

文章编号: 1002-0268 (2006) 11-0015-04

粉喷桩复合地基沉降的数值模拟研究

张庆松¹, 刘松玉², 李术才¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 软弱路基在路堤填筑过程中的沉降规律是高速公路建设中非常关心的问题, 应用有限元数值方法, 研究了粉喷桩复合地基在填土过程中沉降的动态过程, 揭示了孔隙水压力在施工过程中的增长消散规律, 计算得到了复合地基桩土应力比。

关键词: 复合地基; 路基沉降; 超孔隙水压力; 数值模拟

中图分类号: U416.1⁺6

文献标识码: A

Numerical Simulation Study on Settlement of Dry Mixing Pile Composite Foundation

ZHANG Qing-song¹, LIU Song-yu², LI Shu-cai¹

(1. The Research Center of Geotechnical Engineering, Shandong University, Shandong Jinan 250061, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

Abstract: Numerical simulation method is used to study the dynamic settlement process of dry mixing pile composite foundation during the construction of road foundation. Excess pore water pressure and consolidation settlement of soft soil foundation are analyzed with permeation flow analysis module and strain analysis module. Stress ratio of pile to soil of composite foundation is obtained to indicate the consolidation settlement and its process pattern.

Key words: composite foundation; roadbed Settlement; excess pore water pressure; numerical simulation

0 引言

软土是泛指天然含水量高、孔隙比大、透水性差、压缩性高、抗剪强度低的软弱土层。在软土地基上修筑路基, 若不加处理, 往往会发生路基失稳或过量沉降, 导致路基病害的产生, 继而影响路基的稳定和道路正常运行。因此, 开展软土地基的研究对我国高等级公路的建设有着十分重要的意义。

近年来, 粉喷桩复合地基方法在公路软基处理中得到了较为广泛的应用, 而粉喷桩复合地基的沉降预测计算是高速公路建设中非常关心的问题。现行公路软基规范中推荐的软土路基沉降计算方法在工程实用中取值较为困难; 其次, 分层总和法的固结计算依据

的是太沙基一维固结理论, 实际上土体水平向渗流对固结的影响也是不可忽视的。而有限元法不仅可以考虑土体应力应变的非线性特征, 而且可以考虑侧向变形和水平向渗流对固结沉降的影响。利用有限元法进行数值模拟分析, 再与理论公式配合使用, 可以对软土沉降作出较为准确的判断, 这也是有限元法近年来得到较快发展的原因^[1]。

1 固结沉降的计算方法

用有限元法分析土体的固结沉降通过应力和渗流的耦合来实现, 用应力分析模块计算应力和位移, 用渗流分析模块计算孔隙水压力, 当两者耦合时, 形成统一的总刚矩阵, 有限元网格中的每一个节点由 3 个

收稿日期: 2005-04-22

作者简介: 张庆松 (1970—), 男, 山东费县人, 博士, 副教授, 研究方向为隧道与地下工程. (zhangqingsong@sdu.edu.cn)

方程来描述, 其中前 2 个是位移平衡方程, 第 3 个是连续流方程。求解这 3 个方程就可以得到应力、位移和孔隙水压力^[4]。

在应力分析中, 有限元平衡方程通过虚功原理得到, 即

$$\sum [B]^T [D] [B] \{\Delta \delta\} + \sum [B]^T [D] \{m_H\} \{N\} \{\Delta u_w\} = \sum F。$$

(1)

流体运动方程可根据孔隙水压力和体积应变由虚功原理得到, 即

$$\beta [L_f] \{\Delta \delta\} - \left[\frac{\Delta \gamma}{\gamma_w} [K_f] + \omega [M_N] \right] \{\Delta u_w\} = \Delta t \left[\{Q\} \right]_{t+\Delta t} \frac{1}{\gamma_w} [K_f] \{u_w\} \Big|_t,$$

(2)

式中, $[B]$ 为梯度矩阵; $[D]$ 为弹性矩阵; $\{N\}$ 为形函数矩阵; F 为外力矩阵; m_H 为非饱和土压缩系数; β 、 ω 为孔压系数; $[L_f]$ 为流量耦合矩阵; Δt 为时间增量; γ_w 为水的容重; $\{Q\}$ 为边界节点的流量矩阵; $[K_f]$ 为单元刚度矩阵; $[K_w]$ 为渗透系数矩阵; $\{\Delta \delta\}$ 为增量位移矢量; $\{\Delta u_w\}$ 为增量孔压矢量; $[M_N]$ 为质量矩阵。

当进行固结分析时, 所有的应力和位移边界条件都在应力计算模块中定义, 所有的渗流边界条件, 如水头、流量等都在渗流计算模块中定义, 根据模型和边界条件就可进行固结耦合分析。

2 工程概况

某高速公路软土段位于古泻湖平原区, 试验段内土层主要可分为 3 层, 分别为灰黄~黄褐色亚粘土, 层厚 1.5~2.0 m; 灰~灰黑色淤泥质亚粘土, 层厚 8.8~10 m; 灰~灰绿色亚粘土, 可塑, 未揭穿。该段软土的力学性质极差, 软土厚 10~12 m, 软土最大含水量为 86.4%, 最大孔隙比达 2.12。因此, 给地基处理来了巨大难题。

根据现场实际情况, 确定采用粉喷桩处理该段软土地基, 处理宽度 39.55 m, 粉喷桩桩长 13.0 m, 桩间距 1.5 m, 桩径 0.5 m, 梅花形布置, 每米喷灰量约为 75 kg。施工试验段首先进行碎石垫层施工, 然后填筑第 1 层土, 120 d 后第 12 层土填筑完毕, 每层填土厚度约为 20 cm, 为了指导路基填筑施工, 需要了解整个填土过程中的路基沉降规律, 为此进行了现场沉降观测和有限元数值模拟。

3 计算模型和计算参数

为了较为准确地模拟整个施工过程和施工结束后

路基的沉降情况, 必须建立合适的计算模型。由于高速公路的条形带状特征, 假定路基只有竖向和侧向的变形, 而无纵向变形, 可以用平面应变问题来模拟, 固结计算中孔隙水压力的增长消散规律按二维渗流问题来处理。

材料的应力应变关系: 桩体采用线弹性材料, 软土层采用邓肯-张非线性弹性材料, 硬壳层、持力层和填土采用线弹性材料, 碎石垫层采用理想弹塑性材料, 为了简化计算, 将桩简化成桩墙, 但对其参数采用加权计算进行了折减, 同时认为桩的存在不影响地基的渗透和固结。

由于桩和桩间土的模量相差较大, 采用薄层单元模拟桩土界面, 用参数压缩刚度 K_{normal} 和剪切刚度 K_{shear} 来描述其特性, K_{normal} 通常设置较大的值, 以模拟垂直层面的小压缩性, K_{shear} 一般设置较小的值, 以模拟桩土之间沿层面的滑动。计算时界面单元的应力和孔隙水压力从相邻单元获得^[3~8]。

由于路基对称性的特点, 取路堤地基的一半进行分析, 基础中心线为对称轴, 左侧边界为路基的中心线, 右侧模型边界距中心线 50 m, 模型中桩长 13 m, 桩间距为 1.5 m。

图 1 为计算模型网格划分图, 表 1 为计算参数。计算参数的选取是通过初期沉降资料的反分析和实验室测试值综合确定的。

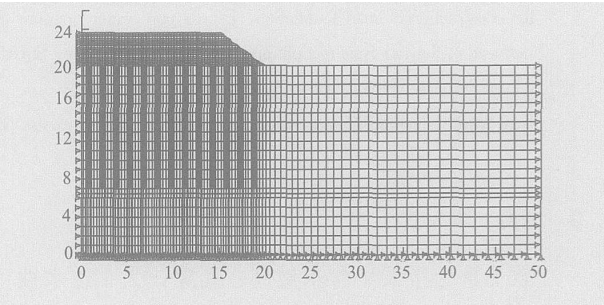


图 1 计算模型网格划分图

Fig 1 Mesh of the mathematical model

表 1 岩石力学计算参数表

Tab 1 Rock mechanics parameter for FEM calculation

材料名称	力学参数
硬壳层	$E=10\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.32$
软土层	$C=4\text{ kPa}$, $\varphi=23^\circ$, $R_f=0.8$, $K=80$, $n=0.8$, $G=0.17$
	$F=0.1$, $E=2\,000\text{ kPa}$, $k=2.16\text{e-}5\text{ m/d}$
持力层	$E=20\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.30$
粉喷桩	$E=70\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.25$
桩土界面	$K_{normal}=2\,000\text{ kPa}$, $K_{shear}=100\text{ kPa}$
碎石垫层	$E=10\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.32$, $C=2$, $\varphi=30^\circ$
填土	$E=5\,000\text{ kPa}$, $\mu=0.28$

4 计算结果与分析

4.1 沉降随时间（填土高度）的变化规律

图 2~图 4 为不同填土高度的路基沉降曲线图,横坐标表示距路基中心线的距离, 纵坐标为沉降值,单位为 m。

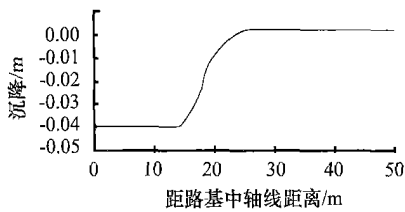


图 2 累计填土高度为1.8 m 时的路基沉降曲线

Fig 2 Roadbed settlement curve of accumulated filling height 1.8 m

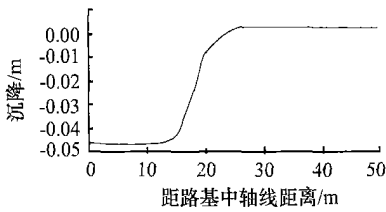


图 3 累计填土高度为2.2 m 时的路基沉降曲线

Fig 3 Roadbed settlement curve of accumulated filling height 2.2 m

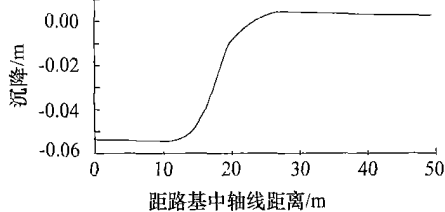


图 4 累计填土高度为2.6 m 时的路基沉降曲线

Fig 4 Roadbed settlement curve of accumulated filling height 2.6 m

从图 2 可以看出, 自路基中轴线向两侧, 沉降逐渐减小, 实测此时的沉降值为左: 40 mm; 中: 43 mm; 右: 38 mm。计算值与实测值较为接近。从图 2 也可以看出, 坡角向外的路基表现为向上隆起, 隆起值随着远离坡角而逐渐减小。

图 5 为路基中心线处沉降随时间的变化曲线, 可见随着时间的增加, 即填土高度的增加, 沉降量逐渐增大, 其中沉降的一部分为瞬时加载沉降, 另一部分为固结沉降, 沉降曲线呈现明显的折线状, 即加载后发生瞬时沉降, 在下次加载前发生固结沉降, 如此反复, 沉降量不断增大。

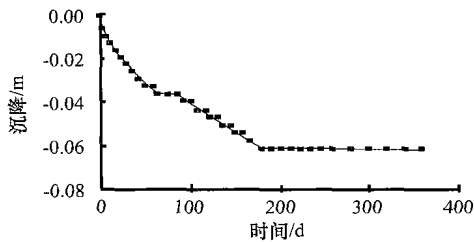


图 5 路基顶面沉降随时间的变化曲线

Fig 5 The settlement of top foundation vs time

当停止加载（填土）后, 随着土体固结的逐渐完成, 沉降曲线慢慢变缓, 并趋于稳定, 从图 5 可以看出大约在 200 d 后, 沉降曲线逐渐变缓, 说明沉降速率逐渐变小, 路基向稳定方向发展。

由计算结果还可看出, 应用粉喷桩处理的路基, 沉降主要发生在加载（填土）阶段, 加载结束后的固结沉降所占的比重较小。

表 2 为填土高度与沉降量统计表, 从表 2 中可以看出, 计算值与实测值较为接近, 说明只要计算模型和计算参数选取得当, 用有限元方法计算路基沉降过

程是可行的。

表 2 填土高度与沉降量统计表
Tab. 2 Statistics of filling height and settlement

填土高度/m		1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	最终沉降
计算沉降/mm	中	40	44	47	51	54	62
	右	37	40	43	46	48	52
实测沉降值/mm	中	43	46	48	51	55	65
	右	38	40	44	47	50	54

4.2 施工过程中的孔隙水压力变化规律

图 6、图 7 为 5、10 m 深处超孔隙水压力在施工过程中的变化曲线。其中横坐标为施工时间, 代表不同的填土高度。由超孔压曲线可以看出: 当施工每层填土时, 深部的孔隙水压力会因加载而升高, 在两次填土的间隔时间内, 孔隙水压力因为土体发生固结而下降, 当施工下一次填土时, 孔压又升高。整个孔压变化曲线呈波浪状, 全部填土施工结束后, 土体在上覆荷载作用下继续固结, 孔压随时间增加而下降, 直至固结完成。由于每次填土厚度较小, 所以产生的超孔压也较小, 超孔压随深度的增加而增加。

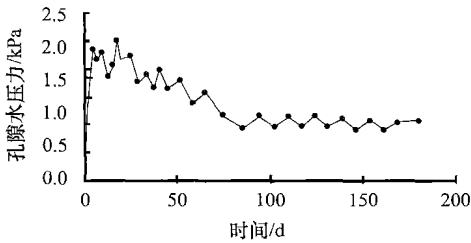


图 6 深度5 m处超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig 6 Excess bore water pressure at the depth of 5 m vs time

4.3 复合地基桩土应力比分析

复合地基的承载力取决于桩和土的承载能力和分担荷载的比例, 在路堤填筑的整个过程中, 由于上部

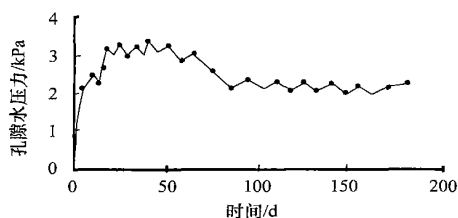


图7 深度10 m处超孔隙水压力随时间的变化曲线

Fig 7 Excess pore water pressure at the depth of 10 m vs time

荷载的改变和桩土应力状态的变化,复合地基的工作状态也是在不断改变的。图8为填土过程中桩顶和桩间土应力变化曲线,该曲线取自从路基中心线算起的第5根桩和桩间土。经查看计算结果,除了坡角处外,其他桩和桩间土的应力分布发展规律和量值基本相似,可以由此计算桩土应力比。

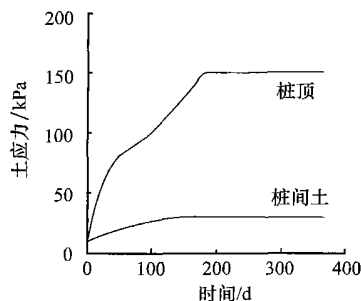


图8 施工过程中桩顶和桩间土应力变化曲线

Fig 8 Variation of stress of pile top and soil during construction

图9为桩土应力比随时间(填土高度)的变化曲线。据此可以分析整个施工过程中复合地基工作状态的变化。

从图9可以看出,初始时桩土应力比为1,说明初次加载的瞬间,桩和土共同承载且发挥着相同的作用。在填土的初期,桩土应力比较小,说明复合地基中桩和土都发挥着主要承载作用,随着填土高度的增加,桩土应力比逐渐增加,当填土施工完毕后,桩土应力比达到一个相对稳定的数值,从计算结果看,其大小约为4.7,与静载试验得到的数值较为接近。

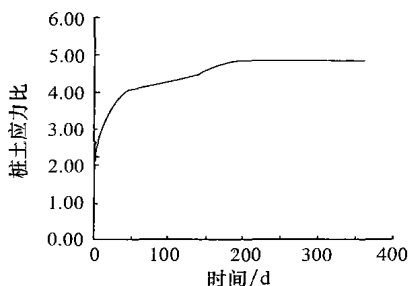


图9 桩土应力比随时间的变化曲线

Fig 9 Stress ratio of pile to soil vs time

5 结论

(1) 数值分析方法可以较好地模拟路基填筑过程中的沉降固结规律,但计算模型与参数的选取非常重要,计算时不但要考虑土体的非线性特征,还要考虑桩土的相互作用,计算参数应该根据实验室测试值和初期填土沉降资料反算得到。

(2) 用粉喷桩处理的软土地基,其沉降主要发生在填土阶段,采用合适的粉喷桩施工参数,路基的总体沉降值也较小,可以满足软基沉降控制的要求。

(3) 施工过程中孔隙水压力的变化规律较好地反映了填土施工过程和软基固结过程。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 高等土力学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 宋修广, 郭宗杰, 刘金章. 粉喷桩复合地基的数值计算分析 [J]. 岩土力学, 2002, 23 (4): 494—497.
- [4] 曾远, 周瑞忠. 高速公路复合地基非线性有限元分析 [J]. 福州大学学报, 2003, 31 (2): 206—210.
- [5] 杨新安, 程军, 等. 粉喷桩加固复合地基数值模拟研究 [J]. 铁道学报, 2000, (增刊): 11—14.
- [6] 殷宗泽, 朱泓, 等. 沪宁高速公路地基沉降有限元计算分析 [J]. 水利水电科技进展, 1998, 18 (2): 22—26.
- [7] 陈建峰, 石振明, 沈明荣. 宽路堤软土路基沉降的有限元模拟 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (4): 23—25.
- [8] 刘国明, 周军. 路堤软土地基沉降有限元非线性分析 [J]. 福州大学学报, 2003, 31 (4): 472—473.