

强夯法加固湿陷性黄土的微观研究

王 梅, 白晓红

(太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘 要: 黄土的湿陷性对于建筑的安全具有极大的危害性, 而强夯法可以有效地消除黄土的湿陷性。通过对强夯前后湿陷性黄土的物理力学性质及微观结构进行对比分析, 强夯效果沿深度可分为三段, 从 3 m 至 8 m 为强夯效果最佳段。强夯使土体中孔径大于 20 μm 的孔隙含量减少, 小于 5 μm 的孔隙含量增加, 土体的致密程度提高。

关 键 词: 湿陷性黄土; 强夯法; 微观结构

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Microstructural study on collapsible loess reinforced with dynamic compaction

WANG Mei, BAI Xiao-hong

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The collapsibility of loess, which can be effectively eliminated by the dynamic compaction, does great harm to the safety of constructions. The effect of the dynamic compaction is evaluated through the contrast and analysis of the physical and mechanical properties of the collapsible loess before and after dynamic compacting. The compacting effect can be divided into three phases along the depth, and the most effective improved depth is from 3 to 8 m. The content of pores larger than 20 μm decreases and the content of pores smaller than 5 μm increases after the dynamic compaction. The density of loess is improved.

Key words: collapsible loess; dynamic compaction; microstructure

1 前 言

黄土结构性研究的根本目的在于揭示结构性对土力学行为的影响及内在联系, 因此将土的微观结构与宏观结构力学行为相结合是一条正确的研究途径^[1]。而强夯法用于消除黄土的湿陷性是一种效果显著且造价相对较低的地基处理方法^[2]。本文结合山西王曲发电厂强夯法处理湿陷性黄土试验场地, 分别取强夯前后不同深度处的土样, 对其物理力学性质进行了一系列的试验, 并利用扫描电镜对强夯前后不同深度处的土样进行观察, 得到微观结构照片二百余幅, 对微观照片中孔隙的分布进行了定量统计, 对强夯法加固湿陷性黄土的机理从微观方面作了一定的探讨。

2 强夯前后黄土的物理力学性质

重度 and 干重度如图 1 所示。强夯前后黄土的干重度变化情况与重度的变化情况基本一致。强夯后土的干重度在深度 10 m 之内较夯前土有显著的增长, 由夯前 13.6~15.1 kN/m^3 增至 15.4~18.0 kN/m^3 ; 在 10~12 m 深度内, 增幅有所减小, 强夯土的干重度开始下降; 12~16 m 深度内, 强夯土的干重度要小于夯前土; 16 m 以下, 基本恢复一致。这表明, 在一定范围内, 地基土的干重度增大, 湿陷性也随之改善。

孔隙比如图 2 所示。夯前黄土的孔隙比较大, 且随深度的增加逐渐减小。强夯后黄土的孔隙比在 10 m 深度内有较明显的减小由夯前 0.79~0.99 降至

0.5~0.76; 在 10-12 m, 降幅有所减小; 12-16 m 范围内, 强夯土的孔隙比大于夯前土; 16m 以下, 趋于一致。随孔隙比的减小, 湿陷性减弱。试验结果表明在一定范围内, 强夯对地基土的压密作用是较为显著的。

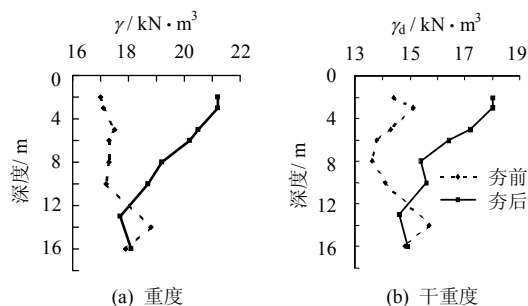


图 1 强夯前后黄土重度 and 干重度对比曲线

Fig.1 Comparison of unit weight and dry unit weight before and after dynamic compaction

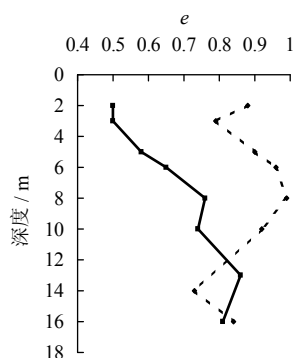


图 2 孔隙比 (e) 对比曲线

Fig.2 Comparison of void ratio

饱和度如图 3 所示。饱和度是与含水量密切相关的指标之一。夯击过程中土层中的孔隙水压力有所增加, 但因土的渗透性较差, 孔隙水的渗排量和蒸发量很小, 从而导致强夯土的饱和度增大, 由图

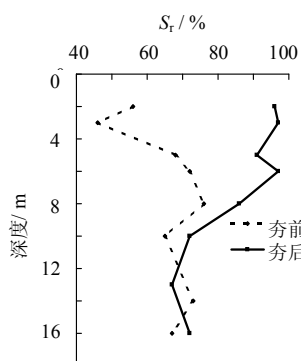


图 3 饱和度 (Sr) 对比曲线

Fig.3 Comparison of degree of saturation

可以比较清楚地看到: 深度 8m 以内的强夯土的饱和度有了明显的增长, 由夯前的 0.46~0.76 增大至夯后的 0.86~0.97, 增幅较大; 8-12m 范围内增幅有所减小; 12-15m 内, 强夯土的饱和度较夯前略有减小, 15m 以下趋于一致。

2.4 强夯土的湿陷性

消除场地内黄土的湿陷性是强夯要达到的主要目的之一。本次试验取压力 400 和 800kPa 来对强夯处理后黄土的湿陷性进行评价。夯前黄土除个别土样外, 自重湿陷系数 (δ_{zs}) 都小于 0.015, 可定义为非自重湿陷性黄土。在图 4 中 400kPa 压力下夯前黄土的湿陷系数较大, 强夯后黄土的湿陷系数的降低更加明显, 3-8m 深度内夯后土的湿陷系数仍为零, 14m 深度内的湿陷性基本消除。800kPa 压力下夯前土 3-8m 内的湿陷系数比较大, 10m 以下湿陷系数较小。夯后土 3-8m 范围内湿陷系数接近于零, 10m 以下强夯土的湿陷系数与夯前接近, 10m 深度内土的湿陷性基本消除。

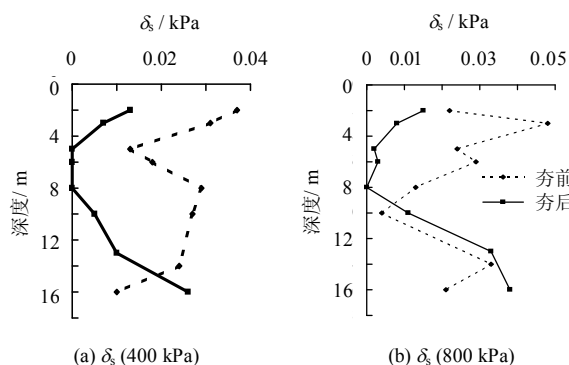


图 4 湿陷系数对比曲线

Fig.4 Comparison of collapsibility coefficient

2.5 渗透试验

采用变水头试验得出各个土样在垂直方向的渗透系数 (k) 见图 5。土体渗透性的变化是与土体的组成结构的变化紧密联系的。土中颗粒的定向排列和孔隙大小及分布对渗透性都有很大影响。黄土是一种大孔隙土, 渗透系数要大于一般的粘性土。夯前黄土的渗透系数约为 10^{-4} cm/s, 夯后有大幅度的减小, 一般为 10^{-5} cm/s, 甚至 10^{-6} cm/s。这表明强夯后, 土中颗粒重新排列, 更接近于平行状态, 颗粒间孔隙减小, 水流渗透时所受的阻力和经过的距离加大, 土的渗透系数随之减小, 强夯后 10 m 深度内土样的渗透系数有明显的减小, 10~13 m 内减幅有所降低, 13 m 以下接近于夯前。

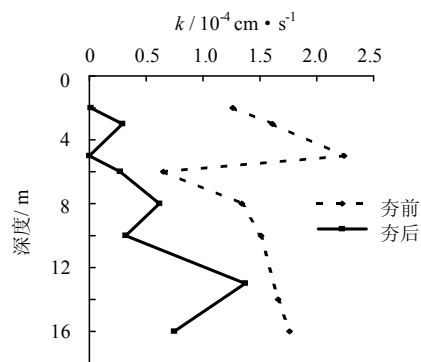


图5 渗透系数对比曲线

Fig.5 Comparison of permeability coefficient

3 强夯效果分析

综合以上对强夯前后黄土的各项物理力学性质的分析,强夯后的效果沿深度大致可分为3个阶段:

第1段为从起夯面到最后一次夯击锤的底面,大约在地下深度2~3 m左右。这一段内的土层在强夯时受到夯击的扰动。夯坑周围的土体隆起,侧向

挤出,是扰动松弛段。

第2段从深度3~12 m左右。这一段土体夯后的各项物理力学性质都有一定程度的变化,湿陷性基本消除,是强夯加固段。这一段又可划分成两部分:从深度3 m到8 m之间,各项的改善程度较大,为强夯效果最佳段,在8~12 m之间,夯后土体的各项物理力学性质的变化幅度开始减小,加固的效果开始逐渐减弱。

第3段为深度约12 m以下。这一段土体受到强夯的影响很小或基本未受到强夯的影响,夯后土体的各项物理力学性质的变化幅度减小,逐渐与夯前趋于一致,是强夯无扰动段。

4 强夯前后黄土微观结构对比分析

强夯后黄土的结构非常密实,在与夯前取相同倍数下进行扫描电镜观察时,颗粒与孔隙的形态分辨不很清楚,所以夯前与夯后采用了不同的放大倍数。其微观结构见所附照片(见图6)。

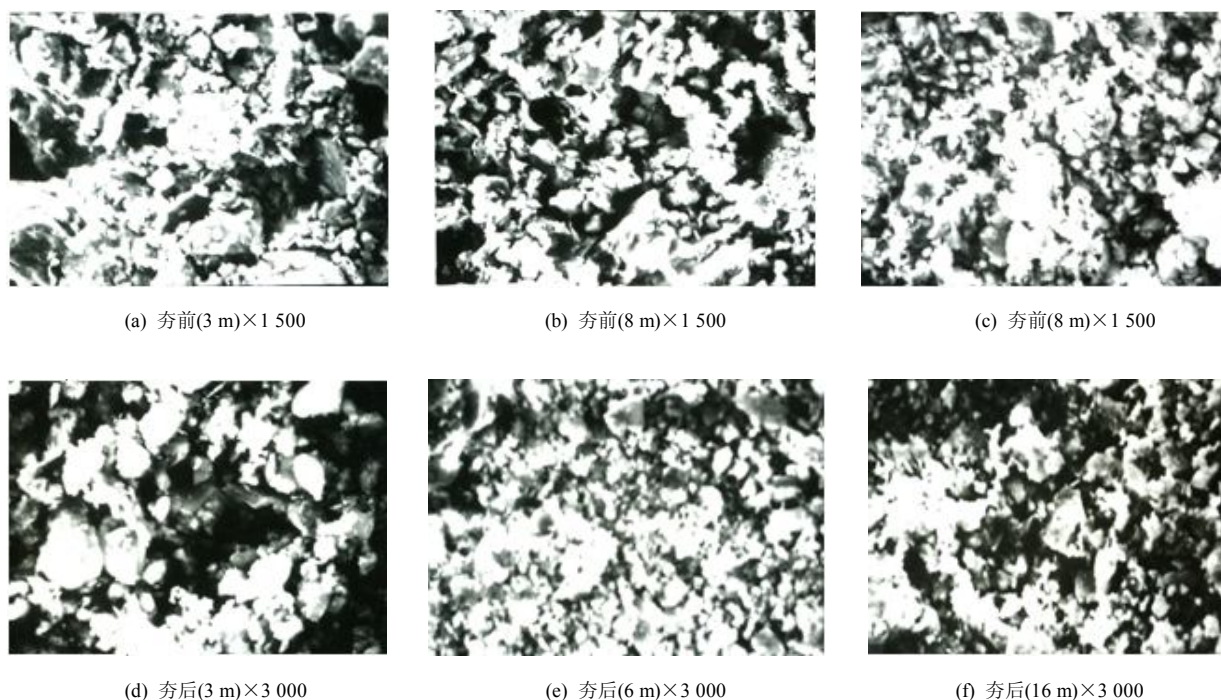


图6 强夯前后黄土的微观结构照片

Fig.6 Microphotographs of loess before and after dynamic compaction

夯后土体的微结构在不同深度内与夯前相比,发生了程度不同的变化:

第1段土体:厚度为2~3 m左右。根据强夯后物理力学性质的分析,为扰动松弛段,对微观照片进行分析得出的结论也基本相同。在各项定量统计值中,孔隙的面密度为孔隙总面积与所统计的场总

面积比值,周密度为孔隙总周长与场总周长的比值。本段土体中孔隙的面密度夯后较夯前在水平面上稍微有所降低,而垂直面上则有一定增加(见图7)。周密度较夯前有大幅度的增长(图8)。在夯后土样的微观照片的统计中,已不存在孔径大于50 μm 的孔隙;小于5 μm 的孔隙含量由夯前的10%左右增

至 20%以上; 50-20 μm 的孔隙含量在水平面上减少, 而在垂直面上有一定的增加, 表明水平方向的孔隙有所增加; 20-5 μm 之间的孔隙在垂直面上减少, 水平面上增加(见图 9~11)。

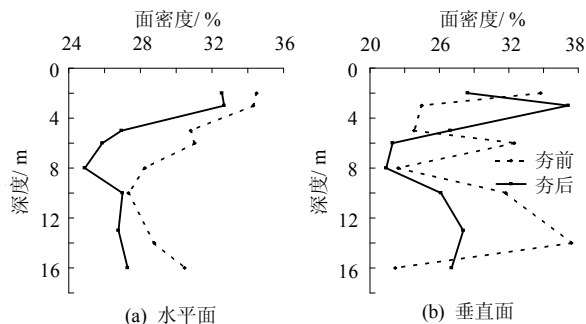


图 7 孔隙面密度变化曲线
Fig.7 Change of pore density / unit area

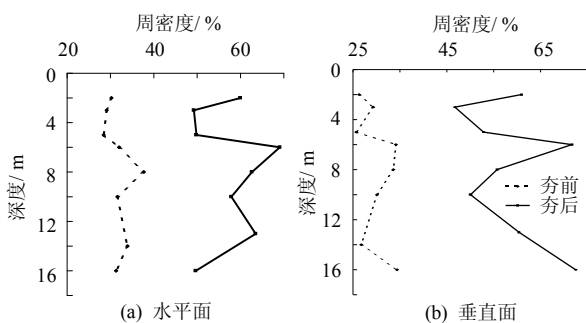


图 8 孔隙周密度变化曲线
Fig.8 Change of pore density / unit perimeter

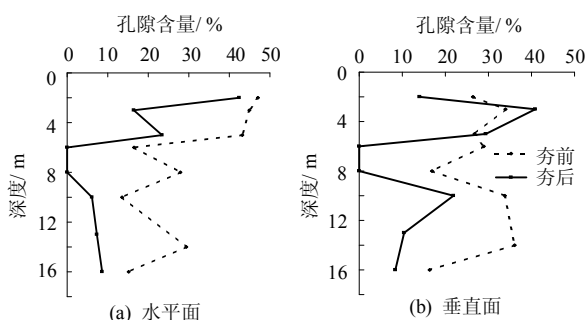


图 9 孔隙(孔径 50~20 μm)含量变化曲线
Fig.9 Change of pore contents ($d=50\sim20\mu\text{m}$)

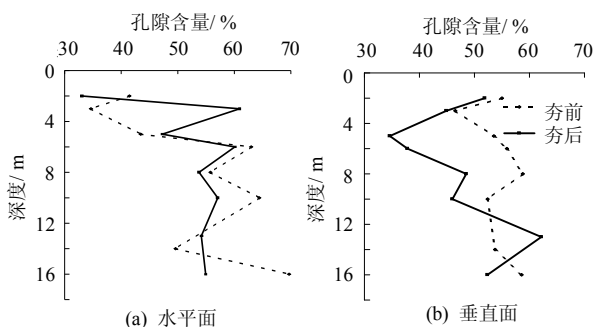


图 10 孔隙(孔径 20~5 μm)含量变化曲线
Fig.10 Change of pore contents ($d=20\sim5\mu\text{m}$)

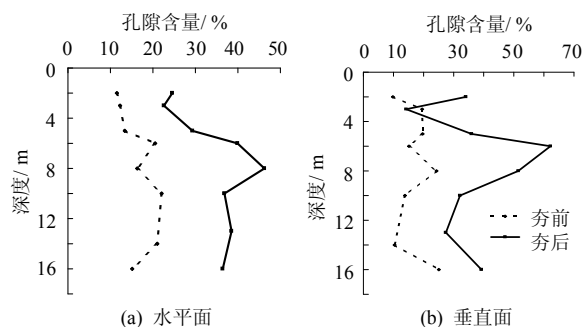


图 11 孔隙(孔径<5 μm)含量变化曲线
Fig.11 Change of pore contents ($d<5\mu\text{m}$)

第 2 段土体: 从深度 3~12m 左右为强夯加固段, 土体又可分为两部分。第一部分土体为从深度 3~8 m 左右, 是加固效果最佳段。通过对本段土样微观照片的孔隙统计结果, 深度 5 m 和 7 m 土样的微结的孔隙含量都为 0, 较夯前大幅度减少。深度 3~8 m 范围内, 孔径为 20~5 μm 的孔隙所占面积, 在垂直面上夯后比夯前降低幅度较大, 而水平面上也有一定程度的降低, 但降幅不大, 与此相反, 孔径 5~2 μm 和小于 2 μm 的孔隙所占的面积, 夯后比夯前都有较大的增长。这表明, 在巨大夯击波的作用下, 土体中较大孔隙的数量减小, 而孔径 5 μm 以下的孔隙明显增加, 这显然是夯击使得土颗粒重新排列成致密结构的缘故。第二部分在深度 8~12 m 之间, 强夯效果开始下降。这段土体中孔隙面密度夯后较夯前的减小幅度有所减小, 甚至在 10 m 时, 减幅为 0。但是不同孔径孔隙含量的变化仍比较明显。50~20 μm 孔径的孔隙含量在 8~12 m 内水平面和垂直面上的降低幅度都比较大; 而 20~5 μm 孔径的孔隙含量在 8~12 m 之间夯后小于夯前; 孔径小于 5 μm 的孔隙含量在水平面与垂直面上都是夯后大于夯前。这表明, 强夯对土中结构仍有一定的影响, 使微孔隙的数目增加。

第 3 段土体: 从深度 12 m 以下为强夯无扰动段。在微观的统计数据上变化也在减小。50~20 μm 孔径的孔隙含量在 12~14 m 内水平面和垂直面上降低, 20~5 μm 孔径的孔隙含量在 12~14 m 之间夯后要比夯前大。孔径小于 5 μm 的孔隙含量在水平面与垂直面上都是夯后大于夯前。

现选取夯后各段土体中比较具有代表性的土样, 列出它们的孔径分布直方图(见图 12), 可以清楚地看到不同孔径的孔隙在强夯不同阶段含量的变化情况。

通过对以上各段土体的分析, 可得出如下结论:

(1) 强夯使夯前土体中所存在的肉眼可观察到

的大孔隙基本消除,而架空孔隙也在巨大夯击波的作用下受到破坏,成为镶嵌孔隙,夯后土体的结构稳定性增强,湿陷性消除。

(2)土体经过强夯以后,土中孔隙的面密度减小,而周密度则大幅度地提高。这是由于强夯使土体中较大孔隙的含量减小,而微孔隙的含量大大增加的缘故。

(3)根据土中孔隙的统计结果,强夯使孔径小于 $5\mu\text{m}$ 的孔隙含量有较大的增加,而孔径大于 $20\mu\text{m}$ 的孔隙含量有明显的减少,孔径在 $20\sim 5\mu\text{m}$ 之间的孔隙,在强夯加固效果较好段,夯后的含量要小于夯前,在扰动松弛段,情况则相反。

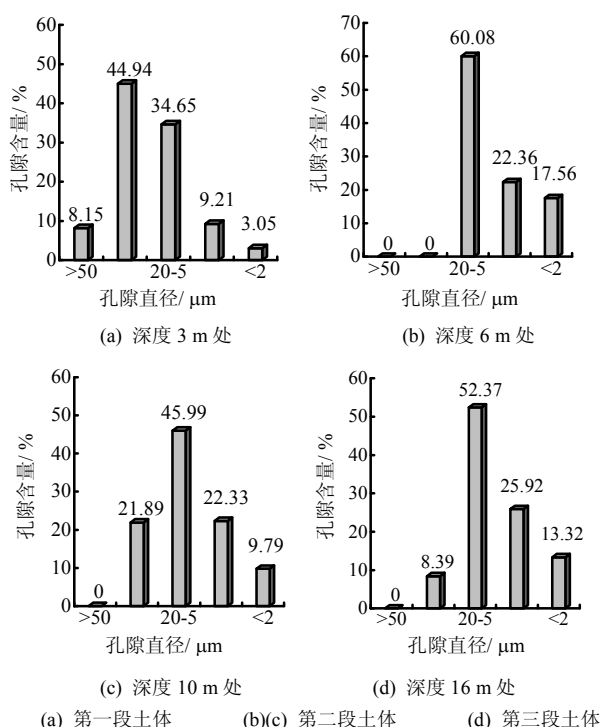


图 12 夯后土样孔径分布直方图

Fig.12 The histogram of the pore diameter of loess samples after dynamic compaction

5 结 论

(1) 山西王曲电厂地基处理试验场地经过强夯处理以后,深度 12m 以内土层的各项物理力学性质得到改善,地基土的渗透性减小,湿陷性基本消除。

(2) 强夯后地基土可沿深度分为三个不同的加固效果段。扰动松弛段、强夯加固段以及强夯无扰动段。通过对微观照片的分析,也证实了这一分段的合理性。

(3) 强夯使土体中所存在的肉眼可观察到的大孔隙基本消除,而架空孔隙也在巨大夯击波的作用下受到破坏,成为镶嵌孔隙,夯后土体的结构稳定性增强,消除了湿陷性。

(4) 强夯使土体中孔径大于 $20\mu\text{m}$ 的孔隙含量减少,小于 $5\mu\text{m}$ 的孔隙含量增加,土体的致密程度提高,湿陷性随之消失。

参 考 文 献

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3—13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23, (1): 3—13.
- [2] 范维垣, 史美筠, 裘以惠. 关于强夯法加固地基的几个问题[A]. 中国建筑学会地基基础学术委员会地基处理学术会议论文集[C]. 1980.
FAN Wei-yuan, SHI Mei-yun, Qiu Yi-hui. Some problems about ground reinforced with dynamic compaction[A]. The paper collection of the foundation treatment conference of ground and foundation academic committee. Architectural Society of China[C]. 1980.