

离心模型试验在粉喷桩处理软土地基沉降中的研究*

刘俊新 文江泉 邱恩喜

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

摘 要 离心模型中的固结时间是原型的固结时间缩短至 $1/N^2$, 能够在较短的时间内模拟软土地基的长期沉降. 采用离心模型试验方法, 模拟软土地基在粉喷桩处理后的渗透固结性状. 通过对地基施工期阶段及工后的沉降进行分析, 证实了用粉喷桩进行处理地基是可行的.

关键词 软土地基 离心机 粉喷桩

中图分类号: TU446 **文献标识码**: A

CENTRIFUGAL TEST USED TO DETERMINE PERFORMANCE OF DISPOSING CLAY FOUNDATION WITH JET - GROUTING PILE

LIU Junxin WEN Jiangqian QIU Enxi

(Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu China 610031)

Abstract Centrifugal physical model test can shorten the consolidation time to $1/N^2$ of the prototype permeation and consolidation of clay foundation disposed by jet - grouting pile. In this paper, authors use the centrifugal physical model to estimate settlement of the soft foundation and compare the modeling results with field observation of settlement during construction and post - construction.

Key words Clay foundation, Centrifugal machine, Jet - grouting pile

1 引 言

水泥系粉体深层搅拌法(即粉喷桩)就是将水泥粉连续不断地分散土中,利用化学固化作用,将分散的土团粒,凝聚成具有整体性水稳性和一定强度的土,从而达到加固地基的作用。

与“砂井排水法”的加固机理不同,深层搅拌法是造成坚固的水泥拌和土的方法来加固软基,该法不是设置排水通道使地基非常缓慢地固结,而是让水泥土拌和体非常迅速地成为一个坚硬的复合地基来直接承受外荷,大大减少沉降量。该法不是增加

地基的平均强度来逐步提高稳定性,而是在地下形成桩或构造物以抵抗外荷。因此,通常是象钢筋混凝土桩基一样利用安全系数给定拌和体的允许应力。水泥拌和体的变形是很微小的。因而路面和路堤的沉降是很小的。在施工期内基本能完成沉降。工后沉降很小。“深搅法”的特点是快速、高强、沉降小^[1]。

通常条件下,软土地基的渗透固结十分漫长,不论是在物理试验还是现场试验中,要观测软土地基的固结沉降是一项艰巨的任务。在离心模型试验中,由于固结时间与模型比 N 的平方成反比,也就是说,离心模型中的固结时间将原型的固结时间缩

* 收稿日期: 2004 - 11 - 24;收到修改稿日期: 2005 - 01 - 05.

第一作者简介: 刘俊新(1976 -),男,博士,主要从事边坡稳定性分析研究. Email: 960442@sohu.com

短至 $1/N^2$, 使得能够在较短的时间内模拟软土地基的长期沉降^[2-4]。这正是离心模型试验技术在软土地基处理的优势体现。随着离心模型试验技术的发展, 许多岩土工作者结合工程实际, 利用离心模型试验技术, 验证软土加固处理方法的可靠性和可行性, 特别是用于预测软土地基的长期沉降和稳定性。

2 离心试验模拟软土渗透固结的原理

土工离心模型试验是利用离心机产生离心力场, 提高模型土体的体积力, 形成人工重力。具体做法就是将原型按几何尺寸相似缩小 n 倍, 使模型材料的含水量 W 和密度 ρ 均与原型的相同, 然后将制备好的模型置于高速旋转的离心机中, 设原型的容重 γ_p 为

$$\gamma_p = \rho g$$

其中: ρ 为土体质量; g 为重力加速度。模型的容重 γ_m 为

$$\gamma_m = \rho a$$

其中: a 为总加速度向量。

按照模型与原型的应力相一致的条件, $\sigma_p = \sigma_m$, 即, 得到 $\gamma_p \times h_p = \gamma_m \times h_m$, 于是 $a = \frac{h_p}{h_m} g = ng$ 即利用离心机产生 n 倍重力加速度, 达到模型和原型二者的重力完全相等, 以保持其力学特性的相似性^[2-4]。

假定模型与原型中的孔隙水压力与土性相同且荷载及边界条件也相同, 由于模型比原型缩小 n 倍, 故模型的渗径也缩小了 n 倍, 由太沙基的固结原理知:

$$U = 1 - \beta \times e^{-\lambda}$$

由假定可知, $\beta_m = \beta_p$, $\lambda_m = \lambda_p$, 因此两者的时间因素相等即 $T_{vm} = T_{vp}$, 由固结时间: $t = \frac{H^2}{C_v} T_v$, 因此原型中: $t_p = \frac{H_p^2}{C_v} T_{vp}$, 在模型中: $t_m = \frac{H_m^2}{C_{vm}} T_{vm}$, 由此可得:

$$t_m = \frac{H_p^2}{H_m^2} \times t_p = \frac{1}{N^2} t_p$$

即模型所需时间为原型的 $1/n^2$ 。

3 地质情况和加固处理措施

本次工点选在四川某处沟谷冲积平原, 地形开

阔, 地表覆盖第四系坡冲洪积层, 多为软土, 厚 6 ~ 12m 不等, 为软塑状, 含水量为 40.7%, 密度为 $16.92 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 塑性指数为 17。下伏基岩为泥岩夹砂岩。路堤中心最大填筑高度为 10m。由于含水量为 40.7%, 大于 30%, 塑性指数为 17, 大于 10, 符合粉喷桩设计原则^[4]。工点的软土地基设计方案采用 $\phi 50 \text{ cm}$ 粉喷桩加固, 三角形布置, 桩间距 1.0m。加固宽度至路堤坡脚外 3m, 加固深度贯穿软土层。粉喷桩顶部铺设两层双向 $50 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 土工格栅及 0.5m 厚的中粗砂或砂砾石垫层。

4 离心模型试验方案

根据离心模型试验机理和主要的物理量的模拟比, 考虑模型的制作, 试验选用大模型箱 ($600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$), 采用模型比为 1: 100。

通过比较工点的各断面情况, 本次采用如下地质情况的断面作为离心试验模拟的断面: 该断面在路堤范围内的地基主要分为 4 层, 下伏基岩为泥岩夹砂岩, 线路中心以左的基岩基本呈水平, 线路中心以右基岩略有倾斜; 基岩以上为粉质粘土层, 厚度为 1.5m 左右; 粉质粘土层以上为软土层, 厚度约 8m; 软土层以上为人工填土, 主要是耕植土, 厚度约 1.5m。由于粉质粘土层和耕植土层较薄, 通过模型比计算出离心模型的层厚为 1.5cm, 因此, 从离心试验制作考虑, 将此断面简化处理 (图 1), 一是原型的边

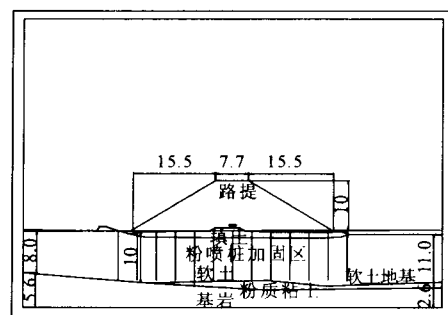


图 1 简化的横断面图

Fig. 1 Simplified transverse profile

界过于复杂, 将地基表面边界的曲线状简化成直线。二是将地基作两层土层处理, 基岩不变, 粉质粘土层和耕植土层用软土层来代替, 在离心模型中, 基岩在路堤填土作用下的变形很小, 可以忽略。故以压实的细砂、粘土和水泥混合料模拟泥岩夹砂岩, 并根据泥岩不透水的特点, 在模型基岩表面作不渗水处理。

考虑实际情况,本次试验采用原状土的重塑土,在填筑过程中不改变原状土的含水量,只要求密度与工点现场相同,密度取 $16.92\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。地基分二层填筑,预先计算每一层的重量,并压实到计划的高度。

离心模型的粉喷桩采用先预制,后安装的方式。桩的预制方法是,在地基原状土中拌入一定量的水泥,通过模具挤压成型,然后在恒温恒湿箱经过 7 天的养护,养护温度为 60° 。养护后,预制桩的强度为 2.4MPa 。由于模具直径不能完全按照直径 0.5cm 挤压成型,实际预制的模型桩直径为 0.58cm ,因此,在复合地基模型制作时,按照置换率一致的原则,将桩的间距调整为 1.16cm 。

土工格栅砂垫采用塑料纱网加细砂来模拟。砂经过 0.5mm 筛,按模型比 100 计算,相当于原型直径 50mm ,与粗砂的直径相近。模型制作时,先在平整的地基表面撒上一层约 1mm 左右的细砂,铺一层经过处理的纱网,再撒上一层约 3mm 左右的细砂,铺一层纱网,最后再撒上一层约 1mm 左右的细砂,并保证砂垫层的总厚度在 5mm 。

路堤填料为红层填料,填料经风干过 2mm 筛后用于路堤填筑,高度为 10m ,按 0.93 的压实系数填筑。

离心模型试验测试内容主要是变形,采用两种方法,一是电测法,使用 4 个电涡流传感器,编号分别为 ch11、ch12、ch14、ch15,其中 ch11 测的是左侧路堤坡角的水平位移, ch12 是路堤顶部的垂向沉降, ch14 是路基右侧坡角 2cm 处垂向沉降, ch15 路堤右侧坡角处垂向沉降。二是在有机玻璃一面的离心模型划分网格,在试验过程中按一定间隔时间进行摄影,通过网格点坐标变化研究路堤整体的变形趋势和稳定性。

考虑填筑土为扰动土,首先将模型地基在离心加速度 40g 时运行 20min ,相当于将模型地基进行预先固结。在放置路堤模型后,为了避免离心加速度的变化剧烈引起地基的破坏,将离心加速度从 $0\text{g} \sim 100\text{g}$ 划分为 5 个台阶,分别在 20g 、 40g 、 60g 、 80g 运行 5min ,并各测变形一次,这一过程相当于路堤填筑过程。在离心加速度为 100g 时,稳速运行 2h ,相当于原型固结 28mon 。每间隔 10min 测一次变形。

5 数据处理与分析

5.1 地基土参数分析

表 1 是列出了离心模型试验前后地基土参数实测值,从中可以看出由于粉喷桩的挤密和本身渗透固结作用,地基土强度有了明显的提高。

表 2 模型试验地基参数

Table 2 Parameters of simulating clay foundation

指标类型	含水量/(%)	密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	C_u/kPa	$\varphi_u/(^\circ)$
试验之前	40.7	16.92	5.8	2.5
试验之后	37.14	18.30	7.27	3.1

5.2 各种加速度时矢量分析

图 2 是离心加速度为 40g 时变形矢量图,地基整体向右偏斜,这主要是地基基底存在明显的斜坡。图 3 是试验结束后的变形矢量图。可见,地基在沉降的同时,整体向右水平位移。在加速度提升过程中,路堤右侧坡角外一定距离的地基出现隆起挤出现象,在固结过程中,隆起的部分又沉降下去了。

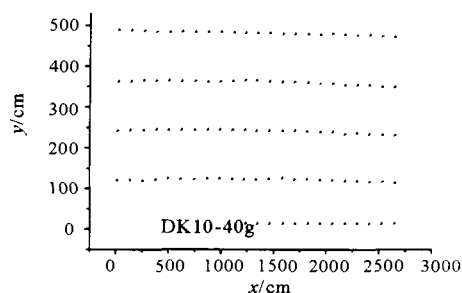


图 2 变形矢量图(40g)

Fig. 2 Deformation vectorgraph (40g)

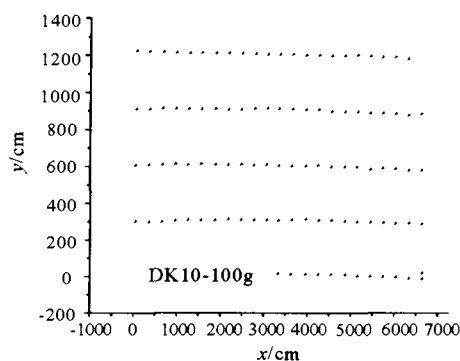


图 3 变形矢量图(100g)

Fig. 3 Deformation vectorgraph (100g)

5.3 沉降分析

图4是离心模型试验加载过程中变形随离心加速度的变化情况,这一过程相当于路堤填土过程。图5是路堤高度达到10m后,各测点的总沉降随运行时间的变化曲线,相当于路堤填筑完成后,各测点的工后总变形随时间的变化。图6是施工后变形与时间的关系。上述表和图中数据都按相应的模型比换算到原型。

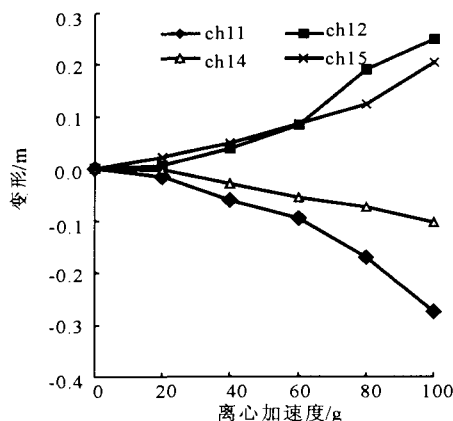


图4 变形与离心加速度曲线

Fig. 4 Curves of deformation and centrifugal acceleration

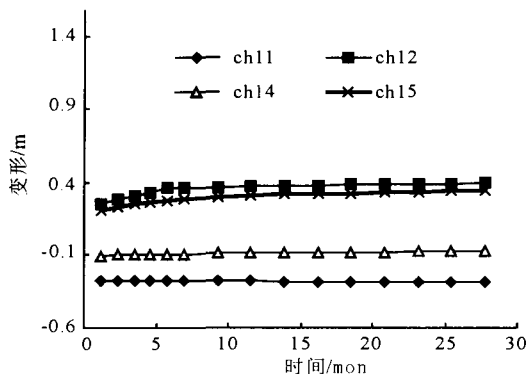


图5 总变形与时间变化曲线

Fig. 5 Curves of total deformation and time (month)

路基表面的沉降,包括路堤本体的压密沉降和地基沉降。由测试结果知,地基表面的总沉降量为0.394m,其中施工阶段产生的沉降为0.251m,路堤完工后27mon的沉降为0.143m。完工后的前半年是工后沉降速率最快的阶段,沉降量为0.11m。之后沉降速率趋于缓和,22mon内的沉降为0.033m。

路堤右侧距离坡角10cm处的垂向变形,换算到原型,在路堤施工阶段,地基向上隆起现象,并随

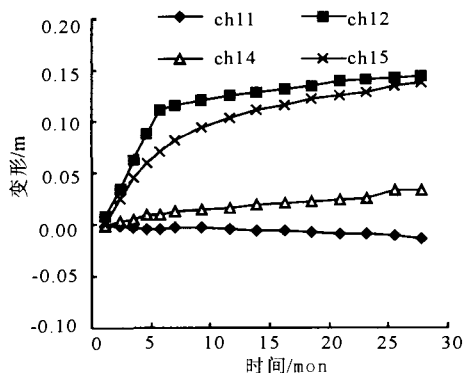


图6 施工期后变形与时间变化曲线

Fig. 6 Curves of deformation and time (month) after construction

路堤高度增加而增加,最大隆起量为0.104m。当施工结束后,由于本身渗透固结的原因,地基又发生沉降,最终沉降量为0.033m。

为了区分地基与路堤本体的垂向沉降,在本次试验的同时还进行10m路堤填料试验,压实系数为93%,填料的含水量为最佳含水量12.81,10m高的路堤本体刚完工时,红层路堤的变形为0.038m,故线路中心处地基此时的沉降为0.213m,与坡角10m处沉降0.204m相比,基本一致。同时路堤本体工期27mon的总沉降和沉降分别为0.052m和0.014m,推算出线路中心处的地基工后的总沉降和沉降分别为0.342m和0.129m,路堤右侧距离坡角10m处总沉降和沉降为0.342m和0.139m,也基本相符。由此可推出地基的工后沉降随时间的变化如图7所示。由此可看出,上述将划分路堤本体和地基沉降的分析方法是可行的。同时对拟合填筑高度10m,压实系数为93%路堤拟合得式(1):

$$S_1 = \frac{t}{\alpha t + \beta} \quad (1)$$

式中: S_1 为工后沉降(m); t 为时间(mon); α, β 为试验参数,此时分别为54.6和403.7。

路线中心处地基的工后沉降随时间的变化趋势(图7),可用式(2)来描述:

$$S_a = \frac{t}{u + t/S_{a,\infty}} \quad (2)$$

式中: S_a 为时间 t 的施工期后沉降(m); $S_{a,\infty}$ 为总的施工期后沉降(m); t 为时间(mon); u 为试验参数;

对于此工点而言, $S_{a,\infty}$ 和 u 的值分别为0.139m和17.20,式(2)拟合的相关系数 R^2 大于0.95,说明拟合公式能很好地反映路基工后沉降的变化趋势。

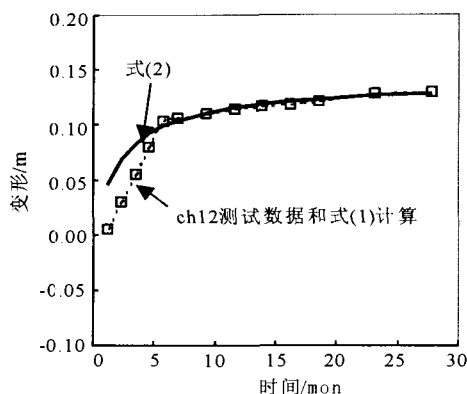


图7 施工期后地基变形随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of foundation deformation and time
(month) after construction

路堤顶面施工期后的沉降随时间的变化规律也就可以用下式来描述:

$$S_a = \frac{t}{u + t/S_{a,\infty}} + \frac{t}{\alpha t + \beta} \quad (3)$$

式中: α, β 与式(1)相同。

根据式(3)预测工点路堤顶面的沉降随时间的变化如图8,与实测值有非常好的相关性,两者的相关系数为0.985。

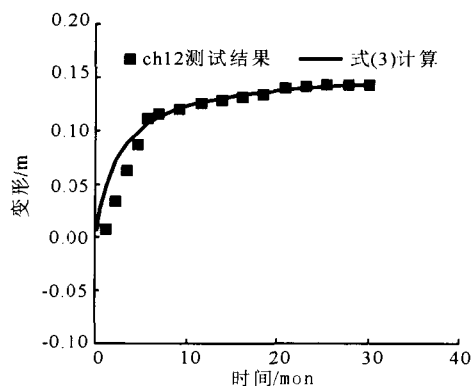


图8 施工期后路堤变形随时间变化曲线

Fig. 8 Curve of embankment deformation and time
(month) after construction

同时根据铁路客专线规定: $200\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的路基的工后总沉降不应大于 15cm , 沉降速率不应大于 $4\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据此要求和以铺轨日作为工后沉降计算起始时间,在此工点使用红层作为路堤填料、压实系数为0.93的前提下,按实测的数据和预测,路堤应静放5mon之后才能铺轨,这样第一年的工后沉降速率为 $4.4\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,总的工后沉降将在 0.08m 以下。按式(3)预测第一年的工后沉降速率

为 $3.3\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,总的工后沉降将在 0.06m 以下。

5.4 水平位移分析

如图5、图6所示,当路堤高度达到 10m 时,左侧坡角向右的水平位移为 0.13m 。路堤填筑施工结束后,变形随时间的变化却非常缓慢,在 28mon 时间内变化为 1cm ,说明路堤的坡角变形主要发生在施工期间。根据摄影测量得到路堤右侧坡角向右的水平位移为 0.27m 。

6 结论和建议

(1) 离心试验后,地基土的含水量,密度, C_u 和 φ_u 都有不同程度的提高;

(2) 使用粉喷桩加固处理的软土地基时,地基的侧向变形主要发生在路堤填筑阶段;

(3) 根据离心试验结果可知:地基采用粉喷桩是可行的。在离心模型试验中,路堤填筑到 10m 时,路基的沉降为 0.251m 。完工 27mon 后路基总沉降为 0.394m 。路基的总的施工期后沉降为 0.139m 。竣工后的前半年地基沉降速率最大。

(4) 在红层作为路堤填料、压实系数为0.93的前提下,工点路堤应静放5mon之后铺轨,这样,第一年路基表面的工后沉降速率为 $3.3 \sim 4.4\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,路基总的工后沉降将在 0.08m 以内。

参 考 文 献

- [1] 何福林. 沪宁高速公路路基的粉喷桩处理[J]. 中国公路学报, 1994, 7(增1): 2~3.
He Fuling. The Jet-grouting Pile Improvement of the Hu-Ning Freeway Soft Ground. China Journal of Highway Transport, 1994, 7(Suppl. 1): 2~3.
- [2] 蔡荣, 梁媛, 隋旺华, 蔡振. 离心模型试验概述及其在煤矿开采中的应用探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 193~196.
Cai Rong, Liang Yuang, Sui wanghua, Cai Zhen. Brief of centrifugal model test and its application to coal mine. Journal of engineering geology, 2003, 11(2): 193~196.
- [3] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1~3.
Bao Chenggang, Rao Xibao. Principle of the Geotechnical Centrifuge Model Test. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1~3.
- [4] 吴邦颖, 张师德, 陈绪禄. 软土地基处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999, 230~243.
Wu Bangyin, Zhang Side, Chen Xulu. Disposal of Soft Foundation. Beijing: Press of Chinese Railway, 1999, 230~243.