



# 码头钢筋混凝土桩的细观损伤模型 参数标定及模型验证

王多银<sup>1,2</sup>, 杜文力<sup>1</sup>, 陈昊然<sup>1</sup>, 段伦良<sup>1,2</sup>, 吴穗庆<sup>1</sup>, 唐选海<sup>1</sup>, 李国洋<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 桩被用于码头中时, 由于各种因素对桩身材料特性的劣化而降低桩身承载能力已成为高桩码头安全健康使用的重要因素。为更加准确地预测钢筋混凝土桩在内河码头复杂水工环境下(船舶荷载、波浪荷载等)的损伤情况和变形特性, 设计出一种易于制作与操作的水平加载装置, 对钢筋混凝土桩进行水平分级加载试验, 得到桩底受拉荷载-应变曲线, 通过 PFC3D 软件建立三维颗粒流离散元钢筋混凝土桩模型, 对细观参数进行标定, 并结合物理试验结果验证模型力学性能的合理性。

**关键词:** 钢筋混凝土桩; 水平荷载; PFC3D; 参数标定

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0037-08

## Mesoscopic damage model of wharf reinforced concrete pile parameter calibration and model validation

WANG Duoyin<sup>1,2</sup>, DU Wenli<sup>1</sup>, CHEN Haoran<sup>1</sup>, DUAN Lunliang<sup>1,2</sup>, WU Suiqing<sup>1</sup>, TANG Xuanhai<sup>1</sup>, LI Guoyang<sup>1</sup>

(1. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** When the pile is used in the wharf, the reduction of the bearing capacity of the pile due to the deterioration of various factors on the material characteristics of the pile has become an important influencing factor for the safe and healthy use of the high-piled wharf. In order to more accurately predict the damage and deformation characteristics of reinforced concrete piles in the complex hydraulic environment (ship load, wave load, etc.) of inland wharves, we design a horizontal loading device that is easy to make and operate to carry out horizontal graded loading tests on reinforced concrete pile, obtain the tensile load-strain curve at the bottom of the pile, and build a three-dimensional particle flow discrete element reinforced concrete pile model by PFC3D software. Then we calibrate micro-parameters of the model, and verify the rationality of mechanical properties of the model by results of physical tests.

**Keywords:** reinforced concrete pile; horizontal load; PFC3D; parameter calibration

随着我国内河航运的快速发展, 同时为了适应三峡工程库区蓄水的水文环境, 架空直立式高桩码头在长江上游码头的建设中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。钢筋混凝土在水利工程与港口航运等领域也作为不同构件的材料而被广泛使用, 其中桩是一种主要的形式。然而, 由于其材料特性和使用环境的影响, 钢筋混凝土结构在实际使用过程中往往会

遭受各种损伤, 如裂缝、变形、高温等, 这些问题严重影响了结构的使用性能和安全性<sup>[2-4]</sup>。因此, 对钢筋混凝土结构的细观损伤进行深入研究, 对于提高其使用寿命和安全性具有重要的理论和实践意义。近年来, 随着计算机技术和数值模拟技术的发展, 颗粒流方法 (particle flow code, PFC) 作为一种离散单元法, 已经在混凝土材料和结构

收稿日期: 2023-12-08

作者简介: 王多银 (1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为港工、水工结构新形式及其性能, 结构与地基、水流相互作用等。

的研究中得到了广泛的应用。

离散元方法于 20 世纪 70 年代由 Cundalla 博士创立，并不断得到学术界的关注与发展<sup>[5]</sup>。Cundall 提出离散元方法旨在对不连续介质进行数值模拟与计算<sup>[6]</sup>。PFC 数值模拟开发基于离散元理论，在细观层面进行建模与研究，不考虑宏观层面的连续介质假设(如平衡方程与本构关系等)，只需要满足颗粒之间接触的力-位移关系与牛顿第二定律即可分析颗粒间的接触力与位移。随着本构模型与理论的不完善，PFC 可以用于解决更多的问题。刘金龙<sup>[7]</sup>提出不同层间隔时间的下层碾压混凝土的 PFC 建模方法，建立碾压混凝土单轴压缩的 PFC 模型，确定了 PFC 建模参数，为后续分析提供了条件；Schlangen 等<sup>[8]</sup>建立一个钢筋混凝土的数值模拟框架模型，研究混凝土的典型破坏机制，通过细观参数调整，模拟力学性能与黏结研究材料的断裂力学特性。而对于混凝土承受不同类型荷载，不同的学者通过 PFC 程序进行多种方向的研究，如徐海啸<sup>[9]</sup>以已有的钢筋混凝土梁的抗剪试验作为模拟背景，分别构建有限元模型与离散元 2D 模型，对比抗剪试验所得抗剪承载力与裂缝发展结果得到离散元在计算抗剪能力上误差较有限元更小，而裂缝的发展形态也比有限元更加真实合理；顾祥林等<sup>[10]</sup>基于离散元对混凝土的破坏机理进行分析，发现离散元可以较为真实地模拟宏观尺度下钢筋混凝土构件的受力破坏过程。

综上所述可以发现，在实际工程中，钢筋混凝土作为建筑材料，仅模拟试件难以为实际工程构件所受的荷载提供较为直接的参考价值。所以本文在宏观物理试验的基础上，对钢筋混凝土桩的模型进行合理的离散元三维建模，以期对研究钢筋混凝土桩的优化设计和建模精度提供参考。

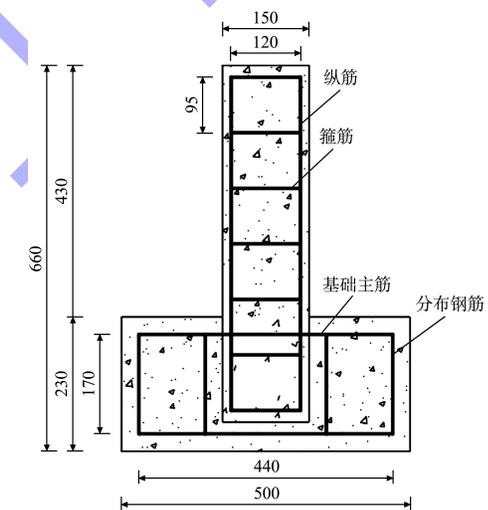
### 1 钢筋混凝土桩水平加载试验

#### 1.1 桩尺寸选定及模型材料选择

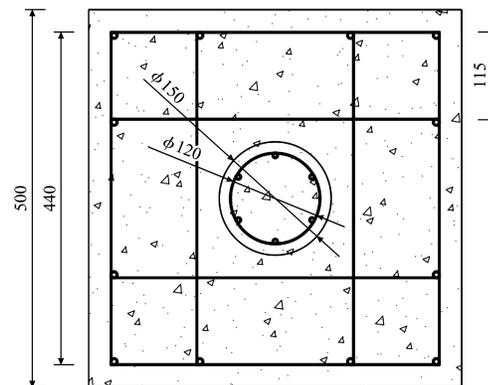
本试验以某实际工程中所用钢筋混凝土桩作

为原型桩，开展钢筋混凝土桩水平分级加载试验。原型桩长 9.15 m、桩径 2.25 m，根据几何相似和静力相似的原则进行室内试验，以  $\lambda_L = 1:15$  的几何比尺对原型桩的尺寸进行缩尺，原型桩采用 C30 混凝土。

模型桩长径比约为 4:1，桩径为 150 mm、桩长为 610 mm，桩内等距分布有 6 根 HRB335 型三级螺纹钢(直径 6 mm)作为纵筋，纵筋外箍有 7 根 HPB300 钢筋(直径 4 mm)，箍筋的布置间距为 95 mm。将混凝土保护层厚度取上下各 20 mm，锚固长度两端均取 200 mm。经过综合计算，在基础内配置 4 根 HRB335 的三级螺纹钢作为钢筋笼主筋，并布有 12 根分布钢筋以保证主筋焊接与抗拉强度。设计桩模型尺寸与钢筋布置见图 1。



a) 正视图



b) 俯视图

图 1 设计桩模型尺寸与钢筋布置 (单位: mm)

桩体内纵筋采用 HRB335 三级螺纹钢(直径 6 mm), 箍筋采用 HPB300 钢筋(直径 4 mm); 基础内主筋采用 HRB335 三级螺纹钢(直径 8 mm), 分布钢筋采用 HRB335 三级螺纹钢(直径 8 mm)。全模型均采用 C30 混凝土一体式浇筑, 混凝土各材料用量见表 1。

kg/m <sup>3</sup>			kg/m <sup>3</sup>
水	水泥	砂	碎石
220	367	689	1 124

注: 碎石粒径为 5~20 mm, 水泥为 P·O 42.5 的普通硅酸盐水泥。

## 1.2 试验结构制作

1) 桩心钢筋笼制作。使用钢筋轧制机加工 HRB335 钢筋, 钢筋笼共布置 6 根 6 mm 主筋, 端头均弯曲 5 cm, 纵向共布置 7 个 4 mm 箍筋环, 间距 95 mm。

2) 基础钢筋笼制作。为避免基础在加载试验过程中开裂, 需要布设钢筋加固。使用钢筋轧制机加工 HRB335 钢筋, 将钢筋分为两端弯曲 5 cm 的受力主筋与分布钢筋, 用钢扎丝绑扎成型。

3) 混凝土浇筑。按照设计好的基础尺寸, 制作木质基础模具箱与桩模具筒, 并在底部用玻璃胶密封, 以防止泥浆泄漏。基础模具箱上部封板中间开 1 个直径 17 cm 的空洞, 以预留 2 cm 作为桩模具厚度。

## 1.3 水平加载装置

截取长度为 180 cm 的 10 号槽钢, 正中处焊 1 个勾环用于绑扎钢丝绳, 在另一端用 L 型钢焊 1 个边长 50 cm 的正方形加载盘。在桩基预受拉侧砖墙正中处边缘凿 1 个深 30 cm 坑槽, 埋入 1 根弯曲成“门”字形的 8 mm 光圆钢筋, 坑槽内填入混凝土振实整平。截取长 40、120、120 cm 的槽钢, 焊接成“门”字形(槽朝上), 在距离“门”字形钢筋水平距离 75 cm 处, 凿 1 个深 50 cm 坑槽, 埋入槽钢, 使槽钢露出地面 70 cm。在各坑槽填实的混凝土强度均足够后, 将定滑轮安装于“门”字形

槽钢正中, 调整位置, 使定滑轮水平向钢丝绳正好位于桩体距桩顶 35 mm 处。用 6 mm 光圆钢筋焊 1 个内径 15 cm 圆环, 圆环外焊 1 个加载环, 将钢丝绳穿过加载环, 用 3 枚钢丝扣锁紧。抬升槽钢高度, 调整位置, 使槽钢一端恰好超出“门”字形光圆钢筋 15 cm, 高度恰好平齐于光圆钢筋下。至此, 加载装置设计制作完毕。

## 1.4 加载制度与试验测量方法

本试验采用水平连续加载, 使用单片质量为 15 kg 的杠铃片作为加载物。初步计算得出极限水平承载力约为 3 kN, 杠杆中心处对钢丝绳会产生 2 倍加载力, 因此破坏试验共分 10 级加载, 每级叠加 1 个杠铃片。加载完毕后卸载依然以 20 s 为间隔依次卸载, 卸载完毕后观察桩模型与应变变化。在桩体的 4 个方向, 沿桩体纵向由上至下按四分之一桥形式均布设竖向电阻应变片测点, 测点间距为 60 mm。

## 1.5 试验结果

试验主裂缝出现在加载处与桩底受拉处, 桩身下部 4 个测点产生拉应变, 将桩底测点视为测点 A, 沿桩身向上每隔 60 mm 所在测点分别为测点 B、C、D, 各测点受拉荷载-应变曲线见图 2。

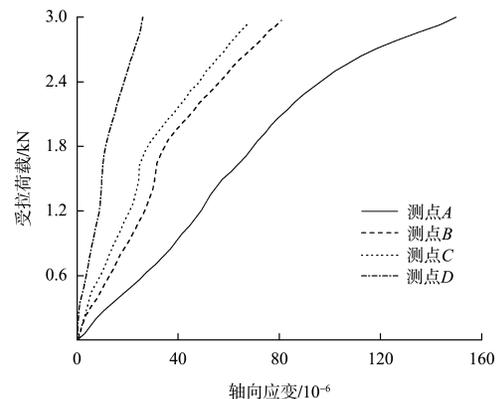


图 2 各测点受拉荷载-应变曲线

通过试验结果可以看出, 测点 A~D 抵达破坏点的峰值应变分别为  $157 \times 10^{-6}$ 、 $82 \times 10^{-6}$ 、 $68 \times 10^{-6}$ 、 $27 \times 10^{-6}$ , 峰值拉应变沿桩身从桩底向上递减。试验中, 桩于第 10 级加载即受拉荷载为 3 kN

时应变骤降,即发生破坏,与初步计算相符,加载过程观测到仪器显示应变随加载过程呈阶梯式变化,符合实际情况,因此可以将该试验结果用于后续数值模型的建立与验证。选用测点A对应受拉荷载-应变曲线作为参照,为后续数值模拟提供验证。

## 2 基于PFC的钢筋混凝土桩数值模拟

### 2.1 PFC计算原理

#### 2.1.1 运动规律

PFC离散元法是由离散元法衍生出来的一种分析方法。它是通过将非均质材料的组分离散成不同给定尺寸的颗粒,并通过在每个颗粒之间建立不同的接触细化材料的实际状态分析结构问题。

由于PFC中颗粒被假设为无法被破坏的刚性体,刚性体的运动源于理论力学中的力和力矩,刚性体上任何一点的平移和旋转都构成刚性体的运动。因此颗粒运动根据平动方程与转动方程计算。

平动方程为:

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (1)$$

式中: $m$ 为颗粒 $i$ 的质量, $\ddot{x}_i$ 为颗粒 $i$ 的加速度, $g_i$ 为颗粒 $i$ 所受重力加速度, $F_i$ 为颗粒 $i$ 所受重力外合力。

转动方程为:

$$M_i = \dot{H}_i = I\dot{\omega} + \omega L \quad (2)$$

式中: $M_i$ 为颗粒 $i$ 的力矩, $\dot{H}_i$ 为颗粒 $i$ 的角动量变化率, $I$ 为转动惯量, $L$ 为颗粒角动量, $\dot{\omega}$ 为角加速度, $\omega$ 为角速度。

#### 2.1.2 边界条件

使用墙体作为加载板,为避免由于墙体的存在对颗粒材料产生边界效应,加载墙的刚度应设为颗粒材料刚度的10倍左右,而边界墙的刚度则应设为颗粒材料刚度的1/10左右。对于加载方面,

主要通过控制墙体的速度进行加载。控制墙体速度分为平移速度、角速度、旋转中心共3个参数,使用下式对墙面端点空间位置移动进行速度计算:

$$\mathbf{x}_{i,O} = \mathbf{x}_{i,W} + \mathbf{e}_{ijk} \boldsymbol{\omega}_{i,W} (\mathbf{x}_{k,O} - \mathbf{x}_{k,W}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}_{i,O}$ 为墙面端点 $i$ 在空间参考系 $O$ 中的位置向量; $\mathbf{x}_{i,W}$ 为墙面端点 $i$ 在墙体参考系 $W$ 中的位置向量; $\mathbf{e}_{ijk}$ 为3D空间中的反对称张量; $\boldsymbol{\omega}_{i,W}$ 为墙体参考系 $W$ 中的角速度向量; $\mathbf{x}_{k,O}$ 为墙面端点 $K$ 在空间坐标系 $O$ 中的位置向量; $\mathbf{x}_{k,W}$ 为墙面端点 $K$ 在墙体参考系 $W$ 中的位置向量。

#### 2.1.3 接触模型

为了解决不同材料与工程问题,有必要根据具体设置不同的接触模型与赋予细观参数,让PFC模拟细观问题更具真实性与合理性。本文主要使用的接触模型为线性接触模型和黏结模型。

1) 线性接触模型的两个颗粒接触刚度为串联状态,其法向刚度根据下式计算:

$$K_n = \frac{K_{n,A} K_{n,B}}{K_{n,A} + K_{n,B}} \quad (4)$$

式中: $K_{n,A}$ 、 $K_{n,B}$ 分别为颗粒 $A$ 、 $B$ 的法向刚度。

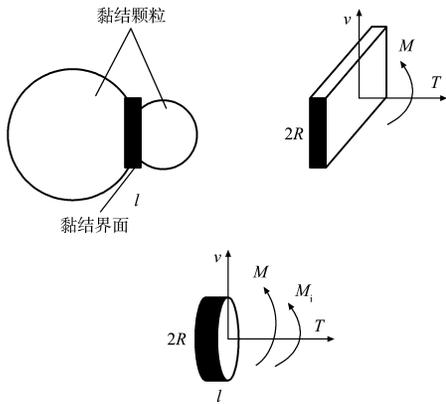
切向刚度根据下式计算:

$$K_s = \frac{K_{s,A} K_{s,B}}{K_{s,A} + K_{s,B}} \quad (5)$$

式中: $K_{s,A}$ 、 $K_{s,B}$ 为颗粒 $A$ 、 $B$ 的切向刚度。

2) 接触黏结模型与平行黏结模型是PFC中的两种黏结模型形态。在平行黏结模型中,ball-ball间会产生的接触力包括两种:1) 颗粒之间具有重叠量或发生一定程度的滑移时,颗粒会根据滑动模型定律产生类似于复合材料的粗集料力学行为的接触力;2) 平行黏结模型本身对颗粒会带来力与力矩,这也契合宏观黏结材料具有的抗拉力与力矩作用。平行黏结模型的原理见图3。平行黏结可以想象成为一组有着恒定法向刚度和切向刚度均匀分布与接触面内的弹簧,颗粒接触位置的相对运动在胶结中产生力和力矩。力和力矩作用于两个黏结颗粒,并且与黏结材料的黏

结边界的最大法向和切向应力相关。如果当中任何一个方向的最大应力超过相应的黏结强度, 平行黏结就断裂。



注:  $v$  为颗粒相对于平行黏结面的速度,  $l$  为颗粒之间接触距离,  $T$  为施加在颗粒上的扭矩,  $R$  为颗粒接触半径,  $M$  为颗粒的外力矩,  $M_1$  为由惯性而产生的力矩。

图 3 平行黏结原理

## 2.2 钢筋混凝土桩颗粒流离散元模型建立

1) 对计算区域 Domain 进行空间定义, 将其定为模型外尺寸的 4 倍正方体空间。

2) 建立钢筋笼颗粒集合体, 见图 4。通过 Auto CAD 软件对钢筋笼进行绘制, 将钢筋笼视作没有缝隙的一连串球体, 根据宏观钢筋所用半径绘制, 对钢筋笼的球体基粒的相对坐标位置进行定位。

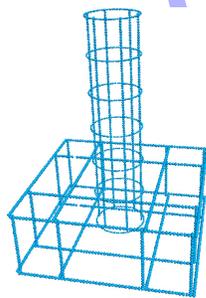


图 4 钢筋笼颗粒

3) 生成混凝土颗粒。根据设计尺寸生成墙体见图 5, 生成原则按粒径 5 mm 以下为砂浆基质, 以上为集料颗粒进行分组。模型颗粒按高斯分布进行随机生成。生成时采用半径放大法, 见图 6。添加基本模型参数, 使模型颗粒弹开, 消除非允许重叠量, 运行直至计算不平衡力  $aratio$  小于  $10^{-4}$ 。

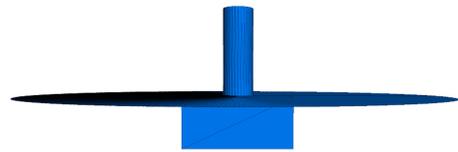


图 5 模型预压墙体边界



图 6 半径扩大法生成混凝土颗粒

在图 5 中, 圆盘形墙体实际作用为去柱体面积的基础上方边界, 由于 PFC 程序中墙体生成特性限制, 将圆台代码的高度设置为相对于颗粒尺寸而言极小的数值, 以模拟去中心圆的墙面。

4) 伺服平衡。对整个模型边界不断进行调整预压, 使模型内部的颗粒尽可能趋向均匀, 减少模型的重叠量与无接触颗粒, 使初始不平衡力  $aratio$  直至低于  $10^{-5}$ 。

5) 赋予接触参数并删除悬浮颗粒, 前后见图 7。将基本模型计算平衡后, 需要将模型外部的悬浮颗粒通过 ball delete 删除, 而对于模型内部的悬浮颗粒进行二次半径扩大使其与周围的颗粒产生接触。最终得到合理的桩体模型, 对细观参数进行标定赋予, 并重新计算至不平衡力  $aratio$  小于  $10^{-5}$ 。

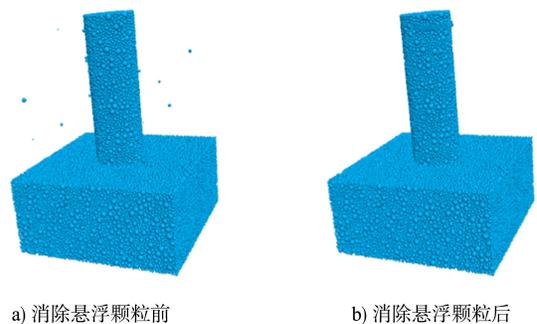


图 7 消除悬浮颗粒前后对比

6) 分级加载并监测数据。建立加载装置的加载环模型, 见图 8。加载环组内颗粒采用节理模型接触。通过循环代码, 对加载环颗粒组施加水平

分级荷载力进行模拟加载，通过时步控制加卸载时间。在模拟加载时，布设测量球，对模型的局部应力应变、轴向应力应变、微裂纹数量等数据进行监测与记录。

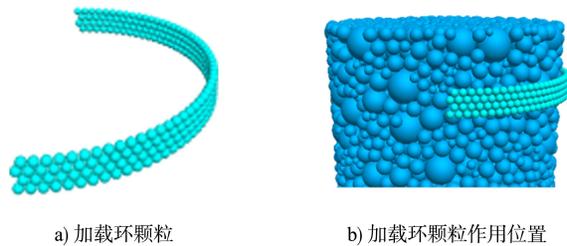


图8 加载环颗粒及作用位置

### 2.3 细观参数标定

在 PFC 中，细观参数和宏观参数之间为高度非线性相关，结合部分学者对模型的各种细观参数敏感性研究<sup>[11-13]</sup>，本文通过使用大量不同参数模拟加载研究验证，现将细观参数的宏观尺度响应归纳如下。

1) 接触有效模量会显著影响模型弹性模量。在 PFC3D 5.0 版中，新增了有效模量作为细观参数之一，从而一定程度上替代主要影响弹性模量的法向、切向接触刚度的具体标定。经试验研究，加载方式与模型孔隙率等对响应曲线均会带来不一样的影响，需要根据具体模型与加载方式单独试算再标定。

2) 刚度比会显著影响模型的峰值应力。刚度比与有效模量共同计算接触刚度，刚度比增大带来模型的接触刚度增大，从而抗变形能力增强，峰值强度越高。在水平加载试验中若刚度比过小，可能会产生加载墙或颗粒击穿模型的现象，需要找到临界值并与其他细观参数共同考虑对峰值应力的影响。

3) 摩擦系数会显著影响模型的峰值应力，同时对弹性模量也有一定的影响。PFC3D 5.0 版中的摩擦系数是细观尺度下颗粒的摩擦系数，取值为大于 0 的任意数，区别于宏观尺度中的摩擦系数取值区间在(0,1)。摩擦系数增大，会使颗粒与颗粒产生相对滑动所需要抵抗的阻力增大，抗变形能力增强，峰值强度越高。根据模拟加载试验，模型的弹性模量也会随着颗粒的摩擦系数上升而

略微上升。

4) 平行黏结抗拉强度与平行黏结强度的比值会影响材料的破坏形态。平行黏结的连接键会在法向和切向产生不同的破裂。平行黏结强度则与宏观参数中的内聚力相似，其与平行黏结抗拉强度均与峰值应力呈非线性正相关。

5) 平行黏结半径乘子会显著影响模型的峰值应力、峰值应变与弹性模量。在 PFC 程序中，若不进行半径乘子的设置，则默认值为 1。由于半径乘子会同时且大幅影响模型整体的应力、应变与弹性模量，因此调整半径乘子可以作为初步对基础参数校正时调整的参数，而后固定乘子后再调整其余参数。

根据以上所述规律，通过反复模拟试验，使用试错法将本模型细观力学参数标定见表 2。

表 2 细观参数标定

颗粒与界面类型	参数描述	细观参数	参数值
钢筋笼	有效模量	emod	1 800 GPa
	摩擦系数	fric	0.5
	刚度比	Kratio	1.5
	密度	$\rho$	7 850 kg/m <sup>3</sup>
	抗拉强度	pa_ten	400 MPa
	黏结强度	pa_coh	400 MPa
	黏结激活间隙	pa_gap	0.008
	半径乘子	pa_rmul	1
砂浆-砂浆界面	有效模量	emod	104 GPa
	摩擦系数	fric	0.5
	刚度比	Kratio	1.5
	抗拉强度	pa_ten	250 MPa
	黏结强度	pa_coh	60 MPa
	黏结激活间隙	pa_gap	0.005
	半径乘子	pa_rmul	1
砂浆-集料界面	有效模量	emod	52 GPa
	摩擦系数	fric	0.5
	刚度比	Kratio	1.5
	抗拉强度	pa_ten	125 MPa
	黏结强度	pa_coh	300 MPa
	黏结激活间隙	fa_gap	0.005
	半径乘子	fa_rmul	1

## 3 模型合理性验证

### 3.1 主要力学参数验证

在使用 PFC 进行仿真时，可以使用对比荷载-

应变曲线与数值模型水平加载应力应变曲线验证主要力学参数、对比应变-时步曲线验证模型破坏时间合理性、对比裂缝分布来验证破坏形态的一致性。

物理试验得到的桩底受拉荷载-应变曲线与离散元数值模拟得到的曲线见图 9。可以看出, 两种试验方法得到的曲线整体上升趋势相同, 最大受拉荷载均为 3 kN, 其中物理试验所得峰值轴向应变为 157, 数值模拟所得峰值轴向应变为 162, 二者较为接近。综上, 数值模拟得出的桩底受拉荷载-应变曲线、模型的主要力学性能等与物理模型试验结果较为吻合。数值模拟水平加载应力-应变曲线见图 10。可以得出, 桩数值模型弹性模量为 29.2 GPa, 峰值拉应力为 4.6 MPa。弹性模量与物理试验所得相差仅 1%, 可以认为是吻合的。

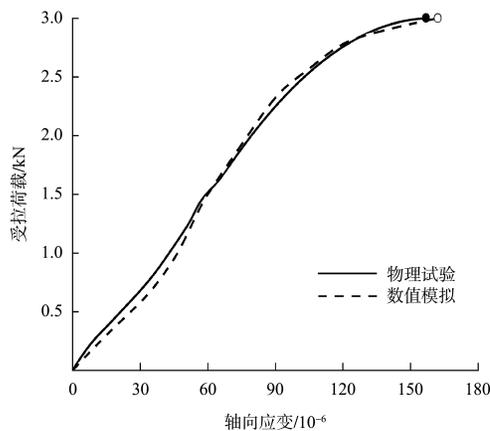


图 9 荷载-应变对比曲线

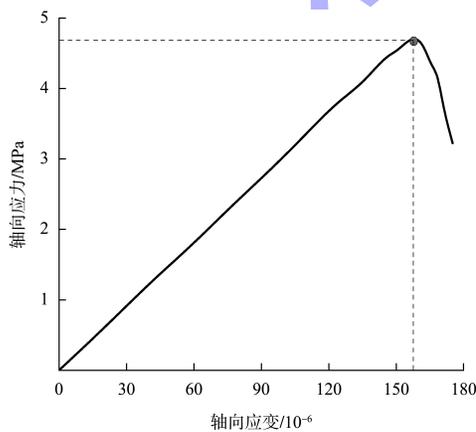


图 10 数值模拟水平加载应力-应变曲线

### 3.2 应变-时步曲线分析

通过将加载时步分级, 通过调试每一级荷载到达稳定所需的时步以达到模拟物理试验中连续

分级加载的效果, 应变-时间步曲线见图 11。将总荷载定为物理试验中施加的最大荷载力, 每一级加载时步定为 cycle5000, 即每 5 000 步荷载大小增加 300 N, 最终模型的应变-时步曲线在加载大小到达 3 000 N 时, 即时间步接近 5 万步时抵达峰值出现骤降, 与物理试验破坏节点相符。

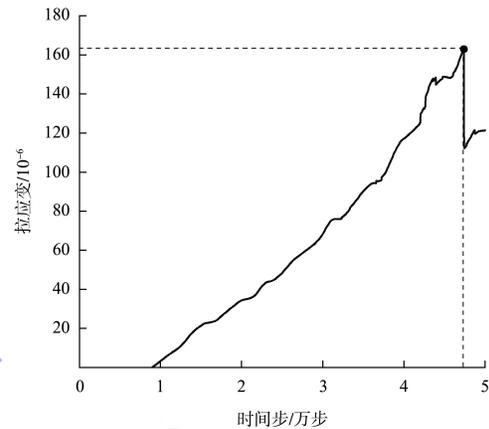


图 11 应变-时步曲线

### 3.3 裂隙圆盘分布

加载完成后共生成 1 944 个裂隙圆盘, 即 1 944 条微裂缝。裂隙主要集中在加载环受力位置、柱体下部钢筋与砂浆交界面、以及柱体露出基础部分的最下部, 见图 12。下部与上部钢筋与砂浆交界面的裂隙为顺筋裂隙, 这是由于钢筋与砂浆的胶结相对较为薄弱, 更容易出现相对滑移从而产生裂隙。整体裂隙的分布符合宏观力学, 与物理试验出现的微裂缝情况较为相似, 破坏形态可以认为是具有宏-细观一致性。

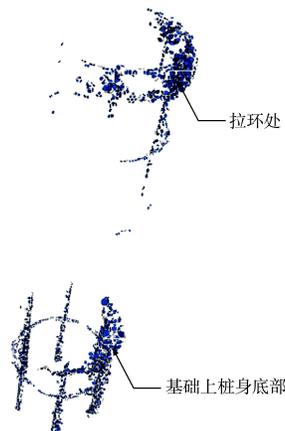


图 12 裂隙圆盘分布

### 4 结论

1) 结合物理试验结果可以得到, 抵达破坏点的峰值拉应变从桩底沿桩身向上递减, 应变随加载过程呈阶梯式变化, 符合实际情况, 因此可以将该试验结果用于后续数值模型的建立与验证。

2) 在建立钢筋混凝土桩颗粒流模型中, 通过使用大量不同参数模拟加载研究验证了 PFC3D 中标定参数流程时细-宏观参数间的大体影响关系, 为优化设计和提高建模精度提供可靠的参考依据。

3) 数值模型分别与宏观尺度对应的桩底受拉荷载-应变曲线、峰值应变对应荷载、弹性模量大小、试验主要裂缝位置进行比较, 均较为吻合, 完成了数值模型的合理性验证。

### 参考文献:

[1] 王多垠, 田建柱. 大水位差架空直立式集装箱码头结构型式研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 139-143.

[2] 刘科. 地震作用下钢筋混凝土柱变形与损伤研究[J]. 震灾防御技术, 2022, 17(3): 579-588.

[3] 陈梦成, 谢力, 刘超, 等. 火灾下矩形钢筋混凝土梁柱温度场的 CA 模拟[J]. 铁道建筑, 2018, 58(5): 44-50.

[4] 陈尚, 蒋欢军. 基于变形的非均匀锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(S1): 1-8.

[5] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large scale movement in blocky rock systems [C]//International Society of Rock Mechanics. Proceedings of Symposium of International Society of Rock

Mechanics. Salzburg: ISRM, 1971: 8-11.

[6] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.

[7] 刘金龙. 碾压混凝土压实过程的 PFC 模拟及压实特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.

[8] SCHLANGEN E, GARBOCZI E J. Fracture simulations of concrete using lattice models: computational aspects [J]. Engineering fracture mechanics, 1997, 57(2/3): 319-332.

[9] 徐海啸. 基于 PFC 的钢筋混凝土梁抗剪承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.

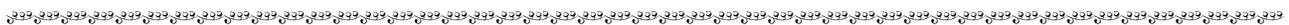
[10] 顾祥林, 付武荣, 汪小林, 等. 混凝土材料与结构破坏过程模拟分析[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 9-17.

[11] YANG B D, JIAO Y, LEI S T. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles [J]. Engineering computations, 2006, 23(5/6): 607-631.

[12] NOHUT S, CEVIK A. Investigation of micro-macroscale interaction of heterogenous materials by a parallel-bonded particle model and introduction of new microparameter determination formulations [J]. International journal for multiscale computational engineering, 2014, 12(1): 1-12.

[13] WANG M, CAO P. Calibrating the micromechanical parameters of the PFC2D (3D) models using the improved simulated annealing algorithm [J]. Mathematical problems in engineering: theory, methods and applications, 2017(5): 1-11.

( 本文编辑 王璁 )



## · 消 息 ·

### 浙江舟山中天重工 3 号码头交工验收

近日, 由中交四航局承建的浙江舟山中天重工 3 号码头项目通过交工验收。

该项目地处长江经济带及长三角一体化战略交汇区, 联系上海、宁波、舟山等国际航运中心城市, 主要建设内容为新建 1 座 30 万吨级舳装码头、2 座引桥及相关配套设施。

该项目的建成, 将进一步加快宁波舟山港航运业发展, 助力打造舟山国际知名现代化船舶工业基地, 有效推进区域产业结构调整 and 经济发展提升。

[https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202409/t20240927\\_216375.html](https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202409/t20240927_216375.html) (2024-09-27)