

# 混凝土预制桩在冲击荷载作用下的破坏机理研究

张亚南<sup>1</sup>, 冯春<sup>2</sup>, 李世海<sup>2</sup>

(1 北京市建筑工程设计有限责任公司, 北京 100055; 2 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**[摘要]** 建立了桩锤系统修正模型并推导冲击荷载修正公式,以基于连续介质力学的离散元方法(CDEM)的计算程序为平台,研究了打桩过程中混凝土预制桩的破坏机理,探讨了冲击荷载的特征和混凝土预制桩的非均匀性对应力波传播过程的影响。研究表明:在一定荷载条件及材料性质下,冲击荷载峰值对桩体受压或受拉破坏的影响有着规律性的变化;给出了基桩在不同支承条件下受冲击荷载作用时间影响的波动响应曲线;给出了混凝土预制桩的非均匀性(包括材料非均匀性和几何非均匀性)对冲击破坏特性的影响。对实际打桩工程有一定参考价值。

**[关键词]** 数值模拟; 桩锤系统; 打桩模型; 冲击荷载; 非均匀性

中图分类号: TU473.1+1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)S1-0876-06

## Destructive mechanism of precast concrete piles under the impact loads

Zhang Yanan<sup>1</sup>, Feng Chun<sup>2</sup>, Li Shihai<sup>2</sup>

(1 Beijing Architectural and Engineering Design Co., Ltd., Beijing 100055, China;

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The pile hammer system model was established and the calculating formula for the impact loads was gained. The platform of continuum media mechanics of discrete element method (CDEM) was used. The failure mechanism of precast concrete piles during pile driving was studied; the relationship between pile dynamic failure property and related influence factors was given. The results show that under the specific load and material properties, the failure of pile has regular changes under the effect of impact load peak value; The wave response curves with the variation of impact load time under different support conditions were given; impact failure characteristics of pile under the effect of non-uniformity of piles was gained. There were reference values for actual piling.

**Keywords:** numerical simulation; pile-hammer system; model of piling; impact load; non-uniformity

## 0 引言

混凝土预制桩在桥梁、码头及高层建筑中广泛使用,但此类桩在施打过程中往往会发生破坏现象,造成了人力、物力、财力的浪费。因此,如何保证在打桩过程中桩不坏是工程界亟待解决的问题。在工程界的做法常常是通过控制打桩应力或控制打桩次数来保证打桩过程中桩不坏。然而,这种做法尚未考虑到其他因素对桩破坏的影响,如冲击荷载的特征和桩体非均匀性的影响等。因此,对混凝土预制桩破坏机理进行研究有重要的工程意义,有利于指导打桩工程的施工过程。

目前国内外专家学者虽然通过理论分析、数值模拟及现场测试等方式对打桩过程中的力学机理做了详细的研究,并提出了CASE法<sup>[1]</sup>、CAPWAP法<sup>[2]</sup>等基于波动理论的分析方法,但其研究目的多是为了研究桩体的可打性、桩基承载力及桩基的完整性检测等,直接研究桩体破坏的却少见报道。

本文拟采用数值模拟技术,运用应力波的理论,

研究在冲击荷载作用下多种因素对打桩破坏的影响,分析打桩过程中混凝土预制桩的破坏机理。

### 1 打桩产生冲击荷载的特征

在打桩的过程中,冲击荷载的产生是第一阶段,要想得到锤击后桩顶的冲击荷载随时间的变化曲线需要先建立打桩解析模型,通过对模型进行推导得到冲击力的理论公式。

#### 1.1 打桩系统模型的建立

桩锤系统主要由桩锤、桩帽、锤垫和桩垫等组成的。St. Venant<sup>[3]</sup>提出的模型用集中质量块表示桩锤,锤垫、桩帽和桩垫均视为桩的一部分,利用波动理论模拟打桩的动力响应。Randolph M F.<sup>[4]</sup>和Koten H V.<sup>[5]</sup>考虑锤与桩不是直接撞击,而是在中间设置具有缓冲的中介物——缓冲垫和桩帽。谢永健、朱合华<sup>[6]</sup>提出一种新的解析模型考虑锤垫的粘弹性和桩垫的弹性,分别用不同的集中质量块表示桩锤、桩帽,用一并联的弹簧、阻尼器表示锤垫,用一弹簧表示桩

作者简介:张亚南,硕士,工程师,Email: yiyang\_de@163.com。

垫,用一阻尼器表示桩,建立平衡方程,利用拉普拉斯变换推导出桩顶位移的解析解。

谢永健、朱合华的模型最全面,最符合实际,但其解析解较复杂,应用不便。因此,本文在谢永健、朱合华模型的基础上,忽略了桩帽质量和桩垫的弹性,从而建立了桩锤系统修正模型,如图 1 所示。

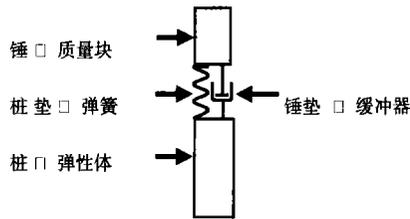


图 1 桩锤系统修正模型

### 1.2 冲击荷载计算公式的推导及简化

应用牛顿第二定律和波动理论得到数学方程,见式(1):

$$\begin{cases} mu''_a + K(u_a - u_b) = 0 \\ Zu'_b + K(u_b - u_a) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

又考虑了阻尼作用,得到平衡方程,见式(2):

$$\begin{cases} mu''_a + K(u_a - u_b) + J(u'_a - u'_b) = 0 \\ Zu'_b + K(u_b - u_a) + J(u'_b - u'_a) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

应用 Matlab 程序求出桩顶的锤击力,见式(3):

$$F(t) = R_5(R_1R_3e^{R_3t} - R_2R_4e^{R_4t}) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{Q_1} + Q_4 \\ R_2 = \sqrt{Q_1} + Q_4 \\ R_3 = Q_2 - Q_3 \\ R_4 = Q_2 + Q_3 \\ R_5 = \frac{V_0m}{2\sqrt{Q_1}} \end{cases} \begin{cases} Q_1 = Z^2J^2 - 2ZJKm + K^2m^2 - 4Z^2Km \\ Q_2 = -\frac{1}{2} \frac{ZJ}{m(Z+J)} - \frac{1}{2} \frac{K}{Z+J} \\ Q_3 = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{Q_1}}{m(Z+J)} \\ Q_4 = Km - ZJ \end{cases}$$

$V_0$ ——锤的初速度(LT<sup>-1</sup>)

$m$ ——锤的质量(M)

$K$ ——桩垫的弹簧常数(MT<sup>-2</sup>)

$J$ ——锤垫的阻尼系数(MT<sup>-1</sup>)

$Z$ ——桩体的波阻抗(MT<sup>-1</sup>)

为了验证修正模型的理论公式的正确性,将理论公式与天津某打桩工程桩顶荷载的现场测试结果进行了对比,其中各参数见表 1:

工程现场结果与理论公式对比参数 表 1

锤初速度 $V_0$ (m/s)	锤质量 $m$ (kg)	桩垫弹簧 常数 $K$ (kg/s <sup>2</sup> )	锤垫阻尼 系数 $J$ (kg/s)	桩体波 阻抗 $Z$ (kg/s)
5.4	$2 \times 10^4$	$3.46 \times 10^9$	$8 \times 10^5$	$5 \times 10^6$

对比曲线如图 2 所示,实线为原始的力与时间关

系曲线,虚线为修正模型的冲击荷载曲线。

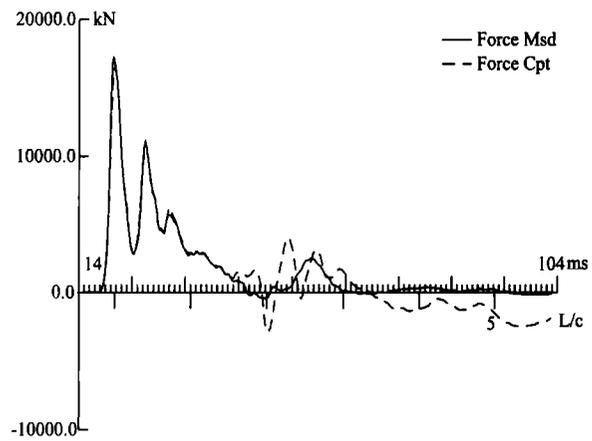


图 2 修正模型理论公式与现场测试对比曲线

对比曲线可知,修正模型理论公式与现场测试结果相符,验证了修正模型的正确性。

由于曲线公式不便于实用计算及曲线所呈图形近似为三角形,因此将锤对桩的作用近似地用三角形荷载表示。如图 3 所示。

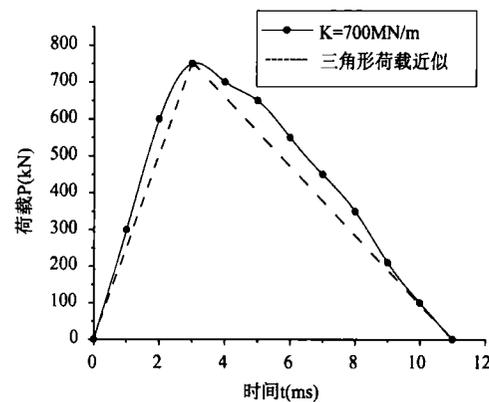


图 3 修正模型曲线公式用三角形荷载近似

若令锤击力峰值为  $F_{max}$ ,上升沿时间为  $t_1$ ,力的持续时间为  $t_2$ ,则可用下式表示锤击力的峰值:

$$F_{max} = R_5(R_1R_3e^{R_3t_1} - R_2R_4e^{R_4t_1}) \quad (4)$$

式中:加载时间  $t_1 = \frac{1}{R_3 - R_4} \ln \frac{R_2R_4}{R_1R_3}$ ,力的持续时

$$间 t_2 = \frac{1}{R_3 - R_4} \ln \frac{R_2R_4}{R_1R_3}。$$

则作用在桩顶的三角形冲击荷载为:

$$F(t) = \begin{cases} F_{max}t/t_1 & (0 \leq t < t_1) \\ F_{max}(t_2 - t)/(t_2 - t_1) & (t_1 \leq t < t_2) \end{cases} \quad (5)$$

据试验资料分析,采用三角形荷载简化桩锤对桩的锤击力,相对误差约为 10%,能满足工程要求。因此,本文中数值模拟所加冲击荷载均为三角形冲击荷载。

## 2 冲击荷载的特征对桩破坏影响

数值模拟采用基于连续介质力学模型的离散元多尺度计算方法(CDEM)<sup>[7]</sup>,CDEM 程序将离散单元法与

有限单元法有机地耦合起来,充分发挥各自的优点。

### 2.1 冲击荷载大小的影响

以打桩工程实际的荷载为基础,一般工程实际打桩时常控制混凝土预制桩体拉应力为 5MPa,压应力为 40MPa,因此本文中荷载变化范围为 5 ~ 40MPa。分析模型如图 4 所示,该模型为截面 40cm × 40cm 的方桩,桩体全长 20m,力学模型的各参数见表 2。

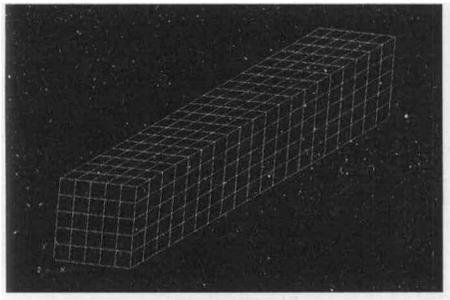


图 4 冲击荷载大小影响的分析模型

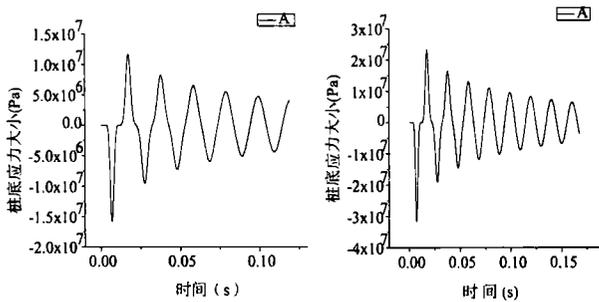
分析模型参数表 表 2

混凝土杨氏模量 Pa	混凝土泊松比	混凝土密度 kg/m <sup>3</sup>	质量阻尼	刚度阻尼
$3.8 \times 10^{10}$	0.30	2500	3.0	$1.0 \times 10^{-4}$

丁科和岳英<sup>[8]</sup>文中提到,基桩在上端自由下端固定的支承条件下在桩身受到一瞬态激振力作用时,入射波在固端发生反射使固端界面处位移为零而应力加倍;基桩在上端自由下端自由的情况下入射波在自由端发生反射,反射波与入射波行进方向相反而导致应力正负号相反,桩体中某处会受到拉应力。由此本文分上端自由、下端固定和上端自由下端自由两种情况考虑。

#### 2.1.1 上端自由下端固定

冲击荷载大小对桩体破坏影响的各曲线(部分)如图 5 所示。



(a) 冲击荷载大小为 10MPa (b) 冲击荷载大小为 20MPa

图 5 桩体下端固定时在各荷载下桩底应力曲线图

取各曲线第一个下跳波的峰值(压应力),得到的数据画出曲线图如图 6 所示。

由图 6 可见,冲击荷载峰值越大桩体受压应力而破坏的可能性越大。这一点在实际打桩工程中很明显成立,该部分数值模拟与工程实际相符合。

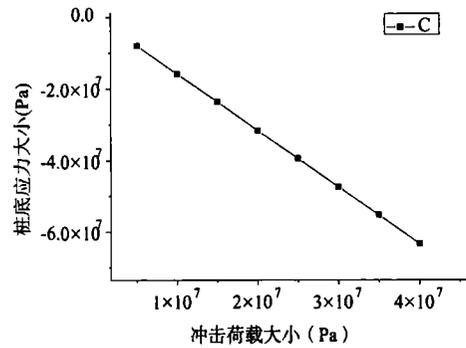
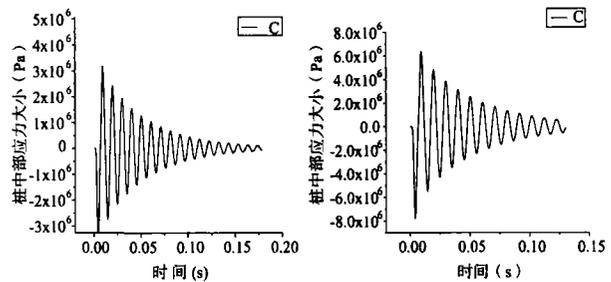


图 6 下端固定桩底应力随冲击荷载变化曲线图

#### 2.1.2 上端自由下端自由

冲击荷载大小对桩体破坏影响的各曲线(部分)如图 7 所示。



(a) 冲击荷载大小为 5MPa (b) 冲击荷载大小为 10MPa

图 7 桩体下端自由时在各荷载下桩中部应力曲线图

取以上各曲线第一个上跳波的峰值(拉应力),得到的数据画出曲线图如图 8 所示。

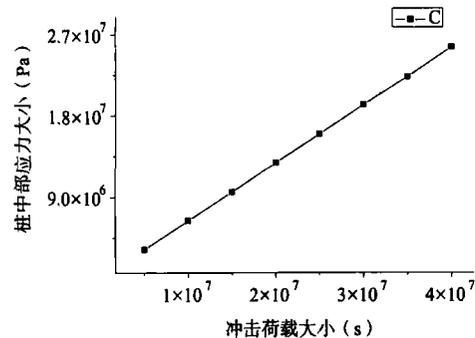


图 8 下端自由桩中部应力随冲击荷载变化曲线图

由图 8 可见,混凝土预制桩桩体下端固定时若不考虑其他因素的影响冲击荷载峰值越大桩体中某处被拉坏的可能性也越大。

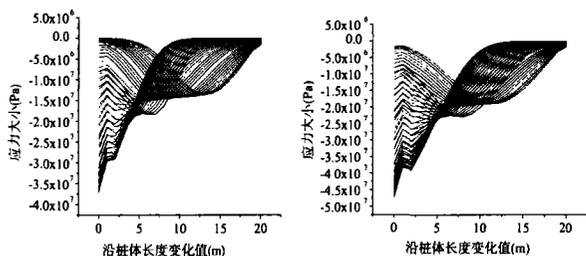
### 2.2 冲击荷载加载时间的影响

一般混凝土波速多在 3000 ~ 4500m/s 的范围内,而本模型尺寸为 40cm × 40cm 方桩,长 20m,则波从桩顶传到桩底约 5ms,考虑这一实际情况,荷载作用时间变化范围在 2.0 ~ 7.5ms 之间。

#### 2.2.1 上端自由下端固定

程序中取 5 ~ 10ms 之间的结果,这是由于考虑到 5ms 之前应力波还未传到桩底,还未产生反射波,而在大于 10ms 的时间范围内桩体中应力波已传播一个来回,再次传播因阻尼影响,最大应力值不会大于第

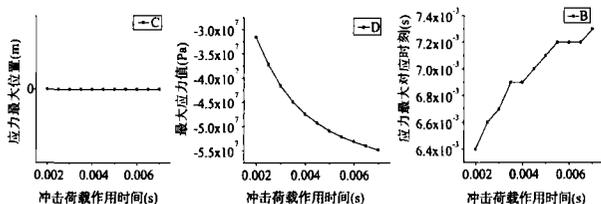
一次传播的数值,因此取 5 ~ 10ms 之间的结果是合理的,应力曲线如图 9 所示。



(a) 荷载作用时间 2.5ms (b) 荷载作用时间 4ms

图 9 桩体下端固定时在各荷载作用时间下应力曲线图

取各曲线图中应力绝对值最大处数据,分别考虑应力最大时位置,数值及时间,得到随冲击荷载作用时间各变化曲线图,如图 10 所示。



(a) 应力最大位置 (b) 应力最大值 (c) 应力最大时刻

图 10 下端固定时各参数随荷载作用时间变化曲线图

由图 10(1)可见,桩体产生压应力最大的位置一直在 0m 处,即易在桩底发生压应力破坏。这是由于当荷载应力波还未传到桩底时应力最大值是应力波的峰值;当应力传到桩底但未传过上升沿的 1/2 时,应力波在固定端同相叠加而使应力增加,但因应力波未过上升沿的 1/2 处,则叠加仍小于原峰值;当应力波传过上升沿的 1/2 而未传过峰值处时,应力叠加大于原峰值;当应力波刚好传到峰值处时,应力叠加结果最大,如图 11 所示,因此应力最大的位置常发生在桩底处。

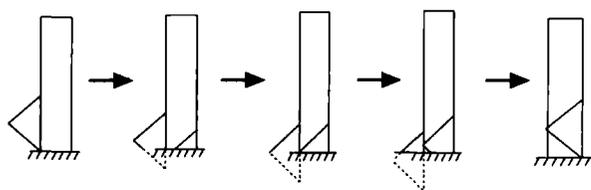
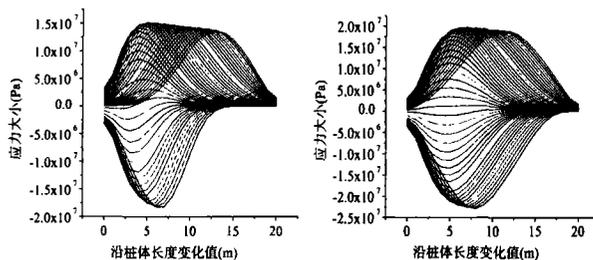


图 11 冲击荷载应力波在下端固定的桩体中的传播过程

由图 10(2)可见,荷载作用时间越长,最大压应力的数值越大。这是由于随着作用时间的增大,冲击荷载的冲量增加,对桩体作用的能量增大,虽然有阻尼作用,但阻尼使应力减小的能力小于冲量增加使应力增加的能力,因此有应力随着冲击荷载作用时间的增大而增大的现象由图 10(3)可见,桩体下端固定时,冲击荷载作用时间越大桩体中出现压应力最大的时间越晚。

### 2.2.2 上端自由下端自由

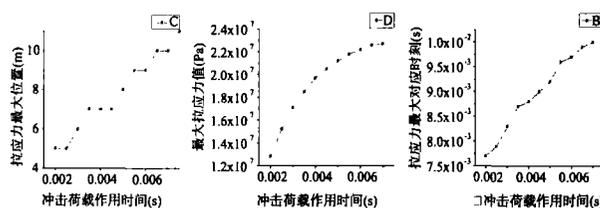
同样取 5ms ~ 10ms 之间的结果,如图 12 所示。



(a) 荷载作用时间 2.5ms (b) 荷载作用时间 4ms

图 12 桩体下端自由时在各荷载作用时间下应力曲线图

取各曲线中拉应力最大处数据,得到桩体下端自由时拉应力最大时位置,数值及时间随冲击荷载作用时间各变化曲线图,如图 13 所示。



(a) 应力最大位置 (b) 应力最大值 (c) 应力最大时刻

图 13 下端自由时拉应力最大位置随荷载作用时间变化曲线

如图 13(1)所示,冲击荷载的作用时间越长桩体中拉应力最大位置越高,桩体发生拉应力破坏的位置越高。这是由于当荷载入射波还未传到桩底时应力最大是入射波的峰值;当入射波传到桩底但未传过峰值时,由于为下端自由,应力波在自由端反相叠加而使应力减小;当入射波传过峰值而反射波的峰值未和入射波的尾端重合时,反射波拉应力峰值仍与入射波压应力重合;当入射波刚好传到使反射波峰值与入射波尾部重合时拉应力最大。因此,当冲击荷载作用时间越长,反射波峰值与入射波尾部重合的位置就越高,如图 14 所示。

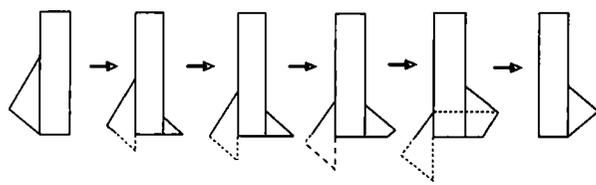


图 14 冲击荷载应力波在下端自由的桩体中的传播过程

如图 13(2)所示,桩体下端自由时,荷载作用时间越长最大拉应力的数值越大,最大拉应力处越容易出现压应力破坏。图 13(3)所示,桩体下端自由时,冲击荷载作用时间越大,桩体中出现拉应力最大的时间越晚。

### 3 混凝土预制桩非均匀性对桩破坏影响

在桩体非均匀处在冲击荷载作用下有可能产生不可预知的应力突变或其他加速混凝土预制桩体破坏的情况。混凝土预制桩的非均匀性包括材料非均

匀性和几何非均匀性。

### 3.1 材料非均匀性

材料的非均匀性包括混凝土本身的非均匀性和钢筋混凝土组成的非均匀性,由于后者较前者的非均匀性程度大,也鉴于已有大量文献对混凝土本身的非均匀性进行研究,因此,本文主要对钢筋和混凝土组成材料的非均匀性进行研究。

考虑通过改变钢筋混凝土桩钢筋个数而桩体尺寸不变来增加桩的配筋率,支承条件均为下端固定,受峰值 30MPa,上升沿时间 1.6ms,加载持续时间 4ms 的冲击荷载。

计算模型如图 15 所示,桩体尺寸为截面  $40 \times 40\text{cm}$  的方桩,桩体全长 20m,钢筋粗 2cm,划分单元为六面体,单元大小为  $0.02\text{m} \times 0.02\text{m} \times 1.0\text{m}$ 。混凝土和钢筋的材料特性见表 3。

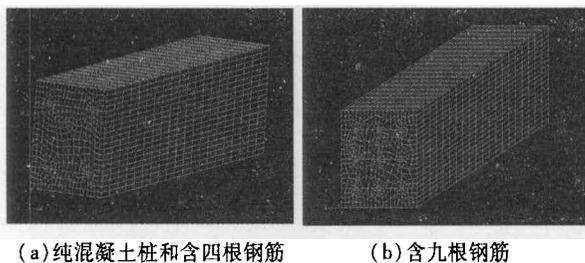


图 15 材料非均匀性影响的力学模型

数值模拟所用混凝土的各参数值 表 3

	杨氏模量 Pa	泊松比	密度 $\text{kg}/\text{m}^3$	质量阻尼	刚度阻尼
混凝土	$3.8 \times 10^{10}$	0.30	2500	3.0	$0.8 \times 10^{-4}$
钢筋	$2.0 \times 10^{11}$	0.25	7800	3.0	$1.0 \times 10^{-4}$

在冲击荷载作用下,通过对力学模型中应力进行监测得到以下各时刻应力图,取某时刻(2ms 时刻)的应力图,如图 16 所示。

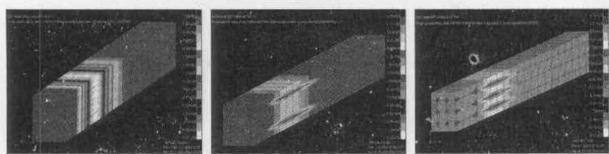


图 16 钢筋混凝土桩在冲击荷载作用下应力图

对不同配筋率桩桩底应力进行监测得到三条曲线图,如图 17 所示,由曲线图得到数据见表 4。

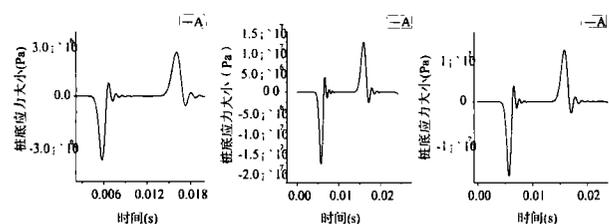


图 17 三种情况的应力曲线对比图

三种情况下的应力曲线对比表 表 4

	纯混凝土	含四根筋	含九根筋
配筋率%	0	0.785	1.766
第一下峰时刻(s)	$5.776 \times 10^{-3}$	$5.711 \times 10^{-3}$	$5.703 \times 10^{-3}$
第一下峰值(MPa)	-3.764	-17.350	-17.761
第一上峰时刻(s)	$1.606 \times 10^{-2}$	$1.590 \times 10^{-2}$	$1.578 \times 10^{-2}$
第一上峰值(MPa)	2.625	12.33	12.52
两峰时差	$1.028 \times 10^{-2}$	$1.019 \times 10^{-2}$	$1.007 \times 10^{-2}$

由表 4 中数据可见,三种情况下第一上峰和下峰的应力值随配筋率的增加而增大,即桩体中最大压(拉)应力随配筋率的增加而增大。此现象可以理解为由钢筋和混凝土的力学性能不同而使钢筋与混凝土不均匀受力,且由于钢筋的强度高、可塑性好等优点使得钢筋承受更多的应力,最大应力集中在钢筋处,因此纯混凝土桩中的最大应力小于钢筋混凝土,可见钢筋混凝土桩的配筋率越高桩体所能承受的应力越大。

两峰时差表示在冲击荷载作用下应力波传播一个来回所用时间,画出曲线图如图 18 所示。

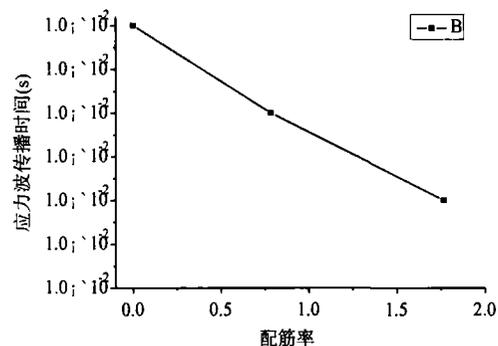


图 18 应力波传播时间随配筋率变化曲线图

由图 18 可知,应力波传播时间随配筋率的增加而减小,即配筋率越高传播时间越短。可见,增加混凝土预制桩中配筋率会提高应力波的传播速度。从材料方面理解,一般钢的传播速度在  $5000\text{m}/\text{s}$  左右,而混凝土的传播速度在  $3000 \sim 4500\text{m}/\text{s}$  范围内,因此加入钢筋会提高应力波在桩体中的传播速度。

### 3.2 几何非均匀性

在实际工程中几何非均匀桩主要为变截面桩,如图 19 所示。

力学模型如图 20 所示,为上端截面  $40 \times 40\text{cm}$  下端截面  $80 \times 80\text{cm}$  的方桩,桩长 20m,在桩长 10m 处截面发生变化,支承条件为下端固定,受峰值 30MPa,上升沿时间 1.6ms,加载时间 4ms 冲击荷载。

应用 CDEM 程序对其施加冲击荷载,得到桩体不同时刻下的各应力图,取某时刻(30ms 时刻)应力图,如图 21 所示。

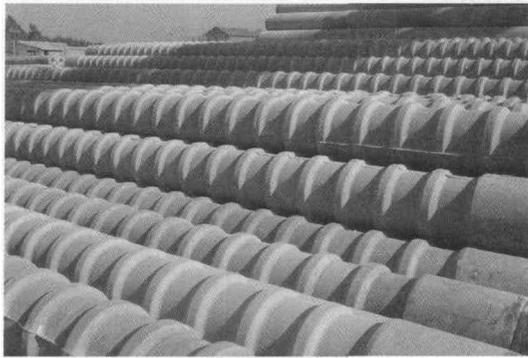


图19 实际工程中的几何非均匀桩

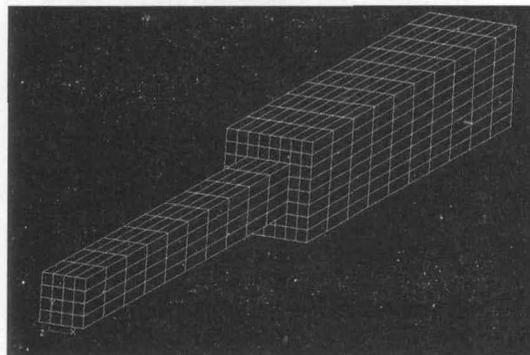


图20 几何非均匀性影响的分析模型混凝土预制

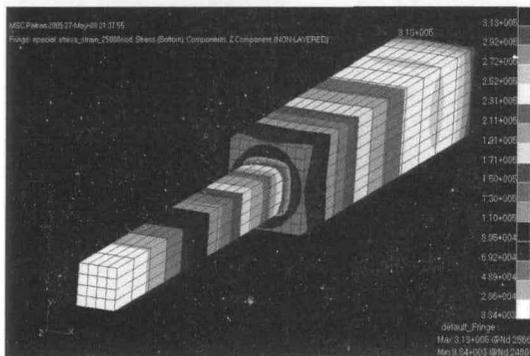


图21 几何非均匀性影响下桩体应力图

由图21可见,桩体下半部分的某些截面位置应力色带的分界线为曲线,即在同一截面处应力大小不同。这是由于在冲击荷载作用下应力波从桩顶向下传播,当传到截面突变处在 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的范围内材料受到沿桩体长度方向向下传播的应力而在 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ 范围外以及 $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ 范围内材料受到的应力是沿着桩体的横截面向外扩散的应力,因此在截面突变处的应力由内向外递减,这样的应力又沿着桩体方向向下传播,从而使桩体下半部分同一横截面上的应力也不相同。

#### 4 结论

采用数值模拟技术,运用应力波的理论,研究了在冲击荷载作用下多种因素(冲击荷载特征、桩非均匀性)对打桩破坏的影响,得到如下结论:

(1)冲击荷载峰值越大桩体中应力(压应力或拉应力)越大,破坏的可能性也越大。

(2)在下端固定的情况下,桩体产生压应力最大的位置一直在桩底处,即易在混凝土预制桩桩底发生压应力破坏;在下端自由的情况下,荷载作用时间越长桩体发生拉应力破坏的位置越高。冲击荷载作用时间越长桩体最大应力值越大,桩体中出现最大应力的时间越晚。

(3)假设钢筋和混凝土间为理想界面,桩体的同一横截面内钢筋处的应力值明显大于周围混凝土的应力值,在钢筋与混凝土的界面处有破坏的可能性。桩配筋率越大,桩体中沿桩长方向的应力分布集中程度越高,应力波在桩体中的传播时间越短。几何非均匀桩体截面面积突然增大处的应力会增大。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘屠梅著. 基桩检测技术与实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] RAUSCHE F, GOBLE GG, LIKINS G. Dynamic determination of pile capacity[J]. J Geotech Eng 1985;111(3):367-83.
- [3] 舒大强,刘刚,熊海华. 粘弹性桩打桩过程中的应力波分析[J]. 岩土力学,2004,25(3):403-406.
- [4] RANDOLPH M F. Analysis of the dynamics of pile driving[A]. In: Banneqee PK, Butterfield R. ed Developments in soil mechanics IV advanced geotechnical analysis[C]. London: London Elsevier Applied Science,1991.
- [5] KOTEN H V. Optimal pile driving[A] In: Proceedings of the 4th international conference on piling and dee Pfoundation, Rotterdam[C] A. A Balkema,1991. 65-68.
- [6] 谢永健,朱合华. 打桩锤击解析模型及垫层材料参数的优化[J]. 同济大学学报,2004,32(7):841-845.
- [7] 李世海,汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3642-3651.
- [8] 丁科,岳英. 应力波在基桩中的传播特性[J]. 振动与冲击,2004,23(3):121-123.