

黄土地区浅埋暗挖地铁隧道衬砌受力分析

来弘鹏¹, 谢永利¹, 刘苗², 许海标³

(1. 长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西安市城乡建设委员会, 陕西 西安 710003;
3. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了解黄土地区浅埋暗挖地铁隧道衬砌结构的受力特征, 得出荷载在衬砌结构各部分中的分担比例, 以西安地铁2号线实体工程为依托, 开展了较大规模的现场测试工作, 对围岩与初期支护接触压力、初期支护与二次衬砌接触压力及二次衬砌结构应力进行了研究。结果表明: 在三连拱大断面地铁隧道中先开挖洞室初期支护各部位所受的围岩压力均大于后开挖洞室初期支护所承受的压力; 左、右线中墙顶、底部初期支护承受的压力较大, 表明隧道中隔墙承担了较大的上部土体荷载; 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为52.81%和47.19%; 二次衬砌混凝土基本受压, 左、右中隔墙二次衬砌混凝土受压最大。在标准断面地铁隧道中左、右线墙脚位置初期支护与围岩之间接触压力较大, 表明这两位置承受了大部分垂直压力; 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为40%和60%; 二次衬砌混凝土基本受压, 拱腰及以上位置应力较大, 仰拱处应力较小。

关键词: 黄土地铁隧道; 浅埋暗挖; 衬砌; 现场测试; 受力特征

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)08-1167-06

作者简介: 来弘鹏(1979-), 男, 山西平遥人, 博士, 副教授, 主要从事隧道结构方面的研究。E-mail: laihp168@chd.edu.cn。

Mechanical characteristics for linings of shallow excavation metro tunnel in loess region

LAI Hong-peng¹, XIE Yong-li¹, LIU Miao², XÙ Hai-biao³

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Municipal Construction Committee, Xi'an 710003, China; 3. Henan Provincial Communications Planning Survey Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to precisely understand the mechanical characteristics for secondary linings of shallow excavation metro tunnels in loess region, large scale field tests are conducted at Xi'an metro line No. 2 site. The contacting pressure on the surrounding rock and the initial support system, contacting pressure on the initial supports and secondary linings and the stress of the secondary linings are monitored. The test results indicate that the surrounding rock pressures of each part in the initial support in earlier excavation chamber are larger than those in later excavation chamber of three-arched metro tunnel, and the pressures at the top and bottom parts of left and right center pillars are the largest due to large load at the upper part. The loading ratio is 52.81% and 47.19% respectively for the initial supports and secondary linings. The stress of the secondary linings is pressure stress, which is the largest at the left and right center pillars. The surrounding rock pressures in the wall foot at the left and right on standard section metro tunnel are the largest due to large load at the upper part. The loading ratio is 40% and 60% respectively for the initial supports and secondary linings. The stress of the secondary lining is pressure stress, which is the largest on the upper arch loin and is smaller on the inverted arch.

Key words: loess metro tunnel; shallow excavation; lining; field test; mechanical characteristics

0 引言

目前在修建地铁时, 主要采用盾构法和浅埋暗挖法修建区间隧道, 其中浅埋暗挖法是在新奥法的基础上, 结合中国国情创立起来的, 它的特点是沿用新奥法原理分析体系, 建立量测信息反馈设计和施工, 同

时采取超前支护和改良地层、注浆加固等配套技术来完成隧道的设计与施工。其精髓是“管超前, 严注浆, 短开挖, 强支护, 快封闭, 勤量测”这十八字方针^[1]。因为经济性、地层的复杂多变以及特殊的环境条件,

在未来一个相当长时期内，对地层有较强适应性和高度灵活性的浅埋暗挖法仍会在城市地铁隧道中得到不断完善和应用。对城市地铁隧道浅埋暗挖法的研究，虽然历经多年实践，有了大量而丰富的科研成果和工程实践经验，但因地铁置于地表以下一定深度的地质体中，它既以地质体为环境，又以地质体为介质、结构或部分结构，它的安全、经济和正常使用与其所在的地质环境有着密切的联系。西安位于渭河盆地中部，土体工程性质复杂，既有湿陷性黄土，又有软黄土等。所有这些不良地质环境导致西安地铁区间隧道的修筑将面临如下 3 个特殊问题：①黄土地区浅埋隧道围岩压力有何特性？②荷载在衬砌结构各部分中如何分担？③衬砌结构型式是否合理及结构长期安全性如何？这些问题都尚值得思考与研究^[2-10]。本文以西安地铁 2 号线实体工程为依托，对黄土地区浅埋暗挖地铁区间隧道衬砌结构受力特性进行实测研究，以期提高黄土地区地铁区间隧道的修筑水平。

1 工程概况

1.1 三连拱大断面地铁隧道工程概况

(1) 工程概况

西安地铁 2 号线草场坡一小寨区间始于陕西省体育场，终于小寨十字，设计起点里程号为 K16+459.796，终点里程号为 K17+356.144，总长度为 896.348 m。围岩等级为 V 级，地下水埋深介于 6.7~10.9 m，隧道底板埋深约 17.5~24.6 m。区间设置过渡线，过渡线的断面图见图 1。本文选取该区间过渡线里程号为 K17+095 三连拱地铁隧道进行现场测试。该断面设计参数与施工步骤分别见图 1、2。

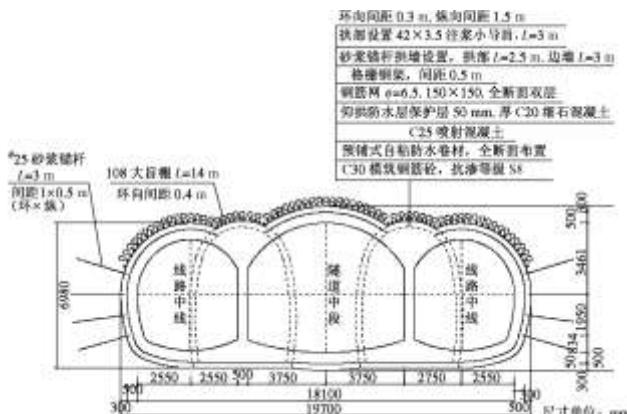


图 1 三连拱断面结构设计图

Fig. 1 Design diagram of three-arched tunnel

(2) 地质概况

区间场地位于黄土梁洼区，地表分布有厚薄不等的全新统人工填土 (Q_4^{ml})；其下为上更新统风积 (Q_2^{eol}) 新黄土及残积 (Q_3^{el}) 古土壤；第一层古土

壤下部在黄土梁区为中更新统风积 (Q_2^{eol}) 老黄土、残积 (Q_2^{el}) 古土壤及冲积 (Q_2^{al}) 粉质黏土、砂土等，在洼地区为上更新统冲积 (Q_3^{al}) 粉质黏土、砂土及中更新统冲积 (Q_2^{al}) 粉质黏土、砂土等地层。

1.2 标准断面地铁隧道工程概况

(1) 工程概况

西安地铁 2 号线工程南门—南稍门区间地铁隧道位于南门以南，南稍门十字以北，区间总长度为 755.934 m，设计里程为 K14+697.829—K15+453.763，为并行的双线单洞隧道，隧道宽度为 6.2 m，左右洞间距 13.0 m。该区间隧道底板埋深约 15.6~20.7 m。隧道施工方法为浅埋暗挖法。

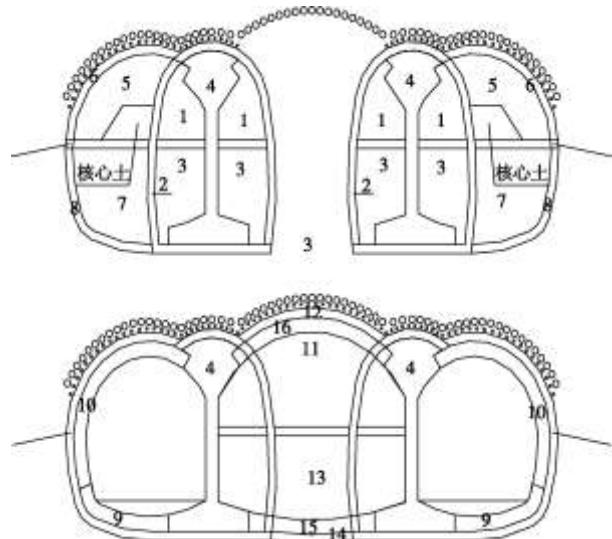


图 2 三连拱隧道施工步骤

Fig. 2 Construction procedure of three-arched tunnel

(2) 地质概况

区间地貌单元为渭河南岸二级阶地。地层从上到下分别为第四系全新统人工填筑土 (Q_4^{ml})，第四系全新统冲、洪积 (Q_4^{al}) 的黄土状土、粉质黏土、砂类土及粉土；本文选取 ZK15+346.5 和 YD K15+346.5 两个断面进行现场，测试测试断面的围岩类别为 V 级，采用马蹄形标准断面结构，隧道衬砌结构为复合式衬砌，初期支护厚 25 cm，二次衬砌厚 35 cm，初期支护采用 C25、S6 喷射混凝土，二次衬砌采用 C30、S8 模筑钢筋混凝土；右线边墙布设砂浆锚杆，为 3.5 m 的 $\phi 22$ mm 钢筋，环纵向间距 1.0 m × 1.0 m 梅花形布置；初期支护中格栅拱架间距为 0.75 m，其作为永久性支撑，每榀格栅拱架两拱脚处各设两根长 3.5 m 的 $\phi 42$ mm 锁脚锚管，施工采用台阶法。

2 测试方案

图 3,4 分别为三连拱大断面隧道与标准断面隧道测试元件布置图^[11-12]。图 3 (a) 中共埋设 42 个钢弦

式压力盒, YY1—YY21 代表围岩与初期支护压力盒, EY1—EY21 代表初期支护和二次衬砌之间压力盒。图 3(b) 中测点 H1—H30 表示 30 个混凝土应变测点。图 4 中 YY1—YY10 表示 10 个初期支护压力测点, EY1—EY10 表示 10 个二次衬砌压力测点 H1—H10 表示 10 个混凝土应变测点。

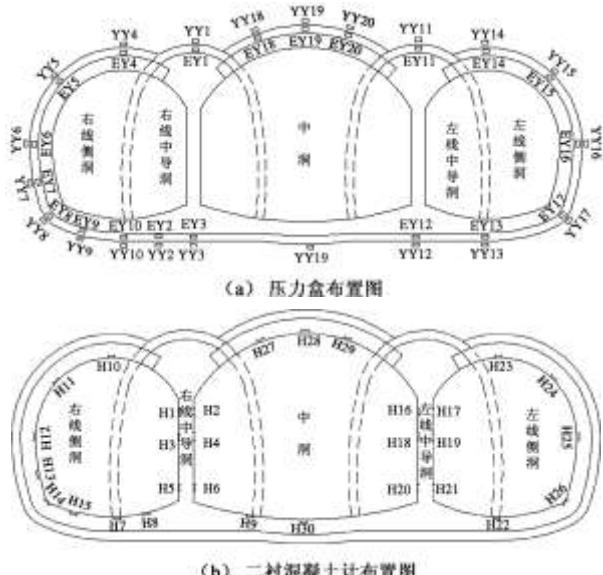


图 3 三连拱大断面隧道测试元件布置图

Fig. 3 Layout of test element in three-arched tunnel

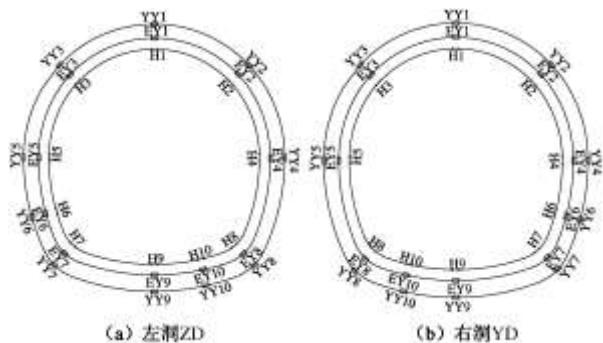


图 4 标准断面压力盒、混凝土计布置图

Fig. 4 Layout of test elements in standard section-metro tunnel

3 测试结果分析

3.1 三连拱大断面隧道测试结果分析

(1) 围岩压力测试结果分析

a) 初期支护围岩压力测试结果分析

图 5 为隧道二次衬砌施作后初期支护围岩压力图。分析图 5 可得: ①测试断面开挖顺序是先进行右线开挖, 然后再进行左线开挖, 受断面各部分开挖先后顺序的影响, 左、右线接触压力分布不均匀, 两侧不对称, 先开挖洞室初期支护各部位所受的围岩压力均大于后开挖洞室初期支护所承受的压力; ②隧道拱部初期支护压力最大值位于中洞拱顶 (103.1 kPa), 与中洞开挖断面较大有关, 隧道左、右线侧洞拱肩与

墙脚位置围岩压力均较大, 这两部位设计时应引起重视; ③左、右线中墙顶部初期支护承受的压力均大于左、右线侧洞顶初期支护承受的压力; 同时, 左、右中隔墙底部受力较大, YY3、YY12 分别承受荷载为 119.3 kPa、114.24 kPa, 且这两位置荷载值明显大于隧道仰拱其他部位受力, 这不仅与中隔墙的自重有关, 也表明三连拱隧道中隔墙承担了较大的上部土体荷载。

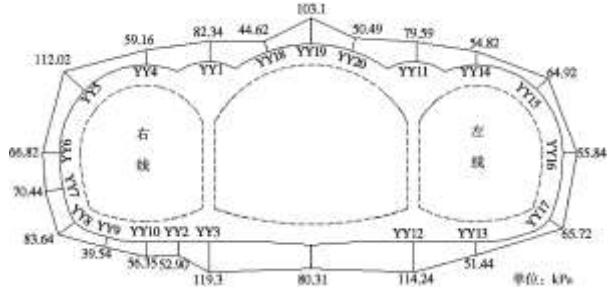


图 5 二衬施作后初期支护承受压力分布图

Fig. 5 Distribution of pressure of initial supports after secondary

linings

b) 初期支护与二次衬砌接触压力测试结果分析

图 6 为三连拱隧道测试断面初期支护与二次衬砌之间的压力分布图 (因部分传感器损坏, 测试结果不太完整), 表 1 为二次衬砌施作后初期支护与二次衬砌结构压力表。

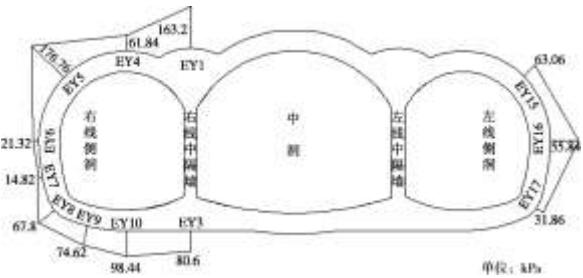


图 6 初期支护与二次衬砌之间的接触压力分布图

Fig. 6 Distribution of contacting pressure between initial supports and secondary linings

分析图 6 和表 1 可得: ①初期支护与二次衬砌之间的接触压力分布不均匀, 左、右线侧洞受力不对称, 右线中导洞拱顶 (EY1) 和右线侧洞拱肩 (EY5) 受荷较大, 分别为 163.2 kPa、176.76 kPa, 这与这些位置初期支护围岩压力较大相对应; ②右线侧洞墙脚和仰拱位置 (EY3、EY8、EY9、EY10) 接触压力也较大, 侧洞边墙部位 (EY6、EY7) 承受的压力较小, 左线侧洞边墙处承受的荷载值较大; ③根据表 1 可以得出, 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为 52.81% 和 47.19%, 这表明在浅埋大跨黄土地铁隧道中二次衬砌处于明显承载状态, 而不仅仅是安全储备; ④由于黄土地区浅埋暗挖地铁隧道初期支护所受的围岩压力主要由松动压力与形变压力组成, 该测试断面隧道二次衬砌所受围岩压力较大, 不仅表明初期支护和二次

衬砌作为整体共同承受隧道荷载，且说明围岩形变稳定时间较长。

表 1 二次衬砌施作后初期支护与二次衬砌结构压力表

Table 1 Pressures of initial supports and secondary linings after construction of secondary linings

测点	P_1 /kPa	P_1/P	(P_1/P 平均值)/%	P_2 /kPa	(P_2/P)/%	(P_2/P 平均值)/%
Y1	82.34	33.53		163.20	66.47	
Y3	119.30	59.68		80.60	40.32	
Y4	59.16	48.89		61.84	51.11	
Y5	112.02	38.79		176.76	61.21	
Y6	66.82	75.81	52.81	21.32	24.19	47.19
Y7	70.44	82.62		14.82	17.38	
Y8	83.64	55.23		67.8	44.77	
Y9	39.54	34.64		74.62	65.36	
Y10	56.35	36.40		98.44	63.60	
Y15	64.92	50.73		63.06	49.27	
Y16	55.84	50.00		55.84	50.00	
Y17	65.72	67.35		31.86	32.65	

注: P_1 为围岩与初期支护接触压力, P_2 为初期支护与二衬接触压力。

(2) 二次衬砌混凝土应力测试结果分析

图 7 为二次衬砌与仰拱中混凝土应力图(以受压为正)。

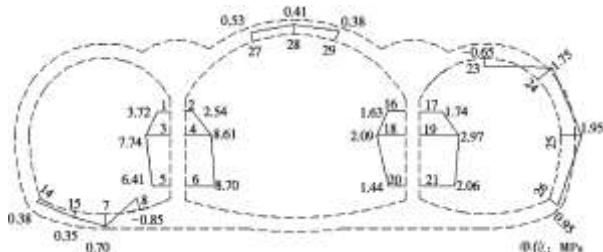


图 7 二次衬砌混凝土应力分布图

Fig. 7 Distribution of stress of secondary linings

a) 二次衬砌混凝土基本受压, 左、右中隔墙二次衬砌混凝土受压最大, 且右侧中隔墙的受荷均大于左侧中隔墙。表明左、右线中隔墙对于传递隧道竖向荷载及左、右线侧洞和中洞荷载效果明显, 同时也表明中隔墙对抑制左、右线侧洞衬砌结构变形效果明显。而右线中隔墙底部受力大于左线中隔墙, 与右线侧洞施工先于左线侧洞有关。

b) 右线侧洞仰拱位置 (#7, #14, #15) 混凝土应力较小。在右线侧洞墙脚位置 (#8) 由于中隔墙浇注产生应力集中, 引起该部位混凝土产生一定的拉应力。

c) 左线侧洞拱顶部位 (#23) 混凝土也产生了拉应力, 同时左线边墙部位 (#24, #25) 位置二次衬砌混凝土应力较大。左线中隔墙部位靠近中洞混凝土应力小于远离中洞部位混凝土应力, 表明该位置的中隔墙存在一定的偏压, 但不明显。

3.2 标准断面隧道测试结果分析

(1) 围岩压力测试结果分析

a) 初期支护围岩压力测试结果分析

图 8 为隧道二次衬砌施作后初期支护围岩压力图。

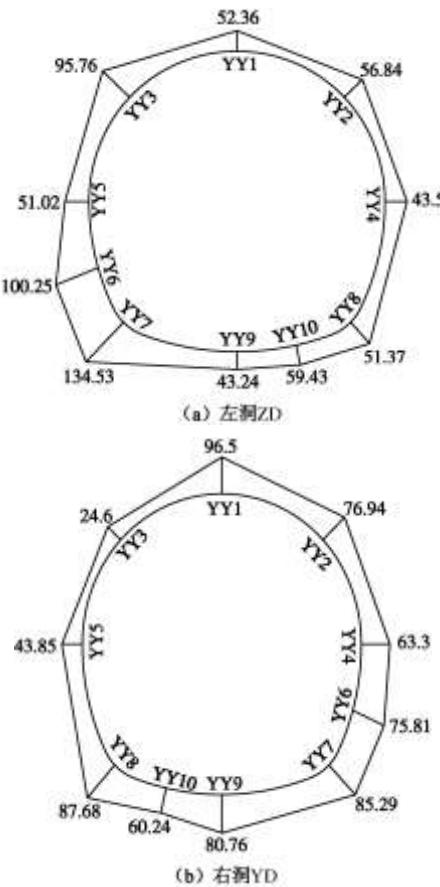


图 8 二衬施作后初期支护承受压力分布图

Fig. 8 Distribution of pressure of initial supports after secondary linings

分析图 8 可得: ① 初期支护与围岩之间接触压力分布不均匀, 两侧不对称, 左洞左侧偏大, 右洞右侧偏大。左、右线 YY7 号和 YY8 号压力盒压力较大, 这是由于这两个位置位于边墙底部, 承受了大部分垂直压力所致; ② 在左洞中, YY3 与 YY2 位置压力值相对较大, 围岩压力“猫耳朵”分布形状较为明显; 最大压力在拱脚而不是拱顶处, 这说明拱脚处于受力不利位置, 设计时应引起重视; ③ 在右洞中, 最大压力在拱顶部, 拱腰及拱脚受力都比左洞小, 这是由于右洞这些部位安装了系统锚杆(为对比分析系统锚杆作用效果, 测试断面仅在右洞安装系统锚杆, 左洞未施作), 这不仅表明边墙锚杆在围岩的变形过程中, 起到了有效的支承和约束作用, 也说明其在维持隧道围岩原有的应力状况, 改善隧道围岩应力的分布以及抑制围岩产生较大的松弛变形方面有一定作用。

b) 初期支护与二次衬砌接触压力测试结果分析

图 9 为测试断面初期支护与二次衬砌之间接触压力分布图, 表 2, 3 为二次衬砌施作后初期支护与二次衬砌结构压力表。

分析图9和表2, 3可得: ①初期支护与二次衬砌之间压力分布不均匀, 两侧不对称, 左洞左侧偏大, 右洞右侧偏大, 这与初支所受围岩压力一致。二次衬

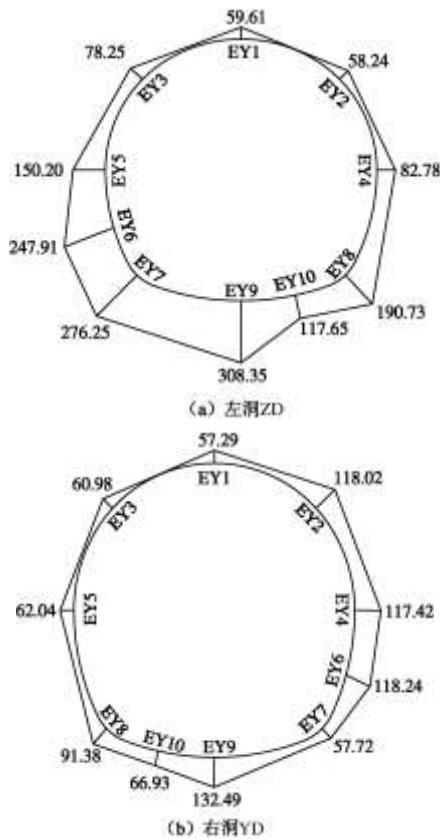


图9 初期支护与二次衬砌之间的接触压力分布图

Fig. 9 Distribution of contacting pressure between initial supports and secondary linings

表2 左洞二次衬砌施作后初期支护与二次衬砌结构受力表

Table 2 Pressures of left hole of initial supports and secondary linings after construction of secondary linings

测点	P_1 /kPa	(P/P_1) /%	(P_1/P) 平均值/%	P_2 /kPa	(P_2/P) /%	(P_2/P) 平均值/%
Y1	52.36	46.76	59.61	53.24		
Y2	56.48	49.23	58.24	50.77		
Y3	95.76	55.03	78.25	44.97		
Y4	43.5	34.45	82.78	65.55		
Y5	51.02	25.36	150.2	74.64		
Y6	100.25	28.79	247.91	71.21	66.06	
Y7	134.34	32.72	276.25	67.28		
Y8	51.37	21.22	190.73	78.78		
Y9	43.24	12.30	308.35	87.70		
Y10	59.43	33.56	117.65	66.44		

砌中仰拱受力较大, 左洞左侧边墙及墙脚、右洞右侧边墙及墙脚接触压力也较大; ②在左洞中, 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为33.94%和66.04%; 右洞中, 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为44.08%和55.92%。综合两洞数据, 初期支护与二次衬砌承受的荷载比例为40%和60%。这说明在浅埋暗挖黄土地铁隧道中, 二次衬砌作为主要的支护结构承担了大部分的荷载; ③对比左右洞初期支护与二次衬砌承受的

荷载比例表明: 施作系统锚杆的右洞初期支护分担的荷载明显大于未施作系统锚杆的左洞。这说明在有系统锚杆的右洞, 支护系统的承载能力增加, 支护系统拥有更高的安全性能; ④地铁隧道中, 由于黄土围岩自身强度低, 在施工阶段, 初期支护不能让其充分的变形就要施做二次衬砌, 二次衬砌要承受较大的力, 所以在设计时, 应提升对二次衬砌重视程度, 在施工时, 应严格按照施工规范, 加强对二次衬砌的施工监控, 保证其质量安全。

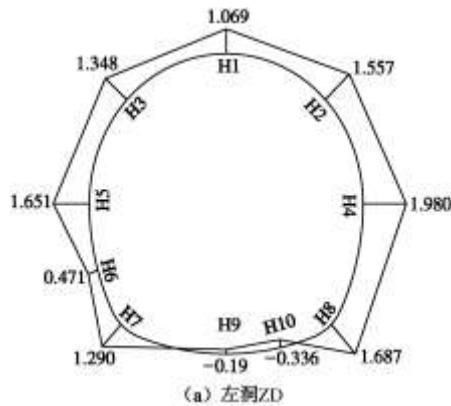
表3 右洞二次衬砌施作后初期支护与二次衬砌结构受力表

Table 3 Pressures of right hole of initial supports and secondary linings after construction of secondary linings

荷载测点	P_1 /kPa	P/P_1	(P_1/P) 平均值/%	P_2 /kPa	(P_2/P) %	(P_2/P) 平均值/%
Y1	96.50	62.75	44.08	57.290	37.25	
Y2	76.94	39.43		118.200	60.57	
Y3	24.60	29.01		60.198	70.99	
Y4	63.30	35.03		117.420	64.97	
Y5	43.85	41.41		62.040	58.59	
Y6	75.81	39.07		118.240	60.93	55.92
Y7	85.29	59.89		57.120	40.11	
Y8	87.68	48.97		91.380	51.03	
Y9	80.76	37.87		132.490	62.13	
Y10	60.24	47.37		66.930	52.63	

(2) 二次衬砌混凝土应力测试结果分析

图10为二次衬砌与仰拱中混凝土应力图(以受压为正)。



(a) 左洞ZD

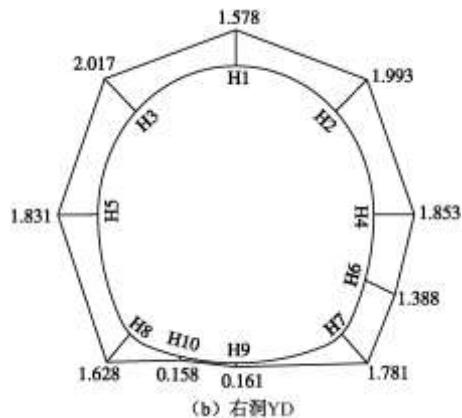


图 10 二次衬砌混凝土应力分布图 (MPa)

Fig. 10 Distribution of stress of secondary linings

分析图 10 可得: ①二次衬砌混凝土基本受压, 不同位置混凝土的应力差别较大, 拱腰及以上位置应力较大, 仰拱处应力较小, 整体呈“苹果”状, 在左洞仰拱处出现了较小的拉应力, 右洞仰拱处压应力较小; ②左洞仰拱处出现较小的拉应力, 与该位置所受压力较大, 而其跨度也比拱部大得多有关。

4 结 论

(1) 在三连拱大断面地铁隧道中, 围岩与初期支护左、右线接触压力分布不均匀, 两侧不对称, 先开挖洞室初期支护各部位所受的围岩压力均大于后开挖洞室初期支护所承受的压力; 左、右线中墙顶、底部初期支护承受的压力较大, 表明隧道中隔墙承担了较大的上部土体荷载。

(2) 三连拱大断面地铁隧道初期支护与二次衬砌承受荷载的分担比例为 52.81% 和 47.19%, 表明在浅埋大跨黄土地铁隧道中二次衬砌处于明显承载状态, 而不仅仅是安全储备。二次衬砌混凝土基本受压, 左、右中隔墙二次衬砌混凝土受压最大。

(3) 标准断面地铁隧道中, 初期支护与围岩之间接触压力分布不均匀, 两侧不对称, 左洞左侧偏大, 右洞右侧偏大。且因左、右线墙脚位置承受了大部分垂直压力, 而致这两个位置压力较大。

(4) 标准断面地铁隧道初期支护与二次衬砌承受荷载的分担比例为 40% 和 60%, 说明二次衬砌作为主要的支护结构承担了大部分的荷载。二次衬砌混凝土基本受压, 不同位置混凝土的应力差别较大, 拱腰及以上位置应力较大, 仰拱处应力较小, 整体呈“苹果”状分布。

参 考 文 献:

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004: 683 - 708. (WANG Meng-shu. Theory and technology of shallow-buried tunnel excavation[M].

- Hefei: Anhui Education Press, 2004: 683 - 708. (in Chinese))
- [2] JTGD70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTGD70—2004 Code for design of road tunnel[S]. 2004. (in Chinese))
- [3] TB10003—99 铁路隧道设计规范[S]. 1999. (TB10003—99 Code for design of railway tunnel[S]. 1999. (in Chinese))
- [4] 张顶立, 王梦恕, 高军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290 - 296. (ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun, et al. Research on construction technology of large span-tunnel in complex rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 290 - 296. (in Chinese))
- [5] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面深埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1618 - 1625. (TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Experimental research on bolt anchorage effect on large-section deep-buried tunnel in loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1618 - 1625. (in Chinese))
- [6] 丁文其, 王晓形, 朱合华, 等. 连拱隧道设计荷载的确定方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 78 - 82. (DING Wen-qi, WANG Xiao-xing, ZHU He-hua, et al. Defining method for designing load of multi-arch tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 78 - 82. (in Chinese))
- [7] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 1 - 4. (WANG Meng-shu. Outline of tunnel construction by means of method of undercutting with shallowoverburden[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(5): 1 - 4. (in Chinese))
- [8] SOUBRA A H, REGENASS P. Three-dimensional passive earth pressures by kinematical approach[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 126(11): 969 - 978.
- [9] 来弘鹏, 林永贵, 谢永利, 等. 支护时机对软弱围岩公路隧道力学特征影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009(3): 390 - 395. (LAI Hong-peng, LIN Yong-gui, XIE Yong-li, et al. Study the relationships between soft-wreak surrounding rocks highway tunnel stress characteristics and supporting opportunity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(3): 390 - 395. (in Chinese))
- [10] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2324 - 2331. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, MEN Yu-ming, et al. Model test study on effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2324 - 2331. (in Chinese))

- [11] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999. (XIA Cai-chu, LI Yong-sheng. Test theory and measurement technology of the underground engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999. (in Chinese))
- [12] 赵占厂, 谢永利, 杨晓华, 等. 黄土公路隧道衬砌受力特性测试研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 66 - 69. (ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 66 - 69. (in Chinese))