

孔内强夯法处理湿陷性黄土地基的应用综述

周小松^{1,2}, 朱才辉³, 乔建伟^{1,2*}, 李鑫磊³, 王颖蛟^{1,2}

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043;
3. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:以56个不同湿陷性黄土场地采用孔内深层(超)强夯法(DDC法或SDDC法)在地基处理中案例为背景,针对其应用现状展开统计分析,讨论了湿陷性黄土地基承载力、湿陷厚度、湿陷等级及地域分布特性,分析了DDC工法中采取的填料、夯击能、成孔直径、成桩直径、桩长、布桩方式等施工参数对湿陷性消除、复合地基承载力等地基处理效果的影响程度和规律。结果表明:(1)湿陷土层厚度和湿陷等级逐级递减,DDC工法使用频次较SDDC工法高,且DDC法在湿陷性厚度为5~15 m的Ⅲ级自重湿陷性场地集中应用广泛。(2)DDC(SDDC)工法中最常采用的填料为灰土,占比为60%,处理后的复合地基承载力可提高1.4~4.7倍。(3)DDC法夯击能为800~2 000 kJ/层,成孔和成桩直径分别为0.4 m和0.6 m;SDDC法夯击能为1 000~3 000 kJ/层,成孔和成桩直径分别为1.2 m和1.8 m。(4)DDC法和SDDC法的桩间距基本为2.0~3.0倍成孔直径,布桩方式一般为正三角形,但SDDC法处理深度较DDC法更深,其对湿陷性地基的挤密加固效果更为明显。

关键词:孔内深层强夯法;孔内深层超强夯法;地基处理;湿陷性黄土;复合地基;承载力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0496-11

Case study on the application of DDC method for foundation treatment in collapsible loess site

ZHOU Xiao-song^{1,2}, ZHU Cai-hui³, QIAO Jian-wei^{1,2*}, LI Xin-lei³, WANG Ying-jiao^{1,2}

(1. China JK Institute of Engineering and Design, Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. Shanxi Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the case of 56 different collapsible loess sites using deep (super) dynamic compaction method (DDC method or SDDC method) in foundation treatment, a statistical analysis is carried out on its application condition. The bearing capacity, collapsible thickness, collapsible grade and regional distribution characteristics of collapsible loess foundation are discussed. The influence degree and law of the construction parameters such as filler, ramming energy, hole diameter, pile diameter, pile length, and pile arrangement adopted in DDC construction method on the foundation treatment effects such as collapsibility elimination and composite foundation bearing capacity are analyzed. The results show that: (1) The thickness and grade of collapsible soil layer decrease gradually, and the frequency of DDC method is higher than that of SDDC method. The DDC method is widely used in grade III self-weight collapsible site with collapsible thickness of 5 to 15 m. (2) About 60% of the DDC (SDDC) construction method uses lime soil as the filler, and the bearing capacity of the treated composite foundation can be increased by 1.4 to 4.7 times. (3) The tamping energy of DDC method is 800-2 000 kJ/layer, hole forming and pile forming diameter is 0.4 m and 0.6 m, respectively; the tamping energy of SDDC method usually is 1 000-3 000 kJ/layer, diameter of hole formation and pile formation are 1.2 m and 1.8 m, respectively. (4) The pile spacing of the DDC method and the SDDC method is basically 2.0-3.0 times the diameter of the hole. The pile arrangement method is usually equilateral triangle. However, the treatment depth of SDDC method is deeper than that of

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807243); 陕西省青年科技新星项目(2022KJXX-05); 机勘院科技研发基金(11741401120200041); CMEC孵化科技项目(CMEC-KJFH-2018-02)。

作者简介: 周小松(1986—),男,重庆彭水人,高级工程师,主要从事黄土地基处理方面的研究与施工工作。E-mail: 35367129@qq.com。

*通信作者: 乔建伟(1990—),男,安徽宿州人,博士,高级工程师,主要从事特殊岩土工程性质与地基处理技术的研究工作。E-mail: qiaojw@jk.com.cn。

DDC method. The compaction reinforcement effect of SDDC method is more obvious for collapsible foundation.

Key words: deep dynamic compaction method (DDC); super deep dynamic compaction method (SDDC); foundation treatment; collapsible loess; composite foundation; bearing capacity

0 引言

我国西北地区广泛发育湿陷性黄土层,在工程建设中存在大量黄土地基加固问题。自20世纪90年代孔内深层强夯技术开创以来,由于该技术采用高能量的高压夯击和动态冲、砸、挤压的强力压实和挤密作用,形成的桩体十分密实,桩周土也能得到强力挤密。目前困扰大厚度黄土地基遇水湿陷、承载力不足等问题也主要采用该技术进行处理。

然而,孔内深层强夯技术在实际施工时,往往面临没有合适的理论去指导施工参数,通常是在现场试桩来确定相关参数,造成了工期和资金上的浪费。因此本文通过大量孔内深层(超)强夯技术在湿陷性黄土地基处理的工程实践为背景,选取了具有代表性的50个DDC工法^[1-49]和6个SDDC工法^[50-55]的工程实际案例进行分析,分别统计了研究区域、原始地层结构(原地基承载力、湿陷厚度和湿陷等级)、填料、施工参数(夯击能、成孔直径、成桩直径、桩长、桩径、布桩方式)等因素以及处

理效果情况(湿陷性消除、复合地基承载力),对其进行了总结归纳,并分析了各个因素对处理效果的影响规律。为湿陷性黄土地区应用DDC或SDDC技术的设计和施工提供参考。

1 DDC法地基处理

自孔内深层强夯(DDC)法开创以来,被广泛应用于湿陷性黄土地区的地基处理中,它夯击能量大,处理深度深,能有效消除处理范围内的湿陷性,较大幅度提高地基土的密实度,降低地基土的变形,增强其承载力。然而,具体施工中填料类型以及施工参数中夯击能、桩长、桩径等因素究竟该如何选择,目前尚没有一个明确的结论。为了考察孔内深层强夯(DDC)法在湿陷性黄土地区应用情况和处理效果的影响因素,根据收集的50多个典型应用案例,分析了研究区域与原始地层结构情况,填土材料和桩长、桩距等因素与处理后湿陷系数和复合承载力之间的关系。统计情况如表1所示。

表1 DDC法处理湿陷性黄土地基统计情况
Table 1 Statistics analysis of foundation treatment in collapsible loess site with DDC method

文献	区域	h_c	G_c	f_a	F_s	T	h_d	T_n	T_e	d	D	l	L	f_{as}
1	宝鸡	20	II、III	116~150	2:8灰土	2~15	—	—	1 300~ 3 000	0.4	0.63~ 0.65	1.2	18.8~ 19.3	300~ 407
2	咸阳	—	II-非	—	2:8灰土	15~20	≥ 3	≥ 10	—	0.4	0.65	1.0~1.25	6.0~ 7.5	210~ 275
3	—	—	III、IV	160	2:8灰土	2	5~8	5~7	560~ 800	0.4	—	1	9	350~ 415
4	兰州	9.4~10.2	III	—	素土	2	4.5~ 5.5	7	700~ 1 000	0.4	0.60	1.1	5.5	—
5	汉中	8.5~9.5	III	160	3:7灰土	2	—	≥ 8	—	—	0.55	0.9	11	450
6	三门峡	10.2~ 16.0	I-非	110	渣土	2~18	8	5~8	—	0.4	0.60~ 2.00	1.1~3.6	8~9	262.5 ~ 297.8
7	兰州	22~26	II、III	—	3:7灰土	3	4~7	6~8	720~ 1 680	0.95	—	1.9	12.5	>250
8	西安	4.6~9.8	I	—	1:9 水泥土	—	4~12	6~8	—	0.6	—	1.1	9	861.24
9	运城	26	III、IV	—	2:8灰土	—	—	—	—	0.4	0.75~ 0.78	1.05~1.2	24	436~ 616

续表 1 DDC 法处理湿陷性黄土地基统计情况

Continuation of Table 1 Statistics analysis of foundation treatment in collapsible loess site with DDC method

文献	区域	h_c	G_c	f_a	F_s	T	h_d	T_n	T_e	d	D	l	L	f_{as}
10	西安	6.0~12.6	II-非	120	2:8 灰土	—	—	—	—	2	—	4.5	4.6~6.6	278~420
11	西安	18	III	170	素混凝土	2	8	6~10	1 600	0.4	0.6	1	19.4	800
12	吕梁	23.5~25.9	III	160	素土	1.8	6~10	6~10	$\frac{1\ 080}{1\ 944}$	0.4	0.55	1(排 0.87)	18	250
13	河津	11.5	III	160	3:7 灰土	1.5~2.0	—	—	—	0.4	0.6	0.9	16	>350
14	洛阳	10~21	I-非	—	1:9 水泥土	1	5	10	500	0.35	0.6	0.95	15~22	470
15	洛阳	13	I-非	—	渣土	—	—	—	—	0.4	0.6	1.2	11	352
16	西安	7.7~9.0	II、III	165	3:7 灰土	1.8	—	—	—	0.4	0.6	0.95	9	340
17	太原	—	II	70	3:7 灰土	2	3	6~8	$\frac{360}{480}$	0.4	0.49	1	11	195
18	西安	9.8~16	III、IV	—	素土	—	—	—	—	0.4	0.6	$\frac{0.85}{(排\ 0.74)}$	7.95	160
19	定边	18.5	III	90	2:8 灰土	—	6	6~10	—	0.4	0.55	0.9	13	260
20	西安	11.3~12.0	II、III	90	3:7 灰土	—	—	—	—	0.4	0.6	$\frac{0.9}{(排\ 0.721)}$	8	270
21	—	—	—	120	1:9 水泥土	—	1	—	—	0.35	0.6	0.95	7~22	332
22	兰州	30	IV	—	2:8 灰土	2.5	7	10	1 750	0.4	0.6	1	16	300
23	西安	10.3~14.8	II-非	90(140)	2:8 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	1.2	6~10	300
24	—	—	—	—	3:7 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	1.2	20.3	305
25	运城	8.5	IV	—	3:7 灰土	1.8	3	8~10	$\frac{432}{540}$	0.4	0.6	1	10.5	328
26	渭南	30	IV	140	3:7 灰土	—	≥ 4	3	—	0.4	0.55	0.9	24.25	>250
27	太原	10~13	II	—	1:4 水泥土	—	—	—	—	0.4	0.6	1	18	>400
28	铜川	17.2~28.0	III、IV	$\frac{150}{180}$	3:7 灰土	1.8~2	≥ 4.50	8~10	$\frac{720}{900}$	0.4	0.6	0.9	19	300
29	庆阳	10	II	150	2:8 灰土	1.2	>6	>10	>720	0.4	0.55	1.1	9	>280
30	固原	40	IV	$\frac{120}{150}$	3:7 灰土	3	—	—	—	0.45	0.65	1.2	40	600
31	海东	20	II	$\frac{120}{160}$	2:8 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	0.95	18	300
32	洛阳	13	I-非	—	渣土	—	—	—	—	0.4	0.6	1.2	11	352
33	忻州	—	I-非	—	1:5 水泥土	—	—	—	—	0.4	0.6	1.2	15	360
34	渭南	8	II	—	2:8 灰土	1.5	5	7	585	0.4	0.6	0.9	9.3	200
35	渭南	14.0~15.5	II	150	1:6 水泥土	1.5	—	—	—	0.4	0.6	0.9	16.5	450
36	青海	7~14.25	II、III	160	2:8 灰土	—	—	—	—	1.1	2	3.6	6	288
37	渭南	7.3~9.0	II	150	2:8 灰土	1.5	$\frac{0.5}{0.6}$	8~10	90	0.4	0.55	0.9	6.5	220
38	巩义	35	III	90	2:8 灰土	—	—	—	—	0.5	0.7	1.2	19~45	260

续表 1 DDC 法处理湿陷性黄土地基统计情况
Continuation of Table 1 Statistics analysis of foundation treatment in collapsible loess site with DDC method

文献	区域	h_c	G_c	f_a	F_s	T	h_d	T_n	T_e	d	D	l	L	f_{as}
39	西安	10	II	—	3:7 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	1	7	200
40	庆阳	26	II	—	2:8 灰土	—	—	—	—	0.4	0.6	0.9	11	250
41	宝鸡	21	IV	140	素土	—	—	—	—	0.5	0.7	1.0	11.5	200
42	榆林	18	III	—	2:8 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	0.9	18	260
43	庆阳	4.5~16.6	II	—	素土	—	—	—	—	0.4	0.55	1.0	11.7	344
44	西安	—	III	—	2:8 灰土	—	—	—	—	0.5	0.7	1.2	—	260
45	—	15	IV	—	2:8 灰土	10	5	10	5 000	1.3	2.0~2.2	3.6	15	200
46	兰州	36.5	IV	—	素土	—	—	—	800~2 000	0.4	>0.6	1.0~1.5	10~25	—
47	长治	3.4~13.4	II-非	120	碎石	—	—	—	—	0.4	0.55	0.9	12	280
48	延安	26.5	IV	150	2:8 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	0.9	20.5	300
49	—	27.2	IV	125	3:7 灰土	—	—	—	—	0.4	0.55	1.0	—	260
50	太原	14.5	II	120	素土	—	—	—	—	0.4	0.6	0.9	14	170

注: h_c 为湿陷土层厚度, m; G_c 为湿陷等级; f_a 为原地基承载力, kPa; F_s 为填料类型; T 为锤重, t; h_d 为落距, m; T_n 为击数; T_e 为夯击能, kJ/层; d 为成孔直径, m; D 为成桩直径, m; l 为桩间距, m; L 为桩长, m; f_{as} 为复合地基承载力, kPa。

1.1 DDC 法应用现状

由表1、图1可知,DDC 工法主要应用于陕西(48%)、山西(20%)、甘肃(14%)、河南(11%)、青海(5%)和宁夏(2%)等地区具有不同湿陷等级的湿陷性场地。

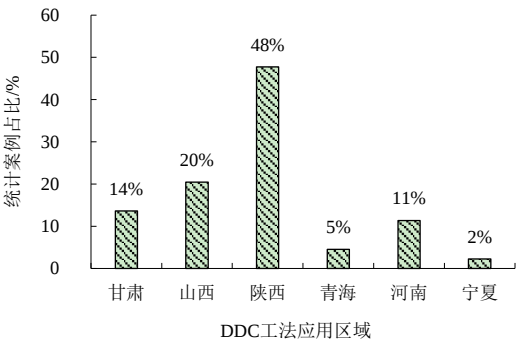


图 1 DDC 工法在不同区域的应用

Fig. 1 Application of DDC in different areas

由图2可知,根据 DDC 工法所应用的湿陷性黄土地场多为Ⅲ级自重湿陷性场地(30.6%),其次为Ⅱ级自重湿陷性场地(26.6%),再次为Ⅳ级自重湿陷性场地(20.1%),其余均为Ⅰ、Ⅱ级非自重湿陷性场地(各占 11.3%)。可见,DDC 工法处理的湿陷地基类型多为Ⅱ~Ⅲ级自重湿陷性场地。其中,DDC 工法处理的湿陷场地中位于陕西地区的西安、咸阳、宝鸡、渭南、铜川等地,其湿陷土层厚度最小值为 6.0 m,最大值为 30 m,平均值为 12.3 m,湿陷类型存在自重和非自重,湿陷等级为Ⅱ~Ⅲ级。位于山西地区的长治,其湿陷土层厚度为 3.4~14.4 m,湿陷类型为非自重,湿陷等级为Ⅱ级。位于河南地区的洛阳,其湿陷土层厚度为 14 m,湿陷类型和等级为Ⅱ级非自重湿

陷。位于陇东陕北地区的榆林、庆阳、延安等地的湿陷土层厚度最小值为 10 m,最大值为 26.5 m,平均值为 18.25 m。从中可以看出不同区域湿陷土层的厚度以及湿陷类型和等级会随着陇西地区→陇东陕北地区→关中地区→山西地区→河南地区逐级递减(图3),这与文献^[21]提出的“中国湿陷性黄土工程地质分区略表和参考表”结果是一致的。由图4可知,DDC 工法在湿陷土层厚度一般(5~20 m)的场地中应用最多,其应用案例大于统计总数的一半以上(70.4%),而其它不同厚度的应用占比不足 30%,如对于湿陷性土层深度在 25~35 m 之间的 DDC 工法应用占 16.4%,在 20~25 m 之间占比约为 6%,其中厚度较小(0~5 m)或超大(35~40 m)的地层中应用最少,分别占比 4.5%和 3.0%。主要原因可能是小厚度湿陷性黄土处理可采用其他简便方法,如强夯法、垫层法,而超大厚度湿陷性黄土地基采取 DDC 工法时,施工工艺及造价相对较高,且处理效果较差。

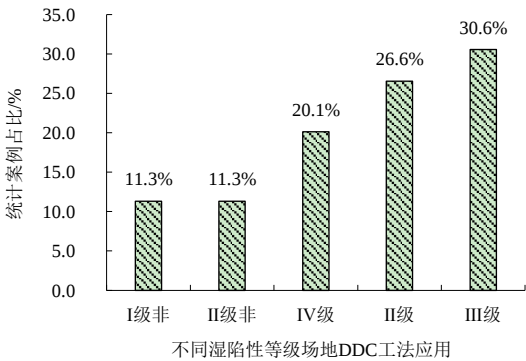


图 2 DDC 工法在不同湿陷性等级场地的应用

Fig. 2 Application of DDC in different collapse loess site

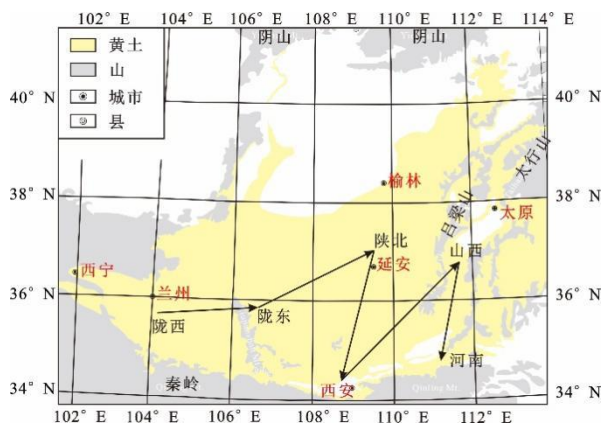
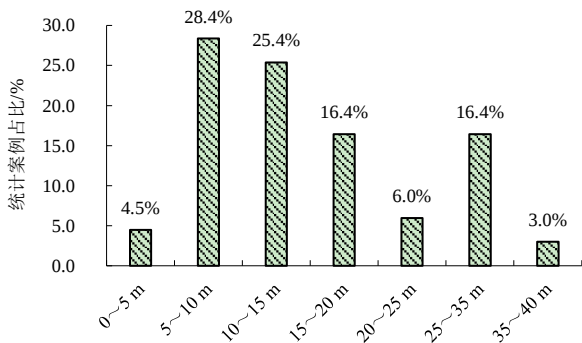


图3 黄土湿陷等级变化示意图

Fig. 3 Schematic of change of loess collapsibility grade



DDC工法在不同湿陷土层深度处应用

图4 DDC工法在不同湿陷土层深度的应用

Fig. 4 Application of DDC in different depth of collapse loess layers

综上所述,DDC工法已被广泛应用于不同湿陷等级和湿陷类型的黄土地基处理中,应用于一般湿陷厚度土层中,且处理效果较好,但对于大厚度和超大厚度湿陷性黄土地基处理应用还较少,对其处理效果有待进一步研究。

1.2 填料对地基处理效果影响

DDC工法常用填料包括素土、灰土(其配比主要采用2:8和3:7)、水泥土(其配比主要采用1:4、1:5、1:6、1:9)、碎石、渣土和建筑垃圾等,DDC工法施工期间,填料的用量每循环约0.12~0.14 m³,单循环用料过多会导致挤密效果不够,过少则造成工程浪费。

统计已有案例DDC工法中填料占比如图5所示。由图5可知,2:8灰土使用频率最高,达35%,3:7灰土使用频率次之,约为25%,素土使用频率约为15%,渣土使用频率约为8%,1:9的水泥土使用频率约为4%,其余占比均低于2%。由此可见,目前DDC工法在处理湿陷性黄土地基使用的填料以灰土为主,总占比约为60%。

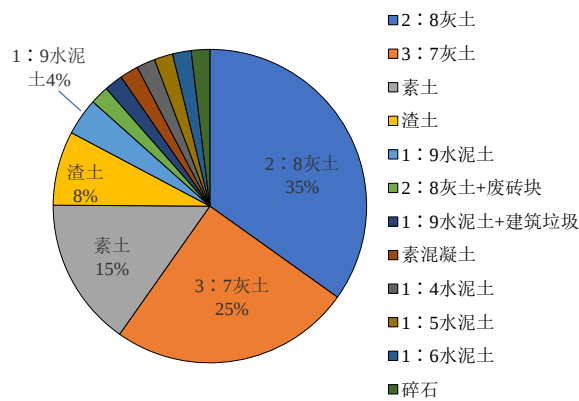


图5 DDC工法中填料的应用

Fig. 5 Application of fill materials with DDC method

根据不同填料进行DDC处理前后的地基承载力对比发现(见图6,其中横坐标表示统计数据的编号):原地基的承载力范围为70~175 kPa,平均值为133 kPa;DDC法处理后复合地基的承载力范围为160~800 kPa,平均值为324 kPa,处理后的承载力提高范围为1.4~4.7倍,平均为2.5倍。因此,采取DDC处理后复合地基承载力显著提高,且均达到了工程建设要求的地基承载力许可值。

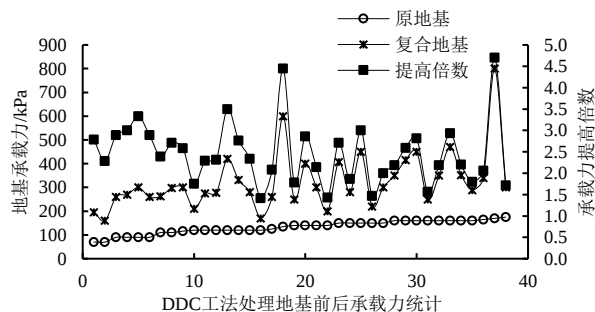


图6 DDC工法处理前后地基承载力对比分析

Fig. 6 Comparison of bearing capacity of foundation soil after and before DDC method treatment

统计采用素土处理后的复合地基承载力特征值平均值为300 kPa;2:8灰土桩的复合地基承载力特征值最大值为407 kPa,最小值为200 kPa,平均值为375 kPa;3:7灰土桩的复合地基承载力特征值最大值为450 kPa,最小值为250 kPa,平均值为341 kPa;1:5水泥土桩的复合地基承载力特征值为320 kPa;碎石土桩的复合地基承载力特征值为450 kPa;渣土桩的复合地基承载力特征值最大值为302 kPa,最小值为210 kPa,平均值为274 kPa。可以看出随着填料强度的增大,处理过后复合地基承载力特征值也随之增大。DDC处理后地基承载力由大到小顺序依次为:碎石→2:8灰土→3:7灰土→1:5水泥土→素土→渣土。

1.3 DDC 设计参数对地基处理效果的影响

由表 1 给出的统计数据可以得出孔内深层强夯法在施工中要控制的参数包括夯击能、成孔直径、成桩直径、桩距、桩长、桩的布置方式。统计结果如下:

(1) 夯击参数。统计上述 50 个文献,发现 DDC 工法采用的夯锤质量一般为 1~20 t 不等,常用夯锤质量为 1.5~3.0 t;落距为 0.5~12 m 不等,常见夯锤落距为 5~8 m;夯击次数一般为 5~10 次不等,常用夯次为 6~8 次;夯击能一般为 90~5 000 kJ/层,常用夯击能为 800~2 000 kJ/层。由于地层、填料、施工控制水平的差异性,导致夯击次数、夯击能与地基处理效果之间的关系较为离散,且目前针对该方面研究成果较少。

(2) 成孔直径 d 。统计成孔直径如图 7 所示。由图 7 可见,DDC 工法成孔直径一般在 0.35~2.0 m 不等,其中成孔直径主要为 0.35~0.4 m,占 83.7%,其原因主要是工程实际成孔工艺一般采用机械钻孔、掏孔,受到施工机具的影响较大。

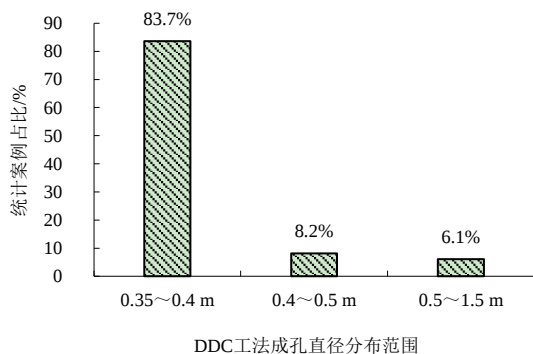


图 7 DDC 工法处理地基成孔直径分布范围

Fig. 7 Distribution range of hole diameter of foundation treated by DDC method

(3) 成桩直径 D 。统计成桩直径分布范围如图 8 所示。由图 8 可知,实际工程中桩体直径分布在 0.49~2.2 m,其中成桩直径主要分布在 0.55~0.70 m 范围内,约占 88%。定义挤密比=成桩直径/成孔直径,绘制成孔直径、成桩直径和挤密比分布曲线如图 9 所示。从图 9 可知,挤密比约分布在 1.2~2.0 之间,平均挤密比约为 1.5,表明 DDC 工法的挤密扩孔效应明显,可显著提高 0.5 倍成孔直径范围土体的密实度。

(4) 桩间距 l 。统计桩间距分布范围如图 10 所示。从图 10 可知,实际工程中常用的桩距分布范围为 0.7~4.5 m 不等,其中桩间距为 0.9~1.2 m 占比最大,为 82.3%。绘制桩间距与成孔直径和成桩直径的比值变化曲线如图 11 所示,由图 11 可知工程

常用桩间距是成桩直径的 1.4~2.2 倍,平均值约为 1.7;桩间距是成孔直径的 2.2~3.4 倍,平均值为 2.5,与规范《孔内深层强夯法技术规程》(CECS197:2006)^[51] 建议的桩间距为 2.0~3.0 d 相符。此外,黄雪峰等^[52] 研究发现当不同桩间距布桩可以消除黄土湿陷性时,选择桩间距较大布桩可以节约大量工程建设成本,但当桩间距越小消除湿陷性效果和地基承载力提高系数也越高,因此采用 DDC 工法进行地基处理时需要确定最优桩间距。

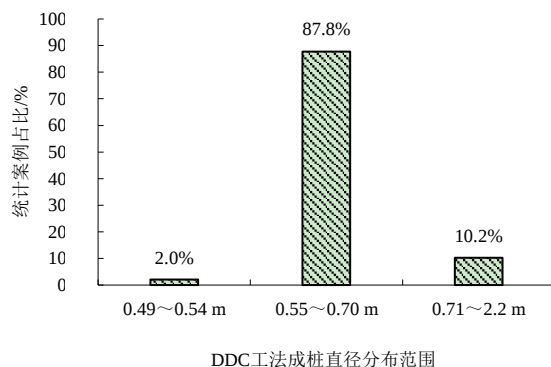


图 8 DDC 工法处理地基成桩直径分布范围

Fig. 8 Diameter distribution range of piles treated by DDC method

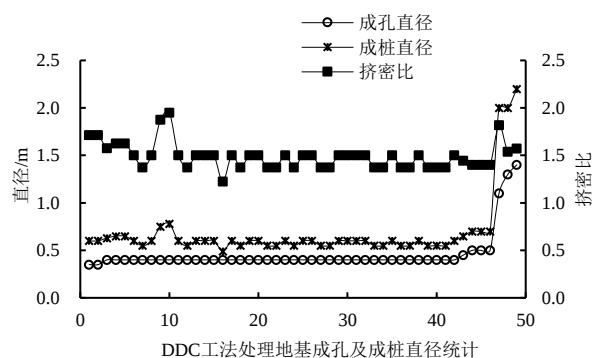


图 9 DDC 工法处理地基挤密比分析

Fig. 9 Analysis of compaction ratio of foundation treated by DDC method

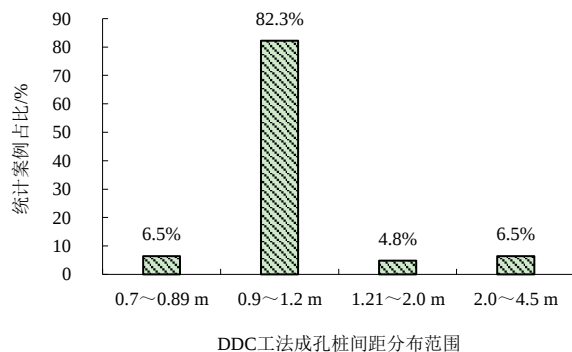


图 10 DDC 工法成孔桩间距分布范围

Fig. 10 Spacing distribution range of pore-forming piles by DDC method

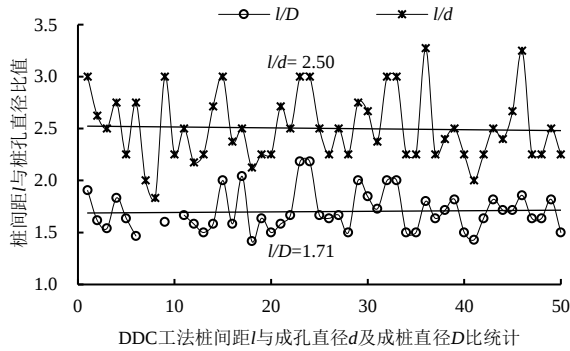


图 11 桩间距与成孔直径、成桩直径比值
Fig. 11 Ratio of pile spacing to hole diameter and pile diameter

(5) 桩长 L 。绘制处理深度与湿陷性土层厚度变化曲线如图 12 所示。由图 12 可知, 地层湿陷性深度与 DDC 处理深度基本保持一致, 实际处理深度(桩长)可能与设计承载力需求及建筑物重要性等级有关。桩长是根据湿陷性土层厚度以及建筑物级别设计, 若要全部消除湿陷量, 桩长要大于等于湿陷土层厚度, 若允许存在一定的剩余湿陷量, 则桩长小于湿陷土层厚度。在填料相同条件下, 桩长越长, 复合地基承载力也就越高, 其消除的湿陷性土层厚度也就越大。

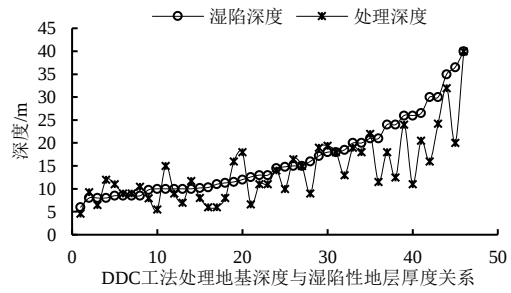


图 12 DDC 法处理地基深度与湿陷性土层厚度关系
Fig. 12 Relationship between foundation depth and collapsible loess thickness treated by DDC method

(6) 桩的布置方式。目前 DDC 工法在工程上采用的布置方式都是正三角形。

2 SDDC 法地基处理

孔内深层超强夯法(SDDC)是在孔内深层强夯法(DDC)基础上发展起来的,SDDC 法相对于 DDC 法锤体自重更重, 一般为 10~15 t, 夯击能更大, 成孔直径也会增大, 从而桩间土以及桩体的密实度更大, 产生的复合地基承载力高。SDDC 地基处理统计情况见表 2。

表 2 SDDC 法地基湿陷性黄土处理的统计情况

Table 2 Statistics analysis of foundation treatment in collapsible loess site with SDDC method

文献	区域	f_a	h_c	G_c	F_s	T_c	D	L	l	f_{as}	d	δ_s
53	三门峡	120	—	III	素土	1 980~3 240	1.7	7.0~7.5	3.5	260		
54		140	8.0	II		400~1 040	1.8	8.0	2.8	375		
55	西安	—	7.5	II非	3:7	2 000~2 500	1.8	8.0	2.8	362		
56		130	10.6	II	灰土	1 300~1 700	1.6	8.0	2.8	320	1.2	<0.015
57	庆阳	90	7.0~26.0	I~IV	素土	>2 250	1.8	20.0~35.0	2.6~2.8	290		
58	西安	150	13.0	II~III	渣土	1 500	2.0	4.6	4.5	273		

注: f_a 为原地基承载力, kPa; h_c 为湿陷土层厚度, m; G_c 为湿陷等级; F_s 为填料类型; T_c 为夯击能, kJ/层; D 为成桩直径, m; L 为桩长, m; l 为桩间距, m; f_{as} 为复合地基承载力, kPa; d 为成孔直径, m; δ_s 为湿陷性系数。

2.1 SDDC 法应用现状

由表 2 可知, 目前 SDDC 法应用情况相对 DDC 而言数量较少, 主要集中在关中地区的西安, 其处理的湿陷土层厚度最大值为 13.0 m, 最小值为 7.5 m, 平均值为 9.8 m, 湿陷类型为自重湿陷或非自重湿陷, 湿陷等级为 II~III 级; 位于陇东地区的庆阳湿陷土层厚度为 7.0~26.0 m, 湿陷类型为 I~IV 自重湿陷。可以看出与 1.1 节分析结果是一致的。

2.2 填料对地基处理效果影响

根据表 2 统计数据可见, SDDC 工法处理湿陷性黄土地基所采用的填料主要为: 灰土、渣土、素

土。采用不同填料地基处理后的承载力相比原地基承载力均显著提高, 采用素土桩的复合地基承载力特征值最大值为 290 kPa, 最小值为 260 kPa, 平均值为 275 kPa; 采用 3:7 灰土桩处理后的复合地基承载力特征值最大值为 375 kPa, 最小值 320 kPa, 平均值为 352 kPa; 采用渣土复合地基桩承载力特征值为 273 kPa。总体而言, 提高倍数平均约为天然地基的 2.33 倍, 与 DDC 处理效果基本相当。

2.3 SDDC 参数对地基处理效果的影响

根据表 2 的统计资料显示, SDDC 法施工参数中锤重一般为 2~15 t 不等, 常用夯锤质量为 10~

15 t; 其落距一般为 5~13 m 不等; 夯击次数一般为 4~6 次; 夯击能平均为 1 000~3 000 kJ/层; 成孔直径一般为 1.2~2.0 m, 平均由 DDC 的 0.4 m 增大到 1.2 m; 成桩直径由 DDC 的 0.6 m 扩大到 1.8 m; 桩间距也保持着 2.0~3.0 倍成孔直径, 为 2.6~4.5 m; 布桩方式仍为正三角形布置。桩长的设计也是根据原地基湿陷厚度来确定。挤密后, 地基的湿陷性系数一般能降至 0.015 以下, 完全消除地基湿陷性。

3 结 论

(1) 湿陷土层厚度和湿陷等级随着陇西地区→陇东陕北地区→关中地区→山西地区→河南地区逐级递减, DDC 工法使用频次较 SDDC 工法高。

(2) DDC 工法采用的填料多为灰土, 总占比为 60%, 其复合地基承载力特征值由大到小依次为: 碎石→2:8 灰土→3:7 灰土→1:5 水泥土→素土→渣土, 处理后的地基承载力提高范围为 1.4~4.7 倍, 平均为 2.5 倍。

(3) DDC 法在湿陷性厚度为 5~15 m 的 III 级自重湿陷性场地集中应用广泛, 其锤重一般为 1.5~3.0 t, 落距平均为 5~8 m, 夯次平均为 6~8 次/循环, 夯击能平均为 800~2 000 kJ/层, 平均成孔和成桩直径分别为 0.4 m 和 0.6 m。

(4) SDDC 法常用的锤重为 10~15 t, 落距一般为 5~13 m, 夯次为 4~6 次/循环, 夯击能平均为 1 000~3 000 kJ/层, 平均成孔和成桩直径分别增大到 1.2 m 和 1.8 m。

(5) DDC 法和 SDDC 法的桩间距基本为 2.0~3.0 倍成孔直径, 布桩方式基本为正三角形布置, 但 SDDC 法处理深度较 DDC 法更深, 其对湿陷性地基的挤密加固效果更为明显。

参考文献

- [1] 杨思明. 孔内深层强夯用于大厚度湿陷性黄土地基中的特点和作法[J]. 建筑技术, 2000(3): 191-192.
YANG Si-ming. Characteristics and practice of deep dynamic compaction in hole applied to collapsible loess foundation with large thickness[J]. Architecture Technology, 2000(3): 191-192.
- [2] 葛希元. 孔内深层强夯挤密桩在公路工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001(5): 105-106.
GE Xi-yuan. The application of down hole dynamic compaction in highway engineering[J]. West-China Exploration Engineering, 2001(5): 105-106.
- [3] 王吉利, 李保欣, 张炜, 等. 钻孔夯密桩处理湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊 1): 69-72.
WANG Ji-li, LI Bao-xin, ZHANG Wei, et al. Experimental research on treatment of collapsible loess foundation with drilling ram-compacted piles (DRCPs)[J]. Geotechnical Mechanics, 2002, 23(S1): 69-72.
- [4] 王广吉. 孔内深层强夯法在局部地基处理中的应用[J]. 甘肃科技纵横, 2003(1): 65-66.
WANG Guang-ji. Application of deep dynamic compaction method in hole in local foundation treatment[J]. Gansu Science and Technology, 2003(1): 65-66.
- [5] 王玉琴. 孔内深层强夯法在高层建筑地基处理中的应用[J]. 陕西工学院学报, 2004, 20(2): 35-37.
WANG Yu-qin. Deep dynamic consolidation applied to ground treatment of high-rise building[J]. Journal of Shaanxi University of Technology, 2004, 20(2): 35-37.
- [6] 范志勇, 程新涛. 孔内深层强夯技术在湿陷性黄土地区应用及检测[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2004(11): 23-25.
FAN Zhi-yong, CHENG Xin-tao. Application and detection of deep dynamic compaction in hole in collapsible loess area[J]. Prospecting Engineering: Rock and Soil Drilling and Excavation Engineering, 2004(11): 23-25.
- [7] 马增, 杜忠, 丁卫东. 《孔内深层强夯法》(DDC)在湿陷性黄土地区的应用[J]. 甘肃科技纵横, 2005(5): 159-41.
MA Zeng, DU Zhong, DING Wei-dong. Application of deep dynamic compaction in pore (DDC) in collapsible loess area[J]. Gansu Science and Technology, 2005(5): 159-41.
- [8] 郑永晖. 采用 DDC 桩处理湿陷性黄土地基[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(增刊 1): 114-116.
ZHENG Yong-hui. Treatment of collapsible loess foundation with DDC pile[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(S1): 114-116.
- [9] 吴耀祖, 赵锦明. DDC 法处理黄土湿陷性效果检验[J]. 岩土工程界, 2005, 8(3): 39-42.
WU Yao-zu, ZHAO Jin-ming. Effect test of loess collapsibility treated by DDC method[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 8(3): 39-42.
- [10] 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): 143-145, 157.
FENG Zhi-yan, LIN Zai-guan, ZHENG Xiang. An example of treating collapsible loess by super down hole deep compaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 143-145, 157.

- [11] 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(5): 8-10.
LUO Yun-hai. Example of treatment of collapsible loess by deep compaction in hole[J]. Geotechnical Foundation, 2006(5): 8-10.
- [12] 陈方明, 关立军, 刘晓华. 大厚度自重湿陷性黄土地基孔内深层强夯法的应用研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(5): 49-52.
CHEN Fang-ming, GUAN Li-jun, Liu Xiao-hua. Research on application of DDC pile in ground treatment of thick loess collapsible under overburden pressure[J]. Building Science, 2007, 23(5): 49-52.
- [13] 汪振斌. DDC 灰土桩在湿陷性黄土地基处理中的应用[J]. 山西建筑, 2007(14): 113-114.
WANG Zhen-bin. Application of DDC lime-soil pile in the foundation management of collapsibility loess[J]. Shaanxi Architecture, 2007(14): 113-114.
- [14] 陈明金. 柱锤冲扩桩(DDC 法)加固湿陷性黄土地基[J]. 科学之友: B 版, 2008(4): 22-23.
CHEN Ming-jin. Reinforcement of collapsible loess foundation by hammer thrust pile (DDC method)[J]. Friend of Science Amateurs: B Edition, 2008(4): 22-23.
- [15] 白石夯. 孔内深层强夯法在工程中的实际应用及设计[J]. 黑龙江科技信息, 2008(20): 258.
BAI Shi-hang. Application and design of deep dynamic compaction in hole in engineering[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008(20): 258.
- [16] 姜规模, 吴群昌, 蔡金选, 等. DDC 法在西安高层建筑地基处理中的应用[J]. 勘察科学技术, 2009(2): 41-44.
JIANG Gui-mo, WU Qun-chang, CAI Jin-xuan, et al. Application of DDC method in foundation treatment of xi'an high-rise building[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2009(2): 41-44.
- [17] 马晋喜, 李庆. 高填方地区地基处理方法实例[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(22): 208-209.
MA Jin-xi, LI Qing. Example of foundation treatment method in high fill area[J]. Science and Technology Information Development and Economy, 2009, 19(22): 208-209.
- [18] 关宏洁, 王瑜, 田晶. 孔内深层强夯法在工程中的应用[J]. 陕西教育: 高教版, 2009(4): 112, 110.
GUAN Hong-jie, WANG Yu, TIAN Jing. Application of deep dynamic compaction in hole in engineering[J]. Shaanxi Education: Higher Education Edition, 2009(4): 112, 110.
- [19] 库崇锋, 张伟. DDC 灰土桩在湿陷性黄土地区大罐地基处理中的应用[J]. 施工技术, 2009, 38(增刊 2): 109-111.
KU Chong-feng, ZHANG Wei. Application of DDC lime-soil pile in basement treatment of collapsible loess regions[J]. Construction Technology, 2009, 38(S2): 109-111.
- [20] 李锋科, 韩军强, 胡炳国, 等. 黄土地区孔内深层强夯法复合地基测试研究[J]. 施工技术, 2009, 38(增刊 2): 76-78.
LI Feng-ke, HAN Jun-qiang, HU Bing-guo, et al. Study on test of compound basement strengthened by down hole deep compaction method in loess regions[J]. Construction Technology, 2009, 38(S2): 76-78.
- [21] 袁克明, 王显雷. 郑西线黄土区水泥土 DDC 桩复合地基的试验研究[J]. 四川建筑, 2009, 29(增刊 1): 169-170, 172.
YUAN Ke-ming, WANG Xian-lei. Experimental study on soil-cement DDC pile composite foundation in loess area of Zhengxi railway[J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(S1): 169-170, 172.
- [22] 刘志伟, 申汝涛. 钻孔挤密桩处理强湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 339-343.
LIU Zhi-wei, SHEN Ru-tao. Field tests on pre-bored compaction lime-soil pile (down-hole dynamic compaction method) to improve serious collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 339-343.
- [23] 谢淮宁. DDC 灰土挤密桩在湿陷性黄土地区大型钢储罐工程中的应用[J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 114-116, 127.
XIE Huai-ning. Application study on DDC lime-soil pile for large steel storage tank project in collapsible loess area[J]. Building Structure, 2010, 40(12): 114-116, 127.
- [24] 马丽红. 孔内深层强夯法(DDC 法)在湿陷性黄土地区的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(9): 86-87.
MA Li-hong. Application of deep dynamic compaction in hole (DDC) in collapsible loess area[J]. Shaanxi Architecture, 2010, 36(9): 86-87.
- [25] 张学兵. 孔内深层强夯桩处理湿陷性黄土地基施工实践[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2010, 37(8): 70-72.
ZHANG Xue-bing. Deep hole compaction pile to deal with collapsible loess foundation construction practice[J]. Journal of Exploration Engineering: Geotechnical Drilling and Digging Engineering, 2010, 37(8): 70-72.
- [26] 李清火, 张浩杰. 孔内深层强夯法在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 建筑科学, 2011, 27(1): 103-105.
LI Qing-huo, ZHANG Hao-jie. Application of DDC technology in collapsible loess foundation[J]. Building Science, 2011, 27(1): 103-105.
- [27] 赵永伟. 太原东山地区湿陷性黄土处理方法的探讨[J]. 科学之友, 2011(15): 63-64.

- ZHAO Yong-wei. Discussion on treatment methods of collapsible loess in Dongshan area, Taiyuan[J]. Friends of Science, 2011(15): 63-64.
- [28] 刘丽萍, 王胜利. DDC 桩处理变电站厚层湿陷性黄土地基的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 35-38.
- LIU Li-ping, WANG Sheng-li. Study on treating thick-bedded collapsible loess foundation of converting substation by deep dynamic compaction pile in hole[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(4): 35-38.
- [29] 田景隆. 孔内深层强夯桩应用于湿陷性黄土地区[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(8): 87-88.
- TIAN Jing-long. Application of deep dynamic compaction pile in hole in collapsible loess area[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(8): 87-88.
- [30] 杨国安. 王洼选煤厂大厚度黄土场地 DDC 桩复合地基处理的研究[J]. 煤炭工程, 2013(1): 46-48, 51.
- YANG Guo-an. Study on DDC pile composite foundation treatment in large loess site of Wangwa coal preparation plant[J]. Coal Engineering, 2013(1): 46-48, 51.
- [31] 李永华. DDC 法在大厚度湿陷性黄土地区的应用[J]. 有色金属设计, 2012, 39(1): 44-46.
- LI Yong-hua. Application of down-hole dynamic compaction (DDC) in thick-bedded collapsible loess area[J]. Nonferrous Metals Design, 2012, 39(1): 44-46.
- [32] 朱静文. 孔内深层强夯法在工程中的实际应用及设计[J]. 民营科技, 2012(7): 317.
- ZHU Jing-wen. Practical application and design of deep dynamic compaction method in engineering[J]. Non-State Running Science & Technology Enterprises, 2012(7): 317.
- [33] 张志华. DDC 法水泥土桩在地基处理中的应用[J]. 山西建筑, 2012, 38(10): 102-104.
- ZHANG Zhi-hua. On application of DDC method cement soil pile in foundation treatment[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(10): 102-104.
- [34] 白彦刚. 浅谈 DDC 灰土挤密桩在湿陷性黄土地基处理中的应用[J]. 陕西水利, 2012(1): 71-72.
- BAI Yan-gang. Application of DDC lime soil compaction pile in collapsible loess foundation treatment[J]. Shaanxi Water Resources, 2012(1): 71-72.
- [35] 李孝坤. 夯实水泥土挤密桩在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 中华建设, 2012(8): 232-233.
- LI Xiao-kun. Application of compacted soil-cement compaction pile in collapsible loess foundation[J]. China Construction, 2012(8): 232-233.
- [36] 马志敏, 李开颜. 大直径 DDC 桩在工业建筑中的应用[J]. 工程与建设, 2013, 27(1): 88-90.
- MA Zhi-min, LI Kai-yan. Application of large diameter DDC pile in industrial building[J]. Engineering and Construction, 2013, 27(1): 88-90.
- [37] 刘兴文. 填料灰土的 DDC 桩应用分析[J]. 中小企业管理与科技: 下旬刊, 2013(7): 96-97.
- LIU Xing-wen. Application analysis of DDC pile filled with lime soil[J]. Management and Science and Technology of Small and Medium-sized Enterprises: Last Ten Days, 2013(7): 96-97.
- [38] 李宏福, 李欣, 胡晓. DDC 技术在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 中国水运: 下半月, 2014, 14(6): 380-381.
- LI Hong-fu, LI Xin, HU Xiao. Application of DDC technology in collapsible loess foundation[J]. China Water Transport: Second Half of the Month, 2014, 14(6): 380-381.
- [39] 毛朝亮, 郭卫波. 孔内深层强夯法的实例分析[J]. 四川建材, 2014, 40(2): 97-98.
- MAO Chao-liang, GUO Wei-bo. Case analysis of deep dynamic compaction method in hole[J]. Sichuan Building Materials, 2014, 40(2): 97-98.
- [40] 任凯. DDC 法在庆阳大厚度湿陷性黄土地区的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2015, 22(1): 42-44.
- REN Kai. The application of DDC method in the big thickness collapsible loess region pf qingyang area[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2015, 22(1): 42-44.
- [41] 丁小强, 许力鹏. 孔内深层强夯法在湿陷性黄土地基处理中的运用[C]//加强科技创新服务公司发展——陕西天地地质有限责任公司科学技术创新成果论文集. 西安, 2017.
- DING Xiao-qiang, XU Li-peng. The application of deep hole dynamic compaction method in collapsible loess foundation treatment[C]//Strengthening the Development of Scientific and Technological Innovation Service Company-collection of Scientific and Technological Innovation Achievements of Shaanxi Tiandi Geology Co., Ltd. Xi'an, 2017.
- [42] 孙晓骥, 赵玉慧, 唐琼. 孔内深层强夯法(DDC 法)在湿陷性黄土地区原油储罐地基处理中的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(34): 116-117.
- SUN Xiao-ji, ZHAO Yu-hui, TANG Qiong. The application of DDC foundation treatment method on petroleum steel storage tank subgrade design in collapsible loess regions[J]. Value Engineering, 2016, 35(34): 116-117.
- [43] 周茗如, 杨鑫, 王晋伟, 等. 陇东黄土塬场地高层建筑

- 复合桩基应用研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(9): 812-815.
- ZHOU Ming-ru, YANG Xin, WANG Jin-wei, et al. Research on application of composite piles foundation of hig-rise buildings in Longdong loess tablerland area[J]. Architecture Technology, 2016, 47(9): 812-815.
- [44] 任小江, 黄跃廷, 刘帅. 湿陷性黄土地区孔内深层强夯桩的应用剖析[J]. 科技与创新, 2016(7): 99-100.
- REN Xiao-jiang, HUANG Yue-ting, LIU Shuai. Application analysis of deep-layer dynamic compaction pile in hole in collapsible loess area[J]. Science and Technology & Innovation, 2016(7): 99-100.
- [45] 米素婷, 周立新, 周虎鑫, 等. 孔内深层强夯地基处理效果评价[J]. 施工技术, 2016, 45(7): 89-91, 108.
- MI Su-ting, ZHOU Li-xin, ZHOU Hu-xin, et al. Study on foundation treatment effect evaluation with DDC method[J]. Construction Technology, 2016, 45(7): 89-91, 108.
- [46] 孔洋, 阮怀宁, 黄雪峰. DDC 法复合黄土地基的原位浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 125-132.
- KONG Yang, RUAN Huai-ning, HUANG Xue-feng. In-situ soaking test on composite loess foundation with down-hole dynamic compaction(DDC)[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 125-132.
- [47] 晋炜. DDC 法处理湿陷性黄土地基的应用[J]. 山西建筑, 2017, 43(36): 70-71.
- JIN Wei. Application of DDC method in collapsible loess subsoil[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(36): 70-71.
- [48] 马军平. 孔内深层强夯法处理大厚度湿陷性黄土在某变电站工程中的应用研究[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(6): 278-282.
- MA Jun-ping. Deep hole dynamic compaction method dealing with big thickness of high slope collapsible loess in the application of a transformer substation project down-hole dynamic compaction research[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(6): 278-282.
- [49] 杜帅. 关于某湿陷性黄土地基处理方案的探讨[J]. 山西建筑, 2018, 44(25): 88-89.
- DU Shuai. On exploration for treatment scheme for some collapsible loess foundation[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(25): 88-89.
- [50] 徐自平. 某工程湿陷性黄土地基沉降分析及处理[J]. 山西建筑, 2019, 45(21): 76-77.
- XU Zi-ping. Settlement analysis and treatment of collapsible loess foundation in a project[J]. Shaanxi Architecture, 2019, 45(21): 76-77.
- [51] 中国工程建设标准化协会. 孔内深层强夯法技术规程 CECS197: 2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Down-Hole Dynamic Compaction CECS197: 2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [52] 黄雪峰, 张世径, 朱彦鹏, 等. 湿陷性黄土地基 DDC 桩合理桩间距优化设计[J]. 甘肃科学学报, 2013, 25(4): 119-122.
- HUANG Xue-feng, ZHANG Shi-jing, ZHU Yan-peng, et al. The optimal design of the reasonable pile spacing between DDC piles of collapsible loess foundation[J]. Journal of Gansu Sciences, 2013, 25(4): 119-122.
- [53] 金继伟, 卢淑萍, 王春江. 孔内深层超强夯法(SDDC)作用机理及其在公路工程中的应用[J]. 公路, 2000(9): 27-31.
- JIN Ji-wei, LU Shu-ping, WANG Chun-jiang. Action mechanism of super downhole dynamic consolidation and it's application to highway engineering[J]. Highway, 2000(9): 27-31.
- [54] 周兰, 赖国斌. SDDC 桩法处理湿陷性黄土地基的效果分析[J]. 工程勘察, 2006(增刊 1): 232-234.
- ZHOU Lan, LAI Guo-bin. Effect analysis of SDDC pile method in treating collapsible loess foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveyin, 2006(S1): 232-234.
- [55] 俞宗卫, 许魁, 张小伟. 孔内深层超强夯法在湿陷性黄土地区工程中的应用[J]. 建筑结构, 2009, 39(1): 96-98.
- YU Zong-wei, XU Kui, ZHANG Xiao-wei. Application of SDDC in wet-sinkable yellow soil area's project[J]. Building Structure, 2009, 39(1): 96-98.
- [56] 郭志勇, 杨震, 聂风玲, 等. 黄土地区超级孔内深层强夯桩复合地基应用测试研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 100-103.
- GUO Zhi-yong, YANG Zhen, NIE Feng-ling, et al. Research on the testing and application of composite ground with SDDC pile in loess area[J]. Building Science, 2010, 26(9): 100-103.
- [57] 周涛. 大厚度回填及湿陷性地基土采用 SDDC 挤密桩处理地基的可行性[J]. 甘肃科技, 2019, 35(14): 98-100.
- ZHOU Tao. Feasibility of using SDDC compaction pile to treat large thickness backfill and collapsible foundation soil[J]. Gansu Science and Technology, 2019, 35(14): 98-100.
- [58] 赵治海, 徐张建, 燕建龙, 等. 湿陷性黄土场地孔内深层超强夯挤密桩试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1004-1011.
- ZHAO Zhi-hai, XU Zhang-jian, YAN Jian-long, et al. Study on the super down hole deep compaction in collapsible loess site[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1004-1011.