

搅拌桩复合地基简化数值计算 等效土体参数确定方法

邓永锋, 刘松玉

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘要: 水泥土搅拌桩是目前常用的一种地基处理方法,在高速公路工程的地基处理中得到广泛应用。为了进一步了解在荷载作用下地基变形以及地基内部受力等规律,一般要进行有限元或者有限差分的数值计算。如果直接采用三维的有限元进行模拟,则实现较为困难或者容易造成计算量过大等问题,为此一般简化为二维的平面问题进行分析。本文针对上述问题,总结了目前常用的几种简化方法,并采用实例计算对比分析了计算结果与实测结果之间的差异。结果表明对于该算例,修正复合模量法和桩土分算的计算模式得到的沉降较为相近,而传统的复合模量法计算得到的沉降较小,但总体而言三种方法计算得到的沉降与实测沉降均较为接近。

关键词: 水泥土搅拌桩;数值计算;简化模式;复合模量法;修正复合模量法;桩土分算模式

作者简介: 邓永锋(1978—),男,福建清流人,东南大学讲师,从事地基处理与土体工程性质学研究。

0 引言

水泥土搅拌桩是目前广泛应用于软土地基处理的一种地基处理方法,该方法在我国东部、南部等省份的软土地基处置中得到大量的应用。为了进一步了解在荷载作用下地基变形以及地基内部受力等规律,一般要进行有限元或者有限差分的数值计算。以路堤工程为例,由于在实际工程中,搅拌桩的数量较多,并且桩土交替出现,如果直接采用桩和单元各自建立单元的方法进行计算将导致网格和节点数据众多,并且单元之间大小差异较大,极易导致总刚矩阵奇异,很难实现模拟计算同时,计算速度较慢并且可能导致计算的不收敛。为此在进行数值模拟中,在能够忽略次要影响因素前提下,一般采用等效简化的方法,即将搅拌桩地基局部或者整体简化为复合土层,从而将三维空间问题简化为二维平面问题进行分析。

本文首先总结已有路堤荷载作用下搅拌桩地基三维简化为二维平面计算的方法,进而对传统的复合地基加固区整体等效简化的方法进行优化探讨,在此基础上进行实例分析,对比各种方法平面模拟结果与实测数据之间的差异,探讨可靠的简化方法。

1 常用的简化计算模式介绍

公路工程中软土地基经水泥土搅拌桩处理后形成的复合地基如图1所示,即在地基中采用柱状加固的形式。该图也可以进一步看出,采用柱状加固形式(目前搅拌桩设计的间距一般为1.1~1.5 m)时,即使按单排计算,搅拌桩数量仍非常多。进行数值计算时,如果考虑流固耦合,则不仅编程复杂,而且计算更加复杂。为此一般要简化为平面问题进行简化计算。

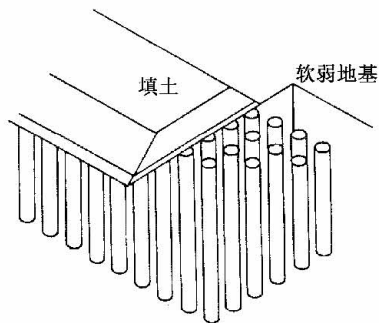


图1 公路工程中搅拌桩常见的部桩形式

目前常用的简化方法主要有以下两类:

第一类(加固区整体简化):将搅拌桩作为一个均质的加固区进行考虑,按复合地基理论计算

得到加固区的复合模量 E_{sp} 和渗透系数 k_{sp} , 如图 2 所示^[1, 2]。

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s \quad (1)$$

$$k_{sp} = mk_p + (1 - m)k_s \quad (2)$$

式中, E_{sp} 为加固区的复合模量; E_s 为软土地基的模量; E_p 为搅拌桩桩身模量; m 为面积置换率; k_{sp} 为加固区的复合渗透系数; k_s 为软土地基的渗透系数; k_p 为搅拌桩桩身的渗透系数。

大量的研究表明搅拌桩桩身的渗透系数 k_p 比桩间土渗透系数小 1~2 个数量级, 同时我国目前公路上搅拌桩处理的面积置换率一般不超过 20%, 对复合渗透系数贡献较小, 为此可以将式 (2), 进一步简化。

$$k_{sp} = (1 - m)k_s \quad (3)$$

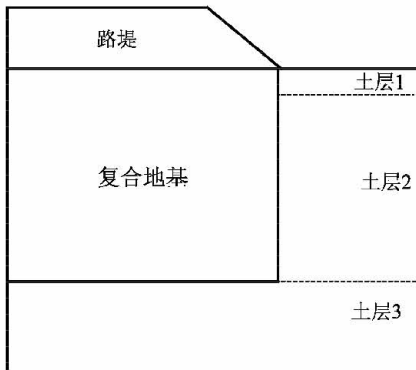


图 2 复合地基整体简化计算方法

第二类(加固区桩土条带分算简化方法): 将搅拌桩地基简化为桩条带和土的条带共同组成的地基进行计算, 即沿公路走线方向搅拌桩加固地基是桩条带和桩间土条带(图 3 和图 4)^[3], 采用该模式将三维搅拌桩地基简化为平面模式进行计算。采用该模式进行计算能够得到搅拌桩地基桩间土沉降和桩身沉降, 可以进一步研究搅拌桩地基在路堤等柔性荷载作用下桩和桩间土的差异变形特性。采用该模式进行简化计算时, 桩间土条带参数按地基土的参数进行选取, 而桩条带的参数(包括等效模量和等效渗透系数, 在面积置换率较小并且搅拌桩渗透系数比桩周土渗透系数小 1~2 个数量级时, 不考虑搅拌桩桩身的渗透, 桩身直径为 0.5 m)按下式进行近似确定:

$$E_{sp} = \frac{E_p}{2d} + \frac{(2d - 1)E_s}{2d} \quad (4)$$

$$k_{sp} = \left(1 - \frac{1}{2d}k_s\right) \quad (5)$$

式中, d 为搅拌桩的桩间距。

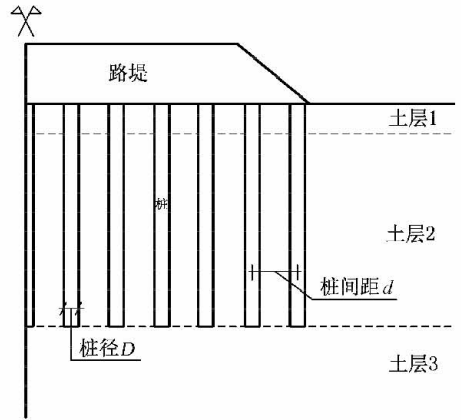


图 3 桩土条带分开的平面简化方法

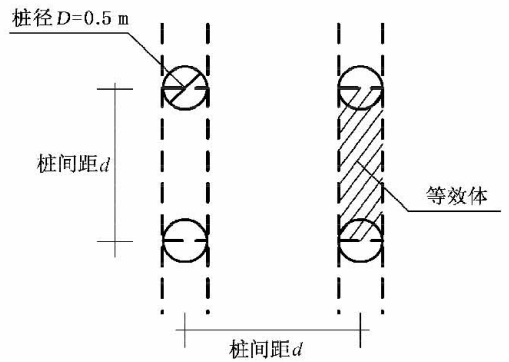


图 4 桩身模量折减模式

2 加固区整体简化模式优化

文献研究表明, 传统的加固区整体简化模式模拟地基在路堤荷载作用下计算得到变形与实测沉降有一定的误差, 《高速公路软土地基过渡段处置技术研究》对加固区整体简化模式进行了优化探讨^[4]。具体做法为根据某一具体试验段的典型工程地质情况和填筑过程, 分别计算三维与按加固区整体简化计算的沉降和孔隙水压力, 对比两者误差。然后在加固区整体简化计算模式中增加修正系数 α 调整, 如表达式 (6) 和式 (7) 所示。通过大量不同桩间距的工况和修正系数 α 计算, 分析三维和二维平面的地基沉降和孔隙水压力。不同工况时, 如对于某一 α 平面计算得到孔压和沉降均与三维计算得到的计算结果吻合, 则表明该 α 为加固区整体简化优化系数。

$$E_{sp} = \sigma[mE_p + (1 - m)E_s] \quad (6)$$

$$k_{sp} = \alpha[mk_p + (1 - m)k_s] \quad (7)$$

计算参数如表 1 所示。

表 1 各层计算参数

	厚度 (m)	密度 (kg·m ⁻³)	k (10 ⁻⁷ m·s ⁻¹)	E _s (MPa)	μ
路堤	5.0	2 100		27.20	0.33
硬壳层	1.5	1 910	1.20	4.89	0.33
软土层	8.0	1 850	1.03	3.40	0.33
硬土层	21.0	1 996	0.32	9.91	0.33
搅拌桩	10.0	2 000			0.33

根据表 1 典型的地质参数和搅拌桩参数计算结果表明,当折减系数 α 为 0.9 时,按加固区整体简化计算得到的沉降和孔压和三维计算得到的沉降和孔压均能较好地吻合。

为此传统的加固区整体简化法在进行简化计算时,应该进行优化以使计算结果与实测结果相吻合,优化方法为表达式(6)和(7),其中修正系数 α 取 0.9。

3 各种简化方法对比分析

为了对比验证上述三个简化模式的合理性,本文采用一个算例进行对比分析。算例来自连盐高速公路 K4+300~K4+350 路段,该路段土层剖面如图 5 所示,试验得到桩土参数见表 2,计算模型均采用弹性模型。

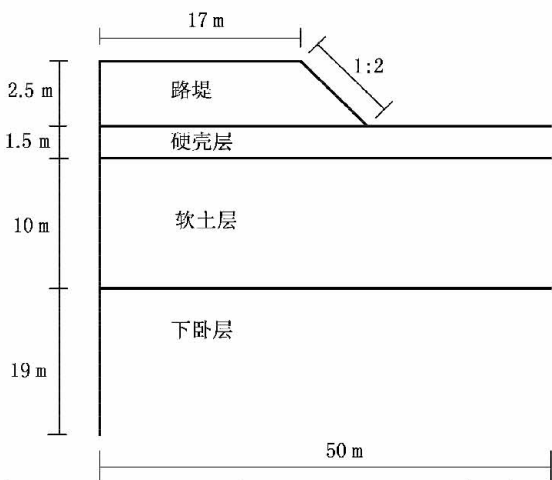


图 5 土层参数

计算中取桩长 10.5 m,桩径 0.5 m。每层填土厚度为 0.25 m,地下水位为距地表 0.25 m,填

土容重取 20 kN/m³。根据影响深度的确定原则(附加应力为自重应力的 0.1~0.2 倍),取地基的计算深度为 20 m。图 6 为该路段实际填筑曲线和计算时采用的填筑曲线,两者差异不大,计算中按计算曲线进行加载,图 6 为实测沉降与加固区按复合模量法、修正复合模量法和桩土分算的模式计算得到的路中沉降。

表 2 桩土计算参数

	厚度 (m)	密度 (kg·m ⁻³)	E _s (MPa)	k _x =k _y (10 ⁻³ m/d)
路堤	2.5	2 000	27.20	
硬壳层	1.5	18.0	3.0	9
软土层	10.0	17.5	1.5	0.4
下卧层	19.0	18.2	7.0	1.6
搅拌桩	11.5	1 800	200	—

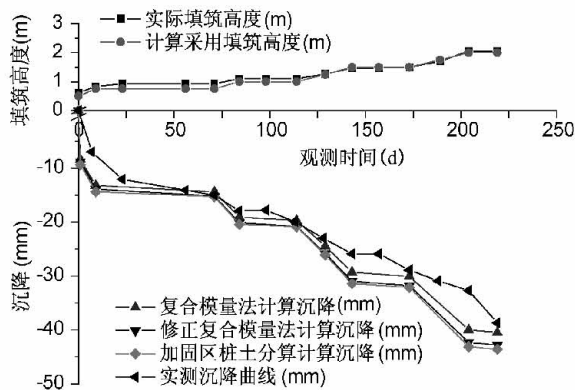


图 6 填土过程和沉降曲线

图 6 的沉降计算对比表明对于本算例工况,填筑高度较低,搅拌桩质量较好时,采用上述 3 种方法计算得到的结果与实测结果较为相近。其中,修正复合模量法计算结果与桩土分算计算得到的结果较为相近,而按传统复合模量法计算得到的沉降较上述两者小。

4 结论

水泥土搅拌桩是目前常用的一种地基处理方法,在高速公路工程的地基处理中得到广泛应用。为了进一步了解在荷载作用下地基变形以及地基内部受力等规律,一般要进行有限元或者有限差分的数值计算。如果直接采用三维的有限元进行模拟,则实现较为困难或者容易造成计算量过大等问题,为此一般简化为二维的平面问题分析。

本文针对上述问题,总结了目前常用的几种简化方法,并采用实例计算对比分析了计算结果与实测结果之间的差异。结果表明对于该算例,修正复合模量法和桩土分算的计算模式得到沉降较为相近,而传统的复合模量法计算得到的沉降较小,但总体而言三种方法计算得到的沉降均与实测沉降较为接近。

参 考 文 献

[1] 刘松玉. 公路地基处理[M]. 南京:东南大学出版社,2001.

- [2] 陈善民. 水泥搅拌复合地基的静、动力特性研究[D]. 浙江大学,2000.
- [3] 邓永锋,洪振舜,刘松玉. 水泥土搅拌桩复合地基三维问题平面模拟的简化方法探讨[J]. 岩土力学,2005, 26(Sup2).
- [4] 东南大学交通学院. 高速公路软土地基过渡段处置技术研究报告[R]. 东南大学,2007.