

杨展鹏, 宋琢. 旁孔法探测桩基完整性的数值模拟分析[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 123–130. [YANG Zhanpeng, SONG Zhuo. Numerical Simulation Analysis of Pile Foundation Integrity Detection by Parallel Seismic Method[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 123–130]

旁孔法探测桩基完整性的数值模拟分析

杨展鹏¹, 宋琢²

(1. 广州市广园市政建设有限公司, 广州 510040; 2. 广州一建建设集团有限公司, 广州 510060)

摘要: 为评价旁孔法在既有桩基长度和完整性检测方面的适用性, 采用数值分析方法对桩顶自由桩基和带承台桩基开展动力分析, 研究桩身缺陷、桩-孔间距、承台结构等因素对旁孔法测试结果的影响。分析结果表明: 旁孔法用于检测桩基长度时, 桩-孔测试间距不应超过 1 m; 对于桩身存在局部缺陷的情况, 当测试孔靠近缺陷侧时, 首波时深直线斜率有较明显的变化; 对与承台连接的既有桩基, 桩-孔测试距离越小, 桩身浅部断桩、夹泥类缺陷的波形异常特征越明显, 但旁孔法难以判别桩-承台连接部位是否存在缺陷。

关键词: 桩基; 完整性; 检测; 旁孔法; 数值分析

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)03-0123-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.15

Numerical Simulation Analysis of Pile Foundation Integrity Detection by Parallel Seismic Method

YANG Zhanpeng¹, SONG Zhuo²

(1. Guangyuan Municipal Construction Co., Ltd., Guangzhou 510040, China; 2. Canton One Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510040, China)

Abstract: In order to evaluate the applicability of the parallel seismic method in the detection of the length and integrity of existing pile foundation, the paper conducts dynamic analysis of the free pile foundation and the pile foundation with cap by numerical analysis method, and studies the influence of pile defects, pile-hole spacing and pile cap structure on the test results of the parallel seismic method. The results show that when the parallel seismic method is used to detect the length of existing pile foundation, the pile-hole test spacing should be less than 1 m; for the case of local defects in the pile body, when the test hole is close to the defect side, the slope of the deep straight line at the first wave changes obviously; for the existing pile foundation connected with the pile cap, the smaller the test distance between the pile and the test hole, the more obvious the abnormal characteristics of the waveform of broken pile and mud inclusion defects in the shallow part of the pile, but the parallel seismic method is difficult to identify whether there are defects at the pile-cap joint.

Keywords: Pile foundation; Integrity; Inspection; Parallel seismic method; Numerical analysis

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678352)

作者简介: 杨展鹏(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事土木工程管理及土木工程施工方面的研究。

E-mail: 869707926@qq.com

0 引言

目前对于桩基重要性的研究较多，往往决定着整体工程的稳定性^[1-2]，所以对于桩基的检测尤为重要。传统桩基检测方法，如高、低应变法、超声波法、静载法等，对于有上部结构的既有桩基均不完全适用^[3-5]。针对既有桩基础检测存在的诸多困难，国外学者提出采用旁孔法对既有桩基的桩长及完整性进行检测^[6-7]。

旁孔法是在既有桩基周围土体中钻检测孔，并在孔中利用三分量检波器或多道水听器链接收自桩顶结构激发沿桩身向下传递的竖向纵波，通过旁孔井中传感器来检测桩身透射波首波的时间规律判断桩长^[8-10]。

目前，旁孔法主要用于既有工程桩基的长度检测。Liao等^[11]提出由两拟合线交点及相应的校正算式确定桩底深度，并用有限元模型进行检验。Huang等^[12]通过三维有限元模拟分析了单孔地震波法检测水泥搅拌桩长度的可行性，提出将上段首至波走时拟合线平移过原点，其与下段拟合线的交点作为桩底深度。Ni等^[13]给出了考虑旁孔倾斜角的桩底深度校正算式。陈龙珠等^[14]给出了完整桩的底端深度计算公式和适用条件。张敬一等^[15]采用基于射线理论的桩-土简化理论模型，得到了3种单孔地震波法桩底深度确定方法的适用性及适用条件。

尽管旁孔方法在探测既有桩基长度方面已得到了较广泛的应用，但关于该方法用于探测和评定既有桩基的缺陷和损伤情况的研究仍不多见。本文采用数值分析方法对桩顶自由桩基和带承台

桩基进行动力分析，研究应力波在缺陷桩基中的透射规律。

1 数值模型与工况

本文采用二维有限差分软件Tesseral进行桩-土体系建模，开展旁孔法的正演模拟，重点探讨：

- (1)桩身缺陷的地震波时—深曲线特征；
- (2)桩-孔间距对桩身缺陷探测效果的影响；
- (3)承台结构对桩身缺陷探测效果的影响。

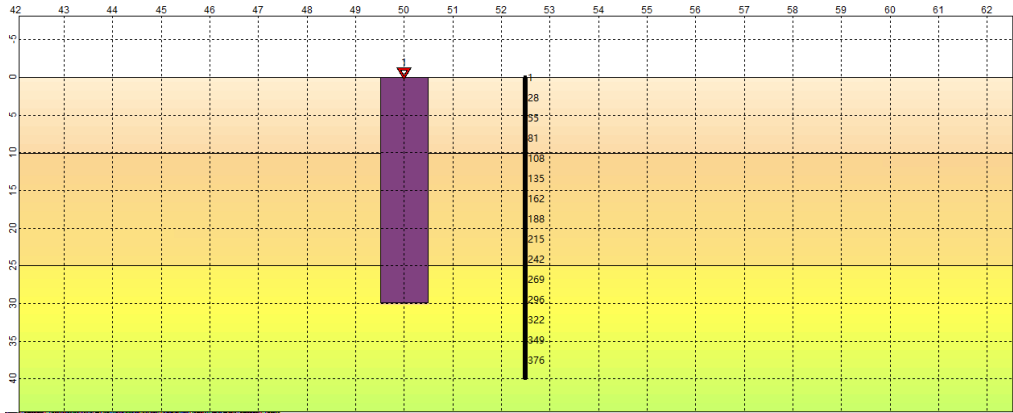
1.1 数值模型及参数

根据不同工况建模，各模型地层均相同，由3种不同性质土层组成，自上而下土体刚度和强度依次增大，各层土的物理参数参见表1。

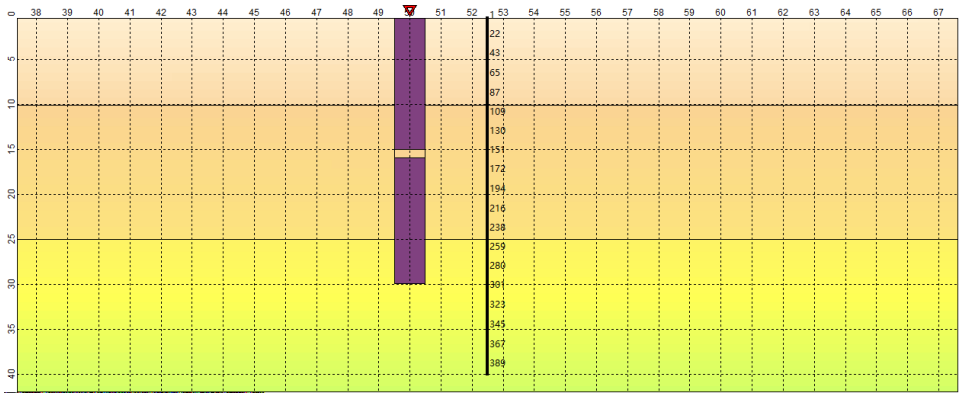
表 1 分层地基土体物理参数
Table 1 Physical parameters of layered soil

土层序号	厚度/m	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	P波速度/ (km·s ⁻¹)
土层1	10	1800	0.48	1.5
土层2	15	1850	0.40	1.8
土层3	25	1900	0.35	2.0

图1为无承台桩基模型，给定桩体、缺陷段和土体弹性波波速等参数，在桩体不同位置设置各类缺陷，桩顶部位进行竖向激振。为减小弹性波在土体边界反射影响，土体模型水平距离和竖向距离分别取100 m和50 m，土体边界设置为吸收边界。图2为带承台桩基模型，承台厚度为1.5 m，宽2 m。



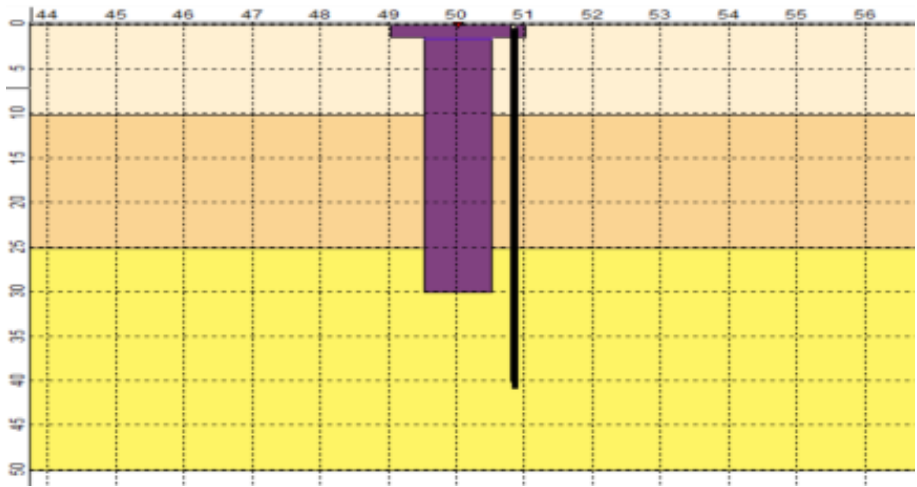
(a)完整桩



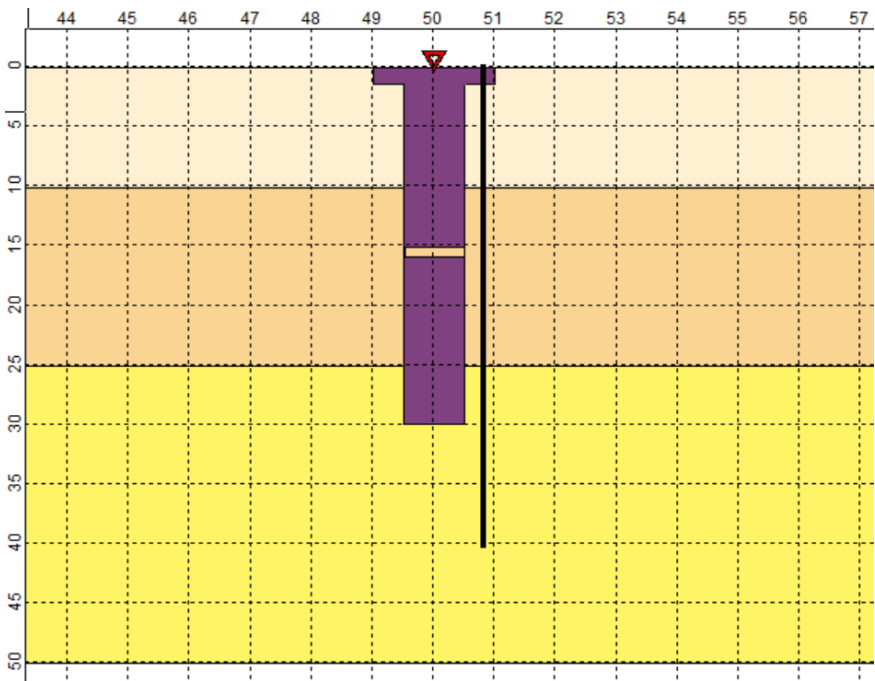
(b)缺陷桩

图1 独立单桩数值计算示意图

Fig.1 Numerical calculation diagram of independent single pile



(a)完整桩



(b)缺陷桩

图2 带承台桩基数值计算示意图

Fig.2 Numerical calculation diagram of pile foundation with cap

激振荷载施加位置位于桩顶中心处。记录总时长取 20 ms，采样间隔时间 0.02 ms，测试孔内上下采样点相邻 0.1 m。桩身缺陷类别包括缩径、断桩、沉渣等，桩身缺陷段泊松比均取 0.3。激振荷载施加位置均位于桩顶中心处。记录总时长取 20 ms，采样间隔时间 0.02 ms，测试孔内上下采样点相邻 0.1 m。

地震波正演模拟采用有限差分法求解动力学方程，根据设定的时间增量步进行计算。

1.2 数值模拟工况

表 2 为独立桩基完整性测试模拟工况参数，无承台的独立桩基桩长均为 30 m，桩径均为 1.0 m，桩身设置不同缺陷，不同缺陷对应不同波速，桩孔距分别按 0.3 m、1.0 m、2.0 m 设置。表 3 为带承台桩基完整性测试模拟工况参数，带承台桩基桩长均为 28.5 m，桩径均为 1 m，桩身设置不同缺陷，桩孔距分别按 0.0 m、0.3 m、0.7 m 设置，承台波速、密度、泊松比与桩基相同。

表 2 独立桩基完整性测试模拟工况
Table 2 Simulation conditions of independent pile foundation integrity test

编号	桩长/m	桩径/m	缺陷类型	缺陷深度范围/m	缺陷段波速/(km·s ⁻¹)	缺陷段密度/(kg·m ⁻³)	桩-孔距/m	备注
1	30	1.0	—	—	—	—	0.3/1.0/2.0	基桩参数： P波速度=3.8 km/s 密度=2350 kg/m ³ 泊松比=0.25 输入地震波参数： 主频=1500 Hz
2-a	30	1.0	混凝土离析 (全部截面)	3~4	3.5	2000	0.3/1.0/2.0	
2-b				15~16				
2-c				27~28				
3-a	30	1.0	夹泥 (1/3 截面)	3~4	1.8	1800	0.3/1.0/2.0	
3-b				15~16				
3-c				27~28				
4-a	30	1.0	断桩(全部 截面)	3~4	1.8	1800	0.3/1.0/2.0	
4-b				15~16				
4-c				27~28				
5	30	1.0	桩底 沉渣	30~30.2	1.8	1900	0.3/1.0/2.0	

注：土体模型计算范围：100 m(长)×50 m(宽)；桩基位于地基模型中部；测试孔位于桩基右侧。

表 3 带承台桩基完整性测试模拟工况
Table 3 Simulation conditions of integrity test of pile foundation with cap

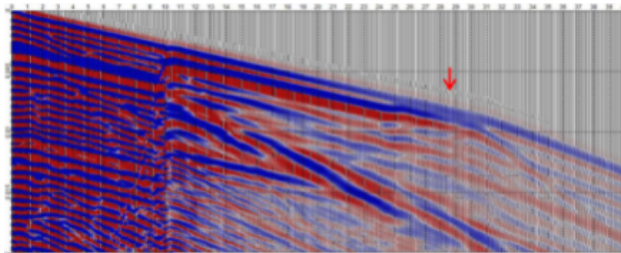
编号	桩长/m	桩径 /m	缺陷 类型	缺陷深度 范围/m	缺陷段 波速/(km•s ⁻¹)	缺陷段密度/ (kg•m ⁻³)	桩-孔距/m	备注
1-A	28.5	1.0	—	—	—	—	0.0/0.3/0.7	基桩参数： P波速度=3.8 km/s 密度=2350 kg/m ³ 泊松比=0.25 输入地震波参数： 主频=1500 Hz
2-A	28.5	1.0	夹泥 (1/3 截面)	15~16	1.8	1800	0.0/0.3/0.7	
2-B								
2-C								
3-A	28.5	1.0	断桩 (全部截面)	3~4	1.8	1800	0.0/0.3/0.7	
3-B								
3-C								
4-A	28.5	1.0	桩-承台连 接不良	1.5~1.7	2.5	2000	0.0/0.3/0.7	

注：桩-孔距 0.0 m 表示测试孔位于桩基中部；桩-孔距 0.3 m、0.7 m 分别表示测试孔距离桩基边缘的距离。

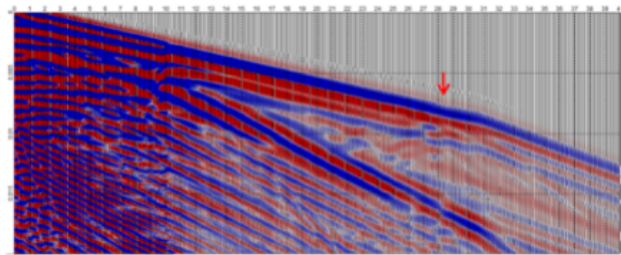
2 模拟结果与分析

2.1 缺陷类型的影响分析

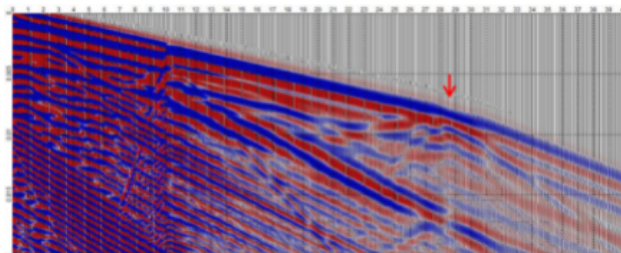
本次模拟研究,桩身设置缺陷类型有:混凝土离析、夹泥、断桩、桩底沉渣。图3为当桩孔距设置为0.3 m时,桩身设置不同缺陷情况下,旁孔法的数值模拟结果,给出了桩顶自由时缺陷桩的地震波时-深关系曲线计算结果。



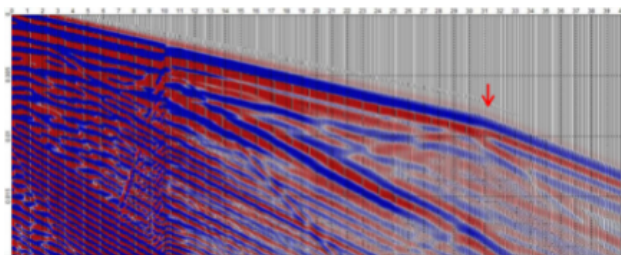
(a)缺陷类型:混凝土离析;缺陷段埋深:27~28 m



(b)缺陷类型:夹泥;缺陷段埋深:27~28 m



(c)缺陷类型:断桩;缺陷段埋深:27~28 m



(d)缺陷类型:桩底沉渣;缺陷段埋深:30~30.2 m

图3 桩孔距0.3 m时桩身不同缺陷模拟结果

Fig.3 Simulation results of different defects of pile with 0.3 m pile-hole spacing

由图3(a)~(d)的时-深曲线计算结果可知,地表、土体分层界面和桩端-土界面等位置波阻抗差异明显,地震波多次发生反射和折射,可见反射波波宽和波形不一致现象。对于桩身混凝土分层、离析等轻微缺陷桩基,首波到达时间和拟合直线斜率在缺陷部位变化不明显(图(a));当桩身存在夹泥、断桩之类缺陷时,因这些部位波阻抗变化十分显著,首波可见较明显的首波斜率减小(首波延时)与反射波组同相轴间断现象,但缺陷部位若靠近土层界面或桩端,受不同介质界面反射和折射波叠加影响,该位置桩身缺陷无法直接根据时深关系进行缺陷分析,但可比较缺陷段转折线与无桩时分层土界面直线斜率,如二者有明显差异可推测桩身可能存在缺陷(图(b)、图(c));桩端底部沉渣对桩-土界面透射的地震波具有吸收作用,若桩端土体波速与其相差不大,很难通过时深关系数据判别该类缺陷(图(d))。

因此,大直径桩混凝土浇筑轻微缺陷对应的地震波形特征与正常桩段差异不大,但桩身夹泥(缩径)、断桩等缺陷的首波波速、反射波组异常特征相对比较明显,具备良好测试条件时可能将其识别。

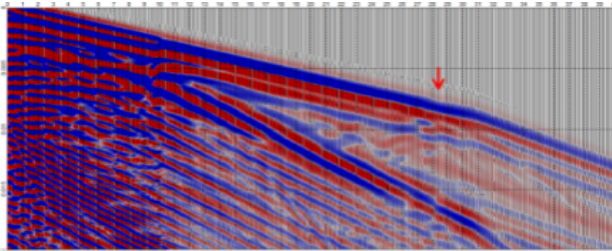
2.2 桩-孔间距的影响分析

为分析桩-孔间距对单孔地震波法测试结果的影响,按桩孔间距分别为0.3 m、1.0 m、2.0 m进行动力数值计算。图4为缺陷类型为夹泥时,不同桩孔距离的旁孔法测试结果;图5为缺陷类型为断桩时,不同桩孔距离的旁孔法测试结果。

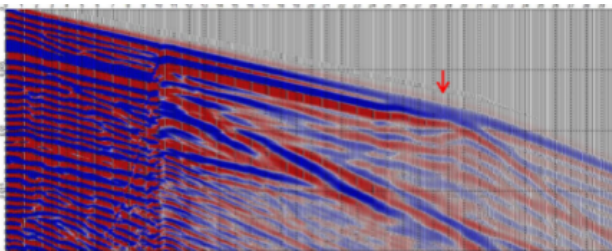
在桩身完整性判别方面,桩身混凝土存在离析等轻微缺陷时,首波到达时间、拟合直线斜率和反射波组未见异常,即便桩-孔间距为0.3 m也难以对缺陷进行判别;对于桩身夹泥、断桩类缺陷,因缺陷部位波阻抗差异较大,首波拟合直线斜率在可见较明显的变化,并且浅部缺陷部位因具有更大的桩-土波速差异,异常信号特征比深部位置更加清晰,当桩-孔间距超过1 m后首波突变特征变得不再明显,仅能通过反射波组同相轴间断特征大致进行缺陷判别。为得到较好的桩身完整性判别效果,建议桩-孔测试间距不超过0.5 m。

图6为完整桩基在不同桩孔间距条件下旁孔法的测试结果。对桩长判定,在桩顶竖向激振条件下,无缺陷桩基初至波时深关系包括桩身直线段、桩端土体直线段及两直线间曲线段。桩-孔距越大,地震波首波分布受地层性质的影响越明显,桩

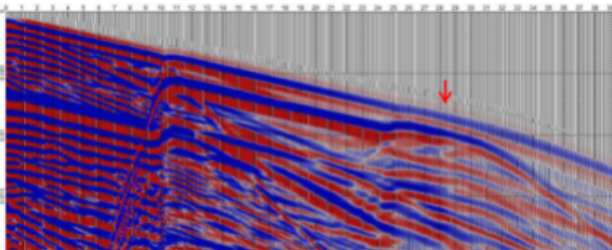
底以上桩段与桩底以下土体的首波到达时间差逐渐减小，表现为上下段拟合直线斜率更加接近，曲线过渡段曲率半径越大。桩-孔距在 1.0 m 以上时，桩长判别需保证足够的测试孔深，否则推测桩底埋深要比实际情况偏小，测试精度也将有所降低。桩-孔距离小于 1.0 m 时，交点法结果推测桩长可满足工程精度要求，桩-孔距超过 1.0 m 时采用平移法进行深度修正也可得到与实际一致的结果。



(a)桩-孔距 0.3 m

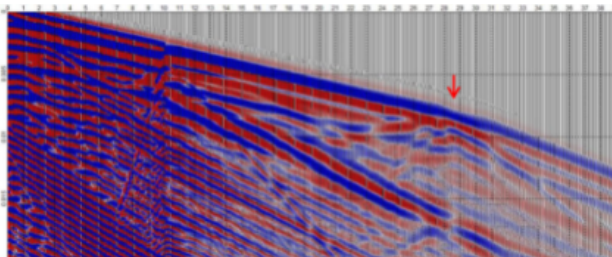


(b)桩-孔距 1.0 m

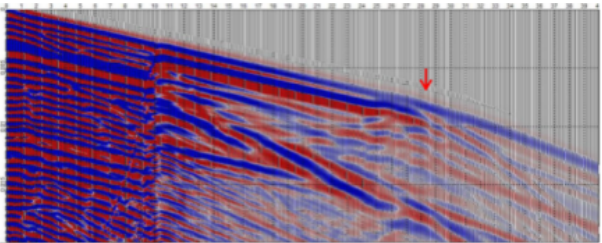


(c)桩-孔距 2.0 m

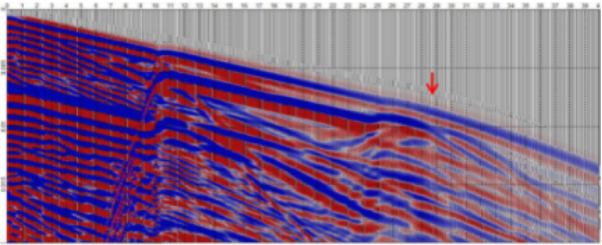
图 4 埋深为 27~28 m 的夹泥缺陷测试结果
Fig.4 Simulation results of mud inclusion defects with buried depth of 27~28 m



(a)桩-孔距 0.3 m

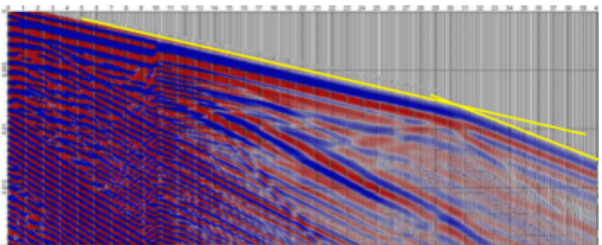


(b)桩-孔距 1.0 m

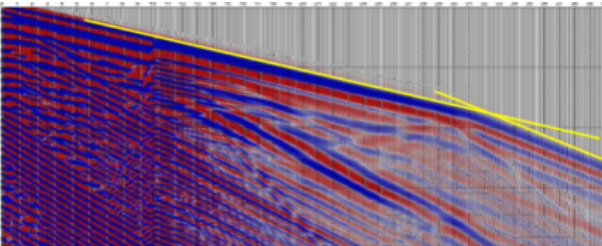


(c)桩-孔距 2.0 m

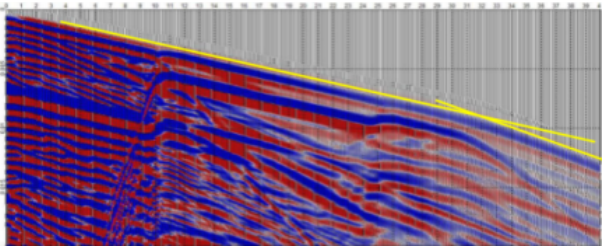
图 5 埋深为 27~28 m 的断桩缺陷测试结果
Fig.5 Simulation results of broken pile defects with buried depth of 27~28 m



(a)桩-孔距 0.3 m



(b)桩-孔距 1.0 m



(c)桩-孔距 2.0 m

图 6 完整桩基旁孔法测试结果
Fig.6 Simulation results of complete pile foundation with parallel seismic method

2.3 上部承台的影响分析

图 7 为桩身断裂时的地震波时—深关系曲线。

桩-孔测试距离越小, 桩身浅部3~4 m处断桩缺陷波形异常特征越明显, 间距达0.7 m时缺陷段影响深度最大, 埋深3~5 m均可见初至时间拟合直线延迟, 但直线斜率变化程度不如小间距时明显。当探测孔位于桩身中部时, 承台对初至直达波形基本无影响, 但桩-承台界面上下反射波组可见较明显的竖向错断现象; 当探测孔位于桩身外部时, 不论钻孔是否穿过承台, 桩-承台结合部位地震波均可见初至波斜率变化, 且钻孔在承台内时直线突变更加显著, 同时反射波组也可见较明显的斜向错断。

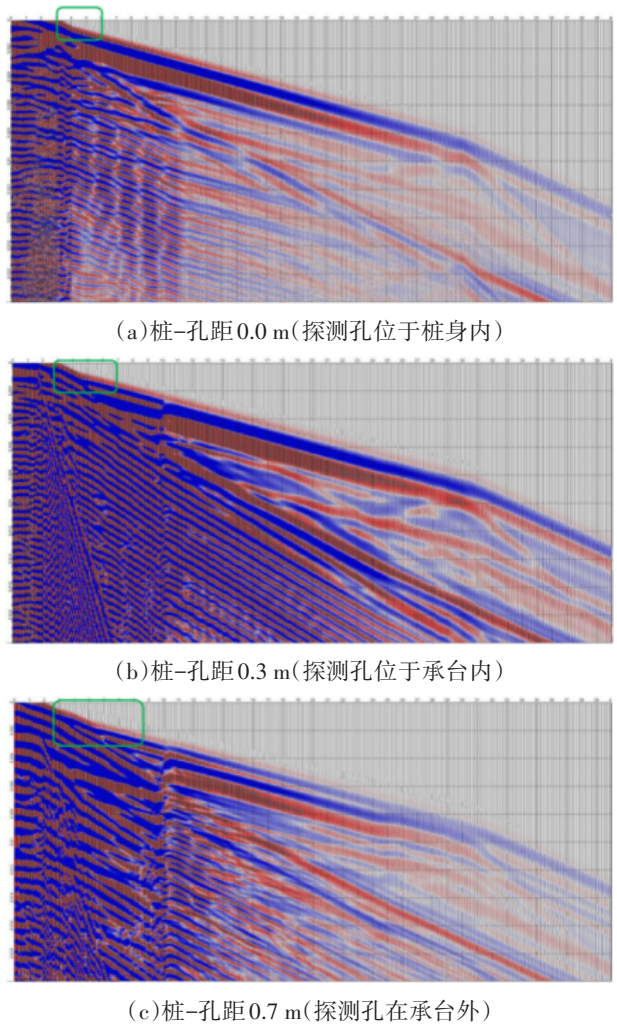


图7 埋深为3~4 m的断桩缺陷测试结果

Fig.7 Simulation results of broken pile defects with buried depth of 3~4 m

图8为桩身局部(单侧)夹泥时的地震波时-深关系曲线。当桩-孔测试间距为0.0 m时, 由于钻孔位于桩身中部, 夹泥缺陷靠近桩身边缘, 从桩顶激发的地震波可绕过缺陷部位沿桩身自上而下传递, 探测孔中接收的直达波和反射波信号很难反映桩侧缺陷特征; 当桩-孔测试间距增加到0.3 m时, 不论

是初至波还是反射波, 在桩身缺陷位置均可见较明显的波异常特征, 即初至波拟合直线斜率突变、反射波轴间断现象; 当桩-孔测试间距进一步增加到0.7 m时, 桩身夹泥缺陷特征已不明显, 很难进行缺陷判别。

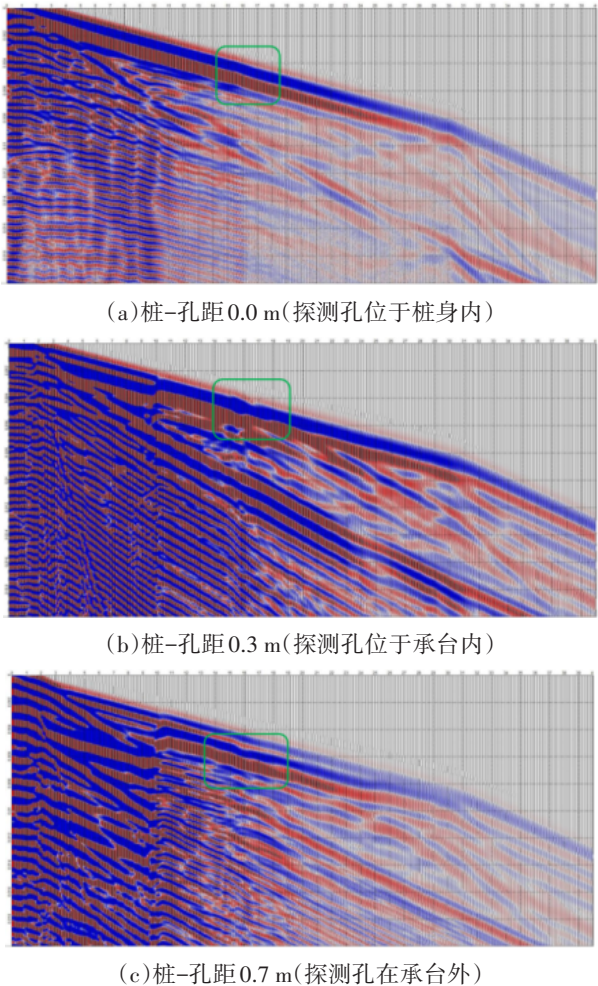
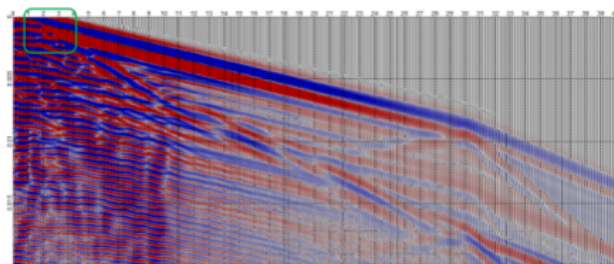


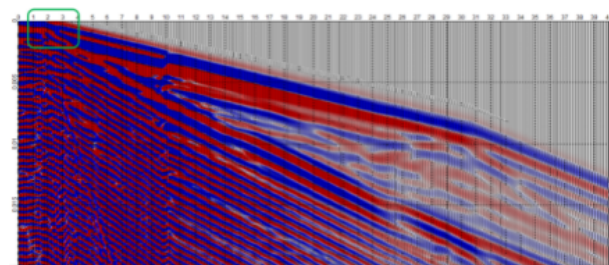
图8 埋深为15~16 m的局部夹泥缺陷测试结果

Fig.8 Simulation results of mud inclusion defects with buried depth of 15~16 m

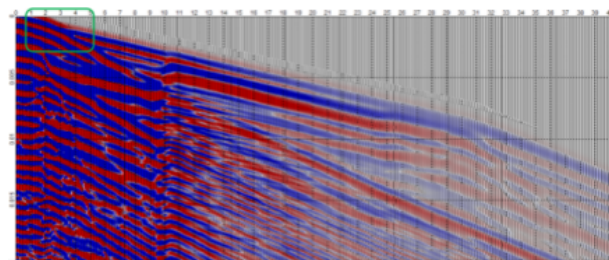
图9为桩-承台连接不良时计算的地震波时-深关系曲线。当桩-孔测试间距为0.0 m时, 虽然顶部0.2 m厚混凝土浇筑质量相对较差, 在该位置附近仍未见到较明显的初至波延迟现象(拟合直线斜率未发生变化), 这与缺陷段长度较短且波速降低不多有关; 当桩-孔测试间距增加到0.3 m和0.7 m时, 初至波在承台-桩顶界面以下可见斜率变化, 但很难区分波速下降是由缺陷还是桩周土引起, 但承台-桩界面位置能够看到反射波斜向错断现象。因此, 单孔地震波法对承台-桩基连接质量缺陷无法进行有效探测和识别, 此时可采用对波阻抗变化更加敏感的孔内管波法进行缺陷探测。



(a) 桩-孔距 0.0 m (探测孔位于桩身内)



(b) 桩-孔距 0.3 m (探测孔位于承台内)



(c) 桩-孔距 0.7 m (探测孔在承台外)

图9 埋深为 1.5~1.7 m 的桩-承台连接不良缺陷测试结果

Fig.9 Simulation results of poor connection between pile and cap with buried depth of 1.5~1.7 m

3 结论

本文通过数值模拟方法对桩顶自由桩基和带承台桩基进行了动力分析,得到了以下结论:

(1)旁孔法用于检测既有桩基长度时桩-孔测试间距应小于 1 m。

(2)桩-孔距增大时,探测孔深度应超过桩底埋深至少 5 倍桩径才能保证桩长判别的准确性。

(3)对与承台连接的桩基,桩-孔测试距离越小,桩身浅部断桩和夹泥缺陷波形异常特征越明显。旁孔法对承台-桩基连接质量缺陷的探测和识别能力有限。

参考文献

- [1] 谷素兵,李锋,谷雷雷,等.软土地区航道开挖对桥梁桩基变形影响研究[J].地震工程学报,2022,44(4):844-853.
- [2] 胡雨菡,包腾飞,朱征,等.桩基对进水塔塔基动力稳定性影响研究[J].地震工程学报,2021,43(3):728-736.
- [3] 张程林,胡贺松,戚玉亮.既有建筑物桩基检测技术研究现状与发展[J].广州建筑,2014,42(02):3-6.
- [4] 朱烈,刘炳凯,周恩海,等.螺杆锚桩反力法在淤泥质土层桩基检测中的应用研究[J].广州建筑,2020,48(06):37-40.
- [5] 卞德存,邵继喜,张国强,等.单孔地震波法在既有桥梁桩基工作状态评估中的应用研究[J].广州建筑,2020,48(05):8-13.
- [6] 杜焯.桩基旁孔透射波检测分析方法研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [7] 张敬一,陈龙珠,宋春霞,等.旁孔透射波法与反射波法检测基桩的对比分析[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(08):99-104.
- [8] 陈龙珠,杜焯,吴宝杰.桩的旁孔透射波法检测技术进展与应用实例[J].水利水电科技进展,2015,35(05):89-94.
- [9] 魏德敏,王棚,徐明江.基于首至波波幅的既有桩基旁孔透射波法[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):243-248.
- [10] 方崇,张信贵,彭桂皎.对新型螺杆灌注桩的受力特征与破坏性状的探讨[J].岩土工程技术,2006,20(06):316-319.
- [11] Liao S T, Tong J H, Chen C H, et al. Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7-8):2279-2298.
- [12] Huang D Z, Chen L Z. Studies on parallel seismic testing for integrity of cemented soil columns[J]. Journal of Zhejiang University Science: Ser A, 2007, 8(11):1746-1753.
- [13] Ni S H, Huang Y H, Zhou X M, et al. Inclination correction of the parallel seismic test for pile length detection[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2):127-132.
- [14] 陈龙珠,杜焯,吴宝杰.桩的旁孔透射波法检测技术进展与应用实例[J].水利水电科技进展,2015,35(5):89-94.
- [15] 张敬一,陈智芳.旁孔透射波法确定桩底深度方法对比研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1331-1337.