

混凝土桩锤击施工时层裂破坏的有限元分析*

梁冠军, 朱永祥, 尤超, 张伦超
(滁州职业技术学院, 安徽 滁州 239000)

【摘要】对混凝土桩锤击施工时出现的桩身层裂破坏现象进行分析。应用大型有限元计算软件LS-DYNA对混凝土桩在软土地基中锤击施工时的破坏现象进行模拟, 结合一定的理论模型讨论, 分析打桩过程中产生层裂破坏现象的各种影响因素。分析结果表明: 应力波的入射压缩和反射拉伸直接影响桩身裂缝的开展情况。研究结果对混凝土桩的设计、制造与锤击施工有一定的指导作用。

【关键词】混凝土桩; 撞击; 软土地基; 层裂破坏; LS-DYNA

【中图分类号】TU473.1 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2013)02-0034-04

1 引言

桩基础是最广泛应用的深基础形式之一, 在沉桩施工方案选择过程中, 锤击施工法常常被采用。从近二十年的经验看, 锤击沉桩也会出现一些质量病害, 如: 桩顶破碎和桩身裂缝等; 本文针对混凝土桩在软土地基中受冲击荷载作用下的受力性能, 利用有限元模拟的方法来研究混凝土桩的层裂现象, 这对保障人民的生命和财产安全, 社会安定有着重大的经济意义。另外, 本项目的开展可望进一步理解锤击施工时混凝土桩的破坏机理, 根据影响因素的相关性分析, 有效地改善桩身的结构设计和提高其宏观力学性能, 并对锤击沉桩过程提出相应的施工建议。因此, 针对混凝土桩锤击施工的层裂现象研究具有重要的学术意义和潜在的应用价值。

2 理论模型

设刚性锤HM与混凝土桩PE截面尺寸相同, 刚性锤初始速度为 V_0 , 混凝土桩处于静止状态, 桩长为 L , 撞击前的初始应力均为零, 应力波持续时间为 t , 应力波速为 c , 当锤与桩在接触瞬间时($t=0$)应力波开始传递, 一直延续到锤因回弹而离开桩, 应力波在桩身上的分布长度为 ct , 在 $t>L/c$ 后应力波将在桩底产生反射和透射。

混凝土桩层裂指桩顶的能量传递效率相对较大时, 应力波以压力波的形式向桩底传递, 到达桩底后又以压应力和拉应力波向上反射, 当拉应力值超过混凝土抗拉强度时, 桩身就将产生裂缝。在软土地基中施工, 由于周边土体对混凝土桩的侧限较小, 在一维应力波作用下产生的层裂以横缝为主。

忽略体力与撞击温度效应, 假设混凝土桩的控制方程为:

$$\begin{cases} \rho_0 \Delta X = \rho \Delta x = \Delta F \\ 1/\rho = \partial x / \partial F \\ u = \partial x / \partial t \\ \partial u / \partial t = -\partial \sigma_x / (\rho_0 \partial X) \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- t ——持续时间
- X ——拉格朗日坐标
- x ——欧拉坐标
- ρ_0 ——初始密度
- ρ ——当前密度
- u ——质点在 x 方向运动速度
- σ_0 ——纵向压缩应力。

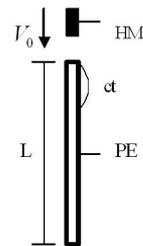


图1 打桩过程及应力波示意图

混凝土本构关系采用等效的K&C混凝土材料模型, 即: LS-DYNA软件中的第72号材料模型)。

K&C混凝土材料模型是美国Karagozian & Case (简称K&C)公司的Malvar, L.J.工程师进行多次改进后提出的。该模型包括三个固定极限面: 弹性极限面、失效极限面和残余强度极限面, 这三个强度破坏面分别对应于混凝土材料应力-应变曲线中屈服阶段、强化阶段及破坏阶段。各强度面在压缩子午面上的强度曲面可以表示为以下的函数关系:

$$\begin{cases} \Delta \sigma_y = a_{0y} + p / (a_{1y} + a_{2y} p) \\ \Delta \sigma_m = a_0 + p / (a_1 + a_2 p) \\ \Delta \sigma_r = p / (a_{1f} + a_{2f} p) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta \sigma_y$ ——等效屈服强度

收稿日期: 2013-05-11

*基金项目: 滁州职业技术学院校本课题(项目编号: YJY-2011-16)。

作者简介: 梁冠军(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构冲击动力学研究。

$\Delta \sigma_m$ ——等效失效强度

$\Delta \sigma_r$ ——等效残余强度

$a_{0y}, a_{1y}, a_{2y}, a_0, a_1, a_2, a_{1f}, a_{2f}, a_{0y}$ ——材料常数

p ——静水压力。

后继屈服面对应的压缩子午线表示为:

$$\text{当 } \lambda \leq \lambda_m \text{ 时 } \Delta \sigma = \eta \Delta \sigma_m + (1 - \eta) \Delta \sigma_y \quad (3)$$

软画面对应的压缩子午线表示为:

$$\text{当 } \lambda > \lambda_m \text{ 时 } \Delta \sigma = \eta \Delta \sigma_m + (1 - \eta) \Delta \sigma_r \quad (4)$$

λ ——损伤变量

λ_m ——损伤转折点

η ——损伤变量 λ 的函数,以数组形式定义。

对于材料轴向拉压时,损伤变量 λ 可表示为:

$$\lambda = \begin{cases} \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{r_f [1 + p/r_f f_f]^{b_1}} & p \geq 0 \\ \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{r_f [1 + p/r_f f_f]^{b_2}} & p < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$d\bar{\varepsilon}_p$ ——等效塑性应变增量

b_1 ——控制压缩软化系数

b_2 ——控制拉伸软化系数

r_f ——单轴强度的应变率效应增强系数。

对于材料在三向等拉作用时,考虑了应变增强效应和应变率增强效应。应变增强效应用体积拉伸损伤增量 $\Delta \lambda$ 表示,

$$\Delta \lambda = b_3 f_d K_d (\varepsilon_v - \varepsilon_{v,y}) \quad (6)$$

式中:

b_3 ——控制体积拉伸软化系数

K_d ——内部系数

ε_v ——拉伸体积应变

$\varepsilon_{v,y}$ ——拉伸屈服点的体积应变

f_d ——将应力路径限制在三向等拉附近的因子。

应变率增强效应主要是调整各极限面强度值,调整公式为:

$$\Delta \sigma_e = r_f \Delta \sigma (p/r_f) \quad (7)$$

$\Delta \sigma_e$ ——各极限面放大后的等效强度。

有了控制方程和K&C混凝土模型,就可以方便的分析出混凝土出现开裂的现象。

3 数值仿真

3.1 几何模型

采用的混凝土桩,截面尺寸为 250mm × 250mm,桩身长度为 20m,采用 8 节点三维实体单元 solid164,混凝土桩局部有限元模型如图 2 所示,单元最小尺寸为 50mm × 50mm × 50mm,沿桩身横截面长宽方向各划分 5 个单元,桩身模型共划分 10000

个单元,考虑到桩身破坏模式下,桩身長细比为 80,所以桩尖竖向位移很小,故桩尖进行竖向位移对称约束。由于打桩位置为软土地基,在桩身层裂破坏模式下,桩身与土壤接触可忽略不计。

为使问题分析过程得以简化,将落锤对桩顶的冲击作用取为三角形脉冲荷载形式,其持续时间为 5ms,在 2.5ms 时荷载达到最大值,荷载-时间历程曲线如图 3 所示。

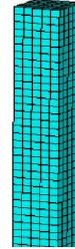


图2 局部有限元模型

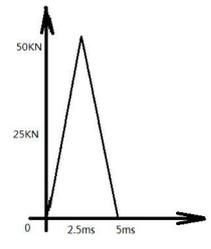


图3 脉冲荷载

3.2 材料参数

混凝土桩模型采用 LS-DYNA 软件里的第 72 号材料,关键字为 *MAT_CONCRETE_DAMAGE, 该材料模型配合状态方程使用,本文采用 8 号状态方程,关键字为 *EOS_TABULATED_COMPACTION, 材料参数如表 1 所示。

表1 混凝土材料参数

| 密度 (kg/m ³) | 弹性模量 (Pa) | 泊松比 | 抗压强度 (Pa) | 抗拉强度 (Pa) |
|----------------------------|--------------|-----|--------------|--------------|
| 2500 | 3.25E10 | 0.2 | 5.52E7 | 5.5E6 |

3.3 破坏模式分析

3.3.1 桩身裂缝开展情况分析

桩锤对桩身施加一次脉冲荷载后,混凝土产生层裂现象,锤击过程中裂缝开展可分为三个阶段:

第一阶段,指脉冲荷载施加在桩顶后应力波到达桩底的过程,这时的应力波主要表现为压缩波, Von mises 平均波速为 3339m/s,总共历时约 5.99ms。

第二阶段,指应力波在桩底界面上进行反射,压缩波衍变为拉伸波,这时的拉伸波与桩顶过来的应力波进行叠加,在桩身某处拉伸应力一旦达到混凝土的破坏应力,则层裂现象就会产生。

第三阶段,指层裂现象产生后,在裂缝面上应力波继续重复前两个阶段的传递,裂缝继续开展,直到拉伸应力小于混凝土破坏应力。

图 4 和图 5 给出了桩身(局部)层裂的透视图和单元网线图,从图中可以清晰的看出随着作用时间的增加,桩身裂缝分层开裂的现象越发明显。

3.3.2 桩身应力情况分析

图 6 给出桩顶从上至下五层单元纵向应力随时间变化情况,可以看出第一层单元最大应力为

32.82MPa, 第五层单元最大应力为 15.63MPa, 从上至下最大应力依次减小, 也说明了脉冲荷载随时间的能量耗散机理。由于第一层单元在强大的脉冲荷载作用下很快达到了混凝土破坏强度值, 在 1.59ms 时进行了“单元杀死”命令, 退出工作。图 7 指出桩底从下至上五层单元纵向应力变化时间历程曲线步调一致, 最大应力约 0.023MPa, 差别不大, 与桩顶最大应力相比, 桩顶应力是桩底的 1427 倍, 可以解释为在桩身压缩变形过程中耗散了很多能量。

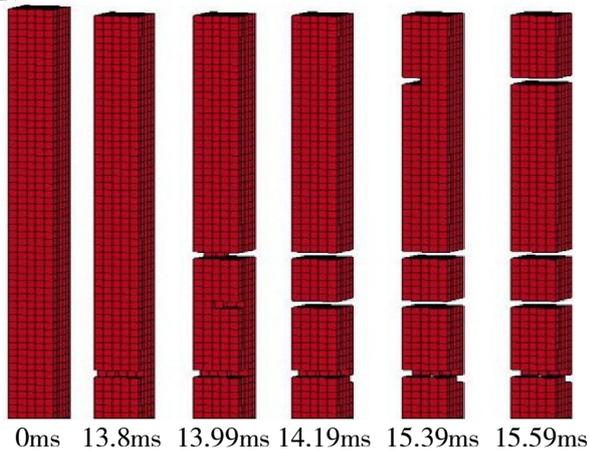


图 4 桩身局部透视图

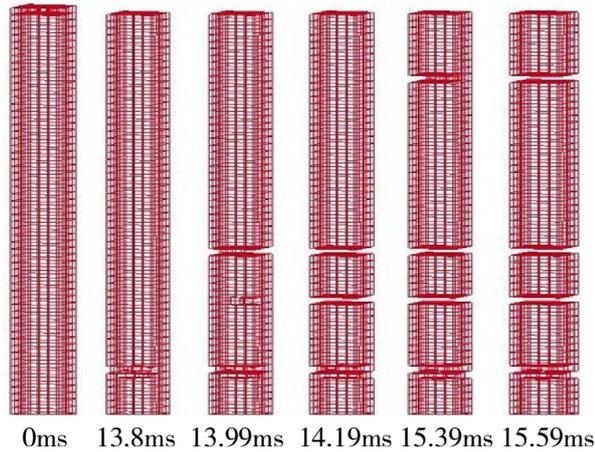


图 5 桩身局部网线图

图 8 是从裂缝附近纵向应力随时间变化曲线, 很显然, 裂缝处应力出现了两次波峰, 是应力波进行反射造成的, 第二次的强度值小于第一次, 同样验证能量耗散和应力波受阻尼而衰减的机理。需要指出的是, 四条裂缝出现的时间间隔不同, 分别相 0.199ms, 0.198ms 及 1.400ms, 这与第一条裂缝出现后, 应力波在裂缝面上进行二次反射, 由于后续断裂桩各段长细比不同, 所以应力波耗时不同, 故

注释及参考文献:

[1]王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,2005.

裂缝开展有不同的时间间隔。

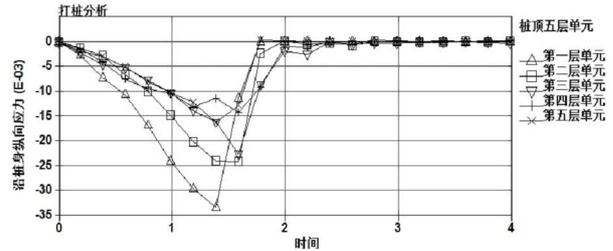


图 6 桩顶五层单元纵向应力时间历程曲线

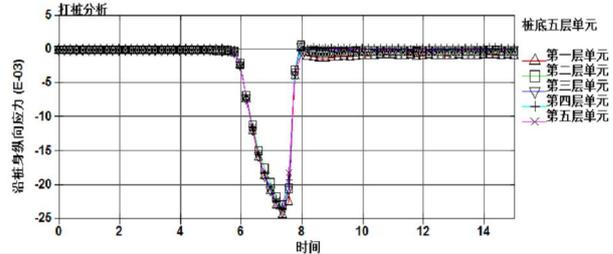


图 7 桩底五层单元纵向应力时间历程曲线

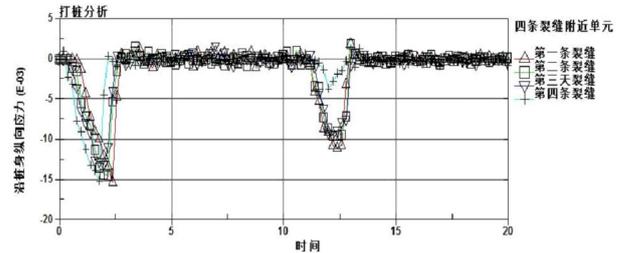


图 8 裂缝附近纵向应力时间历程曲线

4 讨论

在研究混凝土桩锤击施工层裂破坏的问题上, 进行了很多假设, 实际施工中有很多情况与本文不符, 主要表现在以下几个方面:

(1) 本文采用等效的混凝土材料模型描述现场混凝土桩, 必然与实际情况出入很大, 对裂缝的开展情况有很大的影响, 所以笔者接下来的工作是实际的试验数据来描述混凝土的本构关系。

(2) 仿真分析时, 把桩锤撞击桩顶的过程等效为脉冲荷载, 虽然计算过程得到很大的简化, 但是实际操作中, 桩锤质量, 桩锤落距, 桩顶不平, 桩身不直以及桩顶保护层厚度等因素对桩顶破坏模式和桩身裂缝产生很大的影响, 这也是以后工作的重点。

5 结论

本文研究了混凝土桩锤击施工的层裂破坏现象, 通过有限元分析计算, 结果表明: 应力波的人射压缩和反射拉伸直接影响桩身裂缝的开展情况, 研究结果对混凝土桩的设计、制造与锤击施工有一定的指导作用。

- [2]王志亮,臧学义.对软土中锤击贯入桩桩身层裂现象的研究[J].工业建筑,2005(10):36-39.
- [3]孙晓东.常见的锤击桩质量问题及防治措施[J].工程建设与档案,2005(4):277-279.
- [4]王继成,周向阳,刘红梅等.重锤低击和轻锤高击沉桩效果分析[J].人民长江,2011(4):91-94.
- [5]李世民,李晓军.几种常用混凝土动态损伤本构模型评述[J].混凝土,2011(6):19-22.
- [6]张传爱,方秦,陈力.对DYNA3D中K&C混凝土模型的探讨[J].工业建筑,2010(S1):288-292.
- [7]赵海鸥.LS-DYNA动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003.
- [8]LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual[M].Livermore Software Technology Corporation,2003.
- [9]白金泽.LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,2005.

Finite Element Analysis on Spalling Failure of Concrete Pile Impacted by a Hammer

LIANG Guan-jun*, ZHU Yong-xiang, YOU Chao, ZHANG Lun-chao

(Department of Civil Engineering, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou, Anhui 239000)

Abstract: In this paper, it analyzes the phenomenon of spalling failure in the process of concrete pile impacted by a hammer. Based on the LS-DYNA nonlinear program, the dynamical performance of concrete pile into the soft soil foundation impacted by a hammer is simulated. Taking into account the theoretical model, some analysis are conducted to discuss the influence factors of the spalling failure. The analysis results show that the compression and tension of stress wave directly influences pile spalling mode. The research results can provide guidance to the design, manufacturing, and construction of piles.

Key words: Concrete pile; Impact; Soft soil foundation; Spalling failure; LS-DYNA