

文章编号: 0451-0712(2007)03-0188-07

中图分类号: U452.2

文献标识码: B

大拱断面连拱隧道结构设计与优化

王 勇¹, 钱文斐¹, 孙彩红²

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 中国京冶建设工程承包公司 北京市 100088)

摘 要: 介绍了大拱断面连拱隧道的应用前景和结构设计思路, 并提供相应的设计参数, 通过结构计算分析结构的安全性和优化衬砌支护参数, 并提出多种施工方案, 从而为大拱断面连拱隧道设计施工提供一定的科学依据和指导。

关键词: 连拱隧道; 大拱断面; 设计; 优化

1 研究背景

已建的普通连拱隧道多存在防排水效果不理想、衬砌变形大、中墙易开裂、工期较长、工序较多及工程质量不够理想等问题。不论是整体式中墙连拱隧道还是复合式中墙连拱隧道, 中墙是传力和承力部位, 是维系结构整体稳定的中枢, 也是防排水的重点设置部位, 是连拱隧道中最为重要的结构。普通连拱隧道的病害也主要集中在中墙问题上。中墙顶部围岩由于经过多次爆破扰动, 自稳性极差, 较大的竖向荷载直接作用在中墙顶部, 使中墙顶部围岩压力较大, 易产生因中墙沉降而造成结构破坏。另外, 中墙顶部承受着初期支护施作时产生的不平衡力, 从而导致了中墙倾覆或偏压破坏。普通连拱隧道主洞二次衬砌与分离式隧道二次衬砌结构上没有差别, 二次衬砌提早施作产生大变形, 对中墙产生挤压会造成中墙破碎, 地下水顺着裂缝进入中墙, 造成中墙和整个结构破坏。防排水能力差成为普通连拱隧道的很大缺陷。在对接线、防排水和结构施工安全要求较高的情况下, 大拱断面连拱隧道成为一种可靠的选择。本文将大拱断面连拱隧道的结构设计方法及施工工艺等作详细介绍。

2 设计原则和思路

2.1 设计原则

(1) 考虑使用要求, 充分满足使用条件。

(2) 考虑受力条件, 尽量减少应力集中, 保证结构受力条件良好。尤其应对中墙受力进行优化设计,

采取加固措施, 防止地基围岩松弛引起下沉。

(3) 考虑结构承载能力, 使结构受力较为合理、稳定、耐久。对于新型的结构型式, 除要进行工程类比外, 应做充分的数值计算和理论分析, 保障结构安全可靠。

(4) 考虑结构防排水条件, 使防排水设计合理且实用。

(5) 在保障结构安全的前提下, 尽量提高断面利用率, 优化断面尺寸, 减少圬工量, 降低造价。

(6) 考虑施工的难易程度和可操作性, 减少施工工序对结构安全的不利影响。

(7) 遵循“安全第一、结构可靠、造价合理”的原则。

2.2 设计思路

针对当前普通连拱隧道结构的病害和缺陷, 遵循以上的设计原则, 重点考虑解决连拱隧道中墙防排水, 提高结构受力合理性等问题。本文详细介绍大拱断面连拱隧道的设计, 并与普通拱形连拱隧道进行对比分析。

本文在已定设计原则的指导下, 确定大拱断面连拱隧道的断面形式和几何尺寸, 制定初期支护和二次衬砌的结构形式和支护参数, 然后采用规范规定的结构计算方法, 对结构进行计算分析, 探讨结构受力特点和强度安全系数, 判断结构的合理性, 对断面形式和衬砌支护参数进行修正、优化。而后拟定施工方法, 确定各种地质条件下推荐的施工方法。

3 结构设计

3.1 技术指标

公路等级:高速公路。
建设规模:双向四车道。
设计速度:80 km/h。
建筑限界:净宽 10.25 m,净高 5 m。
路面横坡:2%。

3.2 建筑限界及内轮廓设计

隧道断面内轮廓设计贯彻安全、经济、合理的原则。为确保行车安全,除保证绝对不能侵入建筑限界之外,内轮廓与建筑限界之间的空间还必须满足路面、排水、通风、照明、消防、内装等要求,并考虑结构受力、施工方法、围岩级别、工程造价等因素。鉴于连拱隧道一般长度较短,采用自然通风,不考虑预留风机空间。内轮廓设计图见图1所示。内轮廓设计参数对比见表1。

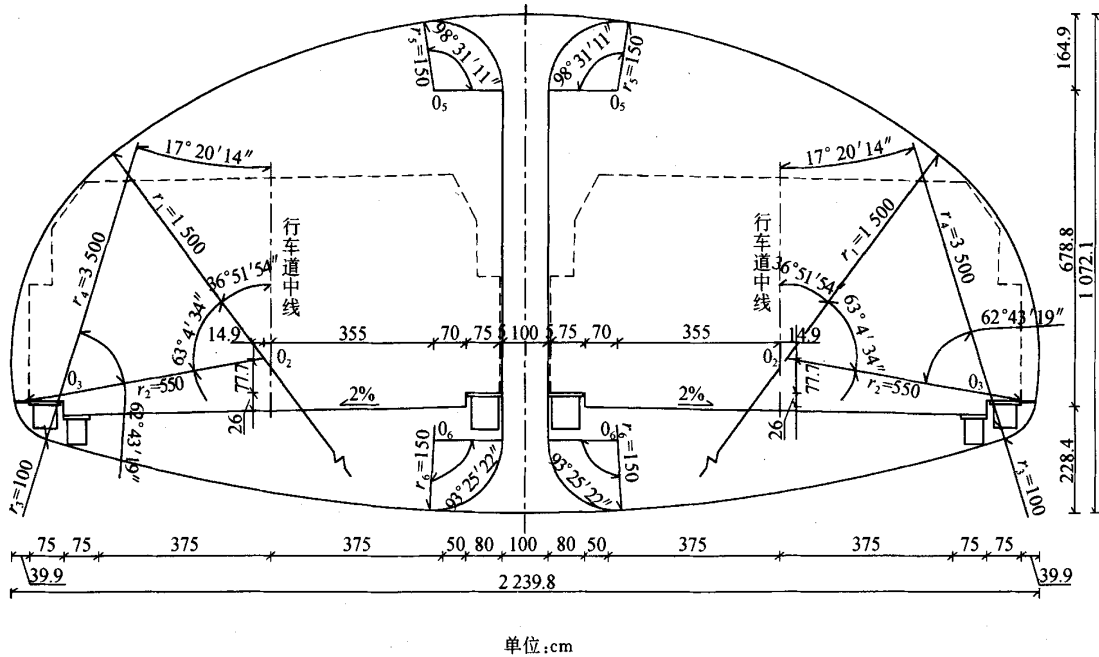


图1 建筑限界与内轮廓设计

表1 内轮廓设计参数对比

项目	面积/m ²	净空面积/m ²	净空周长/m	高度/m	宽度/m
大拱	184.72	133.66	65	9.62	23
普通连拱	154.63	128.40	64.55	8.52	24.60

3.3 暗埋隧道衬砌结构设计

连拱隧道多用于浅埋、偏压地段,宜采用超前管棚、超前小导管或超前帷幕注浆支护,初期支护采用型钢或格栅钢架及锚喷网混凝土,二次衬砌采用C30防水混凝土。有仰拱和无仰拱的衬砌断面设计见图2、图3所示。

复合式衬砌的支护参数,可采用工程类比法拟定。表2为推荐的衬砌支护参数范围。

4 结构计算

本文采用荷载结构法计算,计算荷载只考虑永

久荷载,即结构自重、围岩压力、围岩的弹性抗力。结构自重和围岩的弹性抗力等荷载由程序计算。

4.1 计算模型

限于篇幅,仅介绍深埋V级围岩的计算情况,深埋隧道具体的计算断面型式和荷载分布型式见图4,围岩荷载根据公路隧道规范确定,然后根据各点坐标值对荷载进行离散化,转化为等效节点力,分配在二次衬砌的各节点上。

分析运用ANSYS程序,建模时将二次衬砌结构离散为若干个有限元直梁单元(BEAM3),拱圈、边墙、仰拱和中隔墙分别各建立近似相同长度的单元,共划分了52个单元。假定拱顶60°范围内为脱离区,不设置弹性抗力,其他位置处将弹性支撑以铰接的方式支撑在衬砌梁单元之间的节点上。弹性支撑采用的是弹簧单元(COMBIN14),它们不承受弯矩,只有轴力,弹性支撑沿衬砌轴线的法向设置。弹

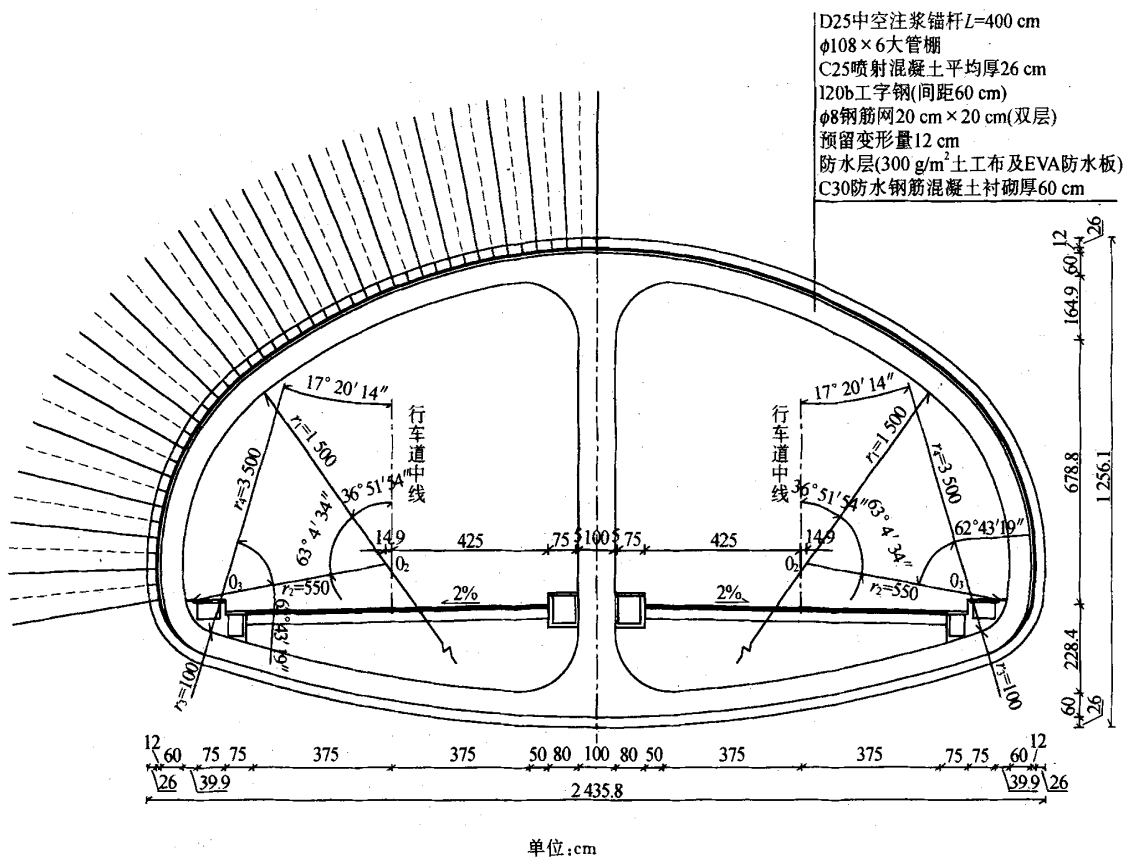


图2 有仰拱的复合式衬砌断面

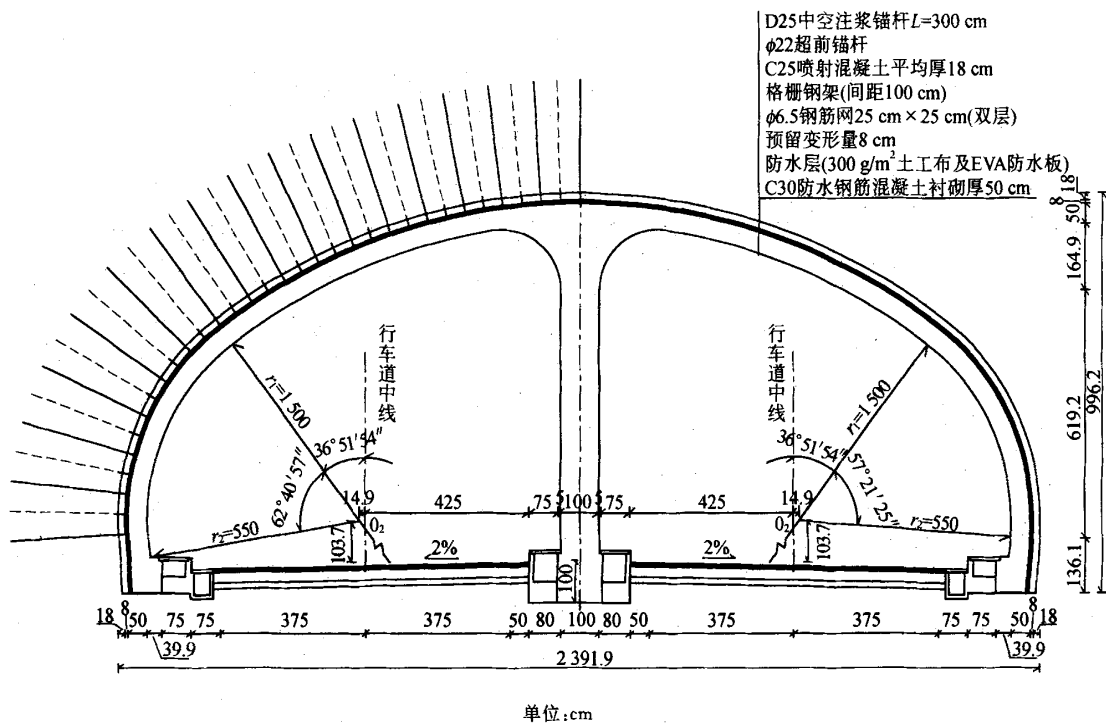


图3 无仰拱的复合式衬砌断面

表 2 复合式衬砌支护参数

围岩级别	初期支护					二次衬砌	
	喷混凝土/cm	锚杆		钢筋网间距/cm	钢架间距/cm	拱墙/cm	仰拱/cm
		长度/m	间距/cm				
V	25~30	3.5~4.0	60~80	15×15	60~80	钢筋混凝土 80~100	钢筋混凝土 80~100
IV	20~25	3.0~3.5	80~100	20×20	80~100	钢筋混凝土 60~80	钢筋混凝土 60~80
III	15~20	2.5~3.0	100~120	25×25	/	50~60	50~60
I	10~15	2.0~2.5	局部	局部	/	40~50	/

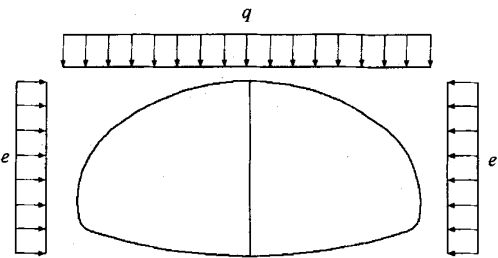


图 4 深埋隧道荷载型式

性支撑仅承受压应力,当计算后支撑受拉时,需重新调整抗力范围,直到满足要求为止。ANSYS 程序建立的荷载结构模型及单元编号见图 5 所示。

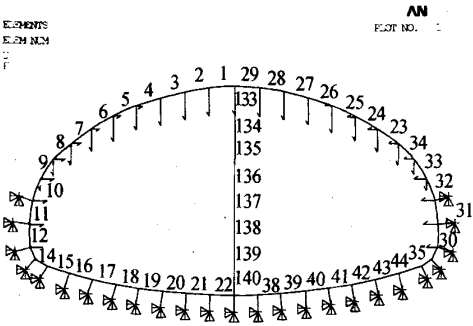


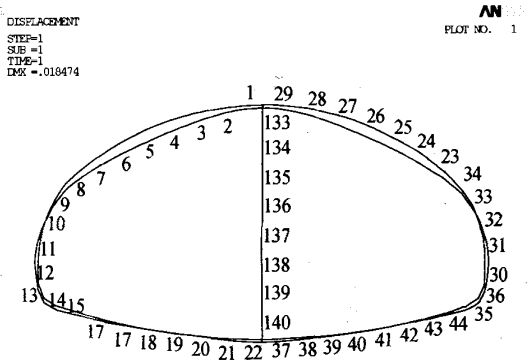
图 5 荷载结构模型及单元编号

4.2 结构变形及内力

将荷载施加到模型上后,调整梁单元实常数属性中的单元厚度,使其真实地模拟隧道衬砌的实际厚度,然后即可求解计算,通过后处理工具直接绘制结构的变形、弯矩、轴力和剪力图,输出结构各单元的节点内力值。

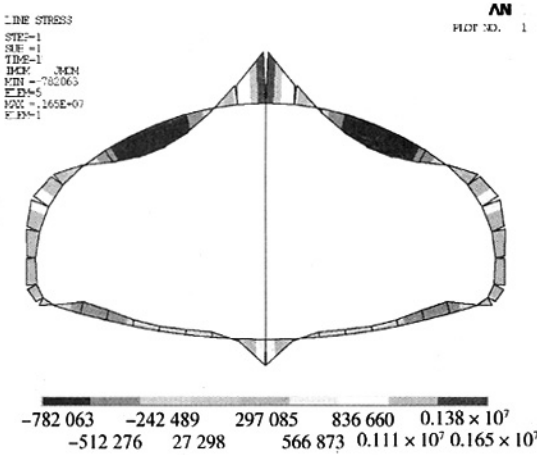
结构的最大变形值为 18.47 mm,发生在拱肩位置。中隔墙顶部和底部因为应力集中的存在,结构弯矩较大,最大弯矩发生在中隔墙顶部,数值为 1.65 MN·m;其他位置的弯矩多在 300~700 kN·m 左右,受力较为合理。拱圈、边墙、仰拱和中隔墙均承受压应力,最大受压轴力集中在中隔墙处,数值为 1.65 MN。

结构变形、弯矩和轴力见图 6、图 7 和图 8 所示。



最大变形量为 18.5mm

图 6 结构变形



单位: N·m

图 7 结构弯矩

4.3 强度安全系数

利用以上内力数据,并根据规范公式,列表计算全断面各单元的衬砌强度安全系数。计算结果表明,在考虑结构配筋和实际工程中中隔墙顶、底部结构加强的情况下,52 个单元的强度均满足规范要求,衬砌的平均安全系数为 4.29,单元最小安全系数为 2.41(规范中最小安全系数为 2.4),故可以判断当前

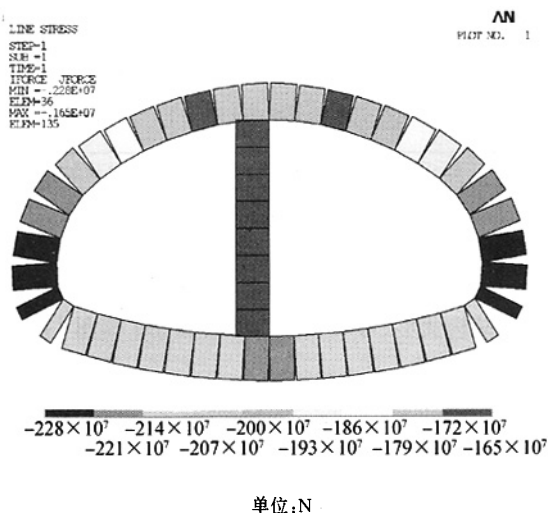


图 8 结构轴力

结构衬砌强度均能满足要求,结构安全可靠。

5 衬砌支护参数优化

5.1 中隔墙设计与优化

中隔墙是维系结构整体稳定的中枢,也是连拱隧道防排水的重点设置部位,对中隔墙进行设计优化分析非常重要。设计研究表明,影响连拱隧道结构型式的设计主要是在于中隔墙的设计,包括中隔墙的结构型式、厚度、高度等。影响连拱隧道中隔墙设计的主要因素有:

- (1)隧道的建筑限界;
- (2)中隔墙电缆沟或排水沟的截面尺寸;
- (3)隧道的地形、地质条件及埋深;
- (4)隧道的施工方案;
- (5)洞外路基中央分隔带的宽度;
- (6)洞外线型及过渡方式。

中隔墙设计优化主要涉及中隔墙的厚度和高度。中隔墙高度与隧道建筑限界、中隔墙电缆沟或排水沟的型式和宽度、施工方案有关。中隔墙的厚度主要是受中导洞开挖后,中导洞拱部围岩压力、不对称施工产生的侧向推力、是否设置中隔墙水沟以及洞外线路条件等因素的影响。中隔墙厚度小,对中隔墙的受力及施工过程中的稳定性不利;厚度大,则工程量增加较多,造成浪费。

从既有隧道中隔墙受力分析来看,在埋深不大的情况下,中隔墙轴力并不控制设计,中隔墙设计主要由中隔墙底的应力、中隔墙底的宽度和施工过程中中隔墙的稳定等条件控制,因此中隔墙地基的承

载力和中墙底的宽度设计是中隔墙厚度设计的关键和控制点。

本文通过数值模拟手段,分析中隔墙厚度分别为 0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m 时的衬砌结构安全性及中隔墙底的地基反力,从而研究当前设计条件下最优的中隔墙厚度参数。数值模拟采用 ANSYS 程序,仅介绍 V 级围岩衬砌的分析研究结果。各种中隔墙厚度的结构受力计算结果见表 3。中隔墙厚度与结构受力关系见图 9 所示。

表 3 中隔墙厚度与结构受力关系

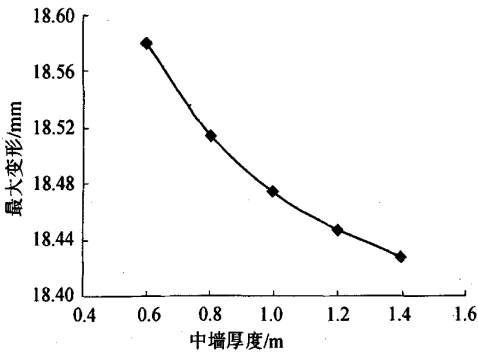
中墙厚度 m	最大变形 mm	平均轴力 MN	平均弯矩 MN·m	安全系数	基底反力 MPa
0.6	18.58	1.982 4	0.318 4	4.911	0.667 4
0.8	18.514	1.978 0	0.319 4	5.319	0.502 2
1.0	18.474	1.976 9	0.320 0	5.732	0.402 5
1.2	18.447	1.975 5	0.320 4	6.147	0.335 8
1.4	18.428	1.974 5	0.320 7	6.562	0.288 1

由计算可知,随着中隔墙厚度的减小,结构最大变形、轴力、基底应力逐渐增大,而结构强度安全系数、弯矩随之减小。研究发现,当前结构在中隔墙厚度小于 1.0 m 时,结构应力和安全性变化加剧,且 1.0 m 厚度是基底应力是否满足地基承载能力的分界点。通过比较分析,中隔墙厚度为 1.0~1.2 m 时结构受力、安全性和经济性为最优,本研究设计图中均采用 1.0 m 厚的中隔墙。以上为 V 级围岩衬砌的中隔墙分析,其他各型衬砌的中隔墙厚度同样根据以上方法确定。

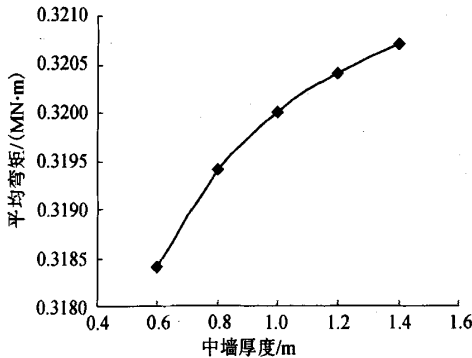
5.2 二次衬砌设计与优化

连拱隧道复合式衬砌的支护参数设计应综合考虑使用要求、工程地质和水文地质条件、围岩级别、隧道埋深及隧道断面形状、开挖方法、施工顺序和断面的闭合时间等条件,通过工程类比和结构计算综合分析确定。大拱断面连拱隧道当前应用较少,研究也属于起步阶段。通过数值模拟手段,分析衬砌厚度分别为 0.50 m、0.55 m、0.60 m、0.65 m、0.70 m 时的结构变形、内力及衬砌强度安全系数,从而研究当前设计条件下最优的衬砌厚度参数。数值模拟采用 ANSYS 程序,仅介绍 V 级围岩衬砌的分析研究结果。表 4 和图 10 分别为各种衬砌厚度的结构变形和强度安全系数计算结果和关系曲线。

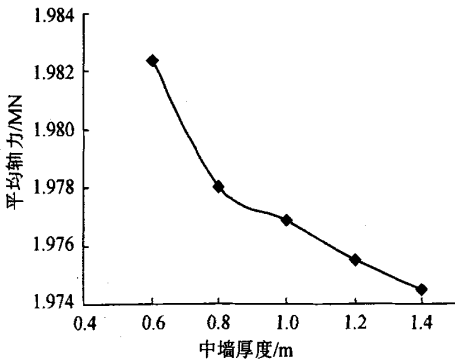
由计算可知,随着衬砌厚度的减小,结构最大变形快速增大,且当衬砌厚度小于 0.60 m 时,结构最大变形超过了 2 cm;随着衬砌厚度减小,结构强度安



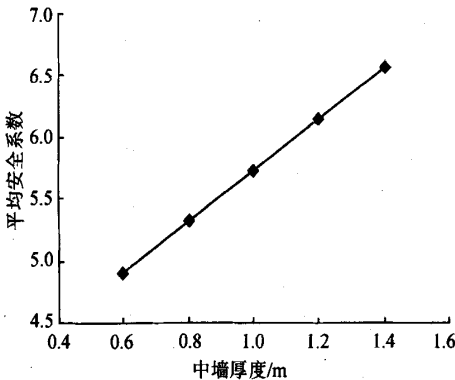
(1)



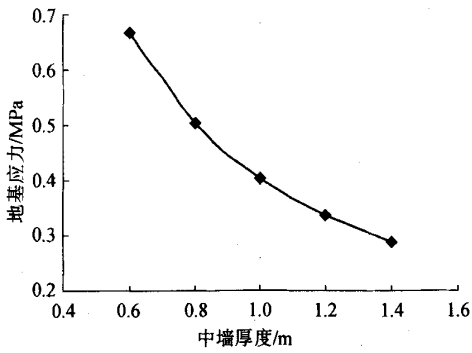
(2)



(3)



(4)



(5)

图 9 中隔墙厚度与结构受力关系

表 4 衬砌厚度与结构受力关系

衬砌厚度/m	最大变形/mm	平均安全系数	不安全单元比例
0.50	24.387	3.920	23.8
0.55	21.080	3.932	14.3
0.60	18.474	4.289	0
0.65	16.390	4.365	0
0.70	14.736	4.387	0

全系数也逐渐减小,且当衬砌厚度小于 0.60 m 时变化加剧;衬砌厚度不小于 0.60 m 时,整环衬砌强度均能达到要求,衬砌厚度为 0.55 m、0.50 m 时分别有 6 个、10 个单元强度安全系数未达到要求,占全部单元个数的 14.3%、23.8%。通过以上比较分析可知,当前设计条件下,考虑结构受力、安全性和经济性等因素,衬砌厚度为 0.60 m 时最优,因此,本设计图中均采用 0.60 m 厚衬砌。以上为对 V 级围岩衬砌支护参数的分析,其他各型衬砌支护参数同样根据以上方法确定。

6 施工方案

大拱断面连拱隧道跨度较大,施工工艺要求较高。对于Ⅱ、Ⅲ级围岩,建议采用中导洞—全断面施工工法,由于围岩较完整且物理力学参数较高,爆破次数虽多但对围岩扰动范围较小,可不采用辅助超前支护措施;对于Ⅳ级围岩,建议采用中导洞—上下台阶施工工法开挖,由于岩体较破碎,多次爆破会对围岩产生一定范围内的扰动,可采用 4.5 m 长的 $\phi 22$ 超前锚杆进行预加固措施,同时由于中墙受力较大,可对中墙底部基础一定范围内采取打设锚杆进行加固等措施;对于Ⅴ级围岩,建议采用三导洞施工工法开挖,洞身覆盖层厚度较厚(超过 2 倍开挖宽度),可

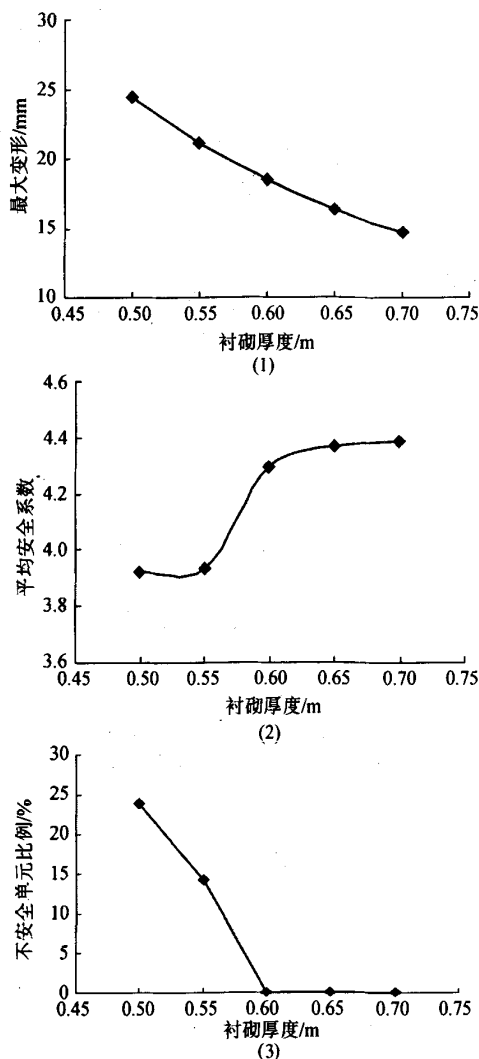


图10 衬砌厚度与结构受力关系

采用5 m 长的 $\phi 42 \times 2$ 超前小导管加水泥浆液进行超前预加固措施,洞口加强段及覆盖层厚度较薄处(小于2倍开挖宽度),可采用 $\phi 108 \times 6$ 大管棚加C.S浆液(管棚内设置4根 $\phi 22$ 钢筋及充填M10水泥砂浆)进行超前预加固,同时对中墙底部进行注浆等加固措施。

7 结论

本文系统阐述了大拱断面连拱隧道的结构设计,结合模拟计算对结构进行了优化分析。大拱断面连拱隧道虽然存在开挖跨度大,断面利用率低,工程造价稍高等劣势,但其防排水效果较普通连拱隧道更好,施工过程中中隔墙受力更为合理,施工工序较普通连拱隧道更简单,整体性好,更好地解决了抗震问题。在对路线、防排水和结构施工安全要求较高的情况下,大拱断面连拱隧道是一种可靠的选择。

参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] JTJ 042—94,公路隧道施工技术规范[S].
- [3] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.
- [4] 刘涛. 精通ANSYS[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [5] 美国ANSYS公司北京办事处. 美国ANSYS Inc. ANSYS使用手册[M]. 1998.
- [6] 云南省公路规划勘察设计院. 连拱隧道建设关键技术研究报告[R]. 2005.

Structure Design and Optimization for Multi-Arch Tunnel with Big Arch Section

WANG Yong¹, QIAN Wen-fei¹, SUN Cai-hong²

(1. China Highway Planning and Design Institute(HPDI) Consultants, INC., Beijing 100010, China;

2. Central Research Institute of Building & Construction, Beijing 100088, China)

Abstract: The application prospect and structural design ideas of multi-arch tunnel with big arch section are introduced, and the corresponding design parameters provided. Through analyzing structure safety by structure computation and optimizing lining support parameters, the construction plans are proposed in order to provide the bases and guidance for the design and construction of similar tunnel.

Key words: multi-arch tunnel; bigarch section; design; optimization