

水下隧道盾构法施工安全风险评估探讨

卢浩,施焯辉,戎晓力

(中国人民解放军理工大学国防工程学院,南京 210007)

[摘要] 随着地铁、公路等交通隧道的不断发展,隧道往往穿越江河湖泊等水体,大直径泥水平衡盾构广泛应用于水下隧道施工。大直径盾构施工风险高、控制难度大,加上水下施工不确定因素多,风险因素具有不断动态变化的特点,使得施工过程中存在较大的风险。风险评估越来越多地应用于水下隧道施工安全管理中。本文介绍了大直径泥水盾构的几个特点,并对这几个特点引起风险增大的机理进行了分析,针对风险评估常用的几种方法中存在的不足,提出了一种适用于类似工程的指数法,给出了该方法的评估流程及基本计算模型,并将该方法初步应用于某水下隧道施工风险评估。该方法能够适应风险因素的变化,并且不拘泥于真实概率,通过进一步的细化和完善,能够更好地适用于水下隧道施工安全风险评估。

[关键词] 水下隧道;安全风险;动态评估

[中图分类号] U459.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0091-06

1 前言

随着城市地铁隧道、越江跨海交通隧道、水利水电隧道、市政公用隧道的陆续建设和发展,隧道不时需要从江、河底下穿越,以满足地下交通线路走向的需要^[1,2]。21世纪以来,多个越江越河隧道工程相继动工,据统计数据表明,目前我国列入计划的仅长江流域的地铁、公路等水下隧道就达20条以上。随着盾构技术日益完善,盾构在世界隧道建设特别是水底隧道施工中已经占据了主要的地位,并在欧、美、日等国家隧道得到了广泛应用^[3]。面对穿越江河地区软土土层的隧道工程,盾构法以其机械化程度高、掘进速度快、周围环境影响小、施工安全等优势,成为地下隧道建设的首选施工方法^[4]。

然而即使采用机械化程度比较高的盾构法施工,水下隧道依然存在很多安全隐患。由于水下隧道存在地下水丰富、水底地质条件复杂以及地质勘察的局限性等特点,难以掌握水底土层条件,比如隧道埋深的变化,由于河流、江水的冲击作用,水底受到不断的冲刷,就会造成埋深不断变化,采用泥

水盾构法施工时就会给泥水压力的设定增加难度。另外,由于盾构机水下施工时客观条件的限制,倘若设备出现严重问题,将难以像在地面一样进行相应的处理,使得过江施工与平常施工面对的风险和遇到的问题均有所不同。

近年来,国内很多学者针对水下隧道施工安全风险大的特点,做了很多风险评估的工作^[5-10],对于推动水下隧道施工安全管理起到了很大的作用,然而这些风险评估大都局限于定性的风险评估,即对于识别出来的风险采用专家调查法等方法进行风险可能性及后果等级的判定,这种方法难以体现风险的各个因素(或指标)在对于风险大小改变的作用。本文从水下隧道的特点出发,研究这些特点对于风险大小的影响机理,结合工程实际,提出一种操作性强的风险评估方法,并对水下隧道施工过程的动态控制提出合理的建议。

2 水下隧道施工的特点

2.1 隧道断面大

由于水下隧道联络通道施工风险大,设计大都

[收稿日期] 2013-03-15

[基金项目] 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(51021001)

[作者简介] 卢浩(1987—),男,安徽六安市人,博士研究生,研究方向为地下工程安全风险管埋;E-mail:lh829829@163.com

选择单圆双线,采用大直径盾构(直径大于10 m)施工,比如武汉长江越江隧道工程盾构直径11.5 m,上海长江口崇明越江隧道直径15.43 m,南京纬七路过江隧道盾构直径15.4 m,南京地铁3号线过江段盾构直径11.64 m,这些隧道采用盾构机的直径大于10 m。大直径盾构机施工中会带来一系列的问题。

1)刀盘上下面的高差大,开挖面可能穿越多种土层,由于不同土层的物理力学参数等性质各不相同,导致刀盘切削土层软硬不均,使盾构开挖面的泥水压力、扭矩、千斤顶推力等参数控制困难大,且对施工中盾构的操作和姿态控制难度更大。

2)开挖面极限支护应力比增大,加大开挖面失稳的可能性。

图1为在一定的土体参数、地下水水位、埋深的情况下,开挖面极限支护应力比随隧道直径改变而变化的曲线图。由图1可见,随着直径的增大,开挖面极限应力支护比不断增加,对泥水压力的控制要求也越高,在相同的技术水平下,开挖面失稳的可能性也会增大。

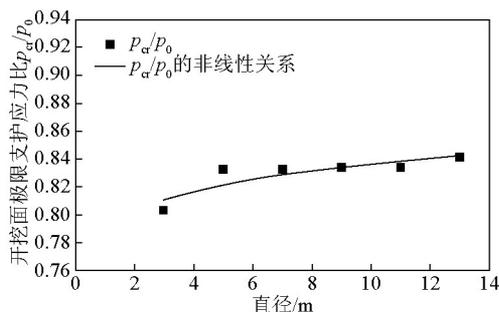


图1 极限支护应力比随隧道直径改变的变化图
Fig.1 Change curve of limit support stress ratio with the tunnel diameter

3)增大地表沉降的可能性。地表沉降预测常用peck公式

$$s = \frac{V_i}{\sqrt{2\pi i}} \times \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中, V_i 为土体损失,不考虑超挖的情况下,土体损失主要考虑是盾构机与管片之间的孔隙,由下面公式可得

$$V_i = \pi \times \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D-a}{2}\right)^2 \right] = \frac{\pi}{4} \times a \times (2D-a) \quad (2)$$

式(2)中, D 为盾构机直径, a 为盾构机直径与管片外径之差。由公式可以看出,随着盾构直径的增加,土体损失量就会不断增大,导致地表沉降量增大。

4)加大隧道上浮的可能性。水下隧道施工中,由于隧道管片处于地下水、浆液的包围中,浮力作用可能导致隧道上浮,从管片的受力分析来看,浮力与管片自重重力之差越大,上浮的可能性就越大。对于单位长度的管片来说,浮力表示为 $F_{浮} = \rho g V = \rho g \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$, 管片重力表示为 $G = \rho_{管片} g \pi \left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D-d}{2}\right)^2\right]$ (D 为盾构直径, d 为管片的厚度)。取 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{管片} = 2450 \text{ kg/m}^3$, $d = 0.3 \text{ m}$,可以得到浮力与重力之差与盾构直径之间的关系图。由图2可知,盾构直径越大,管片所受到的浮力越大,浮力与重力之间的差值也越大,继而隧道上浮的可能性也会增大。

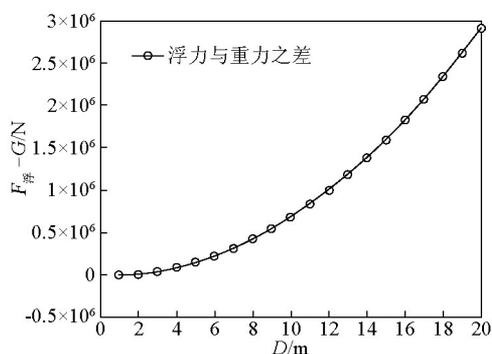


图2 浮力与重力之差值与盾构直径之间的关系图
Fig.2 Relationship between the diameter of shield and difference of buoyancy and gravity

5)增大刀具磨损。盾构机直径会影响刀具的磨损,刀具磨损经验公式

$$\delta = \frac{L \cdot k \cdot n \cdot \pi \cdot D}{v} \quad (3)$$

式(3)中, L 为掘进距离; k 为摩擦系数; n 为刀盘转速; D 为刀具挖掘外径; v 为掘进速度。

从公式(3)可以看出,刀具磨损量与盾构机直径成正比,随着盾构机直径的增大,地层对刀具的性能要求就越高。

2.2 长距离施工

除了大直径的特点,水下隧道掘进距离一般都比较长,工程上一般将一次性掘进距离大于2 km称为长距离掘进。而水下隧道由于其环境特点,掘进距离大都大于2 km,比如南京地铁3、10号线过江段掘进距离都超过3 km,南京纬七路过江隧道全长2932 m,上海长江隧道工程东线隧道长度为7471.65 m,江中段长度为6872.37 m;西线隧道长度为7469.36 m,

其中江中段长度为6 854.91 m。采用大直径盾构一次性超长距离推进,施工中盾构的主轴承的耐磨与密封、刀具和盾尾密封刷等将面临巨大的风险。根据上述公式可知,刀具磨损与掘进距离成正比,随着盾构掘进距离的增大,盾尾密封刷的磨损也将不断增大,在盾尾密封刷发生磨损或损坏以至于必须更换时,在水下隧道高水压的作用环境下,盾构的防水密封风险较大,极有可能发生隧道内大量进水的情况。

2.3 高水压施工

水下隧道施工避免不了承受高水压作用,南京地铁3号线、10号线施工开挖面中需承受最高水压达6 bar。高水压施工就会带来一系列的问题,比如开挖面的稳定性,开挖面极限支护应力比与江水深度的关系如图3所示。由图3可以看出,随着江水深度的不断增加,开挖面极限支护应力比不断增大,对开挖面的泥水压力控制要求也越高。

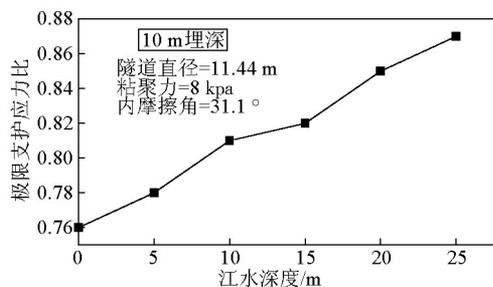


图3 开挖面极限支护应力比与江水深度的关系

Fig.3 The relationship between limit support stress ratio and the depth of river

此外,高水压还会对盾尾密封,管片接头密封,主轴承密封提出更高的要求。

2.4 穿越大堤

水底隧道特别是城市过江隧道,不免要穿越大堤,由于过江大堤防工程大都由抛石护坡加固改造而成,其抗变形的能力比较差,对于施工控制要求比较高(文献研究表明,大堤沉降控制在20 mm),并且大堤的重要性等级比较高,一旦受到破坏,后果将十分严重。

3 风险辨识

根据风险发生的对象不同,可以将风险事件分为两大类:自身风险事件和环境风险事件。同时,根据泥水盾构隧道施工不同风险事件发生的阶段,

又可以将风险事件划分为:盾构始发阶段、盾构掘进阶段和盾构到达阶段。总结国内外以往长大泥水盾构隧道工程经验和事故案例,得出大型泥水盾构隧道施工过程中可能存在的自身风险事件如表1所示。

表1 自身风险事件辨识表

Table 1 The identification of risk events

风险类型	风险名称
盾构掘进风险	工作面失稳、冒顶;刀盘刀具磨损严重;大轴承断裂;主轴承密封件失效;千斤顶推进故障;泥饼风险事件;盾构轴线偏差过大;吸泥仓吸泥口堵塞;盾尾密封失效;管片接头漏水漏浆;管片损坏或拼装不准;管片上浮过大
盾构始发风险	盾构出洞偏离轴线大;基座变形损坏;后靠变形损坏;洞口水土大量流失;洞门破除时土体坍塌;泥水平衡建立困难
盾构到达风险	盾构进洞偏离轴线大;洞口水土大量流失;洞门破除时土体坍塌

4 风险评估的方法

4.1 风险评估方法介绍

风险评估方法主要有定性风险评估、定量风险评估以及半定量的风险评估方法3种,目前水下隧道施工安全风险评估大都采用定性的分析方法^[7-9],多数文献仅仅依据风险等级划分原则,直接评价出风险发生的可能性等级以及后果等级。黄宏伟等^[10,11]采用事故树等定量的风险评估方法进行评估,首先收集相关数据,得出事故树基本事件的发生概率,再根据事故树的计算方法得出顶事件的发生概率。无论是定性分析方法还是定量分析方法都在工程中得到了一定的应用,为推动风险管理的发展起到了一定的推动作用。但是从这些风险评估方法在工程中应用效果来看,在风险评估与工程的结合、方法的可操作性等方面存在一些问题。

对于定性的风险评估方法来说,存在以下几个方面的不足:一是定性的分析方法往往采用专家调查法,邀请一些专家对风险进行可能性等级以及后果等级的打分,然后对打分结果进行综合而获取,根据笔者的经历,即使邀请一批对该工程非常了解的专家进行打分,调查出来的结果也往往是很不收敛的,这样综合出来的结果可信性必然不强;其次,定性的风险评估难以应对风险的动态变化,因为在

施工的过程,有些风险因素会随着外界环境的变化而变化,比如过江隧道中江水水位的变化,江底地形的变化等,此时风险事件的概率或后果也会随之改变,如果变化在一定范围内,一般的定性分析方法对于这种改变难以及时调整。

对于现阶段采用的定量风险评估方法,2011年发布的《城市轨道交通地下工程建设安全风险管理规范》^[12]对风险发生的概率等级进行划分,划分的依据是风险发生真实概率的大小。然而在实际应用中发现:由于隧道与地下工程项目的风险因素、影响范围、发生机理及潜在的破坏机制及其破坏力错综复杂,用概率方法研究隧道与地下工程风险问题时,很难判断一个人为的概率分布假设是否合适,而且经常会遇到小样本问题,要想获得事故发生的真实概率,是一项非常困难、几乎是不可能完成的工作。这就使得定量风险评估方法变得难以操作。

鉴于以上的分析,可以得出以下几个结论。

1)风险评估方法中必须要建立影响风险事件的风险指标与风险事件发生可能性之间的量化关系,这样风险评估才具有可操作性,并且对于风险因素的变化,可以通过调整指标的大小来实现对于风险事件的影响。

2)鉴于风险事件真实发生概率获取的难度,风险评估中避免不了有定性因素的存在,但是在风险评估的过程中,有必要采取一些可行的措施去降低主观因素带来的不利影响,比如现有的研究成果、数值试验、现场试验分析验证等。

3)风险评估模型一定要结合现场的施工特点进行,能够适应地层条件、设计方案、施工方法、施工技术水平等条件的变化。也就是说有其中一项变化,风险也应该随之而变化。

4.2 肯特指数法风险评估

根据上面提出的要求,借鉴肯特在管道运行风险评估中应用指数评估法,并对该方法进行改进,建立一套满足上述3条要求的隧道施工风险评估模型。

肯特^[13]在管道运行风险评估中认为管道事故是无法精确预测的,风险评估不需要按照概率理论进行精确计算,他采用指数代替真实概率值的方法,在风险打分方法上越过了定量评估中的实际概率打分,且指数中包含了概率的因素,又不拘泥于确切的概率,具有比较好的说服力。

1)指数分类。根据地铁施工中事故发生机理,

对于一个灾害事件来说,究其发生的原因,可以归类于3类因素:隧道自身条件(包括工程地质条件、水文地质条件、隧道自身参数如转弯半径、直径、坡度等)、设计因素、施工因素。并且这3类因素之间是一个链性关系,其中任何一个发生变化,都会导致风险的变化。比如盾构进出洞时可能出现水土大量流失事故,风险发生的基本原因是盾构进出洞地层自稳性差、地下水位高,不然不会出现水土流失的现象,在这个地层因素的基础上,如果地层加固设计不当、施工中管理操作失误的话,风险才会发生。

根据上述分析,将指数分为4大类:基本指数、设计指数、施工指数、后果指数。

基本指数是指工程自身所具有的特性,具有难以改变性,这种特性超越操作人员所能控制的范围。一般来说,这种指数是在地铁线路选形完成后就可以获取的,类似这样常规不能改变的指数有:工程水文条件、工程地质条件、周边环境条件、隧道自身参数(包括隧道长度、隧道坡度、转弯半径等)。

设计指数,这里所说的设计是指在基本指数的基础上为了预防基本指数带来的风险或者为施工提供便利而进行的设计,它是进行施工的前提,为施工提供指导。

施工指数侧重于施工期间的管理和操作,主要包括施工方法的选用、施工技术水平、工期影响、外界环境以及施工预控措施5个方面。

后果指数具体为5个方面:环境影响、经济影响、社会影响、人员伤亡影响。

2)基本计算模型。一般风险评估的基本模型

$$R=f(p,c)$$

式中, R 为风险值; p 为事故出现的概率; c 为事故产生的后果。 f 是算子,表示 p 与 c 之间的组合形式,这个组合形式是可变的,由实际情况和现实条件以及决策者的需要来选择。

指数法评估模型没有脱离这个基本模型,结合风险评估的基本模型,构建指数法评估模型

$$R=p \times c, \text{ 其中 } p=f_2(B, D, C),$$

$$c=f_3(\text{后果指数})$$

式中, B 为基本指数; D 为设计指数; C 为施工指数。在这里 p 代表的不是一个确切的概率,而是概率指数,也就是说 p 的取值范围不是在0与1之间的一个概率值,但是这个值中包含的有概率的意义,就是说,确切的概率值与该值是成正相关关系的,

该值越大,风险发生的概率越大,该值越小,相应的风险概率也越小。基本指数、设计指数、施工指数共同构成了概率指数,后果指数代表了风险损失(如图4所示)。

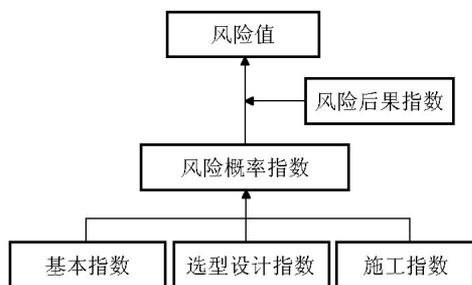


图4 改进的指数模型
Fig.4 Improved index model

基本指数、选型设计指数与施工指数共同作用影响风险概率指数,鉴于选型设计指数、施工指数对风险概率的影响,引入设计系数 D_k 及施工系数 S_k 。设计系数 D_k =设计指数/设计标准值;施工系数 S_k =施工指数/施工标准值。其中设计标准值、施工标准值是人为规定的一个定值。

该模式的计算模型为

$$p = B \times D_k \times C_k$$

设计系数、施工系数的值分别在1的左右,若它们大于1,表明设计、施工会增大事故风险概率指数,加大事故风险发生的可能性;若小于1,表明它们会降低事故发生的概率。

5 工程应用

对于识别出来的风险事件,首先要对该风险进行分析,认识其发生机理,然后再进行风险评估,事故树的分析方法是认识事故发生机理的常用方法,常与其他风险评价方法结合使用。这里可以通过事故树分解分析,得到事故发生的基本事件,而通过事故树的基本事件寻找这些基本事件和各指数之间的相关关系,为该风险事件相关指数类型及指标的确定提供依据,在风险事件各相关指数的指标确定之后,建立打分规则,进而进行评价。

该方法在南京地铁某过江隧道施工中进行了应用,该隧道划分为7个掘进段,图5为盾构掘进段-1各风险的概率指数及后果指数的分布图;图6为盾构掘进段-1各风险的风险值的分布图;图7为刀盘刀具磨损风险在各掘进段的分布图。

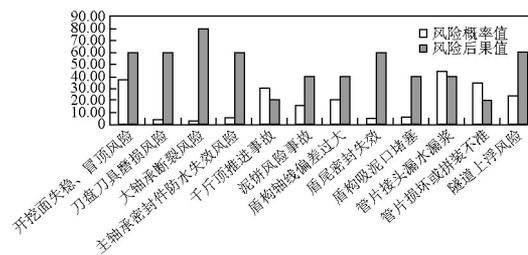


图5 掘进段-1风险概率指数及后果指数
Fig.5 Risk probability index and consequence index in section 1

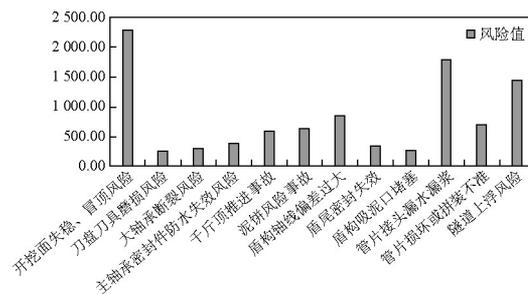


图6 掘进段-1风险指数
Fig.6 Risk index in section 1

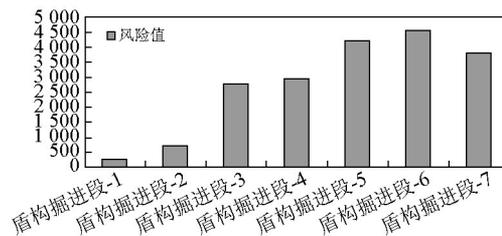


图7 风险在各掘进段的分布图
Fig.7 The risk distribution of each tunnel section

因为该风险评估方法将风险事件的风险值直接与4类指数的指标值相关联,一旦指标值改变,风险值也会相应发生改变,在施工的一些工况(比如江水深度、埋深、设计方案、工期紧张程度等)改变的情况下,风险值能够发生相应的变化。

6 结语

文章介绍了水下隧道施工的特点,研究了这些特点对施工风险的作用,并针对水下隧道施工中风险因素多、变化大的特点,分析了当前定性风险评估方法与工程的不适应性,得出以下结论。

1)风险评估既要与施工工况紧密结合,又不能盲目追求绝对的定量评价,文章提出的肯特指数法模型综合地质、隧道尺寸、设计方案、施工方法、影

响后果等因素,与水下隧道建设各环节紧密联系;且该模型通过对各个指数打分得出风险值大小,适用于施工中的动态风险评价。

2)与肯特在石油管道中的指数法相比,本文的计算模型有了一定的变化,在实际工程中,有时会出现这种情况:事故经常发生在预计不会发生事故的地方或时间。这就表明一类指数的变化能在很大程度上改变风险的大小,所以采用基本指数×设计系数×施工系数×后果指数的计算形式,使得分值变化范围更大,更符合实际工况。

3)与一般的评价方法相似的是,确定权重是肯特指数法中确立打分规则前的一项必要工作,在确立权重的时候,需要借助理论分析、数值模拟、试验等方法提供依据。在风险评估过程中,除了本文介绍的内容外,还需要建立指数法的风险接受准则,风险接受准则的建立是一项非常复杂的工作,需要在工程中边应用边完善。

参考文献

[1] 吴贤国,吴刚,骆汉宾.武汉长江隧道工程盾构施工风险研究

- [J]. 中国市政工程,2007(1):51-53.
- [2] 黄宏伟,彭铭,胡群芳.上海长江隧道工程风险评估研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(1):182-187.
- [3] 尹旅超.日本盾构隧道新技术[M].武汉:华中理工大学出版社,1999.
- [4] 马可栓,丁烈云,彭畅.越江隧道泥水盾构施工引起土层移动的有限元分析[J].西安交通大学学报,2007,41(9):1119-1123.
- [5] 黄清飞.砂卵石地层盾构刀盘刀具与土相互作用及其选型设计研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [6] 罗伟雄.盾构法过江隧道施工的风险及对策[J].施工技术,2005(9):67-69.
- [7] 潘学政,陈国强,彭铭.钱江特大隧道盾构推进段施工风险评估[J].地下空间与工程学报,2007,3(7):1245-1254.
- [8] 季玉国.江海盾构隧道施工风险分析与评价[J].探矿工程,2008(6):76-79.
- [9] 安政拥,季玉国.大型越江盾构隧道施工安全与风险管理探讨[J].探矿工程,2008(12):78-83.
- [10] 吴贤国,王锋. $R=P \times C$ 法评价水下盾构隧道施工风险[J].华中科技大学学报(城市科学版),2005,22(4):44-46.
- [11] 李罡,黄宏伟.超大直径盾构水中进洞风险分析[J].地下空间与工程学报,2009(5):1422-1426.
- [12] GB 50652—2011.城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S].2001.
- [13] Kent W Muhlbauer. Pipeline Risk Management Manual Ideas, Techniques, and Resources [M]. Third Edition. USA: Gulf Professional Publishing,2004.

Discussion on safety risk assessment of shield construction in underwater tunnel

Lu hao, Shi Yehui, Rong Xiaoli

(Defence Engineering School, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

[Abstract] With the unceasing development of the traffic tunnels in subway and highway engineering, sometimes the tunnels pass through rivers or lakes, so slurry shield method with large diameter is often used in the underwater tunnel construction. The underwater tunnel with large diameter has the characteristics of high risk, difficult to control, more uncertain risk factors, which will cause greater risk in construction process. Risk assessment is more and more applied in underwater tunnel construction safe management. The characteristics of using slurry shield with large diameter in underwater tunnel were introduced in this paper, and the mechanism that how the characteristics arouse the increase of risk was analyzed. According to the disadvantages of previous risk assessment methods, an improved index method was put forward, and the assessment process and main calculate model of this method were given. This method has been used in an underwater tunnel in Nanjing subway engineering, the application results show that this method can adapt the dynamic change of risk factors and it can be better applied in underwater tunnel construction safety risk assessment.

[Key words] underwater tunnel; safety risk; dynamic assessment