

# 动力荷载作用下预应力混凝土靠船桩 变形性能理论及数值分析

涂忠仁<sup>1,2</sup>, 尹健<sup>2</sup>, 荣耀<sup>3</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 江西交通工程质量监督站, 江西 南昌 330008)

**摘要:** 结合靠船桩工作特点, 提出了考虑内外阻尼效应的靠船桩动力理论分析方法, 并采用数值分析手段, 分析了动力荷载作用下混凝土强度、初始预应力及荷载作用位置对预应力混凝土靠船桩变形、抗裂性能的影响。结果表明, 高强度混凝土靠船桩受预应力水平影响大, 但当高初始预应力与低荷载作用位置组合时, 混凝土等级变化对靠船桩极限变形能力影响较小; 预应力混凝土靠船桩开裂荷载与荷载作用位置关系密切, 当荷载作用位置较高时, 桩身开裂后很快就丧失承载能力而发生破坏; 初始预应力水平对低强度混凝土(C50)靠船桩的极限变形能力影响小, 而对等级较高混凝土(C60、C70)靠船桩极限变形能力影响较大。

**关键词:** 动力荷载; 靠船桩; 瑞利阻尼; 多自由度; 变形性能

中图分类号: U641.36

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)04-0025-07

## Theoretical and numerical analyses of deformation property of prestressed berthing pile under dynamic load

TU Zhong-ren<sup>1,2</sup>, YIN Jian<sup>2</sup>, RONG Yao<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*  
2. *School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;*  
3. *Jiangxi Quality Supervising Station of Transportation Engineering, Nanchang 330008, China*)

**Abstract:** Considering berthing pile working characteristic, a theoretical analysis equation including interior and exterior damp effects is proposed in this paper. Influence of concrete strength together with initial prestress and load-location on the deformation property and anti-crack property is studied by use of numerical calculation method. Research results show that the deformation property of the berthing pile with high concrete strength can be more easily influenced by initial prestress, and that concrete strength has little influence on the ultimate deformation property when high prestress is combined with low load-location on the berthing pile, and that the crack load of the prestressed berthing pile is closely associated with load location. With a high load location, the berthing pile will quickly lose load capability and then become damaged after cracking. Initial prestress has little influence on the

收稿日期: 2008-01-20

作者简介: 涂忠仁(1973-), 男, 江西宜黄人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。

E-mail: tuzrtj@126.com

ultimate deformation of the berthing pile with low concrete strength, such as C50, but exerts a greater influence on the berthing pile with higher concrete strength, such as C60 and C70.

**Key words:** dynamic load; berthing pile; Rayleigh damping; multi-degree-of-freedom (MDOF); deformation property

设置柔性桩式靠船设施来承受船舶荷载已大量应用于码头结构的设计和建设实践<sup>[1,2]</sup>,相应的设计和施工规范<sup>[3]</sup>业已发布实施.由于钢管桩具有良好的弹性变形能力而常作为靠船桩的首选,但钢管桩方案也有明显的不足,如工程造价昂贵<sup>[4]</sup>、运营期维护费用高等.预应力混凝土桩已广泛用作码头结构物的桩基,其制作及施工经验丰富、造价合理,若用作靠船桩备选类型将有一定的工程意义和社会意义.

目前,在预应力混凝土靠船桩的变形及吸能效果方面开展的试验和理论研究成果主要是在静态荷载条件下获得的<sup>[5,6]</sup>.鉴于靠船桩工作时主要是承受来自船舶的撞击力,该荷载与时间有关,并随靠船桩变形的发展而变化,属于一种低频的动力荷载.目前在此领域研究成果尚属空白,因此,研究预应力混凝土靠船桩在瞬态动力荷载作用下的变形能力、吸能效果及抗裂性能等宏观特性和规律,能为其设计应用提供重要指导.

根据结构动力学理论<sup>[7,8]</sup>,本文先介绍靠船桩计算涉及的基本理论,即多自由度系统一般形式的振动方程,然后阐述作为分布参数系统的靠船桩振动响应求解的解析方法——直接法(偏微分法),最后,采用数值方法对靠船桩在动力荷载作用下的变形性能进行研究和分析,并总结了其中的基本规律.

## 1 靠船桩动力计算原理

### 1.1 多自由度(MDOF)系统振动运动方程的一般形式

本文采用基于动平衡法原理的直接平衡法建立多自由度系统运动方程.根据达朗贝尔原理,系统振动时将受到干扰力、惯性力、阻尼力及弹性恢复力,它们在系统的每一个广义坐标上的分量应保持平衡.据此,在各个广义坐标上施加惯性力,将原来的动力学问题在分析形式上转化为静力学问题,可得到系统的运动方程,此方法称为直接平衡法.

对于  $n$  个自由度结构系统,力的平衡关系可表示为

$$M_r \ddot{x} + C_r \dot{x} + Kx = P_r(t) \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $M, C, K$  为  $n \times n$  阶对称方阵.根据振动方程(1)得出的振动响应分析,仅仅是实际结构系统力学行为的近似解,因为就实际结构而言,本质上都具有分布质量,是一个分布参数系统,又称为弹性体,预应力混凝土靠船桩就是这样一种弹性体.要描述弹性体系任意瞬时的空间位置,严格说来需要有无限多个广义坐标,也称为无限自由系统.求解无限自由系统振动的方法目前有两种:一是建立弹性系统的偏微分方程,求振动的精确解;二是采用近似方法,对弹性体系统进行离散,将无限自由度系统转化为有限自由度系统,而后按照多自由度方法求解.

### 1.2 直接法(偏微分法)

如图1(a)所示,假设预应力混凝土靠船桩的抗弯刚度和单位长度的质量与坐标无关,分别记为  $EI$  和  $m$ ,横向荷载和横向位移分别是坐标和时间的连续函数,记为  $p(x, t)$  和  $y(x, t)$ .分析荷载作用范围内一微段  $dx$  隔离体上所受的力,包括内力、惯性力和干扰力(见图1(b)),可得出仅考虑弯曲这一简单情况下的振动方程

$$EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = p(x, t) \quad (2)$$

实际靠船桩在振动过程中,必然会受到各种因素引起的外阻尼作用,例如水中部分桩身受到的附加水体阻尼作用,入土段桩身则受到桩周土体的阻抗,同时,桩身截面上的各层纤维以一定的速度反复变形,沿截面

高度也会产生分布的内阻尼应力.因此,建立振动方程时应考虑外阻尼和内阻尼对靠船桩动力响应的影响.

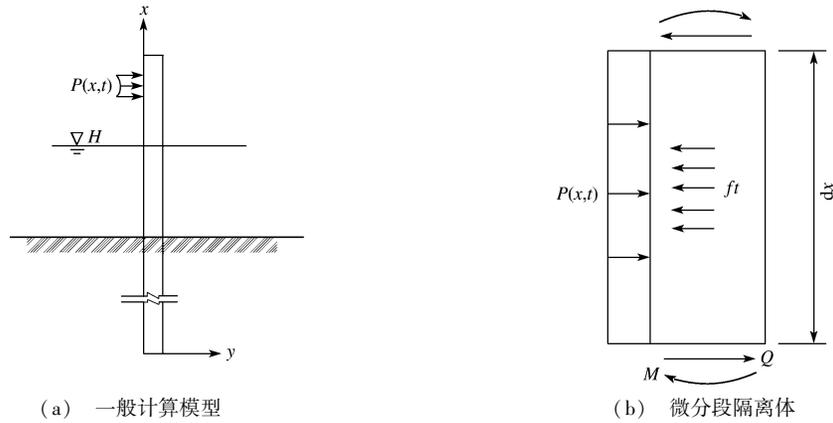


图1 理论分析模型

Fig.1 Theoretical analysis model

外阻尼力与振动速度成正比,即  $f_D = c(x) \frac{\partial y}{\partial t}$

代入(2)式有:

$$EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} = p(x, t) \quad (3)$$

与内阻尼对应的阻尼应力  $\sigma_D$  与材料的应变速率有关,此阻尼应力

$$\sigma_D = c_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (4)$$

式中: $c_s$  为应变阻尼系数; $\varepsilon$  为桩体内距离中和轴任意点处的应变.假设该应力在截面高度上呈线性变化,则此阻尼应力形成阻尼弯矩

$$M_D = \int_A \sigma_D z dA = c_s I(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \quad (5)$$

式中: $z$  为剖面上任意点到中和轴的距离; $A$  为断面面积.

因此,理论上考虑内外阻尼情况下弯曲振动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} = p(x, t) \quad (6)$$

对于(6)式,在简单边界条件下可求解偏微分方程而得出动力响应,但由于表达式为4次微分方程,实际工程中无法提供准确边界条件,加之目前对内阻尼系数研究成果极少.因此,上式只具有一定的理论意义,尚难以用于解决实际工程问题.

### 1.3 系统阻尼

虽然已提出了众多的数学方法来描述阻尼<sup>[9-13]</sup>,但通常还不太可能确定结构中阻尼的确切性质,应用较广的是瑞利(Rayleigh)提出的确定系统阻尼矩阵的方法,该方法将系统阻尼矩阵分解为系统质量矩阵和系统刚度矩阵的线性组合,总集成得到的系统阻尼称之为瑞利阻尼.根据瑞利提出的方法,阻尼可写为

$$C = \lambda_m M + \lambda_k K \quad (7)$$

式中:在非线性系统情形下, $K$  为初始切线刚度;系数  $\lambda_m$ 、 $\lambda_k$  可通过给定的两个模态产生所规定的模态系数阻尼因数而得到.令  $(\omega_r, \varphi_r)$  为其特征对,相应于

$$(K - \omega^2 M) \varphi_r = 0, \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

正交性方程为

$$\begin{aligned} \varphi_r^T M \varphi_s &= M_r \delta_{rs}, \\ \varphi_r^T K \varphi_s &= \omega^2 M_r \delta_{rs} \end{aligned} \quad (9)$$

于是由(7)、(9)式可定义瑞利阻尼

$$\varphi_r^T C \varphi_s = (\lambda_m + \lambda_k \omega^2) M_r \delta_{rs} \quad (10)$$

(1)式也可改写为

$$\ddot{x} + 2\xi_r \omega_r \dot{x} + \omega^2 x = \frac{1}{M_r} P_r(t) \quad (11)$$

若定义  $\xi_r$  为系统阻尼系数,则

$$\xi_r = \frac{C_r}{2M_r \omega_r} = \left( \frac{1}{2M_r \omega_r} \right) \varphi_r^T C \varphi_r \quad (12)$$

$$C_r = \varphi_r^T C \varphi_r = 2M_r \omega_r \xi_r \quad (13)$$

将(10)式代入(12)式右边,最后得到系统的阻尼系数

$$\xi_r = \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_m}{\omega_r + \omega_r \lambda_k} \right) \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

于是,当缺乏实测阻尼试验数据时,可利用两个主要模态主频和系统阻尼系数来确定瑞利阻尼系数  $\lambda_m$  和  $\lambda_k$ .

$$\lambda_m = \frac{2 \times 2\pi f_1 \times 2\pi f_2 \times \xi_r \times (2\pi f_2 - 2\pi f_1)}{(2\pi f_2)^2 - (2\pi f_1)^2} \quad (15)$$

$$\lambda_k = \frac{2 \times \xi_r \times (2\pi f_2 - 2\pi f_1)}{(2\pi f_2)^2 - (2\pi f_1)^2}$$

## 2 预应力混凝土靠船桩变形性能数值模拟

### 2.1 基本假定

数值建模时材料选用混凝土,受力筋采用钢绞线,并假设:

- (1) 试件开裂前,内部钢绞线与砂浆粘结良好,在荷载作用时钢绞线的应变沿长度方向均匀变化;
- (2) 试件开裂后,受拉区混凝土不承受拉应力,拉应力完全由钢绞线承担;
- (3) 试件在弯曲变形过程中横截面始终保持为平面,满足平截面假定;
- (4) 计算时采用小变形假设,即试件变形相对于横截面尺寸为一个少量;
- (5) 阻尼矩阵采用瑞利阻尼;
- (6) 分析方法采用瞬态动力学分析技术.

### 2.2 数值分析模型

用于数值分析的三维模型几何尺寸为:桩身截面为100 cm×100 cm,桩身长度为2 000 cm,桩周土体截面为900 cm×900 cm,厚度为1 200 cm. 位移边界条件:桩周土体外部边界固定,桩身则桩底固定,桩顶自由. 离散后模型节点共计(需另外计算确定)9 088 个,单元10 205 个(见图2).

### 2.3 材料参数及加载模式

计算模型共涉及3种材料,即预应力筋(钢绞线)、混凝土和土体,其材料参数见表1.

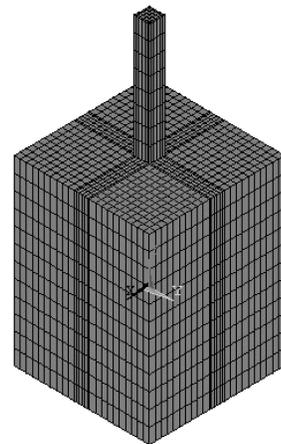


图2 构件单元网格划分图

Fig. 2 Meshed berthing pile

表1 材料参数  
Tab.1 Material parameters

| 混凝土等级     | 弹性模量 / (10 <sup>4</sup> MPa) | 泊松比   | 密度 / (kg · m <sup>-3</sup> ) | 轴心抗拉强度 / MPa | 轴心抗压强度 / MPa | 剪力传递系数 |      | 热膨胀系数 / (°C <sup>-1</sup> ) | 内摩擦角 φ / (°) | 凝聚力 c / (kPa) |
|-----------|------------------------------|-------|------------------------------|--------------|--------------|--------|------|-----------------------------|--------------|---------------|
|           |                              |       |                              |              |              | 张开裂缝   | 闭合裂缝 |                             |              |               |
| C50       | 3.45                         | 0.167 | 2400                         | 2.00         | 23.5         | 0.9    | 1    | /                           | /            | /             |
| C60       | 3.60                         | 0.167 | 2400                         | 2.20         | 28.0         | 0.9    | 1    | /                           | /            | /             |
| C70       | 3.75                         | 0.167 | 2400                         | 2.40         | 33.0         | 0.9    | 1    | /                           | /            | /             |
| 钢绞线 (7Φ5) | 18.0                         | 0.25  | 7850                         | /            | /            | /      | /    | 1.2×10 <sup>-4</sup>        | /            | /             |
| 土体        | 0.003                        | 0.38  | 2000                         | /            | /            | /      | /    | /                           | 20           | 40            |

选择加载模式时参考了实际船舶荷载作用在靠船桩上的动态过程. 船舶正常靠泊时, 船体以规定的速度进行靠泊<sup>[14]</sup>, 当船体和靠船桩接触后, 二者在一段时间内将保持接触状态一起继续向码头前沿靠拢, 桩身承受的荷载逐渐由0增加到峰值, 峰值荷载持续作用于桩身一段时间后, 逐渐减小直至0. 数值计算时模拟的船舶撞击力按线性变化 (Ramped) 方式施加, 加载模式及载荷步见图3.

2.4 阻尼系数

动力计算时, 粘滞阻尼系数是计算多自由度系统动力响应的关键参数. 本算例中, 首先根据几何模型进行系统模态分析, 得到各阶主频值, 取其中前2阶按(15)式计算得到瑞利阻尼中质量矩阵系数  $\lambda_m$  和刚度矩阵系数  $\lambda_k$ , 1阶和2阶主频分别为9.5854和59.108 Hz, 质量矩阵系数  $\lambda_m = 5.18$ , 刚度矩阵系数  $\lambda_k = 0.000232$ . 1阶和2阶主频对应的变形见图4.

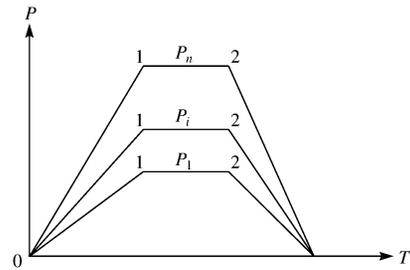
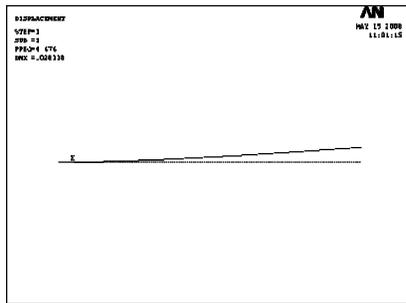
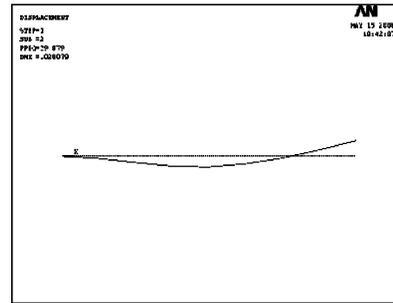


图3 荷载加载示意图

Fig.3 Instantaneous ramped dynamic load



(a) 1阶主频



(b) 2阶主频

图4 1阶和2阶主频对应的变形

Fig.4 Deformation of 1st and 2nd frequency

3 预应力混凝土靠船桩动力计算结果分析

计算工况考虑的变量包括混凝土的强度等级、受力筋的初始预应力, 以及荷载作用位置, 计算工况见表2.

表2 计算工况  
Tab.2 Calculation cases

| 荷载作用位置距<br>桩顶距离/m | 混凝土等级 | 初始预应力/MPa |      |      |
|-------------------|-------|-----------|------|------|
|                   |       | 800       | 1000 | 1200 |
| 1                 | C50   | 1         | 2    | 3    |
|                   | C60   | 4         | 5    | 6    |
|                   | C70   | 7         | 8    | 9    |

(续表)

| 荷载作用位置距<br>桩顶距离/m | 混凝土等级 | 初始预应力/MPa |      |      |
|-------------------|-------|-----------|------|------|
|                   |       | 800       | 1000 | 1200 |
| 3                 | C50   | 10        | 11   | 12   |
|                   | C60   | 13        | 14   | 15   |
|                   | C70   | 16        | 17   | 18   |
| 5                 | C50   | 19        | 20   | 21   |
|                   | C60   | 22        | 23   | 24   |
|                   | C70   | 25        | 26   | 27   |

注:初始预应力为换算后预应力钢筋混凝土桩身截面上的应力值

计算得到具有代表性桩底弯矩位移曲线及桩底弯矩位移当量曲线见图5~7. 其中的位移当量以C70混凝土位移为基准,下同.

所有计算工况的桩底弯矩位移曲线基本一致(见图5). 除了开始阶段(桩底弯矩小于150 kN·m)桩底弯矩位移呈线性外,其余均呈非线性;最大位移均出现在荷载步2,且位移增加比较明显,整个加载及卸载过程完成后桩体基本恢复至初始状态.

图6对应于荷载作用位置为桩顶往下5m处、初始预应力1200 MPa时荷载和位移当量情况,从图6可见,在相当大的荷载范围内,不同混凝土等级(C50、C60和C70)桩身的位移当量基本稳定,直到失效前才有明显变化. 这说明在高初始预应力和低荷载作用位置组合时,混凝土等级对位移当量基本无影响. 原因在于当靠船桩桩底弯矩小于桩的抗裂弯矩时,位移当量曲线间保持平行状态;当靠船桩桩底弯矩大于桩的抗裂弯矩时,位移当量曲线将显著上升.

图7为荷载作用于桩顶往下1m、混凝土等级为C60时,不同初始预应力水平下荷载和位移当量间的关系. 可见,自受荷开始到失效整个过程中,不同预应力水平对应的位移当量一直呈增长态势,但最终破坏时对应的极限荷载较低(为60 kN),说明当荷载作用位置较高,靠船桩自泥面到荷载作用位置的悬臂长度较长时,桩身在开裂后很快就丧失承载能力而发生破坏.

计算结果还表明,各工况的开裂荷载与荷载作用位置密切相关,混凝土等级和初始预应力水平对开裂荷载影响很小,荷载作用位置为桩顶下1m时,荷载级别在30 kN时开裂;3m位置对应的开裂荷载为60 kN;5m位置时开裂荷载则增加到120 kN. 同时,各计算工况的首条裂缝出现的位置在泥面下1m范围内,符合实际情况.

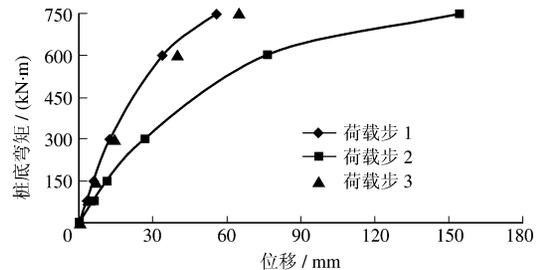


图5 桩底弯矩位移曲线

Fig. 5 Relationship between bending moment and deformation

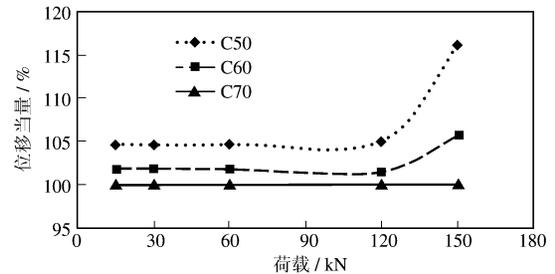


图6 不同混凝土等级桩底弯矩位移当量曲线

Fig. 6 Relationship between load-deformation-varying-ratio for different concrete strengths

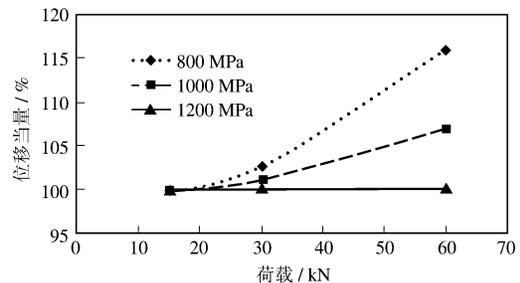


图7 不同初始预应力桩底弯矩位移当量曲线

Fig. 7 Relationship between load-deformation-varying-ratio for different pre-stresses

## 4 结 语

本文利用动力数值计算分析手段,结合靠船桩实际工作特点,研究了混凝土等级、初始预应力以及荷载作用位置对预应力混凝土靠船桩变形及抗裂性能的影响,得出以下结论:

(1)当荷载水平较低时,荷载—位移呈线性关系;当荷载超过开裂荷载后,荷载—位移呈明显的非线性,卸载后存在一定的残余变形;

(2)较高初始预应力与较低荷载作用位置组合时,混凝土等级变化对靠船桩极限变形能力影响小,极限位移当量低于5%;

(3)当荷载作用位置较高,靠船桩自泥面到荷载作用位置悬臂长度较长时,桩身开裂后很快就丧失承载能力而发生破坏;初始预应力水平对低强度混凝土(C50)靠船桩的极限变形能力影响小,而对等级较高混凝土(C60、C70)靠船桩极限变形能力影响较大;

(4)计算结果表明,首条裂缝出现在泥面下1 m范围内;且荷载作用位置、混凝土等级以及初始预应力3个因素中,荷载作用位置对动载作用下桩身开裂的影响最大,本算例中荷载分别作用于桩顶下1、3和5 m处对应的开裂荷载为30、60和120 kN.

因此,应针对桩—土相互作用进行深入研究,提供尽可能准确的入土段桩身边界条件,完善靠船桩动力响应的解析解法;结合实际特点,研究更为符合实际情况的靠船桩系统阻尼理论计算方法及实验手段.开展动力荷载作用下的模型实验,为预应力混凝土靠船桩的实际应用提供更为翔实的研究数据.

## 参 考 文 献:

- [1] 周春儿. 靠船桩的性状及计算方法[J]. 水运工程, 1999, (5): 22-27.
- [2] 谢耀峰. 港口靠船桩工作性状计算的双参数法[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 38-42.
- [3] JTJ 279-2005, 港口工程桩式柔性靠船设施设计与施工技术规程[S].
- [4] 王勇昌, 李 洪. PHC 桩在海港工程中的应用[J]. 港工技术, 2005, (3): 27-28.
- [5] 涂忠仁, 许锡宾. 预应力混凝土靠船桩变形性能试验研究[J]. 同济大学学报, 2005, 33(6): 747-751.
- [6] 涂忠仁, 许锡宾. 预应力混凝土靠船桩抗裂性能试验研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(12): 38-41.
- [7] 唐有刚. 高等结构动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002: 38-57.
- [8] 邹经湘. 结构动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996: 76-124.
- [9] Bert C W. Material Damping: An Introductory Review of Mathematical Models, Measures and Experimental Techniques[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1973, 29: 129-153.
- [10] Bishop R E D, Gladwell G M L. An Investigation into the Theory of Resonance Testing[J]. **Phil Trans**, 1963, 225: 225, 241-280.
- [11] Kolsterman A L. On the Experimental Determination and Use of Modal Representations of Dynamic Characteristics[D]. **Cincinnati: University of Cincinnati**, 1971.
- [12] 郭文武, 刑海军, 舒建平. 混凝土拌合物阻尼的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 1999, 12(2): 56-58.
- [13] 石建军, 胡绍全, 柯国军, 等. 钢筋混凝土材料阻尼值的实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 14-15.
- [14] TJ 215-98, 港口工程荷载规范[S].