

文章编号: 1673-9469 (2017) 01-0024-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.006

湿陷性黄土区客运专线车站工后不均匀沉降初探

田霄峰¹, 罗会武², 陈培帅²

(1. 中交二航局六分公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中交二航局技术中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 结合现场监测数据和地质勘察资料, 对具有一定坡度和深厚填土区域地基处理失效的原因进行了探讨。得到如下结论: (1) 在黄土地区地面沉降可分为4个阶段即增长期、平稳期、加速期、以及最终稳定期, 黄土的沉陷是造成沉降再次加速的原因。建议黄土地区沉降监测应该予以加长, 以确定最终的稳定期。(2) 黄土的沉陷不仅使地表发生不均匀沉降, 也会改变黄土区桩基的力学性质, 造成桩基下部土体的变形。单纯依赖桩的刚度来控制结构变形是存在风险的, 也应该控制桩侧土体变形。(3) 在具有坡度的黄土区域, 地面标高较低的一侧土体胶结作用较弱, 且该区域承担更大的上部填土荷载, 这是导致地面标高低的区域发生更大变形的原因。

关键字: 工后沉降; 湿陷性黄土; 不均匀填土; 沉降控制

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Discussion on differential settlement of the station of passenger dedicated line in collapsible loess zone

TIAN Xiaofeng¹, LUO Huiwu², CHEN Peishuai²

(1. No.6 Eng. Co., Ltd. of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., 430040, China;

2. Technology Center of CCCC Second Harbor Engineering Co Ltd, Wuhan 430040, China)

Abstract: The reason of the failure of foundation treatment in a certain slope and deep artificial fill area is investigated by analyzing the site investigation and the settlement observation. The useful conclusions can be drawn: (1) the settlement in collapsible loess zone can be divided into 4 stages: the growth period, the stable period, the acceleration period and the last stable period. The increase of the rate of the ground subsidence is caused by the collapse of loess soil. The settlement observation time is suggested to be longer to assure the settlement of the construction in the last stable period. (2) the collapse of loess soil not only cause the differential ground subsidence, but also change the mechanical characteristics of pile foundation. Only relying on the stiffness of pile foundation to control the displacements of structure is dangerous, but the deformation of soil near the pile foundation should be considered as well. (3) When the foundation of the construction is in a certain slope, the cementation of soil grains in a low height is weaker than those in a high height, which causes the low area deforming largely.

Key words: post-construction settlement; collapsible loess; uneven deep fill soil; settlement control

过去铁路路基工程设计主要满足强度指标, 路基工后沉降量控制标准为 30~50 cm, 由于控制标准低, 所以在黄土地区修建铁路时, 对湿陷性黄土地基处理的情况不多。现阶段高速铁路在黄土地区得到了迅猛发展, 而高速铁路对路基及相关设施有较为苛刻的沉降要求, 这导致大量地基需要被处理。

由于缺乏相关经验, 近年来广大工程师和学者在这方面做出了诸多探究性工作。徐实^[1]长时间观测灰土挤密桩处理后黄土路基的工后沉降量, 找出黄土路基工后沉降规律, 为黄土地基处理措施的选择提供借鉴。黄雪峰^[2]论述了大厚度自重湿陷性黄土地基处理的原则并探讨了大厚度自重湿陷性黄土地基

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(51379200)

作者简介: 田霄峰(1984-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 副总工, 从事道路桥梁方面的研究。

整片处理、局部处理及多种处理方法的优缺点及适用性。张戎令^[3]着重对不同水灰比和浆材掺量的黄土进行试验,确定出合理浆液配合比,并将其应用到实际工程中,同时用不同检测方法对比,分析注浆效果。齐静静^[4]分析了自重湿陷性黄土浸水过程中桩侧负摩阻力的变化规律及湿陷变形对基桩竖向承载力性能的影响。朱彦鹏^[5]认为桩周土体沉降速率变化对桩身轴力改变影响并不大,对桩侧负摩阻力的改变影响较小,中性点位置变化很小,而不影响负摩阻力的极限值。李金平^[6]归纳出柱锤冲扩桩复合地基的荷载传递机理,得出适当提高桩体和褥垫层的弹性模量可以有效的提高复合地基的承载力及复合地基中桩-土荷载分担比,减小复合地基沉降量。王长丹^[7]得到了湿陷过程主要分为显著湿陷变形阶段、湿陷稳定变形阶段以及水位下降后土体的固结变形阶段。柳墩利^[8]提出了路堤的沉降主要体现为地基沉降,而地基沉降主要体现为下卧层沉降的观点,对孔内深层强夯法进入了深入研究。王应铭^[9]确定了湿陷性黄土地基处理原则,取得的成果对工程运用具有借鉴意义。虽然对黄土区域路基沉降控制有了比较丰富的研究成果。但是由于地质条件和地层的不确定性使得这些研究成果在工程上的运用具有一定的局域性,特别是本工程原始地貌具有一定坡度且为填土深厚的路基。本文重点分析了该工程地基处理失效的原因,旨在减少类似工程地基处理失效的发生,从而减少不必要的工程投资。

1 地质情况概述

工点范围内分布第四系全新统冲积黏质黄土及上更新统风积黏质黄土、粉质黏土、粉土、砂层、

角砾土、圆砾土、卵石土,其地层剖面示意图如图1所示。

该站场地基不满足规范要求,对其进行了处理:在地基表面铺设掺加6%水泥的改良土垫层0.5 m厚。紧接着是采用水泥土挤密桩处理,其中加固I区桩径0.4 m,桩间距1.0 m,桩长8 m,正三角形布置;加固II区桩径0.4 m,桩间距1.0 m,桩长6 m,正三角形布置;加固III区采用的是预钻孔柱锤冲扩桩,桩径0.6 m,桩间距1.2 m,桩长12 m,正三角形布置。站台雨棚立柱基础采用泥浆护壁机械钻孔灌注桩,桩径为0.6 m。在3#站台和4#站台之间的轨道为不停站轨道,采用的是桩板结构基础。

2 沉降监测

该车站运行一段时间后发现不均匀沉降。为探究该站台沉降发展趋势,对该站台进行了沉降监测。测点布置:站台(不含雨棚柱)布点150个,雨棚柱布点30个,盖板沟布点25个,接触网支柱基础布点48个,轨道左轨55个,地道40个,探坑布点2个,各测点累积沉降量三维视图如下图2所示。

结合地质横断面可以看出:在1#站台和2#站台附近沉降量最大,在5#站台附近沉降量次之,在桩板结构附近的3#站台和4#站台沉降量较小。在桩板结构上的4条不停站的轨道,沉降基本达到稳定,且工后沉降量小于15 mm,满足车辆运行需要。而对停站的轨道,沉降量较大不满足使用要求。这种现象说明了该车站桩板结构的地基处理方式是成功的,而处理深度较浅的地基最终沉降量较大,是失效的。

本文不仅关注了沉降的相对值的大小,也需要

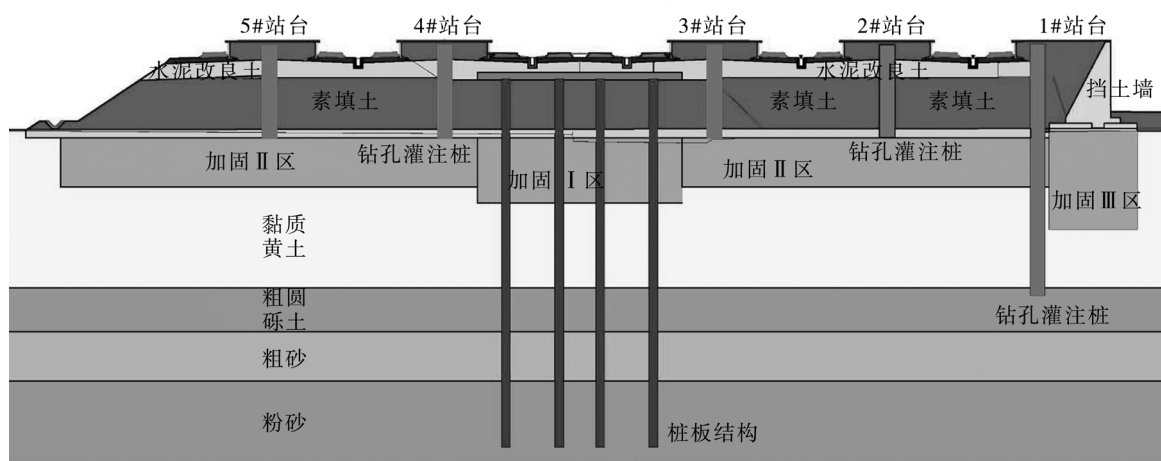


图1 地层剖面图

Fig.1 Vertical stratigraphic section

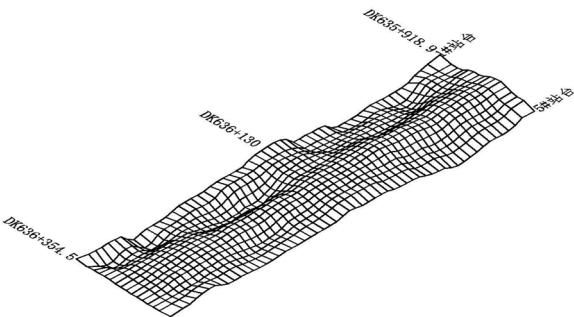


图 2 各测点累积沉降量三维视图
Fig.2 the The three-dimensional view of accumlate settlement of each the measuring points accumlate settlement

了解沉降是否稳定。整理沉降量与时间关系曲线得到沉降速率,并认为沉降速率小于0.04 mm/d为稳定,不需要进行处理。当沉降速率大于0.04 mm/d,应对地基进行整治。整理各结构段测点的最大沉降量及沉降速率如表 1 所示。

对于已完工的条状建筑物,由于其跨度较大,

为衡量该建筑物沉降的状态,采用沉降速率超过稳定值的测点数及其所占总测点数的比例作为参考指标,统计其比例如表 2 所示。

虽然统计测点数及其所占总测点数的比例不能反映整体建筑物的不均匀沉降,但在一定程度上反映了建筑物的整体沉降。由上表数据可知,人行通道各测点沉降趋于稳定,现已停止观测。累积沉降量最大的点为 1# 站台面点 T03-5,沉降量为 41.20 mm,累积沉降速率为 0.15 mm/d。站台 1 及站台 2 沉降未稳定点的比例最大。沉降未稳定点共有 100 个点,占总观测点比例为 31.5%。以上数据表明站台的沉降还在继续,需要进行整治。

3 沉降原因分析

工后沉降主要指最终沉降与运营前沉降之间的差值。无砟轨道路基竣工运营期若发生沉降,只能依靠扣件的调高能力使钢轨向上抬高,扣件的抬高

表 1 各位置测点累积沉降结果一览表

Tab.1 The cumulative settlement of the each measured points in each position

沉降点位置	最大沉降量 /mm	沉降量最大的点位	最大沉降速率 /(mm·d ⁻¹)
轨道	27.34	T07-14	0.10
盖板沟	19.38	T07-15	0.07
接触网	20.07	J05-2	0.07
雨棚柱	32.26	T03-3	0.12
站台 5	16.53	T03-39	0.06
站台 4	13.03	T07-31	0.05
站台 3	18.18	T07-18	0.06
站台 2	21.33	T07-13	0.04
站台 1	41.20	T03-5	0.15
人行通道	4.40	Q02-2/Q04-1	0.02

表 2 沉降监测各位置测点稳定性统计一览表

Tab.2 The stability of the each measured points in each position

沉降点位置	总点数	沉降速率大于 0.04 mm/d 的点数	沉降速率大于 0.04 mm/d 点的比例 /%
轨道	55	16	29.1
盖板沟	25	7	28.0
接触网	48	19	39.6
雨棚柱	30	12	40.0
站台 5	20	7	35.0
站台 4	20	4	20.0
站台 3	20	3	15.0
站台 2	20	10	50.0
站台 1	40	22	55.0
人行通道	40	0	0.0
总点数	318	100	31.5

量是有限的,不允许超过 15 mm,因此要求工后沉降不宜小于 15 mm^[9]。为了突出重点,本文主要分析站台 1 以及雨棚柱产生沉降以及差异性沉降的原因。

3.1 站台 1 沉降分析

重点监测了 1# 站台的沉降,选取 1# 站台具有代表性的测点沉降与时间的关系曲线,如图 3 所示。

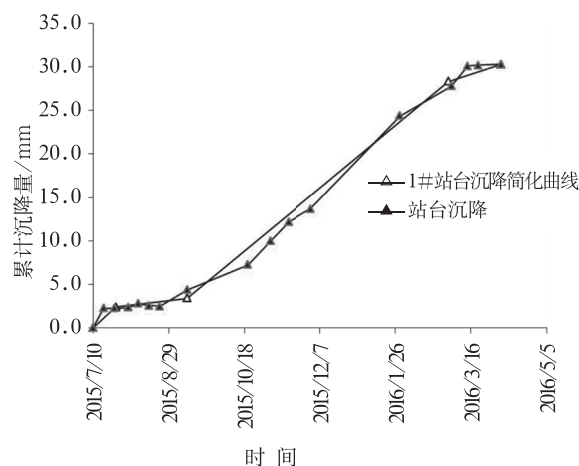


图 3 1# 站台代表性测点沉降量与时间的关系曲线

Fig.3 The settlement versus time curves of the representative measuring points settlement with time in the 1# platform

可以看出 1# 站台的地表沉降大致分为四个阶段,首先自开始监测的 2015 年 7 月 10 号起沉降速率较快,为第一阶段;然后沉降速率减慢,为第二阶段;在 2015 年 9 月以后沉降速率快速增长,为第三阶段;在 2016 年 3 月以后沉降速率再次减慢,为第四阶段。为了便于分析将其沉降曲线简化为四段直线,其斜率依次为: 0.16、0.021、0.144、0.057 mm/d。在第一阶段和第二阶段为路基的正常压密沉降,在第三

阶段沉降速率突然增加,黄土的湿陷性能较好的解释这种现象。而实际上也可以证明黄土地基的确发生了沉降。桩的刚度较大,桩的沉降主要由桩端土的变形而引起的,不考虑桩自身的变形。以此为根据,选取具有代表性的雨棚桩基测点的沉降值来反演发生沉降的土层的范围。雨棚桩基最大沉降量为 180 mm,平均为 100 mm,现按 100 mm 沉降量反算桩底附加应力进而反算中性点位置。沉降计算公式为:

$$S = m_s \sum_{i=1}^n \Delta S_i = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_z(0)}{E_{si}} (z_i C_i - z_{i-1} C_{i-1}) \quad (1)$$

由力的平衡可知:

$$P + \eta_n \pi d \sum_{i=1}^n \xi_n \sigma'_i l_i - \pi d (l - x) q_s + \frac{\pi d^2}{4} l \gamma_s = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_z(0) \quad (2)$$

带入相关参数可以得到中性点埋深为 14.14 m。即地面至埋深 14.14 m 之间土体沉降速率要大于桩身的沉降速率,而地基处理的深度在加固 III 区也只有 12 m,即黄土地基发生了较大的变形。研究表明施工期间地基处理深度范围内的压缩沉降量小于地基处理深度处的沉降量^[8]。所以本文可以做出如下鉴定:本工程的路基工程以及其地基处理施工工艺是满足要求的,其沉降值大约为第二阶段结束时的 4 mm。未处理的深部地基发生了较大沉降,到目前为止约为 27 mm。

本文也探究了 1# 站台沉降较大的原因。整理到 2016 年 4 月 5 号截止分析剖面沉降累积量如图 4 所示。沉降监测的结果表明 1# 站台的沉降量和不均匀沉降程度都要大于 5# 站台。其原因为:原始地貌的地势大约在沿里程增大的方向逐渐变低,车站的 5# 站台一侧的地势要高于 1# 站台一侧,人工填土从

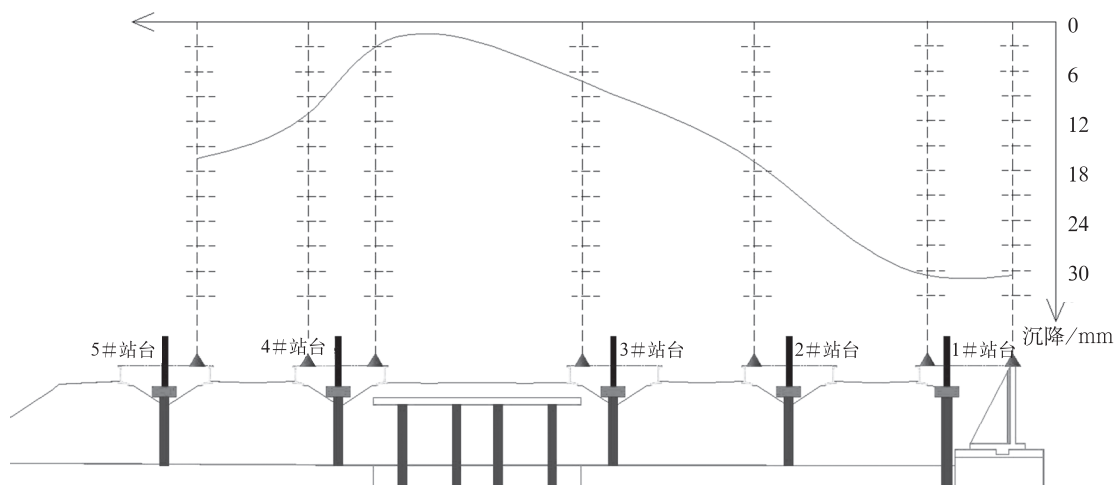


图 4 剖面沉降图

Fig.4 The section settlement

5.67 m 增长至 12.96 m, 在地基处理的过程中虽然按照统一标准施工, 但是由于先期固结压力不一样, 黄土之间孔隙结构存在较大的差别, 导致处理后地基土的力学特性也存在较大差异。其次为大厚度的填土所引起的沉降。填土在此处即是承担上部结构荷载的土体, 又是下部黄土的荷载。1# 站台处的黄土地基在自然沉积的过程中, 土体之间的胶结力没有同一标高的 5# 站台处的黄土地基强, 而黄土是结构性较强的特殊土, 在附加荷载作用下, 黄土结构性逐渐破坏, 贯通的剪切带形成, 土体沿着剪切带滑移, 即沉降速率增大。该站台路基土方施工过程受雨季影响, 部分路基填料含水量偏高, 站内排水系统受路基沉降影响, 导致部分排水系统失效, 地表水的下渗最终造成了 1# 地基的湿陷, 这是黄土地基沉降的又一主要原因。

3.2 雨棚柱沉降分析

雨棚柱长度为 31.1 m, 为端承摩擦桩, 该桩穿透黄土层, 着力于圆粗砾土。本文也监测了 1# 站台雨棚柱的沉降, 目的在于反映深层土体的变化, 其测点沉降与时间的关系曲线, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出雨棚柱的沉降也是分为四个阶段, 首先自开始监测的 2015 年 7 月 10 号起沉降速率较快, 为第一阶段; 然后沉降速率减慢, 为第二阶段; 在 2015 年 9 月以后沉降速率快速增长, 为第三阶段; 在 2016 年 3 月以后沉降速率再次减慢, 为第四阶段。与 1# 站台相比可以看出雨棚柱的沉降在第三阶段, 存在较大的差异, 在第三阶段时雨棚柱最初以较小的速率增加, 随后速率增大。随着埋深的增加, 围压逐渐变大, 土体被压密, 其抵抗变形能力也要强于表层土, 故最终埋深较大的土体其沉降曲线要缓于表层土体。所以雨棚柱的力学特性在 2015 年 11 月份左右发生了变化。为说明问题, 本位整理了 1# 站台和雨棚柱的沉降简化曲线如图 6 所示。

沉降的发生主要由两部分组成: 一部分由土颗粒之间的孔隙被压缩而发生沉降, 另一部分由土颗粒之间的滑移而产生沉降^[10]。结构性、非饱和性和湿陷性是湿陷性黄土三个主要特性, 结构性的破坏是引起黄土有较大沉降的主要原因^[11]。黄土碳酸盐的胶结作用构成了黄土较强的结构强度和特殊粒状架空结构体系, 这使得在天然状态下黄土表现出的强度很高, 孔隙比较大。但是当胶结作用失去之后, 结构强度破坏, 土体自重压力下即使地面荷载不变

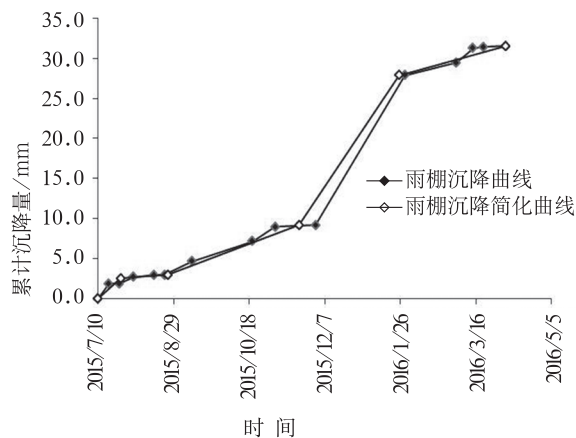


图 5 雨棚柱沉降量与时间的关系曲线

Fig.5 The settlement versus time Curves of the settlement with time in the canopy column

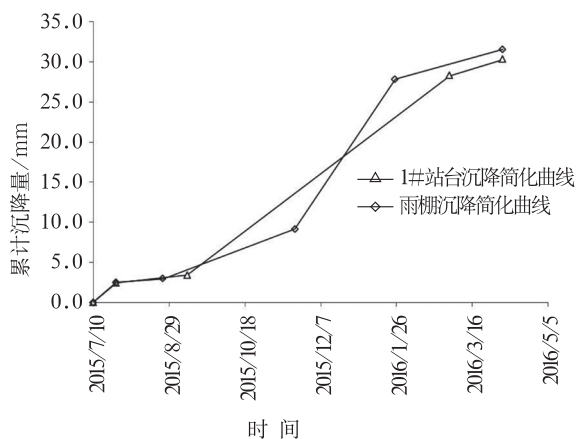


图 6 1# 站台和雨棚柱的沉降简化曲线示意图

Fig.6 The simplified settlement curve of the 1# platform and the canopy column

土体沉降。如图 6 所示, 在第三阶段, 地表的沉降速率大于雨棚的沉降速率, 负摩阻力产生, 这使得雨棚柱的沉降速率增大, 在此过程中伴随着黄土的结构性逐渐损伤, 在 2015 年 11 月份, 黄土的结构性损伤达到临界值, 其抵抗荷载的能力突然丧失, 造成较大规模的黄土沉降速率大于雨棚柱的沉降, 负摩阻力大量产生, 当桩侧有利的摩擦力变成不利的负摩阻力时, 桩端土体就发生了较大变形, 其沉降速率再次增加, 形成图 6 的形式。所以单纯的依赖桩的刚度来控制结构变形是存在风险的, 应该严格控制桩侧黄土地基抵抗变形的能力。

4 解决方案探讨

从以上的分析可以看出黄土地基的沉陷是此站台发生不均匀沉降的主要原因。而地基处理深度不够是黄土地基沉陷的主要原因。目前处理黄土地基沉陷具体方式也很多, 归纳起来其原理^[12-13]总共有

如下4种:(1)消除全部的地基黄土层湿陷性,处理埋深一般在15 m以内。(2)消除部分的地基黄土层湿陷性,根据构筑物的的重要性及分类,限定最小处理厚度,严格控制剩余湿陷量。(3)基础穿透湿陷性黄土层,传力于非湿陷性土层或可靠的持力层上,常用方法就是桩基。(4)充分做好构筑物基础的防水、排水措施,使基础下湿陷性黄土地基无法浸水,以达到避免地基湿陷的目的。可以看出,1#站台地基处理深度为12 m,地基处理深度有待加深。在施工技术和经济上有较大困难,可以考虑应力的扩散或地基整片处理,即加强处理后地基之间的协调性也可以扩大地基处理的范围。由于该站台已经正常运营,为保证该站台正常工作,不影响旅客外出,本次整治方案不计成本,采用高效的高压旋喷桩技术。

5 结论

1)黄土地区地面沉降可分为4个阶段,即增长期、平稳期、加速期、以及最终稳定期。黄土的沉降是造成沉降再次加速的原因。建议黄土地区沉降监测应该予以加长,以确定建筑物是否处于稳定状态。

2)黄土的沉降不仅使地表发生不均匀沉降,也会改变黄土区桩基的力学性质,造成更大埋深土体的变形,单纯的依赖桩的刚度来控制结构变形是存在风险的,也应该控制桩侧土体变形。对于类似工程在施工技术和经济上有较大困难,可以考虑将应力扩散或地基整片处理。

3)在具有坡度的黄土区域,同一标高地层土体具有不同的孔隙结构和土体强度,深厚填土对基础以下较深地基会产生较大的附加应力,在这两种作用下地面标高低的区域会发生更大的变形。减少黄土结构性的损伤或者减少土颗粒之间的孔隙比是减小黄土区域类似工程质量缺陷的关键。

参考文献:

- [1] 徐实.湿陷性黄土地基铁路路基工后沉降规律研究[J].兰州交通大学学报,2011(4):58-62.
- [2] 黄雪峰,陈正汉,方祥位.关于大厚度自重湿陷性黄土地基处理的若干问题探讨[J].后勤工程学院学报,2007(4):39-44.
- [3] 张戎令,王起才,张见.铁路湿陷性黄土路基劈裂注浆浆液配比研究[J].路基工程,2010(4):58-61.
- [4] 齐静静,徐日庆,龚维明.湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J].岩土力学,2006(Z2):881-884.
- [5] 朱彦鹏,杨自刚,陈长流.黄土场土体沉降速率对桩负摩阻力的影响[J].兰州理工大学学报,2014(2):114-117.
- [6] 李金平.柱锤冲扩水泥土桩复合地基在湿陷性黄土地区的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
- [7] 王长丹,王旭,周顺华,等.自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验[J].岩石力学与工程学报,2010(Z1):3101-3107.
- [8] 柳墩利.高速铁路湿陷性黄土地基处理试验研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2012.
- [9] 王应铭,李肖伦.郑西客专陕西段路基湿陷性黄土地基处理简介[J].岩土力学,2009(Z2):283-286.
- [10] 陈仲颐.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [11] 邵生俊,陶虎,许萍.黄土结构性力学特性研究与应用探讨[J].岩土力学,2011(Z2):42-50.
- [12] 罗宇生,江国烈.湿陷性黄土研究与工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:123-126.
- [13] GB50025-2004,湿陷性黄土地区建筑规范[S].

(责任编辑 王利君)