

地铁盾构坍塌事故中施工人员安全能力分析^{*}

李启明, 王盼盼, 邓小鹏, 吴伟巍

(东南大学 建设与房地产研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 地铁项目大规模建设的同时, 灾难性的施工事故不断发生。施工人员的不安全行为是事故发生的直接因素, 但是, 不安全行为正是安全能力匮乏的外在表现。施工人员安全能力的强弱直接影响到是否发生施工事故。在构建施工人员安全能力模型的基础上, 分析了施工人员安全能力的形成机理。同时, 通过分析地铁施工事故原因, 认为地铁施工人员安全能力的大小就体现在施工人员感觉到事故隐患、做出事故隐患危险判断, 进而对事故隐患进行正确响应的过程中, 并对导致盾构法坍塌事故的事故隐患进行了分析。最后, 以一个实际发生的盾构法施工坍塌事故为例, 分析了施工人员安全能力在事故发生过程中的体现, 从而准确确定了施工人员出现失误的时段, 以保障地铁施工安全。

关键词: 安全能力; 施工人员; 地铁; 事故

中图分类号: X948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)04-0073-05

保障地铁施工安全具有重要意义。

0 引言

随着我国经济的持续快速发展, 城市化进程的不断加快, 城镇人口急剧增加, 为了缓和城市交通拥挤的状况, 国内很多大城市相继修建了地铁。迄今为止, 已有 10 个城市开通了 31 条城市轨道交通线。据中国各城市轨道交通发展规划图显示, 至 2016 年我国将新建轨道交通线路 89 条, 总建设里程为 2 500 km, 投资规模达 9 937.3 亿元^[1]。但是, 由于地铁项目施工过程具有隐蔽性、复杂性和技术难度高等突出的特点, 近年来, 国内地铁施工事故频发, 带来了严重的人员伤亡、财产损失以及环境破坏。施工人员是事故的直接接触者, Heinrich 等的多米诺骨牌事故致因理论第一次提出人的不安全行为是事故发生的原因, 从此便开始了关于人的因素对于事故发生影响的研究, 产生了多种事故致因理论, 在施工事故根本原因方面也展开了研究。每一种行为都以某一种能力为前提, 行为方式与能力因素之间有着必然的联系, 因此, 施工人员不安全行为是安全能力匮乏的外在表现。分析施工人员安全能力在地铁施工事故中的体现, 对于提高施工人员安全能力,

1 施工人员安全能力模型及形成机理

1.1 施工人员安全能力定义及模型

目前国内已经对施工人员安全能力进行了一定研究, 将施工人员安全能力定义为: 在一个施工现场内, 施工人员利用与整合所拥有的知识、技能、态度、动机、个人价值等内在特质, 使完成某项施工工作过程中可能存在的危害控制在绝对的最低限度内, 或者至少使其保持在可容许范围内^[2]。

施工人员安全完成某项施工工作, 需要完成三个阶段的心理活动过程: 感知——判断——响应。施工人员处于一个危险不可避免的环境中, 在危险迫近时, 任何一个阶段的失误, 都能导致施工工作的不能完成, 即发生事故。施工人员只有正确感知、正确判断、正确响应, 才能安全地完成施工工作。根据施工人员安全能力与不安全行为及事故的关系, 构建施工人员安全能力模型如图 1 所示。在构建的模型中, 清楚地揭示了施工人员安全能力的发挥过程, 同时说明了施工人员安全能力的强弱直接影响到是否会发生安全事故, 其中施工人员安全能力任务与内在特质之间是匹

* 收稿日期: 2010-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878049)

作者简介: 李启明(1963-), 男, 汉族, 江苏江阴人, 教授, 博士生导师, 研究方向为建设工程管理、房地产经济与管理、国际工程管理. E-mail: njlqming@163.com

配关系，即若施工人员拥有进行正确感知、正确判断、正确响应所需的知识、技能、态度等内在

特质，则表现为安全行为，若不能拥有，则表现为不安全行为。

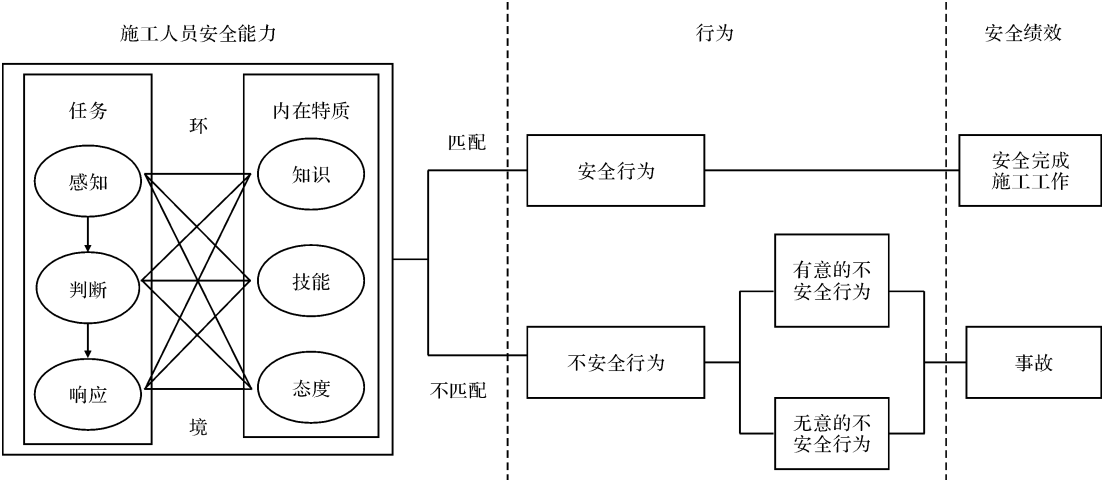


图1 施工人员安全能力模型

1.2 施工人员安全能力形成机理

在危险迫近时，施工人员只有正确感知危险、正确判断是否危险以及采取正确的措施响应危险，才能安全地完成施工作业，即表现出相应的安全能力，因此，施工人员安全能力可被分解为感知能力、判断能力、响应能力。

(1)感知能力

感知是施工人员行动决策前对环境信息进行接收和释义的过程，包括感觉和知觉。施工过程中，施工环境无时无刻不给施工人员提供各种各样的信息。我们只能感知到我们注意的事物，我们也只能注意到我们感知的事物。因此，在感知阶段，施工人员能够感知到的信息正是他们所注意到的信息。由于施工人员的生理缺陷、被感知信息强度不够等原因，容易造成施工人员在感知阶段出现失误。

(2)判断能力

施工人员感知到信息以后，就会利用自己的技能、知识、经验等，对感知到的信息进行比较、推理、归纳、重构、纠正等处理，判断其是否危险。如果被判断为是危险状况，则会针对问题进行决策，寻求解决办法。这个阶段是思维与问题解决阶段，主要解决的问题是判断是否危险、如果被判断为危险，是否采取措施、采取什么样的措施等问题。

(3)响应能力

施工人员在判断阶段将情形判断为危险，做出采取措施的决策，并知道采取什么措施处理的情况下，就会采取具体的实际行动。在响应阶段，施工人员根据判断阶段做出的综合决策，发出相应的行动，主要解决怎样采取措施以及检验所采

取的措施是否有效等问题。

2 地铁施工事故原因分析及施工人员安全能力在事故发生中的体现

地铁施工是在一定的环境条件下，通过组织作业人员利用所需的资源(材料、机器、设备、设施等)进行作业的活动。在一定环境条件下的施工过程中，物的不安全状态以及信息的缺陷形成事故的隐患，若存在人的不安全行为触发事故隐患，则会发生伤害事故。地铁施工事故形成的4个条件可用集合公式表示为：事故 = {环境的不安全条件，材料/机械的不安全状态，信息的缺陷，人的不安全行为} [3]。在人、材料/机械、环境、信息系统中，各因素之间的关系如图2所示 [4]。施工人员的不安全行为在整个事故的发生过程中，起到了触发器的作用，地铁施工过程是一个动态变化的复杂过程，随时随地都会产生可能的隐患，形成危险源，如果监管措施、治理措施不力，施工人员的不安全行为就会触发由材料/机械的不安全状态或环境的不安全条件或信息的缺陷或其中的两个或三个并存的因素造成的危险源，导致事故的发生。

如果施工人员不能对施工过程中存在的事故隐患进行正确处理，就表现为触发事故发生的不安全行为。同时，施工人员不安全行为是施工人员安全能力匮乏的外在表现，因此，施工人员不能对施工过程中出现的事故隐患进行正确的感知、判断、响应的结果就是施工人员表现出不安全行

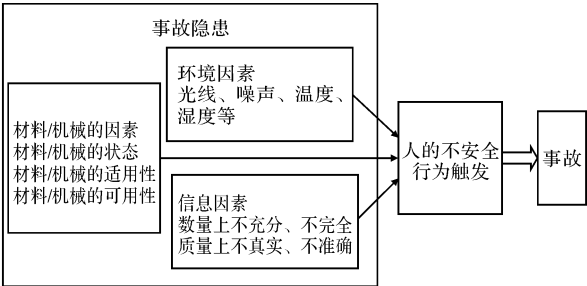


图2 地铁施工过程中施工人员的不安全行为在事故中的作用关系图

为。地铁施工人员安全能力的大小就体现在施工人员感觉到事故隐患，做出事故隐患危险判断，进而对事故隐患进行正确响应的过程中。

3 地铁盾构法施工坍塌事故事故隐患

由于事故隐患的存在，会诱发人员出现触发事故发生的不安全行为，但是，安全能力高的人员已经可以预测到事故的发生，因此可以取正确的方式处理事故隐患，取得防止事故发生的效果。因此，分析地铁施工事故中体现的施工人员安全能力，需要对导致事故发生的事事故隐患进行分析。以盾构坍塌事故为例，从环境、材料/机械、信息三个方面总结了 22 种能够导致事故发生的事事故隐患^[5-10]，如表 1 所示。

表 1 导致盾构法坍塌事故发生的事事故隐患

事故隐患	环境的不安全条件	工作井洞口处于砂性土或有承压水地层 通过不良地质地段或遇不同地质变异情况的界面处掘进施工 地下管网交叉、密集区段掘进施工 施工地段地面交通流量大或者经常有重型车辆通过 施工期间降水量较大
	材料/机械的不安全状态	管片出厂时混凝土强度与抗渗等级不符合设计要求、外观质量不合格 管片拼装误差 管片接缝处有渗漏现象 软土地层中盾构机暂停推进 在不稳定的地层更换刀具 掘进过程中盾构施工参数控制不当，如推进速度、土仓压力、排土量等 盾构机姿态控制不当，造成超挖 管片拼装时，盾构土仓压力下降，造成盾构后退 同步注浆系统发生故障，但是盾构机仍然继续掘进 盾构推进一次纠偏量过大 盾尾脱离后，注浆不及时或效果不佳
	信息的缺陷	掘进过程中反映地下水位及水土压力的变化情况的信息缺陷 掘进过程中反映地下管线沉降、水平位移以及倾斜的监控量测信息缺陷 反映施工线路地表沉降的信息缺陷 地下管线类型、位置以及允许变形值的信息缺陷 工程地质以及水文地质资料信息缺陷 掘进过程中盾构运转情况、排出渣土状况等的信息缺陷

4 施工人员安全能力在盾构施工事故中的体现案例分析

由前面分析可知，地铁施工人员安全能力的大小就体现在施工人员感知到盾构坍塌事故隐患、做出坍塌事故隐患危险判断进而对其进行正确响应的过程中。下面以一个实际发生的盾构法施工坍塌事故为例^[11-12]，分析施工人员在处理事故隐患的过程中体现的安全能力。

事故描述：广州地铁三号线大塘站到沥滘站

圆型盾构隧道区间，隧道内径 5 400 mm，采用 2 台土压平衡式盾构机分左右线掘进施工，隧道衬砌采用直径 6 m 的预制钢筋混凝土管片。盾构施工过程中，当左线盾构机掘进到 180 环，掘进速度极其缓慢，基本上维持在 2~8 mm/min，出土量非常大，3 d 后完成该环推进后，发生地表塌陷事故，沉陷范围大约长 5 m、宽 5 m 及深 0.6 m。盾构机推进过程中，尽管掘进速度非常缓慢，但是盾构机刀盘仍然处于转动状态，刀盘扭矩没有减小，而且千斤顶推力在该环推进中推力明显偏大，开挖面坍塌前几环掘进中千斤顶推力及刀盘扭矩数

据如表 2 所示, 180 环掘进中压力仓土压力大小数据如表 3 所示。

表 2 盾构掘进参数

环号	千斤顶推力/ kN	刀盘扭矩/ kNm	刀盘转速/ rpm	掘进速度/ (mm/min)
175	1 145	2 241	1. 39	5
176	11 008	2 425	1. 44	12
177	10 577	2 156	1. 39	6
178	9 586	2 926	1. 42	22
179	9 878	2 584	1. 45	6
180	13 120	2 427	1. 36	3

表 3 掘进 180 环时压力舱土压力大小 MPa

测点	最大压力	最小压力	平均压力
顶部土压力计	0. 174	0. 038	0. 11
中部土压力计	0. 212	0. 064	0. 143
底部土压力计	0. 245	0. 098	0. 178

事故发生后, 对开挖面前方 3 m 进行地层补充钻探, 钻孔芯样机初探地质报告及现场渣土土质分析, 推测盾构机已经在砂层、全风化泥岩及强风化泥岩多层地基中掘进。

事故原因分析: 由于开挖面下部存在硬质土层, 使得盾构机掘进困难, 推进速度缓慢。在开挖面支护压力不足情况下, 开挖面上部软弱土层不断进入压力仓并经排土器排出, 随着螺旋排土器的不断工作, 破坏从隧道顶部往地表发展, 并最终表现为地表坍塌, 这是发生开挖面失稳坍塌的一个主要因素, 同时, 随着地下水的大量排出, 更加剧了开挖面上部土层的不稳定。因此, 开挖面发生坍塌原因归结为: ①开挖面上部软土地层受到开挖面支护压力不足是发生开挖面失稳的主要原因; ②由掘进速度及千斤顶推力可知, 开挖面底部硬质土层为开挖带来

困难, 导致盾构机掘进速度缓慢, 为局部失稳后地层变形的不断发展创造了条件。

施工人员安全能力分析: 通过上述对事故描述以及事故原因分析, 可以看出, 在盾构掘进过程中, 由于工程地质资料中没有披露相关信息或者是在不同地质变异情况的界面处进行施工等原因, 造成施工过程中存在着环境方面的事故隐患, 即开挖面存在上软下硬的互层地基(事故发生后通过补充钻探得到了证实), 没有在施工前被发现。在存在事故隐患的情况下, 施工人员没有完成正确处理事故隐患, 即完成安全能力任务的三个心理活动过程: 感知阶段虽然注意到了掘进速度极其缓慢、出土量非常大、千斤顶推力明显偏大等盾构施工参数, 但在判断阶段, 施工人员没有对所感知到的不正常施工参数进行正确的分析判断, 即不认为这些不正常施工参数代表的是危险状况, 或者知道是危险的, 但是不能明确是什么原因导致了盾构不正常施工参数的出现, 因此不能采取正确的响应措施, 导致了事故的发生。根据前面分析的施工人员安全能力与不安全行为及事故的关系可知, 施工人员没有对所感知到的不正常施工参数进行正确的分析判断, 说明施工人员不具备判断及分析该情况是否危险的知识、技能以及态度, 或者施工人员所拥有的知识、技能以及态度与正确判断事故隐患是否危险不匹配。施工人员安全能力匮乏外在表现为在盾构参数不正常的情况下, 没有及时正确地分析其原因, 而是继续进行掘进施工, 从而导致开挖面失稳事故的发生。综上所述, 结合图 1 所分析的施工人员安全能力模型, 可得此盾构坍塌案例中施工人员的安全能力如图 3 所示。

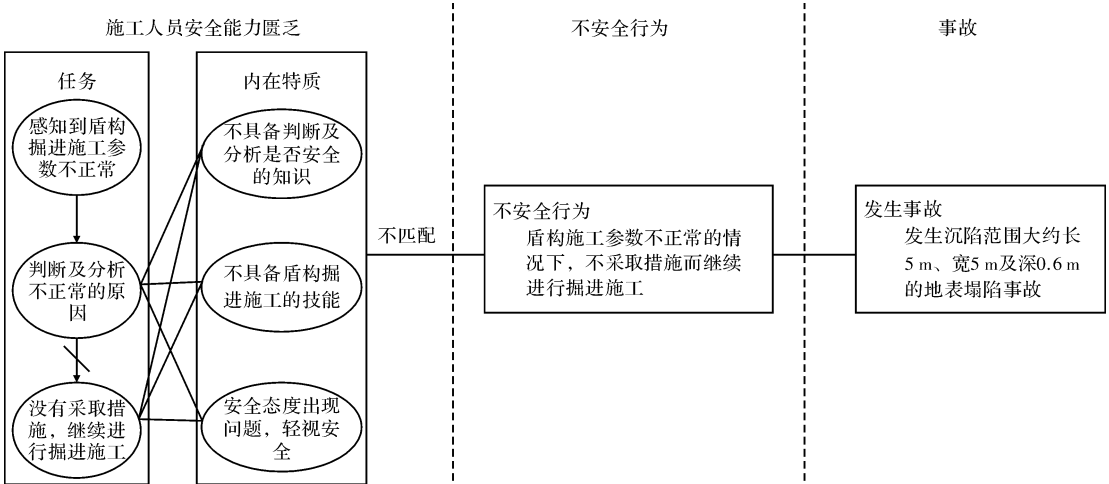


图 3 盾构坍塌事故中施工人员安全能力分析

5 结论

伴随着地铁项目的建设, 地铁施工事故频发。施工人员是事故的直接接触者, 同时也是事故发生时伤亡最为严重的群体。施工人员的不安全行为是导致事故发生的直接因素, 是安全能力匮乏的外在表现。通过分析地铁施工事故原因, 得知地铁施工人员安全能力的大小就体现在施工人员感觉到事故隐患, 做出事故隐患危险判断, 进而对事故隐患进行正确响应的过程中, 并对导致盾构法坍塌事故的事 故隐患进行了分析。同时, 以一个实际发生的盾构法施工坍塌事故为例, 分析了施工人员安全能力在事故发生过程中的体现, 准确确定了施工人员出现失误的阶段, 这对于今后提高施工人员安全能力, 保障地铁施工安全具有重要意义。

参考文献:

[1] 孔德彬, 严冰. 国务院批复 22 城市地铁建设规划, 总投资 8820 亿[EB/OL]. [2009-12-09]. <http://news.sohu.com/20091209/n268796675.shtml>.

[2] 王盼盼, 李启明, 邓小鹏. 施工人员安全能力模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(8): 40-45.

[3] 王春源. 行为决策失误事故及预防控制对策研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2006.

[4] 姚卫峰. 城市地铁施工安全预警的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2005.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50446-2008 盾构法隧道施工与验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[6] 张海波. 地铁隧道盾构法施工对周围环境影响的数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[7] 梁睿. 北京地铁隧道施工引起的地表沉降统计分析与预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

[8] 刘绍伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1297-1301.

[9] 丛恩伟. 北京地铁盾构法施工引起地表沉降的分析与预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[10] 魏广文. 北京地铁盾构隧道施工引起的地表沉降及建(构)筑物的变形控制标准研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[11] 秦建设. 盾构隧道施工中开挖面失稳事故分析[J]. 浙江建筑, 2005, 22(S0): 48-54.

[12] 王殿春, 可洪有. 大-沥区间盾构隧道施工中地面沉降原因分析[J]. 西部探矿工程, 2004, 95(4): 94-95.

Safety Capability of Constructors in Collapses of Subway Construction by Shield Tunneling

Li Qiming, Wang Panpan, Deng Xiaopeng and Wu Weiwei

(Department of Construction Management and Real Estate, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Disastrous construction accidents are common in large subway constructions. Unsafe behavior of constructors, which could be a direct factor of the accidents, is just the external manifestation of safety capability scarcity. Occurrence of a construction accident is directly affected by the safety capability of constructors. Based on an established model for safety capability of constructors, formation mechanism of the capability is analyzed. Meanwhile, by analyzing the causes of subway construction accidents, it is recognized that safety capability of constructors is reflected in the process of sensation, danger judgment and correct response of accident potential. Accident potential of collapses in subway constructions by shield tunneling is analyzed. Finally, take a real collapse in a subway construction by shield tunneling for instance, reflection of safety capability of constructors in accidents is analyzed, period in which constructors make mistakes is accurately determined to ensure safety in subway constructions.

Key words: safety capability; constructors; subway; accidents