

文章编号: 1006-6616 (2007) 03-0247-08

浅埋偏压连拱隧道施工的力学响应分析

向安田, 朱合华, 袁其, 贾明辉

(同济大学地下建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 以江西某高速公路一浅埋偏压连拱隧道为背景, 用 MARC 有限元程序对其出口段进行了动态施工的三维数值模拟。系统研究了塑性区分布和发展、拱顶下沉、正应力与剪应力的集中和转移、中隔墙竖向应力随施工过程的变化规律。研究表明: 1. 非对称开挖是引起中墙偏压的最关键因素, 初衬和二衬的施作对改善中墙偏压作用不大, 对称开挖才是最有效途径; 2. 在浅埋条件下, 拱顶下沉有随埋深增大而增大的趋势, 位移释放在开挖完成、支护之前就已经大部分完成。3. 左右洞上台阶开挖后拱顶出现拉应力区, 是易坍方部位, 应超前或及时支护; 4. 由于偏压作用, 山脊一侧边墙和中墙墙踵处塑性区更发育, 该侧更易失稳; 5. 施工完毕, 隧道两侧边墙附近集中的压应力转移到二衬和仰拱上, 使二者成为应力集中部位, 从而改善了隧道围岩的受力状况。

关键词: 三维数值模拟; 偏压; 拱顶下沉; 塑性区; 应力集中

中图分类号: U451⁺.5

文献标识码: A

0 前言

隧道是在山岭地区修建高速公路常见的一种地下建筑物, 连拱和分离式隧道是目前高速公路隧道的两种形式。连拱隧道由于具有线形顺畅、使用占地面积小等特点, 而在城市道路用地受限、山区地形复杂、道路曲线困难等情况下获得了广泛的应用。从力学上讲, 连拱隧道施工是不可逆的非线性演化过程, 他的最终状态不是唯一的, 而是与应力路径或应力历史有关。其在施工过程中的受力演化机制非常复杂, 施工过程中围岩的稳定性、初衬和二衬的受力情况、中墙的受力特征和稳定性等已成为工程技术人员关注的焦点。有限元法在模拟隧道的分步开挖和适时支护方面具有独特的优点, 随着计算机技术的不断进步, 得到了越来越广泛的采用。当前, 有关单洞隧道施工力学行为的三维有限元分析的文献并不鲜见^[1~3], 研究结果对隧道的设计和施工起了很积极的作用。对双连拱隧道的研究也已深入, 文献^[4~6]用二维有限元对连拱隧道的力学行为进行了较为全面的研究, 文献^[7~10]则采用三维数值模拟的方法进行研究, 但成果往往集中于某一方面, 如地表沉降、中墙受力状态的演变、塑性区的发展等, 如文献^[11]那样用三维有限元对双连拱隧道浅埋偏压洞身段的施工力学响应行为进

收稿日期: 2006-11-10

作者简介: 向安田 (1973-), 男, 博士生, 工程师, 1999 年硕士毕业于成都理工大学, 主要从事隧道和边坡方面的研究工作。E-mail: xat1973@sohu.com

行系统研究和全面分析的文献尚不多见。

本文所做的工作是：在考虑洞身浅埋偏压与洞口仰坡耦合作用的条件下，采用功能强大的 MARC 有限元软件，对某高速公路浅埋偏压连拱隧道出口段施工全过程进行三维数值模拟，得出塑性区分布和发展、拱顶下沉、正应力与剪应力的集中和转移、中隔墙竖向应力随施工过程的变化规律，研究结果对同类隧道的设计和施工具有参考和借鉴意义。

1 依托工程概况及工程地质条件

隧道全长 215 米，采用曲中墙连体隧道结构形式，纵坡为 2.499%。隧道区处于区域上塔前-赋春逆冲推覆构造带之塔前~赋春主断裂构造下盘，主断裂距隧道洞身不足百米。受区域地质构造环境的影响，隧道区裂隙发育，岩体破碎。洞口均由千枚状砂质板岩强风化带组成，岩土结构以蠕虫状松散结构为主，碎块状松散结构次之，稳定性较差。

2 三维有限元模型的建立

在 X 方向左右边界取至自然山脊和山谷线，至隧道左右边墙距离约为 5 倍的单洞跨度，两边施加 X 向的水平位移约束。在 Y 方向自由上边界取至地面，下边界取至距开挖洞底 4 倍洞高处并施加竖向位移约束。在 Z 方向选取长度 40m，整个 $Z=40m$ 平面取 Z 向水平位移约束。考虑实际施工情况，对 $Z=0$ 平面（洞口）而言，坡体前缘线 5m 以下和洞周 5m 开外的交集部分取 Z 向水平位移约束。见图 1。

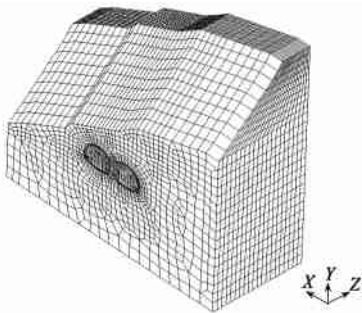


图 1 三维有限元模型网格图

Fig 1 3D FEM mesh of the model

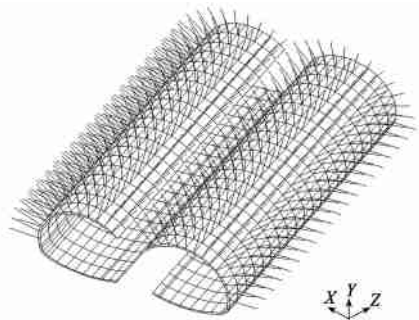


图 2 锚杆和初衬单元剖分图

Fig 2 Anchors and first lining in the model

二衬、初衬和岩石都采用 8 节点三维实体等参单元，共 35700 个；锚杆用三维杆单元（图 2），共 3120 个；锚杆单元节点与实体单元节点完全重合，总节点 36393 个。

假设锚杆是线弹性材料，隧洞围岩和混凝土是弹塑性材料，采用 Drucker-Plager 屈服准则。初始荷载均为岩土体的自重荷载。

另外，隧洞锚杆是按梅花形布置，径向间距 0.8 米，但是建模时为减少单元数量，单元的尺寸大于实际的锚杆分布间距，所以锚杆截面积为折算面积。围岩及其它材料的参数如表 1 所示。

表 1 模型材料力学参数一览表

Table 1 Mechanical parameters of model materials

材料名称	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	密度 ρ (t/m^3)	粘聚力 c (kPa)	内摩擦角 ϕ ($^\circ$)	面积 (m^2)
II 类围岩	0.4	0.3	2.1	300	30	
锚杆	210	0.18	7.8	—	—	0.000850
初衬、二衬	28	0.2	2.5	2200	55	

工况的模拟应尽可能与实际施工过程一致。但由于实际过程比较复杂,而且某些施工过程可能同时进行,因此只能依照实际的施工进度,对施工步骤进行简化,以尽量减少数值模拟计算的工作量,同时又能够反映施工过程中所关心的问题。由于实际施工中一次性开挖长度经常可达 30m,考虑到最危险情况,将所选取段按通槽开挖进行模拟。开挖采取“杀死”单元,初期支护和二衬做采取改变单元属性来“激活”^[12]。

采用中导坑台阶法施工,施工工序为: Lcase 0, 自重作用下初始状态的模拟; Lcase1, 开挖中导洞; Lcase2, 中导洞支护; Lcase3, 浇注中墙; Lcase4, 右洞上台阶开挖; Lcase5, 右洞上台阶初期支护; Lcase6, 开挖左洞上台阶; Lcase7, 左洞上台阶初期支护; Lcase8, 右洞下台阶开挖; Lcase9, 右洞下台阶初期支护; Lcase10, 浇筑右洞二衬及仰拱; Lcase11, 左洞下台阶开挖; Lcase12, 左洞下台阶初期支护; Lcase13, 浇筑左洞二衬及仰拱。右洞靠山谷一侧, 浅埋; 左洞靠山脊, 相对深埋。相对位置可参见图 1。

3 动态数值模拟结果分析^[13~16]

3.1 拱顶下沉

图 3、图 4 中: 坐标 0 处为洞口边界, 埋深 8m; 坐标 40 处为洞内边界, 埋深 40m。位移系 MARC 输出后, 用 Excel 消掉自重作用下的初始位移 (Lcase 0) 后生成。图 5、图 6 中: Lcase 0 的拱顶下沉为自重作用下的初始值, 与施工影响无关。左右洞拱顶节点等间距 (8m)

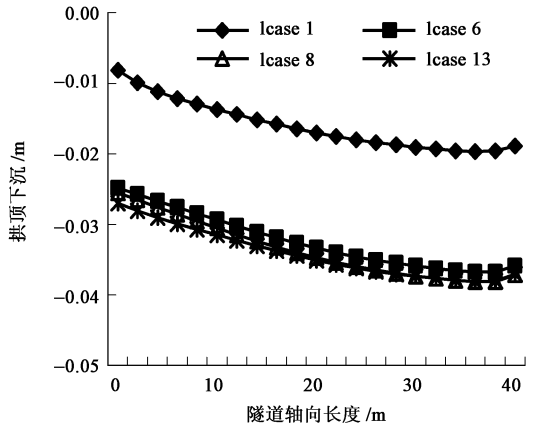
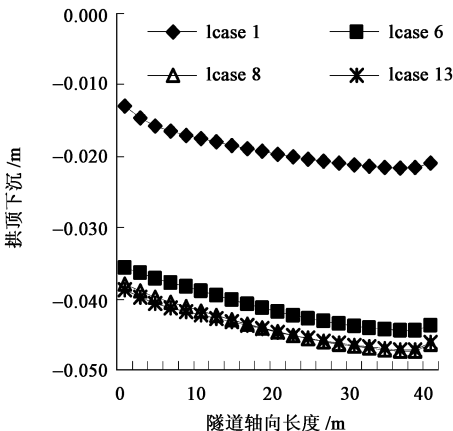


图 3 左洞拱顶下沉与进洞距离关系曲线图

图 4 右洞拱顶下沉与进洞距离关系曲线图

Fig. 3 Curves of vault displacement vs. distance for the left tunnel

Fig. 4 Curves of vault displacement vs. distance for the right tunnel

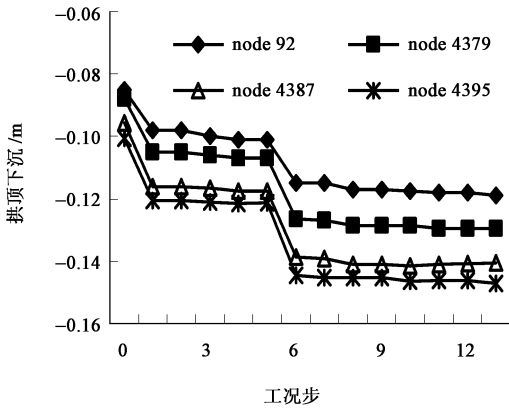


图 5 左洞拱顶下沉与工况步关系曲线图

Fig 5 Curves of vault displacement vs. loadcases at different vault points for the left tunnel

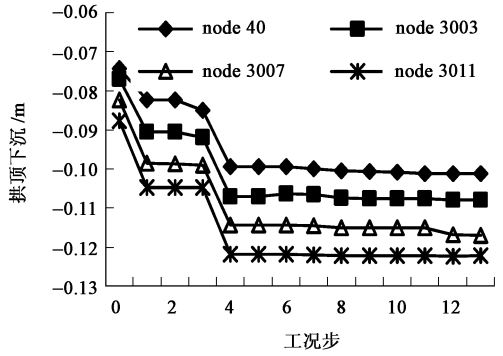


图 6 右洞拱顶下沉与工况步关系曲线图

Fig 6 Curves of vault displacement vs. loadcases at different vault points for the right tunnel

分布, 两洞节点号由洞口至洞内依次增大, 左洞为 92—4395, 右洞为 40—3019。拱顶下沉小结:

1. 从拱顶下沉与工况步关系曲线图(图 5、图 6)看, 隧道位移释放主要发生在隧道中导洞开挖(Lcase1), 左、右洞各自上台阶(左洞 Lcase6、右洞 Lcase4)开挖之时, 其他施工步对拱顶下沉影响不大。

2. 埋深相对较大的山脊侧左洞拱顶下沉比山谷侧右洞拱顶下沉大, 前者最大 4.72cm, 后者最大 3.81cm, 均发生在进洞 40m 处(图 3、图 4)。各工况步拱顶下沉由洞口至洞内有逐渐增大的趋势, 这很可能是由于埋深不断增大引起的。在浅埋条件下, 拱顶下沉有随埋深增大而增大的趋势, 洞内稳定不容忽视。

3. 实测拱顶下沉位移一般 2~3cm, 计算值相对偏大, 但这正好反应了计算模型和参数选取的合理性。开挖是引起拱顶下沉的主要因素, 而监测工作往往是滞后于开挖的, 开挖初期释放掉的部分位移, 未能在监测数据里反映出来。

3.2 应力集中分析

a 剪应力(图 7):

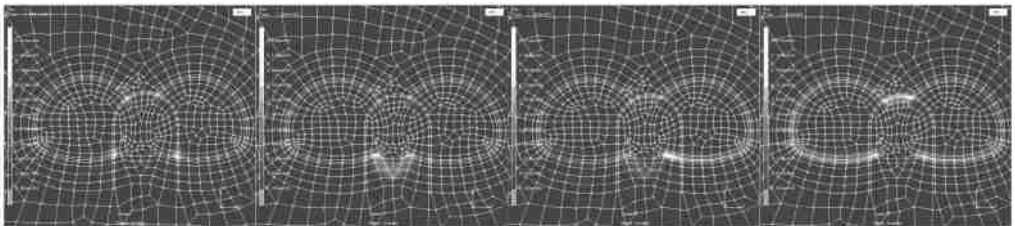


图 7 Lcase2-Lcase7-Lcase10-Lcase13 剪应力集中云图(进洞 20m)

Fig 7 Shear stress distribution around the tunnel during construction

剪应力集中小结:

1. 中导洞支护(Lcase2)的剪应力集中在墙底和拱腰上角点; 在左右洞上台阶开挖完毕后(Lcase7), 中墙的倒梯形墙基剪应力也非常集中; 中墙墙底的剪应力集中区随着左右洞

二衬和仰拱的施作而减弱, 而墙顶的则增强。

2. 施工完毕, 仰拱成了剪应力集中的区域, 比二衬的拱墙和边墙发育, 说明仰拱在支护中发挥了很重要的作用, 应及时施作。

b 正应力 (图 8):

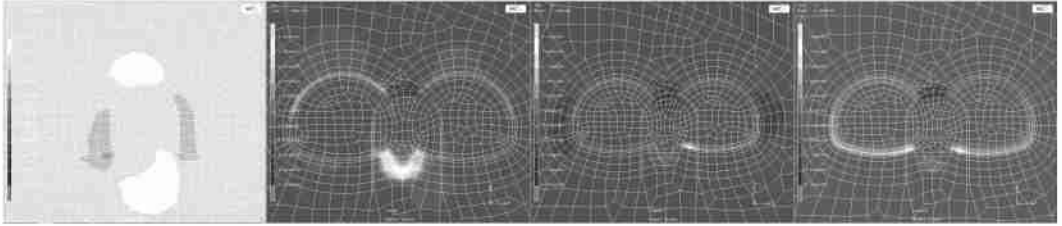


图 8 Lcase1-Lcase7-Lcase11-Lcase13 正应力集中云图 (进洞 20m)

Fig 8 Normal stress distribution around the tunnel during construction

正应力集中小结:

1. 按 MARC 规定, 应力“拉正压负”。中导洞开挖完毕 (Lcase1) 隧道顶部即出现拉应力区, 由于岩土体抗拉能力弱, 因此, 顶部是易发生塌方的部位, 应超前或及时支护。
2. 左右洞上台阶开挖初支后 (Lcase7) 洞顶仍然出现明显的拉应力区, 山脊侧洞顶的拉应力区仍然较大。说明山脊侧更容易坍方, 初支还不能保证隧道的稳定, 应及时施作二衬。
3. 随着左洞下台阶的开挖, 隧道两侧边墙都出现了明显的压应力区, 这显然是由于隧道的偏压推挤作用引起的。
4. 随着二衬及仰拱的及时完成, 隧道周边应力转移, 压应力集中区基本消失, 二衬及仰拱成为正应力集中区。

3.3 塑性区分析

塑性区小结 (图 9):

1. 中导洞开挖初期支护后 (Lcase2) 两侧和墙脚皆有塑性区发育, 说明中导洞虽然截面小, 但其稳定性仍是一个不可忽视的问题。
2. 左右洞上台阶开挖后 (Lcase7), 中导洞的支护仍未拆除, 所以其下部仍然出现较大塑性区, 这是由于中导洞支护拱向两侧传递推力的缘故。说明: 该阶段不拆除中导洞支护, 可以发挥其支护作用, 有利于中隔墙稳定。
3. 施工支护完毕阶段 (Lcase11、Lcase13) 山脊侧中墙墙踵和隧道边墙塑性区比山谷侧发育, 说明施工完毕后山脊侧所受压力比山谷侧大, 失稳最易在山脊侧发生。

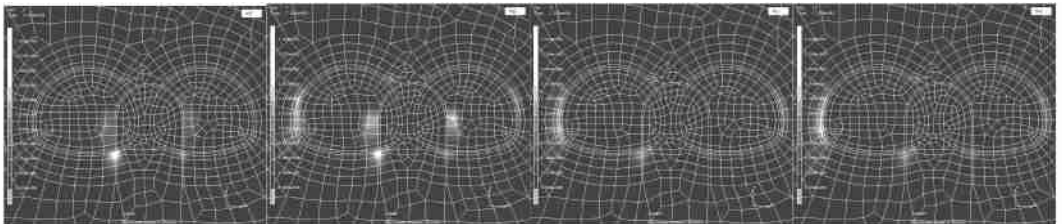


图 9 Lcase2-Lcase7-Lcase11-Lcase13 塑性区分布云图 (进洞 20m)

Fig 9 Plastic zone distribution around the tunnel during construction

3.4 中墙竖向应力分析 (图 10、图 11、图 12)

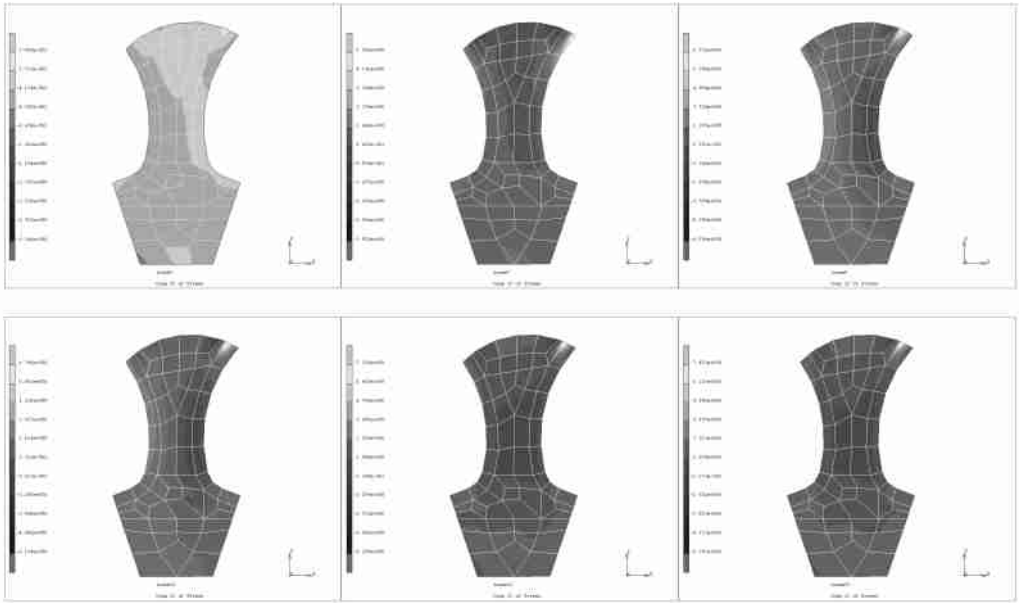


图 10 Lcase3-Lcase7-Lcase8-Lcase10-Lcase11-Lcase13 中墙 σ_y 分布云图 (进洞 20m)

Fig. 10 σ_y distribution of the mid-leading wall during construction

说明: 图 11 和图 12 中应力拉正压负。由于施工中采用改变单元属性来“激活”支护, Lcase 0 的节点 σ_y 值实质是岩体在该点的自重应力, Lcase1 和 Lcase2 工况步由于中导洞开挖(杀死单元), 节点 σ_y 值为 0。而中墙在 Lcase3 才施作, 所以, 分析中墙节点应力的变化应从 Lcase3 开始。为避免边界条件影响, 研究对象取距洞口 20m 的横断面。节点 15362 和 14816 分别为该横断面上部的山脊侧节点和山谷侧节点; 节点 14753 和 15425 分别为该横断面下部山脊侧节点和山谷侧节点。

中墙竖向应力小结:

1. 中导洞开挖施作中墙后 (Lcase3) σ_y 基本为负值, 说明中隔墙主要受压, 但山脊侧受压更明显, 说明隧道偏压。

2. 从 σ_y 分布云图看 (图 10), 在开挖形态对称条件下 (Lcase7、Lcase11-Lcase13), 中墙竖向应力处于相对对称状态。随着右洞下台阶开挖 (Lcase8), 中墙山谷侧成了受压集中区, 说明开挖导致山体有向外移动的趋势, 其推挤作用使中墙受到明显的偏压作用。右洞初衬和二衬的施作 (Lcase10) 并没使中墙偏压应力作出很大的调整, 说明非对称开挖是引起中墙偏压的关键因素。

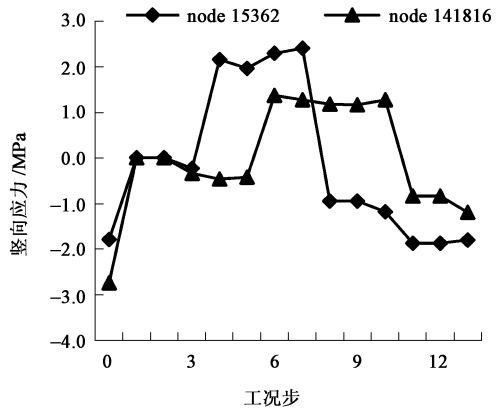


图 11 中墙横断面 (距洞口 20m) 上部两侧节点 σ_y 随工况步变化曲线图

Fig. 11 Curves of σ_y vs. loadcases for the top mid-leading wall nodes on two sides

3. 从中墙横断面(距洞口20m)上部两侧 σ_y 随工况步变化曲线看(图11), 山脊侧上部节点15362在山谷侧右洞上台阶开挖后(Lcase3-Lcase4)出现了明显的拉应力, 山谷侧节点14816在山脊侧左洞开挖(Lcase6-Lcase7)后, 也出现了明显拉应力, 15362节点几乎同时由受拉变成受压状态, 而此时中墙下部节点(15425、14753)仍处于受压状态。

4. 从中墙横断面(距洞口20m)下部两侧 σ_y 随工况步变化曲线看(图12), 中墙下部山脊侧节点14753在山谷侧右洞下台阶开挖(Lcase7-Lcase8)后出现最大竖向拉应力0.903MPa, 山谷侧节点15425受最大压应力3.031MPa。隧道施作完成后(Lcase13)中墙两侧所受压应力相差很小, 说明中墙倾覆失稳、拉裂破坏或压致破坏最可能在非对称开挖的单侧隧道的下台阶开挖期间发生。

4 主要结论

通过对连拱隧道的施工进行动态模拟, 深入理解了隧道的施工力学响应行为, 归纳起来, 可得到以下一些主要结论:

1) 实测拱顶下沉位移一般2~3cm, 计算最大值4~5cm, 相对偏大, 但这正好反应了计算模型和参数选取的合理性。开挖后、支护前的位移变化最大, 而监测工作相对滞后, 初期开挖已经释放掉部分位移, 未能在监测数据里反映出来。浅埋条件下, 拱顶下沉随埋深增大而增大, 洞内稳定不容忽视。

2) 施工完毕, 二衬和仰拱成了应力集中区, 是主要的受力结构, 施工中应及时施作以使其发挥作用。

3) 开挖完毕, 抗拉能力弱的隧道顶部岩土体出现拉应力区, 是易发生塌方的部位, 应及时支护或采用大管棚等措施超前支护。左右洞上台阶开挖初支后洞顶仍然存在明显的拉应力区, 初支还不能保证隧道的稳定, 应及时施作二衬和仰拱。随着施工完毕, 两侧边墙附近压应力集中区转移消失, 二衬及仰拱呈现拉应力集中的状态, 隧道受力状态得到了良好改善。

4) 中墙墙底的剪应力集中区和施工完毕后中墙墙踵出现的塑性区都说明中墙的基础稳定问题不可忽视。塑性区在左右洞上台阶开挖后最发育, 隧道在该施工段最易失稳, 施工时应作好相应的监测工作。由于偏压作用, 施工支护完毕, 中墙墙踵和隧道山脊侧边墙塑性区比山谷侧发育。可采用中墙基础锚固、在山脊侧施作偏压衬砌等方法, 来加强隧道的稳定性。

5) 中墙竖向应力状态在施工过程中经过了复杂的调整, 在开挖形态非对称条件下, 隧道出现最不利的偏心受压(受拉)状态, 初衬和二衬的施作并未让此状态得到有效改善。而

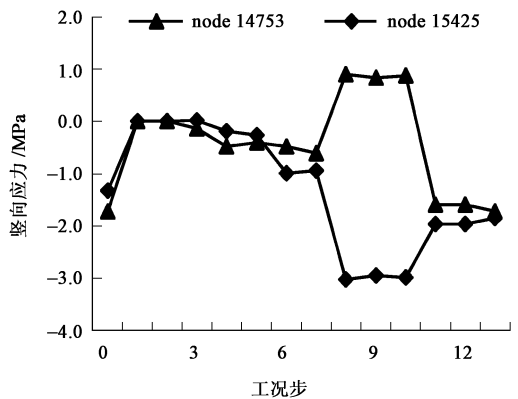


图12 中墙横断面(距洞口20m)下部两侧节点 σ_y 随工况步变化曲线图

Fig. 12 Curves of σ_y vs. loadcases for the bottom mid-leading wall nodes on two sides

开挖形态对称施工步的中墙应力则处于相对对称状态。因此, 对称开挖是防止中墙倾覆失稳、拉裂破坏或压致破坏的最有效措施。

参 考 文 献

- [1] 蒋树屏, 胡学兵. 云南扁平状大断面公路隧道施工力学响应数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (2): 178 ~ 182.
- [2] 杜彬. 长梁山隧道水平软弱围岩地段施工效应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (13): 2357 ~ 2361.
- [3] 金丰年, 钱七虎. 隧洞开挖的三维有限元计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15 (3): 193 ~ 200.
- [4] 邓建, 朱合华, 丁文其. 不等跨连拱隧道施工全过程的有限元模拟 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (3): 477 ~ 480.
- [5] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化 [J]. 岩石力学与工程学报, 24 (22): 4042 ~ 4047.
- [6] 赵玉光, 张焕新, 林志远, 等. 双连拱隧道施工力学数值模拟与施工方法比选 [J]. 广西交通科技, 2003, 28 (4): 25 ~ 30.
- [7] 林刚, 何川. 连拱隧道施工全过程地层沉降三维数值模拟 [J]. 公路, 2004 (3): 136 ~ 140.
- [8] 吴俊强, 刘永华, 李围. 浅埋偏压连拱公路隧道施工数值模拟分析 [J]. 公路交通技术, 2005, (4): 137 ~ 141.
- [9] 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.
- [10] 申玉生, 赵玉光, 张焕新, 等. 双连拱隧道施工过程弹塑性有限元数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (增 2): 4946 ~ 4951.
- [11] 赵阳, 王伟笔, 杨昌能. 偏压浅埋连拱隧道施工过程的三维数值模拟 [J]. 中南公路工程, 2005, 30 (2): 181 ~ 184.
- [12] 陈火红. MARC 有限元实例分析教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [13] 陈建勋, 欧阳院平, 王明年. 公路隧道复合式衬砌结构数值计算及分析 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 74 ~ 79.
- [14] 吴波, 高波, 索晓明, 等. 城市地铁小间距隧道施工性态的力学模拟与分析 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (3): 84 ~ 89.
- [15] 吴满路, 廖椿庭. 大茅隧道地应力测量及围岩体稳定性研究 [J]. 地质力学学报, 2000, 6 (2): 71 ~ 76.
- [16] 马秀敏, 彭华, 李金锁. 新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (4): 386 ~ 393.

MECHANIC RESPONSE OF A SHALLOW-EMBEDDED AND DOUBLE-ARCH TUNNEL UNDER PARTIAL PRESSURES DURING CONSTRUCTION

XIANG An-tian, ZHU He-hua, DING Wen-qi, JIA Ming-hui
(*Geotechnic Engineering Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Taking an expressway in Jiangxi province as the engineering background, the behavior of a shallow-embedded and double-arch tunnel with partial-pressure during construction is simulated. Several aspects, such as stress concentration and transfer, plastic zone distribution, vault displacement and

(下转第 211 页)

CENOZOIC EVOLUTION AND TECTONIC RECONSTRUCTION OF THE QAIDAM BASIN: EVIDENCE FROM SEISMIC PROFILES

YIN An¹, DANG Yu-qí², CHEN Xuan-hua³, WANG Li-qun², JIANG Wu-ming²,
JIANG Rong-bao³, WANG Xiao-feng³, ZHOU Su-ping², LIU Ming-de², MA Li-xie²

(1. *Department of Earth and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics,*

University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA;

2. *Petroleum Research Institute of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)*

Abstract: The Qaidam basin is the largest topographic depression inside the Tibetan plateau. Understanding the tectonic origin of the Qaidam basin has important implications for unraveling the formation mechanism and growth history of the Tibetan plateau. In this paper, the authors analyze regional seismic-reflection profiles across the basin. The first-order structure of the basin is a broad Cenozoic synclinorium, with an amplitude ranging from > 16 km in the west to < 4 km in the east. The fold axis propagated from the western Qaidam basin against the Altyn Tagh fault at 65-50.5Ma to the eastern basin at 23.3Ma; its half-wavelength changes from ~ 170 km in the west to ~ 50 km in the east. The formation of the synclinorium was induced by an older thrust system initiated at ~ 65 -50.5Ma at the northern margin and a younger thrust system initiated at 35.5-23.3Ma at the southern margin. Cenozoic upper-crustal shortening decreases across the basin from $> 48\%$ in the west to $< 1\%$ in the east, suggesting a progressive shift in crustal thickening mechanisms across the Qaidam basin, from dominantly upper-crustal shortening in the west to dominantly lower-crustal shortening in the east.

Key words: seismic reflection profile; tectonic reconstruction; Cenozoic; Qaidam basin

(上接第 254 页)

change of vertical stress, (σ_y) of the mid-leading wall with construction are studied systemtically. The study indicates that: 1) asymmetrical excavation is the key cause of partial pressure in the mid-leading wall and the construction of the first and second lining can not ameliorate the conditions greatly; 2) under conditions of shallow embedment, vault displacement increases with embedment depth and displacement mainly happens during excavation of tunnel before lining construction; 3) after excavation of the up-bench tunnel, pulling stress concentrates around the top arch and lining should be constructed promptly or beforehand; 4) as a result of partial pressure, when plastic zones around the side-wall and mid-leading wall heel, which are near the mountain ridge, are better developed; and 5) when construction finished, compressive stresses at tunnel side-walls disappear and are transferred to the inverse arch and second lining, making them concentrated by shear stress and normal stress and improving the stability of the tunnel.

Key words: 3D numerical simulation; partial pressure; vault displacement; plastic zone; stress concentration