

文章编号:2095-3046(2013)01-0017-07

粘性土地基强夯地面变形的半模试验研究

罗嗣海, 王琨, 邓通发

(江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:根据相似原理,设计采用3种不同直径的模型夯锤(7 cm, 11 cm, 15 cm),对玻璃模型箱(长×宽×高=50 cm×40 cm×60 cm)内土体分别施加4种不同冲击能进行单点夯击实验.实测了在不同锤径下,以4种夯击能作用的地面变形和在不同深度下的竖向位移,建立了夯坑深度和有效加固深度与土质参数及施工工艺参数的相关方程,最后对建立的方程用工程实例进行验证.结果表明:该方程可用来估算现场强夯时的夯坑深度和有效加固深度,故对强夯法的设计与施工具有一定的工程指导意义.

关键词:粘土;强夯;半模试验;夯坑深度;有效加固深度;相关方程

中图分类号:TU44

文献标志码:A

Research on the surface deformation of cohesive soil ground due to dynamic compaction by half model test

LUO Si-hai, WANG Kun, DENG Tong-fa

(School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: According to the similarity principle, the single point tamping experiments with three kinds of different diameter model rammer (7 cm, 11 cm, 15 cm) are made. The soils in the model box of glass ($L \times W \times H = 50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$) are imposed to in four different kinds of tamping energy. Under the different diameter rammer and four tamping energy, the ground deformation and the vertical displacement along depth are measured, and the related equations about the pit depth and the effective treatment depth with the soil parameters and the construction technology parameters are established. Finally the related equations are validated with some engineering examples. The results show that the equations can be used to estimate the rammer pit depth and the effective treatment depth, which has a certain guiding significance for the design of the dynamic compaction method and construction to the project.

Key words: cohesive soil; dynamic compaction; half model test; pit depth; effective reinforcement depth; related equation

0 引言

鉴于目前在强夯领域中还尚未有对于估算地

面变形中关于夯坑深度与有效加固深度的可靠公式,且在强夯处理地基的设计中,地面变形又是一项重要的参数.故文中以相似理论为前提,通过量纲分析,把粘性土作为研究对象,设计了半模实验,

收稿日期:2012-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50869002);江西省自然科学基金资助项目(2008GZC003);江西省教育厅科技资助项目(GJJ10486)

作者简介:罗嗣海(1966-),男,博士后,教授,主要从事岩土力学与地基处理等方面的研究,E-mail: drsoil@163.com.

通过在模型箱内铺设的白色石灰层来观测冲击下土体内部的位移变化规律,进而通过建立夯坑深度和有效加固深度与施工工艺参数和土质参数之间的相关方程,来为强夯的施工设计提供计算依据^[1-2].

1 半模实验设计

1.1 量纲方程的建立

在本实验中所考虑到的参数如下^[3-5]:粘性土的干重度 γ_d ; 单击夯击能 E , 锤重 W , 夯锤底面直径 D , 夯坑深度或有效加固深度 S_i .

故根据相似原理建立量纲方程为:

$$F(E, W, D, \gamma_d, S_i) = 0 \quad (1)$$

以 W, D 为基本量纲, 根据 Π 定理进行量纲分析, 得到三个无量纲数, 即:

$$\pi_1 = \frac{E}{WD}, \quad \pi_2 = \frac{\gamma_d D^3}{W}, \quad \pi_3 = \frac{S_i}{D} \quad (2)$$

将方程(1)简化为:

$$F\left(\frac{E}{WD}, \frac{\gamma_d D^3}{W}, \frac{S_i}{D}\right) = 0 \quad (3)$$

根据式(2)及相似第三定理可得出各相似系数间如下关系式:

$$\frac{C_E}{C_W C_D} = 1, \quad \frac{C_{\gamma_d} C_D^3}{C_W} = 1, \quad \frac{C_{S_i}}{C_D} = 1 \quad (4)$$

故只需根据实际情况确定锤重、锤径即可得到其他参数比例系数. 本实验确定各系数为:

$$C_W = \frac{W_{\text{模型}}}{W_{\text{原型}}} = 1:8000, \quad C_D = \frac{D_{\text{模型}}}{D_{\text{原型}}} = 1:20,$$

$$C_E = \frac{E_{\text{模型}}}{E_{\text{原型}}} = 1:160000, \quad C_{\gamma_d} = \frac{\gamma_d_{\text{模型}}}{\gamma_d_{\text{原型}}} = 1:1$$

$$C_{S_i} = \frac{S_i_{\text{模型}}}{S_i_{\text{原型}}} = 1:20$$

1.2 实验准备

1.2.1 主要实验仪器

(1) 试验的模型箱尺寸: 50 cm×40 cm×60 cm (长×宽×高), 材料采用 5 块 12 mm 厚的钢化透明玻璃黏制而成, 模型箱的前后两面均画上 5 cm×5 cm 的坐标网格, 用来描画土体内部的位移变化情况.

(2) 夯锤: 采用铁制 7 cm, 11 cm, 15 cm 直径的圆形实心夯锤, 每种直径分别设计了 6.25 N, 12.5 N 两种重量, 共 6 个.

1.2.2 土样的制备及铺设

(1) 土样制备: 采用工地上挖出的均质粘性土, 通过筛分机过 5 mm 孔径的筛, 然后烘干, 加水, 初

步控制含水率在 20%~22% 之间.

(2) 土体铺设: 以 5 cm 为一层用铲子进行铺设, 具体为按照模型箱上的刻度, 每一次铺设先铺至 10 cm, 用平刀均匀压制 5 cm 处, 然后用石灰作为标记线, 每隔 5 cm 铺设一层, 直到铺到模型箱的顶部^[6].

1.3 试验方案

由于实际工程上所采用的夯击能在 1000~4000 kN·m 居多, 故此, 本实验设计了 4 种夯击能, 即为 6.25 N×50 cm, 6.25 N×100 cm, 12.5 N×75 cm, 12.5 N×100 cm, 由于实验采用半模锤反映实际中现场夯锤产生能量情况, 故化简时应统一乘以 2, 即分别对应 1000 kN·m, 2000 kN·m, 3000 kN·m, 4000 kN·m. 具体实验分组如表 1 所示^[7-8].

表 1 模型试验分组

组数	能量组合(锤重 W ×落距 h)		锤的底面直径 D	
	原型 / (kN·m)	模型 / (N·cm)	原型 / m	模型 / cm
1	1000	6.25×50	1.4	7
2	2000	6.25×100	1.4	7
3	3000	12.5×75	1.4	7
4	4000	12.5×100	1.4	7
5	1000	6.25×50	2.2	11
6	2000	6.25×100	2.2	11
7	3000	12.5×75	2.2	11
8	4000	12.5×100	2.2	11
9	1000	6.25×50	3.0	15
10	2000	6.25×100	3.0	15
11	3000	12.5×75	3.0	15
12	4000	12.5×100	3.0	15

2 实验成果

2.1 地面变形观测成果

图 1 是夯锤直径为 $D=11$ cm, 能级 $E=12.5$ N×75 cm 的地面变形过程.

由图 1 可以看出粘性土的地面变形以及土体内部的竖向位移随击数的变化情况. 总体来看, 夯坑深度以及竖向位移随击数增加而增大, 水平方向的影响也逐步扩张, 但一定击数后, 夯坑深度和竖向位移增幅明显变缓; 对于竖向位移的整体趋势, 在夯锤直径范围内, 由趋近平行直线到剧烈弯曲再到接近直线平行, 呈现中心位移沿深度方向变化最

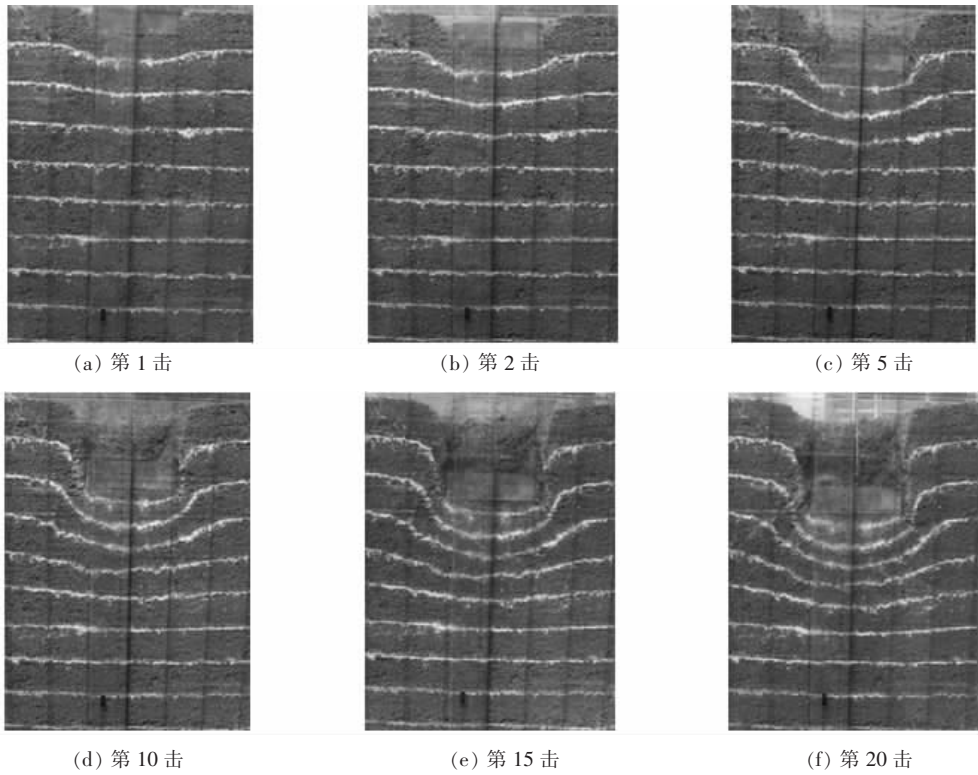


图 1 不同击数下标记层的位移变化

大,附近位移增幅随深度逐渐变缓;在 4 到 5 层土体加固较为明显,侧向有挤密且几乎无隆起现象。

2.2 竖向位移规律

(1) 锤径相同、能量不同时夯点中心下竖向位

移-深度关系曲线如图 2 所示. 从图 2 可见:夯击的能量越大,随深度的增加,位移逐渐增加,前端每种能量位移随深度变化斜率几乎相同,但每种能量在一定的深度都有一个转折点,之后位移变化变缓,

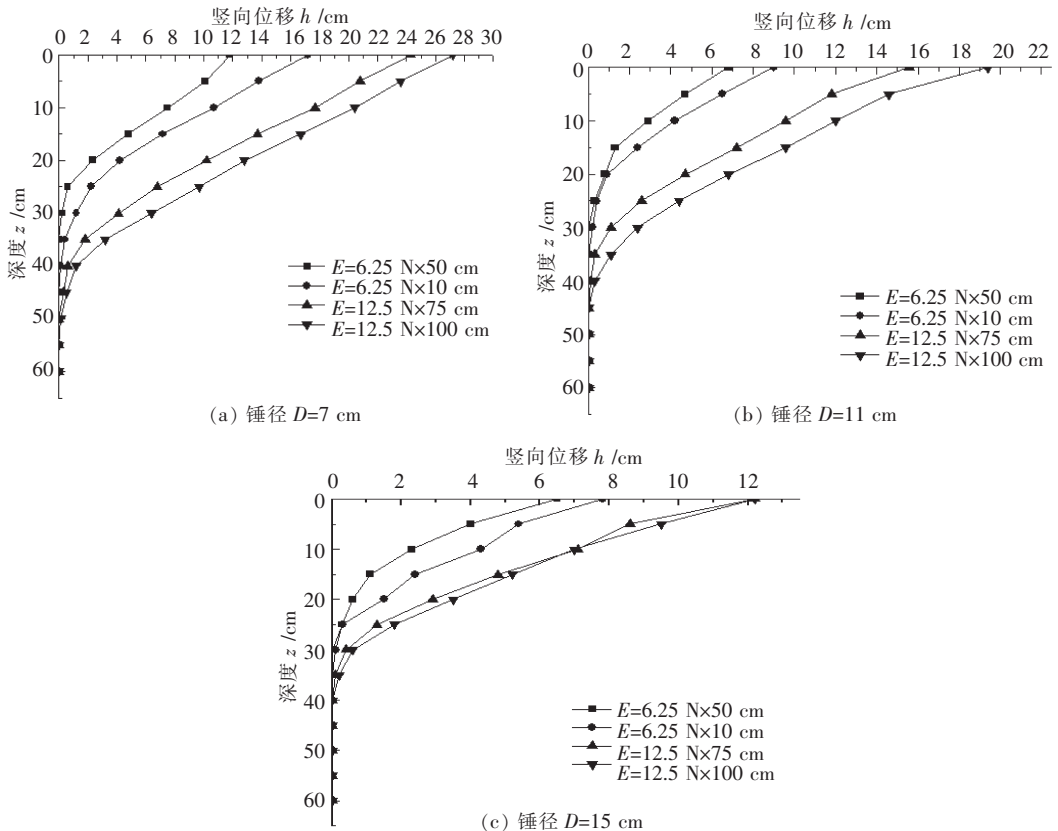


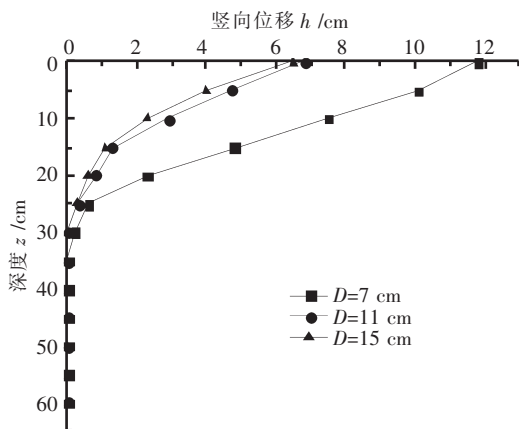
图 2 锤径相同、能量不同时夯点中心下竖向位移-深度关系曲线

直至为0.

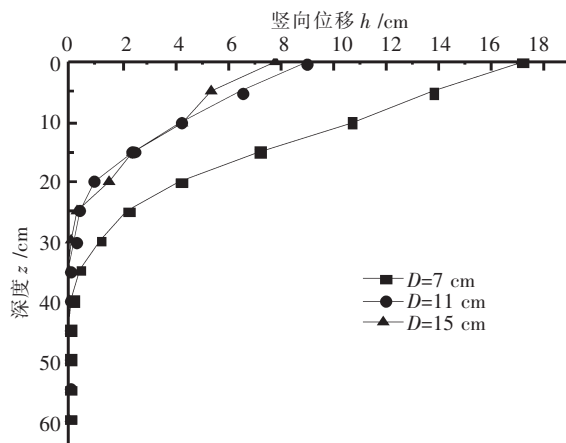
(2)能量相同、锤径不同时夯点中心下竖向位移-深度关系曲线如图3所示. 由图3可见: 在同一深度处, 锤径大的, 位移则较小, 竖向位移随深度的增加而逐渐减小, 对于不同的锤径在一定深度

处, 位移变得很小, 基本接近0.

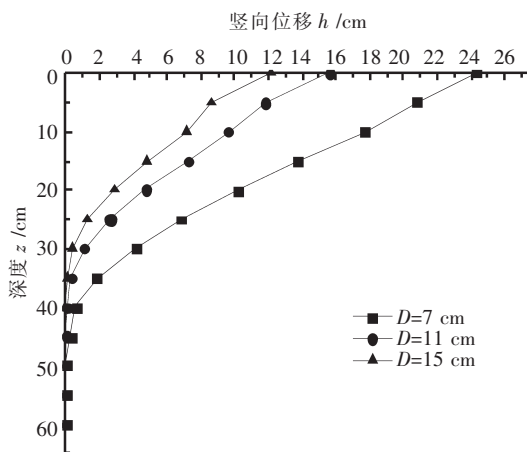
用 origin 软件绘制关于所有实验组数 $h/h_0-z/(WH)0.5$ 曲线关系如图4所示(其中 h_0 为地面的竖向位移, h 为深度 z 处的竖向位移, WH 为单击冲击能).



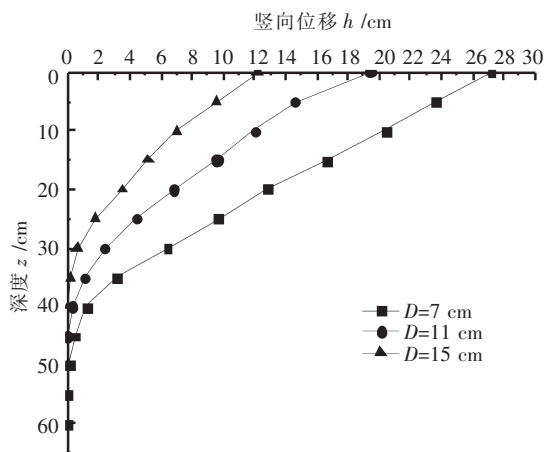
(a) $E=6.25 \text{ N} \times 50 \text{ cm}$



(b) $E=6.25 \text{ N} \times 100 \text{ cm}$



(c) $E=12.5 \text{ N} \times 75 \text{ cm}$



(d) $E=12.5 \text{ N} \times 100 \text{ cm}$

图3 能量相同、锤径不同时夯点中心下竖向位移-深度关系曲线

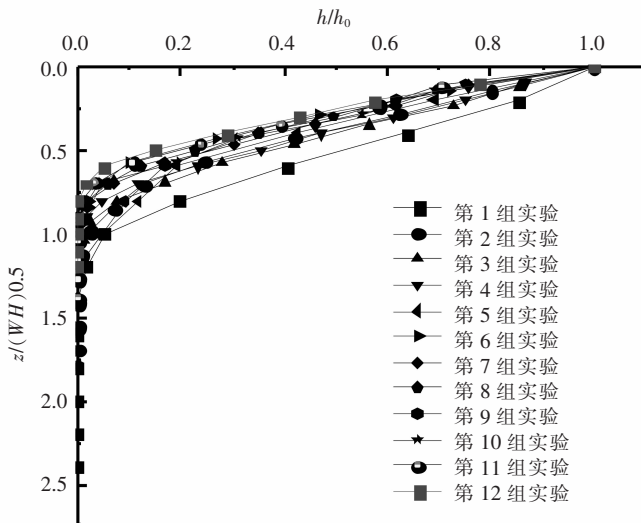


图4 夯点中心下的竖向位移沿深度变化

由图 4 得出分别以地面竖向位移和 \sqrt{WH} 对竖向位移和深度以指数 e 进行归一化处理,采用如下方程^[9]进行拟合:

$$\frac{h}{h_0} = ae^{b \frac{z}{\sqrt{WH}}} \quad (5)$$

以图 2 的数据得到的试验实测结果:参数 a 、 b

和相关系数见表 2。

由表 2 可见,本实验得到的 $a=1.02\sim 1.10$,平均为 1.06; $b=-3.57\sim -1.93$,平均为 -2.83。

2.3 夯坑深度规律

通过试验中得到三种锤径不同能量时的夯坑深度和夯坑体积见表 3。

表 2 方程(6)中的拟合系数及有效加固深度

试验编号	夯击能组合 E / (N·cm)	夯前粘土干重度 γ_d / (kN·m ⁻³)	夯坑深度 S_1 /cm	方程系数 a	方程系数 b	相关系数 r_2	有效加固深度 S_2 /cm
1	6.25×50	9.92	11.8	1.10	-1.93	0.95	38.92
2	6.25×100	11.71	17.2	1.07	-2.53	0.97	45.73
3	12.5×75	10.70	24.3	1.10	-2.42	0.96	60.78
4	12.5×100	11.46	27.2	1.10	-2.53	0.95	67.34
5	6.25×50	12.27	6.8	1.04	-2.53	0.99	26.29
6	6.25×100	11.14	9.0	1.05	-3.33	0.98	30.58
7	12.5×75	11.57	15.6	1.05	-2.94	0.97	45.76
8	12.5×100	12.28	19.4	1.04	-3.10	0.98	52.02
9	6.25×50	11.76	6.5	1.02	-2.81	0.99	24.05
10	6.25×100	11.07	7.8	1.04	-3.01	0.98	30.82
11	12.5×75	11.50	12.2	1.04	-3.29	0.98	38.96
12	12.5×100	11.44	12.2	1.06	-3.57	0.98	40.83
平均	781.25	11.40	14.2	1.06	-2.83	0.97	41.84

注:实验在设计之前进行过试夯,试夯中,在夯击 20 击上下,模型位移场基本趋于稳定,故表 2 中的夯坑深度都以 20 击作为最后标准。

表 3 三种锤径下不同能量时的夯坑深度和夯坑体积

试验编号	锤径 D /cm	夯击能组合 E / (N·cm)	夯坑深度 S_1 /cm	夯坑体积 V /cm ³	单位能量夯坑体积 $V/(\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$
1	7	6.25×50	11.8	227.03	0.73
2	7	6.25×100	17.2	330.93	0.53
3	7	12.5×75	24.3	467.53	0.50
4	7	12.5×100	27.2	523.33	0.42
5	11	6.25×50	6.8	323.14	1.03
6	11	6.25×100	9.0	427.68	0.68
7	11	12.5×75	15.6	741.31	0.79
8	11	12.5×100	19.4	921.89	0.74
9	15	6.25×50	6.5	574.34	1.84
10	15	6.25×100	7.8	689.21	1.10
11	15	12.5×75	12.2	1077.99	1.15
12	15	12.5×100	12.2	1077.99	0.86
平均	11	781.25	14.2	732.73	0.94

由表3作出图5~图8并得出规律如下:(1)夯坑深度与锤径和能量的关系,如图5、图6所示。

由图5、图6可看出,夯坑深度随锤径的增大逐渐变小,随能量增大递增,直至某一区间夯坑深

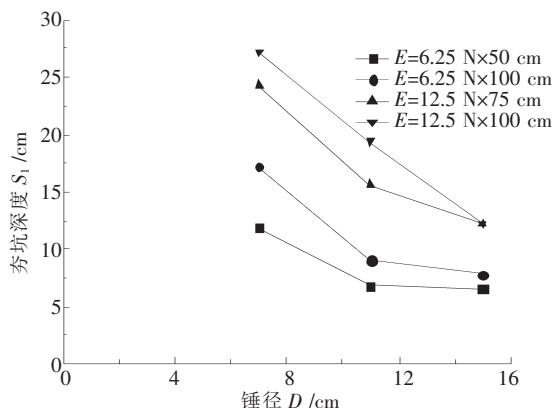


图5 夯坑深度与锤径关系

度变化不明显。两个图形表明段斜率是最大,即锤径与能量产生的效果是最显著的。

(2)单位能量夯坑体积(夯坑体积/夯能)与锤径和能量的关系,如图7、图8所示。

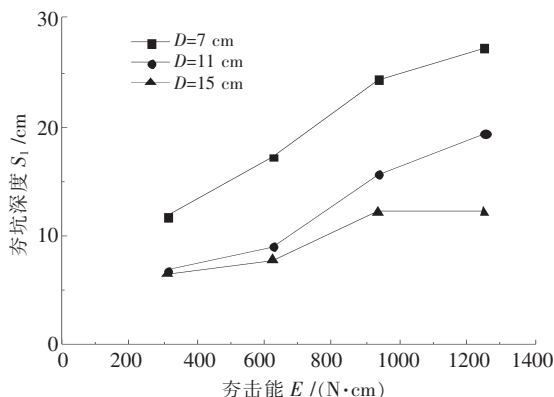


图6 夯坑深度与能量的关系

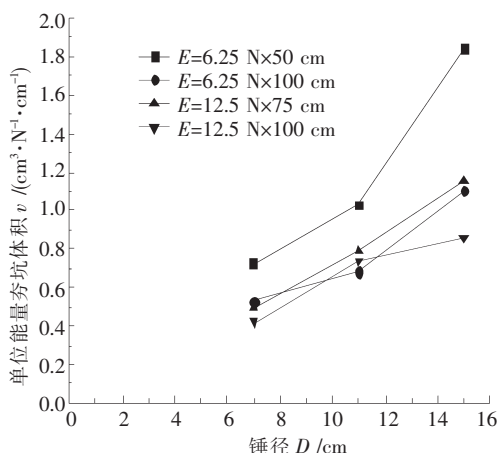


图7 单位能量夯坑体积与锤径关系

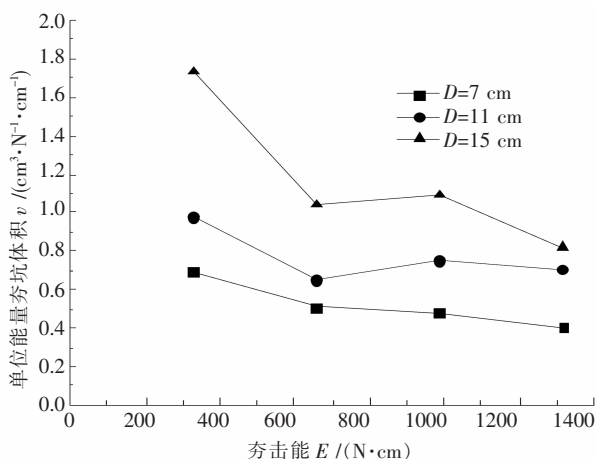


图8 单位能量夯坑体积与能量的关系

由图7、图8可看出,单位能量体积随锤径的增加越变越大,而能量小的其单位能量夯坑体积反而大;另从图8中看出,在曲线中间段有一段平缓期,即随着能量的递增,单位能量夯坑体积变化不明显,故在实际工程中应尽量避免这一能量区间。

3 建立夯坑深度和有效加固的相关方程

3.1 夯坑深度的相关方程

通过实验中得到三种锤径每次夯击下夯坑深度数据,根据式(3),两边取对数进行多元线性拟合得到如下相关方程:

$$\lg \frac{S_1}{D} = -0.4847 + 0.5761 \times \frac{E}{WD} - 0.4611 \times \frac{D^3 \gamma_d}{W} \quad (6)$$

相关系数为 $r=0.93$, $F=351.84$ 。

3.2 有效加固深度的相关方程

由式(5)的 h 对深度 z 进行求导可得中心点下任一深度处的竖向应变^[9-11]。

$$\varepsilon_{zd} = \frac{\partial h}{\partial z} = ah_0 \frac{b}{\sqrt{WH}} e^{\frac{-h}{\sqrt{WH}} z} \quad (7)$$

根据前人提出的有效加固深度为竖向应变 ε 等于 5% 时的深度,则可由式(7)求得每组实验的有效加固深度值,用 S_2 表示,见表 2。

(1)把表 2 中的有效加固深度代入式(3),并与施工工艺参数和土质参数进行拟合,可得:

$$\frac{S_2}{D} = 3.1173 + 0.1484 \frac{E}{WD} - 0.7285 \frac{\gamma_d D^3}{W} \quad (8)$$

相关系数为 $r=0.76$, 统计量 $F=7.899$ 。

(2)把表 2 中的有效加固深度代入式(3),并两边取对数,按照上式方式进行拟合,可得:

$$1g \frac{S_2}{D} = 0.2750 + 0.28451g \frac{E}{WD} - 0.44661g \frac{\gamma_d D^3}{W} \quad (9)$$

相关系数为 $r=0.99$, 统计量 $F=299.889$.

4 实例验证

为了验证估算夯坑深度和有效加固深度的拟合方程是否具有可用性,用工程实例对其进行检验,如表4.

从表4可看出,文中建立的夯坑深度估算公式和有效加固深度估算公式与实际值相接近,故对用

于进行工程设计上具有一定的意义.

5 结论

通过粘土地基半模试验观测到的地面变形与竖向变形规律,建立了由土质参数和强夯工艺参数估算强夯夯坑深度和有效加固深度的经验方程.经过实例验证,表明建立的相关方程与实测结果吻合,对工程实践有一定的实际意义.

表4 夯坑深度和有效加固深度拟合方程的检验

工程实例名称	夯击 E / (kN·m)	锤重 W / kN	锤径 D / m	干重度 γ_d / (kN·m ⁻³)	夯坑深度实测值 / m	公式(5)估算值 / m	相对误差	有效加固深度实测值 / m	公式(8)估算值 / m	相对误差	公式(9)估算值 / m	相对误差
瓮福磷肥工程 I 区 ^[12]	8000	450	3.1	16.0	2.22~2.81	2.70	0.1~0.2	9~10	9.91	0.1	9.35	0.1
瓮福磷肥工程 II 区 ^[12]	6000	450	2.6	19.0	2.22~2.80	2.51	0.1~0.2	7.0~8.0	8.67	0.1~0.2	8.90	0.1~0.2
瓮福磷肥工程 III 区 ^[12]	3000	190	2.6	19.0	1.13~2.17	1.86	0.2~0.5	4.0~5.0	5.42	0.1~0.4	5.88	0.2~0.4
贵阳龙洞堡机场强夯处理 ^[12]	1000	150	2.3	12.3	1.22	1.39	0.1	5.80	6.21	0.07	5.87	0.01
茂名30万t乙烯工程地基处理 ^[12]	2400	175	2.6	13.0	2.10	1.96	0.1	6.9~7.3	7.60	0.1	6.98	0.04
成都地铁二号线某站场工程 ^[13]	3000	175	2.6	15.2	1.985	2.08	0.05	6.5~7.5	7.76	0.03~0.2	6.93	0.07~0.08

参考文献:

- [1] 龚晓楠. 地基处理手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 叶观宝, 高彦斌, 叶书麟. 地基处理 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 石亮, 罗嗣海, 邓通发, 等. 砂土地基强夯地面变形与加固深度的半模试验研究 [J]. 工程勘察, 2012(2): 1-4.
- [4] 张兴元, 张豫川. 高能级强夯室内模型试验研究 [J]. 工程勘察. 2011(9): 9-13.
- [5] 邓通发, 吴周明, 罗嗣海. 渗透系数对饱和土强夯效果影响的数值模拟 [J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(1): 25-28.
- [6] 范秋燕, 陈景河, 易建辉. 强夯法几个问题的室内模型试验研究 [J].

土工基础, 2005, 19(6): 65-67.

- [7] 费香泽, 王钊, 周正兵, 等. 黄土强夯的模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437-441.
- [8] 张峰. 碎石土的强夯模型试验研究 [J]. 建筑科学, 1992(3): 25-28.
- [9] 罗嗣海. 软弱地基强夯与强夯置换加固效果计算 [D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [10] 罗嗣海, 杨泽平, 龚晓楠. 强夯的地面变形规律初探 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 92.
- [11] 罗嗣海, 潘小青, 龚晓楠. 强夯加固深度的统计研究 [J]. 工程勘察. 2001(5): 38-39.
- [12] 王铁宏. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [13] 宋明胤, 高文银. 成都膨胀土地区强夯加固地基施工效果的研究 [J]. 山西建筑, 2011, 37(7): 61-62.