

公路双连拱隧道中隔墙结构优化研究

夏永旭¹

鲁彪^{1,2}

(1.长安大学公路学院, 西安, 710064) (2.浙江省公路勘察设计院, 杭州, 310006)

摘要: 针对双连拱隧道中隔墙结构设计与防排水存在的问题, 应用有限元数值模拟方法对双连拱隧道中隔墙的结构进行了优化研究。曲中墙顶部支撑是最为合理的对称中隔墙结构形式。中隔墙的厚度宜定在 1.5m~1.8m 之间。建议中隔墙的高度取 4.25m。

关键词: 双连拱 隧道 结构 优化

The Optimization of Structure of Mid-board in Highway Multi-arch Tunnel

XIA Yong-xu¹, Lu Biao^{1, 2}

(1. Highway Institute, Chang' an University, Xi' an 710064, China) (2. Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communication, hangzhou 310006, China)

Abstract: aiming at the structure of mid-board and the problem of waterproof in multi-arch tunnel, we analyze mid-board of multi-arch tunnel. At last ,we come up curving and top stay-bearing mid-board is the best cross section in multi-arch tunnel. We also suggest that the width of mid-board should be between 1.5m~1.8m and height of mid-board should be about 4.25m.

Keyword: Multi-arch Tunnel Optimization of Structure

1. 引言

连拱隧道是随我国公路建设的迅速发展而提出的新型大跨度隧道形式, 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。因此在我国高速公路的近几年建设中, 连拱隧道得到越来越多的应用, 仅在福建省的福泉高速公路、罗长高速公路和三福高速公路中已建成和正在修建的连拱隧道就有 25 座^[1]。但是由于连拱隧道开挖跨度较大, 施工工序繁多, 开挖和支护相互交错, 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。另外, 中隔墙处的防排水也是双连拱隧道设计与施工的一个难点。因此本文针对双连拱隧道设计与施工中存在的一系列问题, 应用有限元数值方法着重研究双连拱隧道中隔墙不同结构形式的力学特性, 通过分析比较确定最佳的中隔墙结构形式。

2. 双连拱隧道中隔墙结构形式研究

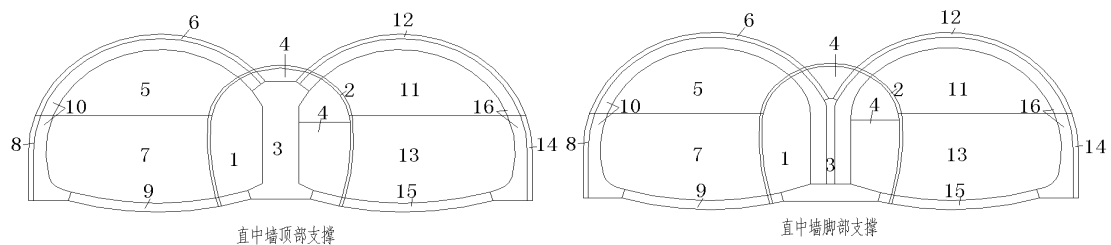
2.1 计算模型及相关参数

目前国内外双连拱隧道的中隔墙结构形式从大的方面分为对称形和非对称形^[1]，但对称形采用最多。对称形又可分为直墙顶部支撑、曲墙顶部支撑和直墙脚部支撑，这三种结构形式在过程实践中都有应用，但他们的受力状态差异较大。为了评估这三种中隔墙的结构特性，本文应用有限元数值模拟方法，结合双连拱隧道的实际施工工序，研究三种中隔墙在整个施工过程中的力学特性。图 1 给出了三种中隔墙形状及开挖步骤。统一按照中导正洞台阶法，其施工工序为：(1)开挖中导洞；(2)中导洞支护；(3)中墙砌筑及铺设中墙顶防水板；(4)中墙右侧回填（或设置工字钢临时支撑）及中墙顶部回填；(5)左洞上台阶开挖；(6)左洞拱部初期支护；(7)左洞下台阶开挖；(8)左洞边墙初期支护；(9)左洞仰拱浇筑；(10)左洞铺设防水层及二衬混凝土浇筑；(11)右洞上台阶开挖；(12)右洞拱部初期支护；(13)右洞下台阶开挖；(14)右洞边墙初期支护；(15)右洞仰拱浇筑；(16)右洞铺设防水层及二衬混凝土浇筑。

本文计算模型为线弹性平面应变模型，岩体的初始应力场仅考虑自重应力，只考虑一次衬砌和二次衬砌，锚杆和钢拱架认为是安全储备。并且不计中墙配筋。地应力开挖释放 30%，初期支护完成后释放 40%，二次衬砌完成后释放其余 30%。围岩和混凝土的物理力学参数根据《公路隧道设计规范》^[2]中相应参数确定。各类计算参数见表 1。

表 1 有限元计算模型物理力学参数

材料类型	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	容重 γ (KN.m ⁻³)	备注
初次衬砌	26.0	0.2	22	体荷载 G 取 10
二次衬砌	28.5	0.2	23	
II类围岩	1900	0.4	1.2	



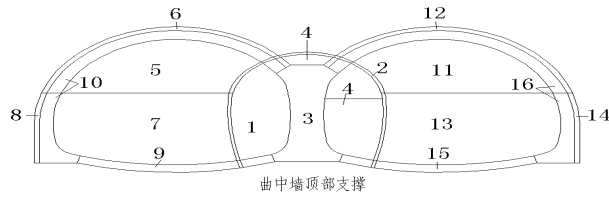


图 1 三种中隔墙支护形式

2.2 数值模拟分析过程及结果

数值模拟过程表明：相同的支护措施和开挖方法，由于中隔墙形状和支撑形式不同，导致衬砌结构的应力和位移也不相同。表 2 给出了三种中隔墙断面形状和支撑形式，按台阶法开挖时，结构的最大应力和中墙的最大位移。

由于直中墙脚部支撑中隔墙较薄，初次衬砌荷载都作用在中墙上，所以，脚部支撑中隔墙应力远大于其它两种断面形式中隔墙应力。直中墙脚部支撑中隔墙的位移远大于其它两种断面形式中隔墙位移，而且，直中墙脚部支撑中墙位移分布不均匀，中墙很可能发生倾覆破坏。直中墙顶部支撑和曲中墙顶部支撑，衬砌结构的应力和变形规律基本相同，只是，直中墙顶部支撑中隔墙应力略大于曲中墙顶部支撑中隔墙应力。三种中隔墙断面形式初次衬砌最大拉应力 σ_{1max} 和最大压应力 σ_{3max} 分别为 4.17MPa、4.20MPa、4.12MPa 和 -9.71MPa、-6.76MPa、-9.43MPa。拉应力相差不大，压应力顶部支撑大于脚部支撑。三种中隔墙断面形式二衬最大拉应力 σ_{1max} 和最大压应力 σ_{3max} 分别为 3.32MPa、4.26MPa、3.84MPa 和 -4.40MPa、-7.43MPa、-4.76MPa。脚部支撑拉应力和压应力大于顶部支撑拉应力和压应力。三种中隔墙断面形式的中隔墙最大拉应力 σ_{1max} 和最大压应力 σ_{3max} 分别为 5.01MPa、11.8MPa、3.99MPa 和 -9.57MPa、-16.7MPa、-8.65MPa。直中墙脚部支撑应力远远大于直中墙顶部支撑，曲中墙顶部支撑应力也较直中墙顶部支撑应力小的多。三种中隔墙断面形式中隔墙最大相对位移分别为 7.576mm、9.317mm、7.575mm。直中墙脚部支撑位移最大，直中墙顶部支撑和曲中墙顶部支撑的位移相差很小。

表 4 三种中隔墙形式支护结构应力与中墙位移计算结果

结果形式	一衬		二衬		中隔墙		
	σ_{1max} (MPa)	σ_{3max} (MPa)	σ_{1max} (MPa)	σ_{3max} (MPa)	σ_{1max} (MPa)	σ_{3max} (MPa)	U_{max} (mm)
直墙顶部支撑	4.17	9.71	3.32	4.40	5.01	9.57	7.576
直墙脚部支撑	4.20	6.76	4.26	7.73	11.8	16.7	9.317
曲墙顶部支撑	4.12	9.43	3.84	4.76	3.99	8.65	7.575

2.3 双连拱隧道中隔墙的合理形式

通过以上数值模拟分析可知：

- ① 直中墙脚部支撑的中隔墙拉应力、压应力以及位移远大于直中墙顶部支撑和曲中墙顶部支撑形式。而且其中隔墙位移分布极不均匀，中墙稳定性较差。
- ② 直中墙顶部支撑和曲中墙顶部支撑，支护结构的应力和变形规律基本相同，只是直中墙顶部支撑中隔墙应力略大于曲中墙顶部支撑中隔墙应力。
- ③ 曲中墙顶部支撑的应力值和应力集中范围均小于其它两种中墙形式，并且位移也比较小。所以，曲中墙顶部支撑是比较合理的中隔墙形状和支撑形式。

3. 中隔墙的结构优化

双连拱隧道设计中存在的另外一个问题是中隔墙的几何尺寸，目前工程中有的中隔墙厚达 3m 多，有的却仅有 1m 多。另外，中隔墙的高度对防排水也有不同的效果，到底中隔墙的高度多少既满足强度的要求又有利于防排水。本节对此仍然采用有限元数值模拟方法进行研究。

3.1 中隔墙宽度的结构优化

以 II 类围岩浅埋为例，设中隔墙高 4.25m，宽分别取为 1.5m、1.8m 和 2.1m，施工步骤同前，计算结果如表 3 所示。

表 3 不同宽度中隔墙的结构应力、位移计算结果

结 果		宽 度		
		1.5m	1.8m	2.1m
初次衬砌	$\sigma_{1\max}$ (MPa)	4.26	4.17	4.07
	$\sigma_{3\max}$ (MPa)	10.5	9.71	9.46
二次衬砌	$\sigma_{1\max}$ (MPa)	3.56	3.32	3.34
	$\sigma_{3\max}$ (MPa)	4.81	4.40	4.18
中隔墙	$\sigma_{1\max}$ (MPa)	5.01	5.01	4.96
	$\sigma_{3\max}$ (MPa)	9.92	9.57	9.46
	位移 U (mm)	7.689	7.576	7.489

通过分析可以看到随着中隔墙宽度增大，初次衬砌的应力在减小，且当宽度在 1.5m~1.8m 之间，拉应力变化显著，1.8m~2.1m 之间时变化平缓。中墙宽度变化对初次衬砌拉应力影响不明显。

二次衬砌的应力变化规律同初次衬砌，中隔墙宽 1.5m~1.8m 时影响显著，宽 1.8m~2.1m 时影响较小。在中墙宽 1.5m~1.8m 时，二衬拉应力减小，而且数据变化也较大，在中墙宽 1.8m~2.1m 时，二衬拉应力最大值反而增大，但是增大的值很小，数据变化不明显。

中隔墙 $\sigma_{3\max}$ 变化规律与衬砌相同，在中隔墙宽 1.5m~1.8m 时，数据变化显著，在中隔墙宽 1.8m~2.1m 时影响较小。中隔墙的拉应力出现在中墙底部，

而且对宽度变化敏感度很低。中隔墙相对位移最大值随着中墙宽度增大而减小。

综上所述，双连拱隧道的中隔墙宽度宜取 1.5m~1.8m。

3.2 中隔墙高度的结构优化

取中隔墙的宽度为 1.8m，高度分别为 3.75m、4.25m 和 4.75m。有限元计算的结果如表 4。

表 4 不同高度中隔墙的结构应力、位移计算结果

结 果		高 度	3.75m	4.25m	4.75m
初次衬砌	σ_{1max} (MPa)		4.08	4.17	4.48
	σ_{3max} (MPa)		9.27	9.71	9.43
二次衬砌	σ_{1max} (MPa)		3.36	3.32	3.30
	σ_{3max} (MPa)		4.32	4.40	5.76
中隔墙	σ_{1max} (MPa)		4.56	5.01	4.56
	σ_{3max} (MPa)		11.9	9.57	9.95
	位移 U (mm)		7.528	7.576	7.536

初次衬砌拉应力随着高度增大而增大。压应力在中墙高 4.25m 时最大，在 3.75m 和 4.75m 时较小。中隔墙高度变化对二次衬砌压应力影响显著，特别是高度从 4.25m 到 4.75m 时，压应力增大很快。中墙高度对二次衬砌的拉应力影响度很低。在 4.25m 时中隔墙压应力最小，高 3.75m 时压应力最大，高 4.75m 时压应力次之；而中隔墙拉应力在高 4.25m 时最大，在 3.75m 和 4.75m 时较小，并且拉应力仅出现在中墙底部。中隔墙相对位移对高度变化敏感度较低。

建议中隔墙的高度取 4.25m 为宜。

4. 结论

通过本文对双连拱隧道中隔墙的结果优化研究，得到如下结论：

- (1) 在所有的对称中隔墙结构形式中，曲墙顶部支撑结构是最合理的结构形式；
- (2) 中隔墙的厚度宜在 1.5m~1.8m 之间取值；
- (3) 为了满足结构强度和防排水的要求，中隔墙的高度不宜太高，建议中隔墙的高度取 4.25m。

参考文献

1. 王文正，公路双连拱隧道开挖方法及施工过程数值模拟研究，长安大学硕士学位论文，2003.5
2. 中华人民共和国交通部，公路隧道设计规范 (JTJ026-90)，北京：人民交通出版社，1900

3. 铁道部建设总局，铁路新奥法指南，北京：中国铁道出版社，1988
4. 鲁 彪，公路小净距隧道最小安全净距确定与双连拱隧道中隔墙断面优化研究，长安大学研究生学位论文，2004.5
5. 夏永旭、王永东，隧道结构力学计算，北京：人民交通出版社，2004.8
6. 李 杰、徐向辉，先墙后拱连拱结构防水问题探讨，西部探矿工程，1999.5

作者介绍：

夏永旭，男，51岁，长安大学公路学院教授、博导。身份证号：610113531218045，
鲁 彪，男，26岁，浙江省公路勘察设计院，助理工程师，身份证号：
61011319690423341

通讯地址：西安市南二环中段长安大学 330 信箱，710064，夏永旭，电话：
029-88498307/13709258640