

徐晓,高盟,陈高鹏,等.大直径扩底灌注桩的抗震性能研究[J].地震工程学报,2019,41(3):645-653.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.645

XU Xiao,GAO Meng,CHEN Gaopeng,et al.Seismic Performance of Large-diameter Belled Piles[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):645-653.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.645

大直径扩底灌注桩的抗震性能研究

徐 晓^{1,2}, 高 盟^{1,2}, 陈高鹏^{1,2}, 王 滢^{1,2}

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 深入分析土-大直径扩底灌注桩体系动力相互作用机理是地震工程的重要研究内容。本文采用快速拉格朗日 FLAC^{3D} 有限差分程序建立地震荷载作用下扩底桩-土和等直径桩-土动力相互作用体的三维数值模型,分析大直径扩底桩与普通等直径桩地震反应的差异。桩周土采用 Mohr-Coulomb 弹性模型以考虑土体的非线性,桩体采用线弹性模型,桩与桩周土之间采用“切割模型”法设置桩土间接触面。输入 5·12 汶川地震波,对两种桩基的地震反应进行了数值计算与分析。结果表明:扩底桩的抗震性能优于等直径桩;与具有显著差异的加速度时程曲线相比,扩底桩对位移动力响应并不敏感。

关键词: 大直径扩底桩;地震荷载;桩-土动力相互作用;地震反应

中图分类号: P315;TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0645-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.645

Seismic Performance of Large-diameter Belled Piles

XU Xiao^{1,2}, GAO Meng^{1,2}, CHEN Gaopeng^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1. Shandong Key Laboratory of Civil Engineering & Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Institute of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: The dynamic interaction mechanism of soil and large-diameter belled piles is an important factor in earthquake engineering research. Based on the Lagrangian FLAC^{3D} program, we established three-dimensional numerical models of the dynamic belled pile-soil interaction and dynamic equal-diameter pile-soil interaction under seismic loading to investigate the difference in the seismic responses of the large-diameter belled pile and conventional equal-diameter pile. We used the Mohr-Coulomb elastic model to consider the nonlinear characteristics of the soil around the pile and the linear elastic model to simulate the pile itself. We then used the model cutting method to set the interface between the pile and its surrounding soil. Under the input of a 5·12 Wenchuan seismic wave, we performed a numerical calculation and analysis of the seismic responses of the two pile foundations. The results show that the anti-seismic performance of the large-diameter belled pile is better than that of the conventional equal-diameter pile. A comparison of the acceleration time history curves with a dramatic difference shows that the belled pile is

收稿日期:2018-08-05

基金项目:山东省自然科学基金(ZR201702160391)

第一作者简介:徐 晓(1995-),女,硕士研究生,主要从事岩土动力学及岩土工程抗震研究。E-mail: qd_xuxiao@126.com。

通信作者:高 盟(1974-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事岩土动力学及环境岩土工程教学和 research。E-mail: gmxyz@sdust.edu.cn。

not sensitive to the dynamic displacement response.

Keywords: large-diameter belled pile; seismic load; pile-soil dynamic interaction; seismic response
large-diameter belled pile; seismic load; pile-soil dynamic interaction; seismic response

0 引言

对许多重要结构而言,如高层建筑、海洋平台和核电设施,应用桩基础是确保基础结构稳定性的最佳选择。5·12 汶川地震以及近年来发生的其他地震使得地震荷载作用下桩-土动力相互作用问题成为亟待解决的难题。而大直径扩底灌注桩由于存在着扩大端,其工作性能与普通桩完全不同,开展大直径扩底桩的动力响应特性的研究,对完善桩基础的抗震设计理论和工程应用具有重要意义。

对地震荷载作用下桩-土动力相互作用的研究方法有很多,其中,简化分析方法是深入分析桩-土相互作用机理的一种重要方法。Shukla 等^[1]提出的 Shukla 法,采用拟静力法考虑土体与结构的相互作用,建立地下结构的拉伸模型和弯曲模型。Nagar 等^[2]引入桩周软化层的概念来考虑土体的非线性问题,提出一种分析单桩、群桩-土轴向动力响应的非线性模型。肖晓春等^[3]通过等价线性迭代逼近土体的非线性动态响应,采用动弹簧系数和阻尼系数来模拟桩周土体,建立土-桩-结构动力相互作用分析模型。刘林超等^[4]将土视为液固两相饱和和多孔介质,考虑土-桩的动力相互作用,在叠加原理的基础上研究简谐 SH 地震波作用下饱和土-2×2 群桩-上部结构的耦合振动问题。Holeyman 等^[5]考虑桩-土之间轴向非线性动力相互作用,推导出在振动荷载作用下桩基的非线性轴向动态响应的解析解和轴向桩身特性的近似非线性解。程麦理等^[6]考虑桩-土界面滑移、分离和碰撞的简化理论模型,推导出桩-土-结构动力体系各特征指标的计算公式,并对考虑桩-土相互作用和不考虑桩-土相互作用的黄土地独柱式桥墩进行了地震响应分析。由于在复杂结构和复杂地形下很难求得解析解,因此简化分析方法只适用于求解均匀介质中规则形体的平面问题。计算机技术的迅速发展有力地推动了桩基础动力响应分析数值理论的发展。由于所做假设较少,数值模拟的结果被认为是较为精确的,因而被广泛应用在桩-土相互作用的动力分析和研究中。Sen 等^[7]采用边界元法,通过满足桩-土界面的平衡和相容性,使轴向和侧向荷载下桩域的运动控制方程与土域的数值解耦合。Maki 等^[8]在纤维梁单元模型的基础上,建立桩-土-结构体系数值计算模型,研究

横向循环荷载作用下同层土中桩和桩土之间的力学特征。高文乐等^[9]运用大型有限元软件从桩尖输入实测爆破地震波,研究爆炸荷载作用下群桩基础中角桩和中心桩的动力响应规律。罗川等^[10]考虑重力因素,利用 LS-DYNA 软件得到水平和竖直方向组合地震激励下桩-土非线性相互作用对桩基地震响应的影响。黄明等^[11]结合扰动状态理论(DSC),建立桩-土相互作用的荷载渐进性传递机制,采用 Matlab 模拟软件分析模型参数对 τ - s 曲线的影响规律。刘述丽等^[12]结合有限差分解法,运用 API 规范建议的 p - y 曲线方法,对海上大直径钢管桩水平承载特性及桩土界面参数分析计算方法进行研究。刘立平^[13]、夏栋舟^[14]、庄海洋^[15]、高盟^[16]等在考虑桩-土结构体系的相互作用与非线性的基础上,采用数值模拟软件研究土层特性、桩土模量、桩径与桩长、基础埋深以及上部结构特性等诸多因素,对桩基抗震性能的影响。此外,采用耦合有限元和边界元法,Paulus 在文献[17]中对端承桩和土体的动力相互作用进行分析,Küçükarslan 在文献[18]中模拟桩土的非线性接触,用来预测群桩的沉降趋势。然而,目前涉及桩-土结构体系的研究主要集中在对等直径桩的动力响应分析,而对大直径扩底灌注桩在地震动作用下的动力响应研究极少,考虑到桩基础抗震分析和设计的重要性,研究大直径扩底桩-土的动力相互作用对桩基动力响应特性的影响有重要意义。

应用三维快速拉格朗日差分软件 FLAC^{3D} 程序,可以较准确地模拟材料的屈服、塑性流动和软化,是岩土工程领域的通用软件^[19-24]。因此,本文采用 FLAC^{3D} 有限差分程序,分别建立扩底桩-土结构体系与普通等直径桩-土结构体系的三维动力数值模型,考虑体系的相互作用与非线性,对比分析扩底桩和普通等直径桩地震反应特性的差异,旨在为实际工程的抗震设计提供有益的参考。

1 计算模型

1.1 模型与网格尺寸

模型以及网格尺寸的设置决定计算的时间,合理的模型和网格尺寸的设置可以提高计算的效率。模型越大,网格越细,计算精度越高,计算时间越长,收敛会越困难。

土体采用 Mohr-Coulomb 模型,桩体采用弹性模型,桩-土结构模型范围取值 12 m×12 m×15.5 m,模型如图 1 所示。因为数值模拟分析的目的是得到桩身以及土体的加速度和位移时程曲线,因此网格采用 1.1 倍比率渐变形式,靠近桩身处网格密集,远离桩身处的网格稀疏。这样可以使计算网格不至于过密集,加快计算的收敛速度,桩周土体也能得到合理的观察。

1.2 材料属性及力学参数

在 FLAC^{3D}中采用体积模量 K 和剪切模量 G 描述弹性模量 E 和泊松比 ν ,根据式(1)、式(2)来计算体积模量和剪切模量,本次模拟设置的桩和桩周土体其他材料属性及力学参数如表 1 所列。

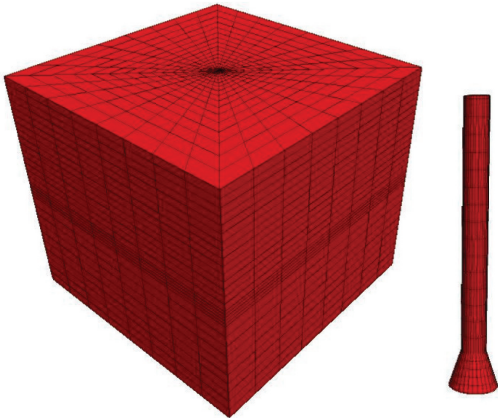


图 1 桩土数值模拟分析模型
Fig.1 Pile-soil numerical model

表 1 桩-土材料参数

Table 1 The pile-soil material parameters				
参数	第一层黏土	第二层黏土	等直径桩	扩底桩
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 800	1 950	2 500	2 500
体积模量 K/Pa	1.11×10^7	5.56×10^7	13.9×10^9	13.9×10^9
剪切模量 G/Pa	3.7×10^6	1.85×10^7	10.4×10^9	10.4×10^9
粘聚力 C/Pa	12 000	20 000		
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	18	30		
长度或厚度 L/m	11.5	4	11.5	11.5
直径 d/m			1	1
扩底高度 h/m				1.5
扩底直径 D/m				2

$$K = \frac{E}{3((1 - 2\nu))} \tag{1}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{2}$$

1.3 收敛准则

收敛准则直接影响到数值模拟计算结果的精度和计算时间的长短。两种最常用的收敛准则,一是体系最大不平衡力和典型内力的比率小于某一临界 (SET mech ratio);另一种是人为设定体系最大不平衡力不大于某一特定值 (SET mech force)。后者也称绝对收敛标准,有较大的局限性,本例采用程序默认的不平衡力与典型内力比率的收敛准则。

1.4 接触面的设置与参数选择

对于模型,先把桩体与土体网格分组建立,然后在桩体网格组上建立接触面,模拟桩土之间桩侧摩擦阻力和桩端阻力之间接触面。接触面单元本构模型组成如图 2 所示。

在桩-土接触面上,采用“切割模型”法在桩侧和桩端分别设置接触面,桩-土界面之间的摩擦角 δ 是影响摩擦桩的承载性能的关键因素,根据 Potyondy^[25]和 Acer 等^[26]的研究,桩土界面之间的摩擦角

δ ,对于黏性土宜取 $\delta/\varphi=0.6\sim0.7$ (φ 是桩周土体的有效内摩擦角)。对于土体的内摩擦角范围取 $15^\circ\sim30^\circ$,则桩土界面摩擦角的大概范围为 $9^\circ\sim21^\circ$,本文选取 12° 作为参考值。作用在本构模型接触面上的法向弹簧刚度、剪切弹簧刚度、拉伸以及剪切强度和由膨胀引起的有效法向力的增量是由线性 Mohr-Coulomb 强度准则决定。将接触面的剪切刚度 k_s 值和法向刚度 k_n 值设置为周围土体单元格体积模量的 10 倍,本次桩土相互作用的模拟中, $k_s=k_n=1 \times 10^8$ kPa,接触面粘聚力 C 取 8 kPa。

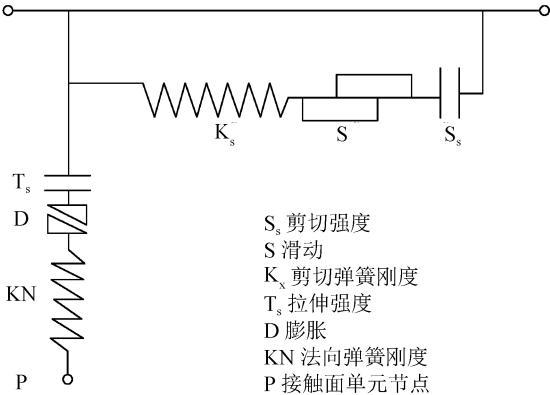


图 2 接触面单元本构模型组成

Fig.2 The interface element in constitutive model

1.5 阻尼的确定

FLAC^{3D}用阻尼来考虑土体滞后性,通过设置合理的阻尼参数和阻尼形式,描述桩体以及土体的动力响应。数值模拟的动力分析中,在动力荷载下,体系将产生阻尼,进而造成能量的消散^[27]。FLAC^{3D}模拟提供了三种阻尼形式,即滞后阻尼(Hysteretic Damping)、瑞利阻尼(Rayleigh Damping)、和局部阻尼(Local Damping)。在动力计算中滞后阻尼有许多优点,但是模型参数较多,获取困难;瑞利阻尼在一定的频率范围近似反映出和频率无关的特性,动力计算的时间步太小,计算时间太长;局部阻尼通过在结构单元节点或网格节点上增加或减少质量达到收敛目的。局部阻尼系数 α_L ,与系统自振频率和地震波频率无关,相比于瑞利阻尼时间步也不会减小,有利于提高计算的效率。

对于地震荷载作用下桩土体系的动力响应问题,采用局部阻尼。局部阻尼系数为:

$$\alpha_L=\pi D$$

(3)

式中: D 为临界阻尼比,岩土材料的临界阻比范围一般是2%~5%,根据经验,模型选的临界阻尼比设为5%,即局部阻尼的阻尼系数为0.157 1。

1.6 边界条件

在对桩-土-结构体系进行动力分析时,由于波的反射,使模型边界条件的选取不容忽视。自由场边界与无限场地模拟效果相同,向上的波在边界上不产生扭曲,因此模拟采用自由场边界以减少在边界上非真实的反射波,如图3所示,土体底部边界采用三向约束,四个侧面采用自由场边界,模拟波从有限域向无限域的传播。

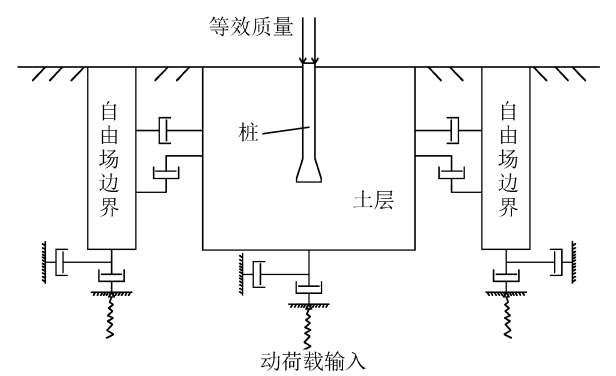


图3 自由场边界示意图

Fig.3 Free field boundary condition of finite element model

1.7 荷载的输入

输入地震波采用2008年汶川地震波加速度

Table,其施加的加速度时程如图4所示。加速度峰值在0.5 s内达到0.2g,从2.5 s起逐渐减小,3 s时减小到0,计算时间至3 s。施加的动力输入荷载通过FISH函数转换形成应力时程,直接施加在模型底部的边界上,其转换公式^[19]为:

$$\sigma_n=-2(\rho C_p)v_n$$

(4)

$$\sigma_s=-2(\rho C_s)v_n$$

(5)

$$C_p=\sqrt{(K+4/3G)/\rho}$$

(6)

$$C_s=\sqrt{G/\rho}$$

(7)

$$V_n=at$$

(8)

式中: σ_s 、 σ_n 分别为施加在粘性边界上的切向应力和法向应力, C_p 是纵波波速, C_s 是横波波速, K 、 G 分别表示模型底层土的体积模量和剪切模量, ρ 表示模型底层土的密度, a 表示施加的加速度。公式中的系数2表示施加的能量中只有一半是向上传播作为动力输入的,施加能量的另一半向边界下部传播。公式中的负号是让应力施加后节点的速度能与实际相同。

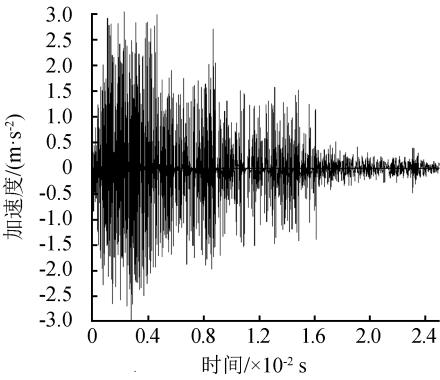


图4 汶川地震波加速度时程曲线

Fig.4 Acceleration time-history curves under Wenchuan seismic wave

2 地震反应特征分析

2.1 应力场分布对比

在数值模拟计算开始,首先根据桩体和土体的初始状态,在自然重力的状态下计算模型的初始平衡状态。生成桩土模型和接触面单元后,施加水平荷载和上部荷载,进行等直径桩和扩底桩的模型的加载平衡。加载平衡后,等直径桩和扩底桩对桩底土的应力影响不大,此时主要承载的作用力为桩侧摩阻力。此外,在输入地震波前要把震前平衡后的位移清零。如图5所示为平衡后地震作用下等直径桩和扩底桩的模型切片。

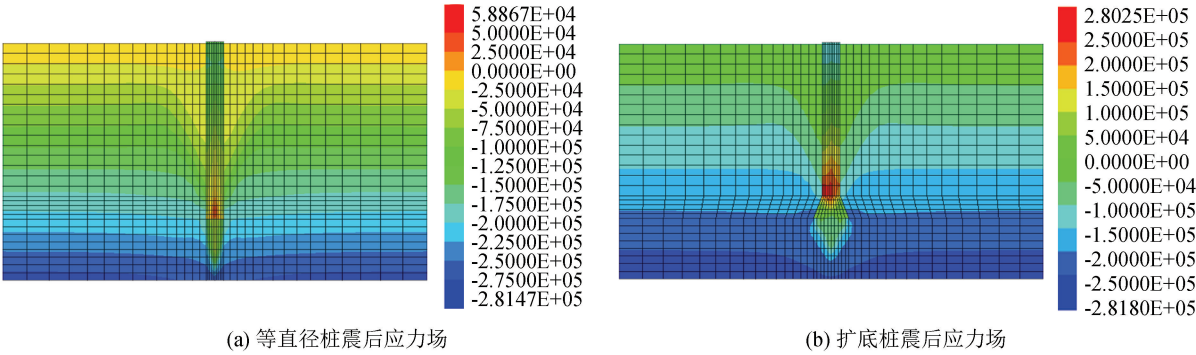


图 5 桩基础震后应力场

Fig.5 Stress field of the pile after earthquake

正如图 5 所描述的,在地震荷载作用下,两种桩型的桩身应力随深度的增大,呈先增大后减小的趋势。桩身应力近似一条抛物线,在桩底和桩顶位置处应力最小,与峰值应力最大相差 2.95×10^5 Pa(普通桩)和 5.92×10^5 Pa(扩底桩)。也就是说,扩底桩的应力是普通桩应力的 2 倍,因此扩底桩具有更大的刚度,抵抗变形的能力更强,比普通直桩更稳定,更有利于抗震。从图中数据也可以看出,等直径桩的峰值应力为 7.64×10^4 Pa,而扩底桩最大应力为 3.10×10^5 Pa,二者相差一个数量级。原因在于桩基础能量的吸收与扩散,在震源能量和土质参数的相同条件下,两者能量的扩散是相同的。但是,扩底桩由于其扩底部分,振动能量的吸收要比普通桩多得多,因而,在地震荷载的作用下,扩底桩的抗震性能优于等直径桩。

2.2 扩底桩与等直径桩加速度时程曲线对比

图 6 所描述的分别是两种桩基础在桩底位置处加速度时程曲线对比图。如图 6(a)和 6(b)所示,等直径桩与扩底桩加速度时程曲线变化规律基本一致;桩底加速度大约是输入加速度的 2 倍,说明加速度在从下向上的传播过程中不断被放大;与输入地震波时程曲线相比,桩底的高频部分都较少,说明土层对高频地震波有一定的过滤作用。仔细观察两条加速度时程曲线,发现等直径桩桩底加速度峰值为 7.60 m/s^2 ,加速度主要集中在 $-4.00\sim4.80\text{ m/s}^2$;扩底桩桩底加速度峰值为 5.10 m/s^2 ,加速度主要集中在 $-3.80\sim3.80\text{ m/s}^2$ 。也就是说,扩底桩的体积每增加 1 m^3 ,加速度峰值可减少 1.59 m/s^2 。在这种情况下,扩底桩被认定是一种经济型桩,与没有扩大基础的传统直桩相比具有明显的优势。

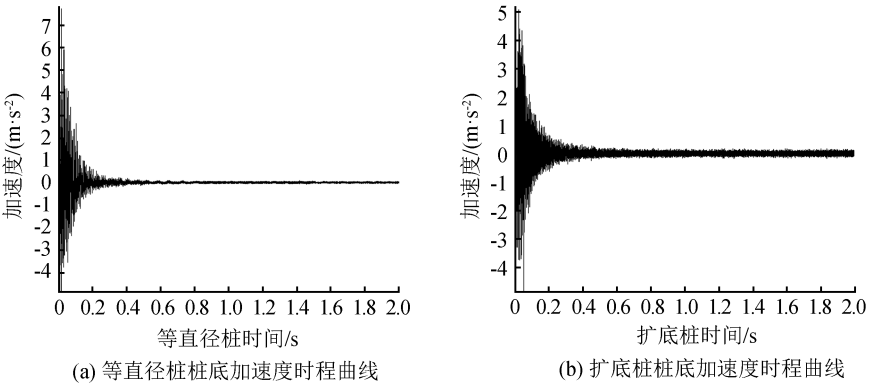


图 6 两种桩型桩底点加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time-history curves of points at the bottom of two kinds of piles

图 7(a)和 7(b)所描述的是等直径桩和扩底桩桩底中心以上 200 mm 点加速度时程曲线。对比两图可以看出,等直径桩与扩底桩加速度变化趋势大致相同,但总体上,扩底桩加速度略小于普通桩(没

有扩底)加速度。例如,等直径桩加速度峰值 7.80 m/s^2 ,加速度区间主要集中在 $-4.60\text{ m/s}^2\sim6.60\text{ m/s}^2$;扩底桩加速度峰值 5.30 m/s^2 ,加速度区间主要集中在 $-3.80\text{ m/s}^2\sim4.60\text{ m/s}^2$ 。相较于普通桩,

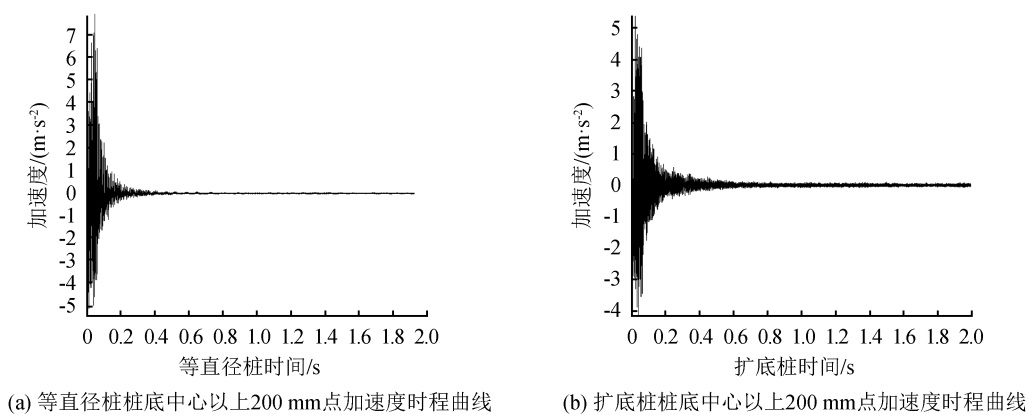


图 7 两种桩型桩底中心以上 200 mm 点加速度时程曲线

Fig.7 Acceleration time-history curves at the points of 200 mm above the bottom center of two kinds of piles

扩底桩加速度区间减少 17%~30%，加速度峰值减少 32%。此外，在桩底中心以上 200 mm 处加速度与桩底处加速度相比，普通桩增加 2%，扩底桩增加 3%，这表明加速度的动力响应对桩基础扩底端的直径的增加是敏感的。

等直径桩和扩底桩与地表土接触点加速度时程曲线如图 8(a)和 8(b)所示。与图 6 和图 7 相似，扩底桩和等直径桩加速度时程曲线变化规律大体相同。具体来看，等直径桩接触点加速度峰值为 10.80 m/s²，加速度区间主要集中在-6.40~7.20 m/s²；扩底

桩接触点加速度峰值 7.00 m/s²，加速度区间主要集中在-5.60~5.80 m/s²。显然，在桩基础上部，等直径桩的加速度响应比扩底桩的加速度响应更为剧烈。与图 6 桩底相比，桩基础每增加 1 m，等直径桩和扩底桩加速度峰值分别增加 0.28 m/s²和 0.17 m/s²，这再次证明输入的地震加速度在从下向上的传输过程具有放大效应，也进一步表明地震荷载作用下扩底端直径的增加对抗震有利。此外，扩底桩直径仅增加了 1 m，加速度峰值就减少了 3.8 m/s²，这表明扩底端的直径的增加对加速度动力响应的效率是巨大的。

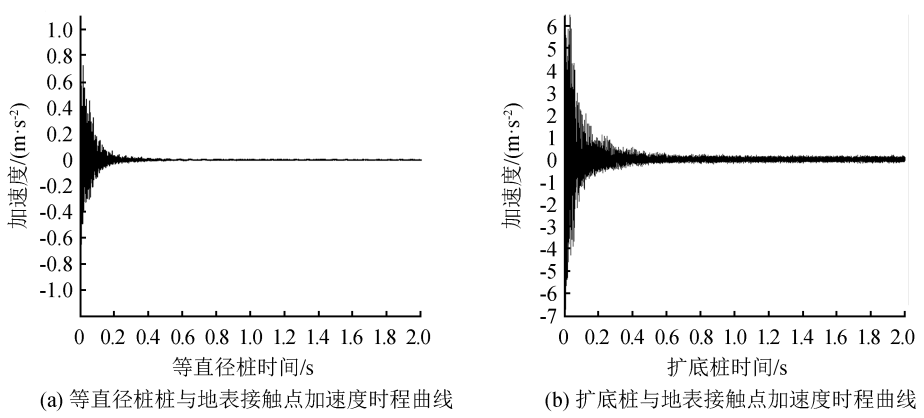


图 8 两种桩基桩与地表接触点加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time-history curves of contact points between the two kinds of piles and surface

2.3 扩底桩与等直径桩位移时程曲线对比

图 9 描述的分别是两种桩基础在桩底位置处的位移时程曲线。对比图 9(a)和 9(b)可以看出，等直径桩与扩底桩的位移响应规律几乎相同，但相对而言，等直径桩的位移响应要比扩底桩的位移响应剧烈，这相差不明显，表明位移的响应值对扩底桩直径的大小不敏感。仔细观察两条位移时程曲线，取

0.13 s 左右，等直径桩和扩底桩的沉降分别为 0.399 mm、0.327 mm，两者仅仅相差 0.072 mm，减少 18%。在 6 s 时，等直径桩、扩底桩桩底点达到最大位移分别为 1.18 mm 和 1.08 mm，二者最大位移相差 0.10 mm，减少 8%。也就是说，扩底桩扩底端直径的增加使抗震性能得到提高，但提高的效率是有限的，并且随着时间的增加逐渐降低。

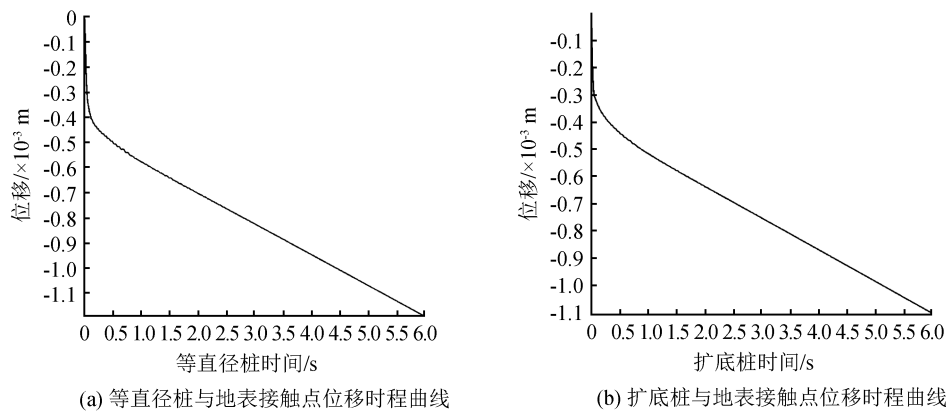


图 9 两种桩基桩底点位移时程曲线

Fig.9 Displacement time-history curves of the base points of two kinds of piles

如图 10 所示,给出的是等直径桩和扩底桩与地表土接触点位移时程曲线。对比图 10(a)和 10(b)发现,普通桩(不扩底)的位移响应比扩底桩的位移响应并不显著,前者的位移时程曲线几乎与后者相同。观察两种桩型的位移时程曲线,等直径桩在 0.13 s 左右产生的沉降值为 0.409 mm,比扩底桩产生的位移多 0.055 mm,较扩底桩增加 16%;在 6 s

时,等直径桩、扩底桩与地表土接触点的最大位移分别为 1.18 mm 和 1.10 mm,两者相差 0.08 mm,同比增长 7%。也就是说,扩底桩在刚接触地震波时,就能吸收能量,从而减少沉降,并且随着时间的推移,这种减少波动的抗震特性可以继续保持。此外,与具有显著影响的加速度时程曲线相比,扩底桩的扩底端对位移动力响应并不明显。

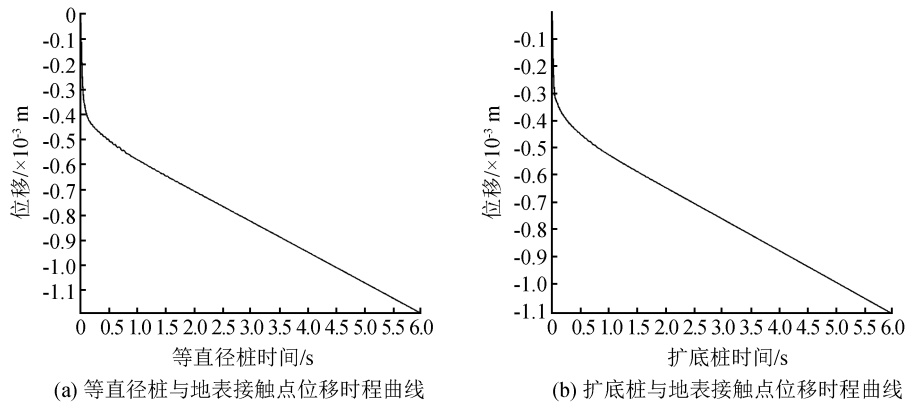


图 10 两种桩基桩与地表接触点位移时程曲线

Fig.10 Displacement time-history curves of contact points between the two kinds of piles and surface

3 结语

本文借助三维有限差分程序 FLAC^{3D},土体采用 Mohr-Coulomb 模型,对大直径扩底桩基在实际地震作用下的动力响应进行时域内的分析,探讨等直径桩和扩底桩的抗震性能,结论如下:

(1) 两种桩型的应力分布均呈“抛物线型”分布,但与普通直桩相比,扩底桩可承受应力的强度大,抵抗变形能力强,对上部结构的稳定性和安全性更加有利。

- (2) 桩基础的加速度动力响应对桩基扩底端直径的增加是敏感的,扩底桩直径仅比普通桩直径增加 1 m,加速度峰值最大可减少 3.8 m/s²。
- (3) 扩底桩由于其扩底端,较等直径桩的位移时程曲线要小,抗震性能有所提高。但与具有显著影响的加速度时程曲线相比,扩底桩对位移动力响应的影响并不明显。

参考文献(References)

[1] SHUKLA D K,RIZZO P C ,STEPHENSON D E.Earthquake

- Load Analysis of Tunnels and Shafts[C]//The 21st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1980: 20-28.
- [2] EL NAGGAR M H, NOVAK M. Non-Linear Model for Dynamic Axial Pile Response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120 (2): 308-329.
- [3] 肖晓春, 迟世春, 林皋. 水平地震下土-桩-结构相互作用简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, (5): 561-564.
- XIAO Xiaochun, CHI Shichun, LIN Gao. Simplified Analysis Method for Soil Pile Structure Interaction Under Horizontal Earthquake[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, (5): 561-564.
- [4] 刘林超, 杨骁. 地震作用下饱和土-桩-上部结构动力相互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 120-128.
- LIU Linchao, YANG Xiao. Dynamic Interaction of Saturated Soil-Pile-Structure System under Seismic Loading. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 120-128.
- [5] HOLEYMAN A, WHENHAM V. Axial Non-linear Dynamic Soil-Pile Interaction[M]//HOLEYMAN A, WHENHAM V. eds. Springer Proceedings in Physics. Cham: Springer International Publishing, 2015: 305-333.
- [6] 程麦理, 杨红霞, 李盛斌. 黄土场地中桩-土动力相互作用机理及地震响应规律[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(22): 121-127.
- CHENG Maili, YANG Hongxia, LI Shengbin. Mechanism of Pile-Soil Dynamic Interaction and Seismic Response in Loess Sield[J]. Science, Technology and Engineering, 2018, 18(22): 121-127.
- [7] SEN R, DAVIES T G, BANERJEE P K. Banerjee Dynamic Analysis of Piles and Pile Groups Embedded in Homogeneous Soils[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13(1): 53-65.
- [8] MAKI T, MAEKAWA K, MUTSUYOSHI H. RC Pile-Soil Interaction Analysis Using a 3D-finite Element Method with Fibre Theory-Based Beam Elements[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(13): 1587-1607.
- [9] 高文乐, 黄博, 王晨, 等. 爆破地震作用下桩-土-结构相互作用的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 463-467.
- GAO Wenle, HUANG Bo, WANG Chen, et al. Numerical Simulation of Pile-Soil-Structure Interaction under Blasting Vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 463-467.
- [10] 罗川, 占昌宝, 楼云锋, 等. 地震激励下桩-土非线性耦合作用对桩基动力响应特性的影响[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 20-26.
- LUO Chuan, ZHAN Changbao, LOU Yunfeng, et al. Effects of Pile-Soil Nonlinear Coupling Actions on Dynamic Response Features of Pile Foundation under Earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 20-26.
- [11] 黄明, 张冰淇, 陈福全, 等. 基于扰动状态概念的桩-土相互作用的新荷载渐进性传递模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 167-172.
- HUANG Ming, ZHANG Bingqi, CHEN Fuquan, et al. A New Incremental Load Transfer Model of Pile-Soil Interaction Based on Disturbed State Concept[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Suppl 1): 167-172.
- [12] 刘述丽, 易神州, 张昆. 海上大直径钢管桩水平向桩土界面参数试桩分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 205-212.
- LIU Shuli, YI Shenzhou, ZHANG Kun. Analysis on Trial Pile for Horizontal Pile-Soil Interface Parameters of Large Diameter Offshore Steel-Pipe Pile[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2018, 49(5): 205-212.
- [13] 刘立平, 李英民, 韩军, 等. 桩-土动力相互作用对桩基变形特性和受力性能的影响[J]. 地震工程与工程振动. 2006, 26(3): 235-237.
- LIU Liping, LI Yingmin, HAN Jun, et al. Influence of Soil-Structure Dynamic Interaction on Seismic Responses of Piles[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 235-237.
- [14] 夏栋舟, 何益斌, 刘建华. 刚性桩复合地基-上部结构动力相互作用体系抗震性能及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3505-3511.
- XIA Dongzhou, HE Yibin, LIU Jianhua. Analysis of Aseismic Capability and Influential Factors for Rigid Pile Composite Foundation-Superstructure Dynamic Interaction System[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3505-3511.
- [15] 庄海洋, 于旭. 土-桩-隔震结构动力相互作用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- ZHUANG Haiyang, YU Xu. Dynamic Soil-Pile-Isolated Structure Interaction. [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [16] 高盟, 徐晓, 王滢, 等. 大直径扩底灌注桩的地震反应特性[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 194-202.
- GAO Meng, XU Xiao, WANG Ying, et al. The Seismic Response Performance of Large-Diameter Belled Pile[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 194-202.
- [17] WIJAYA P K. Dynamic Interaction Analysis of Soil and End Bearing Pile Using Boundary Element Model Coupled with Finite Element Model[C]// 2009 First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 2009: 282-287.
- [18] KÜÇÜKARSLAN S, BANERJEE P K. Inelastic Analysis of Pile-Soil Interaction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(11): 1152-1157.
- [19] 陶连金, 李积栋, 吴秉林, 等. 竖向地震动对大跨度高断面 Y 形柱地铁车站地震响应分析研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 648-654.
- TAO Lianjin, LI Jidong, WU Binglin, et al. Influence of the Vertical Seismic Wave on the Seismic Response of an Large-Span High-Section Y-Shaped Column Subway Station[J]. Chi-

na Earthquake Engineering Journal,2015,37(3):648-654.

[20] 宋健,高广运,陈青生,等.近断层地震动作用下土质边坡动力响应研究[J].地震工程学报,2013,35(1):62-68,90.

SONG Jian, GAO Guangyun, CHEN Qingsheng, et al. Dynamic Response of Soil Slope under Near-Fault Gound Motions[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):62-68,90.

[21] 张豫川,高飞,吕国顺,等.基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J].科学技术与工程,2018,18(30):220-227.

ZHANG Yuchuan, GAO Fei, LÜ Guoshun, et al. Numerical Simulation of Settlement of High Fill Foundation Settlement Based on Creep Test of Loess[J]. Science, Technology and Engineering,2018,18(30):220-227.

[22] 杨小明,张理平,吴珺华,等.裂隙和土体软化效应双重影响下膨胀土边坡的稳定性分析[J].水利水电技术,2017,48(2):138-142

YANG Xiaoming, ZHANG Liping, WU Junhua, et al. Analysis on Stability of Expansive Soil Slope under Dual Impact from Fissure and Soil Mass Softening Effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(2):138-142.

[23] 方传峰,余传玉,史存丁,等.基于 FLAC3D 模型动态更新的自然崩落法开采过程模拟技术[J].中国安全生产科学技术,2018,14(5):89-94.

FANG Chuanfeng, YU Chuanyu, SHI Cunding, et al. Simulation Technology of Mining Process by Natural Caving Method Based on FLAC3D Model with Dynamic Update[J]. Journal of Safety Science and Technology,2018,14(5):89-94.

[24] 王志强,苏越,孙中文,等.孤岛工作面长度对下伏大巷稳定性影响研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(1):63-69.

WANG Zhiqiang, SU Yue, SUN Zhongwen, et al. Study on Influence of Length of Isolated Island Working Face on Stability of Underlying Main Roadway[J]. Journal of Safety Science and Technology,2018,14(1):63-69.

[25] POTYONDY J G. Skin Friction between Various Soils and Construction Materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

[26] ACER Y B, DURGUNOGLU H T, TIMAY M T. Interface Properties of Sands[J]. Geotechnical Engineering Division, 1982,108(4):648-654.

[27] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D Foundation and Engineering Examples[M]. Beijing: China Water&Power Press,2009.