

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0939-06

冲击压实路基黄土的微观特征研究

王生新^{1,2}, 韩文峰^{1,3}, 谌文武^{1,2}, 梁庆国¹

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;
3. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300381)

摘 要: 采用扫描电镜和压汞试验研究了天然黄土和冲击压实 8~40 遍路基黄土的微观结构和孔隙特征。结果表明: 天然黄土和冲击压实 8 遍的路基黄土, 其微结构以粒状架空结构为主; 冲击压实 16~40 遍, 土的微结构变成粒状镶嵌结构。冲击压实 16 遍前后, 土的孔隙直径分布在 0.006~164 μm 之间, 平均孔径从 0.767 9 μm 降低到 0.071 1 μm , 中等孔径从 5.264 μm 减少到 0.568 4 μm ; 但孔隙表面积从 0.624 m^2/g 增加到 7.517 m^2/g 。孔径分布在 10 μm 和 2 μm 处出现分界值, 16 遍前 $2 < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的孔隙占 67.53 %, 而 16 遍后 $d \leq 2 \mu\text{m}$ 的孔隙占 68.07 %。最佳的冲击压实遍数为 16 遍。冲击压实 16 遍后, 土微结构的改变和小孔隙的增多为冲击压实技术加固黄土路基的机理。

关 键 词: 路基黄土; 冲击压实; 扫描电镜; 压汞分析; 孔径分布

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Microstudy on roadbed loess improvement by impact compaction technology

WANG Sheng-xin^{1,2}, HAN Wen-feng^{1,3}, CHEN Wen-wu^{1,2}, LIANG Qing-guo¹

(1. School of Civil Engineering and mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. Department of Civil Engineering, Tianjin College of Urban Construction, Tianjin 300381, China)

Abstract: The microstructure and pore characteristics of natural loess and roadbed loess improved by impact compaction after 8-40 compactor passes were qualitatively and quantitatively studied on the basis of the test results from scanning electron microscope (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP). The results show that open structure is the main structure type of natural loess and roadbed loess after 8 compactor passes; and inter-particle inlaid structure is the main type of roadbed loess after 16-40 compactor passes; The pore size distribution is within the range of 0.006~164 μm before and after 16 compactor passes, the average pore diameter has been lowered from 0.767 9 μm to 0.071 1 μm ; the median pore diameter has been decreased from 5.264 μm to 0.5684 μm . The pore surface area has been increased from 0.624 m^2/g to 7.517 m^2/g ; there are two dividing pore diameters of 10 μm and 2 μm for all types of loess, and for the loess before 16 compactor passes, the pores with diameter between 2 to 10 μm cover 67.53 % of all the pores, while the pores with diameter less than 2 μm cover 68.07 % for loess after 16 compactor passes. Therefore the optimum compactor pass is 16 and the improvement mechanism of impact compaction is change in loess microstructure and increase of micropores.

Key words: roadbed loess; impact compaction; scanning electron microscope (SEM); mercury intrusion porosimetry (MIP); pore size distribution

1 前 言

冲击压实法是将常规的高频率、低振幅震动压实机改进为低频率、高振幅的冲击压实机, 增加了压实功能, 是一项加固公路路基的新技术, 具有施工速度快, 加固效果好的特点^[1]。

我国于 1995 年从南非引进冲击压实技术, 成功地应用于香港机场道路的建设^[2]; 后来在各地高速

公路建设中进行使用^[3-5], 但在湿陷性黄土地区应用较少^[6]。近年来, 许多专家和学者从干密度、压缩系数、弹性模量、加州承载比、黄土湿陷系数、弯沉值等宏观方面来分析评价冲击压实加固路基效果; 另外, 对于天然黄土的显微结构, 也有较多的研究成果^[7-17], 但对冲击压实后黄土显微结构未见进行过研究。显然, 冲击压实技术是一项物理加固方法, 有必要从土的微观结构方面来研究, 并对其

收稿日期: 2004-09-19

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (2001-318-000-18); 黄土路基压实技术。

作者简介: 王生新, 男, 1966 年生, 博士研究生, 高级工程师, 注册土木工程师, 主要从事地基处理方面的科研工作。E-mail: wangshxin02@st.lzu.edu.cn

加固机理进行探讨。本文结合作者在西北湿陷性黄土地区进行的冲击压实技术研究课题,选用扫描电镜 (SEM)、压汞试验 (MIP) 的方法,对加固前后不同压实遍数土体的显微结构变化特点、孔隙特征进行了研究。

2 现场试验和微观测试

2.1 现场试验

冲击压实试验区选在国道主干线连云港至霍尔果斯甘肃境内的 k115+180 m~k115+220 m 之间,

在我国湿陷性黄土工程地质分区中属于陇西黄土区。试验场地地貌为黄土梁斜坡后缘,公路横切而过;路基半填半挖,北半幅为填方区,南半幅为挖方区。试验区为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级Ⅳ级。路基土为 Q^2_4 新近堆积黄土,黄褐、棕褐色相杂、相间;土质不均匀,松散,具有大孔及虫孔;局部混有砂粒,大孔壁上有白色钙质粉末。在研究深度 1.80 m 范围内,挖方区为原状黄土,土质疏松,具湿陷性,挖方区冲击压实前路基土的物理力学性质见表 1。

表 1 挖方区冲击压实前路基土的物理力学性质指标
Table 1 Physico-mechanical properties before impact-compaction in excavation

深度 <i>H</i> /m	含水量 <i>W</i> /%	密度 ρ /g·cm ⁻³	干密度 ρ_d /g·cm ⁻³	饱和度 <i>S_r</i> /%	孔隙率 <i>n</i> /%	孔隙比 <i>e</i>	压缩系数 <i>a</i> ₁₋₂ /MPa ⁻¹	压缩模量 <i>E_s</i> /MPa	湿陷系数 δ_s
0.0~0.3	13.30	1.72	1.52	46.3	43.6	0.772	0.04	44.3	0.033
0.3~0.6	15.05	1.70	1.48	49.4	45.2	0.825	0.16	12.5	0.022
0.6~0.9	15.35	1.54	1.34	40.8	50.4	1.015	0.36	5.8	0.057
0.9~1.2	14.05	1.43	1.25	33.2	53.4	1.149	0.63	4.1	0.086
1.2~1.5	11.60	1.35	1.21	25.4	55.0	1.233	0.69	4.5	0.063
1.5~1.8	11.80	1.37	1.23	26.6	54.5	1.196	0.56	5.6	0.210

现场试验性施工时,要求 YCT25KJ 型冲击压实机可在 12 m 宽路基上掉头,加固宽度为 12.50 m,冲压机械运行时离路肩边缘不小于 50 cm,纵向轮迹交错重叠 20 cm,使冲压夯坑均匀,呈梅花形分布。完全覆盖路基表面需 8 圈,计为 1 遍。冲压前和冲压 8 遍、16 遍、24 遍、40 遍分别用 A、B、C、D、E 表示,冲压后不同遍数,未等路基土强度静置恢复,立即采取路基下 60 cm 试样,待室内自然风干后进行扫描电镜试验和压汞试验。

2.2 微观测试

细粒土的微结构定性、定量研究是评价土的工程性质的一个很重要方面,尤其微结构与土的宏观本构响应的定量化联系上^[18,19]。本次试验工作在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室完成。

冲压前和冲压 8 遍、16 遍、24 遍、40 遍后,分别在挖方区试验段 6 处不同的位置上,取路基下 60 cm 处黄土试样各 6 件,共 30 件送实验室进行扫描电镜试验,并对其中的 10 件土样同时进行压汞试验,试验操作按照实验室规定程序进行。试验压汞仪器采用 PORESIZER9320 型。

3 扫描电镜结果分析

3.1 冲压前、冲压 8 遍路基黄土的微结构特征

对路基黄土显微照片进行观察,并运用黄土微结构的相关理论进行分析,冲压前、冲压 8 遍扫描电镜的试验结果为:土的骨架颗粒以单粒为主,颗

粒形态为棱角状和次棱角状,棱角清晰;土的孔隙以架空孔隙为主,粒间孔隙次之;架空孔隙的形状不规则,呈圆形、方形等各种形状,其直径大于 10 μm;骨架颗粒表面胶结物主要是粘土矿物和碳酸钙;黏土矿物呈鳞片状、片状、多为条带状,碳酸钙分布于孔隙周围或形成包膜附在粗颗粒表面,这些物质只起胶结骨架作用;土中颗粒多呈点接触,接触面积小,颗粒间只有极少的盐晶和粘胶微粒附在接触点处,这种接触关系连接强度小,连接点的牢固程度差,在外力作用下或其他条件发生变化时,容易产生错动或断裂。

根据骨架颗粒形态、连接形式(接触关系)、排列方式的组合,按照有关黄土微结构的相关理论分类,挖方区冲压前 0 遍、冲压 8 遍路基黄土的微结构为粒状、架空、点接触结构,其扫描电镜典型图片如图 1,图 2 所示。

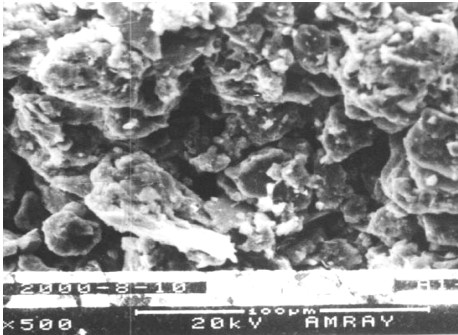


图 1 冲击压实前扫描电镜图片(×500)
Fig.1 SEM photograph before impact compaction (×500)

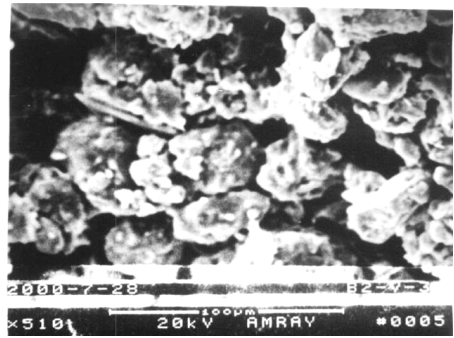


图 2 冲压 8 遍后扫描电镜图片 (×500)
Fig.2 SEM photograph after 8 compaction passes (×500)

3.2 冲压 16 遍、24 遍、40 遍路基黄土的微结构特征

与冲压前、冲压 8 遍路基黄土的微结构特征相比, 冲压 16~40 遍土微结构明显发生了变化, 具有如下的结构特征。骨架颗粒未发生变化, 仍以单粒为主。变化的主要是: 颗粒的连接形式以面接触为主; 与颗粒排列方式有关的孔隙以粒间孔隙为主, 架空孔隙次之; 粒间孔隙在平面上排列成交错状, 在空间上呈镶嵌排列, 这种孔隙较周边的颗粒粒径小, 比较稳定, 一般不会发生湿陷。

因此, 挖方区原状黄土冲压 16~40 遍后, 路基黄土的显微结构为粒状、镶嵌、面接触结构, 其扫描电镜典型图片如图 3、图 4 所示。

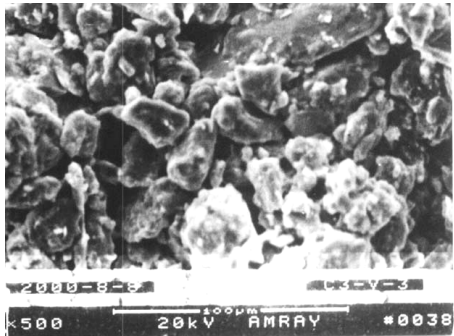


图 3 冲压 16 遍后扫描电镜图片 (×500)
Fig.3 SEM photograph after 16 compaction passes (×500)

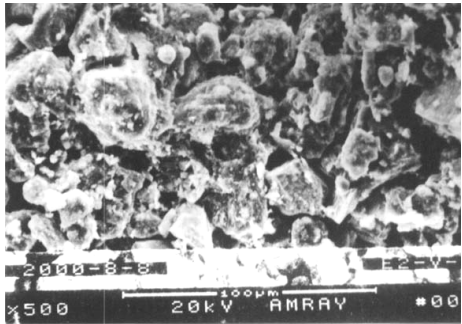


图 4 冲压 40 遍后扫描电镜图片 (×500)
Fig.4 SEM photograph after 40 compaction passes (×500)

4 压汞试验结果分析

4.1 冲压前后压汞试验特征

压汞试验资料分析整理后汇总于表 2, 对表列的各种孔隙结构特征值进行分析, 具有以下特点:

(1) 冲压 16 遍后, 孔隙表面积显著增加。不同遍数孔隙表面积的变化特征见图 5, 16~40 遍的孔隙表面积值远大于冲压前、8 遍的相应值, 前三者平均值为 $7.517 \text{ m}^2/\text{g}$ 是后两者平均值 $0.624 \text{ m}^2/\text{g}$ 的 12 倍; 16 遍时的孔隙表面积 $8.564 \text{ m}^2/\text{g}$ 是冲压前、8 遍平均值 $0.624 \text{ m}^2/\text{g}$ 的 13.7 倍。

(2) 孔径特点: 冲压前后孔径分布范围为 $0.006\sim164 \text{ }\mu\text{m}$, 冲压 16 遍后结构稳定的大孔隙依然存在, 但大孔隙略有减小, 小孔隙增加明显; 由图 5 可知, 冲压 16~40 遍后平均孔径、中等孔径明显低于冲压前、8 遍的相应值。平均孔径从冲压前、8 遍的平均值 $0.7679 \text{ }\mu\text{m}$ 降低到 16~40 遍的平均值 $0.0711 \text{ }\mu\text{m}$, 且比 16 遍时的 $0.0709 \text{ }\mu\text{m}$ 降低 10.83 倍; 中等孔径从冲压前、8 遍的平均值 $5.264 \text{ }\mu\text{m}$ 减少到 16~40 遍的平均值 $0.5684 \text{ }\mu\text{m}$, 比 16 遍的 $0.4805 \text{ }\mu\text{m}$ 降低 10.95 倍。

(3) 孔隙表面积的增大, 小孔隙的增多, 土的干密度必然增大。16 遍时的干密度为 $1.6840 \text{ g}/\text{m}^3$, 大于冲压前、8 遍的相应值。

(4) 冲压 16 遍时的孔隙表面积最大, 中等孔径和平均孔径远小于 16 遍前的相应值。考虑到工程经济因素, 最佳冲击压实遍数为 16 遍。

表 2 不同压实遍数土样孔结构特征值一览表

Table 2 Soil porous properties under different compaction passes

编号	孔隙体积 / $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	孔隙表面积 / $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	孔直径 分布/ μm	中等孔径 / μm	平均孔径 / μm	计算干密度 / $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
A1(0)	0.1286	0.668	0.0784-118	2.264 9	0.770 2	1.579 5
A2(0)	0.1183	0.475	0.006-129	2.815 9	0.996 6	1.639 9
冲压前	0.1235	0.572		2.540 4	0.883 4	1.609 7
B2(8)	0.1080	0.594	0.006-164	7.854 1	0.726 8	1.472 4
B3(8)	0.1096	0.758	0.006-112	8.121 0	0.578 0	1.440 2
8 遍	0.1088	0.676		7.987 6	0.652 4	1.456 3
C1(16)	0.1433	9.146	0.006-137	0.233 3	0.062 7	1.809 2
C2(16)	0.1578	7.982	0.006-100	0.7276	0.0791	1.558 7
16 遍	0.1506	8.564		0.4805	0.0709	1.684 0
D2(24)	0.0918	5.088	0.006-130	0.9454	0.0722	1.556 5
D3(24)	0.1405	10.369	0.006-118	0.1902	0.0542	1.718 3
24 遍	0.1162	7.729		0.5678	0.0632	1.637 4
E1(40)	0.1570	7.147	0.006-100	0.8062	0.0878	1.796 9
E3(40)	0.0950	5.369	0.006-100	0.5077	0.0708	1.627 7
40 遍	0.1260	6.258		0.6570	0.0793	1.712 3

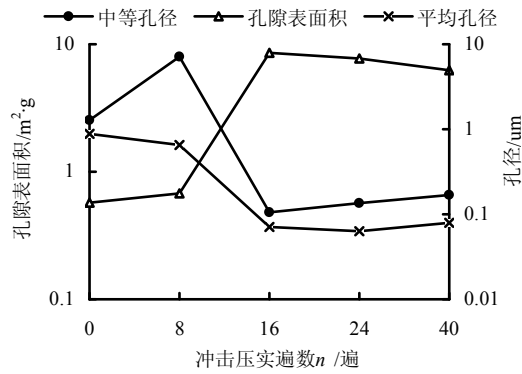


图5 孔隙表面积、孔径与冲击压实遍数关系图

Fig.5 Total pore area & pore diameter vs. compaction pass

4.2 冲压前后孔径分布与累计进汞量、进汞增量的关系

冲压前即0遍、冲压8遍路基土的孔径分布与累计进汞量、进汞增量间的关系,可在代表性土样A1和B3的压汞试验曲线图6、图7中反映。

冲压16遍、24遍、40遍后路基土的孔径分布与累计进汞量、进汞增量间的关系,可在代表性土样C1、D2和E3的压汞试验曲线图8、图9中反映。

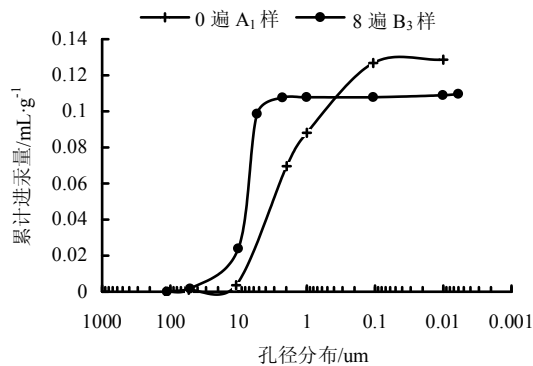


图6 土样A1和B3累计进汞量与孔隙直径关系图

Fig.6 Samples A1 and B3 cumulative intrusion vs. diameter

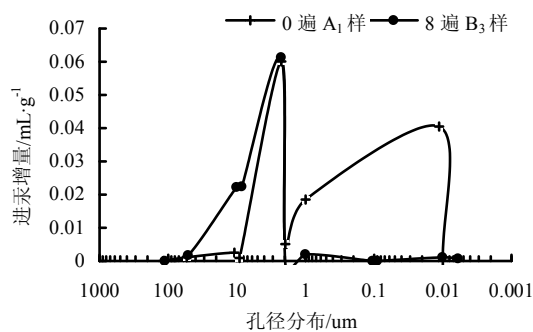


图7 土样A1和B3进汞增量与孔隙直径关系图

Fig.7 Sample A1 and B3 incremental intrusion vs. diameter

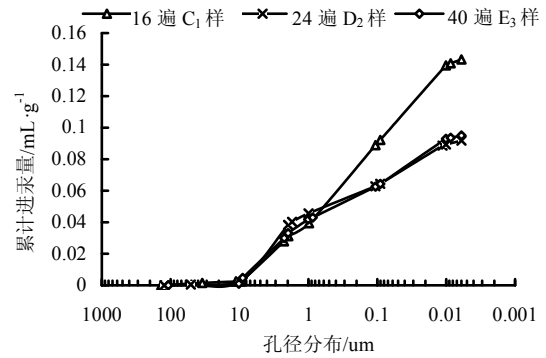


图8 土样C1、D2和E3累计进汞量与孔隙直径关系图

Fig.8 Samples C1, D2 & E3 cumulative intrusion vs. diameter

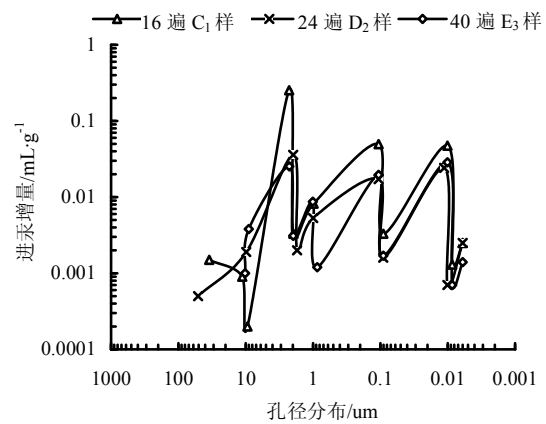


图9 土样C1、D2和E3进汞增量与孔隙直径关系图

Fig.9 Samples C1, D2 & E3 incremental intrusion vs. diameter

图6和图7中,孔径 $d=10\mu\text{m}$, $d=2\mu\text{m}$ 附近,曲线明显有一转折点;图8和图9中也有这样的特点,同时,在 $d\leq 2\mu\text{m}$ 区段,D2和E3进汞增量与孔隙直径曲线形状相似。这些特点说明在 $10\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 为孔隙直径分界值。对 $d\leq 2\mu\text{m}$, $2\leq d\leq 10\mu\text{m}$, $d\geq 10\mu\text{m}$ 孔径区间进汞量进行比较,其变化特征见表3和图10,冲压8遍时土样具湿陷性, $d\geq 10\mu\text{m}$ 和 $2\leq d\leq 10\mu\text{m}$ 的孔隙含量最多,分别达20.1%,77.3%, $d\leq 2\mu\text{m}$ 的孔隙含量最少,为2.6%。冲压16~40遍时土样无湿陷性, $d\geq 10\mu\text{m}$ 的孔隙在1.3%~2.85%间; $2\leq d\leq 10\mu\text{m}$ 的孔隙在26.9%~31.6%间, $d\leq 2\mu\text{m}$ 的孔隙在65.6%~71.1%间,且16遍时的相应值分别为最大值和最小值。

5 冲击压实技术加固机理探讨

冲击压实技术是一种物理加固方法,在冲压密实路基黄土时,土体中的化学成分、矿物成分及胶结物性质不会发生变化,而土的微结构会产生显著

的变化。随着冲击压实能量的不断增加，土颗粒移动、错位，这样多次重复，土的结构发生了渐变，冲压 16 遍后，土的微结构由原来的粒状架空结构为主转变为粒状镶嵌结构为主，由疏松变为紧密，使土颗粒处于密实的状态，与骨架颗粒的排列方式有关的孔隙也发生了变化， $2 \leq d \leq 10 \mu\text{m}$ 的孔隙显著减少， $d \leq 2 \mu\text{m}$ 的孔隙急剧增加，土颗粒接触面积增大。

表 3 不同冲击压实遍数孔径区间进汞体积百分含量表
Table 3 Intrusion volume percentages of diverse pore diameters under different compaction passes

孔径区间	$d \leq 2 \mu\text{m} / \%$	$2 < d \leq 10 \mu\text{m} / \%$	$d > 10 \mu\text{m} (\%)$
A1	46	51	3.0
A2	32.7	64.5	2.8
冲压前	39.4	57.8	2.9
B2	1.7	79.9	18.4
B3	3.5	74.7	21.8
8 遍	2.6	77.3	20.1
C1	78.2	20	1.8
C2	64	33.8	2.2
16 遍	71.1	26.9	2.0
D2	58.3	39.1	2.6
D3	72.8	24.1	3.1
24 遍	65.5	31.6	2.9
E1	69.9	28.5	1.6
E3	65.2	33.8	1.0
40 遍	67.5	31.2	1.3

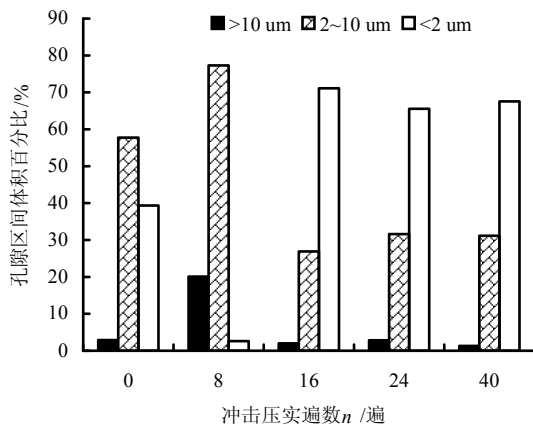


图 10 孔隙区间体积百分含量与冲击压实遍数关系图
Fig.10 Intrusion volume percentages of diverse pore diameters vs. different compaction passes

土的微结构由粒状架空结构变成粒状镶嵌结构，接触关系由点接触变成面接触，小孔隙的增加，使得路基黄土的工程力学性能得到提高和改善。

6 结 论

(1) 冲击压实前和 8 遍路基土结构以粒状架空

结构为主，16 遍后路基土结构以粒状镶嵌结构为主。

(2) 冲压前和冲压 8~40 遍，孔径分布范围为 $0.006 \sim 164 \mu\text{m}$ ；冲击压实 16 遍前后，平均孔径从 $0.7679 \mu\text{m}$ 降低到 $0.0711 \mu\text{m}$ ，中等孔径从 $5.264 \mu\text{m}$ 减少到 $0.5684 \mu\text{m}$ 。

(3) 冲压 16 遍后，孔隙表面积显著增加，从 16 遍前的 $0.624 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $7.517 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

(4) 扫描电镜和压汞试验分析结果相吻合，两方法说明最佳冲击压实遍数为 16 遍。

(5) 冲压 16 遍后，土的结构发生了变化，与骨架颗粒的排列方式有关的孔隙直径发生变化， $2 < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的孔径显著减少， $d \leq 2 \mu\text{m}$ 的孔径急剧增加，土颗粒接触面积增大，由点接触变成面接触状态。从而使得土体的工程力学性能得到提高和改善，微观上探讨了冲击压实技术加固黄土路基的机理。

参 考 文 献

- [1] 张洪, 孙斌煜, 朱维高. 滚动冲击压实技术及其机械设计研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(3): 256—260.
ZHANG Hong, SUN Bin-yu, ZHU Wei-gao. Research on the technology and machine design of rolling impact compaction[J]. **China Mechanical Engineering**, 1999, 10(3): 256—260.
- [2] 方其杭, 张展, 陆磊. 蓝派冲击式压实机技术特性及应用[J]. 交通科技与经济, 2002, 13(1): 13—14.
FANG Qi-hang, ZHANG Zhan, LU Lei. The performance and application of Aubrey berrange-percussive-compactor[J]. **Technology & Economy in Areas of communications(TEAC)**, 2002, 13(1): 13—14.
- [3] 杨人凤, 张永新, 赵新荣. 土的冲击压实试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 31—34.
YANG Ren-feng, ZHANG Yong-xin, ZHAO Xin-rong. Research on test of impact compaction about soil[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2003, 16(3): 31—34.
- [4] 杨世基. 冲击压实技术在路基工程中的应用[J]. 公路, 1999, (7): 1—4.
YANG Shi-ji. Application of impact compaction technology in roadbed engineering[J]. **Highway**, 1999, (7): 1—4.

- [5] 史保华, 司剑峰, 朱小力, 等. 冲击压实技术在机场工程软基处理中的应用研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 33—38.
SHI Bao-hua, SI Jian-feng, ZHU Xiao-li, et al. Application study of impact compaction technology in airport soft ground engineering[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2001, 14(3): 33—38.
- [6] 刘若琪, 华遵梦, 沈秋武. 黄土路基冲击碾压检测成果分析[A]. 罗宇生, 汪国烈主编. 湿陷性黄土研究与工程[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 237—244.
- [7] 高国瑞. 我国黄土湿陷性质的形成研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, (2): 1—8.
GAO Guo-rui. The formation of collapsibility of loess soils in China[J]. **Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute**, 1994, (2): 1—8.
- [8] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1—10.
GAO Guo-rui. A Structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(4): 1—10.
- [9] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980, (24): 945—948.
GAO Guo-rui. Microstructure of loess soils in China[J]. **China Science Bulletin**, 1980, (24): 945—948.
- [10] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, (12): 1 203—1 209.
GAO Guo-rui. Microstructure classification and collapsibility of loess soils[J]. **Science in China**, 1980, (12): 1 203—1 209.
- [11] 苗天德. 黄土湿陷变形机理的研究现状[A]. 罗宇生, 汪国烈主编. 湿陷性黄土研究与工程[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 73—82.
- [12] MIAO T D, NIU Y H, LIU Z Y. Unified catastrophic model for collapsible loess[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2002, 128(5): 595—598.
- [13] Rogers C D F, Dijkstra T A, Smalley I J. Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe[J]. **Engineering Geology**, 1994, 37: 83—113.
- [14] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学(B 辑), 1988, (7): 756—766.
YANG Yun-lai. Study of the mechanism of loess collapse[J]. **Science in China(Series B)**, 1988, (7): 756—766.
- [15] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B 辑), 1987, (12): 1 309—1 315.
LEI Xiang-yi. Pore types and collapsibility of loess soils in China[J]. **Science in China(Series B)**, 1987, (12): 1 309—1 315.
- [16] 李云峰. 黄土渗透性与空隙性关系的研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 10—31.
- [17] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99—103.
QI Ji-lin, XIE Ding-yi, SHI Yu-cheng. Status quo and method of quantitative study on soil structure[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2001, 23(1): 99—103.
- [18] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. Mathematical model of soil mass structure—core problems of soil mechanics in 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [19] 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): 1—13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.