

# 新建隧道施工对近距离既有隧道的 影响及安全风险评估

李军, 吕婧, 刘瑞

(内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 与既有隧道相距较近时,新建隧道施工会影响既有隧道结构的稳定性,增加新建隧道施工难度和工程风险。文中依托大青山隧道与武川至呼和浩特段隧道平行建设,垂直间距约 30 m 的工程实例,对既有隧道进行质量检测,采用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力分析软件研究新建隧道爆破开挖对既有隧道的影响,确定合理爆破参数,并对大青山隧道施工设计进行安全风险评估。结果表明,既有隧道衬砌结构与围岩之间局部存在松散、不密实等接触不良现象,围岩局部存在较明显的松散、裂隙带;1# 隧道左线局部区域二次衬砌砼强度低于 C25 设计标准,基本满足设计标准;单次爆破药量 50 kg、隧道间距 40 m 时衬砌的最大振速超过规范要求,单次爆破药量 25 kg、隧道间距 30 m 时衬砌的最大振速超过规范要求,单次爆破药量 25 kg、隧道间距 40 m 时衬砌的最大振速满足规范要求,单次爆破药量 12.5 kg、隧道间距为 30、35、40 m 时衬砌的最大振速满足规范要求;大青山隧道塌方、影响相邻隧道安全、危岩落石、大变形、交通事故的风险等级分别为Ⅲ、Ⅲ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅱ级,可通过加强地质预报、超前支护、注浆封堵及加固、加强通风及变形监控量测等措施降低风险发生概率。

**关键词:** 隧道;新建隧道;既有隧道;质量检测;爆破振动;风险评估

**中图分类号:** U458.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)05-0183-05

随着城市公路隧道的大规模建设,受地面建(构)筑物、地质条件的限制及地下空间的合理利用,新建隧道近距离穿越既有隧道或建(构)筑物的情况增多。与既有隧道相距较近时,新建隧道施工会影响既有隧道结构的稳定性,增加新建隧道的施工难度和工程风险。毕强等研究了新建隧道施工时近距离既有隧道的变形及内力变化规律,提出了保证既有隧道安全性的量化指标;郑俊杰等针对温福铁路头岭隧道下穿既有高速公路隧道的实际情况,调整开挖方法、爆破参数及起爆方式,确保既有隧道安全;王占生等针对浅埋暗挖隧道近距离下穿既有地铁的情况,通过既有地铁现状评估,制定了既有地铁变形控制标准,进行了新建隧道施工方案优化。以往研究大多在保证既有隧道稳定性的前提下提出施工控制技术,缺少对新建隧道的安全风险评估。该文针对大青山隧道分析新建隧道爆破开挖对既有隧道的影响,并对其施工设计进行安全风险评估,确保新建隧道的施工安全及已建隧道的运行安全。

## 1 工程概况

内蒙古自治区拟建呼和浩特至武川一级公路,

共需建设 0#、1#、2#、3# 4 条大青山隧道,长度分别为 248、1 815、210、165 m,其中 1#、2#、3# 隧道分别与武川至呼和浩特段 1#、2#、3# 隧道平行建设,垂直间距约 30 m。

大青山隧道断面为拱形,宽 7.5 m,高 8.0 m,为单向二车道一级公路标准的长隧道,以Ⅳ、Ⅴ级围岩为主。拟建隧道与既有隧道的相互关系见图 1。采用复合型衬砌,包括Ⅴ级围岩浅埋偏压段衬砌、Ⅴ级围岩加强段衬砌、Ⅴ级围岩一般段衬砌、Ⅳ级围岩一般段衬砌、紧急停车带Ⅳ级围岩段衬砌。

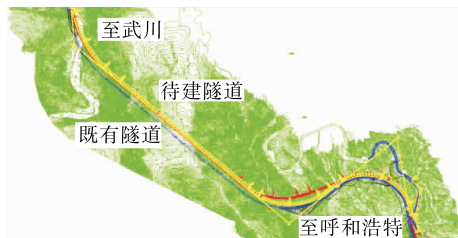


图 1 新建隧道与既有隧道的平面位置关系

通过对既有隧道衬砌砼与围岩之间接触情况、壁后是否存在空洞和松散层、衬砌结构强度、围岩破裂松散程度及整体稳定性等进行检测,得到以下结

论:1) 隧道衬砌质量总体良好,围岩整体稳定或基本稳定;2) 衬砌结构与围岩之间局部存在松散、不密实等接触不良现象,围岩局部存在较明显的松散、裂隙带;3) 1#隧道左线局部区域二次衬砌砼强度低于C25设计标准,但基本满足设计要求。

## 2 隧道爆破振动数值模拟分析

### 2.1 施工方法

隧道围岩主要为Ⅳ、Ⅴ级,施工方法通常可采用全断面爆破、台阶法施工爆破和CD法施工爆破。

爆破采用乳化炸药,周边孔、辅助孔和掏槽孔炮孔直径均为42 mm。根据炸药性质,光爆孔药卷直径为27 mm、重0.1 kg,掏槽孔及辅助孔药卷直径为32 mm、重0.15 kg。

考虑隧道施工采用全断面、台阶法和CD法3种方式,隧道断面面积为 $100\text{ m}^2$ 。全断面开挖时,周边眼间距为46 cm,最小抵抗线为60 cm;上下台阶法开挖时,周边眼间距为50 cm,最小抵抗线为65 cm;CD法开挖时,周边眼间距为50 cm,最小抵抗线为60 cm(见图2)。



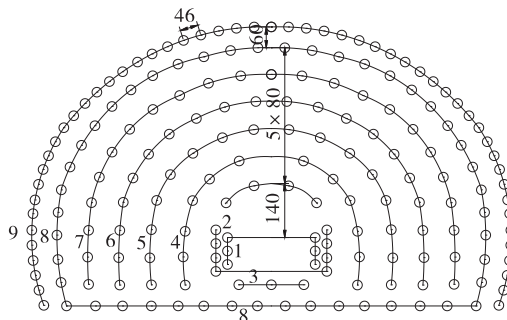
(a) 全断面开挖施工



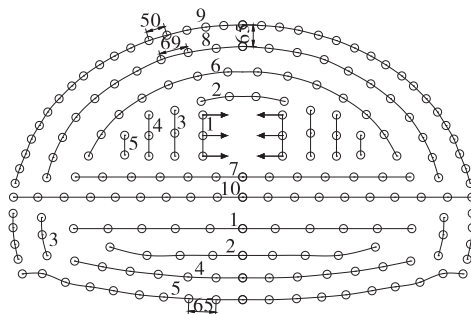
(c) 台阶开挖施工



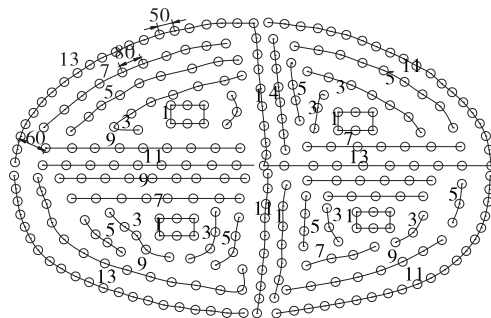
(e) CD法开挖施工



(b) 全断面爆破炮眼布置



(d) 台阶法爆破炮眼布置



(f) CD法爆破炮眼布置

图2 不同爆破施工方法及炮眼布置示意图(单位:cm)

拟建隧道爆破施工将对既有隧道产生影响,其影响程度随着一次起爆药量的增加和距离的减小而增大,通常由结构物的振动速度来评价和衡量。根据JTG B02—2013《公路工程抗震设计规范》,隧道衬砌结构的安全允许振动速度为 $10\sim 20\text{ cm/s}$ 。

### 2.2 建立模型

#### 2.2.1 计算模型

采用ANSYS/LS-DYNA非线性动力分析软件建立隧道爆破计算模型,模型的6个面均设置 $z$ 向约束,左、右侧和下方设置非反射边界。已建隧道的

内部设置全反射边界。数值计算模型见图 3。



图 3 隧道爆破数值计算模型

已建隧道衬砌支护结构采用 C25 模筑砼,厚度 45 cm;初期支护采用 C25 早强砼,厚度 18 cm。隧道拱底衬砌厚度取 45 cm,其余取 63 cm。炸药等效为柱状集中药包,乳化炸药的密度取 1.2 g/cm<sup>3</sup>,装药长度为 60 cm。

2.2.2 参数选取

(1) 炸药参数。炸药采用高能炸药模型,用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和 JWL 状态方程联合描述,JWL 状态方程[见式(1)]能较准确描述爆炸过程中爆轰产物的压力、体积、能量特征。乳化炸药的参数见表 1。

$$p=A\left[1-\frac{\omega}{R_1V}\right]e^{-R_1V}+B\left[1-\frac{\omega}{R_2V}\right]+\frac{\omega E_0}{V}\tag{1}$$

式中: $p$  为爆轰产物的压力; $V$  为相对体积; $E_0$  为初始内能密度; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为特征常数。

表 1 乳化炸药的参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
爆破速度/(m·s <sup>-1</sup> )	3 600	$B$ /GPa	5.81
$E_0$ /(J·m <sup>-3</sup> )	$2.67\times10^9$	$R_1$	5.8
$p$ /GPa	5.0	$R_2$	1.56
$A$ /GPa	3.26	$\omega$	0.57

(2) 围岩性质参数。已建隧道的围岩采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 塑性材料。根据隧道勘察报告,新建隧道的围岩主要为Ⅳ、Ⅴ级,由于Ⅳ级围岩的振动效应比Ⅴ级围岩大,选取Ⅳ级围岩参数(见表 2)进行计算。

表 2 围岩性质参数

参数名称	参数值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 700
弹性模量/GPa	5.29
屈服应力/GPa	0.039 7
泊松比	0.32

(3) 衬砌结构参数。已建隧道的衬砌结构采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 塑性材料,参考 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,衬砌结构参数见表 3。

表 3 隧道衬砌结构参数

参数名称	参数值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500
弹性模量/GPa	30
屈服应力/GPa	0.011 9
泊松比	0.2

2.3 数值模拟计算及结果分析

针对全断面施工爆破(单段最大装药量为 50 kg,隧道间距为 40 m)、台阶法施工爆破(单段最大装药量为 25 kg,隧道间距为 30、40 m)和 CD 法施工爆破(单段最大装药量为 12.5 kg,隧道间距为 30、35、40 m),即 3 种施工方案、6 种情况进行数值模拟计算。选取计算模型的一个代表面,其衬砌结构拱顶、拱腰 1、拱腰 2、拱腰 3、拱脚、底腰、底板对应模型节点见图 4。衬砌结构特征点的最大振动速度见表 4。

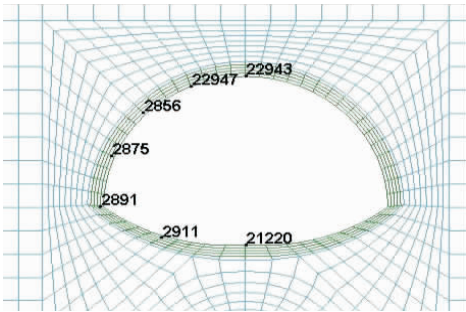


图 4 衬砌特征点与计算模型节点对应图

表 4 不同工况下爆破振动数值模拟计算结果

施工方法	单次爆破药量/kg	隧道间距/m	衬砌最大振速/(cm·s <sup>-1</sup> )	结论
全断面法	50.0	40	28.57	振速超限
	25.0	30	21.24	振速超限
台阶法	25.0	40	14.94	安全
	12.5	30	9.03	安全
	12.5	35	8.49	安全
	12.5	40	6.35	安全

由表 4 可知:1) 单次爆破药量 50 kg、隧道间距 40 m 时,衬砌的最大振速超过规范要求。表明爆破

药量大于 50 kg、隧道间距小于 40 m 时施工不满足工程安全要求。2) 单次爆破药量 25 kg、隧道间距 30 m 时,衬砌的最大振速超过规范要求,但超过规范上限较小;单次爆破药量 25 kg、隧道间距 40 m 时,衬砌的最大振速满足规范要求。表明爆破药量大于 25 kg、隧道间距小于 30 m 时,施工可基本满足工程安全要求;爆破药量小于 25 kg、隧道间距大于 40 m 时,施工可满足工程安全要求。3) 单次爆破药量 12.5 kg、隧道间距为 30、35、40 m 时,衬砌的最大振速满足规范要求。表明爆破药量小于 12.5 kg、隧道间距大于 30 m 时,施工满足工程安全要求。4) 隧道衬砌结构安全允许振速与爆破振动频率有密切关系,需根据实际爆破方式和围岩情况,通过现场测试确定爆破振动频率和安全振速。

### 3 隧道施工安全风险评估

针对大青山隧道施工图设计进行安全风险评估,确定风险等级,针对各风险因素提出风险处理措施,将各类风险降低到可接受水平,保证施工安全。

#### 3.1 安全风险等级及判断标准

隧道工程设计安全风险分为 I 级(低度风险)、II 级(中度风险)、III 级(高度风险)、IV 级(极高风险),安全风险等级要求见表 5。

表 5 隧道安全风险等级要求

风险等级	要求
I	风险水平可接受,当前应对措施有效,不必采取额外技术、管理方面的预防措施
II	风险水平有条件接受,工程有进一步实施预防措施以提升安全性的必要
III	风险水平有条件接受,必须实施削减风险的应对措施,并准备应急计划
IV	风险水平不可接受,必须采取有效应对措施将风险等级降低到 III 级及以下水平;如果应对措施的代价超出项目法人(业主)的承受能力,则更换方案或放弃执行项目

#### 3.2 安全风险评估内容及方法

隧道工程施工图设计阶段安全风险评估的主要步骤(见图 5):1) 通过对类似结构工程安全风险发生情况的调查,基于对设计、施工、运营阶段可能发生安全风险诱因的分析,确定关键、次要风险源。2) 采用定性、定量相结合的方法,分析和评估风险源的发生概率及损失,确定其发生的可能性及严重程度。

3) 根据风险发生概率等级和风险损失等级,按风险等级确定的相关要求确定安全风险等级。4) 针对不同安全风险等级提出应对措施。

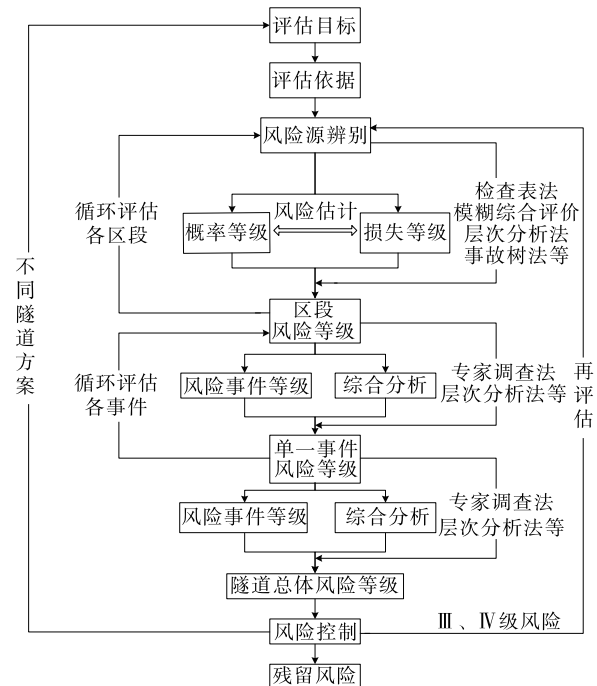


图 5 隧道施工图设计阶段工程安全风险评估流程

#### 3.3 风险评估结论

经风险评估,大青山隧道初始风险见表 6。

表 6 大青山隧道潜在风险因素

风险事件	事故发生概率	事故发生后果	风险等级标准	风险接受准则
塌方	4	2	III	不期望
影响相邻隧道安全	4	2	III	不期望
危岩落石	4	2	III	不期望
大变形	4	1	II	可接受
交通事故	3	2	II	可接受

根据表 6,大青山隧道发生塌方、影响相邻隧道安全、危岩落石、大变形的等级分别为 III、III、III、II 级。为确保安全风险得到有效控制,需根据隧道不同风险类别采取措施,将风险降到中度以下可接受水平(见表 7)。

### 4 结论

(1) 既有隧道衬砌质量总体良好,围岩整体稳定,但工程质量存在缺陷及安全隐患。

表 7 大青山隧道风险应对措施

风险事件	主要成因	初始风险			风险主要处理措施	残余风险		
		概率等级	后果等级	风险等级		概率等级	后果等级	风险等级
塌落掉块塌方	浅埋、破碎带、节理裂隙发育	4	2	Ⅲ	加强地质超前预报;超前支护;注浆封堵及加固	2	2	Ⅱ
危石滚落	洞口陡边坡风化危石、隧道内爆破施工影响松动岩块	4	2	Ⅲ	加强超前地质预报;超前支护;注浆封堵及加固	1	2	I
围岩大变形	埋深较大、围岩岩性差地段;初期支护不及时	4	1	Ⅱ	加强超前地质预报;加强通风;全过程监控	3	1	Ⅱ
交通事故	新建隧道爆破施工影响、现有隧道交通拥挤	3	2	Ⅱ	设置现场施工警示牌、限制交通	1	2	I
影响既有建筑物安全	新建隧道施工过程中爆破振动、应力重分布影响	4	2	Ⅲ	加强既有隧道爆破振动、变形监控量测	1	2	I

(2) 单次爆破药量 50 kg、隧道间距 40 m 时,衬砌的最大振速超过规范要求;单次爆破药量 25 kg、隧道间距 30 m 时,衬砌的最大振速超过规范要求;单次爆破药量 25 kg、隧道间距 40 m 时,衬砌的最大振速满足规范要求;单次爆破药量 12.5 kg,隧道间距为 30、35、40 m 时,衬砌的最大振速满足规范要求。隧道衬砌结构安全允许振速与爆破振动频率有密切关系,需根据实际爆破方式和围岩情况,通过现场测试确定爆破振动频率和安全振速。

(3) 大青山隧道塌方、影响相邻隧道安全、危岩落石、大变形、交通事故的风险等级分别为Ⅲ、Ⅲ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅱ级。可通过加强地质预报、超前支护、注浆封堵及加固、加强通风及变形监控量测等措施将风险降到中度以下可接受水平,确保安全风险得到有效控制。

参考文献:

[1] 胡群芳,黄宏伟.盾构下穿越已运营隧道施工监测与技

\*\*\*\*\*

(上接第 120 页)

[10] 交通部公路司.新概念公路设计指南[M].北京:人民交通出版社,2005.

[11] 冯江.山区河谷地形城市道路设计体会[J].城市道桥与防洪,2014(7).

[12] 王健.公路勘察设计新理念在山区公路设计中的应用[J].交通科技,2015(3).

[13] 王玉震,岳军.公路勘察设计新理念在山区公路小桥

术分析[J].岩土工程学报,2006,29(1).

[2] 张治国,张孟喜.软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊 2).

[3] 杨立华,潘智锋,王晨涛.软弱围岩条件下新建隧道下穿浅埋隧道安全及稳定性研究[J].公路,2015(7).

[4] 毕强,吴金刚,马杰.新建隧道近距离上穿既有隧道的力学分析及工程处理措施[J].铁道建筑,2009(8).

[5] 毕强,吴金刚,马杰.新建隧道近距离上穿既有隧道的力学分析及工程处理措施[J].现代隧道技术,2008(增刊 1).

[6] 郑俊杰,包德勇,龚彦峰,等.铁路隧道下穿既有高速公路隧道施工控制技术研究[J].铁道工程学报,2006(8).

[7] 王占生,张顶立.浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊 2).

[8] 余辉,王吉庆,肖钦.基于地质雷达的隧道工程衬砌无损检测及应用[J].公路与汽运,2015(3).

[9] 胡林翼.隧道稳定性监测在施工中的实施方法[J].公路与汽运,2016(5).

收稿日期:2017—06—13

涵设计中的应用[J].北方交通,2013(9).

[14] 周志强.北方山区高速公路设计新理念:以京昆高速公路山西平定至阳曲段第 S22 合同段设计为例[J].交通标准化,2014(11).

[15] 覃光焱,黄华华,李量,等.公路改城市道路设计方法探讨[J].公路交通技术,2010(4).

收稿日期:2017—04—24