

张兴周,陈江,万励,等.交通荷载及其对紧邻基坑支护结构影响的现场实测分析[J].地震工程学报,2020,42(2):490-497.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.490
ZHANG Xingzhou, CHEN Jiang, WAN Li, et al. Field Test and Analysis of Vehicle Load and Its Influence on the Retaining Structure of Adjacent Foundation Pits[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 490-497. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.490

交通荷载及其对紧邻基坑支护结构影响的现场实测分析

张兴周¹, 陈江², 万励³, 罗文俊^{4,5}, 徐长节^{3,4,5,6}

(1. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310000;

2. 浙江省交通投资集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310000;

4. 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013;

5. 华东交通大学土木工程学院, 江西 南昌 330013;

6. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310000)

摘要: 目前对交通荷载对深基坑围护结构的影响研究尚处于起步阶段。本文通过对某深基坑工程交通荷载以及交通荷载作用下深基坑围护结构振动加速度及桩后动土压力的现场实测研究,给出了坑边车辆荷载计算经验公式,并分析了车辆荷载大小、行驶速度等因素对基坑围护结构振动特性及动土压力的影响规律。结果表明:在地表面处,车辆荷载产生的振动以竖直向为主;车辆荷载的大小将直接影响围护结构振动加速度幅值及动土压力大小;车辆行驶速度不同,车辆振动产生的峰值加速度和土体惯性力也不同,从而使得基坑围护结构桩后动土压力也不同,车辆行驶速度越大,基坑围护结构振动峰值加速度及动土压力也越大;车辆交通荷载对基坑围护结构的影响将随着距离的增加而衰减。研究所得结果可供相关基坑工程设计施工参考。

关键词: 交通荷载; 基坑; 振动加速度; 动土压力

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0490-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.490

Field Test and Analysis of Vehicle Load and Its Influence on the Retaining Structure of Adjacent Foundation Pits

ZHANG Xingzhou¹, CHEN Jiang², WAN Li³, LUO Wenjun^{4,5}, XU Changjie^{3,4,5,6}

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

4. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

5. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

6. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Currently, research into vehicle loads' influence on support structures of foundation

收稿日期: 2018-09-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057801); 国家杰出青年科学基金项目(51725802); 国家自然科学基金项目(51878276); 江西省落地计划成果转化项目(KJLD4036)

第一作者简介: 张兴周(1968—), 高级工程师, 长期致力于市政、城市轨道交通和交通等系统的工程建设。E-mail: 240583178@qq.com。

pits is still at an initial stage. Through field measurements of vehicle load and vibration acceleration of foundation pits' retaining structures, as well as dynamic earth pressure of a retaining pile following the action of vehicle load. Empirical formulas for the calculation of vehicle load on adjacent foundation pits were obtained, and the influence of vehicle load and vehicle speed on the vibration characteristics of retaining structures and dynamic earth pressure were analyzed. Results showed that vertical vibration gives priority to the vibration induced by vehicle load at the ground surface. Vehicle load directly influences the amplitude of the vibration acceleration of both the foundation pit retaining structure and the dynamic earth pressure. Vehicle speed also has an effect on the peak acceleration induced by vehicle vibration, and higher speed will lead to larger peak vibration acceleration and dynamic earth pressure. However, the influence of vehicle load will decrease with increasing distance. These results can provide a reference for design and construction of relevant foundation pit projects.

Keywords: vehicle load; foundation pit; vibration acceleration; dynamic earth pressure

0 引言

在现代化进程中,随着城市建设水平的不断提高,交通堵塞的问题日益严重。为了缓解交通压力,地下轨道交通设施的建设已成为普遍趋势。然而由于城市用地局限性等因素,地下轨道交通设施深基坑往往位于交通主线路中并且临近大型建筑群及各种地下管线,基坑围护结构周边荷载条件较为复杂,其中交通荷载即是不可忽略的一项。目前在深基坑工程围护结构设计中,通常将车辆荷载作为静荷载考虑。然而,车辆荷载是一种变频率、变振幅、长期作用的不规则动荷载,对比静荷载而言,其对基坑围护结构的影响因素更为复杂。因此,这类基坑在设计施工时,交通荷载对围护结构影响的评估一直是工程界和学术界的一个难题。

目前,国内外学者针对车辆荷载等交通荷载对深基坑围护结构的影响研究尚处于起步阶段,其中,Hu等^[1]采用一阶可靠度理论,对重型列车荷载影响下挡土结构的内部稳定性进行了评估与分析;Tang等^[2]在JTG D30-2004(公路路基设计规范)^[3]计算方法的基础上,考虑交通荷载影响下土体破裂角变化,优化了土体等效厚度的计算公式,提高了基坑支护设计精度。王俊杰等^[4]考虑地下水渗流,结合现行有关规范,针对不同的排水条件,分别推导了作用于路基挡墙的主动土压力计算公式,讨论了车辆荷载,墙土摩擦角等对主动土压力系数的影响。刘素锦等^[5]依据规范中三种车轮组的方法,将车辆荷载转化为等效的静荷载,通过等效均厚土层法和集中荷载法,研究了基坑边车辆荷载对不同支护类型的基坑稳定性的影响。现场实测方面,林驰等^[6]结合武汉某基坑,针对不同支护形式采取了不同的

检测手段,研究了交通荷载对支护结构的响应规律。针对无支撑基坑围护结构,邱洪志等^[7]通过现场试验,分析车辆的振动响应加速度特性,进而通过极限平衡分析理论,得到了车辆荷载作用下基坑围护桩桩后土体主动土压力的计算表达式。Zhang等^[8]采用锚索和钢管桩相结合的方法对轨道路堤进行加固,通过检测证实其可确保列车荷载作用下基坑的稳定性。数值模拟方面,Xu等^[9]结合工程实例,运用有限元的方法分析了交通荷载对基坑围护结构内力的不利影响,并给出了复杂环境因素作用下基坑垮塌后的加固方案,供今后工程借鉴。潘杰麟^[10]通过数值模拟,对车辆荷载作用下基坑支护桩与土体相互作用情况进行模拟,分析了交通荷载在基坑开挖前后对基坑的影响。张向东等^[11]结合某深基坑工程,采用有限元软件Adina进行模拟,分析了道路交通荷载对在深基坑支护结构稳定性的影响。

在其他动力荷载对挡土结构影响方面,张富^[12]建立了地震冲击荷载作用下基坑桩的有限元分析模型;刘小浪等^[13]运用有限差分法对地震荷载作用下重力式挡土结构土压力进行分析;刘鹏飞等^[14]分析了基坑开挖对地震作用下场地运动特性的影响;Steedman等^[15]将剪切波传播过程中挡土结构后方土体振动加速度的相位变化引入传统土压力计算公式;此后,不少学者采用类似的方法对地震作用下挡土结构主被动土压力进行了分析^[16-19];这些研究方法和结果可为交通荷载作用下的基坑围护结构土压力及动力响应分析提供借鉴,但由于地震荷载与交通荷载存在较大差异,且目前对于路面交通荷载作用下土体振动加速度变化规律的研究及相关数据较

少,相关研究难以开展。

由以上分析可见,目前交通荷载对深基坑围护结构影响方面研究多采用有限元数值模拟的方法进行,理论研究以及深基坑支护结构现场实测资料较为匮乏,且对于车辆荷载大小的确定缺乏实测数据的支撑。本文依托某深基坑工程,通过对现场真实车流过程中车辆荷载、基坑围护土压力、振动特性的持续监测,得到车辆荷载作用下基坑支护结构土压力及振动加速度特性随时间空间的变化衰减规律,相关研究成果可供类似工程参考借鉴。

1 现场测试方案

1.1 工程概况

如图 1 所示,杭州市某地下通道工程东段位于文一路与教工路交叉口,其盾构井基坑采用分段开

挖的施工工序,标准段基坑开挖深度为 8 m,基坑宽度为 20~26 m。基坑支护采用 SMW 工法桩结合钢筋混凝土支撑的支护方式,SMW 工法桩桩径为 0.85 m,桩间距为 0.6 m。基坑开挖之前,在工法桩桩顶位置一道钢筋混凝土冠梁,尺寸为 0.9 m×1.0 m。由于施工部分位于道路正中央,基坑开挖过程中,为保持道路的正常通行,采用原有车流从基坑两侧绕行的方法。基坑边缘与通行段的最小间距仅为 2.0 m。现场实测之前,基坑已开挖至底部,且底板已浇筑完成。

根据野外钻探,场地原位测试与室内土工试验成果,结合场地土层成因类型,场地勘探深度范围内可划分为 16 个工程地质层,细分为 32 个工程地质亚层。基坑开挖所涉及的土层有 6 层,其物理力学参数如表 1 所列。

表 1 土层参数
Table 1 Soil parameters

土层编号	土体名称	平均厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①	素填土	1.45	18.8	0.863	12.6	8
②	砂质粉土	5.05	18.7	0.816	6.4	27.5
③	粉质黏土	2.00	18.7	0.877	15.6	13
④	淤泥质黏土	4.90	16.9	1.362	11.2	6.1
⑤	淤泥质粉质黏土	2.05	17.4	1.239	12.5	8.7
⑥	粉质黏土	2.65	18.3	0.966	14.8	10.5

1.2 传感器布置

为对现场交通荷载及其对基坑围护结构的影响进行研究,选取通行段与基坑边缘间距最小处为测试断面如图 1 所示。

力盒的损坏;在 SMW 工法桩背面靠近道路一侧,以测斜管为骨架,埋设 9 组土压力盒(＃1~＃9),土压力盒测量面朝向道路一侧,其埋设深度从上往下依次为: - 0.8 m, - 1.6 m, - 2.4 m, - 3.2 m, - 4.0 m, - 4.8 m, - 5.6 m, - 6.4 m, - 7.2 m。此外,在测试断面上基坑内侧沿着 SMW 工法桩深度方向布置 4 个单轴加速度传感器(A1~A4),位置依次为: - 1 m, - 3 m, - 5 m, - 7 m。在道路与基坑冠梁中间人行道上,冠梁顶部以及钢筋混凝土支撑上表面并排布置三个三轴加速度传感器(A、B 和 C)。同类别的传感器其基本参数一致,各传感器具体布置位置如图 2 所示。

2 现场测试结果与分析

2.1 车辆交通荷载

现场测试过程中,对测试时间段内经过测试断面的公交车、SUV、以及小型轿车三种常见车辆型号进行记录。车辆荷载直接由土压力盒测得,车辆速度则由车辆前后轮轴距及其经过土压力盒埋设槽的时间差计算得到。土压力盒数据采集仪的采样频率为 100 Hz,采集得到车辆交通荷载(取前轴与后

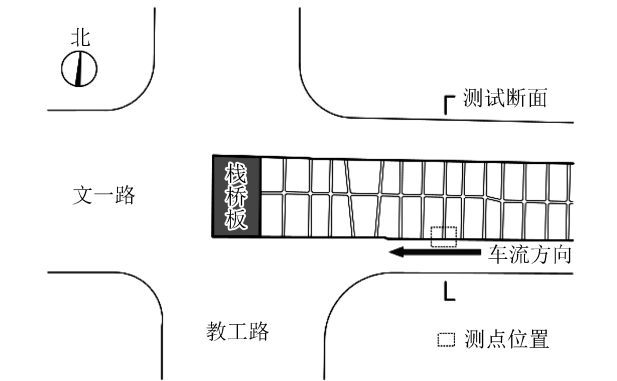


图 1 基坑平面图
Fig.1 Plan of the excavation

在测试断面上,通行道路靠近基坑的一侧开设 - 0.44 m×0.08 m 的长条形土压力盒埋设槽,埋设槽长边方向与车流行驶方向相垂直,内部放置 5 个土压力盒,土压力盒间距为 0.08 m。土压力盒上部用砂土覆盖,并盖有铁板,以防止测试过程中的土压

轴产生荷载的较大值)分布如图 3 所示。

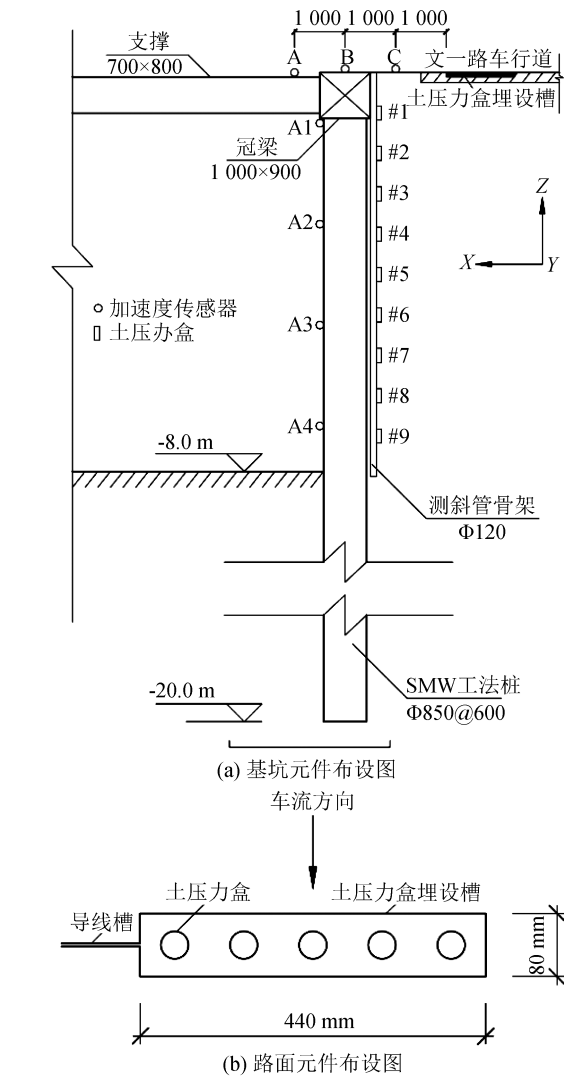


图 2 传感器布设图
Fig.2 Layout of sensors

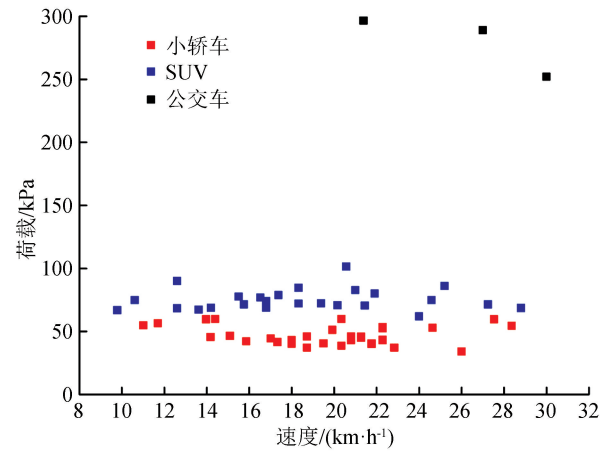


图 3 实测车辆荷载大小分布图
Fig.3 Measured vehicle loads distribution

由图 3(a)可知,根据实测结果,小轿车、SUV、

公交车三种典型车辆产生的峰值荷载分布范围分别为 40~60 kPa,70~90 kPa 以及 250~300 kPa。对于不同车辆类型,其荷载大小相差较大,因此考虑交通荷载进行基坑设计时,应分别进行考虑。

图 4 为实测三种不同类型车辆荷载的时程曲线。可见车辆荷载均呈中间大两头小的三角形分布,其作用时间与车辆行驶速度有关。因此在基坑设计中,可以采用三角形脉冲荷载进行计算。根据实测荷载大小与时间的关系,可得三角形脉冲荷载 $p(t)$ 的表达式如下:

$$p(t) = - \left| \frac{P}{v/2b} \cdot (t - v/2b) \right| + P \quad t \in [0, 0.07] \quad (1)$$

其中: P 为车辆峰值荷载,可按图 3 实测结果进行选取, v 为车辆行驶速度, b 为车辆行驶方向上轮胎与路面的接触宽度,可按 JTG D30-2004(公路路基设计规范)^[3] 进行取值。

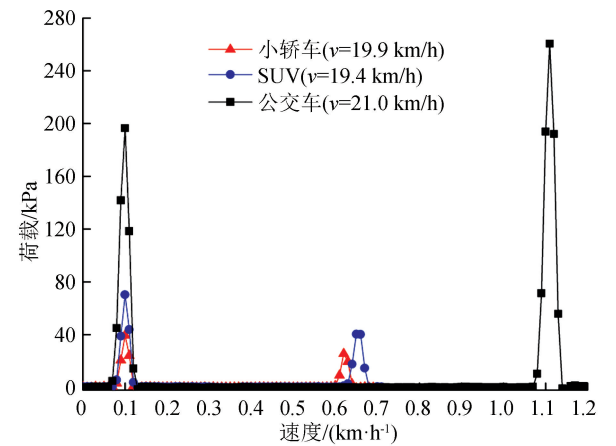


图 4 车辆荷载时程曲线
Fig.4 Time history curve of vehicle loads

2.2 加速度响应分析

围护桩桩后动土压力主要来源于坑边车辆交通荷载振动加速度产生的惯性力。下面将通过车辆交通荷载引起的基坑围护结构加速度响应的现场实测数据,对其进行分析。现场加速度传感器数据采集仪的采样频率为 8 000 sps。

图 5 为现场测试过程中每 1 s 内加速度传感器 A、B、C 测得的最大振动加速度大小。可见,车辆交通荷载引起的 z 方向的振动加速度幅值最大, y 方向振动加速度幅值最小。说明在车辆交通荷载作用下,地表位置土体及基坑围护结构的振动以竖向向为主,水平向次之,基坑设计时应应对这两个方向的振动进行重点考虑。另一方面,由于土体阻尼的存在,从测点 C 至测点 A,随着距离车辆荷载作用点距离

的增大,振动加速度幅值的大小逐渐减小,说明车辆荷载距离基坑围护结构越近,其对围护结构的影响越显著。

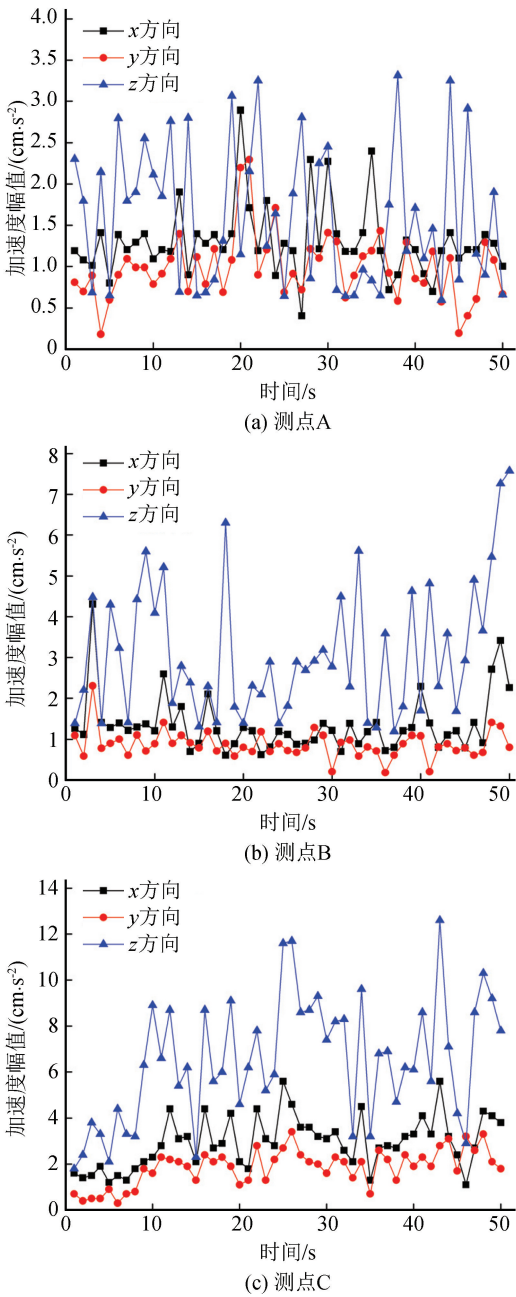


图 5 实测峰值加速度大小
Fig.5 Measured peak acceleration

图 6 至图 8 分别为八种不同车辆荷载作用下,测点 A2 测得的水平向加速度时程曲线。可见,在车辆经过测试断面的过程中,基坑围护桩振动的加速度幅值随车辆逐渐驶近而快速增长,达到峰值之后,又开始随着车辆逐渐驶远而呈指数形式衰减。由于加速度增长和衰减阶段其大小变化趋势明显不同,故这两个阶段产生土体惯性力的作用效果亦不

相同,实际工程当中应分别进行分析。

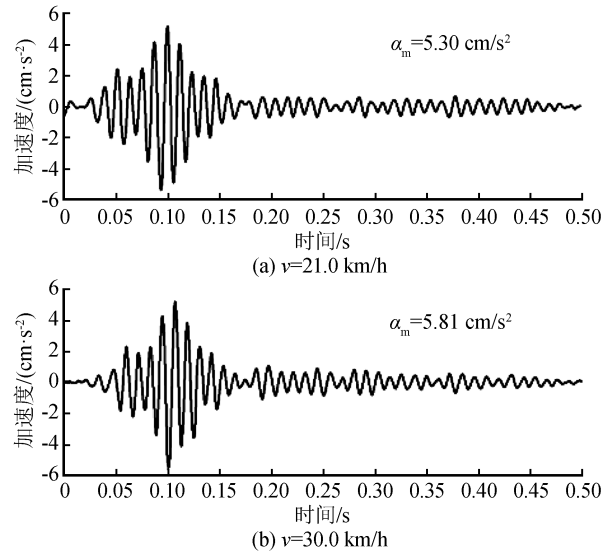


图 6 水平向加速度时程曲线(公交车)

Fig.6 Time history curve of horizontal acceleration (bus)

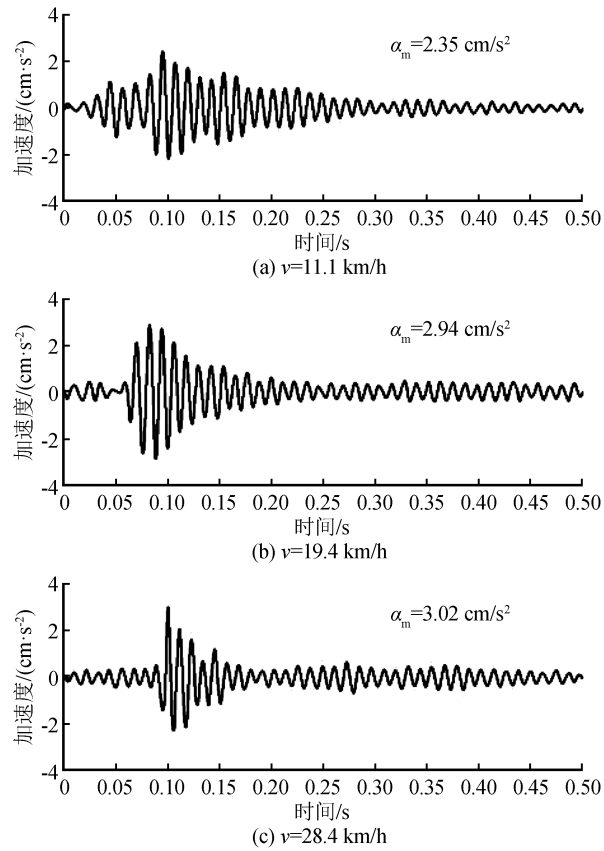


图 7 水平向加速度时程曲线(SUV)

Fig.7 Time history curve of horizontal acceleration (SUV)

表 2 给出了这八组车辆荷载作用下,A1~A4 四个测点测得的基坑围护桩振动峰值加速度大小。结合图 6 至图 8 和表 2 可知,车辆荷载大小及车辆行驶速度均会对基坑围护结构振动峰值加速度产生

影响,车辆荷载越大,车速越快,围护桩振动峰值加速度 α_m 也越大。由于土体并非完全弹性体,土颗粒之间的摩擦作用及黏滞作用将使得车辆荷载产生的振动波沿深度方向发生衰减,而由于支护桩顶部钢筋混凝土支撑的约束作用,桩顶的振动加速度将减小,故实测基坑围护桩峰值加速度的最大值位置发生下移,位于埋深约为 3 m 处(A2 测点),最小值位于围护桩的顶部(A1 测点)。支撑约束情况下基坑围护桩振动加速度随深度的变化关系将在今后的研究中进一步探讨。

2.3 围护结构土压力

开始测试之前,无车辆荷载影响情况下,SMW 工法桩初始桩后土压力分布如图 9 所示,实测结果与介于按式(2)和式(3)计算的第 j 层土体静止土压力及主动土压力理论值之间。

$$p_0 = (0.95 - \sin\varphi_j) \sum_{i=1}^j \gamma_i H_i \tag{2}$$
$$p_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_j}{2}\right) \sum_{i=1}^j \gamma_i H_i - 2c_j \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_j}{2}\right) \tag{3}$$

其中: $\gamma_i, H_i, \varphi_j, c_j$ 分别为第 i 层土体的天然重度、厚度、第 j 层土体的内摩擦角及黏聚力。测试过程

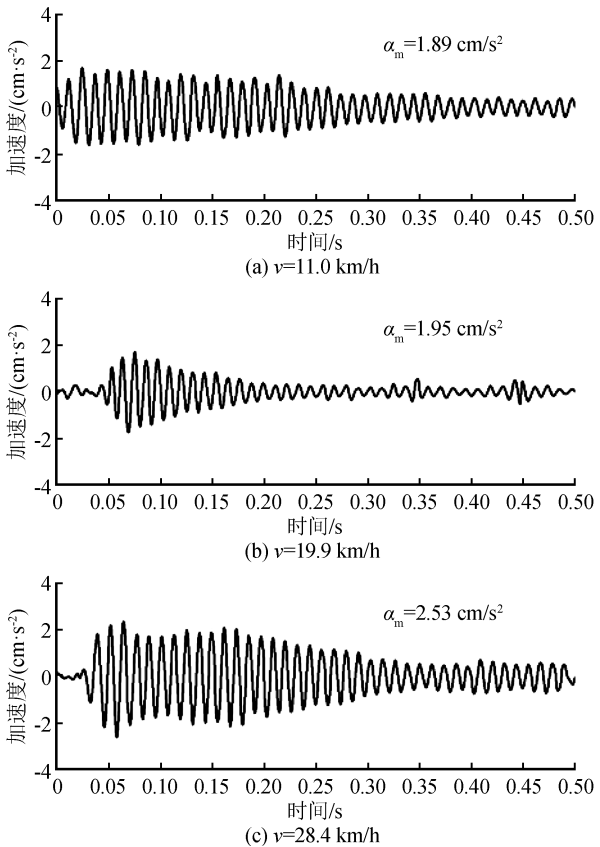


图 8 水平向加速度时程曲线(小轿车)

Fig.8 Time history curve of horizontal acceleration (car)

表 2 基坑围护桩振动峰值加速度(单位:cm/s²)

Table 2 Peak acceleration of foundation pit retaining pile (Unit:cm/s²)

车型 时速/(km·h ⁻¹)	小轿车			SUV			公交车	
	27.5	21.2	15.1	27.2	21.0	15.5	27.0	21.0
测点 A1	1.11	0.90	0.73	1.30	0.93	0.80	3.10	2.88
测点 A2	2.53	1.95	1.89	3.02	2.94	2.35	5.81	5.30
测点 A3	0.77	0.42	0.36	0.32	0.26	0.24	1.56	1.23
测点 A4	0.68	0.21	0.24	0.27	0.24	0.18	0.91	0.72

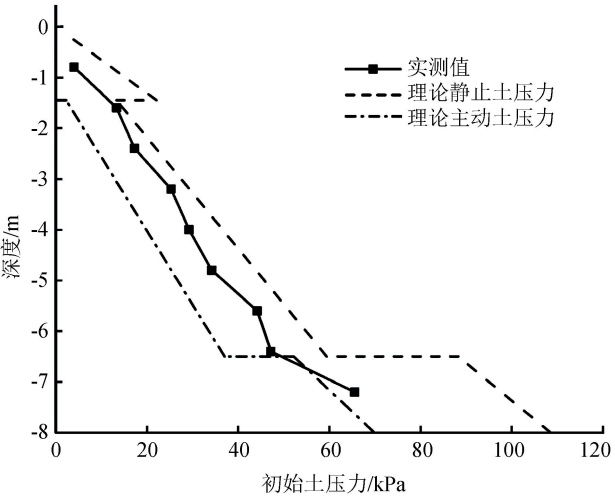


图 9 桩后初始土压力分布

Fig.9 Distribution of initial earth pressure

中,测得土压力相对于初始土压力的变化量 Δp 即为车辆交通荷载产生的动土压力。为分析车辆交通荷载对基坑围护结构土压力的影响,取八组不同车型,不同车速情况下,各土压力测点测得的动土压力 Δp 与初始土压力 p_0 的比值进行对比,如图 10 所示。可见,车辆荷载对基坑围护桩上半部分的影响较大,主要集中在埋深位于 0~3 m 的范围内,最大情况下可使桩后土压力增加 10%。而随着埋深的增加,由上一小节的分析可知,车辆荷载引起土体振动加速度发生衰减,车辆荷载对围护结构土压力的影响逐渐减弱。另外,桩后土压力的变化幅度与车速以及车辆荷载大小有关,车辆荷载越大,车速越快,由前一小节的分析可知其产生的振动加速度和惯性力越大,从而由于惯性力引起的桩后土压力变化幅度也越大。

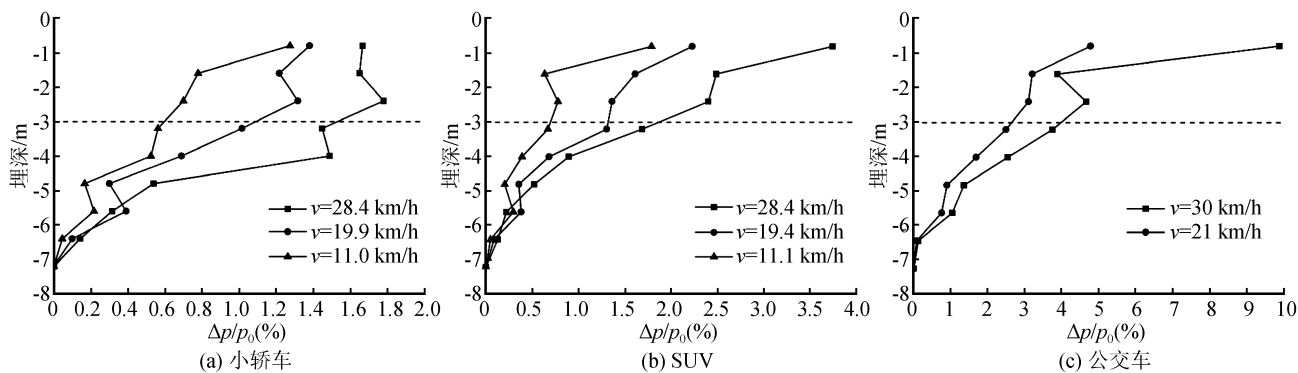


图 10 实测桩后动土压力峰值

Fig.10 Measured peak values of dynamic earth pressure

3 结论

本文通过对杭州市某粉黏土地基中深基坑工程的现场实测,讨论了不同因素对车辆荷载作用下基坑支护结构土压力及振动加速度特性随时间空间的变化衰减规律的影响,得到了以下主要结论:

(1) 现场实测结果表明,车辆行驶过程中,其轮胎与地面接触产生的荷载呈中间大两头小的三角形脉冲荷载分布形式,文中式(2)可作为坑边车辆交通荷载计算依据。

(2) 在地表位置处,车辆荷载引起的基坑围护结构及桩后土体振动以竖直向为主,水平向为辅,且随着距离荷载作用点距离的增加而发生衰减。

(3) 在车辆荷载影响下,基坑围护桩振动的加速度幅值随着车辆的驶近而快速增大,达到峰值之后,又开始车辆的驶远而呈指数形式衰减。其他条件相同的情况下,车辆荷载越大,车辆行驶速度越快,围护桩振动的峰值加速度也越大。所测得围护结构振动加速度波形可作为交通荷载作用下惯性力的计算依据。

(4) 基坑围护桩桩后土压力的变化幅度与车速以及车辆荷载大小有关,车辆荷载越大,车速越快,围护桩后动土压力越大。在埋深 0 m~3 m 范围内,车辆交通荷载对基坑围护桩桩后土压力影响较大,最大情况下可使桩后土压力增加 10%。超出此范围后,随着埋深的增加,车辆荷载对土压力的影响迅速减小。

参考文献(References)

[1] HU B, LUO Z. Life-cycle Reliability-based Assessment of Internal Stability for Mechanically Stabilized Earth Walls in a

Heavy Haul Railway[J]. Computers & Geotechnics, 2018, 101:141-148.

[2] TANG L Y, QIU P Y, SCHLINGER C M, et al. Analysis of the Influence of Vehicle Loads on Deep Underground Excavation-supporting Structures[J]. Iranian Journal of Science & Technology Transaction of Civil Engineering, 2016, 40(3):1-10.

[3] 中交第二公路勘察设计院.公路路基设计规范:JTG D30-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

China Secondary Transportation Construction Highway Exploration and Design Institute. Code for Design of Highway Subgrade: JTG d30-2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2004.

[4] 王俊杰,柴贺军.车辆荷载下饱和路基挡墙主动土压力计算[J].岩土工程学报,2008,30(3):372-378.

WANG Junjie, CHAI Hejun. Active Earth Pressure Induced by Saturated Subgrade Under Vehicle Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3):372-378.

[5] 刘素锦,郭明伟,李兆源,等.浅析车辆荷载对深基坑支护结构的影响[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):105-107.

LIU Sujin, GUO Mingwei, LI Zhaoyuan, et al. Discussion on the Influences of Vehicle Loads on Supporting Structure of Deep Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1):105-107.

[6] 林驰,罗元方,江淑平,等.移动荷载下基坑支护结构响应与监测分析[J].武汉理工大学学报,2007,29(11):112-114.

LIN Chi, LUO Yuanfang, JIANG Shuping, et al. Monitoring and Effect of Moving Load to Foundation Excavation Support Configuration[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(11):112-114.

[7] 邱洪志,孔纪名,王仁超,等.车辆荷载对支护桩主动土压力的影响分析[J].岩土工程学报,2016,38(3):486-493.

QIU Hongzhi, KONG Jiming, WANG Renchao, et al. Effects of Active Earth Pressure on Supporting Piles Under Vehicle Loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3):486-493.

[8] ZHANG H L, ZHANG G L, YANG J S. A Case History of the

- Excavation of deep Foundation Pit Adjacent to Railway[C]// Geohunan International Conference 2011, Changsha, China, 2011:10-16.
- [9] XU C J, XU Y L, LIN H H, et al. Influences of Vehicle Loads on Braced Excavation in Soft Clay[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353-356: 146-151.
- [10] 潘杰麟. 车辆移动荷载作用下基坑支护桩-土相互作用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- PAN Jieli. The Interaction of Support Pile-soil Under Vehicle Moving Loads in Deep Foundation pit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [11] 张向东, 张晨光, 刘家顺. 交通荷载作用下深基坑支护结构稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 125-129.
- ZHANG Xiangdong, ZHANG Chenguang, LIU Jiashun. Analysis on Stability of Deep Foundation Pit Supporting Structure Under Traffic Loads[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(2): 125-129.
- [12] 张富. 基坑桩地震冲击下的受力分析模型仿真[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 466-472.
- ZHANG Fu. Simulation of Force Analysis Model for Foundation Pit Pile Under Seismic Impact[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 466-472.
- [13] 刘小浪, 马淑芝, 贾洪彪, 等. 地震作用下重力式挡土墙土压力特性数值模拟研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 750-758.
- LIU Xiaolang, MA Shuzhi, JIA Hongbiao, et al. Numerical Simulation of Soil Pressure Characteristics of Gravity Retaining Walls during Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 750-758.
- [14] 刘鹏飞, 徐明. 基坑对场地地震响应影响的数值分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 116-128.
- LIU Pengfei, XU Ming. Numerical Analysis of the Influence of Deep Excavation on the Seismic Response of a Site[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 116-128.
- [15] STEEDMAN R S, ZENG X. The Influence of Phase on the Calculation of Pseudo-static Earth Pressure on a Retaining Wall[J]. Géotechnique, 1990, 40(1): 103-112.
- [16] GHOSH P, KOLATHAYAR S. Seismic Passive Earth Pressure Behind Non Vertical Wall with Composite Failure Mechanism: Pseudo-Dynamic Approach[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2011, 29(3): 363-373.
- [17] NIMBALKAR S S, CHOUDHURY D. Computation of Point of Application of Seismic Passive Resistance by Pseudo-dynamic Method[J]. Géotechnique, 2008, 55(9): 699-702.
- [18] KOLATHAYAR S, GHOSH P. Seismic Active Earth Pressure on Walls With Bilinear Backface Using Pseudo-dynamic Approach[J]. Computers & Geotechnics, 2009, 36(7): 1229-1236.
- [19] 王志凯, 夏唐代, 陈炜昀. 刚性挡土墙地震主动土压力的拟动力学分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(1): 46-51.
- WANG Zhikai, XIA Tangdai, CHEN Weiyun. Pseudo-dynamic Analysis for Seismic Active Earth Pressure Behind Rigid Retaining Wall[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(1): 46-51.