

水泥土桩复合地基变形分析方法研究^{***}

吴发宏 荀 勇

(盐城工学院建筑工程系, 盐城, 224003)

摘 要 结合工程实例, 对水泥固化剂深层搅拌处理软土复合地基变形的验算方法进行分析比较, 所提出的有限元程序分析方法具有实际应用价值。

关键词 搅拌桩 复合地基 变形 程序

分类号 TU4

前 言

水泥土搅拌法是用以加固饱和粘性土地基的一种新方法。它是利用水泥(或石灰)等材料作为固化剂, 通过特制的搅拌机械, 在地基深处就地将软土和固化剂(浆液或粉体)强制搅拌, 由固化剂和软土间所产生的一系列物理—化学反应, 使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土, 从而提高地基强度和增大变形模量。根据施工方法的不同, 水泥土搅拌法分为水泥浆搅拌法和粉体喷射搅拌法两种。前者用水泥浆和地基搅拌, 后者用水泥粉或石灰粉和地基土搅拌。

本文介绍了水泥土桩复合地基变形分析程序。该程序基于 Biot 固结理论和有限元法, 可对复合地基的变形进行线性或非线性分析。与现有的其它程序相比, 该程序在分析中可对水泥桩复合地基作最小的简化, 因而能较真实地模拟这种地基的实际情况, 得到与实际更为相符的计算结果。尤其是由于采用波阵解法编程, 且在消元过程中作了一些可加快解题速度和更节约内存的改进, 使该程序可在 IBM-PC 或兼容机上实现计算, 分析对象的自由度可高达近万。利用本文程序, 文中分析比较了搅拌桩复合地基各种简化计算方法。为说明本程序的实际应用效果, 本文在最后分析了一工程实例。分析表明, 与实测变形相比, 结果是令人满意的。

1 水泥土桩复合地基有限元分析理论与解法改进

1.1 基本理论与解题方法

尽管与天然软土地基相比, 水泥土桩的固结略显次要, 但不失为一般性。本文的水泥土桩复合地基有限元分析程序仍基于 Biot 三维固结理论, 既能不考虑固结的分析, 亦能进行考虑固结的分析。

采用 8 节点等参元对水泥土桩复合地基进行离散, 则可得单元的 Biot 三维固结有限元方程:

$$[K_e]\{\delta\}^e + [K_c]^T\{P\}^e = \{R_i\}^e$$

• 江苏省教委自然科学基金资助项目

•• 收稿日期: 1997-08-12

$$[K_c] \frac{\alpha \{\delta\}^e}{\Delta t} - [K_s] \{P\}^e = 0$$

式中: $\{\delta\}^e$ 为单元节点任移矢量, 24×1 ; $\{P\}^e$ 为单元节点孔压矢量, 8×1 ; $[K_e]$ 为单元刚度矩阵, 2×24 ; $[K_c]$ 为单元耦合矩阵, 8×24 ; $[K_s]$ 为单元渗流矩阵, 8×8 ; $\{R_i\}^e$ 为单元等效节点荷载矢量, (24×1) 。

由增量理论和数值积分法, 可进一步得到以增量形式表示的单元三维固结有限元方程, 以用于非线性弹性分析, 即:

$$[K_e] \{\Delta \delta\}^e + [K_c]^T \{\Delta P\}^e = \{\Delta R_i\}^e$$

$$[K_e] \{\Delta \delta\}^e + \alpha \cdot \Delta t [K_s] \{\Delta P\}^e = \{\Delta R_p\}^e$$

式中 α 为对应于某种数值积分公式的积分常数 ($0.5 \leq \alpha \leq 1$)。

$$\{\Delta R_p\}^e = \Delta t [K_s] \{P\}^e_{i-\Delta t}$$

鉴于水泥土桩复合地基有限元法计算量较大, 用普通的求解方法, 在国内较普及的微机上求解具有上千个自由度的工程问题即会遇到内存不足的困难, 而在大、中型计算机上算题又必然会因计算费用高而使分析失去意义, 因此本文采用波阵解法 (Front Solution)^[1] 解题, 其特点如下:

- (1) 消元顺序与节点编号无关, 仅与单元编号有关。
- (2) 单元编号以使波阵宽最小为原则。
- (3) 组装从第一个单元开始, 边组装边消元, 消元后信息写入外存。
- (4) 回代从最后一个单元开始, 所需信息从外元读入, 直到求得全部节点未知数。

1.2 波阵解法的改进

为了寻求解决在微机上解题必然遇到的内存不足、速度慢这一难题, 作者对前述能在有限元计算中节约大量内存的波阵解法作了进一步研究, 并结合有限元编程实践作出以下改进:

(1) 从单元刚度矩阵 (当考虑固结时, 则为固结矩阵) 的形成到组装、消元均在一个循环内完成。节约了原来先在一个循环内形成所有的刚度矩阵并写入外存, 而在其后的组装、消元循环中又从外存读入各单元矩阵所占用的写、读机时。

(2) 边界的约束信息不在组装前全部形成, 而是边形成边消元。消元时, 存贮约束信息所需内存仅与单个节点的自由度有关, 而原来所需的内存与边界结点总自由度成正比。

(3) 对于零约束, 采用对该约束主元直接置零的方法处理, 消去原来先放大该约束主元再消元的工作。

(4) 鉴于有限元解题中有许多信息在某一步后即无用, 编程中采用可调数组, 使这些信息所占的内存存在适当时候能方便移作它用, 即同一内存多次使用。

1.3 程序与功能简介

本文的水泥土桩复合地基变形分析, 微机程序用 FORTRAN 语言编制。图 1 为程序框图。现将程序主要功能说明如下:

(1) 能自动划分单元并识别桩单元, 从而可用反映桩体自身材料特性的参数参加计算, 即能考虑水泥掺含量、置换率等对搅拌复合地基变形的影响。

(2) 可用于分析平面应变问题 (此种情况下, 波阵宽一般小于 150, 因而程序求解能力可达上万个自由度)、空间轴线对称问题以及桩数较少的完全空间问题。

(3)可进行线性和非线性弹性分析。进行分析时,由前级荷载下各单元的应力状态计算下级荷载下各单元的变形模量,并按摩尔—库仑定律检验各单元的破坏情况,破坏则可作应力修正和迭代。

(4)可进行考虑固结分析,亦可通过置任一点孔压为零来进行不考虑固结计算。

此外,程序可在任一时段计算结束时停机,而其后的计算则可从下一时段继续进行。这样可利用零量机时,突然停电时也不至于前功尽弃,从而提高微机效率。

显然,该程序的通用性较强,不但可用于水泥土桩复合地基的变形分析,更可用于天然地基和砂井地基等的固结分析。

2 水泥土桩复合地基各种分析方法的比较

实际工程中,目前水泥土桩复合地基的沉降一般采用近似的简化计算。例如分析总和法、分层法等。但由于这些方法不能考虑实荷载的真实分布和水泥土桩复合地基的实际形状,给出的结果往往与实测值有较大差距。

利用本文有限元程序,对水泥土桩复合地基可作以下三种不同层次的分析。

2.1 群桩分析法 将圆截面的桩简化成等面积的正方形截面,然后将桩与土分别划分单元。进行

线弹性分析时,桩和土则采用非线性模型。显然这种方法既可用于平面应变问题(例如机场跑道下的水泥桩复合地基),也可用于完全空间问题(例如水箱下的水泥桩复合地基)。

2.2 双层地基分析法 将水泥土桩加固区当作一均匀的复合层,用一复合模量来综合反映加固区的桩土置换率和水泥掺含量等因素。而在进行非线性分析时,加固区和天然土层则分别采用不同的非线性模型。

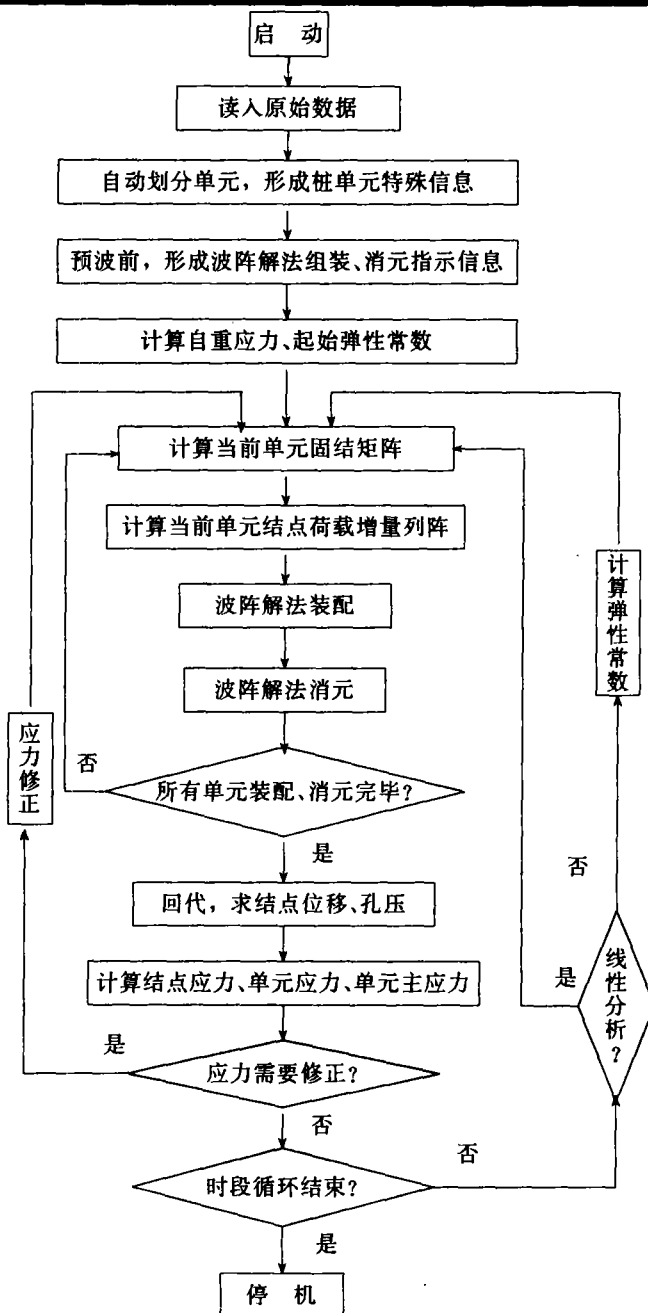


图1 水泥土桩复合地基有限元分析程序框图

2.3 水泥土墙分析法 将纵向一排搅拌桩简化成等面积的水泥土墙,然后按平面应变问题分析。

经用以上三种分析方法对同一水泥土桩复合地基按面应变问题进行不考虑固结的线弹性分析结果比较,发现后一种方法较前二种方法给出的沉降值大^[2]。而前两种分析方法的计算结果较为接近。

显然按群桩分析与实际情况最为接近,而且这种简化方法还可同时考虑搅拌桩水泥掺含量、桩土置换率以及桩径、桩距等因素的影响,因而可以模拟水泥土桩与土之间的相互作用。但是由于是桩土分别形成单元,计算量较大,尤其对于完全空间问题,由于其波阵宽很大,按此法只能分析有限的几根桩,且计算所需时间较长。

而双层地基分析法则不受桩数限制,且形成的单元数较少,因而计算简便、迅速。由于将加固区当作一均匀的复合层,因而避免了因桩、土的不同变形特征而带来的一系列复杂问题,即用“宏观”的方法来对待搅拌桩复合地基,使问题得到了简化。

3 工程实例分析

工程概况:大丰县新丰镇五层综合楼,总建筑面积 1445m²,设计荷载,承重墙为 16t/m,山墙为 12t/m,条形基础宽 1.0m,搅拌桩长 9m,桩径 0.5m,置换率 0.35,每米桩水泥用量 50kg。

主要地质条件为:0 至 2.2m 的变形模量 $E_s = 5.1\text{MPa}$; 2.2m 至 2.9m, $E_s = 2.3\text{MPa}$; 2.9m 至 3.9m, $E_s = 7.4\text{MPa}$; 3.9m 至 6m, $E_s = 5.1\text{MPa}$; 6m 以下, $E_s = 153\text{MPa}$ 。

本文按双层地基法对该工程地基进行有限元分析,复合模量按下式考虑^[3]:

$$E_o = mE_p + (1-m)E_s$$

E_o 为桩群体的变形模量; E_p 为水泥土搅拌桩的变形模量; E_s 为桩间土的变形模量; m 为桩、土置换率。

同时考虑基础和相邻基础荷载的影响,将桩群体的变形模量乘以 β 的修正系数。本文运用目前常用的几种近似计算方法对该工程进行沉降分析,其结果汇总于表 1。可见,本文所介绍的有限单元法分析结果与实测值最为接近。

表 1

计算方法	最大沉降(mm)	最小沉降(mm)	备 注
实测值	10.11	8.23	
“手册法”	13.23	10.71	
分层总和法	20.42	16.84	视群桩为格子状假想实体基础
有限单元法	11.88	10.36	

参考文献

- 1 Cheung, Y. K. Q. YeO, M. F 著. 谢秀松, 王貽荪, 李立芳译. 实用有限元分析导论. 人民交通出版社. 1980
- 2 荀勇, 张红. 粉体喷射搅拌法在苏北沿海地区的应用. 全国现代结构交流会论文集. 1996, 10
- 3 叶观宝. 深层搅拌桩加固软基的试验研究分析. 同济大学硕士论文. 1991, 6