



# 大管桩与抛石体相互作用的模型方试验研究\*

冯春<sup>1</sup>, 李世海<sup>1</sup>, 吴豪伟<sup>2</sup>, 许利凯<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190; 2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;  
3. 北京科力安监测技术有限公司, 北京 100190)

**摘要:** 高桩码头施工中的抛石过程会对大管桩的受力产生较大的影响, 这将给码头的正常使用带来隐患。模型实验用沙子模拟抛石体, 用 PVC 管模拟大管桩, 利用应变片电测技术, 测量了不同工况下 PVC 管中的应变, 并分析得出了作用在 PVC 管上载荷的分布规律。通过模型实验, 给出了大管桩与抛石体相互作用的经验公式, 并指出引起 PVC 管侧向弯曲的主要原因是沙子对 PVC 管存在侧向集中力, 产生该集中力的原因是 PVC 管前后沙子高度差的存在。此外, 通过验证实验和数值模拟, 得出了与模型实验相同的结论, 从而进一步证明了模型实验所得规律的正确性。

**关键词:** 高桩码头; 大管桩; 抛石体; 量纲分析; 模型实验

中图分类号: TU 473.1+2

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2009)06-0014-08

## Model experimental research on interaction between large-diameter concrete pile and riprap

FENG Chun<sup>1</sup>, LI Shi-hai<sup>1</sup>, WU Hao-wei<sup>2</sup>, XU Li-kai<sup>3</sup>

(1. LEM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
3. Beijing Credian Monitoring Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China)

**Abstract:** Riprapping construction will have a great effect on large-diameter concrete pipe pile during the construction of high-pile wharf, and will engender hidden troubles to the normal operation of the wharf. During the model experiment, the riprap is simulated by sand and the large-diameter concrete pipe pile is simulated by PVC pile. With the strain gauge technology, the strain of the pile is measured and the distribution law of the load is discovered. By the model experiment, we give the empirical formula of the interaction between pile and riprap, and know that the concentrated load caused by the height difference of the sand fore-and-aft PVC pile leads to pile's lateral bend. Besides, by other tests and numerical simulation, the same conclusion is obtained, which proves further the correctness of the experimental rules.

**Key words:** high-pile wharf; large-diameter concrete pipe pile; riprap; dimensional analysis; model experiment

深圳港蛇口港区 #6 和 #7 泊位集装箱码头工程位于广东省珠江三角洲南部, 珠江入海口东岸, 毗邻香港。码头平面布置为顺岸式, 码头结构为全直桩高桩梁板式, 基桩为后张法预应力混凝土

大管桩, 前后轨道梁下为两根  $\phi 1\ 400\ \text{mm}$  的预应力混凝土管桩, 中间为 4 根  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  (#6 泊位) 或  $\phi 1\ 400\ \text{mm}$  (#7 泊位) 预应力混凝土管桩。

施工过程中, 在大管桩周围进行抛石的主要

收稿日期: 2008-12-09

\*基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10632100); 中国科学院重要方向性项目(KJCX2-YW-L01)。

作者简介: 冯春(1982-), 男, 硕士研究生, 从事岩土力学、地质体力学研究。

目的是为了稳定坡岸,增强基桩稳定性。但抛石体是大棱体结构,由于受抛掷顺序不当、未分层及桩身周围抛石体高差过大等因素影响,桩身在棱体不均匀侧压力的作用下,使桩体产生弯曲变形,桩顶发生变位<sup>[1]</sup>,同时过大的变形还将导致混凝土的开裂,这将严重影响桩基的安全使用寿命。

尽管大管桩已在高桩码头中普遍应用<sup>[2-4]</sup>,但在施工及运营时的受力特性并不是十分清楚。国内外学者虽然对大管桩的制备工艺、极限承载力及海浪作用下的应力和变形作了充分的研究<sup>[5-8]</sup>,但对高桩码头施工过程中大管桩与抛石体作用(以下简称“桩石作用”)机理的研究却少见报道。

本文以深圳港蛇口港区大管桩施工为背景,旨在通过实验研究了解抛石体与大管桩之间真实的作用力,同时也为高桩码头的合理施工及健康监测提供一些基础数据。

## 1 量纲分析

要进行模型实验,必须使模型与原型之间有可比性,具体地说就是要使两者有相似关系。量纲分析是建立模型与原型相似关系及合理建模的有效手段<sup>[9-10]</sup>。本文选取该工程的第十四结构段进行量纲分析,结构段如图1所示。

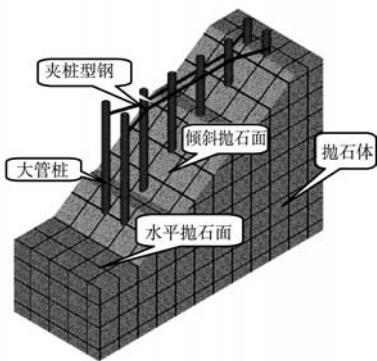


图1 大管桩布置示意

在实际抛石过程中,为了保证桩顶偏位不至于过大,对一个结构段内的8根管桩进行了夹桩(顶端受到一定的约束),但本着从易到难的原则,本文首先研究大管桩单桩在顶端自由(未夹桩)情况下的受力规律。

同时,在实际抛石中,由于抛石是在海水中进行的,水的浮力会对桩体的受力产生影响,但考虑到模型实验的可行性,本文拟在无水的条件下进行模型实验,并取抛石体的有效密度代替天然密度。

同样,抛石的速度、方式及抛石量都将影响桩体的受力及桩顶的挠度,但根据现场监测,抛石量对桩体受力及变形的影响最大,因此本文着重研究抛石量对管桩的影响。

此外,在实际抛石中,最后形成的抛石面有倾斜面及水平面两种。但水平面中的桩体在其桩周受到近乎均匀的外力,对桩体变形的贡献不大。而对于倾斜面中的桩体,由于抛石体在桩体前后存在一定的高差,可能会对桩体产生一定的作用力,因此本文主要研究抛石面为倾斜面的情况。

经以上简化,桩石作用的模型可用图2表示。此模型主要研究下端固定上端自由的桩体在楔形抛体作用下的受力规律。由于实验中的直接测量量是应变,因此更具体地说,是研究桩体上不同埋深处的应变随抛石量的变化规律。

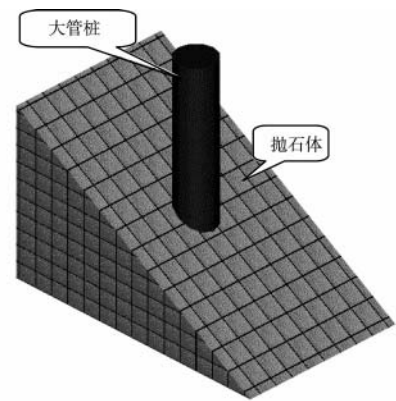


图2 桩石作用模型

取长度的量纲为 $L$ ,质量的量纲为 $M$ ,时间的量纲为 $T$ ,对简化后的模型进行量纲分析,涉及该模型的物理量及量纲如表1所示,其中几何量 $h, B, W, B_1, L_1, H_1$ 所表示的几何意义如图3所示。

在实际抛石中,抛石船在海面将块石抛下,形成的坡角必然是自然坡角 $\varphi$ ,所以 $L_1$ 及 $H_1$ 是相关的,保留 $H_1$ 。由于增大或者减小 $H_1$ 相当于改变埋深 $h$ ,因此 $H_1$ 和 $h$ 也是相关的,保留 $h$ 。此

表 1 桩石作用模型的物理量

研究对象	物理量	量纲
大管桩	总高度 $H$	L
	外径 $D$	L
	内径 $d$	L
	弹性模量 $E$	L
	竖向应变 $\varepsilon$	L
	桩体轴线上点的埋深 $h$	L
抛石体	有效密度 $\rho_s$	ML <sup>-3</sup> T <sup>-2</sup>
	重力加速度 $g$	LT <sup>-2</sup>
	内聚力 $C$	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
	自然坡角 $\varphi$	
	平均粒径 $d_s$	L
桩在抛石 中的位置	桩体轴线到抛石体右侧的距离 $B$	L
	桩体轴线到抛石体后侧的距离 $W$	L
抛石体的几 何尺寸	宽度 $B_1$	L
	长度 $L_1$	L
	高度 $H_1$	L

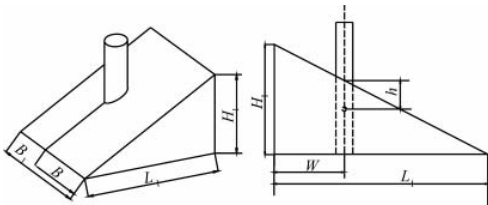


图 3 桩石作用模型几何参数示意图

外令  $B=B_1/2$ ，也即将管桩放置于抛石体正中，这样便又可以减少一个参量。

经过以上分析，此问题的自变量有  $H, D, d, E, h, \rho_s, g, C, \varphi, d_s, B, W$  等 12 个，因变量为应变  $\varepsilon$ ，于是可以建立因变量关于自变量的函数关系式，如式 (1) 所示。此问题中具有独立量纲的量有 3 个，以  $\rho_s, g, D$  为基本量，则原方程可以改写为式(2)。

在实际抛石过程中，所用的是同一种大管桩和同一种抛石体，改变的只是抛石体的几何尺寸，因此无量纲量  $\varphi, \frac{E}{\rho_s g D}, \frac{C}{\rho_s g D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{d_s}{D}$  均为常数，无量纲方程(2) 可以写成式(3)。

于是，关于抛石过程中大管桩的受力特性研

究可以转化为研究抛石过程中桩上不同埋深处的应变与无量纲埋深  $\frac{h}{D}$ ，无量纲宽度  $\frac{B}{D}$ ，无量纲长度  $\frac{W}{D}$  之间的关系。在式 (1)~(3)中的函数符号  $f$  只表示自变量和因变量之间满足某种关系，并不表示具体的函数形式。

$$\varepsilon=f(H, D, d, E, h, \rho_s, g, C, \varphi, d_s, B, W) \quad (1)$$

$$\varepsilon=f\left(\varphi, \frac{E}{\rho_s g D}, \frac{C}{\rho_s g D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{d_s}{D}, \frac{h}{D}, \frac{B}{D}, \frac{W}{D}\right) \quad (2)$$

$$\varepsilon=f\left(\frac{h}{D}, \frac{B}{D}, \frac{W}{D}\right) \quad (3)$$

## 2 模型实验

### 2.1 实验模型的建立

根据量纲分析及相似理论，要保证原型与模型的相似性，必须保证原型与模型的无量纲参量  $\varphi, \frac{E}{\rho_s g D}, \frac{C}{\rho_s g D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{d_s}{D}$  相等。参考文献 [11]，本文采用 PVC 管模拟大管桩，用沙子模拟抛石体。原型与模型的参数如表 2 所示，原型与模型的无量纲参数如表 3 所示，其中几何缩比约为 36。由表 3 可知，原型与模型的无量纲数基本相等，但由于采用了沙子，导致无量纲数  $\frac{d_s}{D}$  相差较大。但考虑到沙子和块石凝聚力均可看成 0，且摩擦角差别不大等原因，尽管其尺寸不同，但表现出了相似的力学特性，故实验采用沙子进行模拟。

模型实验的实验装置可分为两部分，即实验槽和应变测试系统（如图 4），测量仪器为 YE3817C 型应变放大器。实验槽由 20 cm×10 cm×10 cm 的规则大理石块堆砌而成，在实验槽的底部放置一个 20 cm×20 cm×20 cm 的水泥墩，中间预留与 PVC 管外径相同尺寸的孔洞，作为 PVC 管的锚固点。根据实验工况的不同，可把水泥墩放在实验平台的不同位置，并保持实验平台及水泥墩的平整性。

表 2 原型与模型参数对照

类别	弹性模量 $E/\text{Pa}$	惯性矩 $I/\text{m}^4$	总高度 $H/\text{m}$	外径 $D/\text{m}$	内径 $d/\text{m}$	类别	有效密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 $C/\text{Pa}$	自然坡角 $\varphi/(\text{°})$	平均粒径 $d_s/\text{m}$
大管桩	$5.5 \times 10^{10}$	0.117	40	1.4	1.1	抛石体	$1.9 \times 10^3$	0	33.7	0.25
PVC 管	$2.1 \times 10^9$	$4.32 \times 10^{-8}$	1.12	0.04	0.036	沙子	$2.7 \times 10^3$	0	33.9	0.003

表 3 原型与模型的无量纲数

类别	$\varphi$	$E/\rho_s g D$	$C/\rho_s g D$	$H/D$	$d/D$	$d_s/D$
原型	33.7(由施工图得)	$2.11 \times 10^6$	0	28.57	0.79	0.18
模型	33.9	$1.98 \times 10^6$	0	28	0.9	0.08

实验开始前, 在 PVC 管上的不同位置布置 6 个应变片, 从锚固点开始依次往上, 每 5 cm 布置一个应变片。由于应变片的敏感元件很细, 所以实验时将应变片黏贴在受压侧 (即接近坡脚的一侧), 以免被砸坏。

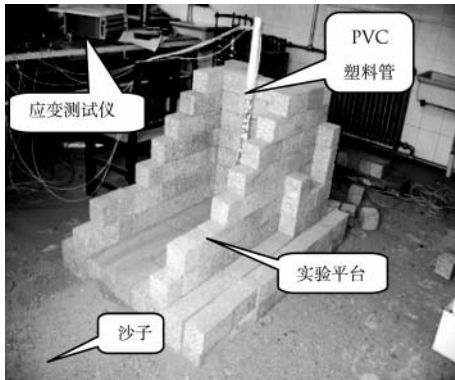


图 4 实验装置

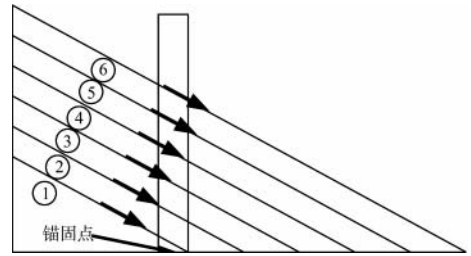


图 5 沙子抛填顺序



图 6  $B=30\text{ cm}$ ,  $W=25\text{ cm}$  实验图

### 2.2 实验方案的选择

首先确定抛沙的方式。本文主要研究抛填量对桩体受力的影响, 因此采用从 PVC 管后侧缓慢倾倒沙子的方式, 抛沙的顺序如图 5 所示, 序号表示抛沙在时间上的先后顺序, 箭头表示每层抛沙的方向。

实验时首先确定一个宽度  $B$  及 PVC 管到后侧的距离  $W$ , 然后记录下各通道初始值, 接着进行抛沙, 当沙子刚好掩盖住距锚固点最远处的应变片 (距锚固点 30 cm) 时, 记录下此时各传感器的值, 接着继续进行抛沙, 每增高 5 cm 记录一次, 直到抛沙高度达到 60 cm。然后改变  $B$  及  $W$  重复上述步骤。其中  $B$  选择 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm 六组;  $W$  选择 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm 七组;  $B$  与  $W$  自由组合, 共 42 组实验。其中  $B=30\text{ cm}$ ,  $W=25\text{ cm}$  这组实验如图 6 所示。

### 2.3 实验数据的处理

在实际抛石过程中, 抛石体是没有边界约束的, 也即  $B$  趋向于无穷大, 但在模型实验中, 为了实现倾斜抛面, 必须在两侧人为地加上约束,

因此首先分析宽度  $B$  的增加对 PVC 管上各点应变的影响。取  $W=30\text{ cm}$  时, 无量纲埋深  $h/D$  为 11.25, 10, 7.5, 6.25 和 5, 五种情况下的应变随着无量纲宽度  $B/D$  的变化规律如图 7 所示。

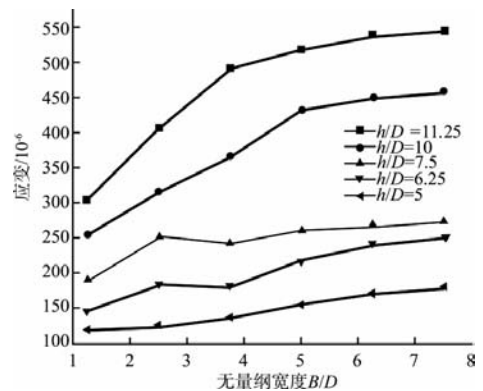


图 7 相同埋深下应变随着宽度的变化规律

由图 7 可知, 随着无量纲宽度  $B/D$  的增加, 相同无量纲埋深对应的应变逐渐增大, 但增大的趋势逐渐减慢, 到  $B/D=5$  (即  $B=20\text{ cm}$ ) 时, 增大的趋势已经非常缓慢, 这表明在此宽度下, 边界条件对 PVC 管受力的影响已经非常小, 这表明以后做此类实验只要保证无量纲宽度  $B/L \geq 5$ , 便能保证边界条件不影响研究对象的受力。

取  $B=20\text{ cm}$  时, 研究无量纲埋深  $h/D$  为 12.5, 11.25, 10, 8.75, 7.5, 6.25 六种情况下应变随着无量纲长度  $W/D$  的变化规律 (图 8)。



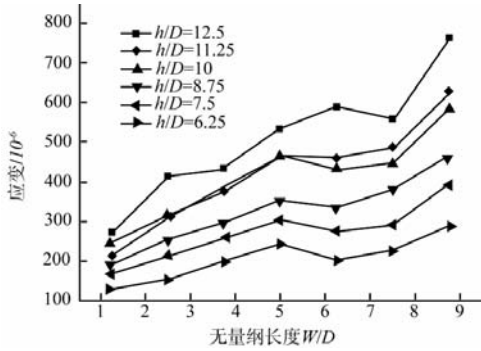


图 8 相同埋深下应变随着长度的变化规律

由图 8 可知，宽度固定时，相同埋深条件下 PVC 管中的应变随着该管中心到后墙的长度  $W$  的增加而增大，并且增大的趋势基本呈线性。同时，埋深越大的点，所得的应变也越大。取  $B=20\text{ cm}$  和  $W=25\text{ cm}$  这一组，分析桩上任一点的应变随无量纲埋深  $h/D$  的变化规律 (图 9)。

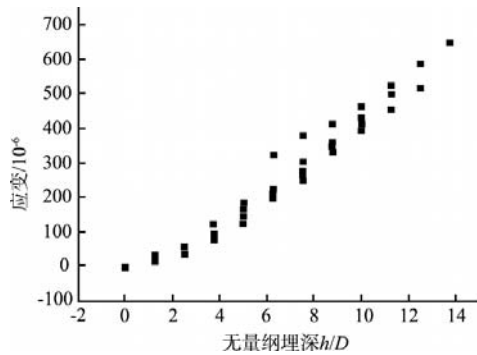


图 9 相同宽度及长度的情况下应变随着埋深的变化规律

由图 9 可得，在宽度  $B$  及长度  $W$  固定的情况下，PVC 管中不同埋深处的应变随着无量纲埋深的增大而线性增大。

取宽度  $B=20\text{ cm}$ ，对长度  $W$  为  $5\text{ cm}$ ， $10\text{ cm}$ ， $15\text{ cm}$ ， $20\text{ cm}$ ， $25\text{ cm}$ ， $30\text{ cm}$ ， $35\text{ cm}$  等 7 种情况下应变与无量纲埋深  $h/D$  之间的关系进行线性拟合，拟合公式采用  $\varepsilon = K(h/D)$ ，如表 4 所示。从表 4 可得，系数  $K$  随着  $W/D$  的增加逐渐增加，根据图 8 所得基本结论，对系数  $K$  与  $W/D$  进行线性拟合，如图 10 所示。拟合函数为  $K = [3.5 \times (W/D) + 20] \times 10^{-6}$ ，拟合数据点为 7 个，相关系数为 0.979。

根据以上拟合，可以得到 PVC 管上点的应变与无量纲埋深及无量纲长度的关系，如式 4 所示，由于实验时  $W$  的最小值为  $W_{\min}=5\text{ cm}$ ，因此要求无量纲的宽度  $W/D \geq 1.25$ 。由于  $B \geq 20\text{ cm}$  后，边

表 4 不同长度下应变与埋深之间的函数关系

$W/D$	数据量	拟合系数 $K$	相关系数 $R$
1.25	42	$22.205 \times 10^{-6}$	0.976
2.5	42	$31.036 \times 10^{-6}$	0.979
3.75	42	$34.254 \times 10^{-6}$	0.992
5	42	$40.467 \times 10^{-6}$	0.993
6.25	42	$40.840 \times 10^{-6}$	0.989
7.5	42	$41.953 \times 10^{-6}$	0.994
8.75	42	$53.455 \times 10^{-6}$	0.994

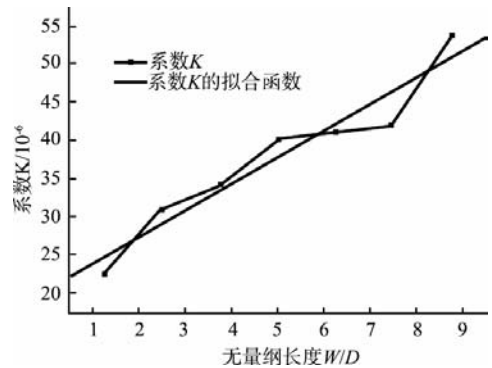


图 10 系数  $K$  随  $W/D$  变化的规律

界条件的影响已可以忽略，因此 (4) 式同样适用于  $B \geq 20\text{ cm}$  的情况。根据 (4) 式，将  $B=20\text{ cm}$  时不同的  $W/D$  和  $h/D$  代入，并与实验所得数据相减，计算其拟合误差 (图 11)。

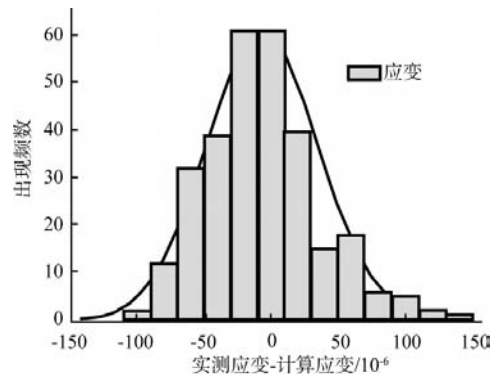


图 11 拟合公式的误差分析

在图 11 中，统计数据 294 个，平均值为  $-6.8 \times 10^{-6}$ ，标准差为  $42 \times 10^{-6}$ 。

$$\varepsilon\left(\frac{h}{D}\right) = \left(3.5 \times \frac{W}{D} + 20\right) \frac{h}{D} \times 10^{-6} \quad (4)$$

由于 PVC 管是一种管状受弯构件，同一断面不同点所受的应力不同，本文中所指的应力是应变片所在直线的应力，即每个断面只取了一个点，因此本文中所指的应力只是埋深的函数。将式 (4) 分别代入式 (5)，(6)，(7)，可得 PVC 管上不同埋深处的应力、弯矩及剪力，如式 (8) 和 (9)、(10) 所示。

$$\sigma \left( \frac{h}{D} \right) = E\varepsilon \left( \frac{h}{D} \right) \quad (5)$$

$$M \left( \frac{h}{D} \right) = \frac{2\sigma(h/D)I}{D} \quad (6)$$

$$Q \left( \frac{h}{D} \right) = -M' \left( \frac{h}{D} \right) \quad (7)$$

$$\sigma \left( \frac{h}{D} \right) = E \left( 3.5 \times \frac{W}{D} + 20 \right) \frac{h}{D} \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$M \left( \frac{h}{D} \right) = \frac{2EI}{D} \left( \frac{3.5W}{D} + 20 \right) \frac{h}{D} \times 10^{-6} \quad (9)$$

$$Q \left( \frac{h}{D} \right) = \frac{2EI}{D^2} \left( \frac{3.5W}{D} + 20 \right) \times 10^{-6} \quad (10)$$

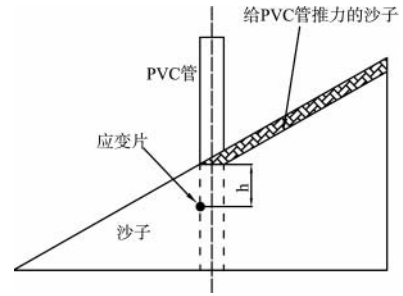


图 12 PVC 管受力分析图

等于 PVC 管前后的高度差。本节将从验证实验及数值模拟两方面, 证明实验所得结论的正确性。

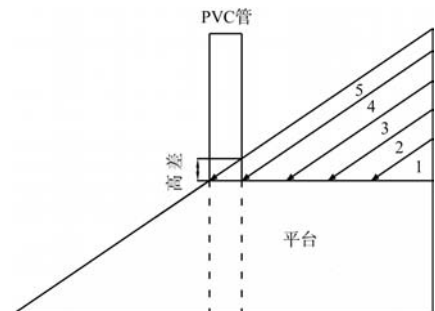
### 3.1 验证实验

验证实验分两组, 第一组如图 13a) 所示, 首先形成如图所示的沙子平台, 然后按从 1 到 5 的顺序等厚度地进行倾斜抛填, 同时记录下抛每层时的应变, 如果只有第 5 层引起应变的大变化, 便可证明实验所得结论的正确性。

第二组实验如图 13b) 所示, 首先同样形成如图所示的沙子平台, 然后按从 1 到 5 的顺序等厚度地进行水平抛填, 同时记录下抛每层时的应变, 如果每一层增加的应变基本一致, 便可证明实验所得结论的正确性。

所得实验结果如图 14, 15 所示, 其中 1 号传感器离锚固点最近, 5 号传感器离锚固点最远。如图 14 所示, 前 4 层的抛沙对应变的贡献可以忽略, 第五层抛沙结束后应变有突然的增大; 如图 15b 所示, 随着抛填层数的增加, 应变片所测得的应变也逐渐增大, 呈较好的线性关系。由此可以判断, 斜坡表面一定厚度的沙子给了 PVC 管侧向的作用力, 并且这一厚度近似等于 PVC 管前后的高度差。

当然, 在处理数据时, 也发现验证实验所得应变约为模型实验所得应变的 1/10 左右, 这主要



a) 倾斜抛填

式中:  $\sigma$  是应力;  $M$  为横截面上的弯矩;  $I$  是转动惯性矩;  $Q$  为剪力。

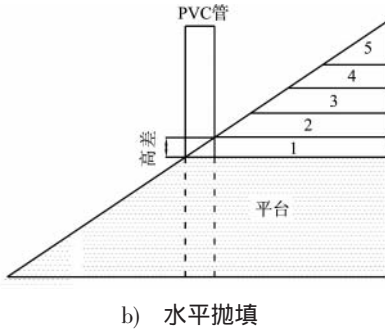
将  $W=30 \text{ cm}$ ,  $h=60.45 \text{ cm}$  及其它模型实验的数据代入(8), (9), (10)式, 计算在此状态下的应力、弯矩及剪力, 可得在埋深为 60 cm 处的应力为 1.5 MPa, 弯矩为 3.2 N·m, 剪力为 5.3 N。

由式(8), (9)可得, 不同埋深处的应力和弯矩均是  $W/D$ ,  $h/D$  的线性函数; 由式(10)可得, 不同埋深处的剪力仅是  $W/D$  的一次函数, 且当  $W/D$  等于常数时, PVC 管上不同埋深处的剪力相同。这表明在 PVC 管的上部受到一个集中载荷的作用。由实验可知, 该剪力应该位于抛沙面附近(即埋深  $h=0 \text{ cm}$  附近), 因为在抛沙面以下  $\varepsilon$  与  $h/D$  就呈很好的线性关系。

根据实验结果及材料力学的基本知识可以判断, 斜坡上表面一定厚度的沙子对 PVC 管产生了作用, 给了 PVC 管一个侧向的推力, 导致管上产生了线性的应变, 而在这一厚度之下, PVC 管受到四周均匀的压力, 使得在管上的作用力合力为 0, 具体如图 12 所示。由图可知, 阴影部分的沙子就是给 PVC 管作用力的沙子。同时可以预见, 沙子的作用厚度应该等于 PVC 管前后的高度差, 也就是说, 由于倾斜抛沙面的存在, 使 PVC 管顶端在两侧的受力不均匀, 从而导致 PVC 管受到侧向的推力作用。

### 3 作用机理的验证

根据实验, 得出了“斜坡表面一定厚度的沙子给了 PVC 管侧向的作用力, 从而导致 PVC 管弯曲”的结论, 同时也预见了这一厚度应该近似



b) 水平抛填  
图 13 抛填方式

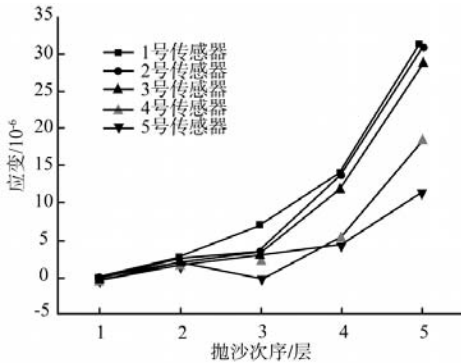


图 14 倾斜抛填方式下应变的变化规律

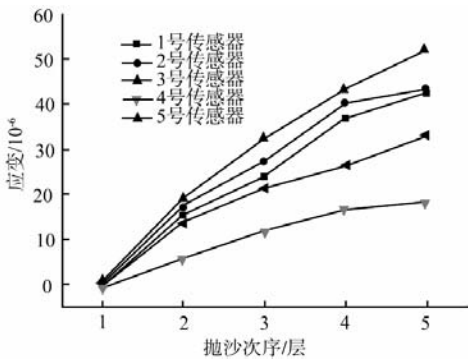


图 15 加、卸载状态下的应变

是由于实验方式的不同造成的。验证实验是为了增强实验的可行性，首先形成如图 13 所示的斜坡，然后再把斜坡的上半部分移去形成平台，接着再按照从 1 到 5 的次序依次抛填。由于沙子并非理想的弹性介质，在移去沙子的过程中，虽然对 PVC 管进行了卸载，但 PVC 管所受到的力几乎没有减少，它的侧向偏位几乎没有改变，这就导致再次进行分层抛沙时，PVC 管上的应变改变很小。但通过应变的变化趋势，同样可以证明模型实验所得结论的正确性。

关于加、卸载对 PVC 管应变的影响可从图 16 看出。取  $B=20\text{ cm}$ ， $W=25\text{ cm}$ ，按照图 5 逐层进行抛填，然后逐层进行卸载，图中  $H_z$  表示加载或

者卸载时倾斜面与 PVC 管轴线的交点到锚固点的距离，记录的是距离锚固点最近 (5 cm) 的传感器随着  $H_z$  的改变其应变的变化。由图可知，加载时随着无量纲高度  $H_z/D$  的增加，应变正比例增加，这一点与模型实验时无量纲埋深与应变之间的关系一致，因为无量纲高度的增加实质上就是无量纲埋深的增加。但在卸载时，随着无量纲高度的减小，应变并非线性很小，而是呈现出了滞后(曲线上凸)，这也正是导致验证实验所得应变比模型实验所得应变小很多的原因。

### 3.2 数值模拟

采用 FLAC<sup>3D</sup> 进行数值模拟，沙子采用 radcylinder 单元，PVC 管采用 cshell 单元。根据模型的对称性建立如图 17 所示的计算模型，取  $B_1=20\text{ cm}$ ， $L_1=120\text{ cm}$ ， $H_1=80.6\text{ cm}$ ， $W=30\text{ cm}$ ，此模型共 22 400 个单元，25 725 个节点。本模型采用 step 命令运行 25 000 步，此时可认为系统已达平衡状态。

由图 18 可知，在 PVC 管所在处的前、后两侧，X 轴方向的正应力几乎对称布置，只有在斜坡表面附近，左右两侧的正应力才有差别，也正是由于这个应力差的存在，导致在实验抛沙时 PVC 管在管顶受到侧向力的作用，并产生侧向弯曲。

由图 19 可知，在 PVC 管顶端后侧(远离坡脚侧)确实存在一个很高的水平应力区，约  $-3\ 750\text{ Pa}$ ，且由图可以看出，此高应力区的作用高度近似等于 PVC 管前后的高度差，这一点与模型实验所得结论一致。同时，PVC 管顶端前侧(靠近坡脚侧)的沙子由于无法承受拉力，出现了零应力区，这样可以近似求得顶端的沙子对 PVC 管的推力为 4 N，这与本文前面由拟合公式给出的推力 (5.3 N) 非常接近。

### 4 结论

通过模型实验发现，当无量纲宽度  $B/D \geq 5$  时，边界条件对模型实验的影响可以忽略不计；当无量纲长度  $W/D$  不变时，应变与无量纲埋深  $h/D$  呈正比关系；当无量纲埋深  $h/D$  不变时，应变与无量纲长度  $W/D$  呈一次函数关系。此外，本文还得出在无边条件影响下桩体上任意埋深处

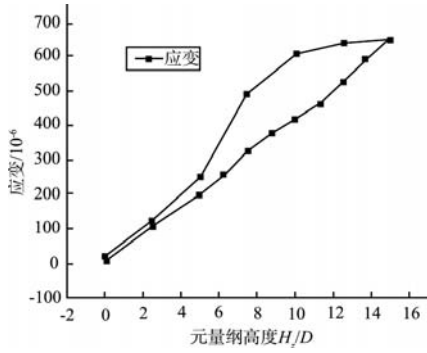


图 16 加、卸载状态下的应变

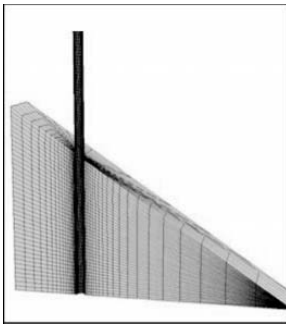


图 17 数值计算模型

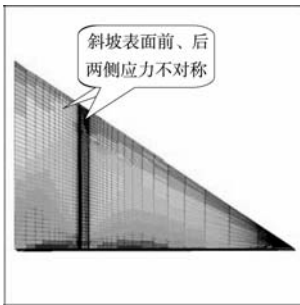


图 18 平衡时沙子的水平正应力分布

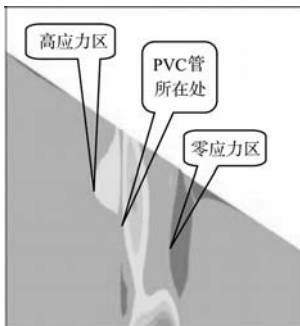


图 19 沙子表面处的水平正应力分布

的应变与无量纲埋深  $h/D$  以及无量纲长度  $W/D$  的函数关系。

通过模型实验还发现, 引起 PVC 管侧向弯曲的原因主要是沙子对 PVC 管存在侧向力, 该侧向力主要是通过集中力的形式来体现的, 产生该集中

力的原因是 PVC 管前后沙子高度差的存在, 本文还通过验证实验及数值模拟证明了这一结论的正确性。

在验证实验中, 对沙子的加、卸载曲线进行了研究, 发现在加载时, 应变随着加沙高度的增加而线性增加, 但卸载时却呈现出了非线性。根据模型实验, PVC 管中的应变随着抛沙高度的增加而增加, 这一点与现场监测的情况相符, 但模型实验中应变随抛沙高度的增加幅度较现场监测的大, 因为模型实验中 PVC 管的顶端是自由的, 而在实际的施工过程中大管桩的顶端由于有夹桩, 受到一定的约束作用。由此也可以看出桩顶夹桩对桩体的侧向位移起了一定的约束作用。

根据实验所得结论, 在实际的抛石过程中, 应严格控制抛石在大管桩两侧的高度差, 同时抛石时要注意在管桩周围均匀抛掷。

参考文献:

- [1] 泽新庆. 大管桩全直码头位移原因及预防措施[J]. 水运工程, 1997(7): 24-27.
- [2] 丁捍东, 王林. 大管桩使用情况调查[J]. 港工技术与管理, 2001(3): 55-65.
- [3] 王炳煌. 《港口工程桩基规范》(JTJ254 -1998) 介绍[J]. 水运工程, 2001(10): 75-82.
- [4] 刘鹏飞. 混凝土大管桩及其在我国港口工程中的应用[J]. 水运工程, 1997(8): 19-22.
- [5] 刘永锋. 高应变法确定大直径混凝土管桩的承载力[J]. 水运工程, 2005(9): 23-25.
- [6] 丁捍东. 3 股钢绞线大管桩开发研究[J]. 港工技术与管理, 2001(3): 28-35.
- [7] 杨玉珍. 双股钢绞线大管桩的力学性能及承载力试验[J]. 港工技术与管理, 2001(3): 24-27.
- [8] Eicher J A, Guan H, Jeng D S. Stress and deformation of offshore piles under structural and wave loading [J]. Ocean Engineering, 2003, 30 (3): 369-385.
- [9] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- [10] 杨俊杰. 相似理论与结构模型实验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [11] 李世海, 魏作安, 张俊红, 等. 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25 (3): 84-85; 88.

(本文编辑 武亚庆)