

水泥混凝土路面大件运输车辆轴线荷载限值研究

段同军¹, 郑帅¹, 裴福才¹, 单景松^{2*}, 孙培丽³

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

3. 山东汇通建设集团有限公司, 山东 济南 250002)

摘要:大件运输一般是指大型设备的运输配送,具有体积大、重量大的特点,对运输工具和道路承载能力都有严格的要求。现行水泥混凝土路面设计时未充分考虑大件运输车辆多线多轴的荷载特点。该文首先采用有限元方法建立不同等级公路水泥路面模型,考虑大件运输车辆轴线数及多线多轴的荷载变化,对大件运输荷载作用下水泥路面的受力特性进行了分析。然后依据水泥路面设计的极限状态方法反算了不同等级和公路区划公路的极限荷载应力。进而对比大件运输车辆作用下水泥路面应力响应与水泥路面的极限承载能力,确定了大件运输车辆的轴线荷载限值。该研究从水泥路面承载能力的角度为规范大件运输车辆的轴线荷载提供指导。

关键词:水泥混凝土路面;大件运输;有限元模型;轴线荷载限值

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

近些年来,中国经济稳定快速发展,在基础建设过程中,对大型设备运输的需求日益增加。有些大型设备的形状不规则且尺寸大,单件重量可达数百吨,一般情况下,这些大型设备需要从生产地通过各种运输方式运至安装现场。大设备的运输配送会导致路面产生各种各样的破坏,特别是水泥路面的断裂病害。

大件是指运输重量、体积上占有优势的物品,一般情况下可归类为特重荷载。聂敏^[1]指出特重荷载具有轴多轴重的特点,通过进行有限元分析,提出了特重荷载交通的定义,并给出特重荷载交通轴载界限公式和水泥混凝土板的合理尺寸;王选仓等^[2-3]通过试验验证推荐了适合不同公路等级、不同交通量的水泥混凝土路面典型结构供有关部门选用;田森等^[4-5]通过试验和有限元分析了解到水泥混凝土路面动荷载加大了对路面的作用,起到变相增加荷载的作用;陈雨林^[6]通过现场荷载试验、有限元数值理论研究得出多轴化交通荷载使路面的动态响应在轴间产生叠加,路面板处于持续受拉状态,且轴数越多,叠加效果越明显;蒋应军等^[7-9]则从材料及结构上系统地提出了重载混凝土路面结构组合原则及设计方法,使得荷载应力结果更加准确;Knoflach H^[10]基于经验数据研究了卡车超载对道路养护成本的影响;Kilareki Walter P^[11]使用理论模型研究了刚性路面和柔性路面上不同轴重对路

面的影响;亓祥宇等^[12]经过计算得出,减少单轴载荷可改善路面受力状态;周华等^[13-14]建立3D路面模型,得出了重载车对水泥混凝土路面的影响;辛勤等^[15-16]建立有限元模型,分析得到重载作用下超载率对水泥混凝土路面板的影响,以及超载率对路面板弯沉值及应力值脱空尺寸的影响;孙吉书等^[17]指出对于部分车型来说,总重并未超重,但一个或者多个轴超出设计的最大值,相比较对总重和尺寸加以限制,对车辆轴线荷载进行规范更为科学;杨永刚等^[18]运用Ansys有限元软件对单轮和温度荷载作用下新旧道面之间的黏结应力进行计算分析,研究了尺寸和厚度等因素对水泥混凝土道面修补的效果;侯海元等^[19]研究了道路混凝土细观结构损伤与抗冻性能之间的量化关系,建立了界面区参数与抗冻性间复合多元线性模型。

现行水泥路面设计考虑了极限荷载作用,但还未完全考虑大件运输车辆的特点。根据大件运输的荷载特性,分析水泥混凝土板的应力分布,确定大件运输的轴线荷载限值,有利于对大件运输车辆荷载进行规范,防止运输过程中导致水泥路面出现极限破坏。该文利用Ansys软件建立有限元模型,计算不同轴线组合的荷载应力,依据不同等级水泥混凝土路面的承载能力,研究大件运输车辆的轴线荷载限值,从路面承载能力的角度为大件运输车辆轴线限值提出限定标准。

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2021ME004);住房和城乡建设部科技项目(编号:2020-k063)

作者简介: 段同军,男,高级工程师。E-mail:775316892@qq.com

***通信作者:** 单景松,男,博士,副教授。E-mail:cyhsjs@163.com

1 大件运输车辆主要形式

大件运输车辆的轴线数根据货物的尺寸和重量而定,货物较宽时,车辆横向也设置多轴形式。轴型布置如图 1~4 所示,具体可分为以下几种情况:一线一轴,车宽通常取 2.5 m 左右,轴线间距 1.2~1.8 m。不同轴线间距时,单块混凝土板容纳的轴线数不同。如混凝土板长度为 5 m,轴线间距为 1.2 m 时,最多可布置 5 轴线;轴线距离为 1.3~1.6 m 时,可布置 4 轴线;轴

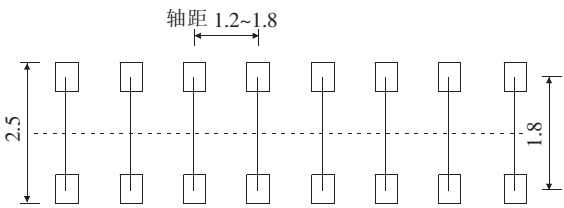


图 1 一线一轴车计算模型简图(单位:m)

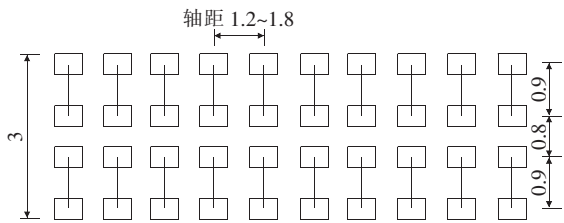


图 2 一线两轴车计算模型简图(单位:m)

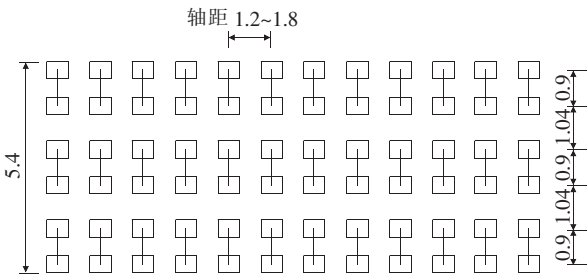


图 3 一线三轴车计算模型简图(单位:m)

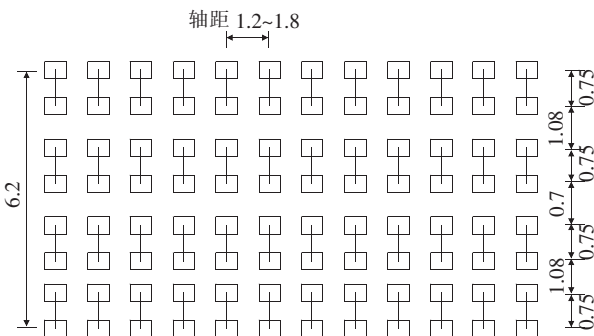


图 4 一线四轴车计算模型简图(单位:m)

线距离为 1.7~1.8 m 时,可布置 3 轴线。根据调查,一线两轴车宽 3.0 m 左右。一线三轴车,车宽 5.4 m 左右,因横向第三轴作用在另一块板,此种情况不予考虑,按照一线两轴考虑。一线四轴车,车宽大于 6 m,左右两轴分别位于相邻板块,此种车型仅考虑作用于一块板上的两轴,因而车辆作用与一线两轴车类似,具体荷载作用效应可参考一线两轴车。下面分析轴线重量和轴线间距变化对水泥路面板层底弯拉应力影响。

2 大件运输水泥路面有限元模型及荷载应力

2.1 典型路面结构及材料参数

根据中国水泥路面的使用情况,高速公路、一级公路以及二级公路、三级公路水泥混凝土路面结构及其厚度如图 5、6 所示。高速公路、一级公路水泥混凝土板厚度为 28~30 cm,基层采用两层水泥稳定碎石层,厚度为 36~40 cm,底基层采用石灰稳定、二灰稳定或级配碎石材料,厚度为 16~20 cm。二级、三级公路水泥混凝土板厚度为 24~26 cm,基层采用一层水泥稳定碎石层,厚度为 18~20 cm,底基层采用石灰稳定、二灰稳定、级配碎石材料,厚度为 16~20 cm。该文以此为典型结构进行水泥路面受力分析。

水泥混凝土路面板 28~30 cm
水泥稳定层 18~20 cm
水泥稳定层 18~20 cm
石灰稳定、二灰稳定或级配碎石 16~20 cm
土基

图 5 高速、一级公路水泥路面结构

水泥混凝土路面板 24~26 cm
水泥稳定层 18~20 cm
石灰稳定、二灰稳定或级配碎石 16~20 cm
土基

图 6 二级、三级公路水泥路面结构

2.2 水泥路面结构有限元模型

假定水泥混凝土面板与半刚性基层间竖向位移连续,水平方向设置为滑动状态。水泥混凝土板与基层层间接触使用弹簧单元实现,具体弹簧单元如图 7 所

示,仅考虑弹簧的法向刚度。水泥混凝土面层板和基层单元划分时,需要面层底部和基层顶面设置的单元尺寸一致,且节点所在位置一致,这样可使处于同一位置处上下节点建立一个接触对,使用弹簧单元对其进行连接。接触单元设置为仅有竖向的刚度,且刚度应设置为较大值,保证竖向位移的连续性,不设置横向接触参数。这样可实现层间的光滑状态且竖向位移连续。

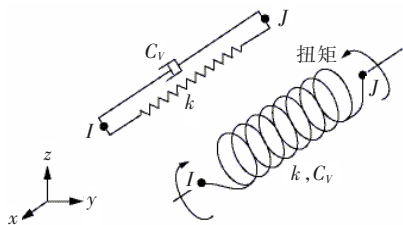


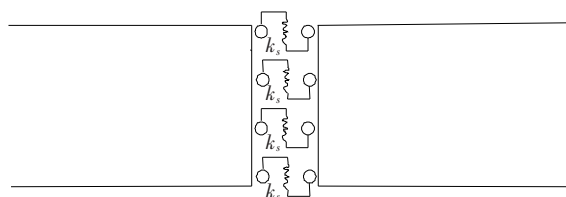
图7 弹簧单元

混凝土板与板之间的接缝处传荷能力通过设置竖向剪切弹簧实现,如图8所示。若沿混凝土块体宽度为 b 区域上分布着一列共 n 个节点,每个节点都分布弹簧单元。下面推导弹簧弹性系数 k_s 的取值范围,为便于推导,假设块体间接缝宽度为0。若块体间剪应力为 τ ,则有关系式:

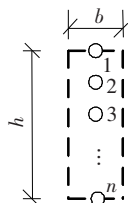
$$\tau \cdot b \cdot h = n \cdot k_s \cdot \Delta \quad (1)$$

$$\Delta = \gamma \cdot h \quad (2)$$

式中: k_s 为弹簧弹性系数; Δ 为接缝处两侧板体对应结点竖向位移差; γ 为相邻板间剪切应变; h 为混凝土板厚度; b 为混凝土板宽度。



(a) 接缝两侧剪切弹簧



(b) 接缝横断面单元结点

图8 接缝传荷弹簧单元

将式(2)代入式(1)得:

$$\tau \cdot b \cdot h = n \cdot k_s \cdot \gamma \cdot h \quad (3)$$

移项得:

$$k_s = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \frac{b}{n} = G \cdot \frac{b}{n} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \frac{b}{n} \quad (4)$$

因此,当 k_s 值达到式(4)中数值时,可认为接缝处材料跟两侧混凝土材料相同,荷载作用下接缝两侧无竖向位移差。将混凝土材料参数代入式(4), k_s 值接近 1×10^8 N/m,因此 k_s 取值区间为 $0 \sim 1 \times 10^8$ N/m,代表接缝无传荷能力至完全传荷的状态。

通过设定不同的接缝弹簧单元弹性系数和基层顶面的综合模量,对水泥路面进行计算。图9中单块板周围建立混凝土板,并加入接缝弹簧单元,车辆荷载加至中间板表面纵缝中间位置。以一线一轴100 kN为例进行计算,接缝处变形如图10、11所示。由图10可以看出:接缝传荷能力的大小对接缝处弯沉规律影响很大,特别是 k_s 从 1×10^5 N/m增加至 1×10^7 N/m区间时影响更为明显。考虑到高速和一级公路接缝处设置传力杆和拉杆,传荷能力较好,接缝弹簧弹性系数 k_s 取 1×10^7 N/m;对于二级及以下公路,接缝处传荷能力相对较弱,接缝弹簧弹性系数 k_s 取 1×10^5 N/m。

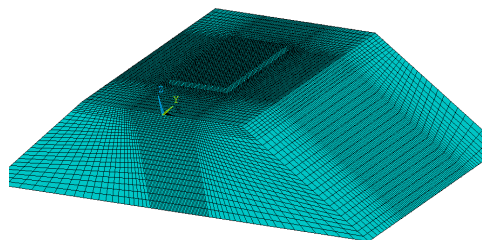
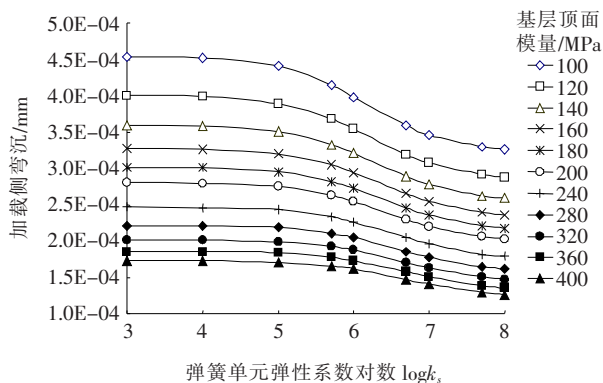


图9 有限元网格图

图10 加载侧弯沉随 $\log k_s$ 变化规律

2.3 水泥路面板受力分析

通过有限元模型计算,考虑轴线数量、轴线间距和轴线重的变化,高速及一级公路荷载应力计算结果见图12、13,二级及三级公路计算结果见图14、15。由计算结果可以看出:多轴线作用下混凝土板底的弯拉应力相比于单轴线作用时呈下降趋势。这是因为相邻轴

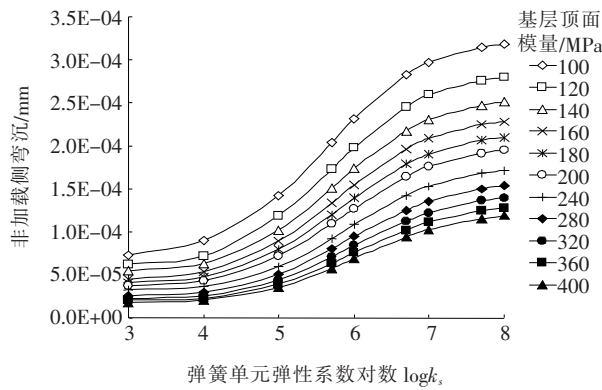


图 11 非加载侧弯沉随 $\log k_s$ 变化规律

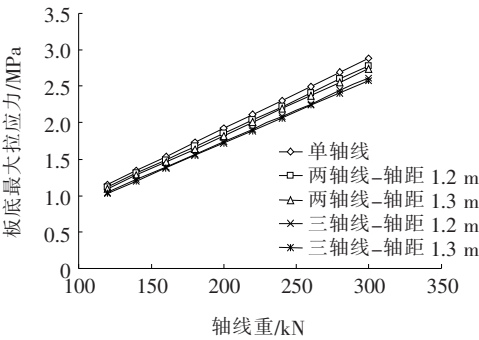


图 12 一线一轴荷载板底弯拉应力(高速、一级公路)

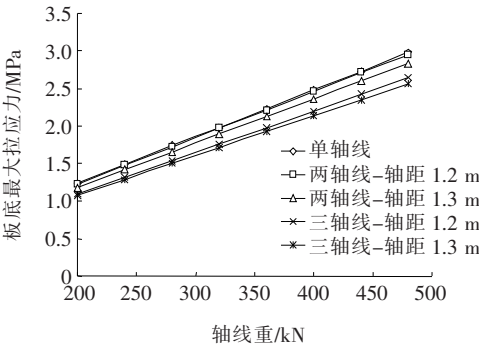


图 13 一线两轴荷载板底弯拉应力(高速、一级公路)

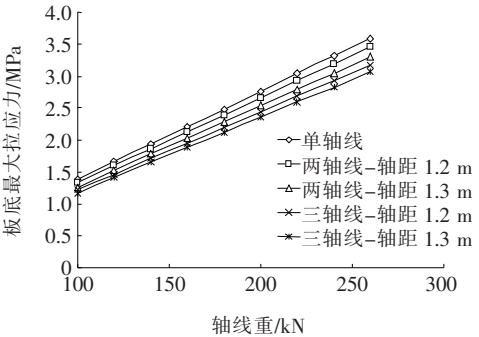


图 14 一线一轴荷载板底弯拉应力(二级、三级公路)

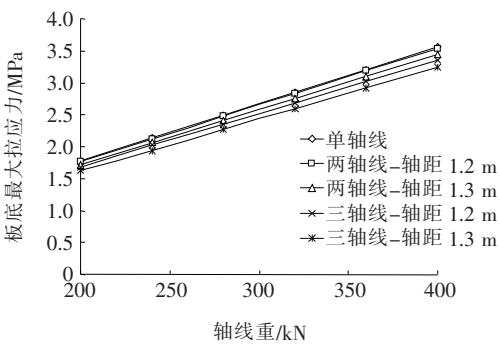


图 15 一线两轴荷载板底弯拉应力(二级、三级公路)

同时作用下,轴之间相互作用在纵缝中间边缘底部会产生负弯矩,降低板底拉应力。因而,该文仅分析了纵向两轴、三轴同时作用下板底最大应力,用以确认是否存在负弯矩的影响。结果表明多轴计算意义不大,最终确定单线多轴作用下的板底弯拉应力为最不利状态。

3 水泥路面温度应力

最大温度梯度时混凝土面层板最大温度应力 $\sigma_{t, \max}$ 参照现行水泥路面设计规范设计方法计算^[18], 具体如式(5):

$$\sigma_{t, \max} = \frac{\alpha_e E_e h_e T_g}{2} B_L \tag{5}$$

式中: α_e 为混凝土的线膨胀系数; T_g 为公路所在地 50 年一遇的最大温度梯度; B_L 为综合温度翘曲应力和内应力的温度应力系数; E_e 为水泥混凝土面层板弯拉弹性模量; h_e 为水泥混凝土面层板厚度。

最大温度应力计算结果列于表 1 中。

表 1 典型结构最大温度应力

公路自然区划	最大温度梯度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)	最大温度应力/MPa	
		高速公路、一级公路	二级公路、三级公路
Ⅱ、Ⅳ	85.5	1.427	1.629
Ⅲ	92.5	1.544	1.762
Ⅴ、Ⅵ	89.0	1.486	1.696
Ⅶ	95.5	1.594	1.820

4 水泥路面极限荷载应力反算

4.1 极限状态校核方法

大件运输车辆对水泥路面的影响以最大轴线荷载

下的极限状态为原则,在行车荷载和温度变化的综合作用下,不产生极限断裂作为设计标准。因此,以最重轴线荷载和最大温度梯度综合作用下,不产生极限断裂作为验算标准。其极限状态设计表达式为:

$$\gamma_t(\sigma_{p,\max} + \sigma_{t,\max}) \leq f_t \quad (6)$$

式中: $\sigma_{p, \max}$ 为最重轴线荷载在临界荷位处产生的最大荷载应力(MPa); $\sigma_{t, \max}$ 为最大温度梯度在临界荷位处产生的最大温度翘曲应力(MPa); γ_t 为可靠度系数; f_t 为水泥混凝土 28 d 弯拉强度标准值(MPa)。

4.2 极限荷载应力反算

(1) 可靠度系数取值

根据 JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》^[20] 可查得可靠度系数。该文中进行典型结构分析时,考虑水泥路面实际应用情况,对高速公路和一级公路采用了相同的结构,二级和三级公路采用了相同的路面结构。为道路设计安全考虑,可靠度系数取值时采用保守的做法,高速公路和一级公路都采用高速公路可靠性标准,可靠度系数取 1.64,二级公路和三级公路都采用二级公路可靠性标准,可靠度系数取 1.04。

(2) 极限荷载应力反算

根据可靠度系数、不同自然区划的最大温度应力和弯拉强度标准值,可根据式(6)反算荷载应力最大值。水泥混凝土弯拉强度标准值高速公路、一级公路取 5.0 MPa,二级、三级公路取 4.5 MPa。极限荷载应力反算结果列于表 2。

表 2 荷载应力极限值反算结果

自然区划	极限荷载应力/MPa	
	高速公路、一级公路	二级公路、三级公路
Ⅱ,Ⅳ	2.541	2.425
Ⅲ	2.424	2.292
Ⅴ,Ⅵ	2.482	2.358
Ⅶ	2.374	2.234

5 大件运输轴线荷载限值确定

将荷载应力仿真结果与表 3 中荷载应力结果进行对比,将不超过表 3 中荷载应力极限值对应的最大轴线荷载作为轴线荷载的限值。以高速、一级公路的一线一轴和一线两轴为例,对最大轴线荷载求取方法进行说明。取前文图 12、13 仿真结果,将表 2 中最大荷

载应力做水平线,与仿真数值线相交处对应的横坐标数值即为最大轴线荷载值,具体方法绘于图 16、17 中。其他公路等级及大件运输轴线组合情况下的轴线荷载限值求取方法可参照上述方法进行。具体轴线荷载限值列于表 3.4。

表 3 最大轴线荷载限值(高速、一级公路)

公路等级		最大轴线荷载/kN			
		Ⅱ、Ⅳ	Ⅲ	Ⅴ、Ⅵ	Ⅶ
高速公路	一线一轴	260	250	260	240
	一线两轴	410	390	400	380
一级公路	一线三轴	615	585	600	570
	一线四轴	820	780	800	760

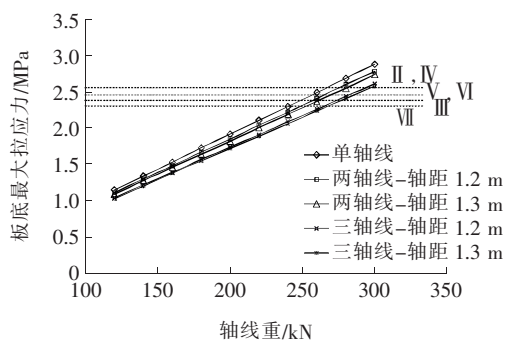


图 16 一线一轴轴线荷载限值(高速、一级公路)

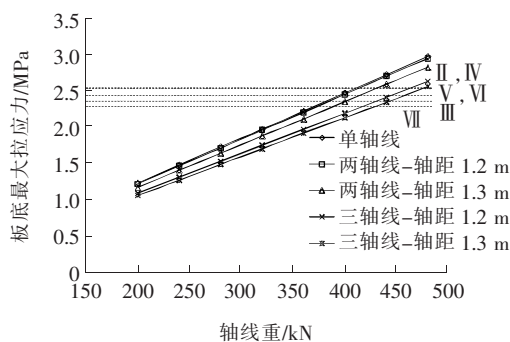


图 17 一线两轴轴线荷载限值(高速、一级公路)

表 4 最大轴线荷载限值(二级、三级公路)

公路等级		最大轴线荷载/kN			
		Ⅱ、Ⅳ	Ⅲ	Ⅴ、Ⅵ	Ⅶ
二级公路	一线一轴	180	170	175	160
	一线两轴	280	260	270	250
三级公路	一线三轴	420	390	405	375
	一线四轴	560	520	540	500

6 结 论

大件运输车辆整车重量大、体积大,具有多线多轴荷载形式,行驶于水泥路面时可能超过路面板的极限承载能力而导致断板发生。该文从水泥路面承载能力的角度,研究了大件运输车辆的轴线荷载限值,得到主要结论如下:

(1) 混凝土路面板块间的传荷能力对接缝处弯沉和受力有较大影响,仿真计算时接缝单位长度内剪切弹簧弹性系数可取值区间为 $0 \sim 1 \times 10^8$ N/m,对于设置传力杆和拉杆的接缝可取 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ N/m。

(2) 大件运输车辆纵向的轴线数量、横向轴数和轴线重量的变化都对混凝土路面板底拉应力产生一定的影响。纵向轴线的增加对板底应力产生负弯矩作用,可仅考虑单轴线。横向多轴时会产生明显的应力叠加作用,根据车辆宽度和板宽的关系,仿真计算时应至少考虑一线两轴荷载。轴重对板底影响最显著,板底应力随轴线重量增加而线性增加。

(3) 依据水泥路面现行设计规范的极限状态反算板底最大弯拉应力,以大件运输车辆产生的板底弯拉应力不大于板底弯拉应力极限值为判断方法,确定得到了不同轴线形式车辆的轴线荷载限值。实际应用时可根据大件运输车辆轴线类型、货物重量和所经路段水泥路面结构等方面,综合判断轴线荷载是否处于限值以内,防止轴线荷载过大导致水泥路面破坏。

参考文献:

- [1] 聂敏.特重荷载交通作用下重型水泥混凝土路面结构研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [2] 王选仓,王新歧,李春平,等.重载水泥混凝土路面研究[J].中国公路学报,1999,12(1):3—5.
- [3] 杨三强,武文秀,刘娜,等.特重荷载下水泥混凝土路面承载能力有限元仿真分析[J].河北大学学报(自然科学版),2017,37(6):561—566.
- [4] 田森.重载车辆作用下普通水泥混凝土路面破坏机理研究[D].济南:山东交通学院,2019.

- [5] 郑仲浪,吕彭民.多轴大货车对路面的动作用力研究[J].郑州大学学报(工学版),2009,30(4):44—47.
- [6] 陈雨林.重载对水泥混凝土路面板的动力作用效应研究[D].福州:福州大学,2015.
- [7] 蒋应军.重载交通水泥混凝土路面材料与结构研究[D].西安:长安大学,2005.
- [8] YU Wei,ZHANG Yannan, WANG Xuancang, et al. Analysis on Bearing Capacity of Heavy-Load Cement Concrete Pavement [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014,505—506:200—203.
- [9] LU Yani,XIAO Taoli. Stress Analysis of Cement Concrete Pavement under Overweight Loads [J]. Advanced Materials Research,2012,446—449:949—953.
- [10] KNOFLACHER H. The Effect of Truck Overloading on Road Maintenance Cost on an Empirical Data Basis[M]. Institution of Electrical Engineers,1989.
- [11] KILARESKEI Walter P. Heavy Vehicle Evaluation for Overload Permits [J]. Transportation Research Record, 1989.
- [12] 亓祥宇,余健,白绘杉.基于大件运输的车辆选择及荷载标准研究[J].公路,2020,65(8):126—132.
- [13] 周华.水泥混凝土路面上重载车辆的动荷载分析[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [14] 郑仲浪,吕彭民.多轴大货车对路面的动作用力研究[J].郑州大学学报(工学版),2009,30(4):44—47.
- [15] 辛勤,孙吉书,任晓军,等.重载作用对混凝土路面板的弯沉及应力分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(6):30—33.
- [16] 张悦.重载交通下水泥混凝土路面结构响应分析[D].天津:河北工业大学,2015.
- [17] 孙吉书,耿晓婷,孙建诚.超载交通对道路路面性能的影响[J].中外公路,2015,35(3):338—342.
- [18] 杨永刚.水泥混凝土修补道面结构参数敏感性分析[J].中外公路,2021,41(4):79—84.
- [19] 侯海元,周胜波,闫强.影响道路水泥混凝土抗冻性能的细观损伤因子研究[J].中外公路,2021,41(3):314—318.
- [20] 中交公路规划设计院有限公司.公路水泥混凝土路面设计规范:JTG D40—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.