

大跨度公路隧道施工力学响应数值试验研究^①

邱明明^{1,2}, 杨果林², 魏赛赛², 邓伟³

1. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075;

3. 中建五局土木工程有限公司, 长沙 410004

摘要: 大跨隧道施工力学行为极为复杂, 明确其力学行为及应力水平对大跨隧道设计与施工有积极意义. 以某四车道公路隧道为工程背景, 借助数值模拟手段建立了三维围岩—结构隧道施工力学模型, 对不同开挖方案下四车道公路隧道施工力学响应进行了对比分析, 获得了大跨隧道围岩和支护结构的位移、应力及塑性破坏区等的分布特征与演变规律, 提出了适合 V 级围岩条件下大跨隧道合理开挖方法和控制措施, 研究成果可以为同类隧道工程的设计与施工提供理论参考.

关键词: 大跨隧道; 开挖方法; 力学响应; 数值试验; 演变规律; 隧道工程

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)12-0170-09

随着我国交通的快速发展及大跨度隧道的修建, 为隧道修建技术和理论研究提出了严峻的挑战和广阔的发展动力. 然而与一般公路隧道和铁路隧道相比, 大跨度公路隧道跨高比大、扁平率高、受力状态复杂、稳定性差、对开挖速度和开挖安全的要求更高. 因大跨度隧道工程修建较少, 积累的设计、施工实践经验不多, 又无成熟的理论计算方法和标准的设计规范可参照, 加之其本身众多复杂因素的影响, 在诸多方面都面临着亟待解决的问题^[1].

四车道公路隧道施工过程中的动态施工力学行为极为复杂, 围岩极易发生失稳乃至坍塌, 且掌握隧道动态施工过程力学行为, 明确围岩与支护衬砌结构的应力水平及荷载传递机理, 对控制隧道围岩稳定及变形有重要作用. 因此, 研究大跨度隧道施工开挖过程中的动态力学响应和围岩—支护结构相互作用是十分必要的. 对于大跨公路隧道开挖力学行为的研究, 国内外一些学者主要采用理论分析^[2-4]、模型试验^[5-6]、现场实测^[7]及数值仿真^[8-11]等方法, 对三车道公路隧道的受力特征及合理开挖方法进行探讨, 而四车道公路隧道施工动态力学行为的相关成果及文献较少.

本文依据实际工程资料及现有的公路隧道设计规范, 运用三维有限差分程序 FLAC^{3D} 软件, 建立三维围岩—结构隧道施工力学模型, 对四车道大跨公路隧道施工围岩应力场、位移场及支护结构力学响应进行了研究, 比较分析了四车道大跨度深埋隧道开挖方案的合理性, 可为设计和施工提供理论依据, 并供类似工程参考借鉴.

① 收稿日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778641, 51478484); 中建五局土木工程有限公司基金资助项目(02012016YN77); 延安大学博士科研计划资助项目(YDBK2017-32).

作者简介: 邱明明(1985-), 男, 陕西商洛人, 博士, 讲师, 主要从事道路与铁道工程、隧道及地下工程方面的研究.

通信作者: 杨果林, 教授, 博士研究生导师.

1 工程背景

某一级高速公路隧道为双向分离式单洞四车道隧道,隧道右线长 1 082 m,隧道左线长 1 090 m,设计行车速度为 100 km/h,断面呈近似椭圆形,采用五心圆断面形式.洞顶埋深范围约为 36~40 m,隧道开挖净宽为 22.0 m,轴线处开挖高度为 15.5 m.隧道穿越地质类型为软弱破碎的 V 级围岩;初期支护为锚喷混凝土:喷射混凝土(C20,厚度 30 cm)+钢筋网(直径 10 mm,间距 20 cm×20 cm)+中空注浆型锚杆(直径 30 cm,长度 5.0 m@1.0 m)+钢拱架(25#工字钢,间距 0.5 m);二次衬砌为钢筋混凝土结构:模筑混凝土(C30,厚度 70 cm,带仰拱).

2 数值计算模型建立

2.1 计算模型及边界条件

根据工程勘察报告及隧道设计资料,隧道跨度 $L=22.0$ m,覆土厚度 $H=29.0$ m.考虑土体的无限性及隧道开挖扰动影响范围,取模型上表面为地表,上边界取距原点 40 m;下边界取距原点 24 m;左、右边界取距原点 60 m;纵向开挖长度取 3 m.取平行隧道横断面水平向为 x 轴、竖向为 z 轴、沿隧道轴线开挖方向为 y 轴,坐标原点为隧道中心点,建立的三维隧道开挖计算模型尺寸为: x (宽)× y (长)× z (高)=120 m×3 m×64 m,所建模型共划分 5 592 个单元,8 565 个节点,模型网格见图 1.该模型上表面取为自由边界;模型侧面和底面取位移为边界条件,侧面限制水平位移,底面固定限制水平和竖直位移;计算时仅考虑自重应力场.

FLAC^{3D}对连续介质进行大变形分析具有较大优势,可计算非线性本构关系,并能模拟多种不同力学特性的材料.软件提供了多种基本网格形状和梁、壳体等结构单元,因此非常适合于模拟隧道开挖的渐进过程.模型采用 FLAC^{3D}中的六面体单元模拟各土层,采用放射状单元模拟隧道周边土体,采用壳体单元模拟初期锚喷支护,采用柱形壳单元模拟隧道及二次衬砌结构.

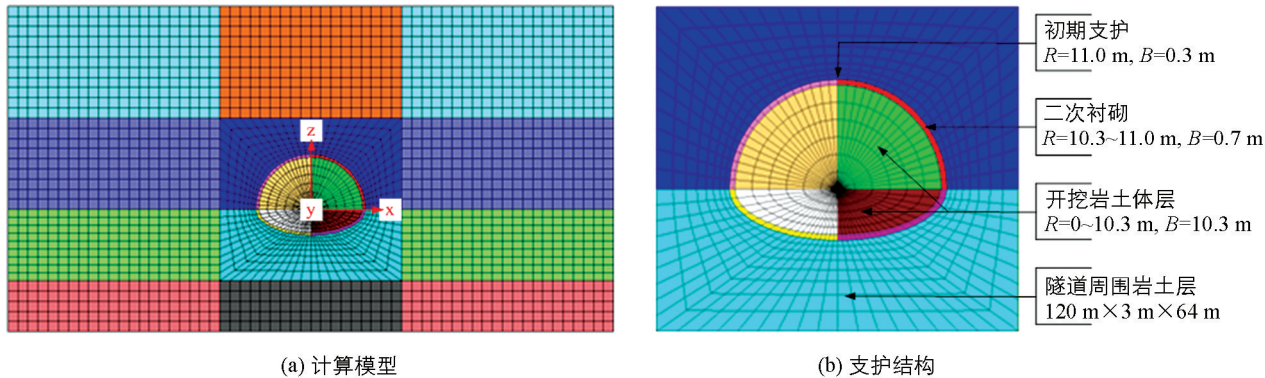


图 1 四车道隧道三维计算模型

2.2 本构关系及材料参数

FLAC^{3D}提供了适合模拟岩土材料的本构模型及结构模型.在模拟计算中,岩土体材料采用各向同性弹塑性 Mohr-Coulomb 本构模型,利用增量理论计算,初次衬砌、二次衬砌采用弹性本构模型.

Mohr-coulomb 屈服准则^[12]为

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} = 0 \tag{1}$$

式中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$; c 为凝聚力; φ 为摩擦角.

在 FLAC^{3D}中,常用 K 和 G 两个弹性常量来描述材料属性,而不用弹性模量 E 和泊松比 ν .它们之间

的关系如下^[13]:

$$\begin{cases} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad (2)$$

以 V 级围岩为研究背景, 围岩物理力学参数、支护结构等材料的相关计算参数依据地质勘察报告及《公路隧道设计规范 JTG D70-2004》等规范^[14-15]中建议的参数选取, 各计算参数如表 1 所示.

表 1 材料主要物理力学参数

材料参数	重度(γ)/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量(E)/ GPa	泊松比(ν)	体积模量(K)/ GPa	剪切模量(G)/ GPa	凝聚力(c)/ MPa	内摩擦角(φ)/ °	抗拉强度(τ)/ MPa
V 级围岩	18.0	1.5	0.40	2.50	0.54	0.10	23	0.10
初次支护	23.0	21.0	0.20	11.67	8.75	—	—	—
二次支护	26.0	32.0	0.20	17.78	13.33	—	—	—

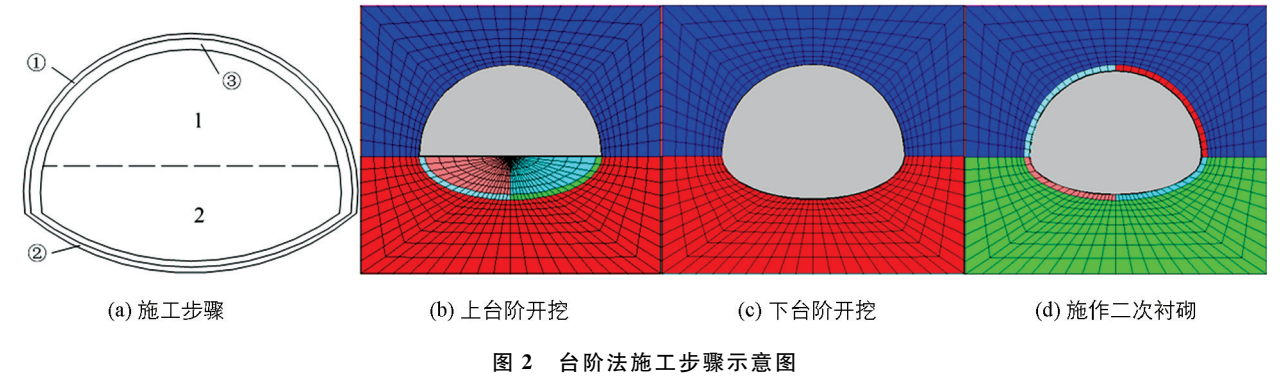
2.3 隧道开挖方法及模拟

隧道开挖方法要根据断面形状、隧道长度、工期、地质、涌水情况以及周围环境等条件综合确定. 大跨隧道施工方案主要是根据围岩地质和施工技术条件来确定, 从目前的施工技术水平来看, 适合于大跨度隧道的开挖方法主要有台阶法、台阶分部开挖法、中壁工法(CD 法或 CRD 法)和双侧壁导坑法(眼镜工法)等. 根据隧道围岩地质情况, 本次模型试验采用台阶法(开挖方案 I)和中壁工法(开挖方案 II)进行比较研究, 两种方案施工步骤如表 2、图 2、图 3 所示.

在数值计算过程中, 首先对模型施加重力荷载, 计算土体的原始自重应力场, 清除自重作用下的土体位移; 然后进行隧道开挖, 开挖后释放隧洞边界地层应力 25%^[11], 然后进行第一次开挖计算; 施作隧道初期支护结构, 进行支护计算; 最后施作二次衬砌, 释放隧洞边界全部地层应力并进行计算; 依次进行下一步开挖计算, 直至隧道全部开挖完成.

表 2 隧道施工方案及开挖步骤

施工方案	开挖支护步骤	施工方案	开挖支护步骤
方案 I—台阶法	1. 上台阶研究	方案 II—中壁工法 (CRD 法)	1. 左上部开挖
	①上台阶支护		①左上部支护
	2. 下台阶研究		2. 右上部开挖
	②下台阶支护		②右上部支护
	③施作二次衬砌		3. 左下部开挖
			③左下部支护
			4. 右下部开挖
			④右下部支护
			⑤施作二次衬砌



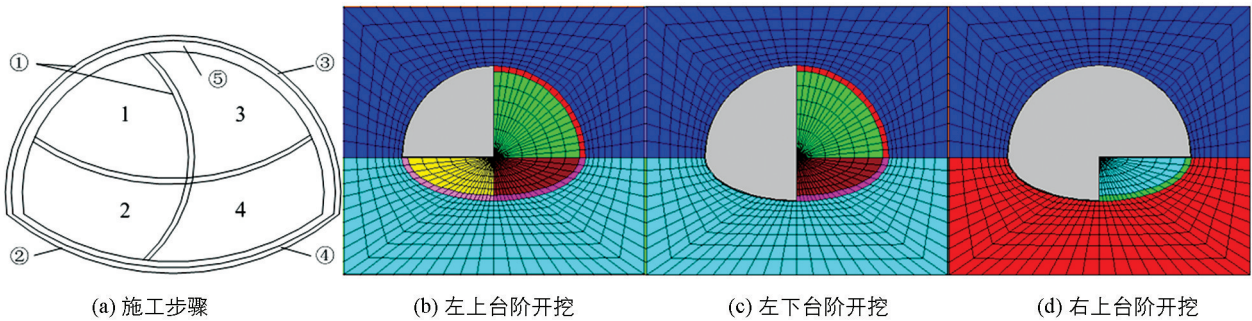


图 3 CRD 法施工步骤示意图

3 计算结果对比与分析

3.1 围岩应力场分布

图 4、图 5 给出了不同开挖方法对应的隧道围岩应力场分布. 由图对比可得: 台阶法开挖时应力场左右两侧基本对称, 而 CRD 法应力场左右两侧明显有差异. 两种开挖方法引起的围岩小主应力在拱顶处分别为 0.067, 0.010 MPa, 在拱底处分别为 -0.010, -0.110 MPa, 即均在拱顶处受压, 拱底处受拉, 且台阶法开挖引起的围岩受压应力范围明显大于 CRD 法. 两种开挖方法引起的围岩大主应力在拱顶处分别为 0.493, 0.414 MPa, 在拱底处分别为 0.299, -0.150 MPa; 台阶法引起的围岩大主应力在拱顶处的受压程度和在拱底处的受拉程度均大于 CRD 法. 说明在 V 级围岩条件下, 采用上下台阶法施工对围岩的扰动影响程度较 CRD 法大, 因此合理的开挖方法、分部形态、施工工序等对减少应力集中或拉伸破坏有积极意义.

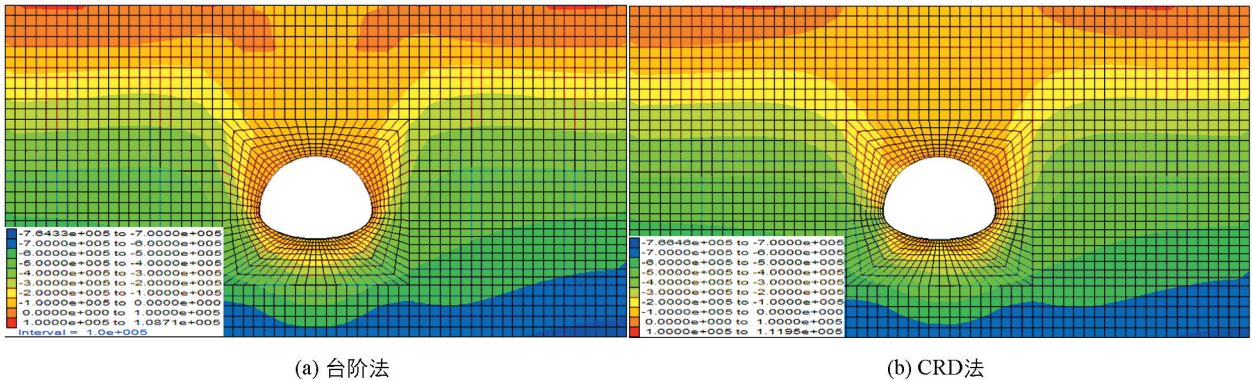


图 4 围岩小主应力 σ_3 场分布 (单位: Pa)

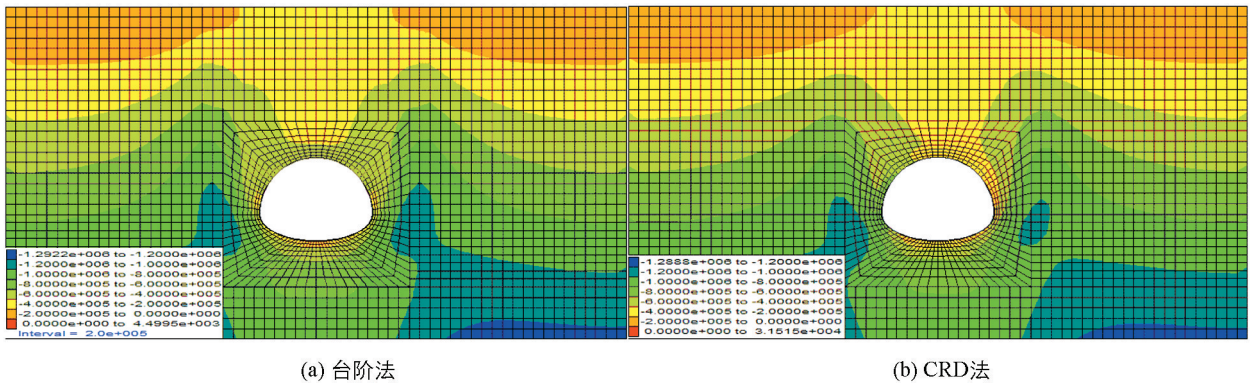


图 5 围岩大主应力 σ_1 场分布 (单位: Pa)

3.2 围岩位移场分布

图 6、图 7 给出了不同研究方法对应的隧道围岩位移场分布. 由图对比可得: 隧道开挖完成后, 台阶法施工引起的最大竖向位移在拱顶和拱底处分别为 $-28.591, 7.021$ mm, CRD 法施工引起的最大竖向位移在拱顶和拱底处分别为 $-15.384, 7.333$ mm, 即在拱顶表现为沉降变形, 拱底表现为隆起变形; 台阶法施工引起的最大水平位移在左拱腰和右拱腰处分别为 $-15.115, -15.096$ mm; CRD 法施工引起的最大水平位移在左拱腰和右拱腰处分别为 $-8.634, -10.754$ mm(见表 3). 由此说明, CRD 法施工引起的隧道围岩位移范围及程度均小于台阶法, 采用 CRD 法在控制围岩变形和稳定方面要优于台阶法.

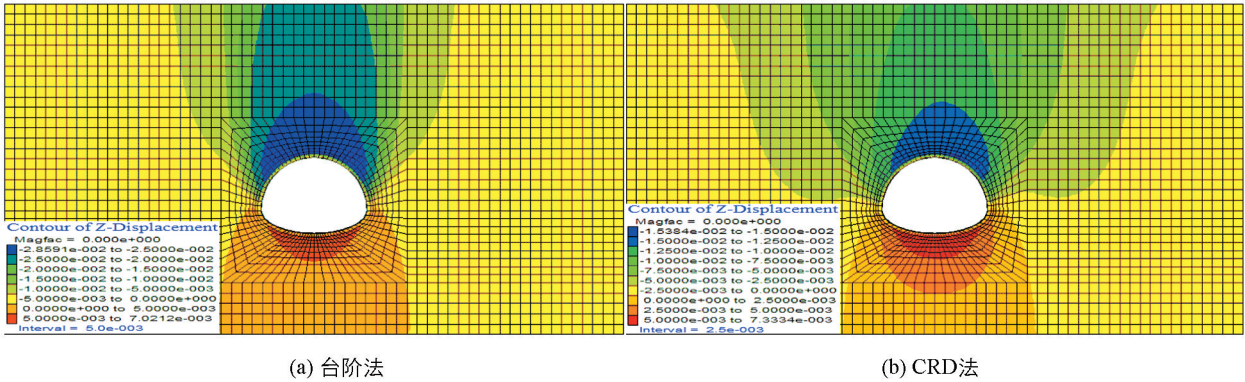


图 6 围岩竖向位移场分布 (单位: m)

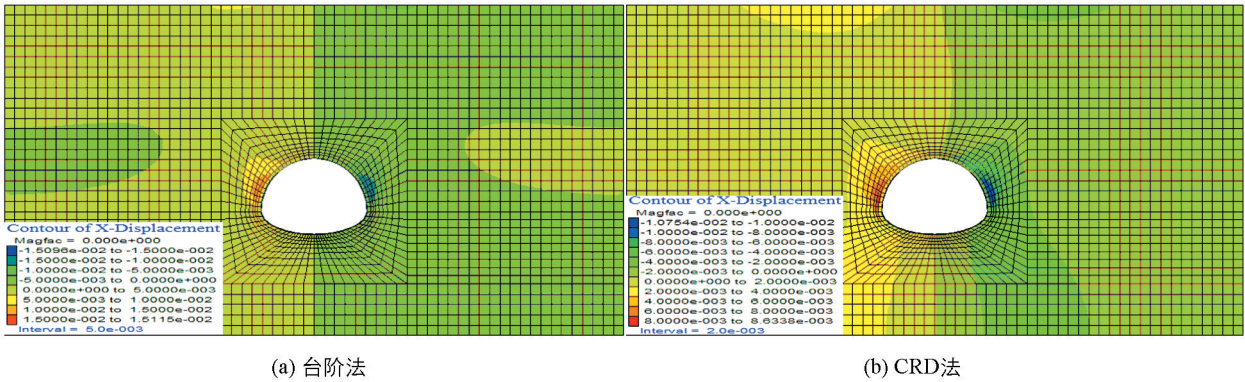


图 7 围岩水平位移场分布 (单位: m)

CRD 法各工序依次施工对应的拱顶下沉值依次为 $-7.388, -8.923, -14.633, -14.955, -15.384$ mm(见表 3), 拱顶下沉随隧道的开挖逐渐增大, 随着二次衬砌的施作完成, 围岩变形稳定; 台阶法施工引起围岩变形直接贯穿到地表, 且变形扰动影响范围及程度明显大于 CRD 法. 台阶法施工引起的隧道围岩竖向位移沿隧道轴线是对称的, 而 CRD 法施工引起的围岩竖向位移沿隧道轴线呈非对称分布. 主要原因是 CRD 法较台阶法施工工序多、时间长、每步形成的空间小, 隧道开挖后围岩的位移是随时间、空间逐渐发展变化的, 故在隧道施工过程中应合理控制施作支护结构的时间, 以便更好地发挥围岩的自承能力和控制围岩的稳定性.

3.3 围岩塑性区分布

图 8、图 9 给出了不同开挖方法对应的隧道围岩塑性区分布. 由图对比可得, 台阶法施工形成的塑性区范围远大于 CRD 法, 开挖后隧道周围及拱顶上方土体发生剪切破坏, 在地表和拱底发生拉伸破坏. 采用台阶法施工隧道拱顶上方发生剪切破坏的土体直接贯穿至地表, 而采用 CRD 法发生剪切破坏的土体范围及影响程度明显要小于台阶法. 由于 CRD 法分多步施工, 塑性区是逐渐发展形成的,

对隧道围岩的扰动影响较小，因此，对施工要求较高或围岩自稳性能不良的地质条件下，宜优先选用 CRD 施工法施工。

表 3 不同开挖方法隧道围岩位移比较计算结果

类 型		上台阶开挖		下台阶开挖		二次衬砌					
台阶法	竖向位移(U_y)/mm	−26.523	拱顶	−28.176	拱顶	−28.591	拱顶				
		7.631	隧道中心	7.251	拱底	7.021	拱底				
	水平位移(U_x)/mm	−13.697	左拱腰	−15.392	左拱腰	−15.115	左拱腰				
		−13.662	右拱腰	−15.375	右拱腰	−15.096	右拱腰				
类 型		左上部开挖		左下部开挖		右上部开挖		右下部开挖		二次衬砌	
CRD法	竖向位移(U_y)/mm	−7.388	拱肩	−8.923	拱肩	−14.633	拱顶右侧	−14.955	拱顶右侧	−15.384	拱顶
		5.741	左平台中心处	5.938	拱底左侧	7.158	拱底	7.652	拱底	7.333	拱底
	水平位移(U_x)/mm	−6.454	右拱腰	8.410	右拱腰	9.192	右拱腰	9.264	左拱腰	−8.634	左拱腰
		−7.341	右上侧壁	11.704	右上侧壁	9.568	左拱腰	10.815	右拱腰	−10.754	右拱腰

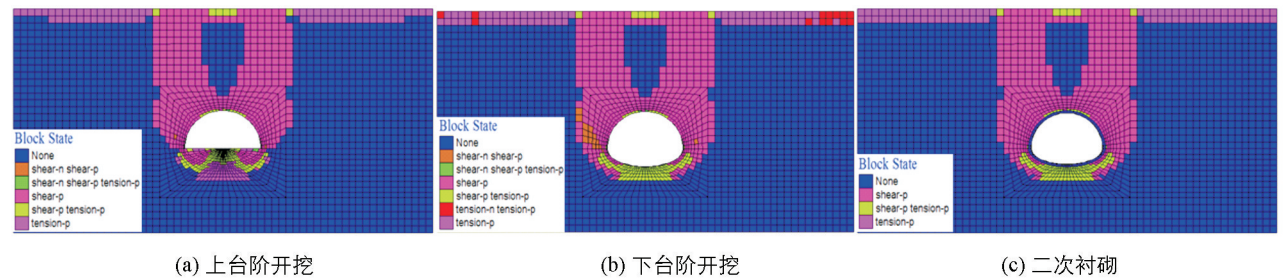


图 8 台阶法围岩塑性区分布

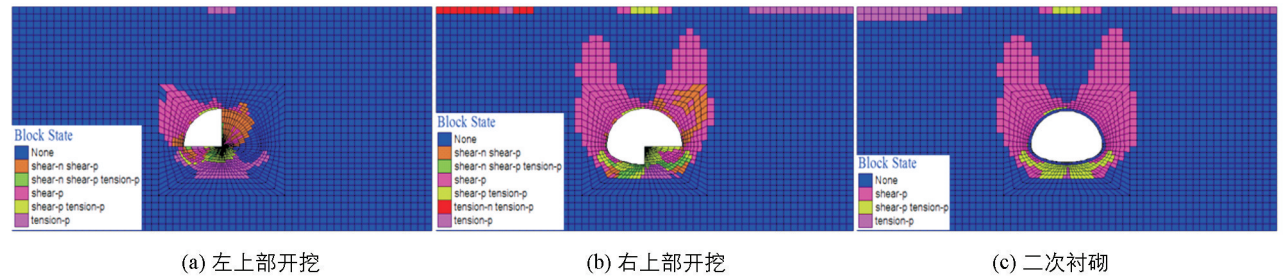
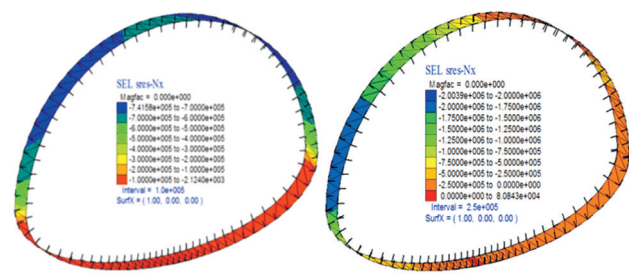


图 9 CRD 法围岩塑性区分布

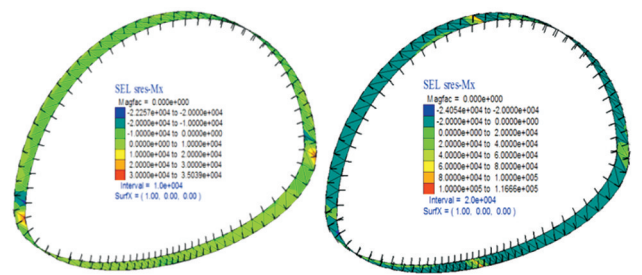
3.4 初期支护内力分布

锚喷支护属于柔性支护结构，能有效与围岩共同作用控制围岩变形，起到使围岩“卸载”的作用，充分发挥围岩自承能力，有利于更好地发挥二次衬砌结构的承载作用. 图 10、图 11 为采用台阶法及 CRD 法对应的初期支护结构轴力及弯矩分布，由图可得，台阶法施工初期支护结构一直处于受压状态，未出现拉力，CRD 法在拱底出现较小拉力，拉力值为 −80.843 kN；台阶法初期支护结构轴力最大值为 508.70 kN，发生在拱肩位置，CRD 法初期支护结构轴力最大值为 2 003.9 kN，发生在拱腰位置；台阶法初期支护结构弯矩最大值为 35.039 kN·m，发生在拱脚位置，CRD 法初期支护结构弯矩最大值为 −116.67 kN·m，发生在拱底位置. 说明在隧道拱顶、拱腰、拱脚及拱底位置易出现应力集中现象，建议隧道开挖后及时进行初期支护，特别是对易发生应力集中部位进行适当的强化支护措施。



(a) 台阶法 (b) CRD法

图 10 初期支护结构轴力分布(单位: N)

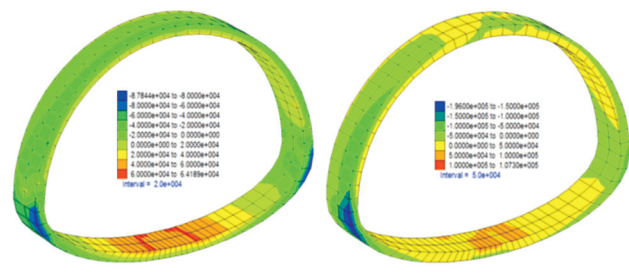


(a) 台阶法 (b) CRD法

图 11 初期支护结构弯矩分布(单位: N·m)

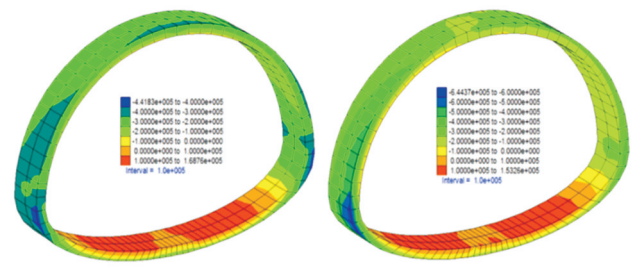
3.5 二次衬砌应力分布

图 12、图 13 给出了不同开挖方法对应的二次衬砌结构应力分布. 由图对比可得: 两种开挖方法引起的二衬小主应力在拱脚处分别为 0.088,0.196 MPa, 在拱底处分别为-0.064,-0.107 MPa; 两种开挖方法引起的二衬大主应力在拱脚处分别为 0.442,0.644 MPa, 在拱底处分别为-0.169,-0.153 MPa. 台阶法和 CRD 法均在隧道拱底临空侧出现拉应力, 在拱脚处出现压应力, 且在拱脚处出现应力集中. 因此, 在大跨隧道施工过程中, 二次衬砌结构应适时跟进, 充分利用围岩时空效应的影响, 以最大限度地控制隧道施工阶段的变形, 减轻衬砌结构的压力.



(a) 台阶法 (b) CRD法

图 12 二次衬砌小主应力 σ_3 分布(单位: Pa)



(a) 台阶法 (b) CRD法

图 13 二次衬砌大主应力 σ_1 分布(单位: Pa)

3.6 施工方案的比选

综合分析, 将台阶法和 CRD 法施工隧道围岩及支护结构应力和变形计算结果统计于表 4 和表 5. 由表可得, 对于大跨公路隧道, 从施工力学角度看, 采用台阶法或中壁工法都是安全可行的; 从施工工序角度看, 台阶法施工空间大, 工序相对简单, 便于引用大型机械, 有利于加快施工进度, 减少经济成本; 从围岩稳定性角度看, 中壁工法施工引起围岩位移的范围及程度要小于台阶法施工, 拱顶下沉仅为台阶法的 53.8%. 因此, 对施工有较高要求或围岩自身稳定性不良的地质条件下, 可优先选用中壁工法或双侧壁导坑法等工法, 以保证施工安全、顺利进行.

表 4 不同开挖方法隧道围岩应力与位移比较

类	型	周 边 围 岩							
		大主应力(σ_1)/MPa		小主应力(σ_3)/MPa		竖向位移(U_y)/mm		水平位移(U_x)/mm	
台阶法	大小	0.493	0.299	0.067	-0.010	-28.591	7.021	-15.115	-15.096
	位置	拱顶	拱底	拱顶	拱底	拱顶	拱底	左拱腰	右拱腰
CRD 法	大小	0.414	-0.150	0.010	-0.110	-15.384	7.333	-8.634	-10.754
	位置	拱顶	拱底	拱顶	拱底	拱顶	拱底	左拱腰	右拱腰

表 5 不同开挖方法隧道支护结构内力比较

类	型	初期支护				二次衬砌			
		轴力(N)/kN	弯矩(M)/(kN·m ⁻¹)			大主应力(σ ₁)/MPa	小主应力(σ ₃)/MPa		
台阶法	大小	741.58	−2.124	−22.257	35.039	0.442	−0.169	0.088	−0.064
	位置	拱肩	拱底	边墙	拱脚	拱脚	拱底	拱脚	拱底
CRD 法	大小	2003.9	−80.843	−24.054	116.67	0.644	−0.153	0.196	−0.107
	位置	拱腰	拱底	拱脚	拱底	拱脚	拱底	拱脚	拱底

4 结论及建议

通过数值试验方法,对四车道公路隧道在施工过程中围岩与支护结构的应力、位移及塑性破坏区等力学响应进行了研究,得到以下结论与建议:

1) 台阶法开挖引起的围岩受压范围较 CRD 法大,受大跨隧道扁平率的影响,在拱脚和墙脚易出现应力集中现象,且台阶法施工使边墙部位产生拉应力区,建议在实际工程中应强化应力集中或相对薄弱部位加固措施,以保证大跨隧道的整体稳定性.

2) 大跨隧道由于洞室开挖空间大,结构扁平,开挖后产生较大的围岩变形.台阶法开挖围岩变形扰动影响范围及程度明显大于 CRD 法,CRD 法施工产生的拱顶下沉量比台阶法减少了 46.2%,且 CRD 法施工引起的围岩竖向位移沿隧道轴线呈非对称分布,拱顶下沉远大于水平位移,故大跨隧道拱顶下沉量应作为判别围岩稳定的重要指标.

3) 大跨隧道开挖后,在拱顶上部产生剪切破坏,在仰拱拱底部产生拉伸破坏.台阶法施工产生的围岩塑性破坏区范围明显大于 CRD 法.因而,建议隧道开挖后及时进行初期支护,适时跟进二次衬砌结构,以最大限度控制围岩过大变形和塑性破坏区.

4) 台阶法施工初期支护结构的应力分布较均匀,CRD 法施工可以较好地发挥支护系统的支护作用,支护结构在拱肩和拱脚部位均出现了应力集中的现象,在修建大跨隧道时应采取适当的强化支护措施.

5) 在具体隧道施工过程中,应充分发挥监控量测的作用,将数值试验、理论分析和监控量测结合起来,建立有效检验和反馈机制,保证隧道围岩和结构的稳定.

参考文献:

[1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[2] PRASAD V V R, DWIVEDI R D, SWARUP A. Determination of Support Pressure for Tunnels and Caverns Using Block Theory [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 55—61.

[3] SCUSSEL D, CHANDRA S. A New Tunnel Support Pressure for Polyaxial Approach to Obtain State of Stress [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 36: 80—88.

[4] 杨建国, 谢永利, 李俊升, 等. 服役公路隧道结构模糊物元可靠性评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 162—166.

[5] LI S C, YUAN C, FENG X D, et al. Mechanical Behaviour of a Large-Span Double-Arch Tunnel [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(7): 2737—2745.

[6] 梁小勇, 扈世民, 张春会. 深埋大断面黄土隧道围岩失稳试验研究 [J]. 岩土工程学报. 2013, 35(S2): 559—563.

[7] 张顶立, 王梦恕, 高 军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290—296.

[8] GAN D Q, LU H J, LU X N, et al. Numerical Analysis of Western Hills Highway Tunnel Excavation and Support [J]. Information Computing and Applications, 2011, 7030: 41—47.

[9] 张志强, 冯 君, 马 悦, 等. 小江口隧道边坡失稳破坏机理数值分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(10): 152—161.

[10] 章慧健, 龚 伦, 仇文革, 等. 隧道分部开挖的围岩松动区演变分析 [J]. 岩土工程学报. 2014, 36(12): 2323—2329.

[11] 张志强, 何 川, 余才高. 南京地铁盾构掘进施工的三维有限元仿真分析 [J]. 铁道学报, 2005, 27(1): 84—89.

[12] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[13] 李 围. 隧道及地下工程 FLAC 解析方法 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[14] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路隧道设计规范: JTGD70-2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[15] 中华人民共和国行业标准编写组. 岩土工程勘察规范: GB50021-2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

A Numerical Experimental Investigation of the Construction Mechanical Response for Lange-Span Highway Tunnels

QIU Ming-ming^{1,2}, YANG Guo-lin², WEI Sai-sai², DENG Wei³

- 1. School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an Shaanxi 716000, China;
- 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
- 3. CCFEB Civil Engineering Co. Ltd., Changsha 410004, China

Abstract: The construction mechanics of large-span tunnels is extremely complicated, and understanding the mechanics behaviors and stress level is of great significance to the design and construction of large-span tunnels. On the basis of a case study of a four-lane highway tunnel, the finite difference method (FDM) using software FLAC^{3D} was adopted to establish a three-dimensional stratum-structure construction mechanical model for researching the distribution characteristics and the evolution rules of displacement, stress, and plastic failure zone on the surrounding rock and the structure of the tunnel, The mechanical responses of the four-lane highway tunnel under varying construction methods were compared and analyzed. Some dynamic mechanics rules were obtained, and reasonable construction methods and control measures of large-span highway tunnels were put forward on this condition. It is hoped that the results obtained in this study can be adopted in the design, construction and research of similar large-span highway tunnels.

Key words: large-span tunnel; excavation method; mechanical response; numerical test; evolution rules; tunnel engineering

责任编辑 汤振金

