

黄土填方场地强夯与分层碾压施工过程的内部沉降监测方法

于永堂^{1,2}, 张继文³, 董宝志⁴, 唐丽云⁵, 黄鑫², 曹静远²

(1. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710021; 4. 山西金宝岛基础工程有限公司, 山西 太原 030031;
5. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土填方场地采用强夯法与分层碾压法处理时, 会引起较大的冲击荷载与振动荷载, 导致施工期埋设的监测元件易被破坏且补救困难。为此结合填方场地施工特点, 对深层沉降标法、电磁式沉降仪法和串接式位移计法进行改进, 主要包括: 当采用深层沉降标法时, 施工期将沉降钢板预埋至填土内不同高程, 竣工后钻孔测量沉降钢板的高程变化, 确定施工期总沉降, 然后利用同一钻孔安装深层沉降标, 采用水准测量方法观测工后沉降; 当采用电磁式沉降仪法时, 将沉降管及沉降磁环通过钻孔与探井安装至填土地基内, 沉降管端部深入基岩内, 将基岩内安装的沉降磁环作为相对基准点观测内部沉降, 以减少施工期管口高程频繁变化引起的测量误差; 当采用串接式位移计法时, 在填方地基内同一垂直线方向, 设置若干位移计监测单元, 通过分段测量、逐段累加方法, 获得填方场地不同深度处的沉降量。上述监测方法的集成应用实现了填方地基内部沉降的全程、连续监测, 也可作为类似工程监测提供参考。

关键词: 黄土填方场地; 强夯; 分层压实; 内部沉降; 监测方法

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0054-08

Layered settlement monitoring method of loess filled foundation during dynamic compaction and layered compaction

YU Yong-tang^{1,2}, ZHANG Ji-wen³, DONG Bao-zhi⁴, TANG Li-yun⁵, HUANG Xin², CAO Jing-yuan²

(1. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China;
2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
3. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China;
4. Shanxi Jinbaodao Foundation Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030031, Shanxi, China;
5. School of Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: When dynamic compaction and layered rolling compaction methods are used for loess filled foundation treatment, the construction process can cause large impact loads and vibration loads, resulting in easy destruction of monitoring elements buried during construction and difficult remediation. Therefore, based on the construction characteristics, the monitoring methods for layered settlement using deep settlement measurement marker, electromagnetic settlement gauge, and series displacement meter have been modified. The deep settlement measurement marker is to embed the settlement steel plate to different elevations in the fill during the construction period. After completion, the boreholes above settlement steel plate were drilled to measure the elevation changes of the steel plates, so the total settlement during the construction period can be determined. And then use the same boreholes to install deep settlement markers, using leveling methods to observe the post-construction settlement. The electromagnetic settlement gauge is to install the settlement pipe and settlement magnetic ring into the filled foundation through drilling boreholes and excavating exploratory

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-086); 陕西省技术创新引导专项(基金)计划项目(2020CGHJ-002)。

作者简介: 于永堂(1983—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程监测与测试技术、特殊土工程性质评价与地基处理技术研究与应用。E-mail: yuyongtang@126.com。

wells, and the end of the settlement pipe needs to be embedded into the bedrock. The settlement magnetic ring installed in the bedrock is used as a relative reference point to observe internal settlement, reducing measurement errors caused by frequent changes in pipe orifice elevation during construction. The series displacement meter is to set up several displacement meter monitoring units in the same vertical direction within the filled foundation, and obtain the settlement at different depths of the filled foundation through sectional measurement and piecewise accumulation method. The integrated application of the above monitoring methods has realized the complete, continuous, and automated monitoring of layered settlement of the fill foundation, and can also provide a reference for similar projects.

Key words: loess filled foundation; dynamic compaction; layered rolling compaction; layered settlement; monitoring method

0 引言

近年来,我国西部黄土丘陵沟壑区开展城市建设,修建机场、铁路和公路等基础设施,受地形和空间的限制,形成了大量黄土填方场地,一些填方场地的厚度达几十米甚至超过一百米^[1-2]。黄土填方场地是由“原场地”和“填筑体”组成的特殊地质体,原场地按照地貌分为“梁峁区”、“沟谷区”,其中梁峁区分布着大厚度的湿陷性黄土,具有水敏性、大孔隙和结构性等特殊性质,在自重和上覆荷载作用下,遇水后其结构会迅速破坏,产生显著的附加沉降变形;沟谷区常分布淤积土,其含水量高、饱和度大、压缩性强,在上覆填土荷载作用下,沉降量大、变形稳定时间长^[3-4]。为了减少黄土填方场地的工后沉降和不均匀沉降,对梁峁区湿陷性黄土和沟谷区的淤积土主要采用强夯法或强夯置换法处理;对填筑体主要采用分层压实法、强夯法处理,或采取分层碾压与强夯补强组合处理^[5-8]。在黄土填方场地的施工期和工后期,为了掌握地基的有效压缩层厚度及压缩层范围内各层土的变形特性,常需要在原场地和填筑体内不同深度处埋设内部沉降监测元件,根据沉降监测结果分析土层的压缩特性,并指导现场施工及验证设计参数的合理性。

工程实践表明,监测元件的埋设和保护关系到监测工作能否顺利进行,已成为保证监测数据及时性和有效性的关键^[9]。然而,强夯、冲击碾压等填方场地处理方式均会在地基一定深度内,产生较大的冲击荷载和振动荷载,对预埋的监测元件造成影响甚至损坏,因此,需要根据黄土填方场地的施工特点对监测设备、埋设方法、观测方法等进行改进,建立适合黄土填方场地的内部沉降监测方法。本文根据陕北某典型黄土高填方工程的监测经验,总结了强夯和分层碾压施工过程的内部沉降监测方法,以及监测元件的埋设、保护方法,相关成果可为类似工程提供参考。

1 内部沉降监测方法

1.1 深层沉降标法

以往采用深层沉降标法观测施工期和工后期沉降,需要在施工期将深层沉降标的底板埋入监测高程处,将测杆与护管随着填土厚度的增加而分节段接长^[10]。土方填筑施工会干扰测杆向上引出,导致测杆产生侧向偏移,影响沉降观测精度,为避免施工破坏,甚至需要长期值守。因此,难以采用深层沉降标法监测施工期沉降。为了实现施工期沉降与工后期沉降的接续测量,对传统深层沉降标法进行改进,改进的深层沉降标法监测原理见图 1。

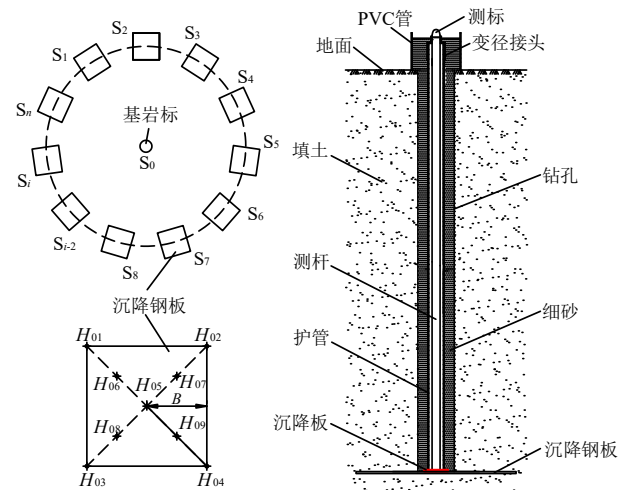


图 1 改进的深层沉降标法监测原理示意图

Fig. 1 Monitoring principle of modified deep settlement measurement marker

如图 1 所示,当需要观测不同深度的沉降量时,将不同埋深的沉降钢板 S_1 、 S_2 、...、 S_n 沿同一圆心呈环形阵列布置,在土方填筑施工过程中,将沉降钢板预先埋设不同深度处,同时测量各沉降钢板顶面的形心、角点等坐标及高程初值。土方填筑施工达到设计标高后,根据沉降钢板形心坐标测放钻探点,然后钻探至沉降钢板顶面,测量填筑施工完

成后的钢板高程，最后利用该钻孔埋设深层沉降标，采用光学水准测量方法观测工后沉降。当需要测定土层的沉降量时，可以在圆心处设置基岩标 S_0 。改进的深层沉降标法具体实施过程如下：

(1) 沉降钢板的埋设：当填土施工达到埋设高程时，填土面经过碾压刮平后，铺设 1~2 cm 中砂找平，铺设尺寸为 3.0 m×3.0 m、厚度为 3.0 mm 的钢板，采用 GPS RTK (Real Time Kinematic) 实时动态定位技术测量钢板顶面四角及中心坐标，用铲车在钢板顶部虚铺 50 cm 厚的回填土，然后填土进行强夯或分层碾压施工直至达到设计高程^[1]。测量设备采用 GPS，仪器型号为拓普康 Hiper II G，垂直观测精度为 15 mm+1 ppm，水平观测精度为 10 mm+1 ppm。对所测沉降钢板中心、角点的全部高程数据取平均值，获得沉降钢板的初始埋设高程 H_0 。

(2) 施工期总沉降测量：当填土施工完毕后，根据沉降钢板埋设位置坐标，采用 GPS RTK 技术重新放点，钻探点设置在沉降钢板的中心位置处。为保证钻孔不偏离沉降钢板区域范围，钻探的偏斜率 α 需满足 $\alpha_{\max} \leq B/L$ ，其中 B 为沉降钢板中心距边缘的最小距离， L 为钻孔的实际深度。当钻探至钢板顶面时，钻机操作员可通过钻进难易程度判断钻头是否与钢板接触。在不施加外力作用下，使整套钻具靠自重与钢板接触，孔口处钻杆上标记测量参照点，采用 GPS RTK 技术精确测定参照点的高程 H_c ，然后逐段提出钻杆，逐段量测参照点以下钻杆及钻头的总长度 L_c ，计算沉降钢板的现高程 H_t ($H_t = H_c - L_c$)，现高程 H_t 与初始埋设高程 H_0 之差即为该段时间内监测深度下部地基土的施工期总沉降量。

(3) 工后分层沉降测量：将测杆底部安装沉降板，分段接长测杆放至孔内，测杆顶部安装半球形测头，测杆采用 $\Phi 26.9$ mm 的镀锌钢管加工制作，外部套 $\Phi 50$ mm 的硬质 PVC 管作为护管，然后由 PVC 管变径直通 (50 mm 转 32 mm) 将测头固定在管中心位置，地面以上部分采用 $\Phi 250$ mm、高 50 cm 的 PVC 管进行保护。分层标安装完毕后，定期应用因瓦尺、电子水准仪，采用几何水准测量方法进行沉降观测，并绘制分层沉降量与时间关系曲线、分层沉降量与深度关系曲线等。

改进的深层沉降标法在施工期不受强夯或分层碾压施工产生的冲击荷载或振动荷载的影响，但是无法获得施工过程分层沉降数据，仅能获得施工完成后的最终分层沉降量，若需测量工后分层沉降，则需要安装分层沉降标，通过人工水准测量方

法观测沉降。该方法的测量精度受人为因素或环境因素影响较大，测量过程需要长距离引测，因此不适合难以找到稳定基准点以及需要获得施工过程中不同时间点分层沉降数据的场地。

1.2 电磁式沉降仪法

电磁式沉降仪法的监测设备包括沉降管、沉降磁环 (或磁板) 和测试仪器，是目前工程中最常用的一种分层沉降监测方法。将该方法应用于强夯法和分层碾压法处理地基的施工期监测时，需要结合施工条件对监测元件埋设和观测方法进行调整。改进的电磁式沉降仪法监测原理示意图见图 2。

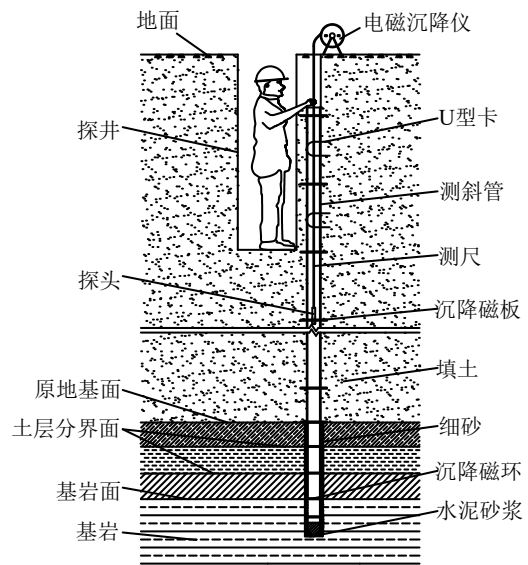


图 2 改进的电磁式沉降仪法监测原理示意图

Fig. 2 Monitoring principle of modified electromagnetic settlement gauge method

如图 2 所示，施工期将沉降管的底端设置在原场地中风化基岩内，最下部磁环位于土岩分界面处，并通过灌注水泥砂浆固定，以提供相对稳定的基准点。通过观测不同深度处测点与基准点相对位移，即可得到基岩面以上各土层的分层沉降量。施工期随填筑施工采用探井将沉降管引至当前填筑面后观测施工期沉降，工后期将沉降管引至设计地面后观测工后期沉降。该方法具体实施过程如下：

(1) 原场地中的监测元件埋设：a) 埋设孔钻探：采用干钻探方式成孔，钻探至中风化基岩内不少于 1.0 m，并清除孔内泥浆和沉渣；b) 沉降管与沉降磁环安装：在沉降管上安装定位环和沉降磁环，在沉降管底端向上约 30 cm 位置以及土岩分界面处分别设置一个定位环和沉降磁环，孔底灌注水泥砂浆，将沉降管逐节下放，管底插入水泥砂浆中，沉降管节段之间的接头连接位置采用防水胶和防水胶带进行密封处理；c) 埋设孔回填：采用干细砂

回填沉降管与钻孔之间的空隙, 回填过程中振动沉降管使钻孔填实; d) 位置测量与保护: 采用 GPS RTK 技术观测沉降管管顶中心坐标及高程, 沉降管的顶部设置厚度为 20~30 cm 的聚苯乙烯泡沫保护, 防止冲击荷载造成沉降管的破坏。

(2) 填筑体中的监测元件埋设: a) 探井开挖: 当沉降管上部的填土强夯施工完成后或分层碾压施工完成后, 在距监测点约 15 cm 处开挖直径约 60 cm 的探井。b) 安装槽开凿: 根据上一次已安装的沉降管管顶中心坐标和高程, 在引线探井侧壁上开凿安装槽, 安装槽的顶部至当前填筑面, 底部至上一次已安装沉降管管顶下 10~20 cm, 安装槽的宽度为 $(d+5) \sim (d+10)$ mm, 水平方向弧形槽底深度为 $m_i+d/2$, m_i 为上一次已安装沉降管轴线至引线探井侧壁的距离, d 为沉降管外径。在安装槽开凿过程中, 架设吊线锤用于开凿安装槽引点, 将吊线锤对准上一次已安装的沉降管管顶的中心坐标, 在吊线锤指向的引导下, 由上而下开凿安装槽。c) 沉降管及沉降磁环安装: 将本次安装的沉降管与探井中上一次已安装的沉降管连接, 根据监测高程安装沉降磁环, 当所需全部沉降管节段和沉降磁环安装完毕后, 每间隔 3~4 m 用一个 U 型卡子将沉降管固定在安装槽中, 顶部沉降管的管顶距探井井口的距离为 50~60 cm, 管口用沉降管顶盖封堵。d) 探井回填: 随土方填筑施工, 采用原探井开挖时的原土回填, 每填高 30 cm, 采用 150 kg 夯锤, 落距 3 m, 夯击 20 次, 经检测探井内夯实回填土与原分层压(夯)实填土的干密度基本一致(图 3), 可保证探井内外变形协调。重复上述安装埋设、测量与保护步骤逐步将沉降管引至最终设计地面以上。

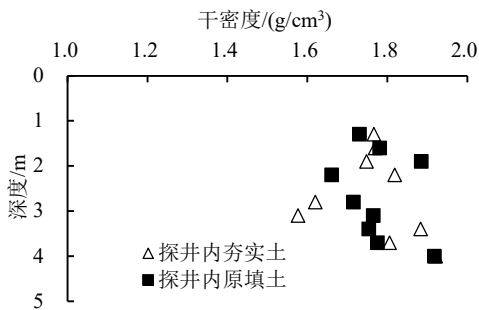


图 3 探井内夯实回填土的干密度测试结果

Fig. 3 Test results of dry density of compacted backfill in exploratory wells

(3) 观测与数据处理分析: 读数时将探头放入测斜管内, 探头感应到沉降磁环时, 产生电磁感应信号送至地面仪器显示, 同时发出声光警报信号,

此时读取沉降管管口标记点处对应的测量电缆刻度值即为沉降磁环的深度, 该方法的分辨率为 ± 1 mm, 重复性为 ± 3 mm。施工期由于沉降管的管口高程频繁变动, 为减少测量误差, 采取以基岩面作为沉降观测的基准点。首次观测($t=0$)时, 基岩面处的沉降磁环($i=0$)距沉降管管口的深度为 $(k_{0,0\text{进}}+k_{0,0\text{回}})/2$, 第 i 测点处的沉降磁环距沉降管管口的深度为 $(k_{i,0\text{进}}+k_{i,0\text{回}})/2$; 当观测时间为 t 时, 基岩面处的沉降磁环距沉降管管口的深度为 $(k_{0,t\text{进}}+k_{0,t\text{回}})/2$, 第 i 测点处的沉降磁环距沉降管管口的深度为 $(k_{i,t\text{进}}+k_{i,t\text{回}})/2$, 此时该深度处相对于基岩面的沉降量为:

$$S_{it} = [(k_{i,0\text{进}}+k_{i,0\text{回}})/2 - (k_{0,0\text{进}}+k_{0,0\text{回}})/2] - [(k_{i,t\text{进}}+k_{i,t\text{回}})/2 - (k_{0,t\text{进}}+k_{0,t\text{回}})/2] \quad (1)$$

式中: S_{it} 为第 i 测点在时间 t 时相对于基岩面的沉降量, mm; i 为测点编号, $i=0, 1, 2, \dots, n$; $k_{i,t\text{进}}$ 为第 i 测点在时间 t 时的进程读数, mm; $k_{i,t\text{回}}$ 为第 i 测点在时间 t 时的回程读数, mm。

电磁式沉降仪法的监测元件可在填方施工过程中埋设, 可以获得填土施工期及工后期全过程的分层沉降数据, 但沉降管受上覆填土荷载和施工荷载的影响较大, 实际工程中经常出现沉降管被周侧土体压扁, 探头无法下放测量的问题, 因此, 该方法不适用于填方厚度较大、施工荷载较大容易造成沉降管损坏的工程。

1.3 串接式位移计法

测量设备主要由位移计、位移传递杆、保护套管、沉降板、锚固头和沉降观测标等部件组成, 监测原理如图 4 所示, 将监测对象自下而上分成 n 个监测层, 分别表示为 S_1, S_2, \dots, S_n , 当土层发生沉降变形时, 将带动沉降板同步下沉, 每一监测层的上部沉降板与下部沉降板(原场地中为锚固头)之间的土体产生压缩变形, 使二者产生相对位移, 位移传递杆将相对位移传递给位移计进行测量, 随土方填筑施工监测装置分段埋设至地基内, 通过分层测量、逐层累加方法, 实现对同一垂直测线填方场地内部沉降的监测^[12-13]。根据叠加原理, 各沉降板监测点(各监测层顶面处沉降板埋设位置)相对于基准点(锚固头)的沉降可采用式(2)计算。

$$S_j = \sum_{i=1}^j \Delta S_i \quad (2)$$

式中: S_j 为第 j 个 ($j=1, 2, 3, \dots, n$) 沉降板监测点相对于基准点的沉降; ΔS_i 为第 i ($i=1, 2, 3, \dots$,

n) 监测层的分层沉降(压缩)量。

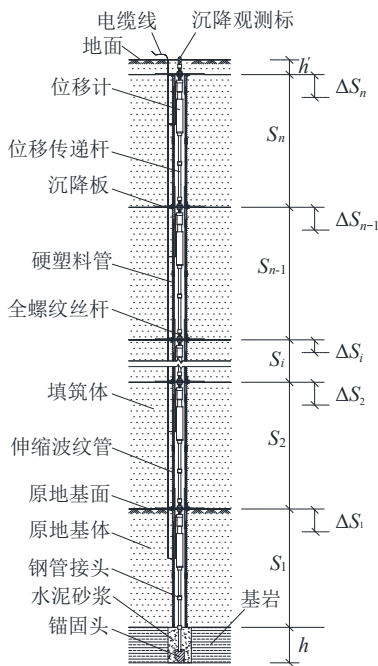


图4 串接式位移计法监测原理示意图^[12]

Fig. 4 Monitoring principle of series displacement meter method^[12]

该方法将整个填筑施工过程分为若干阶段,前一阶段将监测设备埋入地下,利用GPS RTK技术定位埋点位置,填土继续施工,待达到下一阶段埋设高程时,利用GPS RTK技术定位找点,开挖探井接续安装埋设与测试,而后探井回填夯实,填土继续施工,如此循环,直至达到设计高程,接入自动化监测系统,从而获得了填筑施工全过程的监测数据,其技术要点如下^[11,14-15]:

(1) 原场地中的监测元件埋设方法: a) 埋设孔钻探: 当填土施工至高出原场地面约0.8 m时,采用干钻方式成孔,钻探至中风化基岩内不少于1.0 m,并清除孔内泥浆和沉渣。b) 监测仪器安装: 将底部位移传递杆与锚固头连接,然后逐节连接位移传递杆下放,最后一根位移传递杆与位移计的下端连接,将水泥砂浆注入埋设孔孔底,待水泥砂浆凝固12 h后,采用干细砂回填埋设至孔口。以埋设孔为中心开挖埋设坑,坑底为原场地顶面,将位移计的上端与沉降板连接,调整沉降板的高程至原场地顶面,将长度约0.5 m的位移传递杆预留段连接于沉降板上部。c) 位置测量与保护: 采用GPS RTK技术测量位移传递杆预留段的顶部坐标及高程,位移传递杆预留段的上部采用厚度约30 cm的聚苯乙烯泡沫保护;在距监测点约15 cm处开挖埋线探井,将位移计的电缆预留下一次引线所需长度,电缆呈螺旋状同方向放入探井中,剩余电缆装

入电缆袋放置探井中,采用GPS RTK技术测量电缆袋的顶面高程、探井井口的坐标及高程,电缆袋上部放置厚度约20~30 cm的聚苯乙烯泡沫。

(2) 填筑体中的监测元件埋设方法: a) 埋设探井开挖: 当填土施工至超过本次沉降板设计埋设高程约1.3 m后,根据上一次埋线探井的坐标和高程开挖埋设探井,将电缆引出至当前填筑面以上并读取沉降量; b) 安装槽开凿: 根据上一次位移传递杆预留段的坐标及高程,由吊线锤引导在探井侧壁上开凿安装槽,安装槽的顶部至井口,底部至上一次已安装位移传递杆预留段顶端下约20 cm; c) 仪器安装: 安装槽开凿过程中,在沉降板安装位置处开挖水平向槽,将沉降板安装至土中监测深度处,将沉降板与土槽之间的空隙用膨润土球填实,每间隔3~4 m用一个U型卡子将测杆固定在安装槽中,但位移计测量范围内不设置U型卡子; d) 埋设探井回填: 采用原土对探井进行分层回填夯实,通过试验确定夯击次数,最后预留一定深度(预留深度根据电缆量而定),不回填,用于存放及保护电缆; e) 观测电缆保护: 将电缆集中绑扎成一束,采用与原场地顶面位置同样的方式进行保护。

串接式位移计法的监测元件采用原场地中钻孔埋设与填筑体中探井埋设相结合的方式,避免了监测元件的埋设对施工的干扰,同时提高了监测元件的成活率,工后可接入自动化监测系统。由于该方法需要开挖探井埋设监测元件,监测元件无法承载较大的冲击荷载,因此适用于采用细颗粒土填筑、分层压实施工的填方地基。

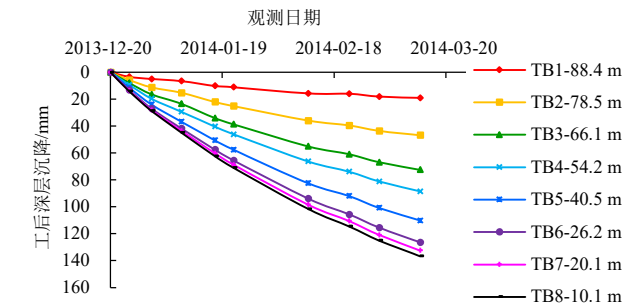
2 工程实例

陕北某工程地处黄土丘陵沟壑区,原场地梁峁区主要地层为 Q_4 滑坡及崩塌堆积物、 Q_3 黄土及古土壤、 Q_2 黄土及古土壤、 N_2 红黏土和J砂岩及泥岩,沟谷区主要地层为 Q_4 冲洪积、淤积土层。本工程沟谷原场地采用强夯法处理,填筑体采用分层碾压法+强夯补强处理,压实度控制标准为0.93(重型击实试验指标控制),黄土填料主要来自黄土梁峁区挖填线以上的各土层,主要为 Q_3 黄土及古土壤、 Q_2 黄土及古土壤,其中黄土层以粉土为主,古土壤层以粉质黏土为主。

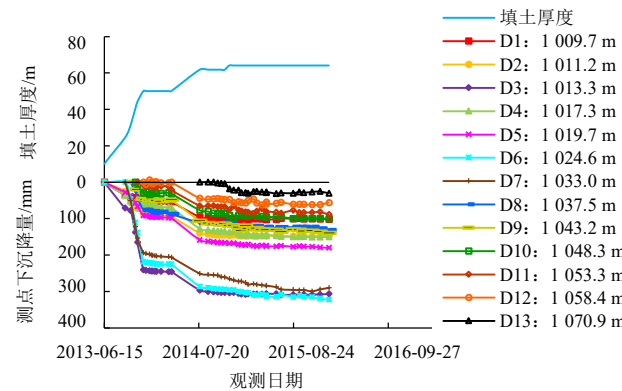
本工程采取以串接式位移计法为主,深层沉降标法、电磁式沉降仪法为辅对原场地和填筑体的内部沉降进行了观测。典型断面处的监测点如下: (1) 串接式位移计法监测点位于沟谷填方区中心,监测

点处原场地土层厚度为 5.1 m, 填土厚度为 106.5 m;

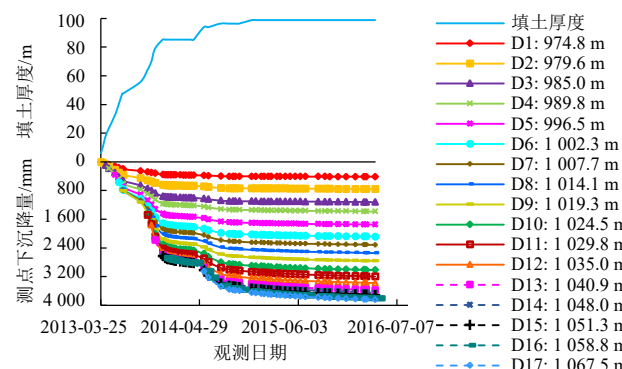
(2) 深层沉降标法监测点在以串接式位移计法监测点为中心的圆周上, 共设置 8 个监测点, 其中随土方填筑施工监测高程处的预埋钢板监测点 TB1~TB6, 工后期钻孔测量得到的施工期沉降量分别为: 680 mm、950 mm、1 510 mm、1 430 mm、1 410 mm、44 mm, 监测点 TB7、TB8 处施工期未预埋钢板, 在填方竣工后采取钻孔埋设深层沉降标, 采用二等水准测量方法观测工后沉降; (3) 电磁式沉降仪法监测点位于沟谷斜坡位置, 原场地土层厚度为 2.3 m, 填土厚度为 64.2 m。图 5 中 D 后面的数字表示监测点编号, 冒号后面的数字表示监测高程。各监测点的内部沉降与时间关系曲线见图 5。



(a) 深层沉降标法 (工后期)



(b) 电磁式沉降仪法 (施工期+工后期)



(c) 串接式位移计法 (施工期+工后期)

图 5 内部沉降与时间关系曲线

Fig. 5 Sub-surface settlement changes with time

由图 5 可知, 相比于电磁式沉降仪法, 串接式位移计法的数据连续性更好、沉降曲线更加完整平滑, 能更准确地反映填土施工加载过程中地基内部深层沉降的发展变化规律, 方便工作人员准确掌握填方场地的变形与稳定状态。

3 讨论

(1) 当采用改进的深层沉降标法观测内部工后沉降时, 仍采用人工水准测量方法, 时效性较差。卫星变形系统在采用特殊的观测措施、精密星历和适当的数据处理模型和软件后, 平面精度可达亚毫米级, 高程精度可稳定在毫米级^[16-17]。因此, 考虑采用卫星变形监测系统代替人工水准测量, 在场区内的监测点处设置北斗监测站, 在场区外的稳定区域设置基准站, 改进的深层沉降标法自动化监测原理见图 6。如图 6 所示, 采用卫星变形监测系统观测测杆沉降量, 可以克服人工水准观测受天气、地形地貌、通视条件以及人为误差等影响的不足, 实现内部沉降的远程、动态和连续监测。

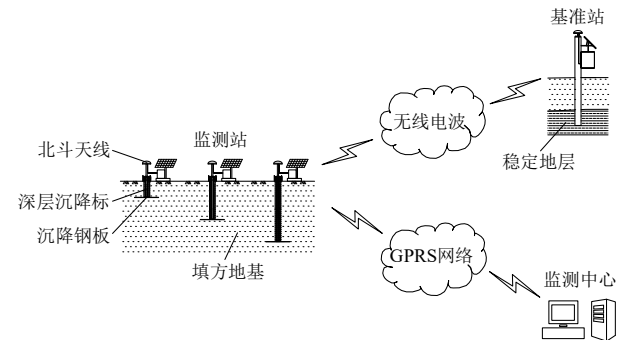


图 6 改进的深层沉降标法自动化监测原理示意图

Fig. 6 Automatic monitoring principle for modified deep settlement measurement marker

(2) 当采用电磁式沉降仪法观测内部沉降时, 由于沉降管和沉降磁环的埋深较大, 探测头在沉降管内的下放路径有差异, 会影响内部沉降观测精度。为此, 在原探测头基础上增加了“扶正导向装置”, 沉降管采用带有十字导槽的测斜管。该装置的构造原理及实物照片如图 7 所示, 该装置上部为塑料管, 下部为带有导向轮的钢杆, 探测头插入塑料管与“扶正导向装置”连接为一体, 塑料管可保证不影响探测头与沉降磁环(板)之间的电磁感应效果, 并使探测头沿着沉降管中心轴线滑动, 减少因测量路径不同造成的误差, 与内部水平位移观测数据结合后, 还可获得地质体的三维矢量变形。

(3) 串接式位移计法采取多组位移计同轴串

接方式,上下两个监测单元共用一个沉降板,一旦该沉降板安装效果不佳,会影响沉降板上下两个监测单元的测试效果。当施工环境恶劣时,为减少某一监测单元的失效对整个监测系统的影响,在串联组合式位移计法的基础上提出了一种“交错并行式”的布置方法,该布置方式见图8。如图8所示,沿探井中心设置监测垂线,监测垂线上交错设置沉降监测单元,相邻监测单元的上下端监测高程相互接续。每一监测单元由上部沉降板和下部沉降板组成,位移计和位移传递杆位于上下沉降板之间,用于监测上下板之间的压缩变形量。该方法各监测单元之间相互独立,可避免某一监测单元的失效对相邻监测单元测试结果的影响。

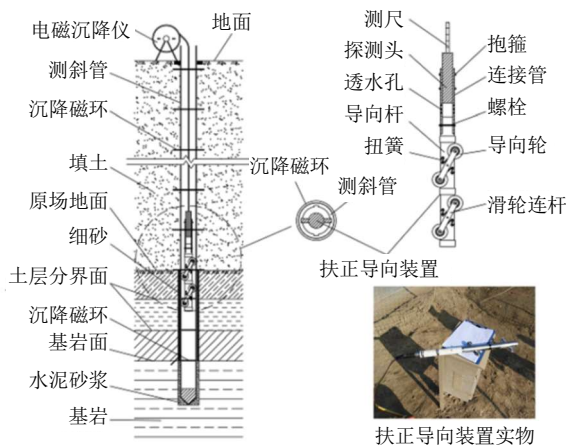


图7 电磁式沉降仪探头扶正导向装置原理及实物

Fig. 7 Principle and real centering and guiding device for the electromagnetic settlement gauge probe

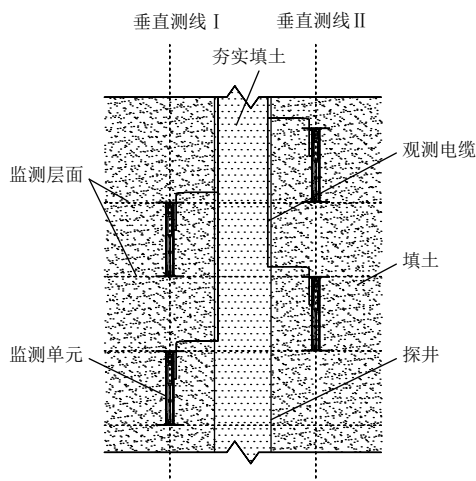


图8 交错并行式的位移计安装布置方法示意图

Fig. 8 Installation and layout method of staggered parallel displacement meters

4 结论

本文针对黄土填方场地采用强夯法与分层碾

压法处理时,因冲击荷载与振动荷载较大导致施工期埋设的监测元件易被破坏且补救困难的问题,对深层沉降标法、电磁式沉降仪法和串接式位移计法进行了改进,主要包括:

(1) 深层沉降标法是采取在土方填筑施工过程中将沉降钢板预埋至填土内,竣工后钻孔至沉降钢板顶面测量施工期总沉降,并利用同一钻孔安装深层沉降标,观测工后深层沉降。对于工程安全影响大的关键部位,可采用卫星变形监测系统代替人工水准测量方法观测深层沉降,实现动态、连续和自动化监测。

(2) 电磁式沉降仪法是采取原场地中钻孔埋设与填筑体中探井埋设相结合的方法埋设沉降管及沉降磁环,实现了原场地与填筑体内部沉降的完整监测。当监测深度较大时,为避免每次测量路径不同造成的测量误差,可采用测斜管代替普通沉降管,并在探测头上设置“扶正导向装置”,保证测试路径一致。

(3) 串接式位移计法是采取在土方填筑施工过程中,随填土厚度增加依次将位移计和沉降板埋入监测深度,通过分段测量、逐段累加方法获得同一垂直测线不同深度的沉降量。当施工冲击荷载对监测元件的影响较大时,也可采用“交错并行”方式布置测点,避免因某一监测单元的失效对相邻监测单元测试结果的影响。

参考文献

- [1] 朱才辉, 李宁. 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 845-854.
ZHU Cai-hui, LI Ning. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845-854.
- [2] 张炜, 张继文, 于永堂. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告: 黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 12-19, 38.
ZHANG Wei, ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang. Key technical issues and engineering practices in project construction of loess deep filled foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2016, 30(1): 12-19, 38.
- [3] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 85-92.

- YU Yong-tang, ZHENG Jian-guo, ZHANG Ji-wen, et al. Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 85-92.
- [4] 彭文顺. 陕北山区高速公路淤积土特征与地基处理[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(7): 119-121.
- PENG Wen-shun. Characteristics of silted soil and foundation treatment of expressway in mountainous area of northern Shaanxi[J]. *Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition)*, 2020, 16(7): 119-121.
- [5] 徐文涛, 张忠雄, 董宝志, 等. 大厚度湿陷性黄土填方地基增湿强夯试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(1): 151-159.
- XU Wen-tao, ZHANG Zhong-xiong, DONG Bao-zhi, et al. Experimental study on humidification and dynamic compaction of large thickness collapsible loess filled foundation[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2023, 21(1): 151-159.
- [6] 高建中, 郑建国, 魏弋锋, 等. 延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 1-9.
- GAO Jian-zhong, ZHENG Jian-guo, WEI Yi-feng, et al. Engineering Practice of Land Reclamation in Loess Hilly Gully Areas in Yan'an New District[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 1-9.
- [7] 徐文涛, 董宝志, 于永堂, 等. 直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J]. *地基处理*, 2022, 4(增刊 1): 134-143.
- XU Wen-tao, DONG Bao-zhi, YU Yong-tang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction on collapsible loess with low moisture content and large thickness[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(S1): 134-143.
- [8] 曹杰, 张继文, 郑建国, 等. 黄土地区平山造地岩土工程设计方法浅析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(增刊 1): 109-112.
- CAO Jie, ZHANG Ji-wen, ZHENG Jian-guo, et al. Design of high-fill reclamation projects in loess areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S1): 109-112.
- [9] 王国欣, 周涛, 黄宏伟. 隧道新奥法施工过程中监测元件埋设和保护[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2005(11): 62-64.
- WANG Guo-xin, ZHOU Tao, HUANG Hong-wei. Burying and protection of monitoring elements during tunnel NATM construction[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2005(11): 62-64.
- [10] 王美华, 王新新. 土体分层沉降监测技术的现状与发展趋势[J]. *建筑施工*, 2016, 38(2): 232-234.
- WANG Mei-hua, WANG Xin-xin. Current status and development trends of layered soil settlement monitoring technique[J]. *Building Construction*, 2016, 38(2): 232-234.
- [11] 于永堂, 梁谊, 张继文, 等. 黄土高填方施工期监测元件的埋设与保护方法[C]//2023 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 北京, 2023: 395-399.
- YU Yong-tang, LIANG Yi, ZHANG Ji-wen, et al. The installation and protection methods of monitoring components during the construction period of thick loess filled ground[C]//Proceedings of the 2023 National Engineering Construction Industry Construction Technology Exchange Conference (Volume I). Beijing, 2023: 395-399.
- [12] 于永堂, 张继文, 郑建国, 等. 高填方地基内部沉降监测装置的研制[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(3): 550-561.
- YU Yong-tang, ZHANG Ji-wen, ZHENG Jian-guo, et al. Development of an apparatus for measuring subsurface settlement of deep filled ground[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(3): 550-561.
- [13] 于永堂. 黄土高填方场地沉降变形规律与预测方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- YU Yong-tang. Study on settlement deformation characteristics and prediction methods of loess deep filled ground[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [14] 张继文, 于永堂, 郑建国, 等. 与黄土高填方同步施工的监测仪器先埋后引式分步埋设法: 中国, CN201310386167.1[P]. 2013-11-27.
- ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang, ZHENG Jian-guo, et al. Burying-before-guiding type step-by-step burying method for monitoring instruments in synchronous construction with loess high fill: China, CN201310386167.1[P]. 2013-11-27.
- [15] 张继文, 于永堂. 黄土高填方监测技术研究与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 39-41.
- ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang. Research and Application of Monitoring Technology for Thick Loess Filled Ground[M].