

大跨度公路隧道围岩竖向压力分布特征探讨

刘学增¹, 罗仁立²

(1. 同济大学 建筑设计研究院, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 结合龙头山大跨度隧道围岩压力监测, 探讨了竖向压力与隧道埋深、围岩级别的关系; 并采用深、浅埋隧道法、普氏系数法以及别尔巴乌麦尔法分别对不同的监测断面计算其围岩压力, 对于高级别围岩Ⅳ、Ⅴ, 普氏系数法计算结果和实测值较为吻合, 而深、浅埋隧道法和别尔巴乌麦尔法计算结果比较一致, 但是均大于实测值; 对于Ⅱ、Ⅲ围岩, 深、浅埋隧道法与实测值较为吻合, 普氏系数法要小于实测值, 而别尔巴乌麦尔法则大于实测值; 从围岩压力与埋深的关系可以看出, 深、浅埋隧道法、别尔巴乌麦尔法与实测值的变化趋势基本一致, 但比实测值偏大, 普氏系数法则比较接近于实测压力的平均值. 根据不同的计算方法讨论了不同计算方法对大跨度隧道的适用性, 为大跨度隧道围岩压力的设计计算提供有意义的参考.

关键词: 大跨度隧道; 围岩压力; 计算方法; 监测

中图分类号: O 451.1

文献标识码: A

Analysis of Large-span Highway Tunnel Surrounding Rock Vertical Pressure Attributes

LIU Xuezheng¹, LUO Renli²

(1. Architectural Design & Research Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the monitoring of the Longtou Mountain large-span tunnel surrounding rock pressure, a study is made of the relationship of vertical pressure, buried depth and surrounding rock grade. The road tunnel design code method, M M theory method and Bilbawumyer theory method are respectively used to calculate the surrounding rock pressure. In the rock grades IV or V, the value calculated by M M theory method and the actual value are about the same, the value calculated by the road tunnel design code method and the value calculated by Bilbawumyer theory method are greater than the actual value; in the rock grade II or III, the value calculated by the road tunnel design code method and the actual value are

about the same, the value calculated by M M theory method value is smaller than the actual value, and the value calculated by Bilbawumyer theory method is greater than the actual value; in the relationship of surrounding rock pressure and buried depth, the variation trends of the road tunnel design code method value and Bilbawumyer theory method value are similar to the actual value, but they are greater than the actual value. The value calculated by M M theory method is close to the average actual value. The applicability of different calculation methods of surrounding rock pressure is studied for the large-span tunnel, which provides a reference for large-span tunnel design.

Key words: large-span tunnel; surrounding rock pressure; calculation method; monitoring

围岩压力是岩体扰动产生应力重分配过程中围岩变形由支护结构的阻挡而在支护与围岩接触面上产生的压力. 从根本上说围岩压力有两种: 松弛压力和形变压力. 隧道围岩压力的确定大致分为3种: 第1种是直接测量法; 第2种是工程类比法, 即根据大量实际资料分析统计和总结, 按不同围岩类别提出围岩压力的经验数值; 第3种方法是在实践的基础上从理论上研究围岩压力的估算方法. 由于影响围岩压力的因素很多, 企图建立一种完善和适合客观实际情况的围岩压力理论及计算方法较为困难.

1907年俄国学者普罗托奇雅诺夫提出围岩分类, 并给出了松散地层和破碎岩体的松弛压力公式. 1922年Hewett和Johannesson^[1]基于土压力理论来估算作用在衬砌结构上的压力大小和分布情况. 1946年泰沙基(K Terzaghi)^[2]基于应力传递法提出了松散岩体的围岩压力计算公式. 别尔巴乌麦尔提出涉及浅部采掘空间的围岩压力计算. 《铁路隧道设计规范》(TB10003—2001)^[3]中的基于1025个塌方

收稿日期: 2009-06-02

作者简介: 刘学增(1971—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下建筑工程. E-mail: xuezhengl@263.net

资料,建议了按概率极限状态法下以松散体考虑的围岩压力计算公式.《公路隧道设计规范》(JTGD70—2004)^[4]中提出IV~VI级围岩浅埋隧道荷载计算公式和深埋隧道的围岩压力为松散体时的计算公式.它们是在总结以往国内外分类方法的基础上,针对中国特色的工程实际而提出来的,基本代表了我国当前围岩压力计算的最新水平.但是我国规范是在统计的基础上建立的经验公式,而统计样本91.6%都在5~10m宽度的隧道内取得的,在指导当前三车道(15 m)、四车道(21 m)等大跨度隧道时,显得有些无能为力^[5-8].针对这一情况,本文结合广州龙头山大跨度隧道分别采用深、浅埋隧道法(公路隧道设计规范采用方法)、普氏系数法和别尔巴乌麦尔法^[9]计算不同埋深和围岩级别的围岩竖向压力,并与实测值进行对比分析,讨论大跨度隧道竖向围岩压力分布规律.

1 广州龙头山围岩压力监测

1.1 工程概况

龙头山隧道按上下分离式布置,左线长1 010 m,右线长1 002 m,单洞净宽18 m,净高8.95 m,是上下行双向分离式八车道大断面公路隧道.隧道范围内的主要地层为:坡残积土,全-强风化花岗岩,弱、微风化花岗岩,岩石风化裂隙发育一般.V、IV级围岩约占隧道总体的30%,III、II级围岩约占70%.设计参数见表1:

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameters

围岩级别	摩擦角 $\varphi/$ (°)	单轴饱和抗压强度 $R_c/$ MPa	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
V	21	32	20
IV	45	32	24.5
III	39	50	23
II	50	92	25

1.2 围岩压力监测(共 12 个断面)

分别对龙头山隧道不同围岩级别的断面埋设压力盒.具体监测断面情况见表2,压力盒测点布置如图1^[10]所示.

隧道V、IV级围岩采用双侧壁导洞施工,围岩压力按施工步分步释放,对拱顶竖向压力的实测值根据围岩内部位移监测进行调整.在K5+870断面共埋设3套多点位移计,布置见图2,该断面围岩主要

为全-强风化花岗岩,IV级围岩,埋深45 m.

表 2 监测断面

Tab.2 Monitoring cross section

监测断面	围岩等级	埋深/m	岩性
zk6+730	V	7.5	强风化花岗岩
zk6+665	V	30.1	强风化花岗岩
zk6+630	IV	45.7	强风化花岗岩
zk6+460	II	89.0	弱风化花岗岩
zk6+327	V	70.6	强风化花岗岩
yk6+740	V	2.3	强风化花岗岩
yk6+635	V	44.7	强风化花岗岩
yk6+580	IV	56.0	强风化花岗岩
yk6+346	III	59.2	中风化花岗岩
zk5+870	IV	54.4	强风化花岗岩
zk5+888	IV	56.0	强风化花岗岩
yk6+085	II	122.0	弱风化花岗岩

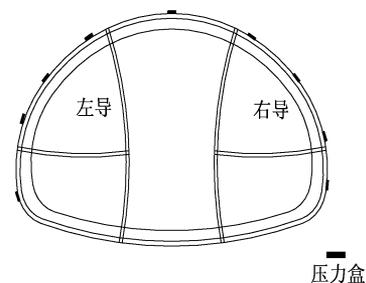


图 1 监测断面压力盒布置

Fig.1 Pressure cell distribution

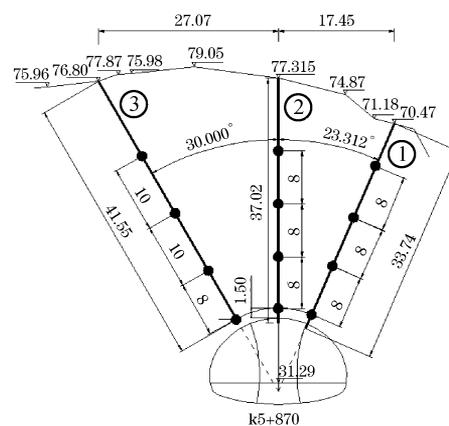


图 2 多点位移计布置图(单位:m)

Fig.2 Displacement gauge distribution(unit:m)

以第二套多点位移计的时间—位移曲线为例进行分析,见图3^[10],存在4处明显突变段,如图中第I~IV段所示.这4处突变清晰记录了洞内不同开挖工序的掌子面到达量测断面时,由其引起的围岩松动位移.其中第I段和第II段均是由右导洞上台阶掌子面开挖引起的位移突变.当右导洞上台阶掌子面至k5+873断面附近(12月23日),施工停止,由此引起第I段

的位移突变;直到 2006 年 1 月 18 日,该掌子面又开始施工,从而引起第Ⅱ段的位移突变.第Ⅲ段位移突变是由左导洞下台阶掌子面开挖引起的位移突变.第Ⅳ段位移突变是由核心土掌子面开挖引起的位移突变.

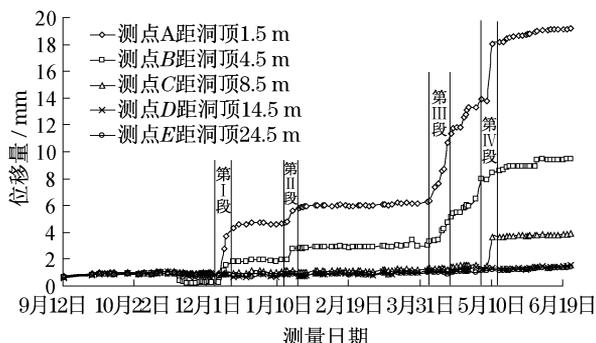


图 3 多点位移计的时间—位移曲线

Fig.3 Time-displacement curve of displacement gauge

测点 A 累计位移 17.4 mm,核心土开挖后产生位移 5.92 mm,占累计位移 34%;测点 B 累计位移 7.9 mm,核心土开挖产生位移 3.02 mm,占累计位移 38.2%,测点 A、B 平均得 36.1%.隧道开挖后围岩变形量与围岩压力的释放成正比关系,在核心土开挖后,埋设压力盒测得拱顶围岩竖向压力是在拱顶围岩竖向总压力释放 63.9%后测得的,即拱顶压力盒测得的竖向围岩压力占拱顶总竖向围岩压力的 36.1%.

调整后竖向压力实测值为

$$F = f/0.361 \quad (1)$$

式中: F 为调整后竖向压力实测值, kPa, 即为总的围岩压力值; f 为压力盒实测值, kPa. 对于Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ级围岩也参照Ⅳ级围岩处理.

本文中讨论的竖向围岩压力实测值均为式(1)调整后的围岩压力实测值.

2 围岩压力计算与实测的对比分析

2.1 围岩压力的不同计算方法与对比

普氏理论考虑毛洞跨度、内摩擦角和毛洞高度,广泛应用于欧美等国家的隧道设计中.根据公路、铁路隧道设计规范中,岩石坚硬强度对应的岩石单轴饱和抗压强度 R_c 的数值,采用其推荐的计算公式 $f = 0.1 R_c$,求得对应各级围岩下的 f 值.普氏理论的计算公式为^[2]:

$$q = \frac{B/2 + h_s \tan(45^\circ - f/2)}{f} \gamma \quad (2)$$

式中: q 为垂直均布压力, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$; γ 为围岩重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$; B 为隧道宽度, m; h_s 为隧洞高度, m; f 为坚固系数; φ 为围岩内摩擦角.

别尔巴乌麦尔理论计算公式为^[9]:

$$q = \frac{\gamma B h}{B + 2 h \tan f} \quad (3)$$

式中: h 为埋深, m.

当埋深大于 25 m 时写成以下形式:

$$q = \frac{r B}{2 \tan f} \quad (4)$$

分别采用公路隧道规范中采用方法即深、浅埋隧道法、普氏系数法和别尔巴乌麦尔法计算各监测断面竖向围岩压力,并与竖向围岩压力实测值进行比较,见表 3.

表 3 围岩竖向压力值比较

Tab.3 Comparison of surrounding rocks pressure calculated by different computing methods

监测断面	围岩等级	埋深/m	考虑释放系数调整后围岩力实测值/KPa	深、浅埋隧道法计算值/KPa	普氏系数法计算值/KPa	别尔巴乌麦尔法计算值/KPa
zk6+730	V	7.5	34.1	194.450	156.97	191.670
zk6+665	V	30.1	255.8	540.350	156.97	533.470
zk6+327	V	70.6	118.2	464.030	155.42	529.300
yk6+740	V	2.3	127.8	60.632	155.42	79.400
yk6+635	V	44.7	18.2	232.020	124.25	245.250
zk6+630	IV	45.7	124.8	232.010	124.25	245.245
yk6+580	IV	56.0	70.1	117.130	82.46	207.460
zk5+870	IV	54.4	255.3	234.260	124.25	245.250
zk5+888	IV	56.0	36.0	234.260	124.25	245.250
yk6+346	III	59.2	192.5	237.070	124.25	245.250
zk6+460	II	89.0	3.5	57.536	31.56	205.360
yk6+085	II	122.0	143.7	57.536	31.56	205.360

2.2 竖向围岩压力与埋深的关系

深埋和浅埋隧道分界,按荷载等效高度值,并结

合地质条件、施工方法等因素综合判定.荷载等效高度的判定公式为^[4]:

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (5)$$

式中: H_p 为浅埋隧道分界深度, m; h_q 为荷载等效高度, m, 计算如下:

$$h_q = q/\gamma \quad (6)$$

式中: q 为由矿山法算出的围岩垂向压力 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$, γ 为围岩重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$.

在龙头山隧道工程中, V 级围岩 $h_q = 18$ m, $H_p = 45$ m; 对于 IV 级围岩 $h_q = 9$ m, $H_p = 22.5$ m.

由图 4 看出, 浅埋段中, 由于普氏系数法不考虑埋深, 认为作用在洞顶围岩压力仅为压力拱内部岩体自重, 故在埋深小于 h_q 时计算值较实测值偏大, 而在埋深大于 h_q 而小于 H_p 时计算值偏小; 别尔巴乌麦尔法和深、浅埋隧道法对隧道浅埋段普遍偏大, 但基本符合实测值趋势, 即埋深大于 h_q 时随埋深增加而增大, 埋深大于 h_q 而小于 H_p 时随埋深增加而减少. 在深埋段中, 普氏系数法计算值偏小, 别尔巴乌麦尔法和深、浅埋隧道法计算值普遍大于实测值.

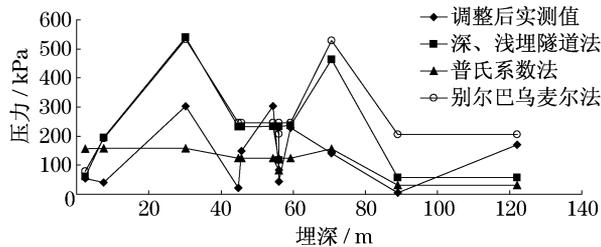


图 4 围岩压力与埋深的关系

Fig. 4 Surrounding rocks pressure buried depth relationship

由图 5 可以看出, 在隧道埋深较浅时 (30 m 以下), 竖向围岩压力随埋深增加而增长; 当埋深较深时 (40~60 m), 竖向围岩压力波动较大, 与围岩等级在 IV 级与 III 级间变动有关, 当埋深很深时 (60 m 以

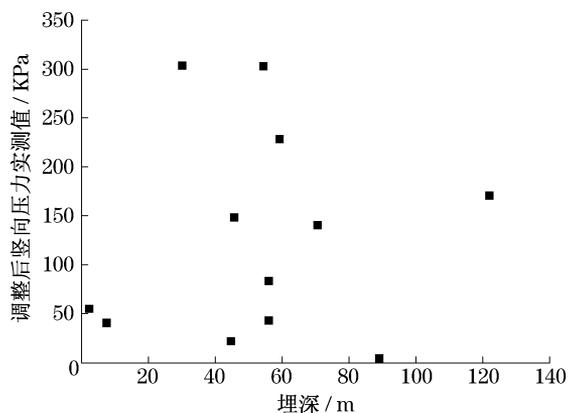


图 5 竖向围岩压力实测值与埋深关系

Fig. 5 Measured value-depth relationship

上), 围岩压力趋于平缓, 说明竖向围岩压力实测值与埋深并没有明显的关系.

2.3 竖向围岩压力与围岩级别的关系

竖向围岩压力与围岩级别的关系见图 6.

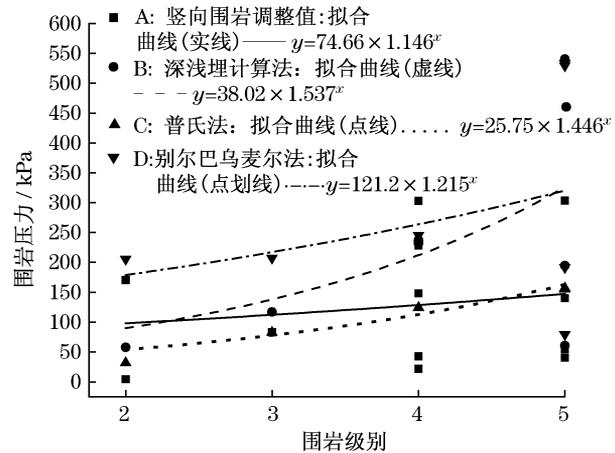


图 6 竖向围岩压力与围岩级别关系

Fig. 6 Pressure-rock level relationship

对各方法的计算值和实测值与围岩级别关系进行指数拟合.

竖向围岩压力实测值与围岩级别的关系如下:

$$y = 74.66 \times 1.146^x \quad (7)$$

式中: y 为竖向压力值, KPa, x 为围岩级别.

深、浅埋隧道法 (规范法) 计算围岩压力值与围岩级别的关系如下:

$$y = 38.02 \times 1.537^x \quad (8)$$

普氏系数法计算围岩压力值与围岩级别的关系:

$$y = 27.75 \times 1.446^x; \quad (9)$$

别尔巴乌麦尔法计算围岩压力值与围岩级别的关系如下:

$$y = 121.2 \times 1.215^x; \quad (10)$$

从以上的统计分析可以看出竖向围岩压力实测值, 随围岩级别提高而平缓增大. 对于高级别围岩 IV、V, 普氏系数法计算结果和实测值较为吻合, 而深、浅埋隧道法和别尔巴乌麦尔法计算结果比较一致, 但是均大于实测值; 对于 II、III 级围岩, 深、浅埋隧道法与实测值较为吻合, 普氏系数法要小于实测值, 而别尔巴乌麦尔法则大于实测值. 普氏系数法计算值在 II、III、IV 级围岩中相对实测值偏小, 在 V 级围岩中较实测值大, 总体来说偏不安全. 深、浅埋隧道法和别尔巴乌麦尔法在大多数情况下均大于实测值, 该方法偏保守.

3 结论

本文结合广州龙头山大跨度隧道围岩压力实测值,考虑了大跨度隧道双侧壁导洞工法对竖向围岩压力的释放,对竖向围岩压力采用了不同计算方法进行计算比较,得出以下结论:

(1) 在围岩压力与埋深的关系上,深、浅埋隧道法、别尔巴乌麦尔法与实测值的变化趋势基本一致,但比实测值偏大,普氏系数法则比较接近于实测压力的平均值。

(2) 在高级别围岩Ⅳ、Ⅴ上,普氏系数法计算结果和实测值较为吻合,而深、浅埋隧道法和别尔巴乌麦尔法计算结果比较一致,但是均大于实测值;在Ⅱ、Ⅲ级围岩级别上,深、浅埋隧道法与实测值较为吻合,普氏系数法要小于实测值,而别尔巴乌麦尔法则大于实测值。

(3) 普氏系数法偏不安全,别尔巴乌麦尔法相对深、浅埋隧道法、普氏系数法计算结果较为合理,深、浅埋隧道法结果偏大,偏安全。

参考文献:

- [1] 曲海锋,杨重存,朱合华,等.公路隧道围岩压力研究与发展[J].地下空间与工程学报,2007,3(3):536.
QU Haifeng, YANG Zhongcun, ZHU Hehua, et al. Research and development on surrounding rock pressure of road tunnel. chinese[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3):536.
- [2] 沈明荣.岩体力学[M].上海:同济大学出版社,1991.
SHENG Mingrong. Rockmass mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991.
- [3] 中华人民共和国行业标准. TB 10003—2001 铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2001.
Professional Standard of the People's Republic of China. TB10003—2001 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Press, 2001.
- [4] 中华人民共和国行业标准. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
Professional Standard of the People's Republic of China. JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [5] 姜德义,刘春,李光扬,等.大跨度隧道围岩竖向压力计算值的对比分析[J].中国矿业,2005,14(11):63.
JIANG Deyi, LIU Chun, LI Guangyang, et al. Correlation and analysis of calculation values of vertical pressure of wall rocks of large-span tunnel[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(11): 63.
- [6] 刘继国,郭小红.深埋小净距隧道围岩压力计算方法研究[J].公路,2009,3:200
LIU Jiguo, GUO Xiaohong. A study on calculation method of surrounding rock pressure about deep-buried tunnel with small spacing[J]. Highway, 2009, 3:200.
- [7] 赵占厂,谢永利,杨晓华,等.黄土公路隧道衬砌受力特性测试研究[J].中国公路学报,2004,17(1):66.
ZHAO Zhanchang, XIE Yongli, YANG Xiaohua, et al. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1):66.
- [8] Bhasin R, Grimstad E. The use of stress-strength relationship in the assessment of tunnel stability[C]//Proc Recent Advances in Tunneling Technology. New Delhi: [s. n.], 1996: 93-98.
- [9] M. 鲍莱茨基, M. 胡戴克. 矿山岩体力学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1985. 29-38.
Boreek M, Chudek M. Mining rock mass mechanics [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985. 29-38.
- [10] 同济大学隧道及地下工程研究所. 围岩变形规律研究与科研监测总报告[R]. 上海:同济大学隧道及地下工程研究所. 2007.
Tunnel Research Institute of Tongji University. Study on the deformation law of surrounding rocks and scientific monitoring report[R]. Shanghai: Tunnel Research Institute of Tongji University, 2007.