

黄土拱作用机理剖析

赵学勳¹, 王 璐^{2,3}

(1.西安公路研究所, 西安 710054; 2.华南农业大学信息学院, 广州 510640; 3.中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘 要: 广泛分布于黄土地区的民居黄土窑洞表明, 围岩土体中的黄土拱是承受荷载的结构单元。应用滑动线法绘出的土拱形状, 已被实际观测资料加以证实。对黄土拱的承载力、整体稳定性进行了计算, 揭示出现有的两种地层压力学说没有正确与谬误之别, 只是各有其适宜的应用场合, 其前提条件是整体稳定性是否满足。

关 键 词: 黄土拱; 承载机理; 解析方法; 稳定性

中图分类号: T 432

文献标识码: A

Analysis of mechanism of loess arching

Zhao Xue-meng, Wang Lu

(1.Xi'an Road Institute, Xi'an 710054, China; 2.School of Information, South China Agricultural University, Guanzhou 510640, China;

3.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guanzhou 510640, China)

Abstract: There are a lot of people inhabitancy caves locating in loess zone. The loess mass surrounding cave can be supported by loess arching formed in the process of excavation, which can maintain the stability of caves. The shape of arch in loess cave excavation was determined by the limit sliding line method and verified by the site measurement information. The bearing force of arch and stability parameter of wall rock was calculated by the limit sliding line method. It is shown that two kinds of earth pressure method determined loads on lining structure can be the same with the different suitable conditions.

Key words: loess arching; bearing mechanism; analytical method; stability

1 引 言

随着我国西部大开发战略的实施, 高等级公路上的隧道数量日益增多。隧道的设计计算方法和施工工艺水平直接影响到工程质量和费用的高低。隧道是要有衬砌的。一直以来, 计算衬砌的垂直荷载, 存在着两种学说^[1]: 一是松动压力说, 认为是“由于围岩土体坍塌而引起”; 二是变形压力说, 主张是“由于开挖卸荷、土体变形、挤压衬砌所引起”。孰是孰非? 没有定论。但双方各做各的事, 各自发表文章, 争论不激烈。

与之相应, 工程建设总结中有着完全相反的观点, 一个说: “快挖快衬砌, 使洞周土体塑性区大大减少”; 另一个却讲“适当迟缓衬砌, 以充分发挥土体的抗剪能力, 可减少衬砌上的围岩压力”。何者为宜? 这可是与工程经济安全可靠有极大关系的事, 不容迟疑, 不可等闲视之。这里面有一

个关键性的前提, 就是围岩整体稳定性是否有保证。

隧道围岩土体作为土工构造物, 需同时考虑三个问题, 即: 承载力、变形及稳定性。它和地基土体的承载力、沉降不同, 也和边坡的稳定有些区别。用什么单元来分析, 从何做起? 心中无数。

幸运的是, 遍布于黄土地区广大城乡的民居黄土窑洞给了我们以启示^[2]。窑洞和隧道相似, 都呈拱形, 只是尺寸比较小一些, 它只有简单的支护, 没有衬砌。鉴于黄土不能承受拉力, 所以只能以土拱形状传递压力, 将上覆土重传到洞底平面。如此, 土拱就成为承载的主体。成就卓越的刘东生教授当年研究黄土, 就是从调查三门峡的黄土窑洞开始的^[3]。他看见老乡们利用古土壤层的坚固性来做了窑洞的天花板, 从而发现了古土壤层。可这块天花板还需要那呈曲线形的侧壁土体的支撑, 这就和拱形差不多了。他们的黄土研究成果已成为我们工作的技

术基础^[4]。

无独有偶的是,2004 年颁布的公路隧道设计规范^[5],引进了奥地利的工程地质学家提出的“新奥法”,是以充分发挥围岩的自承载能力为基本原理。这一思路又给我们以启迪。想办法计算围岩土拱的自承载能力,计算作用于土拱上的推力,用以判断土拱的整体稳定性,从而辨别学术上的是与非,并产生社会效益,就成为我们争取达到的目标。

2 黄土拱力学特性分析

黄土隧道围岩土体主要是风成沉积,厚度大,比较均匀,软弱结构面不突出,初始应力较小,所以有可能对其力学特性进行较深入的探讨。

在开挖隧洞以前,任意一点的应力状态如图 1 所示,最大主应力 $\sigma_{\max}$,为铅垂方向,最小主应力 $\sigma_{\min}$,为水平方向。

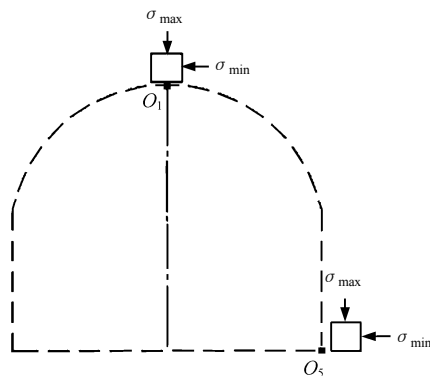


图 1 土洞开挖以前土的应力状态

Fig.1 The stress state before cave excavation

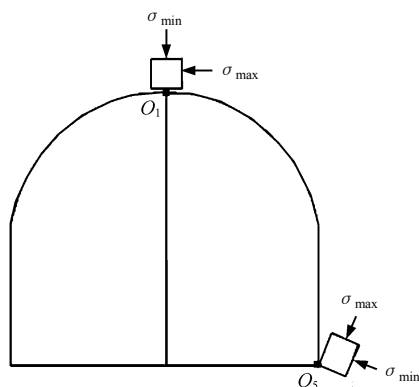


图 2 土洞开挖以后土的应力状态

Fig.2 The stress state after cave excavation

开挖隧道以后,拱顶的 $\sigma_{\max}$ 方向旋转 90° ,拱脚的应力状态亦有了变化,如图 2 所示。随着隧洞断面的扩大,围岩土体逐渐从弹性状态进入临塑状态,又发展到极限平衡状态,直至丧失整

体稳定性,到坍塌破坏。为了具体了解这一破坏过程,专门修建了试验性的黄土隧道,单车道,250 m 长,穿过 Q_1 土层。无衬砌土洞有 3 段,累计长 34.9 m,其中有 2 段发生崩坍,长度分别为 7.5 m, 14.0 m,另有 13.4 m,处于临界状态。

崩坍是逐年发展的,较大的崩坍皆发生在冬冻春融期间。破坏是从侧壁底部开始,左右两侧大体上对称,如图 3 所示。由于侧墙的存在,图 4 所示的崩坍是从墙顶开始。当地最低气温为 -16°C ,厚度仅 40 cm 的砖砌墙体有效地起到了保湿保温作用。

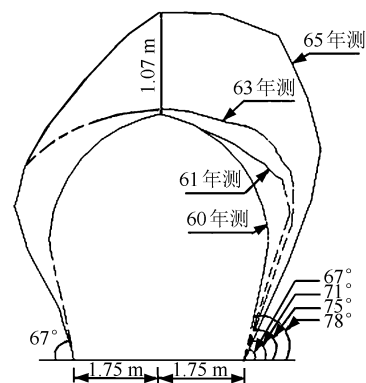


图 3 南崩坍段逐步发展图

Fig.3 The progress of cave collapse in south segment of tunnel

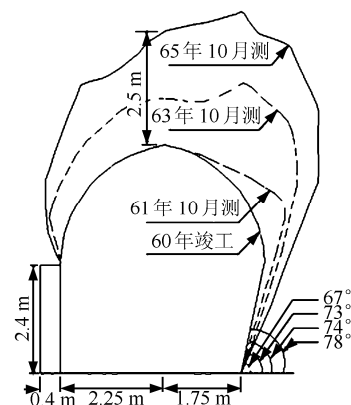


图 4 北崩坍段逐步发展图

Fig.4 The progress of cave collapse in north segment of tunnel

图 3、图 4 所示的崩坍曲面可视为围岩土体逐步地发生剪切破坏的滑裂面。

应用松散介质极限平衡理论来分析时,考虑到黄土具有粘结力,摩擦角,又有体积力,计算分两步进行:

第一步,在不考虑体积力的情况下,将土洞表

面分为三段, 近似为直线, 在其上作用有匀布超荷载, 即内聚力 $C \cdot \text{ctg} \varphi$, 用滑移线网络法依次绘出如图 5 所示的围岩滑线网络图。

图 5 中 $O_1O_2O_3O_4O_5$ 所包围的网络就是所要得到的土拱, 左右对称。它不同于拱桥的主拱圈, 也和普氏理论中的压力拱不同。土拱的拱顶截面高度为 O_1O_2 。这个滑线网络图由三部分组成, 即: 主动应力状态区, 为三角形 $O_1O_2O_3$, 两个夹角等于 $45^\circ + \varphi/2$; 过渡区为 $O_1O_3O_4$, O_3O_4 为对数螺旋线; 被动应力状态区 $O_1O_4O_5$, O_1O_5 的夹角为 $45^\circ - \varphi/2$ 。图 5 所示的滑动网络的包络线与图 3、4 中的滑裂线相比较, 就可看见二者大致相似, 表明所应用的绘制网络图的方法是可行的。

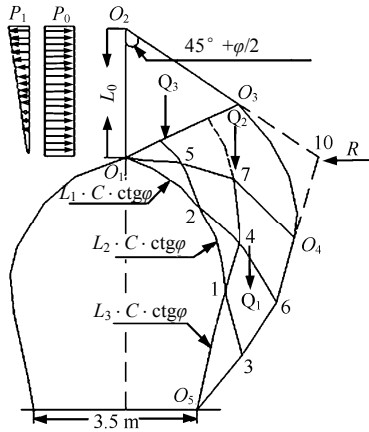


图 5 围岩滑线网络图

Fig.5 The sliding line net of wall rock

主动应力状态区的 O_1O_2 是土拱的拱顶截面, 可用力多边形图解法得出作用在此截面上的荷载 P_0 , 呈水平方向, 均匀分布。土的内聚力在 O_1O_2 截面上也存在, 包含在 P_0 之中, 要从中扣除。

第二步, 考虑土的体积力的影响, 先计算三个区域内的体积力, 后按力多边形图解法求出体积力在 O_1O_2 上面产生的荷载 P_1 , 水平方向, 呈三角形分布, 在 O_1 点等于零。这一荷载在斜坡稳定分析中是压力, 在隧道的情况下, 变为拉力, 起着减少承载力的作用, 应予以扣除。由此得出土拱的极限水平承载力:

$$P = P_0 - P_1 \quad (1)$$

式中: P_0 为土的粘结力在拱顶截面产生的压力; P_1 为土的体积力在拱拱顶截面产生的拉力

下面接着进行土拱稳定性的分析。这个分析就

是定量地考察引起土拱剪切滑动的力与抵抗滑动的力之间的平衡条件。滑动力是拱顶水平推力, 抗滑动力就是水平承载力。土拱拱顶水平推力的计算图式如图 6 所示。

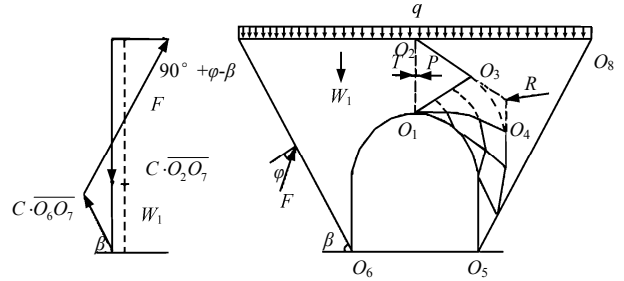


图 6 土拱拱顶截面水平推力计算图

Fig.6 Calculation of level pushing force at arch top in tunnel section

图 6 中, 夹角 β 取为 $45^\circ + \varphi/2$, 偏于安全。作用在 $O_7O_2O_8$ 平面上的垂直匀布荷载 q , 按现行的公路隧道设计规范中的公式计算, 视其埋置深度的不同, 而用相应的公式。

对深埋隧道 (规范 2004 中式 6.2.3)

$$q = 0.45 \times 2^{s-1} \gamma \omega \quad (2)$$

$$h_q = q/\gamma \quad (3)$$

对浅埋隧道

当埋深 $H < h_q$ 时 (规范 2004 中式 E.O.2-1),

$$q = \gamma H \quad (4)$$

当埋深为 $h_q < H < 2.5h_q$ 时 (规范 2004 中式 E.O.1-3),

$$q = 2.5\gamma h_q \quad (5)$$

水平推力 T 由图 6 所示的力多边形求出。

到此为止, 即可列出土拱稳定性的判别条件为

$$p > KT \quad \text{稳定} \quad (6)$$

$$p \leq KT \quad \text{不稳定} \quad (7)$$

安全系数 K , 按结构计算采用, 取较大值。

在稳定条件下, 就可应用变形压力学说计算, 考虑衬砌晚一点做, 衬砌刚度小一些, 让围岩土体有时间发生变形, 或者加厚回填层, 按土体变形和衬砌变形相协调的原则设计衬砌, 以取得较好的技术经济指标。

如果不稳定,那就只能承认松动压力学说是适用的。前述的计算土拱水平推力时所用的匀布垂直荷载,就是铁路部门通过对 127 座单线铁路的 417 个塌方资料的统计分析,以 5 m 为基本跨度整理而成的。按此考虑,快挖快砌成为必然,不但不能回填松软层,而且要及时填实拱背缝隙,以防土体塑性区域的扩大,引起灾难性的危害。水平推力 T 由图 6 所示的力多边形求出。

3 结 语

此项研究是直接为黄土隧道的设计、施工服务的,所提出的评估围岩整体稳定性的方法,以及由此对两种计算衬砌荷载的学说、两个施工方法各有其适用范围的解读,对工程建设是有用的。

此外,对土力学而言,所绘制的隧道围岩滑动网络图有别于已有的三种,即:土坡、地基和挡土墙后的土体按极限平衡理论分析的滑动网。其滑线网络如何运用已有四类边值问题网络的处理方法,是值得研究的。

对民居建筑而言,此项研究成果为窑洞选址、保证其坚固耐用,提供了必要的技术。其实,此成

果的核心是土拱,是受到黄土窑洞的启发后才想到的。来之于民,回归于民,是天经地义的事。

时至今日,我们的确感到黄土窑洞是一座知识宝库,是黄土地区丰厚历史文化积淀的一部分,除了如前所述的以外,还有建筑物理学方面的“冬暖夏凉”的感知和与地理信息系统(GIS)有关的一些观念。在提倡推行绿色建筑的今日,我们认同一位著名建筑学家任震英所倡导的理念,那就是人们完全可以逐步地把科学技术和现代的物质条件应用到窑洞建筑中去,赋予古老的窑洞新的生命。

参 考 文 献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [2] 陕西省交通设计院. 黄土调查研究汇集[M]. 北京: 人民交通出版社, 1960.
- [3] 刘东生. 黄土与环境[M]. 科学出版社, 1985.
- [4] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.