

强夯振动主控因素研究*

王鹏程, 刘建坤, 冯瑞玲

(北京交通大学 土木工程学院, 北京 100044)

摘要:强夯施工过程中的剧烈振动会影响周围的居民以及建筑物,因此,必须充分考虑强夯振动的主要影响因素以确定合理的施工安全距离,基于某站场地基处理实际工程,建立了强夯施工的有限元模型,以强夯最后一击地表振动速度为评价指标,针对强夯的安全距离和振动的主要影响因素,结合敏感性分析方法,分析了多个相关因素对于安全距离的影响,结果表明土体的性质的影响更大,笔者认为在保证夯击效果的前提下,宜采用轻锤高落距的组合形式,可以在一定程度上减小强夯的振动影响。

关键词:强夯振动;主控因素;数值模拟;敏感性分析

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)05-1282-07

Research on the Primary Controlling Factors of Vibration of Dynamic Compaction

Wang Pengcheng, Liu Jiankun, Feng Ruiling

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P.R.China)

Abstract: The vibration caused by dynamic compaction can seriously affect the buildings and residents nearby, it is necessary to analyze the main controlling factors to determine the safe construction distance of dynamic compaction. Based on practical construction, numerical model of dynamic compaction was established, taking vibration velocity of ground surface as evaluation index, main controlling factors were respectively studied. The results show that: compared with others factors the soil properties have a greater influence; for different combinations of hammer weight and dropping distance of same compaction energy, lighter hammer with higher drop distance could reduce the vibration effect to some extent.

Keywords: vibration of dynamic compaction; main controlling factors; numerical simulation; sensitivity analysis

1 引言

强夯法是利用一定重量的夯锤自由落下产生的巨大夯击能,完成对地基土体的夯实,可以提高地基土的强度、降低土的压缩性、改善砂土的抗液化条件、消除湿陷性黄土的湿陷性,同时,还可以提高土层的均匀程度,进而缩小甚至避免可能产生的差异沉降。根据其夯击能量的大小可以分为常规强夯和高能级强夯。因其加固效果好、适用土类广、施工方便、经济节约等优点,获得了广泛的应

用。关于强夯的加固机理,加固效果,以及施工参数和工艺都已经有了大量的研究^[1,2]。

针对强夯施工所产生的振动也有了较为广泛的研究。夏瑞良等^[3]通过大量的现场试验研究,认为随着距夯点的距离的增大,强夯振动的振幅按负幂函数的形式迅速衰减。褚宏宪等^[4]通过对强夯施工进行同步监测指出强夯所引起的振动波中对施工现场周围建筑物振动影响最大的是低频面波,振动波沿地表传播时会产生垂直分量和水平分

* 收稿日期:2014-07-08(修改稿)

作者简介:刘建坤(1965-),男,山东临沂人,博士,教授,主要从事特殊路基工程的教学与科研工作。

E-mail: jkliu@bjtu.edu.cn

基金项目:国家基础研究计划 973(2012CB026104);国家自然科学基金(41171064)

量,其中水平方向的振动速度以及振动所引起的位移都是最大的。还指出随着与夯点间点号距离的增大,强夯振动的衰减会存在明显的拐点,对于强夯施工以及隔振措施的设计有着重要的指导意义。J. H. Hwang 等^[5]分析认为针对强夯引起的振动,竖向振动持续时间更短,其主频集中在 10~20 Hz 之间,径向振动则有两个主频区间,分别是 3~4 Hz 和 13~14 Hz,夯击能越大,振动幅值越大,但同时其衰减速率也越快。

针对强夯施工的安全距离,目前还无统一的评价指标和标准。美国的爆破规程规定 5 cm/s 作为安全振动速度界限值,美国矿业局推荐振动加速度作为评价指标,规定 $a < 0.1 g$ 为安全振动;当振动加速度介于 0.1~1 g 之间时,建筑物会产生轻微损坏;当大于 1 g 时,建筑物会产生严重损坏。本文的依托工程需研究强夯振动对周围某在建混凝土桥梁的影响,参照国内许多相似工程,采用国家标准《爆破安全规程》(GB 6722—2003)中的相关规定来确定强夯的安全距离,以地表振动速度为评价指标,充分考虑材料疲劳以及实际情况,取 1.5 cm/s 作为安全振动速度的最大值。

2 工程概况

某海滨站场场地主要为丘前缓坡、剥蚀残丘地貌,大部分已经被填土覆盖。场地素填土厚度约为 13.8 m,为近期人工填土,分布于整个场地,未经过处理,作为天然地基极易产生较大的沉降变形,人工填土主要由碎石土构成,透水性好,因此,非常适用强夯处理,试夯方案如表 1 所示。其中,第一遍夯击最后两击平均沉量不大于 10 cm,第二遍夯击最后两击平均夯沉量不大于 5 cm。

表 1 试夯施工参数

Table 1 Construction parameters

遍次	夯击能量 /(kN·m)	锤重 /t	落距 /m	夯点间距 /m	击数
1	6 000	32	18.75	8×8	13~15
2	3 000	20	15	8×8	8~9
3	1 500	10	15	锤印搭接 1/4	3

为了验证强夯效果对强夯后的土体进行检验,如表 2 所示为检测点的瑞利波测试结果,由波速换算得到的承载力可见,强夯处理效果良好。

表 2 各个测点的瑞利波速度及推算的承载力特征值

Table 2 Rayleigh wave speed and characteristic value of subgrade bearing capacity predicted of each measuring point

点号	瑞利波速度/(m·s ⁻¹)	承载力/kPa
1	210.0	270
2	201.0	240
3	213.3	270
4	209.4	265
5	201.3	240
6	214.5	270
7	230.6	300
8	226.6	290

由于本次强夯施工场地周围有一座在建的混凝土立交桥,针对强夯施工所产生的振动的影响,在强夯过程中,在距夯点 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m、60 m 处沿水平和垂直方向布置速度监测点,采集相关数据,为确定强夯安全距离提供相关依据。

试验所得到 6 000 kN·m 夯击能下周边振动情况如表 3 所示。

由实测结果可见,取 1.5 cm/s 作为安全振动速度的最大值,在该地区,夯锤 6 000 kN·m 工况下,安全距离为 30 m。

表 3 强夯周边振动情况实测结果表

Table 3 Measured vibration results of dynamic compaction

距离/m	最大速度/(cm·s ⁻¹)	主频/Hz	振动时长/s
5	5.56	6	2
10	3.85	6	2
20	2.19	6	2
30	1.34	7	2
40	1.20	7	2
60	0.70	7	2

3 数值模型的建立

利用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型。由于影响强夯加固的因素很多,同时,土体实际的变形过程也很复杂,因此,在建立强夯数值分析模型的过程中需要做一些假设,主要包括以下假设:

(1)均匀性假设:数值分析模型所模拟的范围内的土体均为各向同性体。

(2)忽略地下水的影响,即忽略渗透性以及孔隙水压力的变化等。

(3)假设夯锤为刚体,即在强夯过程中不发生任何变形。

(4)忽略强夯冲击土体过程中所产生的热能等能量损失。

本工程有效加固深度最大值为 8.5 m,强夯安全距离最大值为 30 m,试夯最大试验距离 60 m,为加快计算速度,充分利用模型的对称性,确定地基模型为底面半径 70 m,厚度 15 m 的 1/4 圆柱体,深度方向为两层,地面下 5 m 范围为素填土,其余为软土。夯锤同样用 1/4 圆柱体进行模拟,根据不同的夯击能调整高度和半径。

3.1 本构关系的选取

夯锤的本构关系较为简单,采用线弹性本构关系即可。土体采用 Drucker-Prager 模型,能够更好地模拟动荷载的作用,适用于动力分析,而且考虑了强夯过程中土体的剪胀性,主要的试验参数可通过三轴试验得到。结合工程地质勘查资料以及试验,夯锤以及地基的土体的初始参数,如表 4 所示。

表 4 模型参数表

Table 4 Parameters of model

参数		单位	值
密度	素填土		1 830
	软土	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 720
	夯锤		7 800
弹性模量	素填土		6.5
	软土	MPa	2.5
	夯锤		2.1×10^5
泊松比	素填土		0.4
	软土		0.35
	夯锤		0.28
摩擦角	素填土	°	28.7
	软土		35.3
膨胀角	素填土	°	28.7
	软土		35.3
应力流动率	素填土		1
	软土		1

此外,本文通过定义材料的瑞利阻尼来模拟材

料的阻尼作用,瑞利阻尼认为阻尼矩阵 C 是质量矩阵 M 与刚度矩阵 K 的线性组合^[6~8],如式 1 所示:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

式中: α 和 β 为阻尼系数,关于 α 和 β 的取值问题已经有了大量的研究,普遍认可的求解公式如式 2 所示:

$$\begin{cases} \alpha = 2\xi\omega_i\omega_k/\omega_i + \omega_k \\ \beta = 2\xi/\omega_i + \omega_k \\ \omega_{i(k)} = 2\pi f_{i(k)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ξ 为土体结构的阻尼比,一般取值为 0.05, f_i 和 f_k 分别为土体结构第 i 阶和第 k 阶模态的固有频率。对于动力分析强夯振动一般取其前两阶模态的固有频率即可。

本文运用 ABAQUS 软件中的模态分析方法求解了各种工况土层的阻尼系数。以第一层素填土的阻尼系数求解为例进行说明。对于土体的对称边界按其法线方向施加对称约束,圆弧边界约束其竖向位移,通过 Frequency 分析步求得的结果如下:其两阶的固有频率分别为 0.237 97 和 0.788 34,根据公式可以求得第一层素填土的阻尼系数为 $\alpha=0.114 85$, $\beta=0.015 51$,其他情况下土层的阻尼系数求解过程与此类似。

3.2 网格类型和单元划分

本模型土体,采用八节点六面体线性减缩积分单元,针对夯锤,在计算过程中应该将其约束为刚体,其单元类型选择为三维四边形刚性体单元。由于强夯土体的过程土体会产生很大的变形,因此,应该细化夯锤与地基土体接触区域,而且在划分网格过程中应该采用网格自适应技术。除此之外,还应该注意夯锤的网格尺寸不能小于与夯锤接触部分的土体的网格尺寸。一般认为,在动力有限元分析过程中,单元的尺寸不宜大于波长的 1/10。

网格划分过程中,以 Z 轴为中心的,半径为 1 m 的 1/4 圆柱体范围内的网格尺寸设定为 0.1 m,其他区域网格尺寸设定为 1 m,对于夯锤将其网格尺寸设定为 0.15 m,小于与其接触的地基土体的网格尺寸。地基与夯锤装配后的网格划分情况如图 1 所示。

强夯时,夯锤与土体的接触时建模过程中应该重点分析的问题之一。本文通过接触对算法定义强夯过程中夯锤与土体的接触面,由于夯锤的刚度

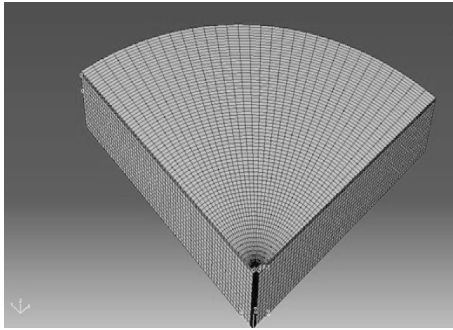


图 1 模型网格

Fig.1 Mesh of the model

较大且网格划分较粗,主接触面定义为夯锤上与土体接触的表面,从接触面为地基土体表面与夯锤接触并受强夯影响十分显著的区域。此外,由于夯锤与土体接触时具有较大的初速度,为了避免振颤,将夯锤向上移动微小的距离,以实现良好的接触。

3.3 荷载与边界条件

本文所建立的模型边界条件如下:

夯锤边界:约束除其竖直方向外的其他所有方向的位移。

地基对称边界:根据对称边界的法线方向施加对称边界条件。

地基圆弧边界:施加固定端约束。

地基底面边界:约束除其竖向外的其他所有方向的位移。

在施加荷载过程中,将夯锤约束为刚体,通过 ABAQUS 中的预应力场将初速度施加在刚体的参考点。对于分析的时间,结合相关实测资料^[9,10],以及相关文献^[11],一般认为夯锤与土体的接触时间为 0.02~0.09 s 充分考虑强夯振动到达土体边界的时间,经过试算,本文确定计算时间为 0.5 s。

3.4 模型验证

利用建立好的数值模型计算地表的振动速度,对比试夯试验得到的数据,结果如图 2 所示。

将图 2 中的两条曲线进行拟合,可以得到式(3)、式(4):

试夯试验:

$$y = 7.156e^{-0.082x} + 0.762, R^2 = 0.997 \quad (3)$$

计算结果:

$$Y = 8.458e^{-0.071x} + 0.628, R^2 = 0.997 \quad (4)$$

由图 2 以及式(3)、式(4)可知,随着距离夯点距离的增加,地面振动速度的峰值呈指数形式衰减,随着距离的增加,衰减的速度也在增加。同时,对于同一地面点的振动速度而言,数值分析结果略大于试验结果,但整体的衰减趋势一致,验证了模

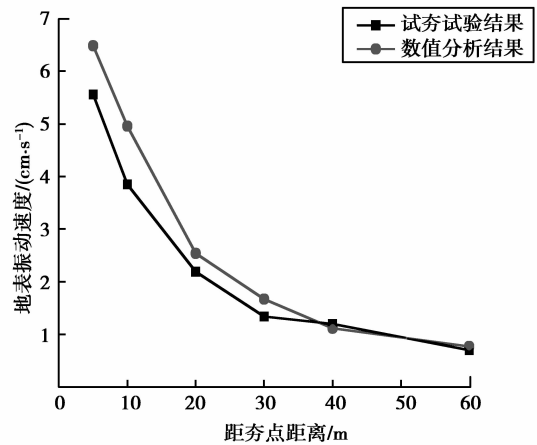


图 2 距夯点不同距离处地面振动峰值

Fig.2 Peak vibration velocity of points at different distance from damping point

型的正确性,可利用此模型进一步研究。

4 主控因素分析

4.1 夯锤落距组合对地面振动的影响

对于强夯振动而言,主要影响因素包括土体和夯击能,夯击能又包括夯锤重量和落距,大量研究证明了夯击能越大其所产生的振动也越大^[12],然而,在相同的夯击能作用下,不同的夯锤重量与落距的组合形式对地面振动速度的影响也不容忽视。

分别取夯击能为 4 000 kN·m 和 6 000 kN·m。当夯击能为 4 000 kN·m 时,分别取夯锤的锤重与落距组合为 20 t×20 m、26.67 t×15 m 和 30 t×13.3 m;当夯击能为 6 000 kN·m 时,分别取锤重与落距组合为 25 t×24 m、30 t×20 m 和 32 t×18.75 m。

经过数值计算,得到的夯击能分别为 4 000 kN·m 和 6 000 kN·m 时,地面振动速度的峰值随距离的衰减曲线分别如图 3 和图 4 所示。

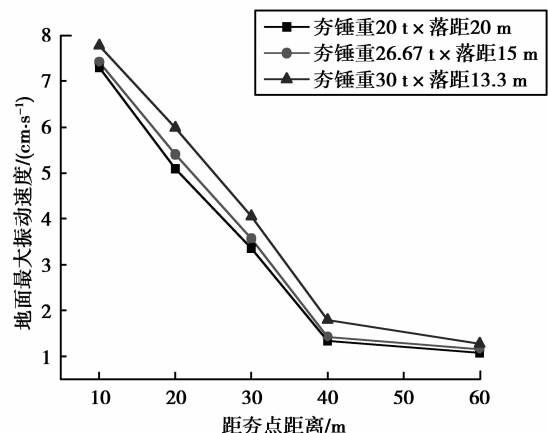


图 3 4 000 kN·m 能级地面振动的峰值速度

Fig.3 Peak vibration velocity at ground surface with 4 000 kN·m energy

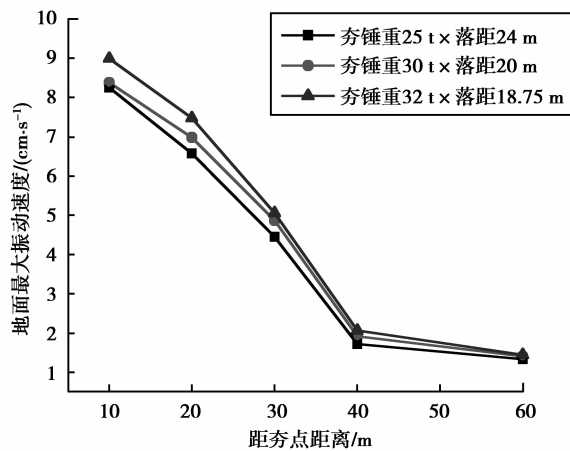


图4 6 000 kN · m 能级地面振动的峰值速度
Fig.4 Peak vibration velocity of ground surface with 6 000 kN · m energy

如图所示,对于两种夯击能而言,在夯击能相同的情况下,相比于轻锤高落距的组合形式,重锤低落距的组合形式所产生的地面振动速度的峰值要大。因此,针对强夯工程,在相同的夯击能情况下,在保证夯击效果的前提下,宜采用轻锤高落距的组合形式,可以在一定程度上减小强夯的振动影响。

4.2 敏感性分析

所谓敏感性分析就是从定量分析的角度来研究相关影响因素发生变化时对所关心的指标影响程度的方法。正交设计是敏感性分析的主要方法之一,其主要的分析指标和分析过程如下:

假设 A、B、C……为某一组互不相同的影响因素, r 表示各个因素的水平数,同时, A_i 表示因素 A 的第 i 个水平,其中 $i=1,2,3,\dots$; X_{ij} 用来表示因素 j 的第 i 水平值,其中 $i=1,2,3,\dots,j=A,B,C,\dots$; Y_{ij} 则可以表示在 X_{ij} 下试验所得到的因素 j 第 i 水平的试验结果指标,其中, Y_i 是随机变量,服从正态分布。用 K_{ij} 表示因素 j 的第 i 水平的统计参数,用 n 表示因素 j 的第 i 水平的试验次数,则 K_{ij} 可以通过公式得到:

$$K_{ij} = \sum_{i=1}^n Y_{ijk} \quad (4)$$

得到全部统计参数以后,可以通过显著性评价参数极差 R_j 分析各个因素影响的显著性。极差越大,说明此因素对于试验结果的影响越明显,也就是说,试验结果对于此因素的敏感性越大。极差 R_j 的计算公式:

$$R_j = \max \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{rj}\} - \min \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{rj}\} \quad (5)$$

本次试验以不同影响因素下,有限元模型计算出的地面最大振动速度为 1.5 cm/s 的地面点距夯点的距离作为安全距离,以此为统计参数,相关影响因素以及各因素水平值的选取如表 5 所示,其中土体指的是上层素填土:

表 5 正交分析参数选择

Table 5 Parameters selection of orthogonal analysis

因素水平	土体弹性模量 /MPa	土体密度 /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	锤底半径 /m	夯锤高度 /m	夯锤落距 /m
1	5	1 700	0.5	1	5
2	10	1 750	0.64	1.2	10
3	20	1 800	0.75	1.5	12
4	30	1 850	0.87	2	15
5	45	1 900	1	2.5	20

本次试验一共 5 个影响因素,每个因素 5 个水平,根据正交试验的要求一共需要做 25 组试验,结果如表 6 所示。

表 6 正交试验方案与结果

Table 6 Scheme and results of orthogonal experiment

序号	土体弹性模量 /MPa	土体密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	锤底半径 /m	夯锤高度 /m	夯锤落距 /m	安全距离 /m
1	5	1 700	0.5	1	5	20.9
2	5	1 750	0.64	1.2	10	22.54
3	5	1 800	0.75	1.5	12	22.36
4	5	1 850	0.87	2	15	23.57
5	5	1 900	1	2.5	20	24.69
6	10	1 700	0.64	1	12	25.30
7	10	1 750	0.75	1.2	15	26.09
8	10	1 800	0.87	1.5	20	29.91
9	10	1 850	1	2	5	25.58
10	10	1 900	0.5	2.5	10	25.41
11	20	1 700	0.75	1	20	35.94
12	20	1 750	0.87	1.2	5	33.94
13	20	1 800	1	1.5	10	34.18
14	20	1 850	0.5	2	12	30.78
15	20	1 900	0.64	2.5	15	31.78
16	30	1 700	0.87	1	10	43.38
17	30	1 750	1	1.2	12	44.20

续表

序号	土体弹性 模量 /MPa	土体 密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	锤底 半径 /m	夯锤 高度 /m	夯锤 落距 /m	安全 距离 /m
18	30	1 800	0.5	1.5	15	29.52
19	30	1 850	0.64	2	20	35.04
20	30	1 900	0.75	2.5	5	35.77
21	60	1 700	1	1	15	52.96
22	60	1 750	0.5	1.2	20	44
23	60	1 800	0.64	1.5	5	45.97
24	60	1 850	0.75	2	10	53.4
25	60	1 900	0.87	2.5	12	55.59

根据试验结果得到 25 个强夯安全距离。在得到所有试验结果之后,通过公式计算出各个因素的极差,进行极差分析。极差分析表 7 如表所示:

表 7 极差分析结果

Table 7 Results of range analysis

参数	土体弹性 模量 /MPa	土体密度 /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	锤底半径 /m	夯锤高度 /m	夯锤落距 /m
K_{1j}	114.06	178.487	150.612	178.487	162.156
K_{2j}	132.286	170.759	160.62	170.759	178.909
K_{3j}	166.625	161.943	173.568	161.943	178.225
K_{4j}	187.904	168.369	186.386	168.369	163.919
K_{5j}	251.923	173.235	181.607	173.235	169.584
R_j	137.868	16.544	35.774	16.537	16.753

根据所得的结果可以看出,各个因素的极差值从大到小的顺序为土体的弹性模量、夯锤底面半径、夯锤落距、土体密度和夯锤高度,此顺序即为各因素对于强夯振动以及安全距离影响的衰减顺序。

相比于夯锤的相关因素,土体的性质对于强夯振动的影响更大,而对于夯锤来讲,夯锤的重量对于振动的影响大于落距对振动的影响,其中夯锤底面半径的影响尤其显著。经过分析可以认为,在满足强夯施工技术要求的前提下,轻锤高落距以及小直径的夯锤形式能有效减少强夯振动的影响,缩小夯点与被保护对象之间的距离,即在确保周围建筑物振动安全的前提下,在尽可能大的范围内使用强夯法进行地基处理。

5 结 论

基于实际工程利用数值分析的方法,运用大型有限元通用软件 ABAQUS 建立了强夯处理地基的模型,通过与实测振动数据进行对比验证了模型的正确性,在此基础上,主要分析了不同参数对于强夯振动的影响,并分析了强夯振动对于各个参数的敏感性,得到以下主要结论:

(1)强夯引起的地面最大振动速度随着距离的增加成指数形式衰减。随着夯击能量的增加强夯引起的地面振动也在增加,同时,振动的衰减速度也在增加。

(2)经过对强夯相关因素的敏感性分析,认为强夯振动对于各个因素敏感性大小的顺序为土体的弹性模量、夯锤底面半径、夯锤落距、土体密度和夯锤高度。可以认为,土体的性质对于强夯振动的影响更大,而对于夯锤来讲,夯锤的重量对于振动的影响大于落距对振动的影响,其中,夯锤底面半径的影响尤其显著。

(3)经过分析可以认为,在满足强夯施工技术要求的前提下,轻锤高落距以及小直径的夯锤形式能有效减少强夯振动的影响,减少夯点距离保护对象的距离,从而能更大幅度地发挥强夯的优势。

参考文献 (References)

- [1] 赵建华,陈晓斌.动力排水固结软基处理模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):60-66. (Zhao Jianhua, Chen Xiaobin. Model testing study on dynamic drainage consolidation method for soft soil foundation treatment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 60-66. (in Chinese))
- [2] 王安明,黄志全,李彰明,等.动力排水固结模型试验设计研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):60-66. (Wang Anming, Huang Zhiqian, Li Zhangming, et al. Study on design of model test of dynamic drainage consolidation method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 60-66. (in Chinese))
- [3] 夏瑞良,龚晓平,沈小七.强夯引起地面振动的衰减特征[J].地震学刊,2001,21(2):41-43. (Xia Ruiliang, Gong Xiaoping, Shen Xiaoqi. Attenuation characteristics of the ground vibration caused by strong tamping [J]. Journal of Seismology, 2001, 21(2): 41-43. (in Chinese))
- [4] 褚宏宪,史慧杰.强夯振动监测应用分析[J].物探与

- 化探, 2005, 29(1): 88-92. (Chu Hongxian, Shi Huijie. An analysis of tamping vibration monitoring application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(1):88-92. (in Chinese))
- [5] J.H.Hwang, T.Y.Tu. Ground vibration due to dynamic compaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006(26):337-346
- [6] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (Xie Dingyi. Soil Dynamics[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2005. (in Chinese))
- [7] 高广运, 李志毅, 黄诚. 强夯的非线性有限元分析和施工参数优化[J]. 地下空间, 2004, 24(4): 427-433. (Gao Guangyun, Li Zhiyi, Huang Cheng. Nonlinear finite element analysis and construction parameter optimization of dynamic compaction [J]. Underground Space, 2004, 24(4): 427-433. (in Chinese))
- [8] 何长明, 邹金峰, 李亮. 强夯动应力的量测及现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 628-632. (He Changming, Zou Jinfeng, Li Liang. Field tests on measurement of dynamic stress of dynamic compaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4):628-632. (in Chinese))
- [9] 于海涛. 强夯振动能量随距离衰减规律研究[D]. 广州: 中山大学, 2010. (Yu Haitao. Research on the law of dynamic compaction vibration energy attenuating with distance [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010. (in Chinese))
- [10] 刘利平, 刘晶晶, 石明禄. 强夯作用下饱和软土地层的沉降和变形性状[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1222-1226. (Liu Liping, Liu Jingjing, Shi Minglu. The characteristics of settlement and deformation of saturated soft soil under dynamic Loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6):1222-1226. (in Chinese))
- [11] 孟庆山, 汪稔. 冲击荷载下饱和软土动态响应特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 17-21. (Meng Qingshan, Wang Ren. Experimental study on dynamic characteristics of saturated soft clay under impact loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 17-21. (in Chinese))
- [12] 尹坚, 张良涛. 地基强夯振动测试分析及防振动措施[J]. 铁道工程学报, 2009(4): 17-20. (Yin Jian, Zhang Liangtao. Test and measurement of the vibration induced by heavy ramming foundation and anti-vibration measure [J]. Journal of Railway engineering Society, 2009(4): 17-20. (in Chinese))

(上接第 1275 页)

- [2] Musso G. Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area [J]. Civil Engineering, 1979; 49(11): 79-82.
- [3] Bito Y. Construction methods of the structures passing through under railway line [J]. Japanese Railway Engineering, 1987, 4(26): 6-9.
- [4] Tan W L, Ranjith P G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunneling [A]//In Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Mechanics [C]. ASCE. Seattle USA, 2003.
- [5] 大谷達彦, 進士正人, 千々和辰訓. 地表面沈下抑制効果を考慮したパイプルーフの設計法[J]. トンネルと地下, 2010, 41(5): 383-393. (Otani Tatsuhiko, Shinji Masato, Chinjiwa Tatsunori. Design method of pipe roof tunnel support considering surface settlement control effects [J]. Tunnel and Underspace, 2010, 41(5): 383-393. (in Japanese))
- [6] 土井勇介, 大谷達彦, 進士正人. 粒状体解析を用いた先受け工法の適切な鋼管間隔に関する検討[J]. 隧道工程(日本土木学会), 2009, 19: 219-224. (Doi Yusuke, Otani Tatsuhiko, Shinji Masato. The optimum distance of roof umbrella method for soft ground by using PFC [J]. Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE, 2009, 19:219-224. (in Japanese))
- [7] 肖世国, 夏才初, 朱合华, 等. 管幕内箱涵顶进中顶部管幕竖向变形预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1887-1892. (Xiao Shiguo, Xia Caichu, Zhu Hehua, et al. Vertical deformation prediction on upper pipe-roof during a box culvert being pushed within a pipe-roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1887-1892. (in Chinese))
- [8] 李超. 浅埋暗挖隧道管棚作用机理及施工过程三维数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010. (Li Chao. Mechanism of pipe-roof in shallow-buried tunnels and 3D numerical simulation of construction process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [9] 孙旻, 徐伟. 软土地层管幕法施工三维数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1497-1500. (Sun Min, Xu Wei. 3D numerical simulation of pipe-curtain method in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.): 1497-1500. (in Chinese))