

# 中国地应力场分布规律统计分析

赵德安<sup>1,2</sup>, 陈志敏<sup>1</sup>, 蔡小林<sup>3</sup>, 李双洋<sup>4</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030;  
3. 长沙理工大学 桥梁与结构工程学院, 湖南 长沙 410076; 4. 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 查阅迄今为止中国现有的实测地应力资料, 参照霍克-布朗的地应力分析、统计和拟合方法, 形成实测平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的散点图, 回归实测平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度的变化曲线并与霍克-布朗曲线进行比较, 发现深度超过 1 200 m 以后, 中国实测平均水平地应力与垂直地应力的比值统计值大于霍克-布朗曲线中值, 且最大应力包线与霍克-布朗包线基本吻合, 而最小应力包线的应力水平小于霍克-布朗包线的应力水平。进一步分析回归中国岩浆岩、沉积岩和变质岩等 3 种岩性的地应力统计结果, 得到类似的回归曲线。统计结果对了解中国地应力场的宏观分布情况具有重要参考价值, 对进行深埋地下结构分析计算和辅助设计具有重要的实用价值。

**关键词:** 岩石力学; 地应力场; 回归分析; 散点图; 拟合曲线

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2007)06-1265-07

## ANALYSIS OF DISTRIBUTION RULE OF GEOSTRESS IN CHINA

ZHAO Dean<sup>1,2</sup>, CHEN Zhimin<sup>1</sup>, CAI Xiaolin<sup>3</sup>, LI Shuangyang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. School of Civil Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou, Gansu 730030, China;

3. School of Bridge and Structure Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China;

4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The initial geostress measurement results up to now in China are reviewed. Three typical results from the southern mountainous area in Fujian Province, Baka oilfield in Xinjiang autonomous region and No.2 mining area of Jinchuan nickel mine in Gansu Province are listed. The ratios of the average horizontal geostresses and the vertical geostresses(RAHVG) varying with depth are plotted in a dispersed point chart following the Hoek-Brown's method. The regression curve and the maximum envelope curve as well as the minimum envelope curve for RAHVG are fitted in the dispersed point chart. Compared with the Hoek-Brown' curve, when the depth is more than 1 200 m, the RAHVG are greater than that of Hoek and Brown. The maximum envelope curve for China is almost consistent with that of Hoek and Brown, but the minimum envelope curve for China shows smaller than Hoek-Brown's minimum envelope curve. Furthermore, the dispersed point charts are plotted and the same type of the RAHVG curves is fitted for the rock types of the magmatic rock, sedimentary rock and metamorphic rock based on the initial geostress measurement results. The regression results of the three different rocks show the

**收稿日期:** 2006-07-19; **修回日期:** 2006-10-06

**基金项目:** 铁道部科技开发计划项目(2004G043-A); 教育部留学回国人员科研启动基金和兰州交通大学青蓝人才工程基金资助项目

**作者简介:** 赵德安(1959-), 男, 博士, 1982年毕业于兰州铁道学院铁道工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的试验、数值分析及岩土锚固技术等方面的教学与研究工作。E-mail: zhao\_da@mail.lzjtu.cn

different properties in RAHVG curves. When the depth is more than 500 m, the RAHVG curve for the sedimentary rock is approaching to 1.0. For the magmatic rock in China, the values in the RAHVG curve are bigger than those of the other two types when the depth is less than 500 m, but smaller when the depth is more than 500 m. The measurement geostresses for the metamorphic rock are more dispersed than those for the other two types of rocks. The fitted regression curves are of importance for the numerical analysis of underground engineering.

**Key words:** rock mechanics; geostress field; regression analysis; dispersed point chart; fitting curve

## 1 引言

中国地下空间的利用最近 10 a 发展很快, 尤其是有着向更大埋深发展的趋势, 如中国的秦岭隧道、乌鞘岭隧道等工程的埋深已接近甚至超过 1 000 m, 在煤炭、矿冶、石油等行业竖井甚至达数千米之深。埋深的增大使得地下工程的设计和施工不得不考虑工程区初始地应力场的影响。如对于深埋地下工程的围岩稳定性分析及围岩压力分析等都可能区别于浅埋地下工程, 特别是对于高地应力情况, 问题会变得更加复杂。对初始地应力场的判断是否可靠、岩体参数的选取是否合理等都将直接影响到工程设计与施工的经济性、可靠性和安全性。现场实测地应力是提供地应力场最为直接的途径, 但在工程现场, 由于场地的复杂性及经费等原因, 不可能进行大量的全面量测。因此, 总结中国迄今为止已经量测到的地应力资料, 找出宏观地应力分布规律, 特别是根据不同岩性研究中国地应力分布规律就显得非常重要。

重力作用和构造运动是引起地应力的主要原因, 其中尤以水平方向的构造运动对地应力的形成及其特点影响最大<sup>[1]</sup>。形成构造应力场的原因非常复杂, 它在空间的分布极不均匀, 而且随着时间的推移还不断发生变化, 属于非稳定的应力场。但是相对于工程结构物的设计基准期来说, 可以忽略时间因素, 将它视为相对稳定的应力场进行分析。迄今为止, 还很难用函数形式表达构造应力场, 而只能通过实地量测得到一些数据。如前所述, 深层地应力的量测代价是昂贵的, 而且常常因量测方法不得当或仪器误差而难以得到理想的结果。因此, 基于现有量测结果, 用统计分析的方法确定中国宏观地应力场的分布规律以指导工程实践就显得十分重要。

E. T. Brown 和 E. Hoek<sup>[2]</sup>1978 年总结归纳了世

界不同地区地应力的测量结果, 总结出的世界各国垂直应力  $\sigma_v$  随深度  $H$  变化的规律, 其拟和公式为

$$\sigma_v = 0.027H \quad (1)$$

E. T. Brown 和 E. Hoek<sup>[2]</sup>根据世界不同地区地应力量测结果绘出的平均水平地应力与垂直地应力比值随深度变化回归曲线, 如图 1 中的霍克-布朗内包线和外包线所示。

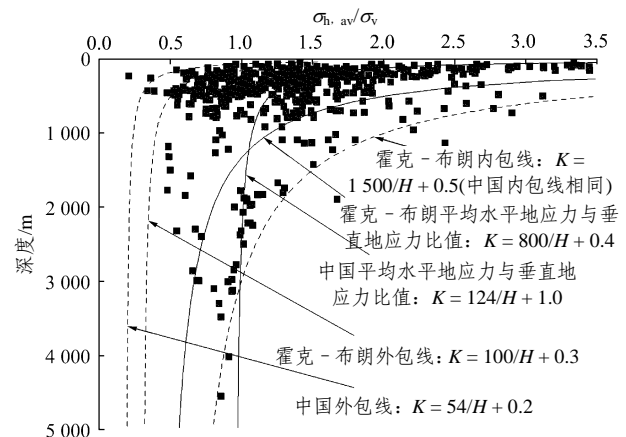


图 1 中国平均水平地应力与垂直地应力比值及其内外包线随深度变化曲线及霍克-布朗曲线

Fig.1 RAHVG curve and the maximum envelope curve as well as the minimum envelope curve varying with depth in China and Hoek-Brown curves

图 1 中,  $\sigma_{h, av}$  为平均水平地应力, 即

$$\sigma_{h, av} = \frac{\sigma_{h, max} + \sigma_{h, min}}{2} \quad (2)$$

若令

$$k = \frac{\sigma_{h, av}}{\sigma_v} = \frac{\sigma_{h, max} + \sigma_{h, min}}{2\sigma_v} \quad (3)$$

则平均水平地应力与垂直地应力的比值符合关系式:

$$\frac{100}{H} + 0.30 \leq k \leq \frac{1500}{H} + 0.50 \quad (4)$$

在佐洛塔列夫及高莉青和陈宏德对影响岩体地

应力状态的地质因素的研究中, 都把岩性列为基本因素之一。陶振宇和杨子文、陶振宇和潘别桐曾指出岩性及其强度可能会显著影响地应力分布<sup>[3]</sup>。同样岩体岩性也是影响平均水平地应力与垂直地应力的比值的基本因素之一。朱焕春和陶振宇<sup>[3]</sup>分析了不同岩石中的地应力分布, 但这篇文章是针对世界范围内的试验结果进行分析的。

德国学者 K. Fuchs 和 B. Müller<sup>[4]</sup>也搜集了世界各国的地应力测试数据, 发表了研究成果——世界应力图 WSM 2000, 如图 2 所示。通过 WSM 可以看出, 最大水平压应力的方向并不是杂乱无章的, 和中国地应力场的最大水平压应力方向基本一致, 它显示了大洲范围的地应力分布模式。全球范围的、区域范围的以及局部范围的地应力模式的确立又为山体形成、沉积盆地的演变和活动断层的特性的研究提供了新的视角。

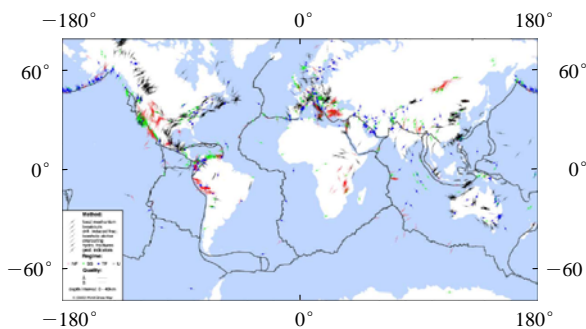


图 2 世界地应力图

Fig.2 World geostress map

近年来, 中国大型地下工程进行了大量的地应力现场实测工作, 为研究中国地应力分布规律提供了必要条件。因此, 本文根据查阅迄今为止中国现有实测地应力资料, 参照霍克 - 布朗的地应力分析、统计和拟合方法, 形成了实测平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的散点图, 回归了曲线并与 Hoek-Brown 曲线进行了比较。朱焕春和陶振宇<sup>[3]</sup>虽然分析了不同岩石中的地应力分布。但这篇文章是针对世界范围内的试验结果进行分析的。特别是在此文发表之后, 中国又增加了大量实测结果。因此, 针对中国的情况研究典型岩性的地应力分布特点十分必要。

本文统计分析了中国 578 组实测地应力数据, 其中可以判断岩性的有 371 组(岩浆岩 147 组、沉积岩 155 组和变质岩 69 组)地应力实测资料参照霍克 - 布朗(Hoek-Brown)的回归方法, 回归分析了中

国不同岩性的平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的曲线。统计结果对掌握中国宏观地应力场情况和进行深埋地下结构数值分析具有重要的实用价值。

## 2 中国实测地应力分析

### 2.1 实测地应力统计分析

中国实测地应力资料来源广泛, 所查资料包括来自矿山、油田、交通等各个行业的实测资料。实测地应力资料又来源于不同工程, 如中国二郎山隧道、广华山隧道、广州蓄水能电站、克拉玛依油田、新城金矿、峨口金矿、梅山金矿、金川镍矿、玲珑金矿、秦岭公路隧道、三峡船闸区、山西太原引黄工程、杭州天荒坪抽水能电站等<sup>[5~9]</sup>。此处给出 4 个较为典型的结合工程的地应力测量结果(表 1~4)。

表 1 福建南部山区一高速公路隧道区水压致裂地应力测量结果(岩浆岩)<sup>[5]</sup>Table 1 Geostresses measured by hydro-fracturing method for a highway tunnel design in southern mountainous area in Fujian Province(magmatic rock)<sup>[5]</sup>

埋深 $H/m$	$\sigma_{h, \max}/MPa$	$\sigma_{h, \min}/MPa$	$\sigma_v/MPa$
124.00	6.800	4.400	3.350
156.00	7.300	6.100	4.210
188.00	6.000	5.000	5.080
228.00	6.400	5.300	6.160
247.00	6.900	5.700	6.670
285.00	9.300	6.300	7.700
347.00	13.100	8.600	9.370
388.00	13.900	9.200	10.480
411.00	12.900	8.700	11.100
421.00	13.700	9.300	11.410

根据所查阅实测地应力资料, 按实测平均水平地应力与垂直地应力的比值, 绘制了平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的散点图, 如图 1 所示。参照霍克 - 布朗世界范围内地应力分布规律的研究成果及分析方法, 进一步回归分析了中国平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的规律。

参照式(3)的定义, 令平均水平地应力与垂直地应力的比值为

$$k = \frac{a}{H} + b \quad (5)$$

表 2 引黄隧洞水压致裂地应力测量结果(沉积岩)<sup>[10]</sup>

Table 2 Results of stress measurement from No.2 hole with hydro-fracturing in a planned tunnel for diversion of water from the Yellow River(sedimentary rock)<sup>[10]</sup>

埋深 $H/m$	$\sigma_{h, \max}/MPa$	$\sigma_{h, \min}/MPa$	$\sigma_v/MPa$
85.50	10.000	4.500	2.200
98.83	10.200	4.500	2.500
116.05	12.800	6.600	3.100
124.49	11.600	5.700	3.300
135.31	13.100	5.700	3.600
165.00	15.200	6.800	4.400
170.00	16.500	7.300	4.500
292.66	20.100	8.800	7.500
303.12	19.700	8.600	8.100

表 3 金川二矿区地应力测量结果(应力解除法、变质岩)<sup>[11]</sup>

Table 3 Geostress measurement results for mining area No.2 of Jinchuan nickel mine (stress releasing method, metamorphic rock)<sup>[11]</sup>

埋深 $H/m$	$\sigma_{h, \max}/MPa$	$\sigma_{h, \min}/MPa$	$\sigma_v/MPa$
580.00	31.180	10.880	13.740
580.00	24.880	12.960	13.590
580.00	28.080	11.590	14.280
580.00	28.440	9.440	13.340
730.00	36.950	13.090	17.550
730.00	37.860	12.220	16.790
730.00	34.680	13.480	17.340
730.00	31.640	11.590	18.680
790.00	40.550	16.750	20.550
790.00	37.260	17.660	18.190

表 4 巴喀油田压裂曲线估算地应力结果(沉积岩)<sup>[12]</sup>

Table 4 Results of estimated geostresses from fracturing curve in Baka oilfield(sedimentary rock)

埋深 $H/m$	$\sigma_{h, \max}/MPa$	$\sigma_{h, \min}/MPa$	$\sigma_v/MPa$
1 744.20	60.700	37.600	37.700
1 777.15	43.700	34.600	39.400
1 803.90	61.500	41.000	39.600
1 827.40	56.600	35.200	41.200
1 828.40	54.600	38.500	40.500
1 833.30	52.800	34.400	39.000
1 878.20	52.200	32.400	41.500
1 889.30	48.400	38.100	41.700
1 893.60	85.400	51.200	40.800
1 963.60	51.400	42.700	43.800
1 976.60	54.600	39.300	44.200
1 999.80	50.000	36.700	45.500
2 067.45	52.300	40.000	45.500

式中:  $a$  和  $b$  均为待定常数。

假定

$$1/H = X \tag{6}$$

则有

$$k = aX + b \tag{7}$$

由线性回归可得

$$a = 124.25 \tag{8}$$

$$b = 0.950 \ 3 \tag{9}$$

即

$$k = \frac{124.25}{H} + 0.950 \ 3 \tag{10}$$

根据同样方法也可以得到中国平均水平地应力与垂直地应力的比值的内外包线, 且内包线与霍克 - 布朗内包线基本重合。中国平均水平地应力与垂直地应力比值回归曲线及其内外包线如图 1 所示。为便于比较, 图 1 还给出了霍克 - 布朗的世界各国平均水平地应力与垂直地应力比值随深度变化曲线。

由图 1 可知:

(1) 中国地应力量测结果的平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度的变化规律大致与霍克 - 布朗世界范围内量测结果的规律相似。在大约 1 000 m 深度内, 量测结果比较分散, 主要原因应该是越接近地表, 构造运动所产生的断层、节理等就越复杂, 地应力中的构造应力也就越复杂。

(2) 大约在 1 200 m 以内, 中国平均水平地应力与垂直地应力的比值曲线小于霍克 - 布朗中值曲线。

(3) 深度超过 1 200 m 以后, 中国平均水平地应力与垂直地应力的比值曲线大于霍克 - 布朗中值曲线。

(4) 中国平均水平地应力与垂直地应力的比值的最大应力包线与霍克 - 布朗包线基本吻合, 而最小应力包线的应力水平小于霍克 - 布朗包线的应力水平。

## 2.2 中国不同岩性地应力分析

根据同样的研究方法, 将所收集到的大量地应力实测数据按岩浆岩、沉积岩和变质岩三大岩性予以区分, 分别得到了按相应岩性地应力量测结果绘出的平均水平地应力与垂直地应力比值  $k$  与深度关系散点图<sup>[13]</sup>, 如图 3~6 所示。共统计了 147 组岩浆岩数据、155 组沉积岩数据和 69 组变质岩数据。根据同样方法得到如下回归方程:

(1) 岩浆岩:

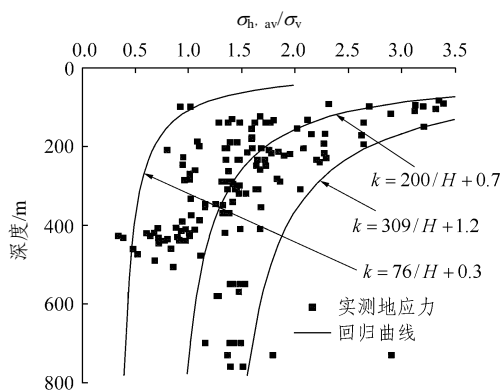


图 3 中国岩浆岩平均水平地应力与垂直地应力比值及其内外包线随深度变化规律

Fig.3 RAHVG curves and the maximum envelope curve as well as the minimum envelope curve of the magmatic rocks varying with depth in China

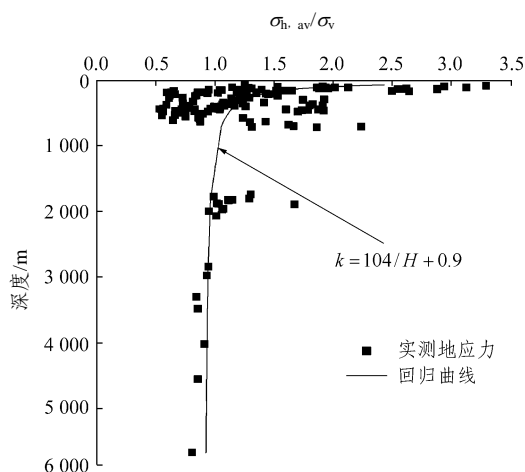


图 4 中国沉积岩平均水平地应力与垂直地应力比值随深度变化规律

Fig.4 RAHVG curve of the sedimentary rock varying with depth in China

$$k = \frac{200}{H} + 0.7 \quad (11)$$

(2) 沉积岩:

$$k = \frac{104}{H} + 0.9 \quad (12)$$

(3) 变质岩:

$$k = \frac{82}{H} + 1.0 \quad (13)$$

同时还在图 3~6 中给出了相应岩性的平均水平地应力与垂直地应力比值  $k$  值随深度变化规律曲线及其内外包线。

为便于比较, 图 7 还给出了霍克 - 布朗曲线与三大岩性分别回归曲线的比较图。图 7 中霍克(小)及霍克(大)分别表示霍克 - 布朗曲线两条包线,

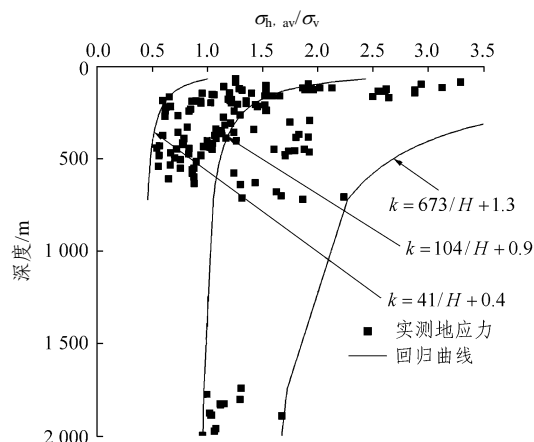


图 5 中国沉积岩平均水平地应力与垂直地应力比值及其内外包线随深度变化规律

Fig.5 RAHVG curve and the maximum envelope curve as well as the minimum envelope curve of the sedimentary rock varying with depth in China

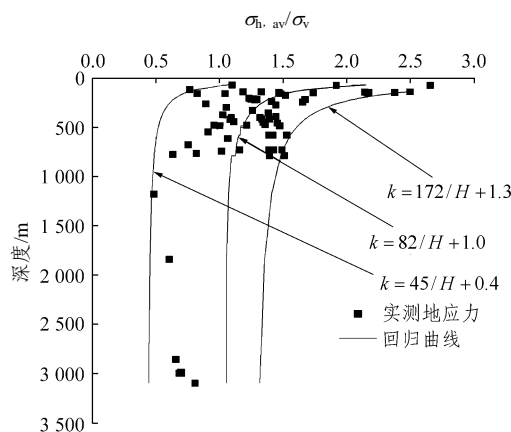


图 6 中国变质岩平均水平地应力与垂直地应力比值及其内外包线随深度变化规律

Fig.6 RAHVG curve and the maximum envelope curve as well as the minimum envelope curve of the metamorphic rocks varying with depth in China

即分别为  $k = 100/H + 0.3$  曲线和  $k = 1500/H + 0.5$  曲线。

分析图 3~7 中曲线可知:

(1) 由图 3 可知, 岩浆岩在深度 100 m 以内的实测数据较少, 大部分实测数据集中为 100~500 m。图 3 给出了中国岩浆岩平均水平地应力与垂直地应力比值及其内外包线随深度变化规律, 对深埋地下结构计算的荷载分析具有重要的参考价值 and 实用意义。从图 7 的曲线对比来看, 岩浆岩的平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  回归结果在约 500 m 以内大于沉积岩和变质岩, 随着深度的增加则小于

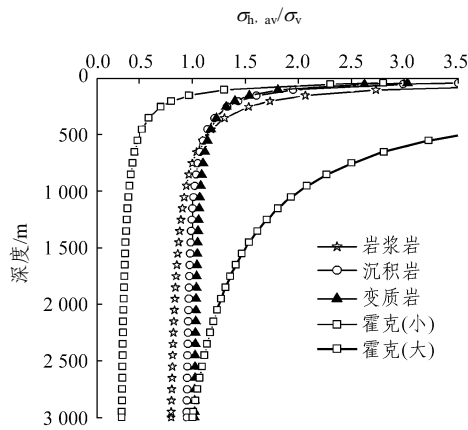


图7 中国3种岩性平均水平地应力与垂直地应力比值随深度变化规律比较

Fig.7 Comparison of RAHVG curves of magmatic, sedimentary and metamorphic rocks varying with depth in China

沉积岩和变质岩且减小速率相对较大。

(2) 图 4 给出了中国沉积岩中平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度变化的规律。由图 4 可知,大部分实测数据集中在 700 m 以内。深度大于 2 000 m 以后,实测数据具有较小的离散性,  $k$  值在 1.0 附近波动,可以认为在较深部位沉积岩的  $k$  值为 1。由图 7 可知,沉积岩中平均水平地应力与垂直地应力的比值回归曲线介于岩浆岩与变质岩之间。

(3) 图 5 给出了深度 2 000 m 以内沉积岩平均水平地应力与垂直地应力比值散点图的内、外包线。可供深埋地下结构计算中进行荷载分析时参考。

(4) 由图 6 可知,中国变质岩的测量结果比较分散,因此平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  亦分散。说明岩性变质作用造成岩体构造复杂。回归曲线比较接近沉积岩的回归曲线,当深度大于 500 m 以后其值渐近于 1.0。回归曲线及其内、外包线对变质岩地区深埋地下结构设计具有重要参考价值。

(5) 图 7 表明,地应力随深度的变化规律与岩性有密切关系。说明针对不同岩性和特定地区的回归分析结果更具实用意义。

### 3 结 论

霍克布朗曲线对于世界范围内的地应力分布规律有着指导性意义,但是由于地应力分布具有很强

的地区性,因而针对不同岩性和特定地区的回归分析曲线对深埋地下结构数值分析中地应力的取值具有重要的参考价值。

本文对中国 578 组地应力数据进行了统计分析和拟合,并对可以判断岩性的 147 组岩浆岩、155 组沉积岩和 69 组变质岩统计数据进行了专门分析和拟合。通过分析相关回归曲线,可以得出以下结论:

(1) 给出了中国平均水平地应力与垂直地应力的比值随深度的变化曲线。通过与霍克 - 布朗世界范围内地应力统计回归曲线比较,得出了当深度小于 1 200 m 中国回归曲线小于霍克 - 布朗中值曲线,而当深度大于 1 200 m 以后中国回归曲线大于霍克 - 布朗中值曲线的结论。

(2) 中国平均水平地应力与垂直地应力比值的散点图内包线与霍克 - 布朗内包线基本吻合,而外包线在霍克 - 布朗曲线的外侧,所反映的比值小于霍克 - 布朗外包线。

(3) 分别分析了中国的岩浆岩、沉积岩和变质岩等 3 种岩性的地应力统计结果,表明针对不同岩性的回归结果差异明显、更具实用意义。所给曲线为深埋工程相关初设工作提供了参考依据。

(4) 中国沉积岩和变质岩的平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  随深度变化规律比较一致,且都随着深度的增加渐近于 1.0。

(5) 中国岩浆岩的平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  在约 500 m 深度以内高于沉积岩和变质岩,随着深度的增加则小于沉积岩和变质岩且减小速率相对较大。岩浆岩的实测数据较多,且在回归曲线两侧(内、外包线间)分布较均匀。

(6) 中国变质岩的测量结果比较分散,因此平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  亦分散。说明岩性变质作用造成岩体构造复杂。有条件时应尽可能针对工程需要进行地应力测试,以便进一步对变质岩的地应力分布规律进行研究。

(7) 对所得曲线及散点图进行对比分析可以看出,平均水平地应力与垂直地应力的比值  $k$  较为分散,特别是在大约 1 000 m 以内更为分散。究其原因,一是实测数据来自不同工程,其所在地的地质构造较为复杂差异较大;二是越接近地表,构造运动所产生的断层、节理等就越复杂,地应力中的构造应力也就越复杂。

## 参考文献(References):

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布[J]. 地震学报, 1999, 16(1): 49 - 63.(ZHU Huanchun, TAO Zhenyu. Geostress distributions in different rocks[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 16(1): 49 - 63. (in Chinese))
- [4] FUCHS K, MÜLLER B. World stress map of the earth: a key to tectonic processes and technological applications[J]. Naturwissenschaften, 2001, 88: 357 - 371.
- [5] 尹健民, 陈礼伟, 钟作武, 等. 某高速公路隧道区水压致裂地应力测量与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 827 - 1 830. (YIN Jianmin, CHEN Liwei, ZHONG Zuowu, et al. Measurement and interpretation on in-situ stresses with hydro-fracturing in a highway tunnel site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 1 827 - 1 830.(in Chinese))
- [6] 肖尚斌, 张艳君. 蒲石河抽水蓄能电站地下厂房地应力特征及岩爆判别[J]. 东北水利水电, 1996, (7): 14 - 16.(XIAO Shangbin, ZHANG Yanjun. The character of the geostress and the estimation of rock pressure burst in the underground factory of the Pushi River pumped-storage power station[J]. Northeast Water Conservancy and Electric Power, 1996, (7): 14 - 16.(in Chinese))
- [7] 钟作武, 龚壁新, 吕国湘. 三峡工程地下厂房区域地应力测量与研究[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(增): 17 - 19.(ZHONG Zuowu, GONG Bixin, LU Guoxiang. The measurement and research of the area geostresses in the underground factory of the Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996, 13(Supp.): 17 - 19.(in Chinese))
- [8] 董 诚, 王连捷, 杨小聪, 等. 安庆铜矿地应力测量[J]. 地质力学学报, 2001, 7(3): 17 - 19.(DONG Cheng, WANG Lianjie, YANG Xiaocong, et al. Stress measurement of Anqing Copper Mining[J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(3): 17 - 19.(in Chinese))
- [9] 吴满路, 廖椿庭. 大茅隧道地应力测量及围岩体稳定性研究[J]. 地质力学学报, 2000, 6(2): 71 - 76.(WU Manlu, LIAO Chunting. Stress measurements and study of stability of the Damao tunnel[J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(2): 71 - 76.(in Chinese))
- [10] 王连捷, 丁原辰, 刘琦胜, 等. 引黄隧洞地应力测量[J]. 地质力学学报, 1996, 2(1): 62 - 69.(WANG Lianjie, DING Yuanchen, LIU Qisheng, et al. Rock stress measurement in a planned tunnel for diversion of water from the Yellow River[J]. Journal of Geomechanics, 1996, 2(1): 62 - 69.(in Chinese))
- [11] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414 - 418. (CAI Meifeng, QIAO Lan, YU Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of mining area No.2 of Jinchuan nickel mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414 - 418.(in Chinese))
- [12] 乔向阳, 刘 成, 徐冰涛, 等. 巴略油田地应力研究与应用[J]. 新疆地质, 2001, 19(4): 300 - 304.(QIAO Xiangyang, LIU Cheng, XU Bingtao, et al. In-situ stress study of Baka oilfield and its application[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4): 300 - 304.(in Chinese))
- [13] 陈志敏. 不同岩性侧压比随深度变化规律探讨[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 99 - 101.(CHEN Zhimin. Discussion on change law of different lithology's side pressure ratio with depths[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(6): 99 - 101.(in Chinese))