

文章编号:1671-1637(2012)03-0009-10

两车道公路黄土隧道变形规律

陈建勋¹, 王梦恕², 轩俊杰³, 乔 雄^{1,4}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030; 4. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: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。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; 按照规范规定的最终速率值预估二次衬砌施作时机不符合工程实际要求, 不能保证隧道围岩和支护结构的稳定和施工安全, 因此, 在黄土隧道的施工中, 需要以控制拱部的沉降来控制隧道的变形。施工中必须秉承“快挖、快支、快封闭”的原则, 采取加强初期支护, 增设锁脚锚杆, 仰拱和二次衬砌边墙基础紧跟, 二次衬砌适时施作的措施, 避免拱部围岩发生过大的沉降, 确保隧道结构稳定。

关键词:隧道工程; 黄土隧道; 变形规律; 监控量测; 回归分析

中图分类号:U451.2 **文献标志码:**A

Deformation rule of loess highway tunnel with two lanes

CHEN Jian-xun¹, WANG Meng-shu², XUAN Jun-jie³, QIAO Xiong^{1,4}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Civil Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, Gansu, China; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Relying on seven single-tunnel double-lane loess tunnels at Wubu to Zizhou section in Shaanxi Province on national main trunk line GZ35 from Qingdao to Yinchuan, the constructing deformations were measured by in-situ test method, and the regression analysis of test results was carried out. Analysis result shows that in the constructing process by using bench method, the arch settlements are far bigger than the clearance convergences. The tunnel deformation of surrounding rock experiences three stages: rapid deformation stage at the initial stage of excavation, sustainable growth stage and slow increasing stage. The deformation rule of loess tunnel accords with logarithmic distribution, but the logarithmic function is divergent, so the final displacement is not predicted. The deformation of surrounding rock is slowly increasing for a long time. It is not in accordance with the actual requirements and can not guarantee the stabilities of tunnel surrounding rock and supporting structure, and construction safety when the constructing time of secondary lining is estimated by using norms. So the deformation of tunnel

收稿日期:2012-01-12

基金项目:陕西省交通科技项目(08-06K);交通运输部科技项目(2010 353 361 310)

作者简介:陈建勋(1969-),男,陕西韩城人,长安大学教授,工学博士,从事隧道及地下工程研究。

should be controlled by using arch settlement in the constructing process of tunnel. The constructing principle of rapid excavating, rapid supporting and rapid closing is put forward for loess tunnel. Strengthening initial supporting, adding crus-locking anchors, quick constructing side walls and timely constructing secondary lining are carried out to avoid large settlement of arch surrounding rock and to ensure the stability of tunnel structure. 6 tabs, 17 figs, 12 refs.

Key words: tunnel engineering; loess tunnel; deformation rule; monitoring measurement; regression analysis

Author resume: CHEN Jian-xun(1969-), male, professor, PhD, +86-29-82334887, chenjx1969@163.com.

0 引 言

中国已经在黄土地层中修建了多条隧道,包括铁路隧道、公路隧道、引水隧道和地铁区间隧道等,积累了比较丰富的经验。苗天德等基于微结构突变失稳假说,深入研究了湿陷性黄土的变形机理,将体积湿陷与剪切湿陷统一到同一个突变模式,给出了黄土湿陷变形的一个完整的本构关系^[1];张新善等对西安地铁一号线的区间隧道开挖对周围土体变形影响进行了计算机模拟,得出了黄土隧道开挖初期往往会引起较大沉降位移的规律^[2];乔春生等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,当掌子面离开一定距离后(35~40 m),隧道收敛速度趋缓,但没有趋于稳定^[3];张孟喜等对受施工卸载扰动黄土的变形与强度特性进行研究,得出黄土在卸载作用下的强度与变形特性、变形模量及破坏特征与加载路径存在很大差别,挤长破坏的抗剪强度较压缩破坏低,挤长破坏的最大轴向应变仅为压缩破坏的 $1/3 \sim 1/2$ ^[4];赵东平等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^[5];梁燕等以甘肃陇西自重湿陷性黄土作为研究对象,基于黄土湿陷过程中变形与渗流耦合的思想,建立了黄土增湿变形的数值模型^[6];赵勇对隧道围岩动态变形规律及控制技术进行了研究,提出了围岩变形控制的技术要点和技术措施,并提出了相应的围岩变形控制建议^[7];雷权有对黄土覆盖土、岩接触地层中隧道围岩变形特征及支护技术进行了研究,得出了在土、岩接触带

中开挖隧道时,应适当加强洞周边土体侧的支护,尤其在土体侧拱肩处应加强支护,从而保证支护结构的变形统一均匀,应合理地进行分步开挖,减小对土层的扰动^[8];朱彦鹏等得出管棚注浆法能够显著抑制浅埋黄土地层的变形和拱顶下沉,减少隧道初期支护结构的变形和受力^[9];Rogers 等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^[10];Nishimura 等对应力历史影响的静态压缩非饱和土的强度参数进行了研究^[11]。以上对不同区域与条件下的黄土隧道的变形规律进行了相关研究,但均因试验条件、依托工程建设条件等限制,没有对黄土隧道的变形进行大量、长期的现场实测,因此,其所得的规律具有一定的局限性,而且黄土具有大孔隙、垂直节理和管状孔道,未扰动时强度较高,遇水土粒崩解的典型工程特性,且不同区域其特性也不同,实际工程地质的复杂性以及施工等因素的不确定性,更使得黄土隧道变形规律表现各有不同,这给设计与施工造成了困扰,且严重制约黄土隧道建设的发展,因此,有必要对其做进一步的研究。

为此,本文以国道主干线 GZ35 青岛至银川陕西境吴堡至子洲高速公路上 7 座黄土隧道(均为单洞两车道分离式隧道)为依托,进行隧道施工过程中围岩变形现场量测,对两车道公路黄土隧道变形规律进行了系统研究。

1 工程概况

依托工程的地貌形态属黄土梁峁区的峁状斜梁,隧址区出露地层表部为马兰组新黄土(Q_3^{sol}),中部为离石组老黄土(Q_2^{sol}),底部为三叠系上统胡家村组褐黄~灰绿色厚层状中细粒长石砂岩类,地下水主要为赋存于第四系黄土层中的孔隙水,隧道埋深为 35~135 m。各隧道概况见表 1,工程地质条件见表 2。

表 1 隧道概况
Tab. 1 Tunnel situations

序号	隧道名称	线位	长度/ m	衬砌长度/m			
				V 级浅埋	V 级深埋	Ⅳ级	明洞
1	张家沟隧道	左线	820	155		650	15
		右线	585	70		500	15
2	刘家坪1号隧道	左线	235	85		135	15
		右线	258	74		170	14
3	刘家坪2号隧道	左线	350	70		260	20
		右线	340	90		230	20
4	刘家坪3号隧道	左线	103	39	40	10	14
		右线	187	28		145	14
5	刘家坪4号隧道	左线	1 914	79	140	1 685	10
		右线	1 865	92	60	1 700	13
6	刘家坪5号隧道	左线	180	152			28
7	问沟隧道	左线	1 345	117	20	1 200	8
		右线	1 240	96	25	1 110	9

7座黄土隧道均采用复合式衬砌,隧道开挖半

表 2 隧道工程地质条件

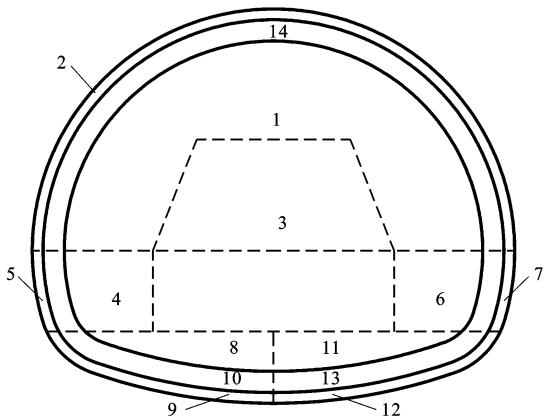
Tab. 2 Engineering geological conditions of tunnels

隧道名称	工程地质概况	围岩稳定性评价
张家沟隧道	围岩为离石组老黄土,土质均匀,块状整体结构,夹含多层棕红色古土壤层和少量钙质结核,孔隙退化,成洞性能较好,但柱状节理发育,具Ⅰ级(轻微)湿陷性,土体易沿节理面坍塌掉块,处理不当会出现较大范围坍塌,侧壁容易失稳,洞壁潮湿,局部有滴水、渗水现象	离石组老黄土的成洞性能较好,洞室有潮湿湿润感,偶有微量裂隙孔隙水渗入
刘家坪1号隧道	围岩为第四系中更新统离石组老黄土,土质均匀,呈块状整体结构,夹含多层棕红色古土壤层和少量钙质结核,局部富集成层,柱状节理发育,呈半坚硬状态	
刘家坪2号隧道	全新统坡积次生黄土,土质疏松,结构松软,垂直节理发育,成洞性能较差;马兰组新黄土土质均匀,大孔、虫孔发育,结构松散,稳定性较差,易坍塌;离石组老黄土土质较均,结构紧密,含少量钙质结核,柱状节理发育,呈块状整体结构	V级:围岩为块状整体结构的离石组老黄土、马兰组新黄土和结构松散的次生黄土,稳定性较差,洞室开挖易坍塌,雨季施工有降水滴入、渗入。Ⅳ级:洞室开挖时土体易沿节理面或风化裂隙面坍塌掉块,拱部无支护时会出现较大范围的坍塌,侧部会有失稳,洞室有潮湿湿润感,局部有裂隙孔隙水渗入。Ⅲ级:三叠系上统胡家村组砂岩、泥岩成洞性能较好,洞室有潮湿湿润感,局部有裂隙孔隙水渗入、滴入现象
刘家坪3号隧道	离石组老黄土,结构紧密,孔隙退化,成洞性能较好,但柱状节理发育,洞口开挖时土体易沿节理面坍塌掉块,处理不当会出现较大范围坍塌,稳定性较差	
刘家坪4号隧道	坡积物为老黄土,土质松散,结构杂乱,呈松软结构;马兰组新黄土土质均匀,大孔、虫孔发育,结构松散,稳定性较差,易坍塌;离石组老黄土结构紧密,孔隙退化,成洞性能较好,但柱状节理发育,洞口开挖时土体易沿节理面坍塌掉块	
刘家坪5号隧道	进出口上部均为马兰组新黄土,土质均匀,结构疏松;下部均为离石组老黄土,表层有少量坡积物,土质疏松,结构杂乱,稳定性差,洞口开挖时易坍塌,处理不当会出现较大范围坍塌	围岩为马兰组新黄土,结构松散,稳定性较差,洞室开挖易坍塌,雨季施工有降水滴入、渗入;洞室开挖时土体易沿节理面、风化裂隙坍塌掉块,拱部无支护时会出现较大范围的坍塌
问沟隧道	进出口土体均为离石组老黄土,结构紧密,孔隙退化,成洞性能较好,但柱状节理发育,洞口开挖时土体易沿节理面坍塌掉块,处理不当会出现较大范围坍塌,稳定性较差	离石组老黄土的成洞性能较好,洞室有潮湿湿润感,偶有微量裂隙孔隙水渗入;砂岩强风化层的稳定性较差,拱部无支护时会有较大的坍塌,侧壁有失稳情况,洞室潮湿湿润

2 测试内容及方法

隧道变形监控量测包括拱部沉降量测和净空收

径均为 6.13 m,采用拱部留核心土环形开挖法施工,施工步骤见图 1。



1—拱部环形开挖;2—拱部支护;3—核心土及中槽开挖;4—左边墙开挖;5—左边墙支护;6—右边墙开挖;7—右边墙支护;8—仰拱左幅开挖;9—仰拱左幅支护;10—仰拱左幅二衬施作;11—仰拱右幅开挖;12—仰拱右幅支护;13—仰拱右幅二衬施作;14—二衬施作

图 1 分部开挖法施工步骤

Fig. 1 Construction steps of partial excavation method

敛量测。拱部沉降量测使用高精度 AL422 水准仪(精度 0.1 mm)和钢瓦水准尺,从洞外或洞内基准点转点至量测断面附近(图 2),然后将钢尺垂直悬

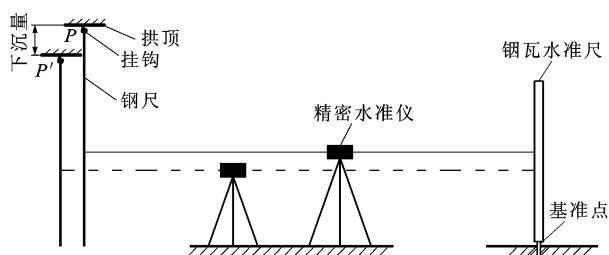


图2 拱顶下沉量测方法

Fig. 2 Test method of vault settlement

挂在拱顶挂钩上,通过水准仪前视钢尺读数,并经过温度修正后可得钢尺读数,由此可得拱顶对基准点的相对高程 P ,相隔一定时间后用同样的方法可得拱顶的相对高程 P' ,则 $P - P'$ 即为该段时间的拱顶沉降值。

净空收敛量测使用 SWJ-IV 型数显收敛计,监测隧道净空最大处的水平位移变化。量测时先用温度计测出环境温度,以用于钢尺温度变形修正,从收敛计钢尺上读出整读数,从数显计上读出微读数,两者之和即为基线的长度,每次量测值之间的差值即为隧道的周边收敛值。

各监控量测项目在横断面上的布置见图3,拱部沉降量测在拱顶和两侧拱腰(距拱顶水平距离2 m处)共布置3处测点。净空收敛量测在每个断面的开挖跨度最大线处,埋设1条水平收敛量测基线。

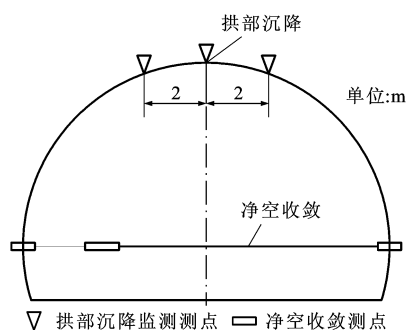


图3 监测项目横断面布置

Fig. 3 Cross-section arrangement of the monitoring items

监测断面沿隧道纵向距洞口5~10 m埋设第1个监测断面,然后每隔50 m布置1个监测断面。7座隧道变形监测所布设的有效拱部沉降测点共161个,净空收敛测线共45条。

3 监测结果分析

现场量测的每个断面的数据采集工作均是从测点埋设3 d后开始(核心土未开挖时无法进行量测),至二次衬砌施作为止。

3.1 隧道变形实测结果汇总

按照不同围岩级别将隧道变形监测结果统计汇总,见表3。从表3可以发现如下规律。

(1)单洞两车道黄土隧道采用拱部留核心土环形开挖法施工,在未计入核心土开挖以前产生变形量的情况下,Ⅳ级围岩黄土隧道拱部沉降的均值约为2 cm,净空收敛的均值约为1 cm;Ⅴ级围岩(浅埋偏压)黄土隧道拱部沉降的均值约为7 cm,净空收敛的均值约为1 cm,可见,黄土隧道拱部沉降值远大于净空收敛值。

(2)刘家坪5号隧道因支护滞后,K52+350、K52+355、K52+365断面的拱部沉降值超出规范允许值,喷射混凝土出现不同程度的裂缝。其余监测断面位移值均在规范允许值范围内,考虑到现场监测的数据不包含核心土开挖前3 d内发生的先期位移(占总位移的30%~50%),故可以将上述位移值适当调大,以此补充隧道开挖后未测到的那一部分位移,之后发现规范允许值的上限比较适合黄土隧道围岩变形最终位移量。

3.2 典型隧道断面变形时态曲线

将7座隧道的变形监测数据描绘成时态曲线,典型隧道断面变形时态曲线分别见图4~17。

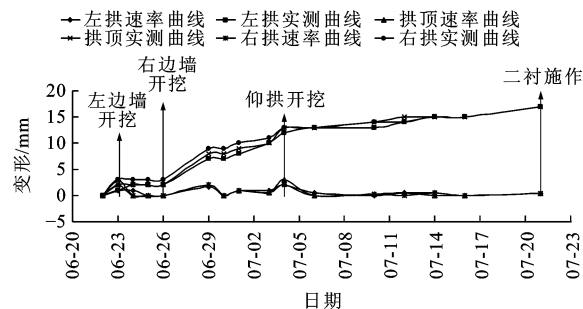


图4 张家沟隧道 K41+065.5 拱部沉降时态曲线

Fig. 4 Arch settlement time curves of section K41+065.5 in Zhangjiagou Tunnel

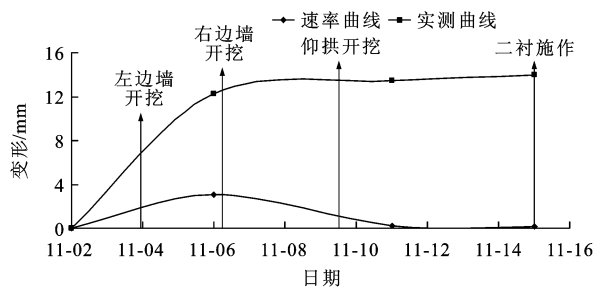


图5 张家沟隧道 K41+165 净空收敛时态曲线

Fig. 5 Clearance convergence time curves of section K41+165 in Zhangjiagou Tunnel

由变形时态曲线图可以看出:变形与时间之间

表 3 隧道围岩变形结果
Tab. 3 Results of tunnel surrounding rock deformations

围岩等级	隧道名称		量测项目			
			拱部沉降		净空收敛	
			实测位移值范围	平均值	实测位移值范围	平均值
Ⅳ 级	张家沟隧道	左线	6~36	13.33	8.58~14.13	13.73
		右线	4~14		12.90~19.29	
	刘家坪 1 号隧道	左线	31~42	26.58	3.68	9.34
		右线	13~41		6.86~17.49	
	刘家坪 2 号隧道	左线	6~19	34.05	0.36	3.39
		右线	10~76		1.49~5.29	
	刘家坪 3 号隧道	左线		18.39		10.08
		右线	5~60		2.11~21.95	
	刘家坪 4 号隧道	左线	6~37	20.27	6.57~35.90	14.38
		右线	10~38		7.50~13.94	
	问沟隧道	左线	9~43	20.57	1.08~5.62	5.87
		右线	9~58		1.61~20.86	
Ⅴ 级	问沟隧道洞口段	左线	68	67.77	8.87~16.41	13.84
		右线	18~63		7.45~15.36	
	刘家坪 2 号隧道洞口段	左线	22~82	71.03	5.58~14.57	11.79
		右线	16~91		7.12~10.34	
	刘家坪 3 号隧道洞口段	左线		68.12		11.47
		右线	65~73		8.82~14.61	
	刘家坪 5 号隧道	左线	41~117	74.94	3.14~11.60	7.00

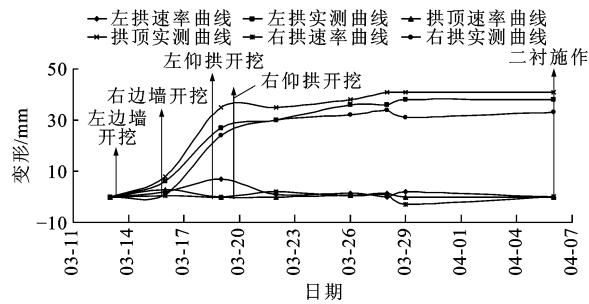


图 6 刘家坪 1 号隧道 YK49+315 拱部沉降时态曲线
Fig. 6 Arch settlement time curves of section YK49+315 in Liujiaping No. 1 Tunnel

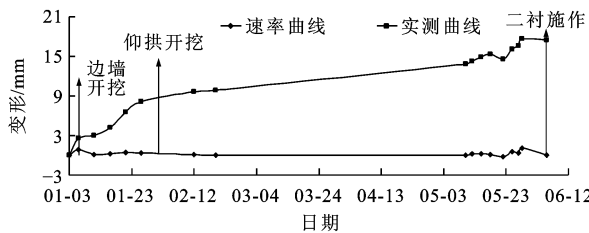


图 7 刘家坪 1 号隧道 YK49+325 净空收敛时态曲线
Fig. 7 Clearance convergence time curves of section YK49+325 in Liujiaping No. 1 Tunnel

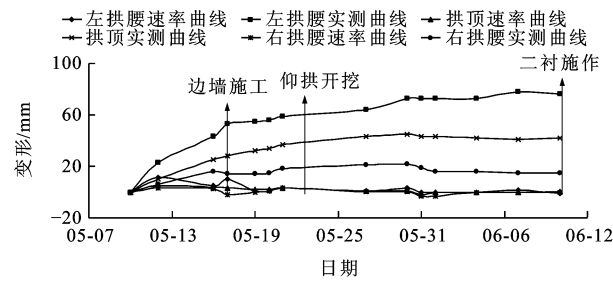


图 8 刘家坪 2 号隧道 YK49+670 拱部沉降时态曲线
Fig. 8 Arch settlement time curves of section YK49+670 in Liujiaping No. 2 Tunnel

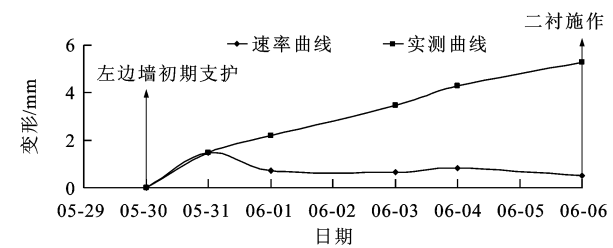


图 9 刘家坪 2 号隧道 YK49+677 净空收敛时态曲线
Fig. 9 Clearance convergence time curves of section YK49+677 in Liujiaping No. 2 Tunnel

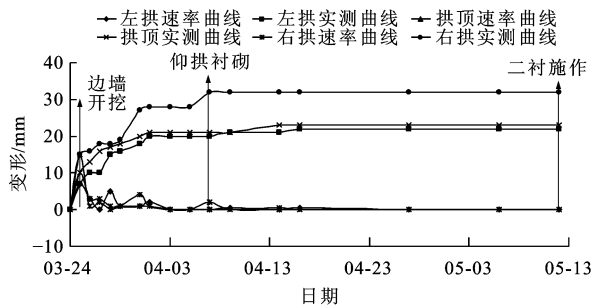


图 10 刘家坪 3 号隧道 YK50+110.5 拱部沉降时态曲线
Fig. 10 Arch settlement time curves of section YK50+110.5 in Liujiaping No. 3 Tunnel

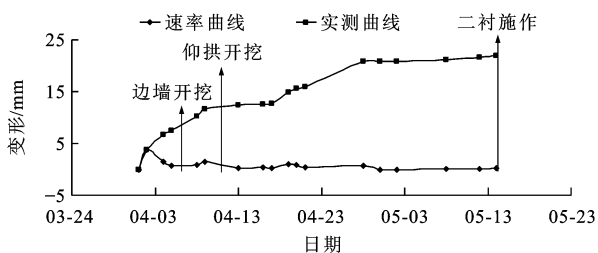


图 11 刘家坪 3 号隧道 YK50+116.5 净空收敛时态曲线
Fig. 11 Clearance convergence time curves of section YK50+116.5 in Liujiaping No. 3 Tunnel

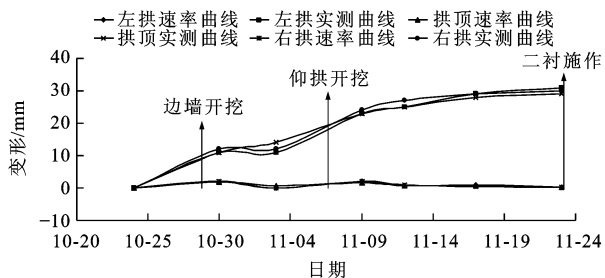


图 12 刘家坪 4 号隧道 YK50+433 拱部沉降时态曲线
Fig. 12 Arch settlement time curves of section YK50+433 in Liujiaping No. 4 Tunnel

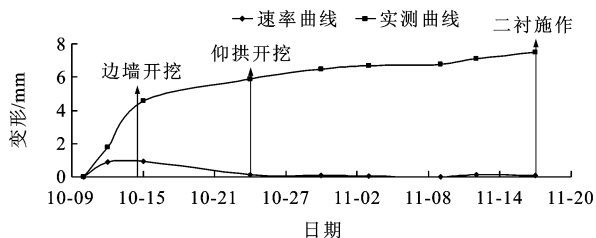


图 13 刘家坪 4 号隧道 YK50+371 净空收敛时态曲线
Fig. 13 Clearance convergence time curves of section YK50+371 in Liujiaping No. 4 Tunnel

有密切的关系,变形在前期随时间增长而迅速增大,变形速率随时间逐渐减小,当达到一定时间后变形呈缓慢增长趋势。从变形到稳定,黄土隧道的围岩变形大致经历了 3 个阶段。

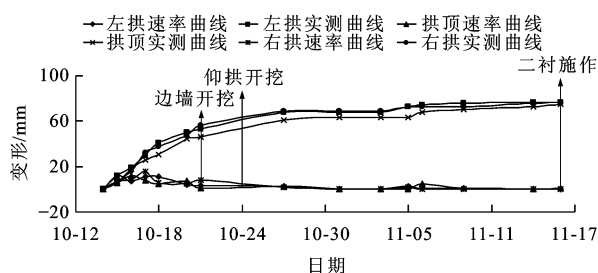


图 14 刘家坪 5 号隧道 K52+345 拱部沉降时态曲线
Fig. 14 Arch settlement time curves of section K52+345 in Liujiaping No. 5 Tunnel

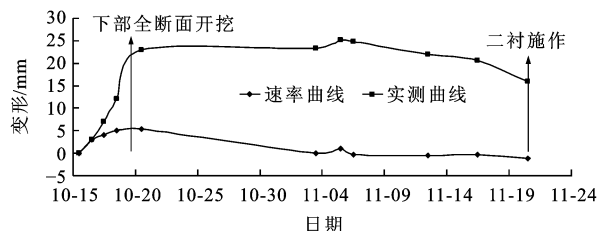


图 15 刘家坪 5 号隧道 K52+350 净空收敛时态曲线
Fig. 15 Clearance convergence time curves of section K52+350 in Liujiaping No. 5 Tunnel

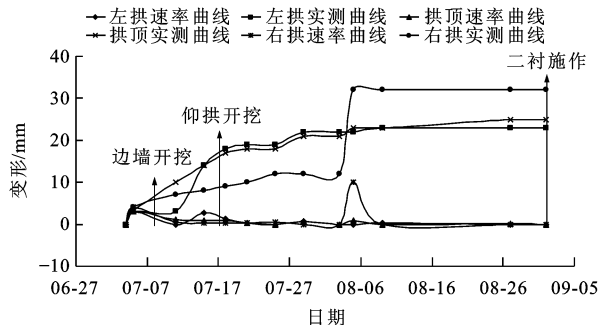


图 16 问沟隧道 YK57+583 拱部沉降时态曲线
Fig. 16 Arch settlement time curves of section YK57+583 in Wengou Tunnel

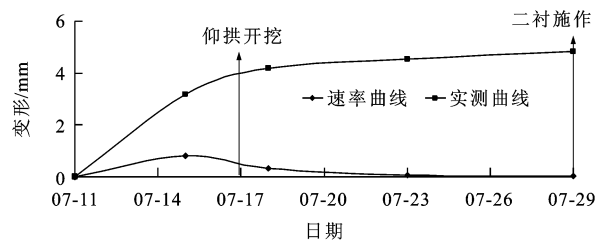


图 17 问沟隧道 YK57+583 净空收敛时态曲线
Fig. 17 Clearance convergence time curves of section YK57+583 in Wengou Tunnel

第 1 阶段是急剧变形阶段(开挖初期),持续时间为 5~10 d,此阶段变形量占总变形量的 60%~70%。由于施工方法的影响以及测试手段的限制,隧道的围岩变形量测是在核心土开挖之后进行,开挖初期发生的大部分变形未能量测到,故第 1 阶段

发生的实际变形要远远大于时态曲线所示的变形量,这就要求隧道施工中要采取快挖、快支、快封闭的施工措施,另外还要增设锁脚锚杆,尤其是初期支护的仰拱要及时施作,尽快控制沉降,防止变形过大或塌方。

第 2 阶段是持续增长阶段,持续时间为 10~15 d,这部分变形量约占总变形量的 30%。如果此时过早施作二次衬砌,过大的变形压力会对尚未完全硬化达到最终强度的二次衬砌混凝土造成损伤,即二次衬砌在低强度时期承受较大的压力,导致混凝土产生“内伤”,发展到最后可能会使混凝土产生裂缝,导致二次衬砌的寿命降低,甚至塌方,故二次衬砌不宜紧跟,因此,对于通俗意义上讲的“二衬紧跟”概念应是二次衬砌仰拱和边墙基础紧跟,及时进行仰拱回填和施作路面基层,增加结构的整体稳定性。

开挖后大约 25 d 围岩变形进入第 3 阶段,即缓

慢增长阶段,此时变形趋于缓慢,宜适时施作二次衬砌,避免更大的变形发生。在开挖边墙时,隧道急剧变形,而在仰拱开挖并回填后,隧道变形趋于稳定,故黄土隧道变形控制的关键工序为下部开挖。

3.3 隧道变形最终位移速率汇总

从判断围岩稳定性及支护结构的可靠度来看,隧道工程技术人员不仅仅关心围岩的变形量,还关心变形速率的大小。前者是用变形值的大小——最终变形量来反映围岩变形特性及稳定状态,而后者则是从一定时间内发生的变形量来比较围岩变形的发展趋势。若变形速率超过该级围岩通常的极限变形速率值,则预示着围岩可能出现失稳破坏,亟需采取加强支护的措施来阻止隧道围岩因过大变形而造成自身强度降低和承载能力的下降。

按照不同围岩级别将隧道变形速率监测结果汇总,见表 4。

表 4 隧道变形最终位移速率汇总
Tab. 4 Final displacement rate summary of tunnel deformation

围岩等级	隧道名称		量测项目			
			拱部沉降		净空收敛	
			实测最终速率值范围/(mm·d ⁻¹)	平均值/(mm·d ⁻¹)	实测最终速率值范围/(mm·d ⁻¹)	平均值/(mm·d ⁻¹)
Ⅳ级	张家沟隧道	左线	0.40~1.50	0.49	0.00~0.03	0.56
		右线	0.00~0.40		0.06~2.15	
	刘家坪1号隧道	左线	0.50~1.50	0.40	0.13	0.40
		右线	0.00~0.67		0.00~1.07	
	刘家坪2号隧道	左线	0.25~0.75	0.52	0.00	0.17
		右线	0.00~1.67		0.02~0.50	
	刘家坪3号隧道	左线		0.25		0.39
		右线	0.00~0.48		0.00~1.45	
	刘家坪4号隧道	左线	0.00~1.60	0.31	0.01~0.77	0.21
		右线	0.10~0.43		0.08~0.13	
Ⅴ级	问沟隧道	左线	0.00~0.86	0.28	0.11~0.30	0.40
		右线	0.00~0.75		0.35~0.82	
	问沟隧道洞口段	左线	0.45~1.50	0.51	0.00~0.11	0.47
		右线	0.05~0.40		0.10~0.43	
	刘家坪2号隧道洞口段	左线	0.50~1.50	0.45	0.43	0.44
		右线	0.00~0.65		0.00~1.07	
	刘家坪3号隧道洞口段	左线		0.50		0.58
		右线	0.00~1.50		0.06~1.15	
	刘家坪5号隧道	左线	0.00~1.00	0.29	0.02~0.68	0.24

对吴子高速公路七座黄土隧道(围岩等级为Ⅳ级和Ⅴ级)161个有效拱部沉降测点进行统计分析,有 141 个测点的最终位移速率超过 0.2 mm·d⁻¹

(占 87.4%),其中Ⅳ级围岩拱部沉降速率均值为 0.38 mm·d⁻¹,Ⅴ级围岩拱部沉降速率均值为 0.44 mm·d⁻¹;对 45 个有效净空收敛测线进行统

计分析,有 29 个水平收敛最终位移速率超过 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (占 64.4%),其中Ⅳ级围岩净空收敛速率均值为 $0.36 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,Ⅴ级围岩净空收敛速率均值为 $0.43 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.4 监测数据回归分析

为了研究黄土隧道的变形规律,在每个隧道中选取 1 个或 2 个典型断面,根据测试数据得到的位移时态曲线的形状与目前隧道监控量测数据回归分析的常用函数,分别选择指数和对数函数,即

$$u = Ae^{-\frac{B}{t}} \quad (1)$$

$$u = A + B \ln(t) \quad (2)$$

式中: t 为时间; u 为变形; A 、 B 为回归常数。

对拱部沉降和净空收敛数据进行回归分析,以指数函数为例,对式(1)两边同时取对数得

$$\ln(u) = \ln(A) - \frac{B}{t} \quad (3)$$

令 $y = \ln(u)$, $a = \ln(A)$, $b = B$, $x = \frac{1}{t}$, 则式(3)

可转化为

$$y = a - bx \quad (4)$$

直线方程的线性回归分析可采用 Excel 的数据分析工具进行,以指数函数为例,首先在 Excel 工作表中计算出线性化方程式(4)中的 y 和 x ,点击 Excel 菜单中的工具中数据分析,选择回归,输入数据后即可得到回归分析结果。如果工具菜单中没有数据分析,从工具中选定加载宏,在加载宏中选定分析工具库,即可在工具菜单中加载数据分析。回归分析结果见表 5。

从表 5 可以看出:用对数函数进行回归分析的各曲线相关系数 R 均在 0.95 以上,而用指数函数进行回归分析的各曲线的相关系数不高,且有负值出现;各监测断面采用对数函数回归时,实测曲线和回归曲线拟合较好,说明黄土隧道围岩变形规律比较符合对数函数。

由于对数函数随时间 t 的增大而呈发散趋势,故不能使用它预估围岩变形的最终值,但可以用于预估隧道围岩趋于稳定状态所需的时间。

3.5 二次衬砌施作时机分析

根据《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042—94)规定,当各测试项目的位移速率明显收敛,围岩基本稳定,周边收敛速率小于 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,或拱部沉降速率小于 $0.07 \sim 0.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时可以进行二次衬砌施作^[12]。由前文研究结果可知,黄土两车道公路隧道变形符合对数函数的数学规律,利用

式(2)求得

$$\frac{du}{dt} = \frac{B}{t} = v$$

二次衬砌的施作时机为

$$t = \frac{B}{v}$$

若将规范中规定的位移速率值 v 代入上式,另由表 5 可知不同围岩级别的 B 值,则由二者可求得二次衬砌的施作时机,见表 6。

从表 6 可以看出,按照规范中临界变形速率 $0.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (Ⅳ级)与 $0.07 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (Ⅴ级)时,预估出的围岩稳定时间(二次衬砌施作时机)分别为开挖后 27~59 d (Ⅳ级)和开挖后 37~53 d (Ⅴ级)。若按此施工,显然不能保证隧道围岩和支护结构的稳定和安全施工。如刘家坪 5 号隧道 K52+365 断面,因停工原因在一个月后才进行二次衬砌施作,导致拱部严重下沉,最大值达 11.7 cm,且拱部钢架表面喷射混凝土剥落,山体地表出现裂缝。

此外,工程界提出黄土隧道施工应“二衬紧跟”的理念是不正确的,其理由是:黄土隧道围岩具有自身强度低、变形大和流变性强的特性,如果二次衬砌过早施作,围岩会继续变形,这样导致二次衬砌承受过大的变形压力。由于在二次衬砌施作后不久,二次衬砌混凝土还未完全硬化达到所需的标准强度,在低强度的时候就承受过大的荷载,势必导致混凝土的先天“内伤”,在后续荷载的作用下,隧道二次衬砌使用过程中可能会出现开裂甚至塌方,这些现象在许多工程实例中都发生过。

由于黄土隧道变形持续时间长,若不及时采取措施加以控制,必然会诱发更大的变形,造成净空侵限甚至塌方,因此,在施工时期要加强初期支护,特别是初期支护的仰拱要及时施作,同时二次衬砌的仰拱和边墙基础要紧跟,以避免隧道发生较大的变形。

4 结 语

(1)现场实测数据表明,在黄土隧道采用拱部留核心土环形开挖法施工过程中,拱部沉降值要远大于净空收敛值。

(2)对于Ⅳ级围岩,当拱顶下沉和净空收敛最终位移速率小于 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,可认为围岩达到基本稳定;对于Ⅴ级围岩,当拱顶下沉和净空收敛最终位移速率小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,可认为围岩达到了基本稳定状态。

(3)黄土隧道围岩变形经历 3 个阶段:第 1 阶段

表 5 回归分析结果
Tab. 5 Regression analysis results

围岩级别	隧道名称	桩号	回归函数	相关系数 R	回归精度
Ⅳ 级	张家沟隧道	ZK41+065.5	$u = -3.296 + 5.671\ln(t)$	0.955	3.166
			$u = 2.445\exp(-4.346/t)$	-0.595	16.070
		ZK41+165	$u = 1.432 + 4.917\ln(t)$	0.950	4.785
			$u = 1.275\exp(-9.475/t)$	0.603	89.250
	刘家坪 1 号隧道	YK49+315	$u = -0.676 + 3.994\ln(t)$	0.985	0.359
			$1.607u = \exp(-0.946/t)$	-0.191	8.350
		YK49+325	$u = -3.090 + 3.686\ln(t)$	0.964	2.544
			$u = 2.429\exp(-7.142/t)$	-0.537	15.990
	刘家坪 3 号隧道	YK50+110.5	$u = 7.045 + 4.996\ln(t)$	0.904	7.190
			$u = 2.822\exp(-0.334/t)$	-0.059	23.580
		YK50+116.5	$u = -1.581 + 6.009\ln(t)$	0.974	2.370
			$u = 2.702\exp(-2.649/t)$	-0.409	21.760
	刘家坪 4 号隧道	YK50+433	$u = -2.489 + 8.762\ln(t)$	0.964	9.690
			$u = 2.128\exp(+7.695/t)$	0.296	21.740
		YK50+371	$u = 0.099 + 2.700\ln(t)$	0.988	0.180
			$u = 1.703\exp(-2.430/t)$	-0.356	2.930
Ⅴ 级	刘家坪 2 号隧道	YK49+670	$u = -0.501 + 3.657\ln(t)$	0.975	9.980
			$u = 2.262\exp(-0.790/t)$	-0.045	86.210
		YK49+685	$u = -0.222 + 2.482\ln(t)$	0.991	0.090
			$u = 1.023\exp(-0.449/t)$	-0.121	2.860
	刘家坪 5 号隧道	K52+345	$u = -3.899 + 2.610\ln(t)$	0.992	10.510
			$u = 3.891\exp(-2.993/t)$	-0.352	41.021
		K52+365	$u = -0.109 + 1.799\ln(t)$	0.900	1.528
			$u = 1.752\exp(-5.389/t)$	-0.525	3.287
	问沟隧道	YK57+583	$u = -1.256 + 3.537\ln(t)$	0.992	1.190
			$u = 2.819\exp(-3.081/t)$	-0.418	35.950
			$u = 0.228 + 1.697\ln(t)$	0.985	0.150
			$u = 0.764\exp(-4.092/t)$	0.474	3.470

表 6 二次衬砌预估施作时机
Tab. 6 Predictive construction time of secondary lining

参数	围岩级别	位移速率/(mm·d ⁻¹)	B	时间/d
拱部	Ⅳ 级	0.15	3.994~8.762	27~59
沉降	Ⅴ 级	0.07	2.610~3.657	37~53

是急剧变形阶段(开挖初期),其持续时间为 5~10 d,此阶段变形量约占总变形量的 60%;第 2 阶段是持续增长阶段,持续时间为 10~15 d,这部分变形量约占 40%;开挖后大约 25 d 进入第 3 阶段即缓慢增长阶段,该阶段围岩仍会缓慢变形。

(4)黄土隧道的变形符合对数函数规律。黄土隧道施工中,控制拱部沉降是关键,施工中应采用“快挖、快支、快封闭”的原则,采取加强初期支护,增

设锁脚锚杆,仰拱和二次衬砌边墙基础紧跟,二次衬砌适时施作的措施,避免拱部围岩发生过的沉降,确保隧道结构稳定。

(5)按照规范规定的最终速率值预估二次衬砌施作时机不符合工程实际要求,不能保证隧道围岩和支护结构的稳定和施工安全。

参考文献:
References:

[1] 苗天德,刘忠玉,任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报,1999,21(4):383-387.
MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-sheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4):

- 383-387. (in Chinese)
- [2] 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.
- ZHANG Xin-shan, LIAO Hong-jian, ZHANG Li. Analysis on influence of tunnel excavation on deformation of surrounding soil in loessial strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4333-4338. (in Chinese)
- [3] 乔春生, 管振祥, 滕文彦. 饱水黄土隧道变形规律研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 225-230.
- QIAO Chun-sheng, GUAN Zhen-xiang, TENG Wen-yan. A study on deformation of tunnel excavated in saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S): 225-230. (in Chinese)
- [4] 张孟喜, 孙钧. 受施工卸载扰动黄土的变形与强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2248-2254.
- ZHANG Meng-xi, SUN Jun. Unloading-induced deformation and strength properties of loess during construction[J]. Chinese Journal of Rock and Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2248-2254. (in Chinese)
- [5] 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.
- ZHAO Dong-ping, YU Yu, WANG Ming-nian, 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. (in Chinese)
- [6] 梁燕, 赵桂娟, 谢永利, 等. 黄土增湿变形的数值模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 43-46.
- LIANG Yan, ZHAO Gui-juan, XIE Yong-li, et al. Numerical model of loess moistening deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 43-46. (in Chinese)
- [7] 赵勇. 隧道围岩动态变形规律及控制技术研究[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 1-5.
- ZHAO Yong. Study on dynamic deformation rules and control technology of surrounding rock for tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4): 1-5. (in Chinese)
- [8] 雷权有. 黄土覆盖土、岩接触地层中隧道围岩变形特征及支护技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- LEI Quan-you. Research on deformation characteristics and lining technology of the tunnel surrounding wall rock with soil-rock interface under loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] 朱彦鹏, 何江飞, 李军. 黄土公路隧道浅埋段管棚注浆支护机理及监测分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 11-15.
- ZHU Yan-peng, HE Jiang-fei, LI Jun. Support mechanism and monitoring analysis of pipe roof grouting for loess highway tunnel in shallow-buried section[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 11-15. (in Chinese)
- [10] ROGERS C D F, DIGKSTRA T, SMALLEY I J. Hydroconsolidation 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.
- [11] NISHIMURA T, HIRABAYASHI Y, FREDLUND D G, et al. Influence of stress history on the strength parameters of an unsaturated statically compacted soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5): 251-261.
- [12] JTJ 042—94, 公路隧道施工技术规范[S].
- JTJ 042—94, technical specification for construction of highway tunnel[S]. (in Chinese)

《建筑科学与工程学报》约稿函

尊敬的各位专家:

《建筑科学与工程学报》是由教育部主管、长安大学和中国土木工程学会主办的面向国内外公开发行的学术期刊。自2005年更名以来,《建筑科学与工程学报》得到了各位专家的大力支持,使期刊得到了快速发展,鉴于《建筑科学与工程学报》还有很大的发展空间,为了进一步提高期刊的学术质量和影响力,特向各位专家约稿。《建筑科学与工程学报》目前的优势包括:

- (1)《中文核心期刊要目总览》刊源。
- (2)中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- (3)不收取版面费。
- (4)发表周期短。
- (5)对学术质量高、有重大项目支持的论文优先发表。
- (6)刊登综述类文章。
- (7)可同期刊登同一主题的一系列成果。

希望各位专家能继续支持我刊,积极投稿。

投稿邮箱:jzxb@chd.edu.cn 电话:(029)82334397 联系人:宋庆国

《建筑科学与工程学报》编辑部