

水下振动压实块石抛填层技术初探^①

付建宝, 梁爱华

(中交天津港湾工程研究院有限公司 港口岩土工程技术交通行业重点实验室,
天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222)

摘要:传统的水下强夯工艺无法实现短时间内无死角地夯实块石抛填层,采用水下振动压实的方法对港珠澳大桥工程中水下块石基床进行压实整平,在国内尚属首例。由于工程实例较少,在现场实施前需进行理论分析。本文将块石抛填层和振动压实系统的模型进行简化,并建立振动方程,通过数学推导给出水下振动压实系统对块石抛填层的做功公式。研究结果表明水对振动压实方法做功的削弱作用很小。

关键词: 水下振动压实; 块石抛填层; 液压振动锤; 理论分析

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0214-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0214

Preliminary Analysis of Underwater Vibrating Compaction Technology for Scattering-Filling Rubble Stone Layer

FU Jian-bao, LIANG Ai-hua

(CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Key laboratory of Port Geotechnical Engineering of the Ministry of Communication, Key laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin 300222, China)

Abstract: At the site of the Hong Kong—Zhuhai—Macao bridge project, the underwater stone bed needed compaction. However, conventional underwater dynamic compaction could not be used to tamp the scattering-filling rubble stone layer with no dead angle over a short period of time. Thus, vibrating compaction technology was used underwater for the first time in China. Owing to the scarcity of engineering examples, theoretical analysis was needed prior to field application. In this study, rubble stone layers and vibration systems were simplified to a mechanical model. The vibration equation was established, and through strict mathematical deduction, the vibration system's work on the rubble stone was obtained. The results show that the weakening effect of water on vibration compaction is very poor.

Key words: underwater vibrating compaction; scattering-filling rubble stone layer; hydraulic vibratory hammer; theoretical analysis

0 引言

国家重点项目港珠澳大桥工程中,东、西人工岛之间采用沉管隧道连接,沉管隧道的天然地基段采用块石基床夯实工艺,基床全长约 4.8 km,宽约 42 m,采用 10~100 kg 块石进行抛填,抛填厚度 1.9

m,其上再抛填 0.6 m 厚的碎石垄沟。抛石基床位于水下,最大水深 44 m,抛填完成后需进行夯实,一方面保证基床顶面的平整度,另一方面使块石抛填层更为紧密,后期不会产生过大沉降。

传统的水下强夯工艺不能满足短时间内无死角

① 收稿日期:2015-04-01

作者简介:付建宝(1981—),男,山东临沂人,主要从事筒仓压力、软基处理、膨胀土处理等方面的研究工作。

E-mail: fujianbao@tpei.com.cn.

地夯实块石抛填层的目的,因而急需找到一种新的方法。施工单位拟采用液压锤振动压实的方法来压实块石抛填层,振动压实系统如图 1 所示。但由于水下振动压实技术的工程实例很少,国内尚属首例,可借鉴的工程经验非常少,因而,在现场实施前对水下振动压实技术进行理论分析是非常必要的。



图 1 液压锤振动压实系统

Fig.1 Hydraulic hammer vibrating compaction system

本文通过建立块石抛填层和振动压实系统的简化力学模型,对模型振动方程进行数学推导,拟给出振动压实系统对块石抛填层的做功公式,为水下振动压实技术的实施提供理论支持。

1 振动方程的建立与求解

参考相关文献[1-3],将“振动压实系统-块石抛填层”振动模型用“质量-弹簧-阻尼”系统来等效,振动系统竖直方向简化模型见图 2。

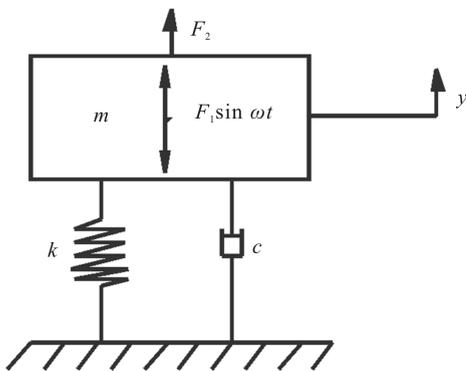


图 2 简化力学模型

Fig.2 Simplified mechanical model

图 2 中,位移竖直方向向上为正。 m 为液压振动系统质量; k 为块石抛填层的等效刚度; c 为等效阻尼,分为块石抛填层等效阻尼 c_1 和水的等效阻尼 c_2 ; F_1 为激振力幅值; ω 为液压振动锤转动的角速

度; $F_1 \sin \omega t$ 为作用在块石抛填层上的振动力; F_2 为压实系统在水中所受的浮力。

根据振动模型,建立竖直方向上的动力学微分方程,即振动方程为

$$m y'' + (c_1 + c_2) y' + k y = F_2 - W + F_1 \sin \omega t \quad (1)$$

假设式(1)的稳定响应为

$$y = Q + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

将式(2)带入式(1),整理后可得:

$$\begin{aligned} &(-m A \omega^2 \cos \varphi - c_1 A \omega \sin \varphi + k A \cos \varphi) \sin \omega t + \\ &(-m A \omega^2 \sin \varphi + c_1 A \omega \cos \varphi + k A \sin \varphi) \cos \omega t + \\ &k Q = F_1 \sin \omega t - W \end{aligned} \quad (3)$$

对比式(3)的两边,想要公式在任意 t 时刻都成立,必须满足以下 3 个关系式:

$$-m A \omega^2 \cos \varphi - (c_1 + c_2) A \omega \sin \varphi + k A \cos \varphi = F_1 \quad (4)$$

$$-m A \omega^2 \sin \varphi + (c_1 + c_2) A \omega \cos \varphi + k A \sin \varphi = 0 \quad (5)$$

$$k Q = F_2 - W \quad (6)$$

由上述 3 式可以求得:

$$A = \frac{F_1}{k \cos \varphi - m \omega^2 \cos \varphi - (c_1 + c_2) \omega \sin \varphi} \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan \frac{(c_1 + c_2) \omega}{m \omega^2 - k} \quad (8)$$

$$Q = \frac{F_2 - W}{k} \quad (9)$$

至此,水下振动过程中位移函数可以求得,即式(2)。振动过程中的速度函数为

$$v = A \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

陆上振动过程中的位移与速度表达式与水下振动相同,但是表达式中 F_2 、 c_2 皆为零。

根据上述模型,水下振动压实施工中,压实系统作用在块石抛填层上的做功等于块石抛填层等效阻尼的做功。一个振动周期内的系统做功计算公式如下:

$$P = \int_0^{2\pi} c_1 v dy = c_1 R^2 \omega \pi \quad (11)$$

单位时间内水下振动压实系统对块石抛填层的做功为

$$P_s = \frac{\omega}{2\pi} P = \frac{1}{2} c_1 R^2 \omega^2 \quad (12)$$

通过上述做功公式可以实现以下 4 个目标:

(1) 已知系统参数和做功时间,求整个振动压实过程中的系统做功;

(2) 已知系统参数和需要的系统做功,反推振动压实所需时间;

(3) 已知振动压实时间、系统做功和除一个系统参数之外的其他参数,则可反推这个系统参数。

(4) 基于压实做功越大块石抛填层沉降越大的原则,可以分析压实系统和块石抛填层参数对水下振动压实效果的影响规律。

2 公式参数的确定方法

系统做功公式中除了块石抛填层和振动系统的固有参数外,还有4个参数需要计算求得:块石抛填层等效阻尼 c_1 、水阻尼 c_2 、等效刚度 k 和浮力 F_2 。

2.1 浮力 F_2 的确定

浮力 F_2 等于水下振动压实系统排开的水的重力,其计算公式如下:

$$F_2 = \gamma_w V \quad (12)$$

式中: γ_w 为水的重度; V 为振动压实系统排开的水的体积。

2.2 等效刚度的确定

相关文献给出了土壤等效刚度的确定公式^[4]如下:

$$k = \frac{1.1E}{1-v^2} \sqrt{BL} \quad (13)$$

式中: k 为土的等效刚度(N/m); E 为土的弹性模量(Pa); v 为土的泊松比; B 为压实板的宽度(m); L 为压实板的长度(m)。

由于缺乏块石抛填层的等效刚度计算公式,将块石抛填层类比土体,采用式(13)来确定其等效刚度。

2.3 块石抛填层等效阻尼确定方法

相关文献^[4-5]给出了块石抛填层等效阻尼的计算公式:

$$c = 2D \sqrt{mk} \quad (14)$$

式中: D 为阻尼比,可通过表1插值求得; m 为系统质量; k 为等效刚度。

表1 阻尼比插值表

Table 1 Interpolation table of damping ratio

质量比 b	泊松比 v						
	0	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
20	0.196	0.207	0.215	0.224	0.234	0.245	0.257
40	0.139	0.147	0.153	0.160	0.167	0.176	0.185
60	0.114	0.121	0.126	0.131	0.137	0.144	0.152
80	0.099	0.105	0.109	0.114	0.119	0.125	0.132

表中质量比 b 可用下式计算:

$$b = \frac{m}{\rho r_0^3} \quad (15)$$

式中: ρ 为土层的密度; r_0 为压实板等效半径。

使用表1进行插值很不方便,参数分析时更为不便。通过对表1的分析,给出了阻尼比 D 的拟合公式,即式(16),所得结果与文献值之间的误差列于表2。由表可以看出,拟合值与表1中数值之间的误差很小,绝大部分小于2%,仅有一个为3.3%,说明拟合公式的精确度较好。

$$D = \frac{1 + 2 \times \sqrt{v^5}}{\sqrt{b}} \quad (16)$$

将式(16)带入式(14),即可得到一个新的块石抛填层等效阻尼计算公式:

$$c = 2\sqrt{2} \sqrt{E} \sqrt{\rho r_0^2} \frac{(1 + 2 \times \sqrt{v^5})}{\sqrt{1 - v^2}} \quad (17)$$

2.4 水等效阻尼的确定

目前的研究成果表明,物体在水中的运动速度较低时所受水的阻力与速度成正比,当速度较高时与速度平方或者立方成正比。在现场试验中,陆上振动压实时最大振动速度在1 m/s左右,因此假定水下振动压实时压实板所受水的阻力为

$$f = c_2 v \quad (18)$$

式中: f 为压实板所受水阻力; v 为振动速度; c_2 为水的阻尼。

水阻尼 c_2 的确定可以参考港口工程荷载规范(JTS 144-1-2010)和海港工程设计手册中关于水中构件所受水流力的计算公式,即

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \rho V^2 A \quad (19)$$

式中: F_w 为水流力标准值(kN); C_w 为水流阻力系数; ρ 为水密度(kg/m^3); V 为计算流速(m/s); A 为计算构件在水流流向垂直平面上的投影面积(m^2)。

式(19)中 C_w 根据构件的不同取不同的值,矩形梁取2.32。将压实板类比矩形梁,参考式(19)得到水阻尼计算公式

$$c_2 = 1\ 200\ A \quad (20)$$

式中: A 为压实板面积。

3 水对振动压实做功的削弱作用分析

水下强夯工艺中水对强夯做功的削弱作用非常巨大已成为工程界的共识。对于振动压实来说,水对做功的影响怎样呢?本文对此进行分析,首先给定一组参数:压实系统总质量 $m = 35 \times 10^3$ kg,块石抛填层密度 $\rho = 2 \times 10^3$ kg/m^3 ,块石抛填层弹性模

量 $E=100\text{ MPa}$, 块石泊松比 $\nu=0.2$, 压实板宽度 $B=2.5\text{ m}$, 压实板长度 $L=5.5\text{ m}$, 激振力幅度 $F_1=1\ 456\text{ kN}$, 角速度 $\omega=1\ 846\pi\text{ rad/min}$, 浮力 $F_2=50\text{ kN}$ 。该组参数为施工单位在现场实验时采用的参数。

表 2 阻尼比拟合值及其与原值误差表

Table 2 Fitting values of damping ratio and errors compared with original values

质量比 b	泊松比 ν													
	0		0.25		0.3		0.35		0.4		0.45		0.5	
	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%	拟合值	误差/%
20	0.20	0.1	0.21	0.7	0.22	0.2	0.23	0.2	0.24	0.8	0.25	1.8	0.27	3.3
40	0.14	-0.2	0.15	0.2	0.15	-0.4	0.16	-0.8	0.17	-0.2	0.18	0.2	0.19	1.5
60	0.11	-0.7	0.12	-0.6	0.12	-1.3	0.13	-1.0	0.14	-0.6	0.14	0.0	0.15	0.8
80	0.10	-1.0	0.10	-0.8	0.11	-1.2	0.11	-1.5	0.12	-0.9	0.13	-0.2	0.13	0.5

注:表中误差为拟合值与表 1 中对应数值之间的误差。

将上述给定参数带入式(11)即可得到水下振动一个周期做功为 12.50 kJ。不计浮力和水阻尼,其他参数不变时一个周期内的振动做功为 12.56 kJ。同样一个周期内,陆上振动仅比水下振动大 0.48%,说明在本文简化模型下水对振动压实做功的影响很小。分析其原因,应该是因为振动过程中位移幅值很小,振动速度也较慢,受到水的运动阻力因而很小的缘故。

4 结语

本文将水下块石抛填层和振动压实系统简化为“质量—弹簧—阻尼”力学模型,建立振动方程,通过数学推导,给出了振动压实系统对水下块石抛填层的做功公式及式中各参数的求解方法,证明水对振

动压实做功的削弱作用很小。本文研究成果可以为振动压实块石抛填层技术提供理论支持,具有重要的理论和工程意义。

参考文献

- [1] 王志强.平板振动夯压实原理的研究与实践[D].天津:河北工业大学,2002.
- [2] 倪振华.振动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989.
- [3] 欧珠光.关于 RCC 振动压实能量的研究[J].湖北水力发电,1991,(1):10-14.
- [4] 欧阳颖.大功率振动平板夯优化设计和仿真分析[D].西安:长安大学,2006.
- [5] 张世英.关于振动压路机设计中土的参数的确定方法[J].工程机械,1998,(1):5-8.