

微型桩材料对桩—土动力相互作用的影响分析

林上顺¹, 庄一舟², 徐亮², 黄福云²

(1. 福建工程学院 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元软件, 开展不同材料微型桩—土动力相互作用的影响研究, 桩身材料分别选为 C40 普通混凝土、C60 普通混凝土、钢管混凝土、RPC 混凝土。分析结果表明, 由于弹性模量发生变化, 不同材料微型桩的桩身弯矩存在明显差异; 桩身材料的弹性模量过大会使微型桩的变形减弱; 与静力荷载作用不同的是, 动力荷载作用下的微型桩在上、下土层范围分别出现了一正一负两个较明显的桩周土反力峰值点。相关研究结论对指导微型桩的设计具有参考价值。

关键词: 微型桩; 有限元建模; 材料; 动力相互作用; 分析

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)06-0535-04

Analysis of impacts of micro-pile's materials on the pile-soil dynamic interaction

Lin Shangshun¹, ZhuangYizhou², XuLiang², Huang Fuyun²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering,
Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The finite element software ABAQUS was used to carry out researches on the impacts of the micro-pile's materials on the pile-soil dynamic interaction, with C40 concrete, C60 concrete, concrete filled steel tubes and concrete RPC chosen as the pile materials. Analysis results show that when the elastic modulus changes, the bending moments of micro-piles made of different materials are obviously different; excessive elastic modulus of the material will weaken the deformation of micro-piles; different from the static load, the micro-pile under dynamic load has both a positive peak and a negative peak of counterforces around the pile in the upper and the lower soil layers respectively. Such research results can provide reference for the design of micro-piles.

Keywords: micro-pile; finite element modeling; materials; dynamic interaction; analysis

微型桩通常指桩径在 100~300 mm、长细比大于 30 的小直径桩。微型桩最初主要用于欧洲诸如纪念碑等历史性建筑物的加固, 后来逐渐扩展到北美。由于微型桩具有良好的动力特性和抗震性能, 已被广泛应用于承受竖向、横向荷载、边坡支护与加固以及震后建筑物的修复和边坡防治

等工程^[1-4]。微型桩—土相互作用研究方法主要有解析法、有限元法和试验法, 其中常用的是试验法和有限元法。有限元法是一种由经典数学方法和计算机技术相结合发展而来的数值方法, 此方法视桩—土为体系直接计算地震响应, 可以模拟几乎任何复杂的几何形状, 尤其是不易被解析或

收稿日期: 2017-06-17; 修回日期: 2017-09-08

基金项目: 福州市科技局市校合作项目(2016-G-62)

通讯作者: 林上顺(1972-), 男, 福建永泰人, 副教授, 博士, 研究方向: 道路、桥梁。

半解析公式所描述的力学问题^[5-7]。为探究不同材料参数下的微型桩—土动力相互作用响应情况,利用 ABAQUS 有限元软件进行建模,探讨微型桩材料发生变化时,对桩—土动力相互作用的影响。

1 微型桩—土相互作用的有限元方法

1.1 模型参数

选取圆形桩身截面为分析对象,选择的分析参数为桩身材料和桩周土类型。桩身材料分别为 C40 普通混凝土、C60 普通混凝土、钢管混凝土、RPC 混凝土等。模型桩径为 100 mm,桩长为 2 200 mm,桩周土选用工程中较为常见的黏性土。

1.2 材料的本构关系

1.2.1 土体的本构模型

为了研究不同桩周土影响下的微型桩—土动力相互作用响应,需要选择合适的砂土模型。目前较为常用的土体本构模型有 M-C (Mohr-Coulomb) 模型、D-P 模型等。M-C 模型通过控制粘聚力 c 来控制硬化和软化过程,其准则是剪应力屈服条件。M-C 模型能够比较真实地模拟天然多孔地质材料,较好地模拟黏土的物理性质。D-P 模型在 π 平面上是一个圆,数值计算时更容易收敛,另外,输入参数较少,且方便获取,对于模拟砂性土具有很好的优势。本文选用黏土作为桩周土,因此土体的本构模型选用 M-C 模型,其本构参数如下:黏土的回弹模量为 12 MPa,密度为 1 750 kg/m³,粘聚力为 58 kPa,内摩擦角为 15°,阻尼系数为 18%。

1.2.2 混凝土的本构关系

ABAQUS 提供了适用于混凝土的各种荷载分析,单调应变,循环荷载,动力载荷,包含拉伸开裂和压缩破碎的混凝土塑性损伤模型,此模型可以模拟硬度退化机制以及反向加载刚度恢复的混凝土力学特性。分析中考虑混凝土塑性损伤,即通过损伤因子 d 和刚度系数 w 对混凝土的弹性受拉、压刚度进行折减来模拟塑性阶段的刚度退化过程^[8-13]。通过控制上述两个参数,进而控制混凝土在拉、压过程中的张开与闭合,使混凝土在往复荷载作用下的力学行为更接近真实情况。

有限元模型中 C40 普通混凝土微型桩的材

料属性参考钢管混凝土微型桩,由材性试验得到的 C40 普通混凝土立方体抗压强度为 41.26 MPa,弹性模量 E_c 为 32.5 GPa,抗拉强度取抗压强度的十分之一。C60 普通混凝土抗压强度根据规范^[14]取 60 MPa,弹性模量 E_c 取 36 GPa,抗拉强度取抗压强度的十分之一。C40 混凝土的材料本构参数:弹性模量为 32.50 GPa,极限拉应变为 137×10^{-6} ,极限压应变为 $1\,790 \times 10^{-6}$,膨胀角为 35°,抗拉强度 4.1 MPa,抗压强度 41.3 MPa; C60 混凝土的材料本构参数:弹性模量为 36.0 GPa,极限拉应变为 137×10^{-6} ,极限压应变为 $2\,030 \times 10^{-6}$,膨胀角为 35°,抗拉强度 6.0 MPa,抗压强度 60.0 MPa; RPC 混凝土单轴抗压试验得到立方体抗压强度为 141.7 MPa,第二应力不变量之比 K_c 、双轴极限抗压强度与单轴极限抗拉强度之比 α_f 等,均参考文献^[15]对 RPC200 的定义。结合材性试验的结果, RPC 混凝土材料属性参数如下:弹性模量为 44.1 GPa, α_f 为 1.14, K_c 为 0.666 7,极限拉应变为 137×10^{-6} ,极限压应变为 $2\,030 \times 10^{-6}$,泊松比 0.25,膨胀角为 35°。

1.2.3 钢材的本构

钢材的本构取自清华大学潘鹏和曲哲等人开发的 PQ-Fiber 子程序中的 Usteel02 模型,该模型主要特点是综合考虑了钢筋与混凝土粘结滑移、混凝土保护层剥落以及累计损伤引起的钢筋混凝土构件承载能力的退化。该本构关系如式(1)、(2)所示^[15-17]:

$$f_{yi} = f_{y1} \left(1 - \frac{E_{\text{eff},i}}{3f_{y1}\varepsilon_f(1-\alpha)} \right) \geq cf_{y1} \quad (1)$$

$$E_{\text{eff},i} = \sum f_{y1} \left(E_i \cdot \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_f} \right)^2 \right) \quad (2)$$

式中, f_{yi} 为第 i 次循环屈服强度; α 为屈服后的刚度系数; $E_{\text{eff},i}$ 为第 i 次循环有效累计滞回耗能; E_i 为第 i 个循环的滞回耗能; ε_i 为第 i 个循环的最大应变; ε_f 为钢筋与混凝土构件破坏时的钢筋拉应变。

Usteel02 模型是一种随动硬化单轴本构退化模型,可以在弹塑性分析中定义动力循环荷载作用下的钢筋、钢结构等的本构,通过用户自定义材料程序对本构参数进行调用。微型桩钢材和钢筋所用钢材本构参数:弹性模量为 210×10^3 MPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3,屈服后的刚度系数为 0.001。

1.3 模型的建立

通过大型有限元软件 ABAQUS/CAE 建立模型, 桩体、泡沫边界、土体采用 8 节点的线性六面体单元(C3D8R)模拟, 钢箱和桩顶质量块用解析刚体代替, 建立刚体时在相互作用模块中分别对钢箱和桩顶质量块赋予相应的惯性点质量。桩体内部的主筋和箍筋采用两节点线性三维桁架单元(T3D2)模拟, 主筋与箍筋通过嵌入的方式与桩体结合, 从而两者共同受力。

边界条件设立时, 在加速度加载前将模型底部完全固定, 设为边界条件 BC1, 待到动力加载分析步时将此分析步杀死, 在动力分析步中重新建立边界条件 BC2, BC2 允许模型底部在加载方向运动, 但其它方向的运动禁止。同时建立一个边界条件 BC3, BC3 是一种加速度荷载。

对于接触问题, 泡沫与土体之间、土体与桩体之间都需设立接触, 各接触以主从接触算法(Master-Slave)为主, 选取主从面时, 以刚度较大的对象为主面、刚度较小的对象为从面。为防止出现不收敛问题, 则不能将多个接触设立在同一个分析步中, 本文对各个面的接触设立一个分析步。切向的接触采用摩尔库伦摩擦罚函数, 桩土之间的摩擦系数取 0.5。桩与桩侧土为面面接触, 土与钢箱壁为点面接触, 为防止过约束, 则去除公共边界点。另外, 模型中的钢箱和泡沫通过绑定约束在一起。

涉及岩土有限元分析时, 模型中一般需要一个位移为零, 但应力不为零的初始状态, 因此需要对其进行地应力平衡。先设立一个只有地应力荷载的分析步, 并求出在重力荷载作用下, 6 个方向的应力水平值, 应力结果经过处理后形成 ABAQUS 文件, 然后修改 Input 文件并导入进行应力平衡和后续分析。有限元模型如图 1 所示。

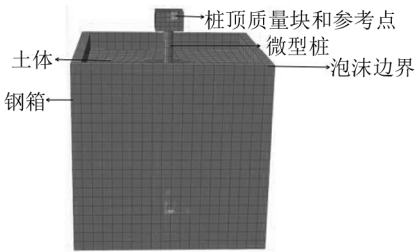


图 1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

2 有限元分析

图 2~4 分别给出的是桩径 100 mm、桩身材料分别为 C40 普通混凝土、C60 普通混凝土、钢管混凝土和 RPC 混凝土的微型桩在 0.15 g、4 Hz 正弦波激励下的桩身弯矩、变形和桩身土反力分布情况。

2.1 桩身弯矩

由图 2 可知, 在 0.15 g、4 Hz 正弦波激励下, 各桩身弯矩分布规律不尽相同。C40 普通混凝土微型桩的弯矩峰值点埋深最小(埋深为 4D)。然后从浅到深依次为 C60 普通混凝土微型桩(埋深为 4.2D)、RPC 混凝土微型桩(埋深为 5D)、钢管混凝土微型桩(埋深为 6D), 这说明桩身刚度越小, 弯矩峰值点的埋深越浅; 各微型桩的弯矩峰值从大到小依次为 RPC 混凝土微型桩(0.96 kN · m)、C60 普通混凝土微型桩(0.80 kN · m)、C40 普通混凝土微型桩(0.77 kN · m)、钢管混凝土微型桩(0.45 kN · m); 对于 C40 普通混凝土、C60 普通混凝土以及 RPC 混凝土微型桩, 各弯矩峰值的大小顺序与桩身材料的弹性模量一致, 而钢管混凝土微型桩的弯矩峰值例外, 这说明材料对微型桩身弯矩响应的影响主要由材料的弹性模量引起, 在一定范围内, 材料的弹性模量越大, 则弯矩峰值越大, 出现的埋深位置越深, 当弹性模量大于某个值后, 弯矩峰值反而减小。

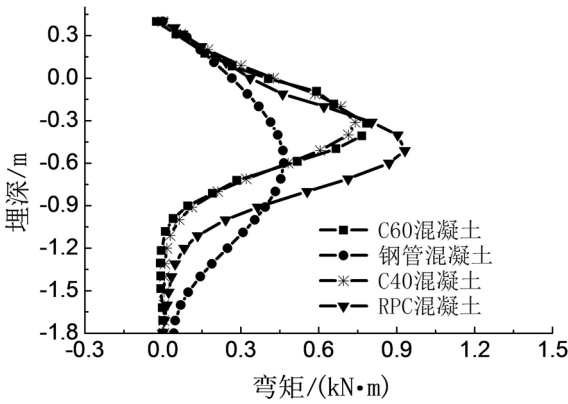


图 2 不同桩身材料下的桩身弯矩 (0.15 g、4 Hz)
Fig.2 Bending moments (0.15 g、4 Hz) of piles made of different materials

2.2 桩身变形

图 3 显示不同桩身材料的微型桩在 0.15 g、4 Hz 工况下的变形情况。图中反映出不同桩身材

料的微型桩变形差别较大。C40 普通混凝土微型桩的变形最显著,为 6.22 mm。然后从大到小依次为 C60 普通混凝土(5.89 mm)、RPC 混凝土微型桩(4.36 mm)、钢管混凝土微型桩(2.93 mm)。这是因为 C40 普通混凝土微型桩的弹性模量最小,钢管混凝土材料的弹性模量最大,弹性模量小变形更容易。

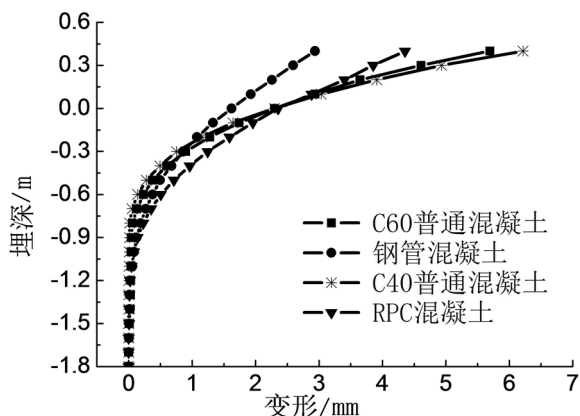


图 3 材料影响的微型桩身变形(0.15 g、4 Hz)

Fig.3 Different deformations of micro-piles made of different materials

2.3 桩身土反力

图 4 显示不同桩身材料的微型桩在 0.15 g、4 Hz 正弦波荷载作用下的桩身土反力分布情况。从图 4 中可知,不同桩身材料下的土反力峰值点大小不一,从大到小依次为 RPC 混凝土(5.31 kN/m)、C60 普通混凝土(4.14 kN/m)、C40 普通混凝土微型桩(4.09 kN/m)和钢管混凝土(3.84 kN/m)。其中 RPC 混凝土、C60 普通混凝土、C40 普通混凝土微型桩的土反力大小与桩身材料的弹性模量呈正相关的关系,而钢管混凝土微型桩例外。说明一定范围内,桩身材料的弹性模量越大,土反力峰值越大,但当弹性模量大到一定值后,桩

身土反力反而变小。另外,对比樊铮晖^[17]的拟静力试验结果发现,静力条件下的微型桩身土反力变化主要集中在表层土范围内,而动力条件下的桩身土反力在上、下土层范围分别出现了一正一负两个较明显的峰值点。

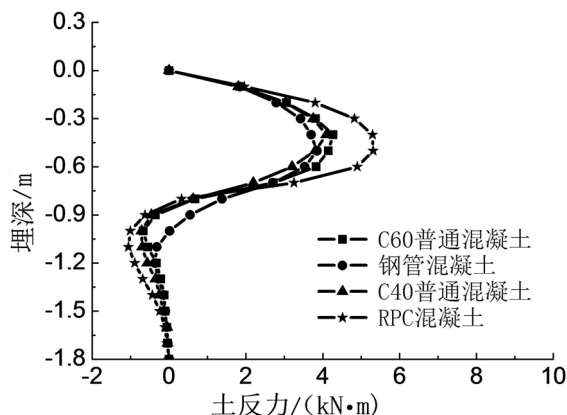


图 4 不同桩身材料的微型桩桩身土反力(0.15 g、4 Hz)

Fig.4 Soil's counterforces (0.15 g、4 Hz) on micro-piles made of different materials

3 结论

对于不同桩身材料的微型桩基受动力荷载作用时,材料对微型桩身弯矩响应的影响主要由材料的弹性模量引起,并且在一定范围内,材料的弹性模量越大,弯矩峰值越大,且出现的埋深位置越深,当弹性模量大于某个值后,弯矩峰值反而减小;桩身材料的弹性模量过大会使微型桩身的变形减弱;一定范围内,桩身材料的弹性模量越大则土反力峰值越大,但当弹性模量大到一定值后,桩身土反力反而变小,并且较大的桩身材料弹性模量会引起更深的土反力曲线的反弯点,另外,动力条件下的桩身在上、下土层范围分别出现了一正一负两个较明显的土反力峰值点。相关研究结论对指导微型桩的设计具有参考价值。

参考文献:

- [1] Cantonir, Collottat, Ghinna V N, et al. A design method for reticulatemicropiles structure in sliding slopes[J]. Ground Engineering, 1989, 22(1): 41-47.
- [2] 周德培,王唤龙,孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1353-1362.
- [3] 孙书伟,朱本珍,郑静. 基于极限抗力分析的微型桩群加固土质边坡设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1671-1677.
- [4] 陈正,梅岭,梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 117(10): 29-35.

3)减隔震装置发挥的隔震效果与梁墩刚度比和设防烈度等级密切相关,总体上轴力、弯矩和位移指标的隔震率随着梁墩刚度比的增大而减小。随着设防烈度等级的提高,轴力隔震效果越

好,且与设防烈度等级呈线性关系,而弯矩隔震率呈不同幅度的减小,位移隔震率几乎不受设防烈度等级影响。

参考文献:

[1] Usami T, Ge H B , Saizuka K. Behavior of partially concrete-filled steel bridge piers under cyclic and dynamic loading[J]. J. Construct. Steel Res,1997,41(2/3):121-136.

[2] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春.钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J].工程力学,2014,31(9):89-96

[3] 王海良,张铎,王剑,等.基于 IDA 的钢管混凝土空间组合桁架连续梁桥抗震易损性分析[J].世界地震工程,2015,31(2):76-86.

[4] 黄育凡.钢管混凝土组合桁式梁-格构式高墩连续梁桥非线性地震性能研究[D].福州:福州大学,2012.

[5] 王海良,金城,杨新磊.曲线钢管混凝土组合桁架连续梁桥抗震分析[J].公路交通科技,2011(12):287-288.

[6] 俞琦,陈语,王家林.桥梁抗震分析方法[J].重庆交通学院学报,2006,25(增刊):32-34.

[7] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.

[8] 陈盛富.四肢变截面钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D].福州:福建工程学院,2017.

[9] 孙颖,陈天海,卓卫东,等.长周期地震动作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究[J].工程力学,2016,31(增刊):244-250.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 538 页)

[5] Vasheghani F R, ZHAO Q, Burdette E G. Seismic Analysis of Integral Abutment Bridge in Tennessee, Including Soil-Structure Interaction[J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2010,22(1):70-79.

[6] 冯士伦.可液化土层中桩基横向承载特性研究[D].天津:天津大学,2004.

[7] Zheng w., luna R. Liquefaction effects on lateral pile behavior for bridges[J].Geotechnical Special Publication,2006,10(2):153-164.

[8] 常士骠,张苏民.工程地质手册 [M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,1992.

[9] 刘波,韩彦辉.FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[10] 熊志远.聚苯乙烯泡沫((EPS)力学行为的实验研究[D].湘潭:湘潭大学,2007.

[11] 张战廷,刘宇锋.ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构,2011(s2):229-231.

[12] 秦浩,赵宪忠.ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J].结构工程师,2013,29(6):27-32.

[13] 刘巍,徐明,陈忠范.ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定与验证[J].工业建筑,2014(s1):167-171.

[14] 中华人民共和国建设部.GB50010-2010 混凝土结构设计规范[s].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[15] 李昊煜.RPC 材料的塑性损伤本构模型参数识别及有限元验证[D].北京:北京交通大学,2009.

[16] 曲哲,叶列平.基于有效累积滞回耗能的干钢筋混凝土构件承载力退化模型[J].工程力学,2011,28(6):45-51.

[17] 樊铮晖.新型半整体式桥台无缝桥梁台后扩孔微型桩侧向受荷性能试验研究[D].福州:福州大学,2014.

(责任编辑:陈雯)