

文章编号: 1000-7598-(2005)11-1727-04

盾构近距离穿越施工的工作面土压力研究

廖少明¹, 杨俊龙², 奚程磊¹, 彭芳乐¹, 侯学渊¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海第二市政工程有限公司, 上海 200135)

摘要: 盾构近距离穿越已建地下构筑物位移场的影响因素及其敏感性与常规施工有较大的不同。结合上海地铁四号线隧道超近距离穿越运营地铁隧道的工程实例发现当盾构接近上方近距离(净距为 1.05 m)地铁隧道时地层土压力发生较大变化, 相应的盾构土仓管理压力需作相应调整。根据隧道受荷机理及弹性力学原理, 找到了这一问题的理论依据, 便推导了相关理论公式, 并在实际工程中设计了盾构土仓管理压力分步台阶控制方案, 对盾构控制起到了很好的指导作用, 成功地将地铁位移控制在 5 mm 之内。土压力实测结果与理论推算的数值大小及分布相当接近, 说明所采用的理论方法是正确可靠的, 在盾构超近距离穿越施工中具有重要指导意义。

关键词: 地铁隧道; 盾构; 超近距离施工; 正面土压

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Approach to earth balance pressure of shield tunneling across ultra-near metro tunnel in operation

LIAO Shao-ming¹, YANG Jun-long², XI Cheng-lei¹, PENG Fang-le¹, HOU Xue-yuan¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Second Municipal Engineering Construction Co, Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The affecting factors and sensitivity of the displacement fields produced by the shield tunneling across the ultra-near tunnel obviously differ from that of the general construction. Combining the metro tunneling examples within ultra-near distance (1.05 m) in Shanghai, It is found that the earth pressure varies significantly while shield approaching to adjacent metro tunnel in operation situated overhead. Based on the principles of tunnel loading model and theory of elasticity a, theoretical formula of earth balance pressure of shield was deduced and a so-called “step control strategy” was concluded which was successfully applied in a typical project of Shanghai metro tunnel line No.4 of which the maximum displacement was controlled within 5 mm. The field measurements of earth pressure proved to be at good coincidence with the theoretical values.

Key words: metro tunnel; shield; ultra-near construction; earth balance pressure

1 前言

近些年来, 上海城市地铁线网结构的日益完善的同时使得地铁建设中盾构隧道相互交叉穿越的情况日益增多。另外, 受到前期已建隧道和规划的影响, 隧道相互穿越的距离越来越远, 这给已建地铁保护带来了极大的困难, 其中如何确定盾构掘进施工参数是控制地层扰动及其对邻近已有隧道影响的关键, 而盾构正面压力的设置又是盾构掘进控制的最重要的施工参数之一, 该参数在近距离施工中具有特殊的变化规律, 本文以上海一典型工程案例作为工程背景展开研究。

图 1 为上海 M4 线盾构穿越地铁二号线隧道的

平面示意图, 位于上海浦东世纪大道下方。该工程盾构机从浦电路站始发(下行线隧道), 沿福山路下方向北推进 420 余米后小角度曲线斜向下穿运营中的地铁二号线区间隧道, 到达张杨路站调头后向南推进 130 余米, 再次小角度曲线斜向下穿运营中的地铁二号线区间隧道。地铁保护要求极高, 施工难度相当大, 具体体现在以下 4 个方面: (1) 盾构与地铁隧道的最小垂直距离仅 1.05 m。(2) 在穿越前未作任何加固处理。(3) 小角度斜向穿越, 穿越距离长, 影响范围大, 其中上行线隧道交叠的投影长度约为 96 m (137~217 环); 下行线隧道交叠的投影长度约为 69 m (354~412 环); (4) 盾构曲线穿越施

收稿日期: 2004-10-14

修改稿收到日期: 2005-02-01

基金项目: 上海市科委城市建设基金及上海市岩土工程重点学科基金支助。

作者简介: 廖少明, 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事盾构法隧道工程设计与信息化施工技术研究。E-mail: liaosm@online.sh.cn

工, 增加了对土体的扰动, 因此对盾构控制提出了很高的要求, 特别是盾构正面土舱压力的设置是控制的关键, 需要根据不同穿越段进行分步计算、精确控制。

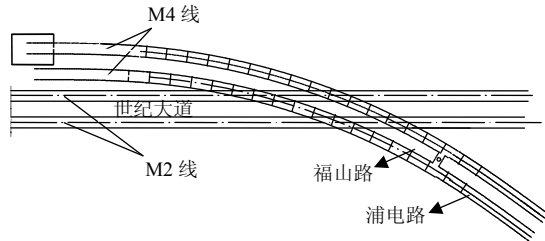


图1 地铁 M4 线盾构隧道穿越地铁 M2 线平面图
Fig.1 Plan of Metro No.4 and No.2

2 盾构正常掘进工作面土压力

根据土压平衡盾构的原理(图2), 土仓中的压力须与开挖面的正面水土压力平衡以维持开挖面土体的稳定, 减少对土层的扰动。因此, 盾构施工时的正面土仓压力管理值是以盾构前方地层水土压力的实际值为基准的。

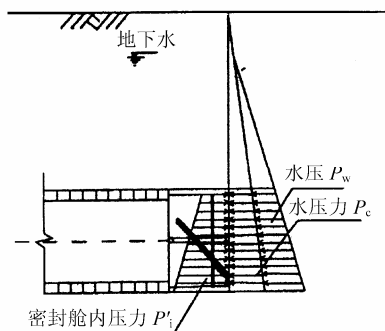


图2 土压平衡盾构原理图
Fig.2 Earth pressure balance principle of shield working face

基于土力学原理, 正面水土压力的理论值为

$$P_0 = P_c + P_w = K_w(\gamma' H + q) + \gamma_w H \quad (1)$$

式中 P_c , P_w 分别为土、水压力; $K_w = 1 - \sin \varphi'$; φ' 为土的有效内摩擦角; H 为盾构工作面中心处深度; γ' , γ_w 分别为土的有效重度、水的重度; q 为地面超载。

盾构推进中的实际施工管理土压力还需考虑地层条件的变化、施工参数等影响, 其表示为

$$P'_0 = \alpha P_0 \quad (2)$$

式中 α 为考虑土体扰动后的性质变化、盾构推进速度、超载状况等因素时正面水土压力的动态调整系数。一般根据实测位移反馈以及位移控制标准, 判断正面压力的合适性, 随时作相应调整。

3 盾构近距离穿越时的工作面土压力

盾构从下方近距离穿越已建隧道过程中有一个比较引人注意的问题就是在近距离穿越时盾构正面土压力值的显著变化。经分析认为, 造成近距离穿越时土压力变化的原因有下面两点: 首先已建隧道部位土体被置换致使其下方土体所受竖向土压力减小, 其次由于穿越时上方已建隧道具有一定的刚度, 微小变形导致上方土拱效应以及隧道地基梁对土压力的承担分散作用。

(1) 由于已建隧道部位土体被置换成隧道结构致使下方土体所受竖向土压力减小^[1](图3), 已建隧道下方一点的水平向土压力也会相应降低。

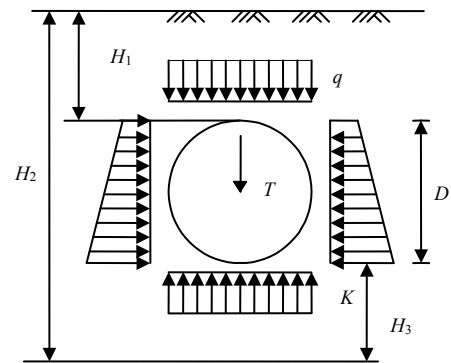


图3 已建隧道下一点土压力计算示意图
Fig.3 Earth pressure at a point under a tunnel

结合本工程, 假定穿越时 M4 线隧道中心距离二号线底部 H_3 , 则可以得到隧道正下方土压力:

$$\sigma_v = K + \gamma H_3; \sigma_h = k_0 \sigma_v \quad (3)$$

又有

$$K = q + T = \gamma H_1 + T \quad (4)$$

式中 K 为隧道底部处的基底反力; T 为隧道结构单位长度自重, $T = \gamma_g t \pi$, γ_g 为隧道衬砌材料重度, t 为隧道衬砌厚度。

$$\sigma_v = \gamma(H_1 + H_3) + T \quad (5)$$

而在远离隧道正下方的点在同一埋深处土压力为

$$\sigma_{v0} = \gamma H_2 = \gamma(H_1 + H_3) + \gamma D \quad (6)$$

显然, $T = \gamma_g t \pi < \gamma D$, 所以 $\sigma_{v0} \geq \sigma_v$, $\sigma_{h0} \geq \sigma_h$ 。

以上的土压力计算适用于已建隧道与施工中的隧道上下平行的情况。若两条隧道上下斜交时, 则挖除土体面积就应该是上方隧道在下方隧道断面上的投影面积(图4)。

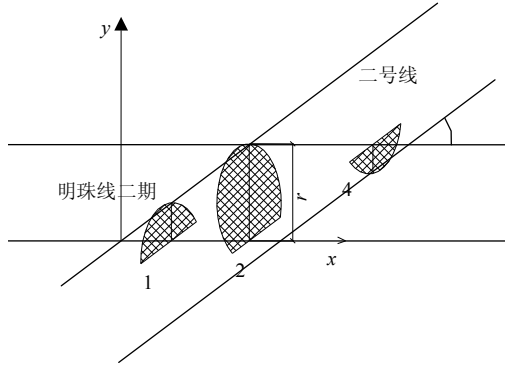


图 4 隧道横断面斜交投影示意图

Fig.4 Projection of tunnels intersected at an oblique angle

$$\left. \begin{aligned} r' &= x \sin \varphi; \\ p' &= 2 \left(\arccos \left(\frac{r'}{r} \right) r^2 - \frac{r'(r^2 - r'^2)^2}{\cos \varphi} \right) \gamma_1 r; \\ p'' &= \frac{cd\gamma_2}{2r}; \quad p = \zeta(p_0 - p' + p'') \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 r' 为阴影部分的长边尺寸; r 为隧道的直径; c 为阴影面的弧线线长; d 为管片厚度; γ_1 为挖去土体的平均重度; γ_2 为混凝土管片的重度; x 为 X 轴坐标; ζ 为考虑上方隧道刚度对土压力的影响折减系数, 在下面内容中介绍。

(2) 由于被穿越的上方隧道具有一定的刚度, 对下方土压力起到了一个承担、分散压力的作用。如图 5 所示。

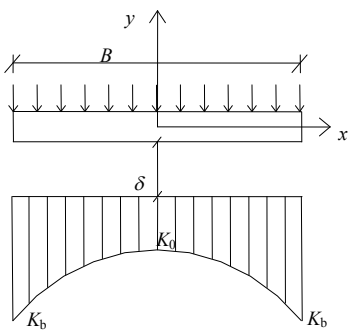


图 5 已建隧道分担下方隧道土压力示意图

Fig.5 Vertical earth pressure reduction produced by ground deformation

隧道下方土体发生变形时二号线隧道的刚度发挥作用, 按照弹性力学理论可推导隧道基底中心变形后的土压力分布, 见式(8)~(11)。

具体推导如下: 若将穿越段隧道局部变形看作刚性体位移, 则得边界条件^[2]:

$$\left. \begin{aligned} y &= 0, \quad |x| \geq B/2, \quad v = 0 \\ y &= 0, \quad |x| < B/2, \quad v = -\delta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

满足上边界条件的傅立叶积分^[3]:

$$y = 0, \quad v(x) = \frac{2\delta}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \xi(B/2)}{\xi} \cos \xi x d\xi \quad (9)$$

假设应力函数:

$$\Phi = \int_0^\infty \frac{1}{\xi^2} (C + D\xi y) e^{-\xi y} \cos \xi x d\xi \quad (10)$$

由此可推导得到上方土体由于变形所产生的附加垂直应力:

$$\sigma_y = \frac{\delta E}{2\pi(1-\mu^2)} \left\{ \frac{x+B/2}{(x+B/2)^2 + y^2} - \frac{x-B/2}{(x-B/2)^2 + y^2} + \frac{2(x+B/2)y^2}{[(x+B/2)^2 + y^2]^2} - \frac{2(x-B/2)y^2}{[(x-B/2)^2 + y^2]^2} \right\} \quad (11)$$

取正上方隧道底部点 $y=0$ 时, 则得到被穿越的上方隧道底部的附加应力:

$$\Delta\sigma_y = \frac{\delta BE}{2\pi(1-\mu^2)} \left[\frac{1}{x^2 - (B/2)^2} \right] \quad (12)$$

式中 B 为隧道穿越段横向宽度, $B \approx 10$ m; E 为土层弹性模量, 考虑原隧道施工时的同步注浆加固影响, 取为 100 MPa, 泊松比 $\mu = 0.4$ 。地铁控制位移 $\delta = 5$ mm, 令 $x=0$, 则 $\Delta\sigma_y = \frac{5 \times 10^{-3} \times 10 \times 100 \times 10^3}{2\pi(1-0.4^2)} \times$

$\left[-\frac{4}{10^2} \right] = -\frac{2500}{\pi \times 0.84} \times 0.04 = -37.9$ kPa, 约为上覆土压力的 75%。因此, 考虑变形及隧道刚度影响的土压折减系数 ζ 在本工程中取为 0.75。

4 盾构工作面压力计算与控制

依据上述两个因素, 以下对盾构实际穿越施工时的正面土压力进行试算, 并制定相应控制方案。明珠二期浦电路至张杨路区间隧道与已建地铁二号线隧道相互位置关系如图 6 所示。明珠线二期与地铁二号线两线夹角 $\varphi = 12.6^\circ$, 中心线埋深为 16.3~18.3 m。可先求得中心线处土体侧向压力, 再考虑地铁二号线隧道对土体代换影响, 得到隧道下部 M4 线盾构中心处的土压力曲线如图 7 所示。从图中看出, 盾构斜向穿越上方隧道过程中, 进去时正面土压力的变化从高到低, 出来时从低到高, 呈现 V 字形。按此预计曲线对盾构正面土压进行跟踪控制, 并设计了如图 8 所示的土仓压力分步台阶控制方案, 成功地将地铁变形控制在 5 mm 之内。

