

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023020324021997

文章编号:1674-599X(2024)01-0016-12

引用格式:孙逸玮.强夯加固粉土地基的竖向附加动应力传递特性[J].交通科学与工程,2024,40(1):16-27.

Citation: SUN Yiwei. Vertical additional dynamic stress transfer characteristics of silty foundation reinforced by dynamic compaction [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 16-27.

## 强夯加固粉土地基的竖向附加动应力传递特性

孙逸玮

(上海港湾基础建设(集团)股份有限公司,上海 200434)

**摘要:**强夯法在各类地基处理项目中得到了广泛应用,但其加固机理仍落后于实践,特别是强夯引起的地基内部竖向附加动应力传递特性。鉴于此,先基于 Boussinesq 应力解和动量定理推导强夯竖向附加动应力和附加剪应力拟静力解。然后,以新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市机场北区扩建项目为工程背景,运用夯锤速度法,模拟 1 000 ~ 4 000 kN·m 能级间强夯引起的动力波传播过程、竖向附加动应力传递特性和夯后土体位移场。最后,将拟静力解与动力数值解的计算结果进行对比分析。研究结果表明:强夯引起的动力波传播呈半圆弧形,竖向附加动应力传递呈半椭圆形。动力波的传播距离决定了强夯影响范围,竖向附加动应力显著区边界决定了强夯有效加固区。由拟静力解得到的竖向附加动应力相比数值解沿深度方向的衰减更快。该研究结果可为强夯法地基处理工程提供重要参考。

**关键词:**强夯法;地基处理;竖向附加动应力;等效拟静力解;数值模拟

中图分类号:TU472.1

文献标志码:A

### Vertical additional dynamic stress transfer characteristics of silty foundation reinforced by dynamic compaction

SUN Yiwei

(Shanghai Geoharbour Construction Group Co. Ltd., Shanghai 200434, China)

**Abstract:** Dynamic compaction method is widely used in various ground improvement projects, but its reinforcement mechanism still lags behind practice, especially the transfer characteristics of vertical additional dynamic stress induced by dynamic compaction. In view of this, the pseudo-static solution of vertical additional dynamic stress and additional shear stress of dynamic compaction are derived based on Boussinesq stress solution and momentum theory. Secondly, taking the north extension project of Urumqi Airport in Xinjiang as the engineering background, the hammer velocity method is used to simulate the dynamic wave propagation process, vertical additional dynamic stress transfer characteristics and soil displacement field induced by dynamic compaction between 1000 ~ 4000 kN·m energy levels. Finally, the calculation results of pseudo-static solution and dynamic numerical solution are compared and analyzed. The results illustrate that the dynamic wave propagation induced by dynamic compaction presents a semi-circular arc, while the vertical additional dynamic stress transmission presents a semi-elliptical shape. The propagation distance of dynamic wave determines the influence range of dynamic compaction, and the boundary of vertical additional dynamic stress determines the effective reinforcement region of dynamic compaction. The vertical additional dynamic

收稿日期:2023-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078060)

作者简介:孙逸玮(1997—),男,上海港湾基础建设(集团)股份有限公司助理工程师,硕士。E-mail:sunyiwei@geoharbour.com

stress calculated by the pseudo-static solution attenuates faster along the depth direction than the dynamic numerical solution. The research results can provide an important reference for the dynamic compaction ground improvement project.

**Key words:** dynamic compaction; ground improvement; vertical additional dynamic stress; equivalent pseudo-static solution; numerical simulation

强夯法加固地基的形成和应用始于 1969 年法国工程师梅那(MENARD L)对法国南部戛纳附近滨海一居住建筑开展的地基处理工程<sup>[1]</sup>。强夯法的原理是利用机械使重锤从一定高度处自由下落,重锤落地的瞬间对原状土体进行动力夯实,达到提高地基承载力的效果。强夯法工程造价低、适应性强、施工效率高、绿色环保,在诸多地基处理项目中具有不可比拟的优势<sup>[2]</sup>。强夯过程可看作是土在冲击荷载作用下的动力响应问题,其与常规静力荷载作用差异较大。因此,很难采用理论解析法进行分析和计算,特别是对强夯有效加固深度的计算和竖向附加动应力传递特性的分析。

强夯加固涉及复杂的土体瞬态动力响应<sup>[3]</sup>。目前,学者们主要采用简化拟静力法<sup>[4-7]</sup>、数值分析法<sup>[8-14]</sup>和现场试验法<sup>[15-18]</sup>对强夯加固后的土体位移和应力场分布特性开展研究。钱家欢等<sup>[4]</sup>以锤-土体系为研究对象,基于 Scott 理论,提出了加卸载弹性模型,该模型可同时计算强夯引起的应力和位移,但存在动应力峰值偏大的问题。刘汉龙等<sup>[5-6]</sup>在钱家欢模型基础上,采用半正弦形式的应力函数代替分段函数,得到了更为准确的位移。郭见扬<sup>[7]</sup>以夯锤为研究对象,利用动量定理推导了锤-土接触面应力均值和峰值,但没有对土体竖向附加动应力分布进行深入探究。孔令伟等<sup>[8]</sup>采用边界元法和动力有限元法,分析了最大动应力沿深度的衰减特性,其研究表明:最大动应力等值线图呈近似椭圆形。王桂尧等<sup>[9]</sup>采用显示动力有限元程序 LS-DYNA 模拟了夯击过程中动应力和位移的等值线变化过程,其研究表明:夯锤下方的加固区类似一苹果体。贾敏才等<sup>[10]</sup>基于三维离散元法模拟了强夯动力冲击过程,其研究表明:土体动应力峰值沿深度具有一定的滞后性。张芮瑜等<sup>[12]</sup>采用物质点法对强夯过程开展数值模拟,研究了强夯能量的转化规律。WANG 等<sup>[13]</sup>基于 FEM-SPH 耦合计算方法开展参数化分析,提出在给定能量条件下,重锤低落具有更好的加固效果。梁永辉等<sup>[18]</sup>针对超低

含水率、强湿陷性粉土地基开展了 2 种不同能级的强夯现场试验,强夯前、后分别在试验场地内开展浅层平板载荷试验、浸水载荷试验、标准贯入试验、土体振动和位移监测等试验。根据试验结果,分析了场地内粉土物理力学性质的变化规律,揭示了强夯处治湿陷性粉土地基时的加固机理,但其测试数据集中在夯前和夯后,缺少对强夯过程中的机理性研究。在强夯加固过程中,地基内部的竖向附加动应力是地基内部致密的直接原因。目前,关于强夯过程中土体竖向附加动应力传递特性的研究相对较少,在选定强夯能级时仍普遍凭借工程经验,对强夯影响范围和有效加固深度的确定还没有形成较为完善的判别标准。研究强夯冲击下的锤-土接触面应力和地基土内部的竖向附加动应力传递特性具有重要的理论与实践意义。因此,本研究以新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市机场北区扩建项目<sup>[18]</sup>为工程背景;基于动量定理和三维 Boussinesq 应力解,推导锤底地基土内部的竖向附加动应力和附加剪应力等效拟静力解析解。并采用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分法,分别计算在 1 000 ~ 4 000 kN·m 强夯能级下的动力波传播、竖向附加动应力传递过程和夯后土体竖向位移场。并将等效拟静力解与动力数值解进行对比分析,提出影响强夯有效加固深度和强夯影响范围的主要因素。

## 1 等效拟静力解

### 1.1 锤-土接触面应力峰值

强夯加固原理如图 1 所示。在夯锤下落过程中,重力势能转化为动能。夯锤落地瞬间,除少部分动能转化为夯锤与土体间摩擦产生的内能和向四周传播的声能,其余强大的动能在极短时间内与地基土接触,产生接触面应力。应力以动力波形式向地基土内部传播,使土体产生自由振动,导致原有土体中的孔隙结构发生改变。锤底竖向附加动

应力是地基内部致密的直接原因。有效加固区的最大埋深为有效加固深度,动力波的最大传播深度为强夯影响深度。根据工程经验,后者往往远大于前者。在强夯过程中,夯锤周围土体容易受到侧向挤压,地表通常会呈现出轻微隆起现象。

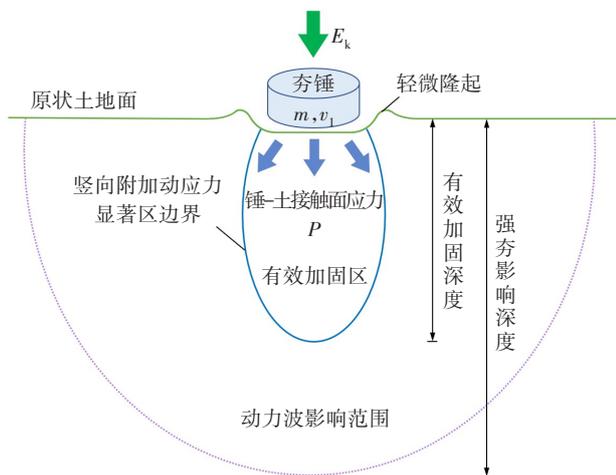


图1 强夯加固原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic compaction

为研究锤-土接触面应力峰值,以夯锤为研究对象,假定夯锤质量为  $m$ ,重力加速度为  $g$ ,自由落体释放高度为  $h$ ,锤-土接触面应力峰值为  $P_{max}$ ,夯锤底面积为  $S$ ,落地时夯锤速度为  $v_1$ ,与地基土接触时间为  $\Delta t$ 。由动量定理可得:

$$(P_{max}S - mg)\Delta t = mv_1 \quad (1)$$

夯锤落地速度  $v_1$  为:

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

锤-土接触面应力峰值  $P_{max}$  为:

$$P_{max} = \frac{mg}{S} \left( \frac{1}{\Delta t} \sqrt{\frac{2h}{g}} + 1 \right) \quad (3)$$

### 1.2 半无限空间 Boussinesq 解

Boussinesq 给出了均质各向同性半无限弹性体表面作用一竖向集中力时半无限空间域内任意一点的应力解和位移解<sup>[19-20]</sup>。Boussinesq 解通常用来求解地面静荷载作用引起的应力场和位移场。本研究基于应力解推导强夯引起的锤底竖向附加动应力分布。接触面峰值应力是强夯过程中的瞬间值,最大竖向附加动应力峰值同样为瞬间值,所以采用本研究的方法计算应力场是可行的。但如需计算强夯引起的位移场,则还需引入锤-土弹簧和阻尼元件或对接触面应力进行折减。

等效拟静力解析模型作出假定:①地基土体为连续均质各向同性的弹性体。②夯锤与土体接触瞬间能量未出现耗散。③锤-土接触面应力沿接触面均匀分布。④不考虑夯锤落地后夯锤进一步产生的竖向位移。

以锤底中心为坐标原点,建立拟静力解析模型,如图2所示。

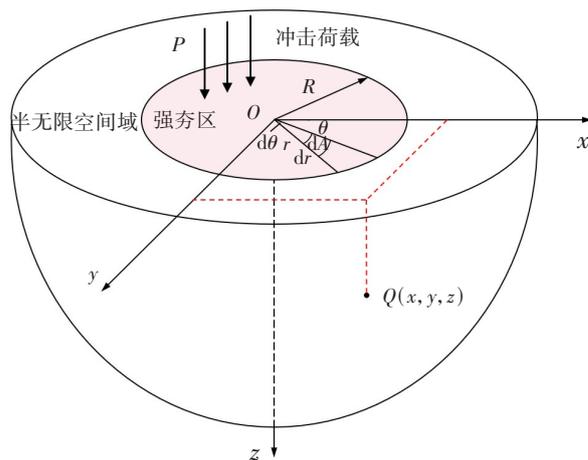


图2 等效拟静力解析模型

Fig. 2 Equivalent pseudo-static analytical model

在图2中, $P$ 为锤-土接触面应力, $R$ 为夯锤半径, $Q(x, y, z)$ 为半无限空间域内任意点。在锤-土接触面的圆形区域内取  $dA=rdrd\theta$ ,按图2所示的坐标系,地基内任一点在锤-土接触面应力作用下的竖向附加动应力计算式为:

$$\sigma_z = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{3Pz^3}{2\pi R_1^5} r dr d\theta \quad (4)$$

式中: $\sigma_z$ 为竖向附加应力; $z$ 为至地表的竖向距离,

$$R_1 = \sqrt{(x - r \cos \theta)^2 + (y - r \sin \theta)^2 + z^2}$$

锤-土接触面应力作用下的附加剪切应力  $\tau_{xz}$  的计算式为:

$$\tau_{xz} = - \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{3P}{2\pi} \frac{xz^2}{R_1^5} r dr d\theta \quad (5)$$

式中: $\tau_{xz}$ 为附加剪切应力。

## 2 三维数值模型的建立

### 2.1 工程概况

新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市机场北区扩建项目<sup>[18]</sup>场地填土主要为粉土层和圆砾层。其中,粉土

层厚约 1.2 ~ 3.8 m,圆砾层揭露厚度超 50.0 m。土体物理力学指标见表 1。本研究选取典型断面进行分析,假定粉土层厚 3.5 m,粉土下方为圆砾层。其中,粉土层为超低含水量土层,具有明显的湿陷性,详细的土性介绍可参考文献 [18]。强夯法在处理湿陷性粉土时具有明显的优势<sup>[11, 16]</sup>,在对浅层粉土加固时,强夯能级通常选定为 1 000 ~ 4 000 kN·m。因此,针对不同能级,开展竖向附加动应力传递特性的研究。

表 1 场地土体物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of site soils

土层	厚度 H/m	天然重度 $\gamma$ / (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 <i>c</i> / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)
粉土层	3.5	17.0	15	15
圆砾层	50.0	23.0	5	40

### 2.2 有限差分数值模型

基于 FLAC<sup>3D</sup>有限差分法,建立三维数值模型如图 3 所示。夯锤直径为 2.5 m,高度 1.0 m,密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>,夯锤质量为 38.288 t,夯锤采用弹性本构,模型边界取 3 倍锤径。土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

数值计算中强夯冲击荷载的加载形式通常有两种:第一种直接在接触面上施加动荷载,一般将冲击荷载简化为一个单峰值的三角形荷载或半正弦分布荷载。这种方法无需建立夯锤模型,但需要提前确定冲击荷载的作用时间,忽略了土体性质对锤-土相互作用间的影响,不能很好地反映接触瞬间的真实情况。第二种方法是建立夯锤模型,假设夯锤从一定高度处自由下落,落地前夯锤具有一定的速度,计算中忽略夯锤的下落过程,直接赋予夯锤落地前竖向的运动速度。第二种方法考虑了夯锤的几何效应,可有效体现锤-土间的相互作用,接触时间根据输入参数自行迭代计算,计算结果更符合实际情况,故本研究采用第二种方式模拟强夯过程。1 000 ~ 4 000 kN·m 强夯能级对应的夯锤落地前速度见表 2。

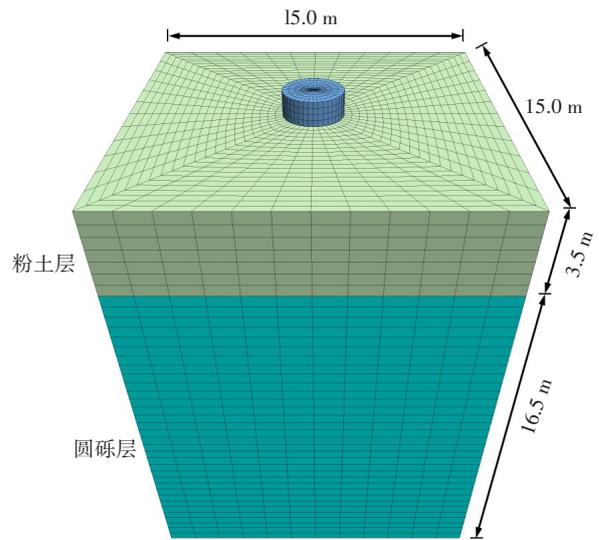


图 3 三维数值计算模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical calculation model

表 2 不同强夯能级对应的落锤速度

Table 2 Hammer velocity corresponding to different dynamic compaction energy levels

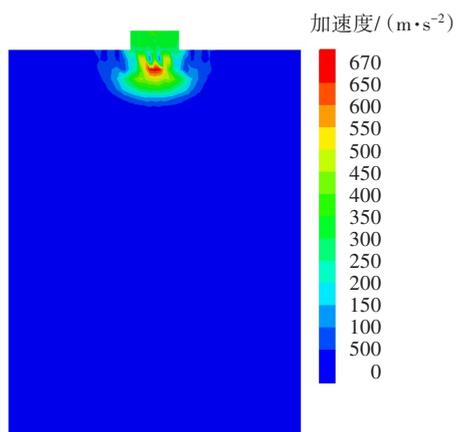
强夯能级/ (kN·m)	释放高度/m	落地时间/s	落地速度/ (m·s <sup>-1</sup> )
1 000	2.662	0.737	7.227
2 000	5.325	1.043	10.221
3 000	7.987	1.277	12.518
4 000	10.649	1.475	14.455

## 3 数值计算结果分析

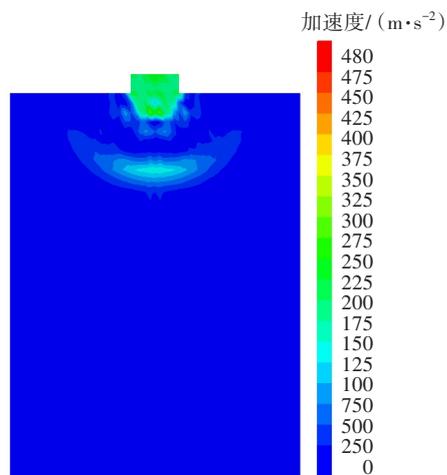
### 3.1 动力波传播规律

本研究主要考察单次强夯过程对地基土的加固机理。当单次强夯能级为 4 000 kN·m 时,地基内部加速度随时间传播的过程如图 4 所示。夯锤与土体接触后,速度减小至零的过程共经历时间约 80 ms。从图 4 可以看出,夯锤与土体接触后,强大的动能迅速转化成以夯击点为振源的动力波。在夯锤减速的初始阶段,地基内部的瞬间加速度峰值较大,加速度云图呈现倒立的“蘑菇体”形,随后动力波向土体深处和周围传播。夯锤正下方附近的地基土受到剧烈冲击,该部分土体获得动量后向下

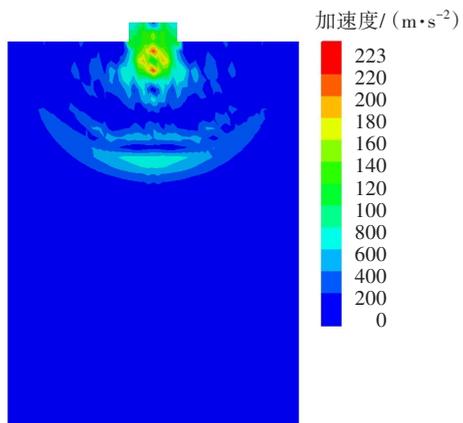
产生位移,逐步形成夯坑。动力波始终以半圆弧形向周围传播,沿深度方向呈现出多个波峰。其中,夯坑正下方的地基内部加速度较大。夯锤速度减小至零后,动力波还将继续向深处和周围传播,随着加固深度的增加,纵波强度衰减,其压密作用也逐渐减弱。



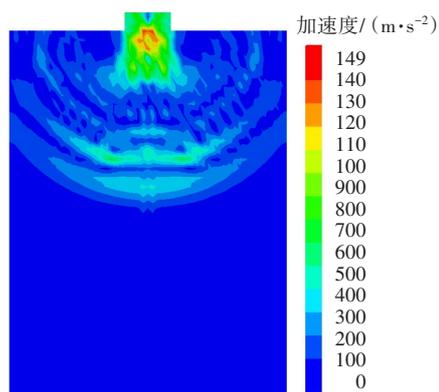
(a)  $t=10$  ms



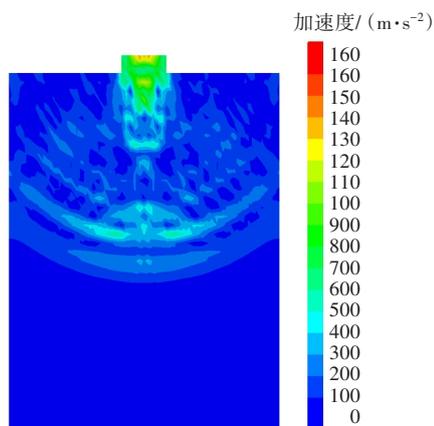
(b)  $t=20$  ms



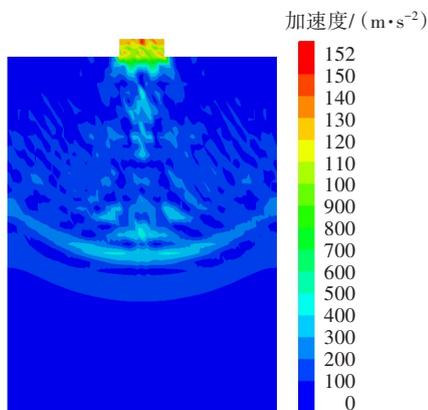
(c)  $t=30$  ms



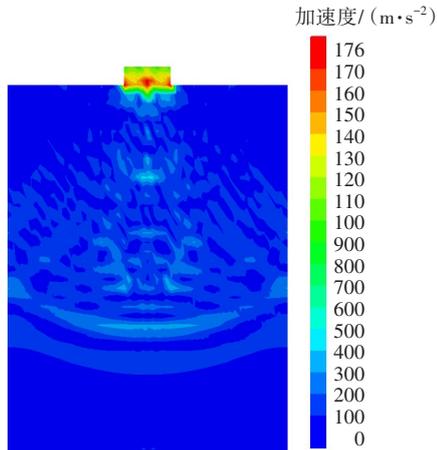
(d)  $t=40$  ms



(e)  $t=50$  ms



(f)  $t=60$  ms



(g)  $t=70$  ms

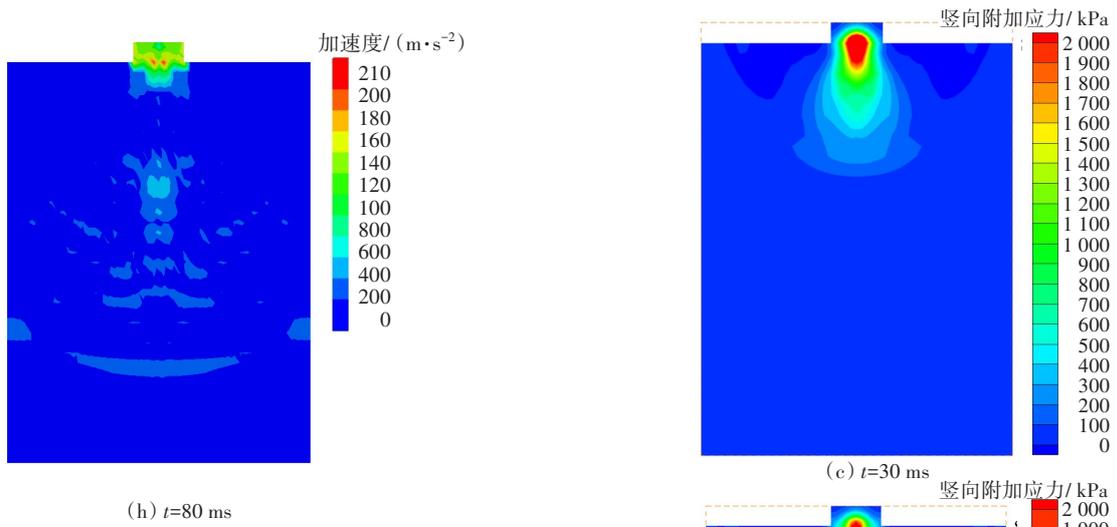
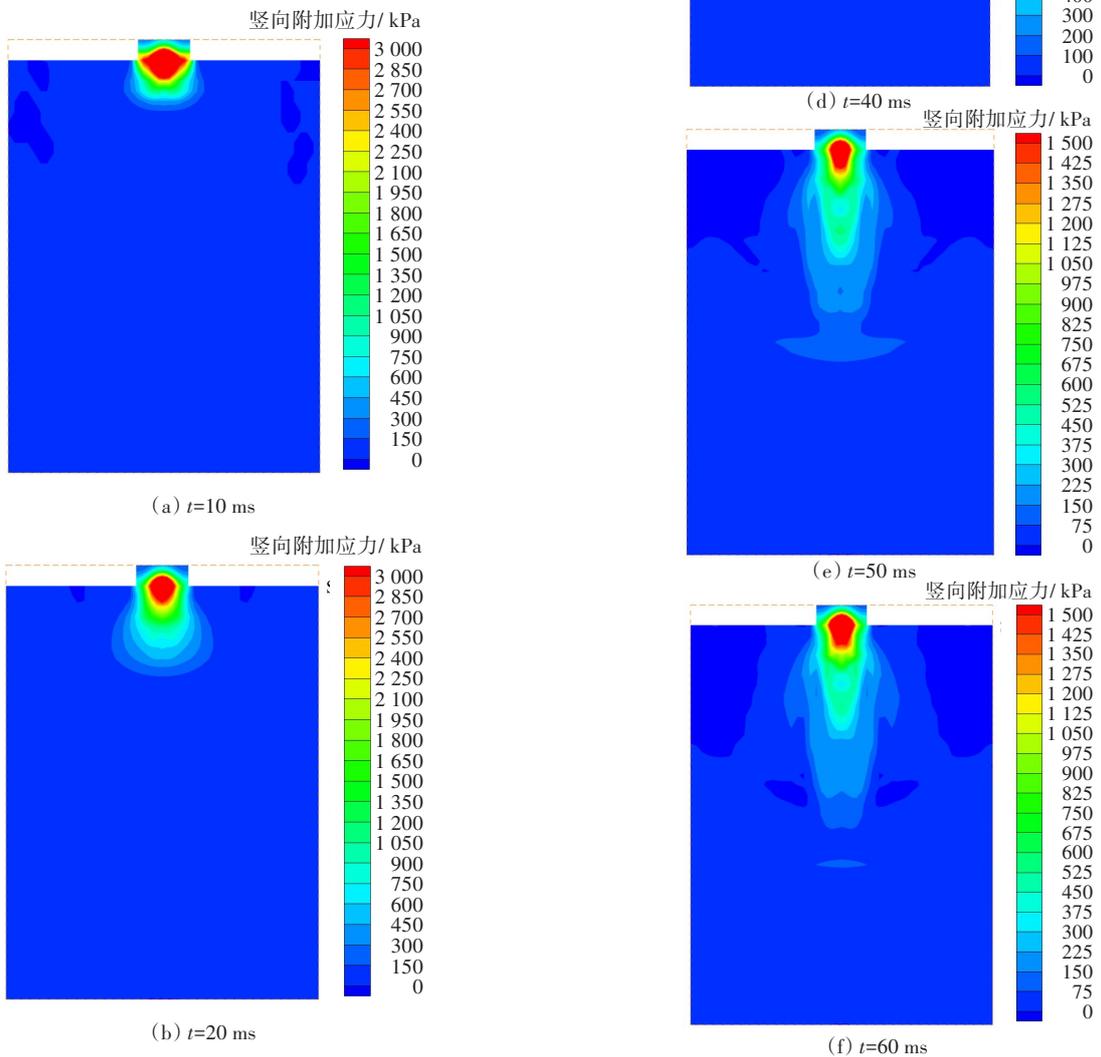


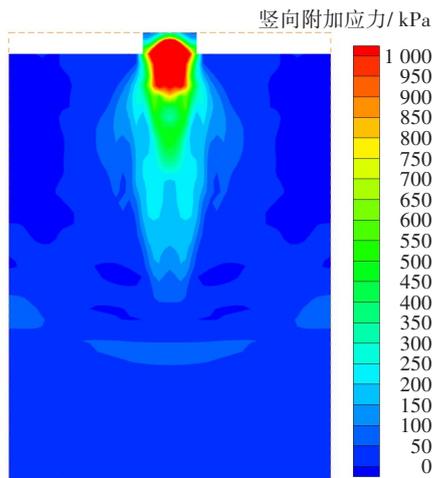
图 4 地基内部加速度传播过程

Fig. 4 Acceleration propagation process inside the foundation

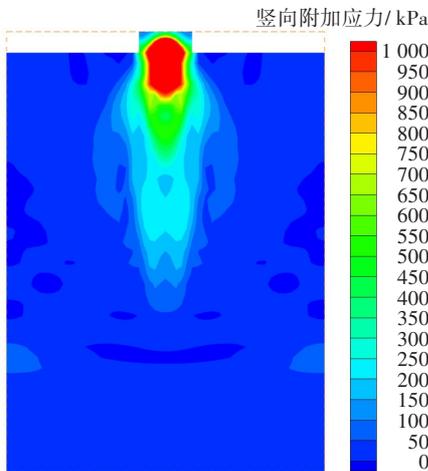
### 3.2 竖向附加动应力传递特性

当单次强夯能级为  $4\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}$  时,地基内部竖向附加动应力传递过程如图 5 所示。





(g)  $t=70$  ms



(h)  $t=80$  ms

图5 地基内部竖向附加动应力传递过程

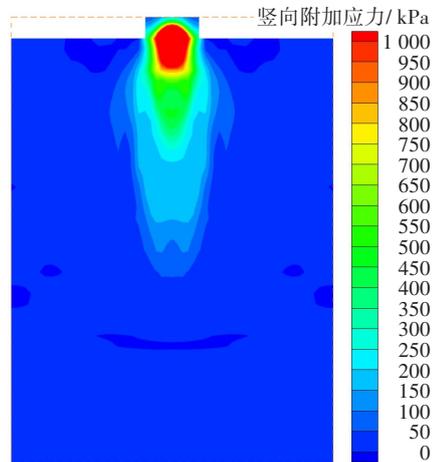
Fig. 5 Vertical additional dynamic stress transfer process in foundation

从图5可以看出,在夯锤与土体接触后的前20 ms,锤底附近地基产生很大的附加动应力,形式上类似“苹果体”。随着夯锤速度的减小,能量开始向下方传递,形式上由“苹果体”逐渐转化为“半椭圆体”,且椭圆的长轴随时间延长而不断增大。

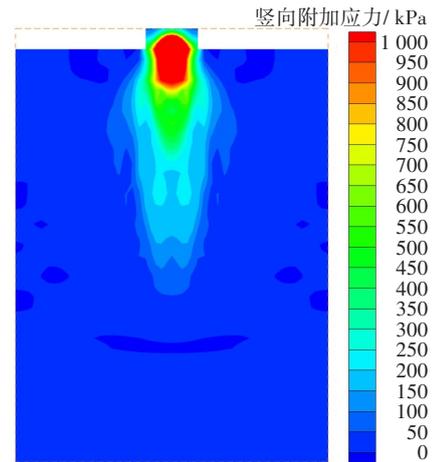
从图4~5可以看出,竖向附加动应力传递云图与动力波传播云图呈现出明显的差异。竖向附加动应力是以半椭圆形式向下传递的,且传递深度有限,而动力波是以半圆弧形向下传播的,传播深度较大且沿深度方向存在多个波峰。因此,部分动力波中并不能起到加固土体的作用,纵波可以对土体产生压密加固效果,而横波仅会加剧对周围环境的扰动。地基土内部的竖向附加动应力是地基内部致密的直接原因。根据竖向附加动应力显著区边

界可判断强夯的有效加固范围。基于此,可对不同夯点间的布置和间距进行优化。

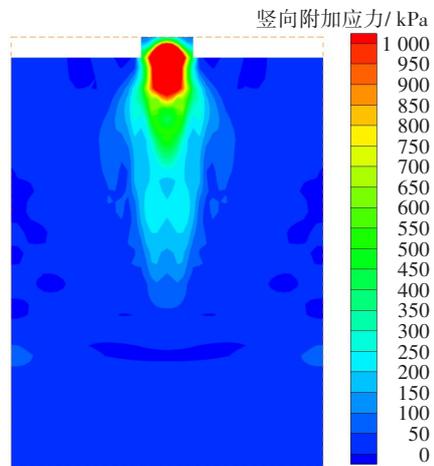
取  $t=80$  ms, 1 000 ~ 4 000 kN·m 不同强夯能级引起的竖向附加动应力的对比如图6所示。



(a) 1 000 kN·m



(b) 2 000 kN·m



(c) 3 000 kN·m

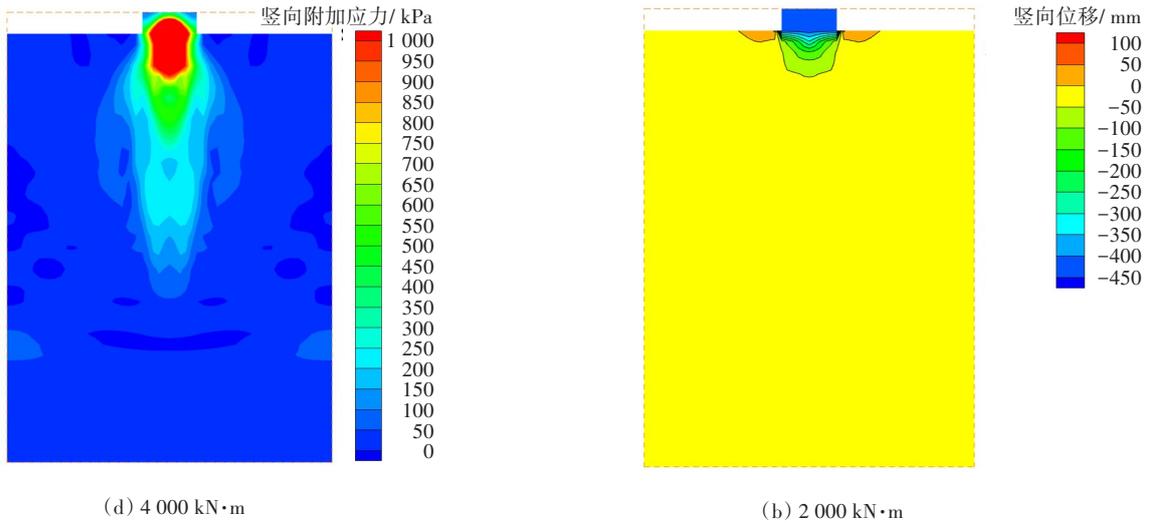


图 6 不同能级竖向附加动应力对比

Fig. 6 Comparison of vertical additional dynamic stress under different energy levels

从图 6 可以看出,不同能级间竖向附加动应力显著区边界存在差异。在强夯能级由 1 000 kN·m 提升至 3 000 kN·m 的过程中,有效加固深度明显增大。强夯能级由 3 000 kN·m 提高至 4 000 kN·m 后,有效加固深度的增加幅度有限。因此,仅提高强夯能级,未必能够达到理想的加固效果。针对本案例,将强夯能级设定在 3 000 kN·m 较为合适。计算结果与梁永辉等<sup>[18]</sup>开展现场试验的结果较为吻合。

### 3.3 强夯引起的竖向位移场分析

夯锤速度减小至零后,1 000 ~ 4 000 kN·m 不同强夯能级引起的竖向位移场对比如图 7 所示。

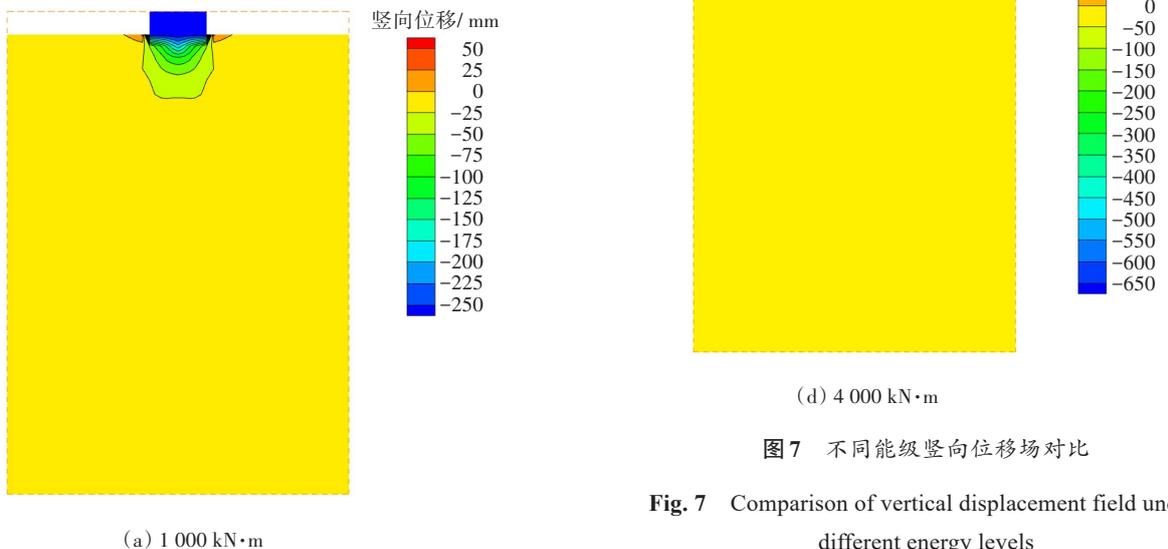


图 7 不同能级竖向位移场对比

Fig. 7 Comparison of vertical displacement field under different energy levels

从图 7 可以看出,随着强夯能级的提高,单次强夯后引起的夯坑深度逐渐增大,夯坑周围土体

受侧向挤压引起的隆起范围逐步扩大。1 000 kN·m能级第一次夯击后引起的夯坑深度为 269 mm；2 000 kN·m能级第一次夯击后引起的夯坑深度为 425 mm；3 000 kN·m能级第一次夯击后引起的夯坑深度为 545 mm；4 000 kN·m能级第一次夯击后引起的夯坑深度为 648 mm。

夯锤中心点以下土体竖向位移沿深度的变化趋势如图8所示。原状土标高位置过夯锤中线处土体竖向位移沿水平方向的变化趋势如图9所示。

从图8~9可以看出,强夯能级由1 000 kN·m提升至4 000 kN·m的过程中,夯坑深度不断增大,但夯坑深度的增加量逐渐减小。土体竖向位移沿深度方向衰减速度较快。竖向位移大,表明土体受压缩程度较高,孔隙比减小明显。因此,强夯有效加固深度可以夯锤中心点下方土体竖向位移曲线曲率突变处作为分界点,分界点以上的土体受到的是压密作用,而分界点以下的土体尚未形成有效加固。

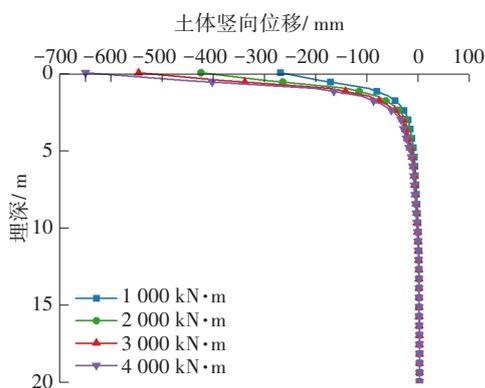


图8 夯锤中线土体竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of soil in the middle line of

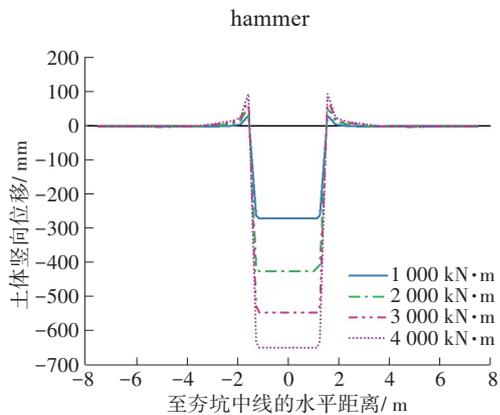


图9 地面经夯锤中线土体竖向位移

Fig. 9 Vertical displacement of soil on the ground through the middle line of the hammer

同时,夯坑周围土体呈现出明显的冲切现象,夯坑深度越大,夯坑周围地表的隆起越大。在场地开展强夯前,建议根据土层厚度信息优化调整不同区域处的强夯能级。

## 4 拟静力解与数值解对比

### 4.1 拟静力解应力场分布特性

根据本研究推导的等效拟静力解,计算得到在相同工况下强夯能级为4 000 kN·m时的过夯锤中线XOZ平面上的竖向附加峰值动应力场,如图10所示。附加峰值剪应力场如图11所示。从图10可以看出,竖向附加动应力分布形式与动力数值解较为接近,整体上呈现半椭圆体。附加峰值剪应力场与孔令伟等<sup>[8]</sup>的计算结果匹配程度较高,表明:本研究所提出的基于Boussinesq应力解的等效拟静力解析解具有较高的准确性。

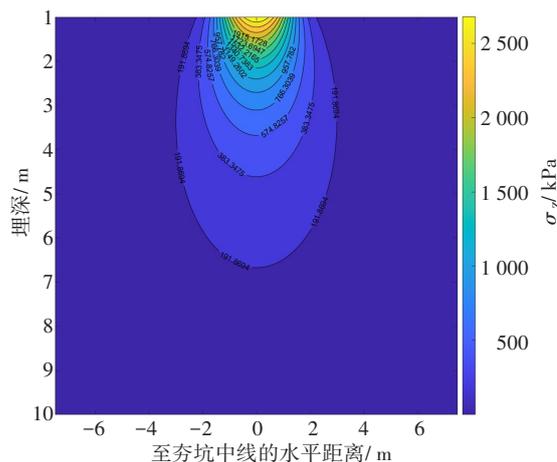


图10 XZ平面竖向附加峰值动应力场

Fig. 10 Vertical additional dynamic peak stress field in XOZ plane

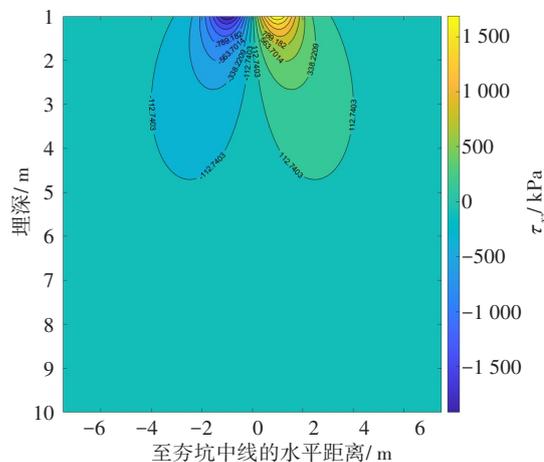


图11 XZ平面附加峰值剪应力场

Fig. 11 Additional peak shear stress field in XOZ plane

## 4.2 计算结果对比

为了进一步探究强夯引起的竖向附加动应力沿深度方向的传递和衰减特性,分别采用等效拟静力解和动力数值解对 1 000 ~ 4 000 kN·m 强夯能级下,竖向附加动应力峰值沿深度的变化趋势进行对比分析,结果如图 12 所示。竖向附加动应力峰值并非是一时刻的计算值,其原理与动力波的传播类似。因此,在数值计算中,须以地基内部布设应力监测点的方式记录完整强夯过程中的最大值,将最大值扣除自重应力后再进行关联。

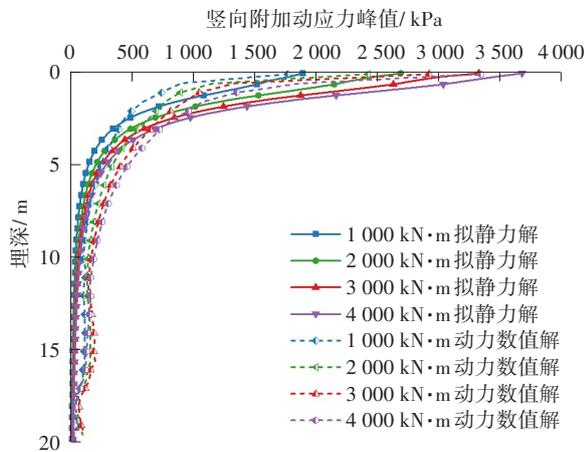


图 12 竖向附加动应力对比

Fig. 12 Comparison of vertical additional dynamic stress

从图 12 可以看出,等效拟静力解与动力数值解的计算结果在整体趋势上较为匹配。其中,拟静力解计算得到的竖向附加动应力峰值沿深度方向的衰减较快,曲线拐点处的曲率较大,埋深超过有效加固深度后,竖向附加动应力接近于零。动力数值解的结果表明,竖向附加动应力峰值沿深度方向呈现缓慢衰减。即使埋深超过有效加固深度,一部分的附加动应力仍然会传递至地基深处,但其加固效果甚微。由上述分析可得出,由于拟静力解是一种简化计算方法,在估算有效加固深度时较为保守,而实际影响深度可能超过计算值。动力数值解能够更好地反映强夯加固地基时竖向附加动应力传递的真实情况。

## 5 结论

本研究采用动量定理提出一种等效拟静力解

析解。并基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件,采用夯锤速度法模拟了动力波传播、竖向附加动应力的传递特性及夯后位移场。通过拟静力解与动力数值解的对比分析,得到以下结论:

1) 强夯引起的动力波以半圆弧形向地基内部传播,动力波的传播距离决定了强夯影响范围;竖向附加动应力呈现半椭圆形分布,竖向附加动应力显著区边界决定了强夯有效加固范围。

2) 强夯能级越高,有效加固深度越大,引起的土体竖向位移也越大,但有效加固深度和位移的增量逐渐减小。强夯有效加固深度可根据夯锤中心点下方土体竖向位移曲线的曲率突变处作为分界。

3) 采用本研究推导的拟静力解得到的竖向附加动应力峰值沿深度方向的衰减较快,在工程应用上偏向保守,而动力数值解呈现出缓慢衰减的趋势,能更好地体现强夯加固的实际情况。

## 参考文献(References):

- [1] MÉNARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation [J]. Géotechnique, 1975, 25(1): 3-18. DOI: 10.1680/geot.1975.25.1.3.
- [2] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.02.023.
- ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.02.023.
- [3] 柳厚祥, 朱性彬. 高速铁路无砟轨道-路基动应力特性分析 [J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.04.001.
- LIU Houxiang, ZHU Xingbin. Dynamic stress characteristics of ballastless track-subgrade coupled system of high-speed train railway [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.04.001.
- [4] 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 Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical principle and calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996.
- [5] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与

- 土体竖向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1493-1497. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2009.10.003.
- LIU Hanlong, GAO Youbin, CAO Jianjian, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1493-1497. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2009.10.003.
- [6] 高有斌, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 强夯加固地基的土体竖向位移计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2671-2676. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.08.057.
- GAO Youbin, LIU Hanlong, ZHANG Minxia, et al. Simplified calculation method of soil vertical displacement under dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2671-2676. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.08.057.
- [7] 郭见扬. 强夯夯锤的冲击力问题(强夯加固机理探讨之一)[J]. 土工基础, 1996, 10(2): 35-40.
- GUO Jianyang. Impact force of dynamic compaction rammer (one of the discussion on dynamic compaction reinforcement mechanism) [J]. Soil Engineering and Foundation, 1996, 10(2): 35-40.
- [8] 孔令伟, 袁建新. 强夯时地基土的应力场分布特征及应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 13-19, 23. DOI: 10.16285/j.rsm.1999.03.003.
- KONG Lingwei, YUAN Jianxin. Stress field distribution characteristics of foundation during dynamic consolidation and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 13-19, 23. DOI: 10.16285/j.rsm.1999.03.003.
- [9] 王桂尧, 胡振南, 匡希龙. 红砂岩路基强夯处理大变形数值模拟方法与效果分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2451-2456. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598.2008.09.026.
- WANG Guiyao, HU Zhennan, KUANG Xilong. Large-strain numerical simulation and experimental result research about improving red-sandstone embankment by dynamic compaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2451-2456. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598.2008.09.026.
- [10] 贾敏才, 吴邵海, 叶建忠. 基于三维离散元法的强夯动力响应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 70-76. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2015.03.011.
- JIA Mincai, WU Shaohai, YE Jianzhong. Discrete element modeling of dynamic compaction in granular soils using PFC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(3): 70-76. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2015.03.011.
- [11] 李金云, 吴全雷, 王邵臻, 等. 强夯法处治湿陷性黄土路基的数值分析及应用[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1): 111-115. DOI: 10.13295/j.cnki.jlut.2017.01.021.
- LI Jinyun, WU Quanlei, WANG Shaozhen, et al. Numerical analysis and its application of wet-collapsible loess roadbed processed with forceful tamping [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(1): 111-115. DOI: 10.13295/j.cnki.jlut.2017.01.021.
- [12] 张芮瑜, 孙玉进, 宋二祥. 强夯的物质点法模拟及其能量转化规律分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1208-1216. DOI: 10.11779/CJGE201907004.
- ZHANG Ruiyu, SUN Yujin, SONG Erxiang. Simulation of dynamic compaction using material point method and analysis of its energy conversion law [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1208-1216. DOI: 10.11779/CJGE201907004.
- [13] WANG W, WU Y J, WU H, et al. Numerical analysis of dynamic compaction using FEM-SPH coupling method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140: 106420. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106420.
- [14] YAO Z Y, ZHOU C, LIN Q Q, et al. Effect of dynamic compaction by multi-point tamping on the densification of sandy soil [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 151: 104949. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.104949.
- [15] 王军, 许建武, 毕玉. 机械降水击密法在吹沙造田软基处理中的应用[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(4): 12-17. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2011.04.003.
- WANG Jun, XU Jianwu, BI Yu. Application of mechanical precipitation and hiting density method in the blowing sand and farmland building dealing with soft ground [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(4): 12-17. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2011.04.003.
- [16] FENG S J, DU F L, SHI Z M, et al. Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction [J]. Engineering Geology, 2015, 185: 105-115. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.12.006.

- [17] 吴帅峰, 蔡红, 严俊, 等. 强夯沉降模型及参数特征分析研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 112-118. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.015.  
WU Shuaifeng, CAI Hong, YAN Jun, et al. Dynamic compaction settlement model and parameter characteristic analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 112-118. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.07.015.
- [18] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1027-1035. DOI: 10.11779/CJGE202206006.  
LIANG Yonghui, WANG Weidong, FENG Shijin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035. DOI: 10.11779/CJGE202206006.
- [19] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 19-50.  
SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000: 19-50.
- [20] 田野. 以顶面回弹模量为目标的铁路货场地基换填方法研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 58-64. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220409007.  
TIAN Ye. Study on the method for ground replacement in railway freight yard aiming at resilient modulus of top surface[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1): 58-64. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220409007.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:杜雪明)
- 
- (上接第8页)
- [18] YU H N, BAI X P, QIAN G P, et al. Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders [J]. Polymers, 2019, 11(7): 1111. DOI: 10.3390/polym11071111.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test procedures for asphalt and asphalt mixture in highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [20] LIANG X M, YU X, CHEN C, et al. Towards the low-energy usage of high viscosity asphalt in porous asphalt pavements: a case study of warm-mix asphalt additives [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00914. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00914.
- [21] 刘涛, 郭乃胜, 金鑫, 等. 聚氨酯固-固相变材料改性沥青的流变性能与改性机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.  
LIU Tao, GUO Naisheng, JIN Xin, et al. Rheological properties and modified mechanism of polyurethane solid-solid phase change materials modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.
- [22] 金娇, 高玉超, 李锐, 等. 有机蒙脱土改性沥青抗老化性及其分子模拟试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 24-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.12.003.  
JIN Jiao, GAO Yuchao, LI Rui, et al. Experiment of aging resistance and molecular simulation of organic montmorillonite modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 24-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.12.003.
- [23] XU X, GUO H Y, WANG X F, et al. Physical properties and anti-aging characteristics of asphalt modified with nano-zinc oxide powder [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224: 732-742. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.097.  
(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)