



特种建（构）筑物建造安全控制技术丛书

穿越既有结构 施工安全控制技术

The Safety Control Methods for
Construction Crossing Existing Structures

李慧民 田卫 张广敏 钟兴润 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



特种建（构）筑物建造安全控制技术丛书

穿越既有结构 施工安全控制技术

李慧民 田卫 张广敏 钟兴润 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

内 容 提 要

本书结合穿越既有建(构)筑物、地铁、管廊、桥梁、公路等结构的施工项目,探讨了穿越既有结构施工安全影响机理与安全控制技术等内容。

首先阐述穿越既有结构施工类型及特点,提出了穿越既有结构施工安全问题;然后系统论述施工安全关键技术及其安全影响机理,分析了不同工法的施工安全影响因素;其次探讨了穿越既有结构施工安全监测技术;进而结合穿越既有结构施工安全控制的特点,构建穿越既有结构施工安全评价指标体系,设计出以预警系统、控制措施、决策系统等为主要模块的施工安全控制系统;最后基于三个穿越既有结构施工的工程案例,系统全面阐述了施工安全控制在实际工程中的应用。

本书可供穿越既有结构建设工程设计单位、建设单位、施工单位以及监理单位等相关人员阅读,也可作为高等院校相关专业教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

穿越既有结构施工安全控制技术/李慧民等著. —北京:
冶金工业出版社, 2019. 6

(特种建(构)筑物建造安全控制技术丛书)

ISBN 978-7-5024-8093-6

I. ①穿… II. ①李… III. ①结构工程—工程施工—
安全控制技术 IV. ①TU714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 092915 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹 蕊

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8093-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019 年 6 月第 1 版, 2019 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.25 印张; 235 千字; 183 页

64.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

在当前我国基础设施建设过程中，出现了大量穿越既有建（构）筑物、地铁、管廊、桥梁、公路等结构的施工项目，导致新建工程安全施工与既有结构正常运营（使用）之间产生难以协调的矛盾。因此，如何进行科学有效的施工安全控制是此类工程建设过程中的重点和难点问题。本书结合该类工程建设项目探讨了穿越既有结构施工安全影响机理与安全控制技术等内容。全书共分为9章，其中，第1章主要阐述穿越既有结构施工类型及特点，提出了穿越既有结构施工安全问题；第2章系统论述了明挖法、盾构法、浅埋暗挖法、顶管法等施工安全关键技术及其安全影响机理；第3章在总结归纳既有结构破坏形式的基础上，分析了不同工法的施工安全影响因素；第4章依据相关规范、监测仪器与监测方法，探讨了穿越既有结构施工安全监测技术；第5章结合穿越既有结构施工安全控制的特点，构建了穿越既有结构施工安全评价指标体系，系统总结相关安全控制标准；第6章在前文相关安全控制技术的基础上，设计了以预警系统、控制措施、决策系统等为主要模块的施工安全控制系统；第7~9章基于三个穿越既有结构施工的工程案例，系统全面阐述了施工安全控制技术在工程中的应用。

本书主要由李慧民、田卫、张广敏、钟兴润撰写。各章撰写分工为：第1章由李慧民、孟江、高明哲撰写；第2章由田卫、张广敏撰写；第3章由钟兴润、柴庆撰写；第4章由田卫、孟江

撰写；第5章由张广敏、钟兴举撰写；第6章由李慧民、钟兴举、高明哲撰写；第7章由关继发、钟兴举、孟江、柴庆撰写；第8章由徐珂、钟兴润、黎峻峰、李燕撰写；第9章由韩树国、柴庆、孟磊、徐红玲撰写。

本书的撰写得到了西安建筑科技大学、郑州交通建设投资有限公司、中铁二十一局等单位的教师、技术和管理人员的大力支持与帮助，并参考了有关专家学者的研究成果与文献资料，在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不足之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2018年12月

目 录

1 穿越既有结构施工安全概论	1
1.1 穿越既有结构施工安全起源	1
1.1.1 穿越既有结构施工安全背景	1
1.1.2 穿越既有结构施工安全内涵	3
1.2 穿越既有结构施工类型及特点	6
1.2.1 穿越既有结构施工类型	6
1.2.2 穿越既有结构施工特点	8
1.3 穿越既有结构施工安全问题	9
1.3.1 新建工程施工安全问题	9
1.3.2 既有结构安全问题	10
2 穿越既有结构施工影响机理	12
2.1 明挖法穿越既有结构施工	12
2.1.1 明挖法穿越既有结构施工关键技术	12
2.1.2 明挖法穿越既有结构施工影响机理	14
2.2 盾构法穿越既有结构施工	16
2.2.1 盾构法穿越既有结构施工关键技术	16
2.2.2 盾构法穿越既有结构施工影响机理	21
2.3 浅埋暗挖法穿越既有结构施工	23
2.3.1 浅埋暗挖法穿越既有结构施工关键技术	23
2.3.2 浅埋暗挖法穿越既有结构施工影响机理	26
2.4 顶管法穿越既有结构施工	28
2.4.1 顶管法穿越既有结构施工关键技术	28
2.4.2 顶管法穿越既有结构施工影响机理	30
3 穿越既有结构施工安全影响因素	33
3.1 穿越既有结构施工安全基本因素	33
3.1.1 地质因素	33
3.1.2 新建工程状况	35

3.1.3 既有结构	38
3.2 既有结构的破坏形式	38
3.2.1 既有建筑物的破坏形式	38
3.2.2 既有地铁的破坏形式	40
3.2.3 既有深基础的破坏形式	41
3.3 基于不同工法的施工安全影响因素	42
3.3.1 明挖法施工安全影响因素	42
3.3.2 盾构法施工安全影响因素	43
3.3.3 浅埋暗挖法施工安全影响因素	47
3.3.4 顶管法施工安全影响因素	48
4 穿越既有结构施工安全监测技术	49
4.1 穿越既有结构施工安全监测仪器	49
4.1.1 位移及沉降监测仪器	49
4.1.2 裂缝及变形监测仪器	52
4.1.3 应力监测仪器	54
4.2 穿越既有结构施工安全监测方法	54
4.2.1 位移及沉降监测方法	54
4.2.2 裂缝及变形监测方法	58
4.2.3 应力及地下水位监测方法	61
4.3 穿越既有结构施工安全监测方案	66
4.3.1 安全监测项选择	66
4.3.2 安全监测点布设	68
4.3.3 安全监测体系	71
5 穿越既有结构施工安全评价技术	73
5.1 穿越既有结构施工安全评价指标	73
5.1.1 施工安全评价指标概述	73
5.1.2 施工安全评价指标筛选	74
5.1.3 施工安全评价指标体系	75
5.2 穿越既有结构施工安全评价模型	82
5.2.1 施工安全评价方法	82
5.2.2 施工安全评价指标权重	84
5.2.3 施工安全风险等级划分	85
5.3 既有结构施工安全控制标准	86

5.3.1	控制标准制定原则及程序	86
5.3.2	既有结构安全控制标准制定方法	88
5.3.3	既有结构安全控制标准内容	89
6	穿越既有结构施工安全控制系统	92
6.1	穿越既有结构施工安全控制系统框架	92
6.2	穿越既有结构施工安全预警系统	93
6.2.1	施工安全预警相关概念	93
6.2.2	施工安全预警指标体系	95
6.2.3	施工安全预警等级划分	97
6.2.4	施工安全预警控制限值	98
6.3	穿越既有结构施工安全控制措施	99
6.3.1	新建工程施工安全控制措施	99
6.3.2	既有结构安全控制措施	102
6.4	穿越既有结构施工安全决策系统	106
6.4.1	施工安全决策模式	106
6.4.2	施工安全决策系统设计	107
7	地下建筑穿越既有地铁施工	109
7.1	工程概况	109
7.1.1	工程基本信息	109
7.1.2	工程地质条件	110
7.1.3	水文地质概况	111
7.2	施工安全风险项	112
7.3	施工安全控制措施	113
7.3.1	顺作基坑施工安全控制措施	113
7.3.2	逆作基坑施工安全控制措施	121
7.3.3	既有地铁隧道上方施工安全控制措施	123
7.3.4	降水施工安全控制措施	128
7.4	施工安全风险控制系统	132
7.4.1	施工安全风险控制指标	132
7.4.2	施工安全风险评价模型	133
7.4.3	施工安全风险控制系统	135

8 高速公路穿越既有铁路施工	139
8.1 工程概况	139
8.1.1 工程基本信息	139
8.1.2 箱桥顶进施工工艺	141
8.2 既有铁路路基变形数值分析	142
8.2.1 基于 FLAC 3D 的既有铁路路基变形模型建立	142
8.2.2 不同顶进步长对铁路既有线路基变形影响分析	145
8.3 施工安全风险因素分析	150
8.3.1 箱桥顶进导致铁路路基变形的风险	150
8.3.2 列车动载导致铁路路基变形的风险	150
8.3.3 施工降水导致铁路路基变形的风险	151
8.4 施工安全风险评价	151
8.4.1 施工安全风险评价指标	151
8.4.2 施工安全风险评价模型	151
8.4.3 施工安全风险等级	156
8.5 施工安全控制措施	160
8.5.1 铁路路基沉降观测	160
8.5.2 箱桥顶进步长控制	160
8.5.3 列车运行速度控制	161
8.5.4 降水控制	162
8.5.5 铁路路基注浆加固	163
8.5.6 铁路线路加固	163
9 新建地铁穿越既有地铁施工	165
9.1 工程概况	165
9.1.1 工程基本信息	165
9.1.2 地质水文条件	165
9.2 既有地铁结构状况调查	166
9.2.1 既有地铁结构现状	166
9.2.2 施工前状况调查	167
9.2.3 施工中状况调查	167
9.2.4 施工方案优化	168
9.3 施工安全风险评价	169
9.3.1 风险辨识	169
9.3.2 风险评价	171

9.4 施工安全控制措施	173
9.4.1 注浆施工工艺及措施	173
9.4.2 变形缝渗漏水控制措施	179
9.4.3 结构裂缝控制措施	180
9.4.4 轨道沉降控制措施	181
参考文献	183

1 穿越既有结构施工安全概论

1.1 穿越既有结构施工安全起源

1.1.1 穿越既有结构施工安全背景

在当前城市人口快速增长和土地资源日益稀缺的情况下,为了满足居住者对城市环境的正常要求,建设者需要采取多种途径加深对城市空间的开发利用。因此,除了以往传统的地上建筑、公路、铁路、管道等工程建设项目不断发展之外,越来越多的地下建筑、地铁以及轻轨等不断涌现在城市的各个层面。在此情况下,工程建设过程中出现了大量新建工程与既有结构之间采用上跨、下穿以及平面交叉等形式进行建设施工,如建(构)筑物与地铁之间、地铁与地铁之间、公路与地铁之间、建(构)筑物与轻轨之间、公路与铁路之间、管道与交通工程之间等的穿越施工项目。所谓穿越既有结构施工,即为新建的建(构)筑物施工时在空间上与既有结构有交叉,需要在既有结构的上部、下部或侧面穿过施工。据不完全统计,随着高速铁路、高速公路以及城市地下管网密度不断提升,目前新建高速公路或铁路,60%以上的项目都涉及穿越既有结构施工问题。如图1-1所示工程即为一高速公路下穿既有铁路施工项目,项目的难点主要集中于在确保箱涵顶进施工安全的同时还要保证列车的安全运营。



(a)



(b)

图 1-1 高速公路下穿既有铁路施工

(a) 高速公路箱涵顶进施工; (b) 对既有铁路进行保护

目前在穿越施工项目中，以城市新建地下工程（地下建筑结构、地铁、公路等）穿越既有在役或运营结构最具代表性，因为一者该类项目数量在穿越施工项目中占有较大比例，如图 1-2 及图 1-3 所示，截至 2017 年底，我国各城市在建的城轨交通里程数及车站数量相当庞大；再者该类项目采取的穿越施工形式多样，上部、下部或侧面穿越的施工方式在建设中皆有应用，城市交通网络建设更为复杂；加之，大量的城轨交通建设集中在城市建筑密集区，在项目建设的**围区域存在大量的人流交通，而且各建设区域的水文地质及建筑环境也存在很大差异。可见，此类工程不仅有一般的建设工程的特点而且具有其特殊性，其中最突出的矛盾就是新建建（构）筑物的施工安全和既有建（构）筑物安全运营的冲突问题。一方面，新建的建（构）筑物穿越既有结构，施工过程中会对既有结构的地基或者荷载状况产生影响，容易造成既有结构安全稳定问题；另一方面，既有结构在施工的条件下正常使用会对新建建（构）筑物的施工带来很大的挑战，加大了施工难度，增加了施工作业人员的安全风险。另外，由于新建工程与既有结构间存在不同的建设周期、技术标准、施工要求及管理模式，使得穿越工程施工存在“技术壁垒”和“管理壁垒”，对于后建设一方不仅是重大的风险源，更是管理和技术上需要攻克的重点和难点，而对于在役方同样承担着巨大的安全服役运营保障风险。因此，两者之间难以调和的矛盾显著增加了此类工程的安全风险。

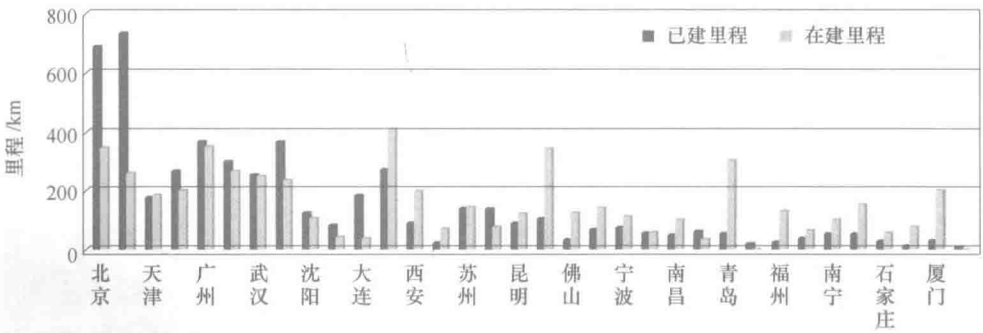


图 1-2 2017 年各城市城轨交通运营里程和在建里程统计

目前，穿越工程相关施工技术与管理尚不能完全满足工程建设需求，施工安全控制办法还比较原始和粗放，施工过程中尚缺乏系统科学的信息化安全风险控制技术与管理方法，导致实际施工过程中出现诸多问题，各种安全事故频发，造成较大经济损失和不良社会反响（如表 1-1 所示）。可见，穿越既有结构施工项目当前亟需一系列科学合理且行之有效的安全控制理论体系。这也是目前国内外相关研究领域的热点和难点问题之一。

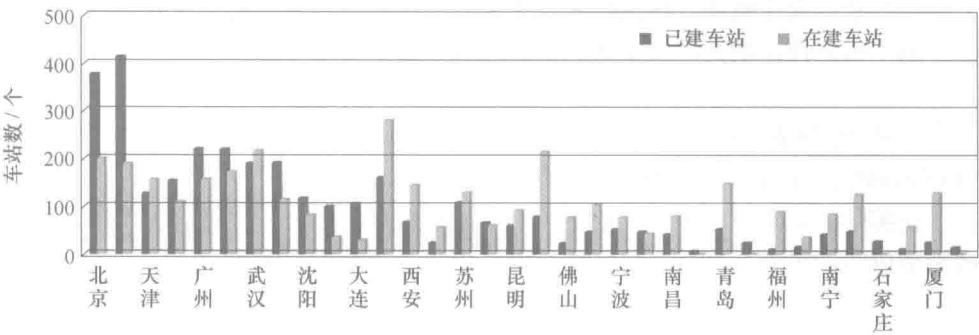


图 1-3 2017 年各城市城轨交通已建车站和在建车站统计

表 1-1 部分穿越既有结构施工安全事故

时间	地点	项目类型	安 全 事 故
2007 年 2 月	上海	隧道侧穿既有管廊	南京汉中路牌楼巷与汉中路交叉路口北侧，正在施工的南京地铁 2 号线出现渗水塌陷，造成天然气管道断裂爆炸。事故导致附近 5000 多户居民停水、停电、停气，附近的金鹏大厦被爆燃的火苗袭击，事故没有造成人员伤亡
2007 年 5 月	武汉	地铁穿越既有车站	在湖北武昌站进行箱涵下穿顶进施工过程中，工作坑的北侧突然发生坍塌，将工作坑内施工人员掩埋，造成 2 人死亡、2 人轻伤
2011 年 12 月	商丘	高速公路穿越既有铁路	商丘某段高速公路在下穿陇海线铁路施工时，由于顶进施工操作不当导致架空体系产生整体侧移，以致铁路线路停运两小时，造成较大经济损失，所幸无人员伤亡
2012 年 5 月	贵州	铁路穿越高速公路	贵广铁路穿越广州绕城高速公路，防护棚贝雷片掉落，砸中三辆汽车，造成四人受伤（重伤一人），同时广州绕城高速公路拥堵十多个小时
2016 年 10 月	沈阳	地铁穿越既有公路	沈阳市地铁 9 号线第 22 标段区间隧道发生坍塌事故，造成 3 名施工人员死亡
2018 年 2 月	佛山	地铁穿越既有公路	广东省佛山市禅城区地铁 2 号线绿岛湖—潮涌盾构区间工地发生地面塌陷事故，导致 11 人死亡，1 人失联

1.1.2 穿越既有结构施工安全内涵

1.1.2.1 穿越既有结构施工安全风险

A 安全风险定义

危险是事物所处的一种不安全状态，在这种状态下，将可能导致某种事故或一系列的损失，包括人员伤害、财产损失或环境破坏等。危险的出现概率、发生

何种事故及其发生概率、导致何种损失及其概率都是不确定的。这种事故形成过程中的不确定性，就是广义上的风险，用数学模型可表示为：

$$R = f(H, P, C)$$

式中， R 为风险 (Risk)； H 为危险 (Hazard)； P 为危险发生的概率 (Probability)； C 为危险发生导致的损失 (Cost)。

在实际的风险分析中，人们更关心事故所造成的损失，并把这种不确定损失的期望值叫做风险，这就是狭义的风险，用数学模型可表示为：

$$R = f(C)$$

式中， C 为危险发生导致的损失。

在穿越既有结构等工程建设中，风险指特定危险源引起事故发生的概率与造成损失大小的综合评估。风险是描述新建工程以及既有结构潜在危险程度的客观量。风险 R 具有损失程度和概率的二重性，所以风险可用损失程度 C 和发生概率 P 的函数来表示，即 $R = f(P, C)$ 。

B 安全风险特征

(1) 客观性。风险是客观存在的，在穿越既有结构工程建设活动中，风险是不可避免的，为了预防事故的发生，只能通过有效的安全管理措施降低风险发生的概率及损失程度，而风险是无法消灭的。

(2) 普遍性。风险并不是只存在于固定形式的活动中，任何行为都存在着风险。因此，穿越既有结构施工过程中的任何一个环节都可能存在着风险。作业人员的安全意识、施工技术可靠性、机械设备的运行状况、既有结构的运行状况以及施工管理的水平都有可能導致风险事件的发生。

(3) 不确定性。风险的不确定性主要体现在风险事件发生的时间的不确定以及造成后果的严重程度的不确定。不过通过对穿越既有结构施工过程进行科学的安全风险评价，可对风险发生的可能性和损失程度做出一定的分析和预测。

(4) 可变性。风险并不是一成不变的，风险的可变性主要体现在风险性质的变化；风险后果的变化；出现了新的风险或风险因素已经消除。在穿越既有结构工程建设活动中，随着工程的进展、管理方式的改变、人员的作业状态、水文地质条件变化等原因，风险在各个层面都有可能发生改变。

1.1.2.2 穿越既有结构施工安全事故

所谓安全事故，是指在实践生产过程中发生的人们不期望的会导致实践生产过程终止或者使其受到干扰的，并有可能造成人员伤亡或物质损失的意外事件。我国《职业安全卫生管理体系规范》定义事故为导致损失、伤害、职业病和死亡的不希望事件。穿越既有结构安全事故的发生，往往是由一个或多个风险源出现致险因子开始，倘若对这些风险源不加以合理控制，就会导致风险的继续扩大，进而导致安全事故的发生，其发生机理如图 1-4 所示。

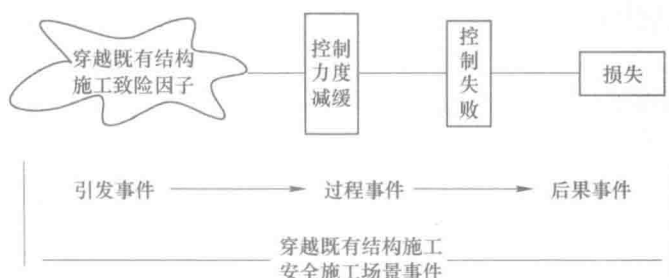


图 1-4 穿越既有结构施工安全事故发生机理

图中穿越既有结构施工安全事故发生机理描述了一个由各事件序列构成的系统的状态演化过程。致险因子在施工过程中是无处不在的，它来自人员操作失误、管理缺陷或环境恶劣等各方面，可以形成引发安全事故的触发条件或者是转化条件。场景事件，也称为不希望事件，主要由引发事件、过程事件以及后果事件三部分构成。引发事件是安全事故发生过程中首个不期望事件，它的发生意味着安全事故的开始；过程事件是紧跟引发事件其后的可能发生的事件，如果控制不利或不被控制，将会引起后果事件；后果事件则是产生损失的事件，它会造成人员、经济、环境等各方面的直接损失。对于穿越既有结构施工项目而言，新建工程现场与既有结构组成的复杂环境、各类施工专项支护方案和现场多维管理等共同构成安全事故发生的前提条件，是需要重点监控管理的对象。

1.1.2.3 穿越既有结构施工安全控制

安全风险控制是根据风险评价的结果对风险事态进行事前处理及过程控制的过程，包括风险决策和风险监控两部分。风险决策是根据风险评价的结果，从风险对策集中选定合适的对策处置风险；而风险监控是指对潜在风险事态进行监测，并适时启动有关风险控制措施的过程。风险对策通常有四类：

(1) 风险规避。风险规避是通过主动放弃或终止项目计划或实施方案来消除风险发生，以及风险发生后可能产生的损失。从风险管理的角度看，风险规避是一种最彻底地消除风险影响的方法，但可能在某种程度上会降低收益，阻碍创新。在穿越既有结构施工过程中对某些既有结构的加固支护方案的安全评估，若出现可预见的安全风险过大时，可采取风险规避的形式处理。

(2) 风险转移。风险转移是以一定的代价将某风险的结果连同对风险对应的权利和责任转移给他方。风险转移并不能消除风险，但通过第三方的介入降低自身风险，风险转移是风险隶属性在风险决策中的体现，对某方是风险事态，但对其他风险承受者可能并不是不可接受的。由于穿越既有结构施工的复杂性，所以在工程建设时业主方应尽可能选取技术实力和管理水平强的建设团队，来最大

可能地承受相应风险，保证施工过程的安全开展。另外，保险是风险转移的一种形式。

(3) 风险缓解。通过某种手段将风险降低到可接受的程度也是风险管理中常用的对策。风险缓解既不是消除风险，也不是避免风险，而是减轻风险影响，包括减轻风险发生的概率或控制风险的损失。这也是穿越既有结构施工安全控制的主要形式。

(4) 风险自留。风险自留是一种由项目主体自行承担风险后果的一种风险应对策略。风险自留要求穿越既有结构工程参建方对施工安全风险损失有充分的估计。

穿越既有结构施工安全控制是指在工程建设过程中对施工安全风险进行事先规划，有效识别重大危险源，全面分析影响既有结构及施工安全的主要因素，确立安全风险评价指标，对风险损失程度及概率做出合理预测或评价，建立相应安全风险控制体系；对既有结构部分及施工全过程进行监测及预警，核对安全风险控制的策略与措施的实施效果是否与预见相同；持续改善和细化风险控制方案，优化既有结构加固及支护方案，最大程度地降低风险事故发生的概率和减少损失程度。

1.2 穿越既有结构施工类型及特点

1.2.1 穿越既有结构施工类型

在当前工程建设过程中，涌现的穿越既有结构施工种类繁多，不同的文献对此进行分类的方式也有所不同，归结起来主要可从如下几个角度进行分类：

(1) 按穿越既有结构类型分类，可分为：穿越既有建筑物（含工业与民用建筑，如图 1-5（a）所示）、穿越既有地上线性工程（含铁路、公路、桥梁与河道等，如图 1-5（b）所示）和穿越既有地下线性工程（含地铁、管廊与地下管线等，如图 1-5（c）所示）。

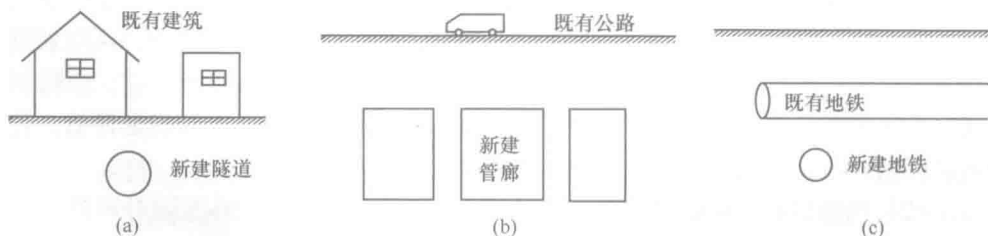


图 1-5 按穿越既有结构类型分类

(a) 穿越既有建筑物；(b) 穿越既有地上线性工程；(c) 穿越既有地下线性工程

(2) 按新建-既有结构空间相对位置分类，可分为：上部穿越（如图 1-6

(a) 所示)、侧面穿越 (如图 1-6 (b) 所示)、下部穿越 (如图 1-6 (c) 所示)。

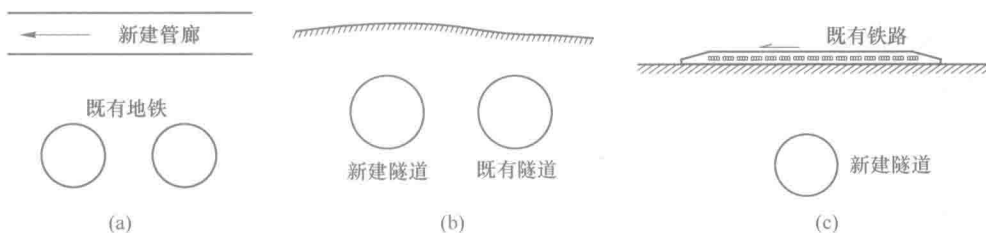


图 1-6 按穿越既有结构空间位置分类

(a) 上部穿越; (b) 侧面穿越; (c) 下部穿越

(3) 按穿越既有结构施工方法分类, 可分为: 明挖法穿越、浅埋暗挖法穿越、盾构法穿越、顶管法穿越等。

以上分类方式基本可以将目前通行的穿越既有结构施工类型包含在内, 每一类施工均可用图 1-7 所示三维视角进行刻画, 图中 x 坐标表示穿越既有结构类型、 y 坐标表示穿越位置、 z 坐标表示施工方法。如盾构法下穿既有建筑施工即为图中坐标 (x_1, y_2, z_1) 所代表的施工类型。

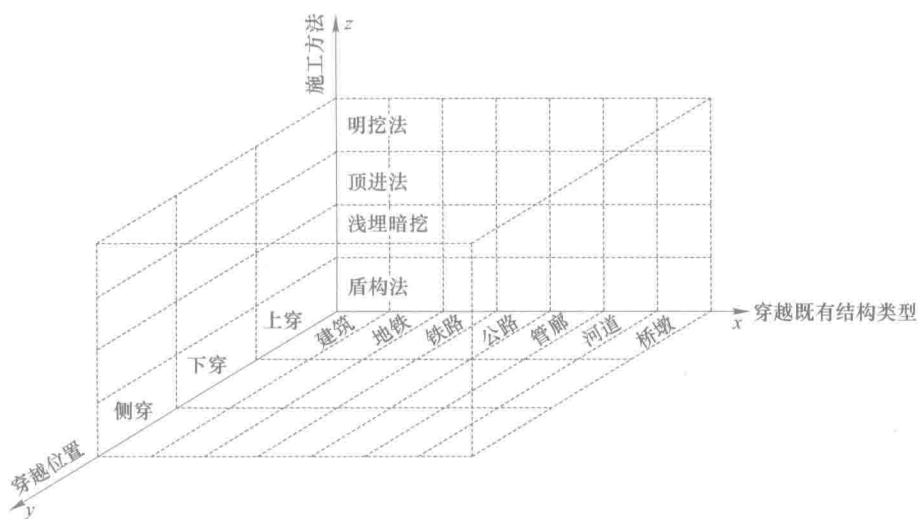


图 1-7 穿越既有结构施工分类

图 1-7 中所有的坐标组合代表的施工类型在实际工程中并不是都存在, 例如坐标 (x_1, y_1, z_1) 代表盾构法上穿既有建筑, 这种施工类型在实际工程中鲜有报道。但通过图 1-7, 可以将按这种分类方式来分的所有施工类型包含在内, 直观方便。