

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.006

动力夯实法处理湿陷性黄土的微观机理

蔡靖¹, 罗明达¹, 董炳寅²

(1. 中国民航大学 机场工程研究基地, 天津 300300;
2. 中化岩土工程股份有限公司 地基基础研究所, 北京 102600)

摘要:利用取自山西的湿陷性黄土,模拟动力夯实现场试验,设计不同夯击次数的模型试验,得到随着夯击次数的增加,土样的密度、强度参数逐渐提高,湿陷性系数逐渐降低的变化规律,但当夯击次数大于8次时,土样竖向变形、密度、内摩擦角和粘聚力均趋于稳定,且湿陷性系数小于0.015。另外,对不同夯击次数下的土样进行SEM(扫描电镜)微观试验,编制SEM图像分析程序,经定性分析得到:随着夯击次数的增加,中小孔隙含量越来越大;夯击前土样等效孔径16 μm以下的孔隙占92.6%,大于16 μm的大孔隙占7.4%,小于4 μm的小孔隙占66.9%。10次夯击后,土体中几乎不存在等效孔径大于16 μm的大孔隙,而等效孔径小于4 μm的小孔隙占81.8%。经定量分析建立了夯击次数与平面孔隙率、平均等效孔径之间的量化关系。从而建立了湿陷性系数与平面孔隙率和平均等效孔径的量化关系。

关键词:模型试验;平面孔隙率;平均等效孔径;湿陷性系数

中图分类号:TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0030-07

Micro-Mechanism of Dynamic Compaction on Collapsible Loess

Cai Jing¹, Luo Mingda¹, Dong Bingyin²

(1. Airport Engineering Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China;
2. Foundation Research Institute of China Zhonghua Geotechnical Engineering Co. LTD, Beijing 102600, P. R. China)

Abstract: Collapsible loess was collected from a suburban district of Shanxi, China. Dynamic model experiments of different hammer blows were designed to simulate the in-situ test on collapsible loess. The model experiments results showed that the density and shear strength parameters of the soil specimens increased with the increase of blows while the collapsible coefficient of the loess decreased with the increase of blows. However, after eight blows, the vertical displacement, the density, the internal friction angle and the cohesion of the loess were tend to be constant, and the collapsible coefficient was less than 0.015 that means the loess is stable. Furthermore, scanning electron microscope was used and SEM image analysis program was established to study the micro-structure of the specimens. The analysis of results showed that small pores in the soil increased with the increase of the blows; before compaction the content of pores with an equivalent pore diameter under 16 μm was 92.6%, the content of pores with an equivalent pore diameter larger than 16 μm was 7.4% and the content of pores with an equivalent pore diameter less than 4 μm was 66.9%. After ten blows, there were nearly no pores with an equivalent pore diameter larger than 16 μm, while the content of the pores with an equivalent pore diameter less than 4 μm was 81.8%. According to quantitative analysis, the relations between the blows and the plane void ratio, and the

收稿日期:2013-08-16

基金项目:中国民航大学校内基金(09CAUC-E01);中国民航大学机场工程基地开放基金(KFJJ2012JCGC02)

作者简介:蔡靖(1975-),女,副教授,主要从事岩土工程研究,(E-mail)Jcai@cauc.edu.cn.

equivalent pore diameter were established. Meanwhile, the relations between the collapsible coefficient and the plane void ratio, the equivalent pore diameter were established.

Key words: the model experiment; the plane void ratio; the equivalent pore diameter; the collapsible coefficient of the loess

中国的湿陷性黄土广泛分布于西北地区,约 38 万 km²。动力夯实法是一种有效消除黄土湿陷性的地基处理手段^[1-2]。但湿陷性黄土本身具有结构性强,孔隙大,可溶盐含量较高等性质会影响夯实的加固效果,采用规范中的设计方法进行夯实施工,会使得工期延长,费用增加,达不到设计深度。如某一西北地区动力夯实法处理湿陷性黄土地基的工程通过初步经验设计确定的施工方案需要 200 多万元,经过优化设计,仅用了 60 万元。夯实过程中土体结构性的变化是造成地基土物理、力学性质发生变化的根本原因,也是影响加固效果的主要因素^[3-5]。目前对土

体结构性变化的定量研究还处于初级阶段,其研究成果还远远没有与易于量测的物理力学参数相结合^[6-9]。因此,针对这个问题,本文从宏观和微观的角度对动力夯实作用下湿陷性黄土的物理力学参数、微观结构变化进行深入研究,为动力夯实法处理湿陷性黄土地基的施工参数的确定提供理论依据。

1 动力夯实法处理湿陷性黄土的模型试验

试验土样取自山西,物理指标见表 1。

表 1 土样的物理性质指标

土样深度/m	土样密度/(g·cm ⁻³)	土样含水率/%	比重	孔隙比	湿陷性系数	液限/%	塑限/%
2.0	1.633	11.07	2.72	0.85	0.089	30.28	14.1
5.0	1.681	10.86	2.72	0.79	0.082	30.28	14.1
11.5	1.720	18.35	2.72	0.87	0.073	30.28	14.1
13.5	1.741	19.12	2.72	0.86	0.054	30.28	14.1
19.0	1.784	18.97	2.72	0.81	0.016	30.28	14.1

模型试验^[10-12]在室外进行,试验场地为天然平整开阔场地,场地土为黏性土。试验场地具体的处理方法为:在开阔平整场地上人工挖一圆柱形土坑,土坑尺寸:高 15 cm、底面直径 12.5 cm,试验时将高 15 cm、直径 12 cm 的圆柱形试样放入坑中,量测坑壁与试样之间的间距,根据试样高度算出间隙体积,采用与试样物理性质相同的土体,分层填土实并压实到与试样相同的密度。试验现场示意图如图 1 所示。试验设备包括:带有连杆和垫片,重量为 10 kg,底面半径为 5 cm 的穿心锤、测量竖向变形的直尺,量程为 30 cm,精确到 0.1 cm。

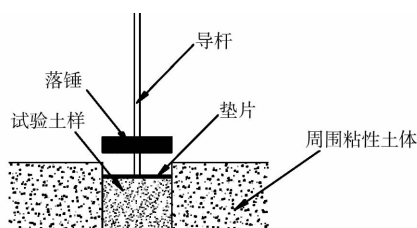


图 1 模型试验示意图

模型试验分 5 组进行,每组 2 个试样,对应的夯

击次数分别为 2、4、6、8、10。落锤提升高度 0.64 m,落锤的夯击能为 64 N,落锤自由下落,每次夯击时间间隔为 16.7 s。每组试样夯击完后,测定土样的高度、密度和含水量。同时用环刀从夯后试样表面沿深度取 2 个直径为 6.2 cm,高为 2 cm 的圆柱体土样,用于湿陷性试验。然后用薄壁取土器分别沿剩余试样上表面中心和两侧取出 3 个直径为 3.9 cm,高为 11 cm 的圆柱体土试样,随后将三个土样分别制成 3 个直径为 3.9 cm,高为 8 cm 的三轴压缩试验试样。在三轴试样制作中,一个取自 11 cm 高圆柱试样的上层、另外两个取自中间和下层,以便获得夯击土体样沿深度的平均力学性能。在制作三轴试验试样的同时,从其剩余部分制作 3 个边长为 1 cm 的正方体土样用作微观试验。

利用上述所取的 5 组(2、4、6、8、10 次夯击)三轴试验土样和原状土(0 次夯击)制成的试样进行 6 组三轴固结排水剪切试验,每组 3 个试样,固结压力分别为 0.1、0.2 和 0.4 MPa。设定剪切速度为 0.1 mm/min,对试样进行剪切试验。试样每产生 0.3 mm 变形值,测读一次测力计读数和轴向变形

值,直到轴向应变为 15%~20%。取轴向应力与应变曲线的峰值作为土样的剪切强度。

利用夯击试验中所取的湿陷性试验试样,用固结仪进行土样湿陷性试验,确定土体的湿陷性系数。根据原状土样的取样深度,确定 200 kPa 为最大分级压力,依次分级施加 50、100、150 和 200 kPa 的压力,施加每级压力后,每隔 1 h 测定一次变形,直至试样变形稳定。试样在 200 kPa 压力下变形稳定后,向固结容器内自上而下注入纯水,水面宜高出试样顶面,每隔 1 h 测定一次变形,直至试样变形稳定为止。根据 200 kPa 压力下土样浸水产生的高度变化值与土样初始高度的比值计算得到湿陷性系数。

不同夯击次数下土样的密度、强度参数和湿陷性系数试验结果如表 2。表 2 中的物理力学参数为试验数据的平均值。典型的 SEM(扫描电镜)图像如图 2~7 所示。不同夯击次数下土样的密度、竖向变形和强度参数的变化如图 8~11 所示。

表 2 不同夯击次数下土样的物理力学参数

夯击次数	土样编号	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	竖向变形/cm	φ/(°)	c/kPa	湿陷系数
0	1	1.780	19.18	0.00	16.55	20.13	0.076
2	2	1.875	19.28	0.31	26.23	28.98	0.069
4	3	1.975	19.04	0.50	26.67	39.97	0.054
6	4	1.981	19.28	0.70	27.10	41.76	0.015
8	5	2.061	19.28	0.77	28.70	44.33	0.004
10	6	2.095	19.32	1.09	28.77	49.61	0.002

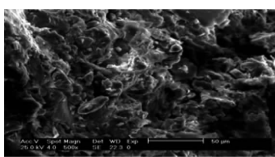


图 2 1 号土样 SEM 图像

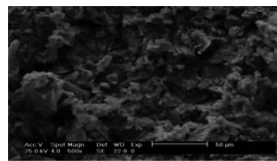


图 3 2 号土样 SEM 图像

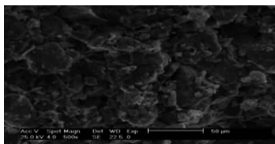


图 4 3 号土样 SEM 图像

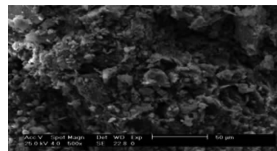


图 5 4 号土样 SEM 图像

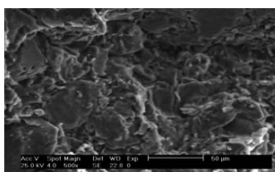


图 6 5 号土样 SEM 图像

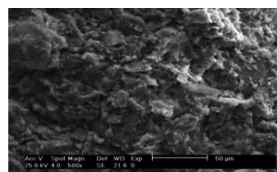


图 7 6 号土样 SEM 图像

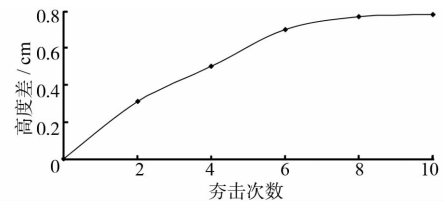


图 8 土样竖向变形量随夯击次数变化曲线

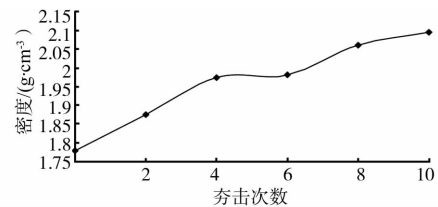


图 9 密度随夯击次数变化曲线

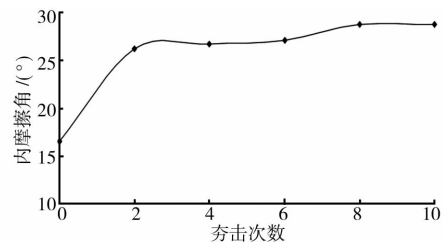


图 10 内摩擦角随夯击次数变化曲线

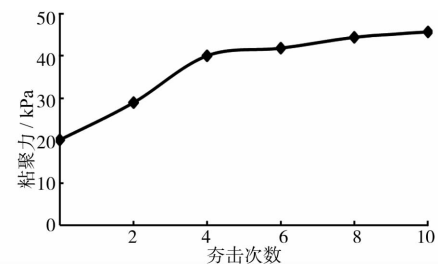


图 11 粘聚力随夯击次数变化曲线

由图 8~11 可知:随着夯击次数的增加,土样的竖向变形量、密度、内摩擦角和粘聚力都呈增加的趋势。但当夯击次数大于 8 次时,土样竖向变形、密度、内摩擦角和粘聚力均趋于稳定。图 12 表明,随着夯击次数的增加湿陷性系数急剧降低,二者的拟合关系式为: $\delta = 0.1478e^{-0.4509N}$, 其中 δ 为湿陷性系数。

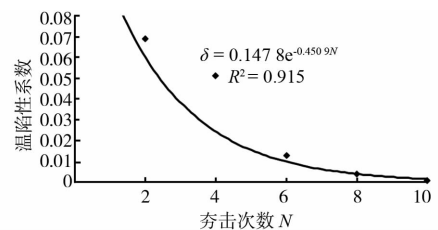


图 12 湿陷系数随夯击次数变化曲线

2 基于 Matlab 的 SEM 图像分析

2.1 微观定量分析特征参数

由于引起黄土湿陷性的主要原因是孔隙的存在^[13-14],动力夯实法处理湿陷性黄土也是以压缩孔隙为目的。因此研究的微观定量参数^[15]有4个。

1)平面孔隙率 e , 定义为 SEM 图像中孔隙要素的面积和图像总面积之比。

$$2) \text{孔隙等效孔径 } D, D = 2 \sqrt{\frac{A \times S}{(3.14A_a \times m)}}$$

其中: D 为孔隙等效直径, A 为孔隙像素点总数, S 为图像实际大小, A_a 为图像总像素点, m 为图像放大倍数。同时定义平均等效孔径, $d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$, 其中 n 为孔隙个数, D 为每个孔隙的等效孔径。

3)图像孔隙的方向角和平均方向角:孔隙方向角即孔隙长轴与水平方向的夹角。平均方向角为孔隙方向角的平均值。

4)图像孔隙的形状系数和平均形状系数 K_i : 孔隙的形状系数(K_i)为: $K_i = \frac{L_s}{L_l}$, 其中: L_s 为孔隙的短轴长度, L_l 为孔隙的长轴长度。 K_i 的取值范围为 $[0, 1]$ 。当 $K_i = 1$ 时,表明孔隙为正方形或者为圆形的极端情况;当 $K_i = 0$ 时,表明结构孔隙呈现线性的极端情况。

2.2 程序算法实现步骤

1)读入 SEM 图像。

2)对图像进行预处理。使用滤波函数对图像进行椒盐滤波处理,消除图像中的噪声干扰。

3)图像的二值化处理。经过预处理的图像采用 Matlab 的矩阵运算方法进行图像的二值化。即将图像转化为灰度图,图像的每一个像素点从 0 到 255 都有一个灰度值。选择一个阈值,当某个像素的灰度值大于该阈值时返回灰度值 0,相反则返回 255。如此,就将整幅图像都赋予 0 或 255 的灰度值,这样就形成了只有黑白两色的二值图像。由于孔隙在 SEM 图像中颜色较深,故在二值图像中显示的是白色。

4)孔隙形态分析。

图 13 为程序算法步骤实现流程图。

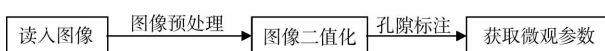


图 13 程序算法步骤实现流程图

2.3 SEM 图像分析

2.3.1 图像预处理 图 14(a)为 500 倍放大 SEM 图像,下方有图像信息,比例尺和放大倍数,但在进行二值化处理时,这些信息会干扰二值图像的效果,故在进行二值处理前去掉原始图像下部,如图 14(b)所示。使用滤波函数对图像进行椒盐滤波处理,消除图像中的噪声干扰,经去噪处理后的图像如图 14(c)所示。图 14(c)表明,经去噪后的图像,孔隙与颗粒特征更加明显,有助于黄土微观结构的定性分析以及二值图像的生成。

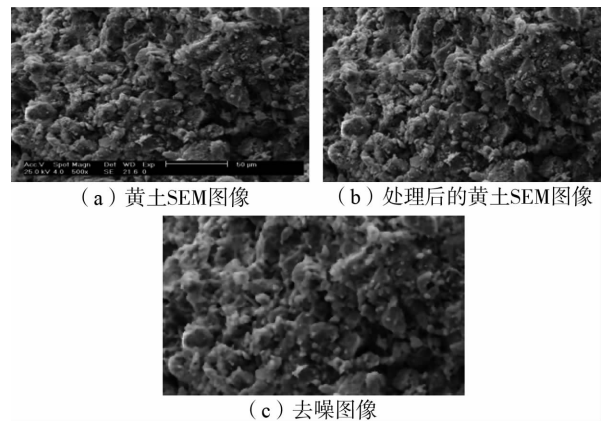


图 14 图像预处理

2.3.2 图像二值化 用矩阵运算方法进行图像的二值化,其中二值图像中白色部分代表孔隙,黑色部分代表固体颗粒。

图 15 为不同夯击次数下,湿陷性黄土在 500 倍放大倍数下的二值图像。

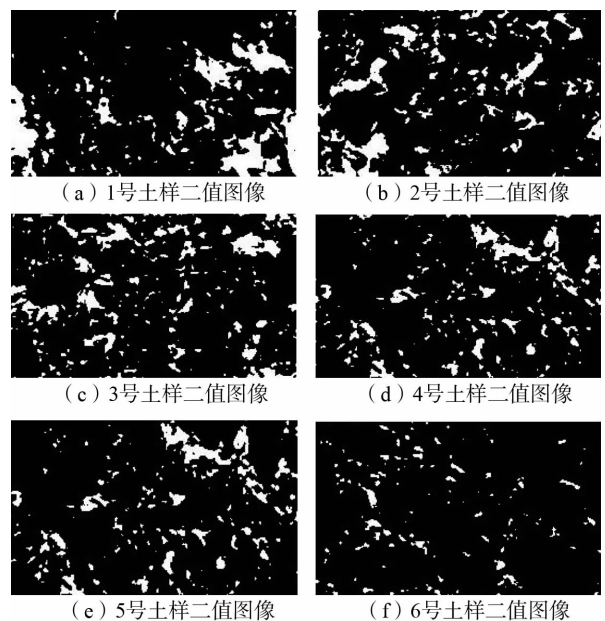


图 15 二值图像

图 15 表明,在没有受到夯击时,土样二值图像中可以清晰地看到大孔隙的存在(图 15(a)所示)。2 次夯击时,土样的二值图像中,大孔隙减少,中小孔隙增加(如图 15(b))。在 4、6、8 和 10 次夯击下,土样孔隙大小随夯击次数的增加而逐渐减小,尤其是 10 次夯击时,二值图像显示是分布较均匀的小孔隙,并且孔隙的数目也明显减少。

2.3.3 微观结构参数定量分析 应用编制的程序,可以获得在不同夯击次数下土样微观参数值,如表 3 所示。平面孔隙率、平均等效孔径与夯击次数之间的关系如图 16、17 所示。图 18 给出了不同夯击次数下平均等效孔径分布。

表 3 不同夯击次数下的微观参数与湿陷性系数

夯击次数	平面孔隙率	平均等效孔径/ μm	平均形状系数	平均方向角/ $^\circ$	湿陷性系数
0	0.129	4.354	0.565	39.513	0.076
2	0.117	3.556	0.561	36.182	0.069
4	0.116	3.413	0.597	36.744	0.051
6	0.083	3.049	0.595	36.981	0.015
8	0.066	2.634	0.575	38.165	0.004
10	0.046	2.529	0.576	33.698	0.002

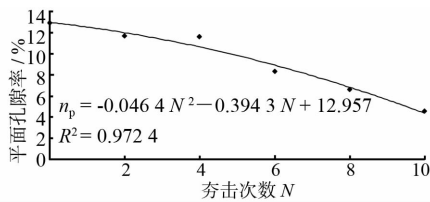


图 16 夯击次数与平面孔隙率关系

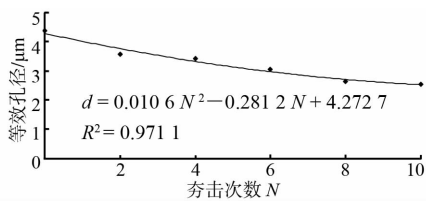


图 17 夯击次数与平均等效孔径关系

图 16、17 表明,随着夯击次数的增加,土样的平面孔隙率和平均等效孔径不断降低,夯击次数与平面孔隙率的关系曲线方程为 $n_p = -0.0464N^2 - 0.3943N + 12.957$; 夯击次数与平均等效孔径的关系方程为: $d = 0.0106N^2 - 0.2812N + 4.2727$, 其中 N 为夯击次数, $0 \leq N \leq 10$, n_p 为平面孔隙率, d 为平均等效孔径。图 18、19 可以看出夯击次数对平面形状系数、平均方向角几乎没有影响。因此后

续的分析中只考虑平面孔隙率和平均等效孔径两个参数。

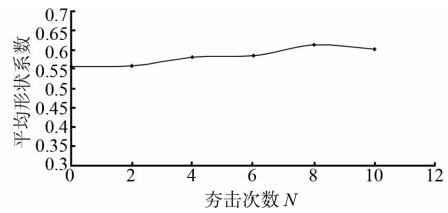


图 18 夯击次数与平均形状系数关系

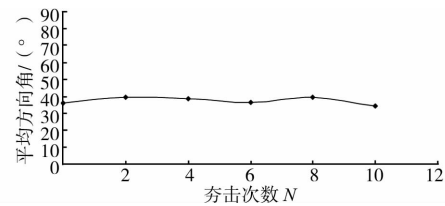
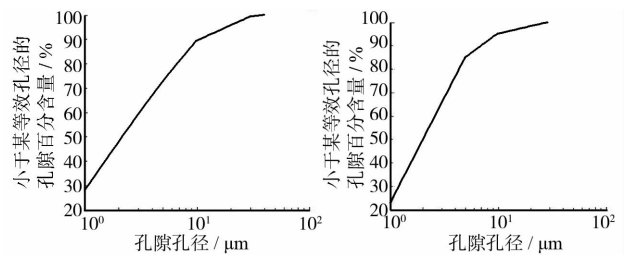
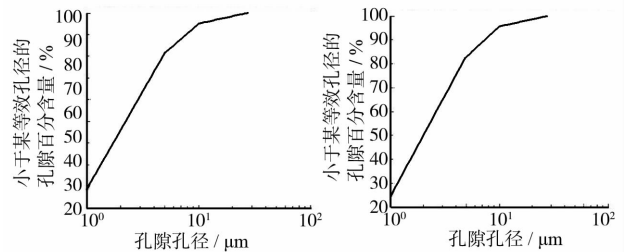


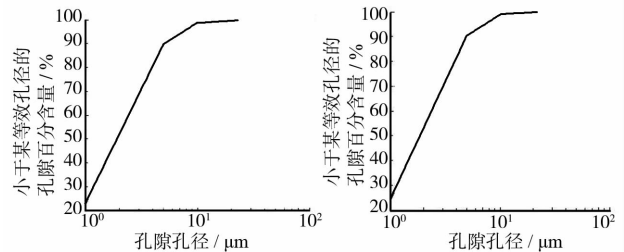
图 19 夯击次数与平均方向角关系



(a) 未夯击土样等效孔径分布 (b) 2次夯击土样等效孔径分布



(c) 4次夯击土样等效孔径分布 (d) 6次夯击土样等效孔径分布



(e) 8次夯击土样等效孔径分布 (f) 10次夯击土样等效孔径分布

图 20 不同夯击次数下平均等效孔径分布

图 20 表明,随着夯击次数的增加,中小孔隙含量越来越大;夯击前土样等效孔径 $16 \mu\text{m}$ 以下的孔隙占 92.6%, 大于 $16 \mu\text{m}$ 的大孔隙占 7.4%, 小于 $4 \mu\text{m}$ 的小孔隙占 66.9%。图 20(f) 表明,10 次夯击后,土体中几乎不存在等效孔径大于 $16 \mu\text{m}$ 的大孔

隙,而等效孔径小于 $4 \mu\text{m}$ 的小孔隙占 81.8%。

3 黄土湿陷性与微观结构参数之间的关系

由表 3 可得不同夯击次数下黄土的湿陷性系数与平面孔隙率、平均等效孔径、平均形状系数和平均方向角的关系如图 21、22、23、24 所示。

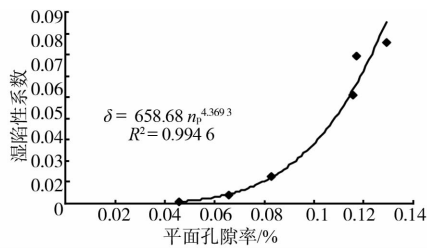


图 21 平面孔隙率与湿陷系数关系

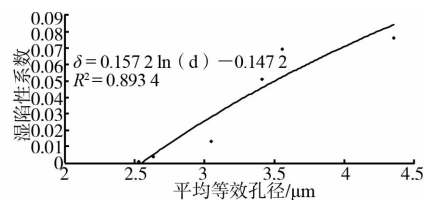


图 22 平均等效孔径与湿陷性系数关系

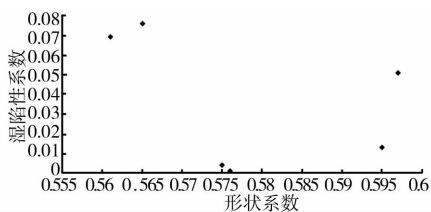


图 23 平均形状系数与湿陷系数关系

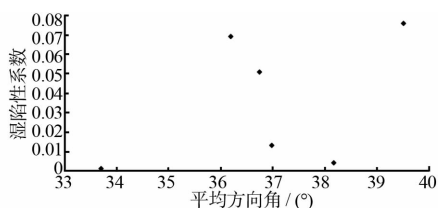


图 24 平均方向角与湿陷性系数关系

由图 21、图 22 得出湿陷性系数与平面孔隙率和平均等效孔径的关系分别为: $\delta = 658.68 n_p^{4.3693}$ 和 $\delta = 0.1572 \ln(d) - 0.1472$ 。而图 23、24 表明,黄土湿陷性系数与孔隙的形状系数和平均方向角的相关性不大。

4 结 论

通过湿陷性黄土的动力夯实模型试验及扫描电

镜微观试验,得出以下结论:

1)随着夯击次数的增加,土样的竖向变形量、密度、内摩擦角和粘聚力都呈增加的趋势。但当夯击次数大于 8 次时,土样竖向变形、密度、内摩擦角和粘聚力均趋于稳定。随着夯击次数的增加湿陷性系数急剧降低。

2)通过微观图像的分析可以得出:随着夯击次数的增加,大孔隙逐渐减少,中小孔隙含量越来越大;夯击前土样等效孔径 $16 \mu\text{m}$ 以下的孔隙占 92.6%,大于 $16 \mu\text{m}$ 的大孔隙占 7.4%,小于 $4 \mu\text{m}$ 的小孔隙占 66.9%。10 次夯击后,土体中几乎不存在等效孔径大于 $16 \mu\text{m}$ 的大孔隙,而等效孔径小于 $4 \mu\text{m}$ 的小孔隙占 81.8%。

3)通过对微观图像的定量分析,建立了夯击次数与平面孔隙率、平均等效孔径之间的量化关系。

4)研究的定量分析参数主要为平面孔隙率、孔隙等效孔径和平均等效孔径。经定量分析,平面孔隙率和平均等效孔径随夯击次数的增加而逐渐减小,并且成线性关系,相关系数均在 0.9 以上。

5)本文采用天然场地粘土作为试验约束条件必然会对试验结果产生一定的影响,今后的研究中拟采用室内击实试验消除边界影响。

参考文献:

- [1] GB 50025—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.
- [2] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 龚成明,程谦恭,刘争平. 强夯激励下黄土边坡动力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2001-2006. Gong C M, Cheng Q G, Liu Z P. Model test study of dynamic responses of loess slope by dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2001-2006.
- [4] Jotisankasa A R, Coop M. Collapse behavior of compacted silty clay in suction monitored oedometer apparatus [J]. Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(7): 867-886.
- [5] 翁效林,王玮,刘保健. 湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 17-22. Weng X L, Wang W, Liu B J. Model test on deformation characteristics of widening collapsible loess roadbed and dynamic compaction method treatment effect, China journal of highway and transport [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 17-22.

- [6] Hu R L, Yeung M R, Lee C F, et al. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction [J]. *Engineering Geology*, 2001 (59): 203-217.
- [7] 冯世进, 胡斌, 张旭, 等. 强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40 (8): 1147-1153.
Feng S J, Hu B, Zhang X, et al. Model test study on impact parameters' influence on tamping effect [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40 (8): 1147-1153.
- [8] Medero G M, Schnaid F, Gehling W Y. Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible Soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2009, 135(6): 840-843.
- [9] 周飞飞. 原状湿陷性黄土的结构性本构模型[J]. *铁道工程学报*, 2012(4): 13-17.
Zhou F F. Non-linear constitutive model for intact collapsible loess [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2012(4): 13-17.
- [10] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. *世界地震工程*, 2010, 12(Sup1): 241-246.
Xiong J H, Hu B, Feng S J, et al. Model test study on silt foundation improvement by dynamic compaction [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2010, 12(Sup1): 241-246.
- [11] Jafarzadeh F. Dynamic compaction method in physical model tests [J]. *Scientia Iranica*, 2006, 13(2): 187-192.
- [12] 赵康, 罗嗣海, 石亮. 强夯模型试验及其研究进展[J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 131-134.
Zhao K, Luo S H, Dan L. Model tests of dynamic consolidation and its progress [J]. *Yellow River*, 2012, 34(2): 131-134.
- [13] Miao T D, Liu Z Y, Niu Y H. Unified catastrophic model for collapsible loess [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2002(5): 595-598.
- [14] Liu S H, Sun D A. Simulating the collapse of unsaturated soil by DEM, Int [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002(26): 633-646.
- [15] 邓津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(4): 542-548.
Deng J, Wang L M, Zhang Z Z. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29 (4): 542-548.

(编辑 王秀玲)

(上接 10 页)

- Li M Y, Zeng Q J, Mo H H, et al. Optimum design of composite foundation according to settlement control for extension project of expressway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 535-540.
- [9] Hiroshi M, Mitsuo N. Design and numerical analysis of road embankment with low improvement ratio deep mixing method [C]// *Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans*, 2004: ASCE, 2004: 1395-1402.
- [10] Reinaldo V M, Yong S. Geogrid-reinforced and pile-supported roadway embankment [C]// *Proceedings of Sessions of the Geo-frontiers 2005 Congress*, Texas: The Geo-institute of the American Society of Civil Engineers, 2005: 11-20.
- [11] Braja M D. *Principles of geotechnical engineering* [M]. Cengage Learning, USA, 2010.
- [12] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1996, 122(7): 577-596.
- [13] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 1-13
Gong X N. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 1-13.
- [14] 刘金龙, 张勇, 陈陆望, 等. 路基拓宽工程的基本特性分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2159-2163.
Liu J L, Zhang Y, Chen L W, et al. Basic characters of road widening engineering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2159-2163.
- [15] Hjortnes P A, BROERS H. The behavior of soft subsoil during construction of an embankment and its widening [C]// *Proc. Centrifuge 94*. Rotterdam: Balkema, 1994: 567-574.

(编辑 胡玲)