

越江隧道泥水盾构施工引起地层移动的有限元分析

马可栓^{1,2,3}, 丁烈云^{1,2}, 彭畅^{1,2}

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院, 430074, 武汉; 2. 华中科技大学控制结构湖北省重点实验室, 430074, 武汉; 3. 南阳理工学院土木工程系, 473004, 南阳)

摘要: 以武汉越江公路隧道为工程背景,建立了考虑衬砌结构与土体变形耦合作用的分析模型,并对单洞、双洞开挖进行了有限元分析。模拟结果表明:与有限元分析最大沉降相比较,Peck公式的预测值一般偏大;在相同埋深的情况下,单洞和双洞开挖引起的地面水平槽的峰值先后出现在3个区域,而这3个区域对于建筑物来说是最危险的区域;随着隧道埋深的增加,地面移动槽的宽度增大但峰值减小,沉降槽峰值位置不变,而水平槽最终峰值位置远离两隧道中心,即对于地面建筑物最危险的区域随着隧道埋深而变化。此结论可为设计、施工提供参考。

关键词: 有限元分析;沉降槽;水平移动槽;泥水盾构隧道

中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1119-05

Finite Element Analysis of Soil Movements Due to Slurry Shield Tunnelling for River-Crossing Soft Clay Highway

Ma Keshuan^{1,2,3}, Ding Lieyun^{1,2}, Peng Chang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Department of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: Aiming at the river-crossing highway tunnels in Wuhan and taking the lining construction and soil deformation coupling effects into account, two finite element models are established for single-tunnel and twin-tunnel excavation. A comparison between the finite element analysis and the Peck's empirical formula indicates that the predicted maximum settlement value from Peck's formula generally tends to larger. It is concluded that under the same depth, the peak values of the ground horizontal movement trough caused by single-tunnel and twin-tunnel digging appear sequentially in three regions which are the most dangerous for ground structures; while the tunnel depth gets deeper, the width of ground movement trough increases but the peak values decreases, the position of the settlement trough remains constant, and the final peak value of the horizontal movement trough gets apart from the centre of two tunnels, which implies that the most dangerous region varies with tunnel depth.

Keywords: finite element analysis; settlement trough; horizontal movement trough; slurry shield tunnel

地下隧道盾构法施工具有适应不同地层和埋深、施工安全等优点,尤其适用于城市地下开挖工程。随着盾构技术日益完善,土压平衡盾构、泥水平

衡盾构在欧、美、日等西方国家得到了广泛应用^[1].我国目前也倾向于应用盾构法进行城市地下交通施工.

武汉过江隧道采用泥水盾构法施工,线路走向主要受两端线路疏解制约,受到多处建筑物和地下管线的影响.盾构施工对这些建筑物和管线产生影响的程度和范围,及如何采取有效保护措施,是需要切实解决的问题.盾构施工中最关心的问题之一是施工对周围环境的影响,主要是地层运动的影响.国内外地下工程界对此非常重视,进行了深入的研究,其中最有影响的是:Peck提出了计算地下开挖导致的地表沉降分布的经验公式^[2];同济大学和上海市政局根据多年来盾构施工实践的资料,对Peck公式进行了研究,分别提出了考虑土体扰动后固结沉降和地层损失概念的修正Peck公式^[3];骆建军等通过对现场量测数据的统计分析,给出了有限元法的特征曲线解析^[4].盾构施工过程中的地表沉降是由隧道埋深、地层条件、盾构机型、施工工况等多种因素造成的,不同地域的结果差别较大.在中国,盾构机的应用及研究主要集中在上海,研究成果也主要针对上海的地质条件和土压平衡盾构等特点^[5],同时国内关于盾构施工对地层影响的研究还限于一般地铁隧道施工引起的地面沉降的预测与研究^[6].本文从保护建筑物的角度出发,研究越江公路隧道盾构施工导致的地层水平位移,这在国内尚未见报道.

1 计算理论与方法

总应力分析法和有效应力分析法是岩土工程中两种最基本的分析方法^[7].从应用上来说,总应力分析法一般用于不考虑渗流固结的情况,对于盾构推进的施工过程,土体的应力和变形分析属于短期变形,因此本文采用总应力分析法.在盾构隧道开挖过程的模拟中,土体与衬砌结构的相互作用采用接触面模拟,接触作用采用摩擦硬接触^[8].实际工程中土的应力-应变关系是很复杂的,本文采用以Mohr-Coulomb准则为屈服准则的弹塑性模型^[9].用有限元法分析弹性薄壳,有两种不同的途径:一种是用薄单元组成的折板系统代替原来的薄壳,由平面应力状态和板弯曲应力状态加以组合而得到薄壳的应力状态^[10];另一种是直接采用曲面单元,根据壳体理论推导单元刚度矩阵.本文分析衬砌时采用后一种方法.

2 盾构施工致地层移动的有限元分析

2.1 算例概况

2.1.1 有限元网格划分

应用ABAQUS软件模

拟双线平行隧道开挖,两隧道中心距离为16.322 m,模型的1方向(见图1)取120 m,2方向取60 m.土体采用平面应变4节点等参单元,管片采用平面应变4节点减缩积分非协调单元.土体单元数为1 048,节点数为1 153,管片单元数为48,节点数为96.针对不同地层损失率 V_L (V_L 分别取为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%)进行模拟.

模拟中的开挖外径 D_i 按公式 $\frac{\pi}{4}(D_m^2 - D_i^2)/$

$\frac{\pi}{4}D_s^2 = V_L$ 计算,得 D_i 分别为11.029 4、11.058 8、11.088 0和11.117 3 m,开挖直径 $D_m = 11.69$ m,衬砌外径 $D_s = 11$ m.对隧道埋深 H 取13.77 m(见图1,其他埋深的网格图略)、20.77 m、27.77 m和34.77 m时的情况进行模拟.

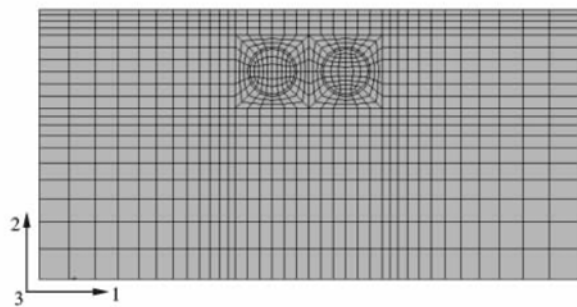


图1 隧道埋深13.77 m时的有限元网格

2.1.2 边界条件 边界条件采用位移边界条件,左右水平方向位移约束,底部固定,上部自由.

2.1.3 参数选取 土体本构模型采用以Mohr-Coulomb公式为屈服准则的弹塑性模型,混凝土衬砌结构采用线弹性模型.自上而下的土层参数见表1.根据前人的经验,本文将衬砌结构刚度折减0.15,由于实际管片的弹性模量为 3.45×10^4 MPa,故在有限元模型中,衬砌结构的弹性模量 E 取 2.93×10^4 MPa,泊松比 ν 取0.2.

2.2 结果及分析

2.2.1 等效塑性区分析 通过对双线隧道先后开挖引起的等效塑性区进行分析,可以得出以下结论:随着平行隧道的先后贯通,围绕隧道的周围土体中将出现环形塑性区,并在平行两隧道的中间部位有塑性区相互连通,最终形成近似“∞”形的塑性区,最小塑性区厚度为2 m左右,两隧道中间塑性屈服区为5 m左右.因此,建议对洞口附近两隧道之间的区域和区域外3 m范围内要进行加固处理,确保盾构安全进出洞.

表1 武昌段典型地层参数

层号	种类	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	厚度/m	$\Phi/(^{\circ})$	C/kPa	E/MPa	ν
1	杂填土	19.80	2.50	26.80	19.50	7.50	0.30
2	粉质黏土	18.90	3.10	21.45	30.25	6.53	0.30
3	淤泥质土	18.32	8.20	10.10	14.25	4.99	0.43
4	粉质黏土	18.69	3.20	21.90	24.80	5.76	0.37
5	粉土	18.98	5.50	31.18	12.50	10.55	0.30
6	粉质黏土	18.71	1.00	26.23	19.06	8.00	0.30
7	粉细砂	19.90	36.5	32.38	8.73	14.29	0.30

2.2.2 模拟结果与 Peck 公式计算结果比较 当埋深为 13.77 m,地层损失率分别为 0.5%、1.0%、1.5%和 2.0%时,地表位移有限元模拟结果与 Peck 公式预测结果的比较如图 2、图 3 所示.由图可以看出,单线开挖时随着地层损失率的增加,有限元模拟的最大沉降分别为 26.41、37.29、49.97 和 61.49 mm,Peck 公式预测值为 25.376、50.752、76.128 和 101.503 mm.在地层损失率为 0.5%的情况下,有限元模拟值和 Peck 公式预测值接近,而在其他情况下,Peck 公式的预测值均偏大. Peck 公式预测的沉降槽半宽基本在 20 m 左右,这与有限元模拟结果接近,但 Peck 公式只能对单洞隧道开挖的地面沉降进行预测.单洞开挖对地层的影响范围基本在 $2H$

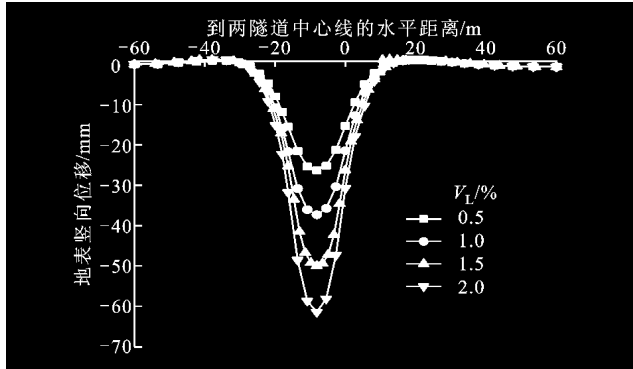


图2 隧道左线开挖后地层损失率与地表竖向位移的关系曲线

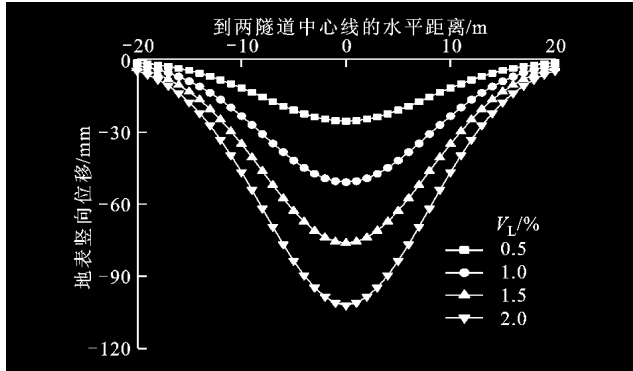


图3 Peck 公式预测结果

+ D_s 以内. 双洞开挖后,随着地层损失率的增加,有限元模拟的地表沉降分别为 32.08、46.17、60.92 和 72.36 mm.由图 2 和图 4 可以看出,右线(双洞)隧道挖通后的沉降槽半宽增大为 24.23 m,地表沉降增加量分别为 5.67、8.88、10.95 和 0.87 mm.双线隧道开挖与单线隧道开挖相比,地表沉降范围增加较大,即影响范围增加较大,而最大沉降增加幅度并不大,只是在一定程度上有所叠加,但不是线性叠加,叠加程度与两平行隧道的相对位置有关.

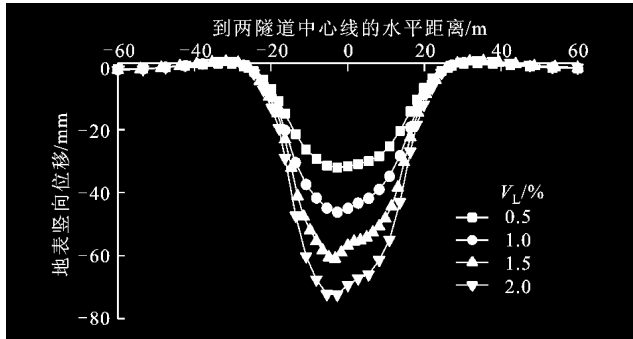


图4 隧道右线开挖后地层损失率与地表竖向位移的关系曲线

从图 5、图 6 可以看出,单洞和双洞开挖后,最大水平位移出现的位置分别为距左线中心 10 m 和距两隧道中心 18 m 左右的位置,地层损失率对峰

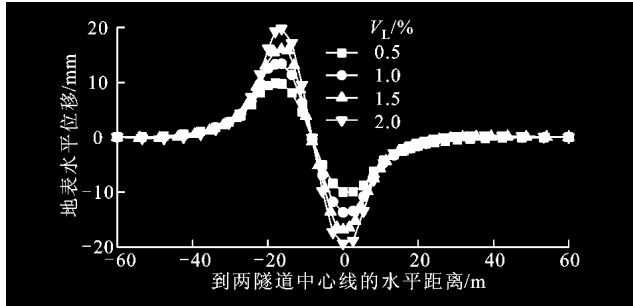


图5 隧道左线开挖后地层损失率与地表水平位移的关系曲线

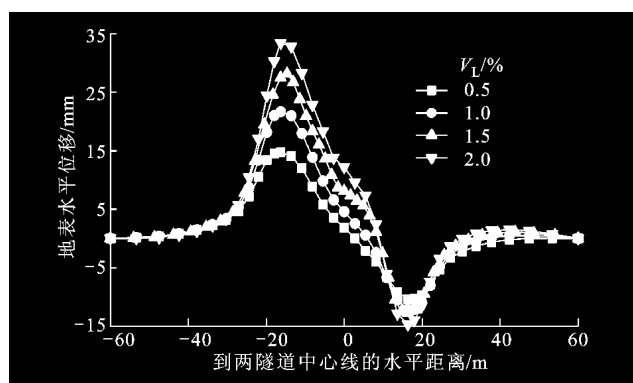


图6 隧道右线开挖后地层损失率与地表水平位移的关系曲线

值的位置影响不大。当地面有建筑物且对称分布时,水平位移峰值出现的位置应该是建筑物最易出现裂缝的位置,实际施工时应该采取措施避免此现象的出现,如在隧道和建筑物之间进行注浆,以补偿地层损失引起的不均匀位移。如果地面有建筑物且呈不对称分布,分析地层水平位移最大值出现的位置时就应该把上部结构、基础的共同作用考虑进来进行建模分析判断。根据以上分析,在两隧道中心线上和距离中心线 18 m 左右的地方,建筑物最易出现裂缝,这和作者在施工现场看到的现象是一致的。地表各点的水平位移在隧道开挖完成后都有向中心靠拢的趋势,并且随地层损失率的增大,这种趋势更强。

2.2.3 不同埋深情况下的模拟结果分析 由图 7 和图 8 可以看出,单洞和双洞开挖引起的地表沉降槽的宽度随隧道埋深的增加而增大,峰值随埋深的增加而减小。埋深越浅,沉降槽和最大沉降对深度越敏感,敏感的埋深大约为 13.77 m~20.77 m。埋深超过 27.77 m 以后,最大沉降对于埋深不很敏感。

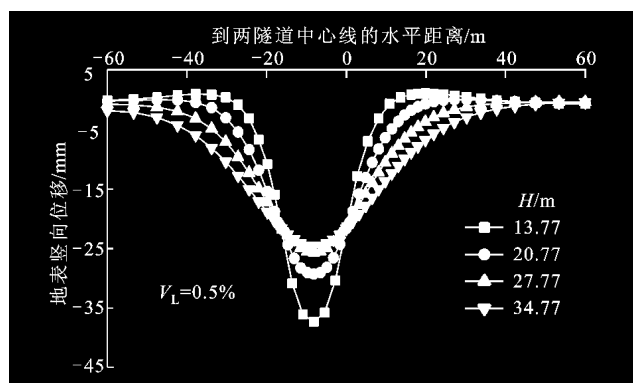


图7 隧道左线开挖后埋深与地表竖向位移的关系曲线

从图 9 可以看出,单洞开挖引起的地表水平移动槽的宽度和峰值的变化规律与垂直沉降槽的变化规律相似,不同的是水平移动槽的峰值位置随着隧

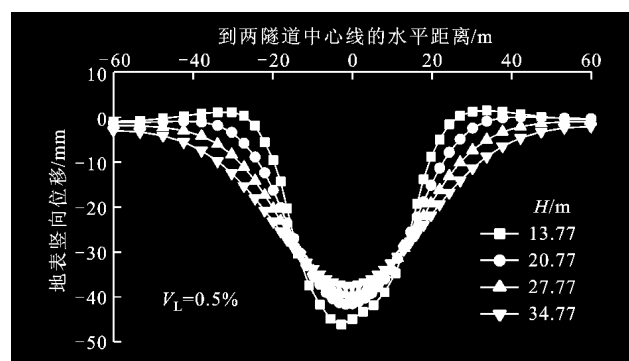


图8 隧道右线开挖后埋深与地表竖向位移的关系曲线

道埋深的增加而远离隧道中心,峰值出现的位置就是地面建筑物最危险的位置。从图 10 可以看出,双洞开挖与单洞开挖相比,水平移动槽宽度和峰值的变化规律相似,不同的是在同等埋深情况下,前者的峰值有所增大,且由于后挖隧道和先挖隧道的相互影响,右边的峰值移动距离较大,在 18 m 左右。比较图 9 和图 10 可以看出,单线隧道开挖的水平位移峰值大约出现在 $x=0$ m, -18 m 这 2 个位置,考虑双线隧道相互影响时,最后的峰值出现在 $x=-18$ m, 18 m 这 2 个位置。综合以上分析,对于建筑物来讲,双线隧道先后施工导致最危险的位置出现在 $x=-18$ m, 0 m, 18 m 的 3 个位置,而不是出现在竖向沉降最大的 $x=0$ m, 10 m 这 2 个位置。

结合图 7~图 10 的分析结果,建议对于埋深大约为 13.77 m~20.77 m 的浅埋地段的盾构掘进要

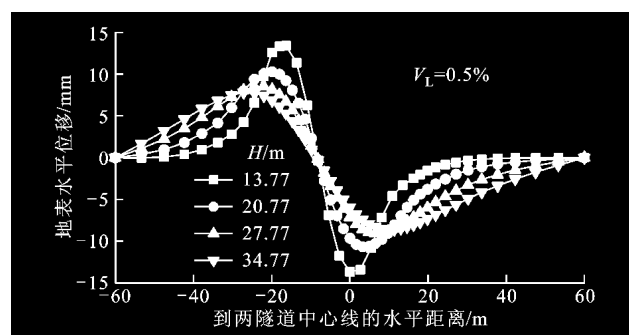


图9 隧道左线开挖后埋深与地表水平位移的关系曲线

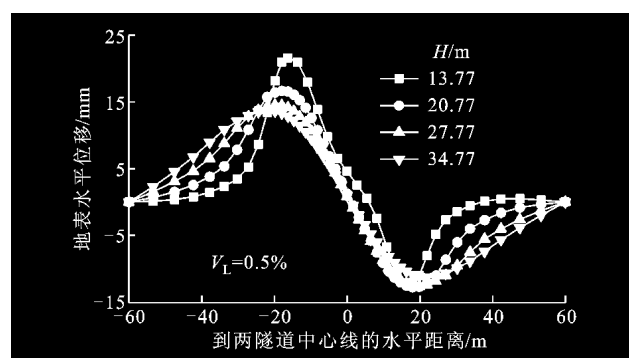


图10 隧道右线开挖后埋深与地表水平位移的关系曲线

特别注意,一方面要实时优化施工参数,另一方面还要进行动态监测,同时对于浅埋地段的建筑物做好切实的保护措施。

3 结 论

(1)平行隧道开挖最终形成的近似“∞”形的塑性区,是土体扰动较大的区域,因此需对洞口附近两隧道之间的区域和区域外3 m范围内进行预加固处理。

(2)有限元单洞模拟和Peck公式预测结果的比较表明,在地层损失率较小时,两者对地表沉降最大值的模拟结果接近,但在其他情况下,Peck公式预测的结果偏大。同时,Peck只能对单一地层、单一隧道的竖向地表沉降进行预测,具有很大的局限性。

(3)通过对单线和双线隧道开挖引起的地面沉降进行对比得出,双线隧道开挖后对地面的影响范围增加较大,但最大沉降增幅不大,只是在一定程度上有所叠加,却不是线性叠加,叠加区域和两隧道的相对位置有关。

(4)通过分析单线和双线隧道开挖引起的地面水平移动槽的分布规律发现,双线隧道开挖后地面水平位移最大值出现在3个位置,而这3个区域才是对地层影响最大的区域,也是对建筑物破坏最大的区域,建议在这些区域进行监测布点时加密布点,布点距离缩短一半。

(5)地面移动槽(包括沉降槽和水平移动槽)的宽度随着隧道的埋深而增加,但峰值均减小。沉降槽峰值位置固定,而水平移动槽两边的峰值位置随着隧道埋深的增加而远离两隧道中心,表明对地面建筑物最危险的区域随着隧道埋深的变化在移动。在埋深13.77 m~20.77 m的浅埋区域,移动槽宽度和峰值对埋深特别敏感,建议盾构在此区域掘进时,要切实优化掘进参数,优化开挖面的泥水压力,加强管片尾部同步注浆及地面和建筑物的监测频率,同时要制定该区域建筑物保护的应急措施。

参考文献:

- [1] Addenbrooke T I, Potts D M. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effect [J]. The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(2): 249-271.
- [2] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Mexico Press, 1969: 225-290.
- [3] 易宏伟,孙钧.盾构施工对软粘土的扰动机理分析[J].同济大学学报,1999,28(3):277-281.
Yi Hongwei, Sun Jun. Mechanism analysis of disturbance caused by shield tunneling on soft clay [J]. J of Tongji University, 1999, 28(3): 277-281.
- [4] 骆建军,王梦恕.地铁施工对管线的影响[J].中国铁道科学,2006,27(6):125-128.
Luo Jianjun, Wang Mengshu. Influence of metro construction on under ground pipeline [J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 125-128.
- [5] 刘元雪,施建勇,许江,等.盾构法隧道施工数值模拟[J].岩土工程学报,2004,26(2):239-243.
Liu Yuanxue, Shi Jianyong, Xu Jiang, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 239-243.
- [6] 姜忻良,赵志民,李园.隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J].岩土力学,2004,25(10):1542-1544.
Jiang Xiliang, Zhao Zhimin, Li Yuan. Analysis calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1542-1544.
- [7] 谢康和,周健.岩土工程有限元分析理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [8] Thomas K, Gunther M. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(4/5): 234-247.
- [9] 杨秋玲,马可栓.大体积混凝土水化热温度场三维有限元分析[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(2):261-263.
Yang Qiuling, Ma Keshuan. Analysis of massive concrete 3-dimensional finite element hydrated heat temperature field [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(2): 261-263.
- [10] Rowe R K, Lee K M. An evaluation of simplified techniques for estimating three-dimensional undrained ground movements due to tunneling in soft soils [J]. Canada Geotech J, 1992, 29(3): 39-52.

(编辑 葛赵青)