

文章编号: 1000-7598-(2002)06-0733-05

天津地铁改造中车站箱体位移控制研究

郑 刚¹, 姜忻良¹, 侯树民², 刘 洪², 崔 奕², 纪颖波¹, 鲍 鹏¹

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300072; 2. 天津市地下铁道总公司, 天津 300040)

摘 要: 在天津市地铁一号线既有线路改造中, 必须解决将原车站进行延伸改造所涉及的开挖与支护问题。由于土质软弱, 需采取注浆来减少因深开挖和回填土所引起的车站箱体位移与沉降以及控制地下水渗透。因车站地处交通要道下, 附近交通拥挤, 使得改造工作难度较大。对控制箱体在开挖过程中的位移、改造完成并回填土后的沉降以及减少开挖改造对交通的影响的方法进行了研究, 并给出了一些建议。

关 键 词: 地铁车站; 改建; 基坑支护; 位移; 沉降

中图分类号: V 231⁺.2. **文献标识码:** A

Control of station box displacement due to reconstruction of Tianjin Metro system

ZHENG Gang¹, JANG Xin-liang¹, HOU Shu-min², LIU Hong², CUI Yi², JI Ying-bo¹, BO Peng¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Metro Construction Corp, Tianjin 300040, China)

Abstract: The excavation and pit support are the problems that must be solved during reconstruction and extension of the subway stations of existing line built in 1974, which was part of line No.1 of Tianjin Metro system. Because of soft ground, pre-grouting is needed to reduce the displacement and settlement of the station box due to deep excavation and back filling, and also to control ground water ingress. These stations are right under the main streets and the heavy traffic in the streets makes the work very difficult. The possible construction operations to control station box and ground displacement and minimizing the effect due to reconstruction on the traffic are researched; some suggestions are given.

Key words: subway station; reconstruction; excavation support; displacement; settlement

1 引 言

随着城市的发展和扩大,城市布局变化很大,使建有 20 年的天津地铁既有线路的利用率逐渐降低。由于该线路存在着标准低,现代化程度不高等缺点,且穿过市区繁华的金融和商业街区,已明显落后于城市的发展。为此,天津市作出了地铁建设的规划,将既有线路分别向南北两个方向延伸,构成地铁一号线,线路全长 26.188 km。既有线路运行的地铁车辆原为 3 节车厢编组,改造后为 6 节,原车站长度和设备用房面积均已不能满足要求,因此,必须新建或对原 7 个车站进行改造。

2 存在的问题

笔者对西站至新华路段既有线路沿线情况进行

了深入分析,认为要进行既有线路改造,需对以下问题进行深入研究并加以解决:

(1) 地铁列车由 3 节车厢增加为 6 节时,需对紧邻原车站的区间隧道箱体进行拓宽改造,实现车站加长。区间隧道箱体原为双跨钢筋混凝土结构,拓宽后为 4 跨,因此,应对改造过程中既有箱体进行施工阶段的受力分析、强度和开裂验算,提出新旧结构连接方法,进行既有箱体改造后的受力计算与加固。

(2) 由于城区道路、建筑物及地下各种管线设施密集,必须采取切实可行的基坑开挖和支护措施,在保证完成隧道箱体改造施工的同时,控制土层位移,防止对地面建筑物、道路和管线产生影响。

(3) 天津市土质软弱,地下水位高,现有隧道埋深一般大于 7 m,开挖及改建过程中必须严格控

制地下水位。要解决地下水降水与渗透问题,包括垂直线路纵向的横向地下水渗透和沿既有线路纵向的地下水渗透问题。

(4) 进行改造时,必须在保持路面通行的情况下进行箱体结构改造施工,至多只能占据半幅路面,因此施行不对称的开挖与施工。应采取可靠措施保持原箱体受力状态不发生大的改变,防止原箱体产生任何将对正常行车产生影响的过量变形,包括开挖过程中箱体自身的水平位移和倾斜,箱体施工完成及回填土后车站箱体的沉降,以及改造后的车站与未改造箱体之间的相对变形等。由于既有箱体诱导逢之间有防水措施以及轨道连通等因素,根据有关单位提供的数据,进行开挖改造的与不改造的隧道箱体之间的相对错动不能超过 3~5 mm。对软土地区的地下工程,这个要求是很严格的。

既有线路车站改造中涉及的问题多,难度大,国内目前还没有可以借鉴的实际工程,国际上也仅见到一些对隧道内部进行损坏修复改建的报道^[1~4]。本文重点对改造过程中涉及的车站箱体位移和改造完成并回填覆土后车站箱体的沉降的控制方法进行研究。

3 开挖与支护

3.1 开挖与支护方案

基于对既有线路箱体改造问题的分析,对基坑开挖与支护提出的方案有明挖法、盖挖逆作法、冻结法或水泥搅拌桩重力式挡土墙。其中明挖法和盖挖逆作法可采用密排钻孔灌注桩、地下连续墙或加劲水泥土挡墙(SMW 工法)作为挡土结构。地下连续墙设备庞大、钢筋笼制作占用场地大,采用密排钻孔灌注桩会产生大量泥浆,因此,造价低、施工方便和污染小的 SMW 工法具有较大优势。另外,冻结法或水泥搅拌桩格栅构成重力式挡土墙,再架设水平支撑可作为明挖法的一个备选方案。

为不阻断道路交通,可采取先施工一侧挡土结构,进行开挖和改造,改造完成后恢复路面,再改造另一侧(见图 1)办法。由于道路中心线与隧道中心线基本重合,实行单侧交替改造的方案将仅占用不到半幅路面,使交通不中断,将带来巨大的经济效益。

3.2 止水方法

在开挖土方前就开始降水,待地下水位降低至设计降水深度以下后,即可进行土方开挖和地下结构的施工。为使路面交通不完全阻断,只能先施工一侧的挡土结构和止水帷幕,因此,必须解决地下

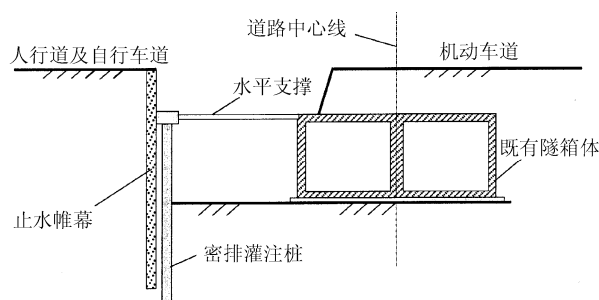


图 1 基坑开挖支护剖面图

Fig.1 Section of excavation and pit support

水从未改造一侧向基坑中渗流的问题。同时,还必须解决地下水沿隧道纵向基坑的渗流问题。在降水过程中,地下水的横向渗流路径如图 2 所示。

3.2.1 横向止水方法

图 2 所示止水帷幕的设置考虑了以下几个方面:

(1) 坑外侧止水帷幕

这是一般基坑开挖工程均要设置的常规止水帷幕,它必须具有足够的深度,防止坑外地下水流入基坑,利于地下结构施工,保证基坑外侧地下水位不明显下降。该止水帷幕可采用水泥搅拌桩密排咬合打设,如果采用加筋水泥土挡墙其自身就是防渗帷幕。

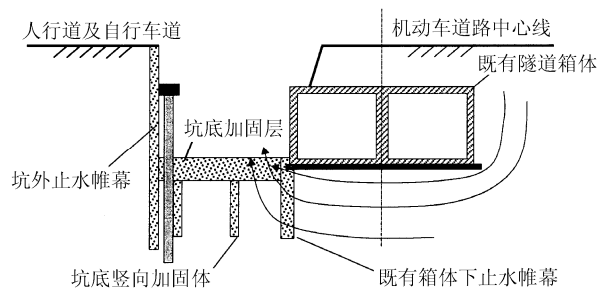


图 2 地下水渗流路线及注浆防渗剖面图

Fig.2 Section of seepage tracking and pre-grouting to control ground water ingress

(2) 既有箱体下的止水帷幕

该止水帷幕的设置可切断既有箱体下地下水向基坑的渗流路径,同时,对其起到地基加固兼托换的作用,防止箱体在改造工程中和新建箱体在浇筑及回填过程中产生沉降。止水帷幕可采用高压旋喷桩密排咬合。

(3) 坑底加固层

考虑到本工程有以下特殊性,在坑底设置加固层。

(a) 经过通车使用长达 20 年, 既有箱体的沉降基本稳定, 然而在新、旧结构之间可能产生不利影响和在隧道纵向诱导缝处产生沉降差。采用坑底加固可有效减小新建箱体的沉降。对坑底软土的加固, 可采用高压注浆形成封底止水帷幕。也可采用高压旋喷或水泥搅拌桩在坑底形成格栅形加固体。

(b) 在既有箱体下设置止水帷幕, 使既有箱体处地下水位基本不下降, 但地下水的浮力, 亦使箱体底面与地基土之间基本上没有接触压力, 单侧土体的开挖势必造成箱体在未开挖一侧的水、土压力作用下产生水平滑动, 即使在箱体顶面设置水平支撑也不能控制箱体底部的水平滑动。如果将坑底加固层顶面设置于既有箱体底面标高以上一定高度, 且与箱体结合紧密, 则将起到底部水平支撑的作用, 有效地减少开挖时既有箱体底部的水平滑动。

3.2.2 纵向止水方法

本工程止水的特殊性还在于需进行纵向止水, 防止地下水由不改造区间隧道外围向开挖区段渗流。为此, 提出了图 3 所示的纵向止水方法。纵向止水帷幕可采用双排水泥搅拌桩, 与隧道结合处可采用高压旋喷封闭。

从图 3 可看出, 纵向止水帷幕除了可起到横向支撑和控制既有箱体的位移的作用, 还可限制不改造区间隧道与改造区间隧道之间发生水平错动和相对旋转, 保证地铁线路保持平顺。

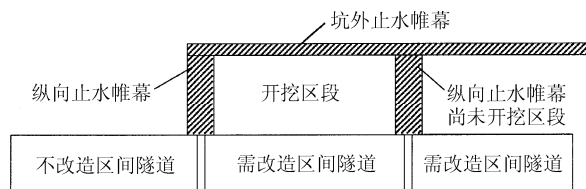


图3 水泥搅拌桩纵向止水方法

Fig.3 Cement treated soil column to control ground water ingress along the tunnel

4 箱体位移计算分析

基坑开挖时将引起既有箱体发生位移, 坑底产生回弹; 其拓宽部分的施工及上部覆土回填相当于在坑底又重新施加荷载, 使坑底土体再压缩从而产生沉降。根据上文所述, 由于不同节箱体之间的错动控制很严格, 必须计算开挖与回填后既有箱体产生的位移, 并确定满足控制位移条件的开挖与支护方案。

比较不同空间开挖方案隧道模型试验结果可

知, 每节箱体之间为柔性连接, 空间效应对变形的影响不显著, 故可按平面问题考虑。因此, 文中采用了平面有限元分析程序来计算开挖与回填覆土过程中既有箱体的位移。

为了模拟隧道箱体与土体之间的滑动, 在箱体与土界面设置了 Goodman 接触面单元。初始地应力 $\{\sigma_0\}$ 采用有限元方法计算和设定水平侧压力系数的方法。土体、箱体及挡土桩均采用了 4 节点等参数单元, 箱体及挡土桩视为弹性材料, 土体采用了弹性和理想弹塑性两种材料模型, 其中理想弹塑性模型采用 Drucker-Plager 屈服准则^[5]。土体开挖释放的荷载根据初始地应力或前一步开挖终了的应力场确定。程序采用增量初应变法解题, 对弹塑性模型, 加荷过程中当出现土体单元屈服时, 由材料屈服引起的过量塑性应变以初应变的形式被转移, 并由整个体系中的所有单元共同负担。土体单元出现受拉破坏或节理、接触面单元发生受拉或受剪破坏时, 也应进行单元应力修正并将多余应力处理为节点力予以转移, 据此进行迭带计算。土层强度指标和压缩性指标取市区浅层土平均指标: $c = 15 \text{ kPa}$, $\phi = 18^\circ$, $E_s = 6 \text{ MPa}$ 。

4.1 开挖引起的箱体位移

基坑开挖深度为 7 m, 明挖法开挖的步骤为 ① 开挖约 2.5 m, 暴露出隧道箱体顶板, 架设水平钢支撑, ② 开挖至坑底加固层顶面, ③ 将坑底加固层分段剔凿至坑底标高, 随剔随在箱体底板标高处架设水平型钢支撑(此型钢支撑可随后浇筑在箱体底板内)。对于开挖过程, 首先针对开挖过程计算无坑底加固层的情况的 3 个工况, 即

工况 1: 开挖 2.5 m 至箱体顶面, 地面超载 20 kPa; 工况 2: 在箱体顶面设置水平支撑, 开挖至坑底; 工况 3: 对比计算了开挖至箱体顶面, 在箱体顶面设置水平支撑, 并假想在箱体底部也有一道刚度无限大的水平支撑时, 与工况 2 箱体的位移对应情况。3 种工况计算结果见表 1。

表1 明挖法各工况隧道位移计算结果
Table 1 Displacements of tunnel due to excavation

工况	(mm)			
	箱体顶面水平位移		箱体底面水平位移	
	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性
1	7.0	7.7	8.6	8.6
2	1.9	0.9	17.5	21.9
3	0.4	-3.6	-0.1	-1.6

计算结果表明, 由于既有隧道箱体受到地下水浮力的作用, 箱体底部与接触面基本无接触压力,

虽然开挖 2.5 m 深（工况 1），但还是会引起箱体水平位移约 8 mm。当开挖至坑底时（工况 2）产生约 20 mm 的水平位移，两次相加约有 28 mm 的水平位移，远远超出了允许值。然而，在箱体底部设置假想的刚度无限大的水平支撑后，基坑两侧土压力基本是平衡的，作用在箱体两侧的水平力也基本是平衡的，所以第二步开挖时箱体几乎没有水平位移，甚至反而略有向未开挖的一侧移动的趋势。说明对坑底土层进行加固并作为坑底水平支撑是有必要的。

下面计算在坑底处设置水泥土加固层时开挖引起的位移。水泥土加固层厚 1.5 m，加固层顶面比箱体底面高 0.5 m，弹性模量 $E=100\text{ MPa}$ 。工况 1、2 的箱体位移情况见表 2。工况 2 计算的有限元网格示意图见图 4。

经弹塑性分析发现，水泥土加固层大大减小了箱体的水平位移。而无水泥土加固层时，位于箱体开挖一侧底部的土体局部出现屈服，不利于控制箱体位移。

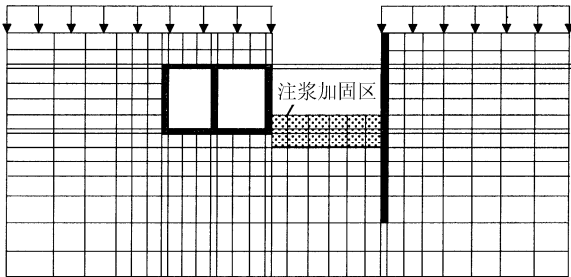


图 4 有坑底水泥土加固层的明挖法有限元计算模型
Fig.4 The mesh for FEM of cut and cover method (with pre-grouting)

表 2 设置坑底加固层各工况隧道位移计算结果
Table 2 Displacements of tunnel due to excavation (with pre-grouting)

工况	箱体顶面水平位移		箱体底面水平位移	
	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性
1	2.5	4.3	3.5	5.4
2	-1.8	-3.7	5.3	12.6

由图 4 可见以上各工况下，既有箱体均发生了逆时针转动，而且在设置坑底水泥土加固层来作为箱体底部支撑的情况下的弹性理论计算结果表明，箱体底部的水平位移仍有近 10 mm。这对于未开挖改造的区间隧道来说，相对错动量仍然超过了允许值。为此，计算了在开挖改造的与尚未开挖的区间

隧道之间设置图 3 中纵向止水帷幕时，箱体在开挖过程中的位移情况（见表 3）。计算结果表明，每段区间隧道仅 20 m 长，如果以每 20 m 长的区段作为开挖单元（如图 3 所示），则开挖区段隧道两端的纵向止水帷幕墙相当于支撑墙，刚度很大，且沿箱体全高度范围均起支撑作用，对箱体的位移控制效果非常明显。在实际施工时，箱体水平支撑都是随挖随支，从考虑水平支撑随挖随支的空间效应来看，采用上述措施以后，箱体的位移基本上能够控制在允许的范围内。

表 3 明挖法各工况隧道位移计算结果
Table 3 Displacements of tunnel due to excavation (mm)

工况	箱体顶面水平位移	箱体底面水平位移
	弹性	弹性
1	0.9	1.6
2	-0.5	3.3

4.2 箱体改造和回填覆土后的沉降分析

基坑开挖将引起坑底产生回弹；既有箱体拓宽部分的施工及上部覆土回填相当于在坑底又重新施加荷载，使坑底土产生再压缩从而产生沉降。因此，必须计算改造后箱体相对于不改造箱体产生的沉降，并确定相应减少沉降的措施。

图 2 提出了阻止地下水由未开挖一侧向基坑渗透的止水措施，其坑底加固层和既有箱体下止水帷幕均可起到减小改造后箱体沉降的作用。为了对比有、无坑底加固措施时新箱体浇筑完成并回填覆土造成箱体的沉降，计算了 3 种工况（覆土完成后取地面荷载 20 kPa）：

- 工况 1：无坑底加固层和坑底竖向加固体；
- 工况 2：有坑底加固层和 3 个坑底格栅形竖向加固体，坑底竖向加固体高 2 m，宽 1 m。
- 工况 3：有坑底加固层和 3 个格栅形坑底竖向加固体，坑底竖向加固体高 4 m，宽 1 m；

由计算结果（见表 4）可见，必须采取坑底加固措施以控制改造后箱体的沉降，采取工况 3 措施后基本能满足要求。如果坑底格栅形竖向加固体取 4 m 高，则表 2 中箱体底部水平位移将进一步大幅度减小。

表 4 改造后车站箱体的最大沉降
Table 4 Settlements of tunnel after backfill (mm)

工况序号	1	2	3
沉降	13.1	8.1	5.4

5 结论与建议

根据现有的研究成果, 可得出如下结论:

(1) 从控制变形角度, 进行天津市地铁既有车站箱体结构改造是可行的。

(2) 对箱体底部土体进行加固既可止水, 又可进一步减小开挖土方引起的箱体水平位移, 而且也将减小改造完成并回填覆土后箱体的沉降。纵向止水墙也可有效控制箱体位移。

(3) 采取本文所述措施后可真正实现不阻断交通, 地铁改造仅占用不到半幅路面。对此进行了经济评估, 以既有线路涉及 7 个车站计算, 降低直接投资数亿元, 而不阻断交通的间接效益更是难以估量。

如果采用加劲水泥搅拌桩挡墙 (SMW 工法) 作为挡土结构, 则可将挡土墙搅拌桩、坑底加固搅拌桩和既有箱体下止水帷幕进行搭接咬合, 形成整体, 对于止水和控制基坑开挖引起箱体的位移及新

建箱体因自重及覆土引起的沉降有更好的效果。

参考文献

- [1] Tajiri M. Damage done by the great earthquake disaster of the Hanshin-Awaji district to the Kobe Municipal Subway System and restoration works of the damage[J]. **Japanese Railway Engineering**, 1997, 137: 19—23.
- [2] Iida H. Damage and restoration of Daikai station of Kobe Rapid Transit Railway[J]. **Japanese Railway Engineering**, 1997, 137: 24—27.
- [3] Lahti M A. Transfer truss supports renovation[J]. **Modern Steel Construction**, 1996, 36(9): 41—46.
- [4] Wallis S M D. Tunnelling the gap in the OLSO metro system[J]. **Tunnels and Tunnelling**, 1984, 16(3): 33—36.
- [5] 上海市建设委员会科学技术委员会. 地铁一号线工程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.