

# DCM 桩复合地基受力变形性能有限元分析

宋二祥, 付浩, 郑天亮, 李贤杰

(清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 结合实际工程, 就深层搅拌桩复合地基数值分析模型及作用机理进行研究。研究表明, 对于带加筋垫层的复合地基, 采用有限变形理论才能较好反映水平加筋垫层的承载作用; 对于施工周期较长的工程, 有必要模拟其饱和软土的固结过程, 以正确计算桩土荷载分担及复合地基的变形; 当桩与桩间土刚度相差悬殊的情况下, 路堤的工后变形将高度依赖于其内所形成压力拱的长期稳定性, 运营寿命内发生差异沉降的风险需要引起重视。

**关键词:** 搅拌桩复合地基; 数值模拟分析; 加筋垫层; 有限变形理论

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096 - 7195(2019)02 - 0001 - 07

**作者简介:** 宋二祥 (1957 - ) 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学及工程方面的教学及科研工作。E-mail: songex@tsinghua.edu.cn

## Deformation analysis of composite foundation with DCM piles by finite element method

SONG Er-xiang, FU Hao, ZHENG Tian-liang, LI Xian-jie

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In combination with the deformation analysis of an engineering project, the numerical model and mechanical mechanism of composite foundation with DCM piles are studied. It is revealed that finite deformation theory should be employed in the analysis to better reflect the bearing effect of the horizontally installed geotextiles in the cushion layer on top of the composite foundation; and staged construction as well as the consolidation process of the saturated soft soil should be simulated in order to calculate correctly the load sharing of piles and soil and the deformation of the composite foundation. The simulated results show that for such a composite foundation, where huge difference in stiffness exists between the piles and soil, the post-construction deformation of the filled embankment on top of the composite foundation will be highly dependent on the long-term stability of the pressure arches formed within the embankment, and the risk of differential settlement during the operation life should be taken into consideration.

**Key words:** composite foundation; numerical analysis; reinforced cushion; finite-deformation theory

## 0 引言

深层搅拌桩 (Deep Cement Mixing, 缩写 DCM) 适用于加固深厚饱和软土层。因其施工方便, 成本较低, 在国内外广泛应用于建筑地基、公路及铁路路基、机场场地及道基等的加固处理。我国自改革开放以来即开始引进、研究此项技术, 发展了不同形式的水泥搅拌桩复合地基, 对其承载变形机理、设计分析方法等均进行了大量研究<sup>[1-2]</sup>, 取得了丰富的成果, 并在有关技术标准中得到反映<sup>[3-4]</sup>。

水泥搅拌桩复合地基依其应用场合的不同而有不同的构造, 从而所呈现的力学特性也有所不同。作为建筑物下的复合地基, 其所受上部结构荷载一般是经由刚度较大的钢筋混凝土基础施加。钢筋混

凝土基础将使桩和桩间土共同沉降, 由于桩的刚度远大于桩间土, 土的作用发挥很少。为使桩间土能合理发挥其承载作用, 对建筑物下的搅拌桩复合地基一般要加设砂石垫层。而对于铁路或公路路基下的水泥搅拌桩复合地基, 所受荷载为其上填筑体以及由填筑体传给复合地基的交通荷载。此时, 由于桩的上刺入导致桩的支撑作用不能充分发挥。为此, 对公路及铁路路基下的搅拌桩复合地基一般要在桩顶铺设土工格栅及适当粒径的碎石垫层。这一做法与桩网复合地基类似, 只是后者的桩身刚度更大。对于上述各种复合地基, 现行规范依据有关研究均

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778339)

国家 973 计划课题 (2014CB047003)

收稿日期: 2019 - 08 - 30

建议了较为简化的设计分析方法。但对于复杂而重要的工程,为考虑桩-桩间土-桩端土的不同相对刚度,考虑施工过程及施工时间长短的差异等不同情况,更好预测复合地基的变形过程,预测桩、土、土工格栅的荷载分担等,采用数值方法进行更为细致的分析显然是很必要的。

同时,水泥搅拌桩施工设备、工艺也在不断发展,可以施作的搅拌桩的桩长、桩身刚度及强度均有显著提升<sup>[5]</sup>。这些新发展对其应用的条件及设计计算方法都提出新的需要考虑的问题。面对不同的工程条件,怎样的设计方案更为合理,有必要进行进一步的分析研究。

工程发展对复合地基的精细分析研究提出了新的需求,同时商用分析软件模拟分析功能的不断发展也为复合地基的精细分析提供了可能。但是,工程问题的科学分析需要对其力学特性及有关计算理论和方法均有全面深入的了解。复合地基的有限元计算看似简单,但如不仔细考虑,所选用的计算模型可能未必合理。笔者注意到的一个问题是,目前不少对路基下水泥搅拌桩复合地基以及桩网复合地基的数值分析,几乎都是采用大家习以为常的小变形理论。这就不能合理考虑水平铺设土工格栅的承载作用,因而其计算结果往往显示土工格栅的作用微乎其微。此外,当复合地基之上的场地、路基分层填筑的时间周期较长时,很有必要考虑桩间饱和软土的固结过程,对此已有研究也还没有提起足够重视。

鉴于上述情况,本文结合作者课题组承担的工程咨询项目,就此种复合地基的计算模型和计算方法进行讨论,进而通过计算对比分析水泥搅拌桩复合地基的作用机理,对其合理应用提出看法。

## 1 复合地基方案及计算模型选用

### 1.1 复合地基方案及计算模型选用

这里考虑的是一沿海机场扩建工程中围海造地场地的地基处理。原场地位于海底水下,水深5 m。海底浅层为20 m厚软土,其下10 m为硬质黏土,再下为砂层或岩层。地基加固方案采用深层搅拌桩(DCM桩)加固软土层,再于其上分层填筑砂层到水面以上9 m高程。

为在软土层上施工DCM桩,先铺设厚2 m、中间夹有土工格栅的砂垫层。土工格栅上方有小厚度的片石层,以保证其对上覆填土的支托能力。DCM桩直径为2.5 m,按间距5 m×5 m的正方形

网格布置。DCM桩顶伸入砂垫层1 m,底部进入软土层下的硬质黏土层5 m。DCM施工完成后,分4层回填砂,每层3 m,最终填至水面以上9 m。复合地基施工工序及相应工期见表1,DCM桩的布置见图1。

表1 施工工序及相应工期

Table 1 Construction stage and corresponding period

施工阶段	施工内容	工期/天
1	砂垫层及 DCM 桩施工	120
2	第一层回填砂	60
3	第二层回填砂	60
4	第三层回填砂	60
5	第四层回填砂	60

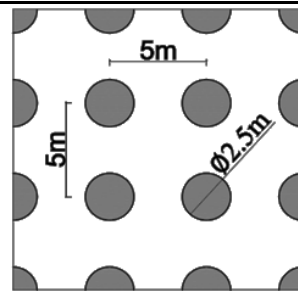


图1 DCM桩布置图

Figure 1 Sketch for the DCM arrangement

### 1.2 计算对象的选取

计算采用笔者曾参与研发的著名岩土有限元软件 Plaxis<sup>[6]</sup>。因属于大面积复合地基上等厚度填筑问题,且 DCM 桩在平面内按正方形网格均匀布置,为简化计算可取一根桩与桩周土及其上的填土进行复合地基-填筑体的受力变形分析。当不同部位的土层厚度有差异时,按各自的土层厚度分别建立类似模型进行计算来估计差异沉降应是偏于保守的。

为便于进行网格划分,这里还将直径2.5 m的圆形 DCM 桩按面积等效为2.2 m×2.2 m的正方形,其中到中间距仍为5 m,这样选取的计算单元如图2所示。

这里对桩和土均采用10节点四面体实体单元。为合理反映桩-土间相互作用,在桩和土之间设置界面单元,界面力学参数取与对应土层相同的值,也就是按粗糙界面考虑,折减系数 $R=1$ 。

土工格栅采用 Plaxis 内置的弹塑性 Geogrid 单元模拟,其截面抗拉刚度 $EA=8000$  kN/m,极限拉力 $N_P=1000$  kN/m。土工格栅与相邻土层间同样设置界面单元,其强度及刚度参数由相邻土层参数再考虑折减系数 $R=0.7$ 来确定。

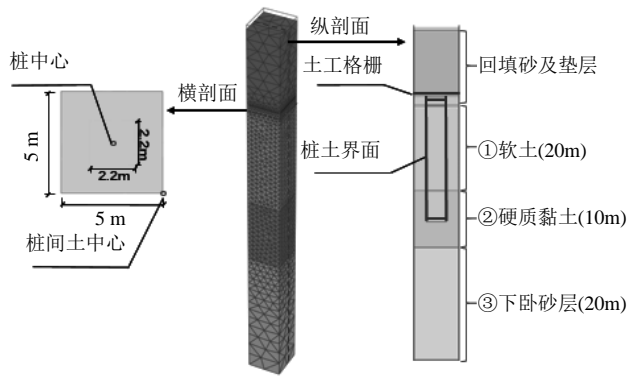


图 2 三维有限元模型

Figure 2 Three-dimensional finite element model

1.3 材料本构模型及参数

为合理反映土体弹塑性变形及其硬化特性, 各原状土层及回填砂均采用 Plaxis 内置的硬化土模型 (HS Model), DCM 桩采用摩尔库伦模拟。Plaxis 中的硬化土模型, 综合了工程中常用邓肯张模型和摩尔库伦模型的优点, 可据有关试验取 DCM 桩体材料的无侧限抗压强度为 1.5 MPa, 其黏聚力取无侧限抗压强度的二分之一 ( $c=750$  kPa), 弹性模量为 300 MPa。各原位土层、回填砂及 DCM 材料参数如表 2~4 所示, 其中的模量及强度参数均对应于有效应力。

表 2 土层力学参数

Table 2 Parameters of the soil

土层	黏聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\phi/^\circ$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	渗透系数 $k/(\text{m}/\text{d})$
软土	1	20	1000	1.5	0.00002
硬质黏土	4	25	8000	1.75	0.00002
下卧砂层	0	35	40000	1.9	0.6

表 3 回填砂力学参数

Table 3 Parameters of the backfill sand

土层	黏聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\phi/^\circ$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	渗透系数 $k/(\text{m}/\text{d})$
砂垫层	0	33	10000	1.8	0.6
回填砂	0	33	20000	1.8	0.6

表 4 DCM 桩材料参数

Table 4 Parameters of the DCM pile

类别	黏聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\phi/^\circ$	$E/\text{kPa}$	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
DCM 桩	750	0	300000	1.6

1.4 变形过程及分析理论的考虑

对任何力学问题的计算分析均需基于对问题特点的分析来决定计算步骤及需要采用的计算理论, 以抓住其主要受力变形特征。

对于岩土工程问题, 往往有必要模拟其大体施

工过程。由表 1 所列施工工序及相应工期可见, 此工程将分层填筑, 每层填筑均需要一些时间。由于填筑的初始阶段, 填筑厚度较小, 填筑体本身自承能力弱, 其重量将直接传递到桩或桩间土。随填筑砂层厚度加大, 其本身刚度增加, 从而可以将其自身重量的新增部分依据桩和桩间土的相对刚度大小进行分配。同时, 桩间土经过一定时间的固结, 其有效应力及相应的刚度和强度也有所增加。为正确模拟上述加载及变形过程, 这里应模拟施工建造及土体固结过程进行计算。

计算理论的选用是又一重要问题。岩土力学分析中一般都采用小变形理论。但是, 在这里因有土工格栅的存在将有所不同。对土工格栅的作用进行力学概念分析可以理解, 水平铺设于桩顶垫层内的土工格栅有两个作用: (1) 当其上、下土体因受竖向应力而有发生横向膨胀变形的趋势时, 土工格栅依靠界面摩擦限制土的横向膨胀, 从而提高土的强度和刚度; (2) 当桩间土因压缩而发生较大沉降时, 土工格栅承受其上填土的重量并把这荷载传给刚度较大的桩, 从而也减小填筑体的沉降。对于土工格栅的后者作用, 必须采用大变形理论才能考虑。因为小变形理论始终以结构初始构形进行平衡分析, 而土工格栅仅有抗拉刚度, 水平铺设的土工格栅没有任何抵抗竖向荷载的刚度。但实际上, 随着竖向挠度的发生, 土工格栅弯曲后, 依靠其抗拉刚度可以承受可观的竖向荷载。而大变形理论是按变形之后的构形进行受力变形分析, 弯曲的土工格栅将有承受竖向荷载的能力, 也就是具有几何刚度。如按小变形理论进行分析, 则仅能考虑土工格栅的第一种作用。随后的计算表明, 是否考虑土工格栅的几何刚度, 将使计算结果有着明显的差异。

以上计算对象、材料本构以及计算理论等的选择, 共同构成本文建议的计算分析模型。

2 计算结果及对比分析

2.1 按合理模型计算的结果

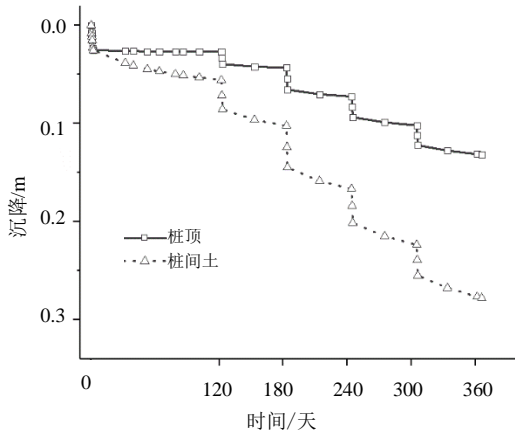
基于上述讨论, 采用大变形理论进行分析 (Plaxis 中的 updated mesh 计算模块), 并分阶段模拟施工建造及土体固结的过程。施工完成后继续计算至固结度达 90%, 以反映工后使用期的受力变形情况。

计算给出施工期及使用期内的沉降时程曲线如图 3 所示, 桩土应力比时程曲线如图 4 所示。其中“桩顶”及“桩间土”代表图 2 中桩顶标高处桩中心及桩间土中心位置。“回填砂顶”代表回填全

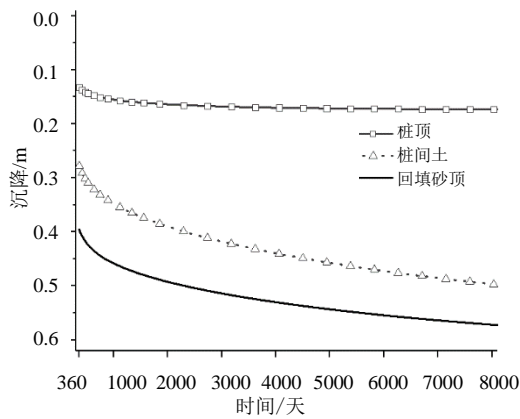
部完成后的地面。桩土应力比指在桩顶标高的桩顶平均应力及对应深度桩间土平均应力的比值。

由图3可知，桩土沉降随填筑加载及地基固结逐步发展。由于桩土刚度不同，且桩间土固结沉降，在桩顶标高处桩与桩间土发生差异沉降，并随加载及固结过程不断增加。在施工刚完成时差异沉降约0.15 m，经过长时间固结后差异沉降达0.28 m。回填砂顶部沉降值则从施工完成时的0.4 m增加至0.56 m。由于后填砂层本身无固结压缩，这意味着复合地基顶部发生了0.16 m的工后沉降。

由图4可知，除第一级填筑外，桩土应力比在加载的瞬间均有一定的减小，这是因为在施工荷载施加后的瞬间，桩间土处于不排水状态，能承受相对更多的新加荷载；加载后经一段时间固结，桩间土沉降增加，其所承受的部分荷载向桩体转移，又使桩土应力比逐渐增加。施工刚完成时桩土应力比约7:1；此后随超静水压不断消散，桩间土固结，桩土差异沉降不断增大，最终桩土应力比可达到70:1。这意味着，对于这样的软土地基，复合地基所受荷载几乎全部由桩来承受。



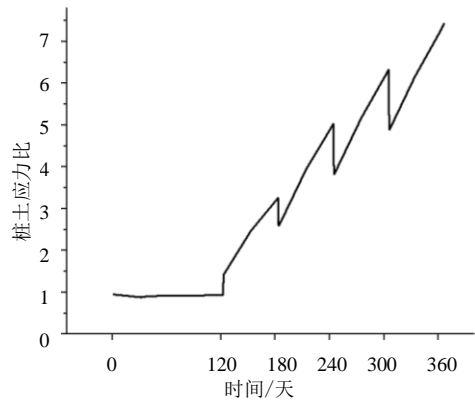
(a) 施工期沉降



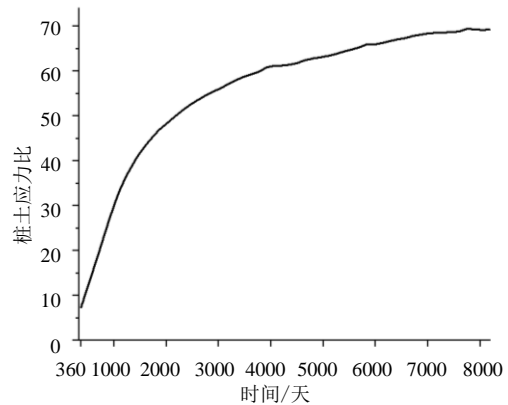
(b) 工后沉降

图3 沉降时程曲线

Figure 3 Time-history curves of settlement



(a) 施工期桩土应力比

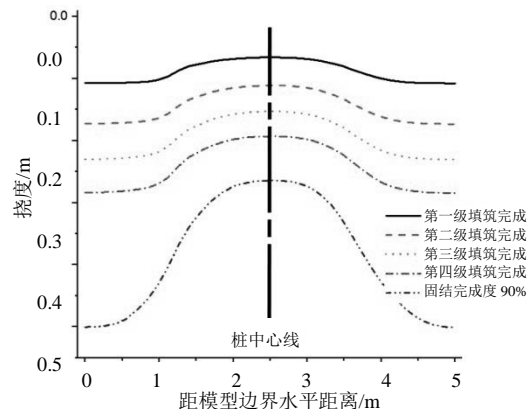


(b) 工后桩土应力比

图4 桩土应力比时程曲线

Figure 4 Time-history curves of pile-soil stress ratio

土工格栅的挠度及拉力同样随施工及地基固结不断变化。图5给出土工格栅在图2所示纵剖面部位的挠度及拉力分布。在施工期内，随上覆砂层填筑厚度增大，土工格栅挠度也不断增大。但直到施工完成，土工格栅的挠度不足0.1 m，其内拉力最大值仅为30 kN/m，出现在桩侧上方，主要由其上填土横向变形使土工格栅表面受到摩擦而引起。在长时间固结后，桩顶标高处的桩土差异沉降不断增大，土工格栅挠度达0.21 m，其几何刚度发挥作用，拉力达到150 kN/m。



(a) 挠度分布

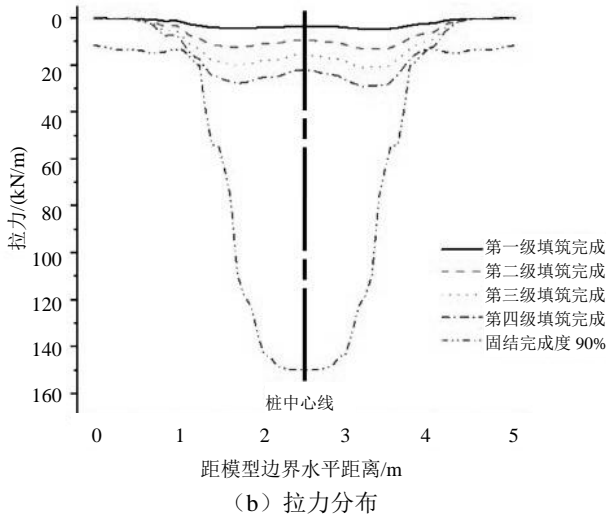


图 5 土工格栅挠度及拉力分布示意图

Figure 5 Deflection and tension distribution of geogrids

经长时间固结后桩顶附近区域的有效主应力云图见图 6。可见填土中出现了压应力拱，应力拱使桩承受了更大部分的荷载。

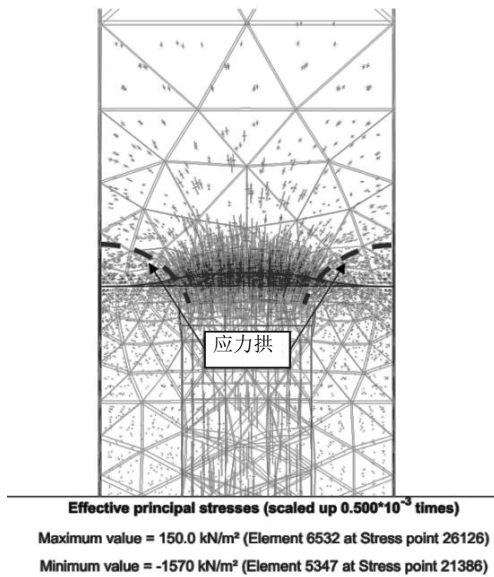


图 6 桩顶附近有效主应力云图

Figure 6 Effective principal stress near pile top

图 7 给出长时间固结后，桩顶附近桩与桩间土塑性点分布图。可见土工格栅以下的垫层中出现了应力拉伸截断点。如无土工格栅，此拉伸截断点将沿拱向上发展。在桩顶附近，由于拱效应的存在以及土工格栅的作用，使桩受很大的竖向压应力及水平拉应力，以至桩顶上出现应力屈服点和拉伸截断点。

从上述计算结果可以看出，当桩间土为饱和软土时，随固结发展，桩土应力相差巨大，桩头一定范围内还有发生拉应力。填筑场地的沉降及差异沉降控制很大程度上决定于桩与土工格栅的强度以

及压力拱的稳定性，使用寿命内发生较大沉降或差异沉降的风险需要引起重视。

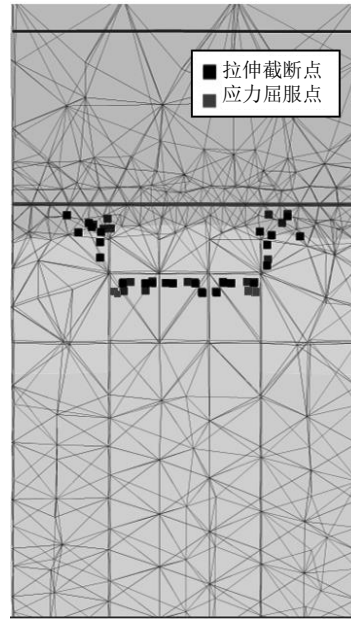


图 7 桩顶桩、土塑性点分布图

Figure 7 Plastic points distribution near pile top

### 2.2 部分参数影响分析

桩-桩间土-桩端土的不同相对刚度，将影响桩土沉降、应力，进而影响复合地基整体性能。本节以上述标准模型为对照，分别修改桩端土及桩间土的模量进行参数影响分析。表 5 给出了参数变化时的计算结果。计算的两种工况分别为：(1) 假设桩端土为与桩间土相同的软土；(2) 将桩间软土模量加大到原来的 3 倍。其他计算参数及计算步骤与原模型相同。

由表 5 所列计算结果可知，当桩端同样为软土时，桩顶深度处的桩土沉降均增大，但桩的沉降增幅相对更大。因此，桩土差异沉降减小。长时间固结后，原模型桩土差异沉降为 0.31 m，而桩端也为软土的模型中桩土差异沉降减小为 0.2 m。由于差异沉降减小，桩土应力比明显减小，同时土工格栅的拉力也从 150.2 kN/m 减小至 104.9 kN/m。地面工后沉降大幅度增加，从 0.2 m 增加至 0.6 m，因为作为拱底支撑的 DCM 桩沉降增大后，复合地基整体沉降也明显增大。

当桩间软土模量增加至原来的 3 倍后，桩间土沉降在各阶段均明显减小，桩顶沉降也略有减小，这是由于桩所分担的荷载减小。长时间固结至现模型计算的 0.15 m，土工格栅的拉力减小至 57.9 kN/m。地面工后沉降减小至 0.1 m。桩间土刚度增大后，其可发挥的承载能力增大，桩土应力比减小，桩头不再出现拉伸截断点及塑性破坏点，桩间土与上覆

填筑体间的脱空现象也未出现,有利于上覆填筑体中压力拱的稳定。此外,由于桩间土刚度变大,同样计算到固结完成度90%的时间由20年减小为10年,主固结沉降更早达到稳定。

### 2.3 不合理模型的计算结果

如前所述,对此种复合地基的计算,为正确反映土工格栅的作用应采用大变形理论考虑土工格栅的几何刚度;为正确考虑整个体系建造、变形发展及上部填筑体中压力拱的形成过程,需模拟施工建造及软土的渗流固结。如采用一般常用小变形理论进行弹塑性计算,则将给出与实际偏差较大的不合理结果。下面通过简要的计算对比对此予以说明。

如不考虑桩间饱和软土的渗流固结过程,则需按“排水”或“不排水”来进行计算。当按排水进行计算,在填筑2m厚的砂垫层时,由于这里软土的压缩性很大,而2m厚的砂垫层尚不能形成压力拱而自无承能力,计算给出桩间土的沉降将近1m。与此变形相应的桩、土应力与上述较合理模型的计算结果也差异很大。当按不排水进行计算时,由于

是大面积等厚度填筑,桩间土近似处于侧限压缩状态,不排水条件下几乎没有变形,复合地基整体变形也很小。事实上,由于实际采用分层填筑,每一层填筑都需要一定的时间,按排水计算等于假定软土固结在很短时间内完成,而按不排水计算则完全忽略排水固结作用,均不能较好反映实际变形及复合地基形成的过程。

对于土工格栅,当按小变形理论计算时,完全不能考虑其承受竖向荷载的能力,计算给出的土工格栅内力偏小很多。图8给出按大变形理论和按小变形理论计算的固结度90%时土工格栅X方向拉力分布情况。按大变形理论计算给出土工格栅拉力最大值约152 kN/m,而按小变形理论计算仅为75.5 kN/m。按小变形理论计算时,不能考虑土工格栅的几何刚度,其拉力只能由上方土体变形引起的摩擦产生,故计算给出的土工格栅内力偏小。同时,由于这一误差,也使计算的桩间土应力、沉降偏大,桩土应力比偏小,地面工后沉降增大。

表5 参数变化影响

Table 5 Influence of variation of parameters

计算工况	原模型	桩端硬土变为软土	桩间软土模量增加至3倍
施工结束时桩顶沉降/m	0.138	0.225	0.116
施工结束时桩顶深度处桩间土沉降/m	0.277	0.363	0.206
施工结束时地面沉降/m	0.395	0.486	0.341
施工结束时桩土应力比	7.5	6.9	4.2
施工结束时土工格栅最大拉力/(kN/m)	29.2	14.5	31.2
固结长时间后桩顶沉降/m	0.189	0.896	0.164
固结长时间后桩顶深度处桩间土沉降/m	0.497	1.098	0.318
固结长时间后地面沉降/m	0.593	1.186	0.442
固结长时间后土工格栅最大拉力/(kN/m)	150.2	104.9	57.9

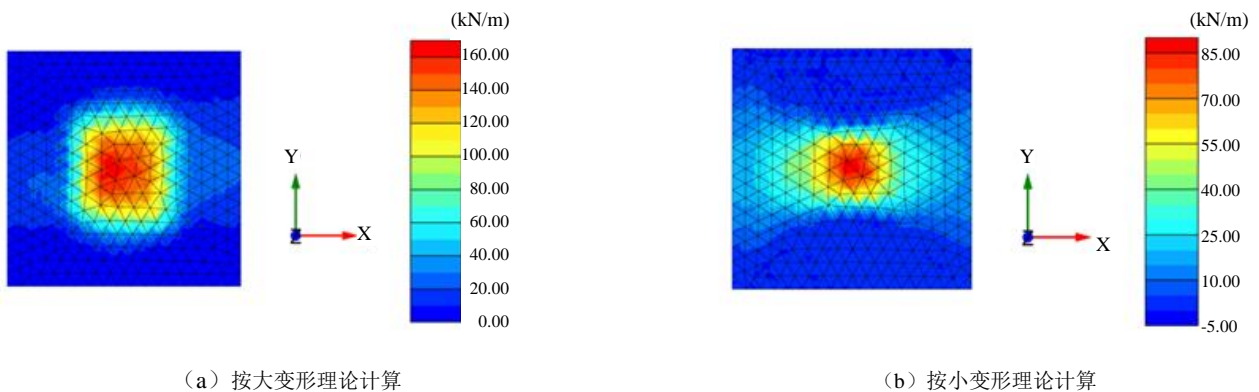


图8 固结长时间后土工格栅拉力分布图对比

Figure 8 Comparison of geogrids' tension distribution after consolidation for a long time

### 3 结 论

本文结合实际工程讨论 DCM 桩复合地基—填筑体共同作用体系的计算分析模型, 并通过计算展示其受力变形特性。

关于计算模型, 本文认为对此种工程问题的计算, 需模拟施工建造及软土渗流固结的过程, 以正确反映桩间土固结变形及其上部填筑体中压力拱的形成过程; 需按大变形理论考虑土工格栅的几何刚度, 以反映水平铺设的土工格栅在变形后承受竖向荷载的能力。

关于此种复合地基的变形特性, 计算表明, 当桩与桩间土刚度相差悬殊的情况下, 随桩间饱和软土的固结发展, 桩土应力相差很大, 桩头有破坏的可能。场地的沉降及差异沉降控制很大程度上决定于桩与土工格栅的强度以及压力拱的稳定性, 使用寿命内发生较大沉降或差异沉降的风险较大。而当桩土刚度比值稍小一些, 上述风险会明显减小。进一步研究可考虑提出一个粗略的定量准则。此外, 对于此种复合地基的更精细的计算分析, 还应仔细考虑施工扰动对桩间土及桩土界面力学性能的影响。DCM 施工还会引起桩周土体的隆起变形以及

土体内部的超静孔压, 尽管对于原地基土为饱和软土的情况, 其影响不大, 但有进一步研究的必要。

#### 致谢:

在本项研究工作过程中作者曾与相应工程项目的有关专家 Peter Leung 及何洪涛先生就桩、土参数取值等进行了多次有益的讨论, 在此深表谢意。

#### 参考文献:

- [1] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1-7.
- [2] 郑刚, 姜忻良. 水泥搅拌桩复合地基承载力研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 46-50.
- [3] GB/T50783-2012 复合地基技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [4] JGJ79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [5] Kitazume M, Terashi M. The Deep Mixing Method[M]. London: CRC, 2013.
- [6] R B J Brinkgreve, et al. Plaxis Scientific Manual[M]. Plaxis BV, 2010.