

红枫连拱隧道开挖稳定性分析

陈永辉¹ 彭建忠² 李文奇³ 陈显春²

(1. 河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098 ; 2. 金丽温高速公路永嘉鹿城段工程建设指挥部 ,浙江 温州 325106 ;
3. 温州龙建路桥工程公司 ,浙江 温州 325000)

摘要 通过对金丽温高速公路红枫连拱隧道工程地质特征的现场调查和理论分析 ,系统地研究了该隧道开挖及加固全过程的围岩应力场、变形场和塑性破坏区的状况及变化特征 . 结果表明 : 红枫连拱隧道围岩应变率较低 ,围岩衬砌后位移值变化量很小 ,按衬砌类型 ,围岩变形基本满足稳定要求 ; 围岩的拉应力随着隧道开挖面的扩大而逐渐变大 ,除局部位置外 ,衬砌基本满足抗拉要求 .

关键词 金丽温高速公路 红枫连拱隧道 开挖 稳定性 数值模拟

中图分类号 :TU457 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)04-0442-05

特殊的隧道结构形式对围岩稳定提出了特殊的要求 . 由于连拱隧道施工工序比较复杂 ,同时没有相应的规范可供参考 ,因此施工过程中遇到的地质问题较多 ,且大部分问题尚未能解决 . 本文根据连拱隧道区工程地质现场测绘资料 ,研究工程区工程地质的基本特征 ,合理确定岩体的物理力学参数 ,分析连拱隧道施工工序对隧道围岩稳定产生的影响 ,并结合隧道开挖大变形分析方法 ,研究连拱隧道开挖顺序对围岩稳定的影响^[1~9] .

1 工程地质特征

1.1 工程地质概况^①

隧道区地质构造形式主要为节理裂隙 ,测绘中未发现断层及破碎带露头 . 隧道区岩石节理裂隙普遍发育 . 据野外测绘和统计模型分析 ,岩体主要发育 3 组结构面 ,产状分别为 $155^{\circ}\angle 85^{\circ}$ 、 $60^{\circ}\angle 85^{\circ}$ 及 $60^{\circ}\sim 83^{\circ}\angle 8^{\circ}\sim 15^{\circ}$,节理面以平直为主 ,多闭合 ,节理间距为 4~6 条/m ,局部密集处可达 10 条/m 左右 . 地层岩性主要为第四系覆盖层和上侏罗统凝灰岩 ,后者岩性致密坚硬 ,块状构造 ,抗风化能力较强 .

1.2 计算参数

根据《金丽温高速公路永嘉鹿城段工程施工图设计阶段工程地质勘察报告》^①、JTG—2004《公路隧道设计规范》及同类地质条件相关工程资料等 ,结合现场工程地质测绘和补充试验 ,依据不同风化带的工程地质特征 ,确定了如表 1 所示的计算参数 .

表 1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

地层号	岩性 风化带	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	摩擦系数	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
1	强风化	0.05	0.330	2600	0.059	0.562	29.34	0.2
2	中风化	0.75	0.316	2630	0.168	0.730	36.13	0.4
3	微风化	2.00	0.290	2660	0.300	1.000	45.00	0.5

2 连拱隧道开挖稳定性分析

2.1 位移场分析

图 1 所示为开挖及加固结束后围岩的位移场等值线 . 所有开挖及加固后的位移最大值和最小值的统计结果见表 2 (x 向向右为正、向左为负 ; y 向向上为正、向下为负) . 开挖模拟方式为先中导洞后两侧隧道 ,按照

收稿日期 2004-12-07
基金项目 浙江省交通科技计划资助项目(2004H27)
作者简介 陈永辉(1972—) 男 ,浙江东阳人 ,副教授 ,博士 ,主要从事岩土工程研究 .
① 浙江省交通规划设计研究院 . 金丽温高速公路永嘉鹿城段工程施工图设计阶段工程地质勘察报告 . 2002 .

施工顺序分为 1 次、2 次和 3 次分步开挖,衬砌模拟材料为钢筋混凝土,其构成的约束力作用在隧道洞壁上。
图 2 为 3 次开挖 x 向和 y 向位移最大值加固前后对比。

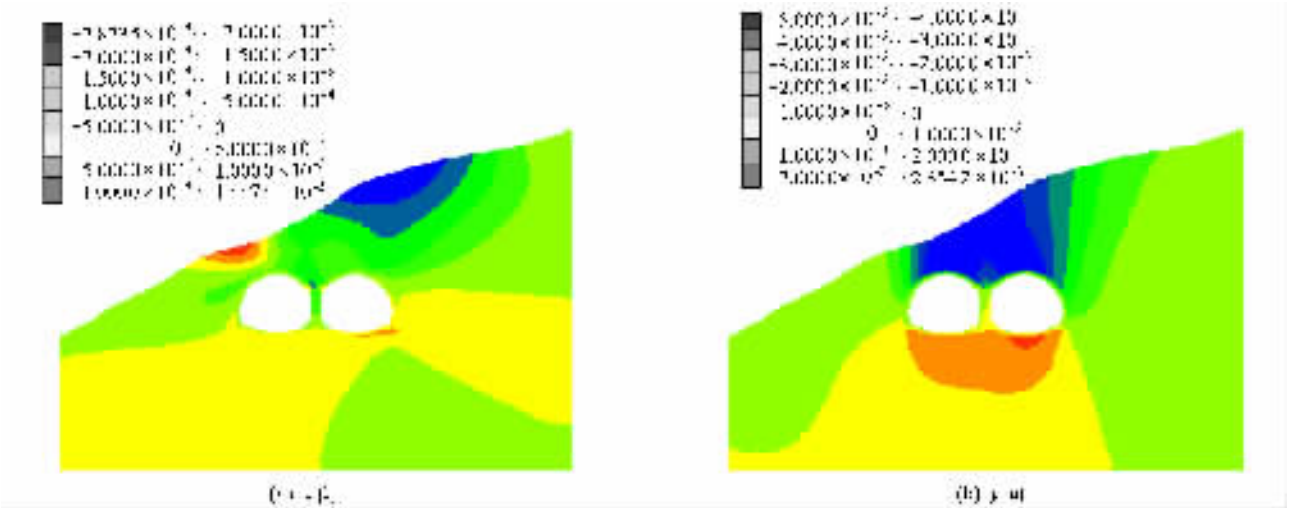


图 1 开挖及加固后的位移等值线
Fig.1 Displacement isoline after excavation and strengthening

表 2 隧道加固前后位移变化

隧道名称	x 向位移		y 向位移	
	加固前	加固后	加固前	加固后
中导洞	-5.54 ~ 0.55	-5.54 ~ 0.56	-2.05 ~ 1.28	-2.16 ~ 1.16
右隧道	-1.90 ~ 0.82	-1.93 ~ 0.86	-5.87 ~ 2.55	-6.04 ~ 2.47
左隧道	-2.75 ~ 1.42	-2.82 ~ 1.45	-6.55 ~ 2.40	-6.81 ~ 2.35

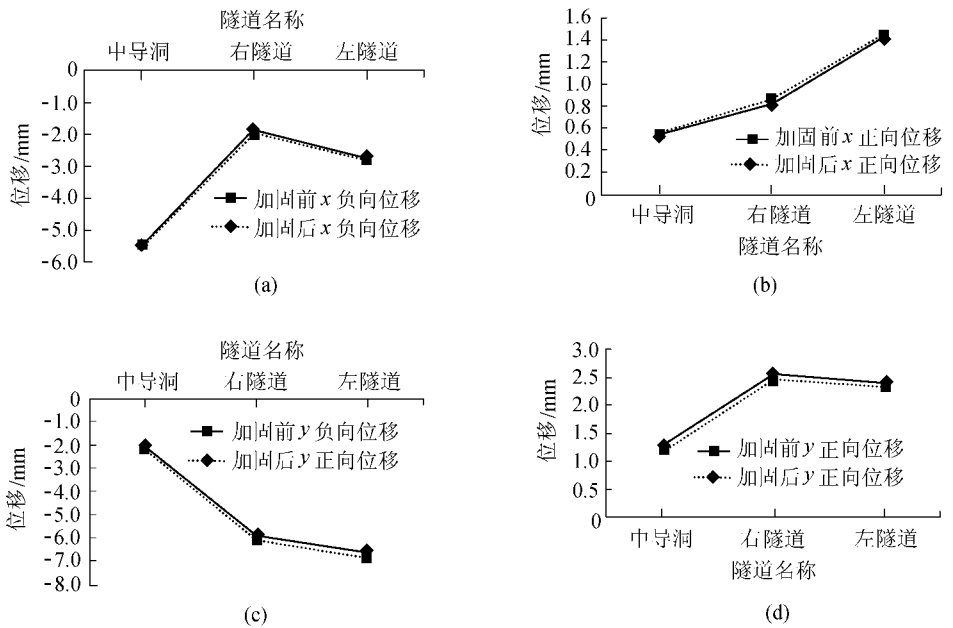


图 2 3 次开挖加固前后 x 向和 y 向位移最大值对比
Fig.2 Maximum x -displacement and y -displacement before and after three times excavation and strengthening of the tunnel

由图 2 可以看出：
a. 开挖的影响范围越来越大,从中导洞到两侧隧道,隧道壁的最大位移值有逐渐变大趋势,分步开挖的位移变化为: x 向从 0.535 0 mm→0.561 9 mm→1.896 2 mm→1.925 4 mm→2.751 5 mm→2.823 5 mm; y 向从 2.050 2 mm→2.163 0 mm→5.856 4 mm→6.041 3 mm→6.548 8 mm→6.807 9 mm. 最大位移多发生在隧道顶部,随

着开挖范围的逐渐扩大,位移范围也逐渐变大。

b. 在中导洞开挖过程中,由于隧道开挖断面比较小,所产生的变形影响区相对较小,受地形的影响,呈现以隧道左下角和右上角为轴线的对称特征。随着右隧道和左隧道的开挖,开挖断面逐渐扩大,隧道的变形场逐渐连接为统一的隧道群变形场,表现出等值线向隧道群中心偏移的特征。隧道顶部该特征尤为明显。

c. 最大位移表现部位有所不同,中导洞主要出现在隧道的右上角,左右隧道主要出现在隧道的顶部。

d. x 方向的位移等值线特征揭示了一个比较特殊的围岩变形演化过程,即中导洞开挖时 x 向的最大位移出现在隧道的右上角。在右隧道开挖过程中, x 向的最大位移从隧道的右上角向左偏移、从左上角向右偏移,受地形的影响,最大位移大小不完全相同。 y 向的位移基本上以洞室的中轴线为中心呈对称分布,呈现明显的拱效应。

2.2 应力场分析

在整个隧道开挖过程中,围岩在初始应力场的作用下向临空面方向移动,产生了不平衡的变形,同时该变形也改变了应力场的分布特征^[10],有些部位产生了一些应力集中区,局部发生了破坏现象^[11]。表 3 为隧道加固前后的围岩应力变化,3 次开挖加固前后 x 向和 y 向的最大应力、剪应力对比如图 3 和图 4 所示。

表 3 隧道加固前后应力的变化

隧道名称	x 向应力		y 向应力		剪应力	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
中导洞	-1.29 ~ 0.32	-1.35 ~ 0.50	-3.03 ~ 0.72	-2.75 ~ 0.81	-1.11 ~ 0.57	-1.11 ~ 0.51
右隧道	-5.65 ~ 2.88	-5.69 ~ 0.36	-5.49 ~ 1.94	-4.82 ~ 1.30	-3.57 ~ 3.03	-3.18 ~ 2.66
左隧道	-4.66 ~ 1.44	-3.97 ~ 1.37	-7.04 ~ 1.19	-5.87 ~ 0.48	-2.57 ~ 5.68	-2.58 ~ 1.81

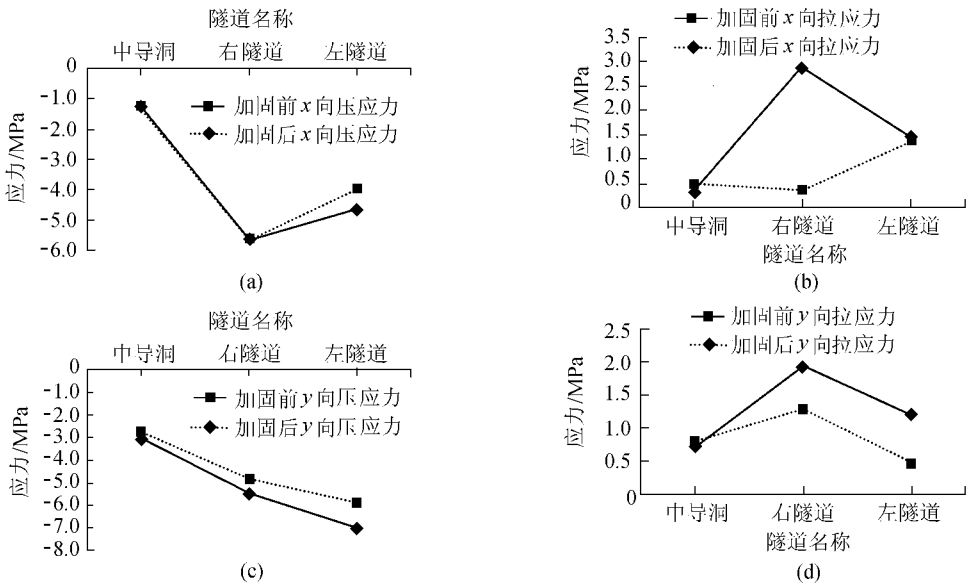


图 3 3 次开挖加固前后 x 向和 y 向应力最大值对比

Fig.3 Maximum x -stress and y -stress before and after three times excavation and strengthening of the tunnel

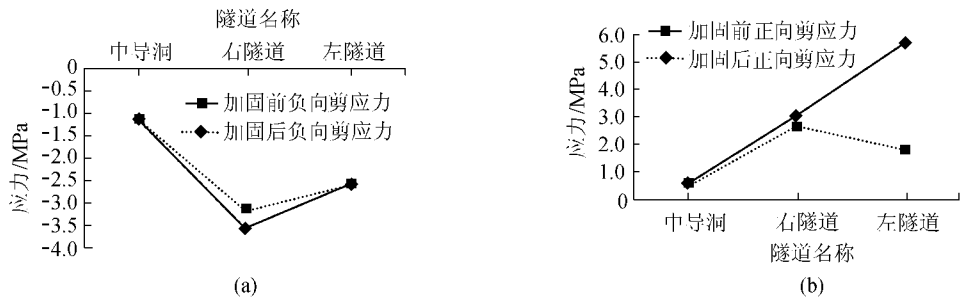


图 4 3 次开挖加固前后剪应力最大值对比

Fig.4 Maximum shear stress before and after three times excavation and strengthening of the tunnel

从表 3、图 3 及图 4 可以看出,隧道加固前后围岩(或衬砌)内的应力变化情况比较明显.中导洞施工过程中 x 向应力将变大,最大压应力增大 0.06 MPa,拉应力增大 0.18 MPa; y 向拉应力变大,压应力变小;剪应力变化较小.在右隧道开挖的过程中及加固前后, x 向应力变大, y 向应力和剪应力变小.左隧道加固后的围岩应力都小于加固前的应力,说明左隧道的加固起到了控制围岩变形破坏的作用.另外,在隧道侧边墙、顶拱、底板等处出现应力集中区,侧边墙比较明显.受洞室基本形态的影响,隧道中隔墙交角部位应力相对较大.

2.3 塑性区分析

塑性区出现的准则依据 FLAC^{3D}中的破坏原则,即岩体满足拉裂屈服的条件为

$$F = \sigma_3 - \sigma_t \begin{cases} > 0 & (\text{发生拉裂屈服}) \\ \leq 0 & (\text{未发生拉裂屈服}) \end{cases} \tag{1}$$

式中: σ_3 ——岩体最小主应力; σ_t ——岩体抗拉强度.

应用上述屈服条件,计算评价中就可以判断各种工况下有无塑性区出现.从隧道不同开挖阶段及加固阶段围岩塑性区的分布特征图中可知:

- a. 破坏区的分布受岩体性质及开挖范围的影响,但破坏区的大小、破坏类型和扩展方式与工程部位和施工开挖顺序密切相关.
- b. 中导洞由于隧道埋深较浅,上覆岩体的重力达不到使岩体破坏的程度,因此塑性区主要发生在隧道的边墙.
- c. 边墙破坏区的大小与边墙高度直接相关.随着边墙开挖深度的加大,破坏区的深度也越来越大,并且最大破坏深度主要发生在隧道边墙的中下部.因此,在整个边墙的开挖过程中,其破坏区在向纵深扩展的同时,也向下部迁移.
- d. 在整个开挖过程中,底板的塑性区大小随着开挖面的扩大而增大.由于隧道开挖断面较小,塑性区主要发生在边墙与底板的交界处,其破坏类型也随着开挖断面的增大而改变.
- e. 同一工程部位的围岩,在不同的开挖阶段中,其破坏状态的表现是不同的,有的在某一阶段处于破坏状态,有的在整个开挖过程中都处于破坏状态.可见,在施工过程中,浅部围岩处于一个破坏和非破坏相互转化的动态平衡中,局部出现重复性破坏是围岩二次应力场、变形场变化带来的结果.
- f. 在有效的影响范围内,隧道破坏区的扩展受相邻隧道施工过程的影响,即在右隧道开挖时,中导洞部分围岩的破坏范围有可能继续扩大.

2.4 衬砌开裂分析

从图 5(a)得知,左隧道衬砌大部分区域处于稳定状态,未出现破坏区域,但在衬砌底部与中隔墙的连接处出现一个拉裂破坏单元,且该单元处于较浅部位,因此对衬砌的稳定性将产生一定的影响.

从图 5(b)可以看出,右隧道加固后,在上覆岩体及衬砌与围岩的相互作用下,衬砌未出现大面积拉裂破坏的区域,在中隔墙与隧道的衬砌连接部位有一单元呈现拉剪破坏状态.由于该部位处于衬砌与围岩的接触部位,因此对工程的影响较小.

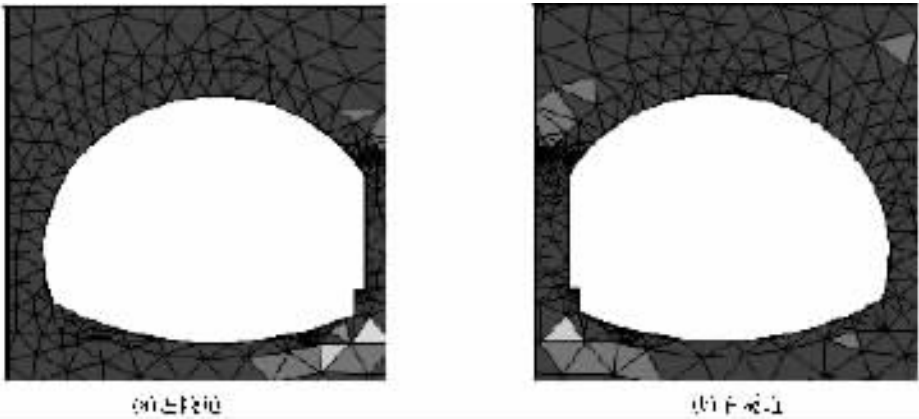


图 5 红枫隧道衬砌开裂状态

Fig.5 Liner rupture in Hongfeng Tunnel

3 结 论

红枫隧道地质条件较好,从计算断面 K214+725 的结果可知,围岩位移较小,最大为 6.81 mm,小于 1 cm,说明围岩应变率较低。围岩衬砌后位移变化很小,说明按衬砌类型,围岩变形基本满足要求。从应力情况看,围岩拉应力随着隧道开挖范围的扩大而逐渐变大,除局部位置外,衬砌基本满足抗拉要求。

参考文献:

- [1] 寇晓东,周维垣,杨若琼,等. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 6—10.
- [2] 龚纪文,席先武,王岳军,等. 应力与变形的数值模型方法[J]. 华东地质学院学报, 2002, 25(3): 220—227.
- [3] 许强,严明,黄润秋. 某水电站左岸深裂缝对工程荷载下边坡稳定性影响的 FLAC^{3D}分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 81—84.
- [4] 丁秀美,黄润秋,臧亚君. 预应力锚索框架作用下附加应力的 FLAC^{3D}模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 339—345.
- [5] 陈祥军,汤劲松. 用 FLAC^{3D}进行马崖高边坡稳定性分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2002, 15(3): 76—79.
- [6] 邓昌铁,魏庭光. 天荒坪抽水蓄能电站地下洞室群合理开挖顺序研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(5): 68—72.
- [7] 张兴来,钟云健. 小净距并行隧道围岩稳定的分析方法及应用[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(1): 5—8.
- [8] 王胜辉,杜小平,袁勇,等. 双连拱隧道洞顶坍方对二次衬砌稳定影响评价[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(3): 10—12.
- [9] 刘小兵,彭立敏,王薇. 隧道洞口边仰坡的平衡稳定分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 80—84.
- [10] 吴继敏,高正夏,侯玉宾. 岩体圆形洞室锚杆前后应力位移分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(4): 107—110.
- [11] 吴继敏,魏继红,孙少锐. 某电站勘探平洞超挖块体评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(2): 57—60.

Stability analysis of excavation of Hongfeng multiple arch tunnel

CHEN Yong-hui¹, PENG Jian-zhong², LI Wen-qi³, CHEN Xian-chun²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jinliwen Highway Yongjia-Lucheng Section Engineering Construction Bureau, Wenzhou 325106, China;

3. Wenzhou Longjian Road and Bridge Engineering Company, Wenzhou 325000, China)

Abstract Based on field investigation and theoretical analysis of geological characteristics of the Hongfeng multiple arch tunnel of the Jinliwen Highway, the current situation and variation characteristics of the stress field, deformation field and plastic failure zone of surrounding rock during the excavation and strengthening of the tunnel were analyzed. The results show that the strain rate and the displacement of surrounding rock are low during excavation, and that the deformation of surrounding rock with the liner currently used meets the requirement of stability. It is also indicated that the tensile stress in surrounding rock increases with the extension of the excavated area, and the tensile strength of the liner is satisfactory except at some positions.

Key words Jinliwen Highway; Hongfeng multiple arch tunnel; excavation; stability; numerical simulation