

文章编号: 1000-7598-(2012)07-1951-07

挤密桩处理湿陷性黄土地基的现场试验研究

米海珍, 杨 鹏

(兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 湿陷性黄土地区的多层建筑大多数都会遇到地基处理的问题, 用素土桩、灰土桩、碎石桩等各种桩处理地基的湿陷性是常用的方法。为检验挤密桩处理湿陷性黄土地基的效果, 设计了现场试验, 试验方案中考虑了桩心距、处理深度、处理范围及桩孔填料等不同影响因素, 设置了 8 个试验点。各点处理后测得了两桩间和 3 桩间等距离的 5 个点上的土体密度变化数值。之后对各点加载 200 kPa, 做小面积 (小坑) 浸水测试和大面积 (整个场地, 28 m×16 m) 浸水测试, 测量两种浸水条件下各试验点的湿陷量。由此总结了该种工程方法处理地基湿陷性的效果和规律性。结果表明: 桩心距应控制在 2.5 倍桩径以内, 可保证消除挤密桩间所有面积的湿陷性, 超出挤密桩长以下地层的湿陷性仍然存在; 小面积浸水发生的湿陷为外荷湿陷, 大面积浸水才能释放试验场地地基的全部湿陷量, 而与处理深度无关; 灰土填料显然优于素土填料, 在地基主要持力层内须用灰土填料, 但对于其下地层或自重湿陷不严重的部位强调使用灰土填料是不必要的。

关 键 词: 湿陷性黄土; 地基处理; 挤密桩; 浸水试验**中图分类号:** TU 444**文献标识码:** A

A field experimental study of compaction piles in collapsible loess foundation

MI Hai-zhen, YANG Peng

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Most of multistorey buildings on loess areas encounter the ground treatment problems. It is common treatment methods to deal with the collapsibility of foundation with a variety of piles (pure-soil pile, lime-soil pile, crushed-stone pile, etc.). In order to test the effect of the compaction pile in collapsible loess foundation, a field test was conducted. To consider the different factors (distance of two piles center, processing depth, processing area, pile hole filling), eight pilot sites were set up in the experimental field. First of all, the change of soil density at the five points equidistant between two piles and three piles were tested after pilot sites were set up; then, after the loading (200 kPa) on the every pilot site, the small area (small pit) immersion and the large area (the entire location, 28 m×16 m) immersion were conducted; the every site's collapse volume was measured respectively. From above experiment the effect and regularity of the treatment methods were obtained. The results show that: to ensure eliminating the collapsibility of all inter-area of compaction pile, the distance of two piles center must be controlled within 2.5 times of the pile diameter. The collapsibility still exists under layer exceeding compaction pile's length. The settlement after small area immersion is loading collapse, exclusively the large area immersion the whole collapse is eliminated, and it is no matter with the processing depth. The lime-soil filling obviously surpasses the pure-soil filling. Within main bearing stratum the filling must be lime-soil. But it is unnecessary to use lime-soil filling under main bearing stratum and some light collapsibility location.

Key words: collapsible loess; ground treatment; compaction pile; immersion test

1 引 言

目前, 对于复合地基机制的理论研究还在不断深入, 其中包括对石灰和软土间的相互作用原理^[1]、对挤密桩体的应力-应变关系^[2]、从化学角度研究

灰-土的反应机制^[3]、挤密桩挤密前后黄土的结构变化和黄土的应力-应变关系^[4]等方面。从 20 世纪 90 年代中期开始, 许多学者就对复合地基数值分析进行了研究^[5-6]。龚晓南^[7]对包括灰土桩在内的复合地基技术的新发展和工程应用, 以及发展中存在的

收稿日期: 2011-04-22

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (No. 3ZSO42-B25-031); 兰州理工大学校基金项目。

第一作者简介: 米海珍, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: Mihai-zhen@126.com

问题做了较全面地论述。虽然对灰土桩处理地基的机制进行了大量的试验研究和数值分析^[8-10]，但仍有许多问题尚未得到完全解决，例如，对桩径、桩心距和处理深度的具体的定量关系及界限值仍不够确切。本文通过 8 个试验点的现场试验，重点研究了桩心距、处理深度、处理范围以及桩孔填料等对湿陷性黄土地基的处理效果，得到了具有工程实用价值的结论。

2 试验目的及场地概述

2.1 试验方案设计

试验地区多层建筑的地基为黄土，厚度大多在 10~20 m 之间，所存在的主要问题是承载力低（一般在 90~120 kPa 之间）和湿陷性问题，不能满足基础对地基的要求，因此，必须对地基进行处理。对处理后地基的要求是：消除湿陷性，承载力达到 200 kPa。为此，本试验在对地基进行不同处理后，在各试验点处用荷载板（各点载板大小不同）加上 200 kPa 的荷载，进行了小面积（小坑）浸水试验，之后，再对整个试验场地进行大面积浸水，以检验挤密桩在实际工程中最不利情况下的处理效果。

通过本次试验，预测试挤密桩在不同桩心距、桩孔填料（有素土、灰土两种）、处理范围、处理深度以及浸水面积等因素下消除地基土湿陷性的情况。现场试验点布置情况见图 1。表 1 为现场试验中各试验点处设计状况表。为此作如下试验设计：H 点未做处理，以测得原始湿陷量；F 点的桩心距大于其余各点；G 点桩孔填料为灰土，其余各点为素土；A 点的处理范围大于其余各点；处理深度方面，E 点和 D 点分别为 2 m 和 4 m，其余各点为 6 m。

试验步骤为：场地布点，对各点按设计进行地基的土桩挤密处理，处理完成后做荷载试验，加 200 kPa 压力，之后各点做小坑浸水试验，最后做全场地的大坑浸水试验。

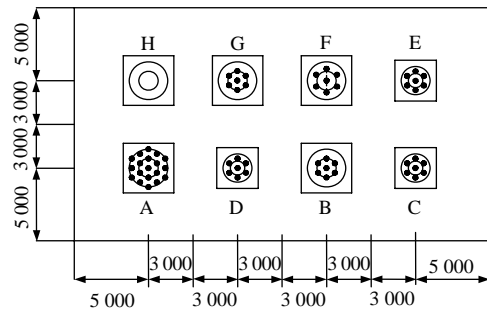


图 1 现场试验点布置概况图（单位：mm）

Fig.1 Sketch of the field experiment sites (unit: mm)

2.2 试验场地土的物理力学性质

本试验场地位于天水某河流的 II 级阶地上，是被平整过的一片梯田，面积约为 4 000 m²。地层主要为侵蚀堆积的次生黄土，平均厚度约为 15 m，大孔结构明显，结构疏松，含铁锈斑迹。现场选取两处探井测试原状土层的基本物理参数，1、2 号探井的湿陷深度分别为 17.2、13.2 m。因为挤密桩处理最大深度为 6 m，所以表 2 为地面以下 6 m 深度范围内的地层土的物理力学性质指标。

3 试验观测及数据分析

试验分 3 个阶段进行，即 200 kPa 荷载试验、小坑浸水试验和大坑浸水试验。通过原位试验，检验经处理后地基密实度及湿陷性的变化情况。

3.1 地基土密实度的变化

试验点 A~H 地基处理孔位及取样点布设位置如图 2 所示，其中桩孔直径为 325 mm，桩心距用 X 表示，在两桩间等距离取 1、2、3 号点，在 3 桩间等距离取 a、b、c、d、e 共 5 点，测试挤密桩在不同桩心距挤密后地基土天然重度变化情况，天然重度变化曲线见图 3，所测数据列于表 3。

由图 3 可以看出，在靠近桩体的 1 点和 a 点，土体天然重度的增长基本都超过 30%，在其他点处的增长随桩心距的减小变化明显。

表 1 场地试验设计状况表

Table 1 Case parameters of field experiment

试验点号	处理深度 /m	桩孔填料	桩心距 桩径	处理面积 载板面积	载荷板直径 /m	载荷板面积 /m ²	浸水小坑直径 /m	小坑面积 /m ²	浸水大坑情况
A	6	素土	2.0	2.5	1.300	1.327	2.60	5.31	
B	6	素土	2.0	1.5	1.300	1.327	2.60	5.31	
C	6	素土	2.0	2.0	0.975	0.746	1.95	2.99	将整个场地开挖，开挖面积为 28 m×16 m = 448 m ² ，深度为 0.4 m，做大面积浸水试验
D	4	素土	2.0	2.0	0.975	0.746	1.95	2.99	
E	2	素土	2.0	2.0	0.975	0.746	1.95	2.99	
F	6	素土	2.5	1.9	1.300	1.327	2.60	5.31	
G	6	3:7 灰土	2.0	1.5	1.300	1.327	2.60	5.31	
H	未处理	未处理	未处理	未处理	1.300	1.327	2.60	5.31	

表 2 地层土的物理力学性质表
Table 2 Physico-mechanical indices of field ground

探井编号	取样深度 /m	含水率 /%	天然密度	干密度	天然孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	压缩系数	自重饱水湿陷系数	200 kPa 湿陷系数
1	2.2	17.3	1.45	1.24	1.189	40	28.3	18.6	0.44	0.064	0.096
	3.2	12.3	1.41	1.26	1.151	29	28.5	16.3	0.26	0.019	0.098
	4.2	13.3	1.43	1.26	1.148	32	30.0	17.3	0.18	0.009	0.052
	5.2	12.0	1.47	1.31	1.072	30	29.0	16.6	0.10	0.004	0.023
	6.2	16.4	1.55	1.33	1.044	37	29.3	19.0	0.11	0.004	0.023
2	1.2	20.8	1.63	1.35	1.002	56	27.3	17.6	0.31	0.001	0.050
	2.2	15.2	1.43	1.24	1.191	35	28.8	18.3	0.53	0.019	0.109
	3.2	11.6	1.42	1.27	1.124	28	28.1	17.6	0.14	0.044	0.055
	4.2	11.9	1.35	1.21	1.229	26	28.0	17.3	0.27	0.040	0.097
	6.2	19.2	1.53	1.28	1.114	47	29.6	18.1	0.14	0.056	0.095

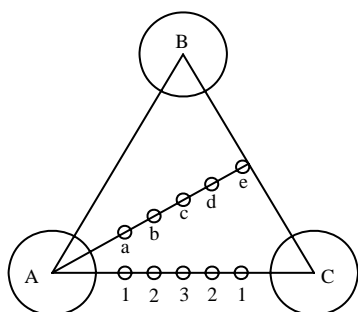


图 2 挤密桩处理基本单元及试验取样点位置示意图

Fig.2 A basic unit of compaction piles and measured points

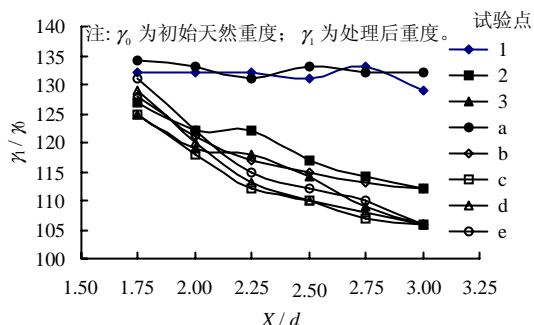


图 3 各试验点密实度变化曲线

Fig.3 Change curves of soil compactness at every point

表 3 各试验点密度及密度增加系数
Table 3 Values of density and increasing coefficient for measured points

点号	桩心距											
	1.75d		2.00d		2.25d		2.50d		2.75d		3.00d	
	密度	增加系数	密度	增加系数	密度	增加系数	密度	增加系数	密度	增加系数	密度	增加系数
1	1.66	1.32	1.66	1.32	1.66	1.32	1.65	1.31	1.67	1.33	1.65	1.29
2	1.60	1.27	1.54	1.22	1.54	1.22	1.47	1.17	1.44	1.14	1.41	1.12
3	1.57	1.25	1.50	1.19	1.49	1.18	1.44	1.14	1.37	1.09	1.34	1.06
a	1.69	1.34	1.68	1.33	1.65	1.31	1.67	1.33	1.66	1.32	1.66	1.32
b	1.61	1.28	1.53	1.21	1.47	1.17	1.45	1.15	1.43	1.13	1.41	1.12
c	1.58	1.25	1.49	1.18	1.41	1.12	1.39	1.10	1.35	1.07	1.34	1.06
d	1.62	1.29	1.51	1.20	1.42	1.13	1.39	1.10	1.36	1.08	1.33	1.06
e	1.65	1.31	1.54	1.22	1.45	1.15	1.41	1.12	1.38	1.10	1.34	1.06

注：密度单位为 g/cm^3 ， d 为桩径，密度增加系数为所测点密度和原状土干密度平均值的比值百分数的小数表达形式。

根据桩间土密实度平均增长系数，将桩间土划分为充分挤密区（挤密处理后重度增长超过 30%）、有效挤密区（挤密处理后重度增长在 10%~30%之间）和挤密影响区（挤密处理后重度增长在 10%以下）。

充分挤密区：出现在桩体周围，当桩心距小于 $2.25d$ 时，处理单元内全部为充分挤密区。

有效挤密区：主要集中在三角形处理单元中心处，其条件为在桩心距 $2.25d \sim 2.50d$ 之间，并随着

桩心距的进一步增加，该区域的范围呈环状扩大。

挤密影响区：当桩心距大于 $2.50d$ 时，将首先出现在三桩间土体处理单元中心附近（即 c 点附近），并随着桩心距的增大而扩展，当 $X > 3d$ 时，这一区域范围比较大，并逐步扩展到处理单元的 3 号点位置。

从本次试验资料看，笔者将各挤密影响范围大致划分如图 4 所示。

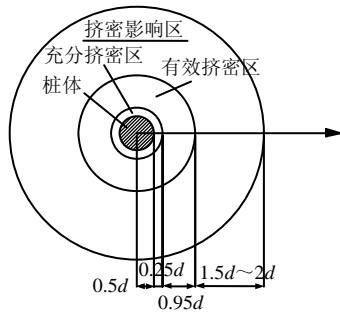


图4 单桩桩周土不同挤密程度区域图
Fig.4 Zone with different compaction extents round a single compaction pile

3.2 地基承载力的变化

3.2.1 单桩桩周土的压缩系数

单桩桩周土在天然湿度及饱水状态下的压缩系数沿径向的变化规律及相应的挤密系数如图5所示，从图中可以看出，饱水状态下地基土的压缩系数和挤密系数均大于天然状态。

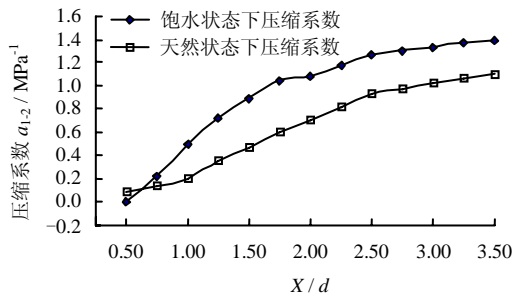


图5 压缩系数随桩心距离的变化曲线
Fig.5 Change curves of compression coefficients with the distances of pile center

由图中曲线可知：天然湿度下，当 $X > 1.5d$ 时，桩周土的 $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ，为高压缩性土； X 在 $0.5d \sim 1.5d$ 之间时， a_{1-2} 在 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 之间，为中低压缩性土。压缩系数随距桩心距的增大而增大，近似呈线性关系。

对于饱水状态而言， $X > 1d$ 时，压缩系数都大于 0.5 MPa^{-1} ，为高压缩性土；桩心距在 $0.5d \sim 1.0d$ 之间时，压缩系数在 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 之间，为中低压缩性土。

这说明在天然湿度下，单桩挤密效果的影响范围应该在 $1.5d$ 范围内。而对于饱水状态，挤密桩只在 $1.0d$ 范围内有挤密效果。

3.2.2 群桩桩间土的压缩系数

最大压缩系数 a_{1-2}^{max} 随桩心距的变化情况见图6。群桩间挤密系数与压缩系数的关系见图7。从图可以看出，在天然湿度下群桩桩间土在 $X = 2.5d$ 以

下时，c点和3号点处的压缩系数均小于 0.5 MPa^{-1} 。3号点处的土体在 $X = 1.75d \sim 3.00d$ 时，其压缩系数均在 $0.13 \sim 0.40 \text{ MPa}^{-1}$ 之间，相应的挤密系数在 $0.93 \sim 0.79$ 范围内，为中压缩性土。 $X < 2.25d$ 时，c点处土的压缩系数变化规律与3号点处相似， $X > 2.25d$ 时，c点处土的压缩系数均大于3号点处土，相应的挤密系数小于 0.83 ，为中压缩性土。并且在 $X > 2.5d$ 以后，3号点和c点处土的压缩系数增长均较快。这说明， $X < 3d$ 时，桩间土压缩性均得到明显改善，为中压缩性土，且随着桩心距的减小压缩系数降低明显。当 $X = 1.75d$ 时，压缩系数降至 0.13 MPa^{-1} 。

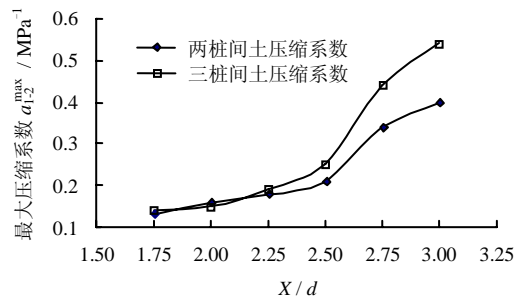


图6 最大压缩系数与桩心距的变化曲线
Fig.6 Change curves of maximum compression coefficients with the distance of pile center

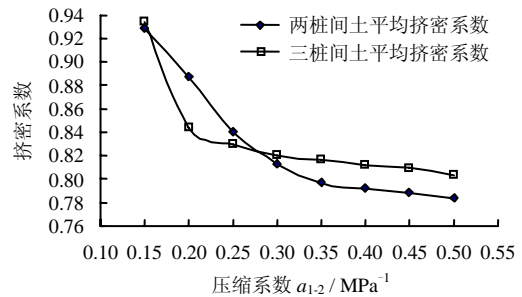


图7 群桩间挤密系数和压缩系数之间的关系
Fig.7 Relationships of compression coefficients with compaction coefficients among pile group

3.2.3 载荷试验的结果（干压缩阶段）

图8为各试验点在 200 kPa 压力下的下沉量条形图。由图可知，未经处理的H点下沉量最大，为 12.01 cm ，下沉量最小的G点为 0.38 cm ，其余6个试验点下沉量均在 $0.95 \sim 1.96 \text{ cm}$ 之间，差别不大。这说明灰土挤密桩相对于素土桩具有更好的处理效果。F点下沉量为 2 cm ，是各素土挤密桩处理点中下沉量最大的，它的桩心距比其余各点略大，这也证明了桩心距越大，处理效果越差。尽管各点处下沉量不同，但可以看出，挤密桩处理过的地基

较原始地基 H 点而言，能有效减少下沉量，下沉量减小到原状地层的 1/6，且各处理点的承载力均能达到 200 kPa。

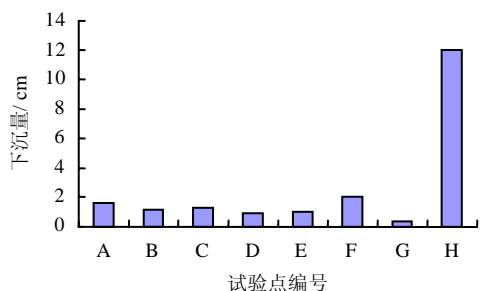


图 8 200 kPa 压力下各点的下沉量
Fig.8 Settlement of every point at 200 kPa compression

3.3 消除湿陷性的效果

3.3.1 单桩桩周土湿陷系数变化规律

图 9 给出了单桩桩周土挤密后湿陷系数水平向的变化。从图可以看出，当距离 $D < 2d$ 时，土体的湿陷系数都小于 0.015，此范围内土体已无湿陷性； $D = 2d \sim 2.75d$ 范围内湿陷系数增长迅速，即是说灰土桩处理湿陷性其水平面内的影响范围在 $2.75d$ 以内。

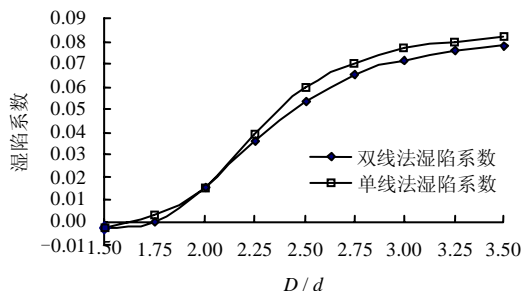


图 9 单桩桩周土挤密后湿陷系数水平向的变化
Fig.9 Radial change of collapse coefficients after compaction around a single pile

3.3.2 两桩间和三桩间土的湿陷系数变化规律

图 10 给出了 200 kPa 下群桩间土湿陷系数与桩心距的关系。从图可知，在处理单元内，当 c 点 $X < 2.25d$ ，3 号点当 $X < 2.5d$ 时，其湿陷系数都不大于 0.015，呈现非湿陷性，试验中还发现甚至在靠近桩体处呈现轻微的膨胀性；对于 c 点处 $X > 2.25d$ 和 3 号点处 $X > 2.5d$ 时，湿陷系数都随着桩心距的增加而几乎呈线性增长，其湿陷系数都大于 0.015，呈现不同程度的湿陷性。这说明当 $X < 2.5d$ 时，挤密桩可在其处理单元内全部消除地基湿陷性。

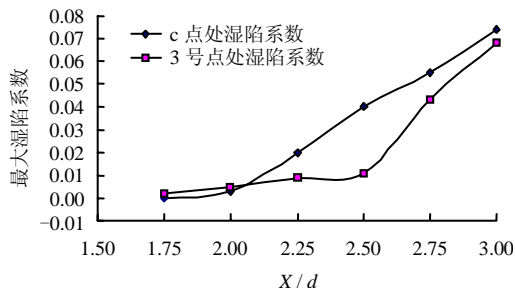


图 10 200 kPa 下群桩间土湿陷系数与桩心距的关系
Fig.10 Relationships of collapse coefficients with the distance between pile's center

3.3.3 小坑浸水试验检验处理效果

8 个试验点在地面压力为 200 kPa 的情况下，小坑浸水 96 h 变形稳定后的湿陷量见图 11、12 所示。在小坑浸水阶段，没有发现自重湿陷的情况。

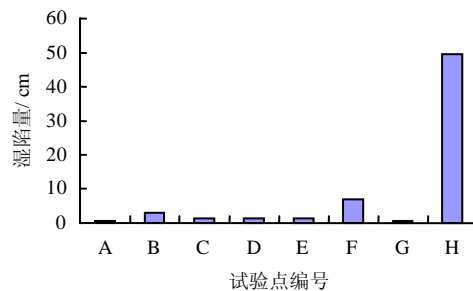


图 11 小坑浸水各点湿陷量图
Fig.11 Every point's settlement after small area immersion

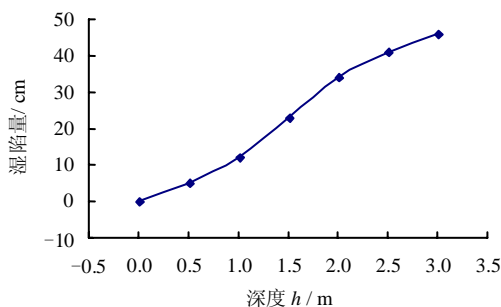


图 12 H 点中点处不同深度小坑浸水时的湿陷量图
Fig.12 Collapse settlement at variant depth after small area immersion at point H

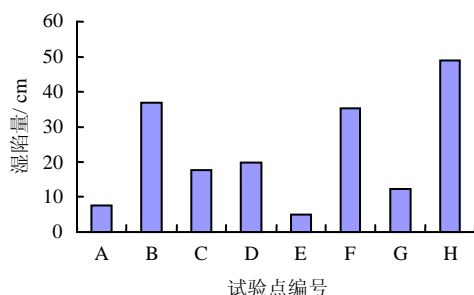
从图看出，未经处理的 H 点地基下沉量最大，达 49.5 cm，其他经过处理的各点仅湿陷 0.5~6.9 cm，湿陷量为天然地基的 1%~14%，桩孔填料为 3:7 灰土的 G 点和处理范围最大的 A 点湿陷量最小，桩心距最大的 F 点湿陷量相对于其他各试验点明显偏大，为 6.9 cm。

3.3.4 大面积浸水试验区处理效果检验

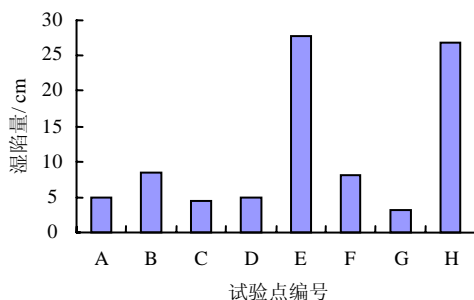
在各试验点载荷试验未卸载情况下，对场地进

行大面积 (28 m×16 m) 浸水, 在不同深度设立了测杆来测试不同深度的湿陷量, 结果见图 13。

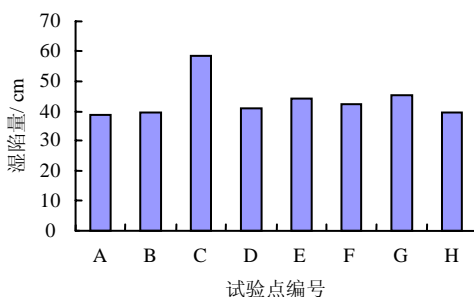
图 13(a)表明, B 点和 F 点的处理范围(相对于载荷载)较小, 仍有较大湿陷性, 这说明了处理范围的主要影响。图 13(b)表明, 2~4 m 未处理地层的湿陷量全部表现出来了(E 点), 也反应了小坑浸水并未释放地层全部的湿陷量, 这证明了小范围浸水与大范围浸水的湿陷影响深度是完全不同的。图 13(c)表明, 5 m 以下地层的湿陷情况基本相同, 因为该场地最大处理深度只有 6 m, 5 m 以下各点的情况基本相同。说明湿陷性的处理深度应该是有要求的。同时, 发现灰土桩较素土桩效果要好。



(a) 载荷载下 0~2 m 内的湿陷量



(b) 载荷载下 2~4 m 内的湿陷量



(c) 载荷载下 5 m 以下湿陷量

图 13 大面积浸水情况下不同地基总湿陷量比较
Fig.13 Comparisons of the total collapse settlement at every point after large area immersion

4 结 论

通过现场试验, 对土挤密桩处理湿陷性地基的效果有了一些更确切的认识, 初步结论如下:

(1) 桩心距: 不论是两桩间还是三桩间土, 即 $X < 1.75d$ 时, 可保证挤密区间内的土都达到充分挤密, 重度比原始地基增加 30%, 承载力提高一倍以上; $X = 1.75d \sim 2.5d$ 之间可保证桩间土达到有效挤密, 重度增长 10%~30%, 承载力提高幅度仍需进一步研究确定。对于浸水情况, 对湿陷性黄土地基控制 $X = 2.5d$ 较为合适。

(2) 处理深度: 通过分析试验结果可知, 在处理深度较浅的情况下, 处理地层以下土层的湿陷性并未发生变化, 所以在深度上不存在影响范围。

(3) 处理范围: 在小坑浸水试验中, 地基发生湿陷, 几乎全部属于外荷湿陷; 大面积浸水试验显示, 地基处理范围达到载荷载面积 2 倍时, 即可解决外荷湿陷、侧向挤出问题。这里似乎与湿陷深度无关。规范^[9]中规定处理宽度超出基底不宜小于处理土层厚度的 1/2, 在此试验中未得到证实。

(4) 桩孔填料: 灰土填料显然优于素土填料。在主要持力层范围内, 应该用夯填灰土填料作为适当减小处理宽度的替代手段。但对于主要持力层以下, 或自重湿陷和侧向挤出都不严重的部位, 强调使用灰土是不必要的, 一般夯填素土即可。

参 考 文 献

- [1] 邱良佐, 吴佳雄. 生石灰桩加固软黏土地基机理的研究[J]. 浙江工业大学学报, 1987, (1): 43-51.
QIU Liang-zuo, WU Jia-xiong. The mechanism of soft clay ground consolidated by quicklime pile[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 1987, (1): 43-51.
- [2] 王吉望. 复合地基的研究及计算原理[J]. 岩土工程师, 1990, 2(1): 18-26.
WANG Ji-wang. Study of features of composite ground and its calculation principle[J]. *Geotechnical Engineer*, 1990, 2(1): 18-26.
- [3] 尚继红. 挤密石灰土桩的反应机理及加固效果分析[J]. 地基基础工程, 1994, 4(1): 25-30.
- [4] 石坚. 挤密对黄土工程特性的影响[J]. 西北建筑工程学院学报(自然科学版), 1999, 16(4): 21-24.
SHI Jian. The effect of compacting on the engineering properties of loess[J]. *Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering (Natural Sciences)*, 1999, 16(4): 21-24.
- [5] 李宁, 韩炬. 单桩复合地基加固机理数值试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 42-49.

- Construction. [S. 1.]: ASCE Geotechnical Special Publication, 2001: 122—166.
- [11] 曾玲玲, 刘松玉, 洪振舜, 等. 天然沉积软黏土的次固结变形机制分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1042—1047.
- ZENG Ling-ling, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun, et al. Deformation mechanism of secondary consolidation of natural clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(7): 1042—1047.
- [12] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [15] 陈希哲. 土力学地基基础(第4版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] MURAKAMI Y. Secondary compression in the stage of primary consolidation[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(3): 169—174.
- [17] IMAI G, TANAKA Y, SAEGUSA H. One-dimensional consolidation modeling based on the isotach law for normally consolidated clays[J]. **Soils and Foundations**, 2003, 43(4): 173—188.
- [18] IMAI G, TANG Y. A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from inter-connected tests[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(2): 83—96.
- [19] JAMIOLKOWSKI M, LADD C C, GERMAINE J T, et al. New developments in field and laboratory testing of soils[C]//Proceedings of the 11th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco: A. A. Balkema, 1985: 57—153.
- [20] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior (third edition)[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [21] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1977, 103(5): 417—430.
- [22] AL-SHAMRANI M A. Applying the hyperbolic method and C_{α}/C_c concept for settlement prediction of complex organic-rich soil formations[J]. **Engineering Geology**, 2005, 77(1—2): 17—34.
- [23] 冯志刚, 朱俊高. 软土次固结变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 583—588.
- FENG Zhi-gang, ZHU Jun-gao. Experimental study of secondary consolidation behavior of soft soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2009, 40(5): 583—588.
- [24] MESRI G, CASTRO A. C_{α}/C_c concept and K_0 during secondary compression[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 230—247

上接第 1956 页

- LI Ning, HAN Xuan. Numerical study of the bearing mechanism of the single-pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4): 42—49.
- [6] 张爱军. 复合地基三维数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 徐洋, 谢康和, 卢廷浩. 二灰土桩复合地基三维固结有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 254—256.
- XU Yang, XIE Kang-he, LU Ting-hao. Consolidation analysis of composite ground with lime-flyash columns by 3D FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 254—256.
- [9] 中国建筑科学研究院. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] 谭峰屹, 汪稔, 赵丽. 柔性桩复合地基承载力数值计算[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 288—292.
- TAN Feng-yi, WANG Ren, ZHAO Li. Numerical calculation for bearing performances of composite foundation improved by flexible piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 288—292.