

DOI: 10.11779/CJGE201603012

车辆荷载对支护桩主动土压力的影响分析

邱洪志^{1, 2}, 孔纪名^{*1}, 王仁超^{1, 2}, 黄森旺^{1, 2}, 崔云¹

(1. 中科院成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过现场车辆加载试验, 测定加载过程中产生的加速度及桩后土压力, 分析车辆的振动特性, 得到了振动加速度随时间变化的关系式。进而基于极限平衡分析理论, 得到了车辆荷载作用下桩后主动土压力的计算表达式, 并讨论了水平振动加速度系数、土体内摩擦角、土体重度及桩-土外摩擦角对桩后主动土压力大小和分布的影响。结果表明: 车辆行驶速度越大, 引起的响应峰值加速度越大, 产生的动土压力幅值越大。当车速相同, 加载车辆与桩间距越大, 产生的动土压力值越小。通过对文中车辆荷载作用下桩后主动土压力计算公式的验证, 发现实测土压力值与理论分析结果吻合较好。因此, 该土压力计算公式可作为车辆荷载作用下支护桩后主动土压力的计算依据。

关键词: 土压力; 车辆荷载; 支护桩; 基坑

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)03-0486-08

作者简介: 邱洪志(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土力学计算与灾害防治工程方面的研究工作。E-mail: hnqhz@126.com。

Effects of active earth pressure on supporting piles under vehicle loads

QIU Hong-zhi^{1, 2}, KONG Ji-ming¹, WANG Ren-chao^{1, 2}, HUANG Sen-wang^{1, 2}, CUI Yun¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences/ Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610000, China. 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Through field loading tests on vehicle, the acceleration under loading conditions and soil pressure behind piles is determined, an equation for the vibration acceleration changes over time is obtained, and the vibration characteristics of the vehicle are analyzed. Based upon the limit equilibrium method, a method is proposed for calculating the dynamic earth pressure on piles under vehicle loading. The effects of a wide range of parameters like vibration acceleration coefficient, wall friction angle, soil friction angle, and the weight of the soil on the active earth pressure are studied. The results show that the peak acceleration and the amplitude of dynamic soil pressure increase with increasing vehicle speed. When the speed is the same, the dynamic soil pressure is attenuated very fast with the spacing between the loading vehicle and the pile, which is changed in a sinusoidal fashion. Through validation, it is indicated that the measured earth pressure accords with the theoretical analysis. Therefore, the proposed method may provide a basis for the calculation of active earth pressure on supporting piles under vehicle load.

Key words: earth pressure; vehicle load; supporting pile; foundation pit

0 引言

随着城市化的发展, 城市道路扩建工程和地铁建设工程越来越多, 靠近道路的基坑也大量出现。在这类基坑支护设计时, 就必须考虑车辆荷载的影响。在基坑支护设计与施工中, 土压力的计算一直是工程师遇到的难题, 如何考虑车辆荷载引起的土压力, 对于基坑的安全施工与顺利进行将十分重要。

车辆行驶过程中产生的振动荷载既不同于静载荷, 也不同于地震荷载, 而是长时间往复施加的循环荷载。目前, 国内外学者对于各类土体在车辆荷载作用下的动力特性已取得了大量的成果^[1-5]。然而, 车辆荷载对基坑支护结构的影响研究, 主要集中在支护结

构的动力特性和支护结构稳定性两个方面^[6-8]。对于土压力计算问题的研究, 仅仅是将车辆荷载等效成静荷载来考虑, 没有考虑车辆荷载的振动特性^[9-11]。

基坑工程中土压力计算方法主要是基于滑楔理论推导出的库仑(Coulomb)土压力理论或由极限平衡理论推导出的朗肯(Rankine)土压力理论。这些土压力计算理论没有考虑车辆荷载的振动特性, 计算结果就不能反映出支护结构受力的真实情况。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401608); 国家高技术研究发展计划“863”计划项目(2012AA121302)

收稿日期: 2014-12-08

*通讯作者

本文通过现场加载试验, 测定加载车辆行驶过程中的加速度时程曲线, 分析车辆的振动特性; 测试加载前后桩后土压力值, 分析车辆荷载对基坑支护桩后土压力的影响规律。在前人的研究基础上, 考虑车辆荷载行驶过程中振动加速度衰减的特点, 给出车辆荷载作用下桩后土压力的计算表达式; 讨论水平振动加速度系数、土体内摩擦角、桩-土外摩擦角及土体重度等因素对土压力的影响。将本文方法计算结果与实测土压力值进行对比分析, 验证了本文方法的正确性。

1 现场试验概况

1.1 工程概况

郑州市某地下快速道路工程, 全长 1260.192 m。采用分段开挖施工工序, 基坑开挖最大深度为 12.8 m。基坑支护采用桩锚联合支护结构, 支护桩采用桩径为 1.0 m 的钻孔灌注桩, 支护桩间中心距为 2.5 m。基坑开挖之前, 在支护桩顶位置, 即 -2.0 m 处设置一道钢筋混凝土冠梁, 尺寸为 1.1 m × 0.8 m。该基坑工程在施工过程中, 原有道路保持正常通行。

工程场地范围内, 表层为人工堆积的杂填土, 其下为第四纪沉积地层, 土层分布相对均匀稳定。岩土工程勘察揭示的地下水位埋深为 20.9~25.1 m, 历时最高水位埋深为 15.0 m, 无承压水。地面以下 30.18 m 深度范围内的土层物理力学参数见表 1 所示。

1.2 测试仪器布置

支护桩采用钻孔灌注桩, 支护桩浇筑完成并达到一定强度之后, 通过机械打孔将土压力盒布设在支护桩背对基坑的一侧。共设有 8 组土压力盒, 放置深度从上往下依次为 -2.5, -3.5, -5.0, -6.5, -8.0, -9.0, -10.0, -11.5 m。在人行道上面并排布置 3 个加速度传感器, 其间距为 325 mm; 沿着桩的深度布设 5 个加速度传感器, 位置依次为 -2.5, -4.5, -6.5, -8.5, -11.5 m, 各传感器规格一致。测点布设平面位置见图 1 所示, 立面图见图 2 所示。

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

土层编号	土层名称	平均厚度 /m	含水率 w/%	重度 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 v
①	杂填土	1.1		19.0		24	32	0.25
②	粉质黏土	4.16	17.5	18.7	21	28	24	0.3
③	粉土	5.52	17.7	18.6	22	23	21	0.31
④	粉砂	2.43	16.8	19.0	17	30	36	0.26
⑤	粉质黏土	16.97	21.6	19.6	21	18	34	0.28

表 2 加载车辆技术指标及加载车辆轴重明细表

Table 2 List of technical indices and axial loads of vehicle

编号	车型	轴距/m		轮距/m		轴重/kN		总重/kN
		1, 2 轴	2, 3 轴	1 轴	2, 3 轴	1 轴	2, 3 轴	
#1	货车	3.80	1.35	2.00	1.90	87.0	347.5	434.5

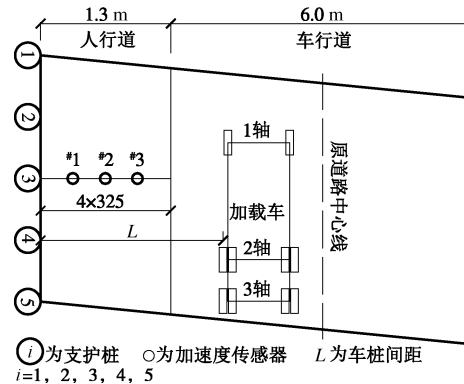


图 1 测点布设图

Fig. 1 Layout of measuring points

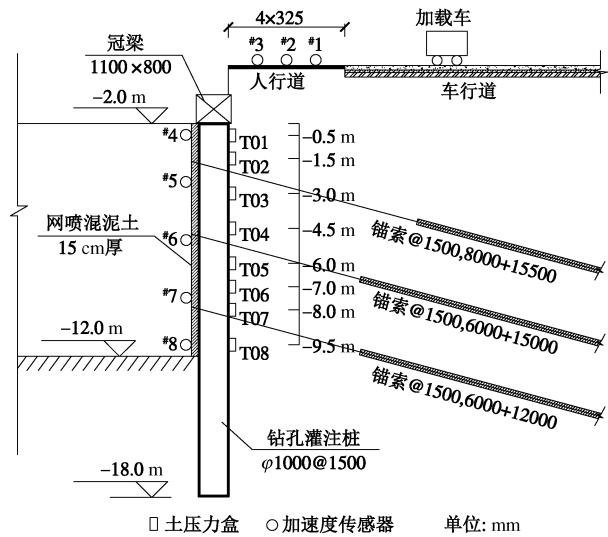


图 2 基坑支护方案

Fig. 2 Program of pit supporting structure

2 试验加载方案及过程

现场加载试验之前, 基坑开挖至底部, 底板已浇筑完成, 并且支护桩变形与位移均在安全范围内。加载试验过程中, 通过控制加载车辆的行驶速度和车辆与桩间距, 来分析桩后土压力的变化规律。

现场实际所用加载车辆技术指标及轴重详见表 2

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

土层编号	土层名称	平均厚度 /m	含水率 w/%	重度 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 v
①	杂填土	1.1		19.0		24	32	0.25
②	粉质黏土	4.16	17.5	18.7	21	28	24	0.3
③	粉土	5.52	17.7	18.6	22	23	21	0.31
④	粉砂	2.43	16.8	19.0	17	30	36	0.26
⑤	粉质黏土	16.97	21.6	19.6	21	18	34	0.28

表 2 加载车辆技术指标及加载车辆轴重明细表

Table 2 List of technical indices and axial loads of vehicle

编号	车型	轴距/m		轮距/m		轴重/kN		总重/kN
		1, 2 轴	2, 3 轴	1 轴	2, 3 轴	1 轴	2, 3 轴	
#1	货车	3.80	1.35	2.00	1.90	87.0	347.5	434.5

所示, 加载车辆参数是按照最不利情况选取的。在实际工程中, 临近基坑的道路对通行车辆的载重进行了限制。本文研究了最不利情况下, 车辆荷载对支护桩土压力的影响, 可以反映出加载过程中支护桩后产生的最大土压力。

加载工况 1: 不同车速。加载车辆分别以 10, 20, 30 km/h 的速度沿着指定线路匀速向前行驶。该路段对通行车辆限速 30 km/h, 加载车辆最大行驶速度为 30 km/h 满足实际要求。

加载工况 2: 不同车桩间距。车桩间距分别选取了 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 m 5 组, 这里的车桩间距是指加载车辆靠近基坑一侧的车轮中心位置与基坑支护桩之间的距离, 如图 1 所示。

3 试验结果与土压力计算分析

3.1 加速度响应分析

加速度产生的惯性力是桩后产生动土压力的主要原因; 同时, 桩后土体的加速度反应及其变化规律也是评价车辆荷载对桩后动土压力影响的基本资料, 下面主要对桩后土体的水平加速度响应进行分析。

现场加载试验过程中, 采集到不同工况下整个试验过程中的加速度值。图 3 是车桩间距为 2.5 m 时, 加载车辆行驶速度分别为 10, 20, 30 km/h, 对应^{#3}加速度传感器采集的响应加速度幅值随时间变化的关系曲线。

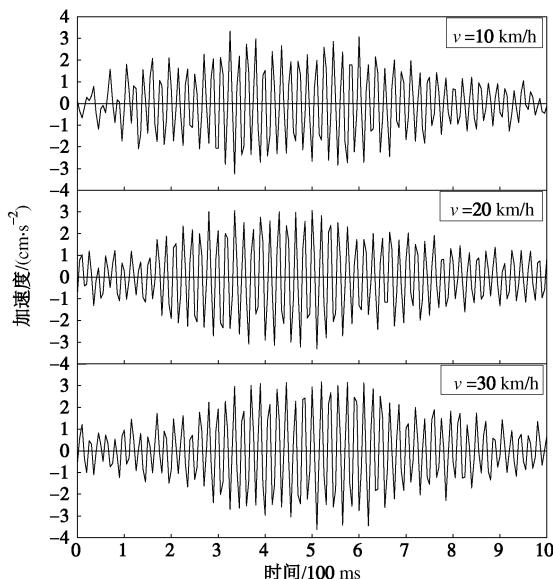


图 3 不同车速对应水平向加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration curves for different vehicle speeds in horizontal direction

在研究车辆荷载振动对结构的作用时, 加速度被

看作是表示振动强弱的度量。图 3 给出了试验过程中水平方向上加速度时程曲线, 加速度值随时间增大而增大, 达到峰值后又开始随时间增大而减小。加速度的衰减过程是按照时间的指数形式衰减, 假定在加速度的增大与衰减过程中, 产生的惯性力作用效果相同。为了简化分析, 这里取加速度衰减过程时程曲线进行研究。

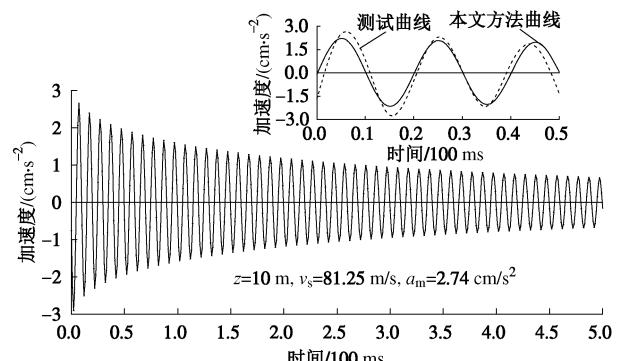


图 4 深度 10 m 处水平加速度拟合曲线

Fig. 4 Fitting acceleration curve for depth of 10 m
土体剪切波速为^[12]

$$v_s = (G / \rho)^{1/2} , \quad (1)$$

式中, G 为剪切模量, ρ 为土体密度。

假定加载过程中, 支护桩后土体振动形式为正弦式振动, ω 为桩后土体振动角频率, T 为振动周期, $\omega = 2\pi/T$ 。则在任意时刻 t , 深度 z 处的振动水平加速度为

$$a_h(z, t) = \frac{a_m}{e^{\sqrt{t}}} \sin \omega \left(t - \frac{z}{v_s} \right) , \quad (2)$$

式中, a_m 为振动峰值加速度。

为了验证式 (2) 的正确性, 选用本文加载试验的相关参数, 回填土层的剪切波速 $v_s = 81.25$ m/s, 车辆与测试点距离为 2.5 m, 已知响应加速度幅值为 2.74 cm/s², 经计算得到了竖直方向 $z=10$ m 位置的加速度时程曲线, 如图 4 所示。

根据土体剪切波速的定义式, 不同土体剪切波速不一样。非黏性土深度 z 的剪切波速^[12]为

$$v_s(z) = (Kz^\beta / \rho)^{1/2} \quad (0 \leq \beta \leq 1) , \quad (3)$$

式中, K 为一个与土体性质有关的常数。将式 (3) 带入式 (2) 得深度 z 处水平加速度为

$$a_h(z, t) = \frac{a_m}{e^{\sqrt{t}}} \sin \omega \left[t - \left(\frac{\rho}{K} \right)^{1/2} \cdot z^{1-\beta/2} \right] . \quad (4)$$

实践表明, 车辆行驶速度不同, 车辆振动产生的峰值加速度也不同。研究车速对桩后土压力的影响,

表3 不同车速、车桩间距各测点加速度幅值

Table 3 Peak accelerations at different speeds and vehicle-pile distances

(cm/s²)

间距/m	#1			#2			#3		
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	10 km/h	20 km/h	30 km/h	10 km/h	20 km/h	30 km/h
1.5	2.48	2.68	2.89	2.44	2.62	2.84	2.31	2.58	2.78
2.0	2.37	2.61	2.72	2.26	2.50	2.69	2.13	2.44	2.56
2.5	2.26	2.48	2.59	2.07	2.36	2.34	1.92	2.28	2.46
3.0	2.17	2.32	2.48	1.92	2.08	2.35	1.85	1.93	2.38
4.0	2.04	2.11	2.31	1.78	1.97	2.21	1.72	1.88	2.10

就要先分析行车速度与加速度幅值之间的关系。表3给出了不同车速、不同车桩间距下各水平位置上的测点响应加速度幅值。车速为30 km/h时, 得到的加速度幅值最大, 为2.89 cm/s²; 车桩间距为1.5 m时, 车速从10 km/h增大到30 km/h, #1测试点的加速度幅值增加了0.41 cm/s², 增幅达到16.5%, #2, #3测试点增幅分别为16.4%和20.3%。车桩间距为4.0 m时, 车速从10 km/h增大到30 km/h, 3个测点加速度幅值增幅分别为13.2%, 24.1%, 22.1%。以上分析表明, 车桩间距和车速都是影响振动加速度的重要因素。

3.2 桩后动土压力分析

加载之前, 桩后土压力分布如图5所示。将加载过程中与加载前测试的土压力值相减, 它们的差值为 Δp , 也就是加载产生的动土压力, 如图6所示。

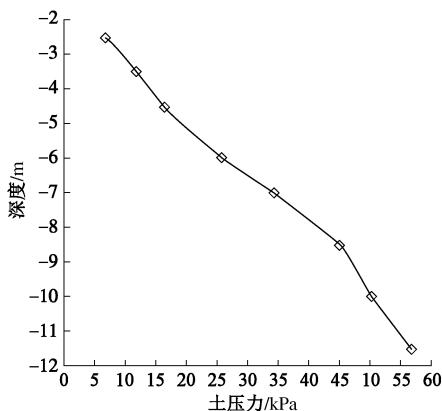
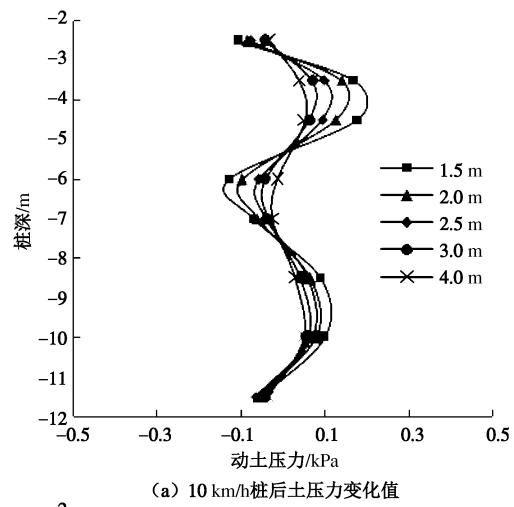


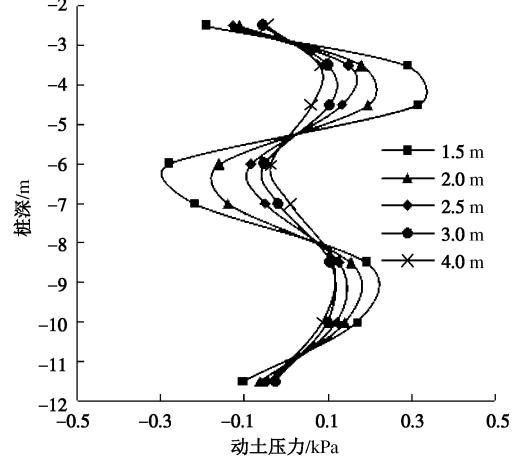
图5 加载前桩后土压力分布曲线

Fig. 5 Original values of earth pressure on piles

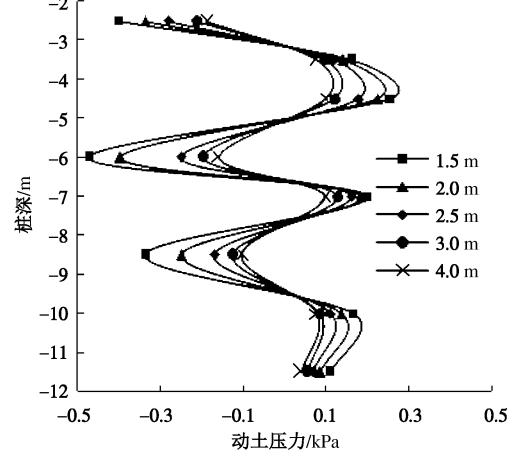
加载试验中, 加载车辆以匀速通过加载路段。图6(a)为加载车辆行驶速度 $v=10 \text{ km/h}$ 时, 不同车桩间距下, 支护桩动土压力分布曲线。从图中可以看出, 加载车辆与支护桩之间的距离为1.5 m时, 产生的动土压力最大, 车桩间距越远, 动土压力值越小。在支护桩的顶端引起的土压力变化值的绝对值最大, 沿桩深方向往下, 车辆荷载作用的影响减小。整体上, 车辆荷载作用产生的动土压力与桩的深度并不成线性关系, 而表现出波动特征。



(a) 10 km/h桩后土压力变化值



(b) 20 km/h桩后土压力变化值



(c) 30 km/h桩后土压力变化值

图6 实测桩后动土压力

Fig. 6 Measured dynamic earth pressures of supporting piles

从图 6(b)、(c) 可以得知, 车速不同, 动土压力变化规律相同, 变化幅度要比车速为 10 km/h 时大很多。车辆行驶速度越大, 车辆振动引起的土压力值就越大。车桩间距为 2.5 m 即为车辆行驶在道路中心线位置时, 产生的动土压力值迅速减小, 随着车桩间距的增大, 车辆荷载引起的土压力值逐渐减小。因此, 车辆行驶在道路中心线或更远的位置, 可以减小其对基坑支护结构稳定性的影响。

在支护桩顶端位置、1/2 桩深和桩底位置, Δp 均是负值, 说明在这些部位, 加载使得桩后土压力值减小。同理, Δp 为正值时, 车辆使得桩后土压力值增大。因此, 土压力计算理论中将车辆荷载等效成静荷载来考虑, 这显然与实际存在较大的偏差。

3.3 土压力计算分析

Seed 等^[13]曾在 Mononobe–Oakbe^[14–15](简称 M–O)方法的基础上, 将地震作用下挡土墙后土压力分成静态力和动态力两个部分。Steedman 等^[12]在此基础上, 认为作用在挡土墙上的静态力是由处于极限平衡状态土楔体的自重提供, 动态力是由作用在土楔体上的水平惯性力提供。水平惯性力可以表示为

$$\begin{aligned} Q_h(z, t) &= \int_0^H \Delta m \cdot a_h(z, t) \\ &= \frac{k_h \gamma \lambda_s \cot \alpha}{4\pi^2 e^{\sqrt{t}}} \left[-2\pi H \cos \omega t - \lambda_s \sin \omega \left(t - \frac{H}{v_s} \right) + \lambda_s \sin \omega t \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $k_h = a_m / g$, g 重力加速度, k_h 为水平加速度系数; $\lambda_s = v_s T$ 为剪切波波长; α 为土楔体滑动面水平夹角; γ 为土的重度。

根据极限平衡理论, 桩后受到的土压力为

$$P_{ae} = \frac{Q_h \cos(\alpha - \varphi) + W \sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\delta - \alpha + \varphi)}, \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cot \alpha, \quad (7)$$

式中, φ 为土内摩擦角, δ 为支护桩与土界面外摩擦角。

侧向土压力系数定义为

$$K_{ae} = \frac{2P_{ae}}{\gamma H^2}. \quad (8)$$

支护桩后的侧向土压力分布大小可对 $P_a(z, t)$ 中的 z 求偏导数:

$$\begin{aligned} p_{ae}(z, t) &= \frac{\partial P_{ae}(z, t)}{\partial z} \\ &= \frac{k_h \gamma \lambda_s \cot \alpha \cdot \cos(\alpha - \varphi)}{4\pi^2 e^{\sqrt{t}} \cdot \cos(\delta - \alpha + \varphi)} \left[-2\pi \cos \omega t + \frac{\lambda_s^2}{2\pi} \cos \omega \left(t - \frac{z}{v_s} \right) \right] + \\ &\quad \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\delta - \alpha + \varphi)} z \gamma \cot \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可以得到支护桩受到的侧向土压力由两部分组成: $p_{ae} = p_{as} + p_{ad}$,

$$p_{as} = \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\delta - \alpha + \varphi)} z \gamma \cot \alpha, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_{ad} &= \frac{k_h \gamma \lambda_s \cot \alpha \cdot \cos(\alpha - \varphi)}{4\pi^2 e^{\sqrt{t}} \cdot \cos(\delta - \alpha + \varphi)} \left[-2\pi \cos \omega t + \right. \\ &\quad \left. \frac{\lambda_s^2}{2\pi} \cos \omega \left(t - \frac{z}{v_s} \right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

式中, p_{as} 为静止土压力, 由土的自重产生, p_{ad} 为动土压力, 由车辆荷载产生的惯性力引起。动土压力 p_{ad} 是时间 t 和深度 z 的函数。

4 土压力计算影响因素分析

4.1 水平加速度系数 k_h 对动土压力的影响

根据对振动系数 k_h 的定义, 系数 k_h 反映了振动荷载产生的惯性力的大小。现场测试试验发现, 加载过程中, 测试点的加速度幅值较小, 最大不超过 0.04 m/s², 即对应的 k_h 值不超过 0.004。按照式(11)计算得到 5 组 k_h 值对应的动土压力, 其分布情况如图 7 所示。计算用的参数与现场试验相关参数一致。从图中可以看出, k_h 值越小, 产生的动土压力值就越小; 整体上看, 动土压力分布表现出波动特征。

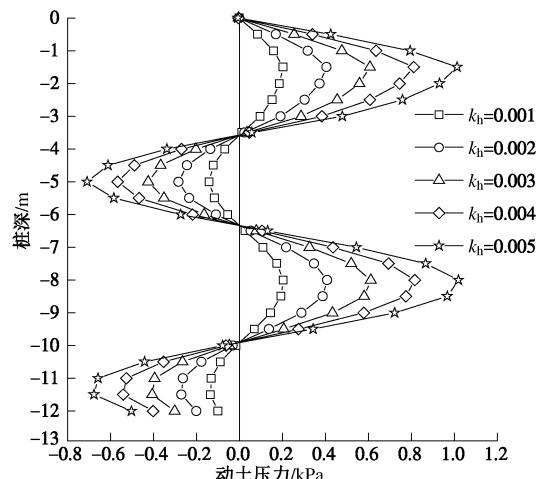


图 7 振动系数 k_h 对动土压力的影响
Fig. 7 Influences of coefficient k_h on dynamic earth pressure

由式(11)可知, 动土压力的大小随着时间的增加而衰减。图 8 给出了不同时刻对应的土压力分布情况, 计算动土压力过程中, 振动系数 $k_h=0.001$ 。在不同时刻, 惯性力产生的动土压力表现出不同的特征。当 $t=0.1$ s 时, 动土压力值变化最大; 不同深度土压力的大小相差较大。随着时间的增加, 行驶车辆逐渐远离支护桩, 车辆振动产生的响应加速度逐渐减小, 相应地作用在桩后的惯性力产生的动土压力就逐渐衰

减。同理, 如果车辆振动产生的响应加速度随时间增加而增大, 则桩后产生的动土压力就逐渐增大。

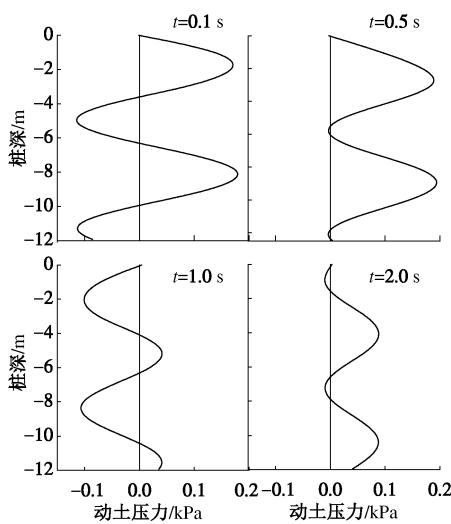


图 8 不同时刻动土压力分布

Fig. 8 Distribution of a dynamic earth pressure at different time

4.2 土的内摩擦角 φ

图 9 给出了不同内摩擦角桩后主动土压力分布规律, 内摩擦角从 18° 增加到 28° , 其它计算参数保持不变, 对应主动土压力从 101.4 kPa 减小到 50.5 kPa 。内摩擦角每增加 1° , 土压力减小 5 kPa , 说明内摩擦角对主动土压力的影响很敏感。并且桩后主动土压力随内摩擦角的增大而减小。

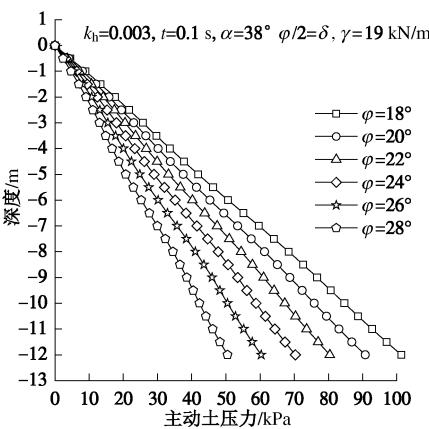


图 9 桩后土体内摩擦角 φ 对主动土压力的影响

Fig. 9 Influences of internal friction angle of soils on active earth pressure

4.3 桩-土外摩擦角 δ

图 10 给出了 3 组桩-土界面外摩擦角对应主动土压力变化规律, 取外摩擦角 δ 分别为 0° , $\varphi/2$ 和 φ 。从图中可以看出, 随着外摩擦角增大, 土压力水平有一定的减小。当外摩擦角增加到一定程度后, 土压力不再减小, 反而又逐渐增大, 但是主动土压力变化幅度很小, 说明外摩擦角对桩后土压力的影响很小。

4.4 土的重度 γ

土体重度是决定支护桩后土压力大小的重要因素, 图 11 考虑车辆荷载的振动作用, 桩后主动土压力分布曲线与土体重度变化的关系。从图中土压力分布对比曲线可以看出, 随着土体重度增加, 主动土压力增大。重度 γ 每增加 1 kN/m^3 , 对应土压力增加 2.65 kPa , 说明土体重度对土压力的影响较大。根据式(9), 土的重度对静止土压力和动土压力都有贡献。

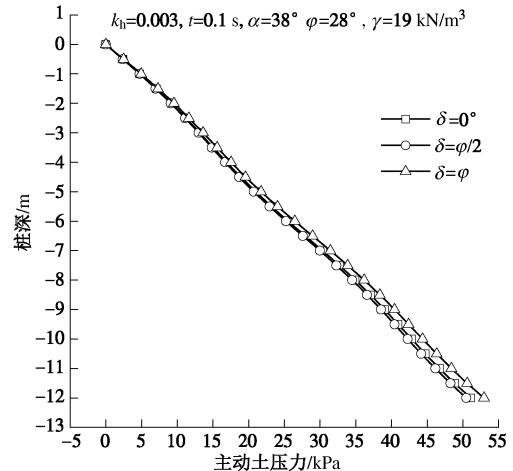


图 10 桩-土界面外摩擦角 δ 对主动土压力的影响

Fig. 10 Influences of soil/pile friction angle on active earth pressure

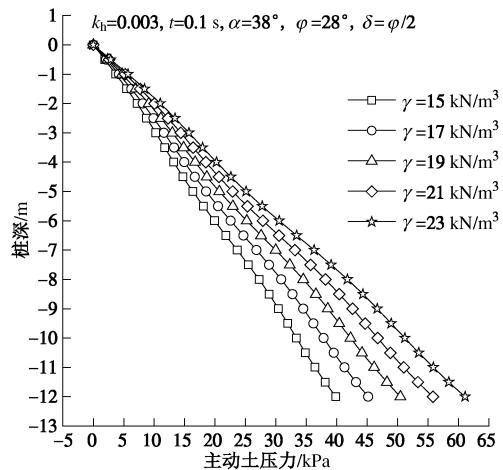


图 11 土重度 γ 对主动土压力的影响

Fig. 11 Influences of unit weight of soils on active earth pressure

5 计算结果对比分析

5.1 土压力计算公式验证分析

规范^[16]给出了车辆荷载作用下挡土结构主动土压力的计算方法, 该方法将车辆荷载等效为均布土层厚度。M-O 方法^[14-15]最开始应用在地震土压力的计算, 考虑振动惯性力对土压力的贡献。为验证本文方法的有效性和合理性, 通过比较前面两种方法对同类问题的计算结果进行验证。

表 4 本文方法与其它文献计算结果对比

Table 4 Comparison among various calculated results

α /(°)	φ /(°)	δ /(°)	γ /(kN·m ⁻³)	k_h	$P_{ae}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	M-O 法 ^[14-15]	《规范》 ^[16]
35	30	10	19	0.003	425.56	432.15	471.25
38	30	15	19	0.003	516.70	520.06	561.46
38	20	10	19	0.003	547.32	550.62	597.75

从表 4 对比结果可知, 本文方法与 M-O 方法计算结果十分接近, 较 M-O 方法计算结果小 0.61%~1.5%, 较现行规范计算结果小 8.63%~10.74%。3 种计算方法都是基于库仑土压力计算方法得到, 不同点在于考虑车辆荷载的作用时, 规范法没有考虑车辆荷载的动力特性; M-O 方法仅考虑了振动荷载峰值加速度对土压力的贡献, 没有考虑车辆荷载振动波的传播特征。本文在前人研究基础上, 考虑了车辆荷载振动波传播过程中衰减的特征及波速对土压力的影响, 这正是引起上述计算偏差的原因。

5.2 实测值与计算值对比分析

将计算结果与实测土压力进行对比分析。计算土压力用到的相关参数与试验中的参数相一致, 二者结果具有可比性。图 12 中实线表示实测动土压力值, 虚线表示动土压力计算值。图 12 (a)~(c) 中, 车桩间距 l 均为 1.5 m, 车速分别为 10, 20, 30 km/h, 对应试验测试结果与计算土压力分布曲线。从三幅图中可以看出, 实测值与计算值吻合较好, 在桩的顶部与底部有一定的偏差, 实测值要比计算值小; 当车速到达 30 km/h 时, 土压力计算值要比实测值略小。

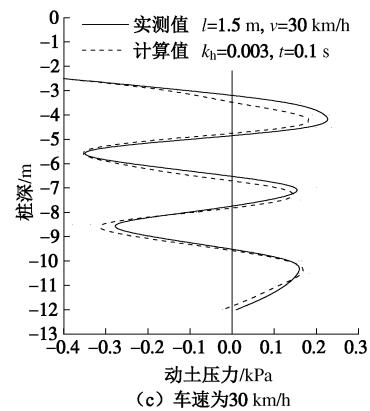
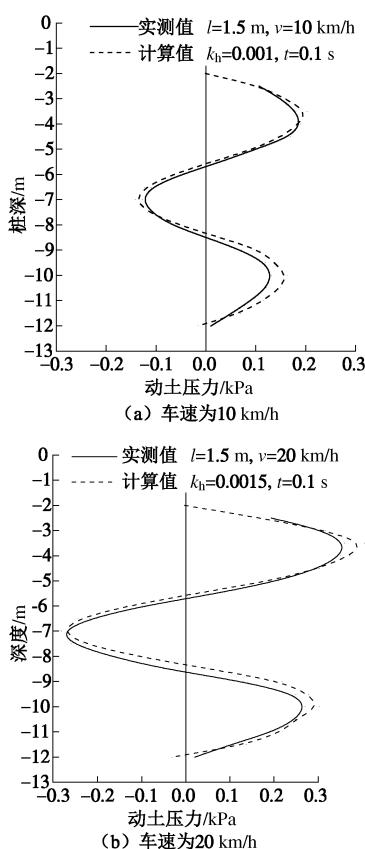


图 12 不同工况下实测土压力与计算值对比

Fig. 12 Comparison between measured and calculated earth pressures under different conditions

6 结 论

本文通过现场车辆加载试验研究了车辆振动响应加速度的特性及基坑支护桩后土压力分布规律。根据拟静力学方法基本原理, 考虑车辆荷载的振动特性, 得到了车辆荷载作用下桩后主动土压力的计算表达式。讨论了各因素对主动土压力分布的影响, 得到结论如下:

(1) 现场加载试验结果表明: 车桩间距越大, 产生的动土压力值越小; 当车桩间距相同, 车速越大, 产生的动土压力越大。

(2) 水平振动加速度系数对动土压力的影响十分敏感; 土体内摩擦角和土体重度对桩后主动土压力的分布影响较大; 桩-土外摩擦角对桩后主动土压力的影响较小。

(3) 本文方法计算得到的土压力值小于规范方法计算结果, 略小于 M-O 方法计算结果; 同时, 实测动土压力值与文中方法计算动土压力值吻合较好。

(4) 基坑周围有行驶车辆时, 应控制行车速度以及车辆与基坑的间距, 这对基坑安全施工十分必要。另外, 文中的式 (9) 可作为车辆荷载作用下支护桩后主动土压力计算的依据。

参 考 文 献:

- [1] 白冰, 周健. 周期荷载作用下黏性土变形及强度特性述评[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 84~90. (BAI Bing, ZHOU

- Jian. Some problems on behavior of saturated clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(3): 84 - 90. (in Chinese))
- [2] 阎澍旺. 往复荷载作用下重塑软黏土的变形特性[J]. 岩土工程学报, 1991, **13**(1): 48 - 53. (YAN Shu-wang. The deformation behavior of remold soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **13**(1): 48 - 53. (in Chinese))
- [3] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A F L. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(1): 100 - 116.
- [4] 张茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5): 699 - 704. (ZHANG Ru, TU Yang-ju, FEI Wen-ping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 699 - 704. (in Chinese))
- [5] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动本构关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3788 - 3792. (LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic constitutive relation of structural soft soils under traffic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3788 - 3792. (in Chinese))
- [6] 林驰, 罗元方, 汪淑平. 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 Yuan-fang, WANG Shu-ping. Monitoring and effect of moving load to foundation excavation support configuration[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, **29**(11): 112 - 114. (in Chinese))
- [7] 乐金朝, 邱洪志, 张利军. 交通荷载作用下桩锚支护结构动力响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(6): 1320 - 1325. (YUE Jin-chao, QIU Hong-zhi, ZHANG Li-jun. Analysis on dynamic response of the foundation pit supporting structure under traffic loads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(6): 1320 - 1325. (in Chinese))
- [8] 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 Xiang-dong, ZHANG Chen-guang, LIU Jia-shun. Analysis on stability of deep foundation pit supporting structure under traffic load[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, **22**(2): 125 - 129. (in Chinese))
- [9] 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 Jun-jie, CHAI He-jun. Active earth pressure induced by saturated sub grade under vehicle load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(3): 372 - 378. (in Chinese))
- [10] 王来福. 汽车荷载作用下挡土墙土压力计算方法的改进[J]. 中国海洋大学学报, 2005, **35**(5): 827 - 829. (WANG Lai-Fu. Improvement of pressure calculation for retaining walls under car load[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, **35**(5): 827 - 829. (in Chinese))
- [11] 谭献良, 邓宗伟, 李志勇, 等. 交通荷载对预应力锚索桩板墙的土压力影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(3): 1178 - 1185. (TAN Xian-liang, DENG Zong-wei, LI Zhi-yong, et al. Dynamic earth pressure effect analysis on pre-stressed anchor pile plate wall under traffic load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(3): 1178 - 1185. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] SEED H B, WHITMAN R V. Design of earth retaining structures for dynamic loads[C]// Proceedings of the Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures. New York, ASCE, 1970: 103 - 147.
- [14] OKABE S. General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1924, **10**(6): 1277 - 1323.
- [15] MONONOBE N, MATSUO H. On the determination of earth pressure during earthquakes[C]// Proceedings of the World Engineering Conference. Tokyo, 1929: 176 - 182.
- [16] JTGD60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 2004. (JTGD60 —2004 General code for design of highway bridges and culverts[S]. 2004. (in Chinese))