

钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力特性的数值模拟研究

张 善, 宋宁生, 孙 鹤, 赵 峰

(江苏省高速公路建设指挥部, 南京 210004)

摘 要:采用 FLAC-3D 软件对钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力特性进行了三维数值模拟, 数值模拟的 $P-S$ 曲线与现场载荷试验曲线基本一致, 结果表明钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力较常规水泥土搅拌桩有较大提高, 在其他条件相同的情况下钉形水泥土双向搅拌桩单桩极限承载力在一定范围内随扩大头高度、扩大头直径增加而增大, 从承载力角度, 钉形水泥土双向搅拌桩存在有效桩长。

关键词: 钉形水泥土双向搅拌桩; 承载力; 数值模拟

作者简介: 张善(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事高速公路技术管理工作。E-mail: zs@jsneinfo.com。

0 引 言

水泥土搅拌桩具有施工简单、速度快、振动小、土体加固后容重变化小等优点, 因而被广泛应用于软弱地基处理, 以提高软土地基承载力、减小地基沉降和不均匀沉降量、增加路堤稳定性^[1]。但是, 大量工程实践表明水泥土搅拌桩在应用过程中也暴露出不少工程问题。针对水泥搅拌桩复合地基存在的问题, 在充分研究水泥搅拌桩加固机理和影响成桩质量因素的基础上, 研制了一种新型水泥土搅拌桩和一种新型水泥土搅拌桩施工工艺, 即钉形水泥土搅拌桩和双向水泥土搅拌桩施工工艺, 并将两者相结合, 形成钉形水泥土双向搅拌桩^[2, 3]。本文采用 FLAC-3D 软件对钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力特性进行了三维数值模拟, 并对有关问题进行分析。

1 数值模拟方法

1.1 模拟方法介绍^[4]

本文采用三维快速拉格朗日差分法 (FLAC-3D 软件) 进行数值模拟, FLAC 是连续介质快速拉格朗日差分分析方法 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 的英文缩写, 是美国明尼苏达 Itasca 软件公司编制开发的显式有限差分程序。FLAC-3D 是二维 FLAC 软件的拓展, 可以模拟土

质、岩石或其他材料的三维力学行为, 可以精确地模拟屈服、塑性流动、软化直至破坏的整个过程, 尤其适用于软弱介质材料的弹塑性分析、大变形分析、流固耦合以及施工过程模拟。FLAC-3D 是目前国际岩土工程界比较流行的计算机软件, 在国外已被广泛应用于工程地质、岩土力学以及构造地质学和成矿学等研究领域。与现行的数值方法相比, FLAC-3D 有着明显的优点:

(1) FLAC-3D 计算中使用了“混合离散化” (mixed discretization) 技术, 更为精确和有效地模拟计算材料的塑性破坏和塑性流动。这种处理办法在力学上比常规有限元的数值积分更为合理。

(2) 全部使用动力运动方程, 即使在模拟静态问题时也是如此。因此, 它可以较好地模拟系统的力学不平衡到平衡的全过程。

(3) 求解中采用“显式”差分方法, 这种方法不需要存储较大的刚度矩阵, 既节约了计算机的内存空间, 又减少了运算时间, 因而提高了解决问题的速度。

1.2 本构模型和材料参数

土体采用摩尔-库仑本构模型, 现场进行钉形水泥土双向搅拌桩单桩荷载试验时, 曾专门将一根桩加载到破坏, 然后进行开挖, 发现桩体变截面下部被压碎, 为模拟桩身破坏, 钉形水泥土双向搅拌桩也采用摩尔-库仑模型。土层分布、土体和桩体相关材料参数均参照沪苏浙现场试验段资料以

及检测结果^[5],详细材料参数见表1。桩土之间设置接触面,接触面单元的法向、切向刚度根据FLAC推荐的公式计算^[4]:

$$k_n \text{ 或 } k_s = 10 \times \max \left[\frac{(K + 4G/3)}{\Delta z_{\min}} \right]$$

式中, K 和 G 为接触面两侧介质的体积模量和剪切模量, Δz_{\min} 为接触面法向厚度最小的网格宽度。

表1 数值模拟参数

名称	埋深 (m)	杨氏模量 $E(\text{MPa})$	泊松比 ν	密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$
表层土	0~2	8	0.33	1938	25.2	24
淤泥质亚黏土	2~14	2	0.4	1755	11.6	14
亚黏土	14~16	9	0.32	1955	21	20
持力层	16~33	20	0.28	2000	28	28
钉形水泥土双向搅拌桩	—	150	0.2	2100	230	35

1.3 边界和单元划分

模拟单桩承载力时不考虑群桩效应,只设一根桩,平面边界距离桩中心取20 m,深度边界取两倍桩长即33 m,地下水位线为地面,不考虑固结,为节省计算时间利用对称性模型只取1/4。桩身单元划分较密,距桩中心越远单元划分越粗,一个模型具有5000多个单元,7000多节点,见图1。

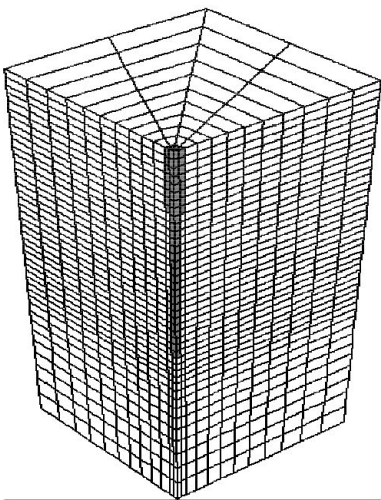


图1 数值模拟模型示意图

1.4 计算步骤和结果对比

模拟的计算过程分为3步:①将桩体赋予同层土体的材料参数,进行自重平衡计算;②不模拟

成桩过程,对桩体赋予其真实的材料参数,计算到平衡,并将位移场置为零,以上两步目的是为了生成初始应力场;③分级(20 kN 或 50 kN)在桩顶施加应力,每一级计算平衡后再加下一级,直到破坏。一个模型的计算时间为4~5 h。

沪苏浙现场试验段共有A、B两种不同设计参数的钉形水泥土双向搅拌桩,其中A区的钉形水泥土双向搅拌桩扩大头高度 $H=4$ m,桩间距 $S=2$ m,B区的钉形水泥土双向搅拌桩扩大头高度 $H=3$ m、桩间距 $S=1.8$ m,A、B试验区地质条件一致,其他设计参数也相同,下部桩体直径 $d=0.5$ m,桩长 $L=16.5$ m。先对A、B区的钉形水泥土双向搅拌桩进行单桩荷载试验模拟, $P-S$ 曲线见图2、图3,可以看出数值模拟的 $P-S$ 曲线规律与荷载试验基本一致,得到的单桩极限承载力也相近。由曲线可以确定,A区钉形水泥土双向搅拌桩由现场荷载试验得到单桩极限承载力在500~550 kN之间,通过数值模拟得到的单桩极限承载力为500 kN;B区钉形水泥土双向搅拌桩由现场荷载试验得到单桩极限承载力在400~450 kN之间,通过数值模拟得到的单桩极限承载力为380 kN。可见,由数值模拟 $P-S$ 曲线确定的承载力略小于荷载试验,其中除了模拟本身的原因外还由于现场荷载试验是在群桩中进行的,有一定的群桩效应。另外,在达到极限承载力之前数值模拟得到的桩顶沉降均大于荷载试验,这是因为模拟时每加一级荷载都计算到稳定(以力学计算精度 5×10^{-7} 控制),而现场沉降在观测时并未发展完全。总的来说,数值模拟与荷载试验比较符合,说明本文采用的数值模拟的模型和计算参数是合适的。

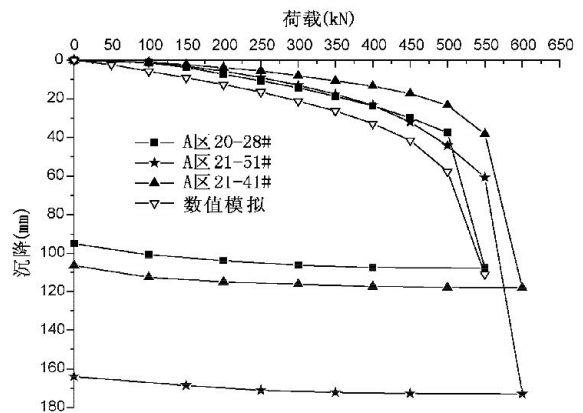


图2 A区钉形水泥土双向搅拌桩单桩荷载试验 $P-S$ 曲线

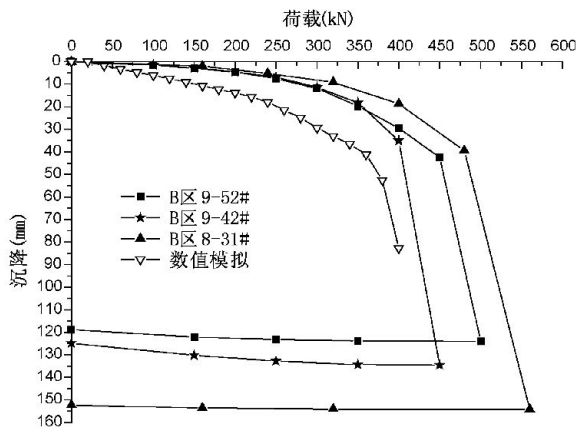


图3 B区钉形水泥土双向搅拌桩单桩荷载试验 P-S 曲线

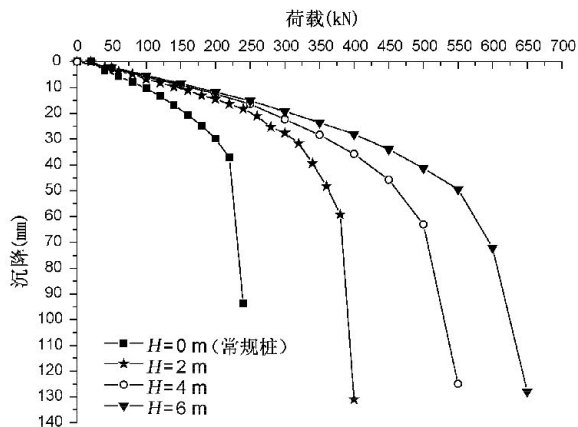


图4 不同扩大头高度 H 的单桩 P-S 曲线

2 模拟结果分析

2.1 数值模拟方案

模拟方案分为 3 组,以扩大头高度 $H = 4\text{ m}$, 扩大头直径 $D = 1\text{ m}$, 桩长 $L = 16.5\text{ m}$, 下部桩体直径 $d = 0.5\text{ m}$ 为标准参数,保持 H 、 D 、 L 中两个参数不变,变化另一个参数,研究钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力随 H 、 D 、 L 的变化规律,详细的模拟方案见表 2。

表 2 钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力模拟方案

方案一:不同扩大头高度 H (m) ($D = 1.0\text{ m}$, $L = 16.5\text{ m}$, $d = 0.5\text{ m}$)	方案二:不同扩大头直径 D (m) ($H = 4\text{ m}$, $L = 16.5\text{ m}$, $d = 0.5\text{ m}$)	方案三:不同桩长 L (m) ($H = 4\text{ m}$, $D = 1.0\text{ m}$, $d = 0.5\text{ m}$)
0	0.5	8
2	0.8	10
4	1	12
6	1.2	14
	1.5	16.5

2.2 单桩极限承载力与扩大头高度 H 的关系

图 4 是扩大头高度 H 分别为 0 m (即常规桩)、 2 m 、 4 m 、 6 m 的 P - S 曲线,可以从图中确定极限承载力分别为 220 kN 、 360 kN 、 500 kN 、 600 kN ,即单桩极限承载力随着扩大头高度的增加而增大,这与现场试验段荷载试验的结果一致。在其他条件相同的情况下, $H = 2\text{ m}$ 、 $D = 1\text{ m}$ 的钉形水泥土双向搅拌桩单桩极限承载力比常规桩增加了 63% ,而当 $H = 4\text{ m}$ 时,其极限承载力是常规桩的 2 倍多,但如继续增加 H 的承载力增幅将减小。

2.3 单桩极限承载力与扩大头直径 D 的关系

保持其他条件不变,扩大头直径 D 为 0.5 m (常规桩)、 0.8 m 、 1.0 m 、 1.2 m 、 1.5 m , P - S 曲线见图 5,同样可以得出单桩极限承载力随着 D 的增加而增大,分别为 220 kN 、 440 kN 、 500 kN 、 550 kN 、 600 kN 。在常规桩上增加一个 $D = 0.8\text{ m}$, $H = 4\text{ m}$ 的扩大头,其极限承载力增加一倍,随着 D 的增大承载力增幅在减小。

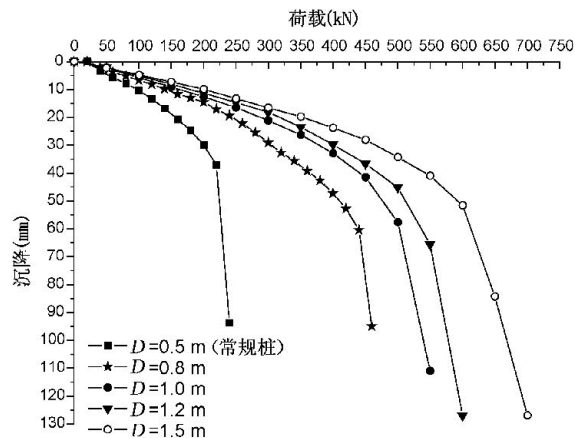


图5 不同扩大头直径 D 的单桩 P-S 曲线

2.4 单桩极限承载力与桩长 L 的关系

图 6 反映了钉形水泥土双向搅拌桩单桩极限承载力随桩长 L 的变化关系, $L = 8\text{ m}$ 时单桩极限承载力为 400 kN , $L = 10\text{ m}$ 时为 450 kN ,而 $L = 12$ 、 14 、 16.5 m 时单桩承载力均为 500 kN 。这说明存在某一临界桩长 L_c ,当 $L < L_c$,承载力随着桩长增加而增大,超过临界桩长后承载力随着桩长增加而不变,即从承载力角度,钉形水泥土双向搅拌桩存在有效桩长。

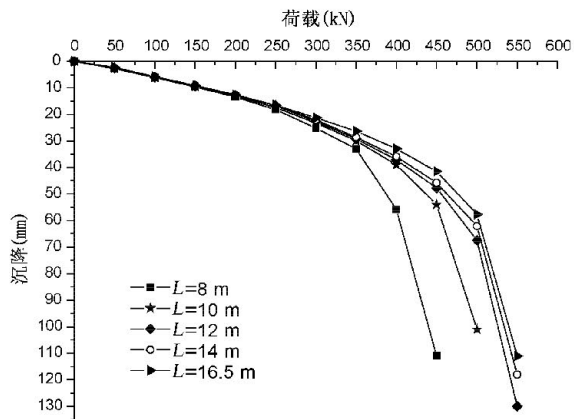


图 6 不同桩长 L 的单桩 $P-S$ 曲线

以上钉形水泥土双向搅拌桩的承载力特性是钉形水泥土双向搅拌桩的结构特点决定的,从图 1 可以看出钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力由 4 部分组成:桩周土对扩大头侧壁提供的摩阻力、扩大头翼缘下部土体支撑力、桩周土对下部桩体侧壁提供的摩阻力、桩端土体支撑力。在其他条件不变的情况下,扩大头高度 H 增加导致扩大头侧壁面积增加,增加扩大头直径 D 使得扩大头侧壁面积和扩大头翼缘面积都增加,增加桩长 L ($L < L_c$) 则增加了下部桩体的侧壁面积,在一定范围内都能提高其单桩承载力。

3 结 论

本文通过现场荷载试验和三维数值模拟分析,得到以下结论:

(1) 数值模拟得到 $P-S$ 曲线与试验段 A、B 区现场荷载试验结果比较一致,说明数值模拟的模型和计算参数是合适的。

(2) 在其他条件相同的情况下,钉形水泥土双向搅拌桩单桩极限承载力在一定范围内随扩大头高度增加而增大。

(3) 在其他条件相同的情况下,钉形水泥土双向搅拌桩单桩极限承载力在一定范围内随扩大头直径增加而增大。

(4) 从单桩承载力角度,钉形水泥土双向搅拌桩存在有效桩长,小于临界桩长时单桩承载力随桩长增加而增大,超过临界桩长后钉形水泥土双向搅拌桩单桩承载力不再增加。

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] 刘松玉,储海岩,宫能和,等. 双向搅拌桩的成桩操作方法. 中国,200410065862[P].

[3] 刘松玉,储海岩,宫能和,等. 双向水泥土搅拌桩机. 中国,200410065861[P].

[4] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[5] 刘松玉,席培胜,朱志铎,等. 钉形水泥土搅拌桩处理软土地基的试验研究[C]. 地基处理与实践——第九届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州:浙江大学出版社,2006:165~170.