

宫晓明,袁鸿鹄,蒋少熠,等.房渣土地基强夯加固三维数值模拟研究[J].水利水电技术,2020,51(2):177-183.
GONG Xiaoming, YUAN Honghu, JIANG Shaoyi, et al. 3-D Numerical simulation study on dynamic compaction of miscellaneous soil-filling foundation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2): 177-183.

房渣土地基强夯加固三维数值模拟研究

宫晓明¹,袁鸿鹄¹,蒋少熠¹,李云鹏²

(1.北京市水利规划设计研究院,北京 100048; 2.中国石油大学(北京),北京 102249)

摘要:为反映强夯加固作用下房渣土地基应力应变变化特点,在北京永定河园博园湿地强夯现场试验和实测资料的基础上,结合工程及加固区域地层环境特点,对房渣土强夯动力响应进行数值模拟研究,探讨房渣土地基相关物理量的响应规律,并与实际测量结果进行对比验证。研究表明:相对横向应力,竖向应力的最大值更大,并且竖向应力的分布区域主要集中在夯锤下方的土体中,而横向应力则更接近土体表面。动力数值模拟中夯坑的沉降量随夯击次数变化的曲线大致呈现负幂函数形式,第七击的单击沉降量小于0.1 m,总夯沉量1.23 m,曲线末端趋于水平,估计极限夯沉量在1.2~1.4 m之间。强夯过程的数值模拟结果和实际监测结果比较接近。模拟分析得出的位移与应力变化规律对于强夯加固回填土地基工作具有重要的参考意义。

关键词:强夯;房渣土地基;数值模拟;土力学;工程地质

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.02.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号:U455.6

文献标识码:A

文章编号:1000-0860(2019)02-0177-07



3-D Numerical simulation study on dynamic compaction of miscellaneous soil-filling foundation

GONG Xiaoming¹, YUAN Honghu¹, JIANG Shaoyi¹, LI Yunpeng²

(1. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China; 2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to reflect the characteristics of the changing characteristics of the stress-strain of the miscellaneous soil-filling foundation under the effect of dynamic compaction, a numerical simulation study is made on the basis of the experimental and measured data from the in situ experiment of the dynamic compaction of the wetland for Beijing Garden Expo in combination with the characteristics of the project and the stratigraphic environment within the reinforcing area, and then the response law of the physical quantities of the miscellaneous soil-filling foundation is discussed, while a comparative verification is made with the measured results as well. The study result shows that relative to lateral stress, the maximum value of vertical stress is larger, for which the distribution area of vertical stress is mainly concentrated in the soil mass below the rammer, while the lateral stress is closer to the surface of the soil mass. The curve of the ramming times-dependent settlement of the tamping pit in the numerical simulation of the dynamic response approximately exhibits a form of negative power function, of which the settlement from the seventh single ramming is less than 0.1 m, while the total ramming settlement is 1.23 m and the end of the curve tends to be horizontal, thus the ultimate ramming settlement is estimated to be between 1.2 m~1.4 m. The numerical simulation result is more close to that of the measured one during the dynamic compaction. The displacement and stress changing law obtained from the

收稿日期:2018-10-23

基金项目:北京市南水北调配套工程河西支线工程项目(NSBD-PT-HXZX-KS);北京市水务五个一人才培养计划项目

作者简介:宫晓明(1980—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程方面的勘察及管理工作。E-mail: flygogo@163.com

通信作者:袁鸿鹄(1984—),男,高级工程师,副所长,博士,主要从事岩土工程、水利水电工程方面的勘察及科研工作。E-mail: bjyuan-honghu_@126.com

simulative analysis have important referential significances for the reinforcement of miscellaneous soil-filling foundation made by dynamic compaction.

Keywords: dynamic compaction; miscellaneous soil-filling foundation; numerical simulation; soil mechanics; engineering geology

0 引言

强夯法加固地基具有效果明显、成本低和操作简单等明显优点,在地基加固中得到广泛应用^[1]。

许多研究者运用数值模拟针对强夯加固从不同角度进行了研究,取得了不少突破性的成果^[2-13]。向泽华等^[4]采用 ANSYS/LS—DYNA 有限元软件,同时将材料的非线性大变形等因素考虑到模拟过程中,得到强夯过程中土体动应力和位移的变化曲线,并总结其变化规律和分布特征;王卫强^[5]针对强夯法加固土体具有的大变形特点,采用非线性有限单元法,结合修正拉格朗日网格,对粗粒土高填方地基强夯法加固过程进行了数值仿真,通过分析道基中应力波的衰减过程以及位移场的变化,探讨了强夯加固机理;刘香等^[6]依托某钢铁企业新体系高炉矿渣地基处理项目,构建拟静力法下夯锤与土体之间的接触力求解模型,并基于 FLAC^{3D} 软件,模拟高炉渣粉煤灰地基强夯过程中的地基土瞬时沉降变化,并对夯后地基土力学性能进行分析;张雨等^[7]根据营口机场工程典型试验区地基现场处理数据,基于 FLAC^{3D} 对试验区强夯处理进行了数值模拟研究,评价各地基处理方法的优缺点;闫吉成等^[8]以绍兴新东线软基加固工程为背景,采用 ABAQUS 对强夯加固粉土地基进行模拟,结合现场实测数据分析了夯击次数夯击能落距和水位对强夯加固效果的影响。

强夯加固地基时,回填土地基土在巨大的冲击力作用下的动力响应问题非常复杂,采用数值分析方法就成为研究强夯加固机理的有效途径,可更系统地对整个强夯过程进行分析研究。

本文在强夯现场试验和实测资料的基础上,结合工程及加固区域地层环境特点,采用 ABAQUS 对回填土强夯动力响应进行数值模拟研究,探讨相关物理量的响应规律,并与现场监测规律对比,给出可供回填土地基强夯理论研究和工程实践应用的参考结论。

1 工程概况

北京园博园回填土强夯工程试验场地位于湿地南端,地形平缓、地面高程约 67 m 左右,该区域填土

分布厚度相对较薄,一般为 5~8 m,适宜采用 3 000 kN·m 夯击能的强夯地基处理方法。地层岩性上部为人工杂填土,下部第四系原状卵石层,自上而下分述如下^[14]。

杂填土稍湿,稍密,组成成份建筑房渣土约占 30%~40%,砂土约 20%~30%,粉土/粉质黏土约占 25%~35%,其他约占 5%~10%,含少量生活垃圾,级配不良。天然密度 1.08~1.67 g/cm³,平均值为 1.28 g/cm³,标贯贯入试验击数一般 5~16 击,局部达 18~45 击,重型圆锥动力触探击数一般 4~12 击,局部大于 18 击,杂填土现场照片如图 1 所示。卵砾石,密实,厚度大于 10 m。场区地下水位埋深大于 15 m。



图 1 杂填土现场照片

试验面积范围为 60 m×20 m,地形相对平整,选用强夯夯击能量为 3 000 kN·m,夯锤为短柱形,截面直径 2.4 m,锤重 20 t;遍夯夯击能量为 1 000 kN·m,夯锤搭接 1/4,共两遍。

现场布置夯击点共 8 个,布置型式为正方形,第 1 排 4 个,第 2、3 排各 2 个,夯点距 5 m,如图 2 所示,其中夯击点的编号代表夯击次序。

点夯设计为每个夯点夯击 7 次,按次序夯击 1—8 夯点,每锤记录 1 次所有数据。遍夯重锤落距 7.5 m,每个位置夯 2 锤,遍夯整个夯击区域,总共进行 2 次遍夯,每锤记录 1 次振动数据,每遍记录 1 次所有数据。

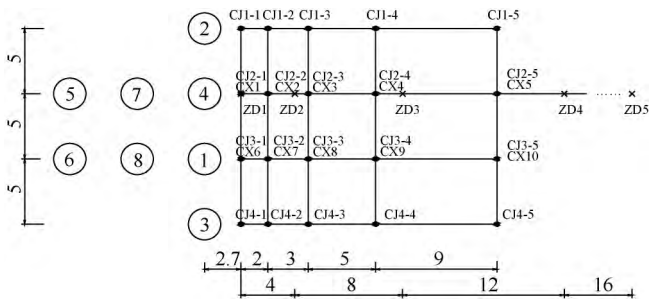


图2 现场夯点、测点和测线示意(单位: m)

2 分析模型和力学参数

根据工程及加固区域地层环境特点,以及夯锤与地基土的作用和被击土体的变形特征,分析模拟时可近似将夯击区域的变形效应简化成轴对称问题来处理,故建立的简化轴对称力学模型如图3所示。模型分夯锤与被夯击区两部分^[15]。

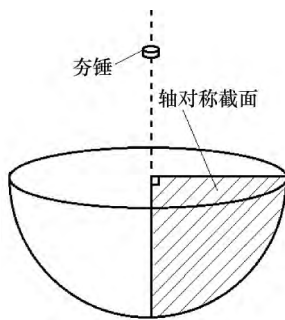


图3 空间轴对称力学模型

为消除环境约束及空间效应的影响,数值模型取土体部分半径为120 m,其中内部60 m划分为四边形四节点轴对称应力单元,地基土模型分两层建立,上层模拟杂填土,下层模拟卵石层,两层的厚度分别为5 m和10 m,建立的强夯模型如图4所示。整个模拟过程中夯锤共夯击地基土7次。



图4 强夯数值模型

对具有相同特征尺寸的模型来说,和静力问题相比,动力问题的网格要求更为严格。在考虑网格疏密程度时,不仅要在应力梯度较大处加密网格,而且还要保证单元边长不超过波长的1/8。这里设置单元的最大边长为0.4 m,满足条件。在夯击区附近4 m

的范围内,动应力变化剧烈,单元尺寸进一步降至0.1 m。

外层60 m划分为无限元,使无限元延伸方向的节点到极点(夯点)的距离是交接点到极点距离的两倍,如图5(a)外层单元所示。在有限元和无限元交界处可看作存在一个阻尼边界条件,当波传至边界时受阻尼作用使反射波消失。

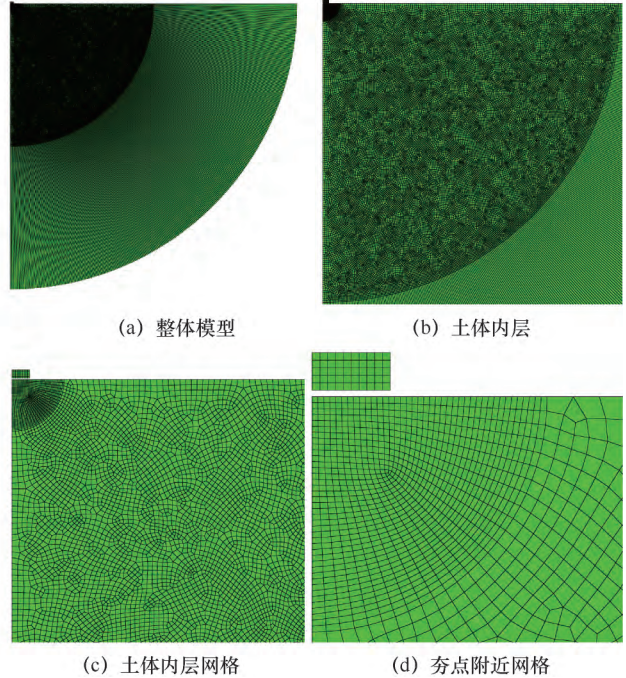


图5 回填土地基强夯网格划分

模型中的锤土接触设置为面对面接触设置,其中刚度较大的夯锤接触面定义为主控面,土体的接触面定义为从属面,夯锤的接触面上的单元长度应长于土体接触面上的单元长度,于是将夯锤的单元长度设为0.12 m。

锤体为半径1.2 m,高0.57 m,密度为7 900 kg/m³的柱体。根据工程实际夯锤夯击能量设计要求,夯锤初始高度为15 m,当其接触土体时,速度 $v = \sqrt{2gh} = 17.1$ m/s,所以给夯锤施加一个17.1 m/s的向下初速度。为了获得足够完整的振动时程,整个模拟时长为设为1 s。

岩土的基本本构模型主要包括理想弹性体模型和弹塑性体模型等,而每一种模型又有其具体的分类,常见的弹塑性模型有Mohr-Coulomb模型和Drucker-Prager模型等,针对强夯施工,相对于Mohr-Coulomb模型等其他弹塑性模型,Drucker-Prager模型能够更好地模拟动荷载的作用,适用于动力分析。而且大量的研究也认为Drucker-Prager模型适用于岩土动力学的计

算, 其计算结果也比较精确, 故在此采用该模型。

Drucker-Prager 模型的屈服准则表达式为

$$\begin{cases} F(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \\ k = \frac{\sqrt{3} C \cos \varphi}{\sqrt{3 + (\sin \varphi)^2}} \\ \alpha = \frac{\sqrt{\sin \varphi}}{\sqrt{3} \sqrt{3 + (\sin \varphi)^2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力偏张量第二不变量; C 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角。

对于动力学问题, 在求解过程中常应用模态叠加法和直接积分法, 其中模态叠加法一般只用于线性问题, 直接积分法可用于非线性问题。而直接积分法又可分为显示分析和隐式分析, 其中隐式分析更适用于光滑的非线性动力学问题, 而显式分析更适用于短暂、瞬态的动力学问题, 如冲击、爆炸等。Drucker-Prager 模型按照其屈服面在子午面的形状分为了线性模型、双曲线模型以及指数模型。由于双曲线模型和指数模型只适用于隐式分析, 而线性模型可用于显示分析, 所以在此采用线性模型。

线性模型在 $p-t$ 应力空间的屈服面表达式为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (2)$$

式中, $t = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right]$; β 为屈服面在 $p-t$ 应力空间上的倾角, 与摩擦角有关; k 为三轴拉伸强度与压缩强度的比值; d 为屈服面在 $p-t$ 应力空间 t 轴上的截距。

根据经验和以夯坑沉陷为控制量的试算, 上层的杂填土初始参数为: 密度为 1350 kg/m^3 , 弹性模量 $E=5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.33 , 摩擦角为 30° , 流应力比为 0.9 , 下层土体为卵石层, 密度为 2070 kg/m^3 , 弹性模量 $E=30 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.3 , 摩擦角为 32° , 流应力比为 0.85 。

夯锤采用弹性模型, 密度 7900 kg/m^3 , 弹性模量 $E=206 \text{ GPa}$, 泊松比为 0.25 。每次夯击之后, 上层土体的弹性模量发生变化, 可根据经验公式 $E = E_0 N^{0.516}$ 计算^[16]。

3 模拟结果与规律分析

3.1 动应力分析

应用软件的后处理模块能以动画形式观察土体内部不同时刻应力波的传播状态。图 6 为强夯锤-土接触后 $0.01 \sim 0.18 \text{ s}$ 各时刻应力波的分布图。为了使应力波的传播特征能更清楚的展示, 图中取相邻两张应

力波图的对应时间差为 0.01 s , 相应的应力为 Mises 应力。

由图 6 可以看出, 在夯锤冲击土体后首先会在土体中产生一个球形应力波阵面, 该波阵面即为纵波波阵面。经过 0.13 s 该波阵面到达有限元与无限元交界处即 60 m 距离处, 由此可估算纵波的波速约为 480 m/s , 随后该波阵面透射出模型范围, 不存在反射波, 由此可看到无限元对透射边界的模拟有较好的效果。

在纵波之后横波之前还存在着一个圆锥形的波阵面(图中 $0.10 \sim 0.15 \text{ s}$ 倾斜的波阵面), 该波称为首波, 首波之所以产生是因为纵波不能满足自由表面的零应力边界条件。首波波阵面与 x 轴的夹角 θ 满足

$$\sin \theta = \frac{c_T}{c_L} \quad (3)$$

图中 θ 约为 30° 左右, 因此可估算出横波波速为 240 m/s 左右, 处在场地的钻孔内横波波速测试结果的范围内。

在横波之后是瑞利波, 可以在土体表层观察到, 随深度衰减较快, 仅限于土体表面往下 2 m 左右。

根据强夯的振动波压密理论, 夯击中产生的强大应力波扫掠过之处土体颗粒会错位, 导致密实度提升, 而在夯点下方区域中, 衡量应力波的大小可以依据竖向动应力的峰值。根据夯坑中心下方 $1 \sim 10 \text{ m}$ 共十个点处的竖向动应力的时程曲线所获得的动应力峰值, 绘制的动应力峰值随深度的变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, 最大竖向动应力随深度增大而衰减。夯点下方 1 m 处最大竖向动应力为 1.6 MPa , 4 m 处为 0.5 MPa , 6 m 处时为 0.2 MPa , 而后衰减缓慢, 10 m 处基本接近 0 。

3.2 位移分析

夯击后, 土体中变形最大的区域是夯坑以下的某个范围内, 在这个范围内的土体受到强烈压缩变得致密, 力学性能提高。通过后处理可看到土体中的位移分布。图 8 给出了夯击后土体夯坑附近的竖向位移、横向位移, 以及总位移云图。

由图 8(a) 分析可见, 夯击后夯坑近域竖向位移的等值线大致为椭圆形。竖向位移从夯坑底部向下逐渐减少, 夯坑底部处位移为 0.33 m ; 到 2.5 m 左右深度时, 位移已降至 0.05 m 以下。在夯坑边缘的浅层土体中, 产生了部分隆起, 在工程实践中的确能观察到这一次现象, 这说明夯坑边缘某个范围内的表层土有震松的情况。

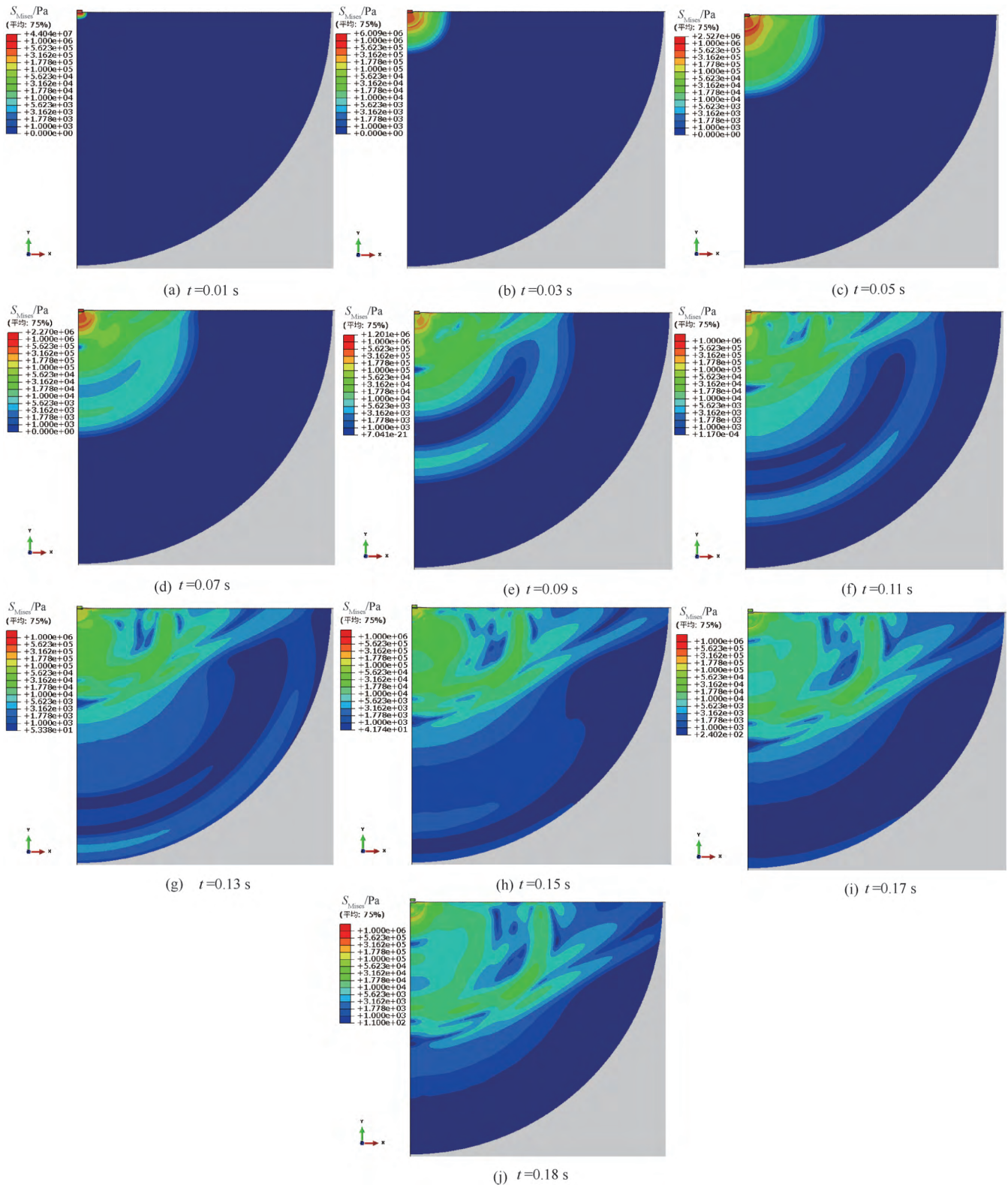


图6 应力波在土体中的传播规律(单位: Pa)

由图 8(b) 分析可见, 水平位移的等值线可近似为芒果形, 水平位移的最大值出现在夯坑底部边角处, 最大值接近 0.1 m, 并向周围逐渐减小, 在 1.5 m 深度处, 水平位移的最大值约 0.05 m; 在 2.5 m

深处, 水平位移的最大值已接近零。另外, 图中最外侧等值线最大宽度处的深度约为 1.2~1.3 m, 与上述加固影响区的计算值 1.22 m 比较接近。

总位移的等值线图形状大体上和竖向位移的等值

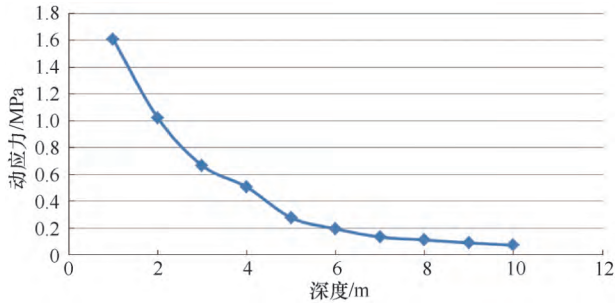


图7 竖向动应力峰值随深度的变化

线图一致,这也说明了夯点附近的位移主要以竖向位移为主,不同之处在于总位移的等值线相比竖向位移等值线形状更宽扁。

图9是夯坑中心下方竖向位移随深度的变化曲线。由图分析可以看出,竖向位移随着深度的增加而逐渐减小。在夯坑表面竖向位移为0.33 m,和实测值非常接近。随着深度的增加,在到达2.32 m深度之前,竖向位移随距离大致呈线性下降,这意味着在这一段距离内,竖向应变近似为常值,在深度超过2.32 m之后,竖向位移的下降减缓,但由于深度为2.32 m时位移已小于0.05 m,所以当深度增加至3.27 m时竖向位移已基本接近0。

4 模拟结果和实测数据的对比

为了检验上述数值模拟分析结果的可靠性,将其部分计算值与现场实测数据进行了对比分析。

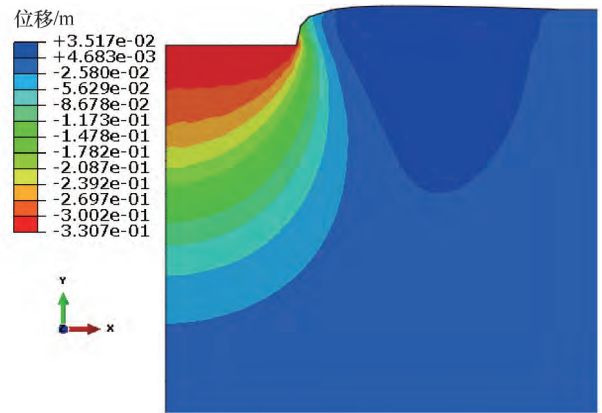
图10为夯点沉降量数值计算值与实测值的对比曲线,图11给出了单击沉降量数值计算值与实测值的对比曲线^[15]。

夯点沉降量和沉降增量的计算平均值均与现场对应实测平均值吻合较好,相对误差很小。总体来说,夯坑沉降量随着夯击次数的变化呈现负指数形式;当进行第7次夯击时,单击夯沉量已小于0.1 m,而且曲线的末端也趋于水平,可认为强夯地基已满足加固要求。据此,可以得到场地地基夯击沉降量的极限值在1.2~1.4 m左右。

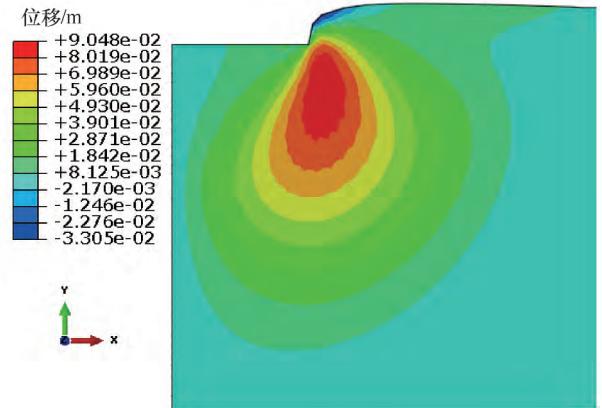
由此可知,数值模拟分析结果与工程实际较为接近,模拟结果具有一定的参考价值。

5 结论

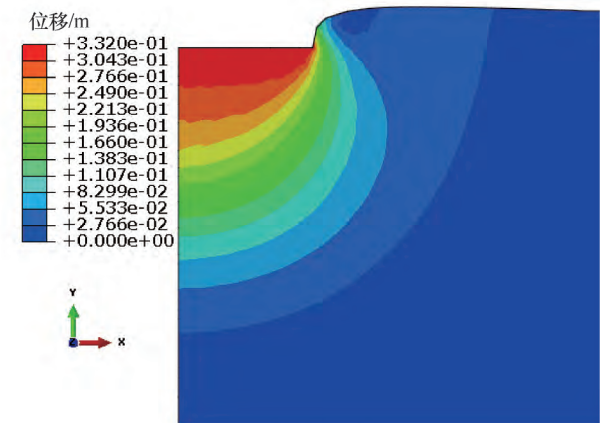
(1) 强夯会在地基中产生强大的动应力波,该应力波的波阵面会随着时间在地基中扩散开来,从而对它所扫掠过的区域进行加固。相对横向应力,竖向应力的最大值更大,并且竖向应力的分布区域主要集中在夯锤下方的土体中,而横向应力则更接近土体



(a) 竖向位移



(b) 横向位移



(c) 总位移

图8 土体位移沉降等值线图(单位: m)

表面。

(2) 动力数值模拟中夯坑的沉降量随夯击次数变化的曲线大致呈现负幂函数形式,第七击的单击沉降量小于0.1 m,总夯沉量1.23 m,曲线末端趋于水平,估计极限夯沉量在1.2~1.4 m之间。

(3) 强夯过程的数值模拟结果和实际测量结果比较接近,模拟分析得出的位移与应力变化规律对于研究强夯加固回填土地基的分析评价具有重要的参考意义。

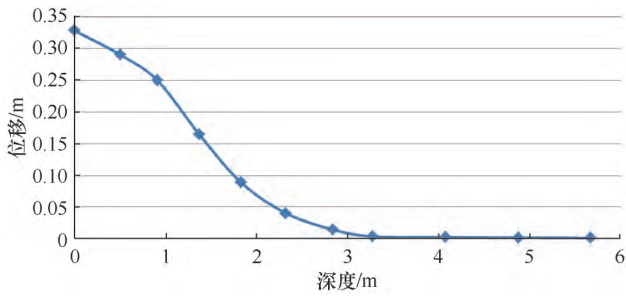


图9 竖向位移随深度的变化

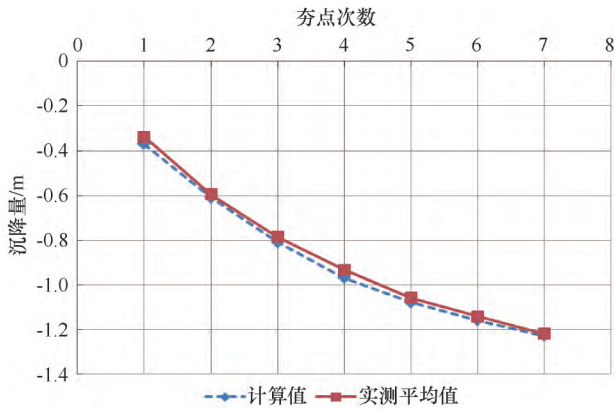


图10 夯点沉降量计算值与现场测量平均值的对比

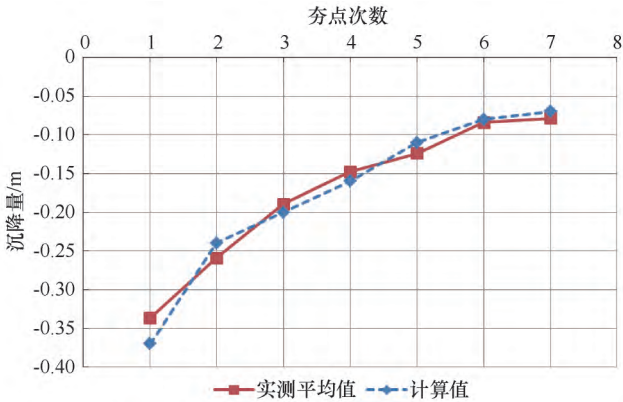


图11 单击夯沉降量计算值与各夯点实测平均值对比

对地表的沉降和振动进行了监测，由于条件的限制，并没有进一步对地下的动应力响应量进行监测，在条件许可下，可在地表以下埋设测点进行动应力

监测。

参考文献:

- [1] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 袁鸿鹄, 刘爱友, 姜晶, 等. 北京园博园回填土地基强夯振动效应测试研究[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(4): 541-545.
- [3] 文思强, 李云鹏, 马康. 强夯能量利用率反演及加固影响范围研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 185-192.
- [4] 向泽华, 胡焕校, 吴高权. 强夯作用下土体动力特性的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 207-211.
- [5] 王卫强. 强夯冲击响应数值模拟与设计参数研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(10): 116-118, 132.
- [6] 刘香, 周鑫, 许有俊. 高炉渣粉煤灰地基回填料的强夯数值模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1116-1122.
- [7] 张雨, 张延军, 胡延玉. 基于FLAC^{3D}的机场软基处理方法模拟研究[J]. 路基工程, 2017(3): 60-63, 68.
- [8] 闫吉成, 余湘娟, 陈永辉, 等. 粉土地基强夯加固效果影响因素数值模拟研究[J]. 能源与环保, 2018, 40(2): 150-155.
- [9] GHASSEMI A, PAK A, SHAHIR H. Numerical study of the coupled hydro-mechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1/2): 10-24.
- [10] 范文超, 蔡新, 徐宝明, 等. 强夯荷载作用下地基竖向位移数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 75-80.
- [11] 周亮. 强夯法加固软粘土地基的离散元数值分析[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(4): 40-42.
- [12] 朱本明. 基于FLAC软件模拟强夯加固吹填砂地基[J]. 水运工程, 2018(3): 161-165.
- [13] 周梦佳, 宋二祥. 高填方地基强夯处理的颗粒流模拟及其横观各向同性性质[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(12): 1312-1319.
- [14] 北京市水利规划设计研究院. 北京园博园湿地填土地基强夯加固试验实测分析研究[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2013.
- [15] 文思强. 基于回填土地基强夯试验的动力效应分析研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014.
- [16] 钱家欢, 帅方生. 边界元法在地基强夯加固中的应用[J]. 中国科学(A辑), 1987, 3(3): 329-336.

(责任编辑 王海锋)