

基于改进 Sheorey 模型的地应力估算方法及应用

裴启涛¹ 丁秀丽¹ 黄书岭¹ 张雨霆¹ 罗超文²

(1 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2 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 地应力是地下工程的基本荷载之一, 垂直应力一般可采用上覆岩层压力计算, 而水平应力却很难确定。Sheorey 建立的静弹性热力学模型在国际上认可度非常高, 但该模型未涉及构造作用影响的区域性差异, 且没有解决最大、最小水平主应力的各自分布特征问题。文章通过引入区域构造应力修正系数, 并结合弹性力学理论, 对 Sheorey 模型进行改进, 提出了弹性岩层中水平地应力估算方法。为进一步考察该方法的有效性 with 实用性, 以福建梅花山隧道为依托, 进行了原岩应力及岩体模量现场测试工作, 并将实测地应力值与计算值进行对比。研究结果表明: 理论计算值和实测值存在一定的误差, 这主要是由局部地质构造及岩体非均匀性引起的, 但在误差允许范围内, 仍可满足工程精度要求。

关键词 铁路隧道 地下工程 地应力 弹性岩层 Sheorey 模型 估算方法

中图分类号: TU459; U451 **文献标识码**: A

1 引言

地应力是地质环境与地壳稳定性评价、地质工程设计和施工的重要基础资料之一, 其不仅是岩土工程开挖引起的围岩变形和破坏的基本荷载, 也是科学确定地下工程岩(土)体力学性质, 进行工程设计、施工、围岩稳定性分析和科学化决策的必要前提^[1-3]。随着地下空间资源开发逐步向深部推进, 以及工程安全问题日益得到重视, 地应力的分布特征已成为国内外众多学者和工程界所关注的热点之一。

地壳浅层应力一般处于三向不等压应力状态。现场实测成果表明^[4], 垂直应力可由上覆岩层平均

容重乘以其深度来估算。然而, 水平地应力的影响因素较多, 诸如板块运动、地质构造、地形地貌及岩性等, 其量值很难估算。围绕这一难题, 国内外学者从不同的角度采用不同的方法进行了有益探讨, 取得了丰硕的研究成果。国外学者 T. Karl 和 F. E. Richart (1952)^[5]认为, 在未受扰动的水平状沉积岩中, 水平应力应为垂直应力的 1/3; E. T. Brown 和 E. Hoek (1978)^[6]通过对全球大量的地应力实测数据进行统计和分析, 建立了水平应力均值与垂直应力的比值 k ($k=(\sigma_{h1}+\sigma_{h2})/(2\sigma_v)$) 随埋深的变化关系; P.R. Sheorey (1994)^[7]考虑了地壳曲率、岩层弹性参数和热膨胀系数等变化, 从理论上推导了水平应力均值与垂

修改稿返回日期: 2017-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401802, 2016YFC0401804); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017030/YT);

国家自然科学基金青年科学基金项目(51609018)。

作者简介: 裴启涛 (1986-), 男, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程与地质灾害方面的研究工作, E-mail: pq01@163.com。

直应力之比的表达式。在国内,朱焕春和陶振宇(1994)^[8]根据全球地应力实测资料,发现不同岩性地应力存在显著的差异性;景锋等(2007)^[9]认为采用 σ_{H}/σ_{V} 、 σ_{h}/σ_{v} 更能反映我国水平构造应力场的差异性特征;李文平(2000)^[10]提出了一种由少量硬岩层实测地应力值估算软岩层的地应力值方法;朱哲明等(2012)^[11]认为可以利用岩石断裂强度来估算岩体水平应力范围;王空前^[12]、王章琼等^[13]分别从岩层倾角及裂隙岩体渗透性角度研究了其对地应力的影响,并在实际工程中进行了应用。可见,目前在水平地应力分布规律方面已取得了较多的研究成果。然而,现有的地应力统计成果大部分仅反映了对深度的影响,这对于地应力实测资料有限、地质构造作用差异明显、地应力分布存在明显区域性特征的工程而言,其统计结果及分布形式很难与实际工程相吻合;此外,水压致裂法和应力解除法是地应力测量的两种主要方法,但受场地和经费等限制,测点的布置范围及数量有限,且这两种地应力测试方法实际上仅适用于硬岩,而软岩及破碎岩层中的地应力无法直接获取。

本文研究的目的是提出一种弹性岩层中水平最大、最小地应力的估算方法,并对福建梅花山隧道进行现场测试,进一步验证该方法的有效性和合理性,同时能够为地下工程地应力的合理确定及应用研究提供借鉴。

2 改进 Sheorey 模型的地应力估算方法

2.1 Sheorey 静弹性热力学模型原理及存在的不足

现有研究表明,地球内部结构可简化为一同心状圈层构造,从地表到地心可进一步划分为地壳、地幔和地核三个部分。大陆地壳的平均厚度约为 35 km,地幔厚度约为 2 900 km。将地壳作为充满不可压缩的液态固体球壳,相应的平衡方程为^[14]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2(\sigma_\theta - \sigma_r)}{r} - \gamma = 0 \quad (1)$$

式中: σ_r 为极坐标下的径向应力; σ_θ 为切向应力。假设径向位移为 u ,则有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu) \frac{du}{dr} + 2\nu \frac{u}{r} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Sheorey 根据地球构造及物质组成,将地球假设为一个球形壳体,同时考虑了不同埋深处的岩层弹性参数以及地温梯度和热膨胀系数等对地应力的影

响,建立了静弹性热应力模型^[15]。该模型的岩层结构如图 1 所示,各岩层厚度及参数见表 1。为了便于后续研究,该模型的基本原理简述如下^[7]:

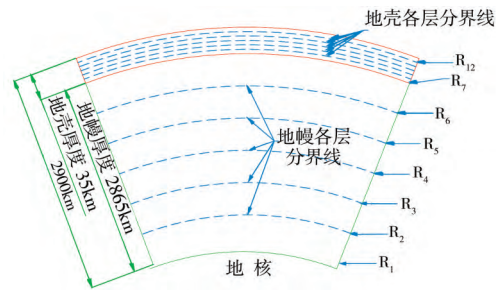


图 1 地球球壳模型

Fig.1 Spherical shell model of the earth

表 1 球壳模型各向同性岩层的不同参数取值^[7]

Table 1 Values of different parameters for isotropic rocks in the spherical shell model of the earth^[7]

类型	S_i	$\alpha/ (10^{-5}/^{\circ}\text{C})$	E/GPa	$R/10^3\text{km}$	$\gamma/ (\text{MPa/m})$
地幔	1	2.4	760	3.47	0.052
	2	1.9	700	3.87	0.048
	3	1.6	610	4.37	0.045
	4	1.35	520	4.87	0.043
	5	1.25	360	5.37	0.040
	6	1.2	200	5.958	0.037
地壳	7	0.77	20	6.335	0.027
	8	0	30	6.34	0.027
	9	2.2	40	6.346	0.027
	10	1.5	45	6.352	0.027
	11	0.9	50	6.358	0.027
	12	0.6	50	6.364	0.027

注: S_i 为岩层编号; α 为热膨胀系数; E 为弹性模量; R 为距地球中心的径向距离; γ 为岩层单位重度;下同。

对于径向应力 σ_{ri} ,可依据上覆岩层自重进行计算,结合图 1,不同埋深岩层的 σ_{ri} 表示如下:

地壳($i=7\sim 12$):

$$\sigma_{ri} = -\gamma(R-r) \quad (3)$$

地幔($i=1\sim 6$):

$$\sigma_{ri} = -p_i + \gamma_i r \quad (4)$$

其中: $p_6 = \gamma(R-R_7) + \gamma_6 R_7$,

$$p_i = p_{i+1} + (\gamma_i - \gamma_{i+1})R_{i+1} = p_6 + \sum_{j=i}^5 (\gamma_j - \gamma_{j+1})R_{j+1}$$

不同埋深岩层 S_i 的地温变化可表示为:

地壳 ($i = 7 \sim 12$):

$$T_3 = G_3(R-r) \quad (5)$$

地幔 ($i = 6$):

$$T_2 = G_3(R-R_7) + G_2(R_7-r) \quad (6)$$

地幔 ($i = 1 \sim 5$):

$$T_1 = G_3(R-R_7) + G_2(R_7-R_6) + G_1(R_6-r) \quad (7)$$

式中: $G_1=0.008 \text{ } ^\circ\text{C/m}$, $G_2=0.003 \text{ } ^\circ\text{C/m}$, $G_3=0.027 \text{ } ^\circ\text{C/m}$, 地球半径 $R=6\ 371 \text{ km}$ 。

由于地幔中的岩石处于塑性状态,可认为其满足静水压力条件,即 $\sigma_r = \sigma_\theta$ 。则对于岩层 S_i ($i = 1 \sim 5$),式(2)可变为^[14]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_i}{dr} - \alpha_i T_1 &= \frac{1}{E_i} (\sigma_{ri} - 2\nu'\sigma_{\theta i}) \\ \frac{u_i}{r} - \alpha_i T_1 &= \frac{1}{E_i} [(1-\nu')\sigma_{\theta i} - \nu'\sigma_{ri}] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ν' 为地幔中的岩石泊松比。

位移边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} (u)_{r=R_i} &= 0 \\ (u_i)_{r=R_{i+1}} &= (u_{i+1})_{r=R_{i+1}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(4)、式(7)代入式(8),并积分可得:

$$u_i = \frac{1-2\nu'}{E_i} (-p_i r + \frac{\gamma_i}{2} r^2) + \alpha_i [t_i r + G_i (R_6 r - \frac{r^2}{2})] + C_i \quad (10)$$

利用位移边界式(9),可以确定积分常数 C_i ($i = 1 \sim 5$)。

对于岩层 S_6 ,根据式(6)、式(10),可得:

$$u_6 = \frac{1-2\nu'}{E_6} (-p_6 r + \frac{\gamma_6}{2} r^2) + \alpha_6 [t_2 r + G_2 (R_7 r - \frac{r^2}{2})] + C_6 \quad (11)$$

结合位移连续性条件 $(u_5)_{r=R_6} = (u_6)_{r=R_6}$,可确定计算常数 C_6 。

当考虑温度影响时,式(2)可进一步表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_i}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\frac{du_i}{dr} + 2\nu\frac{u_i}{r} - (1+\nu)\alpha_i T_3] \\ \sigma_\theta &= \frac{E_i}{(1+\nu)(1-2\nu)} [\nu\frac{du_i}{dr} + \frac{u_i}{r} - (1+\nu)\alpha_i T_3] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将上覆岩层自重及式(5)代入式(12)并积分得:

$$u_i = C_i r^{-(2\nu'/1-\nu')} + [\alpha_i G_3 - \frac{\gamma(1-2\nu)}{E_i}] (Rr - \frac{1+\nu}{2} r^2) \quad (13)$$

同理,将式(9)、式(11)代入式(13),可确定计算常数 C_7 。利用位移边界条件可确定积分常数 C_i ($i = 8 \sim 12$)。

将式(5)、式(13)代入式(12),并利用上覆岩层自重求解径向应力可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r12} &= -\gamma(R-r) \\ \sigma_{\theta 12} &= \frac{E_{12}}{1-\nu} C_{12} r^{-(1+\nu)/(1-\nu)} - \gamma R + \frac{r}{2} [\gamma(1+2\nu) + \alpha_{12} E_{12} G_3] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

利用计算机程序编程,将表1中的数据代入计算,并对结果进行整理,最终得出水平应力均值与垂直应力的比值 k 的表达式:

$$k = 0.25 + 7E(0.001 + 1/H) \quad (15)$$

对于地壳表层岩体, k 系数更为一般的形式为:

$$k = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{\beta E G}{(1-\nu)\gamma} (1 + \frac{1000}{H}) \quad (16)$$

结合式(15),不同弹性模量下的 k 值随上覆埋深的变化关系见图2。可见,该模型较好地拟合了 Hoek & Brown 对全球不同地区水平地应力均值与垂直地应力的比值随埋深的变化规律,进一步说明了将该模型用于地应力预测的合理性及可行性。

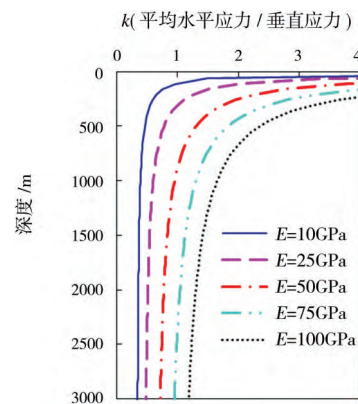


图2 不同弹性模量下的 k 值随埋深的变化关系

Fig.2 Values of k varying with the buried depth for different elastic moduli

虽然 Sheorey 模型估算的水平地应力均值与垂直地应力的比值 k 与实测变化趋势总体一致,但该模型仍存在一些不足,具体如下:

(1) 式(16)中采用的是岩石弹性模量,未合理反映岩体结构面对地应力的扰动影响,在地表浅部获得的 k 值偏大,而在地壳深处, k 值一般不会趋近于某一常数,与实际不符。可见,需要进一步明确岩石弹性模量与岩体弹性模量之间的关系。

(2) 式(16)中未能合理反映由于构造作用引起的最大、最小水平应力的差异性。Sheorey 也意识到这一问题,并对该问题进行了深入的探讨^[16],但其研究工作未能从根本上解决这一问题。

(3) 由于高山、峡谷等地形地貌的影响,地壳浅表层的构造应力大小和方向分布差异较大,使得式(16)的计算结果与实测数据偏差明显,这在一定程度上限制了该模型的实用性,该问题亟待解决。

2.2 Sheory 理论模型的改进方法

朱焕春等^[17]研究表明,在水平构造应力 σ 随埋深 H 的变化规律 $\sigma = aH + b$ 中,构造应力的贡献不仅由 b 直接反映出来,而且对系数 a 也有较大的影响。即,对于某一特定区域而言,构造应力大小可从系数 a 、 b 值上体现。令 $\sigma_v = \gamma H$,则有:

$$\frac{\sigma}{\sigma_v} = \frac{a}{\gamma} + \frac{b}{\gamma H} \quad (17)$$

结合式(17)的表达式含义,通过引入区域构造应力修正系数 ξ 、 η ,用以反映不同构造作用下的水平应力分布的差异性,建立的一般情况下的 k 系数估算公式如下:

$$k = \lambda + \frac{\alpha E_m G}{(1-\nu)\gamma} \left(1 + \frac{1000}{H}\right) \times \xi + \eta \quad (18)$$

式中: E_m 为岩体弹性模量(当岩体受结构面影响较大时,采用岩体等效弹性模量,单位:MPa); λ 为水平地应力侧压系数; ξ 、 η 为构造应力修正系数,其大小可通过对该地区地应力实测值进行回归分析确定,也可查阅同一构造作用下邻近地区实测值确定。

当缺乏岩体弹性模量实测值时,可依据室内实验数据及现有成果综合确定。郭强和葛修润^[18]从损伤力学概念入手,推导了岩体弹性模量因子 E_m/E_i 与完整性指数 $RMDI$ 两者间的定量关系式,如下:

$$\frac{E_m}{E_i} = 0.73 \times RMDI - 0.079 \quad (19)$$

式中: E_i 为完整岩石岩性模量; $RMDI$ 为岩体完整性指数,依据文献[19]确定。

若资料中含有实测的岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 和模数比 MR ,则可利用式(20)对 E_i 进行估算:

$$E_i = MR \times \sigma_{ci} \quad (20)$$

2.3 弹性岩层水平地应力的估算方法

已有的研究果表明,水平方向的地应力主要由两部分组成,一是自重应力水平分量,二是构造水平应力。当工程区以自重应力场类型为主时,水平应力可通过岩体泊松效应较易确定;当工程区以构造应力场类型为主时,对于弹性状态下的岩层,其地应力估算公式如下^[10]:

$$\begin{cases} \sigma_v = \gamma H \\ \sigma_H = \lambda \sigma_v + \sigma_T \\ \sigma_h = \lambda(\sigma_v + \sigma_T) \end{cases} \quad (21)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力(MPa); σ_h 为最小水平主应力(MPa); σ_T 为水平构造应力(MPa);其余符号意义同上。

联立方程式(18)、(21)求解,可得:

$$\begin{cases} \sigma_H = \lambda \sigma_v + 2\alpha E_m G \xi (H + 1000) + 2\eta(1 - \nu) \\ \sigma_v = \gamma H \\ \sigma_h = \lambda \sigma_v + 2\lambda \alpha E_m G \xi (H + 1000) + 2\eta \nu \end{cases} \quad (22)$$

若在同一构造作用下某岩层深度为 H_1 ,弹性参数为 E_{m1} 、 α_1 、 ν_1 ,实测应力值为 σ_{H1} 、 σ_{h1} 和 σ_{v1} ,则对于相邻岩层深度为 H_2 ,岩层参数为 E_{m2} 、 α_2 、 ν_2 的应力值可采用公式(23)进行估算:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{H1}}{\sigma_{H2}} = \frac{\lambda_1 \sigma_{v1} + 2\alpha_1 E_{m1} G \xi (H_1 + 1000) + 2\eta(1 - \nu_1)}{\lambda_2 \sigma_{v2} + 2\alpha_2 E_{m2} G \xi (H_2 + 1000) + 2\eta(1 - \nu_2)} \\ \sigma_v = \gamma H_2 \\ \frac{\sigma_{h1}}{\sigma_{h2}} = \frac{\lambda_1 \sigma_{v1} + 2\lambda_1 \alpha_1 E_{m1} G \xi (H_1 + 1000) + 2\eta \nu_1}{\lambda_2 \sigma_{v2} + 2\lambda_2 \alpha_2 E_{m2} G \xi (H_2 + 1000) + 2\eta \nu_2} \end{cases} \quad (23)$$

3 工程应用

3.1 工程概况及地质条件

福建梅花山铁路隧道全长 15 780 m,为赣龙线全线最长的隧道。位于福建省连城、上杭县境内,进口位于连城县新泉镇向阳村,出口位于上杭县古田镇坪头村,里程 DK215+970 ~ DK229+750,隧道最大埋深 688.21 m。

隧道隧址区在大地构造上属于闽西南拗陷带,NE - NEE 向及 NNE 向断裂最为发育,总体控制着本区构造格局。梅花山隧道轴线方向 NW23° ~ NW46°,与线位相关的主要构造为姑田背斜,背斜轴向约 NE20°,位于赖坊-庙前断裂以东,北端受后期南北向构造的改造而偏转呈南北向。轴部以花岗岩闪长岩、花岗岩为主。

测试部位的隧道里程为 DK223+100,揭露的岩性为燕山早期(γ_5^2)花岗岩,弱风化,中粗粒结构,块状构造,岩质坚硬。

3.2 原位地应力及钻孔弹模测量结果分析

为了获得工程区地应力的分布特征,并对本文的估算方法进行检验,采用国际岩石力学学会推荐的水压致裂法进行地应力现场测试。在隧道里程 DK223+100 处分别布置了水平钻孔和铅直孔,并对铅直孔进行了钻孔弹模测试。铅直孔自隧道底部向下,测段范围为 443.9 ~ 481.9 m,水平孔从隧道边墙向内侧钻进,岩层上覆埋深为 439 m,最大水平深度为 33.9 m。

现场典型的水压致裂地应力实测曲线见图 3,部分水平钻孔实测地应力结果见表 2,铅直钻孔的实测地应力及岩体弹性模量结果见表 3^[15,20],铅直孔各深度段主应力随深度的变化情况如图 4 所示。

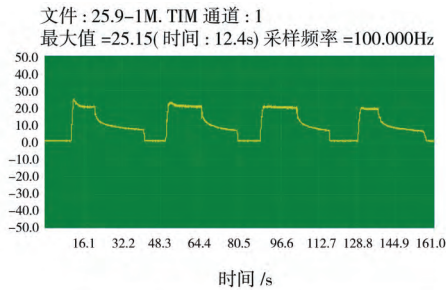


图3 水平孔25.9 m测试段处的压力—时间变化关系
Fig.3 Pressures varying with time at a depth of 25.9 m in a horizontal borehole

表2 水平孔地应力测试成果

Table 2 Measured in-situ stresses along a horizontal borehole

深度 /m	T /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_v /MPa	SH方向
25.9	5.85	15.42	11.40	11.41	NW250°
29.90	8.77	16.26	11.03	11.41	NW230°
33.90	7.10	15.71	11.41	11.41	NW240°

注:上覆岩层重度 r 取26 kN/m³,下同。

表3 铅直孔地应力测试成果

Table 3 Measured in-situ stresses along a vertical borehole

埋深/m	$E_{水平}$ /MPa	T /MPa	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_v /MPa	SH方向
443.9	38.53	3.91	3.48	2.46	11.54	-
445.9	30.15	3.04	7.91	6.27	11.59	-
447.9	37.92	1.38	20.48	11.78	11.65	-
449.9	58.68	3.98	24.98	12.87	11.70	-
451.9	42.95	7.03	22.75	12.02	11.75	-
453.9	55.07	9.01	13.63	8.93	11.80	-
455.9	64.45	4.68	19.21	10.31	11.85	-
457.9	52.52	2.05	16.27	8.81	11.91	-
459.9	43.21	2.46	16.87	9.08	11.96	-
461.9	46.12	2.79	17.71	9.22	12.01	-
463.9	51.59	5.10	17.90	9.45	12.06	-
465.9	49.9	3.52	18.11	9.77	12.11	NW69°
467.9	33.72	4.70	18.08	9.67	12.17	-
469.9	43.94	2.03	19.34	10.07	12.22	-
471.9	53.43	0.87	19.90	11.58	12.27	-
473.9	49.32	4.94	22.85	12.11	12.32	-
475.9	55.46	5.56	20.76	11.67	12.37	NW65°
477.9	62.55	2.89	21.29	11.15	12.43	NW68°
479.9	64.48	6.30	22.62	12.44	12.48	NW66°
481.9	66.40	6.55	25.39	13.73	12.53	NW67°

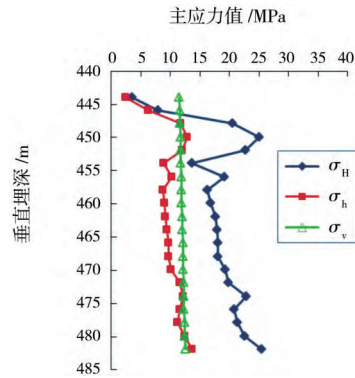


图4 测试孔应力—埋深变化关系

Fig.4 Variation of in-situ stresses vs. buried depth of test boreholes

通过对地应力测试数据进行分析可知:(1)在地应力实测深度内,铅直孔的最大水平主应力方位为NW67°,这与NNE向断层内岩石受挤压构造的力学属性相吻合;(2)铅直孔的最大、最小主应力沿埋深变化均存在三个应力分区,即应力松弛区、应力集中区和应力平稳区,这与国内外研究成果一致。

3.3 不具备地应力测试条件的地应力估算

根据铅直孔的测试结果可知,应力扰动区范围为埋深443.9~455.9 m,该范围内7个测点由于受爆破开挖卸荷的影响,使得地应力实测值与原岩应力偏差较大,因此,在后续计算分析时,将其剔除。

若该工程不具备地应力测试条件,结合试验结果,取 $\nu=0.25$, $r=0.026$ MPa/m, $\beta=5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $G=0.024$ $^\circ\text{C}/\text{m}$, $\xi=1.09$, $\eta=0.07$,并将上述参数代入公式(22)进行计算,该方法简称“方法1”。计算值与实测结果对比如表4及图5所示。

3.4 具有少数地应力实测值的地应力估算

若该工程具备地应力测试条件,但由于场地及经费等原因,只能进行少数的地应力测试,为了获得较准确的地应力值,可采用式(23)进行估算,该方法简称“方法2”。

假设梅花山隧道只对测点2、测点10进行了地应力测试,现利用这两个测点对其余部位地应力值进行估算。岩性参数取值与第3.3节一致,地应力计算结果如表4及图5所示。

3.5 计算结果对比分析

为了便于分析水平应力计算值与实测值之间的离散程度,定义相对误差为:

表4 梅花山隧道测点部位的地应力实测值与计算值对比

Table 4 Comparison between measured and calculated geostress data for measuring points in the Meihuashan tunnel

序号	孔深 /m	弹性模量 /GPa	实测地应力值/MPa			方法1		方法2		相对误差/(%)	
			σ_{H1}	σ_{H2}	σ_{H3}	σ_{H1}	σ_{H2}	σ_{H1}	σ_{H2}	方法1	方法2
1	457.9	52.52	16.27	11.91	8.81	22.35	10.09	19.61	10.60	32.54	20.48
2	459.9	43.21	16.87	11.96	9.08	19.13	9.03	-	-	10.42	-
3	461.9	46.12	17.71	12.01	9.22	20.18	9.40	17.71	9.86	11.50	1.52
4	463.9	51.59	17.90	12.06	9.45	22.15	10.06	19.43	10.56	20.19	9.25
5	465.9	49.9	18.11	12.11	9.77	21.59	9.89	18.95	10.38	15.41	5.00
6	467.9	33.72	18.08	12.17	9.67	15.93	8.01	13.98	8.41	13.04	20.43
7	469.9	43.94	19.34	12.22	10.07	19.57	9.24	17.18	9.70	0.75	9.52
8	471.9	53.43	19.90	12.27	11.58	22.96	10.38	20.15	10.90	9.44	0.50
9	473.9	49.32	22.85	12.32	12.11	21.55	9.92	18.92	10.41	8.26	16.50
10	475.9	55.46	20.76	12.37	11.67	23.77	10.67	-	-	9.40	-
11	477.9	62.55	21.29	12.43	11.15	26.33	11.54	23.11	12.11	19.62	8.56
12	479.9	64.48	22.62	12.48	12.44	27.06	11.79	23.75	12.38	14.34	3.75
13	481.9	66.40	25.39	12.53	13.73	27.79	12.05	24.39	12.65	4.94	4.81

注:(1)方法1、方法2分别对应式(22)及式(23)情况下的计算结果,下同;(2)相对误差综合反映了最大、最小水平应力。

$$\Delta = \left| \frac{\| \text{实测值} \|_2 - \| \text{计算值} \|_2}{\| \text{实测值} \|_2} \right| \times 100\% \quad (24)$$

式中, $\| \cdot \|$ 表示2-范数。

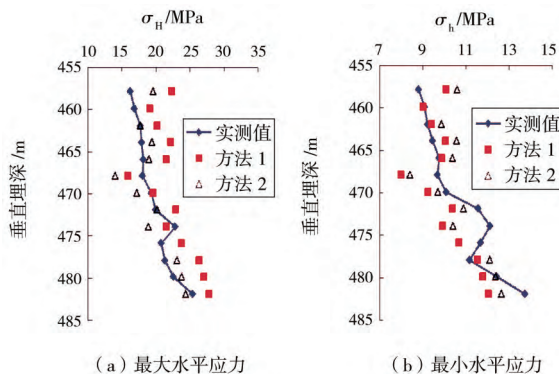


图5 地应力计算值与实测值的变化关系

Fig.5 Relationship of measured and calculated geostress data

由表4及图5可知,除测点1的计算值与实测值的最大、最小水平应力相对误差(方法1为32.54%,方法2为20.48%)较大外,其余测点误差基本上位于20%以内。可见,上述两种方法获得的最大、最小水平应力计算值与实测值总体上吻合较好,计算精度可以满足工程需求,表明采用本文方法进行地应

力估算是可行的。此外,方法1的大部分测点计算值与实测值误差在16%以内,而方法2的误差更小,总体上不超过10%,即方法2的计算结果比方法1的结果准确性更高。

值得说明的是,理论计算值与实测值存在一定的离散性,主要有以下两方面原因:一方面,岩体一般具有非连续、非均质性特征,而本文的计算方法是基于弹性理论,使得在实际预测过程中难免出现离散现象;另一方面,部分地应力实测值受局部地质构造缺陷的影响,造成计算值在局部测点误差较大。因此,本文的研究成果只是初步尝试,如何提高公式的准确性及实用性还有待进一步研究。

4 结论

本文针对目前岩体水平地应力难以估算的问题进行深入分析,通过引入区域构造应力修正系数,并结合弹性理论,对Sheorey静弹性热力学模型进行改进,提出了弹性岩层中水平地应力估算方法,并在实际工程中进行了应用。研究表明:

(1) 采用公式(22)、(23)获得的地应力计算值与实测值总体上吻合较好,大部分测点的相对误差在20%以内,可以较好地满足工程精度要求,进一步验证了该方法的有效性及合理性。

(2) 与方法1的计算结果相比,方法2的结果与

实测值误差更小。方法1的大部分测点计算值与实测值误差位于16%以内,而方法2的大部分测点误差不超过10%,因此,在进行地应力估算时,要充分利用已有的地应力实测成果,采用式(23)进行估算,尽可能地提高水平地应力的预测精度。

(3) 本文提出的估算方法不仅可以明确区分最大、最小水平地应力量值,而且能够适用于不具备地应力测试条件(如软弱岩层、断层破碎带等)的情况,从而为赣龙梅花山隧道的设计及施工提供依据,也为今后类似工程的实践提供借鉴。

参考文献

References

- [1] 谢富仁,邱泽华,王勇,苏恺之,欧阳祖熙. 我国地应力观测与地震预报[J]. 国际地震动态, 2005, 317 (5): 54-59.
XIE Furen, QIU Zehua, WANG Yong, SU Kaizhi, OUYANG Zuxi. Earth Stress Observation and Earthquake Prediction[J]. Recent Developments in World Seismology, 2005, 317 (5): 54-59.
- [2] 何磊,杨斌,王更峰,陈仕猛. 高地应力软岩隧道施工动态控制与优化研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (2): 44-48.
HE Lei, YANG Bin, WANG Gengfeng, CHEN Shimeng. Research on Construction Dynamic Control and Optimization of a Tunnel in Soft Rock under High In-situ Stresses[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (2): 44-48.
- [3] 吴广明. 高地应力软岩大变形隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (4): 94-98.
WU Guangming. Construction Techniques for a Tunnel in Highly Deformed Soft Rock with High Ground Stress[J]. Modern Tunneling Technology, 2012, 49 (4): 94-98.
- [4] HOEK E, BRWON E T. Underground Excavations in Rock[M]. London, UK: The Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [5] KARL T, RICHART F E. Stresses in Rock about Cavities[J]. Geotechnique, 1952, 3 (2): 57-90.
- [6] BROWN E T, HOEK E. Technical Note Trends in Relationships between Measured In-Situ Stress and Depth[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1978, 15 (4): 211-215.
- [7] SHEOREY P R. A Theory for In-Situ Stress in Isotropic and Transversely Isotropic Rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 1994, 31(1): 23-34.
- [8] 朱焕春,陶振宇. 不同岩石中地应力分布[J]. 地震学报, 1994, 16 (1): 49-63.
ZHU Huanchun, TAO Zhenyu. Geostress Distributions in Different Rocks[J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 16 (1): 49-63.
- [9] 景锋,盛谦,张勇慧,罗超文,刘元坤. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (10): 2056-2062.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, LUO Chaowen, LIU Yuankun. Research on Distribution Rule of Shallow Crustal Geostress in China Mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (10): 2056-2062.
- [10] 李文平. 煤及软岩层中地应力值的初步估算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (2): 234-237.
LI Wenping. A Preliminary Estimation Method of Geostresses in Coal and Soft Rock Masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (2): 234-237.
- [11] 朱哲明,胡荣,李业学. 利用岩石断裂强度来估算地下岩体水平应力的范围[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (8): 1721-1728.
ZHU Zheming, HU Rong, LI Yexue. Evaluation of Range of Horizontal Stresses of Underground Rock Mass by Using Rock Fracture Strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (8): 1721-1728.
- [12] 王空前. 横观各向同性岩体地应力计算中岩层倾角的影响[J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (5): 75-79.
WANG Kongqian. Influence of Formation Dip Angle on the Geostress Calculation of a Transversely Isotropic Rock Mass[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (5): 75-79.
- [13] 王章琼,晏鄂川,王鲁男,龙黎红,周楠. 黄岛地下水封洞库地应力对裂隙岩体渗透特性影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (2): 72-77.
WANG Zhangqiong, YAN E'chuan, WANG Lunan, LONG Lihong, ZHOU Nan. Effect of Geostress on the Permeability of a Frac-

- tured Rock Mass in the Huangdao Underground Water-Sealed Storage Cavern[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (2): 72-77.
- [14] TIMOSHENKO S, GOODIER J N. Theory of Elasticity[M]. Kogakusha, Tokyo, 1951: 506.
- [15] 裴启涛, 丁秀丽, 黄书岭, 罗超文. 地应力与岩体模量关系的理论及试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38 (4): 889-897.
PEI Qitao, DING Xiuli, HUANG Shuling, LUO Chaowen. Theoretical and Experimental Study of Relation between In-situ Stress and Rock Mass Modulus[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38 (4): 889-897.
- [16] SHEOREY P R, MURALI MOHAN G, SINHA A. Influence of Elastic Constants on the Horizontal In-situ Stress[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38: 1211-1216.
- [17] 朱焕春, 李浩. 论岩体构造应力[J]. 水利学报, 2001, (9): 81-85.
ZHU Huanchun, LI Hao. On Tectonic Stress in Rock Mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (9): 81-85.
- [18] 郭强, 葛修润, 车爱兰. 岩体完整性指数与弹性模量之间的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (S2): 3914-3919.
GUO Qiang, GE Xiurun, CHE Ailan. Research on Relationship of Rock Mass Integrity Index and Rock Mass Elastic Modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (S2): 3914-3919.
- [19] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31 (4): 1326-1330.
WANG Chuanyin, HU Peiliang, SUN Weichun. Method for Evaluating Rock Mass Integrity Based on Borehole Camera Technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1326-1330.
- [20] 罗超文, 李海波, 李卫兵, 高周俊. 赣龙铁路梅花山隧道围岩应力及岩体模量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (9): 1880-1886.
LUO Chaowen, LI Haibo, LI Weibing, GAO Zhoujun. Study on Stress Field and Modulus Measurement of Surrounding Rock Masses in Meihuashan Tunnel of Ganzhou-Longyan Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (9): 1880-1886.

Estimation Method for Geostress Based on a Modified Shoerey Model

PEI Qitao¹ DING Xiuli¹ HUANG Shuling¹ ZHANG Yuting¹ LUO Chaowen²

(1 Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010; 2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Geostress is one of the basic loads of underground works, and the vertical stress of a rock mass can be calculated using the overburden pressure while the horizontal stress is difficult to determine. The elasto-static thermal stress model established by Shoerey is widely accepted, but the model does not take the tectonic movement induced by regional differences into consideration, and the distribution rules of the horizontal maximum principal stress and minimum principal stress haven't been obtained. In this paper, Shoerey's model is modified by introducing the correction factors of regional tectonic stress based on elasticity theory, and an estimation method for horizontal stress in an elastic rock mass is proposed. An in-situ stress and rock mass modulus measurement are carried out for the Meihuashan tunnel, and a comparison between the calculated results and the measured geostress data are conducted. The results show that the prediction error caused by the local geological structure and rock mass homogeneity is small and within the allowed scope, meeting the precision requirements for engineering.

Keywords Railway Tunnel; Underground works; Geostress; Elastic stratum; Shoerey's model; Estimation method