

文章编号:1673-2049(2018)01-0026-07

## 黄泛区软弱夹层结构地基强夯现场试验

宋修广<sup>1,2</sup>, 孙润生<sup>1,2</sup>, 董行<sup>1,2</sup>, 刘西利<sup>3</sup>, 王珂<sup>1,2</sup>, 薄敏<sup>4</sup>, 桑雪瑞<sup>5</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东省昌乐县公路局, 山东 昌乐 262400; 4. 东营市远创现代置业有限公司, 山东 东营 257200; 5. 山东省公路建设(集团)有限公司, 山东 济南 250102)

**摘要:**为探究黄泛区软弱夹层地层条件下强夯加固效果,采用4种不同的夯击能在鲁西黄泛平原区进行现场试验,研究了强夯过程中软弱夹层的夯沉量、超孔隙水压力以及强夯前后地基承载力、土质力学性质变化规律。结果表明:超孔隙水压力消散速率非常快,24 h后超孔隙水压力消散90%;强夯加固效果显著,地基承载力最大可提高80%;选择单夯1 800 kN·m夯击能加固经济合理,夯后土体物理性质明显提高;对于黄泛区含有软弱夹层地层结构,可用超孔隙水压力为自重应力10%估算强夯有效加固深度,有效加固深度约为7 m;对比不同夯击能下Menard加固深度公式,在一般夯击能条件下,实际加固深度与Menard加固深度较为接近,在较大夯击能下,Menard公式并不适用;所得结论对该区域地基加固有一定的指导作用。

**关键词:**强夯;软弱夹层;超孔隙水压力;现场试验;有效加固深度

**中图分类号:**TU435 **文献标志码:**A

## Field Test of Foundation Dynamic Compaction About Soft Interlayer Structure in Yellow River Flood Area

SONG Xiu-guang<sup>1,2</sup>, SUN Run-sheng<sup>1,2</sup>, DONG Hang<sup>1,2</sup>, LIU Xi-li<sup>3</sup>,  
WANG Ke<sup>1,2</sup>, BO Min<sup>4</sup>, SANG Xue-rui<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Changle Highway Bureau of Shandong Province, Changle 262400, Shandong, China; 4. Dongying Far Modern Property Limited, Dongying 257200, Shandong, China; 5. Shandong Highway Group, Jinan 250102, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study on the effect of dynamic compaction about soft interlayer in Yellow River flood plain area in western Shandong, with 4 tamping energy, the change laws of settlement, the excess pore water pressure, the bearing capacity of foundation and the mechanical properties of soil were studied. The results show that the dissipation rate of excess pore water pressure is very fast, and the excess pore water pressure is nearly dissipated by 90% after 24 h, the effect of dynamic consolidation is remarkable, and the bearing capacity of foundation can be increased by 80%, it is more reasonable to select 1 800 kN·m compacting energy, because the physical properties of the soil are obviously improved after compaction. For the Yellow River flood area containing weak intercalated structure, the excess pore pressure can be used as the

收稿日期:2017-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51208284)

作者简介:宋修广(1966-),男,山东威海人,教授,工学博士,博士后,E-mail:songxiuguang@sdu.edu.cn。



10% of self weight stress critical value to estimate the effective consolidation depth and the effective reinforcement depth is about 7 m. Comparing with the Menard formula, under the less compact energy, the actual depth of reinforcement is closer to that; under the larger tamping energy, Menard formula can not be applied. The results of this study can apply some guidance for the foundation reinforcement in this area.

**Key words:** dynamic compaction; soft interlayer; field test; effective reinforcement depth

# 0 引 言

强夯法又称动力固结法,最早是由法国工程师 Menard 提出,因具有施工简单、速度快、费用低、加固效果显著等优点,已被大量应用到碎石土、粉土、黏土、湿陷性黄土等不良地基处置中<sup>[1-5]</sup>。黄河冲积平原岩性一般以粉细砂土、粉土和黏土为主,但在某些地区含有由洪积、淤积所形成的软弱夹层结构。由于强夯加固黄泛区时存在超孔隙水压力消散较慢、土体液化、软弱夹层结构吸能等问题,所以近年来国内外学者开展了有关强夯处置粉质黏土工作机制研究<sup>[6-9]</sup>,本课题组采用现场试验结合有限元分析手段对强夯加固黄泛区粉质黏土施工工艺开展研究<sup>[10-12]</sup>,目前孔压消散较慢、土体液化问题基本解决,但有关黄泛区含软弱夹层结构强夯施工现场试验研究一直未见报道,合理经济的施工参数也未能

提出。为更真实掌握该类地质条件下强夯作用效应,本文结合山东省某在建高速公路,通过分析强夯过程中夯沉量、超孔隙水压力、强夯前后标贯击数及土体物理力学参数变化规律,系统研究强夯处置该类地基有效加固深度及处置效果,确定了适合该地区的强夯施工参数。所得结论可以指导该地区强夯施工,优化工艺参数,并为类似工程提供参考。

# 1 试验场地基本概况

强夯试验段位于鲁西黄泛平原区,岩性以粉质黏土、黏土为主,局部含有淤泥夹层,地下水位约为 2.95 m。依据地勘资料,其土层划分及物理力学指标如表 1 所示。根据物理力学指标分析,本试验区第②层土质呈软塑状态,含部分有机质,天然含水率接近液限,孔隙比接近 1,100~200 kPa 下压缩模量仅为 3.01 MPa,为低液限有机质高压缩性黏土。

表 1 试验场区土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and Mechanical Indexes of Soil in Test Area

土层名称	层厚/m	天然含水率 $w/\%$	干密度 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$
①粉质黏土	0.3~6.2	25.4	1.55	0.747	92	35.33	21.00	14.33	0.31	6.18
②黏土	6.2~7.5	37.2	1.46	0.964	99	39.00	21.30	17.70	0.89	3.01
③粉质黏土	7.5~9.2	24.6	1.62	0.672	99	34.00	20.00	14.00	0.33	5.39
④黏土	9.2~11.0	31.2	1.50	0.810	99	37.60	19.20	18.40	0.66	5.05
⑤粉质黏土	11.0~15.0	21.5	1.65	0.640	89	31.50	19.35	11.65	0.12	7.78

# 2 试验方案

## 2.1 强夯试验参数确定

Menard 公式为最常用的估算加固深度公式,根据 Menard 公式,强夯有效加固深度  $H$  为

$$H=\alpha \sqrt{\frac{Wh}{10}} \tag{1}$$

式中: $W$  为锤的自重; $h$  为落距; $\alpha$  为修正系数。

根据王琨等<sup>[13]</sup>的研究,结合当地工程经验, $\alpha$  取值为 0.55。试验选择 1 500,1 800,2 200,2 500 kN·m 四种夯击能,计算得到有效加固深度预估值,如表 2 所示。

试验区由 4 个 18 m×42 m 长方形区域组成,

表 2 不同夯击能下有效加固深度预估值

Tab. 2 Prediction Values of Effective Reinforced Depth Under Different Tamping Energies

夯击能 $E/(\text{kN} \cdot \text{m})$	有效加固深度/m
1 500	6.73
1 800	7.40
2 200	8.15
2 500	8.70

分别对应 4 种夯击能。夯点间距为 6 m,按正方形布置;采用 2 遍点夯与 1 遍满夯相结合方式,满夯夯击能为 800 kN·m,夯点布置如图 1 所示。

## 2.2 强夯监测方案确定

为监测强夯过程中超孔隙水压力变化,在每个







### 3.2 超孔隙水压力沿深度方向分布规律

如图 5 所示,不同夯击能下超孔隙水压力沿深度方向分布规律如下:强夯作用引起的表层孔隙水压力远大于深层,且不同夯击能下超孔隙水压力沿深度分布规律基本一致;3~7 m 范围内超孔隙水压力迅速衰减,7 m 位置处超孔隙水压力已衰减至最大值的 50%以上,当超过 7 m 位置后,随着深度增加,超孔隙水压力衰减速率减慢,9 m 位置处超孔隙水压力衰减到 0~2 kPa。由此可见:强夯具有 2 次衰减的特性,曲线在 7 m 位置处存在拐点,以孔隙水压力沿竖向传播曲线的拐点为界将强夯加固地基划分为强扰动区和弱扰动区。

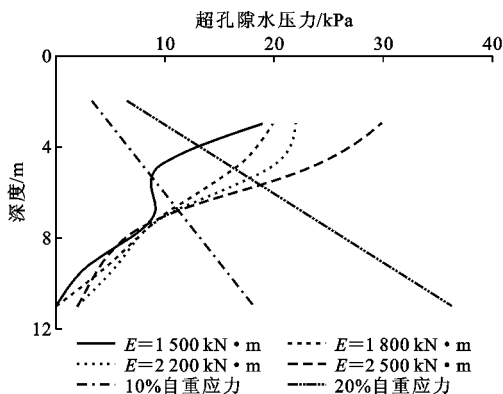


图 5 超孔隙水压力沿深度变化规律

Fig. 5 Excess Pore Water Pressure Varying with Depth

本课题组通过大量实践研究认为,可用附加应力与自重应力的比值  $\sigma_z/\sigma_s=0.1$  (或 0.2) 作为有效加固深度判别标准,即取超孔隙水压力为 10% 或 20% 自重应力时的深度作为有效加固深度临界值。在本次试验中强夯产生的附加应力全部转化成超孔隙水压力。由于试验场地以粉质黏土、黏土为主,根据文献[14]选用  $\sigma_z/\sigma_s=0.1$  更加合理。由图 5 可知:夯击能 1 500, 1 800, 2 200, 2 500 kN·m 的有效加固深度分别为 5.3, 6.7, 6.8, 6.8 m。

### 3.3 超孔隙水压力消散规律

超孔隙水压力消散速率如图 6 所示。由图 6 可知,1 遍夯击结束后,超孔隙水压力开始消散,消散速率随时间增加而递减,夯后 2 h, 1 800 kN·m 夯击能时超孔隙水压力消散至最大孔压的 50%, 而 1 500 kN·m 夯击能时仅消散至最大孔压的 35%, 此外,在 6~7 m 位置处,1 800 kN·m 夯击能作用下引起的超孔隙水压力略小于 1 500 kN·m, 其原因为超孔隙水压力均在强夯后测得,在高夯击能作用下软弱夹层被巨大的冲击能量震扰,土体破碎重组,加速了软基内水的排出,而 1 500 kN·m 夯击

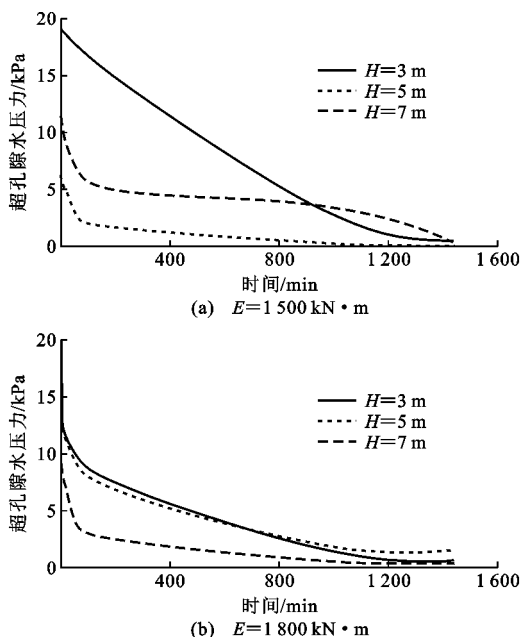


图 6 超孔隙水压力消散速率

Fig. 6 Dissipation Rates of Excess Pore Water Pressures

能下未能有效地影响到软基,超孔隙水也未能及时排出,因而夯后一定时间内超孔隙水压力较大。

不同夯击能下 3 m 位置处超孔隙水压力消散速率如图 7 所示。由图 7 可知:由于浅层位置处 4 种夯击能下超孔隙水压力最大,可依据 3 m 处孔压消散到最大孔压的 20% 为依据来判断不同夯击能下超孔隙水压力消散速率,分析可得 4 种夯击能消散速率从小到大依次为 1 500, 2 200, 2 500, 1 800 kN·m;根据类似工程经验,当超孔隙水压力消散到最大超孔隙水压力的 20% 时,可进行第 2 遍点夯,可见对于此地基 4 种夯击能下强夯间歇期为 24 h。

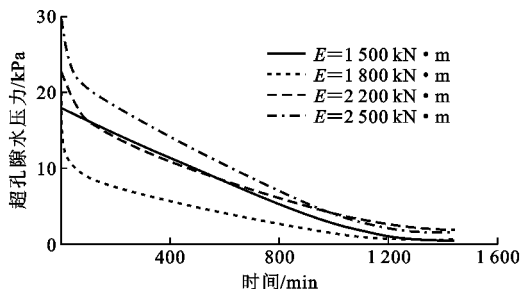


图 7 不同夯击能下 3 m 位置处超孔隙水压力消散速率

Fig. 7 Dissipation Rates of Pore Water Pressures at 3 m Position Under Different Compacting Energies

## 4 强夯加固效果评价

### 4.1 强夯加固后的地基承载力

强夯结束 28 d 后,在强夯区夯点位置处进行荷载试验,选择 0.25 m<sup>2</sup> 圆形承载板,采用千斤顶分级



加载方式,每级为 15 kN;进行试验之前先预压 2 级,待读数稳定之后,卸载至 0 kN 并开始逐级加载,相邻 2 级加载时间间隔及终止加载条件可参考规范<sup>[15]</sup>,各试验区的荷载-位移( $p$ - $s$ )曲线见图 8。

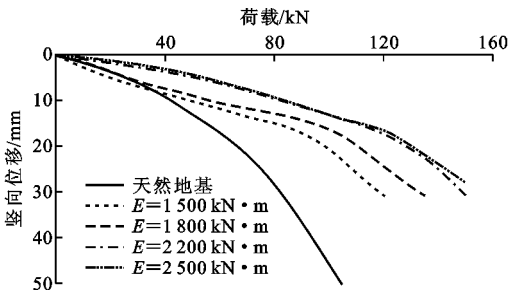


图 8 荷载-位移曲线  
Fig. 8 Load-displacement Curves

由图 8 可知, $p$ - $s$  曲线出现明显转折点,取转折点处对应的荷载为极限荷载。现将各试验区对应的承载力特征值统计在表 3 中。

表 3 承载力特征值

Tab. 3 Characteristic Values of Bearing Capacity		
试验工况	承载力 $f_{ak}$ /kPa	承载力提高幅度/%
天然地基	150	0
$E=1\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$	180	20
$E=1\,800\text{ kN}\cdot\text{m}$	240	60
$E=2\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$	270	80
$E=2\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$	270	80

由表 3 可知:经强夯处置后,地基承载力比夯前提高 20% 以上,夯后地基均能满足填筑路基承载力要求; $E=1\,800,2\,200,2\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$  的地基承载力

表 4 强夯前后压缩模量对比

Tab. 4 Comparison of Compression Modulus Before and After Dynamic Compaction									
深度/m	天然地基 模量/MPa	$E=1\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$		$E=1\,800\text{ kN}\cdot\text{m}$		$E=2\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$		$E=2\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$	
		夯后模量/MPa	增幅/%	夯后模量/MPa	增幅/%	夯后模量/MPa	增幅/%	夯后模量/MPa	增幅/%
1.5	5.81	5.75	-1.03	7.41	27.54	7.40	27.37	8.81	51.64
3.0	4.21	4.65	10.45	5.66	34.40	6.10	44.89	7.07	67.93
4.5	5.28	12.53	42.61	12.41	135.04	12.61	138.83	12.26	132.20
6.0	5.02	6.07	24.13	7.09	41.20	8.03	59.96	8.25	64.34
7.5	4.89	5.09	4.08	6.10	24.74	6.17	26.17	6.11	24.95
9.0	5.31	5.90	1.69	5.58	5.08	5.60	5.46	5.60	5.46

性变为中-低压缩性,在 0~6 m 处,土体压缩模量介于 5.08~13.35 MPa 之间,该范围深度处各夯击能下压缩模量均有所增大,其中 4.5 m 位置处增长幅度最大,可达 135%;在 7.5 m 处,压缩模量介于 6.11~6.87 MPa 之间,增长幅度有所降低,在 9 m 处土体的压缩模量基本没有提高;强夯后检测深度范围内土体干密度在  $1.4\sim1.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间,相比压缩模量,干密度涨幅较小,在浅层位置处涨幅仅

分别提高 60%,80%,80%,其承载能力并没有随单夯夯击能的增加而无限增大。基于地基承载力分析,在相同夯击次数下,单夯夯击能为  $1\,800\text{ kN}\cdot\text{m}$  时更加经济合理。

4.2 强夯前后地基标贯击数变化

强夯处置 28 d 后,在各试验区夯点下进行标贯试验,强夯前后标贯击数变化见图 9。

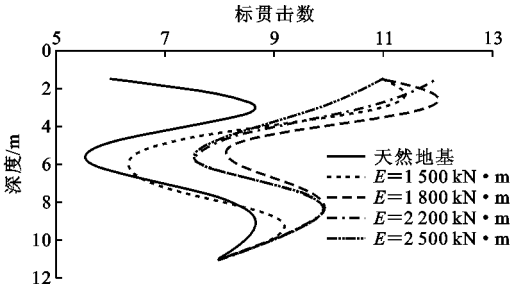


图 9 各夯点下强夯前后土体标贯击数  
Fig. 9 SPT Counts of Soil at Different Compacting Points Before and After Dynamic Compaction

由图 9 可知:各夯点在 0~6 m 深度处,夯前 6~10 击,夯后 7~12 击,标贯击数比夯前提高 16.7%~20%,增加明显;各试验区在 7.5 m 以下标贯击数增幅不明显,可见 4 种不同夯击能下有效加固深度均未超过 7.5 m。

4.3 强夯土质力学指标变化

强夯处置 28 d 后,在各试验区不同深度处采集原状土样,运至室内进行土工试验,得到土体主要物理力学指标,见表 4、5。

由表 4、5 可知:强夯处置后,土体由中-高压缩

为 3%~6.29%,分析其原因是土体密度受结合水膜影响较大且强夯在冬季施工,浅层位置处结合水膜较薄,受到夯击作用后,颗粒间难以发生错动;其余位置处于密度变化规律与压缩模量类似。综合上述可知:强夯能够有效地加固一定范围内土体;单纯从强夯前后土体力学性质变化判断,1 800,2 200,2 500  $\text{kN}\cdot\text{m}$  夯击能作用下加固深度为 7.5 m,而 1 500  $\text{kN}\cdot\text{m}$  夯击能作用下加固深度为 6 m。



表 5 强夯前后干密度对比

Tab. 5 Comparison of Dry Density Before and After Dynamic Compaction

深度/m	天然地基 干密度/ (g·m <sup>-3</sup> )	E=1 500 kN·m		E=1 800 kN·m		E=2 200 kN·m		E=2 500 kN·m	
		夯后干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	增幅/%	夯后干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	增幅/%	夯后干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	增幅/%	夯后干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	增幅/%
1.5	1.42	1.42	0.00	1.48	4.23	1.54	8.45	1.67	17.61
3.0	1.43	1.45	1.39	1.47	2.80	1.49	4.20	1.52	6.29
4.5	1.25	1.46	16.80	1.55	24.00	1.56	24.80	1.57	25.60
6.0	1.28	1.34	4.69	1.38	7.81	1.34	4.69	1.40	9.37
7.5	1.34	1.40	4.47	1.51	12.69	1.50	11.94	1.45	8.21
9.0	1.53	1.53	0.00	1.56	1.96	1.50	-1.96	1.54	0.65

5 强夯有效加固深度及工艺参数确定

强夯有效加固深度是指在正常施工条件下,地基加固到满足设计要求的深度。目前判断标准并不统一<sup>[16-18]</sup>,主要从 2 个方面判断:地基土工程性质指标能有明显改善的深度;地基土竖向变形。本文综合超孔隙水压力、夯前、夯后标贯及土体物理力学性质变化分析该地区各夯击能有效加固深度,结果列于表 6 中。

表 6 强夯有效加固深度

夯击能/ (kN·m)	10%自重应力法 加固深度/m	土质参数变化法 加固深度/m	Menard 加固 深度/m
1 500	5.3	6.0	6.73
1 800	6.7	7.5	7.40
2 200	6.8	7.5	8.15
2 500	6.8	7.5	8.70

由表 6 可知:10%自重应力法与土质参数变化法判断有效加固深度较为接近,今后类似工程也可采用 10%自重应力法作为判断标准;有效加固深度并没有随夯击能增加而增大,对比不同夯击能下 Menard 加固深度公式可见,在一般夯击能条件下,实际加固深度与 Menard 加固深度较为接近,在较大夯击能下,Menard 公式并不适用,分析原因是由于 6.2~7.5 m 范围内存在软弱夹层,具有显著吸收能量的效果,单纯靠增大单击夯击能并不能增加有效加固深度。综合试验结果,1 800 kN·m 单夯夯击能更加经济合理,其施工工艺参数见表 7。

6 结 语

(1)采用强夯法处置黄泛区含软弱夹层结构地基其承载力最大可提高 80%,经 1 800,2 200,2 500 kN·m 夯击能处置后,软弱夹层压缩模量最大可提高 30%,表明强夯加固此类地基效果显著。

表 7 强夯施工工艺参数

Tab. 7 Dynamic Compaction Construction Parameters

夯击能/ (kN·m)	夯点间距/m	最佳夯击 次数	停夯标准/ mm	有效加固 深度/m
1 800	6	8	70	7

(2)综合夯沉量分析,该地基采用强夯加固时总夯击能不宜超过 14 400 kN·m,考虑强夯有效加固深度,在相同击数条件下,1 800 kN·m 为最优单夯夯击能,其对应施工参数可参考本文表 7。

(3)单点夯击结束后,超孔隙水压力立即进入消散过程,2 h 后超孔隙水压力消散 35%左右,24 h 后超孔隙水压力消散 90%左右,该类地基条件下强夯间歇期为 24 h。

(4)对于黄泛区含有软弱夹层地层结构,可用超孔隙水压力为自重应力 10%临界值估计强夯有效加固深度;在一般夯击能条件下,实际加固深度与 Menard 加固深度较为接近,在较大夯击能下 Menard 公式并不适用。

参考文献:

References:

[1] 年廷凯,李鸿江,杨 庆,等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009,31(1):139-144.  
NIAN Ting-kai, LI Hong-jiang, YANG Qing, et al. Improvement Effect of High Energy Dynamic Compaction Under Complicated Geological Conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (1):139-144.

[2] 董 倩,况龙川,孔凡林. 碎石土地基强夯加固效果评价与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 1): 330-334.  
DONG Qian, KUANG Long-chuan, KONG Fan-lin. Reinforcement Assessment and Engineering Practice of Dynamic Compaction for Crushed Rock Soil Fill Foundation in Mountainous Areas[J]. Chinese Journal



- of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 330-334.
- [3] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903-2909.
- HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Experimental Research on Dynamic Compaction Parameters of Collapsible Loess Foundation in Lishi Region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [4] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
- ZHENG Ying-ren, LU Xin, LI Xue-zhi, et al. Research on Theory and Technology of Improving Soft Clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 18-22.
- [5] 贺伟, 韩晓雷, 薛玉, 等. 高能级强夯在湿陷性黄土地区的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 121-126.
- HE Wei, HAN Xiao-lei, XUE Yu, et al. Application of High Energy Level Dynamic Compaction in Collapsible Loess Region[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 121-126.
- [6] 周健, 史旦达, 贾敏才, 等. 低能量强夯法加固粉质黏土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2359-2364.
- ZHOU Jian, SHI Dan-da, JIA Min-cai, et al. In-situ Test Study on Low-energy Dynamic Consolidation Method to Improve a Silty Clay Ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2359-2364.
- [7] 李晓静, 李术才, 姚凯, 等. 黄泛区路基强夯时超孔隙水压力变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2815-2820.
- LI Xiao-jing, LI Shu-cai, YAO Kai, et al. Test Study of Changing Rules of Excess Pore Water Pressure During Dynamic Consolidation at Subgrade of Express-way in Yellow River Flood Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2815-2820.
- [8] PAN X H, YAO Z Y, ZHANG K, et al. Highway Subgrade Dynamic Response Model Test Study on Foundation-broaden Dynamic Compaction Consolidation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353-356: 842-846.
- [9] MA Z Y, LIAO H J, NING C M, et al. Numerical Study of the Dynamic Compaction via DEM[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015, 1(3): 17-22.
- [10] 厉超. 粉土地基强夯动力特性及有效加固范围研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- LI Chao. Study on Dynamic Compaction Characteristics and the Effective Reinforcement Scope of Silt Foundation[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [11] 宋修广, 周志东, 张崇高, 等. 强夯联合井点降水加固粉土地基现场试验[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 51-56, 134.
- SONG Xiu-guang, ZHOU Zhi-dong, ZHANG Chong-gao, et al. Field Test on Silt Foundation Treatment with Dynamic Consolidation Method Combining with Well-point Dewatering[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 51-56, 134.
- [12] 宋修广, 周志东, 杨阳, 等. 强夯法加固无黏性土路基的现场试验与数值分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(3): 1-6, 37.
- SONG Xiu-guang, ZHOU Zhi-dong, YANG Yang, et al. Field Test and Numerical Analysis of Dynamic Compaction on Cohesionless Soil Subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(3): 1-6, 37.
- [13] 王琨, 张兆峰. 强夯法地基加固深度的估算分析[J]. 山东交通学院学报, 2005, 13(2): 23-26.
- WANG Kun, ZHANG Zhao-feng. Analyzing the Estimation of the Depth Reinforced with Heavy — Tamping Method[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2005, 13(2): 23-26.
- [14] 卢延浩. 土力学[M]. 2版. 南京: 河海大学出版社, 2002.
- LU Yan-hao. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Nanjing: Hohai University Press, 2002.
- [15] SL 237—1999, 土工试验规程[S].
- SL 237—1999, Specification of Soil Test[S].
- [16] 孔位学, 陆新, 郑颖人. 强夯有效加固深度的模糊预估[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 807-809.
- KONG Wei-xue, LU Xin, ZHENG Ying-ren. Fuzzy Predetermination of Effective Reinforcement Depth of Dynamic Consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 807-809.
- [17] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 1-17.
- QIAN Jia-huan, QIAN Xue-de, ZHAO Wei-bing, et al. Theory and Practice of Dynamic Consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 1-17.
- [18] 乔兰, 丁余慧, 于德水. 强夯法处理路基的加固效果[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 659-661.
- QIAO Lan, DING Yu-hui, YU De-shui. Investigation of Dynamic Consolidation Effect on Collapse Loess Roadbed[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(6): 659-661.