

重载作用下沥青路面结构验算方法

张碧琴¹, 马亚坤¹, 张 强¹, 王 莉², 王 垒¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中国市政工程华北设计研究总院, 天津 300074)

摘 要:针对目前中国日趋严重的超载现象, 为方便公路养护管理部门定期对路面结构状况进行调查评定, 及时对相应路段公路进行维修养护, 以现行沥青路面设计规范为基础, 经过大量的数据分析对比, 利用线性回归方法, 获得了车辆重载运输轴载作用下的沥青路面标准轴载换算公式; 同时根据沥青路面结构特点, 对考虑重载作用的路面结构的验算内容和原则进行讨论和分析, 最终确定以考虑超载作用的路面弯沉值、容许拉应力值、路面使用寿命及所需结构层厚度, 作为沥青路面结构承载力验算的验算系统。研究表明: 得出的沥青路面标准轴载换算公式以及沥青路面结构验算系统, 对国道 G108 陕西渭南故市镇路段路面结构状况的调查评定是合理的, 评定结果可为公路养护部门提供科学的决策依据。

关键词:道路工程; 沥青路面; 重载; 轴载换算; 结构验算

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Checking measures of asphalt pavement structure under overloading

ZHANG Bi-qin¹, MA Ya-kun¹, ZHANG Qiang¹, WANG Li², WANG Lei¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. North China Municipal Engineering

Design & Research Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: Aimed at more and more serious overloading transportation in China, to help the administration departments to evaluate asphalt pavement structure under overload, as while as to take measures for road maintenance timely, this paper obtained the axle load conversion formula under the overloading transportation, which was based on the current specification for design of highway asphalt pavement, as while as the analysis of a large amount of data with a linear regression method. The content and principles of the pavement structure checking were discussed according to the structural characteristics of asphalt pavement under overloading transportation, and ultimately overloading pavement deflection value, allowable tensile stress value, pavement life and the necessary structural layer thickness of asphalt pavement structure were checked to evaluate pavement structure conditions. The results show that it is reasonable to investigate and evaluate the pavement condition at the section of Gushi town in Weinan city, Shaanxi province using the standard axle load conversion formula of asphalt pavement and the asphalt pavement

structure checking system concluded in this paper and the results will provide a scientific basis for road maintenance departments. 2 figs, 11 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; overloading; axle exchange; structure checking

0 引言

中国国民经济的快速发展带动了公路交通运输业的发展,但公路重载运输现象却日益严重。对中国交通现状进行调查显示,不少车辆后轴从限定的 100 kN 增加到 180 kN 甚至 200 kN 以上。很多道路路面在使用初期就发生了严重的破坏,其中大量超过设计轴载标准的车辆成为破坏中国公路的重要因素^[1]。如果不能及时发现和采取相应的维护措施,将会直接影响道路的正常通行。因此应定期对使用中的路面结构状况进行调查评定,了解路面现有结构状况和强度,据此判定是否需要加强或预估剩余使用寿命,分析路面损坏的原因及提出处理措施。

中国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006),以 BZZ-100 即单轴双轮 100 kN 为标准轴载,以设计年限内的累积标准轴载作用次数进行路面结构设计^[2]。规范采用的轴载换算公式只适用于单轴轴载不大于 130 kN 以及双轴轴载不大于 220 kN 的各种轴载换算。目前中国主流的公路路面设计系统是由东南大学交通学院王凯教授与毛世怀副教授先后合作编制的,以 DOS 和以 Windows 为平台的《公路路面设计程序系统》HPDS 系列。该路面结构验算系统直接采取规范公式计算,没有考虑超限现象对于路面结构承载力的影响。研究表明,路面的非线性与轴重有关,沥青路面随着荷载的增加呈现出明显线性性质,一般在 130 kN 以下均可以视为线性的。考虑非线性因素时路面的破坏程度大于使用线弹性理论计算得出的结果^[3-4]。因此,使用规范公式对超载作用下路面结构进行验算会有一定的局限性。为此,本文以现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)为基础,充分考虑重载车辆对路面结构产生的影响,获得合理的沥青路面标

准轴载换算公式,并在此基础上确定了以考虑超载作用的路面弯沉值、容许拉应力值、路面使用寿命及所需结构层厚度,作为沥青路面结构的验算内容;并以国道 G108 陕西渭南故市镇路段为例进行路面结构验算,以反映重载作用对路面结构的影响,并判定是否需要加强或预估其剩余使用寿命。

1 重载作用下的轴载换算理论

1.1 轴载换算的基本原则

对于道路上行驶的多种类型的车辆轴载,必需选定一种标准轴载,按照等效原则把不同类型轴载作用次数换算为这种标准轴载的作用次数。这种等效原则是指同一路面在不同轴载作用下产生相同的疲劳损坏程度。现行公路沥青路面设计规范中轴载换算表达式是参照 AASHTO 的不同轴载试验结果统计而得,并且采用设计弯沉值和层底拉应力指标,因此进行轴载换算时,应考虑以弯沉等效和弯拉应力等效的原则^[5-6]。

1.2 考虑重载作用的轴载换算方法

1.2.1 考虑弯沉等效的轴载换算方法

以弯沉为设计指标的轴载换算形式为^[7]

$$\frac{N_a}{N_b} = \left(\frac{P_a}{P_b} \right)^n \quad (1)$$

式中: n 为弯沉等效轴载换算指数; P_a 、 P_b 分别为 2 种不同轴型的轴床; N_a 、 N_b 分别为 2 种不同轴型的轴载作用次数。

现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定 $n=4.35$,但这只适用于单轴轴载小于 130 kN 的情况,当轴载大于 130 kN 时如果还使用该公式进行轴载换算必然会产生较大的误差。对于超载,大部分轴载换算指数为 5.4~6.5,其具体取值与路面结构有关,路面结构承载能力愈大,等效轴载换算指数愈小^[8]。考虑到土基的非线性对于整个

路面结构的非线性影响,本文认为以前很多学者提出的 5.5 有些偏低,建议当轴载大于 130 kN 时,对于重载沥青路面的弯沉等效换算指数取 5.9;当轴载小于 130 kN 时,弯沉等效换算指数仍按规范取值为 4.35。

1.2.2 考虑弯拉应力等效的轴载换算方法

以拉应力为设计指标的轴载换算公式的形式为^[7]

$$\frac{N_a}{N_b} = \left(\frac{P_a}{P_b} \right)^{n'} \quad (2)$$

式中: n' 为弯拉应力等效轴载换算指数。

一般半刚性基层路面 $n'=8.0$,对于超载,大部分等效轴载换算指数为 9~12,其具体取值与路面结构强度有关^[9]。考虑土基的非线性影响,基层底部的拉应力超限的可能性很大。本文认为以前学者提出的 9.0 偏低,因此建议当轴载大于 130 kN 时,对于重载沥青路面的弯拉应力等效换算指数取 11.0;当轴载小于 130 kN 时,弯拉应力等效换算指数仍按规范取值为 8.0。

由上述轴载换算方法,考虑重载作用对沥青路面结构的影响,按照弯沉等效和弯拉应力等效原则分析,得出考虑重载作用时的沥青路面轴载换算公式分别为

(1) 弯沉等效

$$N = \sum_{i=1}^m C_1 C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} + \sum_{j=1}^k C_1 C_2 n_j \left(\frac{P_j}{P} \right)^{5.9} \quad (3)$$

式中: n_i, n_j 为各种被换算车辆的作用次数(次/d); P_i 为被换算的各级轴载, $P_i < 130$ kN; P_j 为被换算的各级轴载, $P_j \geq 130$ kN; P 为标准轴载; C_1 为弯沉轮组系数; C_2 为弯沉轴数系数; N 为弯沉标准轴载的当量轴次(次/d)。

(2) 弯拉等效

$$N' = \sum_{i=1}^m C'_1 C'_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{8.0} + \sum_{j=1}^k C'_1 C'_2 n_j \left(\frac{P_j}{P} \right)^{11.0} \quad (4)$$

式中: C'_1 为弯沉轮组系数; C'_2 为弯沉轴数系数; N' 为弯沉标准轴载的当量轴次(次/d)。

1.3 “规范”轴载换算公式与本文轴载换算公式

为了区别现行“规范”轴载换算公式与本文得出

的轴载换算公式的合理性,将 100 kN 作为标准轴载,分别利用 2 个公式计算 4~30 t 轴载的弯沉和弯拉应力等效换算系数,得出的对比曲线如图 1、图 2 所示。

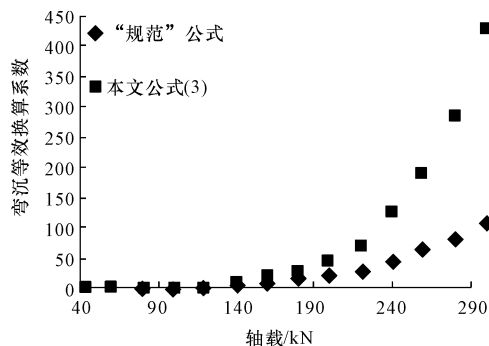


图 1 弯沉等效轴载换算系数对比曲线

Fig. 1 Deflection equivalent axle load conversion coefficient curves

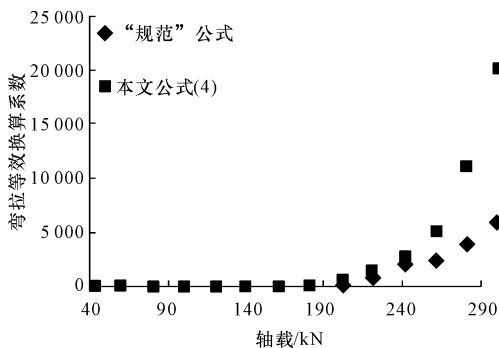


图 2 弯拉应力等效轴载换算系数对比曲线

Fig. 2 Bending-tensile stress equivalent axle load conversion coefficient curves

由图 1、图 2 可以得出,用 2 种换算方法分别计算轴载小于 130 kN 轴载得出的等效轴载换算系数差别很小,可认为 2 种方法是一致的。当轴载大于 130 kN 时,2 种轴载换算公式得出的等效轴载换算系数随着轴载的增加,差距也越来越大。并且“规范”公式换算系数小于本文公式换算系数。所以,如果按“规范”方法对超载道路进行轴载换算就会低估超载荷载对路面的疲劳损坏作用^[9-10]。因此,当轴载大于 130 kN 时,用本文换算方法进行轴载换算更为合理。

2 验算的主要内容及计算方法

为了解路面结构在当前交通量和考虑重载交通

作用下的受力状况,进而为道路的养护维修和管理提供科学的依据,对沥青路面从以下方面进行验算:计算弯沉与容许弯沉的比较;层底拉应力与容许拉应力的比较;现有交通轴载下路面的使用寿命;现有交通轴载需要的路面结构厚度。

本文介绍的考虑重载作用的路面结构验算的计算思路是:以设计规范方法为基础,按照本文提出的标准轴载换算方法,利用从公路重载检测站系统数据库中提取出来的公路交通量和轴载数据,计算得到标准轴载累计当量轴次,结合由原始设计资料提供的路面结构组成的数据及其相关参数,进行路面结构验算分析。对于验算结果满足不了规范要求的道路,提出相应的维修和处理方法。

2.1 比较考虑重载作用下的沥青路面容许弯沉值 L_x 与设计资料中沥青路面容许弯沉值 L_R

路面结构的路表弯沉值表征路面结构在轴载作用下垂直方向的总位移,是反映路面总体刚度的指标。在相同的车轮荷载作用下,路面弯沉值越大,表示路面抵抗垂直变形的能力越弱;路面的弯沉值越小,则路面抵抗垂直变形的能力越强。

实践经验表明,路面的损坏过程是随着累计轴载数的增加而逐步发展的,因此路面结构在达到相同的破坏程度时,回弹弯沉大小与该路面的轮载累计重复作用次数即路面的使用寿命成反比。

利用本文提出的轴载换算公式计算实测交通量,用所得的累计当量轴次计算出路面容许弯沉值 L_x 。重载作用下路面容许弯沉值参考规范按下式计算

$$L_x = 6\,000 N_x^{-0.2} A_c A_s A_b \quad (5)$$

式中: L_x 为超限作用下的路面容许弯沉值(0.01 mm); N_x 为实测交通量换算后的累计当量轴次; A_c 为公路等级系数,高速公路、一级公路为 1.0,二级公路为 1.1,三、四级公路为 1.2; A_s 为面层系数,沥青混凝土面层为 1.0,热拌和冷拌沥青碎石、沥青贯入式路面(含上拌下贯式路面)、沥青表面处理为 1.1; A_b 为沥青路面结构类型系数,半刚性基层沥青路面为 1.0,柔性基层路面为 1.6。

若所得的弯沉值小于路面设计时的容许弯沉值

$L_R (L_x \leq L_R)$,说明以设计弯沉值为控制标准设计出的路面结构强度不足以满足现有的交通荷载,此时,需要提高路面结构强度,以提高抵抗垂直变形的能力。

2.2 比较重载作用下的沥青路面容许拉应力 σ_x 与设计层底拉应力 σ_m

容许拉应力是指路面结构在行车荷载反复作用下达到临界破坏状态时的最大疲劳应力,当结构层底面的最大拉应力超过容许拉应力时出现疲劳开裂。中国现行沥青路面设计规范规定,进行路面结构设计时要求结构层底面的最大拉应力 σ_m 小于结构层材料的允许拉应力值 $\sigma_R (\sigma_m \leq \sigma_R)$ 。其中, σ_m 取决于路面结构层材料厚度及其性质, σ_R 与材料强度及累计标准当量轴载作用次数有关。对于同一路面结构,即路面结构材料相同,达到该临界破坏状态时的最大疲劳应力与荷载作用次数成反比。即 σ_m 一定时, σ_R 随荷载的作用次数增大而减小。

对同一路面结构进行验算时, σ_m 值是一定的,以实测交通量换算后的累计当量轴次计算出 σ_R (即重载作用下的路面容许拉应力 σ_x)。

参照规范,重载作用下的路面容许拉应力按下式计算

$$\sigma_x = \frac{\sigma_s}{K_s} \quad (6)$$

式中: σ_x 为重载作用下路面容许拉应力(MPa); σ_s 为沥青混凝土或半刚性材料的极限抗拉强度(MPa); K_s 为抗拉强度结构系数,对沥青混凝土路面 $K_s = 0.09 N_x^{0.2} / A_c$,对无机混合稳定集料类 $K_s = 0.35 N_x^{0.11} / A_c$,对无机结合料稳定细粒土类 $K_s = 0.45 N_x^{0.11} / A_c$ 。

若 σ_R (即 σ_x) $< \sigma_m$ 时,说明路面结构层濒临达到临界破坏状态,需要对路面进行修复。

2.3 现有交通轴载下沥青路面的使用寿命

对于同一路面结构,设计年限内的累计当量轴次决定了其使用寿命的长短。在进行路面结构设计时,设计年限内一个车道沿一个方向通过的累计标准当量轴次计算公式为

$$N_e = \frac{[(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} N_1 \eta \quad (7)$$

式中: N_e 为设计年限内一个车道的累计标准当量轴次(次/(d·车道)); N_1 为运营第一年双向日平均当量轴次; t 为设计年限; γ 为设计年限内的交通量平均年增长率; η 为车道系数。

假定设计年限内的累计当量轴次是一定的,根据设计资料可知道路设计初始年限内双向日平均当量轴次;另根据实际调查可知现有交通条件下的标准轴次,即考虑重载作用的日平均当量轴次。可以使用如下公式推算出考虑重载作用下路面的使用寿命^[11]。

计算公式为

$$N_e = \frac{|(1+\gamma)^t - 1| \times 365}{\gamma} N_1 \eta = \frac{|(1+\gamma)^{t'} - 1| \times 365}{\gamma} N_x \eta \quad (8)$$

将其简化可得

$$\frac{N_1}{N_x} = \frac{(1+\gamma)^{t'} - 1}{(1+\gamma)^t - 1} \quad (9)$$

式中: N_x 为现有重载作用下一个车道的日平均当量轴次(次/(d·车道)); t' 为现有重载作用下的路面结构使用寿命(年)。

根据式(8)、式(9)可以解出 t' 值。

2.4 现有交通作用下所需的沥青路面结构层厚度

按照《沥青路面设计规范》(JTG D50—2006),根据现有交通量情况、交通轴载及计算弯沉值,充分考虑重载作用,重新进行路面结构设计,计算出新的路面结构层厚度。

3 沥青混凝土路面结构验算结果

国道 G108 陕西渭南故市镇路段为二级公路,车道系数为 0.65,交通增长率 $\gamma=6\%$,设计年限 t 为 12 年,路面结构为细粒式沥青混凝土结构,设计弯沉 $L_R=30.6(0.01 \text{ mm})$,层底拉应力 $\sigma_m=0.315 \text{ MPa}$,设计当量轴次为 14 246 次/d,原路面总厚度为 53 cm,交通量及轴载调查结果 $n_i=5\ 032(P_i<130 \text{ kN})$ 、 $n_j=642\ 351(P_j\geq 130 \text{ kN})$ 。

(1)轴载换算(以弯沉为标准时)。路面设计以双轮组单轴载 100 kN 为标准轴载,按式(3)计算得实测当量轴次 $N=647\ 383(\text{次/d})$,实测交通量换

算后每个车道的累计当量轴次 $N_x=4.207\ 98\times 10^5$ (次/(d·车道))。

(2)计算现有交通荷载下(超限作用下)的路面容许弯沉值 L_x 。将轴载换算结果 N_x 代入式(5)计算得现有交通荷载下的路面容许弯沉值 $L_x=15.2(0.01 \text{ mm})<L_R=30.6(0.01 \text{ mm})$ 。因此,以 $30.6(0.01 \text{ mm})$ 弯沉值设计出的路面结构远远不能满足现有交通荷载。

(3)计算现有交通荷载下(超限作用下)的路面容许拉应力 σ_x 。将轴载换算结果代入式(6),计算得到现有交通荷载下的路面容许拉应力 $\sigma_x=0.27 \text{ MPa}<\sigma_m=0.315 \text{ MPa}$,说明路面结构层材料的容许拉应力大幅减小,以至于小于路面结构层底面的最大拉应力,结构层材料已经破坏或逼近临界破坏状态,路面有待修复。

(4)计算现有交通轴载下(超限作用下)路面的使用寿命。按照本文式(9)计算得 t' 为 4.2 年,小于 t 为 12 年。在超载作用下,现有路面结构计算得到的寿命大大缩短,通过计算寿命可以辅助养护部门有针对性的对路面加强养护维修,同时有针对性的对特殊路段加强超限超载治理,减轻路面强度的衰减,延长路面的使用寿命。

(5)现有交通轴载下需要的路面结构厚度与原厚度比较。根据“规范”公式计算得现有交通轴载下需要的路面结构总厚度为 65 cm,大于原路面结构厚度,因此在超限超载运输作用下,现有的路面结构厚度不能满足要求,基本上都需增加面层或基层的厚度。

4 结 语

(1)考虑超载作用对路面结构的影响,分析了现行规范中标准轴载换算公式存在的缺陷,提出了更合理的轴载换算公式。

(2)从路面结构的力学原理出发,对考虑重载作用的路面结构验算的主要内容和计算原则进行了分析和讨论,确定了以考虑超载作用的路面弯沉值、容许拉应力值、路面使用寿命及所需结构层厚度,作为沥青路面结构验算内容的沥青路面结构验算系统。

(3)利用本文研究成果对国道 G108 陕西渭南故市镇路段进行路面结构状况的调查评定,了解现有的路面结构状况和强度,并根据验算结果为道路养护维修管理提供科学的决策依据。

参考文献:

References:

- [1] 赵队家,刘少文,田波,等. 山西省运煤公路超载情况调查与损坏影响分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(1):27-30.
ZHAO Dui-jia, LIU Shao-wen, TIAN Bo, et al. Investigation and evaluation on overloading of highway in Shanxi[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1): 27-30. (in Chinese)
- [2] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S]. JTG D50—2006, Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
- [3] 王选仓,谭权,王新岐,等. 重载沥青路面研究[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(4):7-10.
WANG Xuan-cang, TAN Quan, WANG Xin-qi, et al. Research on bituminous pavement of running overload vehicles[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4): 7-10. (in Chinese)
- [4] 董忠红,吕彭民. 考虑轮迹横向分布的沥青路面疲劳寿命修正系数[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011,31(6):21-25.
DONG Zhong-hong, LU Peng-ming. Correcting factor of asphalt pavement fatigue life considering wheel-path lateral distribution[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(6): 21-25. (in Chinese)
- [5] 武永平. 宣大高速公路重载交通路面结构研究[D]. 天津:河北工业大学,2002.
WU Yong-ping. Research on heavy load pavement structure of Xuanda expressway[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [6] 王辉,武和平. 沥青路面按弯沉等效轴载换算的研究[J]. 中国公路学报,2003,16(1):19-21.
WANG Hui, WU He-ping. Research on axle exchange based on deflection equivalent for asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 19-21. (in Chinese)
- [7] 陈浙江,王玲娟. 超载下的沥青路面轴载换算[J]. 中外公路,2007,27(2):189-192.
CHEN Zhe-jiang, WANG Ling-juan. Axial exchange formula for asphalt pavement structure under overloading transportation[J]. Journal of China & Foreign Highway 2007, 27(2): 189-192. (in Chinese)
- [8] 王新忠. 重载交通沥青路面设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2005.
WANG Xin-zhong. Research on the method of asphalt pavement design under heavy traffic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [9] Ameri M, Mansourian A, Heidary K M, et al. Cracked asphalt pavement under traffic loading-A 3D finite element analysis [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1978(8):1817-1826.
- [10] 王莉. 基于 GIS 的陕西省公路超限运输路面结构验算系统[D]. 西安:长安大学,2011.
WANG Li. Design of highway pavement structure under overloading transportation checked system in Shaanxi province base on GIS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [11] 李海军,黄晓明. 重载条件下沥青路面按弯沉等效的轴载换算[J]. 公路交通科技,2004,21(7):4-6.
LI Hai-jun, HUANG Xiao-ming. Axle load conversion formula based on deflection equivalent for semi-rigid base asphalt pavement under heavy-load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(7): 4-6. (in Chinese)

