

二灰土桩复合地基三维固结有限元分析

Consolidation analysis of composite ground with lime-flyash columns by 3D FEM

徐洋¹, 谢康和¹, 卢廷浩²

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

中图分类号: TU 472. 32 文献标识码: A 文章编号: 1000- 4548(2002) 02- 0254- 03

作者简介: 徐洋(1976-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事软黏土力学和地基处理等方面的研究。

1 前言*

随着我国经济的快速发展, 高速公路被大量新建, 其中不少须建在强度低、压缩性高的软土地基上。由于复合地基变形较小, 承载力较高且造价经济, 非常适合软土地基高速公路等需要大面积处理的情况, 因此得到日益广泛的应用。

复合地基中的桩体不仅能减少地基变形, 而且当桩体的渗透系数较大时, 还有利于地基的固结, 即加快孔压的消散和变形的发展。对于复杂的地质条件, 如软土层很厚、桩端未放在持力层上时, 解析法将无能为力, 只能借助于数值分析方法。对于路基等群桩基础, 通常把桩体简化为连续墙后用二维固结有限元法来进行分析^[1], 但由于桩体的渗透系数、刚度的折算问题还没有得到很好的解决而带来较大的误差。毫无疑问, 三维固结有限元能更好地考虑实际情况, 因而是复合地基固结分析的最佳方法, 其缺点是计算工作量太大。

本文将 PDSS 法与 Duncan-Chang 非线性弹性模型相结合, 通过工程实例与二维固结有限元法进行了对比, 并且分析了二灰土桩复合地基的变形和固结性状。

2 计算方法

Duncan-Chang 双曲线模型能较好地反映土体的非线性弹性且所需参数可以通过常规三轴试验取得, 因此使用此模型^[2]。PDSS 是平面变形、空间渗流 (plane deformation, spatial seepage) 的缩写, 最早是谢康和针对砂井地基固结提出的^[3,4]。对于路基, 沿荷载长度方向位移近似为零, 因而地基的变形可看作平面应变, 同时由于桩体的存在, 地基中的渗流属于空间问题, 因此本文将复合地基也视为 PDSS 问题, 这样即满足现场实际条件和计算精度的要求, 又利用对称性大大减小了计算规模。

3 实例分析

3.1 工程概况

宁通一级公路南通段全长 38 km, 其中有约 20 km 长的路段处于软基上需进行处理, 根据对比分析最终采用石灰: 粉煤灰: 土= 1: 4. 5: 4. 5 的二灰土桩复合地基加固法, 桩径 0. 55 m, 桩长 6 m, 桩距 2m, 三角形布桩。现场对典型断面 k102+ 990 的分层沉降及孔隙水压力进行了实测。断面各土层主要力学性质参数及测点的布置分别如表 1、图 1 所示。图 1 中 S、P 分别表示沉降环、孔压计, 数字 1~ 4 表示土层序号, 其中路堤顶宽 24. 5 m, 填土高度 5 m, 测点 S5、P1、P6 的埋深分别为 0. 3、10. 5 和 30. 8 m。

表 1 土性参数表

Table 1 The main engineering properties of soil

土层序号	层厚 / m	w / %	I_p	a_v / MPa^{-1}	k_v / $(10^{-5} cm \cdot s^{-1})$	k_h / $(10^{-5} cm \cdot s^{-1})$
1	2.9	31.9	13.0	0.37	1.54	0.335
2	10.1	45.0	14.0	0.96	6.10	2.10
3	15.4	30.1	10.6	0.20	34.40	5.07
4	33.7	9.8	0.28	11.80		2.34
桩体					0.0428	0.0428

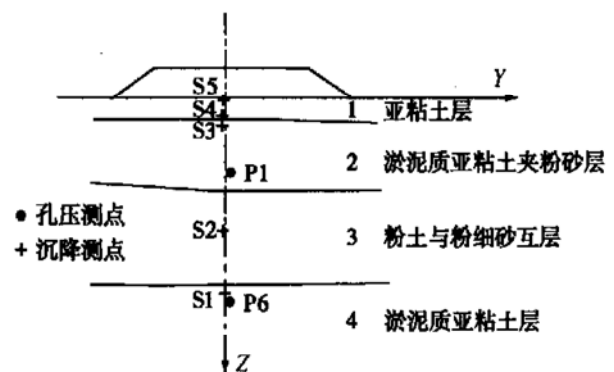


图 1 测点布置图

Fig. 1 Location of measuring points

* 收稿日期: 2001- 09- 15

3.2 计算参数

各土层和桩体的 Duncan-Chang 参数如表 2 所示。对于桩体, Duncan-Chang 参数是随龄期变化的, 经有限元分析^[5], 若不考虑时间效应, 可以取 5 个月龄期时的试验数据。

表 2 邓肯-张模型参数表

Table 2 Parameters of Duncan-Chang model

土层 序号	$\gamma(\gamma')$ / (kN·m ⁻³)	φ / (°)	c / kPa	R_f	K	n
1	7.44	36.0	0.0	0.72	93.9	0.55
2	8.03	34.0	8.8	0.81	115.7	0.69
3	8.43	36.5	28.0	0.63	180.0	0.75
4	7.64	31.8	45.0	0.80	104.9	0.78
桩体	6.90	36.0	134.0	0.48	979.0	0.15

3.3 结果分析

图 2 为地基表面沉降与时间的关系曲线。图 3 和图 4 分别表示 P1、P6 测点(见图 1)的孔隙水压力与时间的关系曲线。从图中可以看出, 二维有限元法和 PDSS 有限元法均能反映沉降和孔隙水压力随时间的变化趋势, 但 PDSS 有限元法计算结果更接近实测结果, 更能反映孔压峰值的大小。

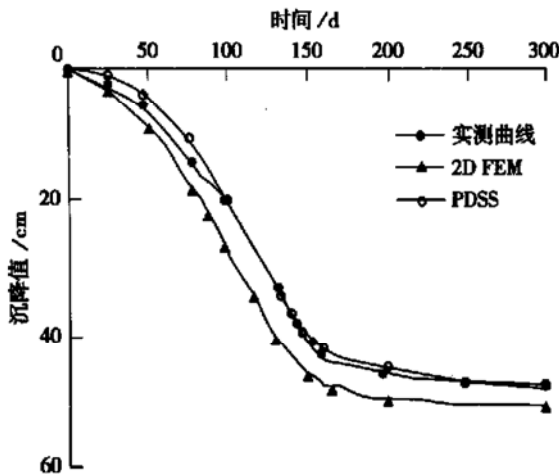


图 2 S5 测点沉降与时间关系曲线

Fig. 2 The curves of settlement with time (S5)

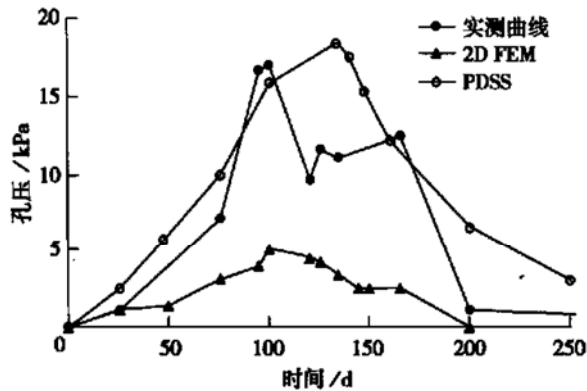


图 3 P1 测点孔压与时间关系曲线

Fig. 3 The curves of pore water pressure with time (P1)

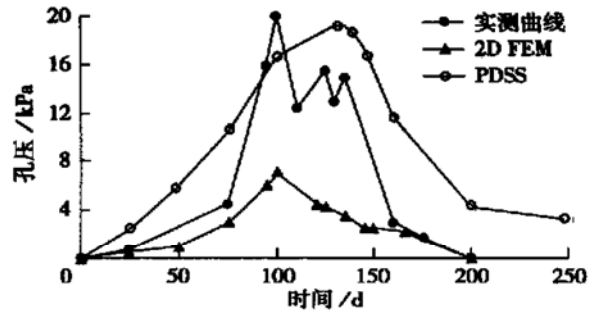


图 4 P6 测点孔压与时间关系曲线

Fig. 4 The curves of pore water pressure with time (P6)

4 复合地基三维变形和固结特性分析

仍然采用该工程实例作为算例, 对二灰土桩复合地基的三维变形和固结特性进行分析。

4.1 二灰土桩复合地基变形特性

图 5 中的曲线对应不同桩体刚度和不同地基深度时的沉降, 其具体工况如表 3 所示。从图 5 中可以看出: 对于二灰土桩、粉喷桩、搅拌桩等桩体刚度介于混凝土桩和散体材料桩之间的半刚性桩复合地基, 减少地基沉降的机理在于减少加固层的沉降, 同时由于应力扩散作用使下卧层的沉降也略有减小。当桩体刚度增加时, 下卧层的沉降值基本保持不变, 而地表的总沉降不断减少, 且桩顶的沉降较桩间土为小, 桩端沉降较桩间土为大, 说明桩体会产生向路基和下卧层的刺入, 图中计算所得桩顶刺入量和实测值相当吻合。

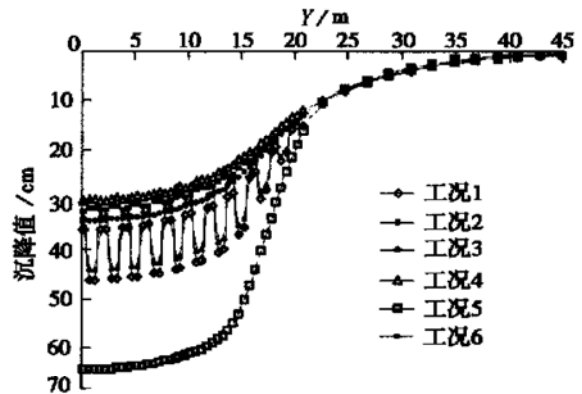


图 5 不同工况条件下地基沉降分布曲线

Fig. 5 Distribution of settlement for different cases

表 3 与图 5 相对应的不同工况

Table 3 Different cases corresponding to Fig. 5

工况	邓肯-张模型 参数 K	计算点	
		深度/m	时间/d
1	桩体刚度: 979	0.0	250
2	桩体刚度: 979	6.0	250
3	桩体刚度: 2 × 979	0.0	250
4	桩体刚度: 2 × 979	6.0	250
5	天然地基	0.0	250
6	天然地基	6.0	250

4.2 二灰土桩复合地基固结特性

文中固结度定义如下:

$$U_t = \frac{S_t}{S} \quad (1)$$

式中 U_t 是某一土层 t 时刻的固结度; S_t 为该土层 t 时刻的沉降量; S 为该土层的最终沉降量。

图6对应的是 $t = 250 \text{ d}$ 、 $Z = 13 \text{ m}$ 时复合地基和天然地基固结度沿 Y 方向的变化曲线,此曲线从固结度上反映了复合地基对加速地基固结的作用。由于桩体渗透系数远小于地基土渗透系数,因此其加速地基固结的机理不同于砂井的排水作用,而是因为桩体的存在产生应力集中效应,使得加固区内土体的附加应力减小,下卧层和加固层间的孔隙水压力差增大,从而加速了下卧层孔压的消散。

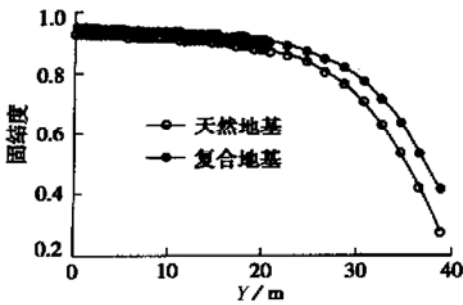


图6 固结度沿 Y 方向的分布曲线

Fig. 6 The curve of consolidation degree along Y direction

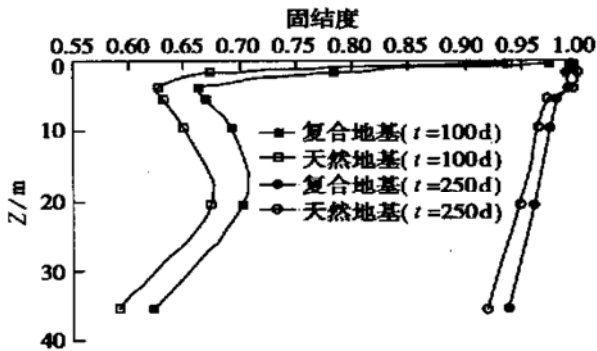


图7 固结度沿 Z 方向的分布曲线

Fig. 7 The curve of consolidation degree along depth

图7对应的是 $Y = 0 \text{ m}$ 时复合地基和天然地基在不同时刻固结度沿 Z 方向的变化曲线。从此曲线可

以看出:在加荷初期,复合地基由于应力的重分布而加速了地基土体的固结,加荷结束后随着时间的增长,下卧层和加固层间水压力差逐渐减小,复合地基和天然地基固结度的差距也不断缩小,并且由于天然地基地表的排水面大于复合地基而出现前者固结度大于后者的现象。可以预计,这种现象随着时间的延长而更加明显。

5 结 论

(1) 二维有限元分析中由于桩体简化为连续墙时桩体的渗透系数、刚度的折算问题还没有得到很好的解决而带来较大的误差,尤其是当需要计算孔隙水压力变化时,则应该用三维有限元。PDSS法既能使计算结果很好地和实际相吻合,又大大减少了真三维有限元的计算工作量,有很大的实用价值。

(2) 复合地基可以有效减少地基的沉降,其机理在于减少加固层的压缩量,对于半刚性桩复合地基由于应力扩散效应,下卧层压缩量也有微小的减少,但不占主要部分;当基础为柔性时桩体会产生向下和向上的刺入效应;复合地基桩体的渗透系数虽然小于地基土体的渗透系数,但由于其附加应力的重分布作用反而加快了地基的固结。因此,砂井和复合地基加速地基固结的机理是不同的。

参考文献:

- [1] Cheung Y K, Lee P P K, Xie K H. Some remarks on two and three dimensional consolidation analysis of sand-drained ground [J]. Computers and Geotechnics, 1991, 12: 73- 87.
- [2] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. J SMFD, ASCE, 1970, 96(5): 1629- 1653.
- [3] 谢康和. 砂井地基固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987. 111- 133.
- [4] Xie K H, Pan Q Y, Zeng G X, et al. Prediction versus performance on the behavior of soft clay ground improved by vertical drains[A]. Proc of Symposium on Versus Performance in Geotechnical Engrg[C]. Rotterdam: Balkema, 1993. 105- 113.
- [5] 杨 涛. 复合地基沉降计算理论、位移反分析模型和二灰土桩软基加固试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1997. 66- 91.