

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0022-05

黄土隧道施工方案的数值分析

倪玉山, 张华兵

(复旦大学 力学与工程科学系, 上海 200433)

摘 要: 黄土隧道围岩不同开挖与支护施工方案的数值分析, 对了解黄土隧洞变形破坏机理以及黄土隧洞设计施工理论具有重要意义。对黄土隧道围岩采用中壁法和双侧壁导坑法开挖各 3 种不同支护顺序分别进行了模拟计算, 考察了各个施工工序地表最大沉降量、隧洞拱顶最大下沉量、围岩塑性区分布、衬砌单元弯矩以及岩体总应变能变化。计算结果表明, 从开挖方法来说, 双侧壁导坑法要优于中壁法; 从支护顺序来说, 滞后支护要优于及时支护。此结果可为黄土隧道工程设计施工提供参考。

关 键 词: 黄土隧道; 设计与施工; 模拟; 开挖

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Numerical analysis of construction scheme of loess tunnel

NI Yu-shan, ZHANG Hua-bing

(Department of Mechanics and Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The variations of five mechanical conditions such as the surface settlements, the displacement at vault of tunnels, the distribution of plastic zone of surrounding loess, the moment distribution of lining element and the total strain energy of surrounding loess are studied under three kinds of lining procedure with two different tunnel constructions, which is sequential excavation with a central heading and with a lateral heading. The results show that the sequential excavation with a lateral heading, which can decrease the amount of displacement at the vault of tunnels and of the maximal surface settlement and of the plastic zone of surrounding loess, is more preferable than that with a central heading. The tunnel lining in delayed construction compared with that in immediate construction is more favorable to enhance the stability of loess tunnel. It is shown that the analytical results are helpful for the design and construction of loess tunnels.

Key words: loess tunnel; design and construction; excavation; simulation

1 引 言

为确保黄土隧道的施工安全, 尽量减少隧道开挖引起的地层沉降和围岩变形, 对其不同开挖方式进行深入研究很有必要。目前对岩石洞室的有限元模拟分析较多^[1~3], 但对于土体, 尤其是黄土隧洞的计算分析较为鲜见。为了解隧道围岩在开挖支护过程中引起地层变形和支护结构的力学状况, 特别是隧道采用不同开挖支护方法对成洞后隧道围岩变形及稳定性的影响, 本文对黄土隧道围岩采用不同开挖与支护方案进行数值模拟, 通过结果分析得到一些对黄土隧道工程设计施工有益的结论。

2 模拟分析过程

2.1 计算模型

隧道开挖是一个动态连续过程。根据工程实际情况以及施工经验, 假设开挖土体按中壁法(图 1)和双侧壁导坑法(图 2)进行分步开挖支护施工, 并以弹性模量相当小, 而质量为零的“死单元”来代替开挖土层单元, 模拟开挖后的空间, 再激活梁单元来模拟添加衬砌。具体步骤如下: ①建立整个隧道围岩和支护衬砌结构计算模型(包括模拟围岩的四边形单元及模拟衬砌的二维梁单元); ②杀死所有作为衬砌支护的梁单元, 并施加重力载荷, 模拟土体在自重作用下黄土自由沉降, 得到围岩的初

收稿日期: 2006-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.10576010)。

作者简介: 倪玉山, 男, 1962 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程力学研究。E-mail: niyushan@fudan.edu.cn

始应力状态；③逐步杀死隧洞内开挖土体，分步开挖隧道，实现对隧道开挖过程的模拟；④激活作为支护结构的梁单元来模拟添加的薄衬砌；⑤根据黄土变形特性，最后在开挖和支护结束后进行黏弹塑性蠕变分析，其中隧道开挖按中壁法和双侧壁导坑法两种施工方法（图 1、图 2），开挖顺序按数字顺序逐步进行，图中 A、B、C、D、E 为观察参考点，为考虑及时支护与滞后支护的影响，以 3 种开挖支护方案分别进行分析比较，见表 1。

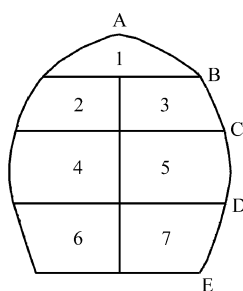


图 1 中壁法开挖支护

Fig.1 Sequential excavation with a central heading

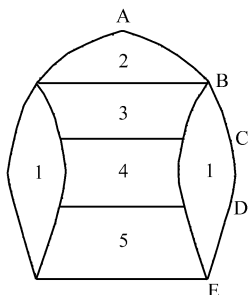


图 2 双侧壁导坑法开挖支护

Fig.2 Sequential excavation with a lateral heading

表 1 两种开挖方法 3 种支护顺序计算方案
Table 1 Three kinds of lining procedure with two different excavations

	中壁法	双侧壁导坑法	说明
方案	I	I	土体开挖后立即进行支护
	II	II	土体开挖之后不进行及时支护，等全部开挖结束后进行一次全部支护
	III	III	土体开挖之后稍等一天后再进行支护

2.2 材料本构方程

对于黄土，黏弹塑性本构关系可取^[4]：

$$\dot{\varepsilon}_e = A\sigma_e^n \quad (1)$$

式中， $A = \dot{\varepsilon}_c / \sigma_{c0}$ ； $\dot{\varepsilon}_c$ 、 $\dot{\varepsilon}_e$ 和 σ_{c0} 分别为等效应变率、参考应变和参考应力。计算采用的黄土材料参数完全由试验确定，黏弹塑性本构方程参数取为^[5]：

$$n = 3, \dot{\varepsilon}_c = 10^{-5} / \text{h}, \sigma_{c0} = 0.103 \text{ MPa}。$$

3 计算结果

有限元计算主要考察的是以上两种开挖方法中各 3 种不同支护顺序，每个施工工序的地表最大沉降量，隧道拱顶最大下沉量、围岩的塑性区分布、衬砌单元弯矩和岩体总应变能随时间变化情况。另外需要说明的是，由于 6 种不同方案对应不同的计算工况，在本文中未能全部显示出每一步开挖和支护所引起的地层沉降和隧道支护结构的变形特点，仅列出隧道最后开挖成型时的部分计算结果。

3.1 地表沉降

采用中壁法施工开挖各个开挖支护步骤所引起的地表沉降计算值见表 2，可知前两步的开挖所引起的地表最大沉降均相同，在其后施工步骤中，尽管支护顺序有所不同，但在各个方案开挖支护完毕进入蠕变分析时地表最大沉降值相差不大，分别为 5.93，5.92，5.9 mm。

表 2 中壁法地表最大沉降

Table 2 The maximal surface settlement of the excavation with a central heading

(mm)						
开挖步骤	方案 I		方案 II		方案 III	
	开挖	支护	开挖	支护	开挖	支护
1	4.48	5.1	4.48		4.48	5.1
2	5.09	5.34	5.1		5.09	5.34
3	5.33	5.59	5.34		5.33	5.59
4	5.57	5.74	5.61		5.57	5.74
5	5.73	5.87	5.75		5.74	5.73
6	5.85	5.9	5.88		5.87	5.85
7	5.89	5.93	5.91	5.92	5.85	5.9

采用双侧壁导坑法开挖各个不同开挖支护步骤引起地表最大沉降值见表 3，可知开始时不同的施工方法所引起的地表最大沉降都相同，均为 4.48 mm。但在随后的开挖支护过程中，方案 I 在最后开挖支护结束时地表最大沉降量最小为 5.39 mm，另外两种方案的最大沉降量分别为 5.91 mm 和 5.89 mm，这是由于方案 I 采用的是起初几步就添加衬砌支护，也就是在 1，2 两块土体开挖结束后就开始支护，添加的衬砌发挥支护作用，支撑洞室以上土体的变形，重新改变它们应力分布，因而引起较小的最大地表沉降量，而方案 II 和方案 III 的地表最大下降量都比方案 I 大，可见及时支护确实能马上起到支护作用，减小地表最大下降量。然而，对于衬砌材料的受力状况、强度和对隧道使用以后围岩变形的影响见后面的分析说明。

表 3 双侧壁导坑法地表最大沉降

Table 3 The maximal surface settlement of the excavation with a lateral heading

开挖 步骤	方案 2-A		方案 II		方案 III	
	开挖	支护	开挖	支护	开挖	支护
1	4.48	4.71	4.48		4.48	4.71
2	4.66	5.37	4.71		4.96	4.90
3	5.35		5.79		5.89	
4	5.37		5.91		5.88	
5	5.39		5.91	5.89	5.89	

比较两种开挖方法引起最大地表沉降量发现, 开挖支护结束时地表沉降值均相差不大, 仅方案 I 较小一点, 可见采用中壁法和双侧壁导坑法开挖对引起地表最大沉降影响较小。

3.2 拱顶下沉量

采用中壁法开挖各开挖支护步骤所引起隧道拱顶最大下沉量见表 4。由表可知, 各个施工方案每一步开挖支护中拱顶最大下沉量有所不同, 但差别不大, 开挖支护结束时也都几乎差不多, 可见这样的支护顺序对围岩变形影响不大。

表 4 中壁法隧道拱顶最大下沉量

Table 4 The displacement at vault of tunnel of the excavation with a central heading

开挖 步骤	方案 I		方案 II		方案 III	
	开挖	支护	开挖	支护	开挖	支护
1	3.02	4.25	3.02		3.02	4.25
2	4.22	4.51	4.22		4.25	4.51
3	4.49	4.77	4.49		4.52	4.77
4	4.75	4.94	4.75		4.83	4.94
5	4.92	5.06	4.94		4.98	4.92
6	5.04	5.08	5.06		5.12	5.04
7	5.07	5.11	5.08	5.11	5.14	5.12

采用双侧壁导坑法开挖各个不同支护顺序拱顶最大下沉量见表 5, 可以看出起初几个开挖支护步骤中 3 种方案拱顶最大下沉量基本相同, 但在方案 I 的后几步, 下沉量不大, 是三者中最小的, 这是因为及时支护能马上发挥支护作用, 抑制土体的变形, 因而拱顶下沉量较小。另外, 比较中壁法和双侧壁导坑法引起的隧道拱顶最大下沉量发现, 刚开始开挖时拱顶下沉量都基本相同, 但在最开挖结束时采用双侧壁导坑法开挖引起的下沉量要小于中壁法开挖引起的下沉量。

3.3 围岩塑性区

用 6 种不同施工方案计算得到隧道围岩在成洞一年后蠕变变形的塑性区分布分别见图 3, 图中标注参数均为等效塑性应变, 单位为%。

表 5 双侧壁导坑法隧道拱顶最大下沉量

Table 5 The displacement at vault of tunnel of the excavation with a lateral heading

开挖 步骤	方案 I		方案 II		方案 III	
	开挖	支护	开挖	支护	开挖	支护
1	3.02	3.31	3.02		3.02	3.31
2	3.25	4.54	3.31		3.54	3.48
3	4.48		5.01		5.04	
4	4.45		5.14		4.94	
5	4.45		5.14	4.97	4.96	

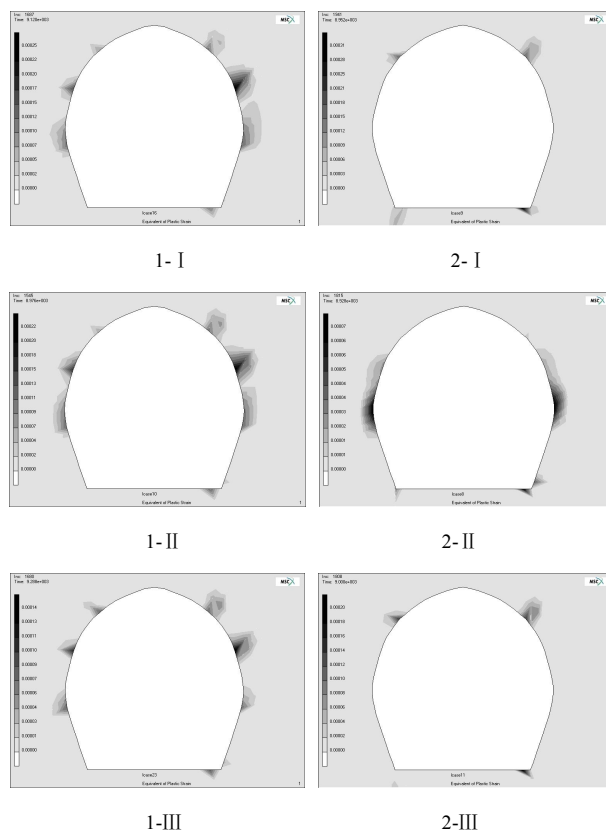


图 3 各个施工方案下隧道围岩塑性区分布图

Fig.3 The distribution of plastic zone of surrounding loess

根据图 3 可得:

(1) 采用中壁法开挖时, 在隧道开挖支护后经蠕变变形都在隧道的拱腰及拱腰以上部分出现塑性区, 且分布大致相同 (图 3 的 1-I, 1-II, 1-III), 而且都在右侧出现比左侧大的塑性变形, 这可能是由于中壁法开挖支护都是从左侧开始进行的 (图 1), 才会对隧道右侧围岩产生较大的压力从而形成这样的塑性区分布。对于方案 I ~ III, 隧道围岩最大塑性应变分别为为 2.466×10^{-4} , 2.196×10^{-4} , 1.418×10^{-4} , 方案 III 比方案 I、方案 II 都要小得多, 可见方案 III 优于前两种方案, 这是由于在支护时给予周围岩体一定时间产生变形, 随后支护的衬砌开始发挥作用, 提高支护处的抗力, 从而会产生较小

的应变。

(2) 采用双侧壁导坑法开挖时, 也是在拱腰处及拱腰以上的部分区域出现塑性区 (图 3 的 2-I, 2-II, 2-III)。方案 I、方案 II 隧道围岩最大塑性应变为 3.066×10^{-4} , 1.994×10^{-4} , 而方案 III 隧道围岩的最大塑性应变为 7.109×10^{-5} , 要比前两种方案小的多, 且它的塑性区分布较为均匀都在拱腰处, 这是因为双侧壁导坑法的开挖时, 先开挖 1, 2 块的土体 (图 2), 而后才开挖其后的土体, 全部开挖结束后才进行支护, 这个过程也正是滞后支护的过程, 首先让隧道周边的土体产生一定量的应变, 经过一定时间后开始支护提高土体的抗力, 使得土体产生较小应变, 因而在以后的蠕变变形中变形较小, 这有利于维持隧道的稳定。

3.4 衬砌单元弯矩

通过 6 种不同开挖支护方案的模拟计算得到围岩蠕变变形后衬砌单元各个参考点 (图 1 和图 2) 的弯矩值, 见表 6, 从表中可知 A、B、C 三点弯矩均为负, 因这 3 点在拱腰以上受拉所致, 而 D 点受压则表现为弯矩为正。

表 6 各个方案衬砌参考点的弯矩值
Table 6 The bending moment distribution of lining element with two different excavations

参考点	中壁法			双侧壁导坑法		
	I	II	III	I	II	III
A	-508.521	-431.41	-513.09	-435.92	-441.297	-440.071
B	-463.176	-418.309	-462.979	-386.358	-395.876	-383.818
C	-204.072	-188.127	-198.133	-145.106	-154.416	-150.287
D	203.284	203.658	208.516	159.928	171.501	102.446
E	0.017	0.017	0.017	0.013	0.013	0.013

在中壁法开挖中, 方案 I 中 A、B、C 的弯矩值要比方案 II 和方案 III 的弯矩值要大。如前分析, 在起初开挖支护时虽及时支护减小地表最大下沉量和拱顶最大下降量。然而, 在围岩蠕变变形时衬砌梁单元要适应围岩的变形, 必然受到较大拉产生较大的弯矩值, 从而也将使得薄衬砌受到较大的拉应力, 这些地方也将更容易受到破坏, 这一点应该引起注意。

在双侧壁导坑法中, 方案 II 的 A、B、C、D 的弯矩值也是比方案 I 和方案 III 的弯矩值要大, 这也是因为起初的开挖支护抑制了围岩的变形, 使其后的蠕变变形时产生较大的弯矩值。

另外, 比较两种开挖方法弯矩最大值可知, 双侧壁导坑法中方案 II 的弯矩值要比中壁法开挖中方案 I 对应的弯矩值要小, 表现为梁单元将会受较小

的应力, 所以双侧壁导坑开挖法还是要优于中壁开挖法。

3.5 围岩总应变能

中壁法开挖支护模拟计算得到围岩总应变能变化如图 4 所示。从图可见, 3 种方案的 3 条应变能与时间关系曲线基本相同, 只是刚开始部分有所不同, 这是由于都采用中壁法开挖, 支护顺序有所不同, 这也正是曲线前端的变化表现为开挖顺序的影响, 其中方案 III, 前端的变化小, 说明滞后支护对围岩应变能扰动较小, 而方案 I 和方案 II 在开挖支护部分有较大转折, 相应对围岩扰动较大, 是由于隧道周边添加衬砌, 改变了围岩应力应变场, 减小了岩体的应变能, 但在随后总应变能又开始逐渐增长, 3 种方案也都有这样的趋势, 可见相对同种开挖方法, 滞后支护对围岩应变能扰动较小, 有一定优势。

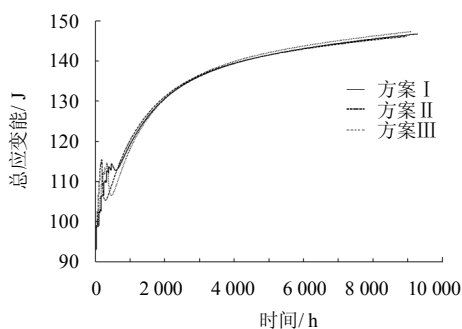


图 4 中壁法岩体总应变能与时间关系图

Fig.4 Variations of total strain energy of the loess tunnel of the excavation with a central heading

双侧壁导坑法开挖支护模拟计算围岩总应变能变化如图 5 所示, 图中曲线前端变化较短, 表现为开挖支护过程较短, 方案 III 在开挖支护过程变化较缓, 逐渐增加, 方案 I 和方案 II 则有部分剧变, 说明对围岩有较大扰动, 可见方案 III 的滞后支护对围岩扰动较小, 有助于保持围岩的稳定。

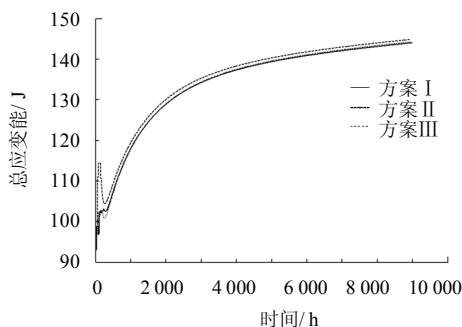


图 5 双侧壁导坑法岩体总应变能与时间关系图

Fig.5 Variations of total strain energy of the loess tunnel of the excavation with a lateral heading

此外,对于中壁法开挖的各个方案,在一年后围岩的总应变能分别为:147.309, 146.126 J 和 146.724 J,而采用双侧壁导坑法开挖的各个施工方案应变能分别为:144.209, 144.82, 144.011 J,可见双侧壁导坑法对围岩应变能扰动小,有利于围岩的稳定,因此从开挖方法来说双侧壁导坑法要优于中壁法;从支护顺序来说,滞后支护要优于及时支护,都有助于保持围岩的稳定。

4 结 论

(1) 虽然延时支护增大地表最大沉降量和拱顶最大下降量,但是在隧道围岩蠕变变形时减小了衬砌的拉压应力,减小后期破坏的可能,也减小围岩总应变能,对围岩后期稳定性有好处。

(2) 对衬砌梁单元弯矩值和围岩塑性区分布以及总应变能比较可得出双侧壁导坑法要优于中壁法。

(3) 从力学观点看,黄土隧道双侧壁导坑法优于中壁法。当然,隧道施工方法的选择涉及因素很多,因此应综合考虑才能确定。

(4) 通过有限元理论,运用程序的生死单元技术,对黄土隧道围岩不同开挖方法和支护顺序进行动态数值模拟,了解了中壁法和双侧壁导坑法施工工序的受力状态和力学行为,可为黄土隧道设计施工提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 白世伟,林鲁生,徐邦树. 凤岗隧洞三维非线性仿真模拟[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 673—677.
BAI Shi-wei, LIN Lu-sheng, XU Bang-shu, Three-dimension nonlinear simulation foe Fenggong tunnel [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 673—677.
- [2] 朱合华,丁文其. 结构施工过程的动态仿真模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 558—562.
ZHU He-hua, DING wen-qi. The construction process simulation of underground structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 558—562.
- [3] Roberto U. Determination of shear failure envelope in rock masses[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 1986, 112(3): 303—315.
- [4] Ladanyi B. Geotechnical Engineering for Cold Regions [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1978.
- [5] 张华兵,倪玉山,赵学勤. 黄土隧道围岩稳定性黏弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 247—250.
ZHANG Hua-bing, NI Yu-shan, ZHAO Xue-meng. Viscoelasto-plastic finite element analysis of stability of surrounding loess of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 247—250.