

强夯加固机理及其环境影响的数值分析

蔡袁强¹, 王大力², 徐长节¹, 陈 超¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江省二轻集团公司, 杭州 310009)

摘 要: 采用大变形几何非线性有限元法分析强夯加固机理及其振动对环境的影响。在强夯计算模型中, 引入 P 波阻尼和 S 波阻尼的概念来说明土体的材料阻尼特性, 同时运用改进人工边界法来模拟波在人工边界上的传播。采用速度和加速度作为强夯振动对环境的影响的评价标准, 得出强夯的最小安全距离。隔振沟是一种有效的隔振方法, 分析了隔振沟隔振效果的各种影响因素, 对实际工程具有一定的参考价值。

关 键 词: 强夯; 材料阻尼; 人工边界; 衰减; 隔振

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Numerical analysis of dynamic compaction and environmental effect caused by the impacting vibration

CAI Yuan-qiang¹, WANG Da-li², XU Chang-jie¹, CHEN Chao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Second Light Industry Corporation, Hangzhou 310009, China)

Abstract: The geometric nonlinear finite element method is used to analyze the impact mechanism of dynamic compaction. Damping of P wave and S wave are introduced to illuminate the material characters of the soil in the model. The improved artificial boundary conditions are applied to simulate wave propagation at the boundary. Two evaluation criterions (velocity criterion and acceleration criterion) are used to estimate the vibration influence to obtain the safe vibration range. The trench is an effective method of vibration isolation; and various influencing factors of trench are studied to give valuable reference for the engineering practice.

Key words: dynamic consolidation; material damping; artificial boundary; attenuation; vibration isolation

1 引 言

强夯加固地基就是利用巨大的夯击能, 在地基中产生冲击波和动应力, 对地基土进行挤密, 提高土的强度并降低其压缩性。吴铭炳等^[1]、李本平^[2]和 GU 等从弹塑性模型入手, 对强夯加固机理进行了细致的动力有限元分析, 但这些分析都是基于经典力学中的小变形假定, 不能真实反应刚体位移的影响。

本文在大变形理论的基础上, 应用有限元和无限元的耦合系统进行模拟^[3], 通过分析人工边界外部无限域对人工边界的作用力来模拟波在人工边界的传播, 该方法概念清楚且容易和有限元数值解法相结合, 分析结果更趋于工程实际。此外, 强夯振

动的地表运动规律及其如何减小此类不良振动的影响, 仍然是工程界较为关注的一个课题。此方面的研究较多的还是通过工程现场的监测, 从实测数据中得到某些结论^[4,5]。隔振沟作为一种有效的措施, 其设计和应用更多依赖于经验。本文从数值分析的角度出发, 研究了强夯振动对环境的影响, 分析了隔振沟设计中各种参数对隔振效果的影响。

2 强夯模型的建立

2.1 本构关系

本文采用了加卸载双线性模型^[6], 对每一次夯击采用不同的加载模量与卸载模量。以 Kirchhoff 应力张量和 Green 应变张量表示的本构关系如下:

$$T_{ij} = D_{ijkl} E_{kl} \quad (1)$$

式中 D_{ijkl} 为四阶弹性张量。

2.2 动力平衡方程

几何非线性动力平衡方程的推导, 采用了改进拉格朗日法, 能很好地处理几何非线性与材料非线性同时存在的耦合问题。基于 Lagrange 描述方法, 整体的动力平衡方程为^[7]

$$M\ddot{U}_{t+\Delta t} + C\dot{U}_{t+\Delta t} + (K_L + K_S)\Delta U = R_{t+\Delta t} - F_t \quad (2)$$

式中 M 为整体质量矩阵; K_L 为小位移刚度矩阵; K_S 为初应力刚度矩阵; C 为阻尼矩阵, 采用 P 波阻尼因子 η_p 和 S 波阻尼因子 η_s 表示^[4]; $\ddot{U}_{t+\Delta t}$, $\dot{U}_{t+\Delta t}$, ΔU 分别为 $t + \Delta t$ 时刻待求的加速度、速度和沉降量; $R_{t+\Delta t}$ 为等效节点荷载向量; F_t 为等效节点力向量。

2.3 强夯冲击荷载的形式

根据大量的实测结果, 夯锤对地面冲击碰撞过程中, 应力波为一尖峰, 均没有明显的第二应力波。因此, 将强夯产生的瞬态荷载简化成三角形^[1, 2], 计算结果和实测数据有一定可比性。本文也采用把冲击荷载简化为三角形的方法, 如图 1 所示。

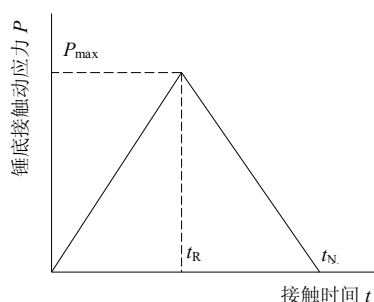


图 1 强夯瞬态荷载简化计算示意图
Fig.1 Instantaneous model of compacting load

3 实例分析

淳安千岛湖某工程, 大面积炸山抛填, 碎石粒径大小不一, 回填厚度为 0.3 ~ 30 m, 采用强夯法处理地基。夯锤重量为 220 kN, 夯锤直径为 2.2 m, 夯锤落距 22 m, 地基土重度为 16 kN/m³。计算模型的地基厚度取 16.5 m, 场地半径取 11 m。强夯有限元的主要计算参数见表 1。

表 1 强夯有限元主要计算参数
Table 1 Parameters for dynamic compaction
FEM calculation

η_p / 10^{-4}	η_s / 10^{-4}	μ	P_{max} /MPa	t_R / 10^{-2} s	t_N / 10^{-2} s	初始加载模量 /MPa	初始卸载模量 /MPa
7.0	7.8	0.35	6.23	4.44	8.88	11	58.32

3.1 强夯加固机理分析

从图 2 可以看出, 夯击沉降量随着夯击次数的增加而增大, 单击夯沉量逐渐减少, 计算结果与现场实测数据吻合得较好。加卸载模型未能反映夯坑周围形成的塑性区, 且计算过程不考虑土体的水平位移, 使得计算结果小于实测值。计算所得的最终夯沉量为 161.14 cm 和实测的 170.0 cm 极其相近, 表明应用大变形理论分析高能强夯的有效性。

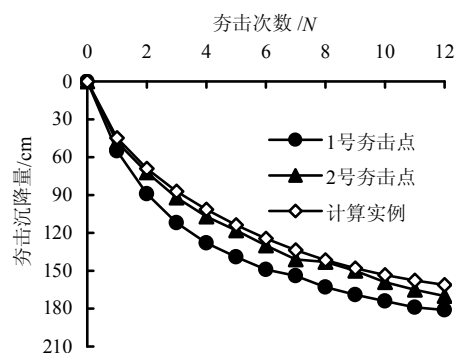


图 2 夯击沉降量与夯击次数的关系
Fig.2 Relationships between compacting settlement and compacting number

图 3 为夯锤中心点以下地基土夯击沉降量沿深度的衰减情况。由图可见, 随着深度的增加, 夯击沉降量迅速变小, 距地表 4.4 m 处, 沉降量降为 36.78 cm, 而到达 8.8 m 时沉降量已经很小, 仅为 3.65 cm。地基土的夯击沉量集中在深度 8.8 m 以内, 而工程实际中瑞利波检测到的强夯加固深度为 8.5 ~ 10.5 m, 可见计算结果符合工程实际。

图 4 为夯坑中心下不同深度的竖向位移的时程曲线。由图可知, 土体内各点位移的最大值并不发生在冲击荷载达到峰值的时刻, 而是要滞后一段时间, 随着深度的增加, 滞后现象越来越明显, 从而可以看出, 土体竖向位移沿深度渐渐发展的情况。在最大位移发生之后回弹的沉降量很少。

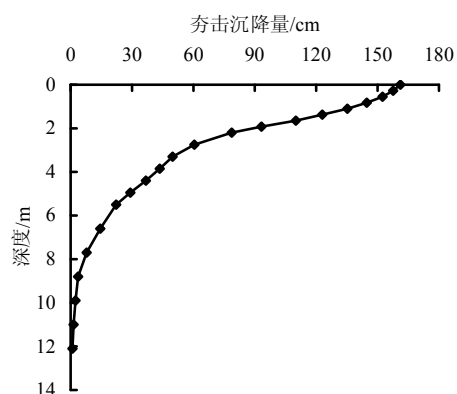


图 3 夯坑下方竖向位移沿深度的分布曲线

Fig.3 Curve of vertical displacement at different depths under the crater

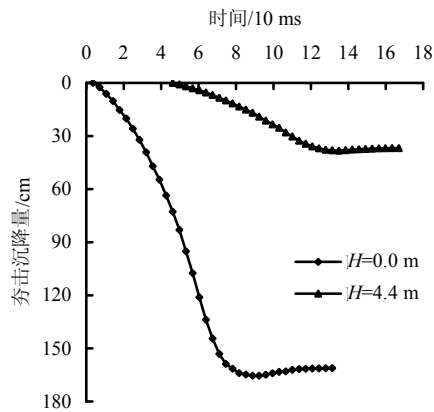


图4 夯坑下方竖向位移的时程曲线

Fig.4 Time histories of vertical displacement under the crater

3.2 强夯振动对环境影响的分析

本文分别以速度和加速度作为强夯振动对环境的影响的评价标准,速度的标准采用 0.0508 m/s ,加速度则采用 0.1 g 。根据图 5 的速度沿水平距离的衰减曲线可以判定,强夯的安全距离在 $20 \sim 22 \text{ m}$ 之间;根据图 6 的加速度沿水平距离的衰减曲线可以判定,强夯的安全距离也在 $20 \sim 22 \text{ m}$ 之间。由此可见,采用速度和加速度作为强夯安全距离的评判依据,所得到的结果相似,说明二者存在统一性。

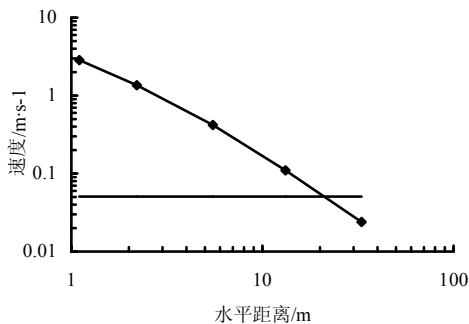


图5 地表最大速度随水平距离的衰减曲线

Fig.5 Attenuation curve of peak particle velocity at ground surface

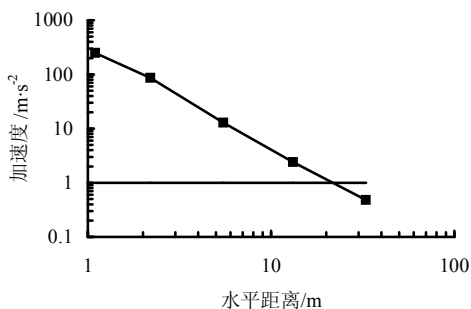


图6 地表最大加速度随水平距离的衰减曲线

Fig.6 Attenuation curve of peak particle acceleration at ground surface

图 7 为夯击能量与地面振动速度的关系曲线,强夯振动速度随着夯击能的增加而增大。近距离测点的地面振动速度对夯击能量的变化较敏感。对应于不同的夯击能量,强夯地面振动具有不同的衰减规律,夯击能量越大,强夯引起的地面振动速度衰减越快。

图 8 为同一夯击能量的不同组合方式沿水平距离的衰减曲线。夯击能量为 $400 \text{ t}\cdot\text{m}$,夯锤质量分别取 20.0 , 25.0 t 和 32.0 t ,对应的落距分别为 20.0 , 16.0 m 和 12.5 m 。结果显示,重锤低落距产生的速度峰值比轻锤高落距要小,速度衰减较慢,对环境的影响较小。因此,重锤低落是实际强夯工程中比较有利的一种组合方式。

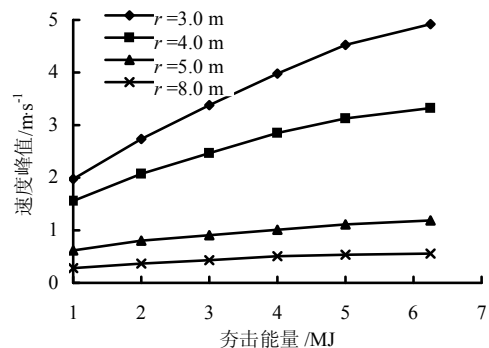


图7 夯击能量与地面振动速度的关系曲线

Fig.7 Relationships between compaction energy and peak particle velocity at ground surface

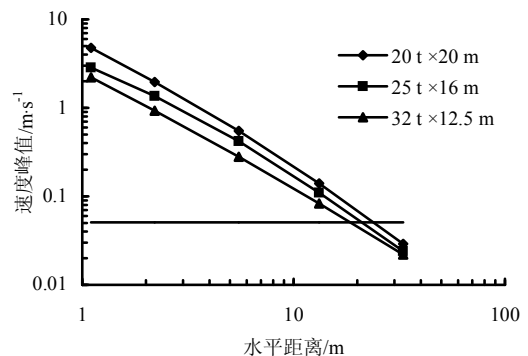


图8 同一夯击能量下振动速度沿水平方向的衰减曲线

Fig.8 Curve of peak particle velocity at ground surface with different momentums but same energy

3.3 隔振沟隔振效果分析

在不满足最小施工安全距离的条件下,设置人工隔振沟是一有效方法,影响被动隔振沟效果的因素很多,振源与隔振沟的中心距离、沟长、沟宽以及沟深都将影响隔振效果,下面详细分析各个影响因素的作用。

在沟深逐渐变化的情况下,计算相应条件下地表各点的振动速度幅值,并与自由场地条件下的地表振动情况相比较,如图 9 所示。隔振沟对于沟后

土体的隔振效果比较显著, 隔振沟越深隔振效果越好。但当隔振沟达到一定的深度后, 要使地表振动的速度峰值衰减率再大一级也是难以达到的, 存在一个临界沟深, 沟深大于该值后, 隔振效果并不能随沟深的增加而显著提高。

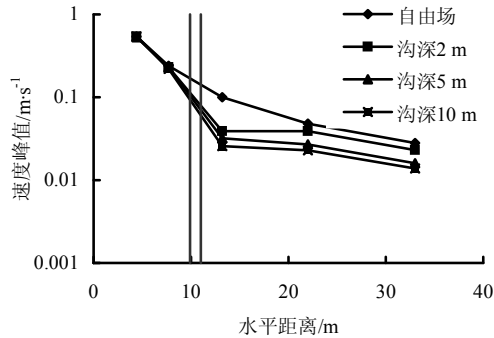


图 9 地表各点速度随沟深的变化曲线

Fig.9 Curve of peak particle velocity at ground surface with depth of trench

在宽度逐渐变化的情况下, 计算相应条件下地表各点的振动速度幅值, 并与自由场地条件下的地表振动情况相比较, 如图 10 所示。隔振沟的沟宽基本不影响隔振效果; 事实上, 一个小的裂隙或裂缝将足以屏蔽大部分的弹性波。因此, 增加隔振沟的沟宽来提高隔振效果的工程意义并不是很大。

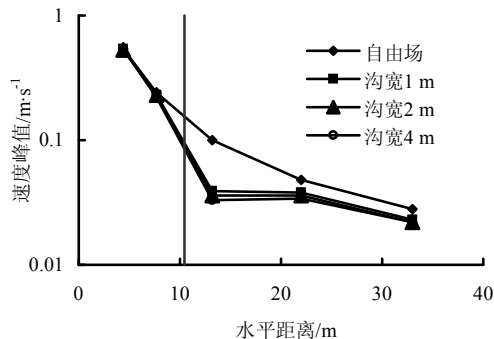


图 10 地表各点速度随沟宽的变化曲线

Fig.10 Curve of peak particle velocity at ground surface with width of trench

隔振沟中填充刚度不同的各种材料, 计算相应条件下地表各点的振动速度幅值, 并与自由场地条件下的地表振动情况相比较, 其结果如图 11 所示。图中, E_0 为土体的弹性模量; E 为填充材料的弹性模量; v_0 为自由场地条件下地表各点的振动速度峰值; v 为不同材料填充时地表各点的振动速度峰值。

由图可以看出, 沟中填充材料的弹性模量与土体的弹性模量相差越大, 隔振效果越好; 相比较而言, 在弹性模量比土体小的一侧, 当二者的弹性模量的级数相差越大, 则曲线递减得越快, 隔振效果越好。因此, 在工程中建议采用橡胶、钢弹簧、乳胶海绵、软木、毛毡以及空气弹簧这类弹性模量

相对较小的材料作为隔振沟的填充物, 能起到更好的隔振效果。

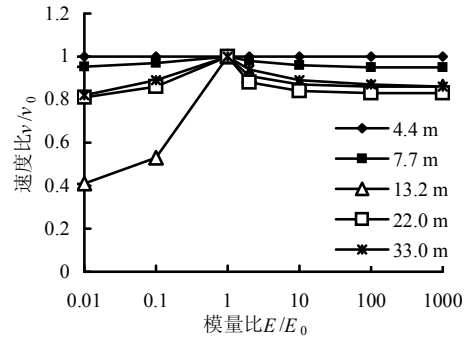


图 11 隔振沟中填充材料的刚度对地表速度的影响

Fig.11 Relationships between stiffness of filled composite in the trench and peak particle velocity at ground surface

4 结 语

本文采用大变形理论研究强夯加固过程, 不论从力学度量上还是工程实际上考虑都更趋向合理, 更符合强夯加固地基的实质。引用的 P 波阻尼和 S 波阻尼具有明确的物理意义, 容易通过试验识别确定。本文所编写的几何非线性有限元程序, 对于强夯过程的数值模拟具有较好的可靠性。

由于目前还没有一个完全适合强夯问题的本构关系, 加卸载双线性模型在很多方面也尚待改进, 若能在大变形理论的基础上, 考虑每一次夯击引起的弹塑性变形, 将使分析更接近工程实际。如何建立一个合理可行的强夯本构关系也将是以后工作的一个重点。

对于强夯引起的振动问题, 本文也进行数值分析。分别从速度和加速度两个方面进行评价, 速度标准采用 0.050 8 m/s, 加速度则采用 0.1g, 分析表明, 两种标准有内在一致性。

隔振沟的隔振效果随沟深逐渐增大, 与沟的宽度无关, 且与隔振沟内填充材料的弹性模量有关。在能保证沟边坡稳定的条件下, 采用无填充沟的隔振效果最好。此外, 在条件允许的情况下保护对象应尽可能离隔振沟位置近些, 则隔振效果越好。

参 考 文 献

- [1] 吴铭炳, 王钟琦. 强夯机理的数值分析[J]. 工程勘察, 1989, (3): 1 - 5.
- [2] 李本平. 有限元法分析强夯加固机理[D]. 杭州: 浙江大学, 1993.
- [3] 凌道盛. 冲击和地震荷载作用下地基的响应动力分析[D]. 1999. 杭州: 浙江大学博士后研究报告.
- [4] 李廷, 吴玉山, 程祖锋. 碎石土地基强夯试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (增1): 966 - 968.
- [5] 方磊, 经纬, 刘松玉. 强夯振动影响与构筑物安全距离研究[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2001, 31(3): 29 - 32.
- [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.

- [7] 何君毅, 林祥都. 工程结构非线性问题的数值解法[M].
北京: 国防工业出版社, 1994.