

盾构区间基岩面探查的综合勘察法应用

姚燕明¹, 叶荣华¹, 王兰中²

(1.宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101; 2.浙江省工程物探勘察院, 浙江 杭州 310005)

摘要: 在软土城市轨道交通工程建设中, 沿线工程地质条件对盾构区间设计方案的影响较大, 局部地段的基岩分布往往直接影响到设计方案的可行性。而通过地质钻探与物探的相互对比, 是准确查明复杂地质条件的有效手段。在宁波市轨道交通2号线二期招宝山站-红联站区间的岩土工程勘察中, 采用浅层地震反射波法配合地质钻探进行联合勘察, 将物探的“线”与地质钻探的“点”结合起来, 通过相互印证和综合解释, 查明了场地下伏基岩面的埋深及起伏形态, 为盾构区间设计方案的稳定提供了可靠的地质依据。

关键词: 浅层地震反射波法; 地质钻探; 基岩面; 盾构隧道

中图分类号: U231+1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 05-0053-05

盾构法因其先进的施工工艺与不断成熟的施工技术, 以及施工安全性高、掘进速度快、对周边环境影响小、不受地面交通及气候条件影响等优点而得到广泛使用, 已成为城市轨道交通地下区间隧道的主要施工方法^[1-2]。宁波轨道交通在1号线、2号线一期工程建设中, 地下区间普遍采用盾构法施工, 盾构隧道穿越范围的地层多为海相淤泥质土或软黏土、冲海相粉土、粉砂和冲湖相软塑-可塑状黏性土, 选用盾构为土压平衡盾构, 刀盘为条幅式盘面, 开口率约40%。常规的土压平衡盾构对宁波市区典型软土地层的适应性好, 可以较好地控制盾构掘进姿态和地面沉降, 但不适用于岩石地层。因此, 局部地段的基岩分布往往直接影响到盾构区间设计方案的可行性。

地质钻探是直接手段, 是对点的勘探, 而物探是间接手段, 是对线的勘探。在基岩面起伏较大地段, 单靠地质钻探来查明场地工程地质条件成本高、效率低, 若能结合有效的物探方法, 不但能高效地解决工程实际问题, 还能节约成本、缩短勘察工期。浅层地震反射波法是一种重要的工程物探方法, 具有分辨率高、受地形起伏影响小、成果解释较直观等优点, 被广泛应用于覆盖层厚度、地层起伏形态、地裂缝、断层、采空区等探测中^[3-8]。本文以宁波市轨道交通2号线二期招宝山站-红联站

区间为例, 介绍了浅层地震反射波法结合钻探法的对比在盾构区间基岩起伏段勘察中的应用, 取得了较好的应用效果。

1 研究区概况

1.1 工程概况

宁波市轨道交通2号线二期招宝山站-红联站区间采用盾构法施工, 隧道外径为6.2 m, 区间长度约1417 m。线路下穿甬江, 受甬江江底冲刷线的影响, 设计对区间隧道线路纵坡进行了优化, 轨面高程最低点调整至-28.5 m, 下穿甬江后以2.8%的坡度上坡至红联站, 线路纵坡已接近《地铁设计规范》一般正线最大坡度的要求。根据初勘资料, 下穿甬江后Q5CZ5~Q5CZ7区段(长度约280 m)基岩面起伏较大, 表1为初勘钻孔揭示的基岩埋深及高程。结合设计方案, 可知初勘钻孔Q5CZ6、Q5CZ7揭示的凝灰岩顶面距隧道结构底板分别为6.9和6.6 m, 推测基岩面最高处(Q5CZ6、Q5CZ7之间)与隧道结构底板的最小距离仅2.8 m, 图1为基岩起伏段初勘地质纵断面。根据《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307-2012), 初勘阶段地下区间的勘探点间距宜为100~200 m, 本工程Q5CZ5、Q5CZ6、Q5CZ7之间的钻孔间距均在135 m左右, 因初勘钻孔间距较大, 图1中所示的

基岩面仅是根据相邻初勘钻孔资料推测得到的结果, 其与场地实际基岩面可能存在一定的差异.

表 1 初勘钻孔揭示的基岩埋深及高程

孔号	埋深/m	高程/m
Q5CZ5	50.2	-46.8
Q5CZ6	30.4	-27.6
Q5CZ7	26.8	-23.7

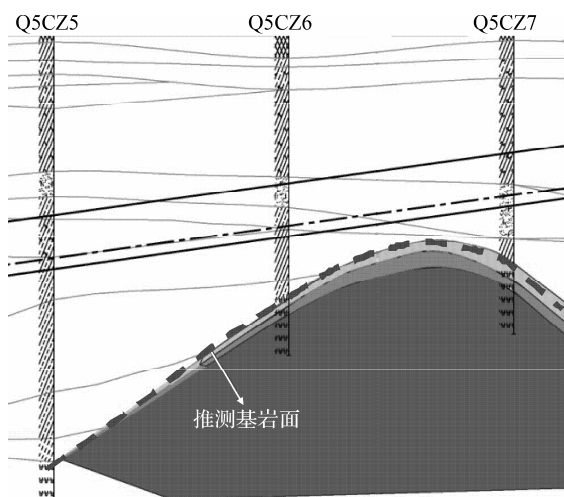


图 1 基岩起伏段初勘地质纵断面

考虑到基岩起伏段(Q5CZ5~Q5CZ7 区段)基岩面距隧道结构底板很近, 且有可能存在岩层侵入隧道结构线内, 此时, 盾构隧道施工时就会遇到“上软下硬”的复合地层, 复合地层对盾构机及盾构施工技术有更高的要求, 而常规的土压平衡盾构难以适应这类复合地层, 需要对盾构机进行重新选型和设计. 根据国内其他城市复合地层的盾构施工经验^[9-10], 为适应“上软下硬”的复合地层, 盾构机需配置复合式刀盘, 刀盘开口率和刀具布置也得相应调整. 此外, 下部岩层对刀盘的偏心荷载较大, 刀具在软硬结合面受力突变, 容易出现异常损坏, 可能需要带压换刀, 盾构掘进施工的难度和风险加大.

1.2 地层岩性特征

研究区地貌类型属于滨海冲湖积平原, 地势平坦, 区间渡口路高程在 2.74~3.16 m 之间. 场地前第四纪地层为侏罗系西山头组(J_{3x})灰黄色-青灰色凝灰岩, 岩石单轴饱和抗压强度在 22.3~57.1 MPa 之间, 标准值为 33.8 MPa, 属较坚硬岩. 场地第四纪地层发育, 中更新世-全新世地层发育齐全,

下穿甬江后厚度变化较大.

下穿甬江后场地表部分布有杂填土, 厚度为 0.7~3.1 m, 填土较薄处分布有黄褐色的硬壳层(①₂ 层粉质黏土), 厚度为 0.6~2.9 m; 场地中上部以海相淤泥质黏土或淤泥等软土为主, 包括①_{3c} 层淤泥质粉质黏土、②_{2b} 层淤泥质黏土、②_{2c} 层淤泥质粉质黏土、③₂ 层软塑状粉质黏土及④_{1b} 层淤泥质黏土, 局部夹厚度较大的冲海相砂土(③_{1b} 层粉砂); 场地中部主要为海相软塑状黏土(④_{2a} 层黏土); 场地下部主要为性质较好的可塑-硬塑状粉质黏土、砂土和凝灰岩, 其中⑤_{1b} 层可塑状粉质黏土的层顶标高为 -21.0~-34.8 m.

2 工作原理及地球物理场特征

2.1 浅层地震反射工作原理

浅层地震反射波法是以地下介质的物性差异为前提, 当地震波从地面人工震源向地下各个方向传播时, 由于不同地层具有不同的物性参数, 地震波会在不同地层的界面处产生反射, 并遵循反射定律. 反射波回到地面的时间与界面埋深有关, 通过反射波的时距曲线(见图 2), 可得到地下介质的变化情况, 从而判断出探测范围内岩土的空间分布规律.

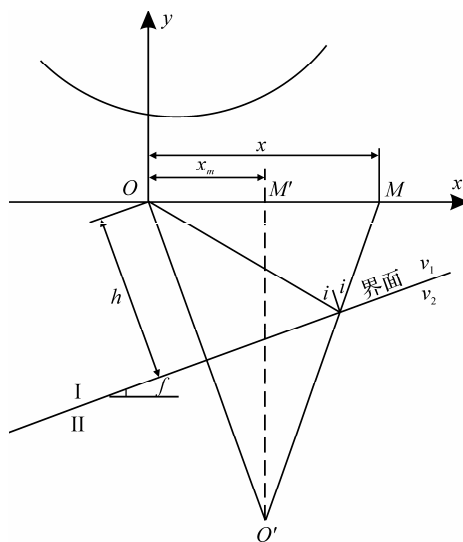


图 2 反射波的时距曲线

反射波时距曲线的表达式为:

$$t = \sqrt{x^2 - 2xx_m + 4h^2} / v_1, \quad (1)$$

$$x_m = 2h \sin \varphi, \quad (2)$$

式中: t 为反射波传播时间(s); v_1 为上覆介质的波

速(m/s); x 为震源至测点的距离(m); x_m 为震源与虚震源在地面上的投影距离(m); h 为震源至反射界面的垂直距离(m); φ 为反射界面的倾角($^{\circ}$).

2.2 地球物理场特征

在研究区地层中, 第四系覆盖层与下伏基岩的物性(速度、密度、波阻抗等)差异较大, 为采用浅层地震反射勘探提供了良好的地球物理前提. 表 2 为研究区各岩土层的物性参数.

表 2 物性参数统计

岩土层	平均横波速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$
填土-淤泥质土	130~140
粉砂-黏性土	200~300
全-中风化凝灰岩	>500

3 野外工作方法

3.1 测线布置

为查明 Q5CZ5~Q5CZ7 区段的基岩埋深及起伏状态, 详勘阶段在加密勘探孔的基础上, 采用浅层地震反射波法对基岩起伏段进行了地球物理勘探. 根据区间线位, 沿渡口路两侧各布置勘探测线 1 条(测线 1-1'、2-2'), 测试长度分别为 310 和 334 m, 共计 3 204 个检波点, 测线里程、坐标等见表 3.

表 3 测线信息一览表

测线	里程	要素点	X(N)坐标	Y(E)坐标	长度/m
1-1'	AK35+800	起点	620 900.44	114 214.56	310
	AK36+110	终点	620 995.13	113 920.70	
2-2'	AK35+776	起点	620 898.42	114 239.48	334
	AK36+110	终点	612 003.22	113 923.30	

3.2 测试仪器及参数

测试仪器为美国 Geomitics 公司 NZXP48 型数字地震仪, 采用通频带接收、连续、自动记录方式, 检波器为重庆地质仪器厂 CDJ-Z38 型横波检波器. 根据野外试验, 检波器采用石膏耦合, 锤击震源为 24 磅榔头, 具体工作参数为: 采样长度 1.0 s, 采样率 0.125 ms, 道数 24 道, 道间距 2.0 m.

3.3 数据采集

野外数据采集时, 检波器一致性良好, 振幅误差小于 5%, 相位差小于 0.4 ms, 各单炮原始记录经核验均符合《浅层地震勘查技术规范》(DZ/T 0170-1997)的要求, 图 3 为典型地震波单炮记录.

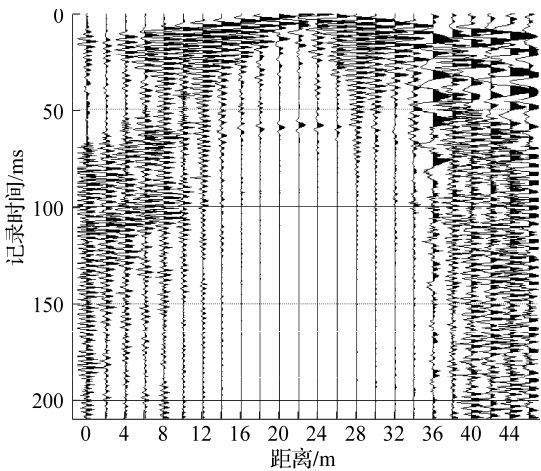


图 3 典型地震波单炮记录

4 物探成果及钻孔对比

4.1 地震资料处理

野外采集的数据文件进行整理后, 对个别畸变点进行剔除或平差, 形成新的文件序列, 利用数字地震仪配套软件进行数据处理, 地震数据处理流程如图 4 所示.

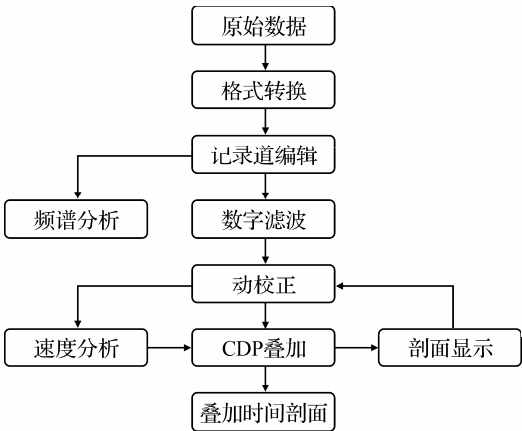


图 4 地震数据处理流程

4.2 物探成果解释

原始地震数据经处理, 可得到反映地层信息的叠加时间剖面, 图 5 为测线 1-1'经过处理后的地震叠加时间剖面(纵坐标记录时间取 710 ms 左右). 根据剖面反射波组的特征, 结合地球物理场特征及地质钻探成果, 将场地划分为 3 个物性层组(填土-淤泥质土层、粉砂-黏性土层和全-中分化凝灰岩层), 其中反射波组 T0、T1 分别为填土-淤泥质土层与粉砂-黏性土层、粉砂-黏性土层与全-中风化凝灰岩层的推测分界面.

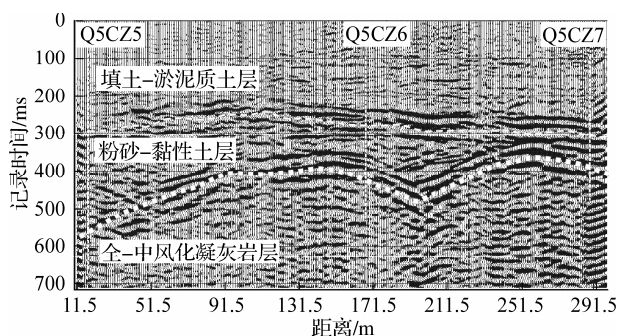


图5 地震叠加时间剖面(测线 1-1')

由图5可以看出,记录时间210~280 ms之间存在一个反射波组,其波组清晰、连续,同相轴起伏平缓,推测为反射波组 T0,即填土-淤泥质土层与粉砂-黏性土层的分界面;记录时间330~535 ms之间存在另一个反射波组,其波组清晰、连续,同相轴起伏较大,呈M型起伏,推测为反射波组 T1,即粉砂-黏性土层与全-中风化凝灰岩层的分界面。通过分析可知,测线范围内填土-淤泥质土层的底板高程为-10.2~-15.5 m,相对较平缓;全-中风化凝灰岩的顶板高程为-22.4~-49.9 m,相对起伏较大,自北向南呈M型起伏。

4.3 钻孔对比

Q5CZ5~Q5CZ7 区段内在详勘阶段布置有静力触探孔 Q5XJ8 及钻孔 Q5XZ11、Q5XZ13~Q5XZ16, Q5CZ7 之后布置有详勘钻孔 Q5XZ17, 图6为典型钻孔(Q5XZ16)的岩芯照片,表4为详勘勘探孔揭示的基岩埋深及高程。

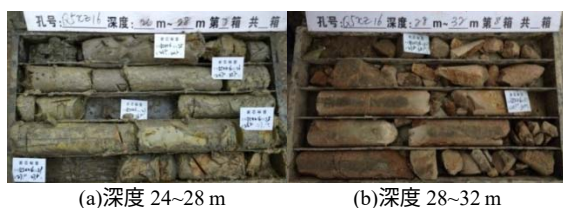


图6 典型钻孔岩芯

表4 详勘钻孔揭示的基岩面埋深及高程

孔号	埋深/m	高程/m	孔号	埋深/m	高程/m
Q5XZ11	33.7	-30.8	Q5XZ15	30.6	-27.6
Q5XZ13	30.3	-27.5	Q5XZ16	27.9	-25.1
Q5XZ14	40.5	-37.7	Q5XZ17	32.4	-29.2

注: Q5XJ8 为静力触探孔, 孔深 40.5 m, 相应高程 -37.8 m, 该深度未遇基岩。

由表4可知,基岩起伏段详勘钻孔揭示的基岩面高程为-25.1~-30.8 m,结合初勘成果,得到

Q5CZ5~Q5CZ7 区段基岩面由深→浅→深→浅→深,基岩面高程分别为-46.8、-27.5、-37.7、-23.7和-29.2 m,基岩面自北向南呈M型起伏,物探反演成果与地质钻探揭示的地层基本吻合,验证了浅层地震反射波法的可靠性。

5 综合分析

综合浅层地震反射波法与地质钻探两者的勘察成果,通过相互比对和综合解释,查明了场地下伏基岩面的埋深及起伏形态,钻孔 Q5CZ6、Q5CZ7 之间的基岩面在初勘阶段推测为凸起,详勘阶段综合判断后表现为下凹,研究区基岩面的起伏形态呈M型,图7为基岩起伏段详勘地质纵断面图。

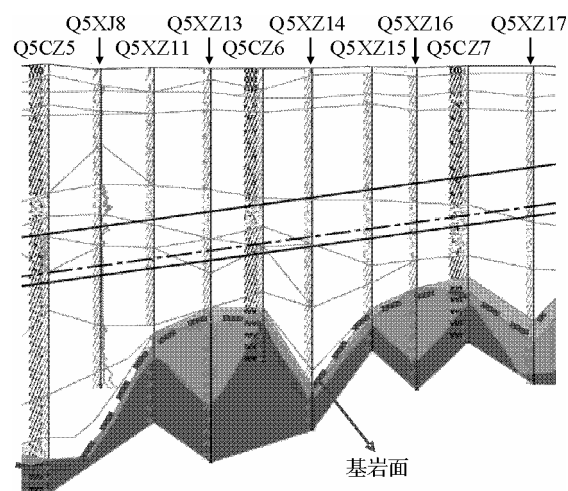


图7 基岩起伏段详勘地质纵断面

结合设计方案,分析可知招宝山站-红联站区间 Q5CZ5~Q5CZ7 区段虽基岩面起伏较大,但基岩未侵入隧道结构线内,基岩面最浅处与盾构隧道结构底板的距离尚有 6.0 m 左右。盾构隧道穿越范围的地层与1号线、2号线一期盾构区间涉及地层基本相同,仍为典型软土地层,包括②_{2b}层淤泥质黏土、③_{1b}层粉砂、③₂层软塑状粉质黏土、④_{1b}层淤泥质黏土和④_{2a}层软塑状黏土,盾构掘进时不会遇到“上软下硬”的复合地层,常规的土压平衡盾构可较好地适应本区间的盾构施工,无需对盾构机进行重新选型和设计,掘进施工风险可控。

6 结论

(1)采用浅层地震反射勘探,将场地地层划分为3个物性层组,分别为填土-淤泥质土层、粉砂-

黏性土层与全-中分化凝灰岩层, 其中基岩埋深变化较大, 基岩面自北向南呈M型起伏, 物探推测成果与地质钻探揭示的地层基本吻合。

(2)通过浅层地震反射波法与地质钻探的联合应用, 查明了场地下伏基岩面的埋深及起伏形态, 结合设计方案, 分析得到基岩未侵入隧道结构线内, 盾构隧道穿越范围仍为宁波典型软土地层, 勘察成果为盾构区间设计方案的可行性提供了可靠的地质依据。

(3)采用有效的物探方法可提高对复杂地质条件的认识, 能高效地解决工程实际问题。浅层地震反射波法与地质钻探相结合的方法在探查基岩面的埋深及起伏形态方面具有显著的应用效果, 本文取得的成果在类似基岩起伏段工程勘察中具有推广意义。

参考文献:

- [1] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12):1849-1857.
- [2] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构平衡控制理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5):61-68.
- [3] 曹江涛, 翟伟强, 方勇. 浅层地震反射波法在山区工程勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2014(8):84-88.
- [4] 廖全涛, 王建军. 浅层地震反射法在武汉长江隧道水上勘察中应用[J]. 水文地质工程地质, 2006(3):121-123.
- [5] 王彪, 陈剑杰, 马勋元. 浅层地震勘探在第四纪松散地层划分中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1):12-16.
- [6] 刘加文, 耿生明, 周鹏. 用浅层地震技术探查基岩构造分布的探讨[J]. 工程地质学报, 2011, 19(S):455-458.
- [7] 吕志军, 陈峰. 浅层地震反射法在跨海隧道地质勘察中的应用[J]. 公路工程, 2014, 39(5):215-219.
- [8] 韩松. 浅层地震反射在不良地质体勘察中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2016(6):11-15.
- [9] 谭顺辉. 深圳地区复合地层盾构针对性设计与选型探讨[J]. 隧道建设, 2014, 34(6):582-587.
- [10] 金华. 南京地铁3号线新庄站—鸡鸣寺站区间复合地层内盾构掘进控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2016(6):117-121.

Application of comprehensive survey method in the bedrock surface investigation of shield tunnel

YAO Yan-ming¹, YE Rong-hua¹, WANG Lan-zhong²

(1.Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315101, China;

2.Zhejiang Engineering Geophysical Prospecting Institute, Hangzhou 310005, China)

Abstract: In the construction of urban rail transit in soft soil area, the route's engineering geologic conditions can seriously affect the design of shield tunnel, the distribution of bedrock in some specific sections often affects the feasibility of the design directly. However, the comparison of the data from geological exploration with the geophysical prospecting proves to be the most effective way to ascertain the complex geological conditions. The shallow seismic reflection method and the geological drilling are used jointly in the engineering survey of the shield tunnel between the Zhaobaoshan station and Honglian station of line 2 in Ningbo rail transit. The buried depth and fluctuant form of the bedrock surface are obtained by the comparison and comprehensive interpretation of the geophysical survey line and geological drilling points, which provides a reliable geological basis for the design of shield tunnel.

Key words: shallow seismic reflection method; geological drilling; bedrock surface; shield tunnel

(责任编辑 韩 超)