

文章编号:1009-3087(2013)04-0039-07

基于双洞效应的黄土公路隧道地层变形规律离心模型试验

来弘鹏,杨万精,谢永利

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:鉴于目前黄土公路隧道修筑面临的一些特有问題,为了更全面地了解双洞效应影响下黄土公路隧道地层变形规律,运用离心模型试验设备,系统开展了4组基于先加载后开洞思路的模型试验,研究了双洞不同净距对黄土公路隧道地层变形的影响。试验结果表明:随着双洞净距的增大,双洞间的相互影响程度减弱,靠近拱顶处的地层变形曲线由单峰值的V形逐步变为双峰值的W形;存在压力拱效应且压力拱的形成高度随双洞净距的增大而增大;先行洞室各层沉降范围及沉降值均略大于后行洞室,且随双洞净距的增大,先行洞室对后行洞室的影响程度逐渐减弱;选用0.5D间距形式,易在隧道间形成应力与变形强影响区,需对中间土体进行加固,选用D及以上间距形式,隧道间可以形成自稳的宽底承载土柱体,故小净距黄土公路隧道双洞间合理净距可选取为D。

关键词:黄土隧道;双洞效应;地层变形;模型试验

中图分类号:U455

文献标志码:A

Centrifuge Model Test on Stratum Deformation Rule of Loess Road Tunnel Based on Double-hole Effect

LAI Hong-peng, YANG Wan-jing, XIE Yong-li

(Key Lab. for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an Univ., Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to understand the stratum deformation rule of loess road tunnel under the influence of double-hole effect more comprehensively, four groups of model tests were carried out systematically with the centrifuge model test device, based on the thinking of first loading and then punching, and the influence of different double-hole clear distances on the stratum deformation of the loess road tunnel was researched. The test results showed that with the increase of double-hole spacing, the degree of the mutual influence between two holes will recede, and the stratum deformation curve close to the vault changes from single peak "V" shape to double peak "W" shape gradually. There exists the pressure arch effect, and the formation height of the pressure arch increase with the increase of double-hole clear distance. The sedimentation range and the sedimentation value of each layer of the anterior hole are larger than those of the subsequent hole, and the influence degree of the anterior hole on the subsequent tunnel will recede gradually with the increase of double-hole spacing. Selecting 0.5D spacing form, the stress and deformation influence area between holes forms easily, so it's necessary to reinforce the middle soil; selecting D spacing form and above, the steady wide-base bearing soil column between holes can form, so the reasonable spacing between two holes of closely spacing loess road tunnel can be D.

Key words: loess tunnel; double-hole effect; stratum deformation; model test

近年来,随着国家基础设施建设力度的进一步加大,西部大开发的不断深入以及路网的逐渐完善,高等级公路建设快速进入经济欠发达的西部省区,穿越黄土地区的高速公路隧道也越来越多,先后在

甘肃、陕西、山西、河南等省份修建了大量黄土公路隧道^[1-2]。伴随着黄土地区公路隧道的修筑,为了确保工程质量、降低工程造价、减少运营病害、提高服务水平、延长使用寿命,在交通部的指导下,各地交通部门和相关科研单位已针对黄土公路隧道的独特性进行了多年的研究,取得了一批科研成果。陈建勋等^[3]依托国道主干线GZ35青岛至银川高速公路陕西境内吴堡至子洲沿线上7座单洞两车道分离式黄土隧道,现场测试了隧道施工变形,并对测试结果进行了回归分析,结果表明:台阶法施工过程中黄土隧道拱部沉降远大于净空收敛;黄土隧道变形大

收稿日期:2013-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008029);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2012ZD019);长安大学基础研究支持计划专项基金资助项目;国家留学基金资助项目

作者简介:来弘鹏(1979-),男,副教授,博士。研究方向:岩土与隧道工程。E-mail: lai hp168@ chd. edu. cn

致经历了急剧变形阶段(开挖初期)、持续增长阶段与缓慢增长阶段;黄土隧道的变形规律符合对数函数规律,由于对数函数具有发散性,故无法由此预估围岩的最终位移,围岩变形将长期处于缓慢增长状态。张新善等^[4]以西安地铁一号线工程为背景,基于黄土力学参数,进行了黄土地层地下隧道开挖对周围土体变形影响的计算机模拟分析,研究了黄土隧道开挖过程中前期支护条件、后期加固措施等因素对隧道内部地表、拱顶、侧墙以及地上建筑物沉降的影响程度和塑性区、位移的分布规律。乔春生等^[5]对饱水状态下黄土隧道的变形规律进行了研究,得出开挖后的前3 d内,隧道变形发展较快,之后变形速度虽然逐渐减小,但收敛很慢。赵东平等^[6]对大断面黄土隧道变形规律及预留变形量进行了研究,得出隧道拱顶、拱脚下沉差异小,隧道开挖后拱部将产生一定程度的整体下沉,隧道拱顶下沉量均大于水平收敛,初期支护封闭后,隧道周边位移基本上不再发展,当隧道埋深小于40 m时,隧道变形量较大且规律不明显,当隧道埋深大于40 m时,隧道变形量分布相对集中。Rogers等^[7]对黄土沉降的不同因素,采用简单的蒙特卡罗方法,建立了相应的结构模型。这些成果为黄土地区修筑公路隧道提供了有力的技术支持。然而,在总结这些成果的过程中,学术界和工程界发现一些深层次技术问题尚需要不断探索与解决。其中,通过作者近几年对大量在建黄土公路隧道地层变形观察发现,埋深较浅分离式隧道在施工过程中随着掌子面的向前掘进,地表会在左线左边墙外侧与右线右边墙外侧出现两条沿隧道走向的纵向裂缝^[8]。这一现象在表明黄土隧道施工过程中地层在两隧道跨度范围内出现了整体下沉,围岩压力取值应取整体下沉土重的同时,也让科技和工程技术人员思考一个问题,即既然分离式隧道未起到分离的目的,还增加了隧道的围岩压力,那可否考虑采用小净距隧道?小净距隧道的合理净距是多少?而要解决这些问题,必须先得清楚基于双洞效应的黄土公路隧道地层变形规律。离心模型试验可以再现自重应力场以及与自重有关的变形过程,在岩土与隧道工程的相关研究中得到了较广泛的应用^[9-10]。例如,周小文等^[11]利用橡皮囊充气再放气的办法进行了多组南水北调引黄盾构隧道的离心模型试验,研究了隧洞内支护压力与地层位移的关系,施工间隙的影响,以及砂层稳定与破坏的机理。马亮等^[12]用融化石蜡的方法在离心机上模拟了矿山法隧道的开挖,对应力场和渗

流场耦合下的地表沉降进行了研究。作者运用TLJ-3型离心设备,基于先加载后开洞的思路,开展了4组离心模型试验,研究不同净距黄土公路隧道地层变形规律,以期今后类似工程的设计与施工提供理论依据。

1 模型试验设备和测量技术

1.1 离心试验设备

试验采用长安大学TLJ-3离心试验系统,离心机最大容量为 $60\text{ g}\cdot\text{t}$,有效半径1.5 m。模型箱内尺寸为 $700\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 360\text{ mm}$,一侧为透明的有机厚玻璃板,便于在试验过程中观察模型土体的变形。试验拖动装置见图1。



图1 TLJ-3型离心模型试验系统

Fig.1 TLJ-3 type centrifuge model test system

1.2 试验量测系统

试验前将穿有色彩鲜明胶带的大头针按照 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的间距依次插入试验模型有机玻璃侧面,试验过程中用数码相机定点定时拍摄运动模型箱内模型变化,试验结束后,运用GetData软件导入拍摄照片,为了尽可能地缩小偶然误差对试验结论的影响,将试验模型数据扩大100倍后定出基准坐标轴,根据各层土体插入的大头针沉降位移与基准线的差值来反映该层土体各测点的变位情况,试验后土体发生变形见图2。

2 试验模型和试验过程

2.1 试验模型

根据模型箱尺寸确定试验模型比例尺为1:100。隧道模型采用实心木质模型,断面尺寸为《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)标准两车道断面,木模型外轮廓尺寸为宽12 cm,高9.5 cm,厚6 cm,拱顶上方填土厚度为30 cm,木模型实物图见图3。需要说明的是实际隧道衬砌结构与实木模型隧道力学性质是存在一定差异,由于重点研究目前黄

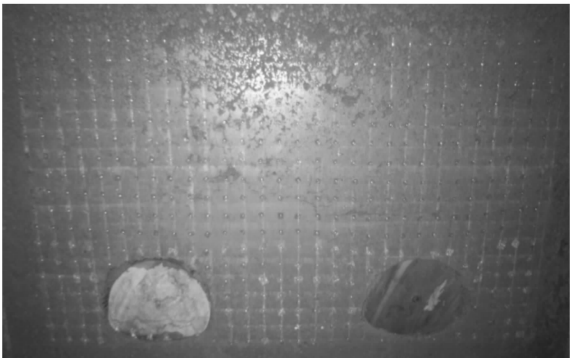


图2 试验后土体变形

Fig.2 Soil deformation after test

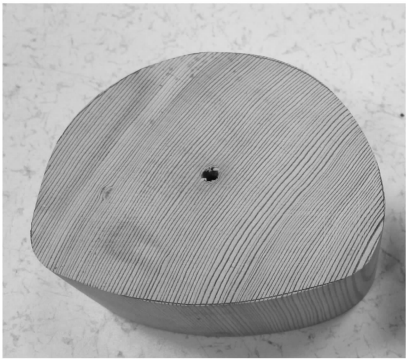


图3 木模型

Fig.3 Wooden model

土公路隧道开挖洞周产生一定变形量后,地层土体的变性规律,所以衬砌结构部分仅做了近似模拟。

各组试验均为右侧隧道掌子面超前左侧隧道1倍洞径。试验模型填土取用最大粒径不超过2 mm的黏质黄土,其物理力学指标如下:含水量19%,击实密度 1.94 g/cm^3 ,黏聚力34 kPa,内摩擦角 31° 。进行了双洞净距分别为0.5D、1D、1.5D、2D共4种工况离心模型试验(D为隧道洞径)。

2.2 试验过程

首先,将制备好的试验用土按每次填土高度不超过5 cm分层填入试验模型箱内并夯实,考虑边界效应并结合模型箱的高度,当填土高度达到15 cm时,开挖出2个用于放隧道模型的凹槽,将隧道木模型上紧密包裹一层2 mm厚的橡胶水管放置在凹槽内,其中,左侧放3组木模型,右侧放5组木模型,以模拟右侧隧道掌子面超前左侧隧道1倍洞径(12 cm),操作过程见图4。填土高度满足要求后,打开试验模型箱侧盖,用直径为3 mm长度适宜的硬铁丝沿隧道木模型周边紧密插入,使得隧道外层被铁丝紧密包围。

然后,将制作好的试验模型放入离心机室逐级施加离心力场到100g,待土体变形稳定约2 h后停机,使隧道模型洞周土体固结,实现初始应力场的还原。



图4 模型安装俯视图

Fig.4 Vertical view for model installation

接着,施加重力场结束后,打开模型箱侧盖挨个拔出隧道模型周边铁丝,取出隧道模型并将塑料水管去掉使得隧道开挖成型,用刮土刀适当修整隧道轮廓让其平顺光滑,再将取出的木模型一一放入开挖洞室内,这样不仅可近似在试验过程中模拟隧道施工过程因开挖地层损失造成的土体变形,而且可使隧道在完成开挖预留5 mm变形后(预留变形量是依据作者对大量在建黄土隧道施工监控量测成果总结的基础上指定的),即被木模型抑制了其继续变形,相当于近似模拟了2次衬砌的施做。隧道开挖完成见图5,2次加载前模型侧面见图6。



图5 隧道开挖完成

Fig.5 Completion of tunnel excavation

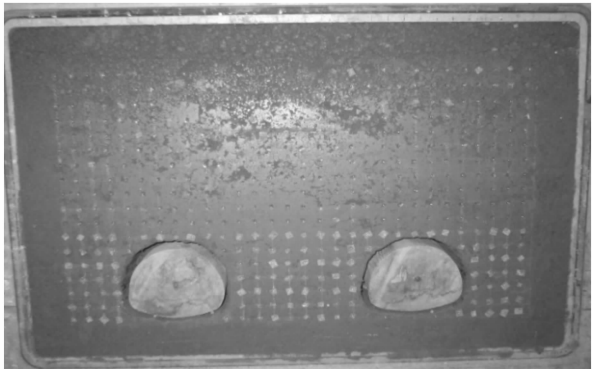


图6 2次加载前模型侧面

Fig.6 Model profile before the second loading

最后,将穿有色彩鲜明胶带的大头针按照 2 cm × 2 cm 的间距依次插入试验模型有机玻璃侧面,将模型箱再次放入离心机室,开始试验量测工作。

3 试验结果分析

在离心加速度为 100g 情况下,根据 4 种净距工况地层位移场变化,选取隧道拱顶上方 2、6、10、16、18、20 cm 6 个分析层面绘制沉降曲线,通过各层土体在不同净距下表现出的变形特征总结地层变形规律。为方便描述,将隧道模型横断面几个关键位置用符号给出,LL0.5D 为左隧道左侧,LM 为左隧道中线,MM 为两隧道整体中线,RR0.5D 为右隧道右侧,后文出现相同符号含义相同。

3.1 不同双洞间距试验结果分析

4 种试验工况各分析层面变形沉降曲线分别见图 7 ~ 10。

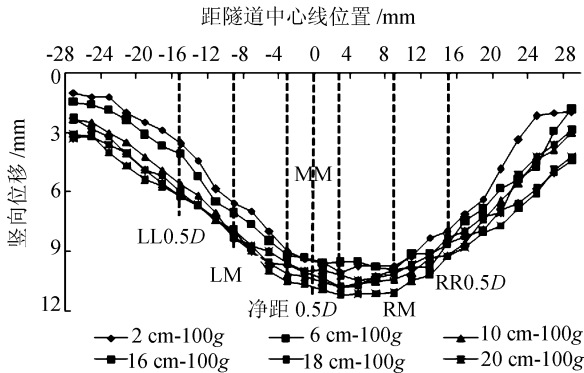


图 7 净距 0.5D 地层沉降曲线

Fig. 7 Stratum sedimentation curve of spacing 0.5D

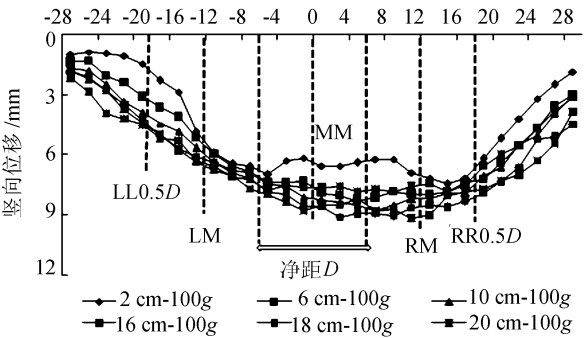


图 8 净距 1.0D 地层沉降曲线

Fig. 8 Stratum sedimentation curve of spacing D

由图 7 可以看出:双洞净距为 0.5D,各层沉降曲线变化规律趋势相同,呈现出偏向右侧的单峰值深 V 形不对称曲线。各层沉降值自 LL0.5D 处开始急剧增大,在 MM 偏右侧出现沉降峰值后逐渐减小,沉降影响范围主要是在 LL0.5D 与 RR0.5D 之间,

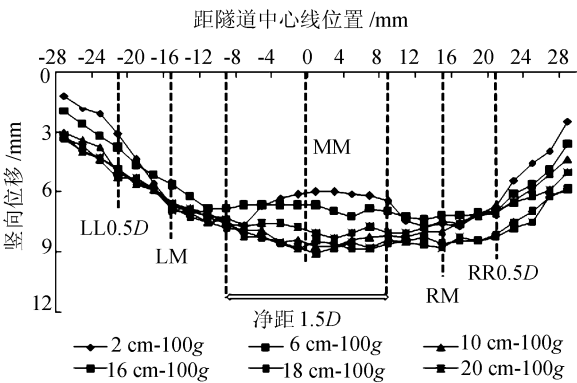


图 9 净距 1.5D 地层沉降曲线

Fig. 9 Stratum sedimentation curve of spacing 1.5D

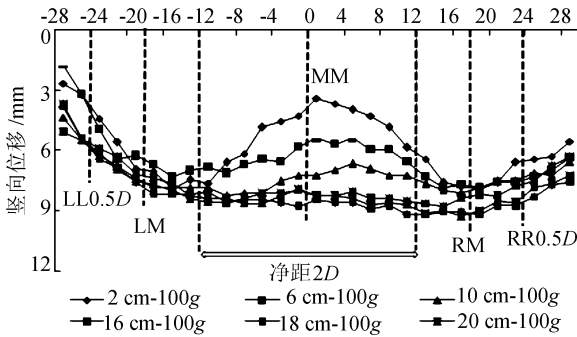


图 10 净距 2D 地层沉降曲线

Fig. 10 Stratum sedimentation curve of spacing 2D

尤其是双洞间的土体沉降最为明显,这是因为 2 洞间距较小,双洞开挖产生了极大的相互影响,致使该部分土体产生了明显的应力与变形集中,处于极为不利的受力状态,若设计选用这种间距型式,将必须对这部分土体进行加固。从各层土体的沉降来看,自隧道拱顶向上地层沉降值逐渐增大,埋深为 16 cm 的地层达到最大值,16 cm 以上地层又开始逐渐减小,这是因为当埋深超过一定厚度后,由于土体的不均匀沉降形成了地层承载拱效应,承载拱上方土体的沉降值因此而减小。

由图 8 可得:双洞净距在 1D 时,埋深为 2 cm 的地层变形曲线为双峰值 W 形,超过 2 cm 以上地层沉降变化规律一致,两隧道间土体沉降值基本相同,近似为 V 形,出现局部等沉面。表明当双洞间距增加到 1 倍洞径时,彼此开挖的相互影响明显减弱,在 2 洞之间可形成 1 个宽底承载土柱体,这有利于施工安全。从各层土体的沉降来看,埋深为 16、18 cm 2 个地层沉降值基本相同,最大值出现在这 2 个地层之间,说明隧道拱效应在 16、18 cm 之间的地层发挥其作用,埋深超过 18 cm 后地层沉降值又有所减小。

由图 9 可见:双洞净距为 1.5D,埋深为 2 cm 的

地层变形曲线为双峰值 W 型,较 1D 有所不同的是,中间土体沉降值不等,随距 MM 的距离增大而增大。埋深超过 6 cm 的地层沉降变形规律基本相同,沉降值自 LM0.5D 左侧一直增大至 MM 偏右侧出现峰值后开始减小。从各层土体沉降值来看,在双洞净距为 1.5D 时,自下而上沉降值依然呈先增大后减小趋势,沉降最大值出现在埋深为 18 cm 的地层,说明隧道拱效应在埋深为 18 cm 的地层发挥其作用。

由图 10 可以看出:双洞净距为 2D,各土层沉降变形曲线都为双峰值的 W 型,各层沉降最大值均出现在隧道拱顶上方。有所不同的是,埋深未超过 10 cm 时,隧道间土体的沉降值远小于隧道拱顶上方的沉降值,中间土体受双洞开挖影响较小。埋深超过 10 cm 后,拱顶上方土体与隧道中间土体沉降差减小,受双洞开挖影响增大。从整体来看,在双洞净距为 2D 时,沉降值自下而上逐渐增大,最大值出现在埋深为 20 cm 的土层。

综合分析图 7~10 可得:双洞效应影响下的黄土公路隧道在修建时围岩处在一个极为复杂的受力状态,先行隧道的开挖扰动了原有的围岩应力平衡使得围岩发生应力重分布,从而导致了一系列的力学行为变化。从各净距不同地层沉降曲线反馈的信息来看,各净距工况下不同填土高度范围的土体变形特征差异性较大,净距为 0.5D 时,因净距较小在双洞中间产生强影响区,使得各层沉降值均较大都表现为 V 型;净距为 D 时,距拱顶 2 cm 以下地层变形曲线为 W 型;净距为 1.5D 时,距拱顶 6 cm 以下地层变形曲线为 W 型;净距为 2D 时,距拱顶 10 cm 以下地层变形曲线为 W 型。由于右侧隧道掌子面超前左侧隧道 1 倍洞径,致使地层变形曲线对于 2 隧道所处的位置来讲是不对称曲线,沉降曲线的对称轴向右侧发生偏移,右侧隧道引起的沉降范围以及各层沉降值均略大于左侧隧道。随着双洞净距的增大,各地层沉降最大值出现的地层距拱顶距离增大,分别出现在 16~20 cm 地层之间,表明土体不均匀沉降形成承载拱高度随双洞净距的增大而增大。

3.2 不同地层试验结果分析

距隧道拱顶上方 2、6、10、16、18、20 cm 地层,不同净距沉降曲线分别见图 11~16。

由图 11 可见:随着双洞净距的增大,距隧道拱顶上方 2 cm 地层沉降曲线变化形态依次为深 V 形、“宽底盆”形、中间土柱矮平的 W 形、中间土柱高陡的 W 形。2 隧道间土体沉降最大值为 0.5D 工况,最小为 2D 工况,表明隧道间土体的沉降值随双洞

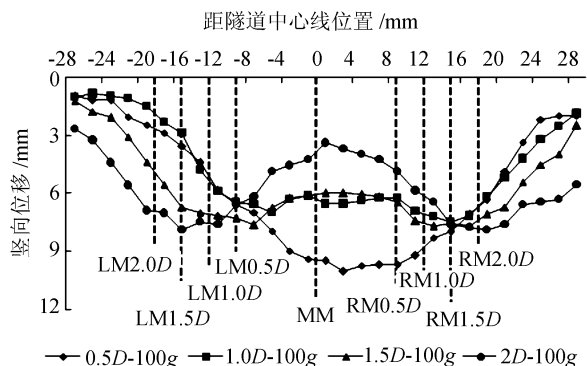


图 11 距隧道拱顶上方 2 cm 地层沉降曲线

Fig. 1 Stratum sedimentation curve 2 cm away from the tunnel vault

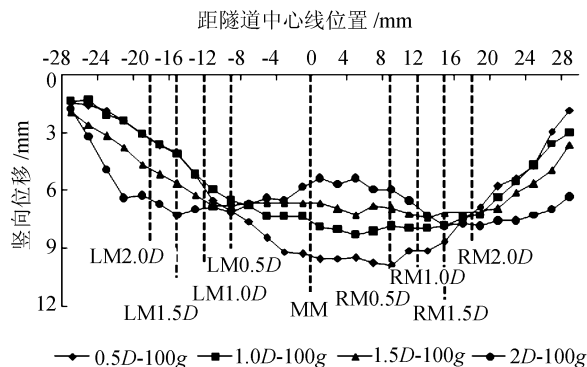


图 12 距隧道拱顶上方 6 cm 地层沉降曲线

Fig. 12 Stratum sedimentation curve 6 cm away from the tunnel vault

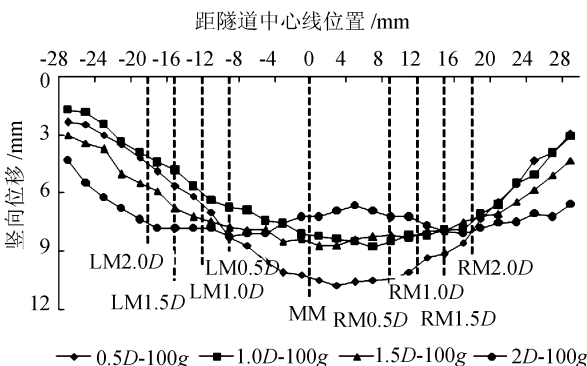


图 13 距隧道拱顶上方 10 cm 地层沉降曲线

Fig. 13 Stratum sedimentation curve 10 cm away from the tunnel vault

净距的增大而减小,中间土柱体的稳定性随双洞间距的增大而增强。另外,该地层沉降曲线的对称轴随双洞间距的增大逐渐由 MM 偏右侧转至 MM 上,表明随双洞间距的增大,先行洞室对后行洞室的影响程度减弱。

由图 12 可以看出:距隧道拱顶上方 6 cm 地层,各工况沉降曲线差异较 2 cm 地层有所减弱,除 2D 工况表现为中间土柱矮平的 W 形外,1D、1.5D 均变

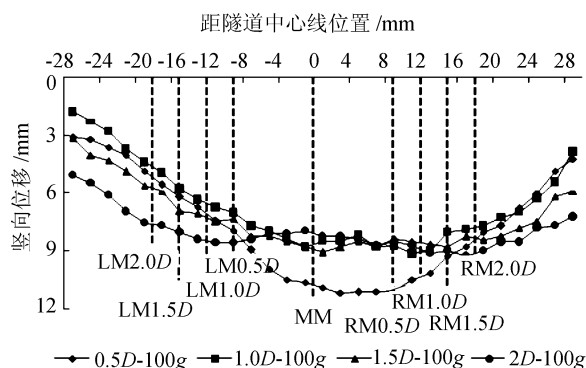


图 14 距隧道拱顶上方 16 cm 地层沉降曲线

Fig. 14 Stratum sedimentation curve 16 cm away from the tunnel vault

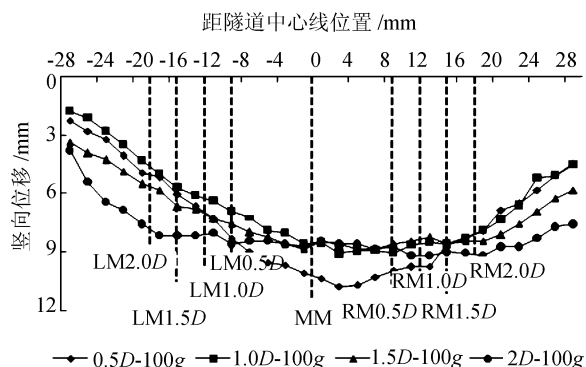


图 15 距隧道拱顶上方 18 cm 地层沉降曲线

Fig. 15 Stratum sedimentation curve 18 cm away from the tunnel vault

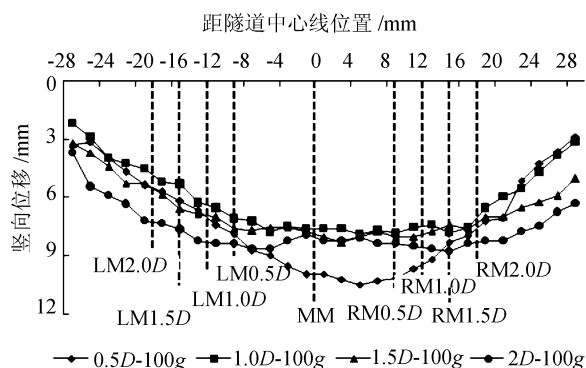


图 16 距隧道拱顶上方 20 cm 地层沉降曲线

Fig. 16 Stratum sedimentation curve 20 cm away from the tunnel vault

为“宽底盆”形。

由图 13 可得:距隧道拱顶上方 10 cm 地层,除 2D 工况表现为中间土柱略显 W 形外,1D、1.5D 均变为“宽底盆”形。

由图 14~16 可以看出:各工况沉降曲线均变为单峰值曲线,即在距隧道拱顶上方 16 cm 地层及以上,地层呈现出整体下沉趋势。

综合图 11~16 可得:随着地层距拱顶距离的增

加,双洞净距对中间土体变形的影响程度不断减弱;地层沉降曲线形态由距隧道拱顶上方 2 cm 地层的深 V 形、“宽底盆”形、中间土柱矮平的 W 形、中间土柱高陡的 W 形 4 种形式逐渐变为几乎相近的“宽底盆”形。随双洞净距的增大,先行洞室对后行洞室的影响程度逐渐减弱,各地层沉降曲线的对称轴逐渐由 MM 偏右侧转至 MM 上。

4 结 语

1) 各净距工况下距拱顶不同高度地层变形特征差异较大,净距为 0.5D 时,因净距较小在双洞中间产生强影响区,使得各层沉降值均较大都表现为 V 型;净距为 D 时,距拱顶 2 cm 以下地层变形曲线为 W 型;净距为 1.5D 时,距拱顶 6 cm 以下地层变形曲线为 W 型;净距为 2D 时,距拱顶 10 cm 以下地层变形曲线为 W 型;其余地层变形曲线为“宽底盆”形。

2) 随着双洞净距的增大,各工况沉降最大值出现的地层距拱顶距离增大,分别出现在 16~20 cm 地层之间,表明土体不均匀沉降形成承载拱高度随双洞净距的增大而增大。

3) 由于右侧隧道掌子面超前左侧隧道 1 倍洞径,致使地层变形曲线对于 2 隧道所处的位置来讲是不对称曲线,沉降曲线的对称轴向右侧发生偏移,右侧隧道引起的沉降范围以及各层沉降值均略大于左侧隧道;且随双洞净距的增大,先行洞室对后行洞室的影响程度逐渐减弱。

4) 选用 0.5D 间距形式,易在隧道间形成应力与变形强影响区,需对中间土体进行加固,选用 D 及以上间距形式,隧道间可以形成自稳的宽底承载土柱体,对于小净距黄土公路隧道而言,隧道双洞间合理净距可选取为 D。

参考文献:

- [1] JTJ D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004.
- [2] Wang Mengshu. Suggestion on China tunneling construction facing the 21st China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(1): 2-4. [王梦恕. 对 21 世纪我国隧道工程建设的建议[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(1): 2-4.]
- [3] Chen Jianxun, Wang Mengshu, Xuan Junjie, et al. Deformation rule of loess highway tunnel with two lanes[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 9-18. [陈建勋, 王梦恕, 轩俊杰, 等. 两车道公路黄土隧道

- 变形规律[J]. 交通运输工程学报,2012,12(3):9-18.]
- [4] Zhang Xinshan, Liao Hongjian, Zhang Li. Analysis on influence of tunnel excavation on deformation of surrounding soil in loess strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4333-4338. [张新善, 廖红建, 张立. 黄土地下隧道开挖对周围土体变形的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4333-4338.]
- [5] Qiao Chunsheng, Guan Zhenxiang, Teng Wenyan. A study on deformation of tunnel excavated in saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S): 225-230. [乔春生, 管振祥, 滕彦彦. 饱水黄土隧道变形规律研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 225-230.]
- [6] Zhao Dongping, Yu Yu, Wang Mingnian, et al. Study on the deformation regularity and preset deformations for large section tunnels in loess[J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46(6): 64-69. [赵东平, 喻渝, 王明年, 等. 大断面黄土隧道变形规律及预留变形量研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 64-69.]
- [7] Rogers C D F, Dijkstra T, Smalley I J. Hydrocon-solidation and subsidence of loess; Studies from China, Russia, North America and Europe in memory of Jan Sajgalik[J]. Engineering Geology, 1994, 37(2): 83-113.
- [8] Chang'an University. Research on construct technique of tunnel in loess[R]. Xi'an: Chang'an University, 2005. [长安大学. 黄土地区隧道的修筑技术研究报告[R]. 西安: 长安大学, 2005.]
- [9] Lai Hongpeng, Lin Yonggui, Xie Yongli, et al. Model tests for soft-wreak surrounding rocks highway tunnel stress characteristics of different stress field[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 81-87. [来弘鹏, 林永贵, 谢永利, 等. 不同应力场下软弱围岩公路隧道的力学特征试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 81-87.]
- [10] Zhou Xiaowen, Pu Jialiu. Centrifuge model test study of the earth pressure and deformation of tunnel lining[J]. Journal Tsinghua University: Science & Technology, 2001, 41(8): 110-112. [周小文, 濮家骝. 隧洞结构受力及变形特征的离心模型试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(8): 110-112.]
- [11] Zhou Xiaowen, Pu Jialiu, Bao Chenggang. A study of the movement and failure characteristics of san mass above the crown of a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 32-36. [周小文, 濮家骝, 包承钢. 隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 32-36.]
- [12] Ma liang, Gao bo. Centrifugal model test of ground surface sedimentation control in construction of tunnels[J]. Construction Technology, 2005, 34(6): 6-8. [马亮, 高波. 隧道施工地表沉降控制的离心模型试验[J]. 施工技术, 2005, 34(6): 6-8.]

(编辑 陈晓红)