

水泥土搅拌法处置软土路基 双控优化设计方法

叶观宝¹, 吴家府², 高彦斌¹

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200092)

摘要: 提出了以置换率和桩长为优化变量, 以单位处理面积上水泥用量最少为优化目标的沉降和承载力双控制的水泥土搅拌法处置软土路基优化设计方法。文中简要介绍了该法的原理及思路, 并阐述了设计步骤, 最后通过实例验证该方法具有一定的实用参考价值。

关键词: 水泥土搅拌法; 软土路基; 沉降和承载力控制; 优化设计

作者简介: 叶观宝(1964—), 男, 安徽歙县人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理与测试技术研究。

0 引言

水泥土搅拌法用于加固饱和黏性土地基的一种有效方法, 在高速公路软基处理工程中已得到广泛的应用。但是迄今还没有明确的水泥土搅拌法处理高速公路软基优化设计方法, 传统的方法多以承载力或者沉降作为主要控制条件进行试算, 设计的效率很低。由于高速公路软基地质情况往往比较复杂, 不同地区软弱土层的厚度和力学性状等具有很大的差别; 另外, 从搅拌桩复合地基计算理论来看, 无论是在承载力控制中还是沉降控制中桩长和置换率都是相互影响的, 它们之间存在着耦合关系^[1, 2], 因此单独采用按承载力控制或者按沉降控制来设计, 可能会带来安全问题或者造成经济上的浪费。本文提出的沉降和承载力双控制的水泥土搅拌法处置软土路基优化设计方法, 不仅能够满足设计要求, 而且可以达到最经济的目标。

1 双控优化设计原理及思路

针对具体工法, 在保证加固效果的前提下, 能

使造价最低或用料最节省, 就可以认为是最优设计, 因而单位处理面积上水泥用量就是水泥土搅拌法优化设计的目标。设计变量选取那些对目标函数值影响较大, 而且为一般设计者不易掌握的设计参数, 作为优化过程中的设计变量; 而将另一些根据经验就可以解决, 或根据地质条件、施工条件等其他要求就能确定的设计参数作为已知变量。因而, 本文选取搅拌桩面积置换率、桩长为设计变量; 而将水泥标号、水灰比、桩径等作为设计已知变量。这样单位处理面积水泥用量(以下简称水泥用量)即可由置换率(m)和桩长(l)的乘积($m \times l$)唯一确定。

1.1 沉降控制

搅拌桩复合地基沉降 s 通常分为两部分: 加固区沉降 s_1 和下卧层沉降 s_2 。沉降计算中涉及的参数不仅包括桩长, 还跟置换率有关; 不同置换率下在满足沉降要求的桩长中必定存在一个最短桩长, 为了方便说明将其称为该置换率下“最佳桩长”。根据沉降控制可以得到不同置换率下最佳桩长, 进而得到沉降控制条件下置换率与水泥用量的对应关系。

作为设计方法的一部分, 作者编制了基于 VC 语言的水泥土搅拌桩复合地基沉降计算程序。程

序中沉降计算采用分层总和法,其中加固区范围内沉降计算用复合模量法,下卧层顶面附加应力采用当层法^[3];计算深度:根据规范要求,压缩层计算深度至附加应力值小于或等于自重应力的0.15倍处。填土荷载用梯形均布荷载传递公式^[4]。

1.2 承载力控制

搅拌桩复合地基承载力公式为

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (1)$$

式中, f_{spk} 为复合地基承载力特征值; m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值; A_p 为桩的截面积; β 为桩间土承载力折减系数; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值。

搅拌桩复合地基单桩竖向承载力由桩身强度和桩周土支撑力中较小值决定。

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (2)$$

$$R_a = u_p \bar{q}_s l + \alpha q_p A_p \quad (3)$$

式中, f_{cu} 为与搅拌桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7 mm 的立方体,也可采用边长为 50 mm 的立方体)在标准养护条件下 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值; η 为桩身强度折减系数; u_p 为桩的周长; \bar{q}_s 为桩间土的平均摩擦力; q_p 为桩端地基土未经修正的承载力特征值; α 为桩端天然地基土的承载力折减系数。

软土地区的水泥土桩,其桩身强度是有一定限制的,也就是说,水泥土桩从承载力角度,存在一有效桩长,单桩承载力在一定程度上并不随桩长的增加而增大。有效桩长可由式(2)与式(3)值相等确定如下:

$$l' = \frac{1}{\bar{q}_s u_p} (\eta f_{cu} A_p - \alpha A_p q_p) \quad (4)$$

(1) 当桩身强度低于桩周土支撑力所提供的强度值时,单桩承载力受桩身强度控制,不同桩长的单桩承载力相同。将桩身强度控制的单桩承载力代入复合地基承载力计算公式即可得到满足承载力要求的诸多置换率中的最小值,为了方便说明问题将其称为“最小置换率”。

$$m = \frac{f_{spk} - \beta f_{sk}}{\eta f_{cu} - \beta f_{sk}} \quad (5)$$

(2) 当桩身强度大于桩周土支撑力所提供的

强度值时,不同桩长的单桩承载力明显不同,此时复合地基承载力由置换率和桩长共同控制。进而得到复合地基承载力控制下置换率和水泥用量的关系表达式:

$$m \times l = \frac{A_p}{\bar{q}_s u_p} [f_{spk} - \beta f_{sk} - (\alpha q_p - \beta f_{sk})m] \quad (6)$$

1.3 沉降和承载力双控制优化设计思路

由于施工条件、机具的限制,目前水泥土搅拌桩(湿法)的最大处理深度一般为 22 m,因而施工限制桩长取 22 m^[5]。设计桩长不应超过施工限制桩长。综合考虑同时满足沉降控制和承载力控制要求的置换率和水泥用量关系,同时以施工限制桩长为界限范围,就可以得到在施工限制内既满足沉降和承载力要求同时又能使水泥用量最小的置换率和桩长组合。我们将其称为“最优设计置换率”和“最优设计桩长”。

2 双控优化设计步骤

该优化设计方法的主要步骤包括 4 个方面:①求沉降控制线;②求承载力控制线;③求施工限制线;④求双控下最优设计桩长和最优设计置换率。具体步骤如下:

(1) 计算初始置换率:输入设计条件,使用沉降计算程序(以下涉及沉降计算均用此程序),求出计算深度 H_j 。桩长取计算深度 H_j ,调整置换率来满足沉降条件,得到初始置换率。

(2) 计算最佳桩长:通过二分法逐步逼近求得某一置换率下刚好满足沉降条件时对应的桩长。

(3) 求取置换率和最佳桩长组合。确定置换率的变化范围,并求出对应的最佳桩长。

(4) 绘制 $m-m \times l$ 关系曲线。由步骤 3 可得满足沉降要求时最佳桩长下不同置换率和对应水泥用量($m \times l$ 值)关系曲线。为了方便说明问题,我们将此关系曲线称为“沉降控制线”。

(5) 计算有效桩长。

(6) 计算承载力控制时最小置换率。

(7) 求承载力控制时置换率与水泥用量关系的表达式。

(8) 以最小置换率为下限,绘制承载力控制下的 $m-m \times l$ 关系曲线,为了方便说明问题,将此关系曲线称为“承载力控制线”。

(9) 绘制桩长 $l=22$ m 时, $m-m \times l$ 关系曲

线。为了方便说明问题将此曲线称为“施工限制线”。

(10) 将沉降控制线、承载力控制线和施工限制线放到同一张图上进行分析,寻求最优设计桩长和最优设计置换率。

3 实例应用

3.1 基本假定

由于实际设计条件很复杂,为了突出对设计方法的研究,所以进行了一系列假定,并对设计条件简化处理。

基本假定:荷载大小以填土高度形式瞬时施加,预压期设为 0。通过总沉降量来进行沉降控制,沉降标准按一般路段的工后沉降标准取 300 mm。

3.2 设计条件

沉降控制设计条件包括以下几个方面:平均填土高度 H ,路堤顶面宽度为 B_1 ,路堤平均处理宽度为 B_2 ,水泥土搅拌桩桩身压缩模量 E_p 、软土压缩模量 E_s 、软土有效重度 γ' 、填土重度 γ'' 。参数取值如表 1 所示。

表 1 沉降控制设计条件已知参数取值表

H (m)	B_1 (m)	B_2 (m)	E_p (MPa)	E_s (MPa)	γ' (kN/m ³)	γ'' (kN/m ³)
4	26	42	90	3	8	20

承载力控制设计条件主要包括:复合地基承载力标准值 f_{spk} 、水泥土搅拌桩 90 d 无侧限抗压强度平均值 f_{cu} 、强度折减系数 η 、桩间土的平均摩擦力 \bar{q}_s 、桩端天然地基土的承载力标准值 q_p 、桩端天然地基土的承载力折减系数 α 、处理后桩间地基土承载力标准值 f_{sk} 、桩间土承载力折减系数 β 、搅拌桩直径 d 。参数取值如表 2 所示。

表 2 承载力控制设计条件已知参数取值表

f_{spk} (kPa)	f_{sk} (kPa)	β	α	\bar{q}_s (kPa)	q_p (kPa)	d (m)	f_{cu} (MPa)	η
80	50	0.5	0.25	5	150	0.5	1	0.3

3.3 设计过程

(1) 绘制沉降控制线

计算出初始置换率为 0.06,并求取置换率 m 为 0.06~0.48 时对应的置换率和最佳桩长组合,如表 3 所示。

表 3 置换率和最佳桩长组合表

置换率 m	最佳桩长 l (m)	沉降量 s (mm)	$m \times l$ 值(m)
0.06	26.5	297.6	1.590
0.12	17.5	293.0	2.100
0.18	14.0	294.1	2.520
0.24	12.0	298.1	2.880
0.30	11.5	279.5	3.450
0.36	10.0	281.4	3.600
0.42	9.0	277.3	3.780
0.48	8.5	295.0	4.080

根据表 3 数据,绘制沉降控制下 $m-m \times l$ 关系曲线,即沉降控制线,如图 1 所示。

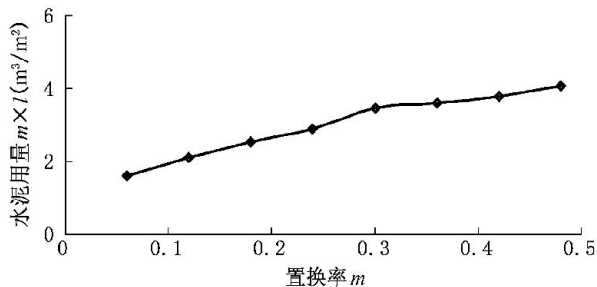


图 1 沉降控制线

(2) 求承载力控制线

计算有效桩长为 $l' = 6.56$ m;计算最小置换率为 $m = 0.20$;由下式代入已知参数可得承载力控制时 m 与 $m \times l$ 的关系式为

$$m \times l = -0.31m + 1.38 \quad (7)$$

以最小置换率为下限,绘制承载力控制下 $m-m \times l$ 关系曲线,即承载力控制线,如图 2 所示。

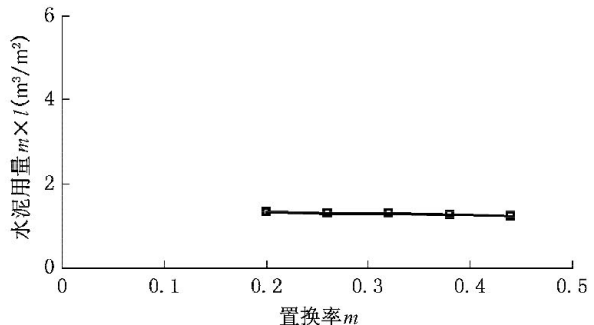


图 2 承载力控制线

(3) 求施工限制线

绘制桩长 $l=22$ m 时, $m-m \times l$ 关系曲线。如图 3 所示。

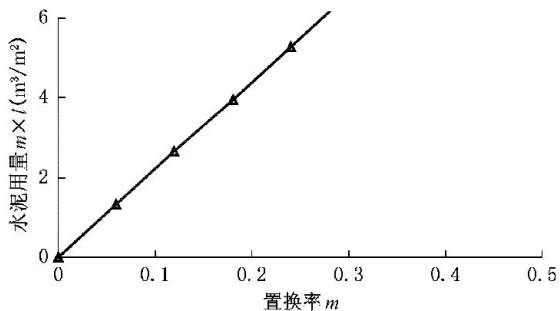
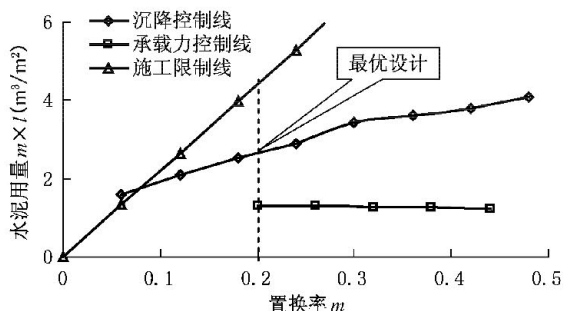


图3 施工限制线

(4) 求双控下最优设计桩长和最优设计置换率

图4 双控条件下 m 与 $m \times l$ 关系曲线

由图4可以很容易得出置换率等于由承载力控制的最小置换率0.20时,对应沉降控制线上对应该置换率下的最佳桩长为最优设计桩长,可通过二分法求得该最佳桩长为13.5m,此时既满足沉降和承载力要求又使水泥用量最小。

于是得到满足沉降和复合地基承载力要求的最优设计桩长为13.5m,对应的最优设计置换率为0.20。

3.4 结果讨论

从最终设计结果可以看出:水泥土搅拌法设计的沉降和承载力计算中置换率和桩长相互影响,仅仅通过沉降或者承载力一种控制很难达到最优化的设计目标。

4 结语

(1) 水泥土搅拌法沉降和承载力双控优化设计方法,在满足沉降和承载力两方面要求的同时还可以达到水泥用量最小的最优设计目标。

(2) 实例应用表明,双控优化设计方法思路明确、操作方便,具有一定的实用参考价值。

(3) 文中为了突出说明方法,对基本条件等作了一些假定和简化,本方法的工程实际应用还需要作进一步探讨。

参考文献

- [1] 叶书麟,叶观宝编.地基处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1997,240~244.
- [2] 徐至钧,曹名葆编.水泥土搅拌法地基处理[M].北京:机械工业出版社,2004,49~62.
- [3] 吴家府.水泥土搅拌法处理软基双控优化设计方法[D].上海:同济大学,2008.
- [4] 高大钊.土力学与基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1998,64~65.
- [5] 叶观宝.高速公路软基处理的理论与设计[D].上海:同济大学,2003.