

文章编号:1671-1637(2015)03-0041-11

软弱黄土隧道支护结构力学特性测试

赖金星^{1,2}, 王开运¹, 来弘鹏^{1,3}, 邱军领¹, 谢永利¹

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 南洋理工大学 土木与环境工程学院, 新加坡 639798; 3. 亚利桑那大学 土木工程与工程力学系, 亚利桑那 图森 AZ85721)

摘要:为研究软弱黄土隧道支护结构的受力特性,优化黄土隧道设计理论,以西宁过境高速公路某黄土隧道为依托,选取杂填土段、深埋段和浅埋段进行了大规模的现场测试,从支护受力的空间分布、时间分布、计算方法以及对比验证等方面,对围岩与初支接触压力、初支与二衬接触压力及二衬和仰拱混凝土的应变进行了系统的研究。分析结果表明:拱顶、拱肩处的压力值较大,是黄土隧道最危险的部位,容易发生坍塌;围岩压力计算值与实测值相差较大,现有方法在计算黄土断面围岩压力时存在较大的误差;深埋段围岩压力稳定时间最短,浅埋段次之,杂填土段时间最长;软弱黄土隧道“新奥法”原理指导下,“强初支,弱二衬”设计理念的采用,使二衬荷载承担比例控制在11%~36%范围内,充分发挥了初支对围岩变形的抑制作用,二衬仍作为安全储备。

关键词:公路隧道;软弱黄土;支护结构;力学特性

中图分类号:U451.4 **文献标志码:**A

Mechanical characteristic test of tunnel support structure in weak loess stratum

LAI Jin-xing^{1,2}, WANG Kai-yun¹, LAI Hong-peng^{1,3}, QIU Jun-ling¹, XIE Yong-li¹

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 3. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, The University of Arizona, Tucson AZ85721, Arizona, USA)

Abstract: In order to analyze the mechanical characteristics of tunnel support structure in weak loess stratum and optimize the design theory of loess tunnel, large scale field tests of the sections of miscellaneous fill, deep depth and shallow depth were conducted for a loess tunnel of the highway through Xining City. In the aspects of space distribution, time distribution, calculation method and contrast verification, the contact pressure between surrounding rock and primary liner, the contact pressure between primary liner and secondary liner, and the strains of secondary liner and inverted arch were systematically studied. Analysis result shows that the vault and spandrel are the most dangerous parts of loess tunnel for their large pressures and prone to collapse. The calculated values of surrounding rock pressure are very different from the measured values, and the existing method has a big error in the calculation of surrounding rock pressure at the loess section. The time for surrounding rock pressure to stabilize is shorter at deep depth section than the value at shallow depth section, and the time at the section of miscellaneous fill is the longest. Following the guidance of New Austrian Tunnelling Method for the loess tunnel and the design concept of “strong primary liner and weak secondary liner”, the

收稿日期:2014-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51008029, 51378071);青海省交通科技项目(2009-08);陕西省工业科技攻关项目(2015GY185)

作者简介:赖金星(1973-),男,广东龙川人,长安大学副教授,工学博士,从事隧道工程研究。

loading proportions of the secondary liner have been kept in the range of 11%-36% and the primary liner has played an important role in controlling the deformation of surrounding rock. The secondary liner has played as safety reserve. 7 tabs, 11 figs, 20 refs.

Key words: highway tunnel; weak loess; support structure; mechanical characteristic

Author resume: LAI Jin-xing(1973-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334453, 373159626@qq.com.

0 引 言

近年来,随着中国交通建设的飞速发展,出现了大量的黄土公路隧道。但由于黄土垂直节理发育,强度较低,具有明显的结构性、水敏性和区域差异性,使得隧道开挖引起的扰动变形和后期蠕变变形比较大,并且公路隧道多具有断面大、平坦状、地质复杂等特点,所以对黄土隧道支护体系的力学特性研究成了亟待解决的问题。尽管中国黄土隧道工程实践已有半个多世纪,但设计理论研究仍然滞后于工程实践,黄土隧道一直是工程界和学术界关注的热点之一^[1-2]。

在此背景下,许多学者对黄土的物理性质与黄土隧道的力学特性进行了多年的研究,取得了一定成果。Kruse 等结合多个工程案例研究了黄土结构对黄土变形及力学特性的影响^[3];Li 等对黄土进行了一系列室内土工试验,分析了水含量和环境压力与黄土结构的应力应变关系,并对黄土结构坍塌进行试验评估^[4-5];赵占厂等在浅埋黄土隧道衬砌受力测试的基础上,研究了围岩压力的分布形式以及随时间的变化规律,对深浅埋的界定标准也作了相应的论述^[6];来弘鹏等以青土岷隧道为依托进行了现场测试,对围岩压力、格栅拱架钢筋轴力、初支和二衬接触压力等变化规律及分布特性进行了研究^[7];陈建勋等基于刘家坪 2[#] 隧道对黄土隧道洞口段支护的受力状况进行施工监测,并采用有限元法进行了分析^[8];杨建民等针对郑州至西安客运专线大断面黄土隧道设计中存在的问题,对深浅埋分界、深浅埋围岩压力进行了研究^[9];李鹏飞等在对 44 座隧道 91 个监测断面围岩压力统计的基础上,研究了隧道围岩压力的分布特征及其与隧道埋深、围岩级别的关系^[10]。

以上针对不同区域与条件下的黄土隧道的力学特性进行了相关研究,为黄土隧道的设计与施工提供了一定技术支撑,但由于黄土的区域差异性明显,多个已建成隧道出现了各种病害,并且在建隧道施工过程中也多次出现塌方现象^[11-12],加之黄土自身

的特殊性和复杂性,形成时期不同的湿陷性黄土的力学性质也相差较大,因此,有必要对其做进一步的研究。大有山隧道所在西宁市无黄土隧道施工先例,地质条件复杂多变,洞身同时处在湿陷性和非湿陷性黄土地层,地表有杂填土和新近堆积黄土等,在进入洞过程中频遇塌方。鉴于此,本文以大有山隧道为依托,采用钢弦式传感器对软弱黄土隧道各典型断面的支护力学特性进行系统测试和分析,为软弱黄土隧道优化设计提供重要基础数据,以期提高黄土隧道的修筑技术水平。

1 工程概况

大有山隧道是丹东至拉萨西宁过境高速公路的关键性控制工程^[13],所属地貌单元主要为黄土塬梁地貌,范围内地层为第四系全新统的黄土、上更新统风积黄土及人工填土,具有压缩性高的特点,湿陷深度达 10~20 m。隧道进口段为北川河西岸Ⅲ级阶地地貌,出口段为黄土塬梁深切沟谷斜坡地貌,海拔高程为 2 314.8~2 444.2 m,隧址区山体冲沟发育。

该隧道为分离式双洞隧道,右线起、讫桩号分别为 K2+655、K5+190,全长 2 535 m,左线起、讫桩号分别为 ZK2+655、ZK5+215,全长 2 560 m。围岩以第四系黄土为主,且多具有湿陷性,级别均为 V 级,根据隧道埋深以及上覆土层的不同将结构分为冲沟回填加强段(杂填土段)、深埋段与浅埋段。隧道衬砌设计遵循“强初支,弱二衬”的思想,其主要支护参数见表 1, L 为支护长度。

2 测试内容与方案

2.1 测试内容

为研究支护体系的力学特性,现场测试内容包括围岩和初支间的接触压力、初支和二衬间的接触压力、二衬和仰拱混凝土的应变。对现场测试仪器的布设应高度重视,本次受力测试全部采用适用于土质条件的沥青囊式压力盒,埋设时将其放在预先挖好的深约 3 cm 的圆坑中,并使沥青囊上面与土面相持平,固定之后对压力盒施加预压力。同时,为了

表 1 隧道支护参数

Tab. 1 Parameters of tunnel liner and support

| 级别 | 初支 | | | | 仰拱 | | 二衬 | Φ50 超前小导管/cm |
|-------------|----------------|------------|----------------|---------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | C25 喷射混凝土厚度/cm | Φ8 钢筋网/cm | Φ22 系统锚杆/cm | 钢架/cm | C25 喷射混凝土厚度/cm | C25 钢筋混凝土厚度/cm | C25 钢筋混凝土厚度/cm | |
| V 级加强(杂填土段) | 28 | @20×20(双层) | @100×50, L=400 | I20a@50 | 28 | 55 | 55 | @35, L=430 |
| V 级(深埋) | 24 | @20×20(单层) | @100×75, L=350 | I18@75 | 24 | 50 | 50 | @40, L=480 |
| V 级(浅埋) | 26 | @20×20(双层) | @100×65, L=400 | I20a@65 | 26 | 50 | 50 | @35, L=500 |

使测试数据更加准确^[2],埋设过程中用纱布将压力盒周边绕实,防止二衬混凝土砂块嵌入。二衬混凝土应变计在拱圈内用环向 U 形支架固定,使其与相应位置二衬外表面切线相平行。总之,在测试仪器埋设过程中,要避免因埋设方法不当使量测“误差”变成“错误”。

2.2 测试方案

为了使测试结果更有研究价值,根据隧道的埋深和上覆土层种类及其厚度的不同,分别在杂填土浅埋段、黄土深埋段、黄土浅埋段各埋设 2 个量测断面,包括:K3+227、ZK3+160(V 级杂填土浅埋段,简称 227、160 断面),ZK3+915、ZK3+243(V 级深埋段,简称 915、243 断面),ZK4+770、K4+450(V 级浅埋段,简称 770、450 断面),各个断面土层厚度及埋深见表 2。其中 450 断面埋设于初支与围岩之间的测试元件由于塌方致使损坏,所以浅埋段围岩与初支之间压力规律都由 770 断面得出。断面布设见图 1,数字为测试元件编号。

表 2 测试断面上覆土层厚度

Tab. 2 Thicknesses of covering soils at test sections m

| 支护形式 | 断面 | 杂填土 | 湿陷性黄土 | 非湿陷性黄土 | 总埋深 |
|-----------|-----|-------|-------|--------|-------|
| V 级杂填土浅埋段 | 227 | 13.21 | 11.27 | 16.39 | 40.87 |
| | 160 | 32.21 | 5.61 | | 37.82 |
| V 级深埋段 | 915 | | 30.35 | 45.48 | 75.83 |
| | 243 | | 39.39 | 23.34 | 62.73 |
| V 级浅埋段 | 770 | | 20.34 | 29.33 | 49.67 |
| | 450 | | 23.79 | 27.60 | 51.39 |

3 初支压力分析

3.1 空间分布规律

初支压力分布见图 2,数字 1~13 为测点编号,其余数字为初支压力值,单位为 kPa。在 227、915、770 断面中,10、11 号压力盒数值都较大,边墙底部承受了大部分的垂直压力。衬砌边墙位置处的压力值也比较大,这是由于拱顶上方土体向两侧挤压所

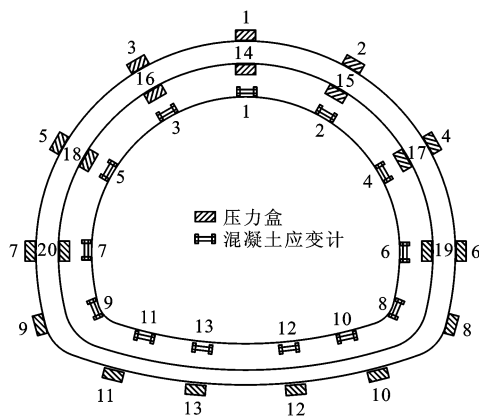


图 1 测试元件布置

Fig. 1 Layout of test elements

致。227、160、770 断面仰拱所受的压力较小,由于这 3 个断面位于浅埋段,且上覆杂填土或者湿陷性黄土较非湿陷性黄土厚度较大,土体变形速度较快,完成变形所需时间也较短,并且由于施工的滞后导致仰拱没能及时闭合,所以仰拱处的压力值较小。915、243 断面位于深埋段,仰拱处的压力值相比浅埋段较大,但增加的幅度不大,由于隧道上覆土层为一定厚度孔隙率相对较小的非湿陷性黄土,易形成自稳性较强的拱圈,比浅埋隧道的稳定性较好,土体承担的释放荷载较大^[14]。

整体来看,围岩压力普遍较大,洞周的不均匀性受力比较明显,主要由地层初始应力状态不均匀以及地层的复杂性造成的。最大围岩压力值出现在拱顶位置处,说明拱顶是隧道拱圈最危险的部位。大有山隧道监测数据显示拱顶沉降普遍较大,应力得到了有效释放,由于土体强度较低,自稳能力较差,围岩压力仍然较大^[15]。另外,拱肩处的围岩压力也较大,容易发生局部坍塌,在实际埋设压力盒的过程中也验证了这一点,所以在施工过程中应注意该位置的支护工作。

图 3 为初支压力沿纵向分布,数字 1~13 为测点编号。除左拱肩外,915 断面的初支压力普遍大于 243 断面,这是由湿陷性黄土的孔隙率较大引起

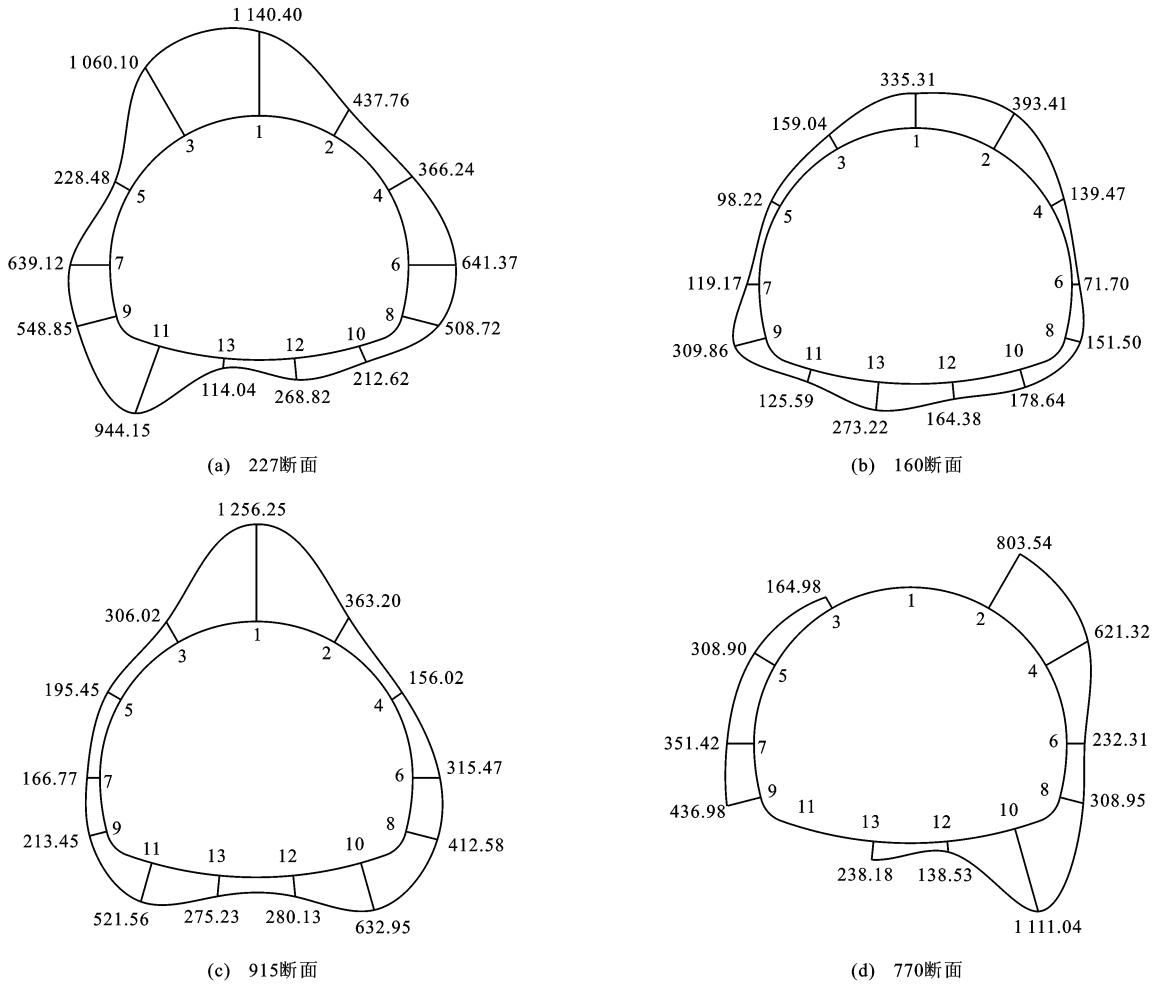


图2 初支压力分布

Fig. 2 Distributions of primary liner pressures

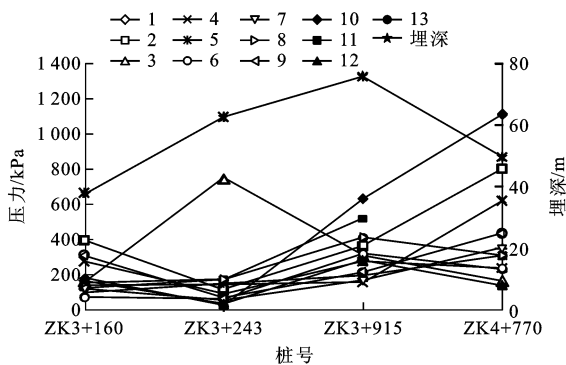


图3 各断面位置的初支压力分布

Fig. 3 Distributions of primary liner pressures at different sections

的^[16],而243断面左拱肩位置压力较大则可能由偏压导致。综合浅埋段曲线变化可以看出,由于上覆土体类型不同,随着隧道埋深的增加,部分位置的初支压力随之减小,说明上覆土层的类型对初支压力大小有较大的影响。对比浅埋段和深埋段的初支压力分布,由于浅埋段的初期支护设计更强,有效抑制

了土层的变形,从而使得接触压力较大。

表3列出了利用不同方法计算得到的围岩压力值,其中实测值推算结果是按静力等效近似计算所得,表中 θ 为滑面的摩擦角, φ_c 为围岩计算摩擦角。对于杂填土断面,无论是按照谢家杰公式^[17]、Terzaghi公式^[18]还是《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)相应公式来计算,都与实测结果相差较大,其中160断面的实测结果与Terzaghi公式计算结果相对较

表3 竖向围岩压力

Tab. 3 Pressures of vertical surrounding rocks kPa

| 方法 | 断面 | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 227 | 160 | 915 | 243 | 770 |
| 实测值推算结果 | 717.97 | 245.42 | 526.59 | 411.78 | 508.59 |
| Terzaghi公式 | 361.01 | 345.98 | | | 387.17 |
| 谢家杰公式 | 501.43 | 472.32 | | | 532.25 |
| 普氏理论 | | | 390.63 | 390.63 | |
| 设计规范 ($\theta=0.5\varphi_c$) | 541.40 | 513.11 | 259.20 | 259.20 | 585.67 |

接近,考虑到杂填土成分复杂,物理力学参数选取不准确,所以 227 断面计算值均小于实测值。深埋段 243 断面的实测结果为 411.78 kPa,与普氏理论计算结果 390.63 kPa 比较吻合,而 915 断面的实测结果大于计算结果且相差较大,说明现有计算方法在计算黄土深埋断面时仍存在一些问題。浅埋 770 断面的实测结果为 508.59 kPa,与 Terzaghi 公式和《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)计算结果相差较大,而与谢家杰公式所得结果 532.25 kPa 比较接近。公路隧道设计规范深埋隧道围岩压力计算是基于 247 座岩质隧道塌方统计得到的经验公式,所以与土质隧道差异大,《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)计算结果与实测结果相比偏小 40%~50%。

3.2 时间分布规律

图 4 为围岩与初支接触压力随时间的变化情况,数字 1~9 为测点编号。160 断面的拱顶、右拱肩和左拱脚处的压力较大,并且时间效应显著,随监测时间增长不断增大,其他测点的压力则较小,只在前 30 d 略有增长,其后便趋于稳定。结合

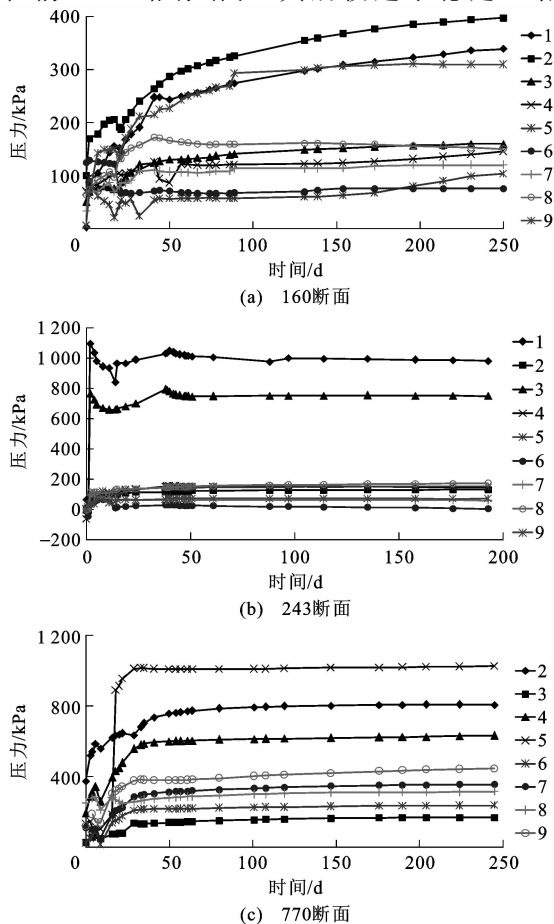


图 4 围岩与初支接触压力-时间曲线
Fig. 4 Contact pressure-time curves between surrounding rock and primary liner

227、160 断面的时程曲线来看,杂填土断面拱顶位置处的压力随时间变化幅度大,并且达到稳定所需的时间较长。深埋段 915、243 断面压力均比较小,且稳定时间较快,特别是 243 断面,除拱顶和左拱肩测点外,其余测点压力均不到 200 kPa,并且在 20 d 之内便趋于稳定;拱顶和左拱肩处压力较大,拱顶处最大为 1 049 kPa,左拱肩处最大值为 791 kPa,在监测 50 d 之后逐渐趋于稳定。770 断面位于浅埋段,各个测点的接触压力最大值出现在 30 d 左右,之后随监测时间增长变化幅度不大,其中,拱腰处的压力随时间的增长幅度比较小,而边墙的压力较大。

图 5 为仰拱压力随时间的变化情况,数字 10~13 为测点编号。仰拱压力盒读数规律与各个断面的拱墙压力规律基本相同,数值普遍较小,说明隧道底部土体产生底鼓的趋势较小,相比之下,杂填土断面仰拱压力值较大且达到稳定所需时间较长,符合杂填土压缩性高、承载力低的特点。

总的来说,在监测 2 个月以后,围岩压力基本趋

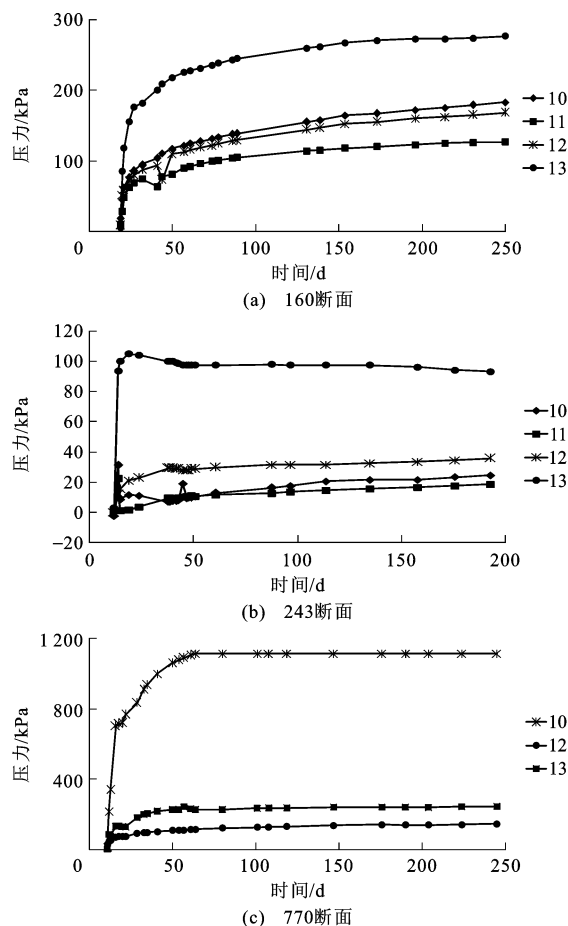


图 5 仰拱压力-时间曲线
Fig. 5 Pressure-time curves of tunnel inverted arch

于稳定,其中深埋断面稳定所需的时间最短,浅埋段面次之,杂填土断面稳定所需时间最长,这为二衬施作时机的选择提供了依据。通过时程曲线与施工进度对比可发现,各个断面在仰拱施作时,围岩压力呈现减小的趋势,说明仰拱对于提高初支承担围岩压力发挥了一定的作用。

4 二衬压力分析

4.1 空间分布规律

隧道初支与二衬的接触压力分布见图 6,数字 1~9 为测点编号,其余数字为接触压力值,单位为 kPa。由图 6(a)、(b)可知,227、160 断面接触压力的最大值出现在拱顶或拱肩处,并且呈现出由拱顶至拱墙下部逐渐减小的规律。其中,160 断面左侧压力大于右侧,这是由隧道洞身两侧地质条件差异

以及浇筑混凝土时模板台车自身结构的原因造成的。表 4 为杂填土断面初支与二衬分担的荷载比例, P_1 为初支与围岩接触压力, P_2 为初支与二衬接触压力, P 为总围岩压力。227 断面二衬分担比例为 17.88%,160 断面二衬分担比例为 36.17%,两者相差较大,一方面是由于初支还没充分变形情况下便开始施作二衬,另一方面也与杂填土成分复杂、规律性差的特点有关。

915、243 断面位于深埋段,由图 6(c)、(d)可知,二衬受力较小,特别是 243 断面,压力对称分布,说明围岩的自稳能力强,浇筑二衬时,初支压力已经基本稳定,二衬所受压力较小。915 断面的压力最大值出现在左拱肩处,最大值为 289.30 kPa,该位置处的混凝土浇筑密实度较低,左拱肩处出现应力集中现象。由表 5 可知,深埋段二衬的荷载分担比较

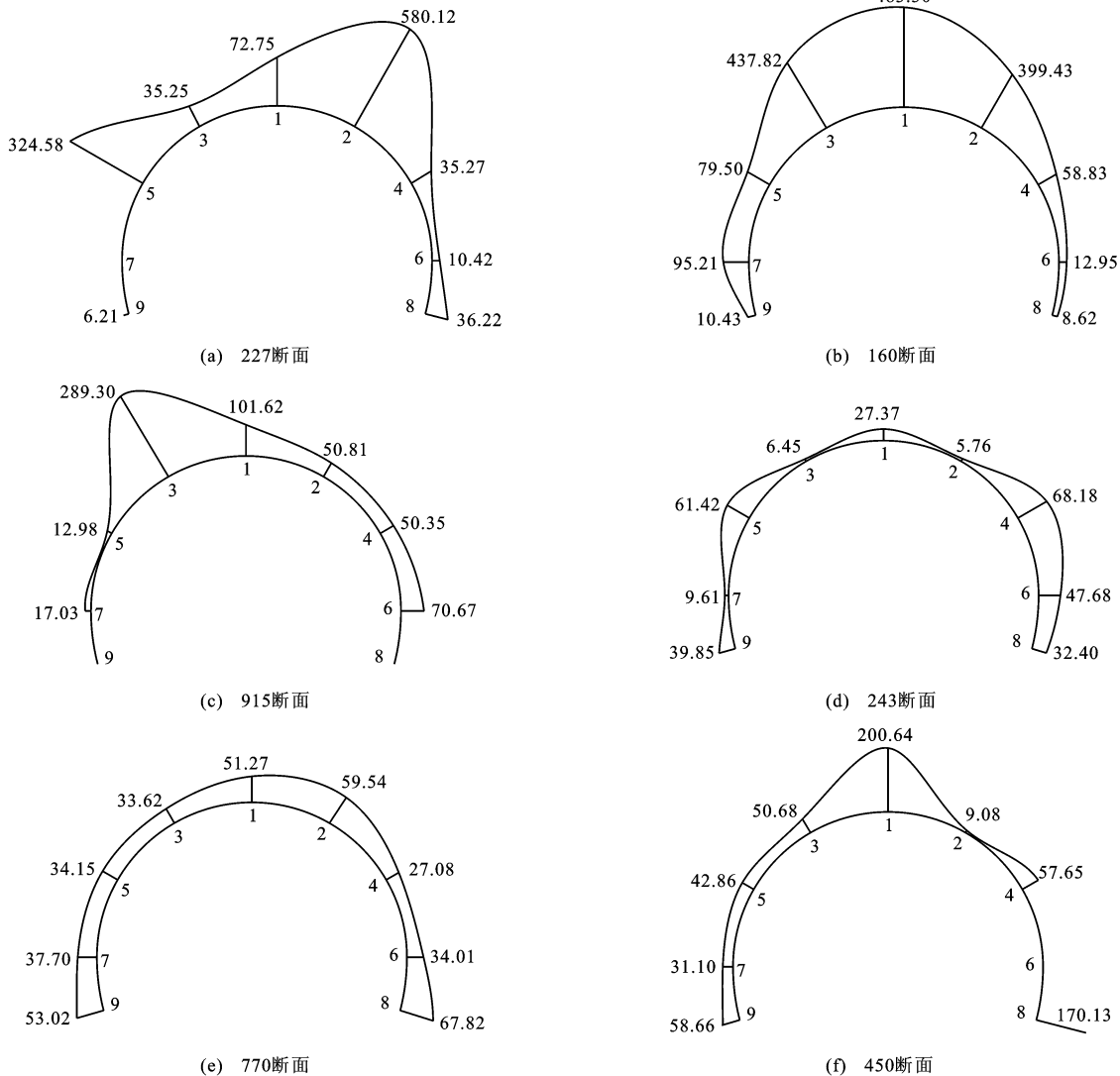


图 6 初支与二衬接触压力分布
Fig. 6 Distributions of contact pressures between primary liner and secondary liner

表 4 杂填土段断面初支与二衬接触压力

Tab. 4 Contact pressures of primary liner and secondary liner at miscellaneous fill sections

| 断面 | 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/ $\%$ |
|-----|-----|-----------|------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| 227 | 1 | 1 140.40 | 94.00 | 82.12 | 72.75 | 6.00 | 17.88 |
| | 2 | 437.76 | 43.01 | | 580.12 | 56.99 | |
| | 3 | 1 060.10 | 96.78 | | 35.25 | 3.22 | |
| | 4 | 366.24 | 91.22 | | 35.27 | 8.78 | |
| | 5 | 228.48 | 41.31 | | 324.58 | 58.69 | |
| | 6 | 641.37 | 98.40 | | 10.42 | 1.60 | |
| | 8 | 508.72 | 93.35 | | 36.22 | 6.65 | |
| | 9 | 548.85 | 98.88 | | 6.21 | 1.12 | |
| | 160 | 1 | 335.31 | | 40.96 | 63.83 | |
| 2 | | 393.41 | 49.62 | 399.43 | 50.38 | | |
| 3 | | 159.04 | 26.65 | 437.82 | 73.35 | | |
| 4 | | 139.47 | 70.33 | 58.83 | 29.67 | | |
| 5 | | 98.22 | 55.27 | 79.50 | 44.73 | | |
| 6 | | 71.70 | 84.70 | 12.95 | 15.30 | | |
| 7 | | 119.17 | 55.59 | 95.21 | 44.41 | | |
| 8 | | 151.50 | 94.62 | 8.62 | 5.38 | | |
| 9 | | 309.86 | 96.74 | 10.43 | 3.26 | | |

表 5 深埋段断面初支与二衬接触压力

Tab. 5 Contact pressures of primary liner and secondary liner at deep depth sections

| 断面 | 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/ $\%$ |
|-----|----|-----------|------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| 915 | 1 | 1 256.25 | 92.52 | 81.92 | 101.62 | 7.48 | 18.08 |
| | 2 | 363.20 | 87.73 | | 50.81 | 12.27 | |
| | 3 | 306.02 | 51.40 | | 289.30 | 48.60 | |
| | 4 | 156.02 | 75.60 | | 50.35 | 24.40 | |
| | 5 | 195.45 | 93.77 | | 12.98 | 6.23 | |
| | 6 | 315.47 | 81.70 | | 70.67 | 18.30 | |
| | 7 | 166.77 | 90.73 | | 17.03 | 9.27 | |
| 243 | 1 | 679.61 | 96.13 | 82.26 | 27.37 | 3.87 | 17.74 |
| | 2 | 112.17 | 95.12 | | 5.76 | 4.88 | |
| | 3 | 747.82 | 99.14 | | 6.45 | 0.86 | |
| | 4 | 145.10 | 68.03 | | 68.18 | 31.97 | |
| | 5 | 149.47 | 70.88 | | 61.42 | 29.12 | |
| | 6 | 63.42 | 57.08 | | 47.68 | 42.92 | |
| | 7 | 56.98 | 85.57 | | 9.61 | 14.43 | |
| | 8 | 172.21 | 84.16 | | 32.40 | 15.84 | |
| | 9 | 213.45 | 84.27 | | 39.85 | 15.73 | |

为接近,均在 18%左右,说明在深埋断面中,大部分围岩压力都由初支承担。

由图 6(e)、(f)可知,770 断面压力由拱肩至拱脚呈现逐渐增大的规律。450 断面最大压力出现在拱顶位置,最大值为 200.64 kPa,拱顶初支的变形较大,在实际施工过程中,当初支施作完成后该断面发生了塌方事故,证实了测试结果的准确性。表 6 为 770 断面初支与二衬接触压力,该断面二衬压力分担比为 11.15%,这与新庄岭隧道测试结果 10.50%比较接近^[19],虽然新庄岭隧道为传统的两层模筑混凝土设计,其计算方法与“新奥法”二衬设计有较大区别,但由于大有山隧道所采取的初期支护比较强,与基于荷载结构原理的两层衬砌设计效果类似,此时二衬主要作为安全储备。

表 6 浅埋段断面初支与二衬接触压力

Tab. 6 Pressures of primary liner and secondary liner at shallow depth sections

| 断面 | 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/ $\%$ |
|-----|----|-----------|------------|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| 770 | 2 | 803.54 | 93.10 | 88.85 | 59.54 | 6.90 | 11.15 |
| | 3 | 164.98 | 83.07 | | 33.62 | 16.93 | |
| | 4 | 621.32 | 95.82 | | 27.08 | 4.18 | |
| | 5 | 308.90 | 90.05 | | 34.15 | 9.95 | |
| | 6 | 232.31 | 87.23 | | 34.01 | 12.77 | |
| | 7 | 351.42 | 90.31 | | 37.70 | 9.69 | |
| | 8 | 308.95 | 82.00 | | 67.82 | 18.00 | |
| | 9 | 436.98 | 89.18 | | 53.02 | 10.82 | |

图 7 为初支与二衬接触压力的纵向分布,数字 1~9 为测点编号。初支与二衬接触压力最大值一般出现在拱顶和拱肩位置,并且分布不均匀,主要由土体分布不均匀以及二衬混凝土浇筑密实度的不同造成的。由于初期支护承受了较大压力,使得浅埋

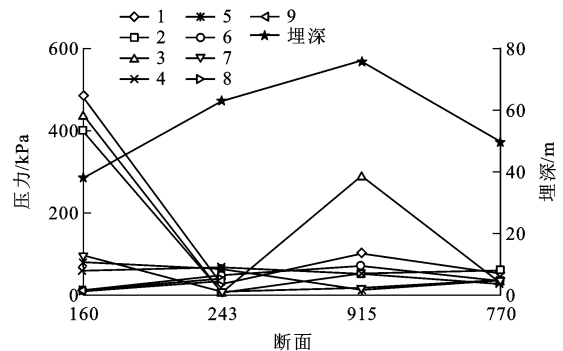


图 7 各断面位置初支与二衬接触压力分布

Fig. 7 Distributions of constact pressures between primary liner and secondary liner at different sections

段和深埋段初支与二衬之间接触压力对比并不明显。相对而言,杂填土段 160 断面的压力分布较为凌乱,这是由杂填土的特点所决定的。由表 4~6 可知,大有山隧道二衬荷载承担比在 11%~36% 范围内,将此结果与以往黄土隧道研究^[19-20]进行对比分析,见表 7。大有山隧道的二衬荷载承担比 11%~17% 远远小于西安地铁 2 号线隧道标准断面的测试结果 60%^[20],而与赵占厂在谯口至兰州高速公路 3 座黄土隧道(新庄岭隧道、白虎山隧道、青土岘隧道)的测试结果比较接近^[19],由此可见,其主要作用仍为安全储备。基于目前黄土公路隧道“新奥法”二衬设计理念,黄土隧道的二衬荷载分担比例比较大,对二衬施工质量的要求也较高;通过大有山黄土隧道的长期监测数据可知,“强初支,弱二衬”的设计可充分发挥初支对围岩变形的控制作用,既达到了传统黄土公路隧道两层衬砌设计的支护效果,又可降低二衬的施作力度,经济效益可观。

表 7 黄土隧道二衬承受的荷载比

Tab. 7 Load ratios of secondary liners of loess tunnels

| 隧道名称 | 隧道形式 | 荷载比/% |
|-----------|------|-------------|
| 大有山隧道 | 单洞 | 11.00~36.00 |
| 西安地铁 2 号线 | 三连拱 | 47.19 |
| | 标准断面 | 60.00 |
| 新庄岭隧道 | 单洞 | 10.50 |
| 白虎山隧道 | 单洞 | 8.90 |
| 青山岘隧道 | 单洞 | 8.50 |

4.2 时间分布规律

图 8 为初支与二衬接触压力随时间的变化情况,数字 1~9 为测点编号。227、160 断面为杂填土,初支与二衬间接触压力整体比较大,特别是上拱圈压力比较大。其中 227 断面的压力最大值 580.12 kPa 出现在右拱肩处,160 断面的压力最大值 483.30 kPa 出现在拱顶处。在拱墙上部测点,拱顶和左右拱肩 3 个测点的变化最明显,接触压力随着监测时间持续增大。竖向围岩压力主要由隧道拱圈承担,在岩质隧道中,拱圈顶部形成一个不受围岩约束的脱离区,而在黄土隧道中,特别是杂填土,土层与拱圈顶部密贴使拱圈顶部形成一个抗力区,但由于杂填土较松散,土体变形受到拱圈约束,使得接触压力不断增大,变形稳定时间也较长。915、243 断面位于深埋段,由图 8(b)可知,二衬受力较小,承载作用不明显。初支与二衬间接触压力 40 d 之后便基本趋于稳定。770、450 断面位于浅埋段,拱顶和拱脚处二衬受力较大,拱腰较小,但从整体来看,各个测

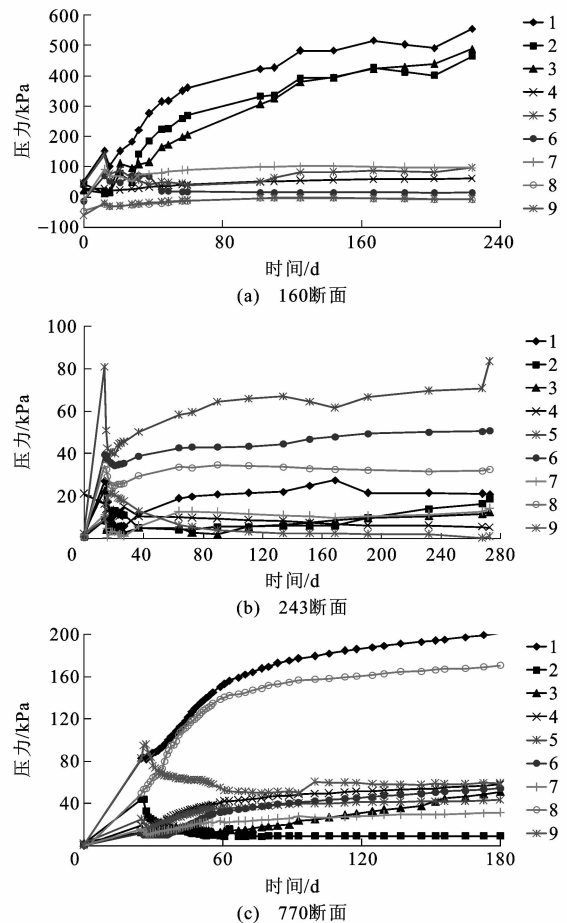


图 8 初支与二衬接触压力-时间曲线

Fig. 8 Contact pressure-time curves between primary liner and secondary liner

点受力较小,稳定较快。其中 450 断面的拱顶和右拱脚处的压力比较大,并且随着监测时间不断增大,考虑到偏压的影响,作用的围岩应力不断释放的缘故,建议隧道支护结构采取不对称的设计参数。

随着监测时间的增长,这几个断面在 40 d 内均呈现先增大后减小再增大的变化规律,而压力开始减小的时刻正是仰拱开始施作时。在仰拱开挖或撤除临时支护后,隧道边墙底部由三向应力状态变为单向受力状态,衬砌结构产生向洞内方向的变形,使得接触压力逐渐减小;然后随着仰拱混凝土强度的增大,应力状态发生改变,接触压力又缓慢增大。另外,二衬压力由开始监测到最后趋于稳定所需要的时间基本在二衬施作后的 40 d 左右。

5 二衬应变分析

5.1 空间分布规律

二衬与仰拱混凝土应变分布见图 9,数字 1~13 为测点编号,其余数字为混凝土应变,单位为 10^{-6} 。227 断面最大应变出现在左右拱脚处,并且左侧应

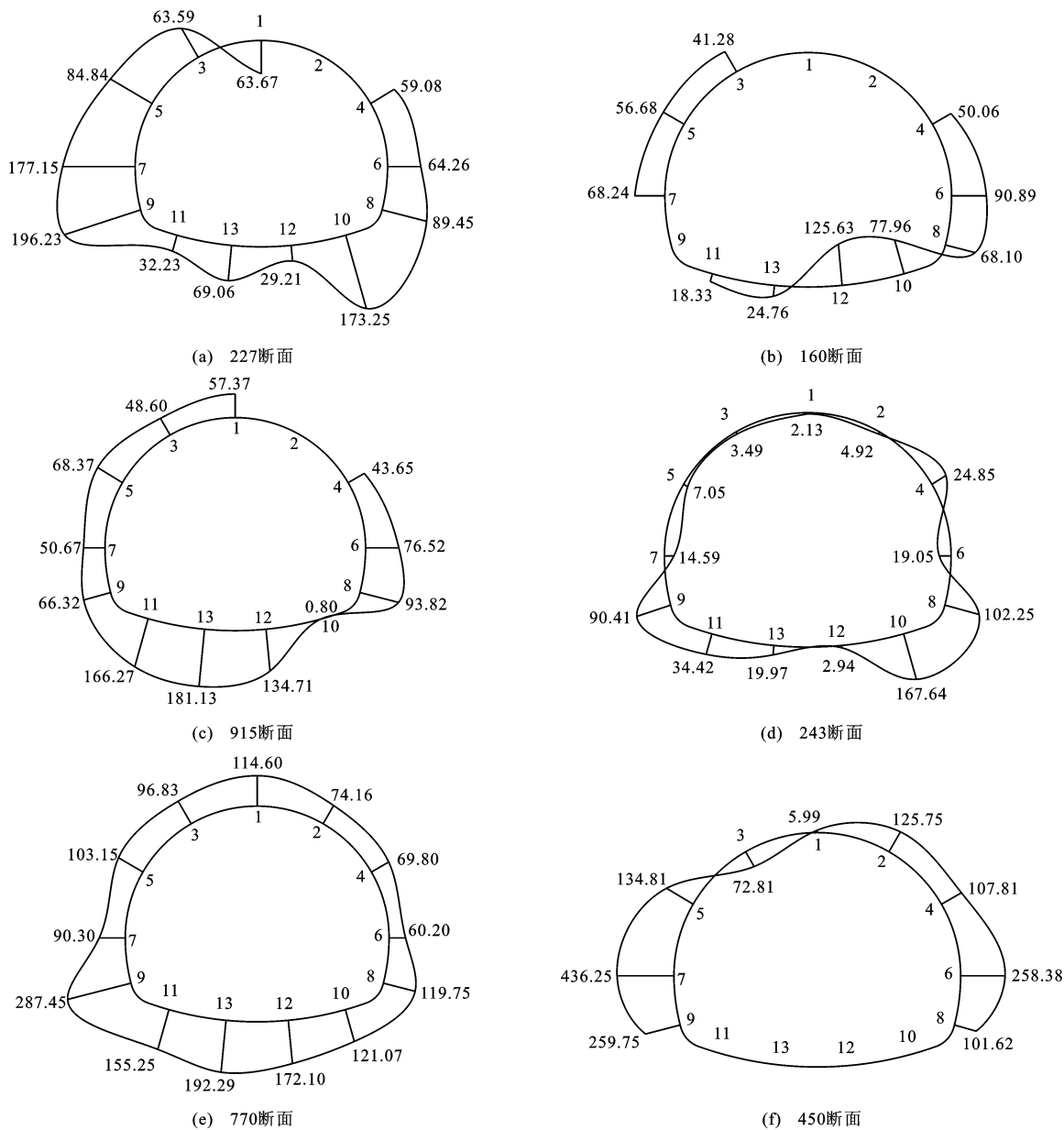


图 9 二衬与仰拱混凝土应变分布

Fig. 9 Strain distributions in secondary liner and inverted arch

变比右侧应变大,这与压力盒所测数据基本一致。整体来看,这 2 个断面不同位置处混凝土的应变差别较大,其中 227 断面的拱顶处和 160 断面的仰拱右侧为压应变,其余部分为拉应变。深埋段 915、243 断面二衬应变都比较小,并且不同位置应变的差别相对较小,说明该断面处结构变形稳定较快,其中 915 断面的最大应变为 181.13×10^{-6} ,位于仰拱中心偏左处,作用在仰拱底部的土层,承担了较大的荷载。浅埋段断面(770、450)二衬应变最大值出现在拱脚和拱顶附近,尤其是 450 断面的拱脚处,混凝土应变最大值为 436.25×10^{-6} 。在二衬施作后,拱脚和拱顶处初支的残余变形较大,导致这 2 个位置

处的二衬应变值较大,这也说明对于不同的围岩,其侧压力系数存在着差异性,不能一概而论。

5.2 时间分布规律

图 10 为二衬混凝土应变随时间的变化情况,数字 1~9 为测点编号。杂填土段 227 与 160 断面在初测阶段除左拱腰外,其他测点处均为压应变,应变先增大后逐渐减小并演变成拉应变,而拱顶处则一直为压应变,并且随时间不断增大;深埋断面各个测点处的应变普遍都比较小,除 243 断面的拱脚测点,多数都在 $(-40 \sim 40) \times 10^{-6}$ 范围内,说明了隧道结构变形稳定的时间较快;浅埋段 770 与 450 断面各个测点应变值随时间增长规律比较接近,开始不断

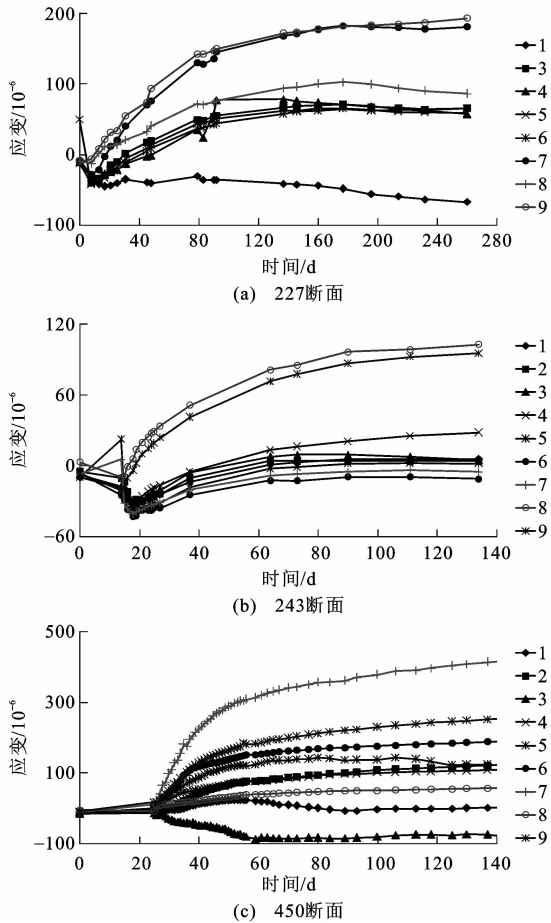


图10 二衬混凝土应变-时间曲线

Fig. 10 Strain-time curves of secondary liner concrete

增大,随后在监测 60 d 左右基本稳定。图 11 为仰拱混凝土应变随时间的变化情况,数字 10~13 为测点编号。仰拱测点以拉应变为主,应变值在监测 10~20 d 急剧增大。随后逐渐趋于稳定,但稳定后仍有微小的波动,这是由于施工中行车等因素造成的。

整体来看,二衬混凝土在初测阶段均为压应变并不断增大,到达峰值之后逐渐减小,之后变成拉应变,并逐渐增大,最后趋于稳定,这个规律在 227 与 243 断面更为明显。

6 结 语

(1)在浅埋杂填土段,拱顶和拱肩位置处的围岩压力较大且波动大,基本呈现出由拱顶至边墙逐渐减小的规律;在深埋段,围岩压力最大值出现在拱顶和左拱肩处,分别为 1 049、791 kPa;在浅埋段,边墙围岩压力较大,约为 1 050 kPa,而仰拱受力较小,为使仰拱得到充分利用,在施工阶段应及时闭合成环。

(2)围岩压力在 2 个月后基本趋于稳定,其中深埋断面稳定所需的时间最短,浅埋断面次之,杂填土断面时间最长。

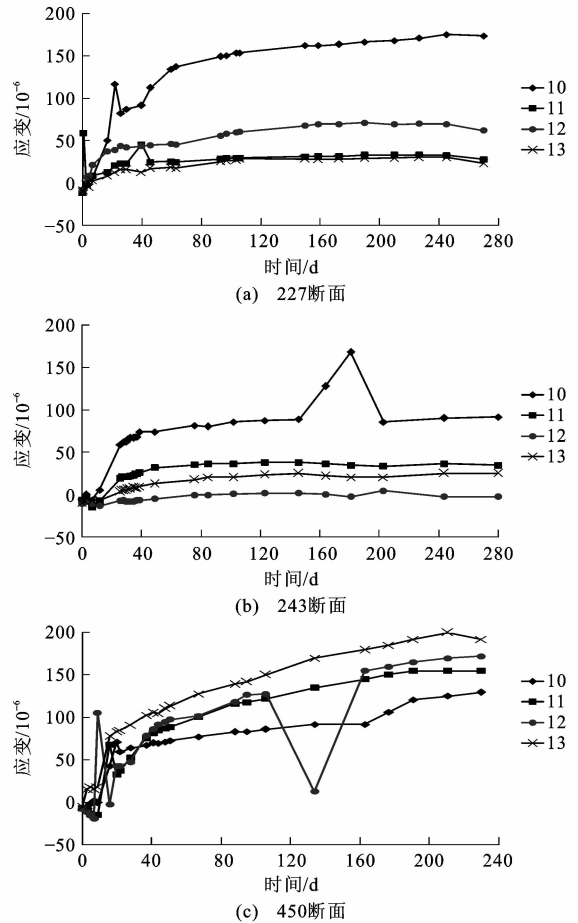


图11 仰拱混凝土应变-时间曲线

Fig. 11 Strain-time curves of inverted arch concrete

(3)拱顶、拱肩处的压力值较大,是黄土隧道最危险的部位,容易发生坍塌,设计和施工过程中应注意超前支护参数的选取。

(4)围岩压力计算值与实测值差距较大,仅深埋段断面的实测结果与普氏理论的计算结果相吻合,说明现有方法在计算黄土断面围岩压力时存在较大的误差,本文实测值可为相似地域工程提供一定参考。

(5)软弱黄土隧道设计施工时,在“新奥法”原理指导下,可进一步遵循“强初支,弱二衬”的设计理念,充分发挥初支对围岩变形的抑制作用,一定程度上既达到了传统黄土隧道两层衬砌设计的支护效果,又可降低二衬的施作力度,使二衬作为安全储备。

参 考 文 献 :

References :

[1] 韩桂武,刘 斌,范 鹤.浅埋黄土隧道衬砌结构受力分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增1):3250-3256.
HAN Gui-wu, LIU Bin, FAN He. Mechanical characteristics of tunnel lining structure in shallow-buried loess area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3250-3256. (in Chinese)

- [2] 李鹏飞,张顶立,赵勇,等.大断面黄土隧道二次衬砌受力特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1690-1696.
LI Peng-fei, ZHANG Ding-li, ZHAO Yong, et al. Study of mechanical characteristics of secondary lining of large-section loess tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1690-1696. (in Chinese)
- [3] KRUSE G A M, DIJKSTRA T A, SCHOKKING F. Effects of soil structure on soil behaviour: illustrated with loess, glacially loaded clay and simulated flaser bedding examples[J]. Engineering Geology, 2007, 91(1): 34-45.
- [4] LI Rong-jian, LIU Jun-ding, YAN Rui, et al. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3): 319-330.
- [5] DUSAN B, ZORAN B, ĆEBAŠEK V, et al. Characterisation of collapsing loess by seismic dilatometer[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 180-189.
- [6] 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)
- [7] 来弘鹏,谢永利,杨晓华.黄土公路隧道衬砌受力特性测试[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):53-56.
LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Mechanical characteristic of highway tunnel in loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 53-56. (in Chinese)
- [8] 陈建勋,姜久纯,罗彦斌,等.黄土隧道洞口段支护结构的力学特性分析[J].中国公路学报,2008,21(5):75-80.
CHEN Jian-xun, JIANG Jiu-chun, LUO Yan-bin, et al. Mechanics characteristic analysis of support structure of loess tunnel entrance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 75-80. (in Chinese)
- [9] 杨建民,喻渝,谭忠盛,等.大断面深埋黄土隧道围岩压力试验研究[J].铁道工程学报,2009,2:76-79.
YANG Jian-min, YU Yu, TAN Zhong-sheng, et al. Experimental research on the surrounding rock pressure of large sectional loess tunnel under deep and shallow submersion[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 2: 76-79. (in Chinese)
- [10] 李鹏飞,赵勇,张顶立,等.基于现场实测数据统计的隧道围岩压力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1392-1399.
LI Peng-Fei, ZHAO Yong, ZHANG Ding-li, et al. Study of distribution laws of tunnel surrounding rock pressure based on field measured data statistics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1392-1399. (in Chinese)
- [11] 马士伟,韩学诠,廖凯.浅埋大断面黄土隧道防塌方实时监测预警[J].现代隧道技术,2014,51(2):11-15,22.
MA Shi-wei, HAN Xue-quan, LIAO Kai. Real-time monitoring and early alarms for collapse prevention in a shallow loess tunnel with a large section[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 11-15, 22. (in Chinese)
- [12] 黄运章,刘春龙,张群,等.某黄土隧道塌方处理措施及原因分析[J].土工基础,2012,26(6):30-33.
HUANG Yun-zhang, LIU Chun-long, ZHANG Qun, et al. Analyses and mitigations of a tunnel collapse in loess[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(6): 30-33. (in Chinese)
- [13] 李焯,许崇帮.大西山隧道围岩长期变形分析[J].公路交通科技,2013,30(12):120-124.
LI Ye, XU Chong-bang. Analysis of long-term deformation of tunnel surrounding rock of Dayoushan Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(12): 120-124. (in Chinese)
- [14] LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun. Calculation method of horizontal surrounding rock pressure for tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 10-17.
- [15] 赖金星,杨晓华.丹(东)拉(萨)国道主干线西宁过境公路大有山隧道监控量测报告总结[R].西安:长安大学,2010.
LAI Jin-xing, YANG Xiao-hua. Monitoring and measuring report of Dayoushan Tunnel[R]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [16] FENG Shi-jin, DU Feng-lei, SHI Zhen-ming, et al. Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction[J]. Engineering Geology, 2015, 185(1): 105-115.
- [17] 谢家杰.浅埋隧道的地层压力[J].土木工程学报,1964,10(6):58-70.
XIE Jia-jie. Stratum pressure of shallow tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1964, 10(6): 58-70. (in Chinese)
- [18] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [19] 赵占厂.黄土公路隧道结构工程性状研究[D].西安:长安大学,2004.
ZHAO Zhan-chang. Study on engineering properties of highway tunnel in loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [20] 来弘鹏,谢永利,刘苗,等.黄土地区浅埋暗挖地铁隧道衬砌受力分析[J].岩土工程学报,2011,33(8):1167-1172.
LAI Hong-peng, XIE Yong-li, LIU Miao, et al. Mechanical characteristics for linings of shallow excavation metro tunnel in loess region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1167-1172. (in Chinese)