

强夯法加固湿陷性黄土后承载力的研究

李大忠

(中国建筑科学研究院地基所, 北京 100013)

【摘要】 通过现场试验, 研究强夯法处理湿陷性黄土后的承载力与夯击能之间的对应关系, 为工程技术人员在采用强夯法处理湿陷性黄土时提供参考。

【关键词】 强夯法; 湿陷性黄土; 承载力

【中图分类号】 TU 472

【Abstract】 The relation between the bearing capacity and compacting energy is given after the collapsible loess is treated using dynamic compaction. It can be used as a reference in engineering practices.

【Key words】 dynamic compaction ; collapsible loess ; bearing capacity

0 引言

强夯法处理湿陷性黄土, 不仅能够消除黄土的湿陷性, 还能提高地基承载力, 是一种既经济实惠又便于施工的地基处理方法。

作为评价处理效果的地基承载力和有效加固深度这两个指标都是设计人员关心的问题, 通常根据上部结构要求提出强夯处理地基后的承载力提高幅度和有效加固深度指标。强夯处理湿陷性黄土的有效加固深度在《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-91) 中有专门章节介绍; 对于另外一个反映强夯法处理效果的指标——承载力, 目前研究资料很少。

1 强夯处理深度范围内土体的分层

影响强夯法处理湿陷性黄土后的承载力因素: 一是土质情况, 密实度、内聚力、渗透性和含水量等; 二是夯击能情况, 包括锤重、落距、锤底面积等。

强夯法的施工工艺是用能级较高的单击夯击的能在夯点处强夯, 次数由试验确定; 再用能级较低的单击夯击能进行满夯, 锤印搭

接, 夯击次数为 2~3 击。夯点处高能级多次强夯的目的是使得夯点下的土体竖向变形挤压加固, 同时夯间土通过夯点下土体的横向变形挤压得到加固; 场地平整后进行满夯, 满夯的目的是将回填到夯坑中的土体和夯间土尚未通过夯点下土体的侧向变形挤压得到加固的表层土体压实。通常情况下, 夯点土和夯间土处理效果在处理深度和承载力提高幅度上都不相同, 夯点土比夯间土处理效果(在处理深度和承载力提高幅度上)要明显; 强夯的加固效果自夯沉面向下随加固深度减弱。强夯法决定了自夯后面向下处理深度范围内土体可分为三层:

1) 满夯加固层

自夯后平整面向下至原夯点夯坑面, 加固效果主要由满夯能级和次数决定。此层土体完全失去原有结构, 颗粒重新排列, 压缩性、渗透性和孔隙比减小, 承载力大幅度提高。

2) 强加密层

自夯点夯坑面向下一定深度, 加固效果主要由夯能级、次数和夯点间距决定。此层

土体也完全失去原有结构,颗粒重新排列变得极为密实,压缩性、渗透性和孔隙比大幅度减小,承载力大幅度提高。

3)影响层

位于强加密层以下,土体密实程度不如上述两层,承载力提高幅度小。

大量强夯工程实践表明,若满夯效果好,满夯加固层土体与强加密层土体密实程度接近,可共同作为基础的持力层;满夯效果不理想,会出现满夯加固层的土体密实程度低于其下面的土体,需将满夯加固层的松土部分清除后作为基础的持力层。

2 强夯处理湿陷性黄土后地基承载力与夯击能间的关系

理想的强夯效果是处理后形成均匀的地基土,通过设置合理的夯点间距,使得夯间土与夯点土的挤密质量一致,通过满夯将满夯加固层土体达到强加密层土体同样密实,此时可认为在到理想强夯效果。

2.1 试验情况

洛阳某强夯工程,强夯面积达 15 万 m^2 ,在施工过程中选择多段试夯场地试夯,配合本课题进行了一些试验工作。试验情况如下。

2.1.1 地质概况

①黄土状粉质粘土及粉质粘土:褐黄色,可塑状态为主,厚约 4.5 m。

②黄土状粉质粘土:棕褐色,稍湿—湿,结构强度高,厚约 2.5~3.5 m。

③黄土状粉土及粉质粘土:黄褐色,湿,稍密—中密,厚约 3.0 m。

④黄土状粉质粘土:棕黄色,稍湿,可塑—硬塑,厚约 2.0—3.0 m。

⑤黄土状粉质粘土:棕褐色,湿,硬塑,结构强度高,厚约 2.5 m。

⑥黄土状粉质粘土:浅棕褐色,湿,可塑—硬塑。厚约 3.0 m。

⑦黄土状粉质粘土及粉土:棕黄色,湿,可塑—硬塑,厚约 3.5 m。

⑧卵石层。

据勘察报告:该场地湿陷性土层厚约为 14 m,为 II 级自重湿陷性黄土,各层土的物理力学指标见表 1。

表 1 各层土的物理力学指标

层	分含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	液限 W_L	塑性指数 I_p	压缩系数 $a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$
①	20.5	17.2	0.893	30.6	10.5	0.25
②	19.5	18.9	0.750	33.4	11.9	0.14
③	21.0	18.8	0.746	32.3	10.3	0.13
④	24.1	17.2	0.967	31.2	10.7	0.16
⑤	21.9	17.8	0.866	32.5	11.4	0.17
⑥	23.4	18.5	0.812	32.9	11.6	0.15
⑦	27.2	17.6	0.861	32.5	11.3	0.15

除③层黄土状粉土及粉质粘土 $f_{fk}=155$ kPa,在 14 m 范围内其它各土层的地基承载力均不大于 145 kPa。

2.1.2 试验过程和结果

试验方案分两种:

1)同一夯锤不同的单击夯击能下各夯点的承载力

夯锤为铸铁重 40 t,锤底面积 5 m^2 ,锤底静压力 80 kPa。起重设备为履带起重机;分别进行 1 200 kN \cdot m, 2 000 kN \cdot m, 3 000 kN \cdot m, 4 000 kN \cdot m, 5 000 kN \cdot m, 6 000 kN \cdot m 和 8 000 kN \cdot m 的单点夯试验,夯击次数均为 18 击。

①单点夯沉量与强夯能级的关系见表 2。

表 2 单点夯沉量与强夯能级的关系

能级 $E/(\text{kN}\cdot\text{m})$	1200	2000	3000	4000	5000	6000	8000
沉降 s/m	2.03	2.86	3.57	4.20	4.87	5.35	5.78
沉降差 $\Delta s/\text{m}$	2.03	0.83	0.71	0.63	0.67	0.47	0.45

在土层相同的情况下,随着单击强夯能级的增加夯沉量逐渐增大,但夯沉量增大的

幅度有逐渐减小的趋势。

② 夯点承载力与强夯能级的关系

在进行各能级单点夯施工后, 分别采用静载荷试验测试处理后各夯点承载力的大小。试验板为圆板, 直径 1 128 mm, 面积 1.00 m² 和直径 798 mm, 面积 0.50 m² 两种压板平行试验, 共做了 15 台。压板位置在夯后土面, 静载荷试验按《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89) 要求。鉴于载荷试验曲线无明显的比例界限, 且夯后土为低压缩性土, 取 $S/D=0.01$ 对应的荷载值为承载力的标准值见表 3。

表 3 单击强夯能级与夯点承载力

能级 $E/(kN \cdot m)$	0	1200	2000	3000	4000	5000	6000	8000
f_k/kPa	145	220	285	400	430	450	480	520
$\Delta f_k/kPa$		75	65	115	30	20	30	40
试验数量		3	2	3	1	2	2	2

在土层相同的情况下, 随着单击强夯能级的增加夯点承载力逐渐增大, 但承载力增大的幅度有逐渐减小的趋势。

2) 不同的夯锤在相同的单击夯击能下各夯点的承载力

在上述试验基础上又进行了夯锤为铸铁重 20t, 锤底面积 5 m², 锤底静压力 40 kPa 的单点夯击试验: 2 000 kN · m, 3 000 kN · m, 4 000 kN · m, 5 000 kN · m, 夯击次数均为 20 击; 与上面 40 t 锤, 底面积 5 m², 锤底静压力 80 kPa 试验结果对比如下。

① 相同强夯能级与单点夯沉量的对比关系见表 4。

表 4 强夯能级与单点夯沉降量表

锤重/t	不同能级 $E/(kN \cdot m)$ 的沉降量/m				锤底静压力/kPa
	2 000	3 000	4 000	5 000	
40	2.86	3.57	4.20	4.87	80
20	2.27	3.13	3.80	4.42	40

夯锤重 20 t 同样反映在土层相同的情况下, 随着单击强夯能级的增加夯沉量逐渐

增大, 但夯沉量增大的幅度有逐渐减小的趋势; 与夯锤重 40 t 的相同能级下的单点夯沉量相比夯沉量减小。

② 相同强夯能级与不同锤底静压力情况下夯点承载力的对比关系

在上述进行锤重 20 t 的单点夯击施工后, 采用静载荷试验测试处理后各夯点承载力的大小。试验板为圆板直径 798 mm, 面积 0.50 m², 每能级做了 1 台。压板位置在夯后土面, 静载荷试验按《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89) 要求。载荷试验曲线无明显的比例界限, 同样取 $S/D=0.01$ 对应的荷载值为承载力的标准值(见表 5)。

表 5 单击强夯能级与夯点承载力 f_k 表

锤重/t	锤底静压力/kPa	不同能级 $E/(kN \cdot m)$ 下的 f_k/kPa			
		2 000	3 000	4 000	5 000
40	80	285	400	430	450
20	40	270	380	440	440

夯锤重 20 t 同样反映在土层相同的情况下, 随着单击强夯能级的增加夯点承载力逐渐增大, 但夯点承载力增大的幅度有逐渐减小的趋势; 与夯锤重 40 t 的相同能级下的夯点承载力差别不大。

两种试验情况, 从单点夯沉量和夯点承载力载荷试验结果可得出以下结论: 夯点承载力随着夯击能级的增加而增大, 但增加幅度减小; 相同夯击能级、夯击次数的情况下, 锤底静压力与夯点承载力关系不大。

2.2 承载力的统计公式

鉴于目前大量强夯工程施工结束后静载荷试验检测位置多在满夯加固层里, 加固效果反映为满夯加固层和强加密层深度范围内; 为了建立强夯法处理湿陷性黄土后的地基承载力与夯击能级的关系, 在上述试验基础上, 又搜集了一些其它湿陷性黄土地区强夯法处理相关资料(见表 6)。

汇集上面所有的数值, 散点图见图 1。

由上面资料可见在不同夯击能的情况

表6 强夯法处理湿陷性黄土后的地基承载力表

工程名称	不同能级 $E/(kN \cdot m)$ 下的 f_k/kPa				
	1 000	2 000	3 000	6 500	8 000
三门峡电厂				500	530
中原油田	210	270			
郑州铝厂		280			
山西介休区段站	200				
国营七四四厂		300			
首阳山电厂		300	400		

注:三门峡火电厂工程强夯工程 6 500 $kN \cdot m$ 的 5 个静载荷试验结果承载力的平均值是 500 kPa ; 8 000 $kN \cdot m$ 的 10 个静载荷试验结果承载力的平均值是 530 kPa 。

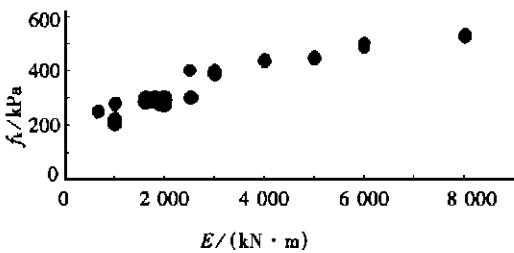


图1 单击夯击能-承载力图

下,对于处理湿陷性黄土的承载力随夯击能的增加而加大,各个工程相同能级下的承载力有一定规律。考虑到试验中的误差以及参加统计的资料较少,偏于安全采用小值平均值原则进行计算,结果见表7。

表7 不同单击夯击能对应的夯点承载力表

能级/ ($kN \cdot m$)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	8000
f_k/kPa	200	280	380	420	440	480	520

归纳夯击能级对应的承载力关系见图2。

由上述曲线得到强夯法处理湿陷性黄土后达到理想加固效果时满夯加固层和强加密层深度范围内单击夯能级与承载力的统计公式为:

$$f_k = 158.84 \ln[E/(kN \cdot m)] - 903.75 \quad (1)$$

式中: E 为夯击能级, $kN \cdot m$; 相关系数 $R^2 = 0.9857$, 拟合很好。

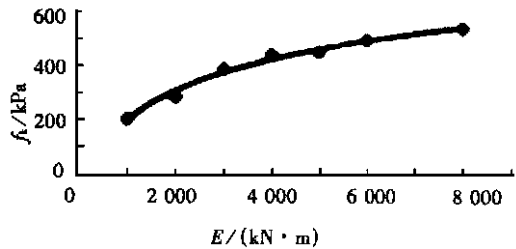


图2 不同单击夯能级对应的承载力图

3 结论

①强夯法处理湿陷性黄土自夯后面向下处理深度范围内土体可分为三层:满夯加固层,强加密层和影响层。满夯加固层和强加密层加固效果最好。

②强夯法加固湿陷性黄土后的地基承载力随着夯击能级的增加而增大,但增加幅度逐渐减小;在满夯加固层和强加密层深度范围内地基承载力与夯击能级统计公式为 $f_k = 158.84 \ln[E/(kN \cdot m)] - 903.75$ 。

上述统计公式是针对理想强夯效果时满夯加固层和强加密层深度范围内的地基土,用本公式计算的强夯法处理湿陷性黄土后承载力值较实际值偏高,但仍对强夯法设计时选取施工参数,预测处理后承载力提高幅度值有一定的实际意义。

参 考 文 献

- 1 地基处理编写委员会.地基处理.北京:中国建筑工业出版社,1988
- 2 陕西省计划委员会.GBJ25-90 湿陷性黄土地区建筑规范.北京:中国计划出版社,1991

收稿日期:2000-02-25