

强夯置换技术处理公路软土地基试验研究

余开彪¹, 王宗国², 张成顺³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 湖北中南路桥有限公司, 湖北 孝感 432000; 3. 天仙一级公路建设有限公司, 湖北 天门 431700)

摘 要: 分析了抛石强夯置换加固软土地基的原理, 并通过监测和分析试验段的孔隙水压力在施工过程中的变化规律, 以及研究静力触探、沉降观测和复合地基静载试验结果, 说明通过该技术的应用, 公路路基的承载力由软土地基的承载力 90 kPa 提高到复合地基的承载力 245 kPa 以上, 加固深度达到 6 m 以上, 且能够加快公路软土地基沉降过程。

关 键 词: 软土加固; 强夯置换; 公路

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Study on dynamic consolidation method for reinforcing soft foundations of highways

YU Kai-biao¹, WANG Zhong-guo², ZHANG Cheng-shun³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Zhongnan Road and Bridge Co.Ltd., Xiaogan 432000, China; 3. Tianxian Expressway Building Co.Ltd., Tianmen 431700, China)

Abstract: The principle of the dynamic consolidation method(DCM)for reinforcing soft foundations is analyzed; pore water pressure through the whole working course is monitored; the curves of SCPT before and after tapering is given; the settlement curves of consolidation area to unconsolidated area and the result of loading test are shown.

Key words: reinforcing soft foundations; dynamic replacement; highway

1 前 言

随着公路建设工程的迅速发展, 遇到不良地质情况逐渐增多, 特别是软基路段的处理是公路工程建设中的一个重要方面, 为满足公路工程地基的强度、变形等要求, 必须对软土地基进行人工处理。强夯置换法作为一种地基处理方法在处理黏土、软土地基方面得到广泛应用。在信(阳)一广(里关)高速公路建设中, 将某路段作为强夯置换试验段, 通过对该路段孔隙水压力消散过程进行静力触探试验, 了解路基强度增长趋势, 并通过对地基强度、路基沉降过程的分析来确定强夯置换法的可行性及处理后的效果。

2 强夯置换加固原理与技术参数

2.1 强夯置换加固软土地基原理

强夯置换法是将排水固结、置换与压密结合起来加固软土地基的一种方法。夯击时强大的冲击能

量, 使泥产生扰动, 并将块石挤入淤泥、压密软土, 使软土地基的密度增加, 从而增加软土地基的抗剪能力。置换材料(直径大于 200 mm 的块石)形成一定直径的块石墩桩, 块石墩桩的承载能力远远高于土体的承载能力, 即形成由墩桩和压密土体构成的复合地基, 在充分发挥块石墩桩和加固后软土地基承载力的条件下, 由二者共同承担荷载。与天然地基相比, 加固后的路基承载力得到很大提高。此外, 块石墩桩透水性远比软土的透水性要强, 是软土中的良好排水通道, 在夯击作用下, 能加快软土的排水固结, 增加土体强度, 减少工后沉降。

2.2 强夯置换法处理的有效加固深度

强夯置换法处理的有效加固深度表达式为^[1, 2]:

$$z = \alpha \sqrt{QH} \quad (1)$$

式中 Q 为夯锤重量(kN); H 为夯锤落距(m); α 为修正系数, 一般取 0.3~0.5。如含水率适中, 可取大值, 其他情况可取小值。在无其他资料的情况

下, 表 1 可作参考。

表 1 强夯置换法加固处理软土的有效加固深度^[1]
Table 1 The effective foundation depth of improvement by dynamic consolidation

单击夯击能 /kN·m	深度/m	
	碎石土、砂	粉土、黏性土、湿陷性黄土
1 000	5.0~6.0	4.0~5.0
2 000	6.0~7.0	5.0~6.0
3 000	7.0~8.0	6.0~7.0
4 000	8.0~9.0	7.0~8.0
5 000	9.0~9.5	8.0~8.5
6 000	9.5~10.0	8.5~9.0
8 000	10.0~10.5	9.0~9.5

2.3 试验路段工程地质概况

该路段位于山谷中, 山谷两侧为群山, 地形起伏较大, 路线由山谷内洼地及山脚通过, 谷内为稻田, 大部分为植物根系、水塘表层为淤泥质土。该段山谷洼地以软塑~流塑状耕植土及第四系冲积、淤积低液限黏土及淤泥质土为主, 层厚为 2~5 m, 容许承载力为 80~100 kPa。山谷两侧及高坎为第四系冲击及坡积土, 容许承载力为 150~160 kPa。施工前地基参数见表 2。

表 2 施工前地基物性参数表
Table 2 The physical properties of the foundation soil before consolidation

重度 γ /kN·m ⁻³	孔隙度 n /%	饱和度 s_r /%	液限 W_L /%	塑限 W_P /%	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E /MPa
15.8~18.1	44~55	28~57	25.1~27.9	14.3~17.6	0.28~0.43	7.2~19.8

2.4 强夯施工技术参数

强夯置换适用于处理饱和和软弱的黏土地基, 其填料可因地制宜, 块石、钢渣等均可。根据公路的工程实际情况, 强夯置换法置换材料为直径大于 200 mm 块石。

施工技术参数如下: 锤径为 1.5 m, 锤底面积为 1.77 m², 锤重 180 kN, 夯锤提升高度为 6.7 m, 夯击能为 1 200 kN·m, 夯点按等边三角形布置, 其间距为夯锤直径的 1.5~2.2 倍, 夯点间距取 3.5 m, 夯击采用跳夯。每个击点夯击 12~18 次, 施工时含水率控制在 w_{p+} (1%~3%) 范围内, 最后一遍夯击后次, 每个点夯击 2 遍。收锤标准: 最后两击平均沉降量不宜大于 5 cm, 夯坑周围不应发生过大隆起。

2.5 试验内容

在夯前、夯 1 遍及夯 2 遍后用静力触探仪测试 z - p_s 变化趋势, 监测强夯置换处理过程中孔隙水压力消散过程以及软基沉降过程。用静载试验测定路

基的实际承载能力。

3 地基处理效果分析

3.1 静力触探试验成果分析

根据夯前和夯后试验段内桩间土各测点的静力触探试验结果绘出 z - p_s 曲线有如图 1 所示。从图中可以看出: 在夯第一遍时, 整个软土层 z - p_s 值有很大提高, 平均值由 2.5 MPa 提高到 5 MPa 左右, 在夯第 2 遍后, z - p_s 值主要增长区在 0~5 m 范围内, 平均值达 7.5 MPa, 比夯前提高约 3 倍, 整个软土强度有很大提高。说明在夯击过程中, 大量块石直接挤穿软土层达到下卧层, 并形成块石墩桩, 块石墩桩又是软土中孔隙水的良好排水通道, 加快孔隙水的排出, 使有效应力得到较快增长, 软土地基的抗剪强度得到很快增长。

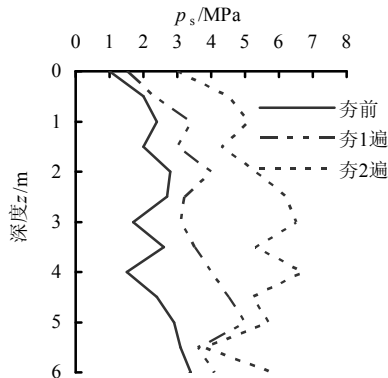


图 1 静力触探曲线

Fig.1 Curves of SCPT before and after tampering

3.2 超孔隙水压力随时间和深度变化关系

超孔隙水压力随时间和深度变化关系见图 2, 从图中可以看出以下规律:

(1) 在夯击过程中, 孔隙水压力迅速增大, 最大可达 50 kPa, 第 2 遍夯击最大孔隙水压力较第一次夯击略有降低。

(2) 第 1 遍夯击后, 孔隙水压力消散比较迅速, 经过 12 h, 孔隙水压力消散 80%; 经过 2 d 后, 孔隙水压力基本消散, 达到静水压力水平。第 2 遍夯击后, 孔隙水压力消散较缓慢, 经过 72 h, 孔隙水压力消散 80%, 经过 3 d 后, 孔隙水压力基本消散, 达到静水压力水平。这说明经过第 1 遍夯击后, 块石墩桩在软土中形成良好的排水通道, 孔隙水压力消散比较迅速; 经过 2 遍夯击后软土依次被挤密, 软土孔隙变小, 因此, 孔隙水压力消散较第 1 遍夯击后缓慢。

(3) 在夯击过程中, 同孔 2 m 处与 5 m 处的

孔隙水压力比较, 2 m 处孔隙水压力大于 5 m 处孔隙水压力, 但是 2 m 处孔隙水压力达到静水压力水平的时间比 5 m 处孔隙水压力达到静水压力水平的时间早 12 h。

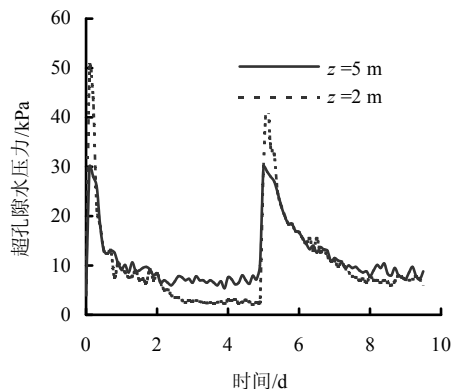


图2 超孔隙水压力消长曲线

Fig.2 Curves of pore water pressure as a function of time

3.3 强夯块石墩复合地基承载力的确定

单墩、墩间土的承载力按下述公式计算复合地基承载力^[3]:

$$f_{sp} = mf_p + (1-m)f_s \quad (2)$$

式中 m 为置换率 f_{sp} 为单墩复合地基承载力(kPa); f_p 为单墩承载力(kPa) f_s 为墩间土承载力(kPa)。

强夯块石墩复合地基载荷试验结果如表 3 所示。

表3 载荷试验结果汇总表
Table 3 The result of loading test

类型	编号	承压板面积 /m ²	最大加载值 /kPa	沉降量 /mm	$f_{0.02}$ /kPa	平均值 /kPa
单墩	1 [#]	3.8	1 000	302.0	395	
	2 [#]	3.8	1 000	205.4	383	393
	3 [#]	3.8	1 000	206.1	400	
墩间土	1 [#]	1.0	280	239.6	115	
	2 [#]	1.0	280	216.2	103	113
	3 [#]	1.0	280	248.0	120	
复合地基	1 [#]	9.0	450	230.8	195	
	2 [#]	9.0	450	224.0	247	234
	3 [#]	9.0	405	253.8	260	

注: $f_{0.02}$ 为沉降板宽比 (S/D) = 0.02 时对应的荷载。

复合地基的承载力理论计算值为 160 kPa, 实际试验复合地基的承载力为 243 kPa, 误差达 50 %。分析如下: 由于块石墩柱和墩间土载面板尺寸较小, 而复合地基载面板尺寸较大, 因而有较强的尺寸效应。在理论计算中, 通常是以加权平均值来计算复合地基的承载力, 而实际上复合地基是由墩柱与土

共同作用来承受荷载, 墩柱与土共同作用有待进行深入研究。

强夯过程中墩间土的原有结构遭到破坏, 孔隙水压力升高, 由于块石墩柱具有良好的透水性, 复合地基的排水固结速度加快, 随着时间的推移, 孔隙水压力逐渐消散, 墩间土的强度逐渐恢复和提高, 复合地基远期承载力大于实测承载力。

3.4 沉降观测结果分析

隆起量-时间曲线见图 3。在试验和填筑过程中, 分别对置换处理区的墩柱土和未处理区的沉降进行比较, 处理区和未处理区的沉降曲线如图 4~6 所示。其规律是: 在第一遍夯击时, 置换处理区的墩柱土隆起 4 cm。在固结作用下, 隆起量下降。在 5 d 后第二遍夯击时, 置换处理区的墩柱土隆起量为 8 cm。

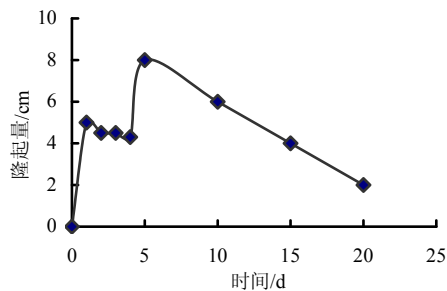


图3 变形曲线(夯后)

Fig.3 Deformation curves as time after tapering (area of consolidation)

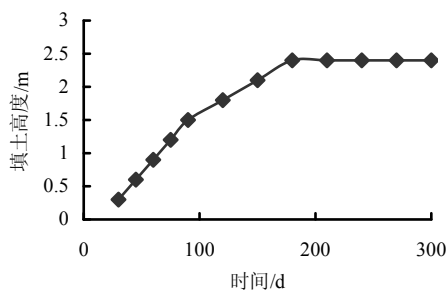


图4 填土高度曲线

Fig.4 Height curves of foundation

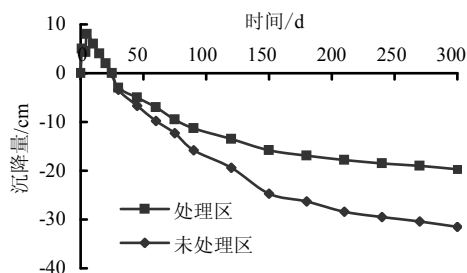


图5 处理区与未处理区沉降比较

Fig.5 Comparative settlement curve of consolidation area to unconsolidated area

4 结 语

(1) 强夯置换处理方法能够挤密软土, 块石墩柱能够加快软土的排水固结, 使软土静力触探 p_s 值增加 3 倍左右。

(2) 强夯置换处理方法能够加快软基沉降固结, 与未处理区相比, 强夯置换处理方法能使工后沉降减小 12 cm 左右。

(3) 抛石强夯置换技术在高速公路软土加固中取得了良好的效果, 加固后路基承载力由加固前的 113 kPa 提高到加固后的 245 kPa 以上, 满足设计要求, 具有工期短, 设备简单等优点, 在石料充足的地区值得推广和应用。

(4) 按块石墩柱的极限承载力、墩间土的极限承载力以及置换率计算的复合地基的承载力与实际试验得到的承载力相比较小, 如果用块石墩柱的变形模量与墩柱间土的变形模量、置换率及复合地基的允许变形值计算复合地基的承载力比较合适, 但

需要测定块石墩柱的变形模量与墩柱间土的变形模量。

(5) 由于土体强度会随时间的延长而增长, 因此, 复合地基的远期强度会大于检测强度。

参 考 文 献

- [1] 孔位学, 陆新. 强夯法加固软土地基有效加固深度研究[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(4): 45—48.
KONG Wei-xue, LU Xin. Study effective improvement depth of dynamic consolidation[J]. **Sichuan Building Science Research**, 2001, 27(4): 45—48.
- [2] 叶观保, 陈望春, 徐超. 强夯法地基处理有效加固深度分析研究[J]. 上海地质, 2003, 7(3): 22—25.
YE Guan-bao, CHEN Wang-chun, XU Chao. Analysis of effective improvement depth of dynamic consolidation[J]. **Shanghai Geology**, 2003, 7(3): 22—25.
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.