

文章编号: 1000-7598-(2008) 03-0828-05

高速公路连拱隧道中墙治理方案研究

赵东平, 王明年

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 针对某高速公路连拱隧道中墙混凝土强度不足问题, 采用有限元数值计算方法对连拱隧道中墙进行了计算, 发现中墙的安全性不能满足规范要求。为了保证隧道中墙的安全使用, 分别对全部凿除中墙和部分凿除中墙的治理方案进行了研究。结果表明: 采用分段部分凿除的方案对中墙进行治理时, 对初期支护影响较小, 未凿除的中墙内力略有增大, 对隧道整体结构影响很小; 而采用全部凿除方法对中墙进行治理时, 对初期支护影响较大。对施工进尺长度的研究表明, 在Ⅲ级和Ⅳ级围岩区段隧道中墙治理时, 一次凿除长度分别取为 12 m 和 9 m 是较为合理的。修复后的连拱隧道中墙安全性满足规范要求。

关 键 词: 高速公路; 连拱隧道; 中墙; 治理方案

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Study on treatment schemes of an expressway multi-arch tunnel middle wall

ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The middle wall of an expressway multi-arch tunnel is calculated by using finite element numerical method aiming at its strength deficiency. The result indicates that the safety factors of the middle wall cannot satisfy Code's requirements. The treatment projects of chiseling away the middle wall partly and wholly are researched; the result indicates that when the middle wall is repaired by the chiseling away partly method, the treatment of middle wall will have a small impact on the preliminary lining; the inner force of the original middle wall will increase slightly which exerts a small effect on the whole tunnel structure. However, when the middle wall is repaired by the chiseling away wholly method, the treatment of middle wall will have a marked impact on the preliminary lining. The study on the length of construction indicates that when the once length equals respectively to 12 m and 9 m on the three and four grade rock mass is reasonable. The safety of the repaired multi-arch tunnel middle wall can satisfy the Code's requirements.

Key words: expressway; multi-arch tunnel; middle wall; treatment scheme

1 引 言

连拱隧道是一种比较特殊的隧道结构。由于其线形流畅、占地面积少, 空间利用率高、避免了洞口路基或大桥分幅、与洞外线路连接方便; 同时在适应地形条件、环境保护以及工程数量上都具有优越性, 因此, 在我国连拱隧道得到越来越多的应用^[1, 2]。但由于连拱隧道开挖跨度较大、施工工序繁多, 围岩应力变化和衬砌荷载转换十分复杂, 尤其中墙受力, 压、拉、弯、扭、剪均有^[3]。另外, 中隔墙的防排水也是连拱隧道设计与施工的一个难点。

从已建成的连拱隧道来看, 中墙的开裂和渗漏水是连拱隧道的主要病害, 此外也有部分已建成的连拱隧道出现了中墙混凝土强度不足问题。总体上

看, 连拱隧道的中墙设计、施工是连拱隧道建设的关键和难点^[4]。

如果已经建成的连拱隧道中墙混凝土强度不足, 则不能保证隧道的正常安全使用。因此, 本文针对某已建成高速公路连拱隧道中墙混凝土强度不足的情况, 对既有隧道中墙安全性进行了评价, 根据评价结果对不满足规范要求的区段给出了两种治理方案, 通过方案比选给出了较为合理的一种治理方案。在选定治理方案的基础上, 为了保证施工安全, 对中墙的一次凿除长度进行了研究。

2 工程概况

国道主干线某高速公路连拱隧道全长 270 m。设计纵坡为 3.8 %; 隧道纵向洞身主要为Ⅳ级和Ⅲ

收稿日期: 2006-05-08

作者简介: 赵东平, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事地下结构计算及理论研究。E-mail: dpingzhao@163.com

级围岩, 根据线路纵断面图, IV级围岩最大埋深为 150 m, III级围岩最大埋深为 100 m。隧道左右线均位于曲线上。

该连拱隧道III级围岩设计为整体式直中墙, 采用 3 导洞法施工, IV级围岩设计为整体式曲中墙, 采用 3 导洞与主洞上下台阶组合法施工。具体如图 1 和图 2 所示。

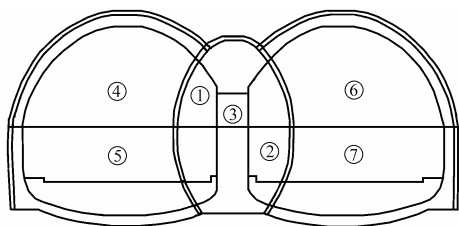


图 1 IV级围岩施工图

Fig.1 Construction drawing of the fourth grade rock mass

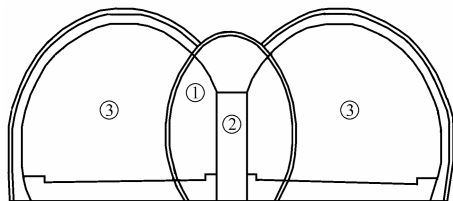


图 2 III级围岩施工图

Fig.2 Construction drawing of the third grade rock mass

隧道中墙采用的是 C25 素混凝土, 厚度为 1.6 m。由于施工质量问题, 隧道建成后, 经试验单位对中墙取样检查时发现, 中墙多个位置混凝土极限强度小于 C25 号混凝土的标准强度, 其实测中墙混凝土的强度如表 1 所示。

表 1 中墙混凝土实测强度

Table 1 Measured concrete strength of middle wall

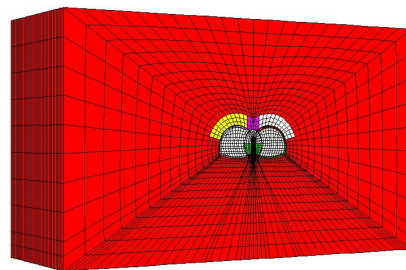
编号	钻芯位置	围岩级别	极限抗压强/ MPa
1	k101+073.6	IV	21.2
2	k101+085.8	IV	16.4
3	k101+091.6	IV	7.2
4	k101+101.7	III	5.3
5	k101+107.6	III	8.5
6	k101+118.6	III	7.9
7	k101+131.1	III	12.9
8	k101+133.4	III	16.0
9	k101+139.0	IV	12.9
10	k101+144.3	IV	12.9
11	k101+159.8	IV	22.6
12	k101+163.3	IV	11.3
13	k101+172.3	IV	14.6
14	k101+183.8	III	12.9
15	k101+191.3	III	12.3
16	k101+201.8	IV	18.3
17	k101+205.9	IV	10.9
18	k101+216.4	IV	8.7

《公路隧道设计规范》^[5] 中 C25 号混凝土的极限抗压强度为 19.0 MPa。由此可见, 除 IV 级围岩的 k101+073.6 和 k101+159.8 区段的中墙混凝土强度合格外, 该连拱隧道其余区段的中墙混凝土的极限强度均不能满足规范要求。

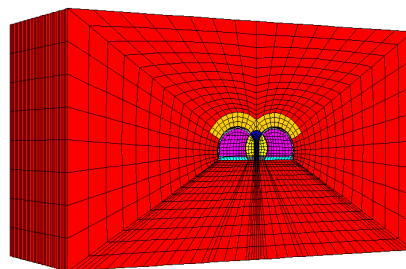
中墙是连拱隧道结构受力的关键构件, 考虑荷载的长期作用效应对结构的不利影响, 对该连拱隧道中墙不满足规范要求的区段需采用经济、可行、安全、合理的方案进行治理。

3 有限元计算模型

连拱隧道 IV 级和 III 级围岩有限元模型计算范围选取分别为: 上部取拱顶以上 32 m 和 27 m, 下部取至隧道仰拱 (或底板) 以下 30 m 和 25 m, 左右均取 60 m, 隧道长度均取 40 m。隧道左右为水平约束, 下部为垂直约束, 上部有围岩垂直荷载, 前方和后方均有垂直其面的约束。计算中, 用 8 节点六面体实体单元模拟围岩、支护结构。计算模型总单元数分别为 83 440 个和 66 560 个, 总节点数分别为 87 043 个和 69 700 个。隧道有限元模型如图 3 所示。



(a) IV级围岩



(b) III级围岩

图 3 连拱隧道有限元模型

Fig.3 The FEM model of the multi-arch tunnel

3.1 计算参数取值

本次计算参考《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[5] 对各类围岩物理力学参数取下限值。详见表 2。

表 2 有限元分析参数

Table 2 Analysis parameters of finite elements

材料	弹性模量 / GPa	泊松比 ν	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
IV 级围岩	1.0	0.32	0.20	30	2.10
III 级围岩	6.0	0.26	0.80	40	2.30
C25 混凝土	29.5	0.20	/	/	2.50

3.2 控制基准

素混凝土和钢筋混凝土的安全系数根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[5] 标准, 采用表 3 中最小安全系数进行评价。

表 3 混凝土最小安全系数

Table 3 The minimum safety factors of concrete and reinforced concrete

圬工种类	荷载组合	破坏原因	
		抗压	抗拉
素混凝土	主要荷载	2.4	3.6
钢筋混凝土	主要荷载	2.0	2.4

考虑到初期支护内有钢架和钢筋网, 按表 3 中钢筋混凝土栏内数值乘以折减系数 0.9 进行评价^[5]。

4 中墙现阶段安全性评价

根据设计的施工方案, 对隧道的施工过程进行了三维数值仿真模拟, 通过分析, 隧道按正常施工工序施工完毕后结构的受力状态来判别中墙结构的安全性, 并以此作为判别是否对其进行治理的依据。计算结果如表 4 所示, 由于中墙系受压应力控制, 故表中计算应力为第三主应力 σ_3 。

表 4 隧道中墙计算结果

Table 4 Calculation result of tunnel middle wall

编号	围岩级别	实测强度 / MPa	计算应力 / MPa	安全系数
1	IV	21.2	9.2	2.3
2	IV	16.4	9.2	1.8
3	IV	7.2	9.2	0.8
4	III	5.3	5.2	1.0
5	III	8.5	5.2	1.6
6	III	7.9	5.2	1.5
7	III	12.9	5.2	2.5
8	III	16.0	5.2	3.1
9	IV	12.9	9.2	1.4
10	IV	12.9	9.2	1.4
11	IV	22.6	9.2	2.5
12	IV	11.3	9.2	1.2
13	IV	14.6	9.2	1.6
14	III	12.9	5.2	2.5
15	III	12.3	5.2	2.4
16	IV	18.3	9.2	2.0
17	IV	10.9	9.2	1.2
18	IV	8.7	9.2	0.9

注: 表中的编号与表 1 中的编号相对应。

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[5], 由表 4 可见:

(1) IV 级围岩地段, 除了 k101+073.6 和 k101+159.8 两个区段 (表 4 中 1 和 11 号区段) 中墙混凝土安全系数满足规范要求外, 其他区段中墙由于混凝土质量问题, 其安全系数不满足规范要求。

(2) III 级围岩地段, k101+101.7~k101+118.6 区段 (表 4 中 4~6 号区段), 实测中墙混凝土安全系数小于规范值, 这说明该区段中墙的安全性不满足规范要求。

5 中墙治理方案

三维计算结果表明, 本隧道中墙共有 12 个区段不能满足安全使用要求, 其中 IV 级围岩共 9 个区段, III 级围岩 3 个区段, 必须进行治理。其他区段根据情况, 可以有选择地进行治理。考虑目前施工现状, 可能采取的治理方案有两种, 即整段凿除再修复和部分凿除再修复。

整段凿除是对不满足安全性要求的中墙全部凿除, 即凿除一段, 修复一段; 再凿除一段, 再修复一段。如此往复, 直到治理完成。部分凿除是在中墙两侧分别凿除一部分厚度混凝土, 保留中间一部分混凝土, 然后将两侧凿除部分用钢筋混凝土浇注填平。此方案可以较好地解决中墙防排水问题。对于本隧道, 研究了一次凿除中墙左右各 30 cm 厚度的情况。

在按选定的方案施工时, 一次凿除的长度越长越好, 因为这样可以缩短工期, 降低中墙治理成本。但从隧道结构安全的角度来看, 如果一次凿除的中墙长度过长可能会危及隧道既有结构的安全。因此, 有必要对中墙的一次凿除长度进行分析。

6 计算结果及分析

6.1 计算结果比较

首先, 根据隧道的施工方案对不同围岩级别隧道的施工过程进行了模拟, 并计算出施工后隧道初期支护及中墙的安全系数; 再以此为初应力场, 计算中墙凿除对既有初期支护及中墙的影响。

分析时, 在连拱隧道初期支护上选择了 12 个研究断面, 断面编号与隧道结构位置对应关系见图 4, 为了比较两种方案的优劣, 分别模拟计算了 IV 级和 III 级围岩情况下, 施工进尺为 6 m, 一次凿除全部中墙以及一次凿除中墙左右各 30 cm 厚度的情况。这两种治理方案计算结果列于表 5 和表 6。

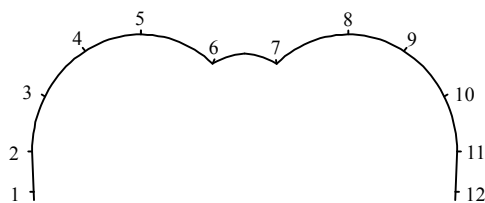


图4 断面编号位置

Fig.4 Position of cross-section numbering

表5 IV级围岩中墙治理后隧道结构安全系数

Table 5 The safety factors of the fourth grade rock mass multi-tunnel after the middle wall repaired

断面编号	受压控制/受拉控制		
	初值	整段凿除	部分凿除
1	2.3/	1.4/	2.0/
2	2.5/	1.6/	2.0/
3	2.8/	1.9/	2.2/
4	7.1/	3.6/	4.3/
5	7.7/	5.1/	13.0/
6	7.1/	/2.6	/7.1
7	7.7/	/2.9	/10.3
8	8.1/	8.1/	14.4/
9	7.3/	3.9/	4.4/
10	2.8/	2.0/	2.2/
11	2.5/	1.7/	2.1/
12	2.4/	1.5/	2.0/

注:“/”左右两侧的数据分别表示该截面受压和受拉控制,表6~8同此注。

表6 III级围岩中墙治理后隧道结构安全系数

Table 6 The safety factors of the third grade rock mass multi-tunnel after the middle wall repaired

断面编号	受压控制/受拉控制		
	初值	整段凿除	部分凿除
1	3.9/	3.0/	3.6/
2	4.7/	3.8/	4.4/
3	6.2/	4.6/	5.8/
4	8.9/	3.9/	8.8/
5	11.7/	/6.7	8.4/
6	14.1/	/6.6	/13.7
7	14.5/	/6.5	/15.1
8	9.3/	/5.2	7.9/
9	10.4/	3.8/	8.6/
10	6.2/	4.6/	5.8/
11	4.7/	3.8/	4.4/
12	3.9/	3.0/	3.6/

由表中的计算结果可以看出,如一次凿除全部中墙,再重新浇筑的治理方案明显对连拱隧道的既有初期支护影响较大。对于IV级围岩区段,中墙一次性凿除后,初期支护左墙脚安全系数由原来的2.3降低为1.4,拱顶处安全系数由原来的7.1变为2.6,且为受拉控制。由此可见,中墙治理的施工过程中既有隧道初期支护安全性不满足规范要求。对于III

级围岩区段,当中墙一次性凿除后,初期支护最小安全系数由原来的3.9降低为3.0,受压控制。同时,隧道初期支护拱顶至中墙位置的安全系数由原来的受压控制变为受拉控制,且数值变化幅度较大。

而如果采用部分凿除的方案,中墙施工时隧道初期支护受扰动较小,且施工后中墙最小安全系数能满足规范要求。中墙部分凿除后,原有中墙的安全系数在表4的基础上略有减小,减小幅度小于8%,隧道整体结构受影响的程度较小。

6.2 凿除长度计算

根据施工现场的条件,设计了3种凿除长度,分别为一次凿除中墙长度为6,9,12m三种情况。本次以隧道初期支护施工后二次衬砌施工前的应力场为初始应力场对以上三种情况进行了数值模拟计算。

当一次凿除中墙左右各30cm厚度,并采用不同的施工进尺时,其计算结果如表7和表8所示。

表7 IV级围岩中墙治理后初期支护安全系数

Table 7 The safety factors of preliminary lining after the middle wall repaired of the fourth grade rock mass

断面编号	受压控制/受拉控制			
	初值	进尺6m	进尺9m	进尺12m
1	2.3/	2.0/	1.9/	1.8/
2	2.5/	2.0/	1.9/	1.7/
3	2.8/	2.2/	2.0/	1.9/
4	7.1/	4.3/	3.9/	3.6/
5	7.7/	13.0/	11.4/	10.8/
6	7.1/	/7.1	/7.0	/7.6
7	7.7/	/10.3	/9.7	/10.1
8	8.1/	14.4/	12.8/	12.1/
9	7.3/	4.4/	4.0/	3.7/
10	2.8/	2.2/	2.1/	1.9/
11	2.5/	2.1/	1.9/	1.7/
12	2.4/	2.0/	1.9/	1.8/

表8 III级围岩中墙治理后初期支护安全系数

Table 8 The safety factors of preliminary lining after the middle wall repaired of the third grade rock mass

断面编号	受压控制/受拉控制			
	初值	进尺6m	进尺9m	进尺12m
1	3.9/	3.6/	3.6/	3.6/
2	4.7/	4.4/	4.4/	4.4/
3	6.2/	5.8/	5.7/	5.7/
4	8.9/	8.8/	8.4/	8.0/
5	11.7/	/8.4	/8.1	/7.9
6	14.1/	/13.7	/13.6	/13.9
7	14.5/	/15.1	/14.6	/14.3
8	9.3/	7.9/	/7.7	/7.5
9	10.4/	8.6/	8.3/	7.8/
10	6.2/	5.8/	5.7/	5.7/
11	4.7/	4.4/	4.4/	4.3/
12	3.9/	3.6/	3.6/	3.6/

由表 7 和表 8 可以看出,随着一次凿除中墙长度的增加,连拱隧道中墙初期支护安全系数逐渐减小。中墙部分凿除后,连拱隧道初期支护与中墙相接位置的安全系数由受压控制变为受拉控制。对于Ⅲ级围岩区段,当施工进尺选择 12 m 时,其初期支护最小安全系数仍能满足规范要求,故其进尺长度可取 12 m;对于Ⅳ级围岩区段,当施工进尺长度选择 12 m 时,中墙施工后初期支护 1 号和 2 号断面位置安全系数小于表 3 中的最小安全系数标准。故认为进尺长度应以小于 12 m 为宜。结合施工现场条件,利用现有模板台车,选择 9 m 较为合适。

6.3 修复后中墙安全性

在对连拱隧道中墙进行治理时,应保证原有初期支护的安全,按第 6.2 节选择的进尺施工后,也应能保证修复后的中墙满足规范要求。由于研究断面距离开挖端 9 m,虽然当本区段内中墙被凿除后应力释放,当此部分中墙再次用混凝土修复后暂时不受力,但是当下一个区段的中墙被凿除时,研究断面修复后的中墙仍将受力。全部中墙被治理后,修复后的中墙安全性如表 9 和表 10 所示。

表 9 Ⅳ级围岩修复后中墙安全系数

Table 9 The safety factors of the middle wall repaired of the fourth grade rock mass

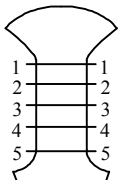
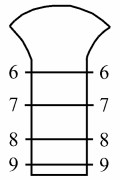
断面	安全系数	控制标准	中墙示意图
1-1	5.4	压	
2-2	4.5	压	
3-3	4.2	压	
4-4	3.9	压	
5-5	5.8	压	

表 10 Ⅲ级围岩修复后中墙安全系数

Table 10 The safety factors of the middle wall repaired of the third grade rock mass

断面	安全系数	控制标准	中墙示意图
6-6	10.9	压	
7-7	9.4	压	
8-8	9.7	压	
9-9	11.4	压	

由表 9 和表 10 可知,Ⅳ级和Ⅲ级围岩中墙经部分凿除再修复后,其最小安全系数分别为 3.9 和 9.4,分别位于的 4-4 断面和 7-7 断面,均为受压控制。对照表 3 可知,修复后的连拱隧道中墙安全系数满足规范要求。

7 结论及建议

综合以上分析,可以得出如下结论:

(1) 在连拱中墙混凝土强度不足的情况下,对中墙采用部分凿除然后再修复的方案是可行的。方案比选认为,采用部分凿除的方案对中墙进行治理对连拱隧道既有结构影响较小,对中墙的防排水有利,故采用部分凿除中墙再修复的方案较为合理。

(2) 采用部分凿除中墙时,对Ⅳ级围岩区段,一次施工进尺宜小于 12 m。结合工地现有条件,进尺长度取 9 m 是较为合理的。对Ⅲ级围岩区段,可以选择 12 m。

(3) 计算结果表明,修复后的连拱隧道中墙安全性满足规范要求。说明达到了中墙治理的目的。

(4) 建议中墙治理时,加强施工监控量测,发现情况及汇报。在施工时,对于特别薄弱的中墙区段进行治理时其施工进尺在结论(2)中的基础上适当减小,以确保施工安全。

参考文献

- [1] 余健,何川.连拱隧道施工全过程有限元模拟[J].现代隧道技术,2004,12(6):5-10.
SHE Jian, HE Chuan, FEM simulation of the whole construction process of a multi-arched tunnel[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2004, 12(6): 5-10.
- [2] 高世军,吴怀义,熊世龙.双连拱隧道的技术性设计[C]//2001年全国公路隧道学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2001:46-49.
- [3] 申玉生,赵玉光.高速公路双连拱隧道的中墙力学特性分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(2):200-204.
SHEN Yu-sheng, ZHAO Yu-guang. Study on mechanical characteristics of middle-wall in twin-bore connecting arch tunnel of the express highway[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(2): 200-204.
- [4] 李玉文,田尚志,陈贵红.连拱隧道中墙设计[J].公路,2004,10:181-184.
LI Yu-wen, TIAN Shang-zhi, et al. Design of multi-arched tunnel's middle-wall[J]. **Highway**, 2004, 10: 181-184.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTG D70-2004. 公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.