

【水利水电工程】

# 大管桩受力特性的物理模型试验研究

张俊红<sup>1</sup>,冯 春<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院,河南 郑州 450011; 2 中国科学院 力学研究所,北京 100080)

**摘 要:**采用物理模型试验的方法,用 PVC管代替大管桩进行了物理模型试验,通过调整有关主要参数,获得不同工况下大管桩受力的分布形式、大小以及挠度的变化规律,可为在实际应用中对大管桩工程进行健康诊断提供借鉴。

**关 键 词:**大管桩; PVC管; 模型试验

**中图分类号:** TV32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1379 (2008) 09-0087-02

大管桩在海港码头建设中得到广泛应用,但对其受力特性的认识还不清楚。随着测试技术的发展,国内外一些学者采用现场试验和现场监测的方法对大管桩与抛石和海水的作用机理以及大管桩的健康状况等进行了研究,取得了一些成果<sup>[1-6]</sup>。但现场试验不仅费用高、时间长,而且外界干扰很大,很难真正获得大管桩的受力情况。物理模型试验是指在实验室条件下,按照事物原型,用不同比例(包括缩小、放大及等尺寸)的模型,对工程问题或现象进行研究的一种重要的科学方法<sup>[7]</sup>。但针对大管桩进行模型试验研究的成果还未有过报道。

笔者利用物理模型试验的手段就抛石对管桩的作用及管桩位移的影响进行了研究。同时为了保证试验测试数据的准确性,在模型试验中采用了一套特别设计的应变放大测试仪进行应变和位移测试。

## 1 大管桩物理模型试验

### 1.1 试验原理

在大管桩施工过程中,水抛棱体为大棱体结构,受抛掷顺序不当、未分层及桩身周围水抛棱体高差过大等因素的影响,桩身在棱体侧压力的作用下产生弯曲变形,桩顶发生位移,严重影响码头的使用寿命。同时,过大的变形还将导致混凝土的开裂,这将直接影响预应力混凝土大管桩的耐久性。因此,在施工过程中,掌握大管桩的受力和变形特性非常重要。

在模型试验中,首先对物理原型进行量纲分析,包括材料的几何尺寸及力学参量等,尽量使模型与大管桩的真实情况相似。通过分析,拟采用 PVC管模拟大管桩,用沙子、石块模拟水抛棱体,并保证相关的力学无量纲量相似。原型及模型的具体参数见表 1。

试验时,先在 PVC管受压侧等间距地粘贴应变片,之后将 PVC管安置在试验槽的底部,再按照设定的高度和坡度往槽内堆置石块或沙土。通过改变堆在 PVC管周围沙子和石块的高度,利用应变测试系统可以测得 PVC管的变形等物理量。然

后根据式(1)~式(4),求出 PVC管的应力、弯矩。对弯矩进行

表 1 原型与模型参数对照

特征量	大管桩	PVC管
惯性矩 /m <sup>4</sup>	0.117	4.3 × 10 <sup>-8</sup>
弹性模量 /Pa	5.5 × 10 <sup>10</sup>	6.0 × 10 <sup>9</sup>
总高度 /m	40	1.12
内径 /m	1.1	0.036
外径 /m	1.4	0.04

拟合得到作用在 PVC管上力的大小和分布形式。

$$\sigma = E \epsilon \quad (1)$$

$$M = E y / I \quad (2)$$

$$I = (D^4 - d^4) / 64 \quad (3)$$

$$M = E I / y \quad (4)$$

式中:  $\sigma$ 为应力;  $\epsilon$ 为应变;  $E$ 为弹性模量;  $M$ 为横截面上的弯矩;  $y$ 为研究点到中性轴的距离;  $I$ 为转动惯性矩;  $D$ 为 PVC管的外径;  $d$ 为 PVC管的内径。

假定试验用的 PVC管为梁结构,根据式(5)~式(6)可以得到 PVC管在不同工况下的挠度变化情况。

$$\theta = l_0 / R \quad (5)$$

$$v = x \quad (6)$$

式中:  $\theta$ 为转角;  $l_0$ 为选取的研究长度;  $v$ 为挠度;  $x$ 为 PVC管上任意一点到固定端的距离;  $R$ 为分析点到中性点的距离。

通过室内模型试验得到沙子和石块等不同抛料对大管桩产生的作用力的大小和分布形式,以及大管桩受到这些力的作用时挠度的变化规律。

### 1.2 模型试验装置

试验装置主要由试验槽和应变监测系统组成。试验槽由

收稿日期: 2008-01-28

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KJ9X2-SW-LD)。

作者简介: 张俊红(1980—),女,河南开封人,助教,硕士,研究方向为工程地质、数值计算及大型结构物力学稳定性分析。

E-mail: zhangjunhong80@yahoo.com.cn

长 20 cm、宽 10 cm、高 10 cm 的规则大理石块堆砌而成,底面预留一些孔洞,孔洞尺寸等于试验用 PVC 管的外径,要保证试验槽各面平整及预留孔洞口完整。试验采用应变放大测试系统测量 PVC 管微应变。试验中沙子粒径约为 0.5~2 mm,摩擦角为 33.5°;石块粒径为 0.5~2.0 cm,摩擦角为 37.5°。

### 1.3 模型试验

大管桩模型试验共分为沙子堆积 PVC 管和石块堆积 PVC 管 2 组。先在 PVC 管沿长度方向布置 6 个应变片。根据经验第 1 个应变片布置在距离 PVC 管底端 11 cm 的位置,应变片间隔为 5 cm。由于试验是在常温下进行,温度变化很小,因此测量时没有考虑温度补偿。

(1)沙子堆积 PVC 管试验。考虑到边界影响,设计了 PVC 管距离试验槽后墙 30 cm (工况 1)和 40 cm (工况 2) 2 种工况。将 PVC 管插入底孔后,从试验槽的后墙缓慢倾倒沙子,让沙子形成自然斜坡,并逐步将 PVC 管掩埋。用钢尺测量 PVC 管埋置深度,第 1 次深度为 25 cm,然后按 5 cm 间隔分 6 次掩埋 PVC 管,同时分别测试相应的物理量。

(2)石块堆积 PVC 管试验。PVC 管距离试验槽后墙距离只考虑了 30 cm 一种情况。同样,将 PVC 管插入底孔后,从试验槽的后墙往槽内缓慢倾倒石块,让石块自然下滑形成斜坡。第 1 次倾倒石块的高度为 15 cm,然后按 10 cm 的间隔分 4 次掩埋 PVC 管,并分别记录相应的微应变。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 沙子堆积 PVC 管试验

根据式 (1)~式 (4),可得到 PVC 管上相应点不同工况下的弯矩。沙子堆积试验中工况 1 的弯矩见图 1。

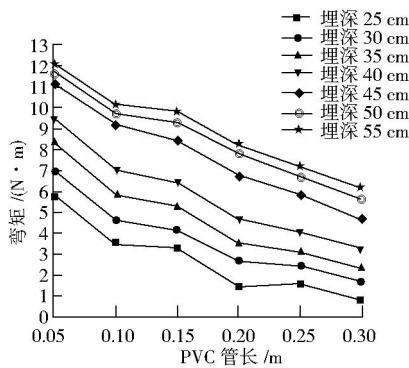


图 1 沙子堆积试验中工况 1 的弯矩

现选择工况 1 中 PVC 管被掩埋 40 cm 的弯矩曲线进行分析,通过拟合,得到函数表达式:

$$y = 8.755 - 21.889x \quad (7)$$

对该函数求导,代入初始条件,则可以得到作用在 PVC 管上的集中力为 21.889 N,作用点在距离管底端 40 cm 处。

同时假定试验时 PVC 管为梁结构,根据式 (5)和式 (6),可以得到不同埋深情况下 PVC 管的挠度曲线 (见图 2)。

### 2.2 石块堆积 PVC 管试验

按照同样的方式,可以得到石块堆积试验中不同情况下的弯矩 (见图 3)。

对堆积石块埋深为 35 cm 工况的弯矩曲线进行拟合,得到拟合函数为

$$y = 9.755 - 27.879x \quad (8)$$

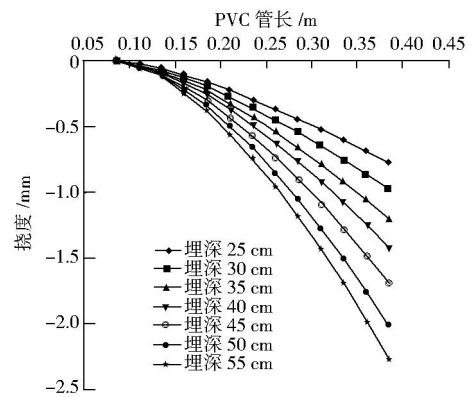


图 2 沙子堆积试验中工况 1 的挠度曲线

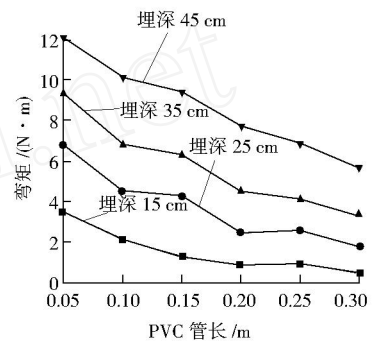


图 3 石块堆积试验中不同情况下的弯矩

进行转化后得到作用在 PVC 管上的集中力为 -27.88 N,作用点在距离管底端 35 cm 处。同样,根据式 (5)和式 (6),可以得到不同埋深情况下 PVC 管的挠度曲线 (见图 4)。

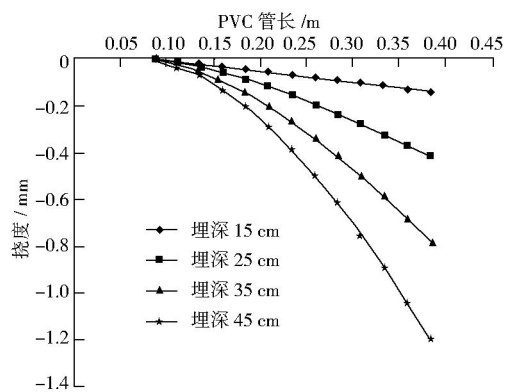


图 4 堆积石块试验中的挠度曲线

## 3 结 语

通过量纲分析和相似原理,用 PVC 管模拟大管桩进行受力特性分析的物理模型试验获得了较好的效果。当 PVC 管被沙子或石块掩埋时,会受到沿水平向的集中力作用,集中力是堆积沙子或石块斜坡引起的,说明在实际抛掷石块和沙子时,应该在大管桩的四周均匀抛掷,避免大管桩产生弯曲。通过模型试验得到的相关规律,可为大管桩在实际使用中的健康诊断提供借鉴。

(下转第 90 页)

到活性组分含量与膨胀率的定量关系;砂浆长度法缺点是仅适用于一些高活性、快膨胀的岩石和矿物,对慢膨胀骨料则不适用;砂浆棒快速法于1994年同时被美国和加拿大定为标准方法,对于硅质骨料(尤其是慢膨胀骨料),应用该方法所得结果与工程使用记录具有很好的一致性,但问题是过于严格,某些被证明是无害的骨料可能被判为有害。鉴于碱-骨料反应的复杂性,在试验时需要采用多种方法进行综合评定。

### 3.3 混凝土骨料碱活性检验结果

从岩相法的结果看,骨料中普遍存在的活性岩石主要是流纹岩、安山岩、玄武岩及石英砂岩。玄武岩的活性成分主要为次生微晶石英、玉髓及基质中的微晶长石;流纹岩和安山岩相对于火山玻璃来说活性不高;石英砂岩中的活性成分主要是微晶石英。连地滩粗砂中含有35%的安山岩屑、玄武岩屑、流纹岩屑及硅质岩屑,活性成分含量较高。

化学法试验按《水工混凝土试验规程》(SD105—82)规定进行,测定结果显示骨料均为非活性。化学法本身的局限性使得其对一些活性不高或缓慢反应的岩石不能作出可靠的结论。

小棒快速法检测结果表明,流纹岩、安山岩、玄武岩及石英砂岩为活性骨料。

砂浆棒快速法检测结果与小棒快速法的试验结果一致。当掺入20%粉煤灰后,砂浆棒的膨胀率降低了87%,掺入40%粉煤灰后,砂浆棒基本不膨胀,这说明粉煤灰对危害性的碱-骨料反应有显著抑制作用。

砂浆长度法试验结果表明,连地滩堆料场的混合料及各种活性岩石均为非活性骨料。对于反应缓慢的活性骨料或活性较低的骨料,这种方法往往不能在指定时间内作出准确的判断。小浪底工程骨料的活性较低,延长观测时间至6.5年,砂浆的膨胀率随着水泥碱含量的增大而增大。在水泥碱含量为1.2%的条件下,除按堆料场中各种岩石平均含量组成的骨料砂浆膨胀率超过0.1%外,其余均未超过0.1%。粉煤灰的抑制效果则非常明显,掺20%和30%粉煤灰的试件180d后膨胀率变化很小。从砂浆长度法的试验结果可以看出,掺20%的粉煤灰可有效抑制危害性的碱-骨料反应。

混凝土棱柱体法检测结果表明,试件没有明显的膨胀,石英砂岩属于潜在危害性的活性骨料,其他几种岩石则属于非活性骨料。

混凝土芯样的碱-骨料反应检测(1999年7月在小浪底施工现场钻取了12组芯样,在实验室进行观测)结果表明,在20和38两种条件下养护的混凝土芯样的膨胀率均很小,有的早期甚至出现收缩,6龄龄期混凝土芯样的最大膨胀率不超过0.02%,说明没有产生危害性的碱-骨料反应。

## 4 控制混凝土骨料碱含量的方法及成效

### 4.1 混凝土碱含量控制方法

在混凝土材料选择和配合比制定时应采取有效措施防止碱-骨料反应。除选用非活性骨料外,限制水泥含碱量、限制单位体积混凝土的含碱量、掺混材料等都是目前常用的预防方法。

随着混凝土技术的发展,混凝土强度级别愈来愈高,单方水泥用量增大,同时使用含碱外加剂和海产骨料增多,因此更

为科学的标准应为控制单位体积混凝土的总含碱量。1981年第五届国际混凝土碱-骨料反应会议讨论意见是,使用碱活性骨料的混凝土单位体积含碱量要小于2.45 kg。在没有其他碱来源的情况下,当水泥含碱量为0.6%时,水泥用量的极限为408 kg;当水泥含碱量为1%时,单方混凝土的水泥限量为245 kg。如果配制混凝土时还有其他碱来源,水泥用量还要降低。1993年12月我国制定了《混凝土碱含量限值标准》(CECS53—93),按工程环境和工程结构分别控制混凝土碱含量限值。

### 4.2 小浪底工程混凝土碱含量控制成效

(1)控制水泥的含碱量。为小浪底工程供货的水泥厂家,原来生产的水泥碱含量大于1%,根据小浪底工程使用要求,各生产厂家通过改进生产工艺,生产出了达到要求的水泥,碱含量基本控制在0.6%。

(2)在混凝土中掺加适量的粉煤灰。在工程实际中,各级配混凝土中均掺用了20%~25%的粉煤灰,这对抑制碱活性反应十分有利。

采用上述方法,使小浪底工程各级配混凝土的总含碱量基本小于3 kg/m<sup>3</sup>。截至2007年5月底,小浪底工程各类闸门启闭累计近4000次,闸门运行状况良好。在建筑物水位变幅区,混凝土表面没有出现“反应环”及局部表面剥落等典型混凝土碱-骨料反应,混凝土结构安全。

## 5 结 语

小浪底工程部分混凝土骨料含有潜在的活性成分,通过对水泥含碱量的控制及在混凝土中掺入适量的粉煤灰,有效抑制了骨料碱活性反应。长龄期(6.5年)试验结果表明,小浪底工程的混凝土不会产生危害性的碱-骨料反应。

鉴于碱骨料反应往往要在较长时间后才表现出来,对于高标号混凝土,仍不能排除存在危害性碱活性骨料反应的可能,因此在继续坚持做长龄期试验的同时,也应加强对建筑物关键部位体型尺寸的监测。

【责任编辑 张华岩】

(上接第88页)

### 参考文献:

- [1] J A Eicher, H Guan, D S Jeng. Stress and deformation of offshore piles under structural and wave loading[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(2): 369-385.
- [2] Bengt H Fellenius, Dean E Harris, Donald G Anderson. Static loading test on a 45 m long pipe pile in Sandpoint, Idaho[J]. Can Geotech J, 2004, 41(4): 613-628.
- [3] 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.
- [4] 丁捍东. 3股钢绞线大管桩开发研究[J]. 港工技术与工程, 2001(5): 26-35.
- [5] 陈耀平. 预应力混凝土大管桩的应用与思考[J]. 水运工程, 2002(12): 27-30.
- [6] 杨玉珍. 双股钢绞线大管桩的力学性能及承载力试验[J]. 港工技术与工程, 2001(5): 20-25.
- [7] 李世海, 魏作安, 张俊红, 等. 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型试验中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(3): 84-85.

【责任编辑 张华岩】