

浅埋偏压连拱隧道中墙优化分析

曹云钦, 王小林

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 浅埋偏压连拱隧道中墙型式直接关系到隧道工程施工及正常运营, 本文采用有限元数值方法对不同中墙型式下偏压连拱隧道结构受力特征作了计算分析, 偏压连拱隧道采用复合曲中墙结构将有助于改善中墙受力状况, 减小应力集中及上部位移, 降低衬砌开裂渗水的可能性, 从而为偏压连拱隧道合理设计提供理论根据。

关键词: 偏压连拱隧道; 中墙形式; 有限元; 受力分析

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0537-04

作者简介: 曹云钦(1972-), 男, 四川资中人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。

Optimal analysis of mid-board of shallow double-arch tunnels under unsymmetrical pressure

CAO Yun-qin, WANG Xiao-lin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The FEM was used to calculate and analyze the bearing character of shallow double-arch tunnel with different mid-boards under unsymmetrical pressure. The unsymmetrically pressed shallow double-arch tunnels which adopted multiple bent mid-board would be helpful to improve the bearing character of the mid-board and to decrease the concentration of stress and the displacement of the up mid-board. Ultimately the adoption of the multiple bent mid-board could lower the possibility of cracking of mid-board. Therefore a theoretical basis to design unsymmetrically pressed shallow double-arch tunnels was provided.

Key words: unsymmetrical pressure; double-arch tunnels; the type of mid-board; FEM; bearing analysis

0 前言

连拱隧道与传统的分离式隧道相比, 因其线形流畅、占地面积少、避免洞口路基或大桥分幅、环保等优点, 已广泛应用于双洞双向行车隧道, 并积累了较成熟的施工经验。然而, 由于连拱隧道开挖跨度大、施工工序交错复杂、不平衡压力作用等原因, 导致施工和运营中衬砌开裂、中隔墙渗水等现象经常发生。所以, 研究中墙结构特征及其力学特性, 优化中墙设计, 科学组织施工尤为必要。

目前国内已建成的连拱隧道中墙主要采用直中墙、整浇曲中墙、复合曲中墙几种形式。整体式直中墙隧道又分顶部回填型和接触型两种, 接触型中墙局部应力集中显著, 极易开裂, 中墙顶接缝排水处理困难; 回填型中墙易出现变形, 且施作困难。整浇曲中墙连拱隧道中墙受力较为合理, 应力集中减小, 中墙顶部不需回填, 中墙稳定性增强, 但中墙顶接缝排水处理困难。以上两种形式中墙存在一个共同的不足之处: ①左右两洞开挖和衬砌顶部不密实, 有空隙, 导致洞室围岩跨度增大, 使隧道围岩受力不利; ②中

墙顶部注浆后易堵塞排水通道; ③左右洞衬砌结构受力不平衡且相互影响^[1]。

复合曲中墙隧道是在中导洞贯通后, 随即修筑中墙, 中墙顶部与导洞顶部紧密接触, 克服了中墙与围岩间存在空洞的缺点, 使主洞开挖时毛洞跨度相对减少, 围岩稳定性大大增强, 提高了结构可靠度。此外, 采用中墙分次施作, 两侧外轮廓与双洞隧道初期支护轮廓一致, 有利于防水板的全断面铺设, 从而使连拱隧道中间部分的防排水结构与独立单洞隧道相同。其施工工艺相对简单, 质量容易控制, 衬砌与仰拱成为整体, 抗震性能好^[2]。

1 工程概况

某高速公路连拱隧道全长 340 m, 隧道顶部为倾斜山坡, 坡度较大, 埋深浅, 最小埋深不足 20 m, 工程地质较差, 基岩为页岩, 风化严重, 上覆第四季粘土, 含碎石、角砾, 有顺层滑移伴危岩、落石等危险, 偏压严重, 围岩属Ⅳ类围岩。隧道为连拱结构, 原设

计为 180 cm 宽整体式直中墙,两洞轴线间距 11.37 m。隧道内轮廓为单心园和直中墙组成,其内半径为 540 cm,隧道为单坡、直线隧道,纵坡 3%。隧道建筑界限为净宽 10.25 m,净高 5.0 m。开挖界限为宽 23.97 m,高 9.85 m。因上覆围岩不能形成承载拱,采用喷锚技术配合管棚注浆法预加固处理措施加固围岩,通过锚杆联结及压注水泥砂浆固结岩层裂缝,使浅埋地层形成一个自稳能力较强的固结体,正洞开挖时,采用锚喷支护体系配合格栅钢架,尽快形成封闭的承力环结构,支撑洞顶荷载,尽量减少围岩的下沉变形,确保正洞安全施工。

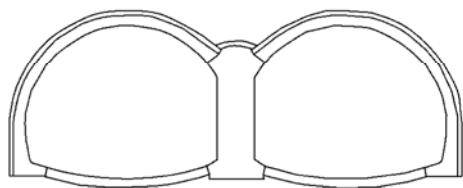


图 1 整体直墙连拱隧道
Fig. 1 Straight mid-board of double-arch tunnel

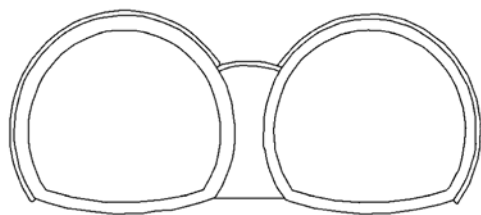


图 2 复合曲墙连拱隧道
Fig. 2 Multiple bent mid-board of double-arch tunnel

鉴于浅埋偏压隧道的特殊性,必须减小隧道施工、运营中,不均衡压力对中墙的影响。由以往实践经验,计划采用复合曲中墙衬砌结构,这种结构左右洞衬砌相对独立,曲中墙过渡平滑,能够较好地减小偏压的影响。根据地质条件调整为曲中墙净宽 1.4 m (含两主洞衬砌共 2.6 m),两洞采用三心拱衬砌,轴线间距 13.4 m,开挖界线为宽 26.7 m,高 10.3 m。

2 数值模型的建立^[3-5]

2.1 基本假设

本文模拟采用 ANSYS 软件,模型做如下假设。

(1) 计算模型为弹塑性应变,围岩进入塑性后采用 Drucker - Prager 屈服准则,支护体系在线弹性范围内变化。目前,岩土类材料常用的塑性屈服准则有 Mohr - Coulomb 强度准则和 Drucker - Prager 强度准则,由于 Mohr - Coulomb 准则不能反映中间主应力 σ_2 对屈服和破坏的影响,而且屈服面有棱角,不便于塑性增量的计算,本计算中采用了 Drucker - Prager 屈服准

- 则。
- (2) 岩体变形是各项同性的。
 - (3) 隧道受力、变形为平面应变问题。
 - (4) 围岩的初始应力场由自重应力构成,不考虑构造应力的影响。

2.2 本构模型

采用弹塑性平面应变模型,岩土材料的非线性按 DP 材料处理。材料进入塑性状态的准则采用 Drucker-Prager 屈服准则,其表达式为

$$F(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

式中 α 、 K 为 D - P 准则材料常数; I_1 为应力张量的第一不变量; $\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$, $K = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$,

其中 c 、 φ 为土体的粘聚力和内摩擦角; J_2 为应力偏量的第二不变量。

2.3 数值模型参数

按照弹塑性力学理论及工程类比方法,一般选取 3~5 倍洞径为计算区域。本模型选取中墙两边各 40 m,下部至隧道底部以下 25 m,上部选至地表。模型左右边界为水平约束,下边界为垂直约束,上边界是自由地表。采用弹塑性模型,围岩采用二维平面应变单元 plane82 单元进行模拟;初期支护(喷射混凝土、钢拱架)采用壳单元 shell63 单元起进行模拟;二次衬砌断面较大,采用 plane42 单元进行模拟;初期支护与围岩紧密接触,将其与围岩视为一体,而初期支护与二次衬砌采用接触单元来进行处理,两者间只传递压应力不传递摩擦力^[6]。

表 1 隧道支护有限元计算参数

Table 1 The finite element parameters of tunnel support

项目	E /GPa	μ	γ /(kN · m ⁻³)	c /kPa	φ /(°)
IV类围岩	1.3	0.3	22	300	30
加固区域围岩	8.0	0.27	23	900	42
C ₂₅ 喷射混凝土	25.5	0.2	24		
C ₂₅ 钢筋混凝土	30	0.167	25		

对于管棚注浆预加固和锚杆等加固的围岩,按经验采取提高 c 、 φ 值来模拟,喷射混凝土中的钢拱架也采用提高混凝土参数的办法来模拟^[2]。

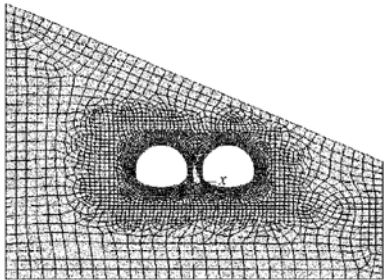


图 3 有限元计算网格划分
Fig. 3 The finite element meshes
网格划分如图 3,模型共有 5348 个单元,15466

个节点,其中有3个三角形单元。

3 计算结果与分析

3.1 主应力分析

从计算获得的各主应力图(图4、5)看,整体式直中墙连拱隧道中墙应力集中较明显,拉应力区范围虽较小,但最大拉应力(位于中墙下部与底拱连结处)达到9.9 MPa,超过C25混凝土强度极限值(2.0 MPa)。最大压应力(主要位于中墙顶部以及下部拐角处)达到12.2 MPa,接近C25混凝土强度设计值(12.5 MPa),且分布范围较大。这些部位也是隧道施工、运营过程中极易出现破坏之处。

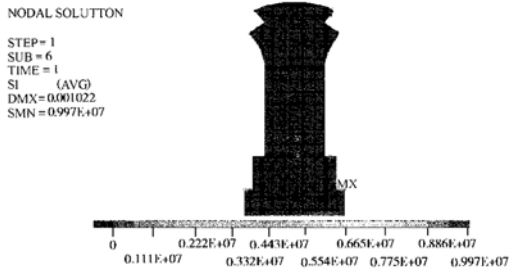


图4 整体直中墙最小主应力 σ_1 分布图

Fig. 4 Distribution of minimal principal stress σ_1 of straight mid-board

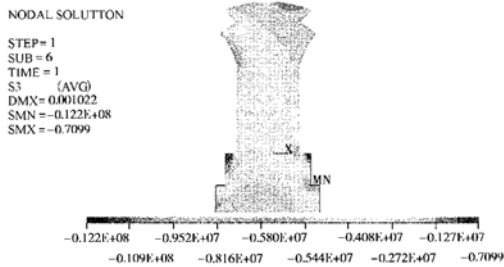


图5 整体直中墙最大主应力 σ_3 分布图

Fig. 5 Distribution of maximum principal stress σ_3 of straight mid-board

复合曲中墙连拱隧道中墙应力集中不显著(图6、7)。拉应力最大值为0.99 MPa,低于C25混凝土拉应力强度设计值(1.33 MPa),拉应力区范围较小,主要位于内侧隧洞顶、底部衬砌。中墙过渡段相对平滑,未出现拉应力集中。压应力最大值达到6.35 MPa,远低于C25混凝土强度设计值,压应力集中出现在内侧隧洞拱脚,中墙顶部内侧及下部外侧也出现集中,但压应力值均小于6 MPa,属安全范围。

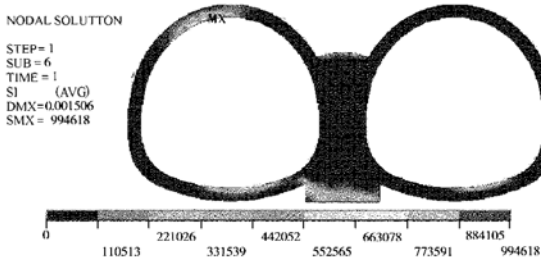


图6 复合曲中墙最小主应力 σ_1 分布图

Fig. 6 Distribution of minimal principal stress σ_1 of bent mid-board

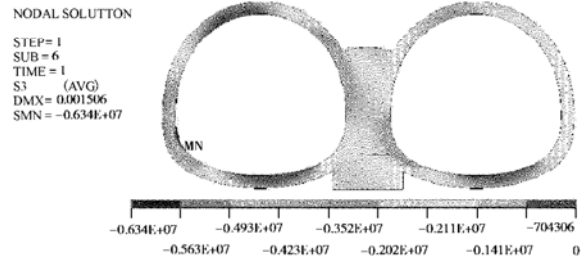


图7 复合曲中墙最大主应力 σ_3 分布图

Fig. 7 Distribution of maximum principal stress σ_3 of bent mid-board

3.2 剪应力分析

从应力图(图8、9)上看,整体式直中墙在上、下部与两侧隧洞衬砌连结部份均出现了较大范围的剪应力集中区,剪应力最大值达到4.25 MPa,高于C25混凝土抗剪强度容许值(1.0 MPa),并且大于1.0 MPa的区域贯穿了剪应力集中区。这些部位在施工及运营过程中极易产生剪切破坏,导致中墙顶部开裂、渗水,影响正常运营。

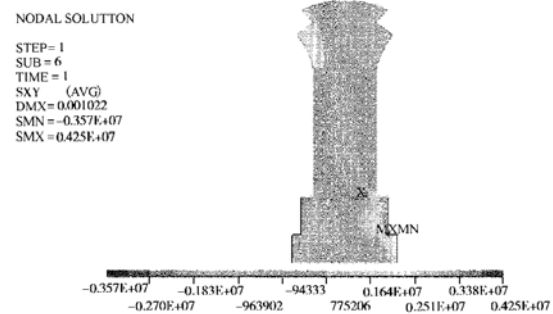


图8 整体直墙剪应力 τ_{xy} 分布图

Fig. 8 Distribution of shear stress τ_{xy} of straight mid-board

相比之下,复合曲中墙最大剪应力达到2.39 MPa,高于C25混凝土抗剪强度容许值,但低于整体直中墙相应的最大剪应力值。剪应力超过容许值的区域出现在上部中墙与内侧隧洞衬砌连结部位和下部中墙与外侧隧洞底拱连结部位,此外在内侧隧洞衬砌拱脚处也出现了剪应力集中区。但总的来讲,无论从剪应力值还是范围都较前者小,且没有贯穿整个衬砌结构,设计时可用增加局部配筋等办法予以解决。

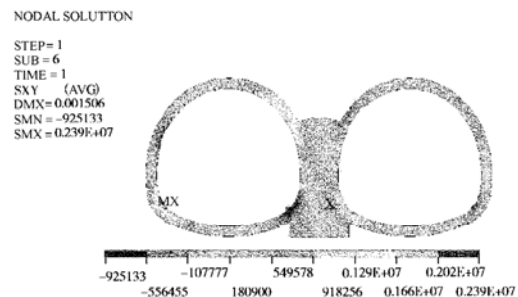


图9 复合曲中墙剪应力 τ_{xy} 分布图

Fig. 9 Distribution of shear stress τ_{xy} of bent mid-board

3.3 中墙位移分析

连拱隧道中墙是设计施工的关键部位,中墙在施工过程中要经历多次扰动和应力重新分布,其应变特性直接反应了中墙及整个结构的稳定性。

据已有的研究成果,偏压连拱隧道外侧先施作较内侧先施作优,有利于围岩和结构的稳定。本文数值模拟将直墙连拱隧道施工分为14个工序(包含一初始应力场),曲墙连拱隧道施工分为16个工序(包含一初始应力场)^[2-4,7]。

为了明确表示出两种类型中墙在施工过程中上下部相对位移变化情况,在中墙有限元网格的上下部分别找出两个特征点 N_1 、 N_2 ,通过对其相对位移进行分析对比,确定较优方案(图10)。

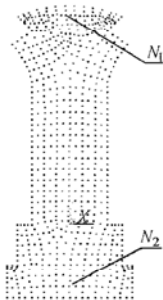


图10 中墙特征点 N_1 、 N_2 位置示意图

Fig. 10 Characteristic nodes on mid-board

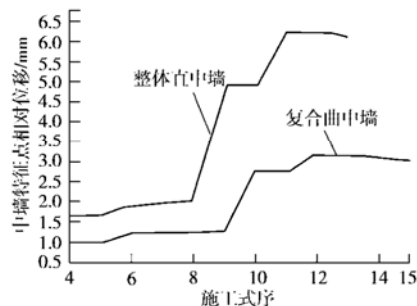


图11 特征点 N_1 、 N_2 水平相对位移随工序变化图

Fig. 11 Variation of relative displacement of characteristic nodes

由数值分析,得到如图11所示两中墙特征点 N_1 、 N_2 相对位移随工序的变化情况。从图中可以看出,在偏压条件下,整体直中墙结构两特征点的水平相对位移要比复合曲中墙结构都大得多,到施工结束时,已经达到了6.13 mm;而复合曲中墙最终相对位移仅为3.10 mm。结合到施工的实际情况,复合曲中墙分层施作,两侧衬砌较独立,互相影响小,开裂可能性降低,衬砌的整体防排水性能提高。因而认为复合曲中墙更适用于偏压连拱隧道。

4 结 论

通过以上分析可以看出,浅埋偏压连拱隧道采用复合曲中墙与采用整体直中墙相比有着很大的优越性,使两洞衬砌结构相对独立,改善了中墙受力状况,减小应力集中及上部位移,减小主洞开挖时围岩跨度,

克服了整体直中墙许多难以解决的问题,施工工艺相对简单,质量易于控制,成型后的防排水系统运行可靠,外型美观。这些优点已在许多高速公路工程中得到了很好地体现,可以在有条件加大中墙厚度的地段采用这一结构形式。

参考文献:

- [1] 鲁彪.小净隧道最小安全净距与连拱隧道中墙优化研究[D].西安:长安大学,2004. (LU Biao. Study on minimum safe clear distance of little clear distance tunnel and mid-board of double-arc tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.)
- [2] 重庆交通科研设计院.公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004. (Chongqing Communication Research & Design Institute. Code for design road tunnel[S]. Beijing: China Communication Press, 2004.)
- [3] 夏永旭,王永东.隧道结构力学计算[M].北京:人民交通出版社,2004. (XIA Yong-xu, WANG Yong-dong. Structure mechanics calculation of tunnel[M]. Beijing: China Communication Press, 2004.)
- [4] 王伟,黄娟,彭立敏,等.不同施工顺序对偏压连拱隧道结构稳定性的影响分析[J].西部探矿工程,2004(10):105-108. (WANG Wei, HUANG Juan, PENG Li-Min, et al. Analysis on the structure stability of the unsymmetrically loaded and connecting-arch tunnel caused by different construction orders[J]. West-China Exploration Engineering, 2004(10): 105-108.)
- [5] 朱汉华,尚岳飞.公路隧道设计与施工新法[M].北京:人民交通出版社,2002. (ZHU Han-hua, SHANG Yue-fei. New methods on highway tunnel design & construction[M]. Beijing: China Communication Press, 2004.)
- [6] 孙均.地下工程设计理论与实践[M].上海:上海科学技术出版社,1996. (SUN Jun. Theory & application of underground project design[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1996.)
- [7] 叶裕明,刘春山,沈火明,等. ANSYS 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005. (YE Yu-ming, LIU Chun-shan, SHEN Huo-Ming, et al. Application of ANSYS in Civil Engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.)
- [8] 刘彤.双连拱隧道施工过程有限元分析[D].西安:西安建筑科技大学,2003. (LIU Tong. The finite element method analysis on the construction procedure of double-arc highway tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.)
- [9] 陈贵红,于炳言.连拱隧道中墙型式受力比选[J].铁道建筑技术,2004(6):29-32. (CHENG Gui-hong, YU Bing-yan. Bearing comparing & choice of middle wall structure shapes of double arch tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2004(6): 29-32.)