

DOI: 10.11779/CJGE201701011

锤击荷载作用下大直径钢管群桩的动力特性分析

冯世进^{1,2}, 王 雷¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 上海某机械厂有一大直径钢管桩, 用于所生产柴油打桩锤出厂前的试用。目前试桩已不满足新生产大吨位柴油打桩锤的试打要求, 因此拟增加 8 根短桩与试桩组成群桩。由于锤击荷载作用下长短组合群桩中荷载的分配及沉降的研究较少, 为得到合理的群桩加固型式, 采用有限元方法研究锤击荷载作用下群桩的动力承载特性。首先建立单桩有限元模型, 分析竖向静荷载作用下钢管桩的沉降, 并将模拟结果与现场静荷载试验结果进行对比, 验证有限元模型的准确性, 再分析锤击荷载作用下单桩的动力响应; 其次建立锤击荷载作用下的长短组合群桩有限元模型, 分析承台质量、承台埋深、辅桩桩长对群桩桩顶荷载分布及沉降的影响。结果表明锤击荷载作用过程中, 角桩、边桩桩顶最大压应力较大, 主桩桩顶最大压应力较小; 承台埋深越浅, 群桩桩顶应力越大, 沉降反而越小; 承台质量、辅桩桩长对群桩动力特性影响不大。

关键词: 锤击荷载; 钢管桩; 群桩; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)01 - 0129 - 09

作者简介: 冯世进(1978 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境岩土工程和土动力学。E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn。

Dynamic response analysis of a large-diameter steel tube pile group subjected to hammering loads

FENG Shi-jin^{1,2}, WANG Lei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China, 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A large-diameter steel tube pile is used in a machinery factory in Shanghai to test the new produced diesel pile hammer. However, with the increase of the diesel hammer weight, it fails to meet the test requirements and a pile group is recommended to bear the hammering loads with the help of 8 added short piles. But so far, few people have investigated the displacement and load distribution of combined pile groups subjected to hammering loads. To reasonably design the reinforcement type of the pile group, the finite element method is used to study its dynamic responses. Firstly, a three-dimensional single pile model is established and verified through static load tests. The dynamic responses of the pile group are then simulated to evaluate the effects of the mass and depth of pile cap, the length of short piles on its settlement and load distribution. The results show that the maximum compressive stress of corner piles and edge piles are larger than that at the top of the main pile during the impact of hammering loads. For a shallower pile cap, the stress of the main pile head tends to be larger while the settlement of the main pile is smaller. Additionally, the mass of pile cap and the length of short piles have little effects on the dynamic properties of the pile group.

Key words: hammering load; steel tube pile; pile group; numerical simulation

0 引 言

目前, 超长直径钢管桩由于其沉桩困难, 多采用动力沉桩的方式, 主要依靠柴油打桩锤产生的冲击荷载将桩身打入土层中。现有一根大直径开口钢管桩, 桩长 91 m, 直径 1350 mm, 壁厚 36 mm, 作为上海某机械厂所生产柴油打桩锤出厂前试打的试桩, 以保证柴油打桩锤在出厂后具有良好的工作性能。目前, 随

着出厂柴油打桩锤的吨位越来越大, 试打时钢管桩产生较大的沉降, 不能满足试车基地长期的试打要求。为尽可能提高现有试桩的承载能力, 拟增加 8 根短桩与试桩形成群桩, 以满足出厂大吨位柴油打桩锤的长期试打要求。然而, 目前对于锤击荷载作用下群桩荷载的分配机制及沉降的研究很少^[1], 对锤击荷载作用

下长短组合群桩动力承载特性的研究较少开展。因此,为获得合理的群桩加固型式,需要进一步研究锤击荷载作用下长短组合群桩的动力承载特性。

在以往的研究中,动荷载作用下桩的沉降规律取得一些进展,Xu等^[2]采用数值方法研究简谐荷载作用下分层土体中群桩的沉降机理;Liu等^[3]、Ding等^[4]采用解析方法得到冲击荷载作用下单桩的沉降规律,并用有限元方法进行验证;朱合华等^[5]采用解析算法得到锤击荷载作用下单桩桩顶的作用力。但是,针对锤击荷载作用下的群桩动力问题,由于柴油锤在桩顶产生荷载的大小及作用时间与群桩自身动力特性有关,且存在群桩效应,用解析方法解决此类问题存在较大的局限性。随着计算机的发展,有限元方法得到了迅速的发展及应用^[6-8]。本文在前人相关研究的基础上^[9-13],采用ABAQUS有限元软件建立三维动力有限元模型,研究锤击荷载作用下超长大直径钢管群桩的动力承载特性。首先,建立锤击荷载作用下的单桩模型,并利用现场静荷载试验验证模型的正确性;再建立锤击荷载作用下的群桩加固模型,分析群桩承台质量、埋深和辅桩桩长等因素对群桩动力承载特性的影响,得到了锤击荷载作用下长短组合群桩荷载分配规律和沉降特性,为实际工程提供指导意义。

1 三维有限元模型建立及参数选取

现有钢管桩长91 m,直径为1350 mm,其上部71 m桩身壁厚36 mm,下部20 m桩身壁厚50 mm,两部分焊接而成,地面以上桩长1 m,作为试桩承受柴油打桩锤的冲击荷载,以保证出厂设备具有良好的工作性能。

1.1 模型建立

为研究锤击荷载作用下单桩、群桩的承载特性,采用ABAQUS有限元软件建立三维动力模型,分析不同工况下单桩、群桩的应力及位移变化。锤击荷载作用下,系统某一时刻的动力平衡方程:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为系统的总质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\delta\}$ 分别为节点的加速度、速度和位移向量; $\{F(t)\}$ 为锤击荷载向量。

模型中阻尼采用瑞丽阻尼:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中, α 和 β 均为比例系数。

柴油锤打桩时,应力波在桩身的传播速度:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

式中, E 为钢管桩弹性模量, ρ 为钢管桩密度。

1.2 模型尺寸

由圣维南原理可知,荷载只对一定范围内的土体产生明显的影响,对于超出这一范围的土体影响可以忽略,工程上一般将桩受荷后的影响半径定为 $20R$ (R 为桩半径)^[14]。对于静荷载作用下的主桩模型,其水平范围内的尺寸可取为以主桩轴线为中心,半径12 m的圆;同时由于大直径钢管桩为摩擦型桩,桩底土体对桩承载力的影响较小,因此模型中土层厚度可取为110 m。当主桩模型承受锤击荷载时,由于荷载作用时间较短,桩对周围土体的影响以应力波的形式向外传播,为保证应力波在边界处不发生反射,模型边界采用无限元吸收边界。考虑到锤击荷载作用下单桩、群桩模型的对称性,为提高计算效率,取1/4模型进行数值分析。

1.3 锤击荷载

由于柴油打桩锤在桩顶产生冲击荷载的大小、作用时间与桩体的刚度、桩型等因素有关,因此为了获得准确的冲击荷载,需要对整个打桩的过程进行模拟。现有柴油锤落距为2 m,打桩过程可简化为弹性体以一定速度作用于试桩桩顶,等效冲击速度根据柴油打桩锤提供的参数计算。

等效冲击速度(表1):

$$v_0 = \sqrt{2eE_t/m} \quad (4)$$

式中, e 为柴油锤的效率系数(取为1), E_t 为柴油锤的设计打击能量, m 为质量。

表1 柴油打桩锤等效冲击速度

| 柴油锤质量 /t | 每次打击能量 /(kJ·m ⁻¹) | 等效冲击速度 /(m·s ⁻¹) |
|-------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 35 | 530 | 5.5 |
| 50 | 860 | 5.8 |

1.4 桩、土参数

由于土体强度远远小于桩体,桩-土体系在荷载作用下一般是土体先破坏,而此时钢管桩的桩体仍处在弹性工作阶段,因此数值模型中桩体为均质弹性体。假定土体的塑性行为符合理想弹塑性关系,土体的屈服准则采用Mohr-Coulomb弹塑性模型,土体阻尼采用瑞利阻尼。桩、土界面接触采用罚函数摩擦,切向摩擦系数取为0.3。桩身材料和土层参数分别见表2, 3。

表2 桩体材料参数

| 桩长 /m | 直径 /m | 壁厚/mm | | 弹性模量/GPa | 密度/(kg·m ⁻³) |
|----------|----------|------------|------------|----------|--------------------------|
| | | 上部 71 m | 下部 20 m | | |
| 91 | 1.35 | 36 | 50 | 210 | 7850 |

表 3 土体材料参数

Table 3 Parameters of soils

| 土层 编号 | 层厚 /m | 弹性模量 /MPa | 密度 /(kg·m ⁻³) | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦 角 φ/(°) |
|----------|----------|--------------|------------------------------|--------------|----------------|
| 1 | 1.8 | 8 | 1800 | 5.0 | 10 |
| 2 | 1.3 | 13.9 | 1820 | 14.0 | 19 |
| 3 | 5.3 | 11.1 | 1810 | 14.0 | 17 |
| 4 | 7.0 | 10.9 | 1760 | 11.5 | 13 |
| 5 | 5.0 | 27.9 | 2010 | 41.0 | 21 |
| 6 | 9.5 | 44.3 | 1930 | 4.3 | 35 |
| 7 | 12.9 | 21.6 | 1910 | 11.0 | 30 |
| 8 | 21.8 | 46.1 | 1920 | 4.0 | 36 |
| 9 | 15.2 | 48.4 | 1910 | 3.0 | 35 |
| 10 | 11.9 | 21.6 | 1930 | 23.0 | 21 |
| 11 | 3.5 | 29.4 | 2040 | 43.0 | 20 |

1.5 网格划分及边界条件设置

钢管桩网格采用结构化网格, 网格划分较细; 土体网格采用扫掠网格, 以主桩轴向向周围渐变放射, 靠近轴线的土体网格密, 远端的网格疏, 这样既能保证模型中桩、土接触模拟的准确性, 也能提高模型计算效率。三维有限元模型网格最小尺寸为 0.01 m, 单元总数约为 41 万。

单桩的静力三维有限元模型底部边界为固定边界, 周围土体边界为水平方向约束边界; 单桩、群桩动力三维有限元模型的底部和周围土体均采用无限元边界, 模拟冲击荷载作用下应力波在土体中的传播与耗散, 避免边界处应力波的反射。

2 单桩受力特性分析

首先建立单桩三维有限元模型, 分析大吨位锤击荷载作用下试桩的动力响应, 模型如图 1 所示。为验证模型参数选取的准确性, 在试桩顶部施加 4000 kN 静荷载计算单桩的沉降, 并将模型计算结果与现场静荷载试验结果进行对比。如图 2 所示, 在 4000 kN 静荷载作用下, 桩顶最终沉降值约为 6.66 mm, 数值模型计算结果与静荷载试验结果相吻合, 说明了数值模型参数选取的合理性。

在桩顶施加锤击荷载, 分析不同吨位锤击荷载作用下单桩的动力响应。锤击荷载作用下单桩的动力响应如图 3 所示, 锤击荷载作用下桩顶应力急剧增大到峰值, 随着柴油锤与桩顶的相互作用, 两者产生相对位移, 桩顶应力逐渐减小, 最后两者脱离, 桩顶应力减小为零; 桩顶位移随着柴油锤的作用先急剧增加, 随后锤与桩顶产生相对位移, 桩顶位移迅速下降, 锤与桩顶脱离后, 桩顶位移小幅波动并最终稳定在较低

水平, 这是由于锤击荷载作用过程中对单桩产生的能量主要被桩和土体所吸收, 残余位移主要由桩身的压缩及桩整体位移引起。35 t 锤击荷载作用下, 桩顶最大应力为 236.8 MPa (压应力取正值), 作用时间为 21 ms, 桩顶最大位移为 24.5 mm; 50 t 锤击荷载作用下, 桩顶最大应力为 251 MPa, 作用时间为 29 ms, 桩顶最大位移为 61 mm。锤击荷载分别为 35 t 和 50 t 时, 试桩桩顶的最大应力相差不大, 但是后者对桩顶作用时间较长, 并且在应力下降期, 相同作用时间内对桩身产生的能量也远大于前者, 因此 50 t 锤击荷载作用过程中对桩顶产生的最大位移及残余变形均远大于 35 t 锤击荷载。

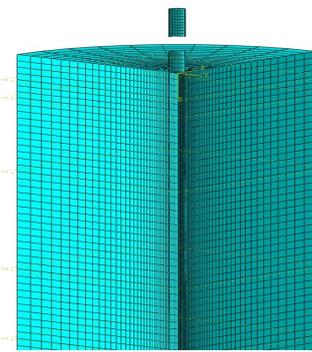


图 1 单桩有限元模型

Fig. 1 Finite element model for tube pile

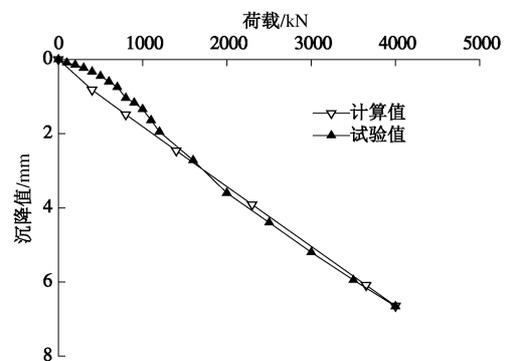


图 2 静荷载作用下单桩沉降曲线

Fig. 2 Settlements of pile under dead loads

将模型计算结果与常用的锤击荷载作用下钢管桩桩顶最大轴向压应力计公式^[14]计算结果对比, 如表 4 所示。

桩顶最大轴向压应力:

$$\sigma_h = 18\sqrt{h_e} \quad (5)$$

$$h_e = v_0^2 / (2g) \quad (6)$$

式中, h_e 为等代落距, v_0 为落锤冲击速度。

由表 4 可以看出, 模型结果与公式计算结果比较接近, 说明了动力模型结果的准确性。

图 4 为 50 t 锤击荷载作用过程中单桩桩身应力

图。由图可以看出，锤击荷载作用下应力波在桩身的传播过程。桩身应力峰值随着深度的增加而减小，当应力波传到桩底，由于波的反射引起上部桩身应力的波动，并最终趋于稳定。

表 4 不同吨位柴油锤打桩时桩顶最大压应力

| Table 4 Peak stresses of pile top under hammering loads | | |
|---|--------|----------|
| 柴油锤质量/t | 计算/MPa | 模型结果/MPa |
| 35 | 223.8 | 236 |
| 50 | 238.5 | 251 |

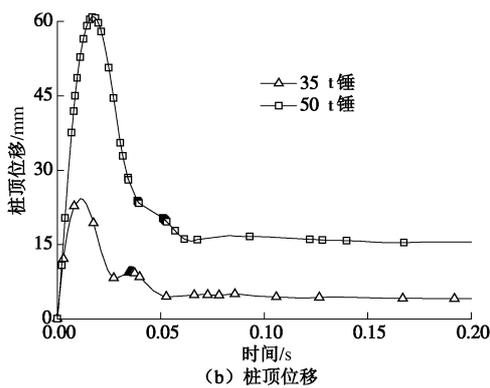
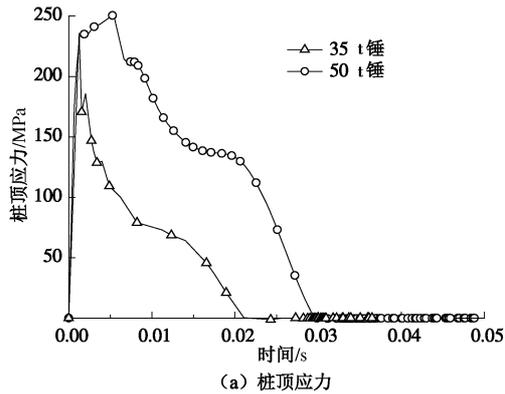


图 3 锤击荷载作用下单桩的桩顶应力及位移

Fig. 3 Stresses and displacements of pile top under hammering loads

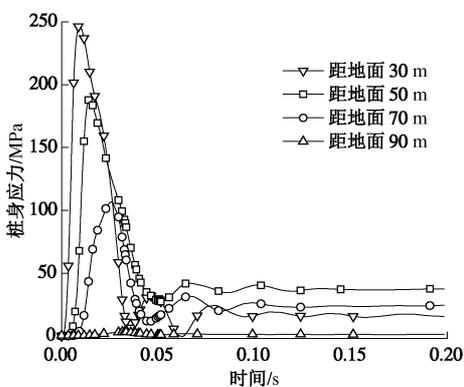


图 4 50 t 锤击荷载作用下单桩桩身应力

Fig. 4 Stresses of tube pile under hammering loads of 50 t

由上述分析可知，50 t 锤击荷载作用下桩顶产生

的最大位移为 61 mm，而柴油打桩锤试桩时要求桩顶最大沉降不超过 50 mm，因此拟增加 8 根短桩对单桩进行加固，形成以单桩为主桩，8 根短桩为辅桩的群桩，以满足出厂柴油打桩锤的试打要求。由于目前对锤击荷载作用下长短组合群桩的研究较少，为了得到更合理的群桩加固型式，需要建立群桩有限元模型，分析辅桩桩长及承台埋深等因素对群桩动力特性的影响。

3 锤击荷载作用下群桩受力特性分析

3.1 锤击荷载作用下群桩受力

在单桩模型的基础上，建立锤击荷载作用下的群桩模型，分析锤击荷载作用下上部主桩桩顶位移及群桩中各桩荷载分配规律。群桩承台为刚性承台，厚 0.5 m，质量 11.25 t，承台以下为下部主桩及辅桩，承台以上为主桩，其桩顶承受锤击荷载。辅桩布置如图 5 所示，主桩桩径 $R=675$ mm， r 为辅桩桩径， d 为辅桩间距。图 6 为承台埋深 10 m 时的群桩模型，辅桩为 $\Phi 609$ 钢管桩，材料与主桩相同，桩长 $l=30$ m，壁厚 $t=16$ mm，桩距 $d=2.3$ m。

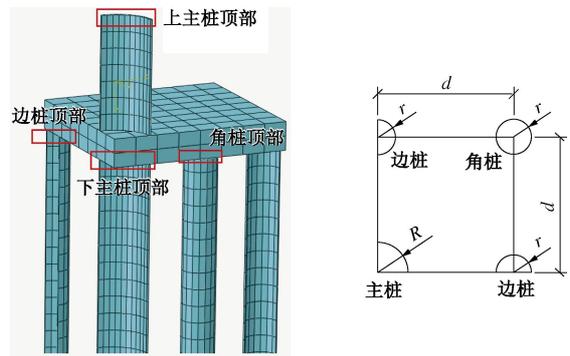


图 5 群桩桩位布置图

Fig. 5 Position of pile group



图 6 群桩有限元模型

Fig. 6 Finite element model for pile group

图 7 为锤击荷载作用下群桩中主桩顶部的动力响

应曲线。由图 7 (a) 可知, 锤击荷载作用时, 上部主桩桩顶应力快速增大, 随后应力传播到承台并在群桩中分配, 群桩中各桩顶应力的波动并迅速达到峰值; 随着桩与锤的相对位移, 桩顶应力逐渐减小, 最后锤与桩脱离, 桩顶应力减小为零。50 t 锤击荷载作用过程中, 桩顶最大应力为 300 MPa, 荷载作用时间为 16 ms, 柴油锤吨位越大, 荷载作用桩顶时间越长。由图 7 (b) 可知, 锤击荷载作用过程中, 上部主桩桩顶位移先逐渐增大到峰值, 随后逐渐减小, 经过小幅度的波动后趋于稳定。50 t 锤击荷载作用下, 桩顶最大位移为 22 mm, 稳定后残余变形约为 2 mm。对比不同吨位锤击荷载作用过程中上部主桩桩顶位移曲线可以看出, 荷载越大对桩顶位移峰值影响越大, 但对稳定后桩顶位移影响较小。

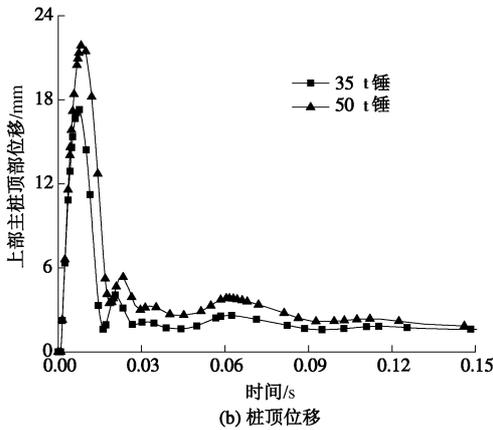
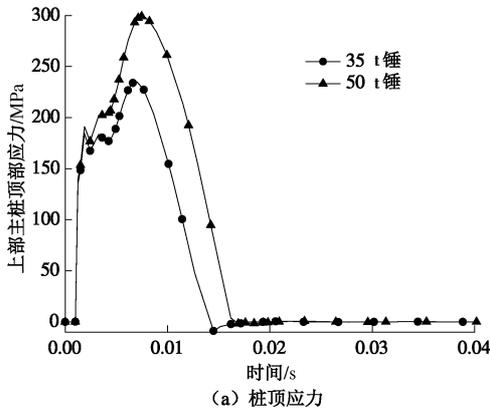


图 7 锤击荷载作用下上部主桩的桩顶应力及位移

Fig. 7 Stresses and displacements of pile top under hammering loads

图 8 为 50 t 锤击荷载作用下群桩中各桩桩顶受力曲线。可以发现, 荷载作用下桩顶应力均快速增加并减小, 在小幅波动后趋于稳定。群桩承台下角桩、边桩桩顶最大压应力为 78 MPa, 承台下主桩桩顶最大压应力为 66 MPa, 因此主桩桩顶轴力为 2452 kN, 角桩和边桩承担的力均约为 2325 kN。可以看出, 角桩、边桩与主桩各约分担三分之一的荷载, 因此承台埋深

10 m 时群桩加固并不能完全发挥主桩的承载能力。

图 9 为 50 t 锤击荷载作用下群桩中各桩桩身应力曲线。由图 9 (a) 可知, 随着桩的深度逐渐增加, 桩身应力峰值逐渐减小, 反映了打桩过程中应力波在桩身的传播与耗散, 桩底应力逐渐增加并趋于稳定。图 9 (b) 和图 9 (c) 反映了角桩、边桩桩身应力变化, 两者应力变化规律相近, 均随着深度的增加, 桩身应力峰值减小。同时可以看出, 锤击荷载作用下, 角桩、边桩桩身均出现拉应力, 这是由于荷载的作用时间很短, 群桩短时间无法吸收锤击荷载产生的能量, 由于土体的阻尼、群桩效应等因素造成刚性承台出现小幅波动, 从而导致群桩中拉应力的出现。

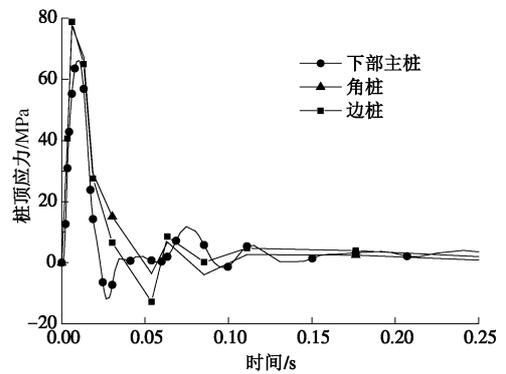
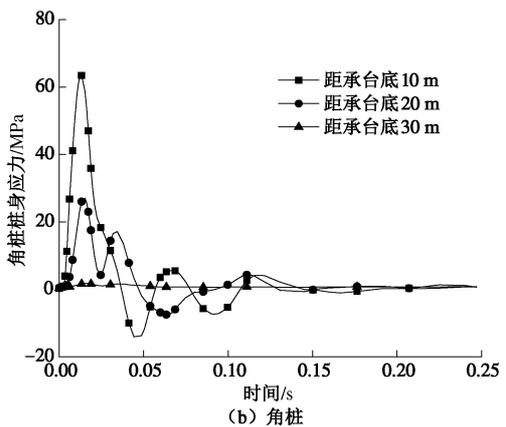
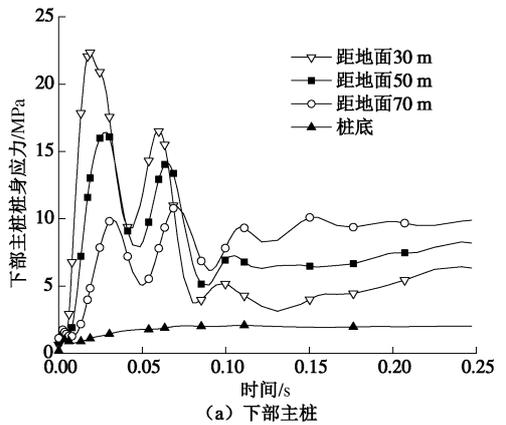


图 8 50 t 锤击荷载作用下群桩中各桩桩顶受力曲线

Fig. 8 Load distribution between pile group under hammering loads of 50 t



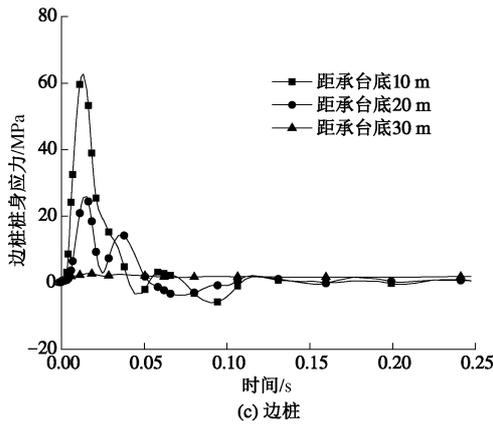


图9 50 t 锤击荷载作用下群桩中各桩桩身应力曲线

Fig. 9 Stresses of pile group under hammering loads of 50 t

3.2 群桩承台质量的影响

为分析承台质量对群桩动力响应的影响，建立有限元模型，承台质量分别取 11.25, 22.5 t，锤击荷载为 50 t，其他参数不变，模型示意图如图 6 所示。

图 10 为承台质量对上部主桩动力响应的影响。锤击荷载作用下，承台质量为 11.25, 22.5 t 时，承台上部主桩桩顶最大应力分别为 300, 307 MPa，上部主桩桩顶最大位移分别为 66, 67 mm，并且桩顶应力及桩顶位移变化规律基本一致。因此随着承台质量的增大，上部主桩桩顶最大应力和最大位移略有增加，但是承台质量对锤击荷载作用下上部主桩的动力响应影响不大。

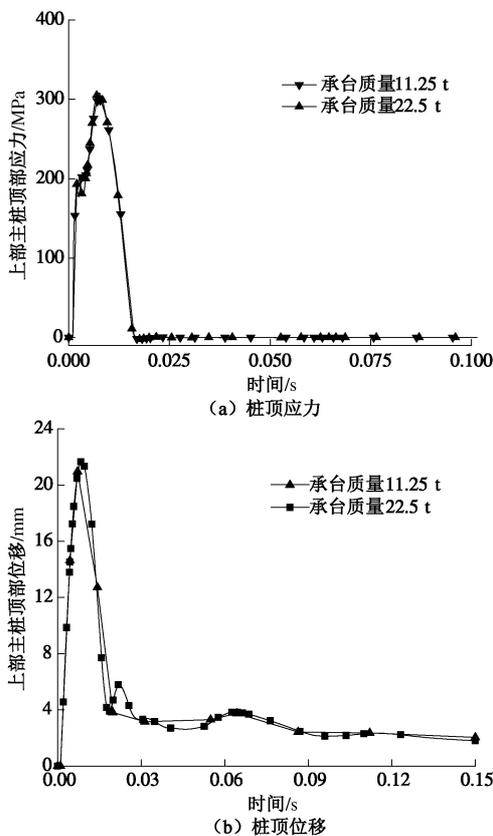


图 10 承台质量对上部主桩桩顶应力及位移的影响

Fig. 10 Effects of mass of cap on stresses and displacements of upper main pile top

图 11 为锤击荷载作用过程中承台质量分别为 11.25, 22.5 t 时，群桩承台下各桩桩顶应力分布图。可以看出，50 t 锤击荷载作用下，承台质量对承台下各桩桩顶应力峰值影响不大；不同承台质量时，下部主桩桩顶荷载变化规律基本一致，边桩和角桩桩顶荷载变化规律虽略有不同，但整体趋势基本一致。

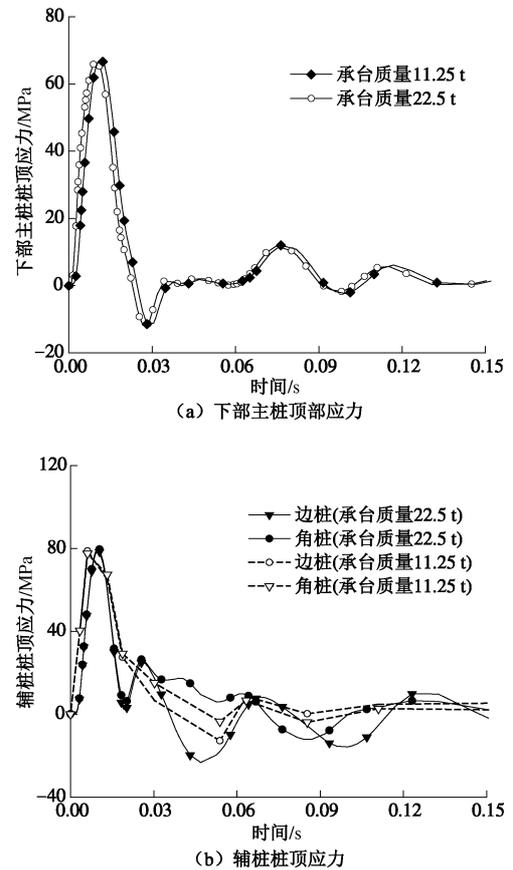


图 11 承台质量对下部主桩和辅桩顶部应力的影响

Fig. 11 Effects of mass of cap on stresses of lower main pile and accessory pile top

综上所述，锤击荷载作用下，承台质量对群桩的动力响应影响不大，后文中承台质量均取为 11.25 t，承台厚度为 0.5 m。

3.3 桩承台埋深的影响

为分析承台埋深对群桩动力响应的影响，建立有限元模型，承台埋深分别取 1, 10 m，锤击荷载为 50 t，其他参数不变，计算模型与图 6 类似。

图 12 为承台埋深对上部主桩动力响应的影响。锤击荷载作用下，承台埋深 1 m 时，承台上部主桩桩顶最大应力为 517 MPa，荷载作用时间为 8 ms；当承台埋深 10 m 时，主桩桩顶最大应力为 300 MPa，荷载作用时间为 18.5 ms，承台埋深对于桩顶最大应力以及荷载作用时间有显著影响。这是由于承台埋深 1 m 时，上部主桩桩顶产生的应力在较短时间内急剧增大到峰值，导致桩锤过早脱离，因此对群桩的动力响应影响

较大。由图 12 (b) 可知, 锤击荷载作用过程中, 承台埋深 10 m 时, 桩顶最大位移为 21.5 mm, 承台埋深 1 m 时, 桩顶最大位移为 11.1 mm。锤击荷载作用后, 承台埋深 1 m 时桩顶位移大于承台埋深 10 m 时的桩顶位移。可以发现, 承台埋深 1 m 时, 桩顶应力较大, 荷载作用时间较短, 对群桩产生的能量较小并且能量在群桩中充分传播之前就过早消散, 因此上部主桩桩顶位移较小。

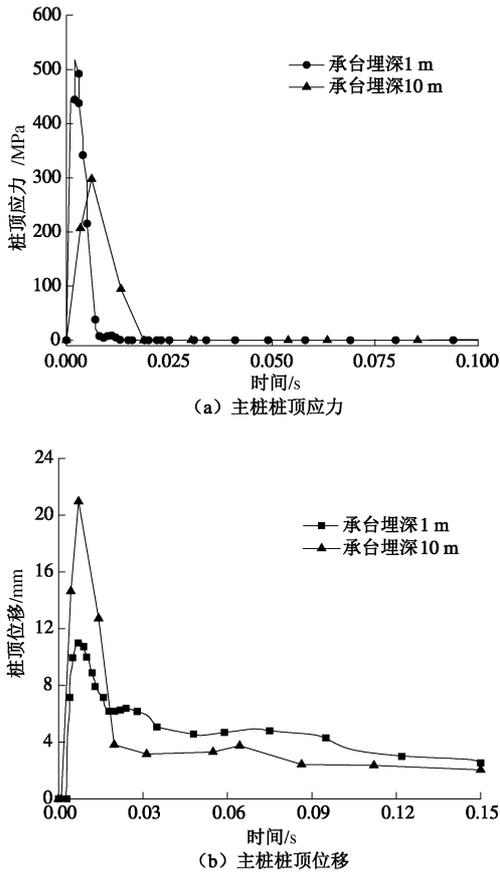


图 12 承台埋深对上部主桩桩顶应力及位移的影响

Fig. 12 Effects of depth of cap on stresses and displacements of main pile top

图 13 为锤击荷载作用过程中承台埋深分别为 1 m 和 10 m 时, 群桩承台下各桩桩顶应力分布图。可以看出, 50 t 锤击荷载作用下, 承台埋深 1 m 时群桩中各桩顶部应力均大于群桩承台埋深 10 m 时各桩顶部应力; 承台埋深相同时, 群桩承台下角桩、边桩桩顶最大压应力较大, 下部主桩桩顶最大压应力较小。同时可以发现, 锤击荷载作用下角桩和边桩的动力响应规律相近, 这是由于模型中假定承台能够满足强度和刚度要求, 将承台设为刚体, 且两者几何参数、力学参数一致, 因此锤击荷载作用下两者承载特性差别不大, 后文仅分析锤击荷载作用下角桩的动力响应。

3.4 辅桩桩长的影响

为了分析辅桩桩长对群桩动力承载特性的影响,

建立有限元模型, 锤击荷载为 50 t, 承台埋深 1 m, 辅桩桩长分别取为 20, 30, 40 m, 其他参数不变。图 14 为辅桩桩长对上部主桩动力响应的影响。可以发现, 辅桩桩长对上部主桩桩顶应力峰值、位移峰值影响不大。由图 14 (a) 可知, 锤击荷载作用过程中, 上部主桩桩顶应力快速增大, 随后桩顶应力逐渐减小到零; 辅桩桩长越长, 上部主桩顶部应力峰值越小, 荷载作用时间越长, 但是辅桩桩长的变化对上部主桩动力响应的影响程度有限。

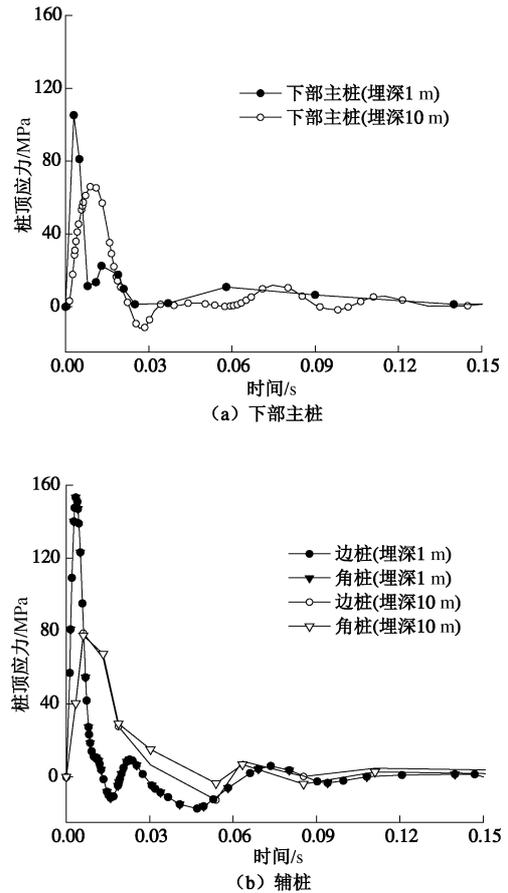


图 13 承台埋深对下部主桩辅桩桩顶应力的影响

Fig. 13 Effects of depth of cap on stresses of lower main pile and accessory pile top

由图 14 (b) 可知, 锤击荷载作用过程中, 主桩顶部位移先急剧增大, 后逐渐减小, 辅桩桩长对主桩顶部位移最大值影响不大, 位移最大值为 11.1 mm。辅桩长度较短时, 主桩顶部应力消散后桩顶位移有明显的回弹现象, 这是由于辅桩长度短, 锤击荷载作用时不能有效的吸收上部主桩传递的能量, 从而引起一定量的回弹。桩长增加到 40 m 时, 回弹现象基本消失。

由图 15 可知, 角桩承担的应力大于下部主桩, 辅桩长度对群桩承台下各桩顶部应力峰值影响较小。在

单桩顶部应力消散后，下部主桩桩顶、辅桩桩顶均出现一定的应力波动现象；辅桩桩长越短，应力波动值越大，并且下部主桩桩顶应力为压应力，辅桩桩顶应力为拉应力。这是由于锤击荷载作用过程中，群桩刚性承台使主桩和辅桩产生的位移相同，而主桩较长，荷载作用后承台下主桩桩顶产生的回弹位移较大，因此顶部出现压应力，而在主桩与承台的作用下，辅桩桩顶产生拉应力。

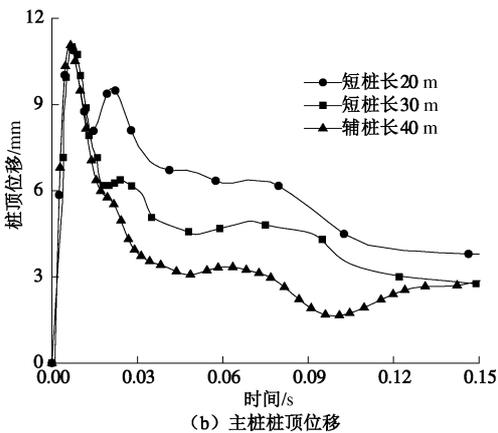
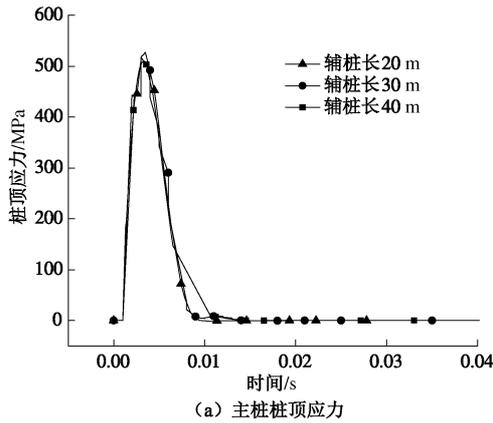


图 14 辅桩桩长对上部主桩桩顶应力及位移的影响
Fig. 14 Effects of length of short pile on stresses and displacements of main pile top

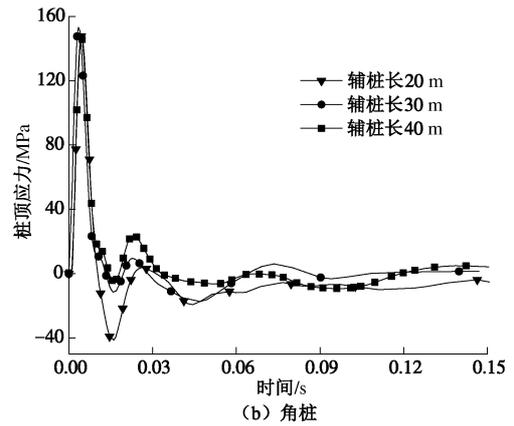
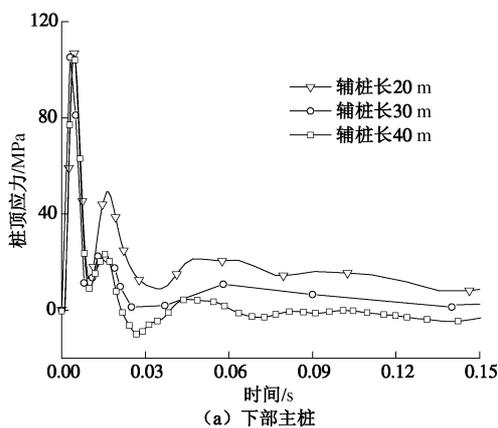


图 15 辅桩桩长对下部主桩及角桩桩顶应力的影响
Fig. 15 Effect of length of short pile on stresses of lower main pile and corner pile top

4 结论与建议

本文建立锤击荷载作用下单桩及群桩三维有限元模型，研究了不同吨位锤击荷载作用下单桩及长短组合群桩的动力特性。研究表明 50 t 锤击荷载作用过程中，单桩桩顶的最大位移不满足使用要求，这与实际工程中遇到的问题相一致。采用群桩加固时，承台的埋深对锤击荷载作用下群桩的动力承载特性有至关重要的影响。承台质量、辅桩桩长对于群桩动力承台特性影响较小，但是增加辅桩长度有利于对锤击荷载能量的吸收。经参数分析，建议群桩加固型式：承台质量 11.25 t，承台厚度 0.5 m，承台埋深 1 m，辅桩桩长 40 m，桩距 2.3 m。50 t 锤击荷载作用过程中，桩顶最大位移为 11 mm，满足大吨位柴油打桩锤试桩要求，并且承台浅埋更有利于降低工程造价，方便承台连接节点等薄弱环节后期的维护。

(1) 锤击荷载作用下，主桩较长，辅桩较短时，长短组合群桩中角桩、边桩桩顶最大压应力较大，主桩桩顶最大压应力较小。

(2) 锤击荷载作用下，群桩承台埋深对群桩受力性能影响显著。承台埋置越浅，锤击荷载作用过程中主桩顶部应力越大，桩顶峰值位移越小，稳定后桩顶位移越大，群桩承台下各桩顶应力越大，且角桩和主桩桩顶应力差别越大。

(3) 锤击荷载作用下，承台质量、辅桩桩长对于主桩顶部应力和位移最大值影响很小，但是对于锤击荷载作用后主桩顶部位移及承台下各桩应力的变化影响较大。

参考文献:

[1] 蒯行成, 任毕乔. 动荷载作用下群桩桩顶的荷载分布[J].

- 湖南大学学报(自然科学版), 2002, **29**(4): 55 - 59. (KUAI Xing-cheng, REN Bi-qiao. Load distribution at the pile tops in pile groups under dynamic loads[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2002, **29**(4): 55 - 59. (in Chinese))
- [2] XU B, LU J, WANG J. Dynamic responses of pile groups embedded in a layered poroelastic half-space to harmonic axial loads[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2011, **133**(2): 1 - 10.
- [3] LIU H L, ZHENG C J, DING X M, et al. Vertical dynamic response of a pipe pile in saturated soil layer[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **61**: 57 - 66.
- [4] DING X M, LIU H L, KONG G Q, et al. Time-domain analysis of velocity waves in a pipe pile due to a transient point load[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **58**: 101 - 116.
- [5] 朱合华, 谢永健, 王怀忠. 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(自然科学版), 2004, **32**(7): 841 - 845. (ZHU He-hua, XIE Yong-jian, WANG Huai-zhong. Analytical solution for pile hammer impact and application of optimum design technique for determining cushion parameters[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, **32**(7): 841 - 845. (in Chinese))
- [6] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 某大型哑铃型承台群桩基础与土体共同作用竖向承载变形特性数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1129 - 1135. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Numerical analysis of interaction between group piles and dumbbell shaped cap in a super large bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1129 - 1135. (in Chinese))
- [7] 蒯行成, 田建华. 低承台群桩动力阻抗的有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, **31**(4): 55 - 59. (KUAI Xing-cheng, TIAN Jian-hua. Finite element analysis of dynamic impedances of pile groups with embedded caps[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2004, **31**(4): 55 - 59. (in Chinese))
- [8] 左殿军, 陈 龙, 田志伟, 等. 双向循环荷载作用下码头群桩基础受力特性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 51 - 55. (ZUO Dian-jun, CHEN Long, TIAN Zhi-wei, et al. Numerical study on mechanical characteristics of pile groups of wharf foundation under lateral and vertical cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 51 - 55. (in Chinese))
- [9] 邢皓枫, 李浩铭, 安 新, 等. 超大直径嵌岩桩受力特性的数值模拟及其规律性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 1126 - 1129. (XING Hao-feng, LI Hao-ming, AN Xin, et al. Numerical simulation and analysis of mechanical characteristics for large-diameter rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 1126 - 1129. (in Chinese))
- [10] 谢 涛, 袁文忠, 朱 明. 竖向荷载下超大群桩受力变形分析[J]. 西南交通大学学报, 2002, **27**(4): 377 - 381. (XIE Tao, YUAN Wen-zhong, ZHU Ming. The deformation behavior of super-large pile group under vertical load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, **27**(4): 377 - 381. (in Chinese))
- [11] 熊 辉, 邹银生, 蒋建国. 基于上下部共同作用的群桩动力优化设计[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(5): 590 - 594. (XIONG Hui, ZOU Yin-sheng, JIANG Jian-guo. Dynamic optimizing design of pile-groups considering interaction on upper and lower parts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(5): 590 - 594. (in Chinese))
- [12] 秋仁东, 刘金砺, 高文生, 等. 群桩基础沉降计算中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 15 - 23. (QIU Ren-dong, LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, et al. Some problems on settlement calculation of pipe group foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 15 - 23. (in Chinese))
- [13] 江 杰, 黄茂松, 顾倩燕. 非均质地基中群桩竖向荷载沉降关系分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(8): 2092 - 2096. (JIANG Jie, HUANG Mao-song, GU Qian-yan. Analysis of settlements of vertically loaded pile groups in non-homogeneous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(8): 2092 - 2096. (in Chinese))
- [14] 史佩栋, 刘金砺. 实用桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (SHI Pei-dong, LIU Jin-li. Practical handbook of pile foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))