

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.02.006

车辆荷载作用下黄土路基竖向土压力传递规律研究

杨强强¹, 丁小军¹, 王旭^{1,2}, 张升进¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程试验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为研究车辆荷载作用下黄土路基竖向土压力传递与扩散规律, 基于某管道项目现场试验, 测得不同深度路基中不同速度、不同荷载下的竖向土压力。研究表明: 随着深度增加竖向附加土压力明显衰减, 路基表面至埋深1.2 m范围内衰减速度最快, 衰减率达到80%以上, 1.2 m以下衰减趋于平缓; 车辆载重引起路基表面至1.2 m埋深竖向土压力增长较为明显, 1.2~2.4 m之间由于路基对竖向土压力的扩散和吸收作用, 车辆载重对竖向土压力影响逐渐变小, 2.4 m以下可忽略不计; 随着路基埋深增加, 竖向土压力出现滞后效应, 路基表面至埋深1.2 m位置竖向土压力动态测试曲线为3个峰值, 1.2 m以下变为两个峰值, 其最大峰值由车辆后轴共同引起; 速度在10~30 km/h范围内, 速度对土压力的影响较小。在此基础上通过试验数据与规范中 Boussinesq 法、分布角解法理论计算对比, 分析车辆在重载、超载工况下两种理论计算的适用性。结果表明: 分布角法在车辆载重(520 kN), 埋深0.6 m附近竖向土压力接近试验值, 其他埋深计算较为保守, Boussinesq 法计算值接近试验值或小于试验值, Boussinesq 法计算具有一定的风险性, 在超载、超速情况下将对理论计算结构设计的地下管道造成严重威胁。

关键词: 道路工程; 竖向土压力; 现场试验; Boussinesq 法; 分布角法; 传递规律

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2021)02-0040-08

Study on Vertical Earth Pressure Transfer Rule of Loess Subgrade under Vehicle Loading

YANG Qiang-qiang¹, DING Xiao-jun¹, WANG Xu^{1,2}, ZHANG Sheng-jin¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: To study the rule of vertical earth pressure transfer and diffusion of loess subgrade under vehicle load, based on the field test of a pipeline project, the vertical earth pressures in the subgrade at different depths under the conditions of different speeds and different loads are measured. The result indicates that (1) The vertical additional soil pressure decreases obviously as the depth increases. The attenuation rate is the fastest from the subgrade surface to the buried depth of 1.2 m, the attenuation rate reaches more than 80%, while the attenuation tends to be gentle below 1.2 m. (2) The vertical earth pressure from the subgrade surface to the buried depth of 1.2 m caused by vehicle load increases significantly, in the depth range of 1.2~2.4 m, the influence of vehicle load on the vertical earth pressure gradually decreases due to the diffusion and absorption of the vertical earth pressure by the subgrade, however, the influence below 2.4 m is negligible. (3) With the increase of subgrade buried depth, the vertical earth pressure has

收稿日期: 2020-06-17

自然科学基金: 国家自然科学基金项目(41662017)

作者简介: 杨强强(1994-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生. (2513279154@qq.com).

hysteresis effect. The dynamic test curve of the vertical earth pressure from the subgrade surface to the buried depth of 1.2 m has 3 peaks, while there are 3 peaks below 1.2 m, and these maximum peaks are caused by the rear axle of the vehicle. (4) The influence of speed on soil pressure is small when the speed is within 10–30 km/h. On this basis, through the comparison of test data with Boussinesq method and distribution angle method in the specification, the applicability of the 2 theoretical calculations under heavy load and overload conditions is analyzed. It shows that (1) The vertical earth pressure calculated by the distribution angle method under vehicle load (520 kN) and at the buried depth near 0.6 m is close to the test value, while the calculations at other buried depths are conservative. (2) The value calculated by Boussinesq method is close to the test value or less than the test value. The calculation by Boussinesq method has a certain risk, and it will pose a serious threat to the underground pipeline designed by the theoretical calculation structure in the case of overload or overspeed.

Key words: road engineering; vertical soil pressure; field experiment; Boussinesq method; distribution angle method; transmission rule

0 引言

近年来,随着管道在交通、水利、市政、矿山以及输油等工程中的广泛应用,地下管道已成为现代社会运输水、汽、油等资源的一种重要基础设施,是除公路、铁路、水运和航空以外的第5大运输方式^[1]。穿越道路铺设地下管道的现象较为普遍,作用在地下管道的静荷载主要是覆土土压力,起主要作用的可变荷载则是车辆荷载引起的附加动土压力^[2]。

路面的不平整度、车型的不同会导致车辆轮胎产生较强的动态压力,这种压力直接施加于路面使其产生较强的冲击,导致路基中某一点的附加动土压力大于车辆静止时产生的压力。随着重载车辆日益增多,上述行驶中的车辆荷载动力效应将更加显著^[3]。刘大维等^[4]建立三维有限元模型,采用移动恒动荷载对沥青路面在重型车辆荷载作用下的动态应力响应作了详细分析;Sarkar等^[5]通过多轴车辆作用于路面使其产生动态应力响应,并对动态响应进行分析;刘伟等^[6]针对车辆引起的竖向动应力随速度的变化关系,提出了车辆速度系数,并推导出一种求解方法用来计算车辆荷载引起的附加动应力;Hyodo^[7]利用现场试验实测了交通荷载作用下不同深度的竖向动土压力,经分析得到车辆荷载作用下路基土中某深度一点处的波形曲线,此曲线变化呈现半波正弦,并得到附加竖向土压力随车速变化的关系;Alzabeebee等^[8]同时考虑静载和动载应用有限元分析对埋地管道进行研究,找出了临界荷载条件并进行了参数化研究。Alzabeebee等^[9]采用 Boussinesq 法对交通荷载作用下埋地管道的响应进行了严格的

分析,发现 Boussinesq 法计算过于保守;魏星等^[10]针对圆形均布荷载作用于地面的情形,通过数值积分推导了地基中某一点的动应力,并进一步研究了荷载与地面接触面积对附加应力的影响;国内外大多采用以地基中某一点处车辆动荷载引起的附加动应力来界定影响深度,由于现场试验的局限性,黄土地区车辆荷载作用引起的动应力现场试验数据稀少^[11]。

目前,国内外对车辆动荷载作用下地基附加应力的研究有所欠缺,设计规范中仍用计算静力荷载的方法处理交通动荷载对路基的影响^[12–13],采用 Boussinesq 法、分布角法计算管道顶部的附加压力。采用静力荷载作为车辆标准轴载,在一定程度上低估了路基土中应力大小,是导致路基下方埋地管道早期损坏的主要原因之一,另外大多数管道服役时间过长出现电化学和微生物腐蚀等各种病害,导致管道厚度减少,管道承载能力大幅度减小^[14–15],车辆重载或超载反复作用,超越管道承载能力的附加动应力传递至管道,导致地下管道薄弱位置产生应力集中使其变形,严重将会引起管道局部失稳、薄弱位置破裂渗漏^[16],引发严重的次生灾害。因此,研究车辆荷载引起的竖向土应力传递规律至关重要。

本研究通过现场试验测定黄土路基下不同深度竖向土压力,研究车辆荷载作用下竖向土压力传递与扩散规律,并通过现场试验和 Boussinesq 法、分布角法两种理论计算对比的方法深入研究黄土路基动应力传递规律,从而为相应的设计、施工及管道埋深选择提供参考和指导,为进一步研究交通荷载作用下动土压力响应传递规律提供参考。

1 测试仪器及传感器

1.1 测试仪器

此次现场试验采用 DH5937 动态应变测试系统获取应变数据,工作原理如图 1 所示,此系统在测试和分析方面具有自动、准确和可靠性,并且可以对应变、应力、压力等多个物理量进行测试和分析。因此,此系统是科研研究、工程设计及监测中作为动静态应变测量和分析的重要工具。

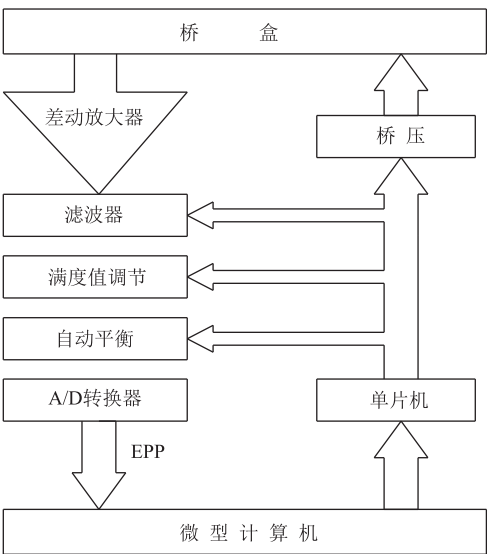


图 1 工作原理框图
Fig. 1 Block diagram of working principle

1.2 土压力盒传感器及测点布置

由于本次试验要进行路基车辆动荷载的测量,本次试验选择 BW 型土压力盒传感器,可以静、动态测量,为防止不同埋深土压力盒超载,分别选取 0.2, 0.3, 0.6 MPa 不同量程的压力盒,直径和厚度分别为 60, 11 mm,超载能力为 120%,埋入土壤中,压力盒接触面要稳固,试验时当车辆荷载移动至埋设土压力盒正上方时,土压力盒受到的压力最大,在埋设土压力盒时必须固定其方向和位置,与压力盒受力面接触的土要经过处理使其直径在 1 mm 左右。土压力盒埋置时在靠近与应变仪连接的一端进行编号,埋设完毕将同一层的导线困在一起用 PVC 管保护。压力盒埋设位置为车辆左右轮、中线、左 2 m,由于汽车沿着中线位置驶过,车辆左右轮以中线对称,所以仅在离左轮 2 m 的位置进行埋设压力盒,土压力盒测点布置见图 2 (图中数字含义示例:2-3-600 指第 2 层的 3 号压力盒量程为 600 kPa)。

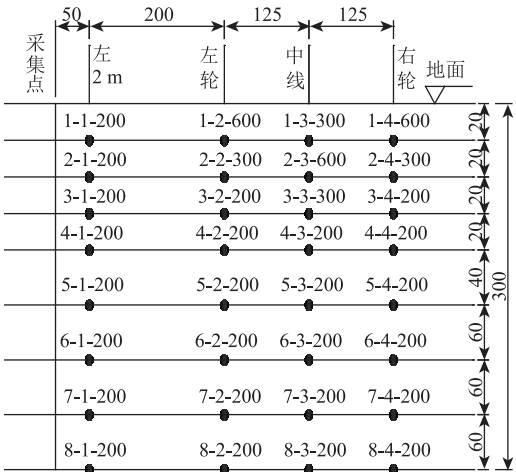


图 2 压力盒测点布置图 (单位: cm)
Fig. 2 Layout of pressure box measuring points (unit: cm)

2 工程概况

本次埋地管道现场原位试验为某有限责任公司西部分公司一项目。试验场地位于兰州市某县,路基土质为中湿粉质土;试验车辆采用 6×4 三轴重型陕西德龙系列 F3000 自卸卡车,卡车装载完毕进行侧重,轴载分配如表 1 所示。

表 1 轴载分配
Tab. 1 Axle load distribution

车型	空载	半载	满载
总重力/kN	180	350	520
前轴载重/kN	60	97	134
后轴载重/kN	120	253	386

3 现场试验方案

现场试验可以直接反映车辆荷载通过埋设压力盒路基时的竖向土压力,本次试验路基经过分层压实处理。压力盒埋深为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 m,车辆载重为空载 (180 kN)、半载 (350 kN)、满载 (520 kN),由于现场条件有限,加载速度分别取 10, 20, 30 km/h 各测 3 次,各测点的最大竖向土压力取其平均值。

选取车辆载重为满载 (520 kN),速度选取 30 km/h,压力盒埋深为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 m,左轮正下方不同埋深应力时程曲线如图 3 所示,从图中可以发现,满载大卡车 (520 kN) 竖向土压力影响深度超过 1.8 m。随路基深度增加土压力被逐渐扩散吸收,卡车通过路基时最大覆土竖向土压力由深到浅呈衰减趋势。埋深 0.2 m 时最大动应力为 47.9 kPa,3 m 时衰减到

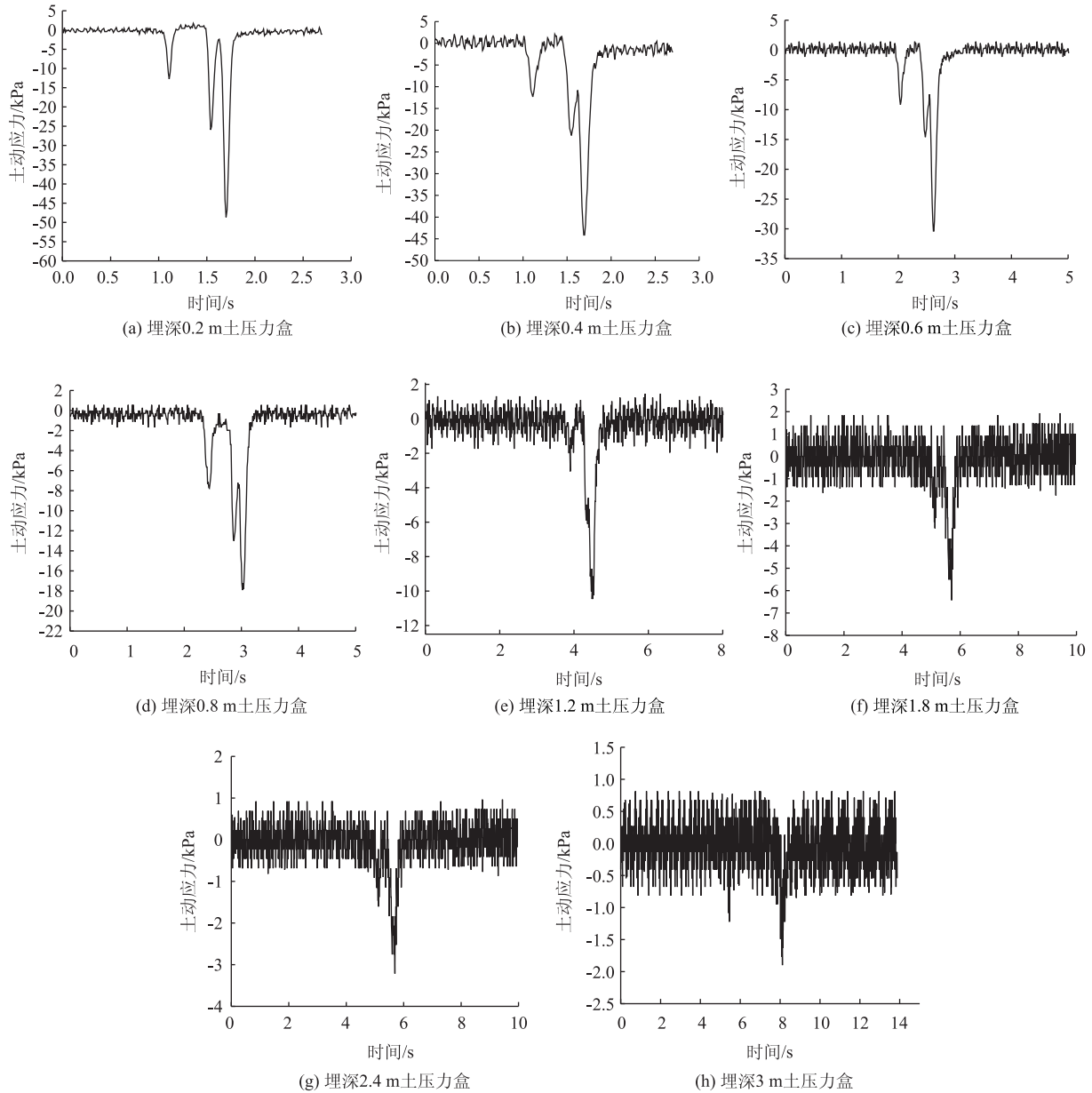


图3 不同埋深竖向土压力曲线

Fig. 3 Vertical earth pressure curves of different buried depths

2.2 kPa, 衰减幅度为 93.7%。0.2 ~ 0.6 m 衰减幅度为 21.1%, 0.6 ~ 1.2 m 衰减幅度为 54.1%, 1.2 m 埋深以下覆土竖向土压力衰减较为缓慢, 1.2 ~ 3 m 衰减幅度为 20.2%。随着深度增加, 应力出现滞后效应, 0.2 ~ 1.2 m 竖向土压力时程曲线有 3 个峰值, 依次由前轴轮胎、后轴前轮、后轴后轮引起, 后轮通过时引起的峰值比前轮峰值大得多, 这是由于大卡车装载重量较大, 较大比例的重量分配到后轮。1.2 m 以下峰值变为 2 个, 前轮驶过埋设测试仪器正上方时引起第 1 个峰值, 由于后轴双驱间距较小, 第 2 个峰值为后轴双驱轮胎共同引起。

4 管顶附加车辆轮压计算

4.1 Boussinesq 法

Boussinesq 法^[17-19]是依据弹性半空间理论方法计算车轮轮压, 并得到附加压力在土中的传递与扩散规律, 当路基表面施加集中轮压 P 时 (图 4), 任意一点处 $M(x, y, z)$ 的竖向附加车轮压力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi R^3} \cos^3 \theta, \quad (1)$$

式中 R 为集中轮压 P 作用点至任意一点 M 处的距离。

将车轮与地面接触的面假设为矩形, 长和宽用

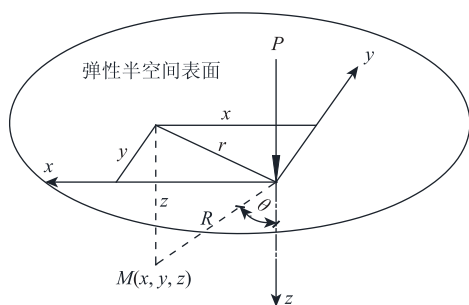


图4 集中轮压土体附加应力

Fig. 4 Additional stress of soil under concentrated wheel pressure

a, b 表示, 车辆荷载分配给每个车轮的应力为 P (图5所示)。车轮作用于地面其作用点用 (x, y) 表示, 车轮均布压力作用微面积为 $d_x d_y$, 则集中力可用 $p_0 d_x d_y$ 代替, 路基深度为 z 的位置由车轮应力引起的竖向附加应力可用式(2)计算:

$$d\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{P_0 z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} d_x d_y \quad (2)$$

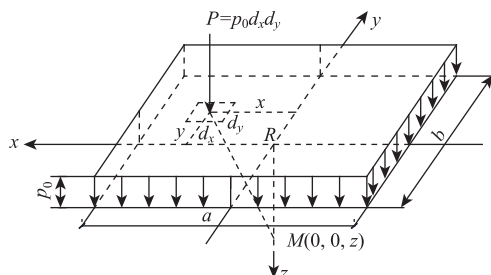


图5 均布轮压土体附加应力

Fig. 5 Additional stress of soil under uniform wheel pressure

对地面受力面积积分可得到式(3):

$$\sigma_z = \iint d\sigma_z = 4 \times \frac{3P_0}{2\pi} \int_0^{b/2} \int_0^{a/2} \frac{z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} d_x d_y = 4K_0 P_0, \quad (3)$$

式中, $K_0 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{2abz(a^2 + b^2 + 8z^2)}{(a^2 + 4z^2)(b^2 + 4z^2)\sqrt{a^2 + b^2 + 4z^2}} + \arctan \frac{ab}{2z\sqrt{a^2 + b^2 + 4z^2}} \right]$ 可查相关应力系数手册取值。

当管道顶部埋深比车轮轮迹的任意一边大得多时, 可采用集中荷载代替车辆轮压的方式用式(1)计算。

算例分析: 本算例工况为车速 30 km/h, 载重 520 kN, 因车辆后轮压力最大, 测得后轴重为 386 kN, 在不同埋深为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2,

1.8, 2.4, 3.0 m 工况下, 考虑某一轮压 ($a = 0.6$ m, $b = 0.2$ m, 单个轮子 $P_0 = 386/4 = 96.5$ kPa), 利用 Boussinesq 法计算得到管顶附加应力如表2所示。

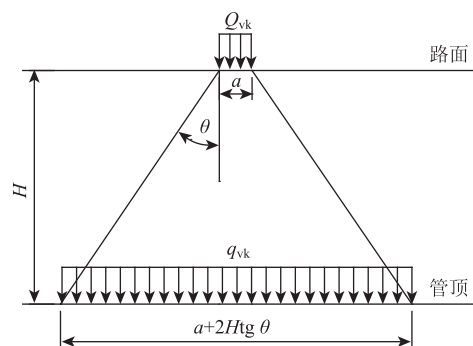
表2 管顶附加应力随深度变化表

Tab. 2 Additional stress of pipe top varying with depth

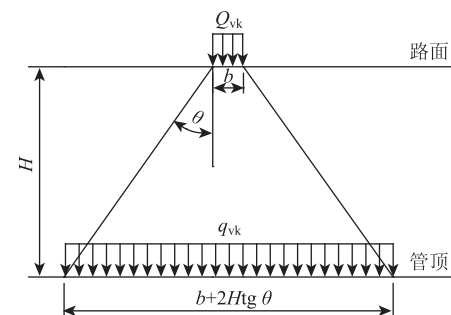
覆土埋深 H/m	附加应力 $\sigma_z/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$
0.2	78.4
0.4	50.6
0.6	33.6
0.8	23.2
1.2	12.7
1.8	6.2
2.4	3.5
3	2.7

4.2 分布角法

分布角法^[13]即车辆单个轮压标准值 Q_{vk} 按车轮与地面接触面积的边缘以某一角度沿路基深度向下传递至管顶, 不同路基扩散角度不同。假设车辆荷载引起的附加压力均匀分布在管道顶部, 如图6所示。



(a) 轮胎长度方向荷载示意图



(b) 轮胎宽度方向荷载示意图

图6 管顶附加轮压分布角法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of pipe top additional wheel pressure distribution angle method on

根据《给水排水管道结构设计规范》(GB50332—2002), 车辆荷载作用在埋地管道上方, 单个轮胎产生的应力传递至管道顶部, 引起的竖向附加压力标准值可根据式(4)计算:

$$q_{vk} = \frac{\mu_d Q_{vk}}{(a + 1.4H)(b + 1.4H)}, \quad (4)$$

式中, q_{vk} 为管顶竖向应力标准值; Q_{vk} 为轮压标准值; a 、 b 分别为轮胎与地面接触的长和宽; H 为路面至管顶的垂直距离; μ_d 为车辆轮压动载系数, 可按表3采用。

表3 动力系数表

Tab. 3 Dynamic coefficient table

H/m	≤ 0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	≥ 0.7
μ_d	1.3	1.25	1.2	1.15	1.05	1

算例分析: 分布角法计算工况的相关参数与 Boussinesq 法相同, 采用分布角法计算附加压力时, 由于应力扩散沿着路基深度有一定的扩散角度 (取 35°), 在分布角法计算式中用系数 1.4 等效表示, 而实际路基工程中, 由于路基结构及土质的不同附加应力扩散的角度也不同。管顶竖向附加压力标准值如表4所示。

表4 不同深度附加压力标准值

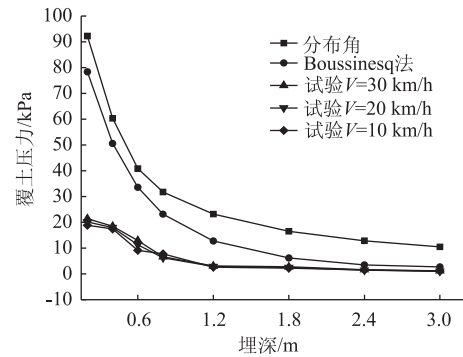
Tab. 4 Standard values of additional pressure at different depths

覆土埋深 H/m	附加压力标准值 $q_{vk}/(kN \cdot m^{-2})$
0.2	92.2
0.4	60.3
0.6	40.9
0.8	31.7
1.2	23.2
1.8	16.5
2.4	12.8
3	10.5

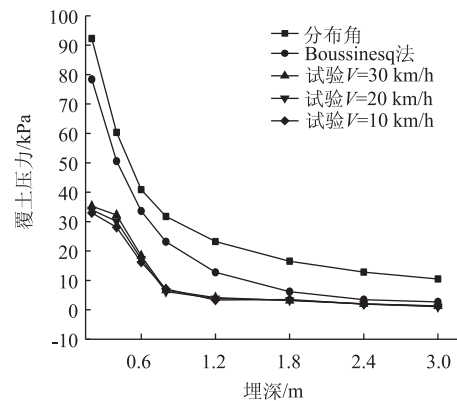
5 试验与理论计算对比分析

由于受到试验场地限制, 卡车行驶速度取 10, 20, 30 km/h, 载重取空载、半载、满载, 测得在不同深度引起的路基土竖向土压力峰值曲线如图7所示, 通过现场试验数据与 Boussinesq 法、分布角法理论计算对比分析, 不难发现: (1) 从图7曲线可以发现, 卡车在空载、半载时动应力峰值均在理论计算之内, 理论计算保守, 卡车满载时竖向土压力受速度影响较大, 分布角法比 Boussinesq 法保守。

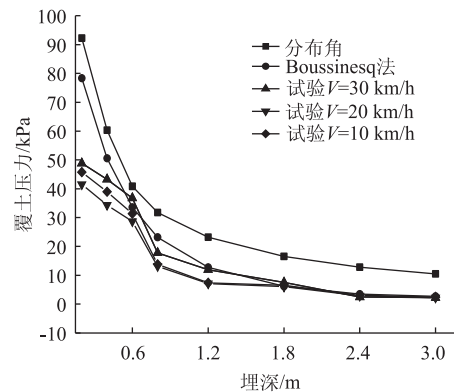
(2) 载重对路基土压力影响较大, 竖向土压力随载重的增加而增大, 但并非线性关系, 此趋势土体浅层比深层更加明显, 卡车速度 30 km/h, 埋深 0.6 m 时, 从空载、半载到满载增幅分别为 65.7%, 51%, 在 0.8 m 以下竖向土压力峰值非常接近且变化幅度不明显; (3) 速度对路基土附加竖向动应力影响较小, 当车辆荷载较大时, 轮胎对路面会产生较大的冲击, 本次试验测得, 当卡车满载时, 速度越大, 竖向土压力越大, 且增大幅值较小, 在 1.2 m 埋深



(a) 卡车空载覆土压力曲线



(b) 卡车半载覆土压力曲线



(c) 卡车满载覆土压力曲线

图7 理论与试验覆土压力对比曲线

Fig. 7 Comparison curves theoretical and experimental covering earth pressures

以下速度对竖向土压力基本无影响。(4) 根据规范,车行道下天然气管道的埋设深度不得小于 0.9 m,从图 7 (c)可以发现,我国地下管道结构设计理论计算方法逐渐不能满足现代超载、超速现状,超载、超速对地下管道造成严重威胁。

6 结 论

通过车辆不同载重、不同速度对黄土路基下不同深度竖向土压力测试分析,并与分布角法和 Boussinesq 法两种理论方法对比分析,得到以下结论:

(1) 随着深度增大路基竖向土压力逐渐衰减,在路基 0.2 ~ 1.2 m 衰减幅度达到 75% 以上,0.6 m 附近时衰减最快,1.2 m 以下变化幅度不再明显。

(2) 载重对竖向土压力的影响较为显著,空载时前后轮引起的土压力峰值相差较小,满载时后轮比前轮峰值大的多,由于土体出现应力滞后效应,1.2 m 以上出现 3 个峰值,1.2 m 以下变为两个峰值。

(3) 在路面平整度良好且车辆未超载的情况下,速度在 10 ~ 30 km/h 范围内,随着载重增大,速度对竖向土压力的影响增大,且增大幅度值较小。

(4) 车辆载重为空载 (180 kN)、半载 (350 kN) 分别以速度 10, 20 km/h 的试验数据表明,分布角法和 Boussinesq 法两种理论计算相比试验结果均较为保守,1.8 m 以下 Boussinesq 法计算结果和试验结果相接近。

(5) 车辆满载 (520 kN)、行驶速度为 30 km/h 工况下, Boussinesq 法计算具有一定的风险性,由于现场试验条件的限制,本研究试验未对超载、超速工况测试,所获数据有限,但依据卡车空载、半载、满载及不同速度对竖向土压力的影响规律,车辆超载、超速将对理论计算结构设计的地下管道造成严重威胁。

参考文献:

References:

- [1] 吴小刚. 交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
WU Xiao-gang. Study on Stress Analysis Model of Pipeline in Soft Soil Subgrade under Traffic Load [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [2] 鞠斌. 车辆荷载作用下埋地管道的动应力响应研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2018.

- JU Bin. Research on Dynamic Stress Response of Buried Pipeline under Vehicle Load [D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.
- [3] KRAUS E, OH J, FERNANDO E G. Impact of Repeat Overweight Truck Traffic on Buried Utility Facilities [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28 (4): 1-9.
- [4] 刘大维, 戴宗宏, 陈洋, 等. 车辆多轮动载作用下柔性路面动应力响应 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (11): 36-44.
LIU Da-wei, DAI Zong-hong, CHEN Yang, et al. Dynamic Stress Response of Flexible Pavement under Multiple Wheel Dynamic Loads of Vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (11): 36-44.
- [5] SARKAR A. Numerical Comparison of Flexible Pavement Dynamic Response under Different Axles [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17 (5/6): 377-387.
- [6] 刘伟, 汤连生, 张庆华. 车辆动载下路基土竖向动应力及扩散规律 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31 (4): 799-802.
LIU Wei, TANG Lian-sheng, ZHANG Qing-hua. Research on Dynamic Stress of Subgrade Soil under Vehicle Loads and Its Diffused Rule [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: National and Science Edition, 2012, 31 (4): 799-802.
- [7] HYODO M, YASUHARA K. Analytical Procedure for Evaluating Pore-water Pressure and Deformation of Saturated Clay ground Subjected to Traffic Loads [C] // Proceedings of 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Rotterdam: A A Balkema, 1988: 653-658.
- [8] ALZABEEBEE S, CHAPMAN D N, FARAMARZI A. Comparative Study of the Response of Buried Pipes under Static and Moving Loads [J]. Transportation Geotechnics, 2018, 15 (1): 39-46.
- [9] ALZABEEBEE S, CHAPMAN D N, FARAMARZI A. Economical Design of Buried Concrete Pipes Subjected to UK Standard Traffic Loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2019, 172 (SB2): 141-156.
- [10] 魏星, 王刚. 多轮组车辆荷载下公路地基的附加动应力 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (10): 1924-1930.
WEI Xing, WANG Gang. Induced Dynamic Stresses in Subsoil of Road Subjected to Moving Vehicle Load with Wheel Groups [J]. Journal of Geotechnical Engineering,

- 2015, 37 (10): 1924 – 1930.
- [11] 仇敏玉, 俞亚南. 道路行车荷载影响深度分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (6): 1822 – 1826.
QIU Min-yu, YU Ya-nan. Analysis of Influence Depth for Roads Induced by Vehicle Load [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31 (6): 1822 – 1826.
- [12] JTG D60—2017, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2017, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [13] GB50332—2002, 给水排水工程管道结构设计规范 [S].
GB50332—2002, Structural Design Code for Pipeline of Water Supply and Waste Water Engineering [S].
- [14] ROBERT D J, RAJEEV P, KODIKARA J, et al. Equation to Predict Maximum Pipe Stress Incorporating Internal and External Loadings on Buried Pipes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53 (8): 1315 – 1331.
- [15] CHEN G H, WU J J. Reliability Analysis and Case Study of Long Term Service Gas Pipelines beneath Urban Street [J]. Procedia Engineering, 2015, 130 (1): 1478 – 1485.
- [16] 苟文锦. 车行道下方埋地管道的力学性状研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
GOU Wen-jin. Study on Mechanical Properties of Buried Pipeline under Roadway [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] ALZABEEBEE S, CHAPMAN D, JEFFERSON I, et al. The Response of Buried Pipes to UK Standard Traffic Loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, 2017, 170 (1): 38 – 50.
- [18] 李镜培, 梁发云, 赵春风. 土力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
LI Jing-pei, LIANG Fa-yun, ZHAO Chun-feng. Soil Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [19] 顾晓鲁, 钱鸿绪, 刘惠珊, 等. 地基与基础 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
GU Xiao-lu, QIAN Hong-xu, LIU Hui-shan, et al. Foundation and Base [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.

(上接第15页)

- [17] 王旭东. 足尺路面试验环道路面结构与材料设计 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (6): 30 – 37.
WANG Xu-dong. Design of Pavement Structure and Material for Full-scale Test Track [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (6): 30 – 37.
- [18] 黄优. 沥青混合料梯形梁动态模量试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
HUANG You. Experimental Research on Dynamic Modulus of Asphalt Mixture Trapezoid Beam [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.
- [19] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
ZHANG Xiao-ning. Principle and Application of Viscoelastic Mechanics of Asphalt and Asphalt Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [20] 张晨晨, 钱振东, 王旭东, 等. 基于DMA方法的沥青砂浆动态弯拉黏弹特性 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (3): 22 – 28.
- ZHANG Chen-chen, QIAN Zhen-dong, WANG Xu-dong, et al. Dynamic Flexural-tensile Viscoelastic Property of Asphalt Mortar Based on DMA Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (3): 22 – 28.
- [21] 黄优, 刘朝晖, 王旭东, 等. 沥青混合料动态模量梯形梁与SPT试验比较研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 279 (11): 3092 – 3099.
HUANG You, LIU Zhao-hui, WANG Xu-dong, et al. Comparison of HMA Dynamic Modulus Between Trapezoid Beam Test and SPT [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2017, 279 (11): 3092 – 3099.
- [22] 赵延庆, 叶勤, 文健. 围压对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2007, 118 (6): 96 – 99.
ZHAO Yan-qing, YE Qin, WEN Jian. Effects of Confining Pressure on Dynamic Modulus [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2007, 118 (6): 96 – 99.