

文章编号:1673-2049(2014)02-0105-07

天津滨海新区典型软土地基强夯法有限元分析

王晓平^{1,2}, 朱海涛^{1,2}, 李忠献^{1,2}, 苑红凯³, 王新岐³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘要:针对中国天津滨海新区典型软土地基强夯法适用效果进行了有限元分析。采用有限元计算分析软件 ABAQUS 的显式分析模块, 建立夯锤对土体冲击作用分析模型, 计算分析获得冲击过程地基表面的接触力历程, 将其作为强夯数值模拟的荷载输入模型, 运用有限差分软件 FLAC 3D 对天津滨海新区典型软土地基土体进行了单点多次夯击分析。结果表明:随着夯击次数的增加, 单点夯击沉降量不断减小而累计夯击沉降量逐渐增大, 8 次夯击后累计夯击沉降量趋于一个稳定值;强夯作用后土体的孔隙水压和土体竖向应力呈半球状分布, 在埋深方向上先增大后减小, 在埋深 5 m 处孔隙水压和竖向应力已很小, 单点多次夯击最有效影响埋深大致在 5 m 范围内;该研究结论对相关的强夯工程具有一定的参考价值。

关键词:强夯法;软土地基;有限元分析;数值模拟;ABAQUS;FLAC 3D;孔隙水压

中图分类号:TU473 **文献标志码:**A

Finite Element Analysis of Dynamic Consolidation Method on Typical Soft-soil Foundation in Tianjin Binhai New Area

WANG Xiao-ping^{1,2}, ZHU Hai-tao^{1,2}, LI Zhong-xian^{1,2}, YUAN Hong-kai³, WANG Xin-qi³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: Authors numerically analyzed the effect of a dynamic consolidation method on a typical soft-soil foundation in Tianjin Binhai New Area, China. Firstly, finite element analysis software ABAQUS was used to establish an impact model of a rammer on soils obtaining a time history of interface contact force. Using this time history data as a load input, the finite difference software FLAC 3D was further employed to analyze the effect of a dynamic consolidation method on the typical soft-soil foundation. The effect on a single point tamped multiply was focused. The results show that with the increase of the tamping number, the tamping settlement increment is becoming smaller along with the total cumulative settlement increasing. After tamped eight times, the total cumulative settlement increment approaches stable. Both excessive pore water pressure and vertical stress of soil have a half-spherical distribution. Along with the depth, these values begin to gradually increase firstly and then gradually decrease. At the depth of about 5 m, the values of pore water pressure and vertical stress are already very small. Therefore, the most effective influence depth of this dynamic consolidation method is within about 5 m. The study

收稿日期:2014-01-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB013603)

作者简介:王晓平(1987-),男,浙江金华人,工学硕士研究生,E-mail:wangxp1158@163.com。

conclusion can provide a constructive reference for the relevant dynamic consolidation engineering application.

Key words: dynamic consolidation method; soft-soil foundation; finite element analysis; numerical simulation; ABAQUS; FLAC 3D; pore water pressure

0 引言

强夯法,也称动力固结法(Dynamic Consolidation Method)或动力压实法(Dynamic Compaction Method)。该方法是采用起重设备将重锤(质量一般为 5~40 t)起吊到一定高度(6~30 m),然后使重锤自由下落,利用重锤的冲击在地基土中产生强烈的冲击波和动应力使地基土固结,从而提高地基土的强度,降低土的压缩性,改善砂性土的抗液化条件,消除湿陷性黄土的湿陷性等土体力学特性。另外,强夯法还可以提高土层的均匀程度,减少将来可能出现的地基不均匀沉降等问题。强夯法是由法国 Menard 技术公司在 1969 年首先采用的地基处理方法,由于该方法在夯实法国 Riviera 滨海填土中的成功应用,随即引起工程界的广泛关注,很快地推广到世界各地的地基处理工程中。强夯法在实践中已被证实是一种具有效率高、应用性强等特点的地基处理方法,已被广泛应用于地基处理工程中^[1-4]。然而目前的相关研究对强夯法压实地基土的作用机理仍不清楚,设计方法很大程度依赖于工程经验,强夯法理论研究工作远落后于工程应用。工程中强夯法的加固效果及夯击参数的取值很大程度上依靠施工现场试验或工程经验来确定。大量简单重复的场地试夯造成人力、物力及时间的浪费,因此开展强夯法对地基土加固机理的数值模拟分析研究工作是十分必要的。

目前,在对强夯产生的瞬态荷载模拟方面,通常根据经验将其简化为三角形波或半正弦波^[5-7]。在夯锤底部及地基表面的动接触应力计算方面,Scott 等^[8]用理想模型来模拟地基土在强烈冲击下的反应,推导了夯锤与土体接触面处的应力计算公式。Miller 等^[9]也提出了确定最大接触动应力的经验公式。钱家欢等^[10]修正了 Scott 接触面应力计算公式,分别用有限差分法、边界元法和集中质量法对砂土和软粘土进行了轴对称三维强夯数值分析,由此求得土体的动力响应,并确定了土体加固深度和土性变化程度。高大钊等^[11-13]利用 Drucker-Prager 本构方程,采用三角形脉冲荷载进行了轴对称三维强夯数值分析,得到了土体应力、孔隙水压力和土体变

形的计算结果。虽然这些简化荷载方式及经验公式使数值模拟计算大大简化,但是这些方法未能较为准确地考虑夯锤作用于土体的整体力学作用过程,所以采用这种简化荷载方式获得的分析结果可能存在较大偏差。

本文中笔者在已完成的天津滨海新区旅游区典型软土地质情况调查和强夯试验段试验检测的基础上,采用有限元计算分析软件 ABAQUS 的显示分析模块,建立了夯锤对土体冲击作用模型,计算分析获得夯锤对土体冲击作用的动力荷载时程。基于获得的该动力荷载时程,运用岩土工程专用有限差分软件 FLAC 3D 对土体进行单点多次夯击分析,给出了相应的应力场、位移场和孔隙水压分布规律,该研究结论对相关的强夯工程提供了一定的参考。

1 ABAQUS 冲击作用模型

1.1 几何模型

采用 ABAQUS 建立的有限元模型(图 1)包括 2 个部分:一部分是夯锤模型,另一部分是土体模型。根据现场试验实测影响范围及软土地质调查,将夯锤模拟成一块短圆柱形刚体,直径为 1.5 m,高度为 0.726 m,质量为 10 t;将土体模拟成水平层状,共分为 5 层,每层土质且各向同性,为 15 m×15 m×10 m 的六面体三维模型,利用该三维模型模拟半空间土体。采用夯锤受到的夯击能所对应的初速度进行加载,模拟夯锤和地基碰撞,然后夯锤在半空间表面做自由振动。

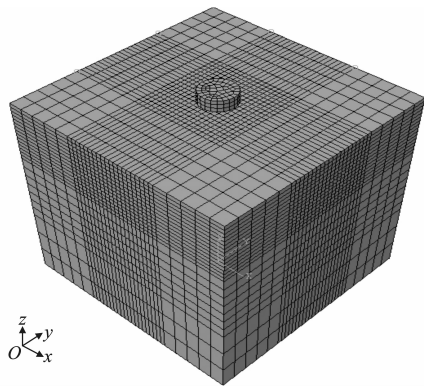


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model

1.2 材料本构模型

当夯锤作用于地基土时,土体将产生相应的形变,由可恢复的形变和不可恢复的形变 2 个部分组成,所以对于土体的材料特性采用弹塑性本构关系,其弹塑性应力-应变关系的矩阵表达式为

$$d\sigma = \mathbf{D}_{ep} d\epsilon \tag{1}$$

$$d\epsilon = d\epsilon^{el} + d\epsilon^{pl} \tag{2}$$

式中: $d\sigma$ 为应力增量; \mathbf{D}_{ep} 为弹塑性刚度矩阵; $d\epsilon$ 为应变增量; $d\epsilon^{el}$ 为应变增量的弹性部分; $d\epsilon^{pl}$ 为应变增量的塑性部分^[14]。

因 Mohr-Coulomb 材料模型在绝大部分的岩土分析中具有足够的精度,故本文中采用 ABAQUS 材料库中的 Mohr-Coulomb 塑性模型来模拟强夯冲击荷载作用下土体所发生的塑性形变。Mohr-Coulomb 模型假设当任意一点的剪应力达到某个值时,材料发生屈服,剪应力与同一平面内的正应力呈线性关系,其屈服函数 F 和塑性流动势函数 Q 的形式为

$$F = R_{mc}q - p \tan(\varphi) - c \tag{3}$$

$$Q = \sqrt{(e c_0 \tan(\Psi))^2 + (R_{mw}q)^2} - p \tan(\Psi) \tag{4}$$

式中: φ 为内摩擦角; c 为粘聚力; R_{mc} 为偏应力的一种度量,控制屈服面在 π 平面的形状; p 为广义压应力; q 为广义剪应力; Ψ 为膨胀角; c_0 为初始屈服内聚力; e 为偏心参数,控制塑性流动势函数与其渐近线之间的距离^[11]; R_{mw} 为偏应力另一种度量,控制塑性势面在 π 平面的形状。

1.3 单元选择

ABAQUS 单元库中大部分的单元都适用于动力问题分析。为了能更好地模拟土体在冲击荷载作用下的响应,考虑到一阶单元比二阶单元能更好模拟应力波的传播,本文中采用一阶 8 节点的三维实体减缩积分单元 C3D8R^[15],如图 2 所示,其中, ξ, η, ζ 均为单元局部坐标。

1.4 边界条件

土体底部边界为 $u_x = u_y = u_z = 0$,侧面边界为 $u_z = 0$,其中, u_x, u_y, u_z 分别为沿坐标 x, y, z 方向位

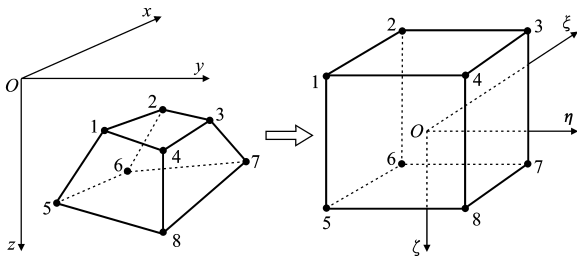


图 2 实体单元向等参元的转化
Fig. 2 Transformation of Entity Unit to Isoparametric Element

移,即在土体的底部对 x, y, z 三个方向进行平动约束;侧面边界为 $u_z = 0$,对 4 个侧面的 z 方向进行平动约束。

1.5 接触模拟

裘以惠等^[16]在山西潞城 II 级自重湿陷性黄土区,对夯锤冲击地基的作用过程进行了实测,夯锤对地基的冲击碰撞作用时间 T 为 $0.04 \sim 0.2$ s。本文中采用钱家欢法加卸载模型^[17]中的接触历程公式进行计算

$$T = \frac{\pi}{2\omega} + \frac{1}{\omega} \arctan(\sqrt{\frac{4MS}{R'^2} - 1}) \tag{5}$$

$$S = \frac{2rE}{1 - \mu^2} \tag{6}$$

式中: M 为夯锤质量; S 为加载弹性参数; E 为土体的弹性模量; μ 为泊松比; R' 为阻尼常量, $R' = 0.6\pi r^2 \sqrt{\rho E_{sul}}$, ρ 为土体介质密度, E_{sul} 为土体卸载弹性模量, r 为夯锤半径; ω 为加载频率, $\omega = \sqrt{S/M}$ 。

1.6 冲击荷载模拟

计算实例来自天津滨海新区某强夯工程项目,根据现场勘查报告将场地土体分 5 层,ABAQUS 有限元模拟输入的土体参数如表 1 所示。

模拟夯击能为 $1\,000\text{ kN} \cdot \text{m}$,代入公式(5)计算得到夯锤与土体接触时间为 0.11 s ,时间步长为 0.002 s ,计算后得到竖向接触力的时程曲线如图 3 所示。计算结果表明,夯锤与地基土之间竖向接触力刚开始随着时间增长而增大,在 0.025 s 时达到

表 1 ABAQUS 有限元模拟输入的土体参数

Tab. 1 Soil Parameters of ABAQUS Finite Element Simulation

| 土层 | 弹性模量 E/MPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ | 膨胀角 $\Psi/(\text{^\circ})$ | 泊松比 μ | 塑性应变 ϵ | 粘聚力 c/kPa | 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|------|---------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------|-----------------|--------------------|---|
| 素填土 | 2.5 | 14 | 5 | 0.30 | 0 | 14.0 | 1 930 |
| 粉质粘土 | 5.3 | 9 | 5 | 0.32 | 0 | 9.0 | 1 900 |
| 粘土 | 2.4 | 13 | 5 | 0.35 | 0 | 9.7 | 1 890 |
| 粉质粘土 | 3.1 | 17 | 5 | 0.35 | 0 | 12.0 | 1 910 |
| 粉土 | 7.9 | 26 | 5 | 0.25 | 0 | 11.0 | 1 960 |

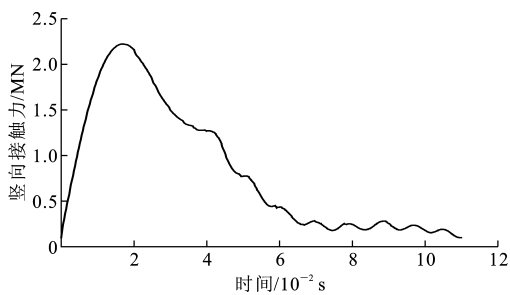


图3 1 000 kN · m 夯击能竖向接触力时程曲线

Fig. 3 Time History Curve of 1 000 kN · m Vertical Tamping Contact Force

峰值,然后随着时间增加,接触力开始变小直至为夯锤自重,整个接触历程考虑夯锤作用于土体的整体力学作用,与以往分析结果相吻合^[18-19]。

2 FLAC 3D 有限元分析模型

采用有限元计算分析程序 ABAQUS 的显式分析模块建立夯锤对土体冲击作用模型,获得其冲击作用动力荷载时程,并作为强夯法数值模拟的荷载输入模型,运用岩土工程专用有限差分软件 FLAC 3D,对天津滨海新区某强夯工程项目的典型地段进行分析研究。

2.1 FLAC 3D 模型的假定

影响强夯法加固地基的因素较多,且土体的变

形也十分复杂,同时考虑到模型要与实际工程特点相适应并且便于分析求解,所以所选地基模型不宜太复杂。本文中 FLAC 3D 建立的有限元模型对强夯土体做如下假设:

- (1)模拟范围内的地基为均质各向同性弹塑性半无限空间体。
- (2)在计算中仅考虑重力的作用。
- (3)流体流动符合达西定律,且各方向渗透系数相等。
- (4)夯锤假设为刚体,并在夯击过程中夯锤底部始终保持水平位置。
- (5)土体颗粒不可压缩。

2.2 FLAC 3D 本构模型及材料参数

FLAC 3D 程序内置有 10 种应用较为广泛的弹性模型和塑性模型,本文中对作为主要模拟对象的土体采用的是 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。笔者所研究强夯工程项目的典型地段的土体共分 5 层,由上到下分别为 1.6 m 厚的素填土、0.5 m 厚的粉质粘土、0.5 m 厚的粘土、2.6 m 厚的粉质粘土、8 m 厚的粉土。FLAC 3D 计算所输入的土体参数见表 2。

2.3 FLAC 3D 几何模型及边界条件

根据模拟土体的实际情况和结合强夯法有限元

表 2 FLAC 3D 计算所输入的土体参数

Tab. 2 Soil Parameters of FLAC 3D Calculation

| 土层 | 体积模量 K/MPa | 剪切模量 G/MPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ | 泊松比 μ | 粘聚力 c/kPa | 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 孔隙率 | 厚度/m |
|------|---------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|---|------|------|
| 素填土 | 2.10 | 0.97 | 14 | 0.30 | 14.0 | 1 930 | 0.44 | 1.6 |
| 粉质粘土 | 4.87 | 1.99 | 9 | 0.32 | 9.0 | 1 900 | 0.47 | 0.5 |
| 粘土 | 2.63 | 0.88 | 13 | 0.35 | 9.7 | 1 890 | 0.47 | 0.5 |
| 粉质粘土 | 3.42 | 1.14 | 17 | 0.35 | 12.0 | 1 910 | 0.45 | 2.6 |
| 粉土 | 5.25 | 3.15 | 26 | 0.25 | 11.0 | 1 960 | 0.41 | 8.0 |

数值模拟相关资料^[20],本文中建立三维地基土体模型,形状为 30 m×30 m×15 m 的六面体。模型采用 FLAC 3D 六面体单元,网格单元尺寸取 $\Delta l = (\frac{1}{10} \sim \frac{1}{8})\lambda$, λ 为最高频率对应的波长。计算共划分 13 500 个单元,15 376 个网格节点。FLAC 3D 有限元模型网格剖面如图 4 所示。

FLAC 3D 有限元软件中,对土体边界条件的定义通常不采用位移边界条件,而是采用速度边界条件,即通过设定模型边界节点的速度来实现位移边界的控制。模型侧面限制水平移动,模型的底面限制竖向移动。在地表下 0.3 m 处加地下水位,形成初始孔压场,流体边界除上表面为可渗透边界

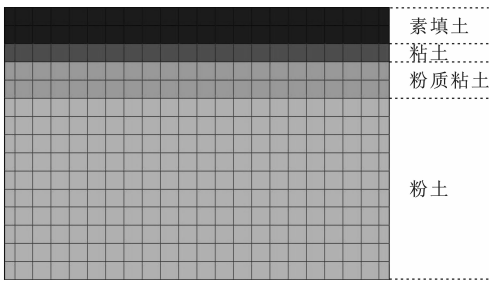


图 4 FLAC 3D 有限元模型网格剖面

Fig. 4 Grid Section of FLAC 3D Finite Element Model

外,其余边界均为不可渗透边界^[21-22]。

2.4 加载方式

本文中将采用 ABAQUS 有限元程序计算得到的 1 000 kN · m 夯击能作用下冲击土体的动力荷

载时程转化成平均应力时程曲线,在数值模拟分析中,将该应力时程波加载到拟定的夯锤与土体接触面上,动力计算控制在 10 000 计算步内完成分析,夯锤与地基土冲击接触过程为瞬时完成,此过程为不排水过程^[21-22]。

3 强夯法有限元分析

3.1 位移场分布规律分析

夯击中心点埋深 0 m 处的第 1 次夯击竖向位移时程曲线如图 5 所示,曲线刚开始下降很明显,接着出现回升。曲线的发展态势代表了整个强夯土体的竖向位移变化过程,位移时程曲线大致分为竖向位移增加段和竖向位移减少段,当处于竖向位移增加段时夯点沉降很快,当处于竖向位移减少段后期时,表现出土体回弹的过程,接触力接近夯锤自重。

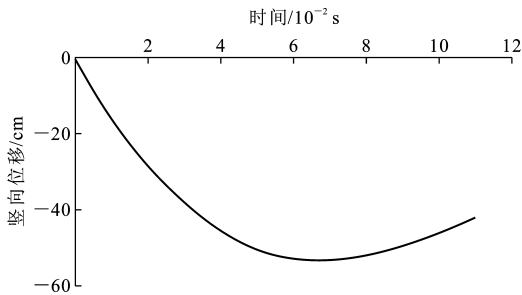


图 5 夯击中心点埋深 0 m 处的第 1 次夯击竖向位移时程
Fig. 5 Time History of Vertical Displacement at 0 m Depth of Tamping Center for the First Tamping

距夯击中心点一定范围内,在 10 次夯击下的竖向位移曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,土体的竖向变形主要发生在距中心点水平距离 2.5 m 范围内,夯锤直接作用接触范围内夯击沉降量最大。

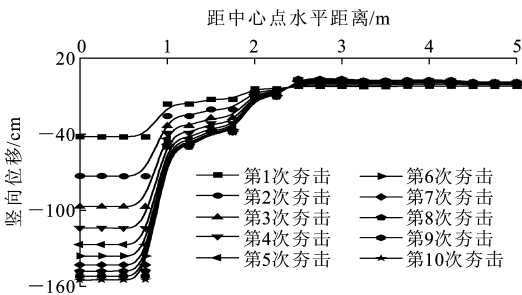


图 6 不同夯击次数下的竖向位移曲线
Fig. 6 Curves of Vertical Displacement Under Different Tamping Times

本文中计算了夯击中心点埋深 0 m 处的累计竖向位移和单次竖向位移。将单次夯击竖向位移和累计夯击竖向位移与夯击次数做成关系曲线,如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着夯击次数的增加,土

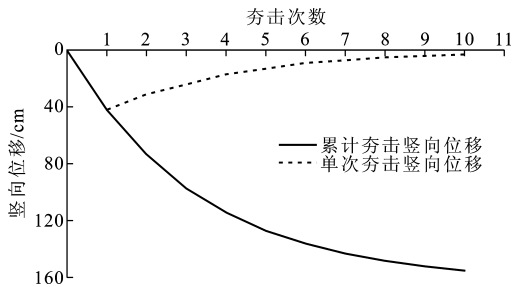


图 7 夯击中心点埋深 0 m 处竖向位移随夯击次数变化曲线
Fig. 7 Variation Curves of Vertical Displacement with Numbers of Tamping at 0 m Depth of Tamping Center

体夯击沉降量也增加,但是最后几次的夯击沉降增量逐渐减小,曲线斜率增长明显变缓。在前 6 次夯击过程中,竖向位移随夯击次数的变化较为明显,且单次夯击沉降增量均大于 10 cm。在这种情况下随着夯击次数的增加,将有利于加固效果的提高,而夯击超过 6 次后,夯击沉降曲线发展较为平缓,此时加固效果的提高就不太显著。经计算可知,前 6 次夯击累计沉降量已占总沉降量的 85%,在第 8 次夯击后单次夯击的位移增量小于 6 cm,达到收锤标准。

夯击中心点处不同埋深点的竖向位移随埋深变化曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,竖向位移主要发生在埋深小于 4.2 m 的土体范围内,其位移峰值随埋深增加呈明显递减趋势。

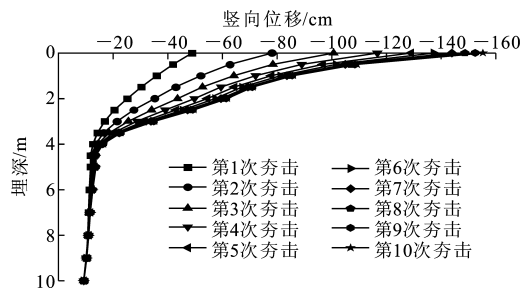


图 8 夯击中心点处竖向位移随埋深变化曲线
Fig. 8 Variation Curves of Vertical Displacement of Soil with Depths at Tamping Center

3.2 土体竖向应力分布规律分析

夯击中心点处竖向应力随埋深变化曲线如图 9 所示。埋深在 0.5~4 m 范围内应力受夯击影响较大,该范围内应力明显增大,并沿埋深土体应力波动明显,埋深 1~1.5 m 范围内出现应力峰值,当埋深超过 6 m 时,土体应力几乎不受夯击影响。表 3 中给出了累计应力峰值和单次应力峰值增量。由表 3 可以看出,随着夯击次数的增加,单次夯击土体的应力峰值增幅越来越小,趋于稳定。

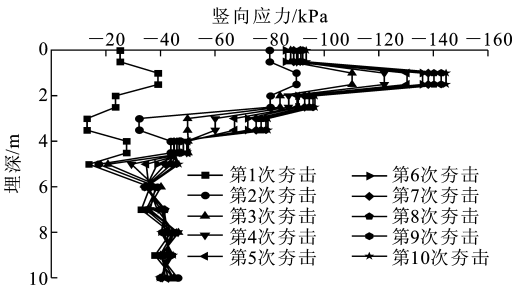


图 9 夯击中心点处竖向应力随埋深变化曲线
Fig. 9 Variation Curves of Vertical Stress with
Depths at Tamping Center

3.3 孔隙水压分布规律分析

夯击中心点处孔隙水压随埋深变化曲线如图10

表 3 累计应力峰值与单次应力峰值增量

Tab. 3 Increments of Accumulative Maximum Stress and Single-tamping Maximum Stress

| 夯击次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 累计应力峰值/kPa | -44 | -101 | -124 | -137 | -147 | -153 | -156 | 158 | -161 | -163 |
| 单次应力峰值增量/kPa | -44 | -57 | -23 | -13 | -10 | -6 | -3 | -2 | -3 | -2 |

注：FLAC 3D 计算的应力受压为负。

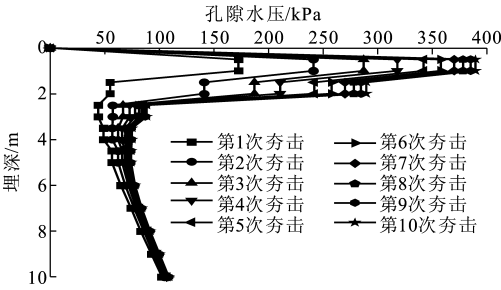


图 10 夯击中心点处孔隙水压随埋深变化曲线
Fig. 10 Variation Curves of Pore Water Pressure with
Depths at Tamping Center

固地基存在一个最佳夯击次数,通过分析竖向位移与夯击次数的关系,建议本工程的最佳夯击次数控制在 8 次左右,以免造成不必要的浪费。

(3)由单点夯击数值模拟的结果可知:强夯作用后土体的超孔隙水压和土体竖向应力呈半球状分布,在埋深方向上先增大后减小,随着埋深的增加,土体内的超孔隙水压和应力迅速减小,在埋深 5 m 处超孔隙水压和动应力已很小,单点多次夯击影响埋深大致在 5 m 范围内。强夯加固地基有一定的影响深度,如果要增大影响范围,建议提高单次夯击的夯击能。

参考文献:

References:

[1] 徐至钧,张亦农. 强夯和强夯置换法加固地基[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
XU Zhi-jun, ZHANG Yi-nong. Dynamic Compaction

所示。与土体竖向应力变化相似,孔隙水压沿埋深增加先增大后减小。由于地表处排水,在强夯作用时间内孔隙水压为 0。当埋深为 0.5~1 m 时,孔隙水压达到一个峰值,此后随着埋深的增加,孔隙水压逐渐减小,当埋深大于 5 m 时,孔隙水压几乎不受强夯影响。

4 结 语

(1)单点夯击数值模拟过程中的竖向位移计算分析表明,强夯加固地基过程中存在强夯土体在夯击作用下土体沉降后又出现回弹的现象。

(2)由单点夯击数值模拟的结果可知:强夯法加

and Dynamic Compaction Replacement Method in Foundation Reinforcement [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[2] 段辉林,刘 山. 湿陷性黄土地区路基强夯施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(10): 60-62.
DUAN Hui-lin, LIU Shan. Dynamic Compaction Technology for Subgrade in Collapsible Loess Area [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(10): 60-62.

[3] 樊世群. 强夯法在杂填土施工中参数的确定[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(7): 45-47.
FAN Shi-qun. Determination of Parameters in Miscellaneous Fill Construction by Heavy Tamping Method [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(7): 45-47.

[4] 米 峻,李爱国,李 伟. 湿陷性黄土路基强夯法施工工艺探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(12): 68-71.
MI Jun, LI Ai-guo, LI Wei. Discussion of Power Ramming Technology for Collapsed Loess Subgrade [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(12): 68-71.

[5] PAN J L, SELBY A R. Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33(7/8/9/10): 631-640.

[6] 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): 329-336.
QIAN Jia-huan, SHUAI Fang-sheng. The Boundary Element Method in the Application of Dynamic Con-

- solidation in Foundation[J]. Scientia Sinica; Series A, 1987(3):329-336.
- [7] 牛志荣,杨桂通. 强夯作用下土体动力特性研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3):118-125.
- NIU Zhi-rong, YANG Gui-tong. Dynamic Characteristics of Soils During and After Dynamic Consolidation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(3):118-125.
- [8] SCOTT R A, PEARCE R W. Soil Compaction by Impact[J]. Geotechnique, 1975, 25(1):19-30.
- [9] MILLER G F, PURSEY H. The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-infinite Isotropic Solid[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1954, 233(1155):521-541.
- [10] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6):1-17.
- QIAN Jia-huan, QIAN Xue-de, ZHAO Wei-bing, et al. Theory and Practice of Dynamic Consolidation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6):1-17.
- [11] 高大钊. 地基加固新技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- GAO Da-zhao. The New Technology of Foundation Reinforcement[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] 吴铭炳, 王钟琦. 强夯机理的数值分析[J]. 工程勘察, 1989(3):1-5.
- WU Ming-bing, WANG Zhong-qi. Numerical Analysis of Dynamic Compaction Mechanism[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1989(3):1-5.
- [13] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. The Principles of Geotechnical Plastic Mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [14] Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. ABAQUS/Standard: User's Manual. Version 5. 8 [M]. Providence: Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, 1998.
- [15] 甘舜仙. 有限元技术与程序[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988.
- GAN Shun-xian. The Finite Element Technique and Procedure[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
- [16] 裘以惠, 郭玉玲. 强夯法加固地基的土体动应力量测[J]. 太原工学院学报, 1984(1):45-52.
- QIU Yi-hui, GUO Yu-ling. The In-situ Measurement of Dynamic Stress in Soil Mass During Heavy Taping by Dynamic Consolidation Method in Ground Improvement[J]. Journal of Taiyuan Institute of Technology, 1984(1):45-52.
- [17] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- QIAN Jia-hua, YIN Zong-ze. Theory and Numerical Calculation of Soil Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996.
- [18] 蒋鹏, 李荣强, 孔德坊. 强夯大变形冲击碰撞数值分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2):222-226.
- JIANG Peng, LI Rong-qiang, KONG De-fang. Numerical Analysis of Large Deformation Impact and Collision Properties During Dynamic Compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2):222-226.
- [19] 孔令伟, 袁建新. 强夯作用下成层地基的表面接触应力分布特征[J]. 力学学报, 1999, 31(2):250-256.
- KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on Surface Contact Stress Distribution Properties for Multi-layered Foundation During Dynamic Consolidation[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(2):250-256.
- [20] LYSMER J, WAAS G. Shear Waves in Plane Infinite Structures[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1972, 98(1):85-105.
- [21] 陈育明, 徐鼎平. FLAC/FLAC 3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- CHEN Yu-ming, XU Ding-ping. FLAC/FLAC 3D Foundation and Engineering Examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [22] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- PENG Wen-bin. FLAC 3D Tutorial Examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.