

高速铁路黄土隧道明洞段地基处理方法研究

刘鹏飞

(中铁第五勘察设计院集团有限公司,北京 102600)

【摘要】 黄土地区高速铁路隧道洞口明挖段地基处理方法的选择应着眼于消除湿陷性与控制沉降变形的双重标准。以兰州市榆中县某黄土高速铁路隧道洞口明挖段地基处理为例,采用水泥土挤密桩进行地基处理时发生塌孔、缩孔,变更为钻孔桩并在桩顶设置钢筋混凝土刚性托板的桩板结构处理方案后,地基处理效果良好。说明了黄土隧道明洞段地基处理方法应结合黄土含水率、湿陷性等诸多因素通过技术经济比较后合理地选用。

【关键词】 高速铁路;黄土隧道明洞;地基处理;水泥土挤密桩;柱锤冲扩桩;桩板结构

【中图分类号】 U 25

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2017.04.001

Study on Foundation Treatment Method for Open Cut Section of Loess Tunnel in High-speed Railway

Liu Pengfei

(China Railway Fifth Survey & Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 102600, China)

【Abstract】 The choice of foundation treatment method for open cut section of high-speed railway tunnel in loess area should focus on eliminating double standards of collapsibility and controlling settlement and deformation. In this paper, Yuzhong county, Lanzhou city, taking a loess high-speed railway tunnel excavation section of the foundation treatment as an example, the use of cement-soil compaction pile for foundation treatment occurs when the hole collapsed and shrinkaged, changed to bored pile, and reinforced concrete rigid support plate is set to the top of the pile, the pile-plank structure has good effect of foundation treatment. It is shown that the method of foundation treatment in loess tunnel should be selected rationally according to the technical and economical comparison with the factors such as water content, collapsibility and so on.

【Key words】 high-speed railway; open cut section of loess tunnel; foundation treatment; cement-soil compaction pile; column hammer-expansion pile; pile-plank structure

0 引言

黄土地区高速铁路隧道洞口段大多为新黄土,具湿陷性,在遇水渗流及较大荷载作用下均可能产生较大沉降。由于高速铁路普遍采用无砟轨道,对线路的平顺性及工后沉降要求极其严格(工后沉降不得大于15 mm)。为控制高速铁路隧道的工后沉降,地基处理的方法应具备控制沉降变形与消除湿陷性的双重标准,另外地基处理的方法选择还需兼顾方便快捷、经济合理的原则^[1]。因此,对于湿陷性黄土隧道洞口明洞段地基处理方法的研究意义重大。

1 工程背景

1.1 工程概况

某高速铁路隧道位于兰州市榆中县,隧道进

口明洞段长约38 m。原设计明挖段地层为第四系上更新统砂质、黏质黄土(Q₃^{al}),基底承载力为150 kPa, Q₃黄土为松软土,具IV级自重湿陷性,湿陷厚度22~27 m。进口38 m明挖段基底设计采用直径为 $\phi 30$ cm的水泥土挤密桩进行加固处理,桩间距60 cm,等边三角形布置,其中DK983+685~DK983+708.7段桩长15 m, DK983+708.7~DK983+723段桩长9 m,桩顶均采用三七灰土换填,仰拱底部厚1 m。

1.2 现场试桩情况

2013年10月,现场隧道进口明挖段进行水泥土挤密桩试桩2处,具体情况为:①JK-1号试桩里程在DK983+716,位于中线左侧5.0 m处,孔顶高

程 1886.835 m, 试桩钻进至设计标高 1874.534 m, 钻入深度 12.3 m, 拔出钻杆后出现缩孔现象, 孔顶以下剩余桩长为 1.0 m, 钻孔揭示地层为砂质黄土, 缩孔段土体以软塑为主; ②JK-2 号试桩里程在 DK983+699, 位于中线右侧 5.0 m 处, 孔顶高程 1886.890 m, 试桩钻进至设计标高 1868.534 m, 钻入深度 18.4 m, 拔出钻杆后出现缩孔现象, 孔顶以下剩余桩长为 0.9 m, 钻孔揭示地层为砂质黄土, 缩孔段土体以软塑为主。

1.3 场地地基黄土含水率检测

现场挖取 3 个探坑取土样进行含水率检测, 具体布置为: ①TK-1 号探坑在 DK983+690 里程中线左侧 5.5 m 处, 坑顶高程为 1886.919 m, 深度 12.5 m; ②TK-2 号探坑在 DK983+705 里程中线右侧 5.5 m 处, 坑顶高程为 1886.874 m, 深度 7.0 m; ③TK-3 号探坑在 DK983+720 里程中线左侧 5.5 m 处, 孔顶高程为 1886.829 m, 深度 7.0 m。根据地质探坑检测结果显示: ①TK-1 号探坑取样实测含水率为: 孔顶下 0.0~3.0 m 黄土含水率为 22.2%~24.5%, 孔顶下 3.0~5.5 m 黄土含水率为 26.5%~28.3%, 孔顶下 6.0~12.5 m 黄土含水率为 20.4%~23.6%; ②TK-2 号探坑取样实测含

水率为: 孔顶下 0.0~1.0 m 黄土含水率为 21.6%, 孔顶下 1.0~4.0 m 黄土含水率为 23.2%~24.9%, 孔顶下 4.0~7.0 m 黄土含水率为 21.4%~23.3%; ③TK-3 号探坑取样实测含水率为: 孔顶下 0.0~4.0 m 黄土含水率为 20.4%~24.1%, 孔顶下 4.0~5.0 m 黄土含水率为 26.0%, 孔顶下 5.0~7.0 m 黄土含水率为 22.3%~23.7%。

1.4 场地地基承载力检测

现场采用静力触探法对该段明洞仰拱基底以下承载力进行了检测, 根据检测结果承载力在 110~150 kPa 之间, 小于地基承载力设计值。

1.5 场地地基黄土湿陷性核查

施工单位在 TK-1 号、TK-2 号、TK-3 号探坑取土样, 并送有资质的土工试验室进行检测。设计单位进行现场指导, 监理单位全程监督取样、送样。土样送检结果无湿陷性, 设计单位根据试验室检测数据, 判定场地地基黄土不具有湿陷性。

2 黄土隧道地基加固方法

结合《铁路工程地基处理技术规程》(TB 10106—2010)^[2]和《地基处理手册》^[3]有关湿陷性黄土地基处理内容综合分析整理出湿陷性黄土地基的常用处理方法, 见表 1。

表 1 湿陷性黄土地基的常用处理方法

方法名称	适用范围
砂石垫层法	处理厚度小于 2 m, 要求下卧土质良好, 水位以下施工时应先降水, 局部或整片处理
灰土垫层法	处理厚度小于 3 m, 要求下卧土质较好, 必要时下设素土垫层, 局部或整片处理
强夯法	厚度 3~12 m 的湿陷性黄土, 环境许可, 局部或整片处理
灰土挤密桩法	厚度 5~15 m 湿陷性黄土, 地下水位以上, 局部或整片处理
水泥土挤密桩法	厚度 5~15 m 湿陷性黄土, 地下水位以上, 局部或整片处理
柱锤冲扩桩法	厚度 5~15 m 湿陷性黄土, 地下水位以上, 局部或整片处理
旋喷桩法	一般用于加固地面以下 20 m 范围内已有结构物地基, 适用于局部处理
钢筋混凝土桩网(筏)结构	厚度 5~30 m 的饱和黄土
钢筋混凝土桩板结构	厚度 5~30 m 的饱和黄土

纵观湿陷性黄土地区高速铁路隧道明洞段既有的地基处理方法, 目前主要有水泥土挤密桩、柱锤冲扩桩、桩板结构等。以下重点分析水泥土挤密桩、柱锤冲扩桩、桩板结构这三种地基加固措施。

2.1 水泥土挤密桩

水泥土挤密桩通过成孔过程中的横向挤压作用, 桩孔内的土被挤向周围, 使桩间土得以挤密, 然后将备好的水泥土分层填入桩孔内, 并分层捣实至设计高程。桩体与挤密的桩间土组成复合地基, 共同承受上部荷载。

水泥土挤密桩的施工工序为成孔、填料制备、夯实成桩三步。第一步成孔的方法有沉管成孔与钻孔夯扩两种, 相比较而言, 钻孔夯扩法挤密效果不如沉管成孔法。第二步填料制备是将水泥和土按一定配合比进行拌合, 并确定合适的水泥土配合比(质量比)及水泥土的最佳含水率。第三步夯实成桩采用机械夯填, 其中关键的技术在于确定合理地夯实参数, 因此应对锤重、单位夯击能、落距、水泥掺和量和含水率等参数进行试验确定, 使桩间黄土的平均挤密系数 ≥ 0.93 ^[4]。

2.2 柱锤冲扩桩

柱锤冲扩桩的加固机理主要有以下四点:①成孔及成桩过程中对原土的动力挤密作用;②对原土的动力固结作用;③冲扩桩充填置换作用(包括桩身及挤入桩间土的骨料);④生石灰、水泥粉与桩间土的物理-化学作用(化学置换)。

柱锤冲扩桩的施工工序为:先采用钻机或重锤冲击成孔,然后分层填料(一般采用灰土或水泥土),通过重锤自由落体夯实成桩,并夯扩挤密桩周土体,从而形成由桩体与桩间土共同承担上部荷载的复合地基,以提高地基承载力、减小地基沉降^[5]。

2.3 桩板结构

桩板结构是研究提出的一种处理深厚松软黄土及湿陷性地基的新型结构^[6]。该结构主要由钢筋混凝土桩基、桩周土体和钢筋混凝土托板组成,其主要工作机理为通过托板将上部荷载传到桩体,桩体把荷载扩散到桩间土、下卧硬层等,从而起到稳定和控制在沉降变形的作用。桩板结构形式示意图见图1、图2。

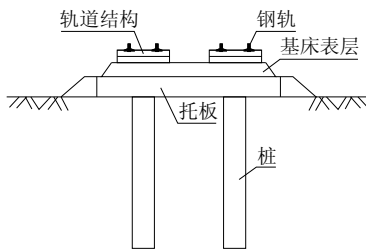


图1 桩板结构形式横断面示意图

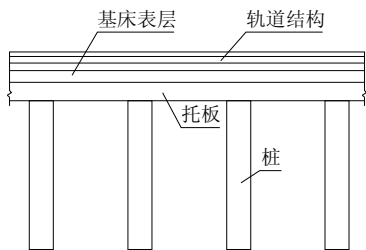


图2 桩板结构形式纵断面示意图

桩板结构设计应根据结构自身的特性,依据表2所列的荷载,按最不利组合工况进行设计。

表2 桩板结构设计荷载

荷载分类	荷载名称
主力-恒载	结构构件及轨道结构自重;混凝土收缩和徐变的影响;基础变位的影响;基床表层自重
主力-活载	列车竖向静活载;列车竖向动力作用;离心力;横向摇摆力
附加力	制动力或牵引力;温度变化的影响
特殊力	地震力;施工临时荷载

桩板结构属于结构力学中的多次超静定结构,结构形式及受力分析均较为复杂,采用简化的计算模型见图3、图4。图中 L 为列车驶入距离, q_1 和 q_1' 为列车活载, q 为作用在托板上的均布荷载(包括恒载、列车活载)。水平荷载对托板受力影响较小,故只在计算桩的内力和变形中考虑。计算中不考虑土对托板的支撑作用^[7]。

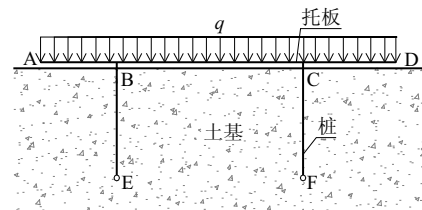


图3 桩板结构横断面计算简图

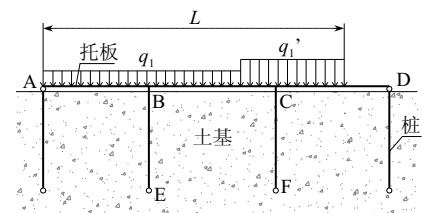


图4 桩板结构纵断面计算简图

桩板结构的施工顺序为:场地平整→填筑基床表层→桩孔定位→埋设护筒→钻孔→检孔及清孔→下钢筋笼→灌注混凝土桩→破桩、检测→凿除桩头至桩顶设计高程→浇注板底混凝土找平层→立模浇注钢筋混凝土托板→板两侧夯填6%水泥改良土、压实。

3 地基加固处理方法研究

3.1 对原设计变更原因分析

1) 雨季降水下渗引起土体含水率增大

上更新统砂质、黏质黄土干燥条件下是呈硬塑—坚硬状。黄土突出的特殊性是垂直节理发育,一旦有雨量较大的降水条件,坡面地表水可沿垂直节理下渗一定深度,并浸润软化垂直节理周边黄土,使其含水量增加,强度降低,形成软弱的直立的网格状“过湿带”^[8]。

隧道进口于2013年5月3日开始施工开挖,因受2013年9—10月榆中地区降雨丰富的影响,及施工开挖中边坡清表,有利于地表降水的下渗,导致第四系上更新统冲积砂质黄土含水率较勘察设计时有所增大。明挖段基底以下含水率增大,呈软塑状态,承载力也有所降低。挤密桩施工时成孔困难,易发生坍孔、缩孔。

2) 场地黄土湿陷性变化的影响

施工图设计时场地湿陷等级及湿陷土层厚度是按照原地面高程开始计算的。由于隧道明洞的开挖深度达到 15~20 m, 上部大多数具有湿陷性的黄土被挖除, 湿陷性黄土的试验压力发生变化, 导致黄土湿陷性系数的测定发生变化。

另外, 由于黄土的湿陷性与土体含水率相关联, 总体来说, 含水率越大湿陷性越弱^[9]。由于试桩时测定土体的含水率在 20.4%~28.3%之间, 所以现场湿陷性核查场地地基黄土不具有湿陷性。

3.2 处理方法的技术性选择依据

1) 水泥土挤密桩的适用性分析

水泥土挤密桩是一种比较成熟的地基处理方法, 在西北湿陷性黄土地区的地基处理工程中已广泛使用, 积累了一定的经验。大量的试验研究资料和工程实践表明, 水泥土挤密桩对于地下水位以上的湿陷性黄土, 消除土的湿陷性及提高承载力都是有效的。当土体含水率低于 12% 时, 成孔较困难; 当土体含水率大于 24%、饱和度超过 65% 时, 在成孔和拔管过程中, 桩孔及周围容易缩颈和隆起, 或成桩后桩心软化, 挤密效果差。

隧道进口明洞段地基处理施工时恰逢雨季, 丰富的降雨下渗导致土体含水率增大至 20.4%~28.3%, 土体普遍呈软塑状, 所以试桩出现缩孔、缩颈现象, 导致成桩困难。

2) 柱锤冲扩桩的适用性分析

柱锤冲扩桩目前仍处于半理论半经验状态, 成孔及成桩工艺及地基挤密固结效果直接受土质条件的影响。柱锤冲扩桩在湿陷性黄土地区高速铁路隧道地基处理技术已通过郑西高铁的修建得以实践。根据实践经验得出, 柱锤冲扩桩对于地下水位以上的湿陷性黄土最大处理深度可达 20~30 m, 且具备设备简单、施工快捷、投资经济等优点。但对于含水率高的软塑状黄土, 由于成孔困难, 甚至于无法成孔, 桩底及桩间土挤密效果、桩身质量等难以保证。

本项目施工时因雨季地表降水的下渗导致地基黄土含水率增大, 呈软塑状, 所以柱锤冲扩桩法对于本项目实际施工条件不具备适用性。

3) 桩板结构的适用性分析

在路基、桥梁与隧道相接的隧道洞口段, 由于不同的结构物刚度差异大, 不均匀沉降控制困难。桩板结构适用于沉降控制困难的深厚层软弱地基、湿陷性黄土地基的提速加固处理。由于桩周土体对桩基的侧向抗力, 板桩结构纵横向刚度大; 因桩基竖向

穿越松软土层, 可严格控制高速铁路的工后沉降。

根据施工现场高含水率软塑状黄土地基水泥土挤密桩的试桩出现缩颈、成孔困难的现象, 为确保明洞段地基加固处理质量, 据实对水泥土挤密桩施工方案进行了调整。桩板结构设计中桩基采用钻孔灌注桩, 属摩擦桩, 按桩径 1.0 m 考虑, 计算出满足承载力要求的桩长为 59 m。托板在满足结构设计要求的前提下, 厚度在 0.75~1.2 m 范围内造价较经济, 设计中托板厚度选用 0.8 m。桩和板的裂缝宽度计算值小于 0.25 mm。桩位布置形式钻孔桩横向间距 4.6 m, 纵向间距为 3~7 m。

通过沉降计算分析得出本项目工后最大沉降值小于 8 mm, 控制沉降效果显著, 满足规范要求。

3.3 处理方法的经济性选择依据

不同地基处理方法有不同的处理深度适应范围, 对本项目湿陷性、软弱性黄土地基采用水泥土挤密桩、柱锤冲扩桩及桩板结构的处理方案进行经济性比较。比较中采用替代方案进行对比分析, 即为达到相近的地基处理效果目的, 完全用另一种地基处理方案代替。根据表 3 可见采用桩板结构具有明显的经济优势。

表 3 地基处理经济性比较

处理方案	总投资估算/万元
水泥土挤密桩	448.1
柱锤冲扩桩	570.9
板桩结构	306.5

4 结 语

1) 水泥土挤密桩主要适用于处理地下水位以上浅层湿陷性黄土, 对含水率高及饱和度高的软塑状黄土成桩困难。

2) 柱锤冲扩桩主要适用于处理地下水位以上浅层及中厚层湿陷性黄土, 对含水率高及饱和度高的软塑状黄土成桩困难、处理效果难以保证。

3) 桩板结构对加固湿陷性黄土地基具有良好的效果和经济效益, 特别是针对深层湿陷性黄土地基和软弱黄土地基具有明显的优势。其既能满足工后沉降要求, 又能有效地减少各结构物工后沉降的差值^[10]。

4) 由于黄土地区地质情况的复杂性、隐蔽性和动态发展的特性, 勘测与施工期间受不同的气候、水文等因素的影响, 导致场地工程地质条件发生较明显的变化, 需通过试桩等方法对原设计方案的适宜性进行分析验证后, 选择最优的施工方案。

(下转第 199 页)

随着试样脆性增强,声发射活跃时间段在缩短;并且,试样脆性越强,峰值前的塑性变形(屈服)段越短。

3)试样在不同的变形阶段具有不同的声发射特征。压密阶段,只有少量声发射信号产生;弹性变形阶段,前期声发射能量无明显变化,后期声发射能量增加,说明此时原有裂纹重新开启或新产生裂纹;塑性(屈服)阶段,声发射能量大幅度增加,可明显区别出此阶段,且随着试样脆性增强,此阶段的持续时间会缩短;破坏阶段,声发射能量达到最大值,且随着试样脆性增强,能量最大值也在增大;峰值之后,随着试样脆性增强,声发射活动的持续时间在变短。

4)试样的脆性指数与声发射能量最大值满足一定的函数关系,这为试样脆性指数的计算提供了新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] Andreev G E. Brittle Failure of Rock Materials: test Results and Constitutive Model[M]. Netherlands: A. A. Balkema Press, 1995.
- [2] 陈 颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报,1997,20(4):312-322.
- [3] 张 明,李仲李,杨 强,等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2493-2501.
- [4] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission[J]. Rock Mech Rock Engng, 2005, 38(1): 1-19.
- [5] Nicsiar M, Martin C D. Evaluation of methods for determining crack initiation compression tests on low-porosity rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 471-479.
- [6] 赵兴东,唐春安,李元辉,等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3673-3678.
- [7] 文圣勇,韩立军,宗义江,等. 不同含水率红砂岩单轴压缩试验声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术,2013,41(8):46-52.
- [8] 秦 虎,黄 滚,王伟忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1115-1120.
- [9] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503.
- [10] Morley A. Strength of Material[M]. London: Longman Green, 1944: 71-72.
- [11] Heteny M. Handbook of Experimental Stress Analysis[M]. New York: John Wiley, 1966: 23-25.
- [12] Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks[M]. London: McGraw Hill, 1967: 44-47.
- [13] 李庆辉,陈 勉,金 衍,等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报,2012, 31(8): 1680-1685.
- [14] 袁振明,耿荣生. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005:1-4.

收稿日期:2017-03-06

(上接第166页)

参 考 文 献

- [1] 屈耀辉,武小鹏,米维军,等. 黄土区高速铁路挤密桩地基沉降控制效果研究[J]. 铁道工程学报,2011(9): 30-35.
- [2] 中华人民共和国铁道部. TB 10106-2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- [3] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:835-853.
- [4] 肖广智. 不良、特殊地质条件隧道施工技术及其实例(三)[M]. 北京:人民交通出版社,2016: 68-72.
- [5] 屈耀辉,武小鹏,米维军,等. 黄土区高铁柱锤冲扩桩地基沉降控制效果研究[J]. 铁道工程学报,2012(1): 21-25.
- [6] 苏 谦,李安洪,丁兆锋,等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[J]. 铁道建筑技术,2007(2):1-4.
- [7] 姚裕春,李安洪,罗照新,等. 郑西客专湿陷性黄土地基处理技术研究[J]. 铁道工程学报,2013(9):15-19.
- [8] 何振宁. 铁路隧道疑难工程地质问题分析—以30多座典型隧道工程为例[J]. 隧道建设,2016,36(6): 636-665.
- [9] 王小强. 晋西北大厚度湿陷性黄土特征分析及处理措施—以山西保德某氧化铝厂场地为例[J]. 岩土工程技术,2016,30(1):33-38.
- [10] 张 然. 浅埋式桩板结构在宝兰客运专线湿陷性黄土短路基中的应用研究[J]. 铁道标准设计,2014,58(6): 32-35.

收稿日期:2017-05-04