

第 1 章 绪 论

随着我国经济的不断发展和城市化进程的加速，城市轨道交通建设在我国各大城市如火如荼地进行。仅浙江省，继杭州、宁波轨道交通工程的修建之后，温州、嘉兴、绍兴、台州、金华和义乌等地正在筹建城市轨道交通工程，现已进入规划研究阶段。据有关专家的预测，未来 10 年，将进入轨道交通时代，轨道交通的岩土工程勘察任务很艰巨。但是轨道交通岩土工程勘察又有其自身特点，如何结合地区的勘察经验，在轨道交通线路勘察的基础上，开展专题研究，进行分析总结，具有十分重要的意义。本书以宁波轨道交通岩土工程勘察实践为基础，对勘察管理进行总结，有助于指导轨道交通岩土工程管理和实践。

1.1 轨道交通工程特点

城市轨道交通工程均建设于城市化已达到相当高水平的大城市，且多位于城市的繁华区，地质条件以及勘察成果质量对工程设计和施工的影响比一般土建工程要大得多。因其结构类型多、施工方法多、所处的环境与地质背景复杂等使其同时具有线路工程、地下工程、环境工程的复杂性、多样性、针对性的特点。

1. 系统工程

城市轨道交通工程为复杂的系统工程，具有线路工程、建筑工程、地下工程、桥梁工程、环境工程、供电工程、通风工程等多重特点。

2. 形式和功能多样

城市轨道交通工程按形式和功能划分，可分为车站、区间、车辆段、停车场、变电站、控制中心等。

3. 周边环境复杂

城市轨道交通工程沿线建（构）筑物众多，地下管线纵横交错，地上道路交通繁忙，局部穿越建筑物，作业难度大。

4. 结构类型多样

轨道交通工程按照线路敷设形式可分为地下线路、地面线路和高架线路；按照结构类型可分为车站主体、出入口通道、风道、风井、人防工程、区间隧道、联络通道、出入线、泵房、高架线路、桥梁、涵洞、路基、车辆段、停车场、变电站、控制中心等。

5. 施工工法复杂

城市轨道交通工程的土建施工方法一般有明挖或盖挖法、矿山法、盾构法三大工法；另外还有一些辅助工法，包括降水、止水、注浆施工、冻结法施工、小导管施作、大管棚施作、盾构始发井和接收井加固施工等。

1.2 轨道交通勘察特点

工程勘察的目的是为工程建设单位及工程设计单位提供地质、测量、水文、地震等勘察文件，以满足建设工程规划、选址、设计、岩土治理和施工的需要。准确可靠的勘察，是设计与施工的基础，是制约整个工程的关键环节之一。

轨道交通线路敷设方式和施工方法的多样性，导致工程基础类型和结构形式的多样性。轨道交通勘察兼有铁路隧道、城市高层建筑、深基坑、水文地质勘察的特点。

1. 线路长、协调难度大

轨道交通线路长，每条线路一般都有几十千米，基本沿既有道路敷设，跨越不同的行政区域，勘探施工前需要向不同的相关管理部门（道路、交警、城管、绿化、管线单位、周边用地业主等）办理施工许可手续。同时，轨道交通勘察是没有征地的勘察，特别是地下盾构区间，政策协调涉及部门多，协调难度大。

2. 任务重、工期紧

轨道交通线路长，布置的勘探测试，工点（车站、区间、车辆段、停车场等）数量较多，详勘提交的勘察成果报告数量也较多。为满足工程进度的需要，初勘从设计提资到提交成果报告一般只有一个多月，详勘约为 4 个月，且协调工作量大，勘察工期较为紧张。同时，因设计边界条件难以稳定，勘察周期还要压缩。

3. 工程地质条件复杂

轨道交通勘察线路是线状工程，涉及多个地貌单元和不同的水文地质、工程地质条件，

工程地质条件复杂，技术难度较大。

同时，轨道交通勘察是地下系统工程的勘察，涉及高架车站、高架区间、地下车站、地下区间、U形槽、停车场、车辆段、控制中心等不同的结构形式，不同结构形式的勘察重点各不相同。

4. 勘察手段多样

由于周边环境复杂、岩土工程问题较多、结构形式较多、施工方法复杂。为查明沿线工程地质与水文地质条件，解决岩土工程问题，提供设计施工所需的岩土参数，需要采用钻探取样、静力触探、水文试验、工程物探、原位测试（动力触探、十字板剪切试验、波速试验、扁铲侧胀试验、电测井）等多种勘探方法。

5. 安全生产、文明施工要求高

轨道交通勘察大多在城市繁华区域进行，交通压力大，涉及对电力、电信、煤气、自来水、污水、雨水、交通信号等地下管线的保护，安全生产的压力较大。

同时，媒体发达，事故报道敏感性高，对安全文明施工要求高。因此，对距地下管线较近勘探孔的施工、开孔方式、泥浆循环系统以及施工区安全警示、撤场回填、地面清洗、路面恢复等细节问题都要预先考虑周全，并加强现场管理。

6. 施工过程中变更较多

由于勘察周期较长，受工程进度的影响，设计方案在未完全确定时即向勘察专业开放，往往实施的勘察方案不能完全满足最终设计方案，需要进行补充勘察。

根据勘察规范规定布置的勘探孔在具体实施过程中受到城市道路、既有建筑物、架空线、地下管线、地下障碍物及地面交通等的约束，常常需要移位才能施工。

此外，地铁车站的出入口、风亭等附属结构位于既有建（构）筑物上，一般需要等征迁完成后再进行补充勘察。

7. 服务周期长

轨道交通勘察服务周期较长，需按工勘、初勘、详勘及补勘不同阶段实施，不同阶段有不同的勘察要求。

由于轨道交通施工周期长（达 3~5 年）、内容多，如管线迁改、地连墙施工、基坑开挖验槽、盾构施工、子单位和单位工程验收等，服务周期达 5 年。

1.3 轨道交通软土工程特性

软土是第四纪后期地表流水所形成的沉积物质，是指天然孔隙比大于或等于 1.0 且天然含水率大于液限的细粒土，多数分布于海滨、湖滨、河流沿岸等地势比较低洼地带，地表终年潮湿或积水。在我国上海、天津、大连、连云港、杭州、福州、宁波、广州、昆明等地区广泛分布着软土。随着社会经济的迅速发展，软土地区城市基础设施建设中面临着越来越多的工程问题，尤其是在东南沿海地区不同程度地存在软土问题及其导致的其他灾害地质问题。软土对工程建设产生诸多危害，主要体现在影响地基的稳定性能，造成建筑物的不均匀沉降，引起塌陷、塌方、水土流失等，从而降低了建筑物的抗风、抗震、抗冲击等能力。

下面就以宁波地区为例，说明软土特性及其对轨道交通工程建设的影响：

宁波市地处滨海平原，地势低平，市区地面高程一般为 2.0~2.5 m (黄海高程)，宁波轨道建设场地属典型的软土地区，广泛分布海相沉积的厚层软土，由①₃层灰色淤泥质黏土、②₂₋₁层灰色淤泥、②₂₋₂层灰色淤泥质黏土组成。物理力学指标见表 1.1~1.3。它具有如下特点：

① 低强度： $C_u = 7 \sim 15 \text{ kPa}$ ， $f_k = 40 \sim 55 \text{ kPa}$ 。

② 弱透水性： $k = i \times 10^{-6} \sim i \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。

③ 高压缩性： $a_{1-2} = 0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}^{-1}$ ，在荷载作用下，压缩变形大，固结历时长。

④ 显著的结构性：软土受到扰动后，黏土矿物絮状结构受到破坏，土强度显著降低，甚至呈流动状态，随着静置时间的增长，其强度逐渐有所恢复，但不能恢复到原来的结构强度。因此软土受扰动→破坏→恢复的性能，称其为触变性。

⑤ 明显流变性，主要表现在以下两方面：

a. 在恒定应力或长期荷载作用下，软土将产生缓慢而长期的剪切应变，土强度则随时间而衰减。

b. 土在主固结沉降完成之后，即土中孔隙水压力完全消散后，将继续产生较大的次固结沉降。

大面积厚层软土分布会对轨道交通工程建设带来一系列岩土工程问题，主要表现为：

① 由于软土广泛分布，其引发的区域性地面沉降现已成为宁波市的区域地质灾害，将可能导致地铁结构长期处于沉降状态，最终可能使管片之间裂隙加大从而发生漏水、渗水，

甚至造成灾害性事故。

② 盾构端头井基坑开挖时，为保证坑壁稳定、周围建（构）筑物及地下管线安全采取的支护结构费用较大，施工风险也随之增大。

③ 在软土中盾构穿越，由于施工扰动再固结引发的沉降会影响到周边地下管线等安全，同样也会影响到地铁自身的安全。

④ 软土所能提供的桩侧摩阻力较小，势必会增加桩数或加大桩长，从而增大工程造价。

表 1.1 宁波平原软土层物理指标统计表

| 岩土编号 | 岩土名称 | 数据统计 | 天然含水率 $w/\%$ | 质量密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 天然孔隙比 e | 液限 $w_L/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 液性指数 I_L | 塑性指数 I_p |
|------------------|-------|------|-----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| ① ₂ | 黏土 | 幅 值 | 28.0 ~ 41.3 | 1.79 ~ 1.95 | 0.71 ~ 0.99 | 36.6 ~ 49.8 | 20.3 ~ 27.1 | 0.3 ~ 0.8 | 16.0 ~ 22.9 |
| | | 变异系数 | 0.101 | 0.021 | 0.070 | 0.080 | 0.073 | 0.248 | 0.090 |
| ① ₃ | 淤泥质黏土 | 幅 值 | 39.9 ~ 57.2 | 1.65 ~ 1.81 | 1.12 ~ 1.65 | 36.6 ~ 47.5 | 20.8 ~ 25.9 | 1.0 ~ 1.6 | 15.6 ~ 21.5 |
| | | 变异系数 | 0.092 | 0.024 | 0.097 | 0.065 | 0.056 | 0.139 | 0.080 |
| ② ₁ | 黏土 | 幅 值 | 33.8 ~ 43.3 | 1.76 ~ 1.88 | 0.74 ~ 0.95 | 36.4 ~ 46.8 | 20.3 ~ 25.9 | 0.7 ~ 1.0 | 16.2 ~ 21.1 |
| | | 变异系数 | 0.059 | 0.019 | 0.068 | 0.064 | 0.068 | 0.095 | 0.065 |
| ② ₂₋₁ | 淤泥 | 幅 值 | 50.4 ~ 60.4 | 1.63 ~ 1.71 | 1.42 ~ 1.74 | 40.9 ~ 48.5 | 22.6 ~ 26.6 | 1.3 ~ 1.7 | 17.8 ~ 22.2 |
| | | 变异系数 | 0.046 | 0.013 | 0.047 | 0.044 | 0.043 | 0.08 | 0.060 |

续表

| 岩土编号 | 岩土名称 | 数据统计 | 天然含水率 $w/\%$ | 质量密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 天然孔隙比 e | 液限 $w_L/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 液性指数 I_L | 塑性指数 I_p |
|------------------|---------|------|-----------------|---------------------------------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| ② ₂₋₂ | 淤泥质黏土 | 幅 值 | 41.3 ~ 53.8 | 1.67 ~ 1.79 | 1.23 ~ 1.55 | 35.8 ~ 45.1 | 20.3 ~ 24.8 | 1.1 ~ 1.7 | 15.2 ~ 20.5 |
| | | 变异系数 | 0.067 | 0.018 | 0.060 | 0.057 | 0.052 | 0.112 | 0.074 |
| ② ₃ | 淤泥质粉质黏土 | 幅 值 | 35.8 ~ 48.8 | 1.71 ~ 1.83 | 1.08 ~ 1.46 | 31.4 ~ 40.0 | 18.7 ~ 21.9 | 1.1 ~ 1.7 | 12.8 ~ 17.7 |
| | | 变异系数 | 0.085 | 0.02 | 0.091 | 0.060 | 0.040 | 0.115 | 0.082 |
| ② ₄ | 淤泥质黏土 | 幅 值 | 42.8 ~ 52.7 | 1.69 ~ 1.77 | 1.20 ~ 1.52 | 36.6 ~ 43.4 | 20.4 ~ 22.6 | 1.2 ~ 1.7 | 16.2 ~ 20.8 |
| | | 变异系数 | 0.054 | 0.013 | 0.057 | 0.043 | 0.025 | 0.092 | 0.064 |
| ③ ₁ | 含黏性土粉砂 | 幅 值 | 24.1 ~ 30.2 | 1.88 ~ 2 | 0.70 ~ 0.94 | | | | |
| | | 变异系数 | 0.058 | 0.017 | 0.066 | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----------------|---------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| ③ ₂ | 粉质黏土 | 幅 值 | 27.1 ~ 35.1 | 1.83 ~ 1.93 | 0.83 ~ 1.08 | 26.8 ~ 32.3 | 16.0 ~ 19.5 | 0.9 ~ 1.3 | 10.4 ~ 13.4 |
| | | 变异系数 | 0.07 | 0.015 | 0.061 | 0.048 | 0.051 | 0.113 | 0.068 |
| ④ ₁ | 淤泥质粉质黏土 | 幅 值 | 38.1 ~ 51.9 | 1.68 ~ 1.81 | 1.11 ~ 1.54 | 34.8 ~ 47.0 | 20.0 ~ 26.0 | 1.0 ~ 1.4 | 14.4 ~ 21.2 |
| | | 变异系数 | 0.083 | 0.02 | 0.107 | 0.078 | 0.068 | 0.11 | 0.102 |
| ④ ₂ | 黏土 | 幅 值 | 35.0 ~ 48.6 | 1.69 ~ 1.85 | 1.14 ~ 1.36 | 35.9 ~ 50.0 | 20.0 ~ 27.2 | 0.8 ~ 1.0 | 15.7 ~ 23.0 |
| | | 变异系数 | 0.085 | 0.025 | 0.048 | 0.085 | 0.079 | 0.057 | 0.097 |
| ④ ₃ | 粉质黏土 | 幅 值 | 30.1 ~ 40.0 | 1.75 ~ 1.88 | 0.82 ~ 1.07 | 29.3 ~ 43.6 | 17.4 ~ 24.1 | 0.8 ~ 1.0 | 12.1 ~ 18.6 |
| | | 变异系数 | 0.068 | 0.017 | 0.056 | 0.094 | 0.075 | 0.079 | 0.103 |

表 1.2 宁波平原软土层力学指标

| 岩土编号 | 岩土名称 | 数据统计 | 压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ /MPa | 压缩模量 $E_{50.1-0.2}$ /MPa | 黏聚力 c_q /kPa (快剪) | 内摩擦角 φ_q /($^\circ$) (快剪) | 黏聚力 c_c /kPa (固快) | 内摩擦角 φ_c /($^\circ$) (固快) |
|------------------|-------|------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---|---------------------------|---|
| ① ₂ | 黏土 | 幅 值 | 0.4 ~ 0.7 | 3.2 ~ 4.7 | 16.3 ~ 30.8 | 5.9 ~ 10.3 | 24.2 ~ 38.8 | 12.1 ~ 16 |
| | | 变异系数 | 0.184 | 0.148 | 0.239 | 0.208 | 0.180 | 0.107 |
| ① ₃ | 淤泥质黏土 | 幅 值 | 0.8 ~ 1.4 | 2.0 ~ 2.6 | 5.9 ~ 11.6 | 1.6 ~ 3.4 | 12.6 ~ 18.8 | 7.7 ~ 10.8 |
| | | 变异系数 | 0.219 | 0.107 | 0.253 | 0.285 | 0.153 | 0.130 |
| ② ₁ | 黏土 | 幅 值 | 0.6 ~ 0.9 | 2.6 ~ 3.5 | 8.6 ~ 17.7 | 3.2 ~ 6.1 | 17.1 ~ 25.4 | 9.4 ~ 12.3 |
| | | 变异系数 | 0.142 | 0.113 | 0.268 | 0.239 | 0.153 | 0.102 |
| ② ₂₋₁ | 淤泥 | 幅 值 | 1.1 ~ 1.6 | 1.6 ~ 2.3 | 4.2 ~ 9.3 | 1.6 ~ 2.9 | 11.9 ~ 16.7 | 7.4 ~ 9.1 |
| | | 变异系数 | 0.157 | 0.128 | 0.289 | 0.230 | 0.131 | 0.083 |
| ② ₂₋₂ | 淤泥质黏土 | 幅 值 | 0.8 ~ 1.3 | 1.9 ~ 2.8 | 2.5 ~ 10.0 | 1.4 ~ 3.8 | 12.0 ~ 19.8 | 7.4 ~ 10.9 |
| | | 变异系数 | 0.129 | 0.099 | 0.281 | 0.236 | 0.125 | 0.110 |

续表

| 岩土编号 | 岩土名称 | 数据统计 | 压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ /MPa | 压缩模量 $E_{50.1-0.2}$ /MPa | 黏聚力 c_q /kPa (快剪) | 内摩擦角 φ_q /($^\circ$) (快剪) | 黏聚力 c_c /kPa (固快) | 内摩擦角 φ_c /($^\circ$) (固快) |
|----------------|---------|------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---|---------------------------|---|
| ② ₃ | 淤泥质粉质黏土 | 幅 值 | 0.7 ~ 1.2 | 2.0 ~ 2.7 | 4.8 ~ 12.0 | 1.6 ~ 4.7 | 13.5 ~ 21.1 | 7.6 ~ 12.3 |
| | | 变异系数 | 0.128 | 0.071 | 0.204 | 0.256 | 0.109 | 0.139 |
| ③ ₁ | 含黏性土粉砂 | 幅 值 | 0.2 ~ 0.3 | 5.6 ~ 8.6 | 9.5 ~ 29.1 | 16.3 ~ 25.0 | 7.9 ~ 17.6 | 23.8 ~ 33.4 |
| | | 变异系数 | 0.073 | 0.114 | 0.299 | 0.120 | 0.177 | 0.051 |
| ③ ₂ | 粉质黏土 | 幅 值 | 0.3 ~ 0.6 | 3.0 ~ 5.1 | 5.5 ~ 22.7 | 3.1 ~ 12.0 | 15.0 ~ 23.9 | 9.4 ~ 14.2 |
| | | 变异系数 | 0.154 | 0.136 | 0.283 | 0.199 | 0.101 | 0.099 |
| ④ ₁ | 淤泥质粉质 | 幅 值 | 0.8 ~ 1.2 | 2.0 ~ 2.8 | 5.4 ~ 16.6 | 1.6 ~ 5.3 | 13.3 ~ 21.9 | 7.8 ~ 11.9 |

| | | | | | | | | |
|----------------|------|------|---------|---------|----------|----------|-----------|----------|
| | 黏土 | 变异系数 | 0.122 | 0.091 | 0.264 | 0.269 | 0.127 | 0.130 |
| ④ ₂ | 黏土 | 幅值 | 0.6~1.0 | 2.3~3.4 | 6.6~22.5 | 2.7~7.8 | 15.4~27.2 | 8.7~13.5 |
| | | 变异系数 | 0.143 | 0.102 | 0.286 | 0.246 | 0.149 | 0.115 |
| ④ ₃ | 粉质黏土 | 幅值 | 0.3~0.7 | 2.7~5.4 | 12~27.6 | 4.9~10.1 | 15.7~34.2 | 9.8~15.9 |
| | | 变异系数 | 0.214 | 0.169 | 0.201 | 0.164 | 0.189 | 0.128 |

表 1.3 宁波平原软土层特殊力学指标统计表

| 层号 | 岩土名称 | 数据统计 | 波速 | 静探 | | | 十字板 | |
|------------------|---------|------|-------------------|------------------|------------------|------------|-------------------|--------------|
| | | | 横波 $v_s/(m/s)$ | 端阻力 q_c/MPa | 侧阻力 f_s/kPa | 摩阻比 n | 剪切强度 c_u/kPa | 灵敏度 S_l |
| ① ₂ | 黏土 | 幅值 | 95.4~141.1 | 0.3~0.7 | 12.2~37.2 | 2.9~8 | 29.7~70.9 | 2.9~3.1 |
| | | 变异系数 | 0.107 | 0.244 | 0.252 | 0.247 | 0.218 | 0.024 |
| ① ₃ | 淤泥质黏土 | 幅值 | 69.8~133.1 | 0.1~0.3 | 3.9~9.4 | 1.9~4.1 | 16.2~28 | 3.3~7.1 |
| | | 变异系数 | 0.159 | 0.192 | 0.216 | 0.192 | 0.206 | 0.283 |
| ② ₁ | 黏土 | 幅值 | 91.3~149.5 | 0.3~0.5 | 9.3~19.8 | 2.5~4.6 | 24.6~51.4 | 2.7~4.5 |
| | | 变异系数 | 0.142 | 0.177 | 0.188 | 0.146 | 0.274 | 0.189 |
| ② ₂₋₁ | 淤泥 | 幅值 | 67.4~124.3 | 0.2~0.4 | 4~7.8 | 1.5~2.3 | 16.4~27.4 | 3.9~6.4 |
| | | 变异系数 | 0.152 | 0.149 | 0.168 | 0.113 | 0.184 | 0.192 |
| ② ₂₋₂ | 淤泥质黏土 | 幅值 | 73.8~140.0 | 0.2~0.5 | 4~8.3 | 1.4~2.2 | 15.5~28.2 | 4.4~6.6 |
| | | 变异系数 | 0.162 | 0.186 | 0.178 | 0.174 | 0.213 | 0.151 |
| ② ₃ | 淤泥质粉质黏土 | 幅值 | 88.9~155.9 | 0.4~0.7 | 6.2~11.2 | 1.3~2.1 | 19.4~31.6 | 2.8~5.3 |
| | | 变异系数 | 0.125 | 0.120 | 0.122 | 0.170 | 0.171 | 0.235 |
| ② ₄ | 淤泥质黏土 | 幅值 | 97.9~140.2 | 0.4~0.7 | 6.1~11.5 | 1.3~2 | 16.2~33.9 | 3.2~5.7 |
| | | 变异系数 | 0.091 | 0.202 | 0.120 | 0.168 | 0.235 | 0.219 |

续表

| 层号 | 岩土名称 | 数据统计 | 波速 | 静探 | | | 十字板 | |
|----------------|---------|------|-------------------|------------------|------------------|------------|-------------------|--------------|
| | | | 横波 $v_s/(m/s)$ | 端阻力 q_c/MPa | 侧阻力 f_s/kPa | 摩阻比 n | 剪切强度 c_u/kPa | 灵敏度 S_l |
| ③ ₁ | 含黏性土粉砂 | 幅值 | 108.6~219.4 | 0.9~2.1 | 9.7~32.3 | 0.9~1.9 | 53.3~96.7 | 2.9~3.1 |
| | | 变异系数 | 0.172 | 0.262 | 0.295 | 0.256 | 0.214 | 0.017 |
| ③ ₂ | 粉质黏土 | 幅值 | 91.3~198.8 | 0.4~0.8 | 6.5~12.2 | 1.2~1.9 | 27.3~45.0 | 2.7~5.9 |
| | | 变异系数 | 0.170 | 0.173 | 0.184 | 0.171 | 0.170 | 0.290 |
| ④ ₁ | 淤泥质粉质黏土 | 幅值 | 111.2~167.6 | 0.4~0.8 | 7.4~13.8 | 1.3~2.3 | 20.5~34.3 | 2.6~3.4 |
| | | 变异系数 | 0.103 | 0.177 | 0.187 | 0.215 | 0.179 | 0.106 |

| | | | | | | | | |
|----------------|-----|------|---------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| ④ ₂ | 黏 土 | 幅 值 | 119.6 ~ 226.4 | 0.7 ~ 1.2 | 12.4 ~ 21.8 | 1.4 ~ 2.2 | 30.1 ~ 48.4 | 2.9 ~ 3.0 |
| | | 变异系数 | 0.146 | 0.193 | 0.183 | 0.165 | 0.176 | 0.018 |