

软土隧道土压力问题的研究综述

张云

殷宗泽

(南京大学地球科学系 南京 210093) (河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 概括了软土隧道衬砌上土压力的研究方法,按其所采用原理不同,将其分为三类,即简化计算的方法、考虑土与衬砌相互作用的计算方法和现场量测及模型试验的方法,总结了迄今为止具有代表性的研究成果,对各种方法的研究思路及存在的问题作了深入细致的分析.在此基础上,提出了今后应从数学模型的描述、模型试验以及现场量测数据的分析等几方面作进一步深入研究,重点应解决如何模拟隧道施工方法和施工过程的问题,并对各类隧道提出简便实用的土压力计算公式,以供衬砌设计之用.

关键词 软土隧道;土压力;衬砌;综述

城市人口和人类活动的增加,使地面空间越来越紧张,地下空间作为一种尚未充分利用的资源,引起了人们的广泛重视并积极加以开发利用.在地下空间的开发利用中,常常遇到在软土地层中建设隧道的问题,如城市地下铁道、公路隧道及地下共同沟等.

软土地层中常用的隧道施工方法有沉管法、顶管法和盾构法,用于软土隧道衬砌的材料有钢筋混凝土、铸铁、钢、钢壳与钢筋混凝土复合材料等,其中以钢筋混凝土管片应用较多.管片之间的连接方式多种多样,有柔性和刚性之分.不论哪种类型的隧道,也不论其衬砌材料和连结方式如何,土压力都是作用于衬砌上的主要荷载,是进行衬砌设计的主要依据,因此如何恰当地估算衬砌上土压力的大小及分布,就成了工程设计人员非常关心的问题.

作用于衬砌上的土压力实际上是周围土层与衬砌相互作用面上的接触应力,其大小及分布形式不仅与土层及衬砌的物理力学性质有关,还与施工方法、隧道的几何参数等相关,因此,关于衬砌上土压力的研究是隧道工程中较为困难却又特别重要的一个课题.

1 衬砌上土压力研究的现状

作用于衬砌上的土压力受衬砌和地层的性质、隧道的施工方法、隧道的埋深、形状、断面的几何尺寸等诸多因素的影响,这使得土压力的研究相当困难,到目前为止,对衬砌与地层相互作用的机理尚未

研究得十分清楚,关于这方面的论文及研究报道的数量也不多.就已有的文献来看,按其所采用的原理不同,对衬砌上土压力的评价方法可分为简化计算方法、考虑衬砌与地层共同作用的分析方法、现场量测及模型试验方法等.

1.1 简化计算方法

在这一类方法中,一般将作用于衬砌上的土压力分为垂直地层压力、水平地层压力、拱底的垂直地基反力以及由衬砌变形引起的被动弹性抗力四部分.关于垂直地层压力的计算理论有:①土柱理论.对埋置较浅的隧道,由于盾尾空隙或衬砌变形引起隧道顶部上覆土柱下沉,两侧地层对柱体产生与下沉反向的摩擦力,根据刚体静力平衡条件,认为垂直地层压力是上覆土柱的重量减去土柱两侧的摩擦力,在较差的地层中,此摩擦力常被假定为零,即

$$p_v = \gamma h \quad (1)$$

式中: p_v 为垂直地层压力; γ 为上覆土层的平均容重; h 为上覆土层的厚度.据报道,此计算方法在软土地层中较为合适,上海软粘土层中修建隧道时所测得的土压力数据表明,隧道拱顶部分土压力随时间延长而增加,最后十分接近于上覆全部覆土重量^[1].但对埋深较大或较硬土层中的隧道,由于拱效应的存在,作用在衬砌上的垂直地层压力要比其上的土柱重量小得多,这已为现场试验所证实^[2].②太沙基理论.该理论以松散体压力为基础,从应力传递的概念出发,认为隧道在开挖后,顶部土体在重力作用下,在隧道两侧至地面之间出现两个垂直

方向的剪切面,由散粒介质平衡方程式算出垂直地层压力

$$p_v = \frac{b\gamma - c}{k \tan \varphi} (1 - e^{-k \tan \varphi \cdot \frac{h}{b}}) + q e^{-k \tan \varphi \cdot \frac{h}{b}} \quad (2)$$

式中: b 为地下结构跨度的一半; c, φ 为土的粘聚力及内摩擦角; q 为地表垂直压力; k 为侧压力系数, 其余符号同前. 它考虑了隧道断面的几何尺寸、埋深、土体的强度指标的影响, 但对与土压力密切相关的施工方法和衬砌的刚度却未予考虑, 同时, 它也没有考虑土体中拱效应的存在. ③ 普氏理论. 前苏联学者普罗托吉雅柯诺夫也以散体介质理论为基础, 认为在松散介质中开挖隧道后, 在其上方形成一抛物线的平衡拱(压力拱), 拱下土体以平均压力作用于衬砌上, 衬砌受到的垂直地层压力

$$p_v = \gamma h \quad (3)$$

其中, h 为压力拱高度, 计算公式为

$$h = \frac{1}{f} [b + h_0^0 \tan(45^\circ - \varphi/2)] \quad (4)$$

式中: h_0^0 为隧道高度; f 为普氏系数, 对粘性土可取 $f = \tan \varphi$. 显然, 对不能形成压力拱的松软地层或埋深太浅的隧道, 普氏理论是不适用的.

水平地层压力则用以极限平衡条件为依据的朗肯主动土压力计算. 由于衬砌的侧向变形的作用, 隧道两侧的土体实际上并不处于主动极限状态, 而是处于被动状态, 因此, 实际的水平地层压力要比朗肯主动土压力大, 而且受衬砌形状及变形的影响, 其分布也不是直线形式.

作用于拱底的垂直地层反力通常被认为等于垂直地层压力与衬砌自重之和, 且均匀分布. 这样处理问题的近似性是显而易见的, 因为与衬砌形状及变形相关的垂直地层压力和垂直地层反力都不是均匀分布的, 对圆形隧道的分析结果表明, 它们在隧道的中部较大, 向两侧则逐渐减小.

至于由衬砌变形引起的地层被动抗力的计算则有日本的三角形法和前苏联的 O.E. 布加也娃法, 它们均采用文克勒局部变形理论, 即认为土层为理想的线弹性体, 地层抗力与相应点的衬砌变形成正比, 其比例系数被定义为地层抗力系数. 这两种方法的区别在于对地层抗力的分布形式作了不同的假设. 日本的三角形法假定水平地层抗力与衬砌的水平位移成正比, 按三角形分布, 在圆形衬砌的水平直径处达到最大值, 如图 1 所示. 前苏联的 O.E. 布加也娃法假定地层被动抗力按圆形半径方向作用在衬砌上, 呈新月形分布, 如图 2 所示, 在衬砌顶部 $2\varphi =$

90° 的范围内为脱离区, 无地层抗力, 在 $45^\circ \leq \zeta \leq 90^\circ$ 的范围内, 地层抗力 $k\delta = k\delta_a \cos 2\zeta$, δ_a 为水平半径处的圆环变形值; 在 $90^\circ \leq \zeta \leq 180^\circ$ 的范围内, 地层抗力 $k\delta = k\delta_a \sin^2 \zeta + k\delta_b \cos^2 \zeta$, δ_b 为底部的土层变形量, k 为地层的抗力系数.

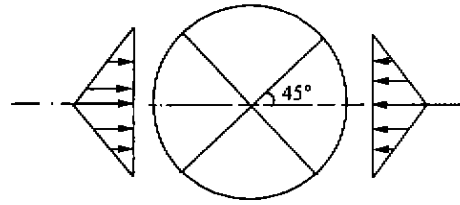


图1 三角形法

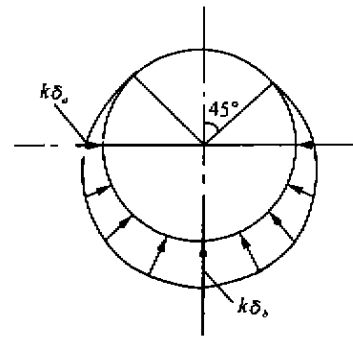


图2 布加也娃法

简化计算方法人为地将作用于衬砌上的土压力划分为以上四部分, 再对各部分提出一些具体的计算公式, 实际上只是解决了计算上的问题, 而对与土压力大小及分布密切相关的土性、施工方法及衬砌刚度等都没有考虑, 因此, 所得结果的可信度并不高.

1.2 考虑地层与衬砌共同作用的分析方法

该方法将地层和衬砌作为连续介质看待, 衬砌和地层这两种不同材料的接触面上的接触应力即为土压力, 根据地层的具体情况, 可将其作为弹性、非线性弹性、弹塑性或粘弹性材料, 视问题的复杂程度不同, 可采用解析解法或数值解法, 由接触面上的接触条件解出接触面上应力的分布状况. 这方面论文和研究报道已有不少, 但具有代表性的却不多. 国内的同济大学等单位利用地层与衬砌间的位移协调条件得出了轴对称条件下圆形隧道弹塑性解析解和粘弹性解析解, 并作了大量的有限元分析^[1]. 日本在青函隧道工程中对衬砌上的土压力作了较为细致的研究^①, 它将围岩作为粘弹性体, 并假设衬砌处于轴对称的平面应变状态, 同时, 为了反映衬砌修筑进度对土压力的影响, 对围岩中产生松弛区域和不产生松弛区域两种情况分别进行了计算. 分析结果表明, 不产生松弛区域时的土压力要比产生松弛

① 日本土木学会青函隧道土压研究委员会. 青函隧道土压研究调查报告. 1977. 365 ~ 401

区域时的土压力大,在产生松弛区域的情况下,若围岩不发生破坏,则衬砌修筑时间晚,作用在衬砌上的土压力减小;若围岩发生破坏,则衬砌修筑时间晚,作用在衬砌上的土压力会有所增大。另外,该研究还对衬砌刚度、注浆区域大小、开挖面推进等对土压力的影响作了探讨。El-Nahhas^[3]则按开挖和相互作用两个阶段分析了隧道和地层之间的相互作用,先根据无衬砌隧道开挖面上的不同结点的径向应力和径向位移之间的关系,绘出一条地层反映曲线,然后真实地计算掘进作业引起的在衬砌起作用前的地层位移。地层位移确定后,即可在相应的地层反映曲线上得到相应的现场应力降低值,随之可确定地层与衬砌相互作用阶段的起始压力,并算出最终平衡时衬砌上的土压力,它考虑了衬砌施作时间对土压力的影响。

与简化计算方法相比,这类方法克服了人为假设土压力分布及大小的主观随意性,兼顾了衬砌和土层的性质、施工方法及过程和开挖面推进等影响土压力的因素,较客观地反映了衬砌上土压力的本来面目,其计算结果具有一定的合理性。但由于土体性质的复杂性,其应力应变关系不仅与土类有关,还与其应力路径有关,而应力路径又决定于隧道的施工方法,在现有的分析方法中,对此基本未作考虑。土压力是衬砌与土体接触面上的接触应力,而两者的刚度一般相差较大,目前,对此并未作深入研究,通常仍将其作为连续体看待。在文献[3]的方法中,确定衬砌起作用前的地层位移是困难的,只能凭经验,但它又是确定衬砌上最终土压力的重要参数,其数值大小直接影响到土压力的大小及其分布。因此,要利用此类方法可靠地计算衬砌上的土压力,还需要深入研究不同类型隧道土压力的形成机理,研究土压力的计算方法,在计算过程中,尽可能地模拟隧道的实际工作状态。

1.3 现场量测及模型试验方法

现场量测能够真实地反映各种因素对土压力的综合影响,因此许多学者都很重视现场量测数据的收集和分析。Eisenstein等^[4]认为土压力的大小和分布与衬砌安装历史、时间及掘进速度有关,并从实测资料分析认为对刚度较小的肋条横板衬砌系统,土压力分布较均匀,而刚度较大的预制管片衬砌系统的土压力分布则为椭圆形,且垂直方向应力大于水平方向应力。前苏联对两座 $H/D = 3 \sim 4$ (H 为隧道中心的埋深, D 为圆形隧道的直径) 的隧道进行实测,结果表明拼装衬砌上径向土压力分布呈上部大,向下部逐渐减小的特征^[5]。同济大学的孙钧和侯学渊教授^[6]考虑了衬砌刚度对土压力的影响,在对上

海地区软粘土隧道的现场实测基础上,提出了将柔性圆形衬砌看成一具有无限弹性铰结的链条环的链条理论,当衬砌在某一方向受压时,必在另一方向膨胀。当衬砌在较大的垂直压力作用下压扁时,衬砌在水平方向除承受松动土压力,即主动土压力外,还承受链的作用,水平方向受压土体的弹塑性变形产生被动抗力,从而调整垂直与水平方向的压力值,定性分析出土压力分布包线呈桃子形和葫芦形的结论。目前,实测资料仅来源于少数工程,受施工条件及地层和衬砌性质等诸多因素的影响,实测结果的离散性很大,对其还缺乏深入的研究,因此很难将它作为普遍的规律加以应用。

相对于现场测试,室内模型实验更有利于有目的地控制实验条件,从而研究各影响因素对土压力的作用。侯学渊教授^[7]曾以金属圆管模拟隧道,以钢筒模拟盾构,通过相似材料的模型实验,给出了土压力分布的定性描述,认为隧道周围土压力分布与衬砌和周围地层的刚度比密切相关,刚度比越小,土压力分布越均匀。相似材料的模型实验虽然可以直观地对土压力作定性的研究,但它仍存在许多问题。首先,模型的缩尺使自重应力损失,而对于研究隧道衬砌上的土压力问题来说,保持模型和原型的自重应力场相似是非常重要的。其次,它只是模拟了材料的特性,而对施工过程及施工过程中的回填注浆、衬砌拼装等尚难于模拟。此外,目前用于直接测试土压力的土压力盒在接触面上的测试精度难于保证。正因如此,以测定衬砌上的土压力为目的的模型试验很少见。

2 今后的研究方向

尽管国内外许多学者致力于土压力问题的研究,但由于问题本身的复杂性,对其认识仍显不足,今后应在以下几方面作进一步深入研究。

a. 完善数学模型。大量的现场观察均已证明,作用于衬砌上的土压力不仅与土体的性质有关,还与施工方法、衬砌刚度及衬砌的施作时间等有关,在数学模型中应力求反映土体的复杂性,如土体的非线性弹性、固结和蠕变特性及应力应变关系受应力路径和历时等因素影响的性质。要重点研究如何在数学模型中反映隧道的施工方法和施工过程,如隧道的开挖步骤、回填注浆量的多少等,以提高计算结果的可信度,并实现施工过程的动态模拟。现有的数学模型在这方面处理还过于简单。

b. 开展全面系统的模型试验研究。由于土体性质及施工过程的复杂性,要从理论上完全反映它们对土压力的影响,并建立相应的计算关系是非常困

难的,因此,模型试验的研究就显得非常必要。模型试验不仅要模拟相似材料,而且要模拟施工方法及过程。尽管在 50 年代我国一些从事地下工程研究的学者就试图通过试验研究衬砌上的土压力问题,但由于各种试验条件及量测手段的限制,其进展并不大。近年来,离心模型试验技术的发展,为隧道衬砌上土压力的模型试验研究创造了良好的条件,因为它能补偿因模型缩尺带来的自重损失,使模型的应力状态与原型保持一致,较真实地模拟原型的性态,这对于研究衬砌上的土压力问题来说是非常重要的。当前,离心模型试验的主要问题在于如何在试验过程中模拟隧道的施工过程,对此一直没有较好的解决方法,另外,由于试验时模型处于高速旋转状态,对测试元件的要求极高,因此要研究适用于离心试验的微型土压力盒。

c. 多积累现场的量测数据。现场量测数据是现场各影响因素的综合反映,受现场各种必然因素及偶然因素的影响。要对其中的主要影响因素有针对性地进行深入探讨,去粗取精,去伪存真,为理论分析提供充分的论据。在条件许可的情况下,要多做现场测试,以利于进行比较分析。

最后,从工程实用角度出发,从理论及试验分析中提出简便、易行、所需参数较易获取的土压力计算公式供设计之用也是今后努力的一个方向。

参考文献

- 1 孙钧.地下工程设计理论与实践.上海:上海科学技术出版社,1996
- 2 Zavriev G P.从现场试验资料得出地下结构上的粘土压力.隧道译丛,1979(1):18~20
- 3 El-Nahhas F, El-Kadiand F, Ahmed A. Interaction of tunnel linings and soft ground. Tunneling and Underground Space Technology, 1992(7):33~44
- 4 Eisenstein Z, El-Nahhas F, Thomson S. Pressure-displacement relations in two systems of tunnel lining. In: Resendiz D, Romo M D, Balkema A A eds. Soft Ground Tunneling, Rotterdam, 1981. 85~94
- 5 关树宝译.拼装衬砌上的土压力分布和变形.隧道译丛,1978(4):79~86
- 6 孙钧,侯学渊.上海地区圆形隧道设计的理论与实践.土木工程学报,1984,17(3):35~47
- 7 侯学渊.隧道设计模型理论与试验.岩土工程学报,1984,6(3):35~43
- 8 徐桢祥.地下工程试验与测试技术.北京:中国铁道出版社,1984
- 9 姜朴.现代土工测试技术.北京:中国水利水电出版社,1997
- 10 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程.北京:中国建筑工业出版社,1984

(收稿日期:1998-06-05 编辑:熊水斌)

(上接第 22 页)

参考文献

- 1 王仁洲,颜湘武,尚秋峰.未来灵活交流输电系统的研究方向.华北电力大学学报,1996(10):1~4
- 2 何大愚.柔性交流输电系统概念研究的新进展.电网技术,1997(2):9~14
- 3 李海峰.统一潮流控制策略的研究:[学位论文].南京:河海大学,1998
- 4 梁旭,姜齐荣,王仲鸿等.NETOMAC 在静止调相器仿真中的应用.电网技术,1998,22(4):1~6
- 5 奚江惠,涂光瑜.基于统一潮流控制器对电力系统暂态稳定控制的研究.电力系统自动化,1997,21(3):51~53
- 6 罗春雷,孙洪波,徐国禹.UPFC 动态建模与最优控制研究.电力系统自动化,1997,21(11):4~6
- 7 卢强,孙元章,沈沉,梅生伟.面向目标的 FACTS 设备智能预估控制方式(一).电网技术,1998,22(4):6~9
- 8 卢强,孙元章,沈沉,梅生伟.面向目标的 FACTS 设备智能预估控制方式(二).电网技术,1998,22(5):5~9
- 9 王锡凡.分频输电系统.中国电力,1995,28(1):2~6
- 10 韩居华,辛玲.一种新型的远距离输电系统——分频输电系统介绍.电力情报,1998(3):11~14
- 11 王锡凡,王秀丽.分频输电系统的可行性研究.电力系统自动化,1995,19(4):5~13
- 12 王秀丽,王锡凡,王建华等.分频输电系统实验初探.中国电力,1996,29(6):33~36
- 13 Wang Xifan, Wang Xiuli. Feasibility study of fractional transmission system. IEEE/PES Summer Meeting, Portland, 1995
- 14 王明俊,于尔铿,刘广一.配电系统自动化及其发展.北京:中国电力出版社,1998
- 15 王平洋.电力市场与远动技术.电力系统自动化,1997,21(4):1~2
- 16 刘觉,金振东.电力市场的发展对 EMS 的新挑战.电力系统自动化,1997,21(2):7~9
- 17 王平洋.电力市场竞争与电力调度.电力系统自动化,1997,21(2):10~12
- 18 辛耀中,李泽,赵祖康.国际电工委员会第 57 技术委员会 1998 年会议概述.电力系统自动化,1998,22(10):45~49

(收稿日期:1998-11-10 编辑:熊水斌)