

# 黄土隧道工程问题调查分析

吉武军

(中铁七局集团第三工程有限公司, 陕西 咸阳 712000)

**摘 要:** 以已建的 20 余座黄土隧道为背景, 调查分析了黄土隧道典型的工程地质和水文地质条件, 总结了相应的支护方案和施工方法以及存在的工程问题, 并进行了原因分析。结果表明: 塌方是黄土隧道的主要工程问题, 隧道周围汇水长廊的形成是黄土工程问题产生的主要原因, 隧道进出口段和地质条件发生突变的地层是工程问题发生的主要部位。

**关 键 词:** 黄土隧道; 支护措施; 施工方法; 塌方; 汇水长廊

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Investigation and analysis of engineering problems for loess tunnels

Ji Wu-jun

(The Third Engineering Co., Ltd., China Railway Seventh Group, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** In light of the built loess tunnels, the engineering geology and hydrogeological conditions have been investigated and analysed. Some support measures and construction methods have been summarized. Meanwhile the engineering problems for loess tunnels have been pointed out. It is shown that the collapse is the main project problem. The main cause making engineering problems is the gather water corridor around tunnels. The main positions of destruction is import and export segments and the stratum in which the geological conditions would be changed suddenly.

**Key words:** loess tunnel; support measures; construction methods; collapse; gather water corridor

### 1 引 言

近年来, 随着我国基础建设的蓬勃发展, 穿越黄土的高等级公路、铁路、地铁以及输水输气隧道将越来越多。黄土在甘肃、宁夏、青海、陕西、山西、河南等地区分布广泛, 由于其具有显著的结构性和强烈的水敏性, 使得其工程性质较为特殊, 是工程界和学术界关注的焦点之一。虽然黄土隧道在我国的工程实践和研究已进行了半个多世纪, 但其理论研究远远滞后于工程实践, 还没有形成真正考虑黄土特性的设计方法和建造理念。目前, 黄土隧道的设计和施工仍处于一个经验阶段, 它主要通过借鉴岩石隧道和工程类比的方法进行, 如果说自新奥法诞生以来, 岩石隧道的研究已逐渐走向成熟, 那么对黄土隧道的研究可以说才刚刚起步。大量的黄土隧道在开挖和运营过程中都发生了诸如塌方等严重的事故, 对人民的生命和财产安全构成了极大的威胁。因此, 研究这一课题刻不容缓。不论从什

么角度和用什么方法来研究黄土隧道, 首要的任务应该是紧密结合实际, 调查目前黄土隧道所存在的工程问题, 进而有针对性地去认识黄土隧道围岩变形发展机制, 指导日后的黄土隧道建设。

基于上述的考虑, 本文以已建的 20 余座黄土隧道为背景<sup>[1-12]</sup>, 调查分析目前黄土隧道所处的典型工程地质和水文地质特征、支护方案和施工方法以及存在的工程问题并进行原因分析, 最后给出几点建议和进一步深入工作的思路。调查的黄土隧道包括: 军都山洞室、邛山隧洞、天公路隧道、祁家大山隧道、七道梁公路隧道、六盘山公路隧道、坡儿川隧道、新松树湾隧道、羊马河隧道、关路坡隧道、翅膀沟隧道、万家寨引黄工程、七楞山隧道、土家湾隧道、离石隧道、乌鞘岭特长隧道进口端、白虎山隧道、赵家楞杆梁隧道、新庄岭隧道、楼子沟隧道、马家岔隧道、折家坪隧道、黄家山隧道、成王庄隧道、王家庄隧道、山狼岔隧道、燕家岭隧道、沙哈拉崩隧道、石板沟隧道、邱家鄢隧道。其中包

括公路、铁路、输水等各类工程。

## 2 工程地质及水文地质特征

在黄土地层自下而上的  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  变化中,  $Q_1$  黄土因其土质好、埋藏深、厚度小, 故对通常的洞室意义不大;  $Q_4$  黄土因其土质疏松、强度低、故一般在其中不宜建洞; 而  $Q_2$  和  $Q_3$  黄土, 不仅有一定深度, 而且分布广、厚度大、土质较密、湿度较低、强度较高, 是黄土洞室的主要地层。虽然各个黄土隧道的工程地质条件和水文地质差异较大, 但综观本文调查的黄土隧道, 不难发现以下几个地质特征: ①73%的黄土隧道均位于  $Q_2$  地层中, 而在大部分黄土隧道的进出口段均分布有一定厚度的  $Q_3$  黄土层, 发生于进出口段的塌方事故相对较多。  $Q_3$  黄土具有大孔隙和虫孔、高压缩性、强结构性、显著的水敏性, 垂直裂隙发育, 常处于非饱和状态, 易受大气降雨的影响且存在偏压。通常情况下, 洞口段均要加强支护。②平均降水量相对较少, 一般年平均降雨量在 400~650 mm 之间, 地下水主要通过大气降水补给, 主要有浅层滞水和裂隙水, 常见有渗水出露。总体上看, 地下水分布与流量不均匀、不丰富, 但由于黄土层垂直节理发育, 降雨渗漏通道畅通, 导致局部地层出现较大的含水率, 隧道内日渗水量一般在 0.6~880  $m^3/d$  范围内, 其中最大渗水量为 4 800  $m^3/d$ , 见于祁连山黄土隧道(上游相邻庄浪河, 水文地质为第四系松散积层富水区, 受大气降水、高山融雪、上游地下水及农田灌溉水的补给)。土体含水率差异较大, 其值主要集中在 7%~30%。③土-岩交界地层。大部分黄土隧道并非处于单一的黄土地层中, 常见的土-岩交界地层有黄土与砂黏土、黄土与泥岩以及黄土与页岩交界等。神延铁路羊马河隧道、甘肃省陇西县新松树湾隧道都存在这一地质特征, 土-岩交界处水文地质条件将发生显著的变化, 导致交界处含水率明显增大。④地形特征。黄土隧道主要分布于黄土高原梁峁沟谷区或边山地带, 冲沟发育、植被稀疏、地形起伏较大。第四系松散堆积物主要沿古风化剥蚀面堆积, 随着地形的变化其厚度有所不同, 在沟谷处堆积厚度较大, 其他部位较薄。由于冲沟处隧道埋深相对较浅, 地表水汇集下渗, 此时隧道通过土层一般含水率大, 地质情况差, 塌方事故也多。⑤不良地质。黄土陷穴、地裂缝、滑坡、崩塌、湿陷凹地以及采空区是黄土隧道常见的不良地质, 汉寨隧道、羊马河隧道、七楞山隧道陷穴发育, 其底部在洞身或周围出露, 地下水从陷穴进入洞身, 使围岩产生大面积坍塌。

## 3 支护方案及施工方法

目前, 应用于黄土隧道的支护措施主要有以下几种: 挂网、系统锚杆、喷射混凝土、注浆、钢格栅、钢拱架、超前小管棚以及大管棚。通常情况下, 多种支护措施将联合使用, 以确保隧道围岩的稳定性。各种支护措施在工程应用中都取得了丰富的经验。喷射混凝土是隧道工程中应用最为广泛的支护措施, 喷层厚度以 15~25 cm 为宜, 喷层太薄会使围岩变形较大, 喷层易产生裂缝; 黄土隧道中锚杆作用一直以来颇受争议, 学者们进行了专门的研究, 结果表明锚杆对隧道位移控制、确保衬砌受力的合理性以及对塑性区的控制仍有明显的效果, 可以作为主要的支护手段之一。合理的锚杆长度为 2.5~3.0 m, 长度超过 3 m 后锚杆作用就不很明显。注浆主要适应于围岩比较破碎、泥岩夹心、地层含水率丰富的黄土隧道。值得一提的是, 近期出现的水泥-水玻璃双液注浆在加固隧道围岩破碎带中具有显著的效果。超前小管棚注浆是浅埋偏压隧道通常采用的一种超前支护技术, 亦可应用于软弱地层, 其实质是在拟开挖的地下隧道或结构的衬砌拱圈隐埋弧线上, 预先设惯性力矩较大的厚壁钢管, 起临时超前支护作用, 防止土层坍塌和地表下沉, 以保证掘进和后续支护工艺安全运作。超前小管棚的长度约为 3~6 m, 直径约为 4~8 cm, 搭界长度一般不小于 1.2 m, 环向间距约为 30~50 cm, 倾角为  $1^\circ \sim 5^\circ$ 。大管棚一般是针对隧道进出口段超浅埋新黄土设置的一种强力支护, 长度可达 30 m 左右, 直径约 10 cm。钢拱架也是一种强力支护措施, 多见于围岩较破碎和隧道进出口段。

施工方法及开挖方式对围岩稳定性有重要的影响。常见的黄土隧道施工方法有: 先拱后墙法、先墙后拱法、正台阶法、留核心土法、上或下台阶法、中隔法, 具体的开挖方式要根据隧道类型、截面尺寸、埋深、围岩类别、水文条件、施工机械等确定。总体上看, 开挖方式比较混乱, 各种开挖方式下围岩变形发展规律暂不清楚。

## 4 工程问题及原因分析

### 4.1 工程问题

在力、水耦合作用下黄土的变形特性是极其复杂的, 对黄土力学特性上认识的不足必然会导致许多工程问题的出现。在调查研究中, 几乎 85% 的黄土隧道在开挖或者运营过程中都出现了一些工程问题, 本文就这些问题进行详细地描述并分析其产生

的原因,为今后的研究和实践提供有针对性的讨论。

#### 4.1.1 塌方

黄土的水文地质和工程地质特性决定了黄土隧道的主要地质灾害就是塌方,塌方是黄土隧道最为集中的问题,也是破坏性最大、造成损失最为严重的工程问题。塌方事故的发生主要集中在隧道进出口段或地质条件发生突变的地层中。对于浅埋隧道和深埋隧道分别有不同的破坏特征。浅埋隧道(主要位于进出口段)塌方将贯通地表,形成一个大型的漏斗,塌方体体积和隧道的埋深与围岩类别有关,典型的代表是连霍国道主干线土家湾隧道,进口段埋深为31~35 m,地表处发现塌陷,形成长15 m、宽10 m、深1.5 m的椭圆形陷坑,在陷坑周围出现数条环向裂缝,塌方段位于黄土与泥岩分界带附近,由于黄土的垂直节理发育,竖向渗透性强,而泥岩为不透水层,地下水渗流在界面受阻,使之滞留于黄土与泥岩界面附近,加之开挖的隧道成为一集水廊道,改变了原有地下水的渗流方向,加速了地下水向隧道围岩汇集,导致该段黄土成为饱和黄土,土体呈软塑~流塑状,强度较低,灵敏度较高,稍有扰动,就会产生较大变形。深埋隧道一般只发生局部坍塌或调块等破坏现象,相对于前者危害较小。黄土隧道围岩发生塌方前有明显的特征,具体可归纳为以下几点:水文地质条件的变化,如干燥的围岩突然出水、地下水突然增多、水质由清变浊(地下水将断面泥带走)等;拱顶不断掉下小块;围岩节理面裂缝逐步扩大;支护状态变形敲击发声清脆有力,甚至发出声响;围岩或初期支护,拱脚附近的水平收敛率出现反弹,并继续增大。

#### 4.1.2 片帮和衬砌开裂

片帮是黄土隧道开挖后,由于软弱结构面的存在和开挖导致局部应力集中而引起的。衬砌裂缝是黄土围岩不稳定的最初表现,随着收敛变形的增大,初次衬砌将承受越来越大的压力,此时围岩压力逐渐由变形压力向松散压力转化,导致衬砌开裂,格栅或钢拱架发生严重弯曲变形。衬砌开裂的主要原因是衬砌形式与实际压力分布不适应,还可能是由于喷射混凝土在硬化过程中的自身收缩和施工过程中气温变化所致,有纵向裂缝和环向裂缝。山西万家寨引黄工程隧洞,施工完成后多处洞段衬砌管片产生了不同程度的错台和裂缝,神延铁路七楞山隧道、羊马河隧道、关路坡隧道、翅膀沟隧道的初次支护都发生了不同程度的裂缝。可以说,衬砌裂缝是黄土隧道或其他隧道最普遍的工程问题。

#### 4.1.3 渗漏

渗漏是含水率较丰富或大气降雨相对充足的黄土隧道所面临的工程问题。部分黄土隧道在开挖过程中,由于含水层储水和排泄条件差,土体呈可塑或潮湿状,涌水量较大,如山西王家庄隧道、万家寨引黄隧洞、甘肃兰州新庄岭隧道、神延铁路线隧道等。除此之外,有的隧道在开挖当时看基本无水,但建成使用数年后却有了水,甚至水量还相当多。如国道312线静宁至岷口段的祁家大山隧道,修建时水量并不大,施工防排水问题未引起重视,通车一年后出现了多处渗漏与拱脚沉降,并造成拱顶、拱墙、路面裂缝。甘肃的车道岑公路隧道、陕西铜黄高速公路罗圈梁隧道、松树湾隧道也因建成后出现了程度不等的渗漏水问题,造成隧道内较大面积裂缝、滴水等病害,尤其在冬季渗漏水使路面结冰,影响车辆行驶安全。隧道渗水主要通过拱顶、边墙接缝、排水沟孔、墙角部位渗出,渗漏不仅会使围岩自稳能力降低,造成局部地层软化,而且还会侵蚀普通混凝土,改变支护结构的受力特性,给隧道的安全运营带来威胁。

#### 4.1.4 “豪华”支护

“豪华”支护是对黄土隧道围岩稳定机制没有认识清楚而盲目地追求设计和施工安全的具体表现,浪费资源、且耗时耗工。我国西北部地区近几年将有大量的黄土隧道即将开工,因此,提出这一问题显得格外有意义。

### 4.2 原因分析

隧道周围含水率增大,黄土围岩自稳能力变差(图1)。从隧道周围水力传导系数与距隧道壁的距离关系可以看出,开挖后距洞壁1 m范围内水力传导系数明显增大(图2);从黄土隧道的含水率场看,开挖前黄土地层含水率一般不是很大,围岩处于非饱和状态,开挖一定时间后,在隧道周围将形成一个地下汇水长廊,围岩几乎接近饱和,这是一个普遍的现象。纵观所调查的资料可知,围岩含水率的增大是黄土隧道产生病害的主要原因。地表水(降雨和冲沟水流)渗入和地下水(孔隙裂隙水)转移是围岩水分的主要来源。除此之外,喷混凝土后,黄土围岩将吸收了混凝土中的水分,使含水率增大。黄土体垂直裂隙发育,为地表水入渗提供了良好的渠道,虽然降雨强度不大,但足以使得围岩含水率场发生变化。对于浅埋隧道,地表水是围岩水分的主要来源,连霍国道主干线土家湾隧道在隧道开挖过程中,阴雨连绵,降水较多,大量地表水渗入土层,导致土体的工程性质恶化,发生严重的塌方。

而对于地下水,由于开挖前黄土中的孔隙裂隙水处于一种被封闭的环境中,本身处于平衡状态,是几乎静止的,没有外来压力的情况下,不会产生渗流,而开挖后形成的空间,使周围岩土及孔隙裂隙水失去支撑环境,形成新的渗透边界,破坏地下水的平衡,从而使水分向隧道围岩聚集。研究表明,增湿条件下黄土的结构性将显著降低。由此可见,黄土隧道开挖和运营过程中地下汇水长廊的形成降低了围岩的结构性,从而减弱了围岩自承载能力,导致了诸如塌方、衬砌开裂以及渗漏等工程病害。

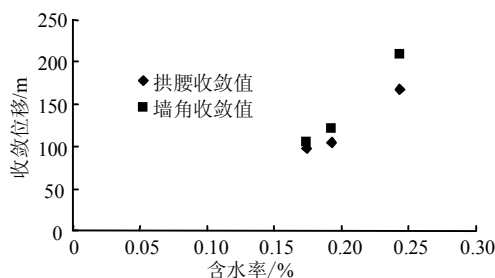


图1 新松树湾隧道典型地段围岩位移测量结果  
Fig.1 The tunnel surrounding rock displacement measurement results of new Songshuwan

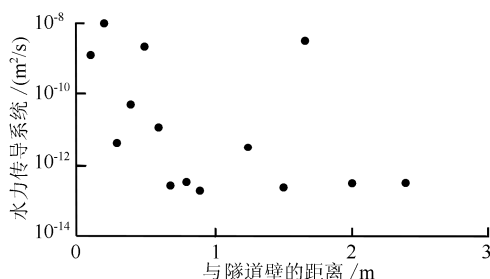


图2 水力传导系数与距隧道壁距离的关系  
Fig.2 The relationship between Hydraulic conductivity coefficient and the distance from the tunnel wall

开挖扰动、支护对围岩结构性的影响是隧道发生塌方的另一原因。现场监测表明,有效的支护体系和合理的开挖方式将显著降低围岩的最终变形量和缩短围岩变形收敛时间。从土体结构性角度考虑,扰动是破坏土体结构性的过程,扰动越大,结构性参数将越小,围岩力学性质将越差。

与此同时,导致黄土隧道产生病害的原因还有很多,如地形条件、不良地质、施工质量、施工进度等。

## 5 结论与思考

虽然每个黄土隧道存在各自不同的工程问题,但求同存异,不难发现:塌方是黄土隧道的主要工程问题;隧道周围汇水长廊的形成是黄土工程问题

产生的主要原因;隧道进出口段和地质条件发生突变的地质是工程问题发生的主要部位。

在认识到黄土隧道目前存在的工程问题后,如何研究和解决这些问题是关键。天然非饱和黄土一般具有结构性,在未受扰动和浸水之前具有较高的结构强度。基于新奥法的理念,在黄土隧道工程中,应尽可能减小对黄土隧道围岩的扰动,保持围岩自身的承载能力。这里的扰动,更确切地说应该是对黄土围岩结构性的破坏,单纯力的作用只是围岩结构性散失的一个因素,而不是全部因素。黄土的结构性可以通过浸水和扰动而充分释放,要保持非饱和黄土的结构性就应该从两个方面出发,即防排水和少扰动。前文调查中出现种种病害,与设计和施工中忽略增湿对黄土隧道围岩稳定的影响不无关系。目前的设计方法并没有考虑存在于非饱和黄土中的孔隙水或者降雨会在开挖后向隧道聚集,使隧道周围一定范围内土体的含水率增大,甚至饱和,这将严重的影响黄土隧道围岩的稳定性。因此,研究力、水耦合作用下非饱和黄土隧道围岩的变形发展规律是具有重要的实践意义。

## 参考文献

- [1] 李宁,朱运明,谢定义,等.大断面饱和黄土隧洞成洞条件研究[J].岩土工程学报,2000,22(6):639—642.
- [2] 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(增刊2):225—230.
- [3] 刘军,田志杰,周建富,等.黄土隧道浅埋段施工技术[J].西部探矿工程,2001,(增刊):204—206.
- [4] 朱伟.黄土隧道塌方处理及原因浅析[J].西部探矿工程,2000,64(3):71—73.
- [5] 朱泽兵,张东明.浅埋、富水、软弱黄土地段隧道施工技术[J].地下空间,2001,21(2):134—137.
- [6] 刘新荣,孙辉,陈晓江,等.黄土连拱隧道二次衬砌的结构分析与监测研究[J].岩土工程学报,2005,27(6):695—697.
- [7] 李庚许,袁德友,汤世明.黄土、砂砾、涌水地层浅埋隧道施工技术[J].铁道标准设计,2005,(9):88—91.
- [8] 温桂安,王德仙.大跨度黄土隧道施工技术[J].铁道建筑技术,2002,(3):35—37.
- [9] 李海波.黄土隧道的开挖[J].公路,1998,(8):12—15.
- [10] 姚冠珠,郝晓琳.黄土质隧道拱部衬砌裂损加固技术[J].铁道工程学报,1998,(3):64—68.
- [11] 阎志雄.浅谈黄土连拱隧道中墙的选择及施工[J].山西交通科技,2005,(2):64—65.
- [12] 计然.黄土隧道的初期支护[J].铁道建筑,1999,(11):15—16.