

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 2-0306-05

浅埋大跨小间距黄土隧道支护技术研究

何历超^{1,2}, 王梦恕¹, 李宇杰^{1,3}

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京市首都公路发展集团有限公司, 北京 100161;
3. 北京市地铁运营有限公司 地铁运营技术研发中心, 北京 100161)

摘 要: 以武-西高速公路桃花峪黄土隧道为研究对象, 采用现场试验与数值模拟的方法, 研究格栅和型钢支护结构对浅埋大跨小间距黄土隧道的影响规律。现场试验表明, 施工引起的沉降比较均匀, 格栅支护与型钢支护对控制整体沉降差别不明显。格栅钢架的受力比型钢钢架小且分布更为均匀, 说明格栅钢架受力更为有利。格栅与型钢钢架受力状态相似且都合理。模拟计算表明, 格栅支护与型钢支护相比, 型钢支护的位移更小。较之格栅, 型钢支护拱顶沉降减小 16%~18%, 边墙收敛减小 23%, 拱脚沉降减小 18%。在 V 级黄土隧道中采用双侧壁法开挖大断面隧道, 围岩将发生较大塑性变形。塑性区域发展范围较大, 需及时支护, 格栅支护与型钢支护对塑性发展范围基本一致。

关 键 词: 大断面; 黄土隧道; 格栅支护; 型钢支护

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Supporting technology for shallow large-span neighborhood loess tunnel

HE Li-chao^{1,2}, WANG Meng-shu¹, LI Yu-jie¹

(1. Tunneling and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education; Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Beijing Capital Highway Development Group Co., Ltd., Beijing 100161, China;
3. Beijing Mass Transit Railway Operation, Subway Operation Technology Centre, Co., Ltd., Beijing 102208, China)

Abstract: With the Taohuayu loess tunnel of Wu-Xi expressway as the research object, it use field experiment and numerical simulation methods to research the influence laws of grating supporting and section steel supporting on shallow large-span neighborhood loess tunnel. The field experiment shows that the settlement caused by construction is uniform, and the control overall settlement ability by grating supporting and section steel supporting are similar. The stress of grating is smaller than section steel; and the stress distribution of grating is more uniform than section steel. The stress state of grating is similar to section steel; and they are reasonable. The numerical simulation shows that the displacement of section steel supporting is smaller than grating supporting. Compared with grating, the displacement on top arch of section steel supporting decreases 16%-18%, the convergence on side wall decrease 23%; the displacement on arch skew decrease 18%. Using twin-side heading method to excavate large-span tunnel in V grade loess tunnel, the surrounding rock has large plastic deformation. Plastic regional development range is very large, and it needs timely supporting. The plastic development scope by grating supporting and section steel supporting is similar.

Key words: large-span; loess tunnels; grating supporting; section steel supporting

1 引 言

大跨隧道一般矢跨比较小, 较难形成承载拱。开挖后围岩应力较圆形隧道更大, 塑性区更大, 需要更强的支护体系, 隧道拱脚处应力集中程度大, 需要地基承载力较高。由于跨度较大, 成拱效应所要求的土体厚度加大, 埋设较小时拱效应不能发挥就会产生较大的松弛压力, 拱顶稳定性也随之下降低^[3]。

我国黄土地区覆盖面积达 64 万 km², 占国土面积的 6.6%^[1-2], 从 20 世纪 60 年代开始对黄土隧道进行相关研究, 铁道部、铁科院、中铁隧道局等相关研究单位结合陇海线、宝中线、神延线、神朔线、西延线、朔黄线上的黄土隧道采用现场试验及模拟计算的方法, 对黄土隧道的开挖、设计支护方法等施工技术进行了相关研究^[4-8], 但针对大跨度浅埋黄土隧道工程国内外研究均较少^[9-10], 尤其大跨度浅埋黄土隧道的支护结构问题更是有待进一步进行研

收稿日期: 2012-11-11

第一作者简介: 何历超, 男, 1982 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事地下工程基础理论方面研究。E-mail: lchhe2005@126.com

究。

隧道支护采用的钢架类型基本分为型钢和格栅两种。两种钢架在支护上各有其优缺点。本文主要结合武-西高速公路桃花峪黄土隧道对型钢和格栅两种支护结构采用现场试验与数值模拟的方法进行研究,进一步完善大断面黄土隧道的支护理论及计算方法。

2 工程概况

桃花峪隧道出口段 30 m 范围内,隧道左线与右线间距均小于 5 m,属于典型小间距开挖隧道。桃花峪隧道勘探深度范围内上部为第四系上更新系统黄土状粉土、黄土状粉质黏土,其中表层为非自重湿陷性黄土,具轻微湿陷性,工程性质较差,其下各层呈密实、硬塑状,工程性质好,下部为第四系中更新统地层,工程性质均较好。桃花峪隧道勘探深度范围内均为第四系上更新统稍密~密实状黄土状粉土,孔隙发育,结构松散,强度较弱,工程性质差,围岩级别定为 V 类。勘测期间钻探深度范围内未发现地下水。分布于隧道区地表不良地质为湿陷性黄土,湿陷类型为非自重湿陷性黄土,湿陷等级为 I 级(轻微)。

为了确保试验结果的可比性,对试验段围岩进行了土工试验,结果见表 1。由表可见,格栅与型钢试验段的地质情况基本相同,能保证现场试验较好的对比性。

表 1 格栅与型钢试验段物理力学参数对比
Table1 Physico-mechanical parameters comparison of grating and section steel experimental section

对比	天然密度 (g/cm ³)	天然含水率/%	孔隙比	干密度 (g/cm ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	压缩 系数	压缩模 量/MPa
格栅段	1.781	12.68	0.714	2.709	23.51	27.02	0.041	33.317
型钢段	1.795	11.34	0.677	2.703	34.49	26.61	0.037	36.434

3 现场试验

3.1 试验简介

桃花峪隧道采用双侧壁导坑法进行施工,选取隧道出口段长 30 m 的隧道区间进行现场试验,试验段埋深约 11 m。在试验断面上埋设反光膜片测量位移,埋设钢筋计测量格栅钢架与型钢钢架的应力。拱顶沉降测点布置图见图 1,钢架应力测点布置图见图 2。图中,“WG”表示钢架的外侧应力测点;“NG”表示钢架的内侧应力测点,整个断面埋设 9 对钢筋计。

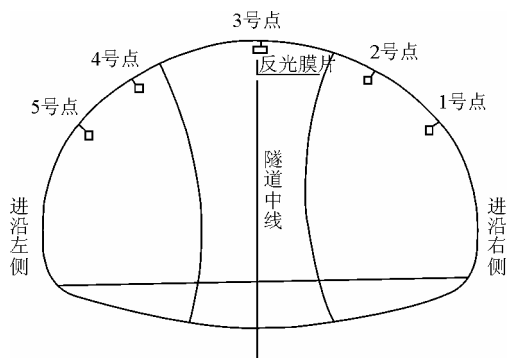


图 1 拱顶沉降测点布置

Fig.1 Arrangement of settlement points on arch top

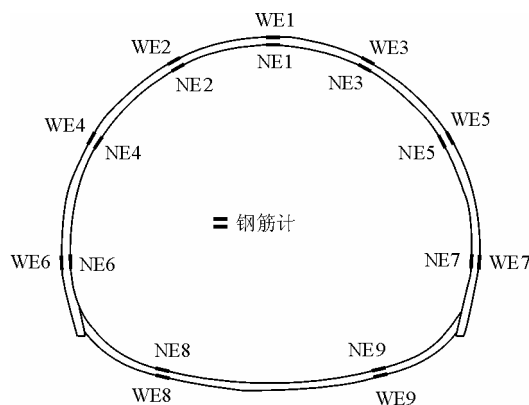


图 2 钢架应力测点布置

Fig.2 Arrangement of stress points on steel frame

断面开挖分两侧导洞和中间核心土三部分。侧导洞分上中下 3 个台阶。台阶长 3 m,初期支护分别进行,两侧洞均设临时钢架竖撑和横撑,做到及时封闭成环。中间核心土开挖作业由上至下分 4 个台阶,并及时施作拱顶钢架和临时横撑及仰拱的钢架。待初期支护收敛后拆除临时钢架竖撑和横撑,施作仰拱和隧底填充(仰拱与隧底填充分次进行),拱墙二次衬砌采用衬砌模板台车一次性灌注,混凝土泵送。施工时两侧导坑错开施工,一侧导坑落后于另一侧导坑 5 m,中间核心土部分开挖初期支护落后于前面两侧导坑开挖面为 10 m。隧道开挖步骤见图 3。

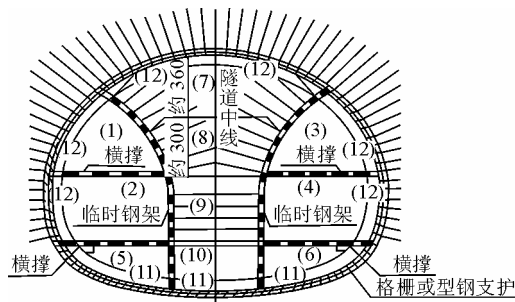


图 3 开挖施工步骤

Fig.3 Excavation steps

3.1 试验结果对比分析

(1) 拱顶沉降

格栅钢架与型钢钢架试验段的拱顶沉降对比时程曲线图见图 4。图中, 字母 XG 表示“型钢钢架试验段”; GS 表示“格栅钢架试验段”; 字母后面的数字为断面的里程编号。试验断面封闭时的拱顶沉降值对比见表 2。由图 4 及表 2 可以得出, (1) 由于现场施工时型钢试验段出现停工现象, 采用格栅支护与型钢支护的沉降相差 15%~35%, 若去除型钢试验段的停工影响因素, 可以认为格栅支护与型钢支护对控制整体沉降差别不明显。(2) 试验段施工拱顶沉降曲线趋势一致。沉降曲线增长趋势平稳无跳跃激增, 说明施工引起的沉降比较均匀, 钢格栅与型钢对沉降的控制方面作用基本相当。

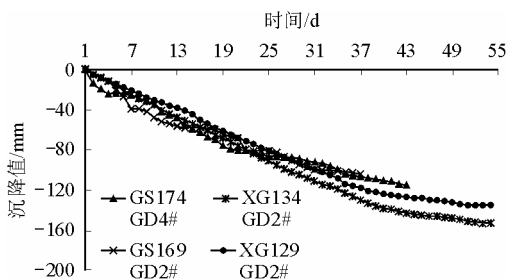


图 4 格栅钢架与型钢钢架试验段的拱顶沉降对比时程曲线

Fig.4 Contrast schedule curve of arch top settlements on grating and section steel frame experimental section

表 2 试验断面封闭时的拱顶沉降值对比
Table 2 Arch top settlement contrast table on closed experimental section

试验段	隧道断面	沉降/mm	
		GD2#	GD4#
格栅钢架段	ZK37+174		-115
	ZK37+169	-104	-130
型钢钢架段	ZK37+134	-153	
	ZK37+129	-135	-151

(2) 钢架应力

格栅与型钢内侧应力对比如图 5 所示, 格栅与型钢外侧应力对比如图 6 所示。由图 5 与图 6 的对比分析可得, (1) 格栅与型钢试验段钢架应力分布都不均匀, 拱部应力普遍大于边墙和仰拱应力。同时, 格栅钢架的受力比型钢钢架小且分布更为均匀, 格栅钢架受力更为有利。(2) 格栅钢架的外侧压应力最大值为 -75.01 MPa, 内侧压应力最大值为 -100.29 MPa, 内外侧的最大拉应力为 5.82 MPa。型钢钢架的外侧压应力最大值为 -93.14 MPa, 内侧压应力最大值为 -100.5 MPa, 内外侧的最大拉应力为 7.05 MPa。格栅与型钢拱架应力均小于规范^[1]中

规定的 Q235 钢的极限强度。(3) 格栅钢架试验段在施工过程中, 钢架除边墙一个测点为较小拉应力外, 其余全部为压应力。型钢钢架试验段在施工过程中, 型钢的拱顶外翼缘一点出现拉应力, 其余全为压应力, 格栅与型钢钢架受力状态相似且都合理。

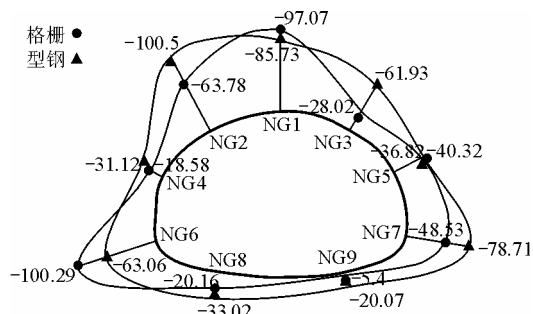


图 5 格栅与型钢内侧应力对比 (单位: MPa)
Fig.5 Inside stresses comparison of grating and section steel(unit: MPa)

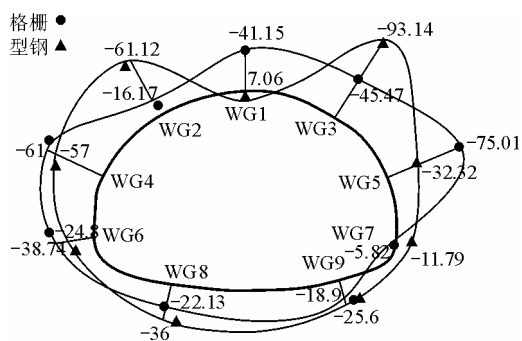


图 6 格栅与型钢外侧应力对比 (单位: MPa)
Fig.6 Outside stresses comparison of grating and section steel(unit: MPa)

综上, 去除型钢试验段的停工影响因素, 格栅支护与型钢支护对控制整体沉降差别不明显。施工引起的沉降比较均匀, 钢格栅与型钢对沉降的控制方面作用基本相当。格栅钢架的受力比型钢钢架小且分布更为均匀, 格栅钢架受力更为有利。

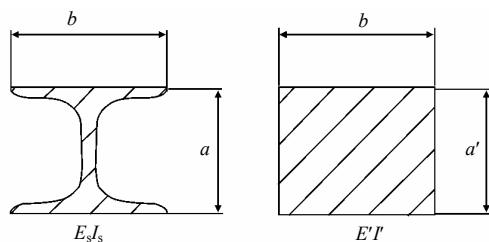
4 数值计算

4.1 计算模型简介

本次模拟计算中围岩采用有限实体单元进行离散化处理。格栅钢架因为对支护组合体刚度贡献小, 格栅钢架组合体的模拟按喷混单独考虑。型钢钢架因为具有相对较强的刚度, 数值模拟中将其按抗弯刚度等效折算为实体单元, 折算后的实体单元与型钢翼缘宽度相等, 其厚度与混凝土厚度相等, 型钢折算等效图见图 7。等效公式为

$$E_s I_s = E' T' \quad (1)$$

式中： E_s 、 E' 分别为型钢真实弹模及折算后的弹模； I_s 、 I' 分别为型钢抗弯惯性矩及折算后惯性矩。



(a) 折算前型钢断面图

(b) 折算后型钢等效断面图

图 7 型钢折算等效图

Fig.7 Convert equivalent figures of section steel

桃花峪隧道的围岩等级为 V 类，隧道施工型钢采用工 25b，可知 $E_s = 210 \text{ GPa}$ ， $I_s = 5\,280 \text{ cm}^4$ ，而 $I' = b(a')^3 / 12 = 27\,465 \text{ cm}^4$ ，则可解得 $E' = 21.89 \text{ GPa}$ 。型钢支护单元与喷混单元图如图 8 所示。

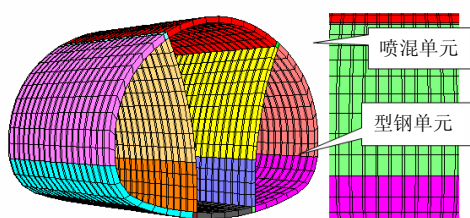


图 8 型钢支护单元与喷混单元图

Fig.8 Section steel supporting element and spray concrete element figure

模型沿隧道纵向 (y 轴) 取 30 m，沿隧道横向 (x 轴) 取 120 m，竖直方向 (z 轴) 向上取至地表，向下取 40 m。采用 ANSYS 有限元软件建立计算模型，采用 FLAC^{3D} 有限差分软件进行相应计算。模型的计算参数见表 3。

表 3 计算参数

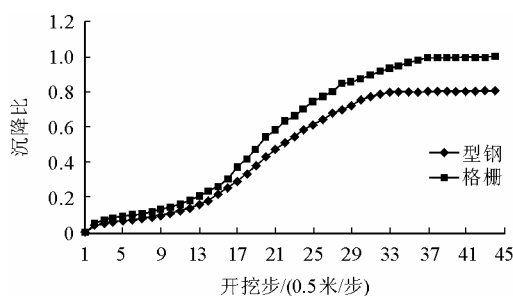
Table 3 Calculating parameters

工法	围岩 级别	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
双侧壁法	V	1.8	300	0.33	28	26.5

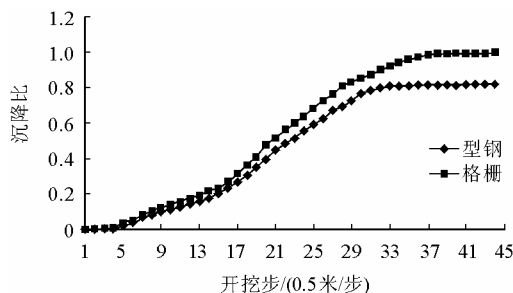
4.2 数值计算结果

(1) 支护位移

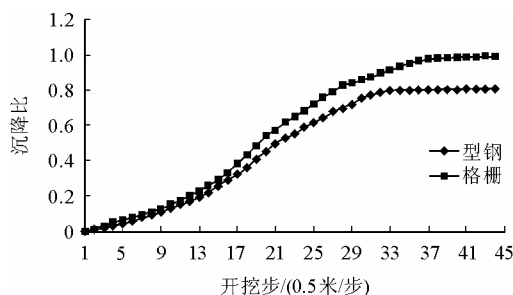
数值模拟计算中严格按照现场施工工序以 0.5 m 的循环进尺推进 (见图 3)。以格栅的支护位移为基准，型钢采用比例系数表示。格栅支护与型钢支护的沉降对比曲线如图 9 所示。由图可见，(1) 随着开挖步推进，沉降收敛逐渐增长；断面封闭以后沉降收敛趋于稳定；(2) 由于开挖跨度大，故收敛距离约在 2D 左右；(3) 格栅支护与型钢支护对比，



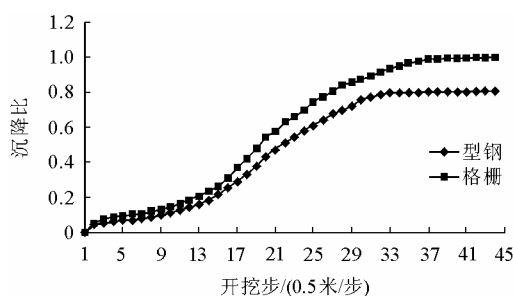
(a) 格栅支护与型钢支护左拱顶沉降对比



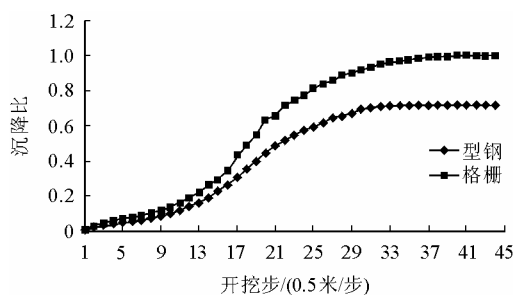
(b) 格栅支护与型钢支护右拱顶沉降对比



(c) 格栅支护与型钢支护拱顶沉降对比



(d) 格栅支护与型钢支护拱脚顶沉降对比



(e) 格栅支护与型钢支护边墙收敛对比

图 9 格栅支护与型钢支护的沉降对比

Fig.9 Settlement contrast curves of grating supporting and section steel supporting

型钢支护的位移更小; 较之格栅, 型钢支护拱顶沉降减小 16%~18%, 边墙收敛减小 23%, 拱脚沉降减小 18%。

(2) 围岩塑性变形

格栅支护围岩塑性区域分布见图 10, 型钢支护围岩塑性区域分布见图 11。由图可见, 塑性变形区域的发生与发展有着如下规律, (1) 塑性区域包裹了整个周边围岩地区, 深度超过 10 m, 并在拱脚、拱肩脚部以约 45°角向上、向下延伸; (2) 由于其埋深浅, 塑性区通过拱顶延伸至地表, 塑性区范围很大; (3) 格栅支护的塑性区大小与型钢支护的塑性区大小相比略大, 两者范围基本一致。

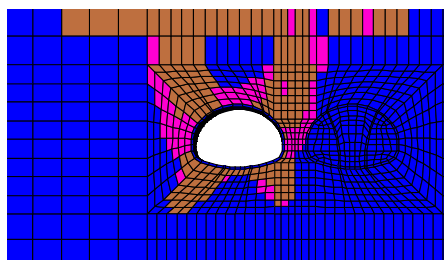


图 10 格栅支护围岩塑性区域分布
Fig.10 Plastic regional distribution of surrounding soil on grating supporting

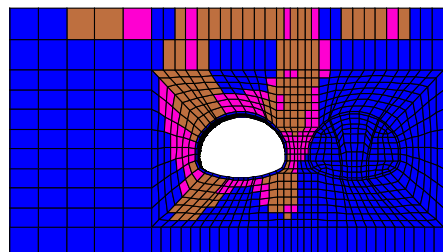


图 11 型钢支护围岩塑性区域分布
Fig.11 Plastic regional distribution of surrounding soil on section steel supporting

5 结 论

(1) 格栅支护与型钢支护对控制整体沉降差别不明显。施工引起的沉降比较均匀, 钢格栅与型钢对沉降的控制方面作用基本相当。格栅钢架的受力比型钢钢架小且分布更为均匀, 格栅钢架受力更为有利。格栅与型钢拱架应力均小于规范中规定的 Q235 钢的极限强度。格栅与型钢钢架受力状态相似且都合理。

(2) 格栅支护与型钢支护相比, 型钢支护的位移更小。在 V 级黄土隧道中采用双侧壁法开挖大断面隧道, 围岩将发生较大塑性变形。塑性区域发展范围较大, 需及时支护, 型钢支护与格栅支护对塑性发展范围基本一致。

参 考 文 献

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3—13.
XIE ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanic[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 3—13.
- [2] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 41(11): 93—98.
SHAO Sheng-jun, DENG Guo-hua. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 41(11): 93—98.
- [3] 伍国军, 陈卫忠, 戴永浩, 等. 浅埋大跨公路隧道施工过程和支护优化的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 118—123.
WU Guo-jun, CHEN Wei-zhong, DAI Yong-hao, et al. Study on excavation sequences and support optimization for shallow-buried and large-spanned tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 118—123.
- [4] 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.
- [5] 程选生, 田瑞瑞, 王俊岭, 等. 大跨度无衬砌蛋形黄土隧道围岩结构的静力和地震动稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 33(增刊): 583—587.
CHENG Xuan-sheng, TIAN Rui-rui, WANG Jun-ling, et al. Static and seismic stability analysis of soil mass surrounding tunnel about large-span unlined egg-shaped loess tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 33(Supp.): 583—587.
- [6] 郭军, 王明年, 谭忠盛, 等. 大跨浅埋黄土隧道中系统锚杆受力机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 870—874.
GUO Jun, WNAG Ming-nian, TAN Zhong-sheng, et al. Anchoring mechanism and effect of systematic rockbolt for shallow buried loess tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 870—874.
- [7] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册—隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [8] 铁道第一勘察设计院. 黄土隧道设计施工难点[R]. 西安: 铁道第一勘察设计院, 2006.
- [9] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(3): 467—488.
- [10] LAMBE T W. A mechanical picture of shear strength in clay[C]//Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Colorado: University of Colorado, 1960: 555—580.
- [11] 北京钢铁设计研究总院. GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.