

Risk Analysis of Pouring Construction of Bored Pile Based on FTA

Runguo Li¹ Zaohong Zhou^{2*} Fei Wang² Shimeng Xiao³ Xiao Wan⁴

1. Jiangxi Engineering Consulting Center Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330038, China
2. Department of Engineering Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi, 330032, China
3. International Cooperation and Exchange Office of Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi, 330013, China
4. Jiangxi Institute of Private Economy, Nanchang, Jiangxi, 330036, China

Abstract

The one-time pouring construction technology of the static pressure test pile head is a new construction technology. In order to give full play to the application benefits of this technology, it is necessary to analyze its risks. This paper uses the accident tree analysis method to analyze the construction process, analyzes the cause of the technical accident and the accident from the perspective of 4M1E, analyzes the importance of the basic events, and puts forward effective preventive measures according to the analysis results. The results show that there are 48 possibilities of bored pile breaking accidents. If we can select one of the three groups and take preventive measures, the accident can be avoided to a large extent.

Keywords

accident tree analysis method; broken pile accident; preventive measures

基于 FTA 钻孔灌注桩浇筑施工风险分析

李润国¹ 周早弘^{2*} 王菲² 肖诗蒙³ 万骁⁴

1. 江西省工程咨询中心有限公司, 中国·江西 南昌 330038
2. 江西财经大学工程管理系, 中国·江西 南昌 330032
3. 江西财经大学国际合作与交流处, 中国·江西 南昌 330013
4. 江西省民营经济研究院, 中国·江西 南昌 330036

摘要

钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工技术是一项新施工技术, 为了充分发挥该技术的应用效益, 有必要对其风险进行分析。论文运用事故树分析法, 剖析施工工艺后, 从4M1E角度分析该技术事故的致因及安全隐导致事故发生的致因, 分析了基本事件的影响重要度排序, 根据分析结果提出有效的预防措施。研究结果表明: 导致钻孔灌注桩断桩事故的可能性有48种, 如能从3组最小径集中任意选取其中一组, 采取预防措施, 则能针对性地对该事故能以很大程度避免。

关键词

事故树分析法; 断桩事故; 预防措施

1 引言

在建筑物基础施工时, 钻孔灌注桩的应用很广泛^[1], 地下连续墙^[2]和坝基础处理等方面应用也很常见^[3]。钻孔灌注桩施工工艺复杂, 需要进行养护至设计强度, 再进行静载试验^[4]。为了其技术的缺陷, 周伏萍等采用钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工技术^[5], 以钻孔灌注桩桩头一次

性浇筑完成代替现有技术中分二次浇筑制作工艺, 不仅缩短了施工工期, 还减少了材料的浪费和降低了人工成本。为保障该技术运用, 防范施工风险, 有必要对其进行风险分析^[6], 以提高施工效率。

2 研究理论——事故树分析 (Fault tree analysis) 法

事故树分析 (Fault tree analysis) 法能分析出导致事故发生的直接原因, 还能揭示引发事故的潜在诱因, 已成为目前预测风险与防范事故发生的主要方法^[7,8]。

事故的顶上或中间事件用矩形表示, 这类事件需继续分析, 而最基本、不能或没必要继续往下分析的事件, 称之

【作者简介】李润国 (1988-), 男, 中国甘肃金昌人, 本科, 工程师, 从事工程管理研究。

【通讯作者】周早弘 (1966-), 男, 中国江西进贤人, 博士, 教授, 从事可持续建设管理、工程管理研究。

为基本事件或称底事件，常用圆形表示。事故树中主要有2种逻辑符号。逻辑“与门”和逻辑“或门”。他们的符号图形如图1所示。



图1 事故树主要逻辑符号

“与门”连接表示当下层事件 $X_1、X_2...X_n$ 都发生时，上端事件 T 才会发生，用“ $T=X_1X_2...X_n$ ”表示。逻辑“或门”符号连接表示当下层事件 $X_1、X_2...X_n$ 中任一事件发生时，上端事件 T 都会发生，用“ $T=X_1+X_2+...X_n$ ”表示^[7,8]。

3 钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工的事故树分析

3.1 钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工步骤

钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工步骤如下：

S1：在已经钻好的灌注桩成孔内安装成孔钢护筒，防止灌注桩成孔孔壁周围的岩土掉落到钻孔灌注桩成孔内，保护成孔孔壁；S2：根据钻孔灌注桩桩长设计钢筋笼的尺寸，保证钢筋笼的顶面高出地面50cm；S3：待步骤S1中的钻孔灌注桩成孔验收合格后，将已设计制作好的钢筋笼安装于钻孔灌注桩成孔内；S4：向钻孔灌注桩成孔内灌入混凝土，混凝土灌注与地面平齐后清理浮渣；S5：在地面上安装桩头钢护筒，然后拔出成孔钢护筒；S6：继续浇筑混凝土并振捣密实至桩头钢护筒筒顶；S7：桩头收浆抹平，对灌注桩进行养护；S8：养护期结束后，使用静载试验设备对钻孔灌注桩进行静载试验，检测钻孔灌注桩单桩的承载力，静载试验设备底部设置有千斤顶，静载试验设备通过千斤顶力学平衡原理进行检测钻孔灌注桩单桩承载力。

3.2 钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工工艺

施工准备：灌注桩施工前，按标准处理施工材料，编制适合施工点地质条件和气候的专项施工方案，并做好技术交底工作。

埋设护筒：挖掘深度1.10~1.30m，且比设计桩径大200mm的基坑后，当钢护筒的中心线与桩位中心线对齐后，埋设护筒，并采取可靠措施加固护筒。

配备泥浆：施工过程中，应选择合适配比的泥浆进行灌注，并适时修正，及时关注泥浆循环利用系统正常运行，确保施工过程正常进行。

钻孔施工：钻进前，必须保证钻机准确定位，先慢旋挖，平稳、缓慢放斗和提斗，时刻注意垂直度，及时纠偏，每次进尺控制在100cm左右，成孔过程中，视土层及时注入泥浆护壁，防止坍孔。钻进至预定深度后，采用泵吸反循环清孔。

安装钢筋笼：钻进灌注桩的同时，同步制作钢筋笼，接长钢筋笼后再伸入孔内，注意预留足够的桩基钢筋长度，同时应逐节验收钢筋笼，达到应有的连接质量，及时修正不合格的钢筋连接点。

3.3 运用事故树法分析

钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工是一项新技术，实际运用还不成熟，使用过程中会存在一些风险，导致钻孔灌注桩断桩的工程事故发生，且一旦发生事故就会带来人员伤亡和重大经济损失。为了防止可能存在的风险，应以系统综合的观点，对事故进行系统全面的安全分析。从系统分析可得知，导致钻孔灌注桩浇筑施工事故发生的主要因素有：施工现场管理不科学、监理单位不能正确履行监理职责、工程质量存在严重实体缺陷等因素，其事故树图如图2所示。

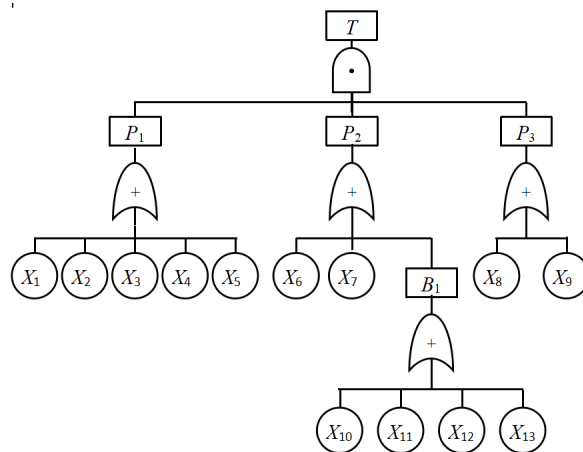


图2 施工风险事故树图

注： T ：钻孔灌注桩施工风险事故； P_1 ：施工现场管理不科学； P_2 ：工程质量存在严重实体缺陷； P_3 ：监理单位不能正确履行监理职责； B_1 ：钢筋笼出问题； X_1 ：技术方案不成熟； X_2 ：未进行技术交底； X_3 ：作业人员无证上岗； X_4 ：无质量保证体系； X_5 ：施工材料不合格； X_6 ：混凝土灌注不及时； X_7 ：灌注桩基础不合格； X_8 ：未及时发现违规施工； X_9 ：未对现场施工单位资质核查； X_{10} ：钢筋笼起吊前未做加固检查； X_{11} ：直接使用钢丝绳起吊钢筋笼； X_{12} ：钢筋笼尺寸不合； X_{13} ：钢筋笼质量差。

从图2可得，可能引起该施工风险事故的情形有13个，分别用 $X_i (i=1,2,...,13)$ 来表示，这些事故隐患即基本事件。一般地，顶上事件的发生是由某些事故隐患的发生引起的。能够引起顶上事件发生的事故隐患的集合被称为割集，其中能够引起顶上事件发生的最小事故隐患集合被称为最小割集。通过运用布尔代数法可以求得最小割集，具体如下步骤计算所示：

$$\begin{aligned}
 T &= P_1 P_2 P_3 \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) (X_6 + X_7 + B_1) (X_8 + X_9) \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) (X_6 + X_7 + X_0 + X_1 + X_2 + X_3) (X_8 + X_9) \\
 &= X_1 X_6 X_8 + X_1 X_6 X_9 + X_1 X_7 X_8 + X_1 X_7 X_9 + X_1 X_0 X_8 + X_1 X_0 X_9 + \\
 &X_1 X_1 X_8 + X_1 X_1 X_9 + X_1 X_2 X_8 + X_1 X_2 X_9 + X_1 X_3 X_8 + X_1 X_3 X_9 + \\
 &X_2 X_6 X_8 + X_2 X_6 X_9 + X_2 X_7 X_8 + X_2 X_7 X_9 + X_2 X_0 X_8 + X_2 X_0 X_9 + \\
 &X_2 X_1 X_8 + X_2 X_1 X_9 + X_2 X_2 X_8 + X_2 X_2 X_9 + X_2 X_3 X_8 + X_2 X_3 X_9 + \\
 &X_3 X_6 X_8 + X_3 X_6 X_9 + X_3 X_7 X_8 + X_3 X_7 X_9 + X_3 X_0 X_8 + X_3 X_0 X_9 + \\
 &X_3 X_1 X_8 + X_3 X_1 X_9 + X_3 X_2 X_8 + X_3 X_2 X_9 + X_3 X_3 X_8 + X_3 X_3 X_9 + \\
 &X_4 X_6 X_8 + X_4 X_6 X_9 + X_4 X_7 X_8 + X_4 X_7 X_9 + X_4 X_0 X_8 + X_4 X_0 X_9 + \\
 &X_4 X_1 X_8 + X_4 X_1 X_9 + X_4 X_2 X_8 + X_4 X_2 X_9 + X_4 X_3 X_8 + X_4 X_3 X_9 + \\
 &X_5 X_6 X_8 + X_5 X_6 X_9 + X_5 X_7 X_8 + X_5 X_7 X_9 + X_5 X_0 X_8 + X_5 X_0 X_9 + \\
 &X_5 X_1 X_8 + X_5 X_1 X_9 + X_5 X_2 X_8 + X_5 X_2 X_9 + X_5 X_3 X_8 + X_5 X_3 X_9
 \end{aligned}$$

由此计算, 可得顶层事件 T 最多有 60 组最小割集:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \{X_1, X_6, X_8\}, E_2 = \{X_1, X_6, X_9\}, E_3 = \{X_1, X_7, X_8\}, \\
 E_4 &= \{X_1, X_7, X_9\}, E_5 = \{X_1, X_{10}, X_8\}, E_6 = \{X_1, X_{10}, X_9\}, \\
 E_7 &= \{X_1, X_{11}, X_8\}, E_8 = \{X_1, X_{11}, X_9\}, E_9 = \{X_1, X_{12}, X_8\}, \\
 E_{10} &= \{X_1, X_{12}, X_9\}, E_{11} = \{X_1, X_{13}, X_8\}, E_{12} = \{X_1, X_{13}, X_9\}, \\
 E_{13} &= \{X_2, X_6, X_8\}, E_{14} = \{X_2, X_6, X_9\}, E_{15} = \{X_2, X_7, X_8\}, \\
 E_{16} &= \{X_2, X_7, X_9\}, E_{17} = \{X_2, X_{10}, X_8\}, E_{18} = \{X_2, X_{10}, X_9\}, \\
 E_{19} &= \{X_2, X_{11}, X_8\}, E_{20} = \{X_2, X_{11}, X_9\}, E_{21} = \{X_2, X_{12}, X_8\}, \\
 E_{22} &= \{X_2, X_{12}, X_9\}, E_{23} = \{X_2, X_{13}, X_8\}, E_{24} = \{X_2, X_{13}, X_9\}, \\
 E_{25} &= \{X_3, X_6, X_8\}, E_{26} = \{X_3, X_6, X_9\}, E_{27} = \{X_3, X_7, X_8\}, \\
 E_{28} &= \{X_3, X_7, X_9\}, E_{29} = \{X_3, X_{10}, X_8\}, E_{30} = \{X_3, X_{10}, X_9\}, \\
 E_{31} &= \{X_3, X_{11}, X_8\}, E_{32} = \{X_3, X_{11}, X_9\}, E_{33} = \{X_3, X_{12}, X_8\}, \\
 E_{34} &= \{X_3, X_{12}, X_9\}, E_{35} = \{X_3, X_{13}, X_8\}, E_{36} = \{X_3, X_{13}, X_9\}, \\
 E_{37} &= \{X_4, X_6, X_8\}, E_{38} = \{X_4, X_6, X_9\}, E_{39} = \{X_4, X_7, X_8\}, \\
 E_{40} &= \{X_4, X_7, X_9\}, E_{41} = \{X_4, X_{10}, X_8\}, E_{42} = \{X_4, X_{10}, X_9\}, \\
 E_{43} &= \{X_4, X_{11}, X_8\}, E_{44} = \{X_4, X_{11}, X_9\}, E_{45} = \{X_4, X_{12}, X_8\}, \\
 E_{46} &= \{X_4, X_{12}, X_9\}, E_{47} = \{X_4, X_{13}, X_8\}, E_{48} = \{X_4, X_{13}, X_9\}, \\
 E_{49} &= \{X_5, X_6, X_8\}, E_{50} = \{X_5, X_6, X_9\}, E_{51} = \{X_5, X_7, X_8\}, \\
 E_{52} &= \{X_5, X_7, X_9\}, E_{53} = \{X_5, X_{10}, X_8\}, E_{54} = \{X_5, X_{10}, X_9\}, \\
 E_{55} &= \{X_5, X_{11}, X_8\}, E_{56} = \{X_5, X_{11}, X_9\}, E_{57} = \{X_5, X_{12}, X_8\}, \\
 E_{58} &= \{X_5, X_{12}, X_9\}, E_{59} = \{X_5, X_{13}, X_8\}, E_{60} = \{X_5, X_{13}, X_9\}.
 \end{aligned}$$

利用最小径集与最小割集的对偶性, 画出该事故树的对偶树, 即成功树 (如图 3 所示)。

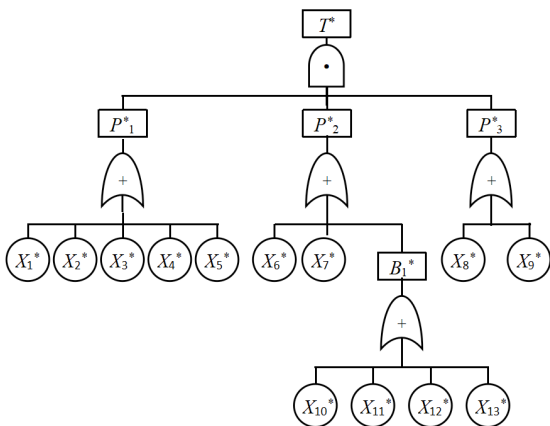


图 3 成功树图

求出成功树的最小割集, 就是原事故树的最小径集。求该成功树的最小割集, 求得的最小割集就是原事故树的最小径集, 用布尔代数法可得:

$$\begin{aligned}
 T^* &= P_1^* + P_2^* + P_3^* = (X_1^* X_2^* X_3^* X_4^* X_5^*) + (X_6^* X_7^* B_1^*) + (X_8^* X_9^*) \\
 &= (X_1^* X_2^* X_3^* X_4^* X_5^*) + (X_6^* X_7^* X_{10}^* X_{11}^* X_{12}^* X_{13}^*) + (X_8^* X_9^*)
 \end{aligned}$$

故此成功树的最小割集有 3 组, 同样原事故树的最小径集也是这 3 组, 即:

$$\begin{aligned}
 E_1^* &= \{X_1^* X_2^* X_3^* X_4^* X_5^*\}, E_2^* = \{X_6^* X_7^*, X_{10}^* X_{11}^* X_{12}^* X_{13}^*\}, \\
 E_3^* &= \{X_8^* X_9^*\}
 \end{aligned}$$

3.4 基本事件影响重要程度分析

根据各基本事件对顶上事件的影响程度不同, 分析各基本事件的重要度, 得出其排序。以 $I(i)$ 表示基本事件 X_i 的结构重要度系数, 用下列近似判别式计算:

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

其中, I_0 为基本事件 X_i 结构重要度的近似判断值; $X_i \in K_j$ 为基本事件 X_i 属于 K_j 最小割 (径) 集; n_i 为基本事件 X_i 所在最小割 (径) 集中包含基本事件的个数。

各基本事件对模板支架坍塌事故的影响的结构重要度系数为:

$$\begin{aligned}
 I_{(1)} &= I_{(2)} = I_{(3)} = I_{(4)} = I_{(5)} = \frac{1}{5} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{20} \\
 I_{(6)} &= I_{(7)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)} = I_{(13)} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{18} \\
 I_{(8)} &= I_{(9)} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}
 \end{aligned}$$

故各个基本事件的影响重要度排序为:

$$I_{(7)} = I_{(8)} > I_{(6)} = I_{(7)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)} = I_{(13)} > I_{(1)} = I_{(2)} = I_{(3)} = I_{(4)} = I_{(5)}$$

3.5 结果分析

①通过事故树分析可以得出这样的结论: 在浇筑失败工程事故中, “或” 门的数量占比较多 (约 80%), 而 “与” 门的数量占比较少 (约 20%), 这意味着该系统的危险性较高。

②从最小割集的角度来看, 任何一个最小割集都可以视为事件发生的一种 “可能渠道”。事故树中的最小割集越多, 意味着事件发生的可能性就越多, 系统的危险性也就越高。本次事故中, 涉及了树中最小割集共计 60 组。这意味着导致钻孔灌注桩断桩工程事故发生的原因有 60 种可能的途径, 这充分展示了断桩工程事故的可能性和危险性之高, 而且预防起来非常困难。如任取一个最小割集 $E_3 = \{X_1, X_{10}, X_9\}$ 进行分析, 只需 X_1, X_{10}, X_9 这三个事件同时发生时, 可能会导致浇筑失败工程事故的发生。

③从最小径集的角度来看, 事故树可以通过识别其最小径集来分析。最小径集是指在事故树中, 从根节点 (即顶上事件) 到叶子节点 (即底部事件) 的一系列路径中, 并且这些路径中不存在共同的节点。顶上事件不发生的可能性可以通过最小径集的存在与否来判断。如果事故树存在最小径

集,那么其中至少存在一条路径,该路径上的所有事件都没有发生的可能性,也就是说顶上事件不发生的可能性存在。最小径集的数量越多,就有越多的方式可以避免顶上事件的发生,从而使系统更加安全。通过利用最小径集,可以选择出确保系统安全的最佳方案,为预防和控制事故提供有效的依据。在断桩工程事故树中最小割集60组,最小径集3组,故利用最小径集分析更为方便。 $E_1^*=\{X_1^*X_2^*X_3^*X_4^*X_5^*\}$ 表明 X_1^* , X_2^* , X_3^* , X_4^* , X_5^* 不发生,则顶上事件不会发生,也就是说,施工单位若在工程施工前,重视现场管理,制定了成熟的技术方案,并认真进行技术交底,杜绝作业人员无证上岗,加强质量监管,严禁使用不合格施工材料,则可以避免施工事故的发生。

④根据结构重要度考虑,无需考虑基本事件发生的概率,只需从事故树的结构上分析各个基本事件对顶层事件发生的影响程度。事故树是由许多基本事件组成的,这些基本事件对上层事件都会产生影响,但程度不同。在制定安全防范措施时,必须确定先后顺序和重要性,以便系统能够达到经济、有效和安全的目标。如:对于本次事故的基本事件 X_8 、 X_9 结构重要度最大,表明其在系统中占首要地位,其次是 X_6 、 X_7 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} ,最后是 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 。由此可以看出,在制定事故预防措施的时候,应按实际依事件的重要度顺序,由大到小地去选出最高效的预防措施。

4 结论与预防措施

通过以上分析可知,钻孔灌注桩新浇筑技术可能导致的断桩事故的可能性有60种。因此,在建筑施工中,钻孔灌注桩断裂事故相对较容易发生。但只要采取3组最小

径集中的任何一组有针对性的预防措施,就能够避免这种事故的发生。建议采取的预防措施如下:

①提高施工技术人员的素质和施工水平。首先要加强培训、教育,以提高工作质量为主,兼顾数量。同时加大考核力度,提高工作积极性。还应加强监理。

②对物的因素,如设备故障、测量工具不准确等,应加强设备管理,提高设备设施的可靠性。

③加强日常生产管理,特别是技术管理的工作,我们需要做到防患于未然。

④加强制度管理,责任落实到人,合理制定防范措施。

参考文献

- [1] 唐少平.建筑工程中钻孔灌注桩施工技术及其质量控制[J].大众标准化,2022(22):31-33.
- [2] 刘明继,吕映碧.钻孔灌注桩质量控制[J].云南水力发电,2022,38(10):151-154.
- [3] 王大帅.钻孔灌注桩技术在建筑工程施工中的应用研究[J].建设科技,2022(16):96-98.
- [4] 胡延赞.钻孔灌注桩施工质量控制与检测[J].四川水泥,2022(5):197-198+205.
- [5] 周伏萍,敖小平,罗平南,等.一种钻孔灌注桩静压试验桩头一次性浇筑施工方法[P].江西省:CN112323877A,2021-02-05.
- [6] 林志寅.浅谈钻孔灌注桩的质量检测及问题处理[J].福建建材,2022(1):71-73.
- [7] 韩保帅.事故树分析法在建筑行业高处坠落的应用[J].四川建材,2020,46(8):204-205+209.
- [8] 崔勇刚.基于事故树分析法的调节阀失效机理分析[J].自动化与仪器仪表,2019(S1):47-49.