

深埋山岭隧道变形规律特征研究

文 / 刘文拿 中铁十一局集团第二工程有限公司

摘要: 本研究以某隧道为例,采用现场监测与数据分析的方法,对隧道施工过程中地表沉降、拱顶下沉及周边收敛的变化进行实时监测,并结合监测数据对围岩变形进行了分析。研究表明,隧道在施工初期围岩变形速率较快,最大地表沉降量达20mm,拱顶下沉和周边收敛最大分别为15mm和14mm。通过初期支护和超前支护的组合,隧道变形在后期趋于稳定,表明支护措施有效控制了围岩变形,保障了施工安全。本研究为类似隧道工程的支护设计和施工提供了参考依据。

关键词: 深埋隧道; 围岩变形; 支护结构; 地表沉降; 拱顶下沉

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.01.050

Study on the Deformation Characteristics of Tunnels Deeply Buried in Mountain Ranges

文/LIU Wenna China Railway 11th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd.

Abstract: This study focuses on a specific tunnel project, utilizing field monitoring and data analysis methods to conduct real-time monitoring of surface settlement, vault subsidence, and convergence of the surrounding rock during tunnel construction. By examining the monitoring data, the deformation of the surrounding rock was analyzed. The results indicate that the deformation rate of the surrounding rock was relatively fast at the initial stage of tunnel construction, with a maximum surface settlement of 20mm, and maximum vault subsidence and convergence of the surrounding rock reaching 15mm and 14mm respectively. Through the combined use of primary support and advance support, the tunnel deformation stabilized in the later stages, demonstrating that the support measures effectively controlled the deformation of the surrounding rock and ensured construction safety. The study provides a reference for support design and construction in similar tunnel projects.

Keywords: deep-buried tunnel; surrounding rock deformation; support structure; surface settlement; vault subsidence

引言

随着我国西部山区交通基础设施建设的推进,深埋山岭隧道在公路和铁路工程中占据着越来越重要的地位。这类隧道通常位于地质复杂的山区,隧道穿越的山岭区域往往伴随着断层、裂隙发育等复杂地质条件,常伴有突水、涌泥等地质灾害,极易发生大规模塌方或围岩大变形,给施工安全带来极大挑战^[1-2]。因此,深入研究山岭隧道在复杂地质条件下的变形与受力规律,对于优化设计、提高隧道支护效率和确保施工安全具有重要意义。

随着基础设施建设的不断推进,西部山区的铁路和公路隧道工程数量逐年增加,尤其是不良地质条件下的隧道施工技术研究上取得了显著进展。许多学者通过理论分析、数值模拟和现场监测等方法,对深埋隧道的围岩稳定性、支护结构受力特征及施工技术进行了深入研究^[3-5]。尽管国内外在隧道施工和支护技术方面已取得一定的成果,但由于山岭隧道的地质条件各异,特别是在深埋大变形隧道中,仍存在着工程实践与理论研究的脱节,许多隧道施工过程中面临的难题仍未得到完全解决。

本文以秦岭南麓低山区某隧道为例,在隧道开挖后对选取特定隧道断面,对其变形和支护结构的受力状态进行了实时监测。通过对隧道施工中围岩变形的监测数据分析,总结了围岩在复杂地质条件下的变形规律。

一、工程概况及地质条件

陕西省某铁路隧道位于为秦岭南麓低山区,隧道全长14公里,不良地质类型多,长距离通风困难,受地形地貌、气候特征、不良地质、涌水量等的影响,施工进度较慢,为其标段重难点隧道工程,同时也是其标段的控制工程。隧道最大埋深约690m,最小埋深约40m,地形复杂,北坡陡峭沟谷发育为“V”形谷,南坡较缓呈“U”形谷,沟谷内多有季节性流水,局部存在常年流水,为I级风险隧道。

本隧道涉及的地层主要为第四系全新统坡积、冲、洪积粉质黏土、细(粗)角砾土、细(粗)圆砾土及卵石土,主要分布于隧道进口及沟谷底部,斜坡表层,厚约1~10m不等。隧道范围内地质构造复杂、新构造运动强烈、应力高度集中、多次岩浆侵入、埋深大的地质环境,存在高地应力现象,软质板岩岩体可能发生大变形。软岩变形风险分级为I级。地下水发育丰富,断层带和节理内富含裂隙水,存在较大的突水、涌水风险,给施工带来挑战,特别是在排水和污水处理方面。

二、隧道支护方案

本文所研究隧道的施工面临复杂的地质条件,支护方案必须兼顾岩溶水、危岩落石、高地应力、突水涌泥等不良地质问题。初期支护采用喷射混凝土、锚杆和钢拱架组合,并针对岩溶发育段进行注浆加固和大管棚支护,确保围岩稳定。在高地应力段及断层破碎带区域,

采用超前小导管注浆及管棚支护，并通过超前注浆引排突水，控制地质灾害风险。初期支护采用“先柔后刚”原则，待围岩变形稳定后进行二次钢筋混凝土衬砌，二次衬砌时预留足够的变形空间，以缓解初期支护荷载并防止隧底隆起。针对长距离施工，特别是2号横洞工区的通风问题，设置了长管路压入式通风系统，并加强洞内环境监控，确保施工安全。通过综合的多层次支护和超前防护，隧道施工风险得到有效控制，确保了工程安全与进度。



图1 超前小导管

三、隧道施工方案及监测

(一) 施工方案

本文研究隧道洞口段采用C25混凝土骨架护坡，并设置排水槽防止水害。隧道洞身采用分级围岩施工，其中III级围岩采用台阶法，IV级和V级围岩采用三台阶法，必要时增设临时横向支撑。支护工艺包括喷射混凝土、锚杆和钢拱架，使用湿喷技术保证支护质量。隧道衬砌遵循“仰拱超前、拱墙整体衬砌”的原则，仰拱采用栈桥平台进行全幅一次性施工，二次衬砌使用自行式模板台车。

在防水设计中，隧道采取“防、排、截、堵相结合”的综合防水措施，铺设自粘式防排水板或EVA防水板，并通过施工缝和变形缝防水处理，确保防水系统的可靠性。针对长距离施工，隧道采用长管路压入式通风，确保洞内空气质量符合安全标准，保障施工顺利进行。

(二) 隧道断面监测

现场监控测量是监视围岩稳定状态、修正初期支护参数、判断二次衬砌施作时机和及时调整施工方法的重要手段，亦是保证安全施工、提高经济效益的重要条件，本隧道必须按照《铁路隧道监控测量技术规程》^[6]的要求，实施动态设计、施工。隧道支护变形监测内容涉及以下项目：1) 地表沉降监测；2) 拱顶下沉变形监测；3) 周边收敛变形监测。本次监测在研究隧道出口正洞设置59个监测断面，根据测点位置的地质环境如围岩等级等确定观测天数。不同监测项目所选监测断面位置不同。

隧道施工过程中，监测方法主要采用自动化监测与人工定期监测相结合的方式。针对沉降及收敛等关键指标，采用高精度监测设备进行实时监控。具体监测设备包括沉降变形监测仪和收敛仪等，用于隧道不同部位的应力、变形和位移测量。自动化监测系统能够对隧道拱顶、侧壁和底板进行24小时不间断监测，确保任何变形或应力变化能够在第一时间被发现。人工监测主要用于重点部位的补充检查和突发状况的应急处理，监测人员通过定期巡查，对设备数据进行校核并进行现场记录。此外，监测设备布置时需结合隧道地质情况，尤其是在在

断层破碎带、软岩区域等不良地质条件下，增加设备监测频率和密度，以确保施工过程中的安全与支护设计的合理性。隧道沉降变形观测次数如表1所示。

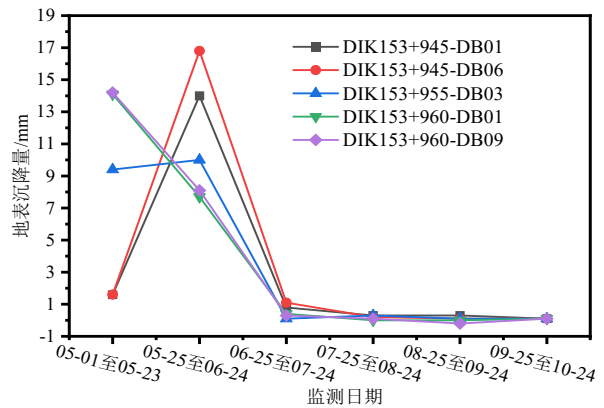
表1 隧道沉降变形观测频次表

观测阶段	观测期限	观测频次	平行观测频次
仰拱（底板） 施工完成后	第1个月	1次/周	1次/月
	第2~3个月	1次/2周	1次/月
	3个月以后	1次/月	1次/3月
无砟轨道 铺设后	第1~3个月	1次/月	1次
	4~12个月	1次/3月	/
	12个月以后	1次/6月	/

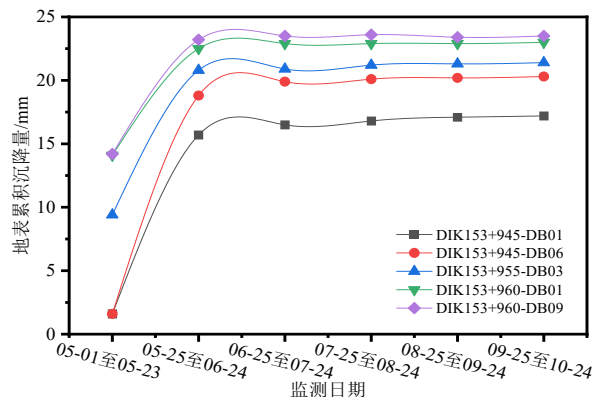
四、隧道支护变形规律分析

(一) 地表沉降监测

据图2的地表沉降历时曲线分析，隧道施工初期（05-01至06-24），各监测点的沉降量较小，最大沉降值约为5mm，沉降速率较慢，表明围岩变形在初期支护下得到一定控制。中期（06-25至08-24），沉降速率显著加快，尤其是DIK153+955-DB03和DIK153+960-DB09的沉降量较大，分别达到15mm和18mm，反映出围岩应力释放加剧，施工进入地质条件较差区域。后期（08-25至10-24），沉降速率逐渐减缓，沉降量趋于稳定，表明围岩变形趋于平衡，最大沉降量稳定在20mm左右。总体来看，地表沉降随施工逐步累积，监测数据表明支护措施对围岩变形起到了有效控制作用。



(a) 地表沉降量

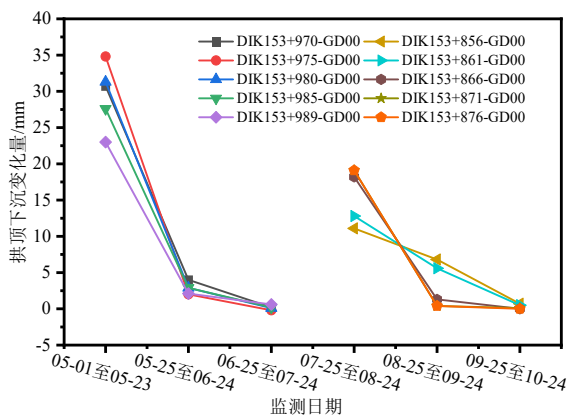


(b) 地表累积沉降量

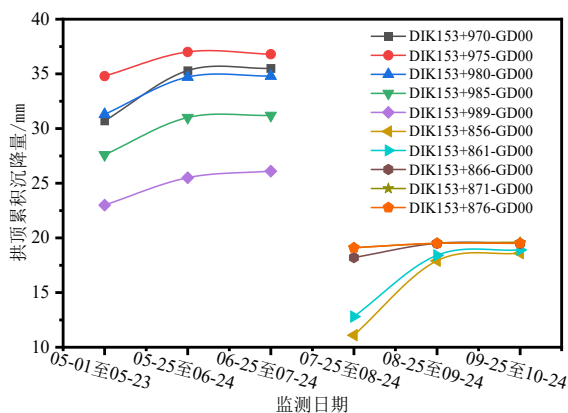
图2 地表沉降历时曲线

(二) 拱顶下沉变形监测

由图3可知,隧道施工过程中,拱顶下沉逐渐累积。施工初期(05-01至06-24),拱顶下沉较缓,各监测点下沉量在2-5mm范围内,表明初期支护有效,围岩变形较小。中期(06-25至08-24),拱顶下沉速率加快,尤其是DIK153+960-DB03监测点下沉量增至12mm,显示出隧道穿越断层破碎带时拱顶变形加剧。后期(08-25至10-24),拱顶下沉逐渐趋于稳定,最大下沉量约为15mm,说明支护措施有效控制了围岩变形,隧道拱顶的稳定性得到提升。总体而言,拱顶下沉量随着施工逐步累积,但在支护措施下得到了有效控制。



(a) 拱顶下沉变化

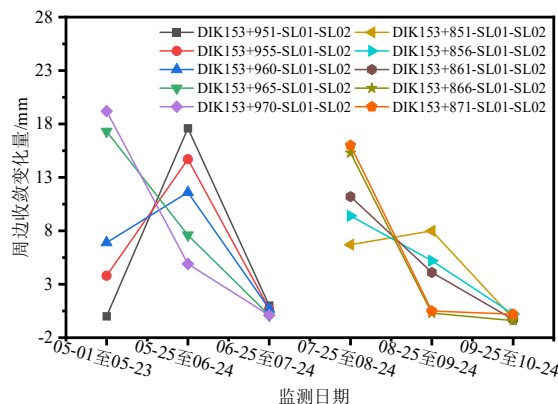


(b) 拱顶累积沉降量

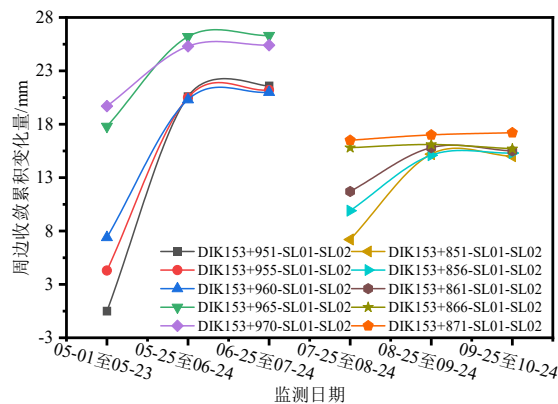
图3 拱顶下沉历时曲线

(三) 周边收敛变形监测

图4展示了研究隧道施工过程中,不同监测点的周边收敛情况。从图4可以看出隧道施工过程中,周边收敛量逐渐累积。初期(05-01至06-24),各监测点的收敛量较小,保持在2-4mm范围内,表明初期支护有效,围岩变形较为平稳。中期(06-25至08-24),周边收敛速率加快,特别是DIK153+960-DB06监测点,收敛量增至12mm,显示出该区域围岩稳定性较差,应力释放加剧。后期(08-25至10-24),周边收敛趋于稳定,最大收敛量为14mm,表明支护措施逐步发挥作用,围岩稳定性显著提升。总体而言,周边收敛量在施工过程中不断累积,但支护措施有效控制了变形,保障了施工安全。



(a) 周边收敛变化



(b) 周边收敛累积变化

图4 周边收敛历时曲线

结论

通过对秦岭南麓低山区某隧道支护结构进行变形监测分析,主要结论如下:

(1) 研究隧道在施工初期沉降量较小,随着施工深入,沉降速率加快,最大沉降量约为20mm,表明在复杂地质条件下,围岩应力释放显著,需加强支护。

(2) 初期沉降速率较低,最大下沉量约为15mm,说明初期支护措施对拱顶变形的控制较为有效,后期沉降逐渐趋于稳定。

(3) 隧道施工中,周边收敛在施工中期加快,最大收敛量达到14mm,后期随着支护加强,收敛速率显著减缓,表明支护结构逐步稳定,确保了围岩的整体稳定性。

参考文献

[1] 陈楠, 赵永辉, 王海, 等. 长大深埋隧道勘察中的综合地球物理方法应用研究[J/OL]. 地球物理学进展, 1-13.
 [2] 姜启武, 黄明, 陈志杰, 等. 深埋隧道掌子面前方地层三维渗流场解析及涌水量预测分析[J/OL]. 工程地质学报, 1-9.
 [3] 邓祥辉. 考虑外水压力的山岭深埋隧道变形分析[J]. 铁道建筑, 2011, (04): 70-72.
 [4] 刘文艺. 深埋山岭隧道节理发育对围岩稳定性影响数值分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(05): 249-250.