

文章编号: 1000-7598-(2013) 06-1703-07

隧道洞顶围岩竖向全位移量测及变化规律研究

李又云¹, 张志耕^{1,2}, 谢永利¹, 刘保健¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064;

2. 内蒙古高等级公路建设开发有限责任公司, 呼和浩特 010051)

摘 要: 围岩内部位移通常是在工作面开挖后再进行量测, 因而导致现场量测结果存在一定损失。为得到隧道施工过程中围岩内部位移的变化规律, 自行研制开发了适用于量测隧道洞顶围岩竖向全位移的多点位移测试仪, 该仪器具有测试原理简单、现场埋设方便、测试数据精度高的特点, 且比传统多点位移计的测点多。结合阿拉坦隧道, 利用该仪器对隧道洞顶处的围岩内部位移进行了量测, 得到了隧道浅埋段洞顶围岩内部位移的变化规律, 经分析发现, 如果采用传统多点位移计进行洞内量测围岩内部位移的方式, 围岩内部位移的损失程度将达 25% 以上, 这将给围岩稳定性的判定造成直接影响; 此外, 通过对监控数据的分析, 还得到了隧道开挖引起的围岩松弛范围。其结果对隧道的开挖与支护具有重要指导意义。

关 键 词: 隧道工程; 围岩内部位移; 监控量测; 数据分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Study of site monitoring of vertical full displacement of vault surrounding rock of tunnels and its change law

LI You-yun¹, ZHANG Zhi-geng^{1,2}, XIE Yong-li¹, LIU Bao-jian¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Inner Mongolia First-Class Highway Construction Development Limited Liability Company, Huhhot 010051, China)

Abstract: The internal displacements of surrounding rock are generally surveyed after the excavation of working face, which results in a certain measuring loss for the field observation. In order to get the change law of its internal displacements during tunnel construction, the multipoint-displacement testing equipment is developed, which is applicable to measuring the vertical full displacement of the vault surrounding rock. This equipment is featured by the simple test principle, the convenient field planting and the high-accuracy test data, and it has more measuring points than that of the traditional multipoint-displacement testing equipment has. The internal displacements of vault surrounding rock of the Alatan tunnel is measured by this equipment to obtain its change law in the tunnel's shallow section. It shows that if the internal displacements of surrounding rock are generally surveyed by the traditional multipoint-displacement testing equipment, 25 percent of internal displacements of surrounding rock is lost through analysis. The range of the surrounding rock relaxation is found through surveyed data, the result is significant to the tunnel's excavation and supporting.

Key words: tunnel engineering; surrounding rock displacement; monitoring survey; data analysis

1 引 言

高速公路隧道已广泛采用新奥法设计与施工^[1-2]。在采用新奥法修建公路隧道的过程中, 监控采集到的大量信息已成为反馈围岩和结构动态、优化支护参数、保证施工安全的重要手段。围岩内部位移量测作为一种投资大且较为复杂的量测项目, 一直是隧道监控量测工作中的一个重要内容,

因为围岩内部位移的变化直接反映了围岩和支护系统的力学形态, 它不仅能够反映隧道开挖或支护后围岩内部位移情况、围岩松动范围、围岩稳定效果, 而且为围岩应力和力学参数的反演分析提供了可靠的信息和依据^[3-5]。

目前, 虽然隧道监控量测技术得到了很大发展, 但也存在很大的改进空间, 就隧道围岩内部位移监控项目而言, 国内开展的相对较少, 只在少数重要

收稿日期: 2012-03-21

基金项目: 内蒙古自治区科技厅科技项目 (No. NJ-2007-02)。

第一作者简介: 李又云, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究工作。E-mail: liyouyun2006@163.com

工程中用到^[6-9]。目前,常用的量测设备主要有各种单点或多点位移计,此外,还有其他一些利用收敛计等间接量测围岩内部位移的方法。上述各种量测围岩内部位移的量测设备或方法都不同程度地存在以下问题:位移计成本高,安装不便;构造复杂,量测难度大;量测范围小,量测点数和深度受限;而结构简单的传感器,精度差,且量测不便,误差也较大^[10-11]。最为重要的是监控量测的数据信息是隧道开挖后得到的,监测信息滞后于施工,围岩内部位移变化的信息不完整,且存在一定的损失,这也是目前隧道施工中一个亟待解决的问题。

2 围岩内部位移量测仪

2.1 基本原理

量测仪器是长安大学自行研制的,该仪器结构见图 1。该多点位移计可监测岩体内某一点与地表的相对位移,其原理是用混凝土浆液或其他锚固剂将锚固元件固定在孔壁某点岩土体上,当该点位置的岩体发生竖向位移时,锚固元件通过受恒定拉力的钢绞线将位移变化传递给测试元件,进而可测出该点的岩石相对地表的位移变化。此测试仪器安装在隧道拱顶地表的周围,对于浅埋隧道来讲,其测试数据不可避免地要受到地表沉降的影响,围岩内部绝对位移量可通过地表沉降数据进行修正。

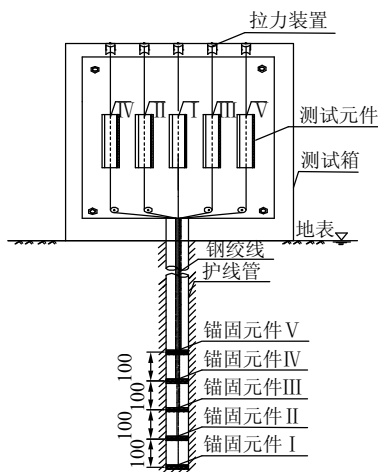


图 1 多点位移计结构图 (单位: cm)

Fig.1 Structure drawing of multi-spot displacement meter (unit: cm)

2.2 锚固原件的埋设

位移计锚固元件采用钻孔埋设,用百米钻机以孔径 108 mm 钻到预设深度,也可直接利用隧道地质勘查钻孔。成孔后用清水置换,保证孔内清洁。

锚固原件按照自下而上逐点进行安装。在最下

部点位锚固原件埋设时,首先是将锚固原件下放到预定深度,然后通过灌浆管将配置好的带有一定膨胀与速凝性的混凝土浆液或其他锚固剂等注入孔内,注入浆液的量按照达到孔内高度 20 cm 进行控制,并使埋设原件处于居中位置,以达到与围岩共同变形的目的;然后按照两测点之间的间距大小向孔内填充一定高度的泥浆,为避免钢绞线下移过程中受到摩阻力的影响,将其装入 PVC 护线管内,以此类推,可将所有锚固原件安装就位。

此外,为防止监控量测过程中钢绞线产生意外脱落或松弛等情况的发生,在测试箱的顶部安装有测力计,以使其始终保持恒定的绷紧度。

2.3 特点及适用性

(1) 量测仪器的基本特点

①目前国内市面上常见的位移计最多可测 6 点,且测点数量越多,埋设难度越大;本量测仪器可以根据量测的需要确定测点数量,可精准确定围岩松动范围,且锚固元件的埋设相对简单;②与传统多点位移计相比,该量测仪器在洞外预先埋设,对隧道施工没有干扰,可以获得由隧道施工引起的洞顶围岩的全过程位移曲线;③量测仪器的精度高,最小读数可达 0.02 mm,量程大,读数装置不受温度和湿度的影响,能累计读数。锚头结构简单,易于生产,费用较低。

(2) 量测仪器的适用性

依据位移量测的基本原理,只要锚固元件与孔内周边岩体黏结效果好,不论何种围岩,隧道施工引起的围岩位移都可以通过该设备进行测试。对于土质围岩或完整性岩体测试数据的变化规律相对较好;如果围岩较破碎,呈现块状,其数据离散性大,位移曲线呈现锯齿状。

利用该设备测试隧道洞顶围岩内部位移,最适宜的隧道埋深范围为 50 m。当埋设深度大于 50 m 时,在钻孔难度增加的同时,锚固元件固定的难度也不断加大。

3 工程概况及监控方案

3.1 工程概况

阿拉坦隧道位于内蒙古自治区通辽市境内,该隧道左线全长为 775 m,右线全长为 730 m,开挖洞径为 12.5 m,纵坡为 2.485%。隧址区内的地形起伏不大,海拔在 900~1 030 m。地貌类别主要有堆积地貌、构造剥蚀地貌、侵蚀地貌。土壤表层为粉质黏土,下为碎石土,底部为全风化凝灰岩、强风

化凝灰岩及微风化凝灰岩等。隧道进出口均为V级围岩,为强-中风化凝灰岩,岩层破碎且风化较严重,以构造节理为主,隧道应用新奥法施工,采用上下台阶法进行开挖,施工时浅埋段洞顶容易塌方,侧壁易失稳。

3.2 监控方案

一般情况下,浅部隧道施工时,开挖本身对地表沉陷量有直接明显的影响,且影响规律复杂。依据地质勘查资料,测试断面位置处的隧道围岩为V级,属强-中风化凝灰岩,岩层极破碎且风化较严重,以构造节理为主,岩体纵波波速为500 m/s,岩体完整性指数为0.31,但无其他不良地质构造;此外,测试断面位置的地形较为平坦。因此,隧道洞顶围岩和地表变形主要以竖向变形为主,其他变形相对

较小,可忽略不计。

在隧道左线出口浅埋段 ZK7+340 和 ZK7+325 断面安装位移计,具体情况如图2所示,其中 K7+340 处为主测断面(A断面),在该断面安装7套(5点/孔)多点位移计,测点间距为1 m,主测断面的测孔具体位置及编号见图3,其中每测孔中 I 测点距拱顶的垂直距离控制在1 m左右。图中 A_n 和 B_n 为孔号(其中 A 与 B 分别表示主测断面与辅测断面; n 表示钻孔号), I ~ V 为不同深度的测点,如 A1-I 为主测断面第1孔 I 深度点;其中, ZK7+340 断面埋深为11.5 m,各钻孔高差见图3,单位为 cm; ZK7+325 断面埋深为14.5 m, A 断面与 B 断面距离隧道出口的距离分别为80 m与95 m,属隧道浅埋断面。

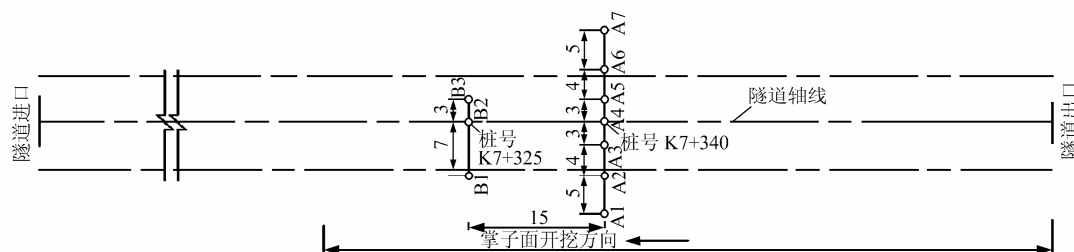


图2 岩体监测平面布置图(A断面, 单位: m)

Fig.2 Rock mass monitor floor-plan (section A, unit: m)

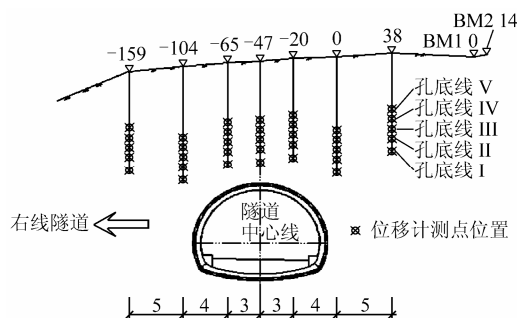


图3 K7+340 钻孔断面 (A断面, 单位: m)

Fig.3 Section of drill hole K7+340 (section A, unit: m)

4 围岩位移数据分析

4.1 围岩内部位移与掌子面位置的关系

掌子面距 A 监测断面 20.0 m (约 2 倍洞径) 时,开始量测,到沉降基本稳定时量测结束。施工过程中,隧道掌子面到达 ZK7+334 之前,每循环进尺 3 m,之后改为短进尺,每循环为 1.5 m。监测断面 A 中共布设 7 个测孔,各测孔在隧道轴线两侧对称,边缘测孔距隧道轴线为 12 m。由于隧道轴线两侧各测点得到的围岩内部位移发展规律基本相同,因此,由中点开始,选取一侧的钻孔与地表测点的数据进行分析,围岩沉降结果如图4所示。

由图可以看出: A1 孔位位移计各测点位移曲线基本重合,且在 $-10 \sim 10$ mm 之间,表明围岩基本稳定,隧道施工的影响范围约为隧道开挖洞径的两倍; A2 ~ A3 号位移计各测点围岩位移曲线与地表位移曲线之间有明显的距离,且各测点之间的位移量差异也相对明显,隧道洞径范围内岩体的竖向位移均大于地表沉降; A4 号孔位处的各测点,尽管其深度间隔为 1 m,但各测点的竖向变形基本一致,表明在围岩极为破碎的条件下,由隧道施工所造成的围岩松动范围远大于 5 m。

此外,由图还可看出,隧道测试断面的地表沉降与不同深度处的围岩竖向位移曲线的变化趋势基本一致,且最大位移量差值在 30 mm 以内,这表明受隧道掌子面施工开挖的影响,围岩发生松弛变形,且松弛变形的范围延伸至地表。

4.2 测孔不同深度处围岩竖向位移分析

图5为 A 断面不同孔位相同深度测点围岩竖向位移变化曲线。从图可以看出,掌子面位置距离监测断面 10 m (约 1 倍洞径) 左右时,围岩开始变形,但围岩变形速率很小;掌子面距离监测断面前 5 ~ 10 m (约 0.5 ~ 1.0 倍洞径) 左右时,围岩变形速率

开始增大,但相对较为缓慢;此后,掌子面越接近监测断面,围岩变形速率越大,且增加迅速。经分析掌子面在穿越监测断面前后 5 m(约 0.5 倍洞径)范围内时,围岩变形速率最大。随着围岩内部应力的调整和初期支护发挥作用后,变形速率迅速减小,

当掌子面越过监测断面 20 m(约 2 倍洞径)左右时,变形速率接近为 0。

此外,沿测点深度方向,距隧道中线距离近的岩体变形大,距离远的较小,当距隧道中线 10 m 以外时,最终位移小于 10 mm。

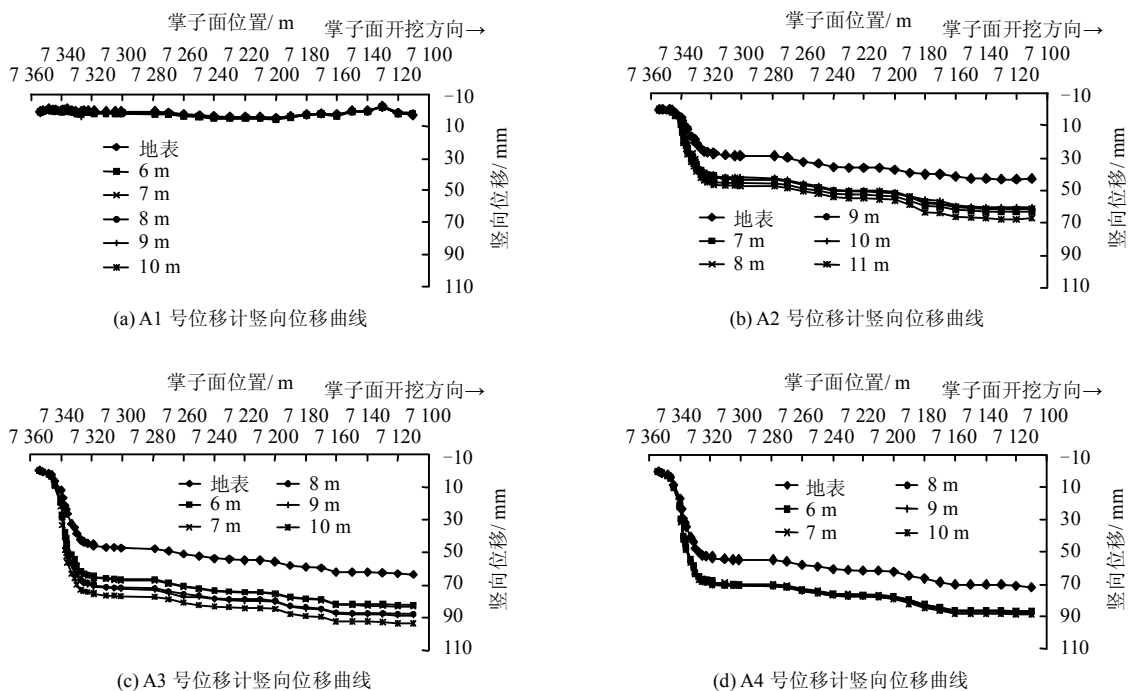


图 4 岩体变形过程 (位移-掌子面位置)
Fig.4 Rock mass distortion processes (displacement - face position)

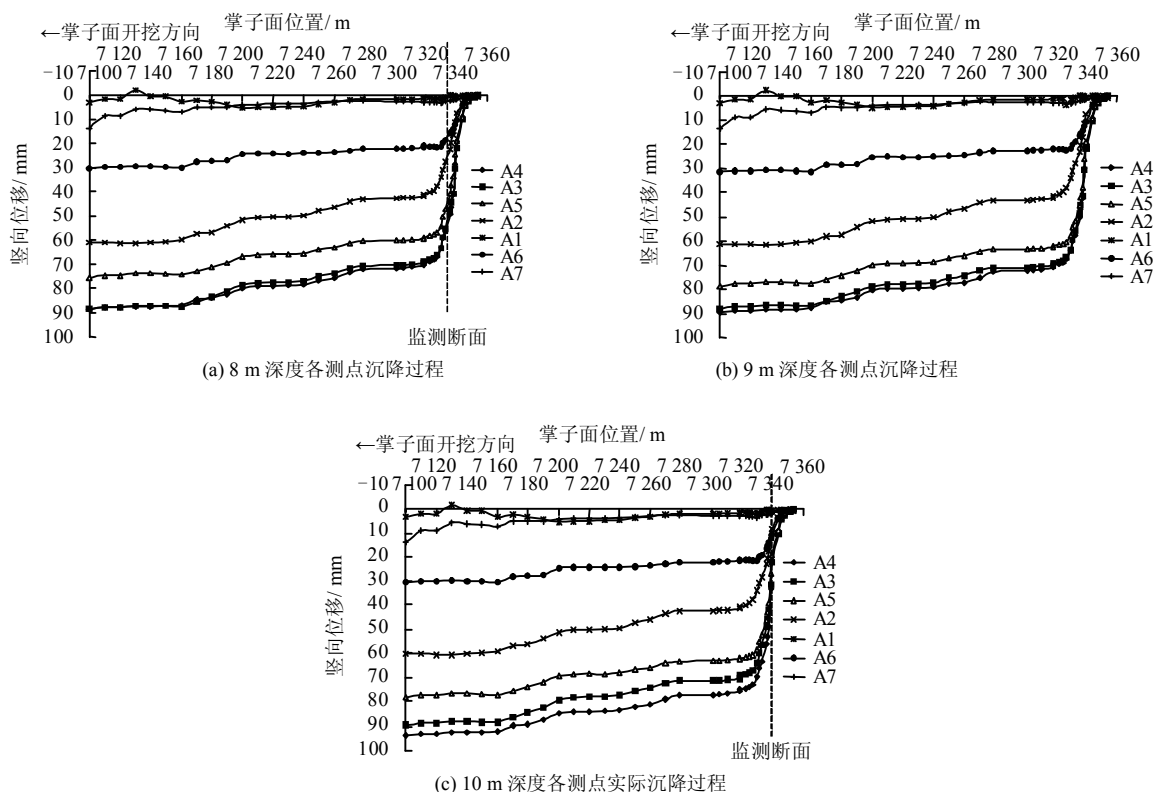


图 5 A 断面各测点不同深度处围岩位移的变化
Fig.5 Various measuring points changing along depth in section A

基于图 5 围岩内部竖向全位移曲线的变化趋势, 当掌子面开挖到监测断面位置时, 围岩竖向位移量已完成最终沉降变形量的 25%。如果采用传统多点位移计进行洞内量测围岩内部位移的方式, 围岩内部位移的损失程度将达 25% 以上, 这将给围岩稳定性的判定造成直接影响。

综合本隧道 A 断面监测结果, 随着掌子面开挖, 岩层各点竖向位移与地表沉降变化趋势基本一致 (如图 6 所示), 图中: L 为开挖工作面距测点的距离; D 为地下工程开挖直径; u 为沉降值; u_0 为最终沉降值。竖向位移曲线可以分为以下 4 个区域:

(1) 微小鼓起区域。掌子面距测点 $-2 \sim -0.8$ 倍洞径范围时, 岩层有上鼓趋势, 究其原因, 主要是掌子面爆破开挖时, 由于振动的影响, 导致掌子面围岩产生松动所致。

(2) 微小沉降区域。掌子面距测点 $-0.8 \sim 0$ 倍洞径时, 该段沉降值至少占总沉降值的 10%。

(3) 沉降剧增区域。随着开挖工作面的向前推进, 在开挖面后距测点 $0 \sim 1.2$ 倍洞径范围内, 岩层沉降量迅速增长, 约占总沉降值 50%~60%, 累计沉降可超过 70%。

(4) 沉降基本稳定区域。在开挖工作面后距测点 2 倍洞径后, 沉降增长缓慢, 沉降曲线趋于平缓。

4.3 围岩横向变形

图 7 为 A 断面掌子面在距测点 -0.5 、 0 、 1 、 2 倍洞径时岩层变形结果。从图 7 中可以看出, 岩层横断面变形与地表类似, 呈漏斗形, 近似正态分布曲线。隧道中心轴附近地表沉降值最大, 越向两边地表沉降值越小, 当距隧道中心轴位置 12 m 时, 沉降值不超过 5 mm, 地表基本稳定。由于地表横向有坡度, 左低右高, 导致最大竖向位移点左移, 表明隧道埋深是影响岩层竖向位移的重要因素之一。

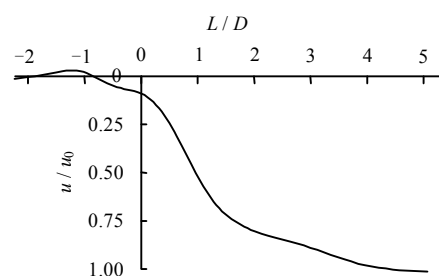


图 6 岩层竖向沉降

Fig.6 Longitudinal subsidence of rock layer

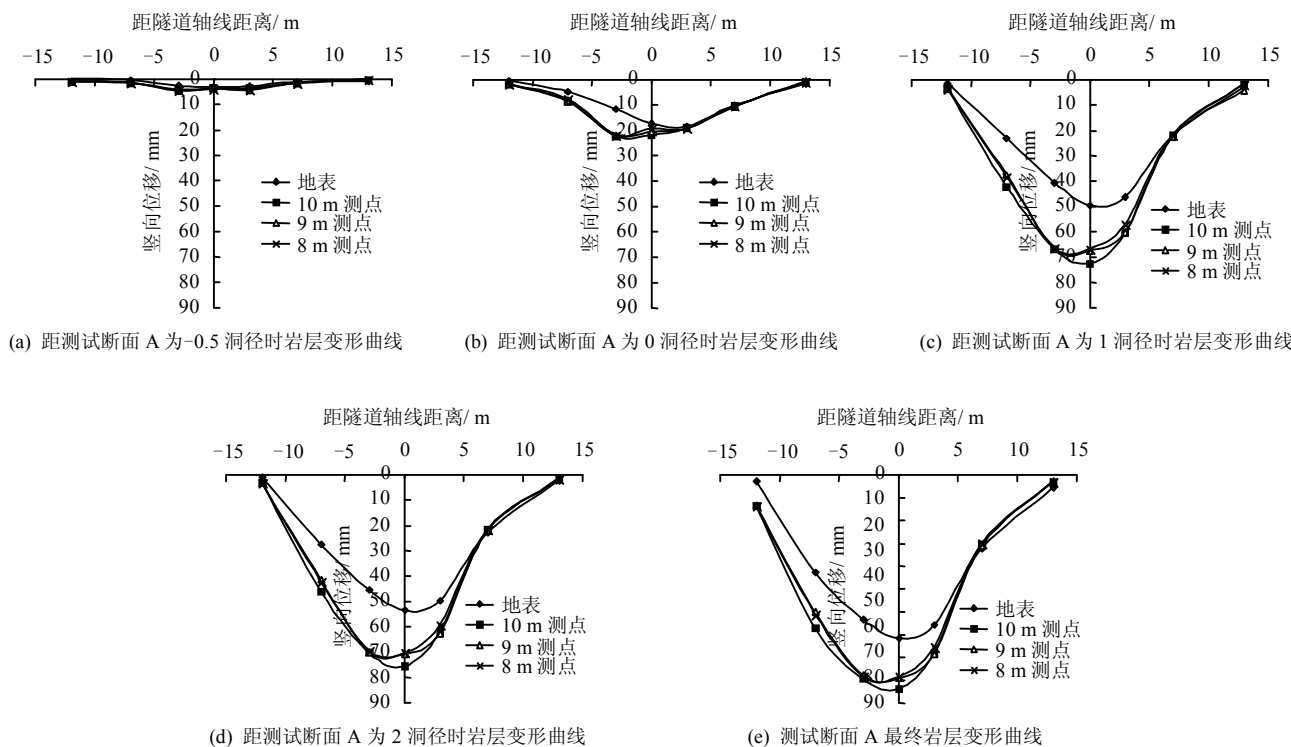


图 7 掌子面距测试断面不同距离时岩层变形

Fig.7 Rock layer distortion subjected to different distances from tunnel fare to test section

基于对地表与围岩横向沉降变形的分析, 对图 7 中曲线采用正态分布曲线拟合, 拟合公式为

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{A}\right) \quad (1)$$

式中: x 为测点与隧道中轴线的距离; $S(x)$ 为距离隧道中心轴线 x 处的地表沉降; $S_{\max}$ 为隧道中心线处的地表最大沉降, 采用实测值; A 为与围岩特征和测点埋深有关的常数。

根据 A 监测断面 42 个测点的沉降量测试结果, 绘制了 A 断面拱顶上部岩体内部竖向变形图。

图 8 为拱顶上部岩体内部竖向变形云图, 从图中看出, 围岩松动圈已经波及地表, 拱顶附近变形最大, 然后向外扩散并逐渐减小, 横向递减速率比纵向快得多; 该图对深埋隧道自然平衡拱高度与宽度的判定及其围岩松散压力的计算有着一定借鉴作用。

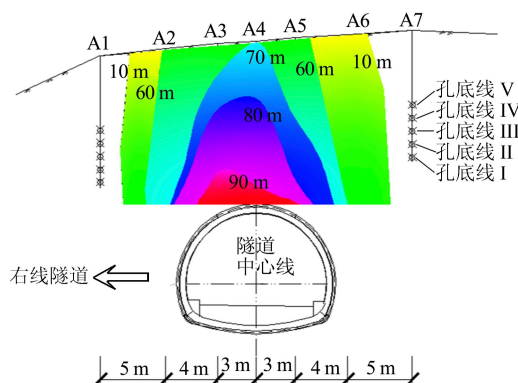


图 8 岩体竖向变形云图

Fig.8 Nephogram of rock mass vertical distortion

5 结 论

(1) 掌子面距监测断面的距离对监测断面围岩变形速率有重要影响, 掌子面通过监测断面前后约 $-1.0 \sim 1.0$ 倍洞径距离时, 发现围岩变形速率较大, 在此区间, 围岩竖向位移发生量约占总沉降量的 70%。此后, 变形速率逐渐减小, 直至为 0。

浅埋隧道周围岩体的竖向变形、地表变形二者趋势一致, 距隧道轴线 0.5 倍洞径以内, 竖向位移差异明显, 且在隧道开挖洞径范围内竖向位移随深度的增加而增加, 但地表沉降变形与隧道拱顶围岩竖向变形最大差值在 30 mm 范围内, 松动区域延伸至地表, 围岩压力为松散压力。

(2) 轴向上, 隧道掌子面位置的变化, 围岩竖向位移经历了微小鼓起区域、微小沉降区域、沉降剧增区域 (该区域的沉降值约占总沉降值 50%~60%, 累计沉降已经超过 70%)、沉降基本稳定区域。在隧道横向, 变形最大点在拱顶附近, 并以该点为中心向周围扩展, 且向两侧的扩散梯度大于向地表的扩散梯度, 竖向位移近似正态分布曲线, 距隧道中线 10m 以外时, 则位移不足 10 mm。

(3) 当掌子面开挖到监测断面位置时, 围岩竖向位移量已完成最终沉降变形量的 25%。如果采用多点位移计进行洞内量测围岩内部位移, 位移的损失将达 25%以上。

参 考 文 献

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s. n.], 1969: 225—290.
- [2] 尚岳全, 王清, 蒋军, 等. 地质工程学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] 赵玉光. 地下工程开挖与支护安全监控量测及地质灾害动态预测与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(3): 36—40.
ZHAO Yu-guang. Field monitor measuring for the safety of excavating and supporting in underground engineering and forecast and prevention for geological hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(3): 36—40.
- [4] 徐林生. 通渝隧道进口施工中的现场监控量测研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(2): 35—37.
XU Lin-sheng. Monitoring during the access construction of Tongyu highway tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(2): 35—37.
- [5] 蒋树屏, 赵阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3460—3464.
JIANG Shu-ping, ZHAO Yang. Study on monitoring and back analysis for road tunnel with complex geology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3460—3464.
- [6] 孙新民, 孙红月, 严细水. FBG 传感器在量测围岩内部位移中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3847—3851.
SUN Xin-min, SUN Hong-yue, YAN Xi-shui. Application of FBG sensor to internal displacement monitoring of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3847—3851.
- [7] 施成华, 彭立敏. 浅埋隧道开挖纵向地表变形预测及其基本规律[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 73—77.
SHI Cheng-hua, PENG Li-min. Prediction of ground surface deformation in longitude due to tunnel excavation and its basic regularization[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 73—77.