主要为逆断层应力状态。同时通过对工程地质报告中记录的新近发生的地震活动断层的分析可知, NE 向的逆断层应力状态也是有利于该区域断层的活动。而坝址区的节理面统计主导方向为 NW 向, NE 向的区域应力场方向与该方向垂直, 这一结果与 Anderson 理论利用逆断层走向推测的方向也是一致的。而该水电站内三个钻孔获得的应力场方向为 $N70.3^{\circ}-89^{\circ} E$, 为 NEE 向, 近东西向。说明工程区应力场仍然主要受到构造水平应力的作用, 与大的区域构造应力场基本一致。同时钻孔水压致裂实测数据与区域构造应力场方向有一定差别, 说明对于地壳浅部钻孔所获得的地应力方向一方面会受到大的区域构造应力背景场的影响, 同时也会受到地表地形地貌和赋存岩性的影响而发生了偏转。可见实测最大主应力方向 (即破裂方位) 十分符合该工程区地应力的赋存规律, 为 NE—NEE 向。

4.2 引水隧道沿线应力量值预测

引水隧道沿线应力量值的预测采用修正后的 Sheorey 模型, 前面第 2 节对其进行了简要介绍。其中的岩体强度估算采用基于 Hoek-Brown 强度准则的经验强度估算法, 国内外均有大量的文献对其介绍、讨论和分析。

在对引水隧道工程区沿线的应力量值预测中, 首先对基准地应力测点钻孔 ZK1 的岩体强度 (E_{m1}) 进行了估算, 本次估算主要参考钻孔 ZK1 的测量资料, 因为其测试曲线较为标准, 同时揭示的应力状态也符合该区域的断层应力状态, 即应力状态有利于逆冲断层的活动。随后利用工程地质勘察资料和隧道剖面图对引水隧道沿线的每个小地质单元的岩体弹性模量 E_{m2} 进行估算, 并通过隧道剖面图取得隧道洞身处的埋深 z , 然后利用式 (5) 计算隧道沿线不同地质单元处的应力量值。在岩体强度估算过程中, 使用 RocLab 软件估算, 该软件内置了 Hoek-Brown 经验强度准则

的所有参数, 使用快捷方便。在预测过程中分别计算最大水平主应力 S_H 与垂直主应力 S_V 的比值 k_H 和最小水平主应力 S_h 与垂直主应力 S_V 的比值 k_h 来预测最大最小水平主应力, 而这种处理方法是完全符合实测地应力数据的分布规律的^[2-3]。

依据前面所提出的分析方法和理论, 对该引水隧道工程区沿线的地应力数据进行预测分析, 预测结果如图 3 所示。

4.3 预测结果讨论

通过前面的论述可知, 笔者利用 Anderson 断层力学理论和修正后的 Sheorey 模型很好地预测了该水电站引水隧道轴线部位的应力状态, 这种预测也是基于前面的假设②③开展的。对于本文中的实例来说, 工程区位于 2 个大型断裂分割的地质单元上, 这 2 个断裂带的力源性质统一且稳定, 在这种前提条件下, 就可以认为该隧道工程区范围内的应力状态是稳定且连续的, 就可以利用 Anderson 理论推测相应的主应力方位。通过工程地质勘察的剖面图 (图 3) 可知, 在整个隧道的穿越区, 主要为多个褶皱的叠加和岩性变化的互层分布, 而这种地质结构不会对整个工程区的应力场发生大的影响^[2-3], 是满足假设③的。根据文献[2, 3]对前人研究成果的总结, 在褶皱的核部、岩体质量较高的部位, 应力值均会明显高于平均水平, 因此建议对这些关键部位, 可以按照适当的比例增加预测值。笔者在预测过程中, 对深埋部位的岩体质量相对于浅埋部位的岩体质量适当地进行了提高。与此同时, 实例研究中的这种褶皱倾斜地层也会影响局部区域的应力方向^[2-3], 而这种应力方向的偏转在深埋洞身段可能会对围岩稳定性发生影响, 需要结合其它手段予以深入研究。

由于在预测中只采用了钻孔 ZK1 的实测结果, 那么可以使用 ZK2 和 ZK3 的实测结果与预测结果进行对比分析。利用预测模型得到 ZK2 处洞身部位的最大最小水平主应力应力值分别为 8.30, 5.87 MPa; 而 ZK3

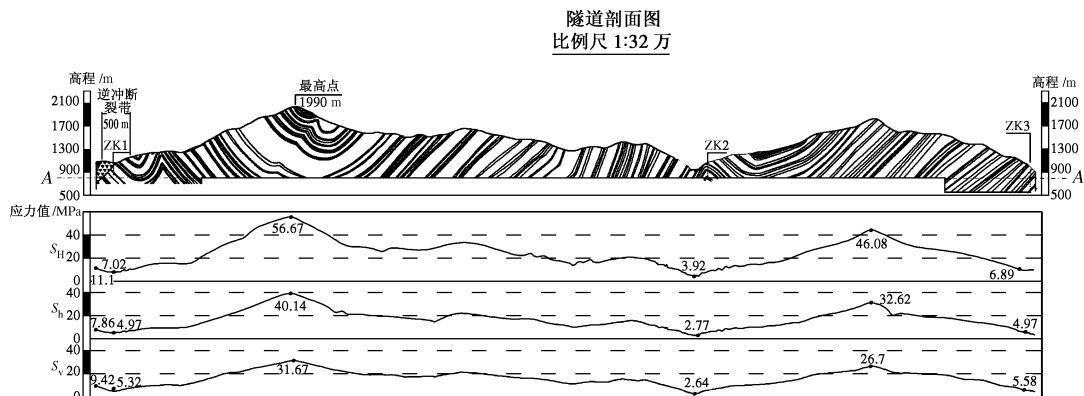


图 3 引水隧道沿线地应力分布图 (图中 S_H 、 S_h 和 S_V 分别指最大最小水平主应力和垂直主应力, A-A' 为引水隧道轴线)

Fig. 3 Profile of stress distribution along axis of water tunnel

处洞身部位的最大最小水平主应力应力值分别为 12.56, 8.89 MPa, 与前面的数据表对比可知, 预测值完全落在实测值所限定的应力值范围内; 而钻孔 ZK2 和 ZK3 中测得的最大最小水平主应力的平均值分别为 8.50, 5.36, 11.01, 6.55 MPa, 与预测值吻合地相对较好。

5 结 论

本文通过工程区地应力状态预测理论、步骤和实例的分析, 得到以下 3 点结论。

(1) 基于已经成熟的世界应力图数据库和中国大陆地壳应力环境数据库, 利用 Anderson 理论、修正后的 Shorey 模型和数值模拟手段, 结合有限的实测资料就可以开展线状工程区未知区域的地应力状态的预测分析。通过本文中的实例使用效果来看, 使用效果较好, 能较好地解决线状工程的工程区应力场预测问题。

(2) 某水电站工程区隶属于青藏高原西缘。3 个钻孔的水压致裂原地应力实测显示三向主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_V$ 或 $S_H > S_V > S_h$, 测量结果均表明最大水平主应力占主导地位, 该工程区的水平构造作用力明显。浅部应力场受地形地貌影响, 趋向于 NEE 向, 而深部应力场主要受大区域构造应力场影响, 为 NE 向。

(3) 通过修正后的 Sheorey 模型对引水隧洞沿线的工程区应力状态进行了预测。预测结果显示, 在埋深最大的地方, 最大最小水平应力值分别为 56.70, 40.14 MPa, 在其它埋深超过 500 m 的地方, 应力值也偏高, 需要引起设计和施工单位的重视。

地壳中的应力分布状态是未知的, 而且每种估算和测试方法都有其优点和局限性, 这里把这种线状深埋隧道工程区域应力场确定问题的解决思路和方法提出来, 供其它工程参考使用。

参考文献:

- [1] 王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(9): 3016 - 3027. (WANG Yan-hua, CUI Xiao-feng, HU Xing-ping, et al. Study on the stress state in upper crust of China main land based on in-situ stress measurement[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(9): 3016 - 3027. (in Chinese))
- [2] AMADEI B, STEPHANSSON O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [3] ZANG A, STEPHANSSON O. Stress field of the earth's crust[M]. London & New York: Springer, 2010.
- [4] ZOBACK M D. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] MCCUTHEN W R. Some elements of a theory for in-situ stress[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1982, **19**: 201 - 203.
- [6] SHEOREY P R. A theory for in-situ stress in isotropic and transversely isotropic rock[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, **31**(1): 23 - 34.
- [7] 王成虎, 郭啟良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2359 - 2364. (WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, DING Li-feng, et al. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2359 - 236. (in Chinese))
- [8] 王成虎, 张彦山, 郭啟良, 等. 工程区地应力场的综合分析研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1562 - 1568. (WANG Cheng-hu, ZHANG Yan-shan, GUO Qi-liang et al, New integrated analysis method to analyze stress regime of engineering area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1562 - 1568. (in Chinese))
- [9] HAIMSON B C. The effect of lithology, inhomogeneity, topography, and faults, on in situ stress measurements by hydraulic fracturing, and the importance of correct data interpretation and independent evidence in support of results [C]// Rock Stress and Earthquakes. London: Taylor & Francis Group, 2010.
- [10] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 39 - 47. (XIE Fu-ren, CHEN Qun-ce, CUI Xiao-feng, et al. Crustal stress in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 39 - 47. (in Chinese))
- [11] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, **40**(7/8): 1011 - 1020.
- [12] SJÖBERG J, CHRISTIANSSON R, HUDSON J A. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: Overcoring methods[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, **40**(7/8): 999 - 1010.
- [13] SHEOREY P R, MURALIMOHAN G, SINHA A. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, **38**(8): 1211 - 1216.
- [14] HOEK E, DIEDERICHSB M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, **43**(1): 203 - 215.