

文章编号: 1000-7598-(2004) 07-1102-05

不同开挖工序对连拱隧道中墙的影响

王胜辉¹, 杜小平², 袁 勇¹, 章勇武², 杜国平², 刘 亮²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 重庆渝东高速公路有限公司, 重庆 400042)

摘 要: 针对筲箕湾连拱隧道的开挖过程进行两种不同工序的模拟计算, 计算中墙在两种不同开挖工序下的强度、变形与稳定性, 比较不同开挖工序对隧道中墙的影响。结果表明, 中墙是连拱隧道最主要的受力构件, 非对称开挖容易在中墙上引起较大偏心荷载。根据计算结果来评价开挖工序的优劣, 对连拱隧道的开挖过程提出一些建议。

关 键 词: 双连拱隧道; 中隔墙; 非对称开挖; 有限元; 模拟计算; 力学性能

中图分类号: U 455.41

文献标识码: A

Effects of different excavating sequences on mid-partition of double-arched tunnel

WANG Sheng-hui¹, DU Xiao-ping², YUAN Yong¹, ZHANG Yong-wu², DU Guo-ping², LIU Liang²

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Chongqing Yudong Expressway Company Ltd, Chongqing 400042, China)

Abstract: Simulating computation for Shaojiwan double-arched tunnel about two different excavating sequences is carried out; and pays attention to strength, displacement and stability of effects under two excavating sequences. The results show that the mid-partition is a key load-carrying member; the nonsymmetrical excavating will bring eccentric loads on the mid-partition easily. From the computing results, this paper evaluates the excavating, and gives some opinions on excavating procedure of double-arched tunnel.

Key words: double-arched tunnel; mid-partition; nonsymmetrical excavation; FEM; simulating computation; mechanical property

1 前 言

连拱隧道是一种比较特殊的隧道结构。按公路隧道设计规范(JTJ026-90)规定, 一般应设计上下行分离的两座独立隧道。两相邻隧道的最小净距由围岩类别, 断面尺寸、施工方法等因素决定。但是有时受地质、施工等因素的限制不得不采用连拱隧道形式。目前, 国内外对连拱隧道各个构件的力学行为的研究还不充分。为此, 本文结合筲箕湾隧道工程实例, 采用有限元方法, 研究了连拱隧道中墙在隧道开挖的不同时期和不同开挖工序(左右洞室对称和非对称开挖)下的位移、应力等力学表现。

2 工程概况

筲箕湾隧道为连拱双洞单向交通隧道, 其总长为 $2 \times 168 \text{ m} = 336 \text{ m}$, 单洞建筑限界净宽 9.5 m、净

高 5.0 m。根据地质勘察报告, 隧道洞身围岩为 III 类, 隧道区内没有发现较大规模的滑坡、岩崩和泥石流等不良地质灾害。隧道区无强震记录, 依据原四川省地震烈度区划, 本区地震基本烈度为 VI 度。

3 计算分析目的

对于连拱隧道, 为了满足安全性要求, 欲减少拱的跨度, 就必须在中间设置中墙。这样中墙上会承受很大的荷载, 当隧道的跨度及中墙的宽度已经给定后, 在既定的条件下, 应考虑中墙自身在整个外荷载的作用下的安全性与稳定性。而隧道中墙在整个开挖过程中的最不利受载时间并不是出现在最终完工时, 所以有必要模拟其开挖过程, 找出中墙所受的最不利荷载及其所在的开挖步骤。由于开挖过程的不同, 即使按照在线弹性范围内考虑, 虽然只有一种最终结果, 但是其受力过程是明显不一样

的,而且最不利荷载也不一定在同一种情况下出现,因此,有必要考虑不同开挖工序的差别以比较不同开挖工序的优劣。具体考虑中墙以下方面随开挖过程的变化:

(1) 中墙的强度。计算中墙中最大截面应力,包括正应力与剪应力是否满足要求。

(2) 中墙的变形。计算中墙的变形是否过大,表现为中墙顶底的位移差是否过大。

(3) 中墙的稳定性。分别计算中墙在整个外荷载的作用下对左、右脚趾的倾覆弯矩,以确定中墙是否稳定。

(4) 在给定混凝土等级的情况下,对中墙进行配筋计算。

4 开挖工序设计

对本隧道考虑用分块开挖的方式,并考虑两种不同的开挖工序情况,具体分块情况见图1。有限元计算软件为 ANSYS5.6,开挖过程的模拟通过生死单元的变换与单元材料的变换来实现。

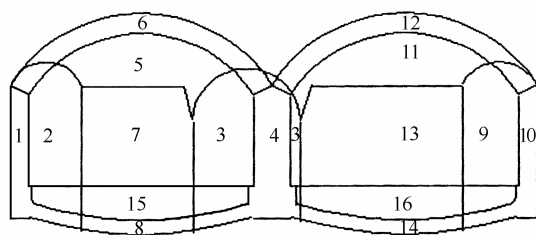


图1 开挖的分块示意图

Fig.1 Segmentation sketch map of excavation

第一种开挖工序,即左、右隧道平行开挖的施工工序:

- (1) 开挖之前,全部材料为岩石;
- (2) 左、右洞开挖,即挖空 1, 2, 9, 10 块;
- (3) 边墙初期支护、二次衬砌施工,即将 1, 10 块的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (4) 开挖中洞,即挖空 3, 4;
- (5) 做成中墙,即块 4 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (6) 左、右洞上半部分开挖,即挖空 5, 6, 11, 12 块;
- (7) 左、右洞拱顶初期支护、二次衬砌施工,即将 6, 12 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (8) 左、右洞核心岩石开挖,即挖空 7, 13, 8, 14, 15, 16 块;
- (9) 左、右洞仰拱施工及路面施工,即将 8, 14

的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土, 15, 16 块的材料变为强度为 C15 的钢筋混凝土。

第二种开挖工序,即先左隧道开挖后右隧道开挖的施工工序:

- (1) 开挖之前,全部材料为岩石;
- (2) 左洞开挖及左边墙施工,即挖空 1, 2 块,且将块 1 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (3) 中洞开挖,即挖空 3, 4 块;
- (4) 中墙施工,即将块 4 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (5) 左洞上半部分开挖,即挖空 5, 6 块;
- (6) 左洞拱顶初期支护、二次衬砌施工,即将块 6 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (7) 左洞核心岩石开挖,即挖空 7, 8, 15 块;
- (8) 左洞仰拱施工,即将块 8 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (9) 右洞开挖,即挖空 9, 10 块;
- (10) 右边墙施工,即将 10 块的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (11) 右洞上半部分岩石开挖,即挖空 11, 12 块;
- (12) 右洞拱顶初期支护、二次衬砌施工,即将块 12 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (13) 右洞核心岩石开挖,即挖空 13, 14, 16 块;
- (14) 右洞仰拱施工,即将块 14 的材料变为强度为 C25 的钢筋混凝土;
- (15) 左、右洞路面施工,即将 15, 16 块的材料变为强度为 C15 的钢筋混凝土。

由于只对中墙进行考虑,故对第一种开挖工序,取第 5 步及其以后计算步骤的数据,而对第二种开挖工序取第 4 步及其以后计算步骤的数据。

5 计算结果

对于中墙,可以近似地考虑为一截面为 1.5×1.0 m 的钢筋混凝土柱,考虑通过上、中、下三个截面来控制此柱,分别标为截面 I, II, III, 参见图 2。

(1) 在变形方面,计算 A, B 两点在水平方向上的位移差。其中, B 点为中墙底中线上点,结果为正值时表示中墙绕底中线顺时针倾斜,反之,为逆时针倾斜;

(2) 在强度方面,假定中墙底面与岩石面结合的很好,不会出现破坏现象,而仅仅只考虑其截面上的情况;由计算结果得到三个截面上的剪力、轴力和弯矩,根据此结果可以验算中墙的强度;

(3) 在稳定性方面,仅对第二种开挖工序计算整个中墙分别绕 C, D 两点的倾覆弯矩,因为对第一

种工序近似为对称开挖,进行类似的验算意义不大。其中 C, D 两点是设计与中墙一起施工的左、右脚趾的两个端点,具体位置见图 2。

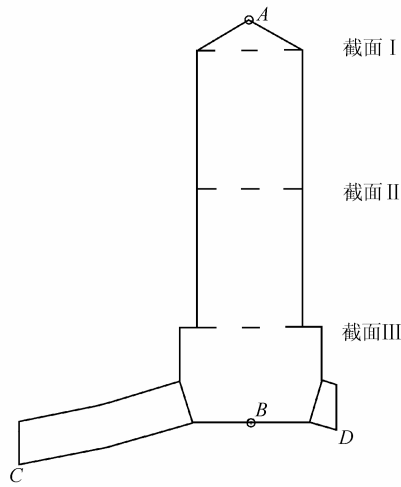


图 2 数据测量位置
Fig.2 Measure position of data

5.1 第一种开挖工序

5.1.1 A, B 两点的水平方向上的相对位移差

计算结果见图 3,中墙顶底位移差的最大值发生在第 5 步,可能是由于中墙开挖时并非完全对称,而是略偏向于左边的缘故。

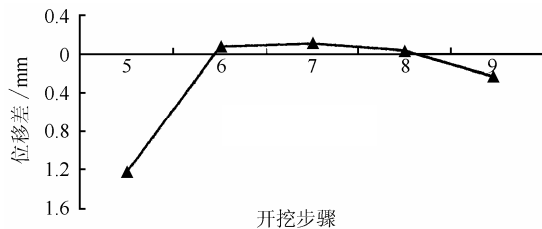


图 3 第一种工序中墙顶部与底部的位移差
Fig.3 Displacement difference between top and bottom of mid-partition for first procedure

5.1.2 配筋计算

由计算得到的轴力见表 1,弯矩见图 4:

表 1 第一种工序中墙三个截面上的轴力
Tablet 1 Axile force on three section of mid-partition for first procedure

开挖步骤	轴力 / kN		
	截面 I	截面 II	截面 III
5	154.8	194.7	154.8
6	7.1	81	154.8
7	8 911.8	8 985.6	9 059.5
8	8 928.3	9 002.1	9 076
9	8 916.9	8 990.8	9 064.7

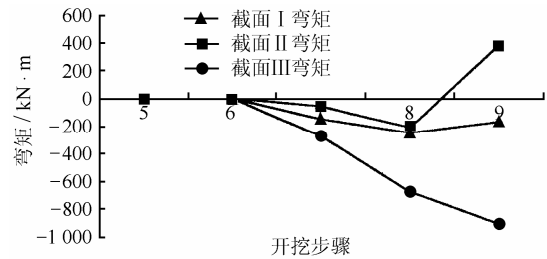


图 4 第一种工序中墙三截面上的弯矩
Fig.4 Moment on three section of mid-partition for first procedure

根据表 1 与图 4,中墙在整个开挖过程中主要是由轴力来控制截面,三个截面上的轴力基本上是一样的,只是弯矩略有不同,且比轴力小得多,可见中墙在开挖过程中始终是受小偏压控制。其中截面 III 的受力最不利,在最后一步中,不但轴力最大,弯矩也是最大,是中墙所受的最不利荷载,其值为 $N = 9\ 064.7\text{ kN}$, $M = 913.3\text{ kN} \cdot \text{m}$ 。考虑到隧道在使用时基本是受对称荷载,则应对中墙进行对称配筋,取中墙的力学模型为小偏心受压钢筋混凝土柱,经过计算得到在 1 m 的范围内的配筋小于柱的最小配筋率,故取 $A_s = A'_s = 3\ 000\text{ mm}^2$ 。

5.1.3 正应力与剪应力验算

(1) 在整个开挖过程中,假定中墙始终在弹性范围内,可以算出其截面上的最大正应力与剪应力。由表 1 可以看出: $N_{\max} = 9\ 064.7\text{ kN}$,对应的 $M_{\max} = 913.3\text{ kN} \cdot \text{m}$,则截面上的最大压应力与最小压应力分别为 8.48 MPa 和 3.61 MPa。

(2) 由计算得出中墙截面上的剪力如表 2:

表 2 第一种工序中墙三截面上的剪力
Tablet 2 Shear force on three section of mid-partition for first procedure

开挖步骤	轴力 / kN		
	截面 I	截面 II	截面 III
5	0	0	0
6	0	0	0
7	108.3	108.3	108.3
8	236.5	236.5	236.5
9	27.6	27.6	27.6

根据表 2 可以看出,在任一步开挖步骤中,中墙不同截面的剪力均相等,只是随开挖的步骤而变化,最不利荷载为 $V = 236.5\text{ kN}$,则截面上的剪应力为:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{236.5 \times 10^3}{1\ 500 \times 1\ 000} = 0.16\text{ MPa}。$$

根据计算,截面上的最大正应力值为 8.48 MPa,

最小正应力值为 3.61 MPa, 剪应力值为 0.16 MPa, 对于 C25 钢筋混凝土而言, 强度是满足的。

5.2 第二种工序

5.2.1 A、B 两点的水平方向上的相对位移差

A、B 两点的相对位移差, 由计算数据绘制图 5, 当左洞上部挖空时, 最大值出现在第 5 步。

5.2.2 配筋计算

由计算得到的轴力见表 3, 弯矩见图 6。

(1) 在小偏压中, 取最不利荷载 $N_{\max} = 9\,530.9$ kN 时, 对应的 $M = 44.3$ kN·m;

(2) 在大偏压中, 取最不利弯矩 $M_{\max} = 3\,607.1$ kN·m 时, 对应的 $N = 8\,163.4$ kN; 经过计算得到在 1 m 的范围内的配筋均小于柱的最小配筋率, 故取 $A_s = A'_s = 3\,000$ mm²。

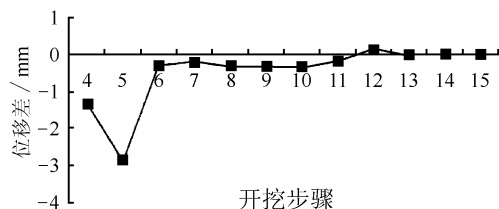


图 5 第二种工序中墙位移差变化

Fig.5 Displacement difference between top and bottom of mid-partition for second procedure

可以看出, 与第一种工序不同的是, 由于不对称开挖的影响, 使得截面上的弯矩很大, 与轴力一起共同控制截面, 故可以认为, 在整个开挖过程中, 中墙既受大偏压状态控制, 又受小偏压状态控制。

5.2.3 正应力与剪应力验算

(1) 由表 3 看出, 中墙三个截面上轴力基本一致, 但不是一直起主要控制作用, 所以取两种情况来验算截面正应力: ① $N_{\max} = 9\,530.9$ kN, $M = 44.3$ kN·m 时, ② $M_{\max} = 3\,607.1$ kN·m, $N = 8\,163.4$ kN 时, 则截面上的最大压应力与最小压应力分别为: ① 6.47 MPa 和 6.24 MPa; ② 15.06 MPa 和 -4.18 MPa。

(2) 由于同第一种开挖工序一样, 在任一步开挖步骤中, 中墙不同截面的剪力均相等。这里仅给出截面 III 的剪力随开挖步骤的变化, 见图 7。

根据图 8 取截面上的最大剪应力为: $\tau = \frac{V}{A}$

$$\frac{911 \times 10^3}{1500 \times 1000} = 0.61 \text{ MPa}。$$

根据计算, 截面上的最大正应力值为 15.06 MPa, 最小正应力值为 -4.18 MPa, 剪应力值为 0.61 MPa。

对于 C25 钢筋混凝土而言, 抗剪强度满足要求, 但是拉应力和压应力均已经超出混凝土的强度, 因此, 需要配置受拉和受压钢筋。

表 3 第二种工序中墙三截面上的轴力

Tablet 3 Axile force on three section of mid-partition for second procedure

开挖步骤	轴力 / kN		
	截面I	截面II	截面III
4	7.1	81.0	154.8
5	7.1	81.0	154.8
6	5 746.7	5 820.6	5 894.5
7	5 794.4	5 868.3	5 942.2
8	5 794.2	5 868.1	5 941.9
9	5 961.8	6 035.6	6 109.5
10	5 875.4	5 949.3	6 023.1
11	8 163.4	8 237.3	8 311.2
12	8 940.1	9 013.9	9 087.8
13	8 881.4	8 955.3	9 029.2
14	9 175.0	9 248.9	9 322.8
15	9 383.2	9 457.0	9 530.9

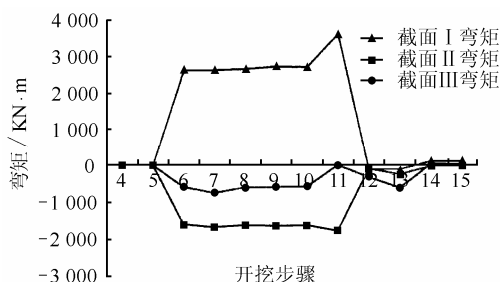


图 6 第二种工序中墙三截面上的弯矩

Fig.6 Moment on three section of mid-partition for second procedure

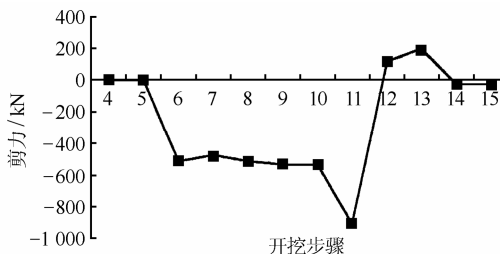


图 7 第二种工序中墙截面 III 剪力

Fig.7 Shear force on the third section of mid-partition for second procedure

5.2.4 倾覆弯矩

由于对这种开挖工序, 中墙受到比较明显的偏压作用, 除进行同第一种工序的计算外, 有必要对中墙进行倾覆稳定验算。

经过计算,中墙绕 C 、 D 两点的倾覆弯矩如图 8。

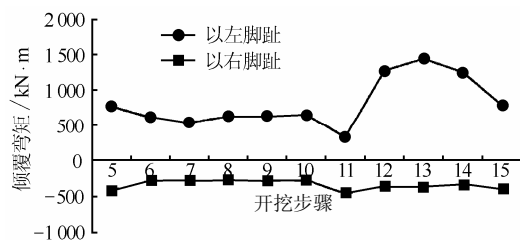


图 8 第二种工序倾覆弯矩变化

Fig.8 Overturn Moment of mid-partition for second procedure

由上图可以看出,在整个开挖过程中,中墙在设计脚趾长度的条件下始终是安全的,同时也表明中墙的倾覆弯矩问题是不容忽略的,设计时保留一定长度的墙趾是有必要的。

6 比较分析

在上面计算的基础上对两种开挖工序下中墙的性能进行比较分析,可以得出以下结论:

(1) 连拱隧道的对称开挖要比非对称开挖更容易控制中墙的变形,采用对称开挖时,中墙的变形要小得多。

(2) 连拱隧道的非对称开挖,若脚趾长度设计不够,容易导致中墙的整体倾覆。

(3) 连拱隧道的非对称开挖容易导致中墙受力恶化,出现开挖时的最不利荷载比正常使用时的荷载大很多的情况。

(4) 对称开挖条件下中墙的设计限制按照使用条件下的荷载为主,是可以满足施工时的稳定及强度要求的。

(5) 对中墙而言,连拱隧道的对称开挖工序优于非对称开挖工序。

参考文献

- [1] 孙钧,汪炳鉴. 地下结构有限元分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [2] 周玉宏,赵燕明,程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679—683.
- [3] 公路隧道设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [4] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,方正昌. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [5] C S 德赛, J T 克里斯琴. 岩土工程数值方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [6] 余晓琳,黄小华,彭立敏. 软弱围岩条件下连拱隧道施工阶段的受力分析[J]. 西部探矿工程, 2002, 77(4): 66—68.
- [7] 孙钧. 地下工程设计理论与实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.

上接第 1101 页

沉降拟合分析,并配合指数曲线法求得了较为准确的固结系数和渗透系数,把求得的参数应用于有限元计算得到了与现场实测一致的结果。

(3) 从沉降计算结果看,河滩相软土地基的瞬时沉降较大,固结速度较快。主要是因为河滩相软土渗透性好,排水较快。用袋装砂井能有效的处理河滩相软土地基。

(4) 从研究结果可看出,在路堤填土小于 2.5 m 时,硬壳层对减小软土地基的沉降有明显作用。如路堤高度不超过 2.5 m 时,可对软土地基不处理。

(5) 在荷载加载期,沉降与填土高度有很好的线性关系,在填土高度小于 2.5 m 时,填土高度对沉降影响很小。因此,在施工中可以加快填土速度,

当大于 2.5 m 时,填土高度对沉降的影响很大,此时施工时应合理的确定填土速度。

参考文献

- [1] 谢新宇,朱向荣,潘秋元. 由实测沉降过程分析未打穿竖井地基固结参数[A]. 第三届全国青年岩土力学与工程会议论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1998.
- [2] 魏汝龙. 从实测沉降推算固结系数[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 12—19.
- [3] 王晓谋. 河滩相软土地基变形规律及硬壳层研究. [博士学位论文 D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [4] 谢康和,周健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.