

Research  
Tunnel Engineering—Article

## 高速铁路大断面黄土隧道建设关键技术

赵勇<sup>a</sup>, 何华武<sup>b</sup>, 李鹏飞<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> China Railway Economic and Planning Research Institute, Beijing 100038, China

<sup>b</sup> China Railway Corporation, Beijing 100844, China

<sup>c</sup> Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 April 2017

Revised 13 July 2017

Accepted 25 July 2017

Available online 15 March 2018

#### 关键词

黄土隧道

围岩分级

地表开裂

设计荷载

三台阶七步开挖法

### 摘要

郑州—西安高速铁路工程的顺利建成极大地提升了中国大断面黄土隧道的建设水平,在设计理论和施工技术两方面都取得了重大进展。本文系统总结了我国高速铁路大断面黄土隧道工程的技术特征与主要难题,包括围岩分级、支护结构设计、地表沉降与开裂控制,以及安全快速施工问题。在此基础上针对各技术难题从设计与施工两个方面阐述了高速铁路大断面黄土隧道建设关键技术。研究表明:大断面黄土隧道围岩分级应以黄土的地质年代为基础,结合塑性指数和含水量两个指标,并考虑埋深影响进行修正;在隧道开挖扰动影响下,洞周滑动趋势面的地表部分因拉应力超过土体抗拉或抗剪强度而破坏,因其直立性较好而形成可见裂缝;大断面黄土隧道围岩压力计算应根据埋深情况分别采用相应的公式进行计算;采用以三台阶七步开挖法为核心的施工技术体系实现了大断面黄土隧道的安全、快速施工,并根据现场试验优化了施工参数,提出了稳定掌子面的工程措施。研究结论和方法对揭示大断面黄土隧道地层及支护力学特性,优化支护结构设计和施工技术参数具有重要意义。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

黄土地层是一种垂直节理发育显著、结构性强的地层,在中国分布广泛,而世界其他国家则分布较少[1–4]。新中国成立以来,我国在黄土地区建设了大量的公路、铁路和引水隧道工程,积累了一定的勘察、设计和施工经验[1]。新建郑州—西安高速铁路客运专线工程(下文简称郑西高铁)线路全长458 km,设计速度为350 km·h<sup>-1</sup>,长距离穿越了黄土地区,出现了28座黄土隧道,总长达53 km,其中,函谷关隧道长7851 m、开

挖面积达174 m<sup>2</sup>,是世界上长度最长、开挖面积最大的黄土隧道。在建设郑西高铁之前,我国铁路黄土隧道开挖断面大都在100 m<sup>2</sup>以下,且施工与运营中出现了较大的地层沉降和衬砌开挖等问题,现有的隧道支护设计方法、施工方案与技术水平无法满足超大断面高速铁路黄土隧道工程建设的要求[5]。依托郑西高铁大断面黄土隧道工程,经过科研院所、建设单位、设计和施工单位等科研与工程技术人员的共同努力、科研攻关,构建了高速铁路大断面黄土隧道建设关键技术体系,有力地支撑了郑西高铁的安全、优质建成通车[1,5–7]。

\* Corresponding author.

E-mail address: [lpf@bjut.edu.cn](mailto:lpf@bjut.edu.cn) (P. Li).

本文结合郑西高速铁路工程,系统阐述中国高速铁路大断面黄土隧道建设关键技术,为今后类似的工程建设提供参考。

## 2. 工程技术难题

中国高速铁路黄土隧道多采用单洞双线隧道方案,具有开挖断面特大、黄土地段长、沉降控制要求严格和建设工期紧等工程特征,在建设中存在如下技术问题[1,8-13]。

### 2.1. 大断面黄土隧道围岩分级

围岩分级是支护结构设计的基础,现有黄土隧道围岩分级方法基于小断面黄土隧道的力学机制、变形特征和物理力学特性。隧道工程具有显著的尺寸效应,高速铁路大断面黄土隧道地层变形机制不能简单套用小断面黄土隧道的研究成果,需要对其加以改进或修正。因此,有必要研究大断面和超大断面黄土隧道的围岩分级,为高速铁路大断面黄土隧道支护结构设计奠定基础。

### 2.2. 适用于黄土隧道的支护结构设计

黄土隧道复合衬砌的基本构成与常规山岭隧道相同,但根据我国黄土隧道建设的工程经验,作为初期支护重要组成部分的系统锚杆的力学机制和作用效果一直存在很大的争议[10],同样黄土隧道设计荷载确定,型钢钢架与格栅钢架的作用机制和适用条件等与高速铁路大断面黄土隧道的支护结构设计直接相关的问题都亟待开展系统深入的研究[11]。

### 2.3. 地表沉降与开裂控制

黄土隧道属于典型的土质隧道,围岩稳定性差,且大都埋深较浅,开挖过程中往往会引起较大的地层沉降和地表开裂,危及隧道结构本身和周边既有建(构)筑物的安全,尤其对于高速铁路大断面黄土隧道,如何有效地控制地层沉降和地表开裂是摆在工程建设者面前的突出难题[14]。

### 2.4. 超大断面黄土隧道安全快速施工技术

当围岩条件较差时,我国大断面隧道多采用交叉中隔壁法(CRD法)、中隔壁法(CD法)或双侧壁导坑法等分部开挖法,通过增加临时仰拱或竖向支撑将大断面分隔为多个小断面,施工工序繁多,节点连接工艺要求

高,不便于机械化作业,施工效率低,进度慢[15-20]。以三车道公路隧道(开挖宽度为15 m)为例,采用CD法和双侧壁导坑法施工的月进度分别约为45 m和30 m,而普通的铁路双线隧道采用CRD法施工的月进度约40 m[1]。

较之普速铁路黄土隧道,郑西高速铁路大断面黄土隧道开挖面积高达174 m<sup>2</sup>,开挖宽度达15 m,且工期要求紧。建设如此大规模的大断面黄土隧道,如何在保证隧道结构安全性和建设经济性的前提下实现快速施工是工程技术人员必须解决的技术难题[1]。

## 3. 设计关键技术

### 3.1. 黄土隧道围岩分级

基于隧道围岩分级关于黄土地层的既有认识,综合考虑影响围岩力学性质的程度、参数的变异性及获取的难易性等方面,比较黄土的各项参数,确定黄土隧道围岩的分级思路及分级指标:以黄土的时代成因为基础,以塑性指数和含水率两个指标为重点,并对埋深影响进行修正,然后给出主要设计指标[1]。

以既有隧道围岩分级为基础,笔者对黄土隧道围岩进行新的分级,如表1所示。值得注意的是,表1中对Q<sub>3</sub>砂质黄土取11.0%的界限含水量,这是因为:实践经验表明,大多数Q<sub>3</sub>砂质黄土的含水量在11.0%左右及以下,且当含水量大于11.0%之后力学性质将会显著变差,故将按这个统计得出的界限含水量作为分级指标。

### 3.2. 地层变形特征与地表开裂机制

#### 3.2.1. 地层变形特征

(1) 变形量大,持续时间长。对郑西高铁大断面黄土隧道地层变形进行了现场监测,多数隧道的地表沉降和隧道洞内变形大于100 mm,而最大地表沉降和隧道洞内变形则达600 mm。郑西高铁多座隧道监控量测资料表明:在开挖初期3~4 d洞内收敛较为明显,随后以1 mm·d<sup>-1</sup>的速度继续收敛,持续时间约20~30 d,即隧道支护封闭后趋于稳定。经过支护封闭后的黄土浅埋段隧道的地表沉降变形在降雨期间仍比较明显,其沉降量可达1~3 mm·d<sup>-1</sup>。

(2) 变形发展快,破坏具突然性。Q<sub>3</sub>、Q<sub>4</sub>黄土被称为新黄土,多具有大孔隙和垂直节理发育的特性,土质松散,含水率多在5%~15%,通常分布于30~50 m深度的地表浅层。受其大孔隙和垂直节理发育特性的影响,

表1 黄土隧道围岩分级

| Classification | Type of loess       | Water content   | Main engineering geological conditions of surrounding rock                     | Stability state after excavation of surrounding rock  | Elastic longitudinal wave velocity in surrounding rock, $v_p$ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )   |         |
|----------------|---------------------|---|--|---|---|---------|
| IV             | IVa                 | Q <sub>1</sub> clayey loess<br>Q <sub>2</sub> clayey loess                              | —<br>< $w_p$   | Largely hard soil; multiple layers of paleo soil, stable horizon; high calcareous content, localized layer of calcareous concretion; undeveloped joints   | Chip off-falling and small collapse at the arch without support   | 1.5–3.0 |
|                | IVb                 | Q <sub>2</sub> clayey loess<br>Q <sub>1</sub> sandy loess                               | > $w_p$<br>< $w_p$   | Largely hard plastic soil; multiple layers of paleo soil, unstable horizon; relatively low calcareous content in the soil layer, with calcareous concretion distributed sporadically; developed joints      | Chip off-falling and collapse at the arch without support; occasional stability failure of side wall  |         |
| V              | Va                  | Q <sub>3</sub> clayey loess<br>Q <sub>1</sub> sandy loess<br>Q <sub>2</sub> sandy loess | < $w_p$<br>> $w_p$<br>< $w_p$  | Hard–hard plastic neo loess; relatively loose; undeveloped joints<br>Largely hard plastic soil; multiple layers of paleo soil, unstable horizon; low calcareous content in the soil layer; developed joints | Collapsible surrounding rock; large collapse may occur as a result of improper treatment<br>Side wall prone to collapse   | 1.0–2.0 |
|                | Vb                  | Q <sub>2</sub> sandy loess  | > $w_p$  | Hard–soft plastic soil; multiple layers of paleo soil, highly unstable horizon; low calcareous content in the soil layer; developed joints  | Collapsible arch and side wall, with possible large collapse as a result of improper treatment; prone to surface settlement or collapse to surface when buried depth is shallow |         |
|                |                     | Q <sub>3</sub> clayey loess<br>Q <sub>3</sub> and Q <sub>4</sub> sandy loess            | > $w_p$<br>< 11 %  | Hard plastic–soft plastic soil; loose; developed joints   | settlement or collapse to surface when buried depth is shallow  |         |
| VI             | Saturated neo loess |   | Soft plastic–flow plastic soil; largely exhibiting a wiggly and soft structure | Extremely prone to collapse and deformation; prone to surface settlement or collapse to surface   | < 1.0   |         |

Q<sub>1</sub>—Early Pleistocene; Q<sub>2</sub>—Middle Pleistocene; Q<sub>3</sub>—Late Pleistocene; Q<sub>4</sub>—Holocene.

$w_p$  is the water content when the plastic limit  $I_L=0$ .

隧道开挖易造成垂直节理切割形成竖向软弱面，形成隧道施工影响范围内的差异沉降，从而造成地表开裂，严重时诱发隧道塌方。郑西高铁大断面黄土隧道工程经验表明，当隧道穿越浅埋新黄土时，施工中往往会出现较大的地表沉降和纵、横向地表裂缝，且裂缝随着开挖面的向前而发展，在隧道支护结构封闭后才能稳定。

(3) 拱脚稳定性问题突出。黄土地层强度低和垂直节理发育显著的特性会造成隧道开挖支护后，在支护结构拱脚处围岩产生显著的塑性破坏区，具体表现在较大的拱脚沉降，严重时会同拱脚沉降太大而引起隧道塌方，且当隧道开挖断面较大时，拱脚的变形控制对整个隧道的稳定性更为关键。

### 3.2.2. 地表裂缝形成机制

(1) 黄土地层的结构性特征。黄土地层垂直节理发

育的结构性特征会出现较多的竖向层面，隧道开挖势必扰动地层，在洞周产生因变形过大引起的松动，尤其隧道开挖断面较大而埋深较浅时开挖隧道会引起上方地层产生显著的差异沉降，从而诱发地层开裂。

(2) 黄土地层力学性质的各向异性。在郑西高铁贺家庄隧道出口洞顶场地，从近11 m深的人工探坑内侧壁取原状土样测试黄土的各向异性，同一高度取样四块（前后左右各一），开展室内竖直和水平方向试件制作与试验。试验结果整理归纳为：水平方向和竖直方向的压缩模量 $E_{1-2}$ 的平均值分别为6.83 MPa和5.82 MPa；竖向湿陷系数和横向湿陷系数的平均值分别为0.026和0.019；三轴试验和直接剪切试验表明，横向黏聚力均大于竖向黏聚力，而内摩擦角变化不大。因此，与一般土相比，黄土具有比较大的抗拉强度、更显著的变形及力学各向异性。黄土竖直与水平方向压缩模量差15%；

黄土竖向与水平方向黏聚力差10%，分别为21.2 kPa和23.7 kPa。

### 3.3. 黄土隧道设计荷载

#### 3.3.1. 现场监测结果

根据函谷关DK270+525断面（浅埋V级围岩）和贺家庄DK242+960断面（深埋IV级围岩）围岩压力的时空特征（图1）可以看出：

（1）黄土隧道围岩压力时程变化基本可以概括为快速增大、缓慢增大和趋于稳定等三个阶段。其中，快速增大阶段结束后围岩压力监测值往往超过了最终结果的三分之二。不同断面围岩压力发展经历各个阶段的时间有所不同，但多数断面围岩压力监测值在隧道开挖完成后三个月内趋于稳定。

（2）在台阶法施工中，后续开挖支护作业步序对前期监测结果影响十分明显，在上台阶开挖后，如果支护及时且迅速封闭成环，开挖引起的应力释放将使初期支护受到较大的地层压力，如果下台阶开挖后支护施做不及时，那么势必造成上部初期支护较长的悬空时间，增大了上部黄土地层的松动区域，加剧了围岩压力的发展。因此台阶法施工时应控制上部支护结构的悬空时间，及时施做下台阶支护结构。

（3）与常规岩质隧道不同，黄土具有明显的流变特征，具体表现在黄土隧道围岩压力变化持续时间长，收敛稳定性慢，尤其高速铁路大断面黄土隧道这种流变特性更为显著，因此高速铁路大断面黄土隧道支护结构设计应考虑长期流变荷载的影响。

#### 3.3.2. 设计荷载

综合分析现场监测结果与各种理论模型的计算结

果，笔者提出黄土隧道围岩压力作用模式，如图2所示。图中， $q$ 为竖向围岩压力， $e_1$ 和 $e_2$ 为水平围岩压力，取值应根据埋深情况分深、浅埋分别进行计算。

（1）深埋情况。深埋黄土隧道围岩压力计算采用修正的Terzaghi公式，具体计算方法如下：

$$q = \frac{b\gamma - c}{\lambda \tan \varphi} \quad (1)$$

$$e_1 = q \tan^2(45^\circ - \varphi/2), e_2 = (q + \gamma H) \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (2)$$

式中， $\gamma$ 为围岩重度（ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ）； $\lambda$ 为侧压力系数； $\varphi$ 为围岩内摩擦角（ $^\circ$ ）； $b$ 为洞顶松动宽度的一半（m）； $c$ 为围岩凝聚力（kPa）； $H$ 为隧道开挖高度（m）。

（2）浅埋情况。浅埋黄土隧道围岩压力计算采用规范建议公式，具体计算方法如下：

$$q = \gamma h \left( 1 - \frac{\lambda h \tan \theta}{B} \right) \quad (3)$$

$$e_1 = \lambda \gamma h, e_2 = \lambda \gamma (h + H) \quad (4)$$

式中， $B$ 为坑道宽度（m）； $h$ 为隧道顶至地面高度（m）； $\theta$ 为顶板土柱两侧摩擦角（ $^\circ$ ）。其他符号及意义同前。

（3）深浅埋判定。理论推导结果和现场调查结果均表明，老黄土隧道的计算临界深度范围为38.0~45.4 m，深浅埋临界深度取1.36（ $H+B$ ）~1.62（ $H+B$ ）；新黄土隧道的计算临界深度范围为57.4~58.2 m，深浅埋临界深度取2.06（ $H+B$ ）~2.08（ $H+B$ ）。因此，建议黄土隧道的深浅埋分界深度为1.3（ $H+B$ ）~2.1（ $H+B$ ）；新黄土（ $Q_3$ 、 $Q_4$ ）隧道可取上限2（ $H+B$ ）~2.1（ $H+B$ ），老黄土（ $Q_1$ 、 $Q_2$ ）隧道取下限1.3（ $H+B$ ）~1.7（ $H+B$ ）。

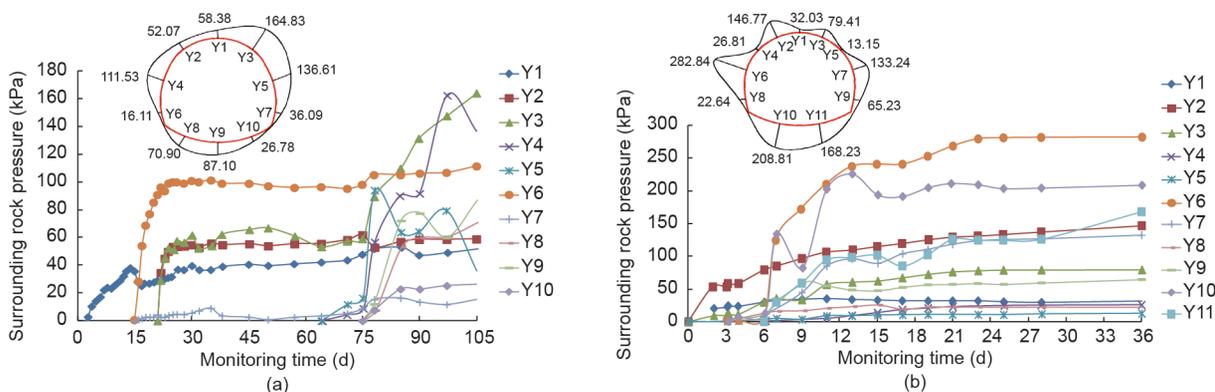


图1. 黄土隧道围岩压力现场监测结果。(a) 函谷关DK270+525；(b) 贺家庄DK242+960。

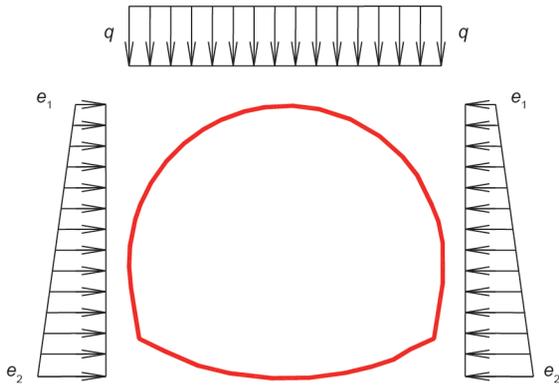


图2. 黄土隧道荷载作用模式。

### 3.4. 支护结构设计参数优化

#### 3.4.1. 系统锚杆

为验证系统锚杆的作用效果,选取郑西高铁函谷关隧道和贺家庄隧道分别开展了深浅埋大断面黄土隧道锚杆力学特性的现场试验研究。经过同等条件下有、无系统锚杆两种情况下的对比试验发现,对于大断面黄土隧道而言,系统锚杆对改善复合衬砌支护结构受力和控制地层变形意义不大,尤其拱部锚杆受力很小,边墙锚杆则受到一定的拉力作用,因此建议大断面黄土隧道在拱部 $130^\circ$ 区域内不设置系统锚杆,该区域以下到拱脚可以布设全长黏结型系统锚杆,长度宜在3.5 m以内。

#### 3.4.2. 钢架适用性

为对比分析型钢钢架和格栅钢架的受力特性及适应范围,选取郑西高铁贺家庄隧道开展了现场对比试验。研究表明,两种钢架控制围岩变形能力基本相当,尤其对控制拱顶下沉能力无显著差异,相对而言,型钢钢架在控制水平收敛方面具有一定的优势,二者所受应力都在设计强度值以内,格栅钢架应力较小,初期支护与围岩间的接触压力分布更为均匀。

#### 3.4.3. 超前支护

超前小导管可以有效地稳定大断面黄土隧道掌子面,必要时可配合管棚施工在侧部临时支撑上加设;管棚在黄土隧道施工过程中作用效果较明显,管棚起到了传递荷载及约束隧道周边围岩变形的作用,建议在有地表沉降控制要求的黄土隧道施工中采用大管棚;而掌子面玻璃纤维锚杆在黄土隧道中,由于其注浆难以达到理想效果,对掌子面前方土体加固作用有限,在黄土隧道中需谨慎使用。

## 4. 施工关键技术

### 4.1. 三台阶七步开挖法

该工法(图3)以开挖弧形导坑预留中部核心土为基本指导思想,将开挖面划分为上、中、下三个台阶,七个作业面,各部分开挖、支护平行流水作业,实现了高速铁路大断面黄土隧道的安全快速施工。该工法具体特点如下:

(1) 作业空间大,便于机械化展开,实现了多工作面平行流水作业,工效高。

(2) 适应地质条件变化能力强,可以及时、灵活地转换作业步序,优化台架施工参数,必要时及时封闭初期支护。

(3) 能够适应各种开挖跨度和断面型式,无临时支撑,不增加造价,工程经济性好。

(4) 充分利用中部核心土,保证开挖面的稳定,利用弧形导坑开挖可以方便及时施做初期支护。

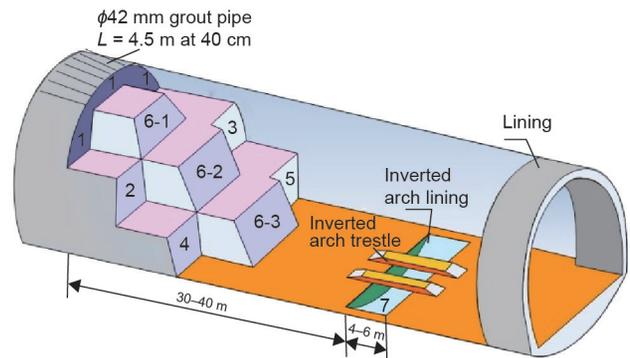


图3. 三台阶七步开挖法。

### 4.2. 台阶施工参数优化

(1) 台阶长度。三台阶七步开挖法台阶长度应适中,过长会影响初期支护的闭合时间,过短则会造成洞内纵向破裂面超过掌子面,引起洞顶土体下滑和开挖面失稳破坏。郑西高铁大断面黄土隧道的工程经验表明,三台阶七步开挖法上台阶宜3~5 m,中、下台阶宜4~6 m;对于稳定性较好的无水老黄土,为方便施工,台阶长度可适当减小。

(2) 台阶高度。三台阶七步开挖法台阶高度也要严格控制。上台阶在满足施工机械化作业的前提下要尽可能得低,避免上台阶过高造成滑移体范围太大,不利于掌子面的稳定,而且上台阶过高时所需小导管的长度也加大,会造成施工不便;同时中、下台阶的高度要合理

分配。根据郑西高铁张茅隧道的工程经验,上台阶高度不小于上台阶宽度的0.3倍,一般取3~4 m;中、下台阶高度平均分配,一般取3~3.5 m。

(3) 台阶错台距离。郑西高速大断面黄土隧道施工经验表明,随台阶错台距离的增加,拱顶、拱脚下沉增大,但增加量不大;而边墙收敛减小且数量较大。工程经验表明,中、下台阶有一定错台时有利于支护结构的稳定,而且变形也在允许范围内,但错台长度不宜长,宜2~3 m。

(4) 合理开挖进尺。开挖进尺的大小对大断面黄土隧道施工变形的影响很大,研究表明,进尺从1 m增加到2.4 m时,拱部下沉增加60%以上,水平收敛增加70%以上,钢架最大应力增加19%,且接近屈服极限。郑西高速大断面黄土隧道工程实践经验表明,IV级老黄土,上台阶一次开挖进尺宜控制在1 m以内,中、下台阶一次开挖进尺1.5 m左右,仰拱一次开挖进尺宜2~3 m。对于新黄土或砂质黄土,建议进尺取老黄土的一半。

#### 4.3. 稳定掌子面措施

(1) 预留核心土。郑西高铁大断面黄土隧道工程实践经验表明,上台阶核心土长度宜与上台阶长度相同,即3~5 m,高度为1.5~2.5 m,顶面宽度为上台阶开挖宽度的1/3~1/2,即3~5 m;中、下台阶核心土长度宜4~6 m,宽度为台阶宽度的1/3~1/2。

(2) 开挖面尽早封闭。开挖面尽早封闭可以有效地稳定掌子面,尤其在富水黄土隧道施工中,应在开挖后尽快初喷5 cm厚混凝土,以控制地层松弛,防止开挖面土体剥离,从而保证作业面的稳定。郑西高速大断面黄土隧道工程实践经验表明,隧道开挖后的2 h是控制掌子面稳定性的关键,有些隧道通常在开挖后至少5~6 h后才能喷上混凝土,这对砂质黄土和富水黄土隧道初期位移的控制不利。

(3) 施作超前小导管。郑西高铁大断面黄土隧道工程实践经验表明,超前小导管一定要穿过掌子面前方的破裂面1 m左右,小导管长度按上台阶高度加1 m来考虑,即4~5 m。在拱部120°范围施作的超前小导管,对大断面黄土隧道而言应当说是一种技术经济效益比较好的支护手段。在黄土中可以采用直接打入方式来快速施作超前小导管。由于超前小导管主要起梁的作用,这种打入方式并不影响其承载能力。必要时同样可以采用钢管压浆来加强对拱部的预支护效果。

## 5. 结语

(1) 综合考虑影响围岩力学性质的程度、参数的变异性及获取的难易性等方面,比较黄土的各项参数,确定黄土隧道围岩的分级思路及分级指标:以黄土的时代成因为基础,以塑性指数和含水率两个指标为重点,并对埋深影响进行修正,对黄土围岩进行了分级。

(2) 黄土地层垂直节理发育的结构特征会出现较多的竖向层面,隧道开挖势必扰动地层,在洞周产生因变形过大而引起的松动,尤其隧道开挖断面较大而埋深较浅时开挖隧道会引起上方地层产生显著的差异沉降,从而诱发地层开裂。

(3) 提出了大断面黄土隧道深浅埋分界值,深埋黄土隧道围岩压力计算宜采用修正的Terzaghi公式,浅埋黄土隧道围岩压力计算宜采用规范建议公式。

(4) 三台阶七步开挖法以开挖弧形导坑预留中部核心土为基本指导思想,将开挖面划分为上、中、下三个台阶,七个作业面,各部分开挖、支护平行流水作业,实现了高速铁路大断面黄土隧道的安全快速施工。

## Compliance with ethics guidelines

Yong Zhao, Huawu He, and Pengfei Li declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Zhao Y, Li G, Yu Y. Loess tunnel engineering. Beijing: China Railway Publishing House; 2011. Chinese.
- [2] Wen BP, Yan YJ. Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China. Eng Geol 2014;168:46–58.
- [3] Jefferson IF, Mavlyanova N, O'Hara-Dhand K, Smalley IJ. The engineering geology of loess ground: 15 tasks for investigators—the Mavlyanov programme of loess research. Eng Geol 2004;74(1–2):33–7.
- [4] Zhu TX. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. Geomorphology 2012;153–154:144–55.
- [5] Li P, Zhao Y, Zhou X. Displacement characteristics of high-speed railway tunnel construction in loess ground by using multi-step excavation method. Tunn Undergr Space Technol 2016;51:41–55.
- [6] Zhang D, Fang Q, Li P, Wong L. Structural responses of secondary lining of highspeed railway tunnel excavated in loess ground. Adv Struct Eng 2013;16(8):1371–9.
- [7] Li P, Zhang D, Zhao Y, Zhou Y, Fang Q, Zhang X. Study of mechanical characteristics of secondary lining of large-section loess tunnel. Chin J Rock Mech Eng 2010;29(8):1690–6. Chinese.
- [8] Zhao Z, Xie Y, Yang X, Li Y. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess. China J Highw Transp 2004;17(1):66–9. Chinese.
- [9] Lai H, Zheng J, Xie Y. Study on characteristics of surrounding rock pressure of undercut metro tunnel with shallow buried excavation in loess region. J China Railw Soc 2012;34(3):99–104. Chinese.
- [10] Tan Z, Yu Y, Wang M, Yang J. Experimental research on bolt anchorage effect on large-section deep-buried tunnel in loess. Chin J Rock Mech Eng 2008;27(8):1618–25. Chinese.

- [11] Wang M, Guo J, Luo L, Yang J, Yu Y, Tan Z. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high-speed railway. *China Railw Sci* 2009;30(5):53–8. Chinese.
- [12] Singh B, Goel RK, Jethwa JL, Dube AK. Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses. *Eng Geol* 1997;48(1–2):59–81.
- [13] Jiang Y, Yoneda H, Tanabashi Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks. *Tunn Undergr Space Technol* 2001;16(2):99–105.
- [14] Feng SJ, Du FL, Shi ZM, Shui WH, Tan K. Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction. *Eng Geol* 2015;185:105–15.
- [15] Hisatake M, Ohno S, Katayama T, Ohmae Y, Sano S. Effect of the ring-cut excavation method on the restraint of displacements ahead of a tunnel face. *Tunn Undergr Space Technol* 2009;24(5):547–54.
- [16] Jiang A, Li P, Shi H. Shallow depth of the tunnel excavation response research based on CRD method. *Proc Eng* 2011;15:4852–6.
- [17] Negro A. Brasilia metro underground. In: Lambrechts JR, Hwang R, Urzua A, editors. *Big digs around the world. Proceedings of the Sessions of Geo-Congress 98*; 1998 Oct 18–21; Boston, MA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers; 1998. p. 144–65.
- [18] Ng CWW, Hong Y, Liu GB, Liu T. Ground deformations and soil-structure interaction of a multi-propped excavation in Shanghai soft clays. *Géotechnique* 2012;62(10):907–21.
- [19] Sharifzadeha M, Kolivand F, Ghorbani M, Yasrobi S. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground—Niayesh tunnel. *Tunn Undergr Space Technol* 2013;35:178–88.
- [20] Xue FC, Ma JL, Yan L, Zhao YM. Three-dimension FEM analysis of large crosssection tunnel in collapsible loess constructed by CRD method. In: Fratta D, Puppala AJ, Muhunthan B, editors. *GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling and design. Proceedings of the GeoFlorida 2010*; 2010 Feb 20–24; Orlando, FL, USA.