

# 地铁工程地质灾害危险性综合评估定量方法 ——以西安地铁一号线为例

邓亚虹<sup>1,2,3</sup>, 彭建兵<sup>1,3</sup>, 卢全中<sup>1,2,3</sup>, 林鸿州<sup>1,2,3</sup>

(1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 国土资源部  
岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以西安市地铁一号线建设工程地质灾害危险性评估为例, 对综合评估量化评分方法进行了理论探讨和实例分析, 主要讨论了评估因子的选取、各因子权重和分级取值、危险性等级划分和各级分值范围确定、评分方法和步骤等几个方面的内容。实例分析结果表明, 基于本文量化评分方法基础上的地质灾害危险性分区能够较好地反映多因素的综合影响, 评估结果合理可信。

**关键词:** 地铁工程; 地质灾害; 危险性综合评估; 量化评分方法

**中图分类号:** P642.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0291-04

## Quantification Grading Method in Subway Engineering Risk Assessment of Geological Disasters

——Taking No. 1 Subway in Xi'an as an Example

DENG Ya-hong<sup>1,2,3</sup>, PENG Jian-bing<sup>1,3</sup>, LU Quan-zhong<sup>1,2,3</sup>, LIN Hong-zhou<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering of Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Taking the geological disaster assessment of No. 1 subway in Xi'an as an example, Theoretical discuss and practical analysis are made on quantification grading method. The selection of assessment factors, weight of each factor and its value, division of risk grade and its scope and score, scoring methods and steps are discussed. The practical analysis result shows that this method can better reflect the comprehensive influence of multi-factor, and the result is reasonable and creditable.

**Key words:** subway engineering; geological disaster; risk comprehensive assessment; quantification grading method

## 0 引言

建设工程的地质灾害危险性评估包括现状评估、预测评估和综合评估3个层次的内容。综合评估是在现状和预测评估基础上,按照致灾地质体发生地质灾害危险性“区内相同、区际相异”的原则进行地质灾害危险性分区(段)。由于需要考虑多灾种、多因素对建设工程的综合影响,因此,单纯的定

性分析已不能满足综合评估进行地质灾害危险性分区(段)的要求。由于国家有关地质灾害危险性评估的行业标准尚处于征求意见稿阶段,所以当前执行的技术依据为国土资源部在2004年第69号文件中发布的《地质灾害危险性评估技术要求(试行)》<sup>[1]</sup>,但该技术要求并没有具体的定量分析评估方面的内容,只是提到在调查和资料收集的基础上进行定性—半定量的评估。实际工程中使用的综

收稿日期: 2008-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40534021); 中国博士后科学基金项目(20080431256); 长安大学科技发展基金项目(0305-1001)

作者简介: 邓亚虹(1978-),男,湖南益阳人,讲师,工学博士,从事岩土工程、地质灾害防治教学与研究。E-mail: hoverdyh@zju.edu.cn

合评估定量或半定量方法主要有层次分析法(AHP)、模糊数学评判法、灰色聚类分析法、信息量模型法、灾损率法和风险区划法等。前4种方法在使用过程中存在着模型建立和计算过程复杂、影响因素过多等不足,从而使得计算结果意义不明确,可控性较差;后2种方法属于定性—半定量方法,因而人为因素影响较大,使得评价结果的可变性较大,可比性较差<sup>[2-7]</sup>。因此,笔者结合西安市地铁一号线(后围寨—纺织城)建设工程的地质灾害危险性评估工作,对综合评估量化分析的方法、步骤和结果表述等进行了理论探讨和实践,以期能够为类似的地下线性工程的地质灾害危险性综合评估和危险性分区提供具有理论和实际意义的参考和借鉴。

## 1 评估工作概况

### 1.1 拟建工程概况

拟建西安地铁一号线近期规划线路为咸阳森林公园—纺织城,近期一期工程为后围寨—纺织城。后围寨—纺织城段呈东西走向,线路沿枣园路—大庆路—莲湖路—东、西五路—长乐路—浐河东路—纺北路—线布置,途经未央区、莲湖区、新城区、浐灞生态区及灞桥区,将三桥镇、城西客运站、大庆路“电工城”、玉祥门、北大街、火车站、五路口、康复路批发市场、金花路、万寿路、长乐坡、城东客运站、半坡、纺织城等大型客流集散点紧密地联系起来,有力地支撑了东西向拓展的城市发展格局,是西安轨道交通线网中的骨干线路。线路全长25.5 km,其中高架线5.38 km(后围寨—汉城路),地下线19.85 km(汉城路—纺织城),过渡段0.27 km(AK5+380~AK5+650);共设车站17座,其中地下站14座,高架站3座,5座换乘站<sup>[8]</sup>。

### 1.2 评估范围

由于地铁建设涉及工程地质、水文地质、环境地质、灾害地质等问题,因此调查工作面积应适当拉大,并将拟建项目所在区域分为一般调查区和重点调查区(即评估区)。一般调查区范围以地铁中心线向南北两侧延伸1 000 m,在起点车场西侧边界和终点车场东侧边界向远离线路方向各扩展1 000 m;重点调查区相对线路向南北两侧各扩展500 m,始末车场向远离线路方向各扩展500 m。调查中心线长度29.8 km,总评估面积为27.8 km<sup>2</sup>,调查面积为59.6 km<sup>2</sup>。

## 2 综合评估量化评分方法

### 2.1 评估原则

在综合分析地质灾害危险性现状和未来发展趋势的基础上,围绕本工程致灾严重的主要灾害类型,结合拟建工程自身重要性及所处的岩土体工程地质类型,全面权衡、准确合理地划分地质灾害危险程度与危险性大小区带。

### 2.2 评估因子及其权重和分类取值

根据现状和预测评估结果,最终确定参与评估的因子及其权重和分级取值的大小(表1)。

表1 评价因子权重及分类取值

评价因子	权重	分级指标	分值
地 裂 缝	0.5	活动强烈,在线位上有近期活动致灾证据	100
		活动中等,在线位两侧500 m以内有近期活动致灾证据	70
		活动微弱,在线位两侧500 m外有近期活动致灾证据	40
地 面 沉 降	0.3	累计沉降量>2 000 mm,沉降速率>100 mm/a	100
		累计沉降量1 000~2 000 mm,沉降速率50~100 mm/a	70
		累计沉降量400~1 000 mm,沉降速率<50 mm/a	40
		累计沉降量<400 mm,沉降速率<50 mm/a	10
工 程 位 置 及 重 要 性	0.2	地下工程:换乘大站	100
		地下工程:一般站点	80
		地上工程:控制中心、变电站、车辆段、停车场	60
		地上工程:一般站点	40

本部分内容主要涉及以下关键问题:

(1) 量化评价因子的选取:评价因子的选取主要考虑地质灾害的致灾严重性和评估区域内建设工程主要遇到的地质灾害类型,同时适当考虑工程自身特点和重要性对发生地质灾害时致灾严重性的影响。本工程评估区范围内主要发育的地质灾害类型为地裂缝和地面沉降,而崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害普遍不发育,因此最后选取的评价因子为地裂缝、地面沉降和工程位置及重要性3项。

(2) 各评价因子权重的确定:评价因子权重的确定主要考虑其致灾的严重性以及与其他因子的比较性而综合给定。由于各项权重之和为1,所以权重的确定是综合比较各因子灾害效应大小之后的一种合理分配。根据上述原则,本次评估各因子

权重确定为:地裂缝 0.5,地面沉降 0.3,工程位置及重要性为 0.2。

(3)各评价因子项内分级及分值确定:根据灾害发育程度和活动性等的差异,各因子项内又可分为不同的等级,不同等级之间的差别主要反映在各自的分值取值上。分值一般可采用 100 分制,亦可采用 10 分制或 5 分制,各评价因子项最高等级的取值应该一致,既满分 100 分、10 分或 5 分;项内不同等级分值差别以能合理反映不同等级之间的致灾严重性差别为目的,不过大也不过小。同时,分值的取值还需考虑不同评价因子之间的协调性,即使具有相同致灾严重性因素的最终分值(考虑权重)基本相当。如活动性最强的地面沉降考虑权重的分值为 30 分( $100 \times 0.3$ ),与中等活动性地裂缝的分值 35 分( $70 \times 0.5$ )基本相当,应当说是合适的;活动性较小的地裂缝的分值 20 分( $40 \times 0.5$ ),与中等活动性的地面沉降的分值 21 分( $70 \times 0.3$ )基本相当,应当说是合理的;地下换乘大站的分值为 20 分( $100 \times 0.2$ ),与活动性较弱的地裂缝分值 20 分( $40 \times 0.5$ )相当,也是比较合适的。如果在上述分析中遇到分值不合理情况,应该对因子权重和等级分值同时进行调整。一般来说,因子权重的调整可根据各因子项最高等级分值之间的对比关系进行综合确定;在此基础上,再根据项间不同等级之间分值的对比分析来确定同一项内等级分值的差值。

2.3 各危险性等级评分取值范围确定

危险性等级根据适宜性原则,取用 3 级制,分别为:危险性大(Ⅰ级);危险性中等(Ⅱ级);危险性小(Ⅲ级)。同时,根据表 1,通过综合考虑,确定了各等级的分值范围:危险性大(Ⅰ级),大于 50 分;危险性中等(Ⅱ级),30~50 分;危险性小(Ⅲ级),小于 30 分。各级取值范围的确定原则和依据如下:

(1)在危险性大(Ⅰ级)的最低分值确定时,依据地裂缝“决定性”原则。即当地面沉降和工程因子均为零时,仅有活动强烈地裂缝即可构成 Ⅰ级危险性,由此确定的最低分值为 50 分( $100 \times 0.5$ )。在此基础上再通过不同的可能搭配来分析其合理性,如中等强度地裂缝和中等强度地面沉降结合应该可以构成 Ⅰ级危险性,其分值为 56 分( $70 \times 0.5 + 70 \times 0.3$ ),大于 50 分,合理;中等强度地裂缝和重要站点结合应该可以构成 Ⅰ级危险性,其分值为 55 分( $70 \times 0.5 + 100 \times 0.2$ ),大于 50 分,合理;强地面沉降和重要站点应该可以构成 Ⅰ级危险性,

其分值 50 分( $100 \times 0.3 + 100 \times 0.2$ ),合理。危险性小地裂缝、活动弱地面沉降和地下一般站点应该只能构成 Ⅲ级危险性,其分值为 48 分( $40 \times 0.5 + 40 \times 0.3 + 80 \times 0.2$ ),小于 50,合理。综上分析,危险性大等级(Ⅰ级)的最低分取值是比较合理的。

(2)在危险性中等和危险性小的界限分值确定时,也依据地裂缝的决定性原则再综合考虑其他可能搭配的合理性。首先,中等强度地裂缝独立应该可以构成中等危险性,其分值为 35 分( $70 \times 0.5$ ),因而其分值应该小于 35 分;其次,中等强度地面沉降独立应该比中等危险性要小,其分值为 21 分,故应大于 21 分;强地面沉降独立应该刚好处于界限附近,其值为 30 分。通过单元打分,发现 30 分附近的分值最接近的为 28 分和 32 分,28 分组成情况为弱地面沉降和地下一般站点,这种情况评为危险性小等级是比较合适的,32 分组成情况为危险性小地裂缝和重要的地下换乘大站,划分为中等危险性是合适的,但应该是中等危险性内危险性比较弱的。综合上述分析,最后确定危险性中等和危险性小的界限分值为 30 分。

2.4 具体评估方法和步骤

依据表 1 对评估区分块进行评分,在此评分基础上进行综合考虑,将评估区按工程线路走向进行地质灾害危险性分段。对地裂缝带的危险性分析则主要依据其对工程的危害性以及线路的位置关系综合评定。危险性分段的具体作法是:

(1)首先将评估区进行均匀网格剖分,每个单元的面积一般为  $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ 。本次将评估区共剖分出 236 个单元,对每个单元综合考虑地质灾害危险性现状评估和预测评估分析结果,参照表 1 分值标准,对每一项评价因子给出适当分值,并考虑评价因子权重计算出单元总分值。

(2)根据单元总分值以及综合评估的危险性等级划分和总分取值范围,初步确定单元的危险性等级。根据上述内容,本次评估危险性等级以及各自的分值范围确定如表 2。

表 2 危险性等级及其分值

Tab. 2 Risk Grades and Values

分值	灾害程度	危险性等级
> 50 分	地质灾害严重	危险性大(Ⅰ级)
30 ~ 50 分	地质灾害一般	危险性中等(Ⅱ级)
< 30 分	地质灾害轻微	危险性小(Ⅲ级)

(3)根据单元的危险性等级和分值综合考虑,

将等级和分值基本相当的单元进行合并,划入同一个危险性分区中。考虑本工程的线状特点,综合分区时的分区界线采用垂直于线路走向的控制断面,因此,同一断面上 4 个单元的最终危险性等级是一致的。

对同一断面的 4 个单元进行综合评定时,依据灾害与线路越近危险性越大的原则,规定如下等级划分方法:当与线路最近的 2 个单元分值高于较远的 2 个单元时,按较近单元分值给定此断面的综合危险性等级;当较远单元分值高于较近单元,且两者分值危险性存在等级差别时,按较远单元分值降一级给定此断面的危险性等级,如不存在等级差别,则按原等级给定。

如一个危险性分区仅包括同一断面的 4 个单元网格,即分区沿线路走向长度为 500 m 左右,则此分区通过综合考虑并入相邻 2 个分区中的 1 个,不再单独划分。但分区长度 1 km 以上者,为提高分区精度,需独立成区,不可并入相邻分区内。

## 2.5 地质灾害危险性综合评估结果

运用上述方法,最终将整个待评估区划分为 3 个危险性等级、9 个区段、7 个地裂缝危险性地带,即 1 区段:车辆段—桃园路口附近,为危险性小区段;2 区段,桃源路口—玉祥门盘道,为危险性大区段;3 区段,玉祥门盘道—许士庙街口,为危险性小区段;4 区段,许士庙街口—北新街街口,为危险性大区段;5 区段,北新街街口—康乐街口,为危险性中等区段;6 区段,康乐街口—长乐坡,为危险性大区段;7 区段,长乐坡—半坡,为危险性中等区段;8 区段,半坡—新寺,为危险性大区段;9 区段,新寺—停车场,为危险性小区段。3 个危险性大地裂缝带( $f_3$  西段, $f_5$ 、 $f_6$  东段东侧),3 个危险性中地裂缝带( $f_3$  东段, $f_4$ 、 $f_6$  东段西侧),1 个危险性小地裂缝带( $f_6$  西段)。

通过对分区结果分析,可以发现:

(1) 由于评估区域的地面沉降灾害危险性相对较轻,因此危险性分区等级主要决定于地裂缝灾害的影响,与其有较好的对应关系。从西往东,地铁沿线依次受  $f_3$  西段、 $f_3$  东段、 $f_4 \sim f_6$  东段西侧及  $f_6$  东段东侧的影响,基本上在活动较强烈的地裂缝与线路相交区域形成危险性大的区域,而相邻地裂缝之间的区域形成危险性相对较小的区域,两者交替出现。从总体来看,由于西段受地裂缝影响小,故其危险性整体小于中段和东段。

(2) 地质灾害严重,危险性大的(Ⅰ级)区段有 4 个(区段 2、区段 4、区段 6、区段 8),总长 8.0 km,占设计路线总长的 31.4%。区段受  $f_3$  西段、 $f_3$  东段、 $f_5$ 、 $f_6$  东段东侧地裂缝影响,且各条裂缝活动性危险性均较大,仅 4 区段的  $f_3$  东段为中等,但此处有北大街换乘大站。综合评估灾害分值大于 50 分,对地铁建设威胁严重。

(3) 地质灾害危害程度较大,危险性中等的(Ⅱ级)区段有 2 个,区段 5 和区段 7,总长 6.5 km,占线路总长度的 25.5%。区内发育  $f_4 \sim f_6$  西段及  $f_6$  东段西侧等地裂缝,总体情况是地裂缝活动性危险性小至中等,尽管  $f_5$ 、 $f_6$  西段的活动性较强,但其距线路较远,危险性降低,综合评估灾害分值为 30~50 分,对地铁建设威胁中等,较严重。

(4) 地质灾害危害程度轻微、危险性小的有 3 个区段,即 1 区段、3 区段和 9 区段。区段内几乎不遭受地裂缝影响,地面沉降影响也微弱,综合评估灾害分值小于 30 分,对地铁建设影响较小。

通过对分区结果的分析可以看出,笔者采用的量化评分方法可较好地反映各评价因子的综合影响,同时评价结果又与最主要的致灾灾种的分布具有良好的一致性和对应性。评分结果直观明了,评价结果合理可信。

## 3 结语

采用综合量化评分方法,对西安市地铁一号线地质灾害危险性进行了综合评估,并根据评估结果进行了危险等级的分段。通过理论和实例分析,可以获得如下认识:

(1) 评价因子应包括区内对拟建工程有较大影响的主要地质灾害类型,同时应考虑工程自身对灾害效应的影响。

(2) 评价因子权重的确定应在各因子致灾严重性比较的基础上进行合理的分配,各因子权重之和为 1;权重的合理性可通过不同因子最高等级分值之间的对比关系来考察。

(3) 各因子项内分级取值一般可采用百分制,各因子项最高等级取值应一致,项内各级之间的分值可采用能合理反映不同等级致灾严重性差别的等差数列。同时,分值的取值还需考虑不同评价因子之间的协调性,使具有相同致灾严重性因素的最终分值(考虑权重)基本相当。

(下转第 298 页)

在成层土体中,由于土层对结构的约束作用的大小不同,结构除产生一定量的整体沉降外还产生了一定的不均匀变形,这些变形会导致结构产生一定的扭转,在结构的内部产生剪切作用。

(2)地震荷载下结构的动力响应中,结构顶板处的主应力最大,加速度响应也最大,从分析结果看,结构的顶板、侧板及角隅处易发生破坏,因而在设计和施工中对这些部位要引起一定的重视。

地震动荷载作用下地铁结构与土体的相互作用是目前岩土工程研究的一个热点和难点。在这一分析的基础上,进行竖向地震荷载作用下隧道结构的反应分析及竖向和水平地震荷载耦合作用时地铁结构的反应分析、车站与隧道接口处在地震荷载作用下的反应分析是土与地下结构在动力荷载作用下需要进一步研究的课题,这些问题的解决对于地下结构的抗震设计会起到重要的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 门玉明,石玉玲.地裂缝研究中的若干重要科学问题[J].地球科学与环境学报,2008,30(2):172-176.
- [2] 长安大学.西安城市快速轨道交通2号线穿过地裂缝带的结构措施专题研究[R].西安:长安大学,2007.
- [3] GB 50157-2003,地下铁道施工及验收规范[S].
- [4] 李德寅,王邦楣,林亚超.结构模型试验[M].北京:科学出版社,1996.
- [5] 李凯玲,张亚,刘妮娜.土-地铁隧道动力相互作用模型试验分析[J].工程地质学报,2007,15(4):534-538.
- [6] 史良.黄土隧道抗震设计研究[D].西安:长安大学,2005.
- [7] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏.结构抗震实验方法[M].北京:科学出版社,2000.
- [8] 庄海洋.土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006.
- [9] 王国波.软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D].上海:同济大学,2007.

(上接第 294 页)

(4)危险性等级根据适宜性原则,一般取用级制,分别为危险性大(Ⅰ级)、危险性中等(Ⅱ级)和危险性小(Ⅲ级),关键在于如何根据表2确定各等级的界限分值。界限分值的选取需考虑最重要地质灾害类型的“决定性”,同时依据不同搭配组合的总评分值进行综合确定。

(5)具体评分方法可采用在网格分块评分基础上的综合评分法,网格大小可根据具体情况有所不同。对于线性工程,以不大于 $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ 为宜。

(6)在合理确定量化评分因子、权重、分值等因素的基础上,采用定量方法进行地质灾害危险性分析是可行的。其既可以考虑各灾种的综合影响,同时又可使评价者跳出纷繁复杂的多因素谜局,用一个简单明确的“分值”来评价地质灾害的危险程度。

当然,笔者仅以西安地铁一号线这一具体的线性地下工程的地质灾害评价为例,对量化评分方法进行了粗浅的理论探讨,所得出的结论也不一定具有“普适性”,相信随着定量方法的工程实践和理论

研究的深入,最终将会形成此方法的规范化和统一化,并以国家标准的形式在规范中予以明确。

#### 参考文献:

- [1] 国土资源部.地质灾害危险性评估技术要求(试行)[S].北京:国土资源部,2004.
- [2] 宗辉.地质灾害危险性评估的半定量评价方法[J].地质灾害与环境保护,2003,14(2):51-53.
- [3] 王国良.层次分析法在地质灾害危险性评估中的应用[J].西部探矿工程,2006(9):286-288.
- [4] 周建中,刘忠敏,张博.地质灾害危险性评估及其半定量分析法在罗家寨气田内部集输工程中的应用[J].中国煤田地质,2007,19(1):47-51.
- [5] 吴亚子.山区公路地质灾害危险性评估方法研究[D].成都:成都理工大学,2005.
- [6] 张会刚.西南山区水电站建设用地地质灾害危险性评估方法研究[D].成都:成都理工大学,2005.
- [7] 刘江波.建设项目地质灾害危险性评估分区定量方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2006.
- [8] 长安大学工程设计研究院.西安市地铁一号线(后围寨—纺织城)建设工程地质灾害危险性评估报告[R].西安:长安大学,2008.