

不同深度 DDC 桩处理自重湿陷性黄土浸水载荷试验研究

张广平¹, 黄雪峰², 朱殿之¹, 奚增红¹

(1. 国家电网甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050; 2. 解放军后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 401331)

摘要: 为研究孔内深层强夯法中不同桩长对自重湿陷性黄土地基处理效果的影响, 进行了 3 个相同桩间距、不同桩长, 单位面积为 20 t 的地表浸水载荷试验。试验结果发现: 自重湿陷性黄土地基经过 DDC 工法处理后, 浸水试坑中水分入渗十分缓慢; 3 个处理区域没有发生较大沉降, 冻胀作用引起的地表隆起大于承台下降和土体湿陷引起地表沉降; 3 个不同 DDC 桩长处理后的地基都能抵抗 20 t/m² 的荷载, 选用 DDC 桩长 15 m 和桩间距 1.1 m 的桩间距可以有效节约成本, 降低工程造价。试验成果可作为今后类似工程建设以及规范进一步修订的参考。

关键词: 孔内深层强夯法(DDC); 自重湿陷性黄土; 浸水载荷试验; 沉降

中图分类号: TU472.3+1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2011)03-0028-06

Research on Soaking Load Tests for Treatment of Self-weight Collapse Loess with DDC Piles of Different Depths

ZHANG Guang-ping¹, HUANG Xue-feng², ZHU Dian-zhi¹, XI Zeng-hong¹

(1. Gansu Electric Power Design Institute of State Electric Network, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Department of Architectural Engineering, PLA Logistical Engineering Institute, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to research the influence of the DDC piles with different depths in the treatment of self-weight collapse loess, the soaking load tests including three areas of same pile spacing and different pile depths were carried out. The tests indicate that after the treatment of collapsible loess by DDC method, the water penetrating into the loess is very slow, there does not appear the greater surface sedimentation in the treated areas, and the sedimentation due to loess collapsibility is greater than that due to frost heaving and expansion. The treated foundation could bear the load of 20 t/m². With the pile depth of 15 m and pile spacing of 1.1 m, this method for the treatment of collapsible loess could reduce the project and construction costs. The test results may be useful to similar projects and to revise "Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions".

Keywords: down-hole deep compaction(DDC); self-weight collapse loess; soaking load test; sedimentation

0 引言

DDC(Down Hole Deep Compaction)又称孔内深层强夯法,该方法由北京长城建筑新技术研究所炳文^[1-2]提出,它的作用机理是把渣土(碎砖瓦、石、砂、土、碎混凝土块、工业废料以及它们的混合物等)用于地基处理,既能满足上部建筑物对地基承载力的要求,同时又达到节约成本的目的。

DDC工法作为一种处理深厚湿陷性黄土地基的有效方法,能充分提高湿陷性黄土地基抵抗湿陷能力,有其广阔的应用前景。该项技术在多项地基处理工程中得到应用^[3-10],消除了深厚黄土地基的湿陷性,大幅度提高了地基承载力,降低地基压缩性,处理效果显著。为规范 DDC 工法,中国工程建设标准化协会 2006 年制定了《孔内深层强夯法技术规程》^[11]。

收稿日期:2011-04-21

修稿日期:2011-05-15

基金项目:国家电网公司科学技术项目(SGKJJSKF[2008]656)

作者简介:张广平(1964—),男(汉族),甘肃甘谷人,高级工程师,主要从事电力土建设计工作。

孔内夯实挤密法是借鉴挤密法变革而来的,它先用长螺旋钻机、人工挖孔或沉管打桩机成孔,在向孔内填入素土、灰土等填料,在以重锤(1.5 t~2.5 t)在孔内分层夯实,使填料向孔周侧向挤出,一般成孔直径 0.4 m,夯扩至成桩直径 0.55 m~0.60 m,形成一种挤密的复合地基。灰土(素土)挤密桩成孔不使用螺旋钻机,直接使用成孔设备或爆炸能量所产生的横向挤压作用形成桩孔。较之素土和灰土挤密桩,孔内深层强夯法处理后的复合地基的承载力更高且均匀,处理深度更深(一般可达 25 m~30 m),处理黄土湿陷性的效果更为理想。

孔内深层强夯法近年来得到广泛的应用,但其理论和试验研究却滞后于实际工程,关于 DDC 桩长合理控制问题也鲜有报道。桩长的合理控制直接关系到地基承载能力的提高和工程造价的降低等问题。桩长过长,基础承载能力会显著增加,但同时也会提高相应的工程造价。另外黄土地基处理后,遇水情况下,地基仍然发生破坏,也就是对地基的影响很大。因此有必要就合理选择桩长问题以及荷载作用下水分对地基沉降的影响进行深入的探讨,本文针对以上问题进行大规模浸水载荷试验。

1 试验概况

1.1 场地条件

试验场地位于兰州市和平镇,北临兰天高速,东、南临金川科技园,交通便利。场地地势较平坦,经勘察场地地貌单元属黄河南岸 IV 级阶地,地貌单元单一。据当地深井资料,该场地地下稳定水位大于 70 m,场地黄土层总厚度大于 38 m,其中湿陷性黄土层厚度约 36.6 m,全厚度黄土层均有湿陷性。根据勘探点揭露,黄土由第四系马兰黄土组成,其岩土工程特性,现自上而下列于表 1。

1.2 场地布置

场地地基处理前需对土体进行增湿,使土体含水率接近最优含水率后方可进行地基处理。经过击实试验得到场地最优含水率为 15.9%。

试验场地共布置 3 个区域,桩长分别为 15 m、20 m 和 25 m,桩间距统一为 1.1 m。处理区域先用步履式桩架 ZKL-20 型长螺旋钻(图 1)预成孔直径 40 cm,等边三角形布置,成桩直径大于 0.6 m,用 DE5 型夯实机(图 2)进行夯实,夯锤重 1.6 t,夯击能 800 kJ~2 000 kJ,夯实材料选用场地中素土。孔内深层强夯法现场图和剖面图分别见图 3 和图 4。

表 1 试验场地的土层特征

土层名称	土层特征	厚度 /m	埋深 /m
耕表土 (Q ₃ ^{ml})	土黄色,以粉土为主,土质较均匀,表层含大量杂草。松散,欠固结,稍湿。	0.5	0~0.5
粉土 (Q ₃ ^{tl})	土黄色-褐黄色,土质均匀,具有湿陷性。稍湿,稍密,摇振反应中等,稍有光泽,干强度中,中韧性。	4.50	0.50~9.00
粉质粘土 (Q ₃ ^{cl})	褐黄色,土质均匀,具有湿陷性。稍湿-湿。稍密-中密,坚硬-可塑,无摇振反应,无光泽,干强度中等,韧性中等。	31.50	1.50~36.00
卵石	卵石占全重 50.0%~70.0%,砾石、砂粒占 20.0%~30.0%,含粉粘粒 1.0%~2.0%。粒径多在 2 cm~20 cm 之间, $d_{50} = 25.60 \text{ mm}$ ~ 61.32 mm , $C_u = 107.31$ ~ 210.18 , $C_c = 0.148$ ~ 0.115 ,磨圆度以亚圆状为主,颗粒无风化,分选性差。揭露深度 1 m。		38.00 以下

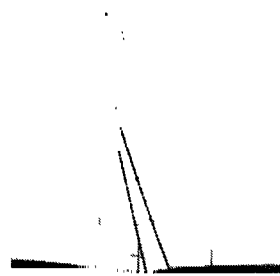


图 1 步履式桩架 ZKL-20 型长螺旋钻



图 2 DE5 型夯实机

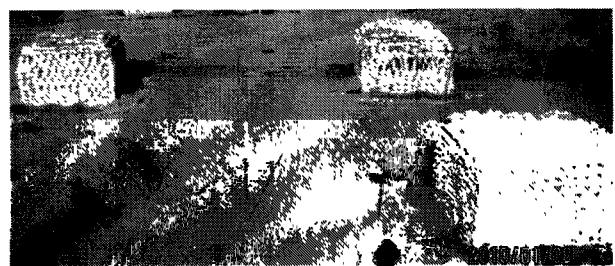


图 3 地基处理后现场图

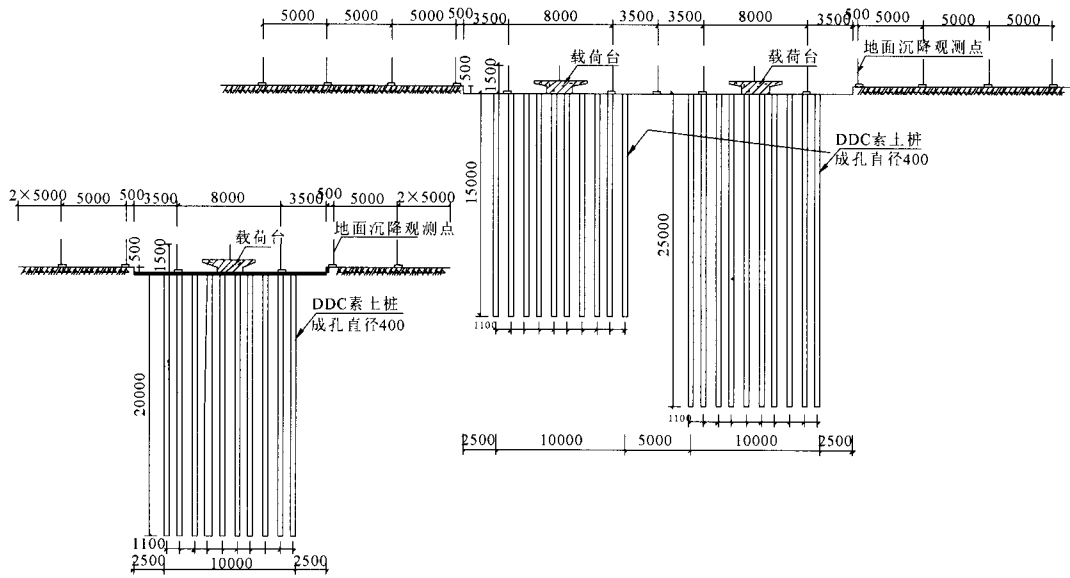


图 4 不同桩长处理区剖面图

场地处理结束后,在处理区域中心处开挖 2 m × 2 m 的正方形空间,用 C30 混凝土浇筑承台。承台自身重量为 20 t,承台上加载 60 t 荷载,荷载采用编织袋装土称重的办法,使承台单位面积荷载达到 20 t。在承台中心处以及不同地表位置设置沉降观测点,沉降观测点构造如图 7。荷载施加前,先移除混凝土承台下方土体,开挖深度为 0.5 m,宽度为 0.8 m,开挖区作为此次试验的浸水坑,以保证浸水水头达到 0.3 m ~ 0.5 m。

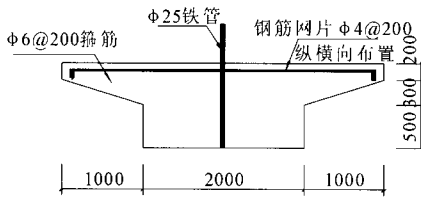


图 5 承载台配筋图

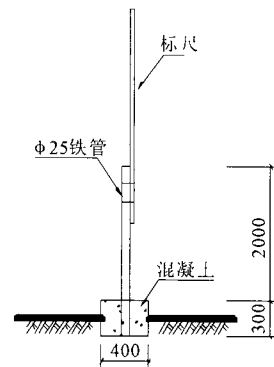


图 7 沉降观测点构造图

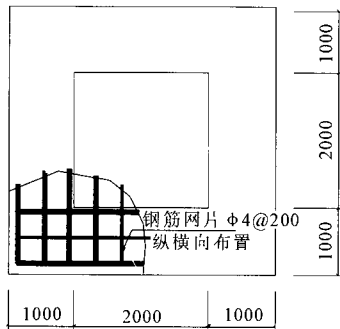


图 6 承载台剖面图

1.3 试验沉降点观测

三个处理区总共 22 个地表沉降观测点,3 个承

台中心观测点,观测点编号如图 8 所示,图中 DDC15N1,表示 15 m 区正北面第一个观测点,其余依次类推;DDC15 - 20 表示 15 m 区与 20 m 区之间沉降观测点。沉降观测使用高精度精密水准仪 SETL ATO - 28ATO - 32,每天早 9 点定时量测。整个试验共进行了 137 个昼夜,包括浸水期 71 d 以及停水期 66 d 两个阶段。

1.4 湿陷性的测定

湿陷性测定主要包括 0.2 MPa 压力湿陷系数和饱和自重压力湿陷系数下测定两方面内容。采用单线法进行湿陷系数测定,同一土样取 5 个环刀试样,试样均在天然湿度下分级加荷,加至不同的规定压力,下沉稳定后,各试样浸水饱和,附加下沉稳定,试验结束。

场地处理完后,对处理趋于挤密效果进行检验。3 个桩体之间进行探井开挖,从上到下依次每延米三桩间、两桩间和桩身取原状土样,分别用单向压缩固结仪量测不同深度的土样 0.2 MPa 压力湿陷系数

$\delta_{s,0.2}$ 和饱和自重压力湿陷系数 δ_{zs} 。

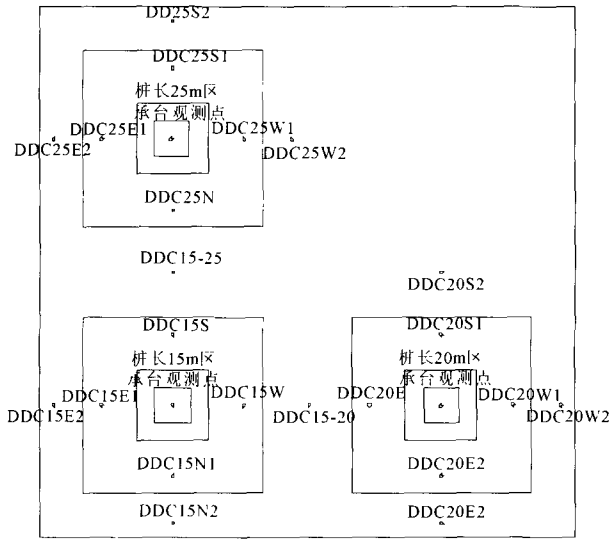


图 8 沉降观测点编号示意图

0.2 MPa 压力湿陷系数 $\delta_{s,0.2}$ 按式(1)^[12]计算:

$$\delta_{s,0.2} = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (1)$$

式中: h_p 为保持天然的湿度和结构的土样, 加压至 0.2 MPa 时, 下沉稳定后的高度; h'_p 为上述加压稳定后的土样, 在浸水作用下, 附加下沉稳定后的高度; h_0 为土样的原始高度。

自重湿陷系数按式(2)^[12] 计算:

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \quad (2)$$

式中: h_z 为保持天然的湿度和结构的土样, 加压至土的饱和自重压力时, 下沉稳定后的高度; h'_z 为上述加压稳定后的土样, 在浸水作用下, 附加下沉稳定后的高度; h_0 为土样的原始高度。

2 试验结果分析

从现场承台下部浸水坑渗水情况来看, 处理效果对渗水有着很强的阻碍作用, 承台底部注水 1 次, 水分入渗的时间较长, 向四周扩散也十分缓慢。孔内夯实挤密效应发挥作用, 对周边土起到了挤密作用; 密实度提高对渗水的影响较大; 所以浸水载荷试验结束时, 承台周边没有很明显由于水分入渗而引起的湿陷沉降, 也没有裂缝的出现。承台下方浸水试坑没有大量沉降发生, 只有试坑边缘由于湿化引起的土壤塌陷。

2.1 处理区域挤密性和湿陷性分析

对处理后的 DDC 不同桩长区域, 选择 15 m 和 20 m 区进行挖设探井, 检验桩体即桩周土挤密和湿

陷情况。探井深度均为 10 m, 对三桩间、二桩间和桩身进行取样。由室内标准击实试验可知该区域土体最大干密度为 1.67 g/cm^3 、最优含水率为 15.9%。

限于篇幅本文中只将挤密区最薄弱环节三桩间土样进行分析。15 m 和 20 m 区域取得三桩间沿径向挤密系数如图 9 所示, 规范要求桩间土挤密系数最小不小于 0.88, 平均不小于 0.90。15 m 区域三桩间平均挤密系数为 0.91, 20 m 区域三桩间平均挤密系数为 0.92, 且两个区域每延米处挤密系数均大于最低限度要求。

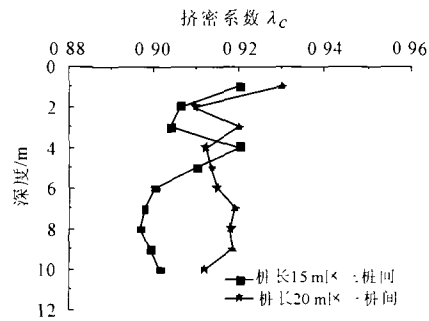


图 9 DDC 桩 15 m 区和 20 m 区域三桩间挤密系数

图 10~图 11 是两个区域不同压力作用下的湿陷系数沿径向变化曲线。三桩间土湿陷系数均小于 0.015 下限, 甚至 4 m 以上土体湿陷系数为 0, 这说明 DDC 桩完全消除了土体的湿陷性。整体来看不同压力下的湿陷系数沿径向增大, 也就是说上部土体处理的效果更好些, 这与挤密系数变化趋势一样, 挤密系数较大的地方, 则湿陷系数较小。

三桩间为整个挤密区域最薄弱的环节, 如果三桩间达到良好的挤密效果, 则整个处理区域湿陷性等指标也能较好达到要求。在本次试验条件下, 选择桩间距 1.1 m 的素土桩体, 达到了消除湿陷性的目的, 这也反映处理达到了消除湿陷性的目的。

2.2 承台沉降观测分析

图 12~图 14 分别是 15 m、20 m 和 25 m DDC 区域承台沉降观测点数据变化图。同样施加 80 t 荷载, 桩长越长, 承台沉降越小。15 m 区域承台累计下沉 87 mm; 20 m 区域累计下沉 62 mm; 而 25 m 区域累计下沉 44 mm。3 个承台沉降主要发生在前 20 d, 浸水前 20 d 沉降占整个沉降量的 70% 左右, 后期 50 d 浸水发生沉降较小, 仅占 20%; 停水后观测中 3 个承台沉降逐渐趋于稳定, 但桩长较短的区域如 15 m 区域, 沉降稳定所需的时间较其他稍长。25 m 承台浸水 40 d 后, 沉降逐渐稳定, 之后一直维持到试验

结束。

2.3 地表沉降观测分析

地表沉降一共 22 个,本文中只分析了三个处理区域部分地表沉降变化,其余观测点的变化规律与文中罗列的观测点几近相同,未全部罗列。另外试验中地表沉降在浸水 40 d 左右时依然很小,故停止了地表沉降观测。

15 m 区共有 6 个地表沉降观测点。编号为 DDC15-20(图 15)的地表沉降在 6 个观测点中沉降表现最为突出,累计沉降仅有 4 mm,其余地表沉降观测点只有 2 mm 的沉降。15 m 区域沉降亦出现沉降量曲线减小的趋势,如图 16。出现这种情况一方面由于受天气影响,秋冬季兰州地区刮风较多;另一方面,还有试验在冬季进行,出现地表的冻胀。

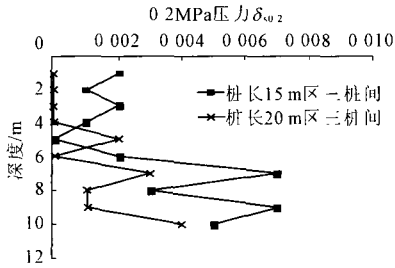


图 10 DDC 桩 15 m 区和 20 m 区域三桩间湿陷系数 $\delta_{s,0.2}$

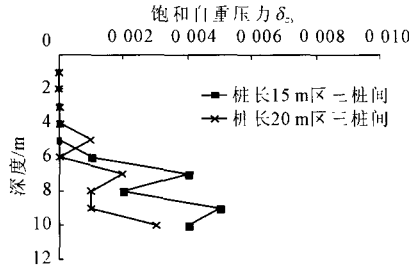


图 11 DDC 桩 15 m 区和 20 m 区域三桩间湿陷系数 δ_s

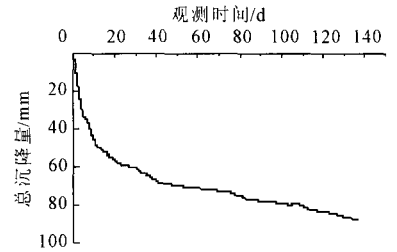


图 12 15 m DDC 桩承台沉降观测曲线

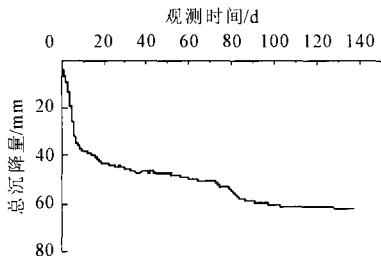


图 13 20 m DDC 桩承台沉降观测曲线

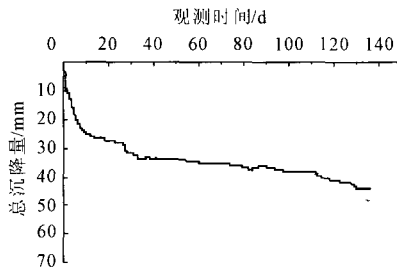


图 14 25 m DDC 桩承台沉降观测曲线

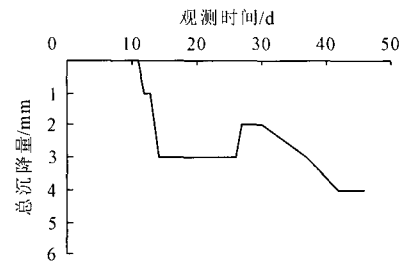


图 15 DDC15-20 沉降量变化曲线

采用 15 m 的 DDC 桩进行地基处理后,对承台进行浸水,承台历经 137 d 累计沉降仅有 87 mm;而周边地表沉降观测点最大沉降也仅有 4 mm,应该说采用桩间距 1.1 m,桩长 15 m 对大厚度自重湿陷性黄土进行处理,抵抗 20 t/m² 的荷载效果良好。

数据变化曲线。从这些曲线可以看出 20 m 承台周边沉降依然是很微小,最大沉降是点号 DDC20W2 仅有 3 mm(图 20)。DDC20N1(图 19)出现上升阶段,而且上升幅度较大,向上隆起 7 mm。地表沉降是由于湿陷引起,地面隆起则由于冻胀因素造成。

图 17~图 20 是 20 m 区域部分地表沉降观测点

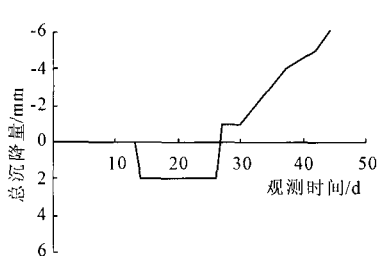


图 16 DDC15N1 沉降量变化曲线

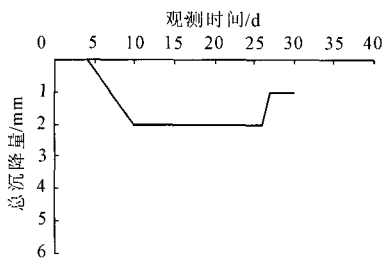


图 17 DDC20S1 沉降量变化曲线

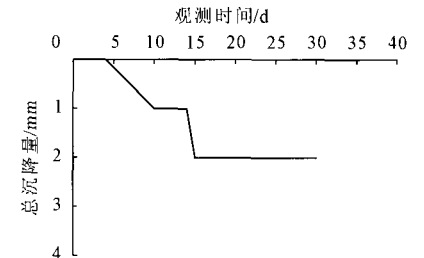


图 18 DDC20S2 沉降量变化曲线

图 21 和图 22 是 25 m 区两个地表沉降观测数据变化曲线。25 m 沉降曲线变化总体与 15 m 和 20 m 区域变化类似,累计沉降量较小,存在回弹现象。点号 DDC25E2 46 d 记录中累计发生了 6 mm 的沉

降;DDC25W2 地表沉降在 46 d 观测中,没有发生任何沉降(文中未罗列)。25 m 区在浸水过程中,80 t 的荷载下对承台西面 8.5 m 距离处土体没有任何影响。总体来说 25 m 区域承受了 20 t/m²,周边没有

出现裂缝以及大面湿陷沉降等问题。

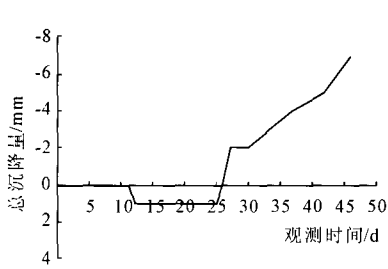


图 19 DDC20N1 沉降量变化曲线

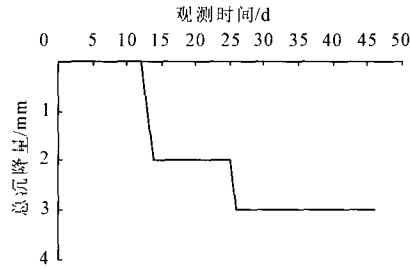


图 20 DDC20W2 沉降量变化曲线

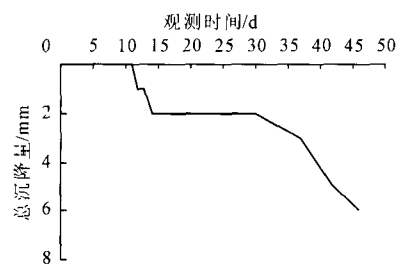


图 21 DDC25E2 沉降量变化曲线

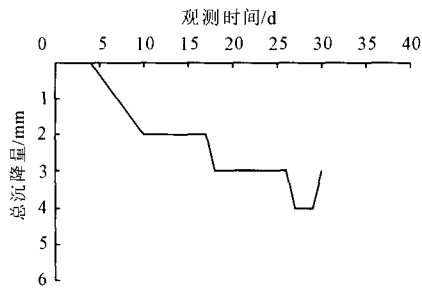


图 22 DDC15-25 沉降量变化曲线

从 DDC 15 m、20 m 和 25 m 处理区域沉降观测变化曲线来看,地表浸水对承台影响不大,而且在周边渗水的情况下,较大荷载并没有引起处理区域的过大变形。桩长 15 m、20 m 和 25 m,桩间距 1.1 m 能满足 20 t/m^2 荷载要求。因此在桩间距 1.1 m 条件下,选用 15 m 桩长可有效节约地基处理成本以及降低工程造价。

3 结论

本文通过对自重湿陷性黄土典型场地进行不同 DDC 桩长的浸水载荷试验,主要结论有:

(1) DDC 工法处理后,浸水试坑中水分入渗缓慢;

(2) 3 个处理区域没有发生较大沉降,冻胀作用引起的地表膨胀大于由于承台下降和土体湿陷引起地表沉降;

(3) 3 个不同 DDC 桩长处理后的地基都能抵抗 20 t/m^2 的荷载,选用 DDC 桩长 15 m 和桩间距 1.1 m 的桩间距可以有效节约成本,降低工程造价。

参考文献:

- [1] 司炳文.湿陷性黄土地基处理的新技术(DDC 工法)[C]//全国黄土学术会议论文集.乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1994:247.
- [2] 司炳文,唐业清.孔内深层强夯技术的机理与工程实践[J].施工技术,1999,28(5):48-49.
- [3] 冯志焱,林在贯,郑翔.孔内深层强夯法处理湿陷性黄土地基的一个实例[J].岩土力学,2005,26(11):1834-1836.
- [4] 黄雪峰,陈正汉,方祥位,等.大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增2):4332-4338.
- [5] 欧阳倩,王治坡,许峰农,等.DDC 灰土挤密桩复合地基施工中应注意的几个问题[J].工业建筑,2006,(增1):815-816.
- [6] 李香德,许天戟.大厚度湿陷性黄土地基处理的研究与应用[J].甘肃工业大学学报,1993,19(2):109-113.
- [7] 罗云海.孔内深层强夯法处理湿陷性黄土实例[J].土工基础,2006,20(5):8-10.
- [8] 苏谦,刘昌清,李安洪.郑西客运专线深厚湿陷黄土地基 DDC 桩法分析及沉降计算研究[J].线路/路基,2006,(5):23-25.
- [9] 汤磊,陈正汉.两个地基处理工程实例的对比分析[J].岩土工程师,1998,10(4):14-17.
- [10] 郑永辉.采用 DDC 桩处理湿陷性黄土地基[J].太原理工大学学报,2005,36(增):112-113.
- [11] CECS 197-2006.孔内深层强夯法技术规程[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [12] GB50025-2004.湿陷性黄土地区建筑规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.