

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.006

关林子公路隧道下穿既有道路施工风险评估

杨战博¹,寇君淑²,杨欢¹,杨红涛¹

(1.中交第一公路工程局有限公司,北京 100085; 2.西安工业大学 建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘要: 山岭隧道下穿既有道路时,不确定因素多,在施工过程中易发生安全风险事件。为降低和控制施工风险,有必要对下穿既有道路施工风险进行评估。以新建的关林子公路隧道下穿既有公路为工程背景,参考风险管理方法,采用专家调查法和层次分析法对工程施工阶段风险进行辨识、分析、评价,得到掌子面失稳为最大施工风险,围岩条件和支护参数对施工风险影响最大。根据得出的风险评估结果,提出严格控制爆破尺寸,加强监控量测等风险控制措施,为关林子隧道安全施工提供保障。

关键词: 公路隧道;下穿;既有道路;层次分析法;风险评估

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0030-05

Risk Assessment of Guanlinzi Tunnel Construction Under Passing Existing Highway

YANG Zhanbo¹, KOU Junshu², YANG Huan¹, YANG Hongtao¹

(1. First Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: There are a variety of uncertain factors when the tunnel under pass the existing roads, it is liable to security risk event under its construction. In order to reduce and control the risk, it is necessary to assess the risk especially when the tunnel under pass existing roads. This research took the Guanlinzi Highway tunnel which under pass an existing road as an example, based on risk management approach, this paper adopted the expert investigation methods and analytic hierarchy process to identify, analyze and assess the risk during the process of tunnel construction, the results as the tunnel face instability is the most dangerous risk, wall rock conditions and support parameters has the largest impacts. Based on the risk assessment results obtained, suggestions were strictly controlled blasting sizes, strengthen monitoring and measurement and other risk control measures should be taken to provide protection for Guanlinzi Tunnel construction.

Keywords: highway tunnel; under passing; existing highway; analytic hierarchy process; risk assessment

近些年公路隧道建设的快速发展,为了满足交通量和交通条件的要求^[1],涌现出三车道、四车道等大断面的公路隧道,公路隧道的建设难度逐渐加大,上、下穿既有道路或其他建筑物的隧道工程越来越多^[2-3]。当隧道穿越地层条件较差,且邻近既有建筑物或构筑物时,隧道施工风险大、工序复杂等特点就显得格外突出^[4-5]。由于此类隧道在施工过程中,不仅要保证新建隧道自身的施工安全,还要严格控制新建隧道开挖引起的地层或邻近建筑物的变形,施工难度很大^[6]。因此,相对于其他公路隧道更

易发生风险事件,有必要对公路隧道上、下穿既有道路的施工风险进行评估^[7-8]。

隧道风险评估按照阶段来看,最主要的两个阶段是设计阶段和施工阶段^[9]。按照研究方法,风险评估可分为两种:一种采用数学方法对整个项目或工程进行定量计算,得出风险值及影响并排序,如蒙特卡罗法、层次分析法、模糊综合评价法等^[10];另一种采用专家调查研究的方法,对指定工程或项目进行实地勘察、资料分析,凭借专家的知识、经验,判断、评估和预测该项目风险^[10-11]。本文以宝汉高

收稿日期:2015-11-14

修稿日期:2015-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51408054);陕西省教育厅专项科技计划项目(15JK1337);中交一公局总承包经营分公司科技项目(KT2015-04)

作者简介:杨战博(1978—),男,陕西乾县人,高级工程师,主要从事隧道施工技术的研究工作。E-mail:32338742@qq.com

速关林子隧道下穿既有道路为研究对象,结合关林子公路隧道的地勘资料、设计资料及现场施工资料,对该隧道下穿既有道路段进行风险辨识。辨识出的风险源采用层次分析法进行风险因素重要性排序,并提出对进口段围岩超前支护和注浆加固,严格控制进口段爆破开挖进尺、积极实施动态监控量测等控制措施,进一步进行有效的风险评估与管理,保障隧道进口浅埋段施工安全。

1 工程概况

1.1 关林子隧道

关林子隧道位于宝汉高速汉中市留坝县武关驿镇武关河村南约 80 m 处,316 国道西侧。隧道采用分离式设计,左线桩号 ZK158 + 355—ZK158 + 775,

长 420 m,属短隧道;右线桩号 YK159 + 335—YK158 + 884,长 509 m,属中隧道。

关林子公路隧道进洞段位于褒河右岸谷坡坡脚,洞线与坡面斜交,存在一定偏压情况,且隧道出口下穿 316 国道,进洞段为浅埋段,埋深均小于 10m。现坡面倾向 20°,倾角 17°,现状条件下自然坡坡面稳定,现坡面一级阶地后缘为冲洪积粉质黏土、淤泥质粉质黏土、中细砂及漂石覆盖,谷坡坡脚为残破积粉质黏土及碎石覆盖(如图 1 所示)。

关林子隧道隧址区地下水主要以大气降水、地表水的渗入补给为主。该隧址区正常涌水量为 184.56 m³/d,雨季最大涌水量为 325.94 m³/d,围岩渗透性很高,水量和水位受季节制约,雨季时水量相对较大。

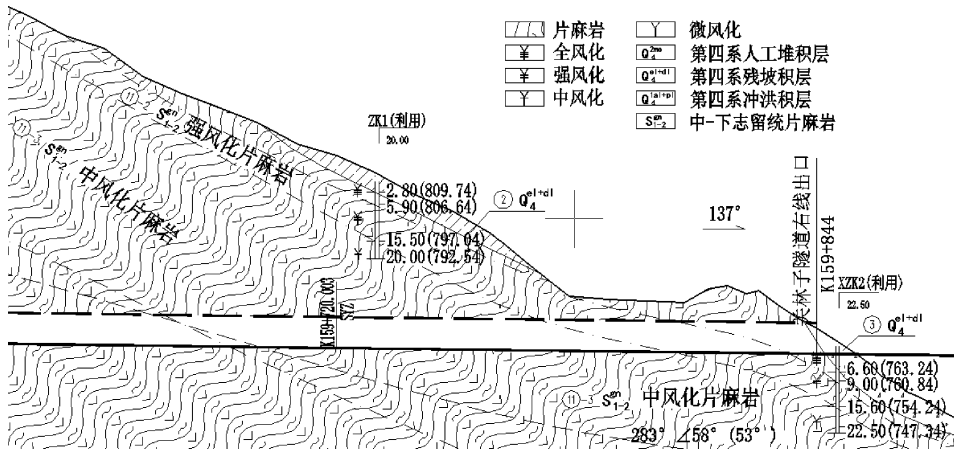


图 1 关林子隧道纵断面图

1.2 施工方法

1.2.1 设计参数

隧道建筑界限净高 5.0 m,净宽为 14 m;隧道开挖断面为 158.8 m²,为大断面隧道。内轮廓结构断面为三心圆+仰拱,拱顶半径 7.95 m,拱肩半径 6.05 m,仰拱半径为 21 m,隧道宽为 14.79 m,高为 10.04 m。

隧道结构采用复合衬砌,V级围岩加强初期支护为:隧道洞口采用 Φ108 mm 管棚,间距 40 cm×40 cm,长度 30 m,搭接长度 5 m;隧道洞内采用 Φ50 mm 的小

导管,间距 40 cm×40 cm,长度 30 m,搭接长度 5 m;围岩浅埋加强初期支护为:C25 喷射混凝土厚 28 cm;纵向间距 50 cm 的 I22b 钢拱架;Φ8 mm 双层钢筋网,间距 20 cm×20 cm;C30 二次衬砌钢筋混凝土 60 cm。

1.2.2 施工工法

关林子隧道下穿既有道路段围岩条件较差,并且该段为大断面浅埋隧道,根据工程地质条件,该隧道下穿道路段采用 CRD 法开挖进行施工,施工步骤如图 2 所示。

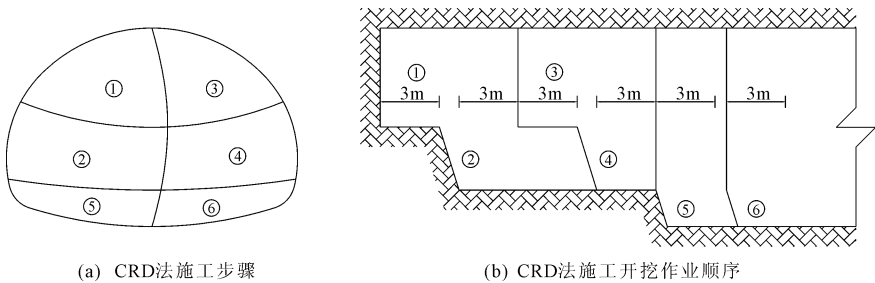


图 2 CRD 法施工步骤

2 风险分析及控制

2.1 风险评估步骤

根据关林子隧道工程地质勘察报告、施工组织设计等相关资料,对隧道采用 CRD 法施工穿越 G316 国道进行风险辨识和评估。关林子隧道下穿既有公路风险评估主要包括三个阶段,分别为风险辨识^[11]、风险评估^[12]及风险控制。首先根据工程地质条件、地形地貌、施工方法等对洞口段进行风险源辨识;其次,采用专家调查法和层次分析法分别对风险源的重要性进行排序。最后,分析本隧道采取的风险控制措施,确保施工过程安全。

2.2 评估结果及控制措施

2.2.1 风险源及风险因素辨识

根据关林子公路隧道工程地质勘察报告及施工组织设计等相关资料,对隧道采用 CRD 法穿越 G316 国道进行风险源识别,由于关林子公路隧道为超浅

埋双向分离式六车道,隧道开挖断面为 158.8 m²,隧道埋深浅,围岩条件极差,难以形成稳定的平衡拱,在施工开挖扰动下,极易造成下穿段围岩失稳,原路面坍塌。通过专家调查法,得出存在的风险有大变形、路面沉降、掌子面失稳等三类。引发上述风险的因素与开挖方案、围岩条件、既有道路的间距、断面大小、支护参数、超前支护参数以及爆破参数有关。

运用层次分析法,建立如图 3 所示的风险层次结构。采用专家调查小组对风险因素重要性程度对比,得到表 1 的结果。分别比较风险因素重要性,根据其重要程度采用 1~13 标度法进行赋值,两两因素进行相比,按照一个因素比另一个因素的重要程度,分别取 1,3,5,7,9,11,13;若两因素相比重要介于之间,则取中间的偶数值;反之,两因素的重要程度相对而言不重要,则取其倒数,列成 7 阶矩阵,求该矩阵的最大特征值,并对一致性指数进行验算。

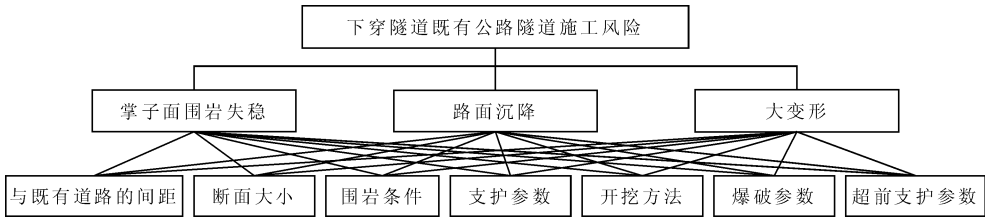


图 3 风险层次结构

表 1 风险因素重要性对比表

评价指标	与既有道路的 间距 P_1	断面大小 P_2	围岩条件 P_3	支护参数 P_4	开挖方法 P_5	爆破参数 P_6	超前支护 参数 P_7
掌子面失稳 C_1	最小	小	最大	较小	较大	一般	大
路面沉降 C_2	大	较小	最大	最小	小	较大	一般
大变形 C_3	较小	小	最大	一般	较大	最小	大

2.2.2 风险评价

(1) 掌子面围岩失稳(C_1) 风险因素验证

对于评价指标 $C_1, P_3 > P_7 > P_5 > P_6 > P_4 > P_2 > P_1$,掌子面失稳风险因素影响程度两两比较结果见表 2。

表 2 掌子面围岩失稳风险因素影响大小相互比较结果

风险因素	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
P_1	1	1/3	1/13	1/5	1/9	1/7	1/11
P_2	3	1	1/11	1/3	1/7	1/5	1/9
P_3	13	11	1	9	5	7	3
P_4	5	3	1/9	1	1/5	1/3	1/7
P_5	9	7	1/5	5	1	3	1/3
P_6	7	5	1/7	3	1/3	1	1/5
P_7	11	9	1/3	7	3	5	1

利用 Matlab 数值分析软件解得 7 阶矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.6068$;引入其余特征根的负平均值作为度量判断矩阵偏离一致性的指标^[13-14],即计算一致性指数 C_I ,由

$$C_I = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \tag{1}$$

式中: C_I 为一致性指数; $\lambda_{\max}$ 为最大特征值; n 为矩阵阶数。可得 $C_I = 0.1011$;由一致性比率^[15]

$$C_R = C_I/R_I \tag{2}$$

另需引入判断矩阵平均随机一致性指标 R_I ^[16],查表 3 知 $R_I = 1.32$,算得 $C_R = 0.0766 < 0.1$,满足要求,若一致性比率 C_R 不满足要求,则需重新调整矩阵,直至一致性比率 C_R 满足要求为止。

表 3 平均随机一致性指标

矩阵阶数	3	4	5	6	7	8	9
R_I	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46

(2) 路面沉降(C_2) 风险因素验证

对于评价指标 $C_2, P_3 > P_1 > P_6 > P_7 > P_2 > P_5 > P_4$,路面沉降风险因素影响程度相互比较结果见表 4。

表 4 路面沉降风险因素影响大小相互比较结果

风险因素	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
P_1	1	7	1/3	11	9	3	5
P_2	1/7	1	1/9	5	3	1/5	1/3
P_3	3	9	1	13	11	5	7
P_4	1/11	1/5	1/13	1	1/3	1/9	1/7
P_5	1/9	1/3	1/11	3	1	1/7	1/5
P_6	1/3	5	1/5	9	7	1	3
P_7	1/5	3	1/7	7	5	1/3	1

解得 7 阶矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.5938$;一致性指数 $C_I = 0.0990$,算得 $C_R = 0.0750 < 0.1$,满足要求。

(3) 大变形(C_3) 风险因素验证

对于评价指标 $C_3, P_3 > P_7 > P_5 > P_4 > P_1 > P_2 > P_6$,大变形风险因素影响程度相互比较结果见表 5。

表 5 大变形风险因素影响大小相互比较结果

风险因素	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
P_1	1	2	1/10	1/4	1/6	6	1/8
P_2	1/2	1	1/11	1/5	1/7	3	1/9
P_3	10	11	1	7	5	13	3
P_4	4	5	1/7	1	1/3	7	1/5
P_5	6	7	1/5	3	1	9	1/3
P_6	1/6	1/3	1/13	1/7	1/9	1	1/11
P_7	8	9	1/3	5	3	11	1

解得 7 阶矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.6710$;一致性指数 $C_I = 0.1118$;算得 $C_R = 0.0847 < 0.1$,满足要求。

(4) 风险源总排序

采用专家调查法确定关林子隧道下穿既有公路施工风险总排序,由低到高依次为路面沉降、大变形、掌子面失稳。利用相对权重系数计算公式可得到层次单排序结果(如表 6 所列),可由

$$C_R = \sum_{j=1}^m (a_j C_{Ij}) / \sum_{j=1}^m (a_j R_{Ij}) \tag{3}$$

得到 $C_3、C_2、C_1$ 相对应的风险因素权重系数的总排序结果,如表 7 所示。

表 6 施工风险因素影响大小相互比较结果

施工风险	C_1	C_2	C_3	层次单排序结果
C_1	1	5	3	0.6370
C_2	1/5	1	1/3	0.1047
C_3	1/3	3	1	0.2583

表 7 风险因素权重系数总排序结果表

风险因素	C_1	C_2	C_3	总排序结果
P_1	0.0094	0.0269	0.0099	0.0463
P_2	0.0159	0.0045	0.0068	0.0272
P_3	0.2762	0.0454	0.1121	0.4338
P_4	0.0283	0.0016	0.0213	0.0511
P_5	0.0923	0.0026	0.0379	0.1328
P_6	0.0511	0.0147	0.0037	0.0695
P_7	0.1637	0.0089	0.0667	0.2393

由此可见,关林子公路隧道施工阶段风险因素重要性从小到大为:断面大小、既有道路间的间距、支护参数、爆破参数、开挖方法、超前支护参数与围岩条件。

(5) 确定隶属度,建立等级评价矩阵

安全风险分级是关林子隧道风险评估结果的重要度量指标和制定风险控制措施和决策的依据。文中采用专家调查法对关林子隧道下穿既有道路风险事件的概率等级进行统计分析,其具体的分类、权重和评估结果如表 8 所示。

表 8 打分评价矩阵

风险因素	权重	不同风险程度得分				
		灾难性的	很严重	严重	较大	轻微
P_1	0.0463	0	0	0	4	6
P_2	0.0272	0	0	0	3	7
P_3	0.4338	5	3	2	0	0
P_4	0.0511	0	0	0	6	4
P_5	0.1328	0	3	5	2	0
P_6	0.0695	0	0	0	7	3
P_7	0.2393	0	4	3	4	0

可得到风险等级评价矩阵:

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nk} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.4 & 0.6 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.3 & 0.7 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.7 & 0.3 \\ 0.0 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$C = WB = (w_1 \cdots w_n) \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nk} \end{bmatrix}$$

根据权重行列式 $W = (0.0463, 0.0272, 0.4338, 0.0511, 0.1328, 0.0695, 0.2393)$, 以及风险等级评价矩阵 B , 可得 $C = (0.2169, 0.2657, 0.2250, 0.2283, 0.0881)$

由上述专家打分得到等级评价矩阵后, 根据规范进行关林子隧道等级评价, 为充分利用层次分析法中信息, 对关林子隧道下穿既有公路进行等级评分以确定风险事件后果等级, 等级得分由分值与权重的乘积和确定, 总评分为 3.3668, 见表 9。

表 9 风险等级评分

风险等级	灾难性	很严重	严重	较大	轻微
分值	5	4	3	2	1
权重	0.2169	0.2657	0.2250	0.2283	0.0881
得分	1.0845	1.0628	0.6749	0.4565	0.0881

关林子隧道下穿既有公路风险等级评分为 3.3668, 风险事件后果等级介于严重与很严重之间。通过前面计算得知掌子面失稳风险发生的概率最大, 同时, 围岩条件、超前支护参数与开挖方法风险因素发生的概率较高, 且造成的后果较严重。分析风险事件发生的概率和后果等级, 对关林子隧道采取风险控制措施, 确保施工顺利安全进行。

2.2.3 风险控制措施

针对关林子隧道下穿既有公路风险因素重要性等级, 对该隧道采取以下风险控制措施: (1) 在下穿既有公路施工时, 应严格按照爆破设计进行, 爆破所引起地表振速应控制在周围建筑物、构筑物 and 过往车辆的允许范围内; (2) 严格控制开挖所引起的地表沉降, 积极实施动态监控, 分析隧道围岩及支护结构的稳定性, 及时调整支护参数; (3) 隧道爆破开挖时, 应进行爆破振动监测, 及时反馈和调整爆破参数。

经隧道开挖现场实际监控量测的数据分析及验

证, 表明风险控制措施可有效控制和规避风险, 确保隧道施工安全。

3 结 论

以关林子隧道下穿既有公路工程为依托, 建立以专家调查法和层次分析法相结合方法, 对洞口段施工风险进行分析, 并有针对性地提出风险控制措施, 其主要结论如下:

(1) 运用层次分析法给出关林子隧道下穿既有道路风险层次结构, 计算得到了各风险因素的综合权重, 结果显示在施工过程中影响最大的风险是围岩条件, 其次为超前支护参数和开挖方法; 由专家调查法得出施工风险由高到低依次为掌子面失稳、大变形、路面沉降。

(2) 提出了关林子隧道下穿既有公路洞口段施工开挖的风险控制措施: 在下穿既有公路时, 应严格按照爆破设计进行施工, 爆破所引起的地表振速应控制在允许范围内; 同时严格控制开挖进尺, 尽可能减小地表沉降, 积极实施动态监控量测和爆破振动监测, 及时反馈信息更改支护参数, 确保关林子隧道施工过程的安全。该隧道开挖现场实际验证以上风控措施有效可行。

参考文献:

[1] 邓祥辉, 高书通. 公路隧道洞口段施工风险评估与控制研究[J]. 铁道建筑, 2014(7): 55-58.

[2] 陈洁金, 张永杰. 下穿既有桥梁隧道施工风险定量评估方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1862-1868.

[3] 黄越, 寇君淑, 邓祥辉, 等. 大断面浅埋公路隧道进口段施工风险评估及控制[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(6): 452-458.

[4] 杨忠, 蒋宗全, 李兵, 等. 金牛山隧道下穿京福高速公路施工风险评估分析[J]. 铁道建筑, 2010(6): 44-46.

[5] 邓祥辉. 大断面软弱围岩隧道洞口段施工工法比较分析[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(12): 974-981.

[6] 马伟斌, 伏兵先, 杜晓燕, 等. 地铁隧道下穿铁路桥施工变形分析及处理措施[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 896-901.

[7] 陈洁金, 阳军生, 张永杰, 等. 下穿建筑物隧道施工风险评估方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4): 88-94.

[8] 陈绍华. 关角隧道风险评估[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 17-27.

[9] 傅金阳, 黄达, 易强, 等. 公路山岭隧道洞口施工风险分析与评估[J]. 湖南交通科技, 2010, 36(2): 158-162.