

文章编号: 1000-7598 (2014) 01-0090-08

强夯置换软土中碎石墩形成过程的试验研究

郑凌透^{1,2}, 周风华^{1,3}(1. 宁波大学 教育部冲击与安全工程重点实验室, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;
3. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 强夯置换工程要求保证夯沉量、置换墩长度等设计指标, 通常通过试夯确定必要夯击次数。研究置换墩形成机制, 确定夯锤能量释放时间、填料运动规律、锤底动压力等因素, 对优化强夯置换工艺有重要作用。目前有关置换墩形成机制的研究较少, 往往套用强夯工程的基本参数或机制来解决。针对这一问题设计了一种模型试验方法, 研究强夯冲击下填料、软土与夯锤之间的相互作用过程。试验研究表明: 每次夯击中夯锤的运动加速度曲线可以分为 4 个阶段, 分别代表了夯锤作用下土体-填料的不同运动过程; 通过分析夯锤的动态力-位移曲线, 阐述各阶段随夯击和填料次数变化而发生的变化及原因; 随填料次数的增加, 在相同夯击能下, 每次夯击中夯锤的能量释放时间减小, 峰值动压力增加, 这反映了随着夯击次数增加, 软土基础中碎石墩逐渐形成的过程。

关 键 词: 强夯置换法; 模型试验; 置换墩; 冲击动力学; 加速度; 高速摄影
中图分类号: TU 411 文献标识码: A

Experimental study of forming process of replacement pier in soft soil using dynamic replacement method

ZHENG Ling-wei^{1,2}, ZHOU Feng-hua^{1,3}(1. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: In a dynamic replacement (DR) process, the length and the subsidence of the replacement pier need to meet the design specifications. The times of tappings and the fillings to fulfill a DR process is generally determined by field test. Understanding the forming mechanism of the replacement pier, and quantifying the factors such as energy releasing time, motion characteristics of fillers, stress of pounder bottom, etc, play critical roles for optimizing the DR process. In this paper, a model test method to study the interactions of the fillers and soil under the multiple impacts of the pounder is established. Experimental results show that each acceleration-time curve in DR can be divided into four stages, representing different phases of the soil-fillers motions under each pounding. Through analyzing the force-displacement ($F-s$) curves of the pounder in this process, the characteristics of each $F-s$ curve are distinguished and the intrinsic mechanism is discussed. It was shown that with the increasing of filling times, the energy releasing time during each pounding decreases and the maximal force increases, signifying the gradual forming of the replacement pier in the soft soil foundation.

Key words: dynamic replacement method; model test; replacement pier; impact dynamics; acceleration; high speed photography

1 引 言

强夯置换法^[1](dynamic replacement method)是由强夯法^[2](dynamic compaction method)改进, 并于 20 世纪 80 年代首先由法国 Menard 公司采用的软弱土处理工艺, 是一种经济、快速的地基处理方式。

具体实施过程是利用重锤下落的夯击能将粒状骨料(碎石等)挤压入可压缩软土中, 通过“填料—数次夯击—再填料”的工艺流程, 形成大直径墩加固土体。与强夯置换法相关联的研究内容主要集中在动力固结原理、置换深度、复合地基承载机制以及强度时效性等方面, 一般认为: 在强夯置换过程中,

收稿日期: 2012-10-23

基金项目: 浙江省 151 人才工程资助项目(No. B01645104300); 宁波市“近海冲击与安全工程”创新团队项目(No. 2009B21004); 宁波大学王宽诚幸福基金。

第一作者简介: 郑凌透, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事冲击动力学、岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhenglingwei@hotmail.com

通讯作者: 周风华, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击动力学方面的研究工作。E-mail: zhoufenghua@nbu.edu.cn

动力挤密、置换成墩、排水固结等机制相辅相成, 形成复杂的整体加固效果^[3-4]。

强夯置换法加固地基的机制、工艺与强夯法不同^[5]。在实际工程中, 强夯置换法的设计要求^[6]提出, 夯点的夯击次数只能通过现场试夯确定。在理论上, 认识碎石墩形成机制不仅关系到工程经济性, 对了解动力固结原理、置换深度、承载机制等有重要作用。一些学者围绕置换深度做了不同方面的研究: 吴忠怀等^[7]取锤-土相互作用时间 $\Delta t=0.04$ s, 使用拟静力法计算了接触面应力并最终获得置换深度; 罗嗣海等^[8]简化强夯置换过程为纵向的一维波动问题, 利用分离单元法求解对应夯击数下的置换深度和桩体长度; 曾庆军等^[9]以波能传播理论为基础, 并设定不同的土能量吸收系数, 求解夯击数与置换深度关系; 解华明等^[10]利用最小二乘法在仅考虑单锤夯击能(重力势能) WH 和土质条件下以土层承载力 f 表征计算获得深度值; 滕凯^[11]取单锤夯击能、土层承载力及夯锤直径 3 个因素为自变量建模分析, 利用工程资料优化拟合后估算置换深度。

孔令伟等^[12-14]在对强夯试验和夯锤的运动特性分析后获得地表面接触应力-时间关系, 可以看出, 随夯击数增加, 接触应力峰值增大, 接触时间减少。牛志荣等^[15]将强夯冲击载荷简化为三角形加载波, 进行了土体动力特性分析。刘汉龙^[16]、高有斌^[17]等将强夯冲击加载简化为正弦波, 计算了土体纵向位移。谢新宇等^[18]考虑冲击载荷下土体的损伤失效机制, 分析了土体变形和碎石墩形成过程。

从力学机制上看, 强夯置换法涉及落锤与填料之间的夯击、填料在软土中的运动和置换、土与填料之间的挤压密实、软土在冲击载荷作用下的变形及流动等复杂过程。研究强夯置换中碎石墩的形成机制, 有必要从软土和骨料的冲击、变形与运动的角度进行分析, 得到锤径、强夯能级、垫层厚度等因素对置换效果的影响, 阐明土中碎石墩的加固机制。为了探究强夯置换机制, 了解冲击状态下锤-石-土的相互作用过程, 分析动接触应力、夯锤能量释放以及碎石墩形成的各个阶段, 需进行试验研究。

半模试验箱作为一种直接观测剖面的有效手段, 首先在强夯中得到了应用^[19-20]。本文设计了强夯置换半模试验箱, 采用冲击动力学的测量手段, 进行了强夯置换模型试验。在保持相同夯击能作用下, 研究夯深、夯锤能量释放时间与夯击数、填料次数的关系。根据试验中获取的置换过程中夯锤的动态纵向位移、动态力、力-位移曲线, 碎石运动

轨迹等数据, 分析了碎石墩形成的几个关键阶段。

2 模型试验简介

2.1 模型相似关系

在强夯置换过程中, 夯锤和填料(碎石等)通常不发生变形和破坏, 可以考虑为刚体, 影响夯锤运动量和置换深度等结果的主要因素包括: 夯锤、碎石的特征尺寸 L 、 L' , 夯锤、碎石、软土的密度 ρ 、 ρ' 、 ρ'' , 软土杨氏模量 E 、泊松比 ν , 夯锤质量 M 、速度 V 、位置坐标 X 和时间 t 。

不计夯锤、碎石、软土三者之间的摩擦, 忽略重力影响, 以 L 、 ρ 、 V 为基本量进行无量纲化处理^[21], 得到相似准则方程:

$$f\left(\frac{L'}{L}, \frac{\rho'}{\rho}, \frac{\rho''}{\rho}, \frac{E}{\rho V^2}, \nu, \frac{M}{\rho L^3}, \frac{X}{L}, \frac{t}{L/V}\right) = 0 \quad (1)$$

试验中 ρ 保持与原型情况相同, 且几何相似比为 $\beta = b/B$ (原型物理量与对应的模型试验物理量的比值)。为满足模型试验与原型的相似, 各物理参量须满足表 1 所示的相似比关系。

表 1 模型参数的相似比

Table 1 Similarity ratios of model parameters

物理参量	相似比	物理参量	相似比
L'	β	V	1
ρ'	1	M	β^3
ρ''	1	X	β
E	1	T	β
ν	1		

2.2 半模试验箱及测量设计

设定几何相似比 $\beta = 0.05$, 使用透明有机玻璃板制作缩尺半模试验箱。采取半模试验方法, 观察面即为实际问题的对称面, 通过透明有机玻璃板可以实时观察到对称剖面的碎石和土体变化, 同时也便于进行数据测量。模型试验箱长、宽超过夯锤直径的 10 倍, 在这个距离, 外边界对强夯作用区域的土体和碎石桩基本没有影响。试验黏土在箱内的尺寸为 800 mm(长)×400 mm(宽)×640 mm(高)。在试验箱外壁粘贴 20 mm×20 mm 透明网格贴纸作为观察坐标, 从剖面观察土体的变形和碎石的侵入现象, 并使用高速摄像机拍摄剖面动态图片, 提供动态纵向位移数据(见图 1(a))。设计相应的半圆柱形夯锤, 质量 $M=2.55$ kg。在试验过程中, 使夯锤贴合试验箱内壁下落。不同于土工试验中在土体中埋设土压力盒的测量方式, 在半圆柱夯锤顶部安装加速度计, 测量夯锤在强夯置换过程中的动态加速度变化(见

图 1(b)), 并利用冲击动力学方法将测量的加速度数据换算成为夯锤的速度、位移及承受载荷数据。

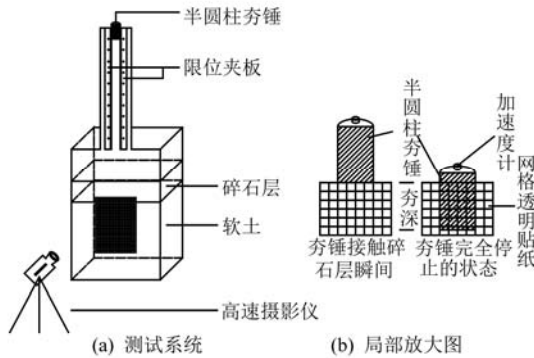


图 1 模型试验箱设计及其测量系统
Fig.1 Design of model test chamber and measuring systems

2.3 试验用土和碎石

取宁波市镇海区某基坑 2-2 层淤泥质粉质黏土, 重塑后模拟地基土体 (图 2(a)), 其含水率为 46.9%。土性勘察报告显示: 饱和重度 $\gamma = 16.62 \text{ kN/m}^3$ 、黏聚力 $c = 11.2 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi = 9.1^\circ$ 。初始碎石层厚度为 40 mm, 平均粒径为 10 mm (图 2(b))。试验前铺设碎石的软土试验箱如图 2(c)、图 2(d)所示。

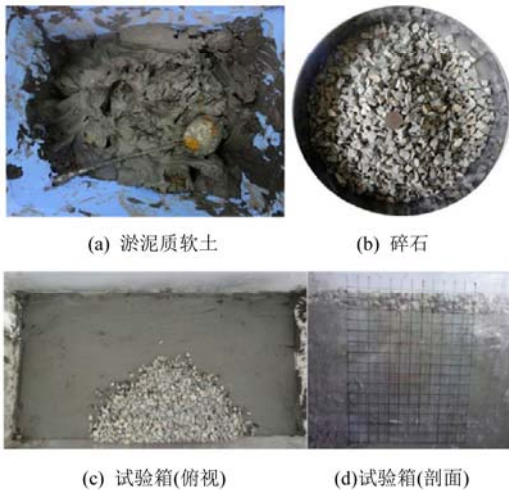


图 2 模型试验材料
Fig.2 Materials of model test

2.4 试验方案

强夯置换模型试验中, 首次撒布的碎石层厚度为 4 cm, 即高出初始黏土高度 4 cm。共进行了 12 次夯击, 每次夯击中锤头的下落高度为 1.12 m, 在夯锤到达 0 高度时刻, 理论撞击速度为 4.6 m/s。在实际试验中, 由于夯锤与壁面的摩擦以及部分夯击中夯坑可能有一定初始深度, 导致夯锤到达碎石墩时刻的撞击速度有一定分布, 基本上在 4.5 m/s 附

近。每夯击 3 次后补充填料一次, 填料后碎石的高度达到初始黏土高度。半圆柱型夯锤底部直径和锤高分别为 8 cm 和 13 cm, 锤重约为 2.55 kg。在夯锤和有机玻璃试验箱内壁间以 S 形刷上润滑油确保夯锤贴合壁面下落, 产生的少量吸附力对下落速度影响不大。试验过程的静态照片见图 3。

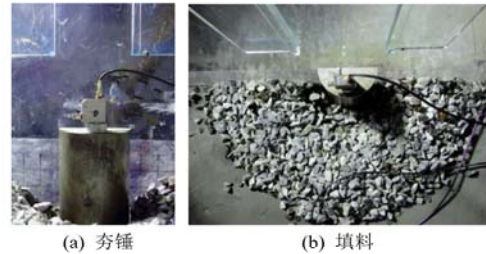


图 3 试验过程照片
Fig.3 Photos during tests

在每次夯击后从对称剖面测量夯坑深度 (夯沉量), 获取夯沉量与夯击次数的关系, 如表 2 所示。填料后夯沉量数据重新归零, 由于初始碎石层高度高出每次填料后碎石层高度 4 cm, 定义为 -4 cm。将夯沉量按填料次数分填料后第 1、2、3 遍夯击并连线如图 4 所示, 括号中数字为夯击击数。从图中可以看出: ①每次填料后夯沉量的增量随着击数的增加而减少; ②随着填料次数的增加, 同一次夯击下的夯沉量减少。

表 2 夯沉量与夯击击数的关系
Table 2 Relationships between ground subsidence and tamping times

夯击击数	夯沉量/cm	夯击击数	夯沉量/cm
初始高度	-4.0	第 2 遍填料后	0.0
第 1 击	7.2	第 7 击	5.5
第 2 击	13.7	第 8 击	8.3
第 3 击	18.5	第 9 击	10.4
第 1 遍填料后	0.0	第 3 遍填料后	0.0
第 4 击	7.9	第 10 击	4.0
第 5 击	11.8	第 11 击	5.6
第 6 击	14.4	第 12 击	7.5

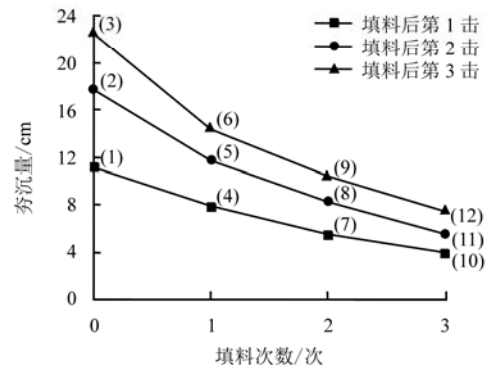


图 4 夯沉量与填料次数的关系
Fig.4 Relations between ground settlement and filling times

3.1 夯锤加速度测量和受力分析

试验获得夯锤的加速度 $a(t)$ -时程曲线。无论是夯锤的动态力 $F(t)$ -时程曲线还是地面接触应力 $p(t)$ -时程曲线，都可由 $F = Ma$ 和 $p = F/S$ (M 和 S 分别为夯锤的质量和接触底面积)，由夯锤的加速度-时程曲线获得。试验中夯锤质量 M 和底面积 S 为常数，这些时程曲线的形状完全一致。

在夯锤顶部安装加速度计获取 $a(t)$ 曲线，简单计算可得 $F(t)$ 曲线和 $p(t)$ 曲线。试验获取置换过程中第 1~12 击夯锤的加速度-时程曲线，进而分析强夯置换过程中夯锤的运动过程并分阶段讨论。

通常，在对无碎石的软土进行强夯时，夯锤对软土作用的动态力-时程曲线比较光滑，在数值模拟和理论分析被视为三角形加载波或正弦函数加载波。与强夯过程不同，在强夯置换中夯锤首先接触到碎石并通过碎石与土相互作用，实测得到的动态力曲线不是对称的正弦波形式。作为一个例子，选取一个典型的第 8 击的夯锤加速度-时程曲线进行分析，如图 5 所示。可以看出：①夯锤的加速度曲线在夯击的早期阶段具有明显的振荡，当夯锤的下落速度减少时，加速度出现负值(加速度向上为正)，这种震荡反映了夯锤与硬石子之间发生接触作用

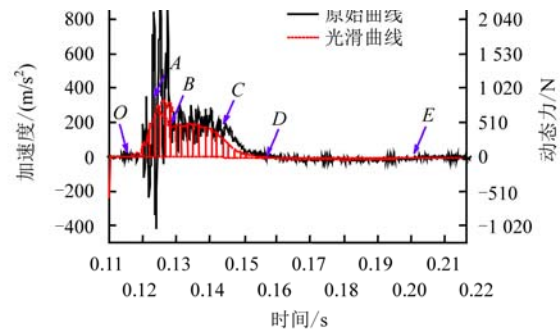


图 5 典型夯锤加速度-时程曲线
Fig.5 Typical acceleration-time curves of pounder

为研究填料工艺对夯锤释放能量的影响，将夯锤中由于应力波传播造成的加速度大幅震荡过滤，获得光滑的、反映夯锤整体刚性运动的加速度-时程曲线，并对这些曲线进行分析。为了便于比较，将填料后第 1 遍击（总编号第 1、4、7、10）的加速度曲线绘制于图 6(a)，这些夯击都发生在碎石填满夯坑之后；将填料后第 3 遍夯击（总编号第 3、6、9、12）的加速度曲线绘制于图 6(b)，此时夯坑已经具有一定深度。

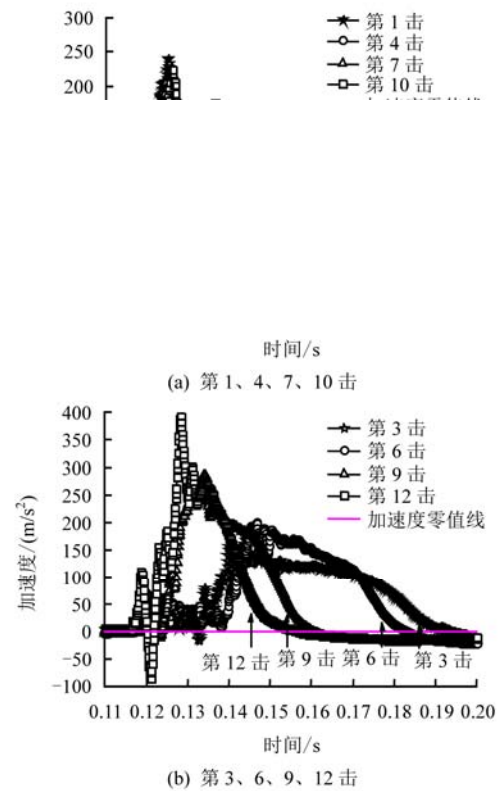


图 6 夯锤加速度-时程曲线
Fig.6 Acceleration-time curves of pounder

观察图 6 所示光滑后的夯锤加速度-时程曲线，主要关注能量释放时间、近似平台区加速度值、近

0.128 s，持续时间 8 ms) 和震荡下行区 AB (0.128~0.132 s，持续时间 4 ms)。在此阶段夯锤与碎石群体发生多体碰撞，实测加速度发生高频震荡，其平均值增加；夯锤的撞击力通过碎石传递给软土，造成软土密实。

(2) 近似平台区 BC (0.132~0.146 s)，持续时间 12 ms。在此阶段，软土压密后夯锤继续使碎石密实，体现在加速度小幅震荡和近似平台的加速度区间。

(3) 快速下降区 CD (0.146~0.156 s)，持续时间 10 ms，此时软土和碎石都得到密实并伴随夯锤的能量释放完毕，加速度曲线快速下降。

(4) 缓慢回弹区 DE (0.156~0.205 s)，持续时间 49 ms，此时夯锤小幅度的向上回弹，体现在较长一段时间出现负加速度。

似平台区历时和加速度最高峰值。从图 6(a)所示各条填料之后第 1 遍夯击(总编号第 1、4、7、10 击)的曲线可知:随着碎石填料的增加,近似平台区的持续时间减小、平均加速度值变大,这反映出夯锤下方软土-碎石基础越来越坚实的事实。同样,观察每次填料后的第 3 遍夯击(总编号第 3、6、9、12 击)的加速度曲线见图 6(b),可见随击数的增加,近似平台区斜率随之增加,这是由于碎石被多次夯击后已经相对密实的结果。

第 1、4、7、10 击和第 3、6、9、12 击都呈现能量释放时间(即夯锤对基础的作用时间)随击数的增加而减小的现象,如图 7 所示。事实上自由落体的夯锤与土体作用时间反映了基础的承载能力,随着填料的增加,碎石层厚度越来越大。图 7 的结果从另一个角度表明,每次夯击后基础越来越坚实的事实。而两次填料之间的能量释放时间曲线,如第 1、2、3 击、第 4、5、6 击并没有呈现明显差别和趋势,因此认为,能量释放时间主要取决于碎石层的厚度,并表现为随碎石层厚度增加而变小。随着击数增加,近似平台区缩短、平台平均值增大、加速度最高峰值增大。

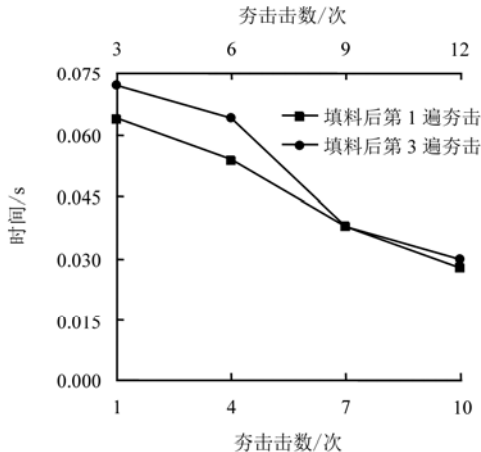
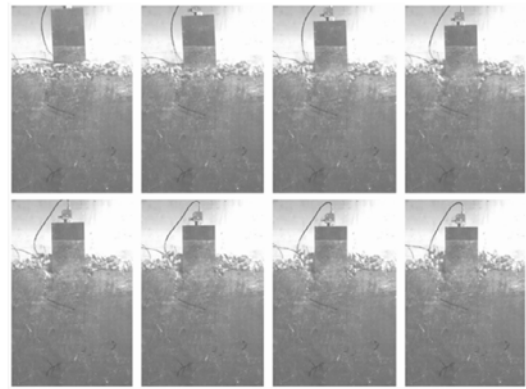


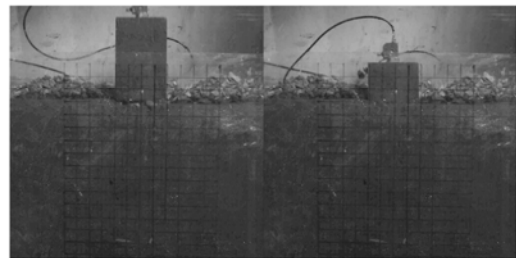
图 7 夯击击数与能量释放时间的关系
Fig.7 Relations between tamping times and energy releasing time

3.2 夯锤运动的高速摄影观测

相较于每次夯击完成后测量夯深的传统做法,高速摄影仪的优点是能够捕捉到强夯置换过程中的夯锤实时位移和软土、碎石的变形情况。试验中以每秒 1 000 幅速度记录强夯置换过程中夯锤、碎石和软土的动态影像,典型落锤落下的连续照片如图 8(a)所示。通过贴于外壁透明贴纸上的网格标尺,观察放大的高速摄影照片(图 8(b)),可以判读夯锤在不同时刻的位置。



(a) 强夯置换下夯锤、碎石和软土连续动态影像(时间间隔 4 ms)



(b) 放大的照片反映夯锤的位置与测量标尺,用于测量夯锤的实时位置

图 8 强夯置换过程的动态影像

Fig.8 Dynamic photos in dynamic replacement process

对于每次夯击,通过判读高速摄影照片,得到夯锤在不同时刻的运动位置,如图 9 所示。在夯锤能量释放过程中,动态力 $F(t)$ 首先达一定峰值并随后下降,曲线的上升、下降相当于加、卸载过程。卸载过程中除不可恢复的塑性应变,还包括一定的弹性应变,因此,夯锤会在达到最大夯沉量后产生回弹。将最大夯沉量和最终夯沉量的差值定义为回弹量,相应地,将回弹量和最终夯沉量的比值定义为回弹比,计算数据由表 3 给出。表 3 表明,回弹量与夯沉量的比值(回弹比)随着填料次数增加而增加,可预见在填料后期会有更快的增长。夯沉量和回弹比分别达到各自阈值时,表明碎石墩已经具有足够强度,或可作为停锤的参考依据。

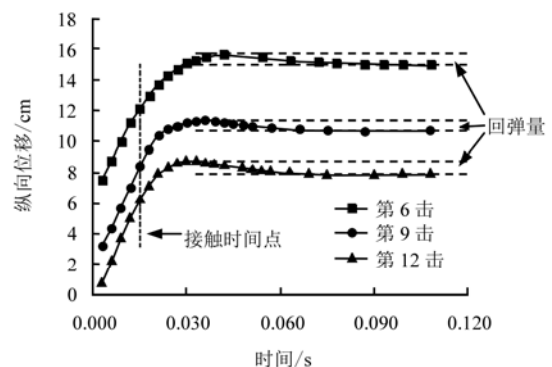


图 9 夯锤纵向位移-时程曲线

Fig.9 Longitudinal displacement-time curves of pounder

表 3 第 6、9、12 击回弹量及回弹比
Table 3 Rebound values and rebound ratios at 6 th, 9 th and 12th tamping

夯击数	夯沉量/cm	回弹量/cm	回弹比/%
第 6 击	2.6	0.70	26.9
第 9 击	2.1	0.65	30.1
第 12 击	1.9	0.80	42.1

3.3 综合分析

3.3.1 加速度计换算与实测对比

在上述高速摄影仪分析的基础上，结合加速度计数据进行分析。将第 6、9、12 击夯锤加速度-时程曲线通过 1 次、2 次积分，分别获取夯锤速度-时程曲线如图 10 所示，以及夯锤位移-时程曲线如图 11 所示。在图 11 中还给出了从高速摄影照片所测动态纵向位移-时程曲线（图 9 数据），以供比较。从图 11 不难发现，加速度 2 次积分获取的位移曲线在峰值、变化时间点方面与高速摄影仪实测数据基本一致。

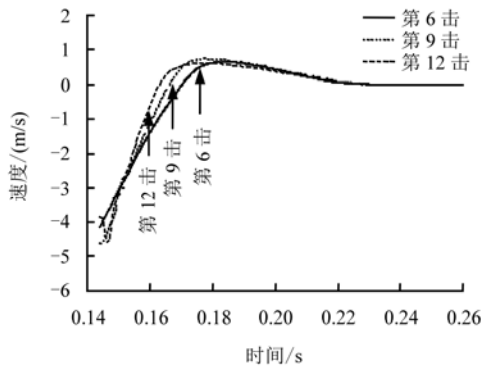


图 10 夯锤速度-时程曲线
Fig.10 Velocity-time curves of pounder

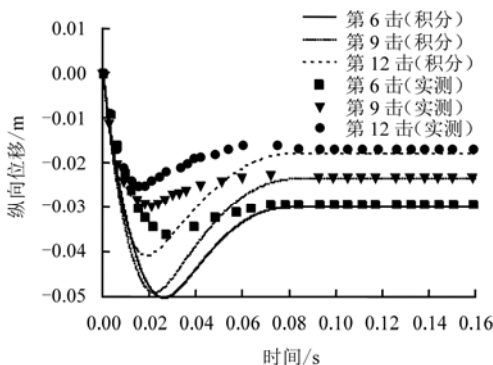


图 11 纵向位移-时间实测曲线与积分结果对比
Fig.11 Comparison between measured and integral curves of longitudinal displacement-time of pounder

3.3.2 夯锤动态力-位移曲线

在获取夯锤的加速度-时程曲线和纵向位移-

时程曲线后，由 $F = Ma$ 绘制力-位移曲线如图 12 所示。图像表明，随着夯锤击数的增加，夯锤动态力峰值增大、冲击力加载曲线斜率变小、弱冲击力段变短。

笔者认为，在夯锤强夯下形成碎石墩的阶段如下：首先是夯锤推动并连带碎石，以软土的变形和破坏首先吸收一部分夯锤的冲击能量，相对应的是力-位移曲线弱冲击力段。弱冲击力段的长度随夯击数增加而缩短，印证了软土在最初受到类似强夯的压缩过程。软土难以继续压缩后夯锤冲击的主要作用化为挤密碎石，并在稍后体现为碎石与软土的相互侵入。事实上，第 6、9、12 击夯锤下的碎石层厚度越来越厚，碎石的挤密逐渐成为夯锤能量释放的主要部分，也使冲击力加载曲线的斜率随击数增加而减小。

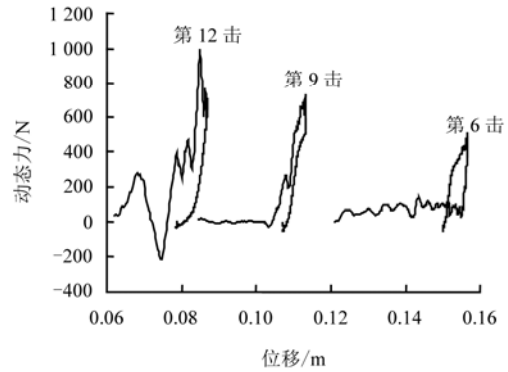


图 12 夯锤力-位移曲线
Fig.12 Force-displacement curves of pounder

4 结论

(1) 设计了强夯置换半模试验箱及相应测量装置，进行了总计 12 击的强夯置换模型试验。联合使用高速摄影仪和安装在夯锤顶部的加速度计，可直接获得夯深数据、夯锤动态加速度-时程曲线、夯锤动态纵向位移-时程曲线，可间接获得夯锤动态力-时程曲线、锤底动应力-时程曲线、夯锤速度-时程曲线、夯锤动态力-位移曲线等。

(2) 试验显示，强夯置换与强夯的曲线存在不同，可分为早期应力波在夯锤中震荡、碎石密实、软土和碎石流动及回弹 4 个阶段。随着击数增加，每次夯击中能量释放时间减小、近似平台区的时间减小、平均加速度值变大、峰值变高。同时发现，填料对动应力的持续时间或称能量释放时间影响较大，而在两次填料之间，每次夯击中夯锤的能量释放时间变化不大。因此认为，填料工艺对强夯置换

中夯锤动应力、接触应力起主要影响。

(3) 动态纵向位移-时程曲线显示, 回弹量与夯沉量的比值(回弹比)随着填料次数增加而增加。

(4) 加速度-时程曲线积分所得夯锤速度-时程曲线, 其接触速度与相同高度自由落体速度接近。再积分所得的夯锤纵向位移-时程曲线与实测夯锤纵向位移-时程曲线进行对比, 有相同的定性规律。

(5) 从所获取的夯锤动态力-位移曲线认为, 填料后夯锤的动态力峰值增大、冲击力加载曲线斜率变小、弱冲击力段变短。通过分析以上各参数变化及(2)中内容推断, 碎石墩形成的几个阶段中软土和碎石各起的作用。

(6) 高速摄影仪和加速度计可以做到相互较好的印证和补充。笔者试图通过以上工作了解强夯置换下软土中碎石墩形成的一些机制, 例如夯锤在冲击中与强夯的区别、形成碎石墩各个阶段的主要贡献者等。所获得的夯锤能量释放和运动规律以及碎石墩形成过程对强夯置换的理论分析和工程实际有一定参考意义。遗憾的是, 由于试验中软土黏性大、颜色深, 造成透明箱壁面沾染模糊, 未能得到碎石墩界面的清晰照片。但试验所获得的测量数据为下一步模拟强夯作用下, 软土的变形以及碎石在软土中的流动规律提供了原始资料。

(7) 目前的研究工作限于模型试验, 所模拟内容与现场工程实际情况相差可能较大, 如夯锤与石子的作用、碎石在软土中的流动和嵌入、土中孔隙水的作用和排出等都涉及复杂的物理过程。在使用模型试验箱进行强夯置换的模拟中, 主要考虑的还是软土的变形情况, 所获结果为现场工程实践提供定性的说明, 也为今后开展足尺试验研究作为铺垫。

参 考 文 献

- [1] LO K W, OOI P L, LEE S L. Dynamic replacement and mixing of organic soils with sand charges[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 116(10): 35-41.
- [2] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(1): 3-18.
- [3] 王保田, 唐劲柏. 强夯碎石桩的发展及成桩机制分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 30-34.
WANG Bao-tian, TANG Jin-bai. Development of DRM and analysis of column-formation mechanism[J]. **Journal of Hohai University**, 1999, 27(6): 30-34.
- [4] 王宏祥, 闫澍旺, 冯守中. 强夯置换墩法处理公路软基的机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 53-58.
WANG Hong-xiang, YAN Shu-wang, FENG Shou-zhong. Study of mechanism of dynamic compaction replacement for reinforcing highway soft roadbed[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 53-58.
- [5] 龚晓南. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] 中华人民共和国建设部. JGJ79-2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 吴忠怀, 吴武胜, 龚晓南. 强夯置换深度估算的拟静力法[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(4): 306-308.
WU Zhong-huai, WU Wu-sheng, GONG Xiao-nan. Quasi-static model for estimating replacement depth of dynamic replacement[J]. **Journal of East China Geological Institute**, 2001, 24(4): 306-308.
- [8] 罗嗣海, 潘小青, 黄松华, 等. 置换深度估算的一维波动方程法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(1): 115-119.
LUO Si-hai, PAN Xiao-qing, HUANG Song-hua, et al. One-dimensional wave equation model for estimating replacement depth of dynamic replacement[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2002, 27(1): 115-119.
- [9] 曾庆军, 李茂英, 李大勇. 强夯置换深度的估算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 608-611.
ZENG Qing-jun, LI Mao-ying, LI Da-yong. Estimation of the displacement depth in dynamic replacement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 608-611.
- [10] 解华明, 丁华. 偏最小二乘回归法在强夯置换深度估算上的应用[J]. 水文地质工程地质, 2003(6): 62-64.
XIE Hua-ming, DING Hua. Application of partial least-squares regression in evaluating replacement depth by dynamic compaction[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2003(6): 62-64.
- [11] 滕凯. 关于强夯置换深度估算公式的评价及改进[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 994-997.
TENG Kai. Evaluation and improvement of formulas for replacement depth under dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(7): 994-997.
- [12] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 86-92.

- KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 86-92.
- [13] 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.
- KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Stress field distribution characteristics of foundation during dynamic consolidation and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 13-19.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体纵向位移计算[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1493-1497.
- LIU Han-long, GAO You-bin, CAO Jian-jian, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1493-1497.
- [17] 高有斌, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 强夯加固地基的土体纵向位移计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2672-2676.
- GAO You-bin, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Simplified calculation method of soil vertical displacement under dynamic compaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2672-2676.
- [18] 谢新宇, 徐玉胜, 吴健, 等. 软土地基连续强夯置换碎石墩的数值分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 249-254.
- XIE Xin-yu, XU Yu-sheng, WU Jian, et al. Numerical simulation of stone column replacement by consecutive dynamic compaction in soft ground[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2011, 33(3): 249-254.
- [19] 费香泽, 王钊, 周正兵. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437-441.
- FEI Xiang-ze, WANG Zhao, ZHOU Zheng-bing. Experimental research of dynamic compaction of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 437-441.
- [20] 冯世进, 胡斌, 张旭, 等. 强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1147-1153.
- FENG Shi-jin, HU Bin, ZHANG Xu, et al. Model test study on impact parameters influence on tamping effect[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2012, 40(8): 1147-1153.
- [21] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2005.
- [10] 亓乐, 刘薇, 孙长帅, 等. 考虑下卧层特性的复合地基荷载传递规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 123-128.
- QI Le, LIU Wei, SUN Chang-shuai, et al. Model test research on load transfer mechanism of composite ground considering underlying layer features[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 123-128.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. **Journal of Structural Engineering**, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [13] 蔡健, 孙刚. 方形钢管约束下核心混凝土的本构关系[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 105-109.
- CAI Jian, SUN Gang. Constitutive relationship of concrete core confined by square steel tube[J]. **Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)**, 2008, 36(1): 105-109.
- [14] 华南理工大学, 东南大学, 浙江大学, 等. 地基及基础(第 3 版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

上接第 89 页