

大断面饱和黄土隧洞成洞条件研究^{*}

Research on the tunneling methods in saturated loess

李 宁^{1,2}, 朱运明¹, 谢定义¹, 郭增玉¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中科院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 针对南水北调中线穿黄连接段大断面饱和黄土隧洞的成洞条件问题, 应用岩土工程软件 FINAL 对几种可能的方案进行了施工仿真试验研究。研究结果表明: ①新奥法施工方案在该大断面高水头饱和黄土围岩中能够成洞; 只需紧跟掌子面喷护, 挂网 25 cm 加系统锚杆形成柔性支护圈即可维持围岩稳定; ②双洞中心相距 2.5 倍洞径时应力与变形的相互影响小于 5%; ③双洞合一的掏槽一次永久衬砌方案也可成洞, 且施工技术要求最低, 但洞周变形最大(约 140 mm); ④双洞合一的预制混凝土超前压桩衬砌方案虽施工工艺复杂, 但却能最大限度的限制围岩变形(最大沉降小于 10 mm), 在重要建筑物底下穿过时, 可能是首选方案。

关键词: 饱和黄土; 大断面洞室; 施工方案; 成洞条件; 数值仿真试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2000)06-0639-04

作者简介: 李 宁, 男, 1959 年生, 西安理工大学岩土所教授, 博士生导师, 1998 年入选中科院“百人计划”。

LI Ning^{1,2}, ZHU Yun-ming¹, XIE Ding-yi¹, GUO Zeng-yu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Three tunneling methods in the saturated loess for the project of water transferring from south to north of China are numerically tested and discussed with the introduced Austria software FINAL. The numerical results demonstrate: (1) Tunneling with NATM (CASE A) is possible and the 10+15 cm shotcrete immediately following the excavation is absolutely necessary; (2) The interaction between two parallel tunneling caves with a distance of 2.5 times of tunnel diameter can be ignored; (3) Instead of projecting concrete support to strengthen the surrounding loess of the tunnel, the traditional tunneling method (CASE B) in which the cast in site lining system is introduced to support the loess, is also possible for the local simple constructors, although the settlements of the tunnel crown reached 141 mm; (4) To reduce the tunnel settlements, another tunneling method (CASE C) with the precast lining system constructed before the tunnel excavation, is much better than CASE B with settlements of 8.5 mm, although the precast lining technics is much complex than CASE B. (5) All the feasible tunneling methods are based on the effective drainage of the water from the current level to the bottom of the tunnel.

Key words: saturated loess; large section tunnel; tunneling methods; numerical test

1 引 言^{*}

南水北调中线工程穿黄南岸连接段邙山黄土隧洞置于邙山 Q₃ 饱和黄土底层和 Q₂ 黄土顶层, 设计洞长 800 m, 埋深 76 m, 洞底以上作用水头 26 m。由于饱和黄土强度低, 隧洞断面大, 埋深较大, 承压水头也较高, 目前国内尚无类似工程可参照, 国外的相关资料也不多见。因此需要通过动态仿真分析来研究这种特殊洞室的成洞条件、施工方法和支护措施。本文就几种可能的施工方法的成洞条件进行数值仿真分析研究。

2 几种施工方案的仿真分析模型

根据工程地质与勘探资料选取的分析断面地质岩层图如图 1 所示。室内实验表明该饱和黄土的应力应变关系为非线性关系^[1,2], 近似双曲线型, 宜用 Duncan-Chang 模型描述, 针对该模型的土层力学参数见表 1, 根据大断面洞室的施工经验, 该开挖洞径约 10.5 m

的软岩隧洞的开挖方案初定为三种方案, 以供对比选择, 这些方案的先决条件是施工时地下水位必须降至洞底以下, 降水范围内土的参数仍按饱和状态取值。

2.1 新奥法施工方案(A 方案)

采用洞径 8.5 m 的并列马蹄形无压隧洞, 双洞中心距 25 m, 如图 1 所示的中心岛台阶式分步开挖, 每步开挖后及时喷混凝土 10 cm, 施作锚杆 1.0 m × 1.0 m, 杆长 3~4 m, 之后紧跟掌子面挂钢筋网再喷 15 cm, 以承受施工期的进一步开挖荷载; 隧洞贯通后, 再施作 80 cm 厚的钢筋混凝土永久衬砌以承受运行期的外水压力与地震荷载。应用引进的奥地利岩土工程分析软件 FINAL^[3] 及笔者开发的 ROCKS 软件包对以上施工过程进行详细的仿真分析。每步开挖时的地应力释放比例根据掌子面与分析断面的空间距离确定^[4,5]; 喷

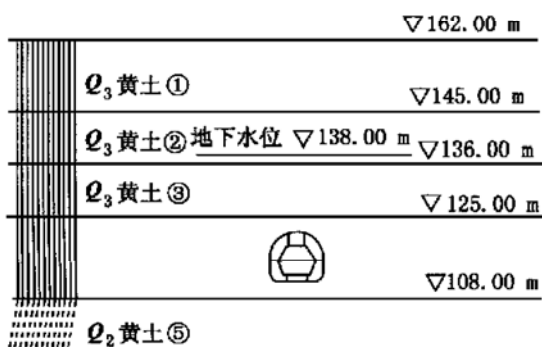
^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19772039); 中科院院长特别基金资助项目(9713)

收稿日期: 1999-11-28

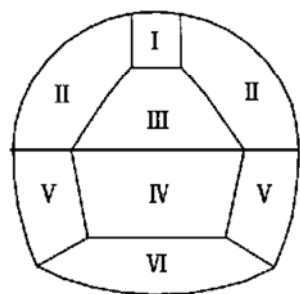
层与挂网用曲梁单元模拟,砂浆锚杆用可承受拉、剪、弯的“柱”单元模拟,黄土围岩用 Duncan-Chang 非线性实体单元模拟。

表 1 土层力学参数表

Table 1 Mechanics parameters of different soil layers								
土层	K	N	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	G	F	D	R_f
①	497	0.097	22	29	0.414	0.088	2.938	0.907
②	140	0.337	12	23	0.282	0.264	2.291	0.845
③	116	0.505	10	23	0.394	0.201	1.509	0.672
④	247	0.797	33	26	0.483	0.228	1.459	0.670
⑤	317	0.720	48.5	29	0.446	0.110	1.584	0.808



(a) 计算断面



比例 1.5 m
(b) 新奥法开挖与支护顺序

图 1 计算断面示意图与新奥法开挖与支护顺序图

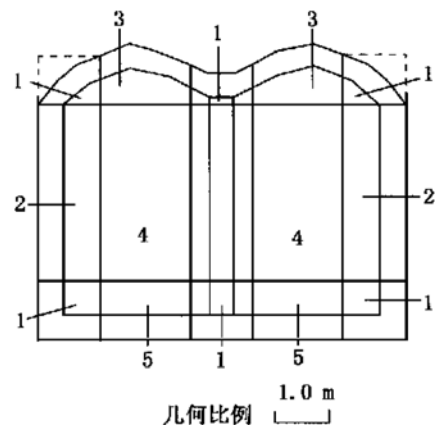
Fig. 1 The calculated section and tunneling and shoring order in NATM

2.2 双洞合一的掏槽一次永久衬砌方案(B 方案)

本方案的洞形为双门洞形,根据我国西北黄土地区的大多数隧洞的施工经验^[1,6],常常采用紧跟掌子面现浇混凝土,既作为临时支护又作为永久衬砌。开挖方案与掏槽衬砌方案见图 2。在每一步开挖后,紧跟掌子面掏槽施作钢筋混凝土衬砌支护。

2.3 双洞合一的预制混凝土压桩衬砌方案(C 方案)

为了更好的控制 B 方案的地面沉降,在 B 方案第一步六孔开挖后,直接用“压桩方式”将预制钢筋混凝土衬砌超前压入(原准备开槽衬砌的位置),消除了开槽引起的地应力释放与地面沉降,其后的开挖与 B 方案相同,只是所有的衬砌均被超前设置。



- 方案 B:

 1. 第一部分开挖与支护
 2. 第二部分开挖与支护
 3. 第三部分开挖与支护
 4. 第四部分开挖与支护
 5. 第五部分开挖与支护
- 方案 C:

 1. 第一部分开挖与超前压桩支护
 2. 第二部分开挖
 3. 第三部分开挖
 4. 第四部分开挖
 5. 第五部分开挖

图 2 双洞合一的二方案开挖及支护顺序图

Fig. 2 Tunneling and shoring order of the two methods to incorporate the two tunnels in one

3 新奥法施工方案的成洞条件

新奥法施工以调动围岩自身的承载能力,减少支护衬砌的工作荷载为宗旨,本文认为其成洞条件应从围岩应力、变形与支护结构的内力强度上同时加以考虑。从而提出:①围岩的最大变形不超过洞径的 1%^[7];②围岩的应力集中引起的塑性区范围不超过锚杆加固区;③锚杆的拉力不超过允许拉拔力;④喷层或衬砌的内力满足其强度要求。

本施工方案的仿真分析结果(见图 3 及表 2、表 3)显示:如果不进行二次挂网 15 cm(方案 A₂),则锚杆最大拉拔力可能达 136 kN(表 3),会使锚杆拔出;而挂网方案 A₃ 按图 1 所示的分五步开挖完成后,洞顶最大沉降为 58 mm,小于 1% 的洞径——105 mm 的允许沉降,洞底上抬 32 mm;洞周塑性区基本上在 1.5 m 洞周以内,小于锚杆加固区 3.0 m 的范围;喷层与挂网复合体最大压力为 2820 kN,平均压应力约 11.3 MPa,未超过 C25 喷层的 3 天强度(12.5 MPa);锚杆承受的平均拉拔力约为 12 kN,最大拉拔力为 77.2 kN,也不大于其最大允许拉拔力 100 kN。由此可知,以紧跟掌子面喷护 10+15 cm 加挂网的新奥法施工方案基本上能维持围岩施工期的稳定性。

表 4、5 同时显示,在 80 cm 的钢筋混凝土衬砌的加固下,双洞洞室在运行期的最大可能外水压力下的沉降位移增量不大于 10 mm;侧位移不大于 15 mm;在 8°地震荷载作用下沉降位移增量不大于 12 mm,侧位移不大于 16 mm,也满足以上成洞条件。

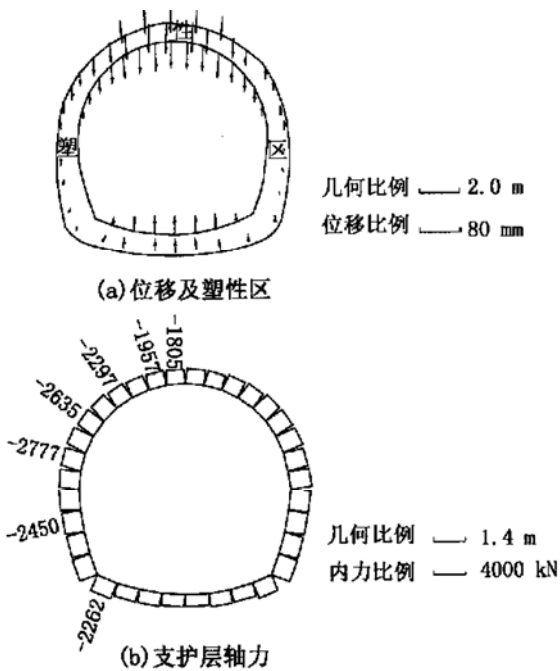


图 3 新奥法方案位移、塑性区与支护层轴力图
Fig. 3 Displacement, plastic region and axial force of the lining system in NATM

表 2 新奥法方案关键部位位移及塑性区范围(洞径 10.5 m)
Table 2 Displacement and plastic region at key points in NATM

方 案	各步开挖后位移/mm						塑性区		
	第一步		第二步		第五步		/m		
	顶沉	侧移	顶沉	侧移	顶沉	侧移	洞顶	侧墙	最大范围
A ₁	12.6	5.4	66.2	11.7	117.3	31.3	3.5	4.0	6.0
A ₂	9.3	5.1	24.5	12.6	70.4	26.7	1.5	2.5	4.5
A ₃	8.6	4.8	22.1	9.7	58.6	12.4	1.0	2.0	3.5

注: A₁—为了研究围岩的自稳能力,开挖后不作任何支护; A₂—新奥法施工施作锚杆,喷射 10 cm 的混凝土; A₃—在 A₂ 基础上,再挂钢筋网,喷射 15 cm 的混凝土

表 3 新奥法方案喷层最大内力与锚杆拉力

Table 3 The largest internal force of shotcrete and pull of anchor pole in NATM

方 案	轴力 /kN	压应力 /MPa	剪力 /kN	弯矩 /(kN·m)	锚杆最大拉力 /kN
A ₂	2448.0	24.48	162.0	8.3	136.4
A ₃	2820.0	11.53	234.0	14.7	77.2

表 4 双洞运行时围岩最大位移与塑性区

Table 4 The largest displacement and plastic region in the double tunnels

方 案	围岩位移/mm				塑性区			
	左洞		右洞		左洞		右洞	
	洞顶	侧墙	洞顶	侧墙	洞顶	侧墙	洞顶	侧墙
A ₄	7.3	0.0	8.6	0.0	±5%		±5%	
A ₅	0.0	16.0	0.0	16.0				

注: A₄—在 A₃ 基础上,再施作 80 cm 钢筋混凝土永久衬砌并承受运行期外水压力; A₅—在 A₃ 基础上,再施作 80 cm 钢筋混凝土永久衬砌并承受运行期地震荷载

表 5 双洞运行时衬砌最大内力与锚杆拉力

Table 5 The largest internal force of shotcrete and pull of anchor pole in the double tunnels

方 案	衬砌最大内力				锚杆最大拉力/kN	
	左洞		右洞		左洞	
	轴力 /kN	压应力 /MPa	轴力 /kN	压应力 /MPa		
A ₄	4251.0	5.3	4120.0	5.6	84.7	86.0
A ₅	4400.0	5.5	4264.0	5.6	117.0	117.0

4 双洞合一的掏槽一次永久衬砌方案的成洞条件(B 方案)

本施工方案是基于以下思路:

- (1) 双洞合一以节省施工步序;
- (2) 临时支护与永久支护合一以提高施工进度,降低施工成本;
- (3) 掏槽开挖衬砌以便于尽量提前支护,控制围岩塑性区的发展。

根据以上思路,围岩的稳定性最后决定于衬砌的内力水平与强度。图 4 与表 6 给出了该掏槽施工方案的围岩结构变形、塑性区与衬砌最大内力情况。图 4、表 6 显示:虽然由于双洞合一使洞室跨度加大,围岩的最大沉降达 141.3 mm,塑性区范围达 15 m 之大,但衬砌内力(轴力)却不很大,约 2200 kN(合压应力为 2.8 MPa),远小于钢筋混凝土衬砌的抗压强度;本文认为该施工方案也是可行的。

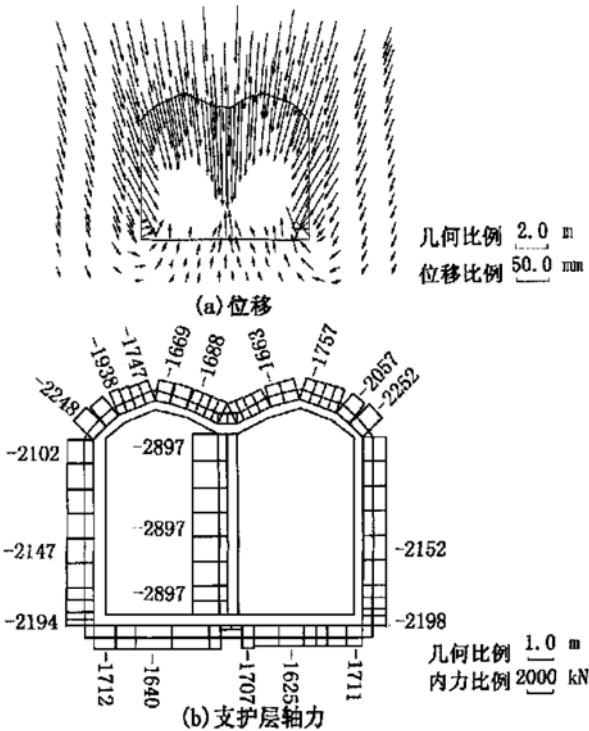


图 4 掏槽衬砌方案位移与支护层轴力图

Fig. 4 Displacement and axial force of the lining system in case B

表 6 方案 B 各步施工引起的位移与衬砌内力

位置	各步开挖与支护后位移/mm			最大轴力 /MN	最大压应力 /MPa	最大剪力 /MN	最大弯距 /(MN·m)
	第一步	第三步	第五步				
洞顶(a)	- 26.6	- 17.7	- 141.3	2.4	2.8	0.41	0.34
上角(b)	- 21.5	- 14.3	- 110.6				

注: 指向洞外的方向为位移正方向, 表 7 与此相同

表 7 方案 C 各步施工引起的位移与衬砌内力

位置	各步开挖与支护后位移/mm			最大轴力 /MN	最大压应力 /MPa	最大剪力 /MN	最大弯距 /(MN·m)
	第一步	第三步	第五步				
洞顶(a)	- 10.2	+ 3.4	- 8.5	3.7	4.6	1.62	1.88
上角(b)	- 4.5	+ 0.3	- 5.4				

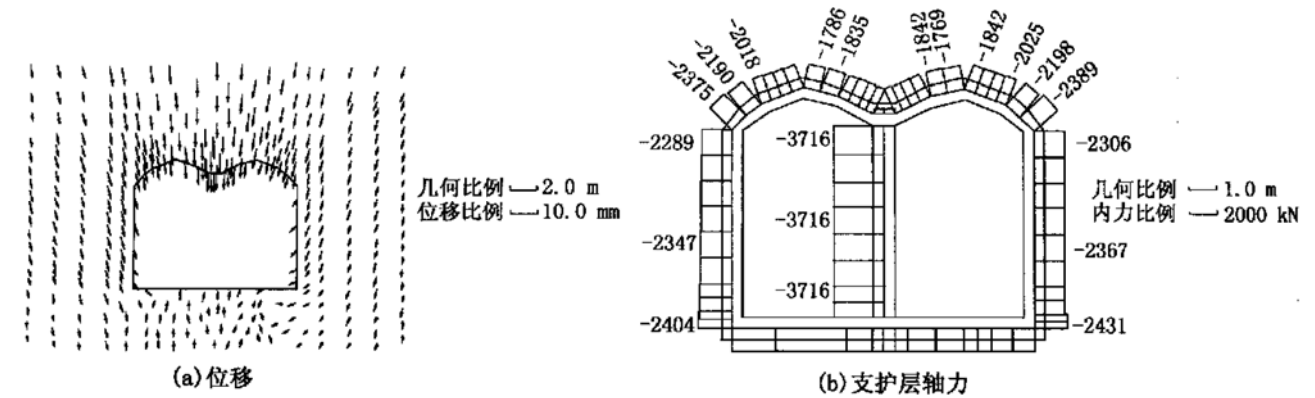


图 5 压桩方案位移与支护层轴力图

Fig. 5 Displacement and axial force of lining in case C

5 双洞合一预制混凝土压桩衬砌方案的成洞条件(C 方案)

为了进一步限制围岩的塑性变形, 超前支护围岩是常常采取的措施, 本方案基于这样的思路, 在刚开挖了连拱双洞的六个角孔后, 即从该孔中压桩进行钢筋混凝土衬砌的超前支护。其成洞机理与要求应与方案 B 一致, 即衬砌的强度条件是成洞的必要且充分条件。该方案的仿真分析结果示于图 5 与表 7 中。由于施做了超前衬砌(刚性)支护, 围岩变形被大大限制了, 最终总位移只有 8.5 mm, 远远小于方案 B 的 141.3 mm; 但这一结果的代价却是衬砌轴力增大了约 50%; 弯距、剪力增大了约 4~ 5 倍(见表 6, 表 7)。

6 结 论

对于饱和黄土中大断面洞室的工程事例, 国内尚未见报道, 本文借鉴国内相似工程的经验提出的几种方案均满足本文的洞室成洞条件。其中新奥法施工方案在施工队伍技术水平较高时, 最简便快捷, 且成本可能最低; 掏槽施工方案在没有地面沉降要求且施工队

伍技术设备简单等条件下可能最优越; “压桩”方案施工过程最为复杂, 但却能够最有效的限制地面沉降, 在重要建筑物附近可能是首选方案。

西安理工大学岩土工程研究所的邵生俊副教授、李永刚硕士及陕西省水电设计院的王一鸣副总工程师均参与了本项目, 在此一并致谢。

参考文献:

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 陕西科技出版社, 1997.
[2] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273~ 284.
[3] 李 宁, 陈 波, 等. 奥地利岩土工程分析软件 FIANL 应用与开发[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(1): 27~ 33.
[4] 李 宁, 尹森菁. 边坡安全监测的仿真反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 9~ 18.
[5] 李 宁, 李永刚, 张 平. 碎裂块围岩仿真反分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 170~ 173.
[6] 中国锚固工程协会. 岩土工程中的锚固技术[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
[7] 郑颖人, 等. 地下工程锚喷支护设计指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.