

深圳市工程建设地方标准

SJG

SJG 187 - 2025

岩溶地区城市轨道交通工程技术标准

Technical standard for urban rail transit engineering in karst area

2025-01-26 发布

2025-04-01 实施

深圳市住房和城乡建设局 发布

深圳市工程建设地方标准

岩溶地区城市轨道交通工程技术标准

Technical standard for urban rail transit engineering in karst area

SJG 187 – 2025

2025 深 圳

前 言

根据《深圳市住房和建设局关于发布 2021 年深圳市工程建设标准制订修订计划项目(第一批)的通知》的要求,深圳市市政工程质量安全监督总站、深圳市地铁集团有限公司、深圳市地质局会同有关单位组成编制组,经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国内外先进标准,结合深圳岩溶地区城市轨道交通工程中的实际应用,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准主要内容是:1.总则;2.术语和符号;3.基本规定;4.勘察;5.设计;6.施工;7.检验与监测;8.风险管理。

本标准由深圳市住房和建设局批准发布,由深圳市住房和建设局业务归口并组织深圳市市政工程质量安全监督总站等编制单位负责技术内容的解释。本标准实施过程中如有意见或建议,请寄送深圳市地质局(地址:深圳市罗湖区宝岗路 7 号,邮政编码:518023),以供今后修订时参考。

本标准主编单位:深圳市市政工程质量安全监督总站

深圳市地铁集团有限公司

深圳市地质局

本标准参编单位:深圳地质建设工程公司

北京城建设计发展集团股份有限公司

北京城建勘测设计研究院有限责任公司

中铁建南方建设投资有限公司

深圳大学

山东大学

深圳市市政设计研究院有限公司

深圳市岩土综合勘察设计有限公司

中国地质大学(武汉)

本标准主要起草人员:金亚兵 黄冬生 黄力平 张中安 贾科

于德涌 朱斌 王彦会 韩莉 吴永钦

敖文龙 姬凤玲 吴成刚 何建凯 董志

杜万强 费建波 成双田 罗小刚 王健

孟栋 徐壮 黎心海 易焱华 胡小辉

武科 彭远胜 龚选波 刘家国 刘懿俊

卢薇艳 唐嘉锋 张国群 吴旭彬 刘动

焦玉勇 谭飞 杨明新 张欣 王鹏

梁景业 周武 邢志豪 管子卉

本标准主要审查人员:陈鸿 周洪涛 付文光 张先亮 陈发波

齐明柱 乔丽平

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
3.1	勘察	5
3.2	设计与施工	6
3.3	检验与监测	7
3.4	风险管理	7
4	勘察	8
4.1	一般规定	8
4.2	可行性研究勘察	9
4.3	初步勘察	10
4.4	详细勘察	11
4.5	施工勘察	14
4.6	勘察成果	15
5	设计	17
5.1	一般规定	17
5.2	岩溶治理设计	17
5.3	地基基础设计	18
5.4	基坑支护设计	19
5.5	隧道设计	20
6	施工	22
6.1	一般规定	22
6.2	岩溶治理施工	22
6.3	地基基础施工	23
6.4	基坑支护施工	24
6.5	隧道施工	25
7	检验与监测	27
7.1	一般规定	27
7.2	检验	27
7.3	监测	27
8	风险管理	30
8.1	一般规定	30
8.2	风险分级	30
8.3	风险辨识	32
8.4	风险评估	33
8.5	风险预警	34
附录 A	深圳市（不含深汕特别合作区）可溶岩分布范围和岩溶发育程度图	35
附录 B	深圳市（不含深汕特别合作区）典型岩溶地质结构类型划分	36

附录 C 场地稳定性和适宜性评价	38
附录 D 岩溶地区物探方法选用表	39
附录 E 隧道岩溶治理范围参考图表	40
附录 F 岩溶地面塌陷预测分析参考标准	42
本标准用词说明	43
引用标准名录	44
附：条文说明	45

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	5
3.1	Investigation	5
3.2	Design and Construction	6
3.3	Testing and Monitoring	7
3.4	Risk Management	7
4	Investigation	8
4.1	General Requirements	8
4.2	Feasibility Study Investigation	9
4.3	Preliminary Investigation	10
4.4	Detailed Investigation	11
4.5	Construction Investigation	14
4.6	Investigation Results	15
5	Design	17
5.1	General Requirements	17
5.2	Karst Treatment Design	17
5.3	Foundation Design	18
5.4	Excavation Support Design	19
5.5	Tunnel Design	20
6	Construction	22
6.1	General Requirements	22
6.2	Karst Treatment Construction	22
6.3	Foundation Construction	23
6.4	Excavation Support Construction	24
6.5	Tunnel Construction	25
7	Testing and Monitoring	27
7.1	General Requirements	27
7.2	Testing	27
7.3	Monitoring	27
8	Risk management	30
8.1	General Requirements	30
8.2	Risk Classification	30
8.3	Risk Identification	32
8.4	Risk Estimation	33
8.5	Risk Pre-warning	34
Appendix A	Distribution and Development Degree Map of Dissolvable Rock in Shenzhen	35
Appendix B	Division of Typical Karst Geological Structures in Shenzhen	36
Appendix C	Evaluation of Site Stability and Suitability	38
Appendix D	Selection Table of Geophysical Exploration Methods in Karst Area	39
Appendix E	Reference Table and Chart for Karst Treatment Range in Tunnels	40

Appendix F Reference Standards for Prediction and Analysis of Karst Collaps 42
Explanation of Wording in This Standard 43
List of Quoted Standards 44
Addition: Explanation of Provisions 45

1 总 则

1.0.1 为确保深圳岩溶地区城市轨道交通工程建设安全适用、技术先进、经济合理、质量可靠、保护环境、风险可控，结合深圳岩溶地区的地质环境条件及轨道交通工程建设经验，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于深圳岩溶地区城市轨道交通工程的勘察、设计、施工、检验与监测以及风险管理。

1.0.3 深圳岩溶地区城市轨道交通工程的勘察、设计、施工、检验与监测以及风险管理，应结合工程地质与水文地质条件及周边环境，综合考虑线路位置与工程类型、材料与施工条件、工期与造价等因素。

1.0.4 深圳岩溶地区城市轨道交通工程除应执行本标准外，尚应符合国家、广东省和深圳市现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 可溶岩 dissolvable rock

包括碳酸盐类、硫酸盐类、卤素盐类等岩石。自然界中硫酸盐和卤素盐类岩石分布较少，其溶蚀较快，岩溶地貌较难保存，因此可溶岩通常主要是指碳酸盐类岩石。

2.1.2 岩溶 karst

水对可溶岩进行以化学溶蚀作用为特征，并包括水的机械侵蚀和崩塌作用，以及物质的携出、转移和再沉淀的综合地质作用，以及由此所产生的各种地质现象的统称，又称喀斯特。

2.1.3 岩溶水 water in karst cave (karst water)

存在于岩溶化岩体中的地下水，又称喀斯特水。

2.1.4 溶洞 karst cave

由岩溶作用所形成且发育在岩体内的空洞的统称。溶洞按成因可分为包气带洞、饱水带洞和深部承压带洞等。

2.1.5 土洞 soil cave

发育在可溶岩上覆土层中的空洞。

2.1.6 岩溶率 rate of karstification

在一定范围内岩溶空间的规模和密度的定量指标，可分为：

1 线岩溶率 (karstification rate in unit line length)：单位可溶岩长度上岩溶空间形态长度的百分比；

2 钻孔见洞隙率 (rate of holes to disclose karst)：在一定深度或层位内，揭露可溶岩洞隙的钻孔数占揭露可溶岩勘探孔总数的百分比。

2.1.7 裸露型岩溶 bare karst

直接出露地表的岩溶。

2.1.8 覆盖型岩溶 covered karst

被松散堆积物覆盖的岩溶。

2.1.9 埋藏型岩溶 buried karst

被已成岩的非可溶岩层覆盖的岩溶。

2.1.10 轨道交通结构地基 rail transit structure foundation

支撑轨道交通设施基础的土(岩)层，它必须能够承受轨道交通设施及其运行产生的荷载，并保持稳定性和安全性。

2.1.11 土岩组合地基 soil-rock composite subgrade

指轨道交通结构受力地层范围内，存在溶沟、溶槽等基岩面起伏较大的岩层与土层交错的地基。

2.1.12 岩溶地质结构类型 classification of karst geological structure

上覆岩(土)层与下伏可溶岩之间的空间组合关系的分类。

2.1.13 溶蚀裂隙 grike

地表水和地下水沿可溶岩的节理裂隙溶蚀侵蚀产生的槽状形态。

2.1.14 溶痕、溶沟 karren, lapies

地表水沿可溶岩表面进行溶蚀，形成的沟痕，微小的称溶痕，大的称溶沟。

2.1.15 溶槽 karst valley

有流水参与作用形成的长条状的岩溶洼地。

2.1.16 岩溶突水 karst water inrush

储集和运动于岩溶含水层中的地下水，当被人工揭露或自然因素失衡而骤然产生的量大且快速的涌水现象。

2.1.17 岩溶涌泥 karst mud inrush

储集和运动于溶洞、溶沟、溶槽中的流塑状泥土，当被人工揭露或自然因素失衡而骤然产生的量大且快速的涌泥现象。

2.1.18 岩溶地面塌陷 karst ground collapse

岩溶洞隙上方的岩土体在自然或人为因素作用下发生变形破坏延伸至地表，并在地面形成陷坑的一种岩溶地质作用和现象。

2.1.19 盾构法 shield method

在岩土体内采用盾构机开挖岩土修筑隧道的施工方法。

2.1.20 明挖法 cut and cover method

由地面开始施作竖向支护结构和支撑体系，垂直开挖岩土体和修筑地下结构的施工方法。

2.1.21 矿山法 mining method

在岩土体内采用人工、机械或钻眼爆破等开挖岩土修筑隧道的施工方法。

2.1.22 顶管法 pipe jacking method

在隧道穿越地下建（构）筑物、河流等各种障碍物时采用顶管机顶管的暗挖式施工方法。

2.1.23 风险 risk

岩溶地区工程建设中，不利事件或事故发生的概率（频率）及其损失的组合。

2.1.24 风险辨识 risk identification

调查识别岩溶地区工程建设中潜在的风险类型、发生地点、时间及原因，并进行筛选、分类。

2.1.25 风险评估 risk assessment

对岩溶地区工程建设风险进行分析和评估，对风险危害性及其处置措施进行决策。

2.1.26 风险接受标准 risk acceptance criteria

对岩溶地区工程建设风险进行分析和决策评估，判断风险是否可接受的等级标准。

2.1.27 风险控制 risk control

制定岩溶地区工程建设风险处置措施及应急预案，实施风险监测、跟踪与记录。风险处置措施包括风险清除、风险降低、风险转移和风险自留四种方式。

2.1.28 风险管理 risk management

对岩溶地区工程建设风险进行风险界定、风险辨识、风险评估与风险控制。

2.2 符 号

B ——隧道中心线与地面塌陷中心的距离；

D ——隧道洞径；

d ——桩身直径；

θ_r ——岩石应力扩散角；

θ ——塌陷角；

r ——地面塌陷坑的半径；

h ——地面塌陷坑的深度；

h_1 —— 隧道顶板至地面的距离；

h_2 —— 隧道底板至可溶岩岩面的距离；

H —— 溶洞顶板厚度；溶（土）洞高度；可溶岩上覆土层厚度；

L —— 左右线隧道中心间距；顶板跨度；岩溶地面塌陷影响范围。

3 基本规定

3.1 勘察

3.1.1 岩溶地区的勘察应查明建设场地可溶岩分布范围、分布规律、发育程度、地质结构类型、工程地质与水文地质特征，对场地及地基作出综合评价。

3.1.2 深圳市（不含深汕特别合作区）可溶岩分布范围和发育程度可按本标准附录 A 确定。深圳市（不含深汕特别合作区）典型岩溶地质结构类型划分可按本标准附录 B 执行。

3.1.3 岩溶地区的勘察宜分为可行性研究勘察、初步勘察、详细勘察和施工勘察四个勘察阶段，并宜根据工程需要开展专项勘察。工程规模较小、场地地质条件简单的丙级勘察或有工程经验的岩溶地区，可合并勘察阶段或直接进行详细勘察。

3.1.4 存在下列情况之一的岩溶场地，勘察应采用综合地质调查、钻探、物探、原位测试、水文地质试验和室内试验等综合勘察手段，勘察方案可进行专门研究和论证：

- 1 土洞或塌陷成群发育地段；
- 2 单一溶洞顶底相对高差大于 10m；
- 3 钻孔见洞隙率大于 60%；
- 4 钻孔线岩溶率大于 30%；
- 5 溶槽或串珠状竖向溶洞发育深度超过 50m。

3.1.5 岩溶发育程度的划分应符合表 3.1.5 的规定。

表 3.1.5 岩溶发育程度

等级	岩溶场地条件
岩溶强发育	1 地表有较多岩溶塌陷、漏斗、洼地、泉眼； 2 溶沟、溶槽强发育，石芽密布，相邻钻孔基岩面高差大于 5m； 3 地下有暗河、伏流； 4 钻孔见洞（隙）率大于 30%或线岩溶率大于 20%； 5 溶槽或串珠状竖向溶洞发育深度达 20m 以上
岩溶中等发育	介于强发育和弱发育之间
岩溶弱发育	1 地表无岩溶塌陷、漏斗； 2 溶沟、溶槽弱发育； 3 相邻钻孔基岩面相对高差小于 2m； 4 钻孔见洞（隙）率小于 10%或线岩溶率小于 5%

注：1 同一档次的各划分指标中，根据最不利组合的原则，从高到低，有 1 个指标达标即可定为该等级；

2 当地区岩溶发育存在显著差异时，应根据岩溶发育程度进行工程地质分区；

3 深圳市岩溶分布概况可按本标准附录 A 确定。

3.1.6 岩溶场地稳定性可根据场地地基稳定性、场地地震稳定性、岩溶发育程度和其他不良地质作用、地质灾害危险性等方面进行定性评价，岩溶场地稳定性可划分为基本稳定、中等稳定、不稳定、极不稳定四个等级，岩溶场地稳定性划分应符合本标准附录 C 中表 C.0.1 的规定；岩溶场地适宜性可根据场地地基稳定性、破坏后果、治理难易程度结合工程建设特征进行定性评价，岩溶场地适宜性可划分为适宜、基本适宜、适宜性差三个等级，岩溶场地适宜性划分应符合本标准附录 C 中表 C.0.2 的规定。

3.1.7 岩溶地区的勘察尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011、《岩土工程勘察规范》GB 50021、《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307、《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、《工程勘察通用规范》GB 55017、《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003、广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241、《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《地基基础勘察设计规范》SJG 01 的有关规定。

3.2 设计与施工

3.2.1 岩溶地区的轨道交通工程地基根据地层组成状况可划分为下列四种类型：

1 土质地基：轨道交通工程地基为土层，根据土的特性可分为冲洪积层地基、红黏土地基、软土地基、填土地基，含土洞地基；

2 土岩组合地基：轨道交通工程地基为土与可溶岩的组合地基，根据岩土组合特征可分为溶沟（槽）、溶蚀（裂隙、漏斗）、石芽等形成的半岩半土地基、多岩少土地基、多土少岩地基；

3 岩石地基：轨道交通工程地基为裸露型、覆盖型和埋藏型岩溶地基，含溶洞地基；

4 混合岩石地基：轨道交通工程地基由部分可溶岩与部分非可溶岩的组合地基。

3.2.2 岩溶场地基本稳定、中等稳定的城市轨道交通工程，宜选择或利用上部硬塑或可塑土层作为隧道地基或桩基持力层。

3.2.3 岩溶场地的治理范围应根据轨道交通工程所处工程地质与水文地质条件、周边环境条件和结构特点并经分析论证确定。

3.2.4 当场地的岩溶对城市轨道交通工程建设有重大影响时，应进行专门研究与论证。

3.2.5 岩溶地区隧道应进行安全风险分析，根据风险分析情况开展岩溶治理专项设计。当隧道位于I、II₁、III₁、IV₁岩溶地质结构地段时，岩溶治理设计与隧道结构设计应统筹考虑。

3.2.6 隧道位于II₁、III₁岩溶地质结构地段时，宜考虑岩溶地面塌陷的可能性；当隧道位于I、IV₁岩溶地质结构地段时，应考虑岩溶地面塌陷的可能性，并应对隧道采取保护措施。

3.2.7 岩溶地区的桩基设计应符合下列规定：

1 岩溶地区的桩基宜采用钻孔桩、旋挖桩等桩型；

2 单桩荷载较大、岩面埋深较浅场地，宜采用嵌岩桩；

3 岩溶弱发育、基岩面起伏大、埋深大场地可采用摩擦端承灌注桩；

4 岩溶中等及强发育场地宜采用端承桩；

5 岩溶中等及强发育场地不应采用人工挖孔灌注桩基础，不宜采用锤击式预应力混凝土管桩基础；

6 岩溶强发育且存在串珠状和厅式溶洞场地不宜采用一柱一桩基础。

3.2.8 岩溶地区的设计尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011、《岩溶地区建筑地基基础技术规范》GB/T 51238 和广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 的有关规定。

3.2.9 岩溶地区施工前应研究分析工程地质与水文地质条件，结合现场实际作出风险评估，制定施工技术方案和专项应急预案，做好各种应急物资储备。

3.2.10 岩溶地区地基基础、基坑、隧道施工前应根据勘察资料和设计的要求，对岩溶进行预处理。

3.2.11 岩溶地区 I 类岩溶地质结构场地不宜抽排岩溶水；当确需抽排时，应采取相应环境保护措施。

3.2.12 岩溶地区应结合工程实际进行现场试验和试验性施工，并应根据试验取得的数据确定施

工参数和工艺。

3.3 检验与监测

3.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程应根据所处工程地质与水文地质条件、周边环境条件和工程特点，开展检验与监测工作，并应反馈检验与监测信息。

3.3.2 岩溶治理的试验、施工以及竣工验收阶段均应进行治理质量和效果检验。

3.3.3 岩溶地区城市轨道交通工程的监测应为验证设计、施工及环境保护等方案的安全性和合理性，优化设计和施工参数，分析和预测工程结构和周边环境的安全状态及其发展趋势，实施信息化施工等提供资料。

3.3.4 岩溶地区检验与监测尚应符合现行国家标准《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79、《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120、广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 和《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136、深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04、《基坑支护技术标准》SJG 05 和《建筑基桩检测标准》SJG 09 的有关规定。

3.4 风险管理

3.4.1 岩溶地区城市轨道交通工程建设应进行风险管理。

3.4.2 风险管理应覆盖勘察、设计、施工全过程。

3.4.3 岩溶地区城市轨道交通工程应建立风险控制机制和信息化风险管理系统。风险管理尚应符合现行国家标准《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》GB 50652 的有关规定。

4 勘 察

4.1 一 般 规 定

4.1.1 岩溶地区城市轨道交通工程重要性等级、场地复杂程度等级和工程周边环境风险等级的划分应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021、《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307和广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241的规定。

4.1.2 岩溶地区城市轨道交通工程勘察等级应根据工程重要性等级、场地复杂程度等级和工程周边环境风险等级划分为甲级、乙级和丙级三个等级，各勘察等级划分应符合下列规定：

1 当工程重要性、场地复杂程度和工程周边环境风险等级中，有一项或多项为一级的勘察时，勘察等级应划为甲级；

2 除甲级和丙级以外的勘察等级应划为乙级；

3 工程重要性、场地复杂程度和地基复杂程度等级均为三级且工程周边环境风险等级为四级的勘察等级应划为丙级。

4.1.3 岩溶地区城市轨道交通工程勘察作业前，应搜集轨道沿线可溶岩分布区地形地貌、区域地质、水文地质、工程地质、环境地质、岩溶专项调查、已建或在建相关工程经验等资料并编制勘察实施方案。勘察作业应查明可溶岩分布特征和岩溶发育程度、岩溶水赋存情况。勘察报告应对工程建设场地稳定性、适宜性和岩溶地面塌陷等风险进行评估，并应对岩溶治理方法、地基基础选型、基坑支护型式、隧道掘进方法等提出建议。

4.1.4 岩溶地区城市轨道交通工程勘察宜采用工程地质测绘和调查、物探、钻探、现场试验测试等多种手段相结合的方法进行，并应符合下列要求：

1 可行性研究勘察阶段应查明场地地质构造、岩溶洞隙、土洞的分布；应了解场地工程地质与水文地质条件；并应对岩溶洞隙、土洞的危害程度和发展趋势做出初步判断，应对场地稳定性和工程建设适宜性作出初步评价；

2 初步勘察阶段应初步查明岩溶地质结构、岩溶洞隙、土洞的分布、发育程度和规律，应初步查明场地工程地质与水文地质条件，并按场地的稳定性和适宜性进行分区；应对场地的岩溶治理、地基基础、基坑支护、隧道掘进等设计、施工提出初步建议；

3 详细勘察阶段应查明拟建工程范围及可能影响范围的岩溶地质结构、岩溶洞隙、土洞的位置、规模、填充程度和填充物性状；应查明场地工程地质与水文地质条件；应查明岩溶水赋存、连通、活动特征，查明地下水、地表水补径排条件；应评价岩溶对工程建设和运营安全的影响；应对岩溶治理、地基基础、基坑支护、隧道掘进等设计、施工提出建议；

4 施工阶段，应根据开挖揭露的情况，进一步查明溶（土）洞边界、发育形态、岩溶水特性；应对岩溶治理措施提出具体建议。

4.1.5 岩溶地区工程地质测绘和调查宜根据工程阶段和重要性等级开展，工程地质测绘和调查的范围及比例尺应根据勘察阶段、工程特点及岩溶发育程度按下列规定确定：

1 工程地质测绘和调查范围应包括场地及周边外扩范围，外扩范围应根据地质条件、岩溶发育程度及周边环境保护需要等因素综合确定。一般区间直线段向两侧外扩不应小于100m；车站、区间曲线段及车辆基地外扩不应小于200m；周边存在河流、水库、湖泊、海湾、沟谷、边坡、山岭等特殊场地时，应根据影响程度扩大调查范围；

2 可行性研究阶段工程地质测绘比例尺可选用1:2000~1:5000，初步勘察阶段工程地质测绘

比例尺可选用 1:500~1:2000, 详细勘察阶段工程地质测绘比例尺可选用 1:200~1:500。岩溶强发育、地质条件复杂地段, 宜放大比例尺。

4.1.6 岩溶地区选用物探勘察手段时, 可根据探测目的按本标准附录 D 选择物探方法。

4.1.7 岩溶地区在工程范围及可能影响范围存在对轨道交通工程建设有重大影响的岩溶问题时, 应进行专项勘察。

4.1.8 岩溶地区勘察施工时, 应做好钻孔卡钻、掉钻、掉机和试验测试引起地面塌陷地质灾害隐患的安全防护和应对措施。

4.1.9 岩溶地区勘察穿越河道、水库等水体区域时, 勘察方法和安全防护措施应进行专门研究。

4.1.10 岩溶地区勘察完成钻探、取样、测试、试验、水位观测等工作后应封孔。

4.2 可行性研究勘察

4.2.1 岩溶地区城市轨道交通工程可行性研究勘察应针对线路方案, 开展工程地质勘察工作, 研究线路场地的地质条件, 为线路方案比选提供地质依据。

4.2.2 岩溶地区城市轨道交通工程可行性研究勘察应研究影响线路方案的岩溶发育特征。应在收集已有地质资料和工程地质调查与测绘的基础上, 开展钻探与取样、原位测试与室内试验等工作。

4.2.3 岩溶地区城市轨道交通工程可行性研究勘察应搜集沿线可溶岩分布区的地形地貌、气象、水文、地震、矿产等资料, 应调查沿线场地的工程地质与水文地质条件、工程周边环境条件、岩溶地面塌陷地质灾害情况、已建或在建城市轨道交通及相关工程建设经验等资料。

4.2.4 岩溶地区可行性研究勘察应进行下列工作:

1 应开展工程地质测绘、调查和地质勘探工作;

2 应结合地质构造、工程地质、水文地质条件等, 划分工程地质、岩溶水文地质单元;

3 应评价场地的稳定性和适宜性;

4 对影响线路方案的岩溶不良地质作用、软弱土, 应了解其岩溶成因、分布范围及发展趋势, 分析其对线路的危害, 提出避让、防治的可行性建议;

5 应研究线路、地貌、工程地质、水文地质、工程周边环境等条件, 提出线路比选方案的建议。

4.2.5 岩溶地区可行性研究勘察的勘探工作布置应符合下列规定:

1 勘探点数量应满足工程地质单元划分的要求, 每个工程地质单元应有勘探点;

2 车站沿线路纵向勘探点间距宜为 100m~150m, 区间沿线路纵向勘探点间距宜为 200m~500m, 岩溶强发育及中等发育的地段宜加密勘探点;

3 车辆段和停车场应有勘探点, 岩溶强发育及中等发育场地不应少于 3 个勘探点;

4 控制线路方案的河流、水库、湖泊等地表水体及不良地质作用和特殊性岩土地段宜布置勘探点, 部分地表水、地下水丰富地段宜布置水位观测孔; 当地下水对车站和区间工程有影响时宜布置长期水文观测孔, 观测时间不宜少于 1 个水文年;

5 在地质条件复杂地段或对线路选线和工法研究有重大影响的地段应加密勘探点;

6 当存在比选线路时, 各比选线均宜有勘探点。

4.2.6 可行性研究勘察的勘探孔深度应符合下列规定:

1 应满足岩溶场地稳定性、适宜性评价和线路方案设计、工法比选需要;

2 勘探孔应均为控制性钻孔, 孔深不应小于 35m 或进入完整基岩不应小于 10m; 对于高架段及有上盖的停车场及车辆段, 勘探孔应进入完整基岩以下 10m;

3 应揭穿填土、软土、砂土、碎石土、溶洞、软硬夹层和断裂带等软弱地层和中等~强透水地层后进入稳定岩土层，如不满足本条第 1、第 2 款要求则应与设计人员共同研究确定勘探孔深度。

4.3 初步勘察

4.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程初步勘察应在可行性研究勘察的基础上，针对岩溶地区城市轨道交通工程线路的敷设形式、各类工程的结构型式、施工方法等工作，为初步设计提供地质依据。

4.3.2 岩溶地区城市轨道交通工程初步勘察应根据沿线区域地质、工程地质与水文地质条件、岩溶分布特征和发育程度、工程周边环境等，采用工程地质调查与测绘、勘探与取样、原位测试、室内试验、物探等多种手段相结合的综合勘察方法。

4.3.3 岩溶地区初步勘察宜根据线路周边环境及场地条件选用地震反射法、微动探测法、高密度电法、探地雷达法、音频大地电磁法或瞬变电磁法等物探方法初步了解岩面埋深及起伏变化情况，并宜指导勘探布孔。

4.3.4 岩溶地区初步勘察应进行下列工作：

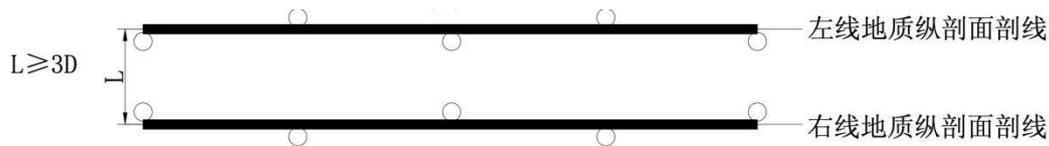
- 1 应初步查明沿线地质构造、岩土类型及分布、岩土物理力学性质、岩溶水文地质条件；
- 2 应初步查明可溶岩与非可溶岩边界，可溶岩类型，岩溶类型、成因、分布、规模、工程性质，并分析其对工程的危害程度，预测其发展趋势；岩溶塌陷危害程度划分标准应符合现行国家标准《地质灾害危险性评估规范》GB/T 40112 的规定；
- 3 应初步查明沿线地表水的水位、水质、河湖淤积物的分布，地表水与地下水的补径排关系；
- 4 应初步查明岩溶地段含水层类型、地下水埋深及承压性，地下水补给、径流、流量、流向、排泄条件，历史最高水位，地下水动态和变化规律，并评价地下水和土对建筑材料的腐蚀性；
- 5 应初步评价岩溶场地和地基的地震效应；
- 6 应评价岩溶场地稳定性和工程建设适宜性；
- 7 应初步划分岩溶场地复杂程度等级。

4.3.5 岩溶地区初步勘察勘探孔布置应符合下列规定：

- 1 勘探孔均应为控制性钻孔，地下车站、明挖区间可沿两侧按照 30m~40m 间距布孔，勘探孔宜布置在结构外侧 1m~3m 范围；
- 2 暗挖区间可按照 30m~80m 间距布孔，勘探孔宜布置在区间隧道结构外侧 3m~5m 范围；当左右线间距（L）小于 3 倍洞径（D）时，应在左、右线外侧及左右线中间布孔，并应在综合利用中间勘探孔基础上满足左右线交叉布孔；当左右线间距（L）大于 3 倍洞径（D）时，左右线应按照单线考虑，分别在隧道两侧交叉布孔。勘探孔平面布置示意图可见图 4.3.5（a）、（b）；



(a) 初勘阶段暗挖区间勘探孔平面布置示意图 (L<3D)



(b) 初勘阶段暗挖区间勘探孔平面布置示意图 ($L \geq 3D$)

图 4.3.5 初勘阶段暗挖区间勘探孔平面布置示意图

- 3 高架段及其他桩基工程，宜结合墩位和桩位布孔，勘探孔间距宜为 30m~80m；
- 4 有上盖的停车场及车辆段场地，勘探孔间距宜为 30m~60m，宜呈网格状布置；
- 5 每个工程地质单元取样和原位测试勘探孔数量不应少于勘探孔总数的 2/3，其中取样勘探孔不应少于 1/2。各工程地质单元地下水分层取样数量不应少于 3 组。

4.3.6 岩溶地区初步勘察勘探孔深度应符合下列规定：

- 1 地下线及地面线勘探孔深度应达到设计结构底板以下 30m 或进入结构底板下完整基岩不小于 10m；

- 2 高架段及有上盖的停车场及车辆段勘探孔深度应进入完整基岩不少于 10m。

4.3.7 钻孔中的素填土、砂土、粉土和一般黏性土宜进行标准贯入试验，可溶岩面表层残积土或溶蚀堆积物宜进行动探试验。

4.3.8 若钻孔揭露基岩，应采取代表性岩样进行岩矿鉴定，每个地质单元不应少于 3 组。

4.3.9 每个工程地质单元主要岩土层的取样数量不应少于 10 件（组），波速测试孔不宜少于 3 个，电阻率测试孔不宜少于 2 个。

4.3.10 岩溶地区初步勘察阶段应开展水文地质试验，并应符合下列规定：

- 1 水文试验孔应布置在不同水文地质单元、对工程建设有较大影响的不同含水层且富水性较强的地段；

- 2 水文试验宜以抽水试验为主，多层地下水地段应分层抽水，试验观测孔宜垂直或平行地下水流向布置；

- 3 宜根据工程需要布置水文观测孔，观测时间不宜少于 1 个水文年。

4.4 详细勘察

4.4.1 岩溶地区城市轨道交通工程详细勘察应在初步勘察的基础上，针对岩溶地区城市轨道交通各类工程的结构形式、埋置深度和施工方法等工作，应满足施工图设计要求。

4.4.2 岩溶地区城市轨道交通工程详细勘察应根据沿线各类工程场地的工程地质与水文地质条件、岩溶分布特征和发育程度、工程周边环境等，采用勘探与取样、物探、原位测试、室内试验，辅以工程地质调查与测绘、水文地质试验等综合勘察方法。

4.4.3 岩溶地区详细勘察应根据初勘查明的可溶岩埋深及岩面起伏形态采用地震反射法、面波法、微动探测法、高密度电法、探地雷达法、音频大地电磁法、瞬变电磁法、跨孔 CT 法或管波探测法等物探方法，进一步查明岩溶洞穴（隙）位置、规模、空间分布形态。

4.4.4 岩溶地区详细勘察阶段应进行下列工作：

- 1 应查明场地岩土层的类型、年代、成因、分布范围、工程特性，分析和评价地基的稳定性、均匀性和承载能力，应提出天然地基、地基处理或桩基等地基基础方案的建议，应对需进行沉降计算的建（构）筑物、路基等提供地基变形计算参数；

- 2 应查明岩溶分布特征和发育程度，可包括溶（土）洞、溶沟、溶槽、溶隙大小和空间分布形态，溶（土）洞填充物和填充程度；

3 应查明地下水的埋藏条件、地下水类型、水质、岩土渗透系数、地下水位及变化幅度等水文地质条件；

4 应查明对工程有影响的地表水体的分布、水位、水深、水质、防渗措施、淤积物分布等，应分析地表水体对工程可能造成的危害；

5 应查明溶洞之间的水力联系和岩溶水活动规律，对因岩溶作用发生过地表水消失或补充的地段，应分析地表水与地下水的水力联系；

6 应预测工程施工与运营期间的岩溶工程问题，对极不稳定、不稳定和可能出现塌陷的场地，应根据工程特点、基础形式与埋深、施工方法等提出相应的治理措施建议；

7 应进行岩溶地面塌陷分区和溶洞稳定性分级；

8 应分析隧道围岩的稳定性和可挖性，对围岩进行分级和岩土施工工程分级，提出对地下工程有不利影响的岩溶地质问题及治理措施的建议，应提供基坑支护、隧道初期支护和衬砌设计与施工所需的岩土参数；

9 应分析工程周边环境与工程建设的相互影响，应评估岩溶地质风险，应提出环境保护措施的建议。

4.4.5 岩溶地区详细勘察阶段勘探孔布置应符合下列规定：

1 岩溶弱发育区的地下车站、明挖及盾构区间勘探孔间距宜为 15m~25m，矿山法区间勘探孔间距宜为 10m~20m；岩溶中等发育区及强发育区的地下车站、明挖及盾构区间勘探孔间距宜为 10m~20m，矿山法区间勘探孔间距 10m~15m；勘探孔宜沿结构外侧 1m~3m 布置；车站结构角点以及出入口与通道、风井与风道、施工竖井与施工通道等附属工程部位应布置勘探孔；车站和明挖区间采用承重桩或抗拔桩时，勘探孔应结合桩位位置；明挖车站宽度较大时，应在中部适当增加勘探孔；

2 暗挖区间宜在隧道结构外侧 3m~5m（水域 5m~8m）布置勘探孔。当左、右线隧道间距（L）小于 3 倍隧道洞径（D）时，宜在左、右线隧道结构外侧 3m~5m（水域 5m~8m）范围和左、右线隧道之间部位布置勘探孔；当左、右线隧道间距（L）大于 3 倍隧道洞径（D）时，宜在左、右线隧道结构外侧 3m~5m（水域 5m~8m）范围各自交叉布置勘探孔；在区间洞口、施工竖井、联络通道、渡线、隧道陡坡段、大断面和异型断面、工法变换部位、盾构始发和到达端头等部位应布置勘探孔和勘探横剖面，每条横剖面宜布置不少于 3 个勘探孔（单洞双线隧道可布置 2 个勘探孔）；暗挖区间勘探孔平面布置示意图可见图 4.4.5；

3 高架段、上盖停车场及车辆段应按桩基工程要求进行勘察，每柱（墩）应布置不少于 1 个勘探孔，嵌岩桩宜逐桩布置钻孔；

4 山岭段隧道宜采用钻探和物探相结合的勘察方法，并宜选择不少于 2 种有效的物探方法。隧道进出洞口及隧道结构底板标高最低部位应布置勘探孔；埋深大于 30m 且洞顶中微风化岩层厚度大于 3 倍洞径（或洞跨）的隧道洞身段，勘探点间距宜按隧道埋深的 1.5 倍到 3 倍确定，复杂场地应取小值，且不宜大于 500m。埋深不大于 30m 或洞顶中微风化岩层厚度不大于 3 倍洞径（洞跨）的隧道洞身段，宜按照一般暗挖隧道要求布置勘探孔。主要的地质界线、断裂、风化深槽等位置应有勘探孔控制；

5 详细勘察阶段的勘探孔，控制性钻孔数量不应少于勘探孔总数的 1/3。采取岩土试样及原位测试的勘探孔数量之和不应少于勘探孔总数的 2/3，其中取样孔数量不宜少于勘探孔总数的 1/2。

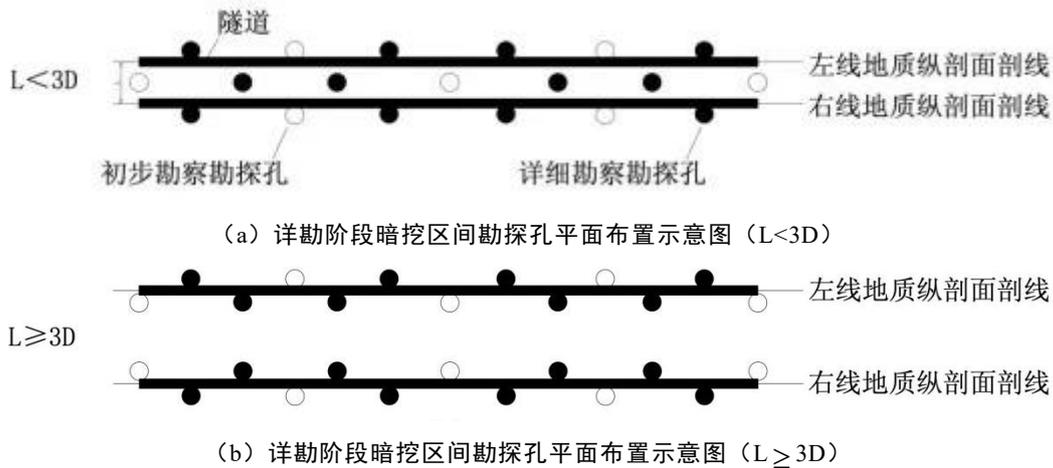


图 4.4.5 详勘阶段暗挖区间勘探孔平面布置示意图

4.4.6 地面物探发现的异常地段，应选择有代表性的部位布置验证性钻孔，验证性钻孔深度应穿越溶洞（隙）底部并进入完整基岩不少于 5m。

4.4.7 岩溶地区详细勘察阶段勘探孔深度应符合下列规定：

- 1 控制性钻孔的深度应达到设计结构底板下 30m 或进入结构底板下完整基岩不小于 10m，一般性钻孔深度应达到设计结构底板下 20m 或进入结构底板下完整基岩不小于 10m；
- 2 高架段及有上盖的停车场及车辆段勘探孔深度应达到桩端以下 10m 或穿透溶洞进入完整基岩不少于 10m；
- 3 当采用跨孔 CT 法探测时，勘探孔深度宜加深 5m。

4.4.8 出现下列情况时宜补充、加密钻孔：

- 1 相邻钻孔揭露的岩面高差大于 5m，且岩面在结构底板下 10m 范围内，相邻两钻孔之间宜补充钻孔，补充钻孔深度应入岩 2m；
- 2 已揭露土洞的钻孔周边宜补充钻孔，补充钻孔宜以已揭露土洞的钻孔为中心放射状向四周补孔，补孔间距可取已揭露土洞的高度，或可在已揭露土洞的钻孔与相邻钻孔中间加孔，直至探明土洞边界；
- 3 线路穿过断层、地层分界线处，或下穿河道等地质或水文地质条件复杂地段。

4.4.9 岩溶地区钻孔宜综合利用，钻探过程中可根据后续物探工作需要可在钻孔中预埋 PVC 管等物探管材。当钻探结束不能及时进行物探工作时，应做好保护措施，防止孔口或套管破坏、淤塞。

4.4.10 岩溶地区详细勘察阶段应查明岩溶水的水文地质特征和主要参数，且应符合下列要求：

- 1 钻探过程中应量测地下水水位，当存在多个含水层时，应对每个含水层水位进行量测；当岩溶水为承压水时，应采用有效手段量测其承压水头；
- 2 需要进行地下水控制的车站和区间工程应进行水文地质试验，水文地质试验手段可采取抽水试验、连通性试验、声纳渗流测井等手段。抽水试验孔深度应进入岩溶含水层底板下不少于 2m；宜在代表性地段开展统测水位及群孔抽水试验确定降水影响半径；
- 3 进行岩溶连通试验时，可采用示踪法、充电法或自然电场法等方法，投放的示踪剂应符合环境保护要求。

4.4.11 岩溶地区详细勘察取样和原位测试的位置、数量等，应满足岩溶地区岩土工程分析评价需要，且应符合下列要求：

- 1 每个工点每一主要岩土层的试样或原位测试数据均不应少于 10 件（组）；地下水分层取样时，各工点每个含水层的水样数量不应少于 3 组，每一处地表水体水样不应少于 2 组；
- 2 每个工点波速测试不宜少于 3 孔，电阻率测试不宜少于 2 孔；当采用连续记录的静力触

探或动力触探为主要勘察手段时，每个工点不应少于 3 个孔；

3 针对溶（土）洞填充物、溶槽（沟）堆积物，溶（土）洞、溶槽（沟）强发育地段应加密取样和测试。

4.4.12 跨孔 CT 法探测实施前应选择代表性地段进行试验验证。跨孔 CT 法布置和验证应符合下列规定：

1 跨孔 CT 法钻孔（CTK）宜沿建（构）筑物外轮廓线对称布置（图 4.4.12）。CT 测线的两端钻孔间距宜小于 25m；

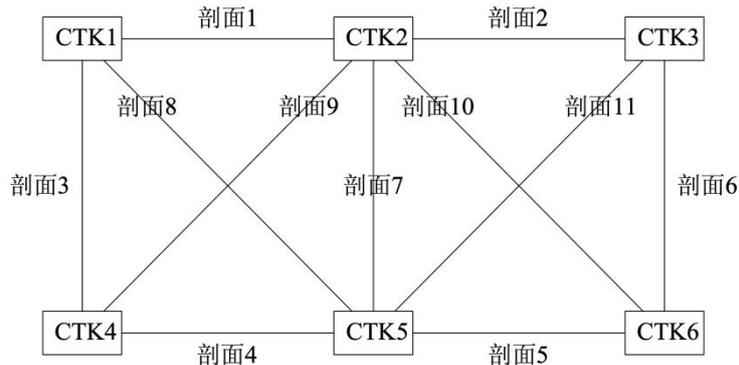


图 4.4.12 CT 法探测剖面示意图

2 跨孔 CT 探测深度应符合本标准第 4.4.7 条的规定；

3 跨孔 CT 法验证孔不宜少于 4 个；验证孔深度应与实测深度一致；验证孔应进行原位测试和取样试验。

4.4.13 当岩溶对工程有重大影响时，应进行岩溶专项勘察工作，进一步查明拟建工程范围内岩溶发育特征及岩溶水特征，分析其影响，并提出针对性的岩溶处理措施建议。

4.4.14 岩溶专项勘察勘探孔布置和孔深等技术要求应按照本标准 4.4.5~4.4.8 的规定执行。

4.5 施工勘察

4.5.1 岩溶地区城市轨道交通工程应针对岩溶场地各类工程的施工方法、施工工艺的特殊要求和施工中出现的岩溶地质问题等开展施工勘察工作。

4.5.2 施工勘察应进一步查明溶（土）洞边界和发育形态、岩溶水特性；对岩溶发育强烈、岩溶水文地质条件复杂的地段，应结合探边等工作进一步加密钻孔进行施工补勘；在区间、出入线、联络通道等隧道施工过程中，应加强岩溶不良地质超前预报工作。

4.5.3 对详勘揭示的溶（土）洞，施工勘察应结合岩溶治理设计要求，应采用探灌结合的方式，在已发现的溶（土）洞周边既有勘探孔周围一倍洞径范围加密勘探，直至探明溶（土）洞边界或设计规定治理边界。

4.5.4 岩溶地区明挖车站及明挖区间的基坑支护结构应在施工阶段实施超前钻探，并应符合下列规定：

1 明挖车站及明挖区间进入岩层的支护桩，可隔桩布置超前钻孔，但钻孔间距不宜大于 3m；对基坑立柱桩，应一桩一孔布置钻孔；

2 明挖车站及明挖区间进入岩层的地下连续墙，宜沿地下连续墙中轴线每 3m 布置一个超前钻孔，转角位置可增加钻孔；

3 超前钻孔深度应大于设计桩长（墙深）5m。

4.5.5 岩溶地区高架段、上盖停车场及车辆段，应按桩基工程要求进行施工勘察，嵌岩桩应采

用一桩一孔的方式开展工作，大直径桩宜根据桩径大小增加超前钻孔数量或增加物探工作。

4.5.6 岩溶地区区间隧道、联络通道、过街通道等采用盾构、矿山、隧道掘进机（TBM）等工法施工时，应进行超前地质预报。超前地质预报可采用超前钻探或地震反射法、高密度电法等物探方法。

4.5.7 对于岩溶地区的基槽、基坑底板和隧道结构，宜采用物探手段及必要的钻探，探查验证结构外侧 3m 范围内的岩溶发育及治理效果。

4.5.8 难以实施超前钻孔的地段，可采用水平钻探、斜孔钻探或地面物探手段探测岩溶发育情况及分布特征。

4.6 勘察成果

4.6.1 岩溶地区城市轨道交通工程岩土工程勘察，应在收集已有资料和工程地质调查与测绘、钻探、现场试验测试、室内试验以及物探等成果的基础上，根据工程特点、勘察阶段、设计方案、施工方法对勘察的要求，进行岩土工程分析与评价，应提供场地的岩土工程勘察报告。

4.6.2 岩溶地区勘察报告中的岩土工程分析与评价，应论据充分、针对性强，所提建议应技术可行、经济合理、安全适用。岩土参数的分析与选用应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 和《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 的有关规定。

4.6.3 岩溶地区勘察成果报告编制应符合下列原则：

1 可行性研究勘察阶段和初步勘察阶段宜按线路整体、地质单元或敷设方式分段编制整体勘察报告，岩溶勘察成果宜作为整体勘察报告的一部分；

2 详细勘察阶段应按照车站、区间、车辆基地等地段编制整体勘察报告，岩溶勘察成果宜作为整体报告的一部分，或可将岩溶勘察成果作为详细勘察成果报告的附件；

3 施工勘察阶段的岩溶勘察成果宜单独编制报告；

4 专项勘察成果应单独编制报告。

4.6.4 岩溶地区勘察报告应符合下列规定：

1 勘察报告应包括文字部分、表格、图件和重要的支持性资料；

2 文字部分除包括现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 的规定外，尚应包括岩溶不良地质作用的描述和岩溶对工程的影响评价；

3 表格除包括现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 的规定外，尚应包括溶（土）洞特征汇总表；

4 图件除包括现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 的规定外，尚应包括溶（土）洞分布平面图、地质剖面图、岩溶物探解译成果图、地下水流向平面及剖面示意图、岩面等深线图；

5 重要的支持性资料应包括原位试验测试、室内土工试验、水质分析、岩石试验、岩矿鉴定、物探及其他等原始资料。

4.6.5 岩溶不良地质作用的描述应包括下列内容：

1 岩溶发育的地质背景和形成条件；

2 岩溶发育形态、规模和空间分布特征，溶（土）洞填充程度与填充物特征；

3 岩溶钻孔见洞率、线岩溶率，覆盖层厚度、性质，溶洞、土洞与塌陷的成因及其发展趋势；

4 岩溶发育的连通性、地下水的连通性；

5 岩溶地下水的类型、分布特征、水位及变化幅度、补径排条件；

6 岩溶地质结构类型，地表水、覆盖层地下水与岩溶地下水之间的水力联系。

4.6.6 岩溶对工程的影响评价应包括下列内容：

- 1 岩溶场地地基稳定性和工程建设适宜性评价；
- 2 溶洞、溶沟（槽）、溶隙、土洞和岩溶水对城市轨道交通工程施工的影响评价；
- 3 溶洞、溶沟（槽）、溶隙、土洞和岩溶水对城市轨道交通后期运营的影响评价；
- 4 城市轨道交通工程施工对周边建（构）筑物、道路、地下管线等环境影响评价；
- 5 城市轨道交通后期运营对岩溶稳定性的影响评价。

4.6.7 溶洞、土洞对工程的影响评价，除应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021和《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307有关规定外，尚应包括下列内容：

- 1 地基不均匀沉降的评价；
- 2 地基基础附近存在溶（土）洞，使基础下岩土层沿临空面或软弱结构面滑动、塌落的可能性评价；
- 3 基岩和上覆土层内，由于岩溶地层较复杂的水文地质环境，易产生新的工程地质问题，造成地质环境恶化的可能性评价。

4.6.8 存在第四系土层覆盖层的溶洞，应按下列原则评价地面塌陷的可能性并提出防治措施建议：

- 1 大量抽排或疏干岩溶水的场地及其影响半径范围内的场地，不经处理不应作为建筑地基；
- 2 覆盖层为黏性土但有土洞存在时，未经处理不应作为建筑场地；岩溶水补给区不应作为建筑场地；必须用作建筑场地时，应在采取填充注浆封堵等处理措施的前提下，采用端承桩作为建筑物基础；
- 3 地下水位高于基岩表面的岩溶地区，应考虑由人工降低地下水引起土洞或地表塌陷的可能性；塌陷区的范围及方向可根据水文地质条件和抽水试验的观测结果综合分析确定；在已有建筑物附近抽水时，应考虑其影响；
- 4 应评价岩溶场地勘察钻探、桩基及地下工程施工诱发地面塌陷的可能性，并应提出防治措施建议。

4.6.9 暗挖隧道应评价隧道断面影响范围内的洞隙分布及填充物情况对隧道施工及运营安全的影响；应对爆破振动、抽排岩溶水等引发岩溶塌陷的可能性进行评估；应预测施工期间岩溶突水、岩溶涌泥位置及强度并提出预处理措施建议。

4.6.10 岩溶勘察报告应根据工程特点、勘察场地工程地质与水文地质条件、岩溶发育与地下水特征、周边环境条件等，提出岩溶治理、设计、施工、检验与监测以及风险管理等建议。对极不稳定场地，应提出避让或处理措施建议；对不稳定场地应提出处理措施建议。对岩溶水应提出长期监测技术和管理措施建议。

5 设计

5.1 一般规定

- 5.1.1** 岩溶地区城市轨道交通工程线路应避让岩溶强发育地段，无法避让时，宜选择穿越可溶岩分布范围最小、环境影响程度最低且岩溶易于治理的地段通过。
- 5.1.2** 隧道轴线应避让构造破碎带和可溶岩与非可溶岩接触带，无法避让时，隧道轴线不宜与岩层走向线平行，宜与岩层构造线大角度斜交或垂直通过。
- 5.1.3** 区间隧道宜通过调整隧道纵坡坡率，避开“上土下岩、半土半岩”地层。
- 5.1.4** 应综合考虑工程特点、工程地质与水文地质条件、岩溶分布特征及发育程度、隧道结构类型、周边环境等因素开展岩溶治理设计、地基基础设计、基坑支护设计、隧道设计和周边环境保护设计。
- 5.1.5** 岩溶治理设计、地基基础设计、基坑支护设计、隧道设计和周边环境保护设计应遵循“统筹协调，动态设计”的设计原则。
- 5.1.6** 岩溶治理对象应包括溶（土）洞、溶沟、溶槽、溶隙、岩溶水以及砂土、砾石土、软弱土等。
- 5.1.7** 岩溶地区应加强岩溶水治理和区间隧道防、排水设计。
- 5.1.8** 设计尚应符合现行国家标准《地铁设计规范》GB 50157、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136、深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04 和《基坑支护技术标准》SJG 05 的有关规定。

5.2 岩溶治理设计

- 5.2.1** 岩溶地区城市轨道交通工程岩溶治理设计应综合考虑工程特点、岩溶发育特征、地质构造、地表水径流、地下水赋存条件、周边环境以及施工工艺等因素，选择适宜的治理方法。
- 5.2.2** 岩溶治理方法可选择充填法、注浆法、地基加固法、桩基法等单一或多种组合方法。未填充、半填充溶（土）洞宜选择填充、注浆法；全填充溶（土）洞、溶槽、溶隙宜选择注浆加固法；软弱土宜选择注浆、搅拌桩、旋喷桩加固法；高架轨道基础下存在串珠状溶洞地基宜选择桩基穿越法；岩溶水堵漏宜选择注浆法或填、注组合法。
- 5.2.3** 明挖车站岩溶治理范围应考虑明挖结构施工、运营安全，结合溶（土）洞与车站结构的位置关系、溶洞的发育特征及大小、基坑开挖深度、坑底岩土层厚度及特性等因素综合确定。基坑坑壁外侧 3m、支护桩（墙）埋深及其底面以下 5m 范围内的溶（土）洞、溶沟、溶槽、溶隙以及砂土、砾石土层应进行治理；基坑内坑底以上影响土石方开挖安全的溶（土）洞、坑底以下 5m 范围的溶（土）洞、坑底以下 5m~10m 范围跨高比大于 1 的溶洞应进行治理。
- 5.2.4** 暗挖隧道岩溶治理范围应考虑施工及运营安全，溶洞与区间位置关系，溶洞的大小、溶洞顶板稳定岩层的厚度、溶洞高跨比，隧道洞径大小等因素综合确定。暗挖隧道岩溶治理范围可按本标准附录 E 的规定确定。
- 5.2.5** 当车站、区间隧道底板附近存在溶沟、溶槽、溶隙，填充物为软弱土，且底板地基承载力和变形不满足长期运营安全时，应对基底地基进行加固处理。
- 5.2.6** 当明挖基坑坑底位于 I₁、II₁ 岩溶地质结构地层时，应根据地层水压、水量、含水层厚度等

综合比选支护结构埋深和坑底防渗治理措施。当采用竖向支护结构兼作隔渗措施时，竖向支护结构应穿越溶洞进入不透水岩层不小于 1.5m。当采用注浆方式治理坑底涌水时，其注浆方式和封底加固厚度应根据岩土层的性质、岩溶发育程度、地下水压力大小等因素综合分析确定。封底注浆加固后的土层应满足抗突涌稳定性的要求。

5.2.7 充填、注浆孔的布置应根据溶（土）洞的埋深、大小、填充情况等因素综合确定，注浆孔的直径大小应与充填、注浆材料相匹配。充填、注浆材料应根据溶（土）洞的发育特征、大小、充填情况、现场施工条件、岩溶水赋存特征等因素综合选择。

5.2.8 充填、注浆施工前，应进行现场试验。施工过程中应根据实际情况完善充填、注浆施工工艺和调整相关技术参数。

5.2.9 岩溶治理设计尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04 的有关规定。

5.3 地基基础设计

5.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程地基基础设计应分析判定沿线岩溶发育场地的稳定性。岩溶场地稳定性可按本标准附录 C 的规定判定。

5.3.2 岩溶地区地基基础设计应根据场地地质条件结合建（构）筑物荷载、基底覆盖土层厚度及下卧软弱土层的分布，综合比选天然地基、复合地基和桩基。经判定岩溶洞穴（隙）顶板在设计附加荷载、地震作用及其他设计状况下处于稳定状态的地基，可利用可溶岩上覆土层作为天然地基；当天然地基不能满足要求时，可根据工程需要进行地基加固处理，处理后地基应满足承载力、变形及稳定性要求；当地基加固处理难以满足要求时，宜选用桩基。

5.3.3 I₁ 岩溶地质结构场地且易发生岩溶地面塌陷时，未经处理不得作为建（构）筑物基础持力层。

5.3.4 浅基础地基中附加应力影响范围内的土洞必须进行处理，且应采取必要措施防止未探明的土洞及潜在的土洞对建（构）筑物安全的影响。

5.3.5 岩溶地区可采用浅基础或桩基础。浅基础可采用扩展基础、条形基础、筏形基础等整体性好、刚度大、跨越能力强的基础形式。岩溶中等发育及强发育场地，不宜采用无筋扩展基础；岩溶弱发育场地，若采用无筋扩展基础时，应增设钢筋混凝土圈梁。

5.3.6 岩溶地区地基基础设计应包含地基的承载力、变形及稳定性计算，基础的极限状态计算、构造措施及耐久性设计。地基、基础计算和基础构造要求应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 和《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定。

5.3.7 可溶岩岩面起伏较大的 III 类岩溶地质结构场地，应考虑其对地基稳定性、承载力和变形的影响；地基主要受力层范围内存在软弱下卧层时，应验算下卧层承载力和变形。

5.3.8 岩溶地区桩基设计应符合下列要求：

1 当一桩有多个施工勘探孔时，应采用最不利的勘探孔资料进行设计；

2 岩溶弱发育场地的桩基最小入岩深度和桩端下溶洞顶板厚度应按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 规定执行；

3 对于岩溶中等发育及强发育场地的嵌岩端承桩，桩端全断面嵌入完整岩层的深度不应小于 2 倍桩端直径且不得小于 2.0m；

4 受荷较大的大直径端承桩应穿越岩性较差、岩体较破碎、岩溶裂隙发育强烈、裂隙水丰富的岩层进入完整岩层，且桩端下完整岩层厚度不宜小于 3d（d 为桩径）且不小于 5m；当桩端

以下持力层岩性较差、岩体破碎、岩溶裂隙发育强烈、裂隙水丰富时，岩层厚度不宜小于 $4d$ 且不小于 $6m$ ；摩擦型端承桩桩端下完整基岩层厚度不宜小于 $2.5d$ 且不小于 $4m$ ；端承摩擦桩桩端下完整基岩层厚度不宜小于 $2d$ 且不小于 $3m$ ，当其桩侧摩擦力占比超其总承载力的 70% 时，桩端下完整基岩层厚度不宜小于 $1.5d$ 且不小于 $2m$ 。桩基承载能力应通过现场试验验证；

5 当遇竖向溶槽（沟）、溶洞或串珠状溶洞地基时，可按摩擦端承桩进行桩基承载力计算，当溶洞间隔板厚度小于 $1m$ 时，不应计入桩身侧阻力。单桩竖向承载力特征值宜通过单桩竖向静载试验或持力层岩性判定确定；

6 岩溶场地桩基采用后注浆技术时，其单桩竖向承载力特征值应通过单桩竖向静载试验确定，且应考虑施工因素的不确定性，对试验结果进行适当折减；

7 判定为不稳定或极不稳定且岩溶地质结构为 I_1 、 III_1 的场地，应采用大直径嵌岩桩且不应计取基岩面以上第四系土层的摩阻力，并适当加强桩身混凝土强度和配筋；单桩基础应考虑负摩阻力的影响；

8 嵌岩桩桩径 d 应根据桩基承载力计算确定，并应考虑桩端持力层范围溶洞的影响。当溶洞顶板跨度 L 小于 $8d$ 时，桩径 d 应符合下式要求：

$$d \geq L - 2H \tan \theta_r \quad (5.3.8)$$

式中：

L ——溶洞顶板跨度（m）；

H ——溶洞顶板厚度（m）；

θ_r ——岩石应力扩散角（°），宜取 45° 。

5.3.9 岩溶地区地基基础设计尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 和广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 的有关规定。

5.4 基坑支护设计

5.4.1 岩溶地区城市轨道交通工程明挖基坑支护安全等级应综合考虑场地地质条件、岩溶分布特征、发育程度、基坑深度、周边环境等因素，且应按照现行深圳市标准《基坑支护技术标准》SJG 05 的规定确定，位于岩溶强发育场地的基坑，安全等级应提高一级。

5.4.2 岩溶地区支护结构选型应根据场地工程地质与水文地质条件、岩溶发育程度、岩溶水赋存情况、基坑深度、周边环境等因素综合确定。

5.4.3 岩溶强发育和中等发育的场地、岩溶水存在承压性或连通性、开挖深度较大、周边环境对变形控制要求严格的基坑，应采用内支撑体系。采用内支撑体系时，第一道支撑宜采用混凝土支撑。

5.4.4 岩溶地区基坑支护结构计算和稳定性验算，应按照深圳市标准《基坑支护技术标准》SJG 05 的相关规定执行。

5.4.5 岩溶地区支护桩（墙）的嵌固深度应满足支护结构稳定性要求。当支护桩（墙）嵌固深度范围内存在溶（土）洞时，应对溶（土）洞进行充填注浆加固处理，根据检测的加固体强度参数修正加固段水平抗力，并应进一步计算支护桩（墙）的嵌固深度。

5.4.6 当可溶岩层面为顺坡向，或溶沟、溶槽、石芽等外露岩面相对于基坑开挖为不利软弱结构面时，应进行基坑支护体系抗滑移稳定性验算。

5.4.7 可溶岩岩面起伏较大且采用地下连续墙支护时，宜根据岩面起伏情况调整地下连续墙分幅宽度或设置为阶梯墙。

- 5.4.8** 基坑内支撑立柱桩应进入稳定岩土层，设计方法应与工程桩的设计方法相同。
- 5.4.9** 基坑工程岩溶水治理措施应结合场地水文地质条件、岩溶发育程度、岩溶水赋存及连通情况、周边环境复杂程度、开挖面及嵌固段与可岩溶空间位置关系等因素综合确定，且应采用“封堵为主，降排为辅，综合治理”的治理原则。
- 5.4.10** 岩溶地区基坑开挖前，宜进行抽水试验检验岩溶水封堵效果。当封堵效果不显著时，应分析原因并采取补救措施。
- 5.4.11** 当基坑底部处于土岩结合面或溶隙发育带，且岩溶水的水头超过基坑坑底标高时，应验算土岩结合面或溶隙发育带上覆土层的抗渗稳定性，当抗渗稳定性不满足要求时，应采取降低岩溶水水压、加固上覆土层等措施。当坑底附近存在开口溶洞或溶洞通道时，应采用充填、注浆法进行加固处理，防止坑底突水、涌泥。
- 5.4.12** 当岩溶水采取降排方法时，应注意控制水位降深，并应分析评估降排水可能对周边环境的影响。当评估周边建（构）筑物、管线、地面存在变形、沉降或塌陷的可能性时，应对溶（土）洞采取充填封堵或隔渗等加固处理，且应设置地下水位观测井和回灌井。
- 5.4.13** 当基坑侧壁及坑底揭露红黏土等遇水易软化土层时，应采取有效封堵措施，避免地表水、雨水、地下水冲刷或浸湿软化红黏土层。
- 5.4.14** 可溶岩采取爆破开挖时，应提前对支护体系采取加固措施，防止因爆破震动引起支护体系变形、失稳以及对基坑坑底岩土层的破坏。
- 5.4.15** 基坑支护设计应与施工密切配合，应结合施工现场实际情况进行动态设计。
- 5.4.16** 岩溶地区基坑支护设计尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《基坑支护技术标准》SJG 05 的有关规定。

5.5 隧道设计

- 5.5.1** 岩溶地区城市轨道交通工程的区间隧道须穿越岩溶强发育区或半岩半土地层时，应通过调整线路纵坡坡度，减少隧道在岩溶强发育区或半岩半土地层中的长度。联络通道应避开岩溶强发育和中等发育区，无法避开时，岩溶治理范围和方法应与区间隧道岩溶治理统筹考虑。
- 5.5.2** 矿山法施工存在岩溶突水、涌泥及地面塌陷等施工风险，穿越岩溶地区的区间隧道宜选盾构施工工法，联络通道宜选机械施工工法。
- 5.5.3** 岩溶地区隧道设计荷载应根据地形、地质条件、埋置深度、施工工法、相邻隧道间距等因素，按照现行行业标准《铁路隧道设计规范》TB 10003 的规定选取。
- 5.5.4** 岩溶地区隧道结构设计应与岩溶治理设计同步进行。施工前已查明的溶（土）洞，宜在地面进行预处理；施工过程中遇见的溶（土）洞宜采取洞内处理和地面处理相结合的方式处理。
- 5.5.5** 隧道工程岩溶水治理措施应结合沿线场地水文地质条件、岩溶发育程度、岩溶水赋存及连通情况、隧道地面环境复杂程度、开挖面岩性特征等因素综合确定。对水压高、水量大的隧道宜采用“封堵为主，疏排为辅，综合治理”的治理原则；对水压和水量相对较小的隧道宜采用全包不排水的治理原则。
- 5.5.6** 矿山法隧道岩溶治理设计应符合下列规定：
- 1 衬砌结构防水可根据不同区段岩溶水文地质条件进行分区设计，分区防水能力应与岩溶水发育情况相适应；
 - 2 当遇到大型、特大型溶（土）洞，治理难度及治理费用过大时，应对其进行技术、经济综合比较，可局部改线绕避溶洞；

3 根据溶（土）洞与隧道的位置关系及溶洞填充情况，可采用砂石、素混凝土等充填、注浆等措施治理；

4 隧道侧墙、底板遇到小规模溶沟、溶槽、溶隙时，可采取充填+注浆的方式处理，也可在隧道侧墙及底部设置盲沟、暗管等疏排岩溶水；

5 隧道拱部以上溶洞可根据岩石破碎程度采用喷锚支护加固、注浆、加设护拱及拱顶充填方式进行治理；

6 水量较大地段隧道可设置排水盲沟和道床排水沟，加大排水截面；排水系统应考虑施工、运营期间的可维护性，并应满足不利情况下岩溶水排水能力的要求；

7 富水岩溶地段衬砌结构应考虑向相邻地段延伸一定范围，与相邻地段衬砌接缝处应设置截水措施；

8 矿山法隧道岩溶治理范围可按本标准附录 E 确定。

5.5.7 盾构隧道岩溶治理设计应符合下列规定：

1 岩溶治理应以砂石、素混凝土等充填和注浆加固等地面措施为主，洞内注浆充填措施为辅；

2 对Ⅲ₁岩溶地质结构地段，应对隧道底板下的溶沟、溶槽及其软弱黏土进行注浆加固处理；

3 对Ⅰ、Ⅳ₁岩溶地质结构地段，应根据岩溶塌陷角、隧道到岩面距离及隧道直径计算岩溶塌陷影响范围，确定岩溶处理范围；可采用注浆、素混凝土充填等措施处理；

4 对Ⅱ、Ⅲ₂、Ⅳ₂岩溶地质结构地段，可根据本标准附录 E 直接对溶洞进行注浆充填处理；

5 对Ⅰ类岩溶地质结构地段，施工期和运营期应设置水位观测井对岩溶水进行长期监测。

5.5.8 岩溶地区隧道衬砌设计应符合下列规定：

1 隧道断面尺寸除应满足限界要求外，尚应预留变形量；变形量可根据围岩级别、隧道截面、埋置深度、施工方法、岩溶地质结构类型等因素确定；

2 设计水压力应根据岩溶地质结构类型、富水情况、溶洞填充情况、隧道防排水类型、隧道埋深等综合分析确定；

3 隧道采用全包防水时应验算衬砌抗水压能力；

4 岩溶地段隧道衬砌结构和配筋应予以加强。

5.5.9 岩溶地区隧道拱、墙背回填应符合下列规定：

1 矿山法隧道周边的超挖部分应采用同级混凝土回填密实；

2 盾构隧道应加强同步注浆、二次注浆。

5.5.10 岩溶地区隧道设计尚应符合现行国家标准《地铁设计规范》GB 50157、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136和深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04 的有关规定。

6 施 工

6.1 一 般 规 定

- 6.1.1** 岩溶地区城市轨道交通工程施工前应对工程影响范围内的周边建（构）筑物进行现场调查，并按规定对工程影响范围内的建（构）筑物进行鉴定和安全评估，结合实际采取风险防范措施，布设监测点。
- 6.1.2** 对工程影响范围内的地下障碍物、构筑物及管线等应进行施工前调查和探测，查清其属性、材质、大小及分布等情况；应根据工程所在场地的环境保护要求，进行工程环境调查工作。
- 6.1.3** 施工前应研究分析场地工程地质与水文地质资料，应结合现场实际情况，作出岩溶风险评估，应制定施工技术方案和专项应急预案，应完善施工和应急准备。
- 6.1.4** 主体工程施工前，应按设计要求完成岩溶治理工作。
- 6.1.5** 施工过程中，应采取预控措施，防止施工引起岩溶地面塌陷；同时应重视环境效应，并应遵循信息化施工原则。
- 6.1.6** 施工测量基准点应选择在施工影响范围以外不受扰动的位置，基准点应稳定可靠。

6.2 岩溶治理施工

- 6.2.1** 岩溶地区城市轨道交通工程岩溶治理正式施工前，应选取有代表性的地段进行岩溶治理试验性施工、选定岩溶治理配套机械设备、确定各项技术参数及获取溶（土）洞充填系数等。岩溶不同分布特征的区域应分别进行试验。
- 6.2.2** 溶（土）洞治理施工前应先钻孔探边。探边钻孔宜方格状布置，并应采取取芯钻进，应查明溶（土）洞边界、洞内填充物及其状态等信息，应估算溶（土）洞体积及充填材料用量。若无法一次性完成溶（土）洞探边，应分次进行。
- 6.2.3** 溶（土）洞探边钻孔间距应按设计要求布置，孔位偏差不应大于 20cm。当需要避让地下管线及其他地下障碍物时应对钻孔位置进行调整，且应报相关单位确认。
- 6.2.4** 全填充的溶（土）洞可直接采取袖阀管注浆或底孔注浆充填，无填充、半填充的溶（土）洞应先充填砂、石等材料再注浆；溶沟、溶槽、溶隙宜采用底孔注浆充填；软弱土可采用袖阀管注浆、底孔注浆、搅拌桩或旋喷桩加固。注浆孔可根据洞体平面投影形状采取矩形或梅花形布置。注浆顺序宜先注边孔再依次注内孔。袖阀管注浆宜重复多次注浆。
- 6.2.5** 充填材料选取应符合下列规定：
- 1 小型、中型溶（土）洞和较小洞隙可直接注浆；
 - 2 大型溶（土）洞宜先充填素混凝土再注浆；
 - 3 特大型溶洞宜先充填中粗砂、碎石、素混凝土等材料再注浆，有防渗要求时，充填材料不应采用中粗砂、碎石；
 - 4 溶（土）洞大小划分标准应符合表 6.2.5 的规定。

表 6.2.5 溶（土）洞大小划分标准

溶（土）洞大小类型	溶（土）洞高度H（m）
特大型	H>10.0

续表 6.2.5

溶（土）洞大小类型	溶（土）洞高度H（m）
大型	$3.0 < H \leq 10.0$
中型	$1.5 \leq H \leq 3.0$
小型	$H < 1.5$

6.2.6 注浆材料可采用单液浆或双液浆。单液浆可采用水泥浆、水泥砂浆、水泥黏土浆等，双液浆可采用水泥浆与水玻璃或其他速凝材料混合液。注浆处理前应进行室内配比试验和现场试验，初步试验可按表 6.2.6 选取。

表 6.2.6 注浆材料参数参考表

注浆参数	内 容
单液浆配比	水灰比=0.8~1.2（质量比）
双液浆配比	水:水泥:水玻璃=(0.8~1):1:(0.12~0.30)（质量比）

6.2.7 充填和注浆施工应符合下列规定：

1 对有地下水活动的溶（土）洞，应设置排水、排气孔；

2 充填投料孔孔径应满足充填材料的可灌性要求，孔数应满足充填工期要求，排水、排气孔数量应满足排水、排气及时性和安全性要求；

3 应在填充之前预置注浆管于洞内（或洞底），充填完成后方可进行注浆。

6.2.8 采用注浆法处理边界不小于溶（土）洞边界时，单一溶（土）洞的注浆处理可采用单液浆，其余应采用双液浆或单、双液浆相结合的方式；当地下水具有流通性时，应采用双液浆；当平面处理边界位于溶洞边界以内时，应在处理边界设置注浆孔（周边孔）注入双液浆进行封堵，再对边界内的注浆孔（中央孔）进行注浆充填，中央注浆孔可采用水泥浆或水泥砂浆等单液浆。

6.2.9 岩溶治理施工完成后，应在规定的时间对岩溶（预）处理的效果按设计要求进行检验，检验结果未达到设计要求的，应对检验未达到要求的溶（土）洞重新进行处理并检验直到满足设计要求为止。

6.2.10 岩溶治理施工尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04 的有关规定。

6.3 地基基础施工

6.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程地基基础施工前应结合工程特点进行现场试验确定施工参数及工艺，地基处理施工可结合岩溶治理施工同步实施。

6.3.2 地基加固施工先后次序的安排应根据所采用的施工工艺、加固机理、挤土效应等因素确定。桩基施工应先施工挤土桩，后施工非挤土桩；当桩型均为挤土桩时，长桩宜先于短桩施工。

6.3.3 岩溶地区水泥土类桩体施工应符合下列规定：

1 搅拌桩穿越土洞软弱填充物时，应提高水泥掺入比；

2 旋喷桩穿越土洞、接近岩面 1m 范围，宜采用复喷、驻喷措施；

3 应考虑岩溶水对桩体的影响，水泥土类桩体宜使用外加速凝剂。

6.3.4 岩溶地区注浆加固施工应符合下列规定：

1 应根据注浆加固目的、地质条件、工程特点和周边环境，选择注浆方法。浅层地基加固可采用底孔注浆或花管注浆，深层地基加固宜采用袖阀管注浆或底孔注浆；

2 注浆浆液的类型及配合比应根据地层的渗透特性和地下水活动特性合理选取，当地层渗透性强、地下水流速快时，应采用双液浆；

3 注浆压力和注浆量应根据地基加固技术要求和环境保护安全要求综合确定，注浆正式施工前应进行工艺性和环境影响性试验，通过试验确定合适的注浆压力和注浆用量控制值。

6.3.5 岩溶地区素混凝土桩施工应符合下列规定：

1 在软弱土层施工时，宜采用退打且隔桩跳打施工，防止相邻桩内混凝土串孔；

2 施工遇到未处理的小型溶（土）洞时，应保证混凝土灌注连续；

3 钻头钻至基岩面时，应降低钻进速度，避免出现钻孔偏斜或卡钻事故。

6.3.6 岩溶地区灌注桩施工宜采取下列措施：

1 全桩身范围无地下水可采用旋挖干作业成孔；

2 I₁类和II₁类岩溶地质结构地段、桩基持力层在地下水位以下、基岩面以上砂层总厚度不大于1m时，可采用泥浆护壁旋挖成孔；孔深较大的桩基可采用反循环工艺成孔和清孔，也可根据土层情况采用正循环钻进，反循环清孔，同时应储备足够的泥浆应对击穿溶洞导致的泥浆流失；

3 I₁类岩溶地质结构地段、持力层在地下水位以下、基岩面以上砂层总厚度大于1m且岩面埋深小于10m时，宜采用钢套管护壁旋挖成孔，同时应储备足够的泥浆应对击穿溶洞导致的泥浆流失；

4 I₁类岩溶地质结构地段、持力层在地下水位以下、基岩面以上砂层总厚度大于1m且岩面埋深大于10m时，应采用全钢套管护壁钻孔成孔；

5 岩溶强发育且溶洞高度达到大型溶洞的场地，宜采用全钢套管钻孔成孔；

6 桩基位置的溶（土）洞已采用充填注浆进行预先处理或桩基周边采用隔水帷幕封闭处理时，可选用泥浆护壁旋挖成孔。

6.3.7 岩溶地区地基基础施工尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136和深圳市标准《桩基施工技术标准》SJG 126的有关规定。

6.4 基坑支护施工

6.4.1 岩溶地区城市轨道交通工程基坑开挖前应在基坑外围设置水位观测孔，施工过程应全程进行地下水位观测。水位观测孔深度不应小于基底以下5m，用于监测岩溶承压水的水位观测孔深度应根据承压水含水地层深度确定。

6.4.2 岩溶地区支护桩成孔、地下连续墙成槽过程中出现漏浆、塌陷等现象时，应回填黏土、碎石等充填孔洞，漏浆、塌陷等现象稳定后方可继续成孔、成槽。

6.4.3 岩溶地区基坑开挖应符合下列规定：

1 基坑开挖前，宜选择岩溶强发育区代表性地段进行支护桩、地下连续墙的桩（墙）体和桩（墙）底防渗性试验；

2 基坑开挖前应做好基坑突涌水应急准备，施工现场应备好注浆设备及应急材料；

3 基坑周边严禁超载，施工材料、设施或车辆荷载不应超过设计要求；

4 开挖断面深度范围存在砂层等透水层时，开挖前宜采用局部开槽方法先挖探槽，检查渗漏水情况；

5 基坑土石方应分段分层开挖，分段开挖长度不宜大于20m，分层开挖厚度不宜大于1.5m；

- 6 当基坑平面形状为长条形，宜沿长边方向设置若干横向分隔墙，宜分仓开挖；
 - 7 开挖过程中应密切监控基坑渗漏水情况，并应做好坑内抽排水工作。
- 6.4.4** 岩溶地区基坑开挖出现下列情况之一时，应暂停开挖，待处理后再继续开挖。可对危险部位采取基坑回填、地面卸土、临时支撑等应急措施：
- 1 开挖过程中渗漏水突然增大；
 - 2 渗漏水点出现流砂、流土，渗漏水变浑浊，甚至出现涌水、涌砂；
 - 3 基坑周边出现地面塌陷、建（构）筑物变形突然增大等；
 - 4 基坑支护结构变形过大、开裂、锚索松动等。
- 6.4.5** 岩溶地区基坑岩石开挖应根据周边环境要求控制爆破施工对环境的影响，可采取密布孔、少装药，设置减震孔、减震沟等技术措施控制振动影响。
- 6.4.6** 岩溶地区基坑施工尚应符合现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《基坑支护技术标准》SJG 05 的有关规定。

6.5 隧道施工

- 6.5.1** 岩溶地区城市轨道交通工程隧道施工前，应根据设计资料并结合施工现场实际，采用综合超前地质预报，重点部位和关键工序应分别制定针对性施工方案。
- 6.5.2** 岩溶地区盾构法隧道施工应符合下列规定：
- 1 应根据工程地质和水文地质勘察报告、可溶岩特征、隧道上覆地层情况以及安全、工期、环保等要求开展盾构机的适应性、可靠性选型工作，盾构机应满足在岩溶地层的施工要求，并应具备在洞内进行岩溶处理的能力，或预留相关接口条件；
 - 2 盾构机刀盘结构应适应岩溶地层条件，面板应采取耐磨措施，中心刀具应按 TBM 固定方式设计；
 - 3 土压平衡盾构机在岩溶强发育富水地层掘进时，螺旋输送机宜按双螺旋机设计，采用单螺旋机应按双闸门设计，后闸门应具备紧急关闭功能；泥水平衡盾构机的泥水循环系统应具备掘进模式和旁通模式，应配置渣石处理装置；超过 40m 埋深岩溶强发育地层宜采用泥水平衡模式盾构机掘进；
 - 4 盾构机在岩溶强发育富水地层宜采用钢套筒进行始发和接收；
 - 5 岩溶强发育地层盾构掘进施工前，应在洞内实施超前地质预报，对发现的溶隙、破碎带等不良地质应提前处置；
 - 6 应根据横向、竖向偏差和滚转角偏差，及时纠偏，纠偏时应控制单次纠偏量，宜逐环和小量纠偏；小半径曲线隧道掘进时，应增加测量次数，满足隧道贯通测量限差要求；
 - 7 宜预先确定开仓作业的地点和方式，进行刀具的检查和更换；对不稳定或不适合开仓的地层，应提前进行加固，满足带压开仓的气密性要求；
 - 8 对 I₁类和 II₁类岩溶地质结构地段，盾构穿越微风化可溶岩地层时，不应空仓掘进或常压开仓，土仓切口压力应高于该地点地下水水头，在气压辅助掘进方式无法实现时可采用浆液辅助模式掘进；
 - 9 宜采用抗水稀释或抗水分散型同步注浆浆液，并宜提高注浆压力，进行二次注浆，宜每隔 5 环~10 环施作一道止水环；
 - 10 掘进过程中应加强地面沉降监测，采取分级预警措施；当出现地面塌陷时，应对现场进行封闭、隔离，启动应急预案。

6.5.3 岩溶中等和强发育地区的区间联络通道，应做好岩溶水监测和地层预加固措施。

6.5.4 岩溶地区区间联络通道开挖前，应探测开挖断面的地下水情况，探测深度不应小于 3m；当地下水丰富时应采取排水注浆加固措施，加固后地层的渗透系数应满足设计防渗要求。

6.5.5 岩溶地区矿山法隧道施工应符合下列规定：

1 隧道施工采用矿山法时，施工前应根据设计资料并结合施工现场实际，采用综合超前地质预报，制定针对性的施工方案；

2 应对联络通道两侧不少于 5 环的管片进行壁后空洞探测和渗水量探查，并应在开挖前完成缺陷处的注浆加固工作；

3 应遵循短开挖、强支护、快封闭、勤量测的掘进原则，上台阶开挖长度不宜超过 1 倍洞径，并及时封闭掌子面；

4 爆破开挖应遵循“多分段、密布眼、少装药”的原则，降低爆破振动对岩溶地层的影响；

5 当开挖遇到未治理的溶洞时，应先开挖溶洞一侧，待支护完成后再开挖另一侧；

6 设置集水井的联络通道，应在隧道二衬结构全部完成后方可开挖集水井；

7 施工现场应备好岩溶涌泥、突水和坍塌处置设备和物资。

6.5.6 岩溶地区隧道施工尚应符合现行国家标准《盾构法隧道施工及验收规范》GB 50446、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238 和广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 的有关规定。

7 检验与监测

7.1 一般规定

7.1.1 岩溶地区城市轨道交通工程的检验与监测，应根据岩溶地区地质环境条件，结合工程特点，采取成熟可靠、技术先进、经济合理的检验、监测手段和方法。

7.1.2 检验与监测的记录、数据和图表等资料应完整。

7.2 检 验

7.2.1 岩溶治理的试验、施工以及竣工验收阶段，均应进行治理质量和效果检验。为设计提供依据的试验阶段的检验应在施工图设计前进行。

7.2.2 岩溶治理的检验应根据工程重要性、地质环境条件、治理方法等因素综合确定，并应遵循“先简后繁、先粗后细、先面后点”的检验原则。

7.2.3 岩溶治理的检验方法应根据不同治理方法进行试验方法选择，可采用载荷试验、钻芯法、静力触探试验、动力触探试验、标准贯入试验、压（注）水试验、抽水试验、物探、波速测试、孔内数字成像等一种或多种综合检验方法。

7.2.4 充填注浆效果检验应符合下列规定：

1 注浆施工验收检验应根据设计要求提出，检验应选择布置在有代表性地段和薄弱部位；

2 注浆效果的强度评定设计有要求的，应注重注浆前后试验数据比较，且不应低于设计强度。检验钻孔数量不应少于注浆孔总数的 5%且不少于 3 个，对于复杂场地岩溶地基应适当增加检测点数，每孔加固块取样试件个数不应少于 3 件；

3 对设计有渗透性要求的，可采取压（注）水试验或抽水试验等方法，充填加固范围内的平均渗透系数或测得的单位吸水量平均值均不应大于设计值，单位工程检验数量不应少于 3 个点且满足设计要求。

7.2.5 工程桩、基坑支护桩结构及地基处理质量检验应符合设计要求以及现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 和深圳市标准《深圳市地基处理技术规范》SJG 04 的有关规定。

7.2.6 岩溶地区基坑开挖前宜采用抽水试验检验围护结构封闭效果，具体点位和数量应符合设计要求。当封堵效果不显著时，应分析原因并采取补救措施。

7.2.7 隧道工程掘进前，应对沿线岩溶洞穴（隙）充填注浆处理范围进行加固处理效果检验，检验点位、数量、方法等应符合设计要求。

7.3 监 测

7.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程监测应根据工程特点、场地岩溶水文地质、工程地质条件、周边环境和施工方法等因素，编制专项监测方案。

7.3.2 岩溶地区监测范围、监测对象、监测内容、监测方法、监测点布置、监测精度、监测周期、监测频率及监测控制值等应根据工程特点、岩溶分布特征、岩溶发育程度、岩溶稳定性、岩溶水连通性、周边环境等因素综合确定。

7.3.3 岩溶地区监测范围应根据工程建设可能影响范围确定，当不能确定影响范围时，可按 300m

范围初步布置监测点，施工过程中应根据实际情况合理调整监测范围。监测范围应根据基坑开挖深度、隧道上覆地层厚度、距离隧道边水平距离、岩溶发育程度等因素进行分区。可按下列原则进行分区：

- 1 主要影响区应包括基坑边或隧道边至3倍基坑开挖深度或3倍隧道上覆地层厚度区域及岩溶强发育区域；
- 2 次要影响区应包括主要影响区域边界至150m区域及岩溶中等发育区域；
- 3 可能影响区应包括次要影响区域边界至300m区域及岩溶弱发育区域。

7.3.4 岩溶地区监测方法可采取人工监测、自动化监测和人工巡查等一种或多种监测方法。地表沉降、建（构）筑物变形、地下管线变形和岩溶地下水监测宜采取人工监测和自动化监测相结合的监测方法。岩溶地区主要监测对象、监测内容及监测方法可按表7.3.4选取。

表 7.3.4 岩溶地区主要监测对象、监测内容及监测方法

监测对象	监测内容	监测方法	工程影响分区		
			主要影响区	次要影响区	可能影响区
岩溶地下水	水位	人工监测、自动化监测	√	√	○
	水压	人工监测、自动化监测	○	○	○
	流速、流向	人工监测	○	○	○
	水质	人工监测	○	○	○
岩土体	地表沉降	人工监测、自动化监测	√	√	○
	土体内部变形	人工监测、自动化监测	○	○	○
建（构）筑物	沉降	人工监测、自动化监测	√	√	○
	水平位移	人工监测、自动化监测	○	○	○
	倾斜	人工监测、自动化监测	√	○	○
	裂缝	人工监测、人工巡查	√	√	○
地下管线	沉降	人工监测、自动化监测	√	√	○
	水平位移	人工监测、自动化监测	√	√	○
	渗漏	人工巡查	√	√	○
其他专项	专项巡查	人工监测、人工巡查	√	√	○

注：√—应测，○—宜测。

7.3.5 岩溶地区监测点布置和监测精度应能反映监测对象的实际状态及其变化趋势，监测点应布置在监测受力及变形关键点和特征点上并应满足对监测对象的监控要求。岩溶强发育、岩溶不稳定、岩溶水连通性好等区域监测点应加密布置。

7.3.6 岩溶地区监测周期、监测频率及监测报警值，应根据监测对象、监测内容、地质环境、周边环境、施工方法等因素综合确定。

7.3.7 岩溶地区监测周期应包括城市轨道交通工程施工监测周期和轨道交通运营监测周期。城市轨道交通运营期监测对象、监测内容应结合岩溶分布特征、发育程度、当地工程经验等因素综

合确定，监测方法宜采取自动化监测方法。

7.3.8 岩溶地区城市轨道交通运营期监测频率及报警值应结合监测对象特性、岩溶分布特征、发育程度、当地工程经验等因素综合确定。

7.3.9 当监测数据出现异常、施工期间出现工程险情、运营期间邻近工程施工等施工环境和周边环境条件改变较大时应提高施工监测频率和运营监测频率。监测报警值应满足工程施工安全和周边环境被保护对象的安全控制要求。

7.3.10 岩溶地区监测尚应符合现行国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》GB 50497、《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911、《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238、广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136、深圳市标准《基坑支护技术标准》SJG 05 和《城市轨道交通工程监测技术标准》SJG 135 的有关规定。

8 风险管理

8.1 一般规定

8.1.1 岩溶地区城市轨道交通工程建设应在勘察、设计、施工、检验与监测阶段，根据工程场地的地质环境条件、工程特点等孕险环境与致险因子进行风险评估，应评估工程建设整体风险等级，并应提出降险措施。

8.1.2 对评估整体风险等级为I、II级和场地岩溶地质结构类型为I类的城市轨道交通工程，应组织开展专项风险评估。

8.1.3 建设、勘察、设计、施工、检验与监测、监理等责任主体单位应履行下列主要职责：

1 建设单位应牵头组织实施风险管理工作；

2 勘察单位应提交真实、准确、可靠且符合国家规定和满足设计、施工的要求的勘察资料，并结合工程特点在勘察文件中说明岩溶地质条件可能造成的工程风险，提出专项勘察建议；

3 设计单位应负责识别和评估岩溶地质风险可能造成的工程风险，应提出设计控制措施，并应在施工过程中根据工程情况进行动态设计；

4 施工单位应负责识别和评估岩溶地质风险可能造成的施工风险，在施工方案中应提出针对性控制措施、工序流程和工艺要求，并应组织实施；

5 检验与监测单位应负责识别和评估岩溶地质风险可能造成的检验与监测风险，应在检验与监测方案中提出针对性控制措施并组织实施；

6 监理单位应负责审查施工方案中针对岩溶地质风险的控制措施，应监督施工单位、检验与监测单位按照设计要求和施工方案落实地质风险控制措施。

8.1.4 城市轨道交通工程建设风险管理，应遵循“分阶段、分对象、分等级”的原则，控制工程建设风险至可接受水平。

8.2 风险分级

8.2.1 工程风险发生可能性等级标准宜采用概率或频率表示，并宜符合表 8.2.1 的规定。

表 8.2.1 工程风险发生可能性等级标准 (P)

等级	1	2	3	4	5
可能性	频繁	可能	偶尔	罕见	不可能
概率或频率值 P	$P \geq 0.1$	$0.01 \leq P < 0.1$	$0.001 \leq P < 0.01$	$0.0001 \leq P < 0.001$	$P < 0.0001$

8.2.2 工程风险损失等级标准宜按损失的严重程度划分五级，并宜符合表 8.2.2 的规定。

表 8.2.2 工程风险损失等级标准 (C)

风险损失等级	A	B	C	D	E
严重程度	灾难性	非常严重	严重	需考虑	可忽略

8.2.3 工程建设人员和第三方伤亡等级标准宜按风险可能导致的人员伤亡类型与数量划分为五级，并宜符合表 8.2.3 的规定。

表 8.2.3 工程建设人员和第三方伤亡等级标准

等级	A	B	C	D	E
建设人员	死亡（含失踪）10人即以上	死亡（含失踪）大于等于3人且小于等于9人，或重伤10人即以上	死亡（含失踪）小于等于2人，或重伤大于等于2人且小于等于9人	重伤1人，或轻伤大于等于2人且小于等于10人	轻伤1人
第三方	死亡（含失踪）1人即以上	重伤大于等于2人且小于等于9人	重伤1人	轻伤大于等于2人且小于等于10人	轻伤1人

8.2.4 城市轨道交通工程环境影响等级标准宜按建设对周边环境的影响程度划分为五级，周边环境影响的等级标准宜符合表 8.2.4 的规定。

表 8.2.4 环境影响等级标准

等级	A	B	C	D	E
影响范围及程度	涉及范围非常大，周边环境发生严重污染或破坏	涉及范围很大，周边环境发生较重污染或破坏	涉及范围大，区域内生态环境发生污染或破坏	涉及范围较小，邻近区生态环境发生轻度污染或破坏	涉及范围很小，施工区生态环境发生少量污染或破坏

8.2.5 经济损失等级标准宜按建设风险引起的直接经济损失费用划分为五级，工程本身和第三方的直接经济损失等级标准宜符合表 8.2.5 的规定。

表 8.2.5 工程本身和第三方直接经济损失等级标准

等级	A	B	C	D	E
工程本身	1000万元以上	大于500万元且小于等于1000万元	大于100万元且小于等于500万元	大于50万元且小于等于100万元	50万元即以下
第三方	200万元以上	大于100万元且小于等于200万元	大于50万元且小于等于100万元	大于10万元且小于等于50万元	10万元即以下

8.2.6 针对不同的工程类型、规模和工期，根据关键工期延误量，工期延误等级标准可采用两种不同单位进行分级，短期工程（建设工期2年以内，含2年）可采用天表示，长期工程（建设工期2年以上）可采用月表示。工程延误等级标准宜符合表 8.2.6 的规定。

表 8.2.6 工期延误等级标准

等级	A	B	C	D	E
长期工程	延误大于9个月	延误大于6个月且小于等于9个月	延误大于3个月且小于等于6个月	延误大于1个月且小于等于3个月	延误小于等于1个月
短期工程	延误大于3个月	延误大于2个月且小于等于3个月	延误大于30日且小于等于2个月	延误大于10日且小于等于30日	延误小于等于10日

8.2.7 社会影响等级标准宜按建设风险影响严重性程度和转移安置人员数量划分五级，并宜符合表 8.2.7 的规定。

表 8.2.7 社会影响等级标准

等级	A	B	C	D	E
影响程度	恶劣的，或需紧急转移安置 1000 人以上	严重的，或需紧急转移安置大于 500 人且小于等于 1000 人	较严重的，或需紧急转移安置大于 100 人且小于等于 500 人	需考虑的，或需紧急转移安置大于 50 人且小于等于 100 人	可忽略的，或需紧急转移安置小于等于 50 人

8.2.8 根据风险发生的可能性和风险损失，工程建设风险等级标准宜分为四级，并宜符合表 8.2.8 的规定。

表 8.2.8 风险等级标准 (P×C)

可能性等级 \ 损失等级		A	B	C	D	E
		灾难性	非常严重	严重	需考虑	可忽略
1	频繁	I 级	I 级	I 级	II 级	III 级
2	可能	I 级	I 级	II 级	III 级	III 级
3	偶尔	I 级	II 级	III 级	III 级	IV 级
4	罕见	II 级	III 级	III 级	IV 级	IV 级
5	不可能	III 级	III 级	IV 级	IV 级	IV 级

8.2.9 针对不同等级风险，应采用不同的风险处置原则和控制方案，各等级风险的接受标准应符合表 8.2.9 的规定。

表 8.2.9 风险接受标准

风险等级	接受标准	处置原则	控制方案	应对部门
I 级	不可接受	必须采取风险控制措施降低风险，至少应将风险降低至可接受的水平	应编制风险预警与应急处置方案，或进行方案修改或调整等	政府主管部门、 工程建设各方
II 级	不愿接受	应实施风险管理降低风险，且风险控制措施所需成本不应高于风险发生后的损失	应实施风险防范与监测，制定风险处置措施	
III 级	可接受	宜实施风险管理，可采取风险处置措施	宜加强日常管理与监测	工程建设各方
IV 级	可忽略	可实施风险管理	可开展日常审视检查	

8.3 风险辨识

8.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程建设应进行风险预测和辨识。

8.3.2 岩溶地区风险辨识前应收集地形图、遥感图像、区域地质、工程地质、水文地质、既有岩溶调查、地下水观测、周边环境、地方志以及史料中有关岩溶灾害的记载等资料。

8.3.3 风险辨识流程应按图 8.3.3 执行。

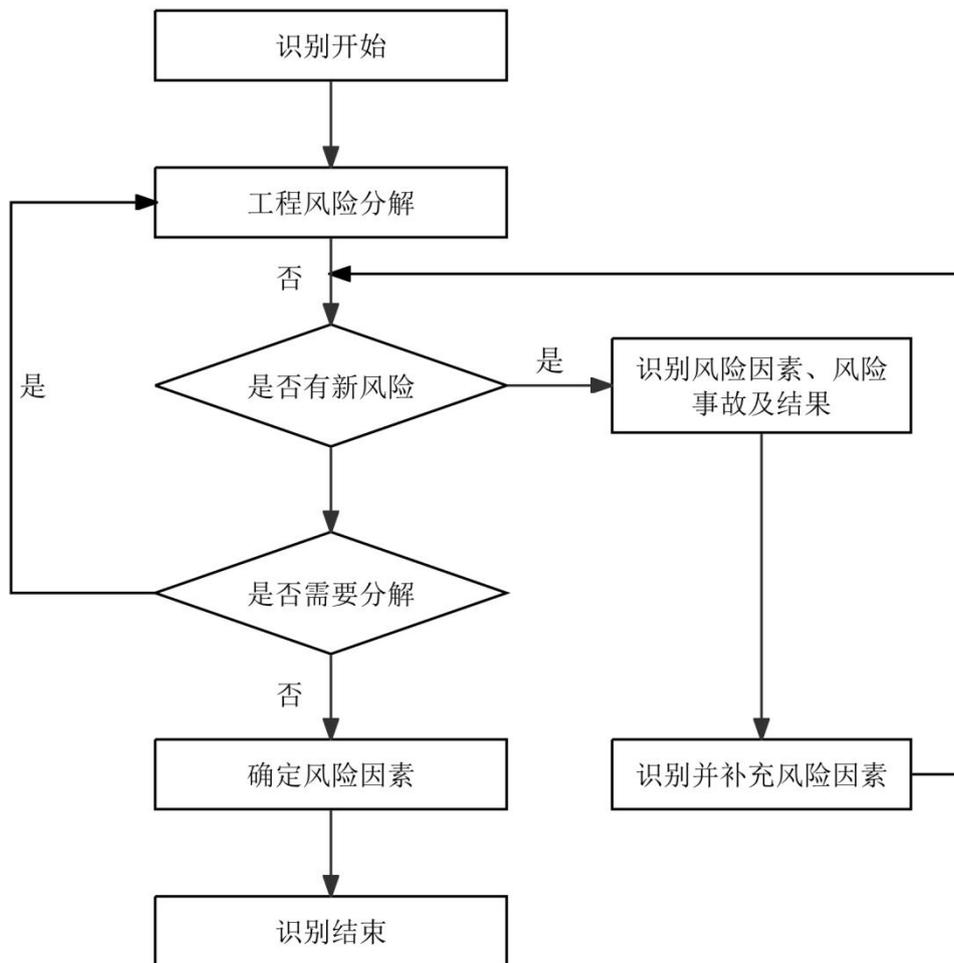


图 8.3.3 风险辨识流程图

8.3.4 岩溶勘察、水文地质试验等应分析卡钻、掉钻、掉机、地面塌陷、冒水漏浆等风险。

8.3.5 岩溶治理施工应分析地面塌陷、地表过量沉降、冒浆或漏浆过量、堵塞管道等风险。

8.3.6 岩溶地区地基基础施工应分析地面塌陷、地表过量沉降、冒浆或漏浆过量、堵塞管道、钻桩受阻、卡钻、掉钻、掉机、桩身混凝土灌注过量、桩身混凝土缺陷等风险。

8.3.7 岩溶地区明挖法施工应分析基坑塌陷、地表过量沉降、基底隆起、基底突涌、围护结构渗漏、围护结构变形、爆破振动、降水困难等风险。

8.3.8 岩溶地区盾构法施工应分析地面塌陷、地表过量沉降、进出洞坍塌、进出洞突涌、中途换刀检修、密封失效、掘进受阻、刀盘刀具非正常磨损、中毒窒息等风险。

8.3.9 岩溶地区矿山法施工应分析地面塌陷、地表过量沉降、进出洞坍塌、洞内突涌、洞内塌方、冒顶、爆破振动、降水困难、中毒窒息等风险。

8.4 风险评估

8.4.1 风险分析方法宜包括定性分析方法、定量分析方法和综合分析方法。工程勘察与设计风险管理中宜采用定量分析方法，并辅以综合分析方法；工程施工风险管理中宜采用综合分析方法。

8.4.2 建设单位应要求勘察、设计、施工、检验与监测等相关单位提供相应的风险评估报告，监理单位应协助建设单位对相关单位提供的风险评估报告进行审核。

8.4.3 勘察单位应在详细勘察成果中对拟建场地的工法适用性进行评价，分析并说明岩溶地质

条件可能造成的工程风险，提出地质风险控制措施建议。当风险等级为I、II级时，宜根据工程实际情况开展专项勘察。

8.4.4 设计单位应根据地质风险评估报告，采取设计措施降低风险等级。根据地质风险调整后的风险等级为I、II级时，应开展专项设计。专项设计时应应对岩溶地面塌陷做预测，岩溶地面塌陷预测可按本标准附录F的规定进行评估。

8.4.5 施工单位应编制施工风险评估报告，应结合施工方案对施工过程中可能遇到的岩溶地质风险进行评估，采取相应施工风险控制措施。施工过程中，施工单位应核查开挖面地质情况与原勘察结果的一致性，当差异较大时，应上报建设、勘察、设计单位，由建设单位组织勘察、设计单位进行现场踏勘并提出处理意见。施工单位应严格按照设计单位提出的地质处理措施组织实施并将处理效果反馈设计单位。

8.4.6 施工单位应编制应急预案，应急预案应包含岩溶不良地质条件可能引起的各种安全风险控制措施。当发生地质条件突变、地质风险控制措施效果较差情况时，应重新评估风险等级和编制应急预案。

8.4.7 检验与监测单位应编制检验与监测风险评估报告，应结合检验与监测方法对检验与监测中可能遇到的岩溶地质风险进行评估，应采取相应风险控制措施。

8.5 风险预警

8.5.1 岩溶地区城市轨道交通工程应采用现场监控量测、信息化管理及第三方监测等监测控制系统，应结合审核检查法、风险图表法等综合风险管控方法，对工程建设风险进行预警。

8.5.2 风险预警等级应由小到大依次划分为黄色、橙色、红色，预警等级划分应根据监测数据变化、现场巡查情况综合判定。根据监测数据变化进行风险预警等级划分宜按表8.5.2执行。

表 8.5.2 监测预警等级划分标准

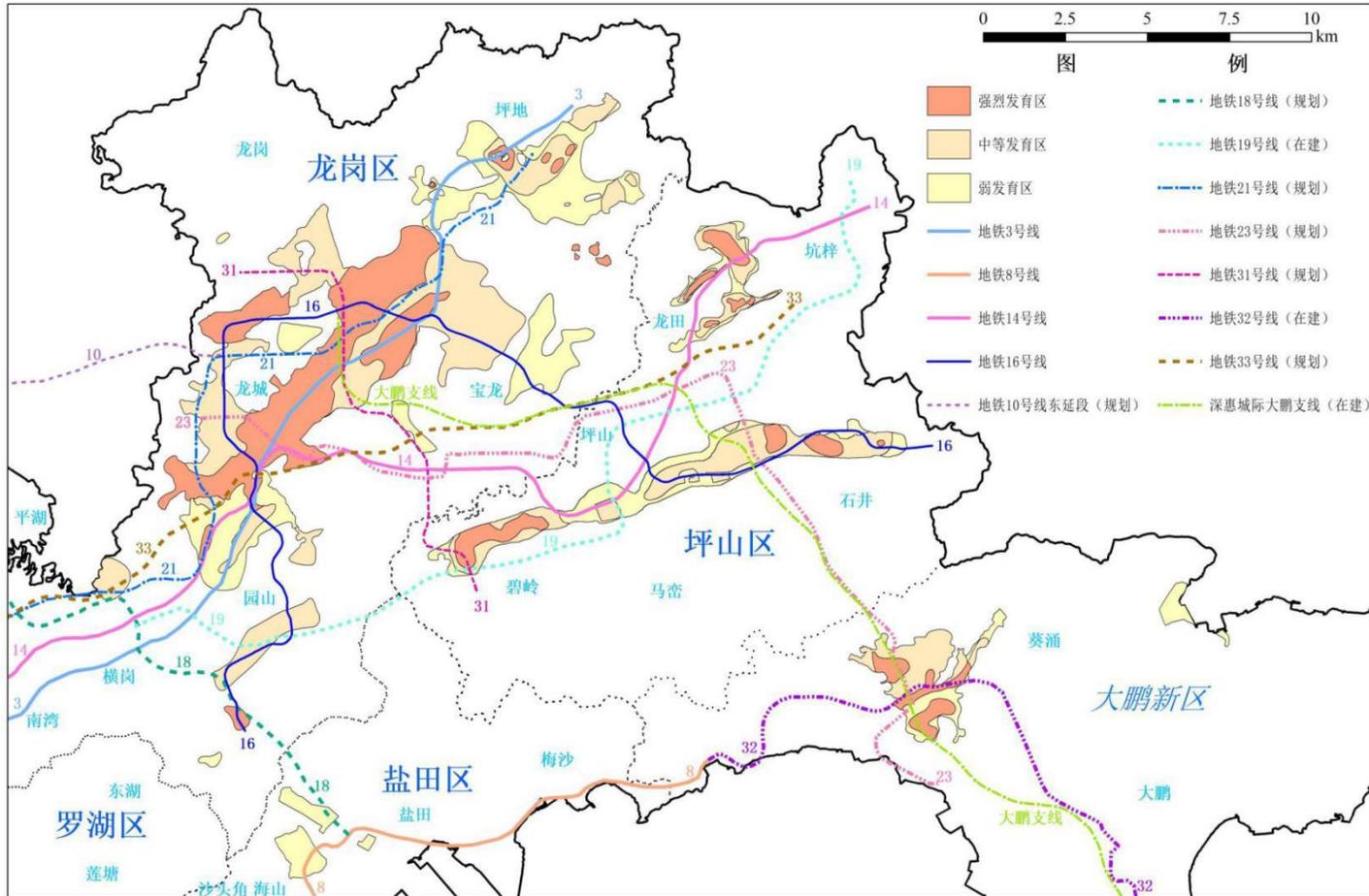
预警等级	监测数据状态描述
黄色	“双控”指标（变化量、变化速率）均达到监控量测控制值（极限值）的70%，或双控指标之一达到监控量测控制值的80%时
橙色	“双控”指标（变化量、变化速率）均达到监控量测控制值的80%，或双控指标之一超过监控量测控制值时；或双控指标达到监控量测控制值而整体工程尚未出现不稳定迹象时
红色	“双控”指标（变化量、变化速率）均超过监控量测控制值，或实测变化速率出现急剧增长，工程存在不稳定迹象时

8.5.3 当出现风险预警信息时，应分析其发生的概率及发展趋势，并制定防范措施，防止灾害发生。

8.5.4 当施工现场发生重大建设风险事故时，施工单位应立即上报建设单位和相关政府主管部门，并应组织人员实施抢险。

8.5.5 事故抢险或救灾结束后，建设单位应组织事故调查和复工风险评估，并应进行风险事故通报，应落实整改和防范措施。

附录 A 深圳市（不含深汕特别合作区）可溶岩分布范围和岩溶发育程度图



注：本图参考《深圳市地质灾害易发程度分区图》（2021年修订版）修订而成。

图 A 深圳市（不含深汕特别合作区）可溶岩分布范围和岩溶发育程度图

附录 B 深圳市（不含深汕特别合作区）典型岩溶地质结构类型划分

表 B 深圳市（不含深汕特别合作区）典型岩溶地质结构类型划分表

岩溶地质结构类型		岩溶类型	工程地质与水文地质特征	岩溶发育程度、上覆地层类型及与可溶岩接触关系等	主要分布位置
I	I ₁	覆盖型	覆盖层下部第四系全新统地层砂土与可溶岩直接接触，一般上部为含砂粉质黏土和黏土，局部软土，下部为砾砂、含卵砾中粗砂、中细砂，具单层、典型二元结构或多元结构，下伏可溶岩。孔隙承压水赋存于砂土、卵砾、碎石中，岩溶裂隙水赋存于可溶岩中；岩溶中等及中等以上发育时，孔隙承压水与岩溶裂隙水有直接水力联系，可溶岩上覆砂土、卵砾、碎石可直接通过可溶岩中的溶隙、孔洞流失	1 岩溶中等及中等以上发育； 2 可溶岩上覆砂土、卵砾、碎石	河流冲积平原中的一级阶地、沟谷平原，主要分布于龙岗、坪山盆地及其河流两侧
	I ₂			1 岩溶弱发育； 2 可溶岩上覆砂土、卵砾、碎石	
II	II ₁	覆盖型	覆盖层下部第四系更新统坡洪积层含卵砾粉土、黏土与可溶岩直接接触，局部夹泥炭质土，上部可为第四系全新统地层，具单层、典型二元结构或多元结构；孔隙承压水赋存于含卵砾粉土、砂土中，岩溶裂隙水赋存于可溶岩中；孔隙承压水与岩溶裂隙水有直接水力联系，岩溶中等及中等以上发育时，在外因作用下粉土、砂土可直接通过可溶岩中溶隙、孔洞流失	1 岩溶中等及中等以上发育； 2 可溶岩上覆黏性土厚度小于或等于2.0m	河流冲积平原中的一级阶地、沟谷平原，主要分布于龙岗、坪山、坪地、坑梓、葵涌盆地及其河流两侧
	II ₂			II类中除满足II ₁ 类所列条件之外的类型	
III	III ₁	覆盖型	覆盖层下部第四系残积土地层砂质黏性土、卵砾质黏性土与可溶岩直接接触，上部可为第四系更新统地层、第四系全新统地层或兼而有之。孔隙承压水赋存于含卵砾、碎石粉土中，岩溶裂隙水赋存于可溶岩中；孔隙承压水与岩溶裂隙水有直接水力联系，岩溶中等及中等以上发育时，在外因作用下软塑~流塑状黏土或含卵砾、碎石直接通过可溶岩中溶隙、孔洞流失	1 岩溶中等及中等以上发育； 2 可溶岩顶板起伏大或存在深、大溶沟、溶槽且软塑~流塑状黏土与可溶岩直接接触	主要分布于坪山、坪地、葵涌、坑梓盆地及龙岗盆地边缘
	III ₂			III类中除满足III ₁ 类所列条件之外的类型	

续表 B

岩溶地质结构类型		岩溶类型	工程地质与水文地质特征	岩溶发育程度、上覆地层类型及与可溶岩接触关系等	主要分布位置
IV	IV ₁	埋藏型	覆盖层下部石炭统测水组砂、页岩或第三系红色碎屑岩与可溶岩直接接触，上部可为第四系地层，孔隙承压水赋存于粉土、砂土、卵砾、碎石中，岩溶裂隙水赋存于碳酸盐岩中，碎屑岩中赋存少量基岩裂隙水。碎屑岩风化程度高、节理裂隙发育，在外因作用下粉土、砂土、卵砾、碎石、碎屑岩碎块可通过可溶岩中的溶隙、孔洞流失	1 岩溶中等及中等以上发育；	主要分布于龙岗、坪山、坪地、葵涌盆地边缘与相邻台地，IV ₁ 主要分布于坑梓盆地
	IV ₂			2 可溶岩上覆红色碎屑岩；	
				3 碎屑岩风化程度高、节理裂隙发育	
				IV类中除满足IV ₁ 类所列条件之外的类型	

注：1 分类时岩溶发育程度、与可溶岩接触关系栏序号所列条件须全满足；

2 其他岩溶地质结构类型划分可按本表执行。

附录 C 场地稳定性和适宜性评价

C.0.1 岩溶场地稳定性可根据岩溶发育特征、地震稳定性按表 C.0.1 进行判别。

表 C.0.1 岩溶场地稳定性划分

场地稳定性	岩溶发育特征	地震稳定性
极不稳定	1 土洞或塌陷成群发育地段； 2 单一溶洞顶底相对高差大于 10m，且无填充或半填充； 3 钻孔见洞隙率大于 60%； 4 钻孔线岩溶率大于 30%； 5 溶槽或串珠状竖向溶洞发育深度超过 50m	危险
不稳定	1 岩溶强发育地段（极不稳定场地情形除外）； 2 有土洞或塌陷发育地段； 3 浅层溶洞发育，洞径大，且不稳定的地段； 4 漏斗、溶槽等埋藏浅，并覆盖有软弱土体的地段； 5 岩溶水排泄不畅，可能造成场地暂时淹没地段	不利
中等稳定	岩溶中等发育地段	一般
基本稳定	岩溶弱发育地段	有利

C.0.2 岩溶场地工程建设适宜性评价，可根据场地稳定性、破坏后果、治理难易程度结合工程建设特征按表 C.0.2 进行综合评价。

表 C.0.2 工程建设适宜性分级

工程建设适宜性	分级条件
适宜性差	1 场地为极不稳定或不稳定，工程建设极易造成地面塌陷； 2 破坏后果严重； 3 治理难度大，治理费用高
基本适宜	1 场地中等稳定，工程建设易造成地面塌陷； 2 破坏后果较严重； 3 治理难度较大，治理费用较高
适宜	1 场地基本稳定，工程建设不易造成地面塌陷； 2 破坏后果不严重； 3 易于治理，治理费用低

注：地面塌陷预测分析可按本标准附录 F 执行。

附录 D 岩溶地区物探方法选用表

表 D 岩溶地区物探方法选用表

物探方法		探测目的						
类别	方法	可溶岩分布	岩面深度与起伏形态	岩溶洞隙空间分布	土洞空间分布	断裂破碎带空间分布	桩基持力层及下卧层性状	地下水流向
地震法类	反射法	○	●	●	●	●		
	折射法	●	●			●		
	面波法		○		●	○		
	映像法	○	○	●	●			
	微动探测法	○	○	●	●	○		
电法类	电剖面法	●				●		
	电测探法	●	●	○		●		
	高密度电法	●	●	●	○	●		
	自然电位法							●
	充电法							●
电磁法类	音频大地电磁法		○	●		●		
	瞬变电磁法	○		●	○	●		
	探地雷达法		○	○	●	○	○	
孔中物探类	跨孔 CT 法	●	●	●	●	●	●	
	管波探测法		●	●		●	●	
	孔中雷达法			○		●	●	
	孔内声呐法			●	●		○	

注：●推荐方法，○可选方法。

附录 E 隧道岩溶治理范围参考图表

E.0.1 隧道岩溶治理范围可见表 E.0.1。

表 E.0.1 隧道岩溶治理范围参考表

岩溶地质结构类型		岩溶治理范围
I	I ₁	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶（土）洞；顶板以上 3m 至地面的未填充和半填充的土洞、软弱土；隧道外侧以外 3m 至塌陷影响区外边界
	I ₂	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶洞
II	II ₁	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶（土）洞；顶板以上 3m 至地面的未填充和半填充的土洞、软弱土
	II ₂	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶洞
III	III ₁	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶（土）洞；顶板以上 3m 至地面的未填充和半填充的土洞、软弱土
	III ₂	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶洞
IV	IV ₁	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶洞；顶板以上 3m 至地面的软弱土
	IV ₂	隧道外轮廓两侧以外 3m、顶板以上 3m、底板以下 5m 范围内的溶洞

注：1 砂土塌陷角宜根据上覆砂土内摩擦角选取；

2 当隧道中心两侧 B 范围内溶洞治理因地面建筑、管线、交通疏解等问题无法实施时，可采取上部土层隔离措施缩小 B 的范围；

3 当隧道底板下 5m~10m 范围存在跨高比大于 1 的溶洞应进行处理；

4 当隧道为单洞双线并采用矿山法施工时，顶板以上治理厚度宜为 5m；

5 对 I₁、II₁、III₁、IV₁ 岩溶地质结构地层，土洞、软弱土治理范围可为：顶板以上 3m 至地面的高度范围和隧道洞径（D）加隧道外轮廓两侧以外 3m 共计（D+6）m 的宽度范围；

6 当隧道下穿河流、水库、湖泊等水体区域时，应进行专项研究；

7 当隧道周边（上、下、左、右）和端头有规划待建的城市轨道交通工程时，其岩溶治理范围应统筹考虑。

E.0.2 I类岩溶地质结构地段岩溶地面塌陷影响范围可见图 E.0.2。

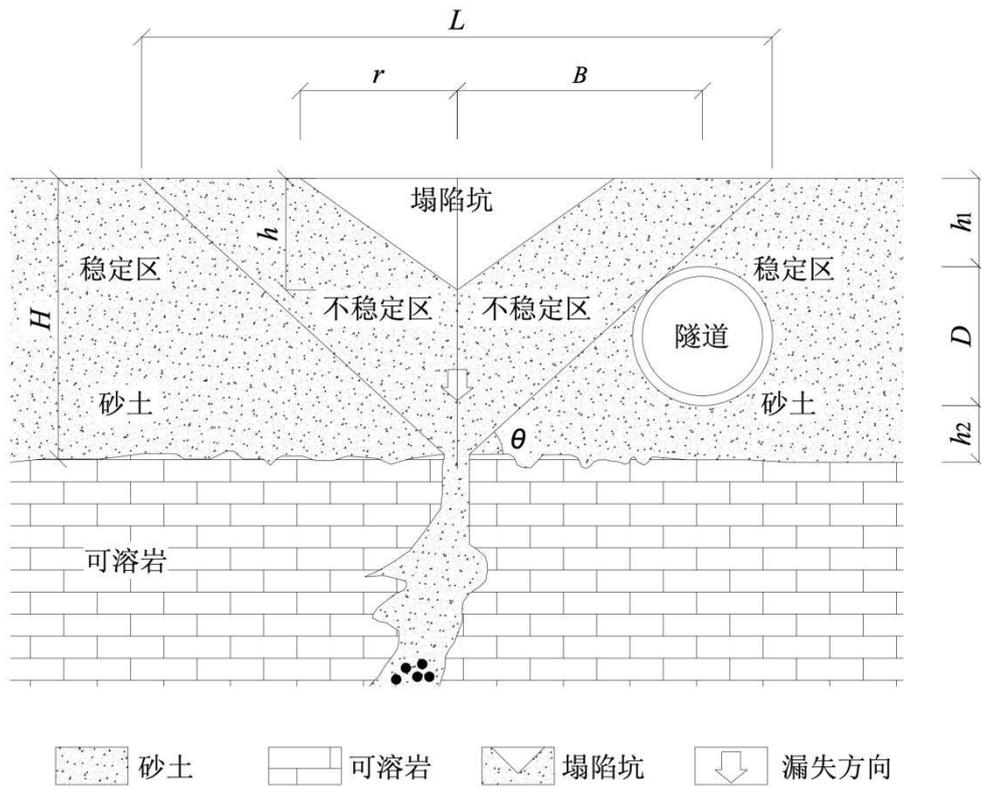


图 E.0.2 1类岩溶地质结构地段岩溶地面塌陷影响范围示意图

附录 F 岩溶地面塌陷预测分析参考标准

表 F 岩溶地面塌陷预测分析参考标准

基本条件	主要影响因素	因素的水平	指标分数
水—塌陷动力	水位（40分）	水位能在土、岩界面上下波动	40
		水位不能在土、岩界面上下波动	20
覆盖层—塌陷物质	土的性质与土层结构（20分）	黏性土	10
		砂土	20
		砂页岩风化残积土	10
		砂土与黏性土多元结构	20
	土层厚度（10分）	<10m	10
		10m~20m	7
		>20m	5
岩溶—塌陷与储运条件	地貌（15分）	平原、谷地、溶蚀洼地	15
		谷坡、山丘	5
	岩溶发育程度（15分）	强发育	15
		中等发育	10
		弱发育	5

注：1 累计指标分大于等于 90 为极易塌陷，71~89 为易塌陷，小于等于 70 为不易塌陷；

2 近期产生过塌陷，累计指标分应为 100；

3 地表降水入渗导致塌陷，水的指标分为 40。

本标准用词说明

- 1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的用词：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关的标准、规范执行的写法为“应符合……的规定”或“宜符合……的规定”。

引用标准名录

- 1 《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003
- 2 《工程勘察通用规范》GB 55017
- 3 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 4 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 5 《地铁设计规范》GB 50157
- 6 《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307
- 7 《盾构法隧道施工及验收规范》GB 50446
- 8 《建筑基坑工程监测技术标准》GB 50497
- 9 《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》GB 50652
- 10 《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909
- 11 《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911
- 12 《建筑抗震设计规范》GB/T 50011
- 13 《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238
- 14 《地质灾害危险性评估规范》GB/T 40112
- 15 《铁路隧道设计规范》TB 10003
- 16 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 17 《建筑桩基技术规范》JGJ 94
- 18 《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120
- 19 《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60
- 20 《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136
- 21 《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241
- 22 《地基基础勘察设计规范》SJG 01
- 23 《深圳市地基处理技术规范》SJG 04
- 24 《基坑支护技术标准》SJG 05
- 25 《建筑基桩检测标准》SJG 09
- 26 《桩基施工技术标准》SJG 126
- 27 《城市轨道交通工程监测技术标准》SJG 135

深圳市工程建设地方标准

岩溶地区城市轨道交通工程技术标准

SJG 187 - 2025

条文说明

目 次

1	总则	47
2	术语和符号	48
3	基本规定	49
3.1	岩溶勘察	49
3.4	风险管理	49
4	勘察	50
4.1	一般规定	50
4.2	可行性研究勘察	51
4.3	初步勘察	51
4.4	详细勘察	52
4.5	施工勘察	55
4.6	勘察成果	55
5	设计	57
5.1	一般规定	57
5.2	岩溶治理设计	57
5.3	地基基础设计	60
5.4	基坑支护设计	60
5.5	隧道设计	61
6	施工	62
6.1	一般规定	62
6.2	岩溶治理施工	62
6.3	地基基础施工	63
6.4	基坑支护施工	63
6.5	隧道施工	64
7	检验与监测	65
7.1	一般规定	65
7.2	检验	65
7.3	监测	65
8	风险管理	67
8.1	一般规定	67
8.2	风险分级	67
8.3	风险辨识	69
8.4	风险分析	70
8.5	风险预警	71

1 总 则

1.0.1 深圳市东北部、东部分布着大量碳酸盐类岩石，发育溶洞、溶沟、溶槽等，其深浅不一、大小不同、形态各异，给工程建设带来了威胁和危害，不仅增加了城市轨道交通工程的建设投资，还严重影响着工程建设的正常运行和建筑物的安全使用。

深圳地铁 14 号线、16 号线沿线岩溶发育程度高，溶洞规模大，给工程建设带来了威胁和危害，不仅增加了城市轨道交通项目的建设投资，还严重影响着工程建设的正常运行和建筑物的安全使用。

为保证深圳岩溶地区城市轨道交通工程的安全，在总结深圳地铁 3 号线四期、14 号线、16 号线及 14、16 号线共建综合管廊等项目工程经验的基础上编制本标准，用以指导勘察、设计、施工、检验与监测和风险管理。

1.0.2 本标准主要针对深圳岩溶地区城市轨道交通工程的勘察、设计、施工、检验与监测和风险管理提出基本要求。深圳岩溶地区城际轨道交通工程的勘察、设计、施工、检验与监测以及风险管理需按本标准执行。

深圳市在岩溶地区积累了丰富及宝贵的工程经验，在充分掌握岩溶发育规律、查明影响岩溶发育因素的基础上，结合工程经验，因地制宜地采取有效的技术措施。在岩溶地区施工，需遵循先保护、先处理后施工的原则。尤其需重视施工环境影响，施工工艺与质量控制、工期与造价等。

2 术语和符号

2.1.10 轨道交通设施包括轨道、桥梁、隧道等。

3 基本规定

3.1 岩溶勘察

3.1.2 深圳市地质局在1996年4月至1997年12月期间对深圳市龙岗区（包括现在的龙岗区、坪山区、大鹏新区）进行了地质调查，初步查明了深圳市可溶岩的分布范围和特征，此后随着深圳市城市开发建设，揭露的可溶岩范围越来越大。本次综合以往岩溶专项调查、深圳市地质灾害风险调查、深圳市城市地质调查，绘制了深圳市（不含深汕特别合作区）的可溶岩分布范围和发育程度，供参考。

根据深圳市（不含深汕特别合作区）岩溶类型、发育程度、可溶岩上覆地层类型及与可溶岩接触关系、工程地质与水文地质特征等因素将深圳市岩溶地质结构划分为4个大类、8个亚类。

3.1.3 岩溶地区城市轨道交通工程勘察需分阶段开展工作，就是坚持由浅入深、不断深化的认识过程，逐步认识沿线区域及场地的工程地质与水文地质条件，准确提供不同阶段所需的岩土工程资料。由于城市轨道交通工程投资巨大，线路穿越城市中心地带，地质、环境风险极高，建设各阶段对工程技术的要求高，各阶段所着重解决的工程问题不同，对岩土工程勘察的资料深度要求也不同。施工阶段揭露情况与原详勘或专项勘察不符时需及时开展施工勘察，确保设计基础资料的准确性。考虑在实际工作中，城市和工程建成区通常已具备一定数量的勘察成果资料，可根据已有勘察成果资料和拟建城市轨道交通工程特点合并勘察阶段，对于设计方案稳定的城市轨道交通工点或区段，可同步开展初步勘察和详细勘察。

3.1.5 由于岩溶发育具有严重的不均匀性，为区别对待不同岩溶发育程度场地上的轨道交通工程地基基础设计，将岩溶场地划分为岩溶强烈发育、中等发育和弱发育三个等级，用以指导轨道交通工程勘察、设计、施工、检验和监测和风险管理。对岩溶发育程度的划分，现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GBJ/T 15-136与现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238的划分标准存在差异，本标准采用现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238的划分标准。其中，

见洞隙率 = 揭露岩溶洞隙的钻孔总数 / 揭露可溶岩钻孔总数 × 100%；

线岩溶率 = 钻孔岩溶洞隙总长度 / 钻孔穿过可溶岩的总长度 × 100%。

3.4 风险管理

3.4.1 岩溶地区城市轨道交通工程建设需开展岩溶地质风险管理，采用先进的科学技术和管理工作方法进行地质条件验证、地质超前预报、地质风险评估和地质风险管理，提高岩溶不良地质条件风险控制的质量和效果，确保人员安全和减少对周围环境影响，将工程建设风险造成的各种影响、破坏和损失降低到合理、可接受的水平。

4 勘 察

4.1 一 般 规 定

4.1.1 岩溶地区城市轨道交通工程重要性等级、场地复杂程度等级和工程周边风险等级的划分参考现有主要规范划分。随着施工工法的不断成熟和机械装备能力的不断提高，部分问题已得到较好的解决。实际建设过程中随着周边环境越来越复杂，周边环境对城市轨道交通的建设影响越来越突出，根据深圳地铁建设经验，岩溶地区可适当提高工程周边环境风险等级在勘察等级划分中的占比，加强风险区域勘察工作，各勘察阶段在有条件的情况下加密钻孔或物探测线查明地质情况，为后期设计及施工提供现实的依据。

4.1.3 岩溶地区城市轨道交通工程勘察作业前需充分收集沿线已有各类基础资料、工程资料，通过对比分析，预测沿线勘察和建设过程中可能出现的地质问题，科学合理地编制勘察方案。勘察方案需有针对性地开展岩溶勘察工作。重点查明可溶岩分布情况、岩溶发育情况和地下水情况。

4.1.4 岩溶勘察需重视可行性研究勘察。在项目决策阶段，科学的预测、实事求是地分析可能存在的危害，以做出正确的抉择，对日后的建设将起到关键的作用。各阶段勘察需遵循从面到点、分区对待、先已知后未知、先地面后地下、先控制点后一般点、先疏后密，以及评价中先定性后定量的工作准则。依据不同的探测对象和工程影响程度，合理选用勘探手段。使用物探方法时，要求有多种方法和手段相互印证，排除假象。

由于岩溶场地的复杂性和特殊性，岩溶勘察比一般场地的勘察有更高的要求，在常规的勘探工作量条件下难以查清。除按常规要求外，岩溶勘察尚需结合其岩溶地层自身的特点及已有的勘察经验开展专项勘察。通过钻探和物探相结合方式，查明岩溶洞隙和土洞的空间位置及规模、充填情况、溶洞连通性等，明确岩溶对场地地基稳定的影响程度，提出影响轨道工程的主要岩溶问题，使勘察工作有目的性和针对性。

岩溶地区的地质灾害和工程事故多数与地下水及其变化有关。与非岩溶地区不同，岩溶地区的地下水具有流动性高，承压性大，连通性强以及水位稳定性差等特征。在岩溶地区进行工程建设时，地下水水位变化易造成场地周边建筑物、道路及管线等下沉或损坏，甚至破坏；岩溶水流干或被抽取时，会导致或引发地面塌陷；基坑开挖时，岩溶水突涌易造成基坑工程事故并影响周边环境；所以，对于岩溶发育区一些与地下水密切关联的工程需在初勘阶段进行专门的水文地质勘察，尤其是岩溶水文地质勘察，了解地下水的相关情况。

鉴于工程地质与水文地质现象的复杂性和不确定性，按一定间距布设勘探点和物探测线所揭示地层信息存在局限性，受周边环境条件限制，部分钻孔在勘察阶段无法实施，部分地质资料缺失；工程施工阶段周期较长（一般为2年~4年），在此期间，地下水和周边环境会发生较大变化；因此，城市轨道交通工程在施工阶段必须开展施工勘察工作，对勘察资料进行验证、补充或修正。

4.1.5 城市轨道交通工程的工程重要性等级较高，存在地面塌陷、特殊性岩土、断裂构造、地表水地下水富集区、既有建筑工程的地段，需适当扩大地质测绘和调查范围。地质条件复杂的山岭地段容易发生崩塌、滑坡、泥石流灾害，当轨道交通工程处于山岭地段时，需扩大调查与测绘范围，从轨道交通工程下游100m位置至山坡分水岭范围需纳入调查范围。若周边存在地表自然水体时，调查范围需适当扩大。

4.1.7 各勘察阶段工程设计方案暂未完全确定，需根据勘察揭露情况判断岩溶发育程度，对于

岩溶中等~强发育地段需开展岩溶专项勘察，对于微发育地段可根据影响程度分段开展。当勘察揭露场地内存在对工程影响较大的溶洞、溶沟或溶槽时，需根据实际情况进行专门研究，充分考虑施工风险及对周边的影响，有针对性开展岩溶专项勘察。

4.1.10 岩溶地区勘察钻探形成的钻孔存在连通地下溶洞与地表水的可能，导致地表水流失，钻探完成后需及时封孔，避免形成水力通道。

根据深圳地区城市轨道交通勘察通常要求及做法，封孔用水泥浆按照 0.5~0.7:1 的水灰比（1 包 50kg 的水泥加 30kg 水）配置，搅拌均匀后，可封灌约 5m 的孔段。封孔时需从下往上灌注水泥浆，钻孔终孔后不拔取套管，钻探下入孔内距空地约 0.3m 处，开始泵送水泥浆，直至孔口返浆，然后拔出套管，孔口以下 0.2m 用水泥砂浆填实并抹平孔口，恢复路面。对位于原路面为沥青的市政道路上的钻孔，用沥青恢复路面。

在山岭段、公园、绿地、景区、农田等有植被覆盖地段，封孔时水泥浆回灌至孔口下 1m 左右，剩余孔段需采用钻孔当处土层，制成适当大小土块后填充孔内并捣实。

对于分布在暗挖法（包括盾构法、顶管法、矿山法等）施工段、断裂带、河流中的钻孔，需进行二次封孔，防止钻孔成为水力联系通道。

4.2 可行性研究勘察

4.2.1~4.2.3 可行性研究勘察需针对可行性研究阶段的线路方案，对沿线场地典型地质条件进行勘察。岩溶发育情况对城市轨道交通结构安全、经济投资和周边环境的影响极大，本阶段需研究影响线路方案的岩溶发育情况和特殊性岩土。同时，需考虑对环境的保护和协调，如重点文物保护、既有古树的保护、既有桩基、地下设施等，并认识和把握既有地上、地下环境所处的岩土工程背景条件。

4.2.4 城市轨道交通工程为线状工程，沿线可能存在多种不同类别的地质条件，需划分工程地质单元，分单元分析和评价对工程的影响并初步提出工程措施建议。岩溶地区的不良地质作用、特殊性岩土以及重要的工程周边环境决定了工程线路走向、敷设形式、施工方法等方案的可行性，并影响着工程的造价、工期及施工安全。在分析和利用沿线已有资料基础上，有条件时均需布置一定数量的勘探工作，保证勘察结论的可靠性。现阶段城市轨道交通沿线周边环境复杂，可行性研究阶段需实地调查清楚沿线环境限制因素，特别是控制性因素的情况，为线路比选提供依据。

4.2.5 可行性研究勘察所依据的线路方案一般都不稳定和具体，并且各地的场地复杂程度、线路的城市环境条件也不同，所以可行性研究勘察勘探点间距需要根据地质条件和实际灵活掌握。根据深圳市城市轨道交通勘察和设计施工经验，岩溶地区可行性研究勘察需在工程建设关键节点范围（特殊工法、地面条件特殊、下穿敏感构筑物等）加大勘探工作量，为后续勘察工作提供指导。

4.2.6 综合考虑岩溶地区特点及可行性研究勘察钻孔间距较大等特征，要求孔深不少于 35m 或入完整基岩不少于 10m，具体勘察过程中可视工程需要与设计、监理共同确认终孔深度。因可行性研究阶段设计方案暂未稳定，原则上可适当加大钻孔深度，以免后期方案调整导致部分钻孔深度不符合要求。

4.3 初步勘察

4.3.1 初步勘察需在可行性研究勘察成果基础上，进一步查明沿线地质、水文和地基条件，需针对拟选用或拟比选的线路敷设形式、基础及结构形式和施工方法开展工作，为初步设计阶段确定车站和区间平面位置、敷设方式、支护形式、施工方法、地下水控制、环境保护、监测检测及

大型工程技术风险控制等提供勘察依据。建设管理过程中，初步勘察成果有时用作土建招标设计的依据并作为基础资料提供给潜在投标人，此时初步勘察成果还需满足招标要求。

4.3.3 初步勘察期间，对于场地条件受限钻探作业难度较大地段或存在地面塌陷地段，勘察主要采用地质调查和地面物探等方法，初步查明基岩埋深及变化情况，有代表性地段和物探异常地段可在后期勘察阶段采用钻探方法加以验证。现有物探方法工作原理及解译方式不同，为避免出现较大偏差，要求采用不同物探方式进行对比分析，相互验证，保证结果可靠性。

岩溶地区初步勘察物探测线需根据轨道线路周边环境和场地条件沿钻孔轴线或平行钻孔轴线布置，地面物探线间距可取 10m~20m，可溶岩与非可溶岩接触界线、岩溶洞（穴）、塌陷地段需加密布线；地面物探点间距可取 1m~5m，跨孔中物探点间距可取 0.5m~1.0m，单孔中物探点间距可取 0.1m~0.2m。

4.3.4 本条第 4 款作出如下说明：根据深圳地铁建设经验，岩溶地区基坑开挖涌水主要为岩溶裂隙水或溶洞内承压水突涌。初勘阶段需根据区域水文资料在地下水丰富地段进行分层测水头，初步查清地下水的承压水头。勘察钻孔可作为水文观测孔利用。

4.3.5 根据深圳市城市轨道交通设计和施工经验，岩溶发育影响因素较多，同一区域发育形态差异性较大，查明岩溶的具体分布及地下水的连通性及承压性对工程施工极为重要。本标准加大了初步勘察阶段的勘探工作量布置，为设计、施工提供尽可能详细的溶（土）洞和裂隙的发育和分布情况。

本条第 2、3、4 款的勘探孔间距上下限取值可根据岩溶发育程度及对工程的影响确定，岩溶强发育、对工程影响较大地段可取小值，岩溶弱发育、对工程影响较小地段可取大值，岩溶中等发育、对工程影响一般地段可取中间值。

岩溶地区钻探过程中因溶洞串珠状发育导致钻孔达到结构底板下 30m 仍未满足技术要求时，视工程需要，报设计、监理共同确定终孔深度。考虑后期岩溶专项勘察物探需要，本阶段钻孔可作为物探试验孔加以利用，考虑到钻孔沉渣及物探盲区，建议计划作为物探利用孔的初勘钻孔在原有基础上加深 5m，便于后期开展物探工作。

4.3.8 深圳市岩溶主要为覆盖性岩溶，可溶岩表层主要为冲洪积层和残积层，部分为溶蚀堆积物和红土层，为便于区分，要求每个钻孔均开展标准贯入试验，可溶岩残积层及溶蚀堆积物大多含有未分化碎石，为较好的反映密实程度，建议采用动探试验。

4.3.9 可溶岩的化学成分、矿物成分、岩石结构对岩溶的发育程度、速度和特征有直接关系，因此要求各个地质单元选取不少于 3 组有代表性岩样开展矿物鉴定工作。

4.3.10 工程地质单元的岩土层类型、物理和力学性质存在差异，因此本条规定了每个工程地质单元主要岩土层的最少取土样、波速测试和原位测试数量。鉴于初步勘察阶段岩土工程参数对于初步设计和土建工程招标的重要性，实际工作中，原则上可适当提高岩土层取样和试验数据的数量要求，不需要以最低数量要求来控制，防止取样和试验数量偏少造成初步勘察阶段岩土参数与后续勘察阶段差异过大引起设计方案和经济投资大的修改。

4.4 详细勘察

4.4.1 岩溶地区的勘察需遵循分阶段开展、逐步深入的原则，详细勘察需基于初勘揭露岩溶发育情况及分布特征，结合设计方案及工法需要针对性布置并开展工作。

4.4.2 一般情况下勘察方法以钻探、取样、原位测试、室内试验为主，但对于岩溶发育地段，物探需同时选用作为主要勘察方法之一，且物探成果作为施工图设计和地基处理的依据时，需先进行验证。此外，深圳地区岩溶虽以覆盖型岩溶为主，岩溶岩上部多为第四系地层覆盖，但仍有

部分地段有岩溶岩出露，此外，岩溶发育地段及周边一定范围通常会有岩溶地面塌陷等不良地质作用，因此需重视工程地质测绘与调查工作，在拟建工程周边一定范围内开展此项工作。另外，还需重视水文地质试验的应用，综合查明岩溶水系统特征。

岩溶分布及发育特征包括岩溶洞隙、溶沟（槽）和土洞的平面位置、埋深、规模、溶洞填充程度和填充物、溶沟溶槽堆积物的性状；岩溶水特征包括埋藏条件、补给排泄条件、连通性、富水性和地层渗透性。

4.4.3 岩溶地区勘察可采用的物探手段多种多样，需基于初勘揭露的岩溶特征（如埋深、溶洞大小）以及场地条件等，选择合适的物探手段，具备条件时优先考虑孔内物探方法，如跨孔 CT 法等。通常需在大规模应用前进行比选试验。

4.4.4 岩溶地区的详细勘察，首先满足施工图设计所要求的各项常规勘察工作，并在此基础上针对岩溶发育特征开展针对性的深入勘察工作，并结合岩溶发育特征给出对应的分析、建议及风险提示。

除了需查明溶洞、土洞、溶沟、溶槽及堆积物等岩溶不良地质作用外，还需查明溶蚀裂隙发育带的分布特征。根据深圳地铁 16 号线及其共建管廊的建设经验，多次发生因可溶岩的裂隙发育带渗透而产生的突涌。

岩溶地面塌陷分区及划分标准，可按本标准附录 F 执行；溶洞稳定性分级及评价方法可按现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 的有关规定执行。

4.4.5 不同规范对钻孔布置的要求有所差别。根据现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307，岩溶不良地质强发育时，按照复杂场地考虑，车站钻孔间距为 10m~20m，区间钻孔间距为 10m~30m；岩溶不良地质一般发育时，按中等复杂场地考虑，车站钻孔间距为 20m~40m，区间钻孔间距为 30m~50m。根据现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136，岩溶地区复杂场地勘探孔间距 8m~15m，中等复杂场地 15m~25m，简单场地 25m~40m（现行武汉市标准《岩溶地区勘察设计与施工技术规程》DB4201/T 632 有同样的规定）。根据现行广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241 对岩溶地区勘探点布置的规定，地质纵剖面图上相邻勘探点间距可为 10m~20m（岩溶强发育时可取小值，岩溶弱发育时可取大值）。此外，深圳市城市轨道交通目前岩溶地区勘察经验，实际的勘探点间距，车站钻孔间距一般在 10m~25m，区间钻孔间距一般在综合上述规范约定，结合深圳市城市轨道交通建设经验，按照不同岩溶发育程度对勘探点布置进行了细分。鉴于岩溶地区的勘察工作指导原则为逐步深入，详勘之外还有岩溶专项勘察以及后续的施工勘察，故对于岩溶弱发育地段钻孔间距略有放宽。此外，深圳地区矿山法施工的地段主要为局部区间以及联络通道，根据深圳经验为风险很大的地段，因此矿山法地段勘探点要求相比盾构法更为严格。

考虑岩溶发育的复杂性，钻孔需布置在结构轮廓线向外 2m 范围内，不需偏离结构过远，造成围护结构处地质条件与勘察成果有明显偏差；根据深圳地区岩溶处理经验，处理范围一般不小于结构外侧 3m，建议在发育大型溶洞、较多串珠状溶洞等岩溶强发育地段，除结构轮廓线处的钻孔外，可在结构外侧 5m~10m 增加一排钻孔。

第 2 款，根据深圳地区城市轨道交通勘察经验，可溶岩发育区常存在同一地段的左右线地质条件差异较大的情况。为合理布置勘察工作并查明左右线纵向地质条件，做出本条约定：当左右线间距小于 3 倍洞径（或洞跨）时，左右线地质纵断面图可共用隧道中间的勘探点，以节省勘察工作量；当左右线间距大于 3 倍洞径时，左右线之间的钻孔距离隧道结构较远，难以代表左右线的地质条件，故需要分别考虑布置。

联络通道通常采用矿山法施工，风险大，岩溶地区的联络通道建设风险更为突出。根据深圳市城市轨道交通建设及管理经验，适当加强勘察工作，对勘探点布置做了更明确的规定，联络通

道的钻孔不少于 6 个。通常需要在左、右线结构外侧在联络通道纵向轴线两侧各布置 2 个，联络通道结构外侧各布置 1 个。当联络通道较长（大于 3 倍洞高或洞跨），还需要适当增加钻孔，钻孔间距按照 5m~10m，当岩溶强发育时取小值，岩溶弱发育时取大值。

第 3 款，现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 及《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 中，仅要求“条件复杂时每个独立基础均需布置勘探点”以及“对一柱一桩的基础，需逐柱布置勘探孔”。深圳岩溶地区场段工程的桩基详细勘察，从参照嵌岩桩勘察要求（不超过 24m）按照 15m~18m 布置（逐墩或隔墩布置），到逐墩布置，到局部地段一墩多孔，根据对岩溶地区复杂程度和风险程度的认识而不断加强。现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 对岩溶地区桩基工程施工阶段勘察提到了一桩一孔加物探或一桩多孔的布置要求，而实际工程建设实践中，施工勘察阶段才进行逐桩勘察工作，可能造成较大的工程变更。现行广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241 依据广州市等地的岩溶地区桩基工程勘察经验，提到了“不同阶段的勘察合理结合，有利于尽快查明岩溶地质条件”，深圳经验与此类似。故此本标准提出，对于岩溶地区的桩基工程勘察，在按照目前逐墩布置勘探点的基础上，结合岩溶发育程度适当加强勘察工作，特别是对于嵌岩桩，需结合施工勘察要求，在详勘阶段提前开展。

根据既有规范，高架段需按照逐墩布设勘探点，当地质条件复杂时适当增加勘探点数量。根据墩台通常尺寸及下设桩基情况，一般 1 个~5 个勘探孔并结合必要的物探手段，可以满足勘察工作内容及深度要求，局部数量可根据岩溶发育程度和场地复杂程度而定。对于岩溶发育强烈且特别复杂的场地（如较多的串珠状溶洞或大规模溶洞），可按照嵌岩桩勘察要求逐桩布置。

第 4 款，此处参照现行广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241 的相关规定和研究成果。目前深圳市城市轨道交通工程山岭段勘察时，钻孔间距通常参照铁路规范、市政规范的要求布置，一般在 200m~500m 之间，在进出洞临近地段、隧道埋深小、地质条件复杂地段钻孔适当加密。山岭段一般地形地貌复杂，不便于钻探作业，且山岭段通常岩土层稳定，不需按照一般暗挖区间进行勘探点布置。山岭段勘察需重视工程地质调查、物探方法的应用，参照本条要求，基于调查和物探揭露，重点在进出洞口地段、地层界线、断裂带附近、物探异常区、线路拐弯等位置布置勘探点，调查、物探、钻探相结合查明山岭段地质条件。

第 5 款，本标准在取样数量方面参照现行广东省标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》DBJ/T 15-241 的规定，比现行国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 偏严格，并特别规定详细勘察阶段取样勘探孔数量不少于勘探点总数的 1/2，以保证岩土层取样具有代表性且数量满足要求。

4.4.7 跨孔 CT 法是经过实践验证的相对精度较高的孔内物探方法，在深圳地区有大量的应用。考虑 CT 探测需要，为避免钻孔深度下部出现探测盲区，钻孔深度需适当增加。

4.4.10 岩溶水多为承压水，钻孔水位量测时，需特别注意确定岩溶地下水的承压水头。另外，深圳岩溶分布地区的地下水都高于基岩面，抽水试验时人工降水可能会引起土洞进一步发育或地表塌陷，需要注意此类风险的防控，做好应对措施。

4.4.11 重视可溶岩的岩矿鉴定及岩溶水的成分分析，用以进行溶蚀原因、溶蚀程度的分析。溶沟溶槽堆积物、溶洞填充物通常工程性质差且不均匀，此外，可溶岩表面多见一层软塑状黏性土。此类地层性质差且不易取样，需考虑取样或原位测试进行适当加密，可靠查明地层工程性质。对于工程影响范围内的此类地层，可参照针对特殊性岩土的取样或原位测试（标贯、动探等）间距要求，按照 1m~2m 的间距进行。

4.4.12 物探方法因探测精度和解译偏差，会影响岩溶勘察成果的准确性，需有一定数量的验证孔用以验证溶洞、裂隙发育带是否与解译相符，并核查物探的准确程度，为设计和施工提供参考。

验证孔的具体数量和布设位置，需要根据岩溶发育程度和数量确定，可按照不少于物探异常数量或 CT 测线数量的 5% 布置，且不少于 4 个。岩溶强发育地段，验证孔数量需适当增加。

4.4.13 岩溶专项勘察是针对岩溶特殊地质的专门工作。通常需结合详勘工作一同开展。在详勘要求基础上，针对岩溶处理的要求，查明溶洞、土洞等不良地质以及裂隙发育带、溶沟溶槽堆积物、溶洞填充物、可溶岩表面软流塑黏性土等特殊岩土分布特征及与拟建工程的相对关系。

4.5 施工勘察

4.5.1 施工阶段的地质工作是施工单位在施工过程中的必要工作，是信息化施工的重要手段。实际工作中，当工程问题较复杂时，施工阶段的勘察资料与初勘、详勘资料的整合分析，建设单位往往要求由掌握场地地质情况、技术力量较强的详勘单位来处理。同时，由于岩溶发育的特殊性等因素影响，实际工程中不同勘察单位、不同勘察阶段的勘察结果有可能出现认识上的差异。根据部分城市和岩溶地区的城市轨道交通工程建设经验，为了尽量减少协调处理工作，保持技术标准的连续性，施工阶段岩溶勘察可由详勘单位实施。

4.5.2 喀斯特地貌岩面起伏及可溶岩中发育溶洞或溶隙分布情况难以预测，根据深圳岩溶地区城市轨道交通工程建设经验，常规详细勘察（包括岩溶专项勘察）工作完成后，仍会存在局部地段围护结构底端深度或工程桩的桩端标高与勘察设计确定的有较大偏差，如果留待超前钻解决则会影响工期和工程风险管控等。对此，广州地铁在总结多条岩溶地区线路建设经验基础上，提出开展施工阶段为设计服务的补充勘察，即针对可溶岩地质条件复杂区域，为进一步确定围护结构、桩基或地基处理深度进行的专项勘察，作为详细勘察阶段的补充勘察，需符合工程建设实际情况和需要。

4.5.4 岩溶地区围护结构超前钻，主要用以确定支护结构及截水帷幕的深度。

4.5.5 详勘和岩溶专项勘察期间，如受各种条件限制，岩溶地区桩基工程勘察未开展一桩一孔或一桩多孔的勘察，在施工勘察阶段需及时完成。

4.5.6 为了提前发现和分析矿山法隧道掌子面前方一定距离内的岩体和不良地质体状态、特征，采用钻探、坑探和地球物理勘探等组合的施工勘察，习惯上称之为“隧道超前地质预报”。

4.5.7 岩溶处理过程中及结束后，可采用物探手段结合必要的钻探，对岩溶处理情况、地面沉降、地下脱空等情况进行探测和验证，以避免风险隐患。目前深圳岩溶地区城市轨道交通工程及综合管廊工程多采用地质雷达探测的方法。

4.5.8 城市轨道交通工程多位于繁华市区，对铁路干线、主要市政道路、高速公路、密集民房等地段，难以采用常规钻探及孔内物探的，可采用水平钻孔、斜孔钻探的手段或者微动探测、地质雷达探测等合适的地面物探手段进行岩溶发育特征的探查。目前深圳岩溶地区轨道交通工程勘察中，对此类地段大多采用了微动探测、地质雷达探测；城际轨道交通工程勘察中，对此类地段大多采用了水平钻探、斜孔钻探的手段。必要时此项工作可提前至详勘阶段开展。

4.6 勘察成果

4.6.5、4.6.6 深圳地区大部分地段（特别是岩溶地区）地下水位较高，岩溶地区地下水活动、洞体稳定性等对城市轨道交通建设影响很大。进行勘察成果分析与评价时，需阐明岩溶的空间分布、发育程度等情况，在此基础上分析和评估岩溶地下水、洞体稳定性对工程建设的影响，提示岩溶地质条件可能造成的工程风险，以及可能因工程建设影响周边产生的环境地质问题。

4.6.8 第 1 款，如可溶岩上覆的饱和砂、砾石层、软土层和有土洞存在的黏性土层均需视为有可能发生覆盖层地面塌陷的场地。

第 2 款，如河床、河漫滩及一级阶地，均视为岩溶水补给区。

5 设计

5.1 一般规定

5.1.1 岩溶地区地质条件复杂，对城市轨道交通工程施工和运营安全产生较大的影响。因此，在选线时，需优先选择避让岩溶强发育地段，以减少岩溶地质灾害对轨道交通工程的影响。

然而，在某些情况下，难以避让岩溶强发育地段，这可能是由于规划要求、城市区域限制或其他因素所致。在这种情况下，需进行全面的环境评估和岩溶地质调查，选择穿越可溶岩分布范围最小、环境影响程度最低且岩溶易于治理的地段进行穿越。这样可以最大程度地减少对岩溶地质环境的破坏，并降低岩溶地质灾害的风险。

在选择穿越地段时，需考虑岩溶地质条件、地下水系统、地表沉降等因素，确保工程安全和可持续发展。同时，还需对穿越地段进行有效的岩溶治理和监测，确保轨道交通工程的稳定性和安全性。

5.1.2 构造破碎带是指岩石中存在的断裂和节理带，其稳定性较差，容易发生地质灾害。可溶岩与非可溶岩接触带则是指可溶岩与非可溶岩之间的过渡带，具有较大的地质不连续性。避让这些不良地段可以减少对隧道工程的不利影响，降低地质灾害的风险。

如果无法完全避让，隧道轴线不与岩层构造线平行。因为与构造线平行的隧道轴线容易受到构造活动的影响，增加了隧道的地质风险。相反，选择与岩层构造线大角度斜交或垂直通过可以减少构造活动对隧道的影响，提高隧道的稳定性。

5.1.3 对于埋深较浅的隧道，需优先考虑采用盾构工法，通过调整隧道纵坡坡率，避开“上土下岩、半土半岩”地层以减少隧道开挖对周围环境和建筑物的影响，必要时可不设置节能坡。

5.1.4 该条强调了在岩溶地区工程的设计过程中，需综合考虑多个因素，充分了解工程的特点和要求，以确保工程施工和运营的安全性。

5.1.5 设计的统筹协调意味着在岩溶地区的工程设计过程中，需统筹考虑岩溶治理、地基基础、基坑支护、隧道设计和周边环境保护彼此之间的关联性和相互影响。动态设计的原则意味着设计需具有灵活性和适应性，能够根据工程地质和施工的实际情况进行调整和优化。岩溶地区的地质和水文条件常常具有复杂性和多变性，因此设计过程需具备动态响应的能力。

5.1.6 该条规定了岩溶治理的对象范围，岩溶地区除了溶（土）洞、溶沟、溶槽、溶隙、岩溶水外，也常存在着砂砾土、软弱土等覆盖层，它们在岩溶地质环境中的稳定性较差，岩溶治理需采取相应的加固和防护措施，以保证地基的稳定性和安全性。

5.1.7 岩溶地区的特殊地质条件 and 水的连通性使得岩溶水的流动更为复杂和不可预测。因此，在进行岩溶地区的工程设计时，需加强对岩溶水的治理，以避免对工程施工和运营的不利影响。同时，针对区间隧道，因其长距离通过岩溶富水地段，其施工和运营过程中需要面对高水位、渗水和涌水等问题。因此，区间隧道设计需充分考虑岩溶地下水的变化和变化，采取适当的防水和排水措施。

5.2 岩溶治理设计

5.2.1 在岩溶地区进行城市轨道交通工程岩溶治理设计，受工程自身特点、岩溶发育特征、地质水文条件、周边环境等多重因素影响，需要予以综合考虑，选择适宜的治理方法。

5.2.2 现行国家标准《岩溶地区建筑地基基础技术标准》GB/T 51238 中关于地基处理的方法有：充填法、跨越法、桩基法、注浆法、褥垫层法。结合广州、武汉、南宁、深圳等地区城市轨道交通工程岩溶处理方法主要为充填法、注浆法、桩基法，因此本标准主要采用充填法、注浆法和桩基法。

5.2.3 根据既有工程经验，明挖结构处理范围一般为：

- 1 支护结构外侧 3m，底板以下 5m 范围内的所有溶洞均须处理；
- 2 底板以下 5m~10m 范围内的溶洞，溶洞稳定岩面顶板高度小于 3m 或高跨比小于 1 的溶洞，需进行充填处理；
- 3 上述两种处理范围以外，存在支护结构底部以下溶洞顶板稳定岩面高度小于 3m 的无填充或半填充溶洞也需进行处理；
- 4 在上述 1、2 处理范围内存在“串珠状”溶洞时，当洞体之间的完整基岩层厚度小于 0.5m 时，仅处理至下层溶洞。明挖结构岩溶处理范围示意图见图 1。

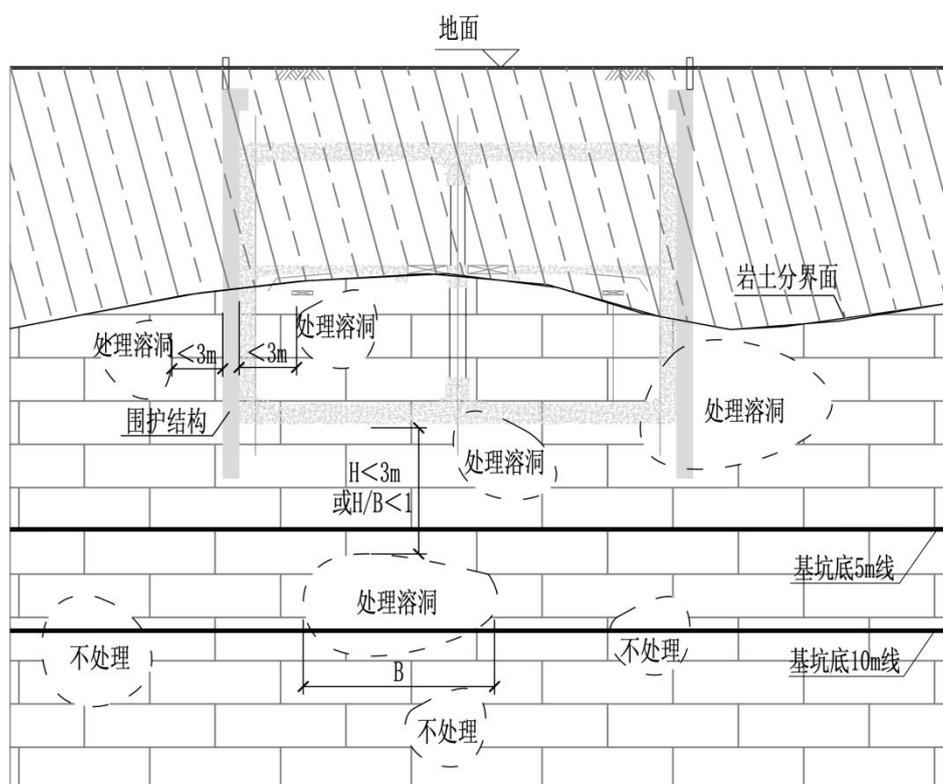
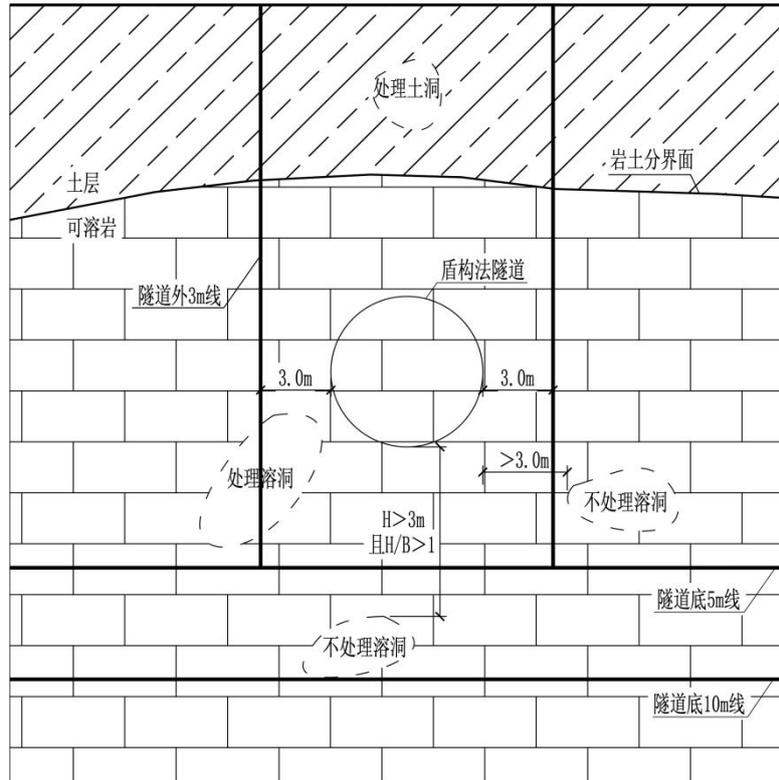


图 1 明挖结构岩溶处理范围示意图

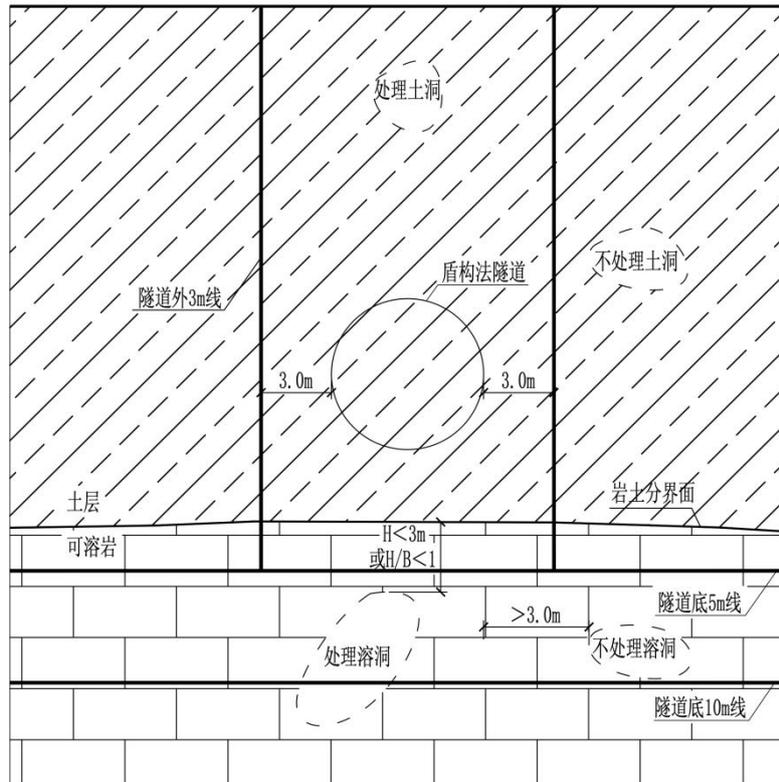
5.2.4 根据既有工程经验隧道结构处理范围一般为：

- 1 结构轮廓线两侧外侧 3m，结构顶板以上 3m，底板以下 5m 范围内的溶洞必须处理；
- 2 底板以下 5m~10m 范围内的溶洞，溶洞稳定岩面顶板高度小于 3m 或覆跨比小于 1 的溶洞，需进行充填处理。

隧道结构岩溶处理范围示意图见图 2。



(a) 隧道位于弱风化可溶岩中



(b) 隧道位于可溶岩上覆土层中

图 2 隧道结构岩溶处理范围示意图

5.2.6 针对明挖基坑岩溶处理，可选用加大支护结构埋深和采取坑底防渗治理措施，根据基底所处地层水压、水量、含水层厚度等进行综合研判，选用安全可靠、经济合理的措施。

5.2.7 充填材料主要有：碎石、砂砾、水泥砂浆、素混凝土、轻质泡沫土以及液态固化土等；

注浆材料主要有：水泥浆、双液浆。充填、注浆材料需满足国家现行有关标准。根据既有工程经验：溶洞高度大于 3m 的无填充和半填充溶洞采用碎石、素混凝土充填；溶洞高度 1m~3m 的无填充和半填充溶洞采用水泥砂浆充填；溶洞高度小于 1m 的无填充和半填充溶洞，以及全填充溶洞采用水泥浆静压注浆。

5.2.8 在进行充填和注浆施工前，需进行必要的现场试验。这些试验旨在评估地质和工程条件，确定合适的施工方法和施工参数，以确保施工的质量和效果。试验内容可以包括注浆材料的性能测试、充填和注浆的适应性试验等。根据试验结果，选择合理的充填和注浆方法，包括充填材料的选用、注浆工艺的确定等。同时，注浆压力、注浆次数、注浆时间等施工参数也需根据试验结果进行合理的设定，以保证施工的质量和效果。

5.3 地基基础设计

5.3.1 岩溶地区场地稳定性是影响地基基础设计的重要因素，其不仅影响工程实施难度及工程造价，还将对地基、基础设计原则产生巨大的影响，因此，地基基础设计时，需对场地的稳定性进行评价。

5.3.2~5.3.5 地基与基础设计需结合地质条件、荷载特点综合确定。地质条件包含地层的稳定性、承载力及抗变形能力。岩溶地区，基础设计需与地基设计相匹配，根据不同的地质条件、功能或施工需求对“强地基”或“强基础”进行比选，综合确定地基及基础设计方案。

浅基础设计时除了地基的承载力及抗变形能力外，需特别注意地基的稳定性，岩溶地区的 I 类场地（特别是 I₁ 类场地），由于地下水的变化、动载等影响易造成砂层流失，形成岩溶沙漏型破坏，导致地基不稳定问题，未经有效处理不得作为持力层。II、III 类场地中亦容易产生土洞，当外部条件改变时，可能造成地基稳定性问题，基底附加应力范围内的土洞需全部处理。

5.3.7 III 类岩溶地质结构的特点为土岩结合面常分布有软塑~流塑状黏土，计算时需考虑刚性下卧层及软弱下卧层对承载力及变形的影响；岩面起伏较大，可能产生滑移时需评估地基稳定性；基础跨越土岩时，需考虑地层刚度变化的影响。

5.3.8 桩基持力层的选择与桩基的型式及岩溶发育程度有较大的关联。桩基计算时考虑到岩溶地区地层的不确定性（岩溶发育、潜在土洞、岩面起伏等），需对承载力进行适当的折减，根据现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 规定，非嵌岩桩桩侧摩阻力折减系数：岩溶弱发育时取 0.95~1.0，岩溶中等发育时取 0.8~0.95，岩溶强发育时取 0.75~0.85；非嵌岩桩桩端阻力折减系数：岩溶弱发育时取 0.9~1.0，岩溶中等发育时取 0.8~0.9，岩溶强发育时取 0.7~0.8；嵌岩桩嵌岩段桩侧摩阻力折减系数：岩溶弱发育时取 0.9~1.0，岩溶中等发育时取 0.8~0.9，岩溶强发育时取 0.7~0.8；嵌岩桩嵌岩段桩端阻力折减系数：岩溶弱发育时取 0.95~1.0，岩溶中等发育时取 0.85~0.95，岩溶强发育时取 0.7~0.85；抗拔桩桩侧阻力折减系数：岩溶弱发育时取 0.9~1.0，岩溶中等发育时取 0.8~0.9，岩溶强发育时取 0.7~0.8。

5.4 基坑支护设计

5.4.1 岩溶强发育区基坑破坏造成的后果影响大、范围广，其基坑安全等级需提高一级。

5.4.2 岩溶弱发育场地，当地下水埋深较大，周边环境空旷，无敏感建构筑物，基坑较浅时，可采用放坡支护；岩溶弱发育场地，当坑底以上的基岩完整、地下水连通性弱时可根据周边环境复杂程度比选采用吊脚桩或吊脚墙；岩溶中等发育场地，可结合地下水控制方案及周边环境保护需要综合比选地下连续墙支护、排桩支护等支护形式；岩溶强发育场地，基坑支护结构深度大于土层与岩溶表面接触带时，可采用地下连续墙、咬合桩等截水效果较好的支护方案。岩溶强发育、

中等发育的场地，存在较厚的饱和砂层、开挖深度较深、周边环境对变形要求严格的基坑可采用地下连续墙支护结构。地下连续墙需进行“一槽两钻”进一步探明岩面起伏及岩溶发育情况，在此基础上进行有针对性的设计。岩溶强发育和中等发育的地段可采用咬合桩、地下连续墙支护结构。

5.4.9 岩溶地区基坑施工地下水的处理至关重要，岩溶地区基坑出现的问题，多数为地下水处理不当引起。地下水封堵可采用支护桩（墙）穿透透水层，注浆封堵（水平注浆帷幕、垂直注浆帷幕）裂隙层连通通道等措施。

5.4.10 岩溶治理及其效果检测通常关注于溶洞本身的处理效果，岩溶裂隙的连通性才是造成基坑突涌水的最重要因素，基坑整体抽水试验、降水试验是检验地下水封堵整体效果的有效手段。

5.4.11 土岩结合面附近，具备很好的岩溶发育条件，容易形成饱和的软土层及裂隙带。基坑底位于土层中，土层下覆岩溶发育且地下水丰富，基底覆盖土层厚度较薄时，容易产生突水风险，需对土岩接合面以及可溶岩的溶洞、裂隙发育带进行处理；支护结构嵌固于土岩结合面时，容易产生绕流、涌水、涌泥等风险，支护结构需穿过土岩结合面或者采用注浆的方式对土岩界面的水进行处理。

5.4.12 岩溶强发育区地下水需封堵处理；岩溶中等发育区地下水需封堵处理，周边环境简单、采用降排水时，需对降水影响进行评估；岩溶弱发育区、周边环境简单时可采用降排水措施，并需加强监测，设置地下水位观测井和回灌井。

5.5 隧道设计

5.5.1 当区间隧道无法避免需要穿越岩溶强发育区或半岩半土地层时，需采取合理的措施调整线路纵坡坡度，以减少隧道在这些地层中的穿越长度和减少对岩溶地质环境的干扰和风险。在确定区间联络通道位置时，需在满足疏散距离的前提下尽可能避开岩溶强发育和中等发育区。

5.5.2 由于岩溶地区的地质条件复杂，传统矿山法施工容易引发岩溶突水、涌泥及地面塌陷等问题。为避免这些施工风险，穿越岩溶地区的区间隧道设计需优先考虑采用盾构施工工法，联络通道需优先选择机械法。

5.5.3 设计荷载的确定需要综合考虑地形、地质条件、埋置深度、施工工法和相邻隧道间距等因素，这些因素会对隧道结构的地层压力、外水压力等荷载产生影响。

5.5.4 由于岩溶发育的不确定性，目前的勘察手段无法完全揭露溶洞的发育形态，在施工过程中，难免会遇到未揭露的溶（土）洞，为确保施工安全和顺利进行，需采取洞内处理和地面处理相结合的方式对溶（土）洞的处理。

5.5.5 在岩溶地区隧道治理设计中，需要详细考虑水压和水量的大小，结合岩溶发育程度和地下水赋存情况等因素，制定适合的治理原则。

6 施 工

6.1 一 般 规 定

6.1.1 根据深圳市人民政府令第 319 号《深圳市房屋安全管理办法》第二十条规定，在地下工程或者爆破工程施工前，建设单位需按规定实地调查周边房屋的场址、地基基础、建筑上部主体结构及围护结构情况，委托专业机构进行安全影响评估，并结合实际采取风险防范措施。

6.1.2 根据现行国家标准《盾构法隧道施工及验收规范》GB 50446 的相关条款规定，由于施工环境不同，各地对施工噪声、固体废弃物（渣土弃置）等排放有不同要求，对施工进度有直接的影响，因此需进行工程环境的调查工作。

6.1.3 参照了现行武汉市标准《岩溶地区勘察设计与施工技术规程》DB4201/T 632 的规定，本条主要对地质风险进行评估和管控。

6.1.4 本条是结合政府监督部门对主体工程施工前条件验收的要求而制定的，现场可根据实际情况，在征得相关部门的同意后，分区域或分阶段进行岩溶治理工程的验收工作。

6.1.5 在岩溶发育地区施工时，桩基成孔（或注浆钻孔）过程中可能造成岩溶水流失，引起土洞坍塌、地面塌陷等安全风险，因此施工中需采取预控措施，查明易造成地面塌陷的浅层土洞并及时处理。

6.2 岩溶治理施工

6.2.1 根据设计确定的岩溶治理施工参数，在选定的区段内进行现场试验，总结出适合该段地质条件下合理的工艺性参数，如注浆孔深度、孔距、注浆压力、浆液配合比、单位注浆量及停止注浆条件等，以验证岩溶治理方法的适用性；根据现场条件选择合理的岩溶处理设备，以满足安全质量和工期要求；通过对该区段采取钻孔取芯、标准贯入、压水试验结合物探手段，如电测深法、电剖面法或瞬态面波法等检测手段，对岩溶治理的效果及质量进行检测，最后形成适合本工程试验段地质条件下的施工方案和施工工艺，以指导后续大面积施工。不同的地质条件需分别独立开展岩溶试验段施工。

6.2.2 探边孔取芯时，对于黏性土和完整基岩的岩芯取样率需大于 80%，岩溶、构造破碎带以及碎石类土取芯率需大于 50%，以确定溶洞边界和洞内填充物状态。区间隧道岩溶治理遇特大溶洞的情况下，因占道施工的原因，无法一次性确定溶洞边界时，可分次施工，并另行制定方案。

6.2.4 充填法适用于无填充、半填充溶（土）洞的处理，注浆法适用于全填充溶（土）洞和溶（土）洞充填后的处理，其施工方法如图 3（a）和图 3（b）所示。

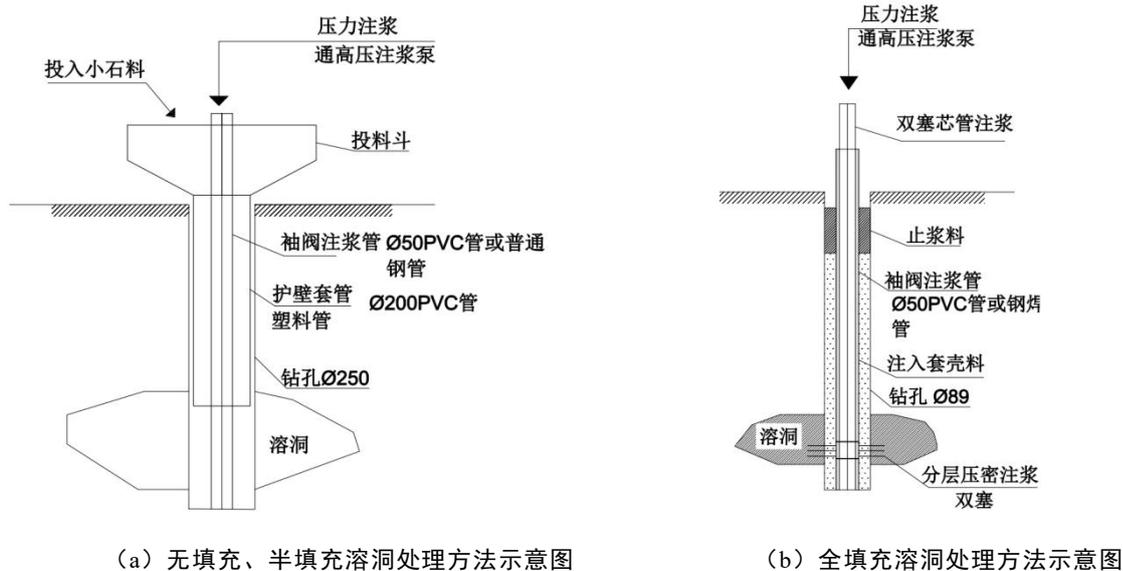


图3 溶洞处理方法示意图

6.3 地基基础施工

6.3.2 地基加固采用桩基时，需根据桩群密度、桩身规格、挤土效应、地质条件和施工条件等因素进行综合考虑，并需遵循以下原则：

- 1 当桩群较密集时，需自中间向两个方向或向四周对称施打；
- 2 当一侧有相邻建筑物时，需由建筑物处向另一方向施打；
- 3 根据桩底标高，需先深后浅进行；
- 4 根据桩身规格，需先大后小、先长后短进行。

6.3.3 岩溶地区采用水泥土类桩体施工搅拌桩或旋喷桩时，采用重复搅拌和复喷措施的目的是扩大加固范围和提高桩身固结体强度，在不良地质条件下的成桩桩体满足质量要求。

6.3.5 岩溶地区素混凝土桩在软弱土层施工时，采用退打且隔桩跳打施工，是为了防止相邻桩内混凝土串孔；岩溶地层的基岩面起伏一般都比较大，钻头钻至基岩面时，为避免出现钻孔偏斜或卡钻事故，需降低钻进速度。

6.3.6 地下水、砂层厚度、饱和软土以及溶洞大小是影响钻孔灌注桩施工工艺的主要因素，溶洞顶板被击穿时，在孔内泥浆压力的作用下，砾砂层和软土层失稳而产生塌孔，还会产生掉钻或卡钻现象，因此须采用钢套筒护壁或全套管钻成孔。

6.4 基坑支护施工

6.4.3 岩溶地区基坑开挖出现基坑涌水的风险高，因此在基坑开挖前需进行基坑内外水力连通性试验，对渗漏点及时堵漏处理。为了减小岩溶涌水风险发生时的破坏范围，对基坑开挖分段长度、分层厚度做了限制。

6.4.5 当基坑开挖基岩石方采取爆破方法时，需根据周边环境要求，采取数码电子雷管微差控制爆破、减少单段装药量、优化布孔方式和装药结构、设置减振孔等控制爆破振动速度的技术措施，避免爆破振动引起地面塌陷或地下水通道贯通。

6.5 隧道施工

6.5.2 城市轨道交通隧道工程采用盾构法在岩溶地区施工时,通过深圳地铁 14 号线及 16 号线的经验总结,与其他地层相比需增加的技术措施如下:

1 盾构机需配置超前钻探和注浆设备,以通过洞内进行溶洞处理;小直径盾构机盾体内空间较小,可预留超前钻探和注浆的接口,大直径盾构机可随机配置;

2 在微风化碳酸岩尤其是方解石含量较高的地层掘进时,盾构机刀盘用传统方式安装的中心刀易崩刃和脱落,因此深圳地铁在以后的盾构机准入时,刀盘的中心刀具均改为 TBM 固定方式,可有效改善中心刀脱落的状况,TBM (Tunnel Boring Machine) 在我国专指在硬岩中以敞开或护盾方式掘进的隧道掘进机;

3 在地下水丰富、岩石强度较高的可溶岩地层掘进时,需采取防止螺旋机喷涌的措施;

4 一般情况下用旋喷桩加固地层进行盾构机始发和接收是较为常用的方法,但在岩溶强发育、上覆地层存在砂层等富水条件下,加固地层的方法难以保证安全,因此推荐钢套筒始发和接收;

5 岩溶强发育地层,由于裂隙发育,盾构在掘进时地层普遍存在漏气的情况,HSP (Horizontal Sonic/Seismic Profiling) 是水平声波/地震波剖面法的英文缩写,对盾构施工来说是一种有效的物探方法,对于松散和密实地层有明显的比对效果,一次探测距离可达 80m 以上,提前对影响盾构施工的松散软弱地层进行处置可有效防止盾构掘进时地层漏气冒浆现象;

6 按现行国家标准《地下铁道工程施工标准》GB/T 51310 要求严格执行;

7 在岩溶强发育地段,由于隧道顶部地层普遍气密性较差,带压检查更换刀具是比较困难的事情,有条件需提前加固地层;

8 在岩溶强发育地层,即使掘进断面为微风化岩层,如果土仓压力小于地下水水头压力,上覆的砂层在压力差的作用下,沿溶蚀裂隙进入土仓,造成地表塌陷;在 I₁、II₁ 甚至在 III₁ 类地层结构场地中,土压平衡盾构机采用气压辅助模式掘进时,土仓保压困难,全土压掘进又会造成盾构超载,这时可采用在土仓内加入厚浆的方式进行浆液辅助模式的掘进,经过施工验证,在岩溶强发育区上覆地层较差的情况下,效果较好。海瑞克公司为岩溶强发育区盾构施工研发的可变密度盾构机与此原理类似,但自动化程度和施工效率更高;

9 提高同步注浆压力,浆液可以进入小的溶洞和裂隙,同时也可以加大同步注浆的流量,保证管片壁后填充密实度;施作止水环的目的是防止由土仓向盾体后部串气。

6.5.3 在岩溶中等及以上发育地层,采用矿山法进行联络通道施工风险较高,存在着岩溶水突涌的安全隐患。地铁 14 和 16 号线的施工经验表明,在同类地层的联络通道施工过程中,不同程度地出现过岩溶水突涌和掌子面局部坍塌的现象,因此需要做好岩溶水的监测工作,评估岩溶水泄露对施工和周边环境的影响。采用矿山法施工联络通道时,地层加固可选择冷冻法。在没有集水井的联络通道,可采用机械法施工。

7 检验与监测

7.1 一般规定

7.1.2 岩溶地区城市轨道交通工程需对检验与监测数据进行整理分析，结果及时反馈建设、设计、施工、监理等相关单位，做到施工信息化管理。

7.2 检 验

7.2.4 主要参照现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 检测要求的第 12.1.3 条的规定。结合深圳地铁 14、16 号线的施工经验，对注浆加固检验方法与检测标准需符合设计图纸要求，设计图纸无要求时建议采用下列标准：

- 1 注浆工程验收检验需选择布置在有代表性地段和薄弱部位（溶洞、土洞或破碎带）；
- 2 土洞充填采用随机原位标贯试验，标贯击数需不小于 10 击；
- 3 溶洞注浆充填物采用随机钻孔抽芯法，做抗压试验，要求无侧限抗压强度大于等于 0.2MPa；
- 4 压（注）水试验透水率需不大于 $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，合格率需大于 85%；其余不合格孔段的透水率最大值需不超过 $7.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，且不集中；
- 5 不满足上述检查标准时，需对受检查的溶洞加固区进行灌浆补强施工，并需加倍检测。

7.3 监 测

7.3.1 城市轨道交通工程基坑多为深基坑，隧道埋深大，施工风险高，因此工程建设监测需编制专项监测方案。

7.3.3 基坑、隧道工程施工对周围岩土体的扰动范围、扰动程度是不同的，一般来说，临近基坑、隧道地段的岩土体受扰动程度最大，由近到远的影响程度越来越小。一般规范将这一受施工扰动的范围称为工程影响区。在施工影响范围内根据受施工影响程度的不同，规范将从基坑、隧道外侧由近到远依次划分为主要影响区、次要影响区和可能影响区。一般情况下，监测区域均不超过 3H（H 为基坑深度或隧道覆土深度）。

根据工程实践，岩溶地区的工程影响分区主要受地层特性和地下水的影响较大，扰动范围、扰动程度均比常规地层要大得多。因此对岩溶地区的监测需适当扩大监测范围。工程影响分区主要目的是区分工程施工对周边地层、环境的影响程度，以便把握工程关键部位，针对受工程影响较大的周边环境对象进行重点监测，做到经济合理地开展工程周边环境监测工作。

因此从工程监测需要及经济合理角度出发，按照距离基坑或隧道距离远近分三级进行监测，监测分区分别为主要影响区域、次要影响区域、可能影响区域。

主要影响区域，为 3H 深度范围内，此区域受施工影响较大，需作为监测重点，监测布点及监测频率需进行加密。地下水位监测点布设在 3H 范围内；主测断面内，布设 3 个水位监测点，距离基坑深度分别为 2m、1H、3H。岩溶地下水水位监测孔深度需不小于基底以下 5m，承压水水位监测管滤管需埋置在所测承压水层中。当环境调查、勘察揭示基坑、暗挖工程周边存在对岩溶地下水水位变化敏感的设施时，需适当扩大地下水位监测范围。其他监测项目按照设计要求执行。

次要影响区域，为 3H~150m 内，此区域内根据施工影响区域的监测情况，定期进行监测。对次要监测区域内存在岩溶发育强烈的，按照主要监测区域标准进行监测。

可能影响区域，为基坑 150m~300m 的区域，此区域以巡查为主，并根据前两级监测情况及巡查情况，开展进一步监测工作。对可能监测区域内存在岩溶发育强烈的，按照次要监测区域标准进行监测，并跟监测数据变化情况采取必要措施。

7.3.4 专项巡查的意义如下：

1 掌握周边环境、支护结构体系和围岩的动态，较全面地掌握各工点的施工安全控制程度（施工过程中存在物的不安全状态、人的不安全行为等），为建设管理单位对轨道交通工程建设风险管理提供支持；

2 坚持现场安全巡视日常化，最大程度避免人员伤亡和环境损害，降低工程经济和工期损失，为工程建设提供安全保障服务；

3 作为现场安全监测的有益补充，及时发现事故前兆，对现象作出定性结论。

因此，对于特殊地层风险监测而言，专项巡查工作与仪器监测同等重要，且相辅相成，绝对不容忽视。

专项巡查内容主要包括工程自身巡查和周边环境巡查两部分内容。

1 工程自身

(1) 地质状况：岩（土）层性质及稳定性、地下水控制效果和其他情况；

(2) 降水工程：降水效果及状态；

(3) 支护结构体系：冠梁变形，桩体（边坡）施工质量，桩加内撑，桩间土稳定及渗漏水情况，支护体系施作及时性、支护体系开裂、变形变化、支护体系施工质量缺陷、超载与超挖和其他情况；

(4) 基坑周边环境：坑边超载、地表积水及截排水措施和其他情况；

(5) 施工工艺：开挖坡度、开挖面暴露时间、施工工序、基坑超挖及其他情况。

2 周边环境

(1) 建（构）筑物：①建（构）筑物开裂、剥落，包括裂缝宽度、深度、数量、走向、剥落体大小、发生位置、发展趋势等。②地下室渗水。包括渗水量、发生位置、发展趋势等；

(2) 桥梁：墩台或梁体开裂、剥落情况，包括裂缝宽度、深度、数量、走向、剥落体大小、发生位置、发展趋势等；

(3) 道路（路面）：①地面开裂，包括裂缝宽度、深度、数量、走向、发生位置、发展趋势等。②地面沉陷、隆起，包括沉陷深度、隆起高度、面积、位置、距墩台的距离、距基坑（或隧道）的距离、发展趋势等。③地面冒浆/泡沫，包括出现范围、冒浆/泡沫量、种类、发生位置、发展趋势等；

(4) 地下管线：①管体或接口破损、渗漏，包括位置、管线材质、尺寸、类型、破损程度、渗漏情况、发展趋势等。②检查井等附属设施的开裂及进水，包括裂缝宽度、深度、数量、走向、位置、发展趋势、井内水量等；

(5) 周边邻近施工情况：在施工程项目规模、结构、位置、进度、与轨道交通水平距离、垂直距离等。

8 风险管理

8.1 一般规定

8.1.1 城市轨道交通工程建设风险管理需贯穿于工程建设全过程，结合城市轨道交通工程的建设实际情况，根据工程建设内容与过程，一般可划分为五个阶段，包括：规划阶段、可行性研究阶段、勘察与设计阶段、招标投标与合同签订阶段和施工阶段。本标准风险管理仅限于勘察与设计阶段、施工阶段，其他阶段的风险管理，需符合国家现行有关标准的规定。

8.1.3 考虑城市轨道交通工程建设风险管理参与单位众多、工程建设情况复杂，为了更好地实施风险管理，建设风险管理需由建设单位负责组织，成立风险管理工作机构与管理组织，并在签订的合同文件或技术条件书中约定建设各方的风险管理职责和任务。

风险管理实施中最重要的是提高建设各方的工程建设风险管理意识，加强风险信息的相互沟通与交流，通过通报、会议等多种形式组织建设各方共同参与，针对重大风险因素开展专项风险管理，并在实施过程中执行风险登记与检查制度，编制规范的风险记录文件。

8.1.4 城市轨道交通工程建设风险管理需根据工程建设阶段、规模、重要性程度及建设风险管理目标等制定风险等级标准。

在城市轨道交通工程建设风险管理中，需全面考虑各项建设风险。城市轨道交通工程建设风险影响因素较多，包括：自然环境、场地条件、结构设计与施工、机电设备安装、参建人员及周边建（构）筑物（包括周围道路、房屋、管线、桥不可接受区梁和其他）等。实施城市轨道交通工程建设风险管理，需在安全可靠、经济合理、技术可行的前提下，通过规划、设计和施工等全过程采取风险控制措施，把城市轨道交通工程建设中潜在的各类风险降低到合理、可接受的水平，以控制建设安全和工程质量，减少经济损失和人员伤亡，并控制工程建设投资，保障工程建设工期。

8.2 风险分级

8.2.1 风险发生可能性等级主要根据风险发生的频率或概率划分为五级，参考国际隧道与地下空间协会（International Association of Tunnel and Underground Space, ITA-AITES）制定的分级方法，制定本标准的风险发生可能性等级标准值。

当概率值难以取得时，可用年发生频率代替。风险发生概率等级需优先采用定量判断标准确定。当无法进行定量计算时，可采用定性判断标准确定。

不同施工方法，风险发生可能性不同，深圳地区城市轨道交通工程主要采取明挖法、盾构法施工。深圳城市轨道交通工程岩溶地区发生地质风险的可能性分级可参照表1~表3确定。

表1 岩溶地区明挖法施工的地质风险可能性分级表

风险类型	基坑失稳	局部坍塌	基底隆起	基底突涌	侧壁渗漏	环境过量变形	爆破飞石	堵水困难
可能性	可能	频繁	罕见	可能	可能	可能	可能	频繁

注：表1引自《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》GB 50652。

表 2 岩溶地区盾构法施工的地质风险可能性分级表

风险类型	地面坍塌	进出洞坍塌	进出洞突涌	环境过量变形	栽头	滞排	掘进受阻	刀盘刀具非正常磨损	偏离轴线	中毒窒息	爆炸
可能性	可能	可能	可能	可能	频繁	偶尔	偶尔	偶尔	偶尔	偶尔	罕见

表 3 岩溶地区地下水影响工程施工地质风险可能性分级表

风险类型	基坑失稳	局部坍塌	基底隆起	侧壁渗漏	基底突涌	环境过量变形	地面坍塌	掌子面坍塌	拱顶冒顶	掌子面突涌	进出洞坍塌	进出洞突涌	螺旋输送机喷涌	盾尾渗漏
可能性	可能	可能	可能	频繁	可能	可能	频繁	频繁	频繁	频繁	偶尔	偶尔	可能	可能

注：表 2、表 3 引自住房和城乡建设部规定《城市轨道交通工程地质风险控制技术指南》（2004 年）。

8.2.2 风险损失等级按照不同损失的类型较难统一划分，一般采用以定性表示为基础，针对不同的损失类型采用量化的等级标准编制。根据风险损失进行分类，本标准将风险类型分为以下五类：

- 1 人员伤亡风险；
- 2 环境影响风险；
- 3 经济损失风险；
- 4 工期延误风险；
- 5 社会影响风险。

风险损失严重程度可采用定量或定性方法确定。需根据可能发生的风险事件，结合工程规模、工法特点、周边环境，分析风险事件发生后可能造成的最大人员伤亡、经济损失、工期延误、环境影响和社会影响，综合参考类似工程事故案例，进行综合评价。

8.2.3 工程建设人员伤亡等级标准参考了国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》（2007-06-01）和《企业职工伤亡事故分类标准》GB 6441-86 的规定。

城市轨道交通工程建设风险管理，要求坚持人员“安全第一”的原则，工程建设风险可能引起的建设人员或邻近区域的第三方（非直接参加工程建设的其他人员）发生伤害或死亡，考虑两者的不同参与对象和工作内容，工程直接参加人员采用《生产安全事故报告和调查处理条例》（2007-06-01）中的较大事故作为一级，第三方伤害以建设人员伤亡的三级作为一级。

8.2.4 城市轨道交通工程建设对周边环境的影响包括两种类型：自然环境影响和社会环境影响。其中，自然环境影响等级标准的制定参考了《国家处置城市地铁事故灾难应急预案》（2006-1-24）、《建设项目环境保护管理条例》（2017-7-16）和《中华人民共和国环境影响评价法》（2018-12-29）等。因工程建设导致的环境影响一般是指导致周边建（构）筑物发生破坏，产生经济损失，其标准参考本标准第 8.2.5 条。

8.2.5 经济损失等级参考了国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》（2007-06-01）划分等级，具体数值需根据一条线路或评估对象的工程总投资估算进行评估。

8.2.6 工期延误等级标准主要根据国内城市轨道交通工程一般的建设周期与可接受的合理工期，同时，考虑工期长短的不同进行划分。对于不合理的工期压缩提前，也易引发各种工程建设风险，因此，由非合理的工期提前所导致的建设风险，亦可根据工期提前程度拟定相应的工期不合理提前的等级标准。

8.2.7 任何灾害或事故的发生都会引起社会负面压力，严重影响公众和政府对于工程建设的良好

意愿和政府公信力，从而导致工程建设各方的社会信誉受到损失。

社会舆论与公众评价对城市轨道交通工程的建设进展影响巨大，社会信誉损失是建设各方潜在风险损失的重要部分。社会信誉损失与不同风险事故的后果密切相关，尤其是如造成第三方损失或对周边区域环境造成损害，将会引起严重的社会信誉损失。本标准制定的社会影响等级标准的执行部分参考了《国家处置城市地铁事故灾难应急预案》（2006-1-24）。

8.2.8 风险等级标准的制定借鉴了国际隧道与地下空间协会（ITA-AITES）制定的《隧道工程风险管理指南》（2004年）以及住房和城乡建设部制定的《城市轨道交通工程地质风险控制技术指南》（2020年），相应的风险分级用风险等级标准矩阵表示。根据近年来我国城市轨道交通地下工程建设风险管理实践经验和国际发展现状水平，将风险等级标准划分为四级。

8.2.9 城市轨道交通地下工程建设中，不同等级的风险需采用不同的风险处置与控制对策。结合风险等级标准矩阵，不同等级风险的接受准则和相应的处置原则与控制方案需考虑风险管理的目标和建设各方的职责来决策。

8.3 风险辨识

8.3.1 岩溶地区城市轨道交通工程建设需根据岩溶分布规律、岩溶发育程度、工程地质与水文地质条件，结合类似工程的工程经验、事故案例以及可能采用的施工工艺、工法，分析预测可能发生的岩溶地质风险，进行风险辨识。

对轨道交通工程建设有直接影响的岩溶因素包括规模大小、覆跨比、填充情况、溶蚀裂隙的发育情况、发育强度等级、暗河、岩溶的富水情况和水力性质、岩溶水的流向、流速。其中主控因素为分布位置、岩溶规模、地下水水力性质及覆跨比。

8.3.2 风险辨识是工程建设风险管理的基础和前提，全面、系统地辨识各类风险对完成风险管理至关重要。城市轨道交通工程建设中建设条件复杂，涉及人员众多，专业工作要求高，岩溶地区需注重收集岩溶地质资料，通过对工程各类资料的综合分析，才能更好地辨识工程潜在的风险。城市轨道交通工程建设风险辨识前，需具备下列基础资料：

- 1 工程周边水文地质、工程地质、自然环境及人文、社会区域环境等资料；
- 2 已建线路的相关工程建设风险或事故资料，类似工程建设风险资料；
- 3 工程规划、可行性分析、设计、施工与采购方案等相关资料；
- 4 工程周边建（构）筑物（含地下管线、道路、民防设施等）等相关资料；
- 5 工程邻近既有轨道交通及其他地下工程等资料；
- 6 可能存在业务联系或影响的相关部门与第三方等信息；
- 7 其他相关资料。

8.3.3 风险辨识包括风险分类、确定参与者、收集相关资料、风险识别、风险筛选和编制风险辨识报告等6个步骤，其中：

1 风险分类需根据本标准第8.2.2条的条文说明风险损失类型进行分类，系统分析工程建设基本资料，对工程建设的目标、阶段、活动和周边环境中的各种风险因素进行分析；

2 风险辨识参与者需选择工程经验丰富及理论水平较高的工程技术人员、管理人员和研究人员一起参与，风险辨识中专家信息对辨识十分重要；

3 需全面收集工程相关资料，对现场进行风险勘察，系统分析工程建设风险因素，潜在的风险因素包括客观因素和主观因素，如工程建设场地及周边环境因素、建设技术方案因素及工程投资、工期和人员等；

4 风险识别：利用风险调研表或检查表建立初步风险清单，清单中明确列出客观存在的和潜在的

各种建设风险，包括影响工程安全、质量、进度、费用、环境、信誉等方面的各种风险；

5 风险筛选：根据风险识别的结果对工程建设风险进行二次识别，整理并筛选与工程活动直接相关的各项风险，删除其中与工程活动无关或影响极小的风险因素及事故，并进一步进行识别分析，确定是否有遗漏或新发现的风险点；

6 编制风险辨识报告：在风险识别和筛选的基础上，根据建设各方的具体要求，结合工程特点和需要，以表单形式给出详细的风险点，列出已辨识的工程建设风险清单。

8.3.7 对本条做以下说明：

1 采用明挖法施工时，需按照施工工序逐项分析岩溶对明挖法施工带来的工程风险；

2 基坑围护结构施工可能发生卡钻、漏浆、埋钻的风险，以及岩面起伏造成围护结构施工和质量把控困难、造成工期长、接缝渗漏、墙底不能完全满足嵌固深度的风险；

3 基坑开挖过程中，可能发生突水、涌泥、涌砂、机械陷落、地基承载力不足、地基不稳定等风险；

4 基坑开挖过程中，可能出现基坑及周围地面坍塌、管线破裂、建（构）筑物损坏等风险。

8.3.8 对本条做以下说明：

1 盾构法施工需根据隧道穿越地段岩溶地质条件和地下水条件开展盾构机选型工作；

2 盾构隧道掘进施工过程中，可能破坏岩溶、土洞原有平衡，发生洞穴塌陷、进而导致地面塌陷和地面建筑物沉降过大的风险；

3 采用泥水平衡盾构时，大量岩块堆积在泥水仓底，存在搅拌棒、格栅易被破坏风险；

4 溶洞的存在使地层软硬不均，易发生盾构姿态偏移，遇见未查明岩洞、土洞时，易发生仓内瞬间失压、盾构栽头风险；

5 岩溶地层开挖面软硬不均、凹凸不平的特点对盾构机刀盘磨损严重，存在刀盘被快速破损的风险；

6 盾构隧道施工过程中，易发生岩溶水击穿盾尾密封，岩溶水涌入隧道的风险；

7 可溶岩表层黏性土及填充黏性土的存在以及大块岩石堆积在仓底，易发生结泥饼、滞排、喷涌风险。

8.3.9 对本条做以下说明：

1 矿山法隧道施工时，因机器震动、爆破等因素影响对周边溶洞、土洞造成扰动，可能破坏其结构平衡诱发塌陷，或直接被揭露，从而发生岩溶突水、涌泥等事故发生的风险；

2 隧道开挖时揭露溶洞、土洞，其原有的平衡结构被打破，可导致开挖面及其周边区域的岩土体发生坍塌；

3 隧道开挖过程中，需预防岩溶洞穴中可能存在的有害气体对人体可能造成危害的风险。

8.4 风险分析

8.4.1 风险分析有很多种方法，可分为定性分析方法、定量分析方法和综合分析方法。其中：

1 定性分析方法，包括：专家调查法（包括智暴法 Brain storming、德尔菲法 Delphi 等）、“如果……怎么办”法（If…then）、失效模式及后果分析法（Failure Mode and Effect Analysis, FMEA）等；

2 定量分析方法，包括：模糊数字综合评判法、层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）、蒙特卡罗法（Monte Carlo）、控制区间记忆模型法（Controlled Interval and Memory Model, CIM）、神经网络方法（Neural Network）、风险图法等；

3 综合分析方法，包括：事故树法（或称故障树法，Fault Tree Analysis, FTA）、事件树

法（Event Tree Analysis, ETA）、影响图方法、原因—结果分析法、风险评价矩阵法，以及各类综合改进方法，如：专家信心指数法、模糊层次综合评估方法、模糊事故树分析法、模糊影响图法等综合评估方法；

在进行风险分析时，可根据工程建设的具体内容、不同建设阶段、风险发生的特点来选取。

8.4.3、8.4.4 工程风险等级可按下列规定进行修正：

- 1 当地质风险为I级时，整个工程风险等级需定为I级；
- 2 当地质风险为II级时，整个工程风险等级需上调一级（工程风险等级已经为最高级时维持不变）；
- 3 当地质风险为III级时，整个工程风险等级保持不变；
- 4 当地质风险为IV级时，整个工程风险等级可根据工程实际情况保持不变或下调一级。

8.5 风险预警

8.5.2 工程建设安全风险预警可分为监测预警、巡查预警和综合预警三种方式。

1 监测预警：根据设计单位提出的“双控”指标监控量测控制值，将施工过程中监测点的安全状态按严重程度由小到大分为三级：黄色监测预警、橙色监测预警、红色监测预警。

监测预警等级和预警标准的划分需根据工程特点、施工经验等确定，一般三个等级分别取其“双控”指标监控量测控制值的 70%、80%和 100%。

2 巡查预警：施工过程中通过巡查，发现安全隐患或不安全状态而进行的预警。按严重程度由小到大分为三级：黄色巡查预警、橙色巡查预警、红色巡查预警。巡查预警等级划分可参照表 4 执行。

表 4 巡查预警等级划分标准

预警等级	隐患、征兆
黄色	一般隐患多或对存在的隐患不整改和整改不及时，如采用检查评分表进行检查评分时得分不合格
橙色	严重隐患或事故早期征兆，如基坑、暗挖隧道超挖严重、支护（撑）不及时（格栅间距超过设计值的 30%，基坑超过三根支撑未加设）或本标准 8.3.5~8.3.9 条所列事故早期征兆
红色	重大隐患或事故中晚期征兆，如现场出现严重违反设计、规范要求的施工作业或本标准 8.3.5~8.3.9 条所列事故中晚期征兆

施工单位巡查内容包括开挖面地质情况，支护结构体系及基坑或隧道周边环境等。

监理单位对施工单位巡查内容（开挖面地质情况，支护结构体系及基坑或隧道周边环境）等监督审查，并进行施工工艺及设备、施工组织管理及作业状态的巡查。当出现下列警情之一时，需根据严重程度按预警监控管理制度发布巡查预警：

- （1）基坑、隧道支护结构出现明显变形、较大裂缝、断裂、较严重渗漏水、隧道低鼓，支撑出现明显变位或脱落、锚杆出现松弛或拔出等；
- （2）基坑、隧道周边岩土体出现涌砂、涌土、管涌，较严重渗漏水、突水，滑移、坍塌，基底较大隆起等；
- （3）周边地表出现突然明显沉降或较严重的突发裂缝、坍塌；
- （4）建（构）筑物、桥梁等周边环境出现危害正常使用功能或结构安全的过大沉降、滑移、倾斜变形及过大裂缝等；
- （5）周边地下管线变形突然明显增大或出现裂缝、泄漏等；
- （6）根据当地工程经验判断需进行警情报送的其他情况。

3 综合预警：施工过程中，需根据现场参与各方的监测、巡查信息，并通过核查、综合分析和专家论证等，及时综合判定出工程风险不安全状态而进行的预警。综合预警分级按严重程度由小到大为三级：黄色综合预警、橙色综合预警、红色综合预警。综合预警等级划分可参照表 5 执行。

表 5 综合预警等级划分标准

预警等级	判定条件
黄色	1 施工安全风险状态评估为Ⅲ级； 2 严重程度为需考虑，影响范围小
橙色	1 施工安全风险状态评估为Ⅱ级或Ⅲ级； 2 严重程度为严重，影响范围较大
红色	1 施工安全风险状态评估为Ⅰ级； 2 严重程度为非常严重或灾难性，影响范围大

8.5.3 工程建设过程中，当出现预警信息时，建设、勘察、设计、施工、检验与监测、监理等相关单位需立即组织分析与研判，同时加强监测、巡视，制定必要的防范措施，防止灾害或事故发生。