

象山隧道拓宽改造工程方案研究

臧万军^{1,2}, 王钊^{1,2}

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 对象山隧道拓宽改造工程方案进行研究。对比增建隧道、大开挖道路、原位拓宽 3 种扩建形式,综合分析象山隧道工程现状、拓宽改造基本原则和影响因素,提出原位拓宽形式的合理性。分析原隧道两侧小洞各拓宽成 3 车道、保留中间两个大洞和原隧道两侧大洞连通小洞各改建为一个大洞两种原位拓宽改造方案,从结构受力、营运能力、施工难度、交通影响和经济性等方面进行比选,确定可行性方案。对连拱隧道拓宽改造施工提出建议,为今后类似的隧道拓宽改造工程提供参考。

关键词: 连拱隧道; 拓宽改造; 方案比选

中图分类号: U452.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)06-0526-06

Study on excavation schemes of Xiangshan tunnel extension

Zang Wanjun^{1,2}, Wang Zhao^{1,2}

(1.College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial University Key Laboratory of Underground Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The excavation schemes of Xiangshan tunnel extension project were researched. The in-situ extension was found to be more reasonable than constructing new tunnels and cutting excavation by comprehensive analysis of the geographical condition, the basic principle and the influential factors of tunnel extension. Two excavation schemes were compared in mechanics characteristic, operation (traffic) capacity, construction difficulty and risk, traffic influence and economy. Several suggestions on the construction of multi-arch tunnel extension projects were proposed, which can provide reference for similar projects in the future.

Keywords: multi-arch tunnel; tunnel extension; scheme comparison

我国现有公路隧道一般为双向四车道分离式隧道,既有隧道拓宽改造的形式一般有增建隧道、原位拓宽以及两者组合。目前已有一些学者对既有隧道拓宽改造方案进行了探索,采用增建隧道形式的有上海打浦路隧道^[1]、日本塔之峰隧道^[2]等;采用原位扩建形式的有重庆鹅岭隧道^[3]、关村坝隧道^[4]、日本天王山隧道^[5]等;采用组合扩建方式的有福建大帽山隧道^[6-8]等。

象山隧道是少见的四连拱结构隧道,力学状

态较分离式隧道更为复杂,拓宽改造的施工难度及风险更显著,对四连拱隧道进行拓宽改造,目前还没有工程先例^[9]。本文结合定性分析和定量分析等方法对象山隧道拓宽改造工程方案进行研究,为类似连拱隧道拓宽改造工程提供参考。

1 工程概况^[10]

1.1 工程地质条件

象山隧道整体埋深较浅,最大埋深小于 23 m,

收稿日期: 2016-10-28

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2016J01205)

第一作者简介: 臧万军(1975-),男,吉林农安人,博士,副教授,高级工程师,研究方向: 隧道抗震减震、隧道施工、地下工程风险评估。

主要穿越象山残积剥蚀山丘,地表植被茂密。隧道通过区域,上部是第四系残积、坡积砂纸粘土及表层部分人工杂填土,分布不均;下部主要是由燕山晚期第二次侵入形成的花岗岩基底及第四次侵入的大型花岗斑岩岩脉组成,局部地段遇到辉绿玢岩穿插。地质条件复杂,岩体自稳能力很差,围岩级别主要为Ⅳ、Ⅴ级。

1.2 隧道原设计

象山隧道建于 1994 年,全长 230 m,基本位于直线上,内为-0.532%的单面坡。设计为 4 洞连拱隧道,中间两洞通行机动车,双向 4 车道;外侧洞设计为人非混行车道(见图 1)。近年来为缓解交通压力,两侧洞开放给小型机动车通行。

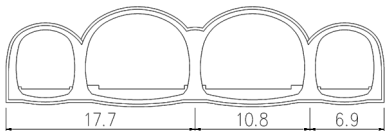


图 1 象山隧道断面(单位:m)

Fig.1 Cross-sectional drawing of Xiangshan tunnel (unit:m)

隧道采用复合式衬砌,其中Ⅲ级围岩地段隧道采用底板形式,Ⅳ级及以上围岩地段均采用仰拱形式。进出口两端采用明洞。中间隧道路面以上净空 58.7 m²,侧洞路面以上净空 26.9 m²。

1.3 隧道病害整治情况

1997 年,象山隧道进行病害整治施工,整治内容:恢复地表排水系统;采用无机材料浆液填充和加固衬砌背后空洞与围岩松散体;对裂缝和有危害的施工缝进行补漏处理,并形成隧道防排水系统;两边洞加一层钢筋混凝土衬砌稳定结构。

1.4 隧道健康检测情况

2011 年,对象山隧道衬砌质量和病害情况进行检测和调研,表明衬砌强度总体符合设计要求,但由于运营时间长,且受外界环境影响存在差异,导致衬砌混凝土强度离散性较大,局部范围略低于设计要求。隧道无重大施工缺陷,衬砌背后无大空洞,局部衬砌厚度略小于设计值及不密实。

2 制定拓宽改造方案的基本原则及影响因素

2.1 拓宽改造方案的基本原则

1)符合福州市城市总体规划,满足交通功能

需要,方便运营管理、维修,减少拆迁,并与周边环境协调一致。

2)有利于环境保护和水土保持,节约能源和土地,保护文物,保护原有植被。

3)采用技术成熟、施工难度低、施工进度快的方案,合理组织施工及施工期间的交通组织。

4)既要经济合理,安全可靠,又要适合本工程的建设特点。

2.2 隧道拓宽改造方案的主要影响因素

象山隧道位于福州市二环路,西依象山、后县山,东临西湖,周边建筑林立。如图 2 所示。



图 2 象山隧道周边环境

Fig.2 Surroundings of Xiangshan tunnel

对于象山隧道拓宽改造方案的拟定,周边主要影响因素有:

1)工程靠象山,临西湖,隧道顶部植被茂密,环境及景观保护难度大。

2)伊斯兰教墓地群位于隧道北口西侧,面积 2 300 m²,部分位于隧道洞顶,墓区搬迁困难。

3)隧道东侧,从北到南依次是西湖别墅、九龙山庄及职业病防治院。其中西湖别墅及九龙山庄建筑距离隧道边线 18 m,九龙山庄停车场紧邻隧道边线,施工风险极大。

3 隧道拓宽改造方案研究

3.1 拓宽改造形式分析

3.1.1 增建隧道

在既有隧道两侧增建隧道,实现隧道的拓宽。该方案占地面积大,拆迁范围广,涉及穆斯林墓区的搬迁,方案实施难度大。

3.1.2 大开挖道路

采用大开挖方式,明挖道路上方山体,以路堑

代替隧道。该方案对景观破坏极大;涉及穆斯林墓区,迁改困难;垂直开挖 30 多 m,基坑临近西湖别墅和九龙山庄住宅,施工风险高;山体敞开明挖,开挖量大,施工噪音及运输对周边影响大。

3.1.3 原位拓宽

对既有四连拱隧道进行原位拓宽改造。该方案对景观影响小,不侵占墓区,但爆破作业可能引起纠纷;施工有风险,但采取措施后,可保证安全;暗挖施工,仅两端洞口施工对周边影响略大,对山顶居民影响小;开挖方量小。

3.2 拓宽改造方案拟定

通过对上述 3 种拓宽改造形式的分析,增建隧道及大开挖方案对周边环境的影响大,实施难度大,原位拓宽改造形式最为合理。因此,对原位拓宽改造形式进一步分析,并提出 A、B 两个方案进行比选。

3.2.1 方案 A

原隧道两侧小洞各拓宽成 3 车道,中间两个大洞加固处理。最终形成双向 8 个机动车道+两个人非混行车道的新四连拱隧道形式(如图 3)。

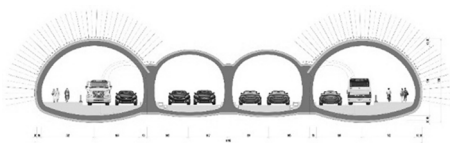


图 3 方案 A 拓宽后隧道断面图
Fig.3 Cross-sectional schematic of scheme A

3.2.2 方案 B

原隧道整体改建,以中隔墙为基准,两侧大洞与小洞连通,各改建为一个大洞,形成一座双连拱隧道,最终也是双向 8 个机动车道+两个人非混行车道规模(如图 4)。

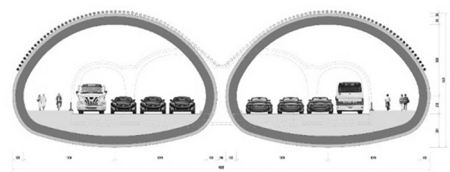


图 4 方案 B 拓宽后隧道断面图
Fig.4 Cross-sectional schematic of scheme B

4 结构受力分析

4.1 计算模型

采用 ANSYS 程序进行计算,按《混凝土结构

设计规范(2015 年版)》(GB 50010-2010)^[11] 计算配筋,并验算结构裂缝宽度。

采用复合式衬砌,设计参数参考《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)^[12] 取值。根据新奥法的基本理论和复合式衬砌的设计原理,初期支护为主要承载结构,二次衬砌在Ⅳ、Ⅴ级围岩时作为承载结构,对于Ⅳ级围岩地段,二次衬砌分担荷载比例为 30%,对于Ⅴ级围岩地段,二次衬砌分担荷载比例为 60%。

计算采用荷载-结构模式,二衬采用二维梁单元模拟,梁单元宽度为单位宽度,梁高为实际衬砌厚度。结构计算参数如表 1 所示。围岩抗力采用弹簧单元模拟,弹簧施加范围及数量根据试算中结构的变形情况进行调整和优化,仅当结构产生指向围岩方向的位移时添加弹簧单元,围岩弹性抗力系数按实测围岩的侧向基床系数和垂向基床系数取值。

表 1 计算参数
Tab.1 Calculation parameter of mechanical forces

结构类型	弹性模量/ GPa	泊松比 μ	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
二次衬砌	31.5	0.2	25

4.2 方案 A(Ⅴ级围岩地段最不利断面)

Ⅴ级围岩拱部 $\phi 180 \text{ mm}$ 管棚联合 $\phi 50 \text{ mm}$ 小导管超前支护,初期支护挂网锚喷,喷 30 cm 厚 C25 纤维混凝土,内设格栅钢架;二衬采用 65 cm 厚 C40 钢筋混凝土。

计算断面隧道洞身位于中风化辉绿玢岩中,Ⅴ级围岩,埋深 16.5 m,隧道顶部砂质粘土层 6.7 m,强风化辉绿玢岩 5.6 m,中风化辉绿玢岩 4.2 m。根据连拱隧道深浅埋计算公式,属于超浅埋隧道。隧道拱顶垂直压力: $q_y = \gamma H = 394.2 \text{ kPa}$

计算侧压力系数:

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]}$$
$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}}$$
$$\lambda = 0.08;$$

弹性抗力系数取 300 MPa/m;排水型结构,不计水压力。

按概率极限状态法,根据承载力极限状态(图 5~7)和正常使用极限状态(图 8~10)的要求,分别进行承载能力及稳定性计算,变形及裂缝宽度验算。从表 2、3 可看出,通过合理配筋,方案 A 的结构能满足结构强度及变形要求。

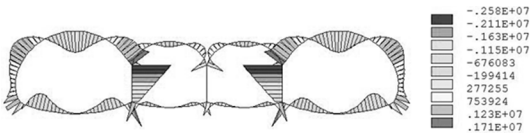


图 5 承载力极限状态弯矩图(单位: N · m)

Fig.5 Bending moment diagram at limit state of bearing capacity (unit: N · m)

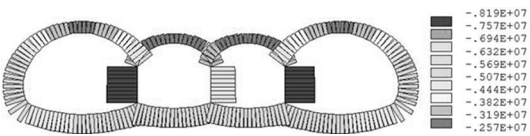


图 6 承载力极限状态轴力图(单位: N)

Fig.6 Axial force diagram at limit state of bearing capacity (unit: N)

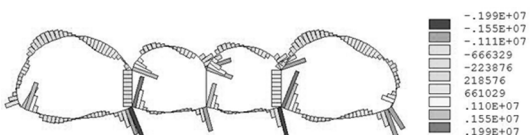


图 7 承载力极限状态剪力图(单位: N)

Fig.7 Shearing force diagram at limit state of bearing capacity (unit: N)

表 2 承载力极限状态计算结果

Tab.2 Computed result at limit state of bearing capacity

位置	弯距/ (kN · m)	轴力/ kN	结构厚度/ mm	配筋设计/ m
中洞拱肩	476	-3 178	420	5Φ20
中洞洞顶	-338	-2 570	400	5Φ20
中洞仰拱	-228	-5 210	400	5Φ20
侧洞中壁处	1 463	-5 205	650	5Φ25+5 辅 Φ25
侧洞洞顶	-1 406	-3 092	650	5 主 Φ25+5 辅 Φ25
侧洞拱肩	1 111	-4 867	650	5Φ25
侧洞仰拱	-1 033	-4 986	650	5Φ25
侧隔壁顶	-2 583	-7 987	≥1 000	—
中隔壁顶	0	-6 441	≥1 000	—

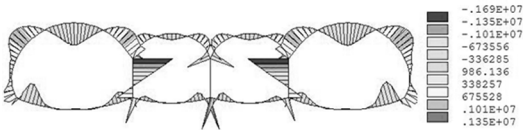


图 8 正常使用极限状态弯矩图(单位: N · m)

Fig.8 Bending moment diagram at serviceability limit state (unit: N · m)

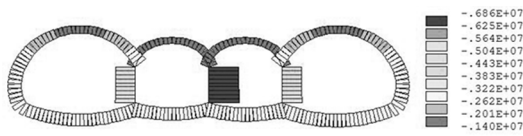


图 9 正常使用极限状态轴力图(单位: N)

Fig.9 Axial force diagram at serviceability limit state (unit: N)

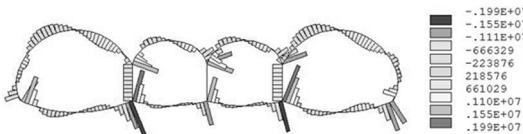


图 10 正常使用极限状态剪力图(单位: N)

Fig.10 Shearing force diagram at serviceability limit state (unit: N)

表 3 正常使用极限状态计算结果

Tab.3 Computed result at serviceability limit state

位置	弯距/ (kN · m)	轴力/ kN	结构厚度/ mm	裂缝 验算
中洞拱肩	383	-1 749	420	不需要
中洞洞顶	-222	-1 405	400	不需要
中洞仰拱	-150	-2 813	400	不需要
侧洞中壁处	660	-2 913	650	不需要
侧洞洞顶	-906	-1 749	650	不需要
侧洞拱肩	759	-2 648	650	不需要
侧洞仰拱	-783	-2 631	650	不需要
侧隔壁顶	-1 672	-4 341	≥1 000	—
中隔壁顶	0	-6 735	≥1 000	—

4.3 方案 B (V 级围岩地段最不利断面)

V 级围岩拱部 φ300 mm 管棚联合 φ50 mm 小导管超前支护,初期支护挂网锚喷,喷 35 cm 厚 C25 纤维混凝土,内设格栅钢架;二衬采用 95 cm 厚 C40 钢筋混凝土。

计算断面隧道洞身位于中风化辉绿玢岩中,

V 级围岩,埋深 14.5 m,隧道顶部砂质粘土层 6.7 m,强风化辉绿玢岩 5.6 m,中风化辉绿玢岩 2.2 m。隧道宽度 50 m,按小净距超浅埋隧道计算。

隧道拱顶垂直压力 $q_y = \gamma H = 302.5 \text{ kPa}$; 计算侧压力系数 $\lambda = 0.08$; 围岩弹性抗力系数取 300 MPa/m ; 中隔壁处隧道弹性抗力系数取 $1\,000 \text{ MPa/m}$; 排水型结构,不计水压力。

按概率极限状态法,根据承载力极限状态(图 11~13)和正常使用极限状态(图 14~16)的要求,分别进行承载能力及稳定性计算,变形及裂缝宽度验算。从表 4、5 可以看出,通过合理配筋,方案 B 的结构能满足结构强度及变形要求。

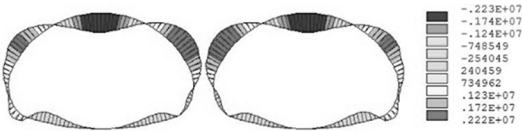


图 11 承载力极限状态弯矩图(单位: N · m)
Fig.11 Bending moment diagram at limit state of bearing capacity (unit: N · m)

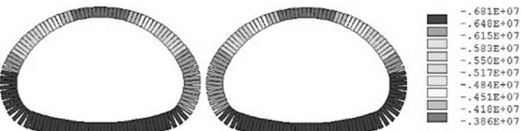


图 12 承载力极限状态轴力图(单位: N)
Fig.12 Axial force diagram at limit state of bearing capacity (unit: N)

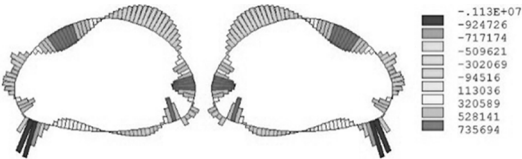


图 13 承载力极限状态剪力图(单位: N)
Fig.13 Shearing force diagram at limit state of bearing capacity

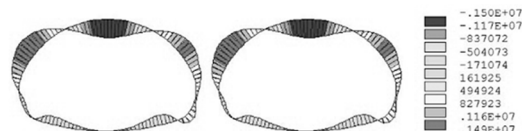


图 14 正常使用极限状态弯矩图(单位: N · m)
Fig.14 Bending moment diagram at serviceability limit state(unit: N · m)

表 4 承载力极限状态计算结果
Tab.4 Computed result at limit state of bearing capacity

位置	弯距/ (kN · m)	轴力/ kN	结构厚度/ mm	配筋设计/ m
拱顶	-2 232	-3 858	950	5 主 Φ25+2 辅 Φ25
内侧拱肩	2 219	-5 955	950	5 主 Φ25
仰拱底	-966	-6 534	950	5 主 Φ25
仰拱	-1 185	-6 522	950	5 主 Φ25
外侧拱肩	1 790	-5 817	950	5 主 Φ25

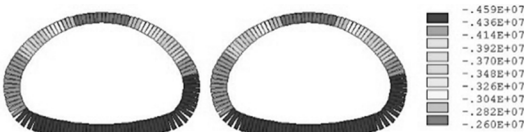


图 15 正常使用极限状态轴力图(单位: N)
Fig.15 Axial force diagram at serviceability limit state(unit: N)

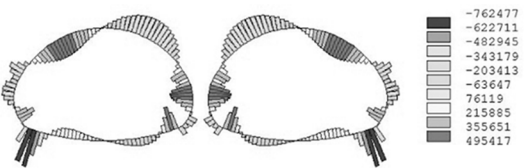


图 16 正常使用极限状态剪力图(单位: N)
Fig.16 Shearing force diagram at serviceability limit state(unit: N)

表 5 正常使用极限状态计算结果
Tab.5 Computed result at serviceability limit state

位置	弯距/ (kN · m)	轴力/ kN	结构厚度/ mm	裂缝 验算
拱顶	-1 748.7	-2 577.2	950	不需要
内侧拱肩	1 405.4	-4 162.2	950	不需要
仰拱底	-826	-5 626.6	950	不需要
仰拱	-1 007.1	-5 826.2	950	不需要
外侧拱肩	1 749.3	-5 247.9	950	不需要

5 方案比选

中隔壁是连拱隧道中连接两侧隧道结构的关键受力结构,必须充分利用中隔壁的支撑作用进行隧道结构受力的有效转换。计算对比发现,方

案 A 结构中隔墙位置处的受力远小于方案 B, 因此, 在确保隧道支护结构的力学平衡和变形稳定方面, 方案 A 要优于方案 B。方案 A 与方案 B 其他方面比选分析见表 6。

表 6 象山隧道拓宽改造方案比选
Tab.6 Excavation schemes comparison

比选因素	方案 A	方案 B
营运能力	通行能力相当; 道路分 4 幅, 互相干扰小	通行能力相当; 道路分 2 幅, 互相干扰稍大
施工难度及风险	不侵占墓区; 侧洞爆破扩挖, 跨度较小, 施工有风险, 对中洞有一定影响	不侵占墓区; 全洞爆破扩挖, 跨度较大, 施工风险极大
改造期间交通影响	不需要全部封闭交通	二环路该段交通全封闭
经济性评估	单洞跨度较小, 工程规模较小, 投资较低	单洞跨度较大, 工程规模较大, 投资较高

从表 6 可看出, 方案 A 和 B 通行能力相当, 但方案 A 道路分 4 幅, 隧道内行车互相干扰较小; 方案 A 施工难度及风险均比方案 B 小; 按方

案 A 拓宽改造隧道对既有交通的影响较小, 按方案 B 改造期间则需要将二环路该段交通全部封闭, 影响很大; 方案 A 工程规模较方案 B 小, 投资也较低。综上, 象山隧道拓宽改造的方案 A 更具有可行性。

6 结论及建议

1) 象山隧道拓宽改造采用原位拓宽形式最为合理, 原隧道两侧小洞各拓宽成 3 车道, 保留中间两个大洞的方案具有可行性。

2) 连拱隧道原位拓宽改造的技术要求比较高。中隔墙是连拱隧道中连接两侧隧道结构的关键受力结构。连拱隧道的结构拆除时必须将中隔墙结构作为重点保护对象, 必须充分利用中隔墙的支撑作用进行隧道结构受力的有效转换, 以确保隧道支护结构的力学平衡和变形稳定。

3) 根据象山隧道的检测情况, 象山隧道衬砌混凝土强度总体符合设计要求, 但由于运营时间长, 受外界环境影响存在差异, 考虑到本次施工对围岩结构的再次扰动, 因此本方案改造侧洞的同时, 须进行中间两个洞加固。侧洞改造完成后, 须对中间两个洞进行混凝土质量及背后空洞检测, 并对衬砌背后空洞进行注浆加强, 对局部强度不达标的混凝土进行凿除重新模筑, 对全隧应采用芳纶复合材料进行补强。

参考文献:

[1] 邵理中, 徐一峰, 潘国庆, 等. 上海打浦路隧道复线工程建设方案研究[C]//2003 上海国际隧道工程研讨会论文集. 上海: 同济大学出版社, 2003: 138-145.

[2] 先明其. 从单线改建成复线的运营隧道——箱根登山铁道 塔之峰隧道[J]. 现代隧道技术, 1996(4): 75-80.

[3] 高干, 刘元雪, 周结中, 等. 地下空间扩建型式研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(6): 1-9.

[4] 李元福. 关村坝隧道改扩建施工技术[J]. 铁道建筑技术, 1996(4): 22-26.

[5] 先明其. 日本老高速公路隧道的改扩建——名神高速公路 天王山隧道[J]. 隧道及地下工程, 1998, 19(4): 47-48.

[6] 武建强. 公路隧道扩建开挖方案比选及施工力学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[7] 胡居义, 陈礼彪, 黄伦海. 2 车道隧道扩建成 4 车道隧道扩建形式研究[J]. 公路交通技术, 2010(5): 93-97.

[8] 陈陆军. 典型高速公路隧道扩建方案及施工力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[9] 陈七林. 四连拱隧道拓宽改造关键技术研究[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 248-253.

[10] 周江天. 四连拱大跨度浅埋隧道的设计[J]. 现代隧道技术, 1999(1): 10-15.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[12] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范: JTG D70-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.