

DOI: 10.7672/sgjs2025010062

四车道隧道双侧导坑钢架岩墙组合 支撑施工技术*

肖凯锋¹, 吕保中¹, 杨建辉²

(1. 浙江交工金筑交通建设有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江科技大学, 浙江 杭州 310023)

[摘要] 四车道公路隧道开挖断面大, 选择合理的分部开挖工法是实现围岩稳定和提高工效的重要途径。依托杨家山隧道分析了传统双侧壁导坑施工方法存在的问题, 提出了双侧导坑钢架岩墙组合支撑施工方法。实践表明, 该方法充分发挥了杨家山隧道硬岩地基承载力高的优势, 利用下台阶岩墙形成钢架-岩墙组合支撑体系, 形成了“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙-临时钢架”构成的双侧闭环结构; 双侧壁上台阶临时钢架拆除后, “拱墙初支-仰拱横撑-岩墙”整体环状受力结构仍然发挥支撑作用。该方法优化了传统双侧壁导坑施工工艺和步序, 解决了原设计存在的各部施工时的相互干扰; 该方法不必安装下部临时钢架, 减少了临时钢架安拆工作量。

[关键词] 隧道; 围岩; 开挖; 支撑; 临时钢架; 中岩墙

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)01-0062-04

Construction Technology of Combined Support of Steel Frame Rock Wall in Double Side Guide Pit of Four-lane Tunnel

XIAO Kaifeng¹, LÜ Baozhong¹, YANG Jianhui²

(1. Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China;

2. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: The excavation section of the four-lane highway tunnel is large, and the selection of a reasonable partial excavation method is an important way to achieve the stability of the surrounding rock and improve the efficiency. Based on the engineering practice of the Yangjiashan Tunnel Project, the problems existing in the traditional construction method of double side heading are analyzed, and the construction method of double side heading steel frame rock wall combined support is proposed. The engineering practice has shown that this method gives full play to the advantages of the high bearing capacity of hard rock foundation of the Yangjiashan Tunnel. The steel frame-rock wall composite support system was formed by using the lower step rock wall, and the bilateral closed-loop structure of “arch wall initial support-inverted arch transverse support-rock wall-temporary steel frame” was formed. After the removal of the temporary steel frame on the upper steps of the double side walls, the overall annular force structure of “arch wall initial support-inverted arch transverse support-rock wall” still played a supporting role. This method optimizes the construction technology and steps sequence of the traditional double-sided wall guide pit, and solves the mutual interference of each part in the original design during construction. This method needs no installation of the lower temporary steel frame, which reduces the workload of temporary steel frame installation and disassembly.

Keywords: tunnels; surrounding rock; excavation; supports; temporary steel frame; medium rock wall

0 引言

在 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》中, 对两车道和三车道隧道推荐了开挖方法, 并未推荐四车道隧道的开挖方法。据统计, 四车道隧

* 浙江省重点研发计划(2021C01131)

[作者简介] 肖凯锋, 高级工程师, E-mail: 253733787@qq.com

[通信作者] 杨建辉, 教授, E-mail: yjh0571@163.com

[收稿日期] 2024-08-16

道开挖方法的选择主要取决于围岩等级,在V级围岩和洞口浅埋情况下双侧壁导坑法应用最多^[1]。对四车道双侧壁导坑法开展的现场实测、有限元分析等研究工作表明,对破碎地层围岩位移控制效果较好^[2-3]。为了提高双侧壁导坑施工进度,实践中对该方法进行了多方面改进,优化了设备选型,以提高生产效率,在上部左右两导洞之间设立联络通道,并将临时钢架改为直线形^[4-5]。在V级围岩情况下,在研究和论证的基础上,浆水泉隧道和魁岐2号隧道成功地将原设计的双侧壁导坑法改为CRD法^[6-7]。浆水泉隧道在极浅埋条件下,采取了护拱、护墙、注浆等加固措施,形成稳定壳体后进行了洞内开挖^[6]。樵岭前隧道在破碎带注浆和掌子面双排小导管加固的基础上,采用CD工法完成了破碎带四车道隧道施工^[8]。龙鼎等四车道隧道在IV级围岩条件下采用CD法开挖^[9]。为了简化施工流程和提高施工效率,在CD法基础上形成了半部CD法^[10-13],该方法是将上台阶的临时钢架支撑于下部台阶上,因此适用于强度较高的围岩,目前该方法成功用于IV级围岩四车道隧道施工。三台阶五步开挖法在III级围岩条件下获得应用,拓宽了作业空间,提高了机械化程度和施工效率^[14]。

从上述文献可见,四车道隧道需要根据围岩等级选择合适的施工方法,同时为了提高施工效率和机械化水平、简化施工工序,对传统方法进行了优化和改进。杨家山隧道洞口围岩破碎,为V级围岩,但岩石强度较高,在施工中对原设计的双侧壁导坑法进行了优化,形成了双侧导坑钢架岩墙组合支撑施工方法,在工程中获得了成功应用。

1 原设计开挖方法分析

杨家山隧道位于绍兴市里庄村,左洞长度为291m,右洞长度为306m。隧道轮廓线净高为12.9m,净宽为19.128m,隧道最大开挖跨度为21.78m,最大开挖高度为14.33m,开挖面积为249.25m²,最大埋深为61m。隧道位于低山丘陵区,地形坡度30°~40°,山体完整性一般,植被发育,属越岭隧道。进出洞口均位于丘陵斜坡处,覆盖层薄,可见强~中风化基岩出露。下伏基岩为晶屑凝灰岩,强风化岩厚3~5m,中风化晶屑熔结凝灰岩,岩质坚硬,岩体完整性一般~较好,总体水文地质条件简单,水量较贫乏。原设计中隧道洞口段采用双侧壁导坑法施工,如图1所示(图中“1,2,…”为开挖施工序号,“I,II,…”为支护施工序号)。

按图1所示的原设计开挖工序施工,左右两侧导坑上下台阶长度为3~5m,上下台阶施工工序交

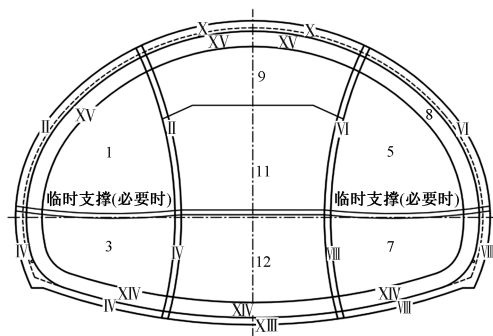


图1 原设计开挖顺序

Fig. 1 Original design excavation sequence

叉,相互干扰。以左侧导坑为例,当工序3施工时,下台阶开挖后台阶平均高度为3m,工序1开挖台车无法正常使用,机械设备无法通行;工序IV(仰拱初支)按原设计要求需紧跟下台阶施工,工序1,3需等仰拱初支强度达到要求后才可回填,影响流水作业。

中导坑(工序9,11和12)施工时与侧导坑工序存在交叉,中台阶(工序11)平台高度为5.2m,施工通道按照1:1坡度两侧放坡,占据了两侧导坑的通道,导致两侧导坑施工机械设备无法进出洞。中导坑上台阶(工序9)最大高度为4m,按1台出渣车和1台铲车计算,铲车侧翻高度不足,铲车需将洞渣外运至洞外,出渣速度较慢且倒车下坡时存在一定安全隐患,同时上台阶高度无法满足湿喷机和混凝土搅拌车的使用。

按原设计要求,临时钢架需在主洞初期支护闭合且变形稳定后方可拆除,会面临两个问题:①由于双侧壁导坑施工断面限制,喷射混凝土施工使用小型湿喷机,需配合开挖台车进行喷射混凝土施工,由于隧道开挖断面高度超过14m,开挖台车最大高度为6.5m,高度不足,临时支撑拆除后补喷混凝土存在困难;②由于隧道开挖断面高度超过14m,机械拆除临时支撑施工难度大,且拆除过程中存在一定安全隐患。

2 开挖顺序优化原理

2.1 优化双侧壁导坑工艺和步序

为了解决上述问题,对原设计工序进行优化,如图2所示。双侧导坑上台阶(工序1和3)施工到工法体系转换断面后,再开挖中导坑上台阶(工序5),解决了中导坑上台阶施工对两侧导坑下台阶的干扰问题,也解决了双侧导坑上下台阶施工的相互干扰;同时,利用四车道隧道跨度大的特点,左右导坑上台阶同时施工而互不干扰;中导坑由原设计三台阶改为两台阶施工,增大了上台阶高度,达到

7.3m,便于上台阶机械化施工。

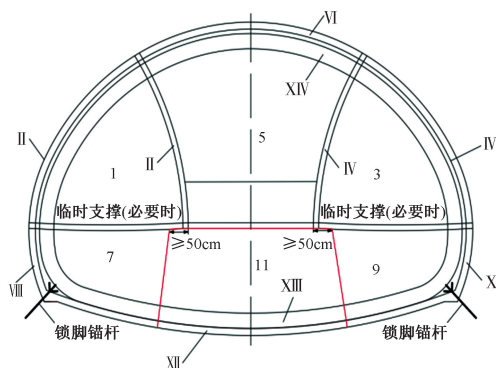


图2 优化后的施工工序

Fig. 2 Optimized construction process

2.2 钢架-岩墙组合支撑体系

优化后的施工方法充分发挥硬岩地基承载力高的优势,两侧导洞下台阶开挖过程中保留了中导坑下台阶中部岩墙,上台阶临时钢架顶端与拱部初支钢架连接,底部支撑于中导坑下台阶岩墙。隧道初支钢架拱脚部位设置锁脚锚杆,并与临时仰拱横撑焊接,临时横撑另一侧通过特制混凝土垫块与岩墙底角连接牢固,形成由“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙-临时钢架”构成的双侧闭环结构,如图3a所示。中导洞上台阶开挖时,拱顶初支与侧墙初支连接,形成“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙”的整体闭环结构,与双侧闭环结构同时工作,如图3b所示。临时钢架拆除后,“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙”整体闭环结构仍然发挥支撑作用,直至中导坑下台阶岩墙开挖结束。在施作仰拱初支后,隧道初支形成完整的闭环受力体系(见图3c)。

3 施工要点

3.1 隧道开挖

为了避免扰动叠加,左侧导洞上台阶(图2工序1)超前右侧导洞上台阶(图2工序3)15m,当两者距离满足要求时可同时开挖。各导洞采用弱爆破开挖,每循环进尺与初支钢架间距相同(0.6m)。双侧导坑上台阶开挖至工法体系转换断面位置后,进行中导洞上台阶开挖(图2工序5),上台阶高度一般控制在7m。采用弱爆破开挖,严格控制钻孔角度,加密掏槽孔,并减少单孔装药量,减少爆破对临时钢架的扰动和破坏,保证双侧壁临时支撑的完整性和有效性。洞身爆破完成后,立即分段、分片对岩面喷射混凝土,初喷厚度为5cm。下台阶左右交替开挖错开距离3~5m,同一榀初支钢架两侧不得同时悬空。

3.2 临时钢架架设

初支钢架和临时钢架在钢筋棚内加工制作完

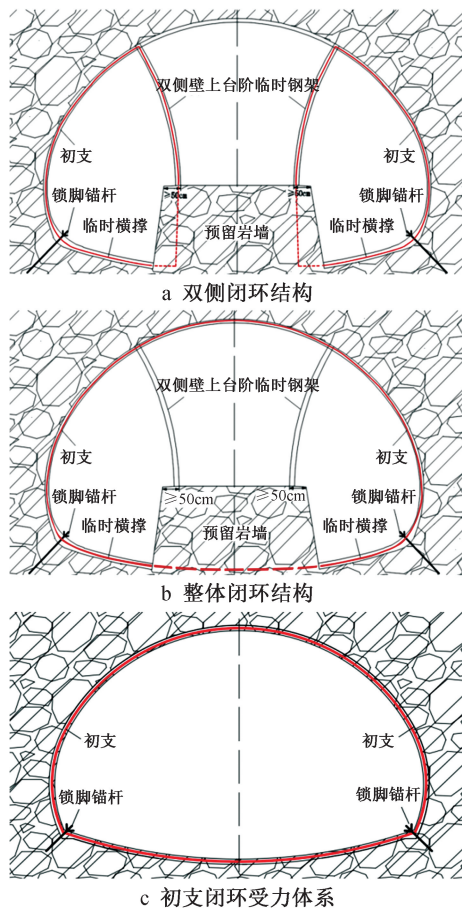


图3 钢架-岩墙组合支撑体系

Fig. 3 Steel frame rock wall composite support system

成,并在开挖面组装成榀。初支钢架之间、临时钢架与初支钢架之间均通过连接板用螺栓连接牢固。钢架安装前清除底脚处虚渣,并在上台阶初支钢架拱脚及临时钢架底部位置设置预制混凝土垫块。初支钢架设置锁脚钢管,规格为 $\phi 50 \times 5$,长度为3.5m,每处2根,采用U形钢筋与拱架焊接牢固,锚孔与管内需注满砂浆,以改善锁脚作用效果。

3.3 两侧导坑下台阶开挖支护

中导坑上台阶施工至工法体系转换断面后,进行左侧导坑下台阶爆破开挖,每循环进尺为2倍的初支钢架间距(1.2m)。爆破开挖时,预留下台阶中部岩墙,岩墙边缘位置超出上台阶临时钢架50cm以上(见图3b),使岩墙与上台阶临时钢架形成组合支撑体系。

下台阶开挖完成后将岩墙底脚位置整平,架设下台阶初支钢架及临时横撑。下台阶初支钢架与上台阶初支钢架通过连接板连接牢固,并在其拱脚部位设置锁脚锚杆。临时横撑一侧与下台阶初支钢架焊接,另一侧通过预制混凝土垫块支撑在岩墙底角位置,形成由“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙-临时

钢架”构成的双侧闭环结构,及早对围岩起到支撑作用(见图 3a)。

3.4 中导洞下台阶开挖

开挖中导洞下台阶之前拆除临时钢架,用炮头机清理临时钢架上端混凝土,用电镐清理连接板,拆除连接板螺丝,然后拆除临时钢架。拆除前要加强拱顶位移监控,判断围岩稳定情况,在确保围岩变形稳定后才能拆除,拆除过程中监控拱顶位移,并严格控制临时钢架一次拆除长度为 5m,与中导洞下台阶开挖长度一致。

3.5 仰拱初支施工

仰拱初支施工前要拆除左右导坑仰拱部位临时横撑。先初喷封闭仰拱底部,安装仰拱初支钢架,钢架之间采用纵向钢筋焊接,钢架两端连接板必须与两侧导坑钢架焊接牢固。然后复喷至设计厚度,覆盖钢架,使隧道初支及时封闭成环。

4 实施效果

杨家山隧道于 2022 年 3 月开始施工,至 2023 年 1 月结束,采用双侧导坑钢架岩墙组合支撑施工方法顺利完成施工。该方法充分发挥了硬岩地基承载力高的优势,利用下台阶岩墙形成钢架-岩墙组合支撑体系,使支护体系快速封闭成环,改善围岩的稳定性。实践表明该方法优化了传统双侧壁导坑施工工艺和步序,解决了原设计存在的各部施工时的相互干扰,包括两侧导洞上下台阶施工干扰,中导坑的上台阶施工对左右导洞下台阶的干扰问题。增大了中导坑上台阶高度后实现了机械化施工。利用中导坑下台阶支撑临时钢架,不必安装下部临时钢架,减少了临时钢架安拆工作量,还可根据围岩情况与双侧壁导坑法之间灵活转化,实现了四车道隧道高质高效施工。每月进尺达到 23m,相对于原设计双侧壁导坑法提高 50%,隧道施工时间累计节省 69d,工程成本累计节约近 200 万元,经济效益与社会效益显著。

5 结语

杨家山隧道采用双侧导坑钢架岩墙组合支撑施工方法顺利完成施工,获得良好的技术和经济效益,施工月进度得到显著提高,节省了工期,节约了工程成本。

1)该方法充分发挥了硬岩地基承载力高的优势,利用下台阶岩墙形成钢架-岩墙组合支撑体系,形成“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙-临时钢架”构成的双侧闭环结构。双侧壁上台阶临时钢架拆除后,“拱墙初支-仰拱横撑-岩墙”整体环状受力结构仍然发挥支撑作用。

2)实践表明该方法优化了传统双侧壁导坑施工工艺和步序,解决了原设计存在的各部施工时的相互干扰,包括两侧导洞上下台阶施工干扰,中导坑上台阶施工对左右导洞下台阶的干扰问题。

3)利用中导坑下台阶支撑临时钢架,不必安装下部临时钢架,减少了临时钢架安拆工作量,还可根据围岩情况与双侧壁导坑法之间灵活转化。

参考文献:

- [1] 张俊儒,吴洁,严丛文,等. 中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 14-31.
ZHANG J R, WU J, YAN C W, et al. Construction technology of super-large section of highway tunnels with four or more lanes in China [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(1), 14-31.
- [2] 李合银,侯文明,张建刚,等. 超大跨度公路隧道进洞方案研究[J]. 现代交通技术, 2021, 18(3): 39-46.
LI H Y, HOU W M, ZHANG J G, et al. Research on entrance scheme of super large span highway tunnel [J]. Modern transportation technology, 2021, 18(3): 39-46.
- [3] 林进坤. 单洞四车道公路隧道双侧壁导坑法施工[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(7): 268-270.
LIN J K. Construction of double side wall heading method for single hole four lane highway tunnel [J]. Highway transportation technology (applied technology edition), 2010, 6(7): 268-270.
- [4] 朱光,李庆丽. 双侧壁导坑法开挖步序优化设计分析[J]. 建筑, 2013(14): 58-59.
ZHU G, LI Q L. Optimization design analysis of excavation steps for double sided wall heading method [J]. Construction and architecture, 2013(14): 58-59.
- [5] 曾宏飞. 软弱围岩浅埋偏压四车道公路隧道安全施工技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
ZENG H F. Study of safe construction technique of four-lane highway tunnel under shallow covered slope in weak surrounding rock [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [6] 施昌龄,李九超,朱绪峰,等. 超大跨度公路隧道穿越破碎带施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(10): 45-50.
SHI C L, LI J C, ZHU X F, et al. Construction technology of super-large-span highway tunnel crossing fracture zone [J]. Road machinery and construction mechanization, 2020, 37(10): 45-50.
- [7] 宋志鹏,张扬,王喜悦. 灰岩中大跨度隧道开挖方法探讨[J]. 科技创新导报, 2017, 14(1): 63-64.
SONG Z P, ZHANG Y, WANG X Y. Exploration of excavation methods for large-span tunnels in limestone [J]. Science and technology innovation herald, 2017, 14(1): 63-64.
- [8] 张长安,万利,李振江,等. 双向八车道超大断面公路隧道穿越极浅埋段方案研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(5): 274-276.

- [J]. 铁道建筑技术, 2017(3):98-100, 108.
- WU Y L. Technical study of China's first sea-crossing subway passing through boulder blasting area with shield method [J]. Railway construction technology, 2017(3):98-100, 108.
- [8] 陈建福. 盾构机穿越海底复杂地层带压进仓孤石处理技术探析[J]. 铁道建筑技术, 2016(8):63-67.
- CHEN J F. Technology analysis on boulder treatment for shield machine through submarine complex formation into cabin with pressure [J]. Railway construction technology, 2016(8):63-67.
- [9] 王公忠, 张惠聚, 张建峰. 泥水平衡盾构通过基岩孤石施工技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(3):350-353.
- WANG G Z, ZHANG H J, ZHANG J F. Technology of slurry balance shield crossing bedrock and boulder [J]. Journal of Liaoning Technical University (natural science), 2014, 33(3):350-353.
- [10] 钟长平, 竺维彬, 周翠英. 花岗岩风化地层中盾构施工风险和对策研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3):17-23.
- ZHONG C P, ZHU W B, ZHOU C Y. On construction risks of a shield machine operated in weathered granite stratum and its countermeasures [J]. Modern tunnelling technology, 2013, 50(3):17-23.
- [11] 梁奎生. 台山核电海底泥水盾构隧洞基岩及风化孤石地层深孔爆破技术研究与应用[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- LIANG K S. Deep-hole blasting technical research and application for the formation of bedrock and weathering boulder of taishan nuclear power submarine slurry shield tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [12] 竺维彬, 黄威然, 孟庆彪, 等. 盾构工程孤石及基岩侵入体爆破技术研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5):12-17.
- ZHU W B, HUANG W R, MENG Q B, et al. Research on controlled blasting technology for boulders and invading bedrock in shield construction [J]. Modern tunnelling technology, 2011, 48(5):12-17.
- [13] 李志义, 刘颖彬, 钟铎炜, 等. 浅覆土超大泥水盾构推进与停机引起地表及深层土体联动变形实测分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(13):108-115.
- LI Z Y, LIU Y B, ZHONG H W, et al. Coupled displacement of deep soil and ground surface induced by advancement and halt of large slurry shield buried in shallow soil [J]. Construction technology, 2023, 52(13):108-115.
- [14] 曾垂刚, 陈瑞祥, 杨振兴, 等. 盾构直接掘进含孤石地层的刀盘刀具振动相似模型试验[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(19):57-61.
- ZENG C G, CHEN R X, YANG Z X, et al. Vibration similarity model test of cutter-disk tool for shield tunneling directly into strata containing isolated stones [J]. Construction technology, 2022, 51(19):57-61.

(上接第 65 页)

- ZHANG C A, WAN L, LI Z J, et al. Research on the scheme of crossing extremely shallow buried sections of a bidirectional eight lane super large cross-section highway tunnel [J]. Highway transportation technology (applied technology edition), 2019, 15(5):274-276.
- [9] 蒋坤, 夏才初, 卞跃威. 节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):841-847.
- JIANG K, XIA C C, BIAN Y W. Optimal analysis of construction schemes of small space tunnel with bidirectional eight traffic lanes in jointed rock mass [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(3):841-847.
- [10] 刘红轲. 半部 CD 法在超大断面隧道中的应用[J]. 山东交通科技, 2018(2):25-27.
- LIU H K. Application of half CD method in ultra large section tunnels [J]. Shandong transportation technology, 2018(2):25-27.
- [11] 张喆, 冯泽欢, 李君强. 半部 CD 施工方法在大跨径山岭隧道中的应用与推广[J]. 公路, 2017, 62(9):1-3.
- ZHANG Z, FENG Z H, LI J Q. Application and promotion of half CD construction method in large span mountain tunnel [J]. Highway, 2017, 62(9):1-3.
- [12] 臧春雷, 余鸾鸢. 超大跨度隧道上台阶 CD 法施工技术探讨[J]. 公路交通技术, 2018, 34(S1):154-159.
- ZANG C L, YU L Y. Discussion on construction technology of step CD in large-span tunnel [J]. Technology of highway and transport, 2018, 34(S1):154-159.
- [13] 王圣涛. 钢架岩墙组合支撑工法在超大扁平硬岩隧道施工中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2):155-162.
- WANG S T. Study on the application steel frame-rock wall combined supporting method in the construction of super large and flat rock tunnel [J]. Modern tunneling technology, 2018, 55(S2):155-162.
- [14] 易丹. 单拱四车道高速公路隧道三台阶五步开挖法探讨[J]. 公路与汽运, 2015(5):197-199.
- YI D. Exploration of three steps and five steps excavation method for single arch four lane expressway tunnel [J]. Highways and automotive applications, 2015(5):197-199.