

重载交通下钢波纹管涵对沥青路面的变形影响

乔建刚¹, 彭 瑞¹, 王春云²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 保定职业技术学院建筑工程系, 河北 保定 071051)

摘要 目的 探究重载交通条件下钢波纹管涵对沥青路面的变形影响, 提高埋设钢波纹管涵沥青路面的寿命。方法 以计算机科学、道路工程等理论为基础, 借助 Midas GTS NX 软件建立三维地层结构模型, 对不同荷载下埋设钢波纹管涵的前、后多种工况进行模拟分析, 探究荷载与钢波纹管、沥青路面不同方向变形之间的关系。结果 钢波纹管的埋设可以有效扩散土体中的应力, 减少车辆荷载带给路面各结构层的沉降变形; 双钢波纹管在荷载作用点处的变形较大, 相邻管涵的变形较小, 上半管对应力的承受程度要远大于下半管; 得到了钢波纹管变形“飞鸽”模型。结论 不同荷载作用下, 轴载的增大会减弱钢波纹管的应力扩散效果; 笔者构建了不同荷载与路面结构层变形的关系模型, 可为铺设钢波纹管涵沥青路面的病害防治提供数据支持。

关键词 道路工程; 钢波纹管涵; 重载交通; 沥青路面; 有限元计算

中图分类号 TU921; U449.83

文献标志码 A

Influence of Steel Corrugated Pipe Culvert on Deformation of Asphalt Pavement under Heavy Traffic

QIAO Jiangang¹, PENG Rui¹, WANG Chunyun²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. Department of Architecture, Baoding Vocational and Technical College, Baoding, China, 071051)

Abstract: The deformation of steel corrugated pipe culvert under heavy traffic conditions affects the deformation law of asphalt pavement. In order to improve the service life of buried steel corrugated pipe culvert asphalt pavement, based on the theory of computer science and road engineering, a three-dimensional stratum structure model is established with the help of MIDAS GTS NX software to simulate and analyze various working conditions of buried steel corrugated pipe culvert under different loads. The relationship between load and deformation of steel bellows and asphalt pavement in different directions is explored. The results show that the embedding of steel bellows can effectively diffuse the stress in the soil and reduce the settlement deformation of each structural layer brought by vehicle load; The deformation of double steel bellows at the load point is larger than that of adjacent pipe culverts, and the stress bearing degree of the upper half pipe is much greater than that of the lower half pipe; Under different loads, the increase of axle

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52008154); 河北省重点研发计划项目(19211210D)

作者简介: 乔建刚(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事道路工程方面研究。

load will weaken the stress diffusion effect of steel bellows, and the relationship model between different loads and pavement structural layer deformation is constructed, which provides data support for disease prevention of asphalt pavement with steel bellows culvert.

Key words: highway engineering; steel corrugated pipe culvert; heavy traffic; asphalt pavement; finite element analysis

钢波纹管涵是指在钢板上轧制波纹以增强其结构刚性,然后通过连接、拼装组成的一种涵洞形式^[1]。近年来,随着我国公路建设的迅速发展,管涵的数量也与日俱增,钢波纹管因施工快捷、经济的特点逐渐被工程界所接受,众多科研人员开始针对钢波纹管的性能进行研究^[2-4]。

刘保东等^[5]采用 ANSYS 软件分析了温度对薄覆土波纹管拱型涵洞应力的影响,结果表明,温度周期性变化会使薄覆土波纹管拱型涵洞所受应力也呈周期性变化趋势,且管中的应力变化受温度影响更为敏感。李祝龙等^[6]运用有限元法得到了填土高度对不同拱顶角度的管拱型钢波纹管的周向等效应力、最大等效应力、横向位移、竖向位移的变化规律,并确定了最优管型。尤侗等^[7]将截面参数分析法与有限元数值模拟相结合,分析了波纹管的受力变形情况,并总结了其力学性能与填土高度、管道规格的对应关系,以及钢波纹管设计中的建议管道规格。V. T. Mai 等^[8]针对基本完好的钢制涵洞与松散回填土中被腐蚀的涵洞,比较了两种结构在不同埋设深度以及不同荷载作用下的性能,研究表明,在回填期间由于涵洞和回填土刚度的差异,劣化涵洞的挠度远大于完好涵洞。C. Regier 等^[9]为了评估涵洞剩余容量以及劣化涵洞的使用寿命结束条件,对两种土壤覆盖深度下腐蚀程度不同的涵洞进行了一系列模拟车辆荷载试验,研究表明,对于大多数劣化程度,回填压实劣化管道中比腐蚀起更重要的作用。

综上所述,目前相关学者主要采用数值模拟和现场施工测量的方式来分析不同温

度、回填高度、荷载条件、腐蚀情况以及几何形状等因素对钢波纹管受力及变形的影响,很少考虑到钢波纹管在埋设过后对沥青路面造成的影响。重载交通条件下,沥青路面的损坏问题会更加严峻,不仅使用性能迅速降低,使用寿命大幅减少^[10-13],埋设在沥青路面下方的钢波纹管涵也会因轴载的增加而产生一系列的变化。

基于上述分析,笔者借助 Midas GTS NX 有限元软件,在不同轴载作用下研究钢波纹管理设前后沥青路面结构的沉降变形状况,探究沥青路面沉降的变化规律,以期为今后钢波纹管涵工程的影响性分析提供理论指导。

1 有限元计算

1.1 钢波纹管结构的简化

对钢波纹管进行研究,主要关注管的埋设对路面变形的影响。为了方便计算,同时保证计算精度和计算结果的准确性,钢波纹管模型的模拟采用环向抗弯刚度等效的方法进行简化^[14-15],将钢波纹管等效为半径相同的实壁管道,再采用有限元软件进行分析,其形状及简化后的参数如图 1、图 2 所示。

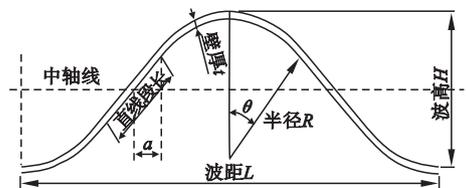


图 1 波纹参数示意图

Fig. 1 The schematic diagram of ripple parameters

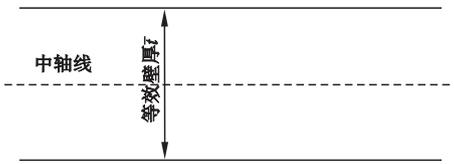


图2 简化后的参数示意图

Fig. 2 The diagram of simplified parameters

由图1可得1/4波长范围内的曲线方程:

$$y = \begin{cases} x \tan \theta, x \in (0, a]; \\ \sqrt{R^2 - (l_0 - x)^2} - (R - \frac{H}{2}), x \in [a, l_0]. \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为圆弧角度的一半; a 为直线段长在X轴投影长度的一半; R 为圆弧半径; l_0 为1/4波长长度; H 为波高。

单位长度面积:

$$\frac{A}{l_0} = \frac{1}{l_0} \int dA = \frac{1}{l_0} \int t ds = \frac{t}{l_0} \int_0^{l_0} \sqrt{1 + y'^2} dx. \quad (2)$$

式中: A 为1/4波长的钢波纹管面积; t 为壁厚。

单位长度惯性矩:

$$\frac{I}{l_0} = \frac{1}{l_0} \int y^2 dA = \frac{t}{l_0} \int_0^{l_0} y^2 \sqrt{1 + y'^2} dx. \quad (3)$$

式中: I 为1/4波长钢波纹管的惯性矩。

等效壁厚:

$$\bar{t} = \sqrt[3]{\frac{12I}{l_0}}. \quad (4)$$

等效密度:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho V}{V} = \frac{\rho t}{\bar{t}}. \quad (5)$$

式中: ρ 为钢波纹管密度; V 为钢波纹管实际体积; \bar{V} 为钢波纹管等效体积。

笔者所用钢波纹管的各项参数:波距 $L = 230$ mm、波高 $H = 64$ mm、壁厚 $t = 6$ mm、直线段长44 mm、圆弧半径 $R = 57$ mm、圆弧角度的一半 $\theta = 45.7^\circ$ 、密度 $\rho = 7850$ kg/m³。经过计算可知该钢波纹管的等效壁厚 $\bar{t} =$

35 mm,等效密度 $\bar{\rho} = 1346$ kg/m³。

1.2 几何模型的构建

采用有限元软件 Midas GTS NX 构建道路力学模型,其中,未埋设钢波纹管时的路面结构形式为:5 cm 沥青混凝土(AC-16) + 7 cm 沥青混凝土(AC-25) + 21 cm 水泥稳定碎石基层 + 21 cm 水泥稳定碎石基层 + 22 cm 水泥稳定碎石基层;在埋设了钢波纹管之后,基层下方的土基替换成470 cm 填土层(山皮土) + 100 cm 砂砾垫层 + 土基,此外填土层中埋设了半径为2 m 的双钢波纹管,钢波纹管下方浇筑有C10 砼,各结构层参数见表1。

表1 结构层参数

Table 1 The parameter table of structural layer

路面结构材料	厚度/ cm	回弹模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
AC-16	5	1 400	2 460	0.25
AC-25	7	1 200	2 483	0.25
水泥稳定碎石	21	1 500	2 400	0.25
水泥稳定碎石	21	1 500	2 400	0.25
水泥稳定碎石	22	1 450	2 400	0.25
山皮土	470	180	2 070	0.25
钢波纹管	0.6	210 000	7 850	0.3
C10 砼	100	17 500	2 500	0.2
砂砾垫层	100	45	2 100	0.18
土基	—	54.4	1 900	0.4

计算模型的长×宽×高为25 m×15 m×8 m,如图3所示。其假设条件:①每个结构层都是均匀、不间断的、且各向同性;②每层的水平方向和竖直方向均为连续;③各层结构侧面位移都为零;④钢波纹管结构及土体之间符合变形协调原则。

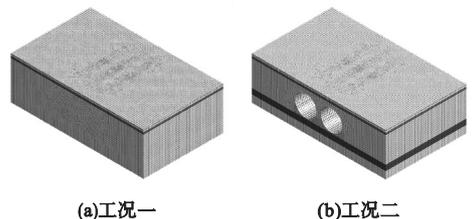


图3 土体模型

Fig. 3 The soil model

1.3 荷载的施加

对于重载交通的施荷过程,根据其整体质量,等效替换为均布荷载施加在路表。结合现行规范,将沥青路面各级轴载对路面的损伤效果换算成 BZZ-100 标准轴载的当量作用效果,所加荷载为双圆垂直均布荷载。对于荷载位置的设置,本次模拟选择在左侧钢波纹管正上方的沥青表面层施加车辆荷载,如图 4 所示。

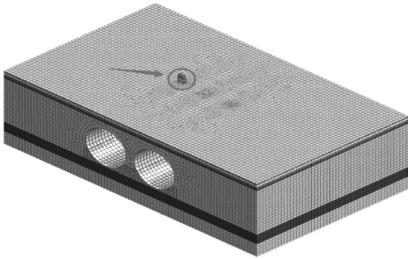


图 4 模型荷载的施加

Fig. 4 The loading application

1.4 计算工况

本次仿真选取两种工况进行分析。工况一:钢波纹管未埋设状态;工况二:钢波纹管已埋设状态。

2 结果与讨论

2.1 标准轴载作用条件下的变形分析

2.1.1 竖直方向变形

为了探究标准轴载(100 kN)下钢波纹管的埋设对路面各结构层变形特性的影响,根据钢波纹管埋设前后的土体沉降云图(见图 5),读取路面随深度的最大沉降变形值(0 cm、5 cm、12 cm、33 cm、54 cm、76 cm 分别为表面层层顶、表面层层底、下面层层底、上基层层底、下基层层底、底基层层底的深度),绘制各结构层随深度的沉降变形折线,如图 6 所示。

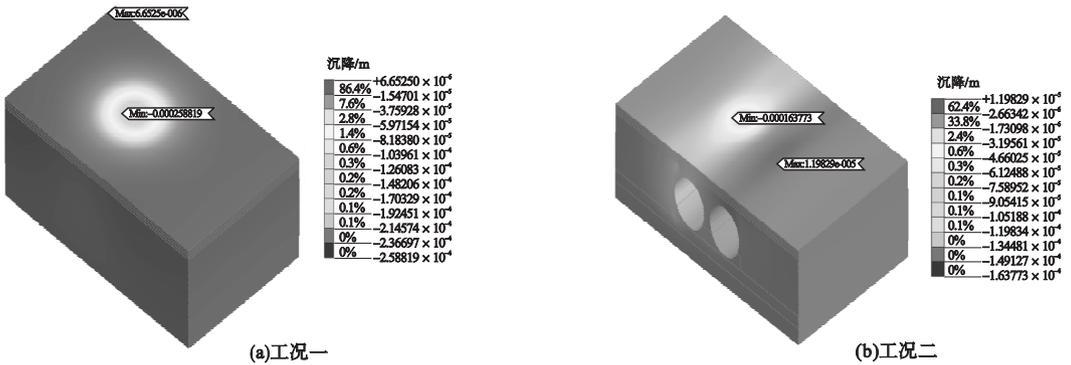


图 5 土体沉降云图

Fig. 5 The cloud maps of soil settlement

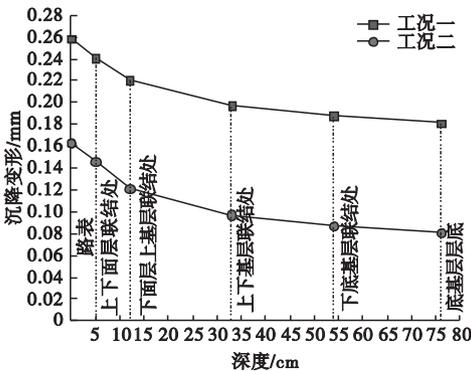


图 6 钢波纹管埋设前后各结构层沉降变形

Fig. 6 The settlement deformation curves of each structural layer before and after embedding steel bellows

由图 6 可知,两工况下路面结构层的最大沉降变化规律是一致的,均随着路面深度的增大而减小。

钢波纹管的埋设情况下,路表到底基层层底各结构层的沉降值较钢波纹管未埋设时分别减少了 36.72%、39.39%、44.98%、50.74%、53.45%、54.98%,这说明钢波纹管的埋设可以大幅度减少车辆荷载带给路面结构的沉降变形,其较大的刚度可以促进应力在各结构层之间更加广泛的扩散,对沥青路面起到了一定的保护作用。

最大沉降量均发生在路表处,未埋设钢波纹管时底基层层底的沉降变形较路表减少了 29.99%;埋设了钢波纹管之后,底基层层底的沉降变形较路表减少了 50.19%。充分说明了钢波纹管的埋设对于整体结构层的影响都很大,并非仅影响到与轮载直接接触的面层,对于扩散基层应力的作用同样很明显。

2.1.2 水平方向变形

为了探究钢波纹管的埋设对于沥青表面层变形特性的影响,垂直于钢波纹管的埋设方向剖切沥青表面层(见图7),得到剖切面的层顶沿着 x 轴不同位置的沉降变形,绘制出沉降变形的变化曲线(见图8),其中, X 表示钢波纹管沿着道路横向的相对位置,下文同。

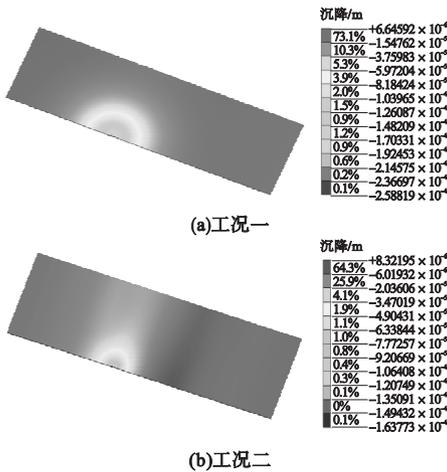


图7 沥青表面层剖切面沉降变形云图

Fig. 7 The cloud maps of settlement deformation at cutting surface of asphalt upper layer

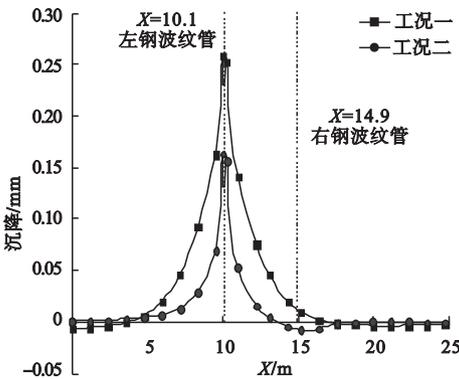


图8 沥青表面层沉降变形

Fig. 8 The settlement deformation of asphalt upper layer

由图8可知,两工况下的沥青表面层均发生了大幅沉降,尤其是路面与荷载接触处,其沉降变形值最大,且随着 X 值向外部两侧土体延伸,变形值逐渐降低。

未埋设钢波纹管时的最大沉降变形为 0.258 819 mm,轮隙处的沉降变形最小值为 0.230 300 mm,较轮胎处减小了 11.02%。在钢波纹管理设之后,最大沉降变形为 0.163 773 mm,而轮隙处的沉降变形最小值为 0.131 150 mm,较轮胎处减小了 19.92%。由此可以得知钢波纹管能够有效缓解车辆荷载带给沥青表面层的负荷,进而减少路面病害。

2.1.3 钢波纹管变形分析

应力在土体内传递的过程中,钢波纹管对其影响较大,故在此处截取钢波纹管最大沉降变形处的云图(见图9),得到该截面沿着 x 轴各个节点的沉降变形值,绘制出钢波纹管的沉降变形趋势(见图10)。

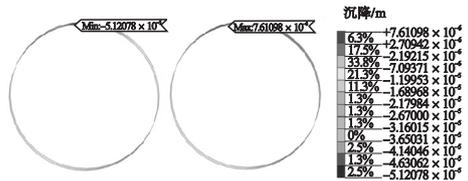


图9 钢波纹管截面沉降变形云图

Fig. 9 The cloud maps of settlement deformation at steel bellows section

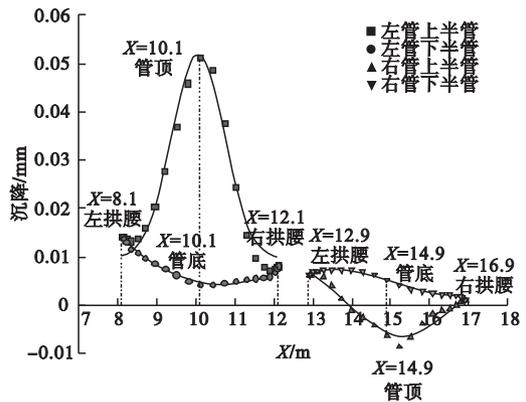


图10 钢波纹管沉降变形

Fig. 10 The settlement deformation of steel bellows

由图10可知,位于荷载正下方钢波纹管 ($X = 10.1$) 的沉降变形值最大,且最大沉降变形发生在管顶,为 0.051 208 mm。该波纹管

左右拱腰的沉降变形值分别为 0.014 237 mm ($X = 8.1$)、0.008 199 mm ($X = 12.1$), 较管顶沉降变形值分别减小了 72.20%、83.99%。而该波纹管管底的沉降变形值最小, 为 0.004 420 mm ($X = 10.1$), 较最大沉降变形值减小了 91.37%。这说明了钢波纹管的主要应力承受部位集中在管顶处, 从管顶到拱腰处的应力下降程度要远大于拱腰到管底, 故对钢波纹管进行结构设计时需优先考虑上半管。

在车辆荷载作用下, 双钢波纹管的变形呈现“飞鸽”状, 为了研究双钢波纹管最大沉降变形截面处的规律, 为管的保护提供数据支撑, 对图 10 中的数据进行函数拟合, 如式(6)所示, 各项参数见表 2, “飞鸽”模型如表 3 所示。

$$y = \frac{a}{b \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-2\frac{(x-c)^2}{b^2}} + d. \quad (6)$$

其中, y 为沉降, mm; x 为钢波纹管沿着道路横向的相对位置 X 值, m ; a 、 b 、 c 、 d 为模型的参数。

表 2 管不同位置时式(6)中的参数值

Table 2 Parameter values in equation (6) for different positions of tube

管的位置	a	b	c	d
左管上半管	0.069 84	1.324 10	10.057 70	0.009 62
左管下半管	-4.282 79	16.512 03	10.618 24	0.211 34
右管上半管	-0.061 01	2.804 10	15.284 40	0.010 99
右管下半管	0.020 55	2.618 69	13.688 99	0.001 17

表 3 模型公式

Table 3 Models

管的位置	钢波纹管沉降变形模型 y	R^2
左管上半管	$0.042 08 \exp \left[\frac{-(x-10.057 7)^2}{0.876 62} \right] + 0.009 62$	0.968
左管下半管	$-0.206 95 \exp \left[\frac{-(x-10.618 24)^2}{136.323 57} \right] + 0.211 34$	0.986
右管上半管	$-0.017 36 \exp \left[\frac{-(x-15.284 4)^2}{3.931 49} \right] + 0.010 99$	0.961
右管下半管	$0.006 26 \exp \left[\frac{-(x-13.688 99)^2}{3.428 77} \right] + 0.001 17$	0.991

采用 F 检验进行相关性检验, 计算得到钢波纹管变形模型 $F_{左上} = 425.60$, $F_{左下} = 2 329.13$, $F_{右上} = 104.11$, $F_{右下} = 2 346.44$, 查 F 分布表可得 $F_{0.95}(1, 19) = 4.38$, 模型显著相关, 可以较好地体现出车辆荷载对于钢波纹管沉降变形的影响。

2.2 重载交通下的变形分析

由于钢波纹管埋设在重载交通路段, 因此需分析不同轴载作用对路面的变形影响, 标准轴载为 100 kN, 我国交通运输部规定公路管理机构对多轴多轮液压平板车最大轴荷超过 20 000 kg 的不予行政许可, 因此设定 200 kN 为轴载上限, 以标准轴载 100 kN 为基础, 定量增加 20% 荷载, 探究 120 kN、140 kN、160 kN、180 kN、200 kN 轴载作用下路面受力情况。

2.2.1 竖直方向变形

不同轴载作用下, 钢波纹管埋设前后各结构层的沉降变形情况如图 11 ~ 图 12 所示。

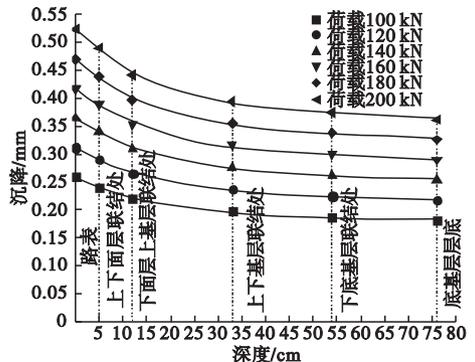


图 11 钢波纹管埋设前各结构层沉降变形
Fig. 11 The settlement deformation of each structural layer before embedding steel bellows

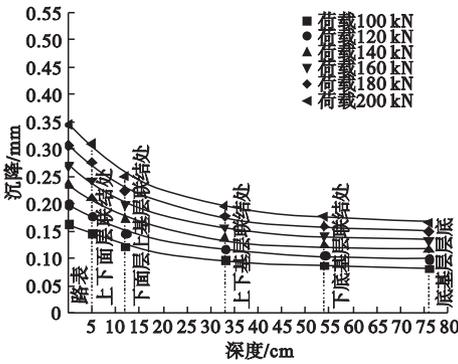


图 12 钢波纹管埋设后各结构层沉降变形

Fig. 12 The settlement deformation of each structural layer after embedding steel bellows

由图可知,不同轴载作用下,钢波纹管埋设前后路面各结构层的沉降变形规律一致,路表的沉降变形最大,各结构层的沉降变形值随着深度的增大而减小,随着轴载的增大而增大。

当轴载从 100 kN 逐渐增大到 200 kN 时,埋设钢波纹管沥青路面的最大沉降变形值较未埋设时分别减少了 36.72%、36.20%、35.72%、35.16%、34.63%、34.24%,这说明轴载的增大会减弱钢波纹管的应力扩散效果。此外,当轴载为 200 kN 时,钢波纹管埋设前后路表的沉降变形值较标准轴载时分别增加了 102.40%、110.35%,说明了轴载对于沥青路面沉降变形的影响不容忽视,且对于钢波纹管埋设后的影响程度较埋设前更大。

对图 12 中的数据进行函数拟合,如式(7)所示。可以得到不同轴载作用下钢波纹管埋设前后路面的沉降变形与结构层深度之间的关系。

$$y = ae^{-\frac{x_1}{b}} + c. \quad (7)$$

式中: y 为沉降, mm; x_1 为结构层深度, cm; a 、 b 、 c 为随轴载变化的参数,参数值如表 4。

采用 F 检验进行相关性检验,计算得到钢波纹管埋设前后路面沉降变形模型 $F_{100} = 4\ 500.44$, $F_{120} = 3\ 786.75$, $F_{140} = 3\ 331.92$, $F_{160} = 3\ 158.71$, $F_{180} = 2\ 987.91$, $F_{200} = 2\ 840.38$,查 F 分布表可得 $F_{0.95}(1, 4) =$

7.71,模型显著相关。

表 4 不同轴载时式(7)中的参数值

Table 4 Parameter values in equation(7) under different axle loads

荷载/kN	a	b	c	R^2
100	0.082 03	18.276 91	0.081 95	0.997
120	0.100 04	18.008 79	0.099 07	0.996
140	0.118 90	17.850 92	0.115 97	0.996
160	0.139 09	17.840 18	0.132 50	0.995
180	0.159 99	17.784 49	0.148 96	0.995
200	0.181 38	17.716 83	0.165 40	0.995

由于式(7)中参数 a 、 b 、 c 随着轴载 x_2 的变化而变化,故将参数和轴载大小进行拟合,研究其变化规律,如图 13 ~ 图 14 所示,得到相应的拟合结果,如表 5 所示。

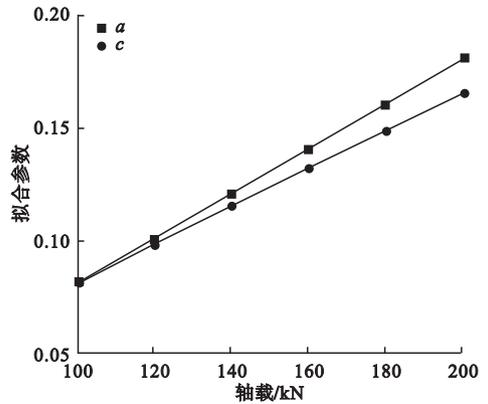


图 13 拟合参数 a 、 c 随轴载的变化曲线

Fig. 13 Curve of parameters a and c changing with axle load

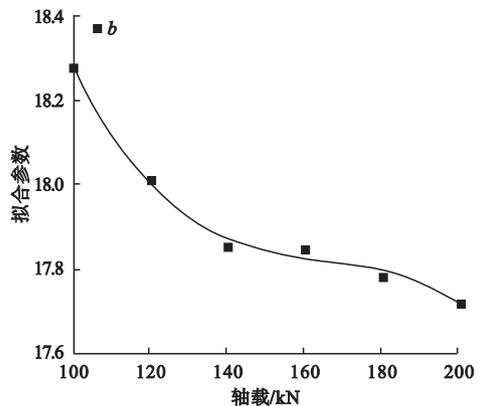


图 14 拟合参数 b 随轴载的变化曲线

Fig. 14 Curve of parameter b changing with axle load

表5 模型公式

Table 5 Models

参数	拟合参数随轴载变化的模型	R^2
a	$0.000\ 995\ 41x_2 - 0.019\ 07$	0.999
b	$-0.113\ 86x_2 + 0.000\ 681\ 4x_2^2 - 0.000\ 001\ 374\ 2x_2^3 + 24.225\ 08$	0.996
c	$0.000\ 833\ 5x_2 - 0.001\ 05$	0.999

故埋设钢波纹管沥青路面的沉降变形值

随深度和轴载的变化模型:

$$y = (0.000\ 995\ 41x_2 - 0.019\ 07)e^{\frac{x_1}{0.113\ 86x_2 - 0.000\ 681\ 4x_2^2 + 0.000\ 001\ 374\ 2x_2^3 - 24.225\ 08}} + 0.000\ 833\ 5x_2 - 0.001\ 05. \quad (8)$$

2.2.2 水平方向变形

为了探究不同轴载作用下钢波纹管的埋设对于沥青表面层变形特性的影响,垂直于钢波纹管的埋设方向剖切沥青表面层,得到剖切面的层顶沿着 x 轴不同位置的沉降变形值,绘制出沉降变形的变化折线,如图 15 ~ 图 16 所示。

由图可知,在不同轴载作用下,右侧钢波纹管($X = 14.9$)上方沥青路面均出现了小幅度隆起的现象,且隆起值接近。这说了轴载的增大对于另一侧钢波纹管附近土体结构的影响较小,其受到的应力值比较接近,车辆荷载所造成的影响主要集中在其正下方的结构层,只有小部分的应力传递到了右侧钢波纹管及其周围土体结构层中。

3 结论

(1) 钢波纹管的埋设可以有效扩散土体中的应力,减少车辆荷载带给路面各结构层的沉降变形,对沥青路面起到了一定的保护作用。

(2) 在车辆荷载作用下,双钢波纹管在荷载作用点处的变形较大,相邻管涵的变形则较小;上半管对应力的承受程度要远大于下半管,故对钢波纹管进行结构设计时需优先考虑上半管。此外,笔者得到了双钢波纹管变形“飞鸽”模型,可为钢波纹管的结构设计提供数据支持。

(3) 重载交通作用下,轴载的增大会减弱钢波纹管的应力扩散效果;此外,笔者还构建了铺设钢波纹管涵沥青路面的沉降变形值随深度和轴载的变化模型,为沥青路面的病害防治提供依据。

参考文献

- [1] 陈玉留,谭文明,吴天祥,等. 波纹管在明洞中的应用及有限元分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1130 - 1138.

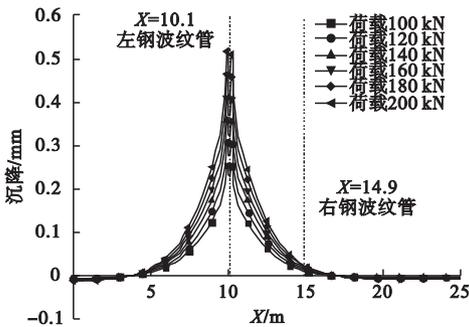


图 15 钢波纹管埋设前沥青表面层沉降变形

Fig. 15 The settlement deformation of asphalt upper layer before embedding steel bellows

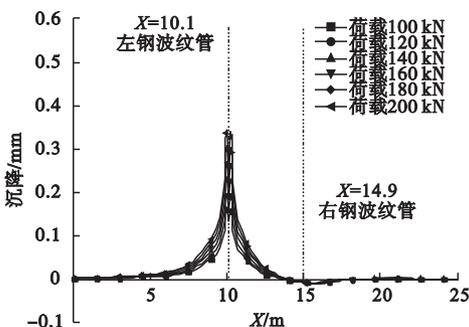


图 16 钢波纹管埋设后沥青表面层沉降变形

Fig. 16 The settlement deformation of asphalt upper layer after embedding steel bellows

- (CHEN Yuliu, TAN Wenming, WU Tianxiang, et al. Application and finite element analysis of corrugated steel in open cut tunnel [J]. Modern tunnel technology, 2018, 55 (S2): 1130 - 1138.)
- [2] 李志栋, 吕高山, 吕敬之. 美国钢波纹管涵洞耐久性设计及讨论[J]. 公路, 2021, 66(1): 91 - 95.
(LI Zhidong, Lü Songshan, Lü Jingzhi. Durability design and discussion of American steel bellows culvert [J]. Highway, 2021, 66(1): 91 - 95.)
- [3] 潘青, 张清照, 周圆媛, 等. 钢波纹管涵代替钢筋混凝土管涵的可行性探究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1051 - 1057.
(PAN Qing, ZHANG Qingzhao, ZHOU Yuanyuan, et al. Feasibility of steel corrugated pipe culvert replacing reinforced concrete pipe culvert [J]. Modern tunnel technology, 2018, 55 (S2): 1051 - 1057.)
- [4] 魏瑞, 曹周阳, 顾安全, 等. 高填方钢波纹管涵垂直土压力计算[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3): 74 - 83.
(WEI Rui, CAO Zhouyang, GU Anquan, et al. Calculation of vertical earth pressure of high-fill steel corrugated pipe culvert [J]. Journal of transportation engineering, 2018, 18(3): 74 - 83.)
- [5] 刘保东, 刘静波, 刘鹏飞, 等. 薄覆土波纹管拱型涵洞长期受力性能研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 65 - 73.
(LIU Baodong, LIU Jingbo, LIU Pengfei, et al. Study on long-term mechanical behavior of buried corrugated steel arch-pipe culvert [J]. Highway traffic technology, 2019, 36(9): 65 - 73.)
- [6] 李祝龙, 曹彪, 梁养辉, 等. 管拱型钢波纹管涵洞有限元计算分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 29 - 34.
(LI Zhulong, CAO Biao, LIANG Yanghui, et al. Finite element analysis of arch-shaped steel corrugated tubular culvert [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2016, 35(4): 29 - 34.)
- [7] 尤佳, 缪林昌, 董冬冬. 钢波纹管的力学性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1187 - 1194.
(YOU Jia, MIAO Linchang, DONG Dongdong. Analysis on mechanical property of corrugated steel pipes [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2017, 47(6): 1187 - 1194.)
- [8] MAI V T, HOULT N A, MOORE I D. Effect of deterioration on the performance of corrugated steel culverts [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2014, 140(2): 04013007.
- [9] REGIER C, MOORE I D, HOULT N A. Remaining strength of deteriorated corrugated steel culverts [J]. Journal of pipeline systems engineering and practice, 2018, 9(2): 04018002.1 - 04018002.15.
- [10] WANG Y, YANG L, YANG H, et al. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression [J]. Engineering structures, 2019, 183(15): 475 - 495.
- [11] 孙雅珍, 唐雪莹, 张思博, 等. 重载和温度作用下橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 98 - 105.
(SUN Yazhen, TANG Xueying, ZHANG Sibao, et al. Crack resistance of rubber asphalt stress absorbing layer under heavy load and temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(1): 98 - 105)
- [12] 王志红, 杨旭红. 基于重载及水平荷载的不同类型沥青路面力学响应分析[J]. 公路, 2019, 64(12): 21 - 26.
(WANG Zhihong, YANG Xuhong. Mechanical response analysis of different asphalt pavement based on heavy and horizontal loads [J]. Highway, 2019, 64(12): 21 - 26.)
- [13] 张海峰, 魏连雨, 宋杨, 等. 重载交通干线公路旧沥青路面加铺层结构力学分析[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(3): 99 - 104.
(ZHANG Haifeng, WEI Lianyu, SONG Yang, et al. Structural mechanics analysis of the asphalt pavement add layer on heavy trunk highways [J]. Journal of Hebei university of technology, 2015, 44(3): 99 - 104.)
- [14] 王洋, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 不同填土高度下壁厚对钢波纹管力学性状影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 69 - 73.
(WANG Yang, HONG Baoning, LIU Xin, et al. Numerical analysis of mechanical and deformation properties of steel corrugated pipe with different thicknesses under different embankment heights [J]. Journal of three gorges university (natural science), 2017, 39(2): 69 - 73.)
- [15] 陈杰, 兰恒水, 雷鸣, 等. 高路堤大管径钢波纹管变形特性研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 143 - 149.
(CHEN Jie, LAN Hengshui, LEI Ming, et al. Study of high-embankment and large-diameter steel corrugated pipe deformation characteristics [J]. Journal of Nanjing university of technology (natural science edition), 2017, 39(4): 143 - 149.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)