

《城市轨道交通既有结构安全评估技术规程》（试行稿）

目次

| | |
|-----------------------|-----|
| 前 言 | III |
| 1 总则 | 1 |
| 2 术语和定义 | 2 |
| 3 基本规定 | 4 |
| 3.1 一般规定 | 4 |
| 3.2 保护区划分 | 4 |
| 3.3 外部作业影响等级 | 5 |
| 3.4 安全评估适用情况 | 6 |
| 3.5 安全评估机构及人员要求 | 6 |
| 4 安全评估程序及方法 | 8 |
| 4.1 一般规定 | 8 |
| 4.2 评估流程 | 8 |
| 4.3 评估方法 | 9 |
| 4.4 评估报告 | 10 |
| 4.5 专家评审 | 11 |
| 4.6 评估后工作 | 12 |
| 5 现状调查 | 13 |
| 5.1 一般规定 | 13 |
| 5.2 调查内容 | 13 |
| 5.3 资料收集 | 14 |
| 5.4 检测方法 | 15 |
| 5.5 现场监测 | 15 |
| 6 数值分析 | 18 |
| 6.1 一般规定 | 18 |
| 6.2 数值分析方法确定 | 18 |
| 6.3 模型建立 | 18 |
| 6.4 本构模型及参数选择 | 19 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 6.5 初始条件与边界条件设置..... | 19 |
| 6.6 计算工况设置..... | 20 |
| 6.7 模型计算与结果验证..... | 21 |
| 6.8 外部作业影响预测与安全评估..... | 22 |
| 7 安全保护要求..... | 24 |
| 7.1 一般规定..... | 24 |
| 7.2 基坑工程..... | 24 |
| 7.3 暗挖工程..... | 25 |
| 7.4 地基基础工程..... | 25 |
| 7.5 道路与桥梁工程..... | 26 |
| 7.6 地下水作业..... | 27 |
| 7.7 爆破与振动作业..... | 27 |
| 7.8 其他作业..... | 28 |
| 附录 A 基坑、暗挖工程的外部作业影响等级判定..... | 30 |
| 附录 B 堆载、浅基础、桩基础的外部作业影响等级判定..... | 35 |
| 附录 C 既有结构为路基或高架时接近程度和外部作业的工程影响分区..... | 37 |
| 附录 D 安全评估报告格式..... | 39 |

前言

本规程按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本规程的某些内容可能涉及专利。本规程的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由东莞市轨道交通局提出并归口。

本文件起草单位：东莞市建筑科学研究院有限公司、东莞市轨道交通有限公司、东莞市建设工程检测中心有限公司、中国地质大学（北京）、东莞理工学院、西南科技大学、东莞新奥燃气有限公司。

本文件主要起草人：张彤炜、李海峰、周书东、陆永芳、张益、董培壮、黎伟佳、叶森立、周世宗、彭智航、李鹏举、潘达、余旭东、黄健桐、郑大叶、胡涛、胡殷、马俊成、李波、刘红岩、王建明、张灿威、丁其乐、黄锦盛、李斯妤、杜涛、黄秋菊、张贵保。

1 总则

1.0.1 为规范外部作业对城市轨道交通保护区既有结构影响安全评估工作，提高其有效性、准确性及指导作用，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于东莞市城市轨道交通保护区既有结构外部作业安全评估的编制、论证和实施。

1.0.3 城市轨道交通保护区外部作业安全评估工作除应遵守本规程外，尚应符合国家和广东省现行有关标准的规定。

2 术语和定义

2.1.1 城市轨道交通 urban rail transit

采用专用轨道导向运行的城市公共客运交通系统，包括地铁、轻轨、单轨、自动导向轨道、市域快速轨道系统。

2.1.2 既有结构 existing structure

已建成的城市轨道交通结构。

2.1.3 保护区 protection area

为保护城市轨道交通的正常使用和安全，在其结构及周边特定范围内设置的安全保护区。

2.1.4 净距 clear distance

外部作业与城市轨道交通结构外边线之间的净距离。

2.1.5 涉轨项目 rail related projects

指建设工程位置在轨道交通安全保护区范围内的工程项目。

2.1.6 城市轨道交通设施 Urban rail transit facilities

城市轨道交通车站（含出入口、通道、风亭、冷却塔等附属结构）、隧道、地面轨道、高架桥梁、车辆段建（构）筑物、变电站等建（构）筑物及城市轨道交通内的所有设备设施。

2.1.7 安全评估 safety assessment

根据外部作业的实施方案、城市轨道交通保护方案及既有结构调查情况等，通过建模、计算、分析，评估外部作业对城市轨道交通既有结构安全影响的工作。

2.1.8 数值分析 numerical analysis

对实际工程合理简化后，通过计算机分析软件，建立模型，剖分计算网格，选取本构模型及材料参数，确定初始条件和边界条件，设置工况分析研究对象力学行为的工作。

2.1.9 外部作业影响等级 external homework impact level

根据外部作业的工程影响分区与城市轨道交通的接近程度，确定其影响等级。

2.1.10 结构安全控制指标 control index for structural safety

根据城市轨道交通结构的安全现状及其保护要求，针对外部作业时结构的响应特征，为保护结构安全而选用的控制指标。

2.1.11 降水作业 operation of ground water

直接或间接诱发城市轨道交通结构周边水位变化或水质变化的外部作业，包括地表水的抽排、引导以及地下工程中的排水、降水、截水或回灌水作业等。

2.1.12 实时监测 real-time monitoring

采用仪器量测、现场巡查或远程视频监控等手段和方法，实时、动态地采集反映城市轨道交通既有结构以及周边环境对象的安全状态、变化特征及发展趋势的信息，并进行分析和反馈，以达到安全保护的目的。

2.1.13 监测预警等级 alarming class on monitoring

根据监测值与其相应的结构安全控制指标值的比较，对城市轨道交通结构实行监测预警管理的分级。

2.1.14 信息管理 information management

以现代信息技术为手段，对城市轨道交通既有结构安全保护信息进行采集、处理、分析、反馈、指导和管理控制的活动

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 外部作业内容包括但不限于：

- 1 新建、改建、扩建或者拆除建（构）筑物；
- 2 挖掘、爆破和机械振动；
- 3 地基加固、打井、基坑施工、地下抽水降水回灌；
- 4 桩施工（旋喷桩、管桩等）、钻探、灌浆、高压注浆、喷锚、地下顶进拖拉法、顶管施工等作业；
- 5 高架上方塔吊安装拆卸作业；
- 6 管线敷设、地下坑道穿越地铁设施等作业；
- 7 取土、采石、挖沙、疏浚河道；
- 8 大面积增加或者减少载荷的活动；
- 9 对轨道交通出入口、风亭、冷却塔、变电站等设施设备进行围圈施工；
- 10 其他可能影响城市轨道交通安全的作业行为。

3.1.2 外部作业评估应对城市轨道交通既有结构和运营安全影响提出明确结论，当需要对既有结构进行监测时，应明确监测范围、对象、周期、项目及控制值。

3.1.3 外部作业评估对象应包括评估范围内的隧道（含联络通道）、车站、桥梁、涵洞、路基等既有主体结构 and 出入口、风亭、通道等附属结构。

3.2 保护区划分

3.2.1 在建线路安全保护区分为一级管控区和二级管控区。运营线路安全保护区分为控制保护区和特别保护区。

3.2.2 在建线路一级管控区、运营线路特别保护区范围：

- 1 地下车站和隧道结构外边线外侧 5 米内；
- 2 地面车站和地面线路、高架车站和高架线路结构外边线外侧 3 米内；
- 3 出入口、通风亭、冷却塔、直升电梯、变电所（站）等建（构）筑物结构外边线和车辆基地用地范围外侧 5 米内；
- 4 1 - 10 千伏电压导线的边线外侧 5 米内，35 - 110 千伏电压导线的边线外侧 10 米内；

地下电力电缆线路地面标桩两侧各 0.75 米内；

5 过江（河）隧道、跨江（河）桥梁结构外边线外侧 50 米内。

3.2.3 在建线路二级管控区、运营线路控制保护区范围：

1 地下车站与隧道结构外边线外侧 50 米范围内；

2 地面车站和地面线路、高架车站和高架线路结构外边线外侧 30 米内；

3 出入口、通风亭、冷却塔、直升电梯、变电所（站）等建（构）筑物外边线和车辆基地用地范围外侧 10 米内；

4 过江（河）隧道、跨江（河）桥梁结构外边线外侧 100 米内。

3.2.4 当城市轨道交通控制保护区遇特殊的工程地质或特殊的外部作业等特殊情况下，应适当扩大保护区划分范围。

3.3 外部作业影响等级

3.3.1 在外部作业对城市轨道交通保护区内实施前，应根据外部作业影响等级和既有结构现状评估等级，确定既有结构安全保护等级。

3.3.2 外部作业影响等级应按表 4.3.2 进行划分，其中接近程度及外部作业的工程影响分区宜按本规程附录 A.0.1 和 A.0.2 确定。

表 3.3.2 外部作业影响等级的划分

| 外 部 作 业 的 工 程 影 响 分 区 | 接近程度 | | | |
|---|------|----|-----|-----|
| | 非常接近 | 接近 | 较接近 | 不接近 |
| 强烈影响区（A） | 特级 | 特级 | 一级 | 二级 |
| 显著影响区（B） | 特级 | 一级 | 二级 | 三级 |
| 一般影响区（C） | 一级 | 二级 | 三级 | 四级 |
| 较小影响区（D） | 二级 | 三级 | 四级 | |

注：1 本表适用于围岩级别为Ⅳ~Ⅵ的情况；围岩等级为Ⅰ~Ⅲ的情况，表中的影响等级可降低一级；围岩级别为Ⅳ的软土地区，表中的影响等级应提高一级，特级时不再提高。

2 围岩级别应按现行行业标准《铁路隧道设计规范》TB 10003 中的有关规定确定。

3 对于既有的城市轨道交通附属结构，外部作业影响等级可降低一级。

3.3.3 存在下列情况之一的，外部作业影响等级应提高一级，特级时不再提高：

- 1 城市轨道交通结构或外部作业位于复杂的工程地质条件或存在工程地质灾害的情况，如地下存在空洞溶洞、深厚软土、地层分布不均匀且差异较大等；
- 2 外部作业为旁侧基坑工程时，基坑开挖深度超过轨道结构埋深且与轨道交通结构平行方向的基坑边长超过 2 倍基坑开挖深度；
- 3 外部基坑支护采用悬挂式截水帷幕，且没有隔断透水层时，既有结构安全保护等级应提高一级，I 级时不再提高；
- 4 对于盾构法、顶管法或矿山法既有结构，当上方外部作业的卸荷比大于 0.15 或开挖深度大于既有结构覆土厚度的 1/4 时，既有结构安全保护等级应增加一级，I 级时不再提高。

3.3.4 外部作业采用顶管法或拖拉管施工工艺时，城市轨道交通既有结构的安全保护等级划分应符合下列规定：

- 1 对于下穿既有结构的管线施工，安全保护等级为 I 级；
- 2 当管道直径小于 2.5m 时，可参照盾构法外部作业确定的安全保护等级降低一级，安全保护等级为 IV 级时仍定为 IV 级；当管道直径大于或等于 2.5m 时，可参照盾构法外部作业确定的安全保护等级。

3.4 安全评估适用情况

3.4.1 安全评估根据外部作业施工进度分为结构现状评估、预评估、施工过程评估以及工后评估。

3.4.2 存在下列情况时应先进行外部作业安全评估：

- 1 外部作业影响等级为特级、一级、二级；
- 2 监测数据达到或超过预警值；
- 3 作业影响区域隧道结构出现新增病害；
- 4 作业影响区域隧道结构原有病害出现较快发展；
- 5 其他可能影响城市轨道交通运营安全或运营的情况。

3.4.3 隧道结构的工后评估应在外部作业完成且监测数据稳定之后开展，宜对作业影响区域的隧道结构病害进行专项评估。

3.5 安全评估机构及人员要求

3.5.1 安全评估工作应由外部作业的建设单位委托具有资质或工程经验的第三方评估机构完成。

3.5.2 安全评估工作主要完成人应有相关城市轨道交通工程安全评估经验。

4 安全评估程序及方法

4.1 一般规定

4.1.1 当外部作业设计方案无法满足预评估确定的结构安全控制指标时，应优化、调整设计方案，并重新评估，直至评估结果满足相应结构安全控制指标值。

4.2 评估流程

4.2.1 安全评估单位宜在初步设计阶段介入并启动安全评估工作，分阶段提交安全评估成果；在召开安全评估会议前，应将安全评估报告提交至东莞市轨道交通有限公司征求意见。

4.2.2 安全评估工作流程应按图 5.2.1 执行，并应符合下列规定：

- 1 由外部作业工程影响分区及接近程度划分外部作业影响等级，并结合城市轨道交通围岩等级及地质条件调整外部作业影响等级；
- 2 根据既有结构调查成果，评定各单项结构病害等级，综合确定既有结构现状评估等级；
- 3 结合外部作业影响等级和既有结构现状评估等级，确定安全保护等级；
- 4 根据外部作业类型与安全保护等级，确定既有结构安全控制指标；
- 5 根据外部作业实施方案开展评估计算与分析，根据评估结果与安全控制指标进行复核验算，进行方案优化与迭代；
- 6 提出评估结论、安全保护要求及措施建议，综合评定外部作业设计方案和轨道交通设施专项保护方案的可行性。

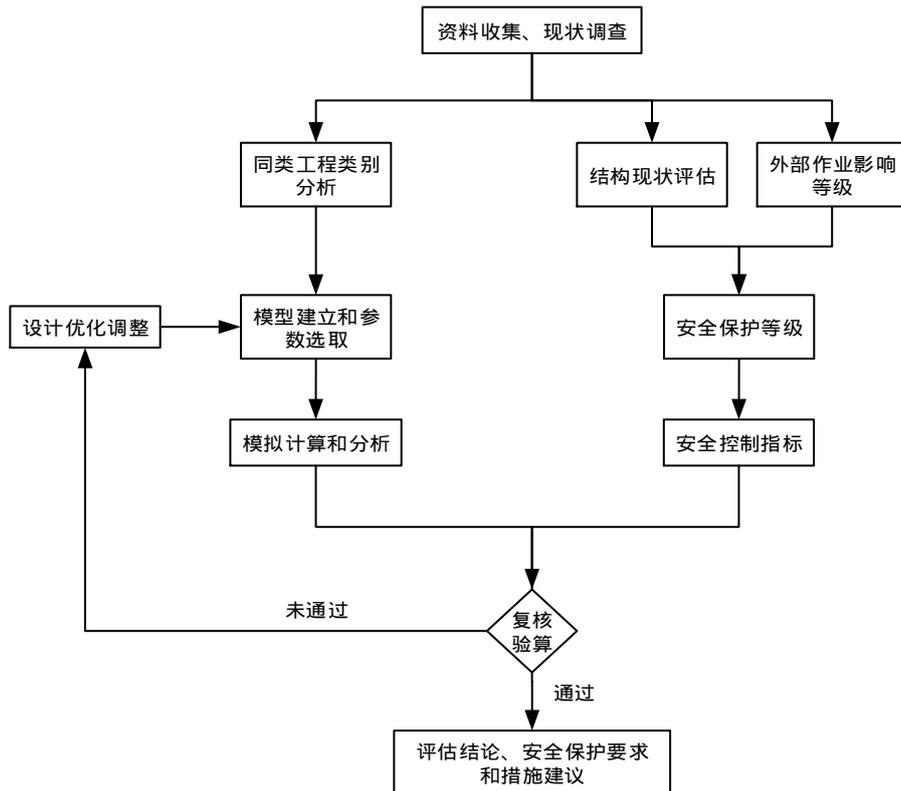


图 4.2.2 安全评估工作流程

4.3 评估方法

4.3.1 外部作业安全评估可采用理论分析、数值模拟和工程类比等方法，预测外部作业对既有结构的影响程度，评估外部作业实施方案和既有结构保护方案的可行性。

4.3.3 评估方法适用范围应符合下列规定：

- 1 理论分析方法可用于评估外部作业对既有隧道结构纵向和横向变形的影响；对于异形基坑或基坑群等复杂情况，可采取对既有结构较为不利的情况进行评估；
- 2 简化理论分析方法可用于评估外部作业对既有结构纵向变形的影响；
- 3 数值模拟方法宜用于评估复杂外部作业对既有结构变形和应力的影响。

4.3.4 采用理论分析方法评估时，应符合下列规定：

- 1 既有结构横截面宜选取受外部作业影响大、位于复合地层或地层突变等典型不利情况；
- 2 既有结构横向附加荷载可根据外部工程作业引起的场地中的应力场和位移场计算；
- 3 管片衬砌宜等效为截面刚度相同的匀质圆环，可采用弹性地基弹簧模型描述地层对管片衬砌变形的约束作用。

4.3.5 采用数值模拟方法评估时，应符合以下规定：

1 外部基坑工程施工模拟应考虑分层、分步开挖、支撑架设、拆撑、回填等关键工况的影响，并重点考虑加载和卸载工况的影响；

2 外部隧道施工宜根据实际施工工序进行分步开挖模拟，盾构法隧道应考虑掌子面支护压力、盾尾空隙、注浆压力等因素的影响。

3 爆破、振动施工模拟宜采用等效爆破荷载时程法或流固耦合方法模拟炸药爆炸、应力波传播与土体/结构的相互作用，在爆破作业开始前，应在现场进行小药量试爆，将实测的振动数据（波形、速度峰值、频率）与数值模拟的预测结果进行对比。

4.3.2 数值模拟评估方法宜采用荷载—结构模型、地层—结构模型，并根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 进行验算。

4.3.6 采用工程类比方法评估时，应符合以下规定：

1 采用工程类比方法评估时，应考虑地质条件、设计方案、施工措施、工程规模等关键因素的相似性，确保类比工程与被评估工程的高度相似；

2 选取的类比工程，其设计、施工、监测数据应完整且准确、可追溯；

3 当存在不确定性或某些参数不完全相同时，应选择对本工程安全最不利的条件或结果进行分析，留有足够的安全冗余。

4.4 评估报告

4.4.1 安全评估应形成专项评估报告，包括工程概况、工程地质与水文地质、周边环境条件及外部作业、评估依据、评估范围、评估对象现状调查、评估内容和评估方法，并分析对既有结构的影响范围和影响程度，提出结论及对外部作业方案的建议等。

4.4.2 评估报告应考虑实施全过程及永久使用阶段可能诱发既有结构各种风险的影响因素，包括周边卸载或超载、水位变化等，并准确、全面、客观地计算外部作业实施全过程及永久使用阶段的既有结构内力和变形结果。

4.4.3 评估报告应结合现行有关规范、结构现状评估、外部作业预评估计算结果和当地经验，综合制定结构变形控制指标和地下水变化控制指标。

4.4.4 评估报告应对以下内容提出建议：

1 对外部工程专项设计及施工的建议；

2 外部工程施工期间是否应进行监测，以及监测范围、监测对象、监测项目和监测控制值；

3 外部作业应注意防范的安全风险及应对措施。

4.5 专家评审

4.5.1 专家应按照下列技术要点开展评审工作：

- 1 工程及周边环境条件描述是否全面、清晰、真实，外部作业影响等级划分是否合理；
- 2 编制依据是否齐全、有效；
- 3 风险辨识及分级是否全面、准确，风险管控措施是否具有针对性和可操作性；
- 4 评估方法、数值分析模型、参数设置、工况分析是否合理；
- 5 评估报告中的监测要求、范围、安全控制指标等是否合理；
- 6 应急处置措施是否具有针对性和有效性；
- 7 评估结论及建议是否合理。

4.5.2 专家评审会应当形成正式评审报告，对安全评估报告形成“通过”、“修改后通过”或“不通过”的一致评审结论。专家组每人专家均需在评审报告上签字确认，并对评审结论负责。

4.5.3 评审结论为“通过”的，评估机构可参考专家意见自行修改完善。

4.5.4 评审结论为“不通过”的，评估报告须重新编制并组织专家评审，原则上由原评审专家组成专家组实施评审。安全评估报告出现下列情形之一时，评审结论应为不通过。

- 1 工程及周边环境条件描述缺失或与实际严重不符的；
- 2 设计或计算不符合工程建设强制性标准要求的；
- 3 未通过理论分析、数值模拟和工程类比等方法进行评估的；
- 4 评估方法、数值分析模型、参数设置、工况分析设置不合理的；
- 5 评估结论缺失或评估结论错误的；
- 6 外部作业影响城市轨道交通安全的，或计算结果超出控制值的，又不能在评审会现场提出明确具体改进措施的情形；
- 7 其他直接涉及城市轨道交通安全，但未采取专项措施的情形。

4.5.5 评审结论为“修改后通过”的，评估机构应根据评审意见对安全评估报告进行改进和

修正，并依次由评估机构技术负责人审核签字、加盖单位公章，施工单位、监理单位审查签字并加盖单位公章，并由专家组长或至少 3 名原专家组成员签字确认后方可实施。

4.6 评估后工作

4.6.1 外部作业影响等级为特级、一级、二级的，形成专项评估报告后，宜由建设单位组织召开专家评审会，并根据专家意见进行回复及修改，并形成逐条回应落实清单。

5 现状调查

5.1 一般规定

5.1.1 安全评估前应进行现状调查，调查对象包括外部作业、轨道交通结构和周边环境等，形成能够反映结构当前状况、抗变形能力和承载能力的评估依据。

5.1.2 调查方法包括资料收集、检测和监测，根据与外部作业时间关系可分为工前调查、过程调查及工后确认。外部作业在开工前应进行工前调查，在施工过程中对出现的问题应进行过程调查，完工后应进行工后调查确认。

5.1.3 结构现状调查和评估范围应不小于外部作业的影响范围；当无经验时，按附录 A 执行。

表 5.1.3 结构现状调查范围

| 外部作业类别 | 影响等级 | | | | |
|--------|-------|----------|-------|------|----|
| | 特级 | 一级 | 二级 | 三级 | 四级 |
| 基坑工程 | L+6h | L+(4~6)h | L+4h | L+2h | L |
| 隧道工程 | L+6D | L+(4~6)D | L+4D | L+2D | L |
| 管线工程 | L+20m | L+10m | L+6m | L | / |
| 道路工程 | L+30m | L+20m | L+10m | L | / |

注：L 表示外部作业的平面投影影响范围长度，h 表示基坑深度，D 表示隧道外径或宽度，“m”为单位米；其他外部作业，如降水（调查范围宜适当扩大）、桩基（调查范围宜适当缩小）、地基加固等工程，应结合降水影响范围、接近程度、桩径、地质条件、施工工艺、地区工程经验等综合确定其调查范围。

5.2 调查内容

5.2.1 现状调查应收集以下内容：

- 1 外部作业的基本情况；
- 2 结构历史监测资料（含隧道收敛、几何参数等）；
- 3 裂缝、剥落、锈蚀、渗漏等既有结构病害信息；
- 4 周边环境基本情况、监测数据；
- 5 其他可能影响结构安全评估的相关因素。

5.2.2 施工过程中出现以下情况之一时，应进行过程调查工作：

- 1 城市轨道交通既有结构的监测数据达到或超过控制值的 70%；
- 2 城市轨道交通既有结构出现新增病害；
- 3 城市轨道交通既有结构原有病害出现较快发展；

- 4 外部作业本身或其周边环境出现异常；
- 5 外部作业技术方案施工过程中发生重大变更；
- 6 其他事件导致城市轨道交通运营安全状态发生变化。

5.2.3 外部作业完成后，应进行工后调查，确认对结构影响程度和稳定情况。

5.2.4 当存在以下情况时，应扩大调查和评估范围：

- 1 外部作业影响等级为特级的项目；
- 2 既有结构存在较严重的历史结构病害；
- 3 既有结构所处区域具有特殊的工程地质或水文地质条件；
- 4 其他可能对结构安全产生显著影响的情况。

5.2.5 现状调查对象和内容可按表 6.2.6 执行。

表 5.2.5 城市轨道交通既有结构现状调查对象和内容

| 调查对象 | 调查内容 |
|--------------|--|
| 外部作业 | 影响轨道交通的作业内容、振动速度、噪声、挤土、荷载增减、地下水影响等。 |
| 周边环境 | 地质条件或地灾情况、地下水位变化、沉降、变形、荷载变化等。 |
| 地下车站和隧道结构 | 结构位移、变形、相对收敛、变形曲率半径、管片错台量和张开量、裂损、渗漏水、材料劣化、剥落掉块、轨道横向高差、轨向高差、轨间距、道床脱空量等。 |
| 轨道交通附属建（构）筑物 | 建筑物沉降、差异沉降、倾斜、开裂、变形、渗漏水、材料劣化、剥落掉块等。 |
| 高架结构 | 墩台位移、裂缝、腐蚀、剥落等。 |
| 道路工程 | 路面沉降、路面开裂、地下空洞病害、护坡挡墙位移、管网渗漏水等。 |
| 其他 | 位移、变形、裂损等。 |

注：外部作业主要包括基坑工程、暗挖工程、地基基础工程、道路与桥梁工程、地下水作业、爆破振动作业和其他影响轨道交通的作业，相应外部作业保护要求按本规程第 7.2-7.8 条的规定执行。

5.3 资料收集

5.3.1 安全评估前应收集城市轨道交通既有结构、工程地质与水文地质、周边环境条件及外部作业等相关资料，收集内容可按本规程第 5.2.1 条的规定执行。

5.3.2 在进行评估工作前，由外部作业的评估单位/建设单位，发函至东莞市轨道交通有限公司收集准确的轨道既有结构相关资料。

5.4 检测方法

5.4.1 病害检查法：

以采用人工目测观察为主，结合量测设备，检查病害位置、大小和分布等。病害包括露筋、掉块、压溃、错台；管片连接件（螺杆、螺栓等）有无缺失、松脱；道床有无开裂、拱起；排水沟有无开裂等。

5.4.2 应对渗漏水点进行调查，调查内容应包括渗漏水的位置、渗水量大小、浑浊程度等。根据隧道结构渗漏水的渗水量大小，可分为湿迹、渗水、滴漏、涌水；根据渗漏水浑浊程度可分为漏泥沙、冒浆等。

5.4.3 裂缝的检测可采用光学法和声波法检测裂缝宽度和深度，并记录长度和走向。

5.4.4 材料劣化检测可采用回弹法、超声波法、钻芯法、超声回弹综合法等方法检测混凝土强度。

5.4.5 钢筋锈蚀可采用等电位法检测。

5.4.6 地下脱空、空洞等病害可采用地质雷达法检测（探测）。

5.4.7 对影响范围内既有隧道结构宜进行断面测量，可采用全站仪、激光断面仪、激光扫描仪、近景摄影测量等方法，对于盾构隧道宜对每环管片进行测量，对于明挖及暗挖隧道断面测量间距宜不大于 5m。

5.4.8 结构缺损病害调查包含隧道结构有无开裂、露筋、掉块、压溃、错台；管片连接件（螺杆、螺栓等）有无缺失、松脱；道床有无开裂、拱起；排水沟有无开裂，调查内容应包括病害位置、大小和分布等，应对结构缺损状况进行详细记录，做好标识并留存影像数据记录。

5.5 现场监测

5.5.1 城市轨道交通安评单位应对所评估项目明确建议是否需要安全监测，对需要进行安全监测的应给出建议监测的范围、监测频率、监测内容与监测等级，设计单位应依据安评建议进行深化设计，明确监测点布设位置、监测频率、监测范围、监测周期、控制值、预警

值、监测点平面布置图以及典型监测点布设断面图等。

5.5.2 监测实施前监测单位应编制满足要求的第三方监测方案，在召开监测方案评审会议前，应将监测方案提交至东莞市轨道交通有限公司征求意见。

5.5.3 轨道交通设施监测的一般规定、技术要求、实施要求参照《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911、《城市轨道交通既有结构保护监测技术标准》DBJ/T 15-231 及《广东省城市轨道交通既有结构保护技术规范》DBJ/T15-120 等执行。

5.5.4 监测方案应依据设计文件和安评报告进行编制，监测数据应反映施工对城市轨道交通的影响，明确监测的对象、范围、影响等级、项目、布点原则、监测频率、监测设备及安装工艺、安全控制指标、预警等级及成果反馈方式等项目。

5.5.5 城市轨道交通监测根据影响等级划分，应优先用全自动化监测方式进行，监测方案中应对监测数据传输模式、数据存储位置、所用网络形式等进行明确。若相关主管部门已经发布数据对接平台的，则应将监测数据按要求对接至平台。

5.5.6 监测单位应采用高精度三维激光扫描设备对隧道全断面进行初始状态调查，扫描范围需覆盖管片接缝、拱顶等关键部位；调查成果应包括点云模型、椭圆度分析及缺陷标注等，必要时可对调查结果进行公证。

5.5.7 外部作业开展前，监测单位应按照监测方案布置监测点，初始值采集需在涉铁保护区内动工前至少连续测取 3 次稳定值，取其平均值作为初始观测值。外部作业的建设单位、施工单位、监理单位、监测单位及东莞市轨道交通有限公司等对监测初始值进行共同确认。

5.5.8 城市轨道交通既有结构的安全控制值的设置应充分考虑前期已发生的变形量。

5.5.9 城市轨道交通既有结构的安全监测报告应满足以下要求：

1 监测报告应分为次报、日报、周报、月报、警情快报及施工完成且监测数据稳定后提交监测总结报告。

2 监测次报、日报、周报、月报、警情快报及总结报告应评价施工对隧道结构、设施及

运营的影响程度及建议措施。

3 监测单位应在监测数据采集后 24 小时内将监测次报、日报发送给建设单位、东莞市轨道交通有限公司、施工单位，并应定期将监测周报及监测月报报告递交到相关单位。

5.5.10 城市轨道交通结构的监测预警等级，应根据结构监测值的大小和变化趋势，以及其相应的结构安全控制指标值进行划分，具体应参考《城市轨道交通既有结构保护监测技术标准》广东省标准 DBJ/T15-231 及相关评估报告。

5.5.11 如监测数据达到预警值，监测单位应根据监测预警流程及时向建设单位、施工单位、监理单位及东莞市轨道交通有限公司发出预警通知书；当监测结果异常时，应立即通报建设单位及东莞市轨道交通有限公司。

6 数值分析

6.1 一般规定

6.1.1 数值分析流程应包括收集资料、确定评估对象、选择分析类型、确定数值分析方法、建立数值模型、选取材料本构模型及校正参数、设定初始条件和边界条件、设置计算工况、提交计算并验证结果、得出结论及建议等步骤。

6.1.2 一般情况应采用三维模型分析。以下情况可选择二维模型分析：

- 1 地层横向变化较小；
- 2 外部作业为线性工程（如管道敷设）且对轨道结构无交叉影响；
- 3 无横向荷载作用的平面应变问题
- 4 基于有限剖面勘察资料的定性及半定量分析。

6.2 数值分析方法确定

6.2.1 应根据分析目的、结构类型、地质条件、计算资源等要素综合确定分析方法，并符合以下规定：

- 1 土体及整体性较好的岩体稳定性分析，可采用有限元、有限差分等连续介质类方法；
- 2 块状、破裂岩体结构稳定性分析，应采用离散单元法或有限-离散单元法；

5.2.2 特殊地层、特殊工况应符合以下规定：

- 1 软土地层施工模拟应考虑固结效应；
- 2 冻结法施工应采用热-力耦合模型。

6.3 模型建立

6.3.1 模型的建立应根据工程地质勘察信息、重点确定地层分界面、断层破碎带和节理裂隙面等控制性结构面。

6.3.2 模型边界与外部作业面、轨道交通结构的距离应进行边界效应影响分析，模型边界至外部作业边缘的距离 ≥ 3 倍作业深度，且 ≥ 3 倍隧道结构埋深。

6.3.3 模型单元尺寸的确定需综合考虑计算精度、计算效率和模型适应性，单元尺寸一般不超过模型最小特征尺寸的 $1/5 \sim 1/10$ 。模型单元尺寸应按以下方法确定：

- 1 关键区域（断层破碎带、节理面）： $\leq 1/10$ 最小特征尺寸；
- 2 非关键区域： $\leq 1/5$ 最小特征尺寸；
- 3 过渡区域：采用尺寸渐变网格。

6.3.4 对于刚度差异较大的部件，应根据刚度协调原理通过调整材料弹性模量、截面尺寸或增设连接件等方式实现刚度协调。

6.3.5 对存在位移错动的地下结构与岩土体界面处，应设置允许开裂、滑移的接触单元。接触单元宜采用面-面接触类型，摩擦系数可根据实际条件取 0.2-0.5。

6.4 本构模型及参数选择

6.4.1 地层本构模型应根据地质结构特征、材料属性、分析方法和分析目的等选取，并符合下列规定：

- 1 软土层应采用小应变土体硬化模型（HSS 模型）或邓肯-张 E-B 模型；
- 2 花岗岩地层可采用 Mohr-Coulomb 模型或 Drucker-Prager 模型；
- 3 散体介质模拟可采用线性接触模型。

6.4.2 轨道交通结构单元模拟应符合下列规定：

- 1 隧道衬砌可采用壳体单元模拟整体力学行为，纵缝和环缝接头处设置刚度折减系数 η （取值 0.6-0.8）；
- 2 车站主体结构可采用三维实体单元，底板厚度 $\geq 500\text{mm}$ 时需考虑剪切滞后效应；
- 3 盾构始发井、联络通道等复杂部位应建立局部精细化实体模型。

6.4.3 模型参数应根据地质勘察、现场试验、室内试验、反演分析、岩体质量分级标准和工程类比等方法确定。

6.5 初始条件与边界条件设置

6.5.1 初始条件应根据数值模型设定初始地应力、初始位移、初始速度或初始水压等。宜根据观测、监测信息反分析获取当前状态，并作为后续计算的初始条件。

- 1 软土地层侧压力系数 λ 一般取 0.4-0.6，岩层 λ 一般取 0.2-0.4；
- 2 初始位移可采用历史监测数据线性外推法确定；

3 初始水压应按最不利原则取静水压力与超孔压之和，超孔压系数 ξ 一般取 1.1-1.3。

6.5.2 边界条件应根据数值模型选择力边界条件、位移(速度)边界条件、无反射边界或水力边界条件等。

1 力边界条件采用动态荷载时程曲线施加，荷载峰值按实际施工阶段调整；

2 位移(速度)边界条件应根据模型的实际约束情况，在对应位置和方向选择相应方式施加；

3 无反射边界应采用粘弹性人工边界，并设置阻尼系数；

4 水力边界条件包含水压边界条件和流量边界条件，水压边界条件的设置应反映水压边界上的水压力随时间的变化规律。视具体问题，可设为水压力边界(如模拟地下水位涨落)或流量边界(如模拟降雨)。通常可将模型人工截断边界设为流量边界或不透水边界。

6.6 计算工况设置

6.6.1 工况设置是确保仿真结果准确性和可靠性的关键步骤，应按照工程的实际类型及工序设置数值分析工况。

1 基坑工程工况可分为分层开挖、支撑架设、拆撑作业三个步骤；

2 隧道工程可分为盾构掘进和矿山法开挖两种施工类型；

3 特殊施工包括冻结法、暗挖法等类型；

4 极端工况，如暴雨、地震等。

6.6.2 外部基坑工程施工模拟应考虑分层、分步开挖、支撑架设、拆撑、回填等关键工况的影响，并重点考虑加载和卸载工况的影响。

1 分层开挖应采用动态分层厚度计算，软土基坑分层厚度不宜超过 2m、单块分块面积宜控制在 200m^2 以内；

2 首道支撑架设滞后开挖面距离应 $\leq 2\text{m}$ ，支撑轴力监测预警值取设计值的 70%；

3 拆撑前主体结构混凝土强度需达设计值的 80%，且拆撑顺序应遵循"先次后主"原则。

6.6.3 外部隧道施工宜根据实际施工工序进行分步开挖模拟，盾构法隧道应考虑掌子面支护压力、盾尾空隙、注浆压力等因素的影响。

1 掌子面支护压力软土地层按 0.1-0.3MPa 控制，砂层按 0.3-0.5MPa；

2 盾尾空隙同步注浆填充率 $\geq 95\%$ ，空隙厚度控制在 5-15mm；

3 初始注浆压力宜取值 0.5-1.0MPa。

6.6.4 矿山法施工工况应考虑起爆顺序、爆破振动控制、支护强度时间控制、二次衬砌协同机制等因素的影响。

- 1 采用毫秒延期雷管分段起爆，分段数 ≥ 3 段；
- 2 可采用萨道夫斯基公式计算爆破装药量；
- 3 喷射混凝土 24h 支护强度应 $\geq 5\text{MPa}$ ；
- 4 二次衬砌滞后初期支护距离应 $\leq 10\text{m}$ ，厚度 $\geq 30\text{cm}$ 。

6.6.5 在复杂地质条件或存在止水帷幕时优先采用地下水位以下作业对城市轨道交通结构的影响模拟，需建立流固耦合模型并应符合以下规定：

- 1 模型范围 ≥ 3 倍基坑开挖深度；
- 2 利用抽水试验数据反演参数，相对误差 $\leq 15\%$ ；
- 3 模拟工况分类见表 6.6.5。

表 6.6.5 地下水位以下作业模拟工况

| 工况类型 | 模拟要求 |
|----------|--|
| 止水帷幕未失效 | 按设计参数建立模型，验证水位降深是否满足要求 |
| 止水帷幕部分失效 | 渗透系数调整为设计值的 2-5 倍，分析水位降深增加 30%-50%时的结构响应 |
| 止水帷幕完全失效 | 渗透系数与周围土体相同，模拟水位降深 $\geq 50\%$ 时的极端情况 |
| 区域水位下降 | 结合历史数据设定水位下降幅度，分析长期沉降对结构的影响 |

6.7 模型计算与结果验证

6.7.1 模型计算可采用静力计算、动力计算及大变形分析三种类型。

1 静力计算适用于恒载、活载、土压力等准静态荷载分析场景，采用隐式分析方法，收敛准则可设为残余力与外荷载比值 $\leq 1 \times 10^{-4}$ ；

2 动力计算适用于地震、爆破、机械振动等动态荷载分析场景，采用显式分析方法，并需设置阻尼系数；

3 大变形计算适用于崩塌、滑坡等极端工况模拟，可采用离散单元法（DEM）、有限-离散单元法（FDEM）或光滑粒子流体动力学方法（SPH）。

6.7.2 应结合作业现场监测信息，验证位移、应力、应变和破裂等数值计算结果的合理性；当计算结果与监测现状偏差较大时，应对模型网格与构建、本构模型与参数、边界条件、施工工况等进行校核，重新计算。

6.8 外部作业影响预测与安全评估

6.8.1 评估计算应分析评估对象主要受力工况下的受力图(受力计算结果包括应力、弯矩等)、变形图、应力集中部位、最大变形部位和最大变形量等,并对主要受力构件和薄弱位置进行强度及承载力分析和验算,分析和验算内容应满足表 6.8.1 要求。

表 6.8.1 外部作业评估计算分析和验算内容

| 结构类型 | 预测与评估内容 |
|------|--|
| 地下结构 | 1、水平位移和竖向位移计算 2、变形缝处沉降差计算 3、结构内力计算 4、结构配筋验算 5、结构裂缝验算 必要时根据项目情况增加下列内容: 1、椭圆度增量计算 2、最不利椭圆度变形隧道断面结构内力和裂缝计算 3、隧道结构外壁附加荷载计算 4、隧道抗浮稳定性验算 5、结构振动响应计算 6、地下水变化影响计算 7、外部作业主体结构荷载影响计算 |
| 高架桥梁 | 1、桥墩、桩基位移计算 2、相邻桥墩、桩基差异沉降计算 必要时根据项目情况增加下列内容: 1、变形缝差异沉降计算 |
| 地面结构 | 1、桥墩、桩基位移计算 2、相邻桥墩、桩基差异沉降计算 必要时根据项目情况增加下列内容: 1、变形缝差异沉降计算 |

6.8.2 当外部作业施工可能引发地下水变化时,安全评估应计算水位变化和外部作业施工耦合作用对城市轨道交通既有结构的影响,并根据计算结果确定水位变化控制指标。

6.8.3 外部作业为道路工程时,应评估交通荷载作用下路基变形引起的城市轨道交通既有结构附加应力和变形。

6.8.4 外部作业采用冻结法施工时，应评估冻胀和融沉阶段对城市轨道交通既有结构附加应力和变形的影响。

6.8.5 在既有结构上方或侧方采用泡沫轻质混凝土回填时，应按永久使用状态下最大吸水率状态的湿容重计算填土荷载的影响。

7 安全保护要求

7.1 一般规定

7.1.1 在城市轨道交通既有结构周边进行外部作业时，外部作业不得影响城市轨道交通的正常运营，不得影响既有结构的正常使用和其他的特殊功能。

7.1.2 外部作业勘察、设计、施工及安全评估前应收集下述资料：

- 1 城市轨道交通结构相关设计文件；
- 2 周边相邻建筑物及地下管线资料；
- 3 城市轨道交通运营期相关检测资料。

7.2 基坑工程

7.2.1 基坑工程设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 复杂地质条件下（如溶洞、软土、地层差异显著区域）基坑开挖引起的土体变形，包括基坑侧壁位移、坑底隆起、沉降等；
- 2 地下水位变化对周边城市轨道交通结构的影响；
- 3 支护结构选型与刚度，以及土方开挖工艺对轨道交通结构的附加作用；
- 4 施工机械、临时堆土等地面超载，以及永久结构等附加荷载；
- 5 基坑开挖过程中的时空效应；
- 6 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏、老化或结构缺陷等安全风险。

7.2.2 在城市轨道交通保护区域内进行深基坑开挖，应加强对基坑稳定性及变形的监测，防止出现其自身支护结构破坏、土体失稳或变形过大等情况。

7.2.3 在城市轨道交通保护区域内进行基坑（槽）作业时，基坑开挖应遵循“分层、分步、对称、平衡、限时、先撑后挖、随挖随撑”的原则，应减少基坑开挖面上围护结构的无支撑暴露时间及变形，基坑开挖至设计高程，应及时浇筑底板结构。

7.2.4 在城市轨道交通保护区域内进行基坑支护及临时结构拆除作业时，应采用冲击、振动小的作业方案，减小振动对城市轨道交通结构的影响。

7.2.5 在城市轨道交通保护区域内进行基坑（槽）作业时，城市轨道交通与基坑之间涉及有

堆载、大型机械设备等改变地面荷载的活动，应验算此外部活动引起的附加荷载及变形对城市轨道交通结构的影响。

7.3 暗挖工程

7.3.1 暗挖工程设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 暗挖施工可能引起的地层变形以及地下水位变化，包括地表沉降、结构倾斜、渗漏等；
- 2 施工支护结构形式及围岩稳定性；
- 3 施工过程中产生的振动和噪声对既有轨道交通结构及列车运营的影响；
- 4 施工机械、临时堆土等外部荷载对轨道交通结构的附加作用；
- 5 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏、老化或结构缺陷等。

7.3.2 在城市轨道交通保护区域内从事暗挖作业时，应选择开挖影响小的作业方案，当作业影响等级为特级、一级时，应采用安全可靠的作业方案，细化施工控制参数，制定安全保护控制措施。

7.3.3 采用盾构法或顶管法近距离穿越城市轨道交通结构时，应根据工程地质、周边环境情况，采取可靠措施，确保城市轨道交通结构的安全。

7.3.4 在城市轨道交通保护区域内采用暗挖作业时，应制定完善的监测方案，宜扩大监测范围，提高监测频率。

7.4 地基基础工程

7.4.1 地基基础工程设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 地基基础工程的设计应分析施工阶段及正常使用阶段附加应力及变形对城市轨道交通既有结构的不利影响；
- 2 桩基作业或地基加固处理过程中的施工工艺和施工参数等；
- 3 施工过程中可能引起的地层变形以及地下水位变化；
- 4 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏、老化或结构缺陷等。

7.4.2 浅基础设计时，宜布置在轨道交通严格保护区范围外；当必须位于严格保护区内时，

应根据轨道交通结构所承受的荷载和附加应力，进行内力和变形验算。

7.4.3 桩基础设计应分析施工阶段、正常使用阶段承台侧面及底部附加应力、桩侧摩阻力和桩端阻力等引起的城市轨道交通既有结构受力状态变化。

7.4.4 在城市轨道交通保护区域内进行桩基作业时，对于挤土桩和部分挤土桩施工，应采取有效措施减小挤土效应对轨道交通的影响，可采取用预钻孔、设置防挤沟或隔离墙等措施；当桩基施工和城市轨道交通结构接近程度为非常接近时，不得采用挤土效应大或振动大的作业方案，接近程度按附录 A.0.1 划分。

7.5 道路与桥梁工程

7.5.1 道路与桥梁工程设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 道路施工期间可能引起的地面堆载或机械荷载对地下轨道交通结构造成的附加荷载和变形；
- 2 桥梁桩基施工及深基础开挖对周边地层稳定性和地下隧道、车站结构的影响；
- 3 桥梁构件吊装、跨线施工过程中的高空坠物、冲击荷载对轨道交通线路结构及运营安全的影响；
- 4 路面及桥梁长期运营阶段产生的周期性活荷载对轨道交通结构的疲劳效应；
- 5 开挖施工引起的地下水位扰动、渗流影响等；
- 6 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏、老化或结构缺陷等。

7.5.2 道路工程跨越或穿越城市轨道交通既有结构时，宜采用正交方式；道路工程下穿城市轨道交通高架结构时，应根据桥下净空条件选择施工车辆及机械设备，并应设置限高限宽等设施及警示标志。

7.5.3 桥梁工程穿越城市轨道交通高架结构时，宜采用下穿方式；桥梁工程上跨城市轨道交通地面或高架结构时，应满足城市轨道交通行车限界要求，竖向净空应结合桥梁沉降量及竖向挠度进行设置。

7.5.5 道路及桥梁施工过程中产生的振动可能影响轨道交通结构的安全时，应采取减振措施，

并对轨道交通结构进行振动监测，振动控制指标应满足相关规定。

7.6 地下水作业

7.6.1 地下水作业设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 地下水作业可能引发流砂、管涌等渗流问题对轨道交通结构的稳定性的影响；
- 2 地下水控制技术对轨道交通结构的影响；
- 3 地下水位变化导致的不均匀变形引起轨道交通结构的附加应力及变形；
- 4 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏、老化或结构缺陷等。

7.6.2 在城市轨道交通保护区域内从事地下水作业，应采取措施避免既有结构周边地层发生流沙、管涌和渗流破坏。

7.6.3 地下水作业前，应预测水位变化对城市轨道交通结构的变形和沉降影响。城市轨道交通既有结构周边存在深厚砂层、软土、岩溶及土洞等特殊性地层时，应严格控制地下水位的下降幅度及变化速率。

7.6.4 地下水控制工程的作业空间宜形成封闭的截水系统。对于强透水地层的地下水位作业，当不能形成封闭截水系统时，须评估地下水作业对城市轨道交通结构的安全影响。

7.6.5 在强透水性的地层进行地下水作业，当采用落底式竖向截水帷幕难以形成有效的封闭截水系统时，可采用悬挂式竖向截水帷幕与水平封底隔渗相结合的地下水控制措施。

7.6.6 当城市轨道交通结构下方地层存在承压水时，应优先采用隔断承压含水层方案；若难以隔断承压含水层，应增加绕流路径减小既有结构处的承压水头损失。

7.6.7 基坑开挖过程中应按需降水；并应验算开挖土方过程中基坑突涌稳定性和地下结构的抗浮安全系数，必要时可采用钻孔降水减压措施或水平封底隔渗措施。

7.7 爆破与振动作业

7.7.1 爆破工程设计、监测评估、施工应考虑下列因素对城市轨道交通结构的不利影响：

- 1 爆破产生的振动波对轨道结构的影响，包括隧道衬砌、桥梁支座、车站结构等的应力

响应；

- 2 爆破产生的飞石、冲击波对轨道设备和供电系统的影响；
- 3 爆破可能导致的地层扰动，如地表沉降、地下水位变化等；
- 4 爆破作业对列车运营时行驶安全的影响，包括列车震动、信号干扰等；
- 5 既有城市轨道交通结构现状，包括裂缝、渗漏水、支撑体系等。

7.7.2 爆破作业前应进行爆破安全评估和爆破设计审查，应对受保护城市轨道交通结构进行安全评估。

7.7.3 爆破（振动）作业前应进行试爆作业和爆破震动监测，且应根据试爆效果及监测信息优化爆破作业。

7.7.4 经爆破评估或试爆作业发现爆破有害效应超过安全允许振速时，应优化爆破技术措施，将爆破有害效应控制在安全允许振速以内；对采取优化爆破措施后，爆破有害效应仍不能满足城市轨道交通结构的安全允许振速要求时，应采用静态破碎法或其他作业方法。

7.7.5 爆破作业时，应监测城市轨道交通结构的振动速度。爆破作业传到城市轨道交通结构的振速，不应超过城市轨道交通结构的安全允许振速。

7.8 其他作业

7.8.1 在城市轨道交通保护区域内进行管道、箱涵施工，应采用耐久性高、整体性强的材质和可靠的连接形式。

7.8.2 塔式起重机等外部高空作业吊重时，严禁经过城市轨道交通轨行区地面结构和高架结构的正上方，并应保持安全距离并满足倒杆安全距离要求。

7.8.3 因工程特殊性，航道浮标的设置、移动、撤销和养护等活动不进行管控及安全评估。

7.8.4 在城市轨道交通地下结构安全保护区内进行加载或卸载作业时，应验算对结构的安全影响，并应满足相应的结构安全控制指标值。

7.8.5 改扩建工程中改变既有城市轨道交通主体结构构件时，应进行现状鉴定和安全评估，必要时对既有结构进行加固处理。

7.8.6 城市轨道交通结构安全保护区内既有房屋改造、加固施工时应采取安全可靠的作业方案；改造过程中应采取可靠措施保证既有结构的安全与运营安全。

7.8.7 外部作业邻近城市轨道交通地面或高架结构时，机械设备站位及作业范围应与既有结构满足倒杆安全距离要求，并采取防倾覆措施。

7.8.8 架空电力线路上跨城市轨道交通地面及高架结构时，跨越架体与城市轨道交通既有结构边线投影的要满足倒杆安全距离要求。

附录 A 基坑、暗挖工程的外部作业影响等级判定

A.0.1 接近程度应根据城市轨道交通既有结构的类型及其与外部作业的空间关系确定，接近程度的判定宜按表 A.0.2 和图 A.0.2-1~图 A.0.2-3 确定。

表 A.0.1 接近程度的判定

| 城市轨道交通既有结构类型 | 相对净距 | 接近程度 |
|--------------|----------------------|---------|
| 明挖、盖挖法 | $L \leq 0.5H$ | 非常接近（Ⅰ） |
| | $0.5H < L \leq 1.0H$ | 接近（Ⅱ） |
| | $1.0H < L \leq 2.0H$ | 较接近（Ⅲ） |
| | $L > 2.0H$ | 不接近（Ⅳ） |
| 矿山法 | $L \leq 1.0W$ | 非常接近（Ⅰ） |
| | $1.0W < L \leq 1.5W$ | 接近（Ⅱ） |
| | $1.5W < L \leq 2.5W$ | 较接近（Ⅲ） |
| | $L > 2.5W$ | 不接近（Ⅳ） |
| 盾构法、顶管法 | $L \leq 1.0D$ | 非常接近（Ⅰ） |
| | $1.0 < L \leq 2.0D$ | 接近（Ⅱ） |
| | $2.0 < L \leq 3.0D$ | 较接近（Ⅲ） |
| | $L > 3.0D$ | 不接近（Ⅳ） |

注：1 L 为城市轨道交通既有结构与外部作业的最小相对净距；H 为明挖、盖挖法的基坑开挖深度；W 为矿山法的隧道毛洞跨度；D 为盾构法的隧道外径，圆形顶管的外径或矩形顶管隧道的长边宽度。

2 相对净距指外部作业的结构外边线与城市轨道交通既有结构外边线间的最小净距离。

3 城市轨道交通非轨行区结构可按相关经验进行适当调整。

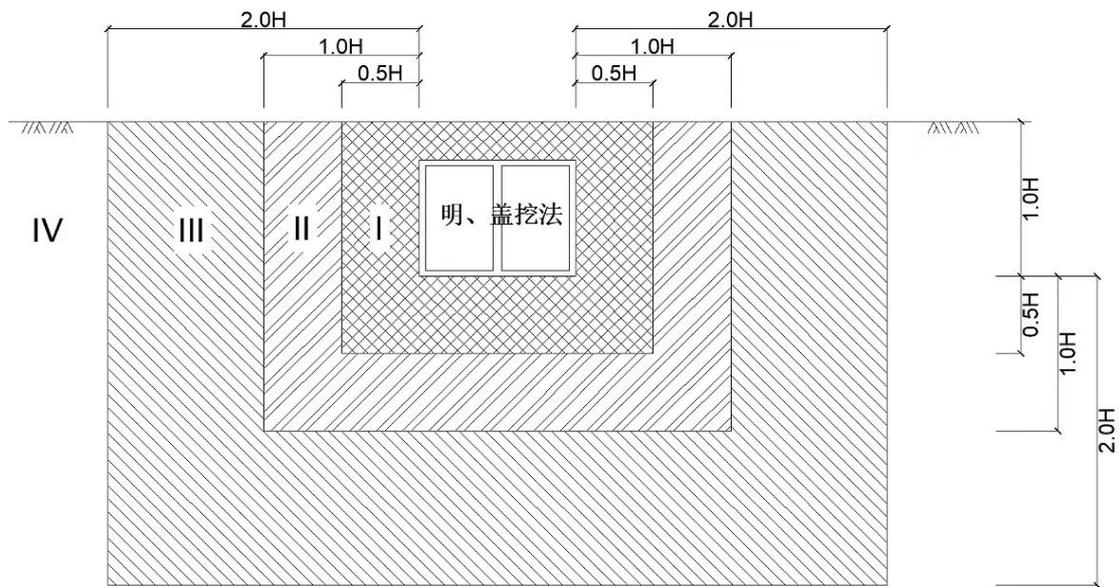


图 A.0.1-1 明、盖挖法既有结构的接近程度判定

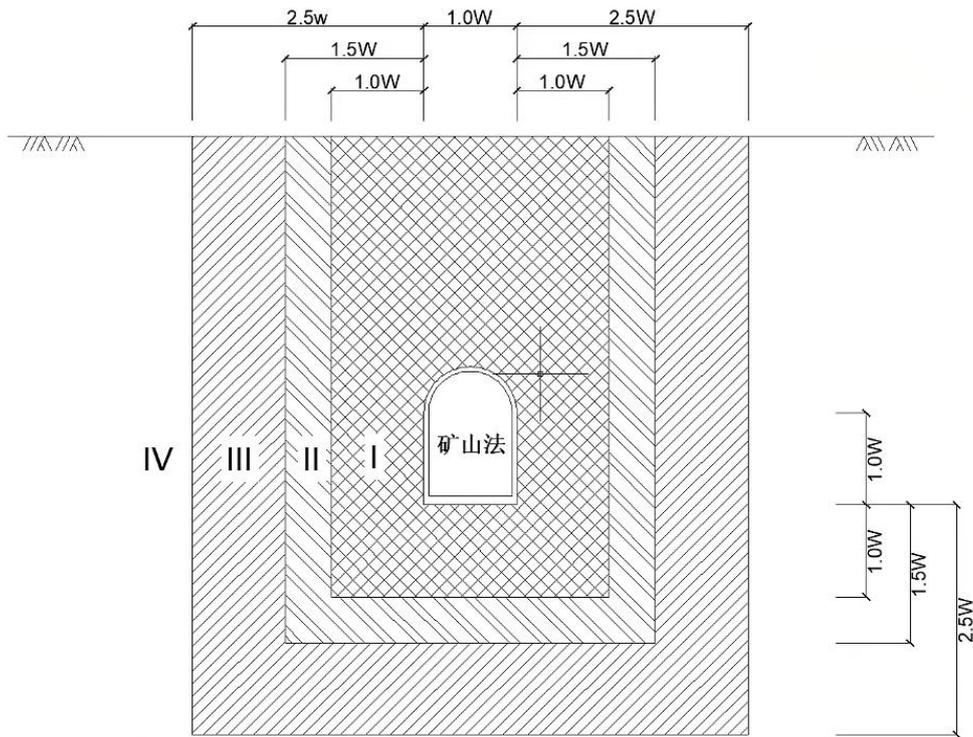


图 A.0.1-2 矿山法既有结构的接近程度判定

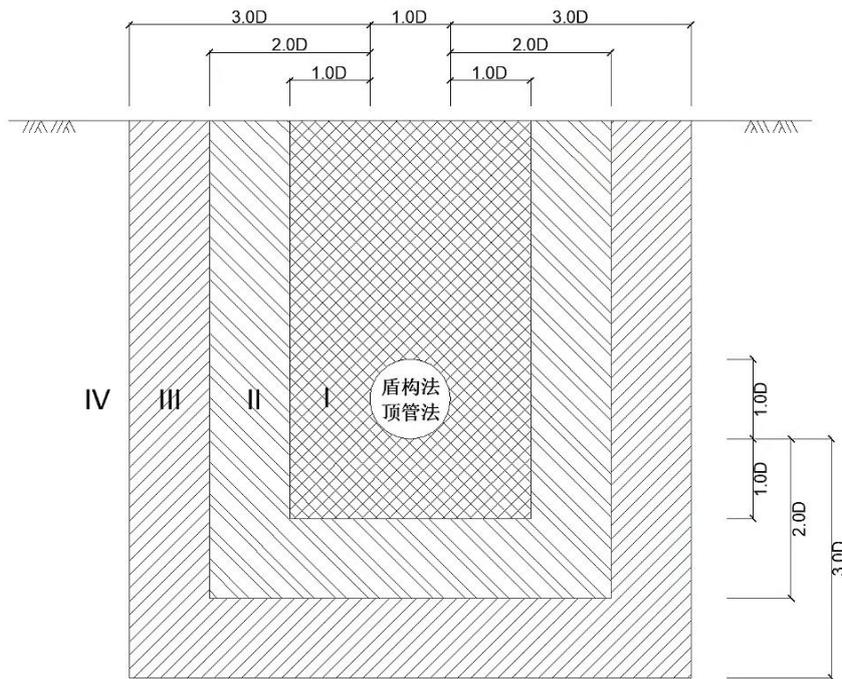


图 A.0.1-3 盾构法或顶管法既有结构的接近程度判定

A.0.2 外部作业的工程影响分区宜根据外部作业的施工方法确定。

1 明挖、盖挖法外部作业的工程影响分区

表 A.0.2-1 明挖、盖挖法外部作业的工程影响分区

| 工程影响分区 | 区域范围 |
|-----------|---------------------------|
| 强烈影响区 (A) | 既有结构正上方及外侧 $0.7h_1$ 范围内 |
| 显著影响区 (B) | 结构外侧 $0.7 \sim 1.0h_1$ 范围 |

| 工程影响分区 | 区域范围 |
|-----------|---------------------------|
| 一般影响区 (C) | 结构外侧 $1.0 \sim 2.0h_1$ 范围 |
| 较小影响区 (D) | 结构外侧 $2.0h_1$ 范围以外 |

注： $1 h_1$ 为明挖、盖挖法外部作业结构底板的深度；

2 当外部作业需施工锚杆、锚索、土钉时，作业边界以锚杆、锚索、土钉末端的水平投影位置为准。

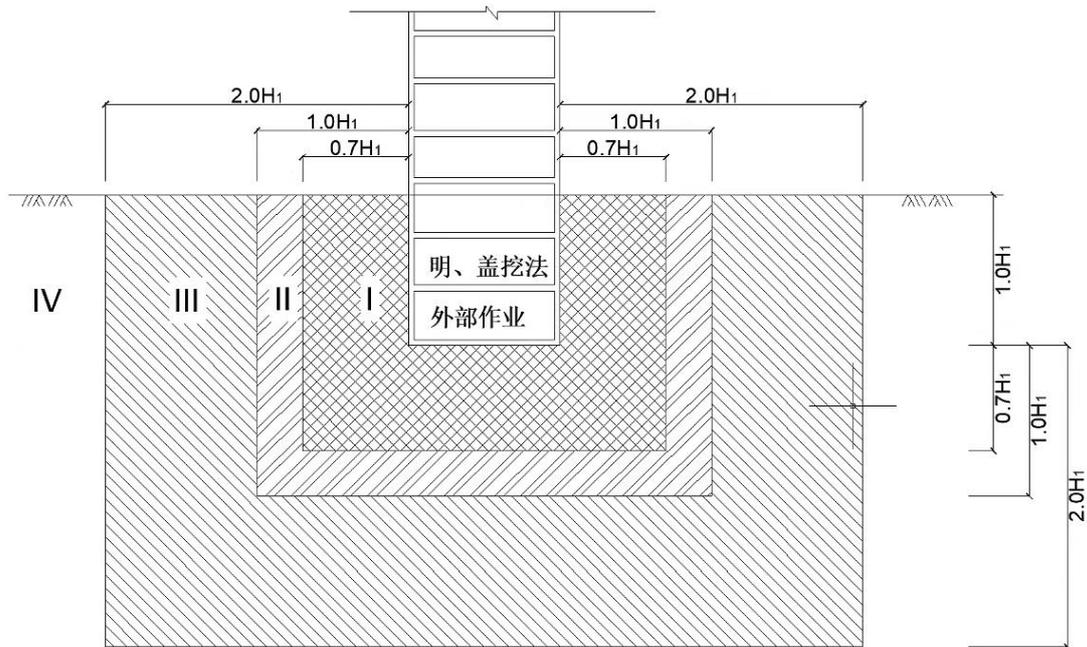


图 A.0.2-1 明挖、盖挖法外部作业的工程影响分区

3 浅埋矿山法和盾构法外部作业的工程影响分区宜按表 A0.2-2 和图 A.0.2-2 确定。

表 A.0.2-2 浅埋矿山法和盾构法外部作业的工程影响分区

| 工程影响分区 | 区域范围 |
|-----------|---------------------------|
| 强烈影响区 (A) | 既有结构正上方及外侧 $0.7h_2$ 范围内 |
| 显著影响区 (B) | 结构外侧 $0.7 \sim 1.0h_2$ 范围 |
| 一般影响区 (C) | 结构外侧 $1.0 \sim 2.0h_2$ 范围 |
| 较小影响区 (D) | 结构外侧 $2.0h_2$ 范围以外 |

注： $1 h_2$ 为矿山法和盾构法外部作业的隧道底板深度。

2 当外部作业需施工锚杆、锚索、土钉时，作业边界以锚杆、锚索、土钉末端的水平投影位置为准。

3 本表适用于矿山法和盾构法外部作业的浅埋隧道，隧道顶埋深小于 $3b$ (b 为隧道毛洞跨度)。

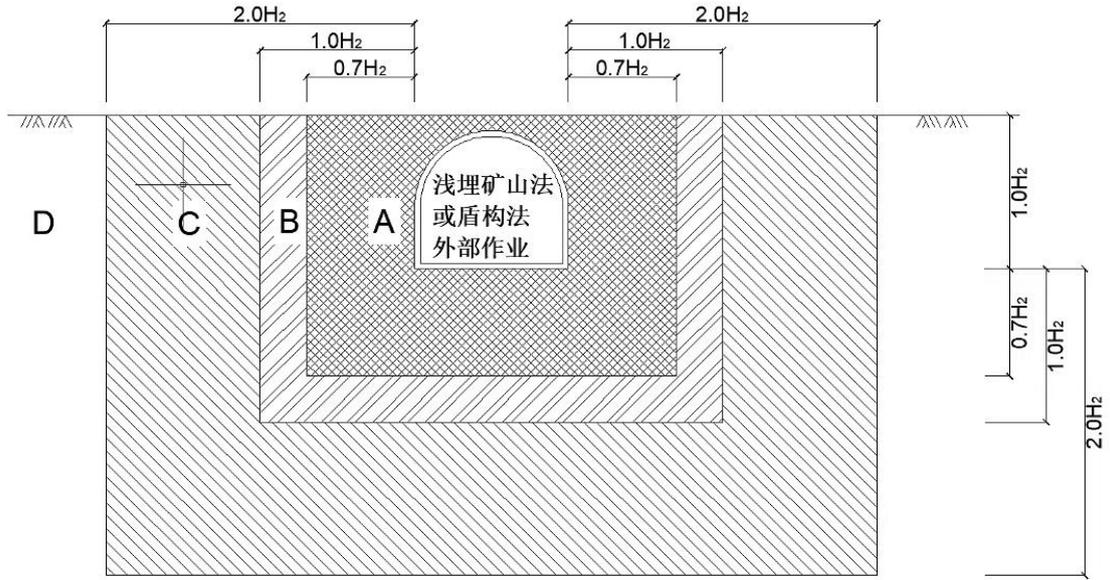


图 A.0.2-2 浅埋矿山法和盾构法外部作业的工程影响分区

4 深埋矿山法和盾构法外部作业工程影响分区按表 C.0.2-3 和图 C.0.2-3 确定。

表 A.0.2-3 深埋矿山法和盾构法外部作业的工程影响分区

| 工程影响分区 | 区域范围 |
|-----------|---------------------|
| 强烈影响区 (A) | 既有结构正上方及外侧 0.7b 范围内 |
| 显著影响区 (B) | 结构外侧 0.7 ~ 1.0b 范围 |
| 一般影响区 (C) | 结构外侧 1.0 ~ 2.0b 范围 |
| 较小影响区 (D) | 结构外侧 2.0b 范围以外 |

注：1 b 为矿山法和盾构法隧道的毛洞跨度。

2 当外部作业需施工锚杆、锚索、土钉时，作业边界以锚杆、锚索、土钉末端的水平投影位置为准。

3 本表适用于矿山法和盾构法隧道顶埋深大于 3b (b 为隧道毛洞跨度) 的深埋隧道。

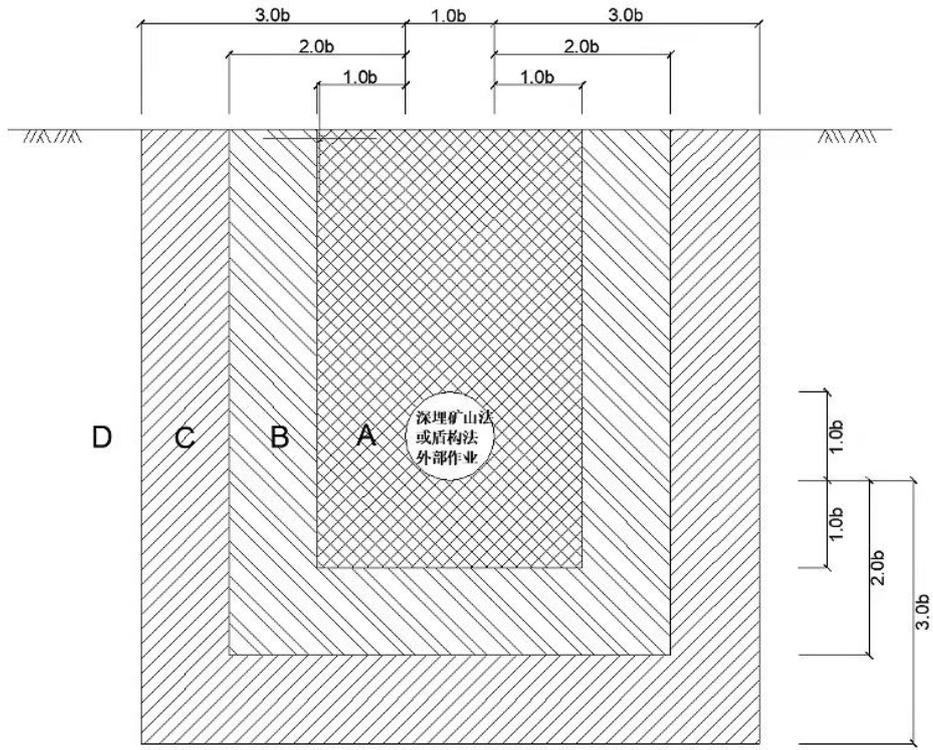


图 A.0.2-3 深埋矿山法和盾构法外部作业的工程

附录 B 堆载、浅基础、桩基础的外部作业影响等级判定

B.0.1 外部作业为堆载、浅基础、桩基础等工程时，应按照以下要求确定外部作业工程影响分区，并按照 B.0.1-1~表 B.0.1-2 要求确定外部作业影响等级：

1 外部作业为堆载、施工荷载等超载时，其工程影响分区按表 B.0.1-1 确定；

表 B.0.1-1 外部堆载作业影响区

| 结构类型 | 工程影响分区 | 相对净距 | 备注 |
|------|-----------|-------------------------|---------------|
| 堆载 | 强烈影响区 (A) | $L_{sd} < H_3$ | 见图 B.0.1-1 |
| | 显著影响区 (B) | $H_3 < L_{sd} \leq H_2$ | |
| | 一般影响区 (C) | $H_2 < L_{sd} \leq H_1$ | |
| | 较小影响区 (D) | $L_{sd} > H_1$ | |

注：1 H1、H2、H3 按下式计算（当 H1、H2、H3 小于 0 时，取 0），其中：Q 为标准组合下，外部作业对应的超载(kN)，分别为超载作用范围的长、宽 (m)， ϕ 为地基压力扩散角，按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB5007) 确定。

$$H_1 = \frac{-(l+b) + \sqrt{(l+b)^2 - 4 \times (l+b - Q/10)}}{4 \times \tan\phi}$$

$$H_2 = \frac{-(l+b) + \sqrt{(l+b)^2 - 4 \times (l+b - Q/15)}}{4 \times \tan\phi}$$

$$H_3 = \frac{-(l+b) + \sqrt{(l+b)^2 - 4 \times (l+b - Q/20)}}{4 \times \tan\phi}$$

2 L_{sd} 为堆载与既有地下结构的水平净距 (m)。

3 堆载水平侧压力对桥桩影响的情况，需另行研究确定。

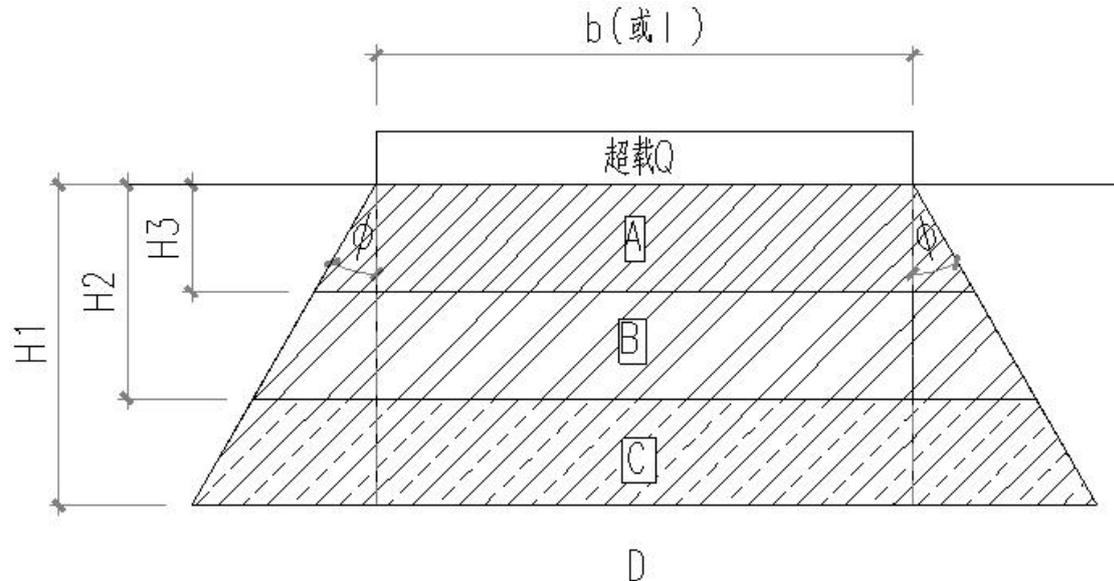


图 B.0.1-1 外部浅基础作业影响分区

2 外部作业为浅基础时，应以基础底面作为基准面，按本条第 1 款的要求确定工程影响分区，并按基坑工程相关要求确定开挖作业的影响分区。

3 外部作业为桩基础时，其工程影响分区按表 B.0.1-2 确定。

表 B.0.1-2 外部桩基础作业影响分区

| 结构类型 | 工程影响分区 | 相对净距 | 备注 |
|-------|-----------|-------------------|---------------|
| 非挤土类桩 | 强烈影响区 (A) | 桩基周边 3.0D 范围内 | 见图 B.0.1-2 |
| | 显著影响区 (B) | 桩基周边 3.0~5.0D 范围内 | |
| | 一般影响区 (C) | 桩基周边 5.0~7.0D 范围内 | |
| | 较小影响区 (D) | 桩基周边 7.0D 范围外 | |

注：1、D—桩基的直径；

2、对挤土类桩，应根据工程实际情况另行分析确定。

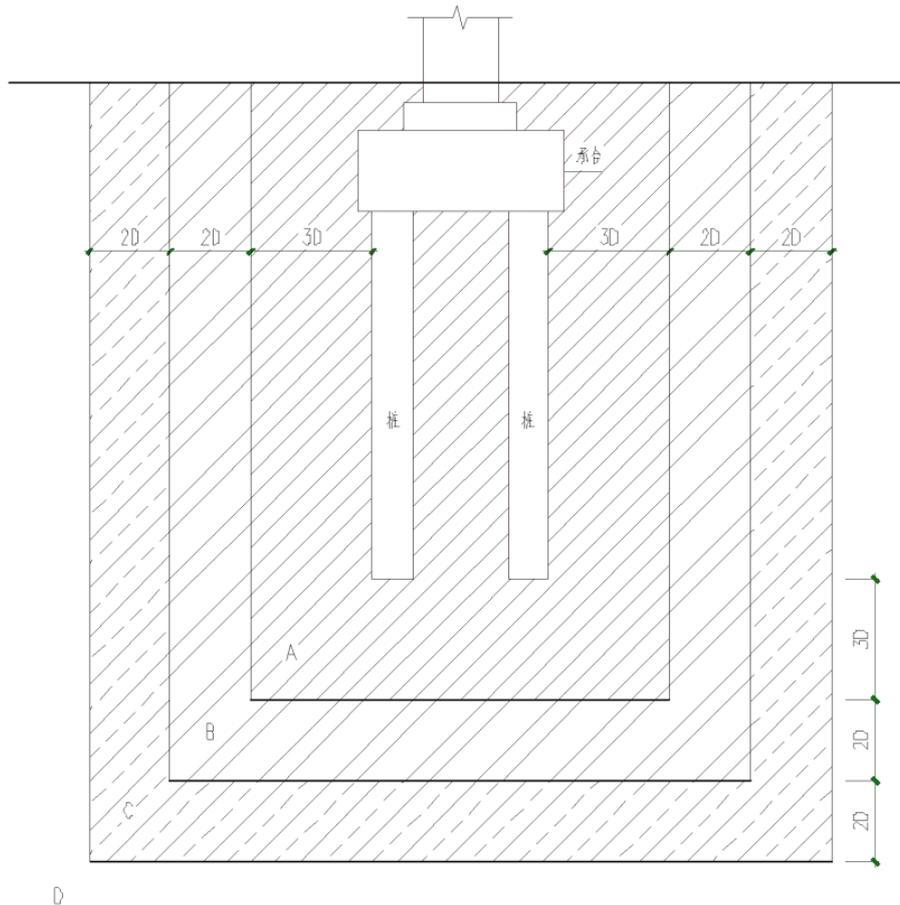


图 B.0.1-2 外部桩基础作业影响分区

附录 C 既有结构为路基或高架时接近程度和外部作业的工程影响分区

C.0.1 当城市轨道交通既有结构为路基或高架结构时，接近程度应根据结构的类型及其与外部作业的空间位置关系确定，接近程度的判定标准宜按照表 D.0.1 和图 D.0.1-1~D.0.1-3 确定。

表 C.0.1 路基或高架结构接近程度的判断标准

| 结构类型 | 相对净距 | 接近程度 | 备注 |
|--------------------|--|-------------|------------|
| 端承桩 | 桩基周边 3D 范围内 | 非常接近 (I) | 见图 C.0.1-1 |
| | 桩基周边 3~6D 范围内 | 接近 (II) | |
| | 桩基周边 6~9D 范围内 | 较接近 (III) | |
| | 桩基周边 9D 范围内外 | 不接近 (IV) | |
| 摩擦桩 (含端承摩擦桩、摩擦端承桩) | 桩基周边 4D 范围内 | 非常接近 (I) | 见图 C.0.1-2 |
| | 桩基周边 4~8D 范围内 | 接近 (II) | |
| | 桩基周边 8~12D 范围内 | 较接近 (III) | |
| | 桩基周边 12D 范围内外 | 不接近 (IV) | |
| 扩大基础 | 基础周边 1.5B 及下方 H 深度范围内 | 非常接近 (I) | 见图 C.0.1-3 |
| | 基础周边 1.5B~3.0B 及下方 H~H+1.5B 深度范围内 | 接近 (II) | |
| | 基础周边 3.0B~4.5B 及下方 H+1.5B~H+3.0B 深度范围内 | 较接近 (III) | |
| | 基础周边 4.5B 及下方 H+3.0B 深度范围外 | 不接近 (IV) | |

注：1. D 为城市轨道交通高架桩基直径；B 为独立基础底面短边的长度，或条形基础底面的宽度；H 为扩大基础主要受力层深度，独立基础时取 1.5B，条形基础时取 3B，且均不小于 5m。

2. 表中不含下穿外部作业，下穿时应进行专项结构影响分析。

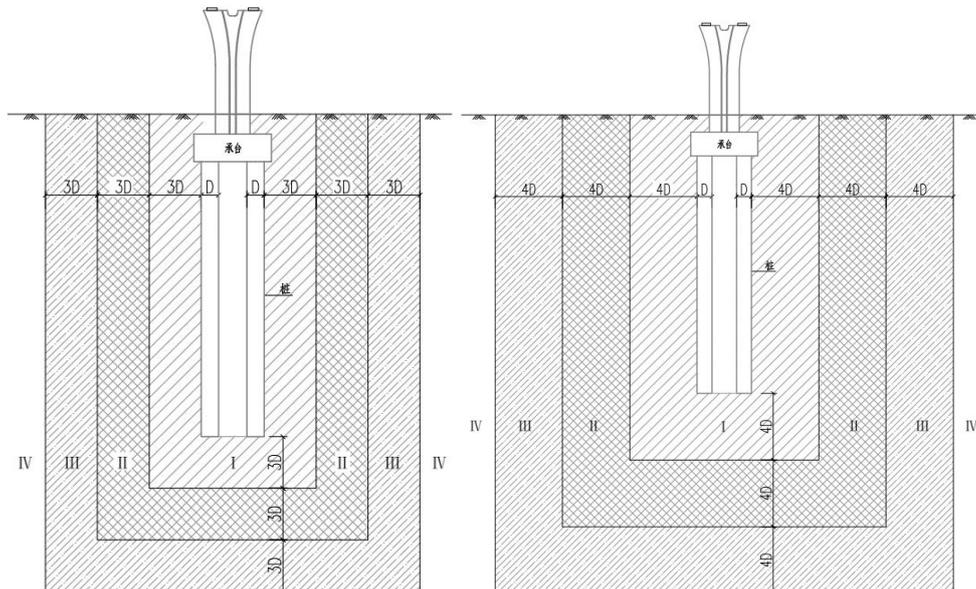


图 C.0.1-1 端承桩

图 C.0.1-2 摩擦桩

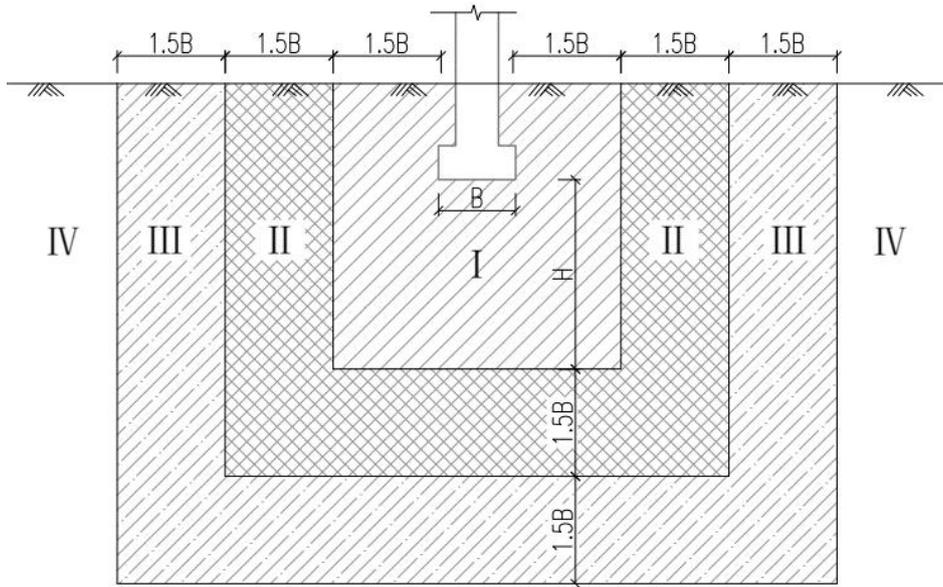


图 C.0.1-3 摩擦桩

附录 D 安全评估报告格式

D.1 报告格式说明

D.1.1 安全评估报告宜包括以下内容：

- 1 封面；
- 2 资质证书；
- 3 著录页；
- 4 目录；
- 5 正文；
- 6 结论；
- 7 建议。

D.1.2 封面宜包括以下内容：

- 1 评估项目名称；
- 2 标题，统一为“安全评估报告”；
- 3 承担单位名称；
- 4 评估报告完成时间。

D.1.3 著录页宜包括以下内容：

- 1 评估项目名称；
- 2 标题，统一为“安全评估报告”；
- 3 承担单位单位负责人、技术负责人、项目负责人及主要参加人员姓名；
- 4 承担单位名称及公章或技术成果章；
- 5 评估报告完成时间。

D.1.4 正文宜包括以下内容：

- 1 评估目的及依据；
- 2 项目概况；
- 3 场地工程地质与水文地质条件；
- 4 既有结构现状调查和评估；
- 5 外部作业影响等级和安全保护等级；
- 6 同类工程类比分析；
- 7 评估模型及参数；

8 评估计算与分析；

9 评估结论；（有个明确的结论，是否满足相关的标准规范或者设计要求）

10 安全保护要求与建议。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，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：

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：

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：

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，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准、规范执行的，写法为“应按……执行”或“应符合……的规定”。

引用标准名录

- 1 CJJ/T202 城市轨道交通结构安全保护技术规范
- 2 DBJ/T15-120 城市轨道交通既有结构保护技术规范
- 3 DBJ/T 15-231 城市轨道交通既有结构保护监测技术标准
- 4 DBJ/T15-31-01 城市轨道交通既有结构保护监测技术标准
- 5 GB 50911 城市轨道交通工程监测技术规范
- 6 GB 50010 混凝土结构设计规范
- 7 GB 50652 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范
- 8 GB 5007 建筑地基基础设计规范
- 9 GB 6722 爆破安全规程

东莞市地方标准

城市轨道交通既有结构安全评估技术 规程

Technical code for safety assessment of existing urban rail transit structures

DB 4419 ××—××

条文说明

制订说明

《城市轨道交通既有结构安全评估技术规程》(DB 4419 ××—××), 经东莞市市场监督管理局于 XXX 年 XXX 月 XXX 日以 XXX 公告批准发布。

本规程制订过程中, 编制组进行了外部作业对城市轨道交通保护区既有结构影响安全评估技术的调查研究, 总结了东莞市及其他地区的轨道交通安全评估实践经验。针对安全评估中常见的数值模型或工况设置与实际不符、参数取值不当、计算结果与实际监测数据背离等问题, 结合东莞市实际情况, 完善和细化现行规范性文件中关于外部作业影响城市轨道交通保护区既有结构安全评估的技术规定。通过研究分析取得了安全评估技术标准、参数等。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定, 编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明。但是, 本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目次

| | |
|-----------------------|-----|
| 前 言 | III |
| 1 总则 | 1 |
| 2 术语和定义 | 2 |
| 3 基本规定 | 4 |
| 3.1 一般规定 | 4 |
| 3.2 保护区划分 | 4 |
| 3.3 外部作业影响等级 | 5 |
| 3.4 安全评估适用情况 | 6 |
| 3.5 安全评估机构及人员要求 | 6 |
| 4 安全评估程序及方法 | 8 |
| 4.1 一般规定 | 8 |
| 4.2 评估流程 | 8 |
| 4.3 评估方法 | 9 |
| 4.4 评估报告 | 10 |
| 4.5 专家评审 | 11 |
| 4.6 评估后工作 | 12 |
| 5 现状调查 | 13 |
| 5.1 一般规定 | 13 |
| 5.2 调查内容 | 13 |
| 5.3 资料收集 | 14 |
| 5.4 检测方法 | 15 |
| 5.5 现场监测 | 15 |
| 6 数值分析 | 18 |
| 6.1 一般规定 | 18 |
| 6.2 数值分析方法确定 | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3 模型建立 | 18 |
| 6.4 本构模型及参数选择 | 19 |
| 6.5 初始条件与边界条件设置 | 19 |
| 6.6 计算工况设置 | 20 |
| 6.7 模型计算与结果验证 | 21 |
| 6.8 外部作业影响预测与安全评估 | 22 |
| 7 安全保护要求 | 24 |
| 7.1 一般规定 | 24 |
| 7.2 基坑工程 | 24 |
| 7.3 暗挖工程 | 25 |
| 7.4 地基基础工程 | 25 |
| 7.5 道路与桥梁工程 | 26 |
| 7.6 地下水作业 | 27 |
| 7.7 爆破与振动作业 | 27 |
| 7.8 其他作业 | 28 |
| 附录 A 基坑、暗挖工程的外部作业影响等级判定 | 30 |
| 附录 B 堆载、浅基础、桩基础的外部作业影响等级判定 | 35 |
| 附录 C 既有结构为路基或高架时接近程度和外部作业的工程影响分区 | 37 |
| 附录 D 安全评估报告格式 | 39 |

1 总则

1.0.1 随着城市快速发展，外部作业（如基坑施工、管线敷设、道路开挖等）邻近或穿越轨道交通保护区的情况日益增多。若缺乏统一的技术标准和管理要求，可能导致评估流程混乱、结论参差不齐，甚至威胁轨道交通运营安全。因此，需通过本规程规范评估内容、方法及程序，确保其科学性和权威性。

1.0.2 本规程适用于东莞市行政区域内城市轨道交通保护区范围内各类外部作业的安全评估工作，涵盖评估报告的编制、专家论证及工程实施全过程，适用范围主要为在建和运营的城市轨道交通结构，不包含规划线路。条文明确界定的外部作业类型包括基坑工程、隧道工程、基础工程、道路与桥梁工程、地下水工程、爆破与振动工程等直接影响轨道交通结构安全的建设活动，同时涵盖其他可能通过土体扰动、荷载变化或振动效应危及轨道交通设施安全的作业类型。该规定旨在通过系统化评估管控各类外部作业风险，确保城市轨道交通运营安全，并与国家现行标准共同构成完整的技术管控体系。

1.0.3 本条规定了城市轨道交通保护区外部作业安全评估工作的合规性要求，强调在依据本规程开展评估的同时，必须同时遵守国家现行相关标准，确保评估工作的全面性、科学性和合法性。

2 术语和定义

本章给出了本规程有关章节引用的 15 条术语，主要参考了《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》GB 50652、《城市轨道交通结构安全保护技术规范》CJJ/T 202 及相关国际标准和资料，并给出了相应的推荐性英文术语以供参考。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 在城市轨道交通安全评估管理中，应全面考虑管控区范围内各项外部作业的影响，避免遗漏，并采取相应的防护措施。

3.1.2 外部作业安全评估须对城市轨道交通既有结构（如隧道、桥梁、轨道等）及运营安全的影响作出明确结论，包括影响性质、程度及控制要求；若评估认为需实施监测，则应具体规定监测范围（空间界限）、监测对象（结构部位）、监测周期（起止时间与频率）、监测项目（沉降、位移、振动等）及控制值（预警与报警阈值），以确保监测数据可有效指导施工风险管控，并符合《城市轨道交通工程监测技术规范》（GB 50911）等技术标准的要求。

3.2 保护区划分

3.2.1 ~ 3.2.3 城市轨道交通保护区划分范围主要参考了《东莞市城市轨道交通运营管理办法》，管控区分级旨在根据线路不同阶段（建设、运营）及空间位置差异，实施差异化保护要求，具体范围以线路或结构外边线为基准。

3.2.4 为确保轨道交通设施的安全稳定，应根据实际情况评估潜在影响，必要时适当扩大保护区划分范围，并采取专项防护措施。具体调整范围应结合地质勘察报告、工程影响分析及专家论证结果确定，以满足安全管控要求。根据《东莞市城市轨道交通运营管理办法》，需调整城市轨道交通控制保护区范围的，由建设单位提出，经城市轨道交通运营主管部门以及市自然资源等相关部门共同审核后，报市人民政府确定。

3.3 外部作业影响等级

3.3.1、3.3.2 为确保城市轨道交通控制保护区内外部作业的安全实施，应结合外部作业工程影响

分区和接近程度确定外部作业影响等级，根据第 3.4 章节内容判断是否需要进行外部作业对城市轨道交通保护区影响安全评估，外部作业工程影响分区和接近程度应遵照现行行业标准《城市轨道交通结构安全保护技术规范》CJJ/T 202 和广东省标准《城市轨道交通既有结构保护技术规范》DBJ/T 15-120 执行。城市轨道交通安全评估工作应充分调查与考虑外部作业与在建或运营中的城市轨道交通的相互关系，并采取不同的安全保护措施。

3.4 安全评估适用情况

3.4.3 隧道结构的工后评估是城市轨道交通保护工作的重要环节，应在外部作业全部完成且监测数据表明结构变形趋于稳定后进行。评估工作应重点关注作业影响范围内的隧道结构状态变化，特别是对施工期间出现变形异常或监测数据超预警值的区段，需开展专项病害评估，包括但不限于结构裂缝发展、接缝错位、渗漏水变化等指标。评估内容宜结合施工前初始状态调查数据、施工期监测数据及结构健康档案进行对比分析，综合判定外部作业对隧道结构的实际影响程度，并为后续运营维护提供技术依据。对于评估发现的结构损伤，应制定针对性的修复或加固方案。

3.5 安全评估机构及人员要求

3.5.1、3.5.2 对城市轨道交通安全评估工作的实施主体和人员作出明确规定。安全评估工作必须由建设单位委托具有相应专业资质的独立第三方机构承担，确保评估工作的客观性和专业性。评估机构的主要技术负责人及核心评估人员应具备丰富的城市轨道交通工程安全评估经验，熟悉轨道交通结构特点、保护要求及相关技术标准，能够准确识别工程风险并提出有效的控制措施。评估机构和人员的资质要求是保障评估质量的重要前提。

4 安全评估程序

4.1 一般规定

4.1.1 在城市轨道交通建设阶段管控区、运营阶段安全保护区内地块的位置与地块设计方案均存在影响城市轨道交通建设及运营安全的风险，外部作业的建设单位在地块控规编制（调整）阶段、勘察阶段、规划条件许可阶段、规划许可阶段和施工许可阶段均应征询市轨道交通局意见。已审批方案有重大变更的应重新报审。

当外部作业设计方案经评估后无法达到预评估确定的结构安全控制指标（如变形限值等）时，建设单位应组织设计单位对方案进行优化调整，包括但不限于改进施工工艺、加强支护措施或调整作业参数等，并重新开展安全评估。该过程应循环进行，直至评估结果证明优化后的方案能够完全满足轨道交通结构安全控制要求，确保既有轨道交通设施和运营安全不受影响。

4.2 评估流程

4.2.2 对于复核算结果不满足安全控制指标的方案，设计单位应优化设计方案，评估单位对优化后的方案再次进行模拟分析验算。

4.5 专家评审

4.5.2 在选取评审专家时，需结合工程实际情况，从工程所在市或省级专家库中严格筛选，确保专家组成员不少于5名且专业对口。若安全评估内容涉及跨专业领域，可酌情增加1-2名相关专业专家，以保证评审的全面性和专业性。专家组实行组长负责制，组长原则上由组内成员民主推选产生，负责统筹评审工作，确保评估过程的规范性和结论的科学性。

建设单位应负责组织召开专家评审会议，并邀请建设、勘察、设计、施工、监理、监测等相关参建单位共同参与，东莞市轨道交通有限公司派人参加，以确保评审工作的全面性和各方意见的充分表达。为提高评审的针对性和实效性，会议原则上宜在工程现场进行，便于专家直观了解项目实际情况。对于条件允许的项目，可在正式评审会议前组织专家组进行现场踏勘，进一步核实工程现状，为后续评审提供客观依据。

4.5.2 专项安全评估报告的评审结论形成过程应遵循严谨、科学的原则。报告编制负责人需向评审专家组全面汇报方案内容，并对专家提出的疑问进行详细解答，确保评审依据充分、信息透

明。专家组在听取汇报和质询后，经集体讨论形成最终的评审结论及优化建议，并由专家组组长向参会各方正式宣读。

4.5.5 安全评估报告评审结论为“修改后通过”，表明该报告在满足基本安全标准的前提下，仍需针对专家评审意见进行局部修订后方可正式生效。

5 现状调查

5.1 一般规定

5.1.1 安全评估实施前对结构采取现状调查，目的就是掌握城市轨道交通结构的安全状态，评估结构的继续抗变形能力和承载能力，并确定相应的结构安全控制值，为后续的评估工作起到一定的指导作用。

5.1.2 现状调查包括对施工质量缺陷的调查、现场结构裂缝、渗漏水调查等。根据城市轨道交通结构的特点和所处的工程地质条件等，结合理论分析、模型试验、数值模拟等方法，预测外部作业对结构的安全影响，提出相应的结构安全控制指标的预测值，同时尚应结合结构的现状评估成果，评估外部作业方案的可行性，并提出保障结构安全的相应措施。当外部作业的预测值超过相应的结构安全控制值时，预评估的结论应为外部作业方案不可行，应调整外部作业方案，制定安全可靠的保护措施，并重新进行预评估，直至预评估的结论为外部作业方案可行。

5.2 调查内容

5.2.1 现状调查重点关注收集以下内容：

- 1 外部作业的种类和规模；
- 2 可能对轨道交通工程造成影响的外部作业的设计、施工情况；
- 3 场地地形、地质和周边环境情况；
- 4 结构的健康程度；
- 5 安全监测的量测结果等。

现状调查主要采取收集资料、现场踏勘的方式，通过照片、视频、文档等形式进行存档保存。针对既有建筑结构的现状调查与监测工作，应由建设单位委托第三方专业机构实施。

5.3 资料收集

5.3.1 现状调查应全面收集与工程安全相关的既有数据、环境条件和潜在风险因素，为后续数值分析、风险识别和措施制定提供依据。

5.4 调查方法

5.4.1 结构缺损病害调查包含隧道结构有无开裂、露筋、掉块、压溃、错台；管片连接件（螺杆、螺栓等）有无缺失、松脱；道床有无开裂、拱起；排水沟有无开裂，调查内容应包括病害位置、大小和分布等，应对结构缺损状况进行详细记录，做好标识并留存影像数据记录。

5.5 现场监测

5.5.11 当第三方监测的实际变形值达到安全控制指标的 60%时,第三方监测单位应向建设单位、施工单位、市轨道交通局、东莞市轨道交通有限公司、建设项目行政主管部门发出预警；当达到安全控制指标的 80%时,须发出报警,建设单位应委托评估单位开展工程后续施工的安全评估,建设单位应立即启动应急预案,并采取有效措施确保城市轨道交通设施安全和运营安全。具体可参照《东莞市轨道交通安全保护区管控工作指引》（东轨〔2024〕28号）。

6 数值分析

6.1 一般规定

6.1.1 本条明确了城市轨道交通保护数值分析的标准工作流程，包含 10 个关键环节：

- 1) 资料收集阶段需获取工程地质、既有结构、外部作业等基础数据；
- 2) 评估对象确定应聚焦关键影响区段；
- 3) 分析类型选择需区分静力/动力、二维/三维等不同需求；
- 4) 数值分析方法应明确采用有限元法、有限差分法等；
- 5) 模型建立需保证几何尺寸、网格划分的合理性；
- 6) 材料本构模型及参数应通过试验或工程类比确定；
- 7) 初始与边界条件设置须反映实际约束状态；
- 8) 计算工况应覆盖施工全过程；
- 9) 结果验证需对比监测数据或理论解；
- 10) 最终结论应提出针对性保护建议。

6.1.2 数值分析模型原则上应采用三维模型分析，以全面反映轨道交通结构与周边环境的相互作用。在满足特定简化条件时，允许采用二维模型分析。

6.2 数值分析方法确定

6.2.1 数值分析方法的选择应基于分析目的、结构特征、地质条件和计算资源等因素进行综合比选，并符合以下技术规定：

1) 对于土体及完整性较好的岩体（如均质黏土层、完整花岗岩等），其稳定性分析可采用有限元法（FEM）或有限差分法（FDM）等连续介质分析方法，这类方法适用于模拟材料的连续变形行为；

2) 针对块状结构、层状岩体或破碎带等非连续介质，应采用离散单元法（DEM）或有限-离散耦合方法（FDEM），以准确表征岩体节理、裂隙等不连续面的力学效应。

分析方法的选择应确保能够反映岩土体的实际力学响应，当涉及复杂地质条件时，宜通过方法对比验证分析结果的可靠性。

6.2.2 软土地层（如淤泥、淤泥质土等）具有显著流变特性，施工模拟应采用流固耦合模型，同时考虑孔隙水压力变化与土体变形相互作用，以准确反映软土固结、蠕变等时效特性；冻结法施工涉及温度场与应力场的相互影响，应采用热-力耦合模型，模拟冻结过程中的温度扩散、冻胀效应及冻土强度演化，并考虑解冻阶段的土体强度恢复特性。

6.3 模型建立

6.3.1 模型的建立应以工程地质勘察资料为依据，考虑地层分界面、断层破碎带、节理裂隙面等控制性结构面的空间分布特征及其力学性质。地层分界面应基于钻孔数据、物探成果等准确划分岩土层位；断层破碎带需单独建模并合理弱化其力学参数；节理裂隙面可采用等效连续或离散网络方法表征。模型边界范围应确保覆盖主要影响区，网格划分需在关键部位（如结构-地层接触带、构造破碎区）适当加密。

6.3.2 通过设置足够的边界距离，可有效消除边界约束对关键区域（如作业面附近、隧道周边）应力场和位移场的干扰。对于特殊工况（如深大基坑、盾构近接施工等），宜通过试算验证边界条件的合理性，必要时可扩大模型范围。

6.3.3 模型单元尺寸的确定应兼顾计算精度与效率，遵循“关键区域加密、非关键区域适度”的原则。单元尺寸一般控制在模型最小特征尺寸的 $1/5 \sim 1/10$ 范围内，具体应满足：

1) 断层破碎带、节理面等关键区域采用 $\leq 1/10$ 最小特征尺寸的精细网格，以准确捕捉不连续面的变形破坏特征；

2) 非关键区域可采用 $\leq 1/5$ 最小特征尺寸的相对稀疏网格，在保证精度的前提下提升计算效率；

3) 过渡区域通过尺寸渐变网格实现应力平缓传递，避免局部畸变。对于存在应力集中或大变形风险的部位，应通过网格敏感性分析验证单元尺寸的合理性，必要时进行局部加密。特殊情况下（如动力分析、断裂模拟等），单元尺寸需另行专项论证。

6.3.4 刚度协调应重点控制交界面处的位移连续性，避免因刚度突变导致应力异常集中或计算结果失真。对于盾构管片接头、桩土相互作用等特殊连接部位，宜通过试验数据或工程类比确定

合理的刚度折减系数。

6.4 本构模型及参数选择

1) 6.4.1 地层本构模型的选取应综合考虑地质结构特征、材料力学属性、分析方法及工程分析目的等因素。

6.4.2 轨道交通结构单元的数值模拟应结合结构类型与受力特性合理选择单元类型及参数设置，隧道衬砌推荐采用壳体单元并考虑接头刚度折减（ $\eta=0.6\sim 0.8$ ），车站主体结构采用三维实体单元时需针对厚底板（ $\geq 500\text{mm}$ ）计入剪切滞后效应，盾构始发井等复杂部位则需建立局部精细化实体模型；模型参数应基于地质勘察、试验数据、反演分析及工程类比综合确定，重点考虑岩体质量分级与结构构造特征。

6.5 初始条件与边界条件设置

6.5.1 数值模拟的初始条件设定应基于工程实际状态合理确定，包括初始地应力、初始位移、初始水压等关键参数，并宜通过现场观测与监测数据反演分析获取真实初始状态。初始地应力应优先采用水压致裂法等现场实测数据，当缺乏实测资料时，软土地层的侧压力系数 λ 建议取0.4-0.6，岩层取0.2-0.4；初始位移需结合历史监测数据，通过线性外推法或时间序列分析确定，以反映既有变形累积效应；初始水压应按最不利工况考虑，取静水压力与超孔压的叠加值，其中超孔压系数 ξ 建议取1.1-1.3。

6.6 计算工况设置

6.6.1 ~ 6.6.4 工况设置是数值模拟的核心环节，需严格遵循实际工程类型及施工工序，以确保仿真结果的准确性和可靠性。

6.6.5 在地下水位以下作业对城市轨道交通结构影响的数值模拟中，当遇到复杂地质条件或存在止水帷幕时，应优先采用流固耦合模型进行分析，并满足以下要求：模型参数可通过抽水试验数据反演确定，以保证渗流场与应力场耦合分析的准确性；模拟工况应参照表 6.6.5 进行分类，流固耦合模型需同时考虑孔隙水压力消散与土体变形相互作用，特别关注止水帷幕的隔水效果及周边地层的水力响应，以评估降水或渗流对轨道交通结构的长期影响。

6.7 模型计算与结果验证

6.7.1 数值模型的计算类型应根据荷载特性及工程需求合理选择，主要包括静力计算、动力计算及大变形分析三类。静力计算适用于恒载、活载及土压力等准静态荷载作用下的结构响应分析，推荐采用隐式分析方法，并以残余力与外荷载比值不超过 1×10^{-4} 作为收敛准则；动力计算适用于地震、爆破振动等动态荷载工况，需采用显式分析方法并合理设置阻尼系数，以反映惯性效应与能量耗散特性；大变形分析针对崩塌、滑坡等极端破坏场景，可采用离散单元法（DEM）、有限-离散耦合方法（FDEM）或光滑粒子流体动力学（SPH）等非连续介质方法，捕捉材料断裂、颗粒流动等大位移行为。

6.7.2 数值模拟结果的可靠性可通过现场监测数据进行验证。当计算结果与实测数据偏差较大时，需系统排查模型误差来源，包括但不限于：1）模型网格划分的合理性（如单元尺寸、过渡区设置等）；2）本构模型及参数的适用性（如地层力学参数、接触面特性等）；3）边界条件的准确性（如荷载施加方式、约束条件等）；4）施工工况的还原度（如开挖步序、支护时序等）。直至计算结果与监测数据吻合程度较好。

6.8 外部作业影响预测与安全评估

6.8.1 评估计算应全面分析评估对象在主要工况下的力学响应，包括应力分布图、弯矩图、变形图等计算结果，重点识别应力集中区域、最大变形部位及其变形量值，并对关键受力构件和薄弱部位进行强度及承载力验算。具体分析内容应满足表 7.8.1 要求。

6.8.2 当外部作业施工可能导致地下水位变化时，安全评估应重点分析水位变化与施工活动的耦合作用对既有轨道交通结构的影响。评估需建立流固耦合模型，模拟降水、回灌或渗流条件下的孔隙水压力分布及结构响应，计算内容包括但不限于：

- 1) 水位变化引起的浮力损失或附加荷载；
- 2) 地层固结沉降对隧道变形的影响；
- 3) 止水帷幕失效风险下的水力梯度变化。

并根据计算结果，应明确水位变化控制指标。

6.8.5 在既有轨道交通结构上方或侧方采用泡沫轻质混凝土回填时，荷载计算应考虑材料在长期使用状态下的最不利工况，即按最大吸水率饱和状态下的湿容重取值。泡沫轻质混凝土的吸水特性会导致其容重增加，进而增大对既有结构的附加荷载。

7 安全保护要求

7.1 一般规定

7.1.2 本条规定了开展外部作业前应收集的关键资料，资料收集应做到详实、准确，并根据工程特点及时补充缺项内容。同时，可同步补充地质、水文、既有结构加固记录等资料，以提高风险识别的完整性。

7.2 基坑工程

7.2.1 本条列举了基坑工程可能对轨道交通结构产生不利影响的主要因素，提出设计与施工阶段应系统考虑土体变形、水位变化、施工工艺、外部荷载及结构现状等综合因素。复杂地质条件下的土体响应存在显著不确定性，支护刚度不足或施工控制不当，可能诱发结构附加变形和失稳风险；同时，轨道结构自身若存在裂缝、渗漏、老化等缺陷，也会加剧受扰敏感性。此外，应重视地下水变化、开挖时效、荷载路径等因素的耦合效应。因此，应通过详细的设计计算与监测评估，合理确定施工参数与保护策略。

7.2.2 本条规定了在进行深基坑作业时应重点控制其稳定性和变形。深基坑作业可能引起地层滑移、支护失稳及地面沉降，进而影响轨道结构。监测内容应涵盖围护结构变形、支撑轴力、坑底隆起、邻近结构响应等关键指标，并根据工程特点设置响应阈值与报警机制。

7.2.3 科学的分层分步施工方式能有效控制开挖引起的土体应力释放和围护结构变形。特别是在邻近轨道结构的基坑中，严格控制无支撑暴露时间和施工步距等，是防止结构附加位移和支护体系失稳的关键措施。

7.2.4 临时结构拆除时若使用高冲击或强震动工艺，可能导致地层扰动或既有结构共振等问题，增加裂缝扩展或结构不均沉降风险。建议选用低扰动工法，并在拆除期间加强轨道结构震速监测。

7.2.5 大型设备站位、临时堆载或材料堆放将改变地表荷载分布，应开展附加荷载分析并制定

布荷方案，必要时设置隔载带或缓冲垫层，确保轨道结构不因附加应力而发生过度变形。

7.3 暗挖工程

7.3.1 本条列出了暗挖工程对城市轨道交通结构可能产生影响的主要因素；其中，地层变形与水位扰动是主要风险源，施工振动、噪声等则可能对结构安全和运营舒适性造成叠加影响。

7.3.2 作业影响等级越高，施工扰动越可能影响轨道结构稳定性和安全运营。因此，在高等级影响下应优先采用扰动范围小、姿态可控性强的施工工艺，并通过细化控制参数（如开挖步距、支护时间、注浆压力等）配套布置完整的保护体系和应急预案。

7.3.3 近距离穿越施工是暗挖工程中风险最高的情形之一，盾构开挖、土压控制、同步注浆质量及地表沉降控制均需考虑在内。建议在盾构掘进前进行详细地质勘察，并采取相应的处理措施；作业时应实时监测轨道结构响应，确保穿越过程结构稳定、安全受控。

7.3.4 建议设置结构沉降、内力、变形、水位、振动等多维度监测指标，并结合施工进度实时调整布点密度与采集频率。

7.4 地基基础工程

7.4.1 本条列举了地基基础工程在设计、评估和施工阶段可能对轨道交通结构产生不利影响的主要因素。设计阶段应评估基础施工和后期运营产生的附加荷载对结构的应力及变形影响，如桩基作业中由于施工扰动和荷载再分布可能诱发的地层移动；加固工程应控制加压、注浆等施工参数，避免造成土体结构破坏或水力失稳。对既有轨道交通结构的现状也需一并审查，如存在结构老化、渗漏等，应综合采取加强防护或局部加固等工程措施。

7.4.2 浅基础确需设置于保护区内时，应评估对轨道结构使用功能的影响，必要时配套设置减振或隔力结构。

7.4.3 承台和桩体与地层之间存在复杂应力传递机制，设计中应分析桩周扰动、桩端支承反力等因素，合理安排桩位与施工节奏，确保既有轨道结构受力状态稳定。

7.4.4 本条规定了挤土桩施工过程中的注意事项和控制要求。

7.5 道路与桥梁工程

7.5.1 本条列举了道路与桥梁工程对轨道交通结构潜在影响的主要因素。

7.5.2 正交布设有利于缩短影响区域，减小施工干扰路径，提高结构力学稳定性及检修便利性。对于下穿高架的作业，应确保施工通道净空满足通行与安全要求，防止因设备超高或转弯半径不足等发生结构碰撞风险。

7.5.3 为减少结构遮挡及冲突风险，桥梁工程宜优先采用下穿方式；确需上跨时，应在设计阶段充分考虑桥梁挠度、沉降与运营限界的耦合影响，确保在最大变形工况下仍满足列车安全通行的净空需求。

7.5.4 地基加固、桩基施工、吊装作业等易产生低频或冲击性振动，对隧道衬砌、车站结构或桥梁支座构件具有潜在威胁。因此，应在施工前评估振动频率、传播路径及轨道结构的响应特性，并制定相应的振动控制指标，实施过程中应设立轨道结构监测点，实时跟踪结构响应。

7.6 地下水作业

7.6.1 本条从渗流破坏、技术扰动、水位变化和结构缺陷等方面，指出了地下水作业的主要风险来源。在实际应用中，施工引起的管涌、流砂、微升沉降，若叠加结构本身的老化、开裂等问题，极易引发渗漏、水害或附加应力积累，必须在设计阶段予以充分识别并制定控制方案。

7.6.2 本条强调对渗流破坏的预防是地下水作业的重要控制目标。建议在施工前开展渗透性测试等相关分析，针对易发区域布设反滤层、止水帷幕或井点系统等措施，并结合监测系统实时

追踪渗流发展趋势。

7.6.3 地下水位的快速下降或剧烈波动，常引发结构沉降差异或基础扰动。在软土、深厚砂层、岩溶等不良地层条件下，应结合现场实测数据与数值分析方法，控制降水速率和幅度。

7.6.4 封闭式截水系统可有效限制渗流范围、控制水力梯度，是保障降水过程稳定性的关键措施。

7.6.5 本条提出组合式隔水结构作为强渗性地层中的对策手段。悬挂帷幕限制侧向渗流，水平封底则提升整体抗突涌与抗浮能力，两者配合可构建较为稳定的水土隔离体系。实施中应结合地质布置优化施工顺序与接口闭合处理。

7.6.6 承压水对结构底板存在长期上浮作用，隔断式防控可直接切断水头传递路径，是首选措施。若地质条件限制隔断效果，应增加水流绕行距离，降低局部水头梯度，并配合抗浮验算调整结构设计或设置压重措施。

7.6.7 降水量与降水速率应与开挖进度相匹配，避免降水滞后或过度引发地层扰动。突涌与抗浮风险多发于高水位软弱地层，应在施工前进行稳定性分析，若存在隐患，可采取水平止水层等措施消解水力扰动。

7.7 爆破与振动作业

7.7.1 本条列出了爆破作业中需重点关注的风险因素，涵盖结构响应、设备干扰、地层扰动及运营安全等方面。实际工程中应结合地质条件、结构状态及设备布设情况，制定有针对性的爆破控制技术方案与监测计划。

7.7.2 爆破作业涉及面广、影响大，需在实施前完成全流程风险识别和设计审查。建议在设计阶段明确爆破参数、安全边界与轨道结构响应，保障轨道设施处于评估可控范围内。

7.7.3 试爆是校核设计合理性与控制效果的重要手段。结合爆破前后实测振动数据调整参数，有助于避免正式爆破中出现不可控震动或结构超限响应，提升作业的精准性和安全性。

7.7.4 本条规定了振动控制的优化措施与替代方案的分级控制逻辑。

7.7.5 实时振动监测是判断爆破作业是否达标的关键依据，应布设于轨道结构关键部位。推荐采用三向高灵敏度振速仪，结合结构特性设置告警阈值和安全预警机制。

7.8 其他作业

7.8.1 本条针对地下结构施工要求高可靠性和耐久性，避免因材料劣化或接缝失效影响周边地层稳定，进而影响轨道交通结构安全。可采用钢筋混凝土整体式结构或连接性能优良的材料体系。

7.8.2 吊重作业存在坠物风险，若吊运物体经过轨道交通结构正上方，一旦发生失控可能造成严重结构损伤与安全事故。因此应严格设定作业限位区，避免高空吊重越过结构上方。

7.8.3 本条明确航道浮标等水上导航标志的管理不纳入城市轨道交通保护范畴，属其他行业主管部门管辖，避免重复管理。

7.8.4 地面堆载或集中卸载作业可能引起结构附加应力，应开展数值分析进行验算，确保结构不出现超限沉降或应力集中，同时建议设置分阶段加载与监测机制。

7.8.5 主体结构构件一旦改动，将直接影响结构整体受力系统与稳定性，需确保新旧结构连接可靠、功能连续。

7.8.6 房屋改造过程中可能引发地基扰动、结构附加应力传递，因此，施工全过程控制振动、

沉降及开挖扰动范围，同时设置监测与风险预警系统，防止作业对运营安全构成影响。

7.8.7 高架与地面结构周边作业空间受限，若施工机械位置设置不当，易出现转臂冲撞、倾覆影响等问题，应结合结构边界设置作业缓冲区、防护装置及限位措施等。