

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2324-07

复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析

黄宏伟¹, 闫玉茹¹, 胡群芳²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘 要: 通过对复合式土压平衡盾构刀盘失效的事故种类及原因的分析与总结, 应用故障树分析 (FTA) 方法对刀盘失效风险进行了研究, 建立了刀盘面板、刀具和其他刀盘体系的故障树系统模型。通过定性与定量分析, 讨论了各项风险事故的潜在失效模式和影响因素。结合具体工程进行了应用, 并提出了针对性的控制措施。研究有助于复合式土压平衡盾构刀盘的设计、施工的决策与控制。

关 键 词: 复合式土压平衡盾构; 刀盘失效风险; 故障树分析

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Risk analysis of cutter head failure of composite EPB shield

HUANG Hong-wei¹, YAN Yu-ru¹, HU Qun-fang²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Shanghai 200092, China)

Abstract: All kinds of accident examples and their potential reasons are analyzed and summarized for cutter head failure of composite earth pressure balance (EPB) shield. In order to research the mechanism of the failure mode on cutter disc, cutters and other different cutting components in composite EPB shield machine, fault tree analysis (FTA) is applied to establishing an analytical model on cutter head failure. Firstly, potential failure modes and effect factors of different failures are all analyzed and calculated by set theory in qualitative and quantitative methods. Then, relevant control measures are proposed to reduce the cutter head failure of composite EPB shield. The results will be useful for cutter head design and construction by composite EPB shield in China.

Key words: composite EPB shield; risk of cutter head failure; fault tree analysis (FTA)

1 引 言

随着盾构机制造技术的发展, 盾构机的适应地层范围越来越广。盾构技术不仅在比较均匀、单一的土层得到广泛应用, 也在各种软硬交替的复合地层中得到了大量的应用。例如, 广州地铁建设中大量采用了复合式盾构机, 广州地铁 2 号线和 3 号线中所引进的复合式盾构机约占盾构总数的 80 % 以上^[1]。然而盾构施工中存在着风险^[2], 复合式土压平衡盾构机在掘进过程中, 刀盘的风险事故率占到盾构总体风险事故的一半以上^[3], 主要风险事故有: 刀具磨损、刀盘体磨损, 个别恶劣的情况下刀盘体也会发生变形, 这些事故使盾构的开挖效率和刀盘使用寿命大大降低, 刀具也发生严重损坏。据统计, 国内复合式土压平衡盾构施工中, 刀具磨损失效在工程中都有不同程度的出现^[4], 其中 23 例非刀具失

效的刀头事故案例中, 刀盘事故频率高达 69.6 % (其中: 结泥饼为 34.8 %, 刀盘变形为 17.4 %, 刀盘被卡为 8.7 %, 刀盘磨损/断裂为 8.7 %), 轴承损坏事故频率为 21.6 %, 渣土改良系统事故频率为 4.4 %, 遇到地下异物的事故频率为 4.4 %。国外也有类似工程风险事故案例, 如在新加坡 Kranji 隧道 (深排污隧道的一部分) 施工中, 沿线地质为复合地层, 采用了两台 EPB 盾构机, 施工中出现了严重的刀具磨损^[5]; 德国威悉河隧道第 1 条管道开挖时, 发生了结泥饼的现象, 使滚刀发生了偏磨^[6]; 波尔图地铁的 Agosto 车站附近的 EPB 刀盘磨损严重, 用了 6 个多星期进行维修^[7]。对磨损刀盘、刀具的检修与更换, 一方面增加了隧道建设的工程费用, 另一方面延长了隧道建设的工期。因此, 研究复合式土压平衡盾构机刀盘失效风险具有重要意义。

本文采用故障树分析方法 (fault tree analysis,

收稿日期: 2007-11-27

基金项目: 2006 年国家“863”项目 (No. 2006AA11Z118) 国家自然科学基金项目 (No. 50879058)。

第一作者简介: 黄宏伟, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程动态信息化施工、风险管理与评估、软土隧道长期沉降方面的研究。E-mail: huanghw@tongji.edu.cn

简称 FTA) 对复合式土压平衡盾构 (composite EPB shield) 的刀盘失效问题进行分析, 研究刀盘失效风险发生的机制及其影响因素, 评估各项影响因素的重要程度, 并以此提出减少刀盘失效的措施, 文中研究工作可为复合式土压平衡盾构施工技术的发展提供参考。

2 复合式 EPB 盾构刀盘失效现状

土压平衡盾构工作原理是利用液压 (电动) 马

达驱动刀盘旋转来切削围岩, 并通过给土压舱之间充满的、经过搅拌的渣土加压来稳定工作面。一般根据不同的工程截面尺寸、不同的水文地质条件, 在刀盘上设置不同数量、不同类型的刀具来进行开挖, 同时利用螺旋输送机排土来控制并保持舱内土压在设计允许范围内。分析盾构刀盘失效主要考虑面板失效、刀具失效、其他系统失效等三部分, 具体工程事故案例见表 1、图 1。

表 1 刀盘事故案例
Table 1 The cases of cutter head failure

名称	案例	案例描述
面板失效	广州地铁 2 号线海珠广场站—市二宫区间 ^[4]	由于过江时多次出现严重结泥饼, 平均日进不足 2 m, 掘进速度仅达到 0~0.5 mm/min。
	先锋 1 号盾构机在深圳地铁福—会区间施工 ^[7]	从 497~498 环共掘进 1.5 m 左右, 由于从 27~28 号刀位到 36~38 号范围内的滚刀全部损坏, 造成所有的刮刀、切刀及其刀座与部分区域的刀盘面板被严重磨损。
	洛杉矶 ECIS 工程	刀盘边缘发生了磨损, 镀层磨损 2 cm, 且刀盘结构也磨损了 2 cm。这些磨损加大了盾构推力、降低了盾构的掘进速度, 地下维修工作使工期延长了几个月。
刀具失效	深圳地铁 1 号线某工地 ^[4]	由于风化后的岩层和额定内的总推力无法提供使滚刀滚动的摩擦力, 滚刀无法转动而发生偏磨, 在掘进不足 10 m 的情况下, 致使 25 把滚刀损坏。
	广州地铁 1 号线中山七路—西门口区间 ^[4]	白垩系三水区康乐段的中风化砂岩的岩石强度为 20~44 MPa。盾构机在通过此段地层时, 在 80 m 的范围内, 盾构机损坏了 58 % 的滚刀、51 % 的刮刀。
	广州地铁 3 号线天河客运站—华师区间 ^[4]	在中、微风化花岗岩掘进时, 盾构机仅前进了 4 环 (6.0 m) 就将大部分滚刀磨损了, 不得不停机换刀。
其他系统失效	新加坡 Kranji 隧道 ^[5]	沿线地质为复合地层, 采用了两台 EPB 盾构机, 施工中出现了严重的刀具磨损。
	广州地铁 1 号线 ^[4]	公园前到烈士陵园盾构区间大轴承严重损伤, 其原因是盾构机一个小齿轮的爆裂, 从而导致大齿圈的几个齿断裂, 并使大轴承严重变形漏油。
	先锋 1 号盾构机在通过深圳地铁福—会区间竖井回填段 ^[8]	由于土舱内温度过高 (刀盘中心部位达到了 100 ℃), 超过了刀具密封能承受的最高温度, 造成部分刀具因润滑油泄露而导致轴承损坏, 致使刀圈弦磨、断裂。



图 1 刀盘事故照片
Fig.1 The photos of cutter head failure

3 刀盘失效风险的故障树分析

3.1 故障树分析概述

FTA 是一种评价复杂系统可靠性与失效的方法^[9-10], 利用故障树进行分析, 不仅能分析出事故的直接原因, 而且能深入提示事故的潜在发生机制, 直接提出事故防范的措施。FTA 解决问题的步骤大致如图 2 所示。

3.2 刀盘失效的故障树绘制

为了研究复合式 EPB 盾构刀盘失效风险问题, 分析中进行了以下假定:

- (1) 不考虑工程施工对周围建筑、路面、地下管线等的不利影响;
- (2) 盾构推进过程中切刀和刮刀一般发生的是

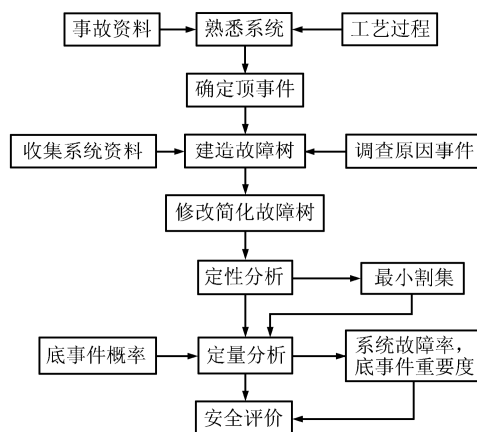


图 2 故障树分析法 (FTA) 流程
Fig.2 The flowchart of FTA

正常磨损, 本文也不予考虑。

根据上述事故调研资料, 编制的复合式 EPB 盾

(3) 选取的事故分析各基本事件之间相互独立。 构刀盘失效风险故障树见图 3。

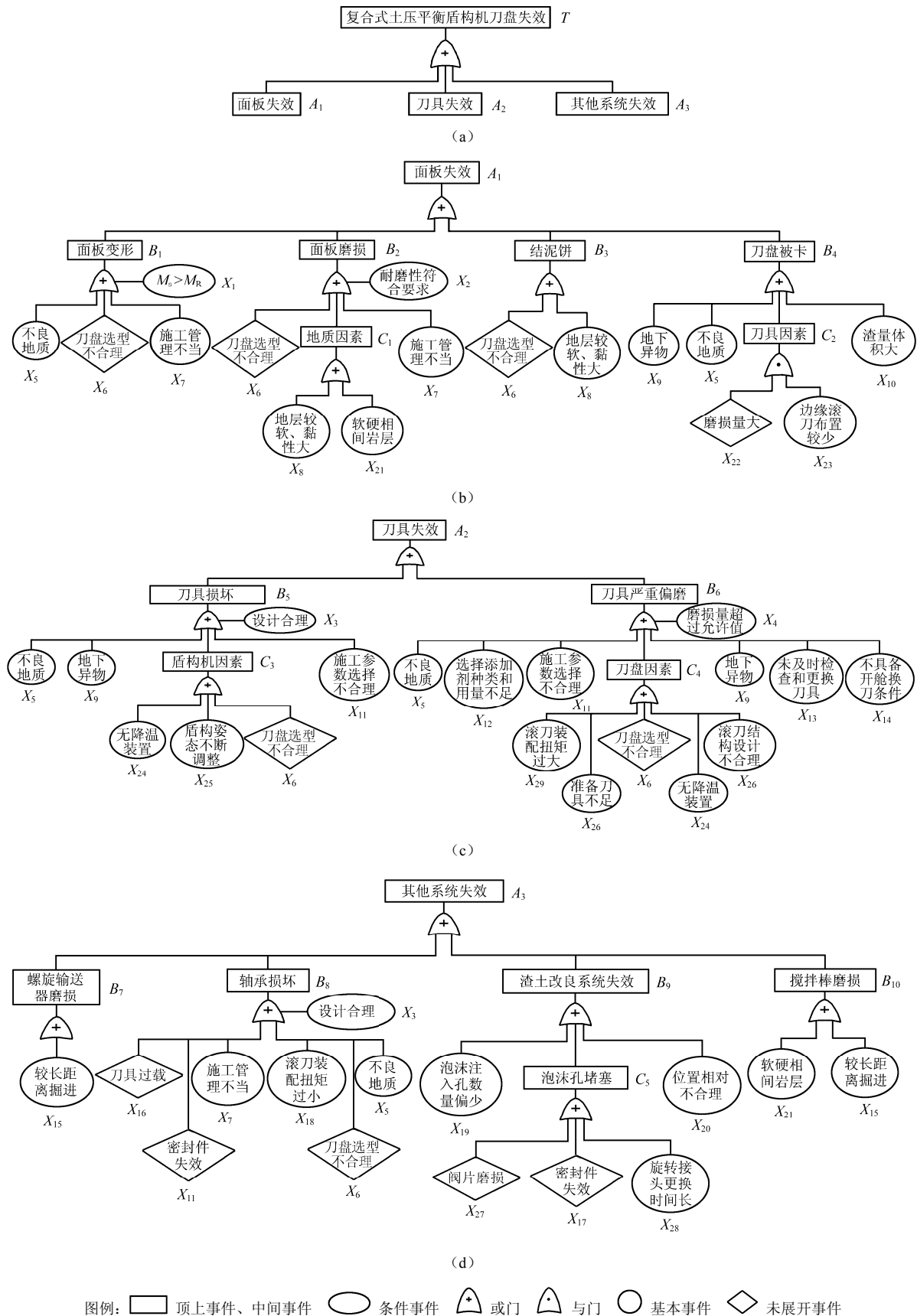


图 3 复合式 EPB 盾构刀盘失效风险故障树

Fig.3 FTA model for the risk of cutter head failure of composite EPB shield

3.3 故障树的定性分析

所建故障树分析模型中顶上事件的基本事件有 28 个, 根据布尔代数规则, 顶事件 T 以最小割集的并集形式表示, 计算图 3 中故障树的最小割集如下:

$$\begin{aligned} T = & A_1 + A_2 + A_3 = \\ & (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) + (B_5 + B_6) + (B_7 + B_8 + B_9 + B_{10}) = \\ & [X_1(X_5 + X_6 + X_7) + X_2(X_6 + C_1 + X_7) + (X_6 + X_8) + \\ & (X_9 + X_5 + C_2 + X_{10})] + [X_3(X_5 + X_9 + C_3 + X_{11}) + \\ & X_4(X_5 + X_{12} + X_{11} + C_4 + X_9 + X_{13} + X_{14})] + \\ & [X_{15} + X_3(X_{16} + X_{11} + X_7 + X_{18} + X_6 + X_5) + \\ & (X_{19} + C_5 + X_{20}) + X_{21} + X_{15}] = [X_1(X_5 + X_6 + X_7) + \\ & X_2(X_6 + X_8 + X_{21} + X_7) + (X_6 + X_8) + (X_9 + X_5 + \\ & X_{22}X_{23} + X_{10})] + [X_3(X_5 + X_9 + X_{24} + X_{25} + X_6 + X_{11}) + \\ & X_4(X_5 + X_{12} + X_{11} + X_{29} + X_{26} + X_6 + X_{24} + X_{26} + \\ & X_9 + X_{13} + X_{14})] + [X_{15} + X_3(X_{16} + X_{11} + X_7 + X_{18} + \\ & X_6 + X_5) + (X_{19} + X_{27} + X_{17} + X_{28} + X_{20}) + X_{21} + X_{15}] = \\ & X_1X_7 + X_2X_7 + X_3X_7 + X_3X_{11} + X_3X_{16} + X_3X_{18} + \\ & X_3X_{24} + X_3X_{25} + X_4X_{11} + X_4X_{12} + X_4X_{13} + X_4X_{14} + \\ & X_4X_{24} + X_4X_{26} + X_4X_{29} + X_{22}X_{23} + X_5 + X_6 + X_8 + X_9 \\ & + X_{10} + X_{15} + X_{17} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{27} + X_{28} \end{aligned} \quad (1)$$

通过故障树的布尔运算得其最小割集为 28 个, 即 $\{X_1X_7\}, \{X_2X_7\}, \{X_3X_7\}, \{X_3X_{11}\}, \{X_3X_{16}\}, \{X_3X_{18}\}, \{X_3X_{24}\}, \{X_3X_{25}\}, \{X_4X_{11}\}, \{X_4X_{12}\}, \{X_4X_{13}\}, \{X_4X_{14}\}, \{X_4X_{24}\}, \{X_4X_{26}\}, \{X_4X_{29}\}, \{X_{22}X_{23}\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{15}\}, \{X_{17}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}, \{X_{27}\}, \{X_{28}\}$ 。

通过最小割集可知, 导致顶事件发生的基本割集类型可以分为两种:

(1) 一阶最小割集, 即最小割集所含底事件的个数为 1 个。此故障树的一阶最小割集有 $\{X_5\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{15}\}, \{X_{17}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}, \{X_{27}\}, \{X_{28}\}$, 共 12 个, 表示单个底事件发生就会引起顶事件的发生, 是顶事件刀盘失效最重要的故障模式。如 $\{X_5\}$ 表示 X_5 (不良地质) 出现时, 会引起面板、刀具失效, 刀盘事故发生。

(2) 二阶最小割集, 即最小割集所含底事件的个数为两个。此故障树的二阶最小割集有 $\{X_1X_7\}, \{X_2X_7\}, \{X_3X_7\}, \{X_3X_{11}\}, \{X_3X_{16}\}, \{X_3X_{18}\},$

$\{X_3X_{24}\}, \{X_3X_{25}\}, \{X_4X_{11}\}, \{X_4X_{12}\}, \{X_4X_{13}\}, \{X_4X_{14}\}, \{X_4X_{29}\}, \{X_4X_{24}\}, \{X_4X_{26}\}, \{X_{22}X_{23}\}$, 共 16 个, 表示 2 个底事件同时发生才会引起顶事件的发生。如 $\{X_1X_7\}$ 表示 X_1 ($M_S > M_R$ 刀盘承受扭矩大于其允许扭矩) 和 X_7 (施工管理不当) 同时发生时, 面板变形, 刀盘事故发生, 即当工作人员发现盾构机掘进参数发生异常时, 没有引起警惕, 贸然掘进, 致使刀盘受损。其他二阶最小割集分析类似。

3.4 故障树的定量分析

故障树定量化的目的就是要计算或估算系统顶事件发生的概率及系统的其他可靠性指标, 从而对系统的可靠性、安全性及风险作出定量的评价。重要度分析是故障树定量分析中的重要组成部分。它是分析各基本事件的发生对顶上事件的发生所产生的影响的大小, 是为修改系统提供重要信息的重要手段。因此, 对复合式 EPB 盾构失效故障树的各底事件进行结构重要度分析和概率重要度分析十分重要。

3.4.1 结构重要度

对复合式 EPB 盾构刀盘失效故障树底事件的结构重要度分析如下。

(1) 单事件最小割集中底事件结构重要度系数最大, 如 $\{X_5\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{15}\}, \{X_{17}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}, \{X_{27}\}, \{X_{28}\}$ 。

$$\begin{aligned} I_5 = I_6 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{15} = I_{17} = I_{19} = \\ I_{20} = I_{21} = I_{27} = I_{28} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 仅出现在同一割集中的所有底事件结构重要系数相同, 如 $\{X_{22}X_{23}\}$ 。底事件 X_{22} 以及 X_{23} 的结构重要度相等, 即 $I_{22} = I_{23}$ (从结构上来说, 磨损量大以及边缘滚刀布置较少, 任一个底事件发生对顶事件的发生影响度相同)。

(3) 仅出现在底事件个数相等的若干个最小割集中的各底事件结构重要系数根据出现次数而定, 即出现次数少, 其结构重要系数小; 出现次数多, 其结构重要系数大; 出现次数相等, 其结构重要系数相等。

$$\begin{aligned} I_4 > I_3 > I_7 > I_{11} = I_{24} > I_1 = I_2 = I_{12} = I_{13} = \\ I_{14} = I_{16} = I_{18} = I_{22} = I_{23} = I_{25} = I_{26} = I_{29} \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 两个底事件出现在底事件个数不等的若干个最小割集中, 其结构重要系数依下列情况而定。

① 若它们在各最小割集中重复出现的次数相等, 则在少数事件最小割集中出现的底事件结构重要系数大。

$$\begin{aligned} I_5 = I_6 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{15} = I_{17} = I_{19} = \\ I_{20} = I_{21} = I_{27} = I_{28} > I_1 = I_2 = I_{12} = I_{13} = \\ I_{14} = I_{16} = I_{18} = I_{22} = I_{23} = I_{25} = I_{26} = I_{29} \end{aligned} \quad (4)$$

② 若它们在少事件最小割集中出现次数少,在多事件最小割集中出现次数多,以及其他更为复杂的情况,可用下列近似判别式计算:

$$\sum I(i) = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_i-1}} \quad (5)$$

式中: $I(i)$ 为底事件 X_i 的结构重要度系数的近似判别值; $X_i \in K_j$, 为底事件 X_i 属于 K_j 最小割集; n_i 为底事件 X_i 所在最小割集中包含底事件的个数。如:

$$I_5 = \frac{1}{2^{1-1}} = 1, I_1 = \frac{1}{2^{2-1}} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

因此,综合上述分析可得出底事件的结构重要度排序:

$$\begin{aligned} I_5 = I_6 = I_8 = I_9 = I_{10} = I_{15} = I_{17} = I_{19} = I_{20} = I_{21} = \\ I_{27} = I_{28} > I_4 > I_3 > I_7 > I_{11} = I_{24} > I_1 = I_2 = \\ I_{12} = I_{13} = I_{14} = I_{16} = I_{18} = I_{22} = I_{23} = I_{25} = I_{26} = I_{29} \end{aligned} \quad (7)$$

其中结构重要度排序中位居前 15 项的底事件如表 2 所示。

表 2 前 15 项底事件列表
Table 2 The former fifteen basic events

符号	底事件	符号	底事件	符号	底事件
X_5	不良地质	X_{15}	较长距离推进	X_{27}	闸片磨损
X_6	刀盘选型不合理	X_{17}	密封件失效	X_{28}	旋转接头更换时间长
X_8	地层较软、黏性大	X_{19}	泡沫注入孔数量偏少	X_4	磨损量超过允许值
X_9	地下异物	X_{20}	位置相对不合理	X_3	设计不合理
X_{10}	渣量体积大	X_{21}	软硬相间岩层	X_7	施工管理不当

根据排序结果,从故障树结构上来说,单事件最小割集 X_5 、 X_6 、 X_8 、 X_9 等最容易引发刀盘失效事故,其次在最小割集中出现次数多的底事件 X_4 、 X_3 、 X_7 也易引发刀盘失效事故发生。因此,若能预防单事件的最小割集和出现次数多的事件的发生,就能有效地减少复合式 EPB 盾构失效事故。

3.4.2 关键重要度

在实际工程中,顶事件的发生概率一般为近似独立事件和的概率公式:

$$P_T = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(M_i)] \quad (8)$$

式中: P_T 为顶事件的发生概率; $P(M_i)$ 为第 i 个最小割集的发生概率。在得出系统(顶事件)的发生概率后,更重要的是要求出危险性最大的底事件。这可通过底事件的关键重要度 $I_g(i)$, 即底事件对系统事故发生的影响程度来表现:

$$I_g(i) = \frac{\partial P_T}{\partial P_i} \frac{P_i}{P_T} \quad (9)$$

式中: P_i 为底事件发生的概率。底事件的重要度越大,说明它对系统安全性的危害越大。所以,通过重要度便可有的放矢地控制风险的发生,以减少风险发生的可能性以及由其可能导致的人员和财产损失。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

某地铁区间隧道采用德国海瑞克公司引进的复合式 EPB 盾构,刀盘主要技术参数为:面板式刀盘直径为 6 250 mm;最大推进力为 30 000 kN;最大扭矩为 4 060 kN·m;刀盘开口率约 28%,刀具布置有 64 把切刀、14 把双刃滚刀、6 把双刃中心滚刀或齿刀、16 把刮刀。本刀盘是根据地铁施工现场的具体地质条件设计制造,刀盘结构中的刀具(滚刀、齿刀)具有互换性和可更换性。该区间隧道主要穿越的地层如表 3 所示,岩层天然单轴抗压强度从 0.2~78 MPa 不等。

表 3 隧道主要穿越地层特性表
Table 3 Properties of the main strata

层序	地层名称	岩性描述
⑤-2	粉质黏土	褐红色;硬塑;含少量粉细砂。
⑥	全风化泥质粉砂岩	褐红色;岩石风化剧烈,结构基本破坏,但尚未辨认,岩芯呈坚硬土状,手捏可散,遇水软化。
⑦	强风化泥质粉砂岩	褐红色;岩石风化强烈,结构大部分破坏,岩芯呈半岩半土状,岩块用手可折断,遇水软化。
⑧	中风化泥质粉砂岩	褐红色;块状结构,风化裂隙发育,锤击声哑,软质岩;岩芯多呈短柱状。
⑨	微风化泥质粉砂岩	褐红色;整体状结构,岩体完整,锤击声脆,较软岩;岩芯呈长柱状。

4.2 故障树分析

作为工程试探性应用,本文采用的概率值与风险发生的可能性的对应关系是依据“地铁及地下工程风险管理指南”^[11]所定,风险的发生概率分为 5 级,如表 4 所示。为了得到刀盘失效故障树模型中

底事件发生概率的大小, 采用了专家调查法。本次调研共向施工单位、科研单位以及设计单位的专家发出 20 份问卷, 收回 16 份, 其中中级及中级以上职称占到总人数的 70%。评分结果见表 5。

把各项底事件概率分别代入式 (8), 求得该工程刀盘失效风险故障发生的概率近似 $P_f = 0.9957$, 说明在该地质情况下, 刀盘可能失效风险发生的概率大, 属于 5 级 (频繁); 根据式 (9) 计算所得各底事件的重要度见表 5。

表 4 风险发生概率等级标准

Table 4 The classification of risk occurring probability

等级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
事故描述	不可能	很少发生	偶尔发生	可能发生	频繁
区间概率/%	<0.01	[0.01, 0.1]	[0.1, 1]	[1, 10]	≥10

表 5 各底事件发生概率及重要度

Table 5 The probability and their importance of basic events

符号	概率/%	重要度 /10 ⁻⁴	符号	概率/%	重要度 /10 ⁻⁴
X_1	0.01	0.01	X_{15}	8.00	803.00
X_2	0.05	0.05	X_{16}	6.00	60.00
X_3	10.00	83.00	X_{17}	0.90	90.00
X_4	85.00	9 532.00	X_{18}	0.08	0.80
X_5	9.00	803.00	X_{19}	0.07	7.03
X_6	5.00	502.00	X_{20}	0.09	9.04
X_7	1.00	10.00	X_{21}	80.00	8 035.00
X_8	80.00	8 035.00	X_{22}	9.00	6.33
X_9	0.07	7.03	X_{23}	0.70	6.33
X_{10}	0.05	5.02	X_{24}	0.60	51.00
X_{11}	0.60	57.00	X_{25}	0.40	4.02
X_{12}	0.08	6.83	X_{26}	0.06	5.10
X_{13}	10.00	854.00	X_{27}	0.04	4.02
X_{14}	0.40	34.00	X_{28}	6.00	0.06

根据表 4 中的数据, 计算得各底事件重要度大小排序如下:

$$\begin{aligned}
 I_g(4) &> I_g(21) = I_g(8) > I_g(13) = I_g(5) = I_g(15) > \\
 I_g(28) &> I_g(6) > I_g(17) > I_g(3) > I_g(16) > I_g(11) > \\
 I_g(24) &> I_g(14) > I_g(7) > I_g(20) > I_g(9) = I_g(19) > \\
 I_g(12) &> I_g(22) = I_g(23) > I_g(26) > I_g(10) > \\
 I_g(25) &= I_g(27) > I_g(18) > I_g(2) > I_g(1)
 \end{aligned}$$

(10)

由式 (10) 结果可知, 引起刀盘系统失效风险的主要原因按照其重要度排序依次为: X_4 (磨损量超过允许值)、 X_{21} (软硬相间岩层)、 X_8 (地层较软、黏性较大)、 X_5 (不良地质)、 X_{15} (较长距

离掘进)。

通过对式 (7)、(10) 的比较还可以得出: 在式 (10) 中位于重要度前 10 项的底事件, 绝大部分也是位于式 (7) 结构重要度前 10 项的底事件。通过具体工程对比分析, 较好地验证了复合式 EPB 盾构刀盘失效风险故障树编制的合理及实用性。

4.3 主要风险因素分析

从式 (7)、(10) 的底事件重要度排序中可以得到对刀盘失效影响最大的风险因素有: 一阶最小割集 X_8 、 X_{21} 、 X_5 、 X_6 以及最小割集中出现次数多的底事件 X_4 等为系统的薄弱环节, 是引起复合式 EPB 盾构刀盘失效的主要风险因素。

(1) X_5 对刀盘失效影响的分析

X_5 (不良地质) 主要包括大块孤石、断裂带等。如果开挖面内存在大块孤石, 比如: 强风化或全风化花岗岩层中残留的微风化、新鲜、坚硬的花岗岩球状风化体, 极易使刀盘受到瞬间荷载冲击, 对刀盘和刀具造成破坏性影响; 断裂带的岩体中若存在极其坚硬的硅铁角砾岩, 当滚刀遇到这种岩层时, 非常容易出现崩角、严重磨损等情况。

(2) X_8 对刀盘失效影响的分析

当盾构机在 X_8 (地层较软、黏性大) 的地层中, 比如: 在可塑、硬塑状的黏土类地层, 黏土质砂土地层, 泥岩、泥质粉砂岩, 母岩为花岗岩的残积土层、全风化岩层和强风化岩层等掘进时, 刀盘容易发生结泥饼的现象, 使滚刀产生偏磨。

(3) X_{21} 对刀盘失效影响的分析

对于 X_{21} (软硬相间地层), 最典型的是上软下硬地层, 盾构机在此类地层掘进时, 一方面是刀具的切向力变化较大, 影响刀具的使用寿命; 另一方面是上部的松散地层会造成土体流失, 引发较大的地面沉降。

(4) X_6 对刀盘失效影响的分析

若隧道施工中发生 X_6 (刀盘选型不合理), 将导致刀盘磨损、刀具的频繁更换等风险, 这不仅影响施工进度, 而且有发生开挖面坍塌、地层沉降和塌陷、涌水等风险。

(5) X_4 对刀盘失效影响的分析

滚刀发生 X_4 (磨损量超过允许值) 时, 未能及时更换刀具, 导致磨损日益严重, 以至磨到滚刀的轴承位置使得整把滚刀报废, 这种磨损会造成周边刮刀、滚刀的损坏, 还会造成刀盘严重磨损。

5 结 论

(1) 对复合式 EPB 盾构刀盘失效的风险事故种

类及原因进行了分析与总结,建立了刀盘失效的故障树系统模型。

(2)在复合式 EPB 盾构刀盘失效风险的故障树分析中,通过对 28 个底事件的定性与定量分析,对各项底事件进行了重要度排序,从而确定了发生风险的主要因素集合,明确了刀盘失效的薄弱环节。

(3)对影响复合式 EPB 盾构刀盘失效的主要风险因素的底事件进行了分析。在工程实施过程中,可针对这些底事件进行审视管理,以降低刀盘失效风险事故的发生。

参考文献

- [1] 竺维彬,袁敏正.浅论广州地铁对中国盾构技术进步贡献[C]//中德隧道(盾构)技术研讨会论文集.[出版地不详]:[出版者不详],2004:393—399.
YUAN Min-zheng, ZHU Wei-bin. Contributions Made by Guangzhou Metro to Development of China's Shield Tunneling Technology[C]//The Proceedings of China-Germany Symposium on Shield Tunneling. [S. l.]: [s. n.], 2004: 393—399.
- [2] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):13—20.
HUANG Hong-wei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(1): 13—20.
- [3] 郭磊.复合式盾构常见施工故障排除[J].现代隧道技术,2006,(增刊):436—439.
GUO Lei. Fault elimination of mixed face shield during construction[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2006, (Supp.): 436—439.
- [4] 竺维彬,鞠世健.复合地层中的盾构施工技术[M].北京:中国科学技术出版社,2006.
- [5] ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22: 388—400.
- [6] NILSEN B, DAHL F, HOLZHAUSER J, et al. Abrasivity of soils in TBM tunneling[J]. *Tunnels & Tunnelling International*, 2006, 3: 36—38.
- [7] NABENDERERDE S, HOEK E, MARINOS P, et al. Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses — The case of “Metro do Porto” and the measures adopted[C]//Geotechnical Risks in Rock Tunnels. London: Taylor & Francis, 2006.
- [8] 蒙先君.复合式土压平衡盾构机刀盘常见故障(损坏)原因分析及解决措施[J].隧道建设,2004,24(2):61—66,73.
MENG Xian-jun. Causation analysis and resolve measures for the ordinary fault (damage) of the mixed EPB shield cutterhead[J]. *Tunnel Construction*, 2004, 24(2): 61—66, 73.
- [9] RICHARD E BARLOW, JERRY B FUSSELL, NOZER D. Singpurwalla. Reliability and Fault Tree Analysis[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1975.
- [10] 史定华,王松瑞.故障树分析技术方法和理论[M].北京:北京师范大学出版社,1993.
- [11] 中华人民共和国建设部.地铁及地下工程建设风险管理指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.

书 讯

汶川地震建筑震害分析与灾后建筑加固通用图集(建工版)

建筑科学类,王凤来编著,小16开,150千字,124页,平膜装,估价:18元,2009年7月出版,ISBN:978—7—112—10808—4

汶川地震后,作者曾多次深入灾区考察和调研,协助当地开展建筑鉴定与加固工作,在工作中取得了宝贵的第一手资料。本书是作者在将资料进行分类整理的基础上,运用大量图片对建筑震害进行了详细分析,同时为达到使灾后建筑加固工作做到有力、有序、有效地进行,便于保证工程质量、合理控制造价、缩短设计周期和利于技术监管的目的,编制了灾后建筑加固通用图集,并对加固方法与技术措施进行了详细介绍。读者对象:工程结构人员、加固技术人员、大中专学校相关专业师生。

(摘自 新华书目报·科技新书目)