

Overview of Axle Load Conversion Formula for Asphalt Pavement

Congling Bao

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: Based on the elastic layered theory system, based on the mechanical response of the asphalt pavement, and using the equivalent principle, an overview is made of the asphalt road surface with surface deflection, base tensile stress, subgrade compressive stress, and interlaminar shear stress. Axle load conversion formula. On this basis, the effects of dynamic load and seasonal changes on the axle load conversion are discussed and the axle load conversion formulae applicable to dynamic loads and seasonal variations are listed. The results show that the axle load conversion formulas obtained when the axle load conversions are performed with different mechanical indexes are similar, that is, the axle structure obtained when the axial load formulas are converted with different mechanical indexes are similar when the pavement structure is designed; furthermore, the dynamic load and season The correction factor makes axle load conversion more suitable for actual projects.

Keywords: Equivalence principle; Axle-load exchanging; Summarize

沥青路面轴载换算公式综述

包聪灵

重庆交通大学, 重庆市, 中国, 40074

摘要: 在弹性层状理论体系的基础上, 以沥青路面的力学响应为依据, 采用等效原则, 综述沥青路面以路表弯沉、基底拉应力、路基顶面压应力和层间剪应力为换算指标的轴载换算公式。在此基础上讨论动荷载作用和季节变化对轴载换算的影响并列出了适用于动荷载和季节变化的轴载换算公式。结果表明以不同的力学指标进行轴载换算时所得到的轴载换算公式相似即用不同的力学指标换算的轴载公式进行路面结构设计时得到的路面结构是相近的; 此外, 动荷载和季节修正系数使轴载换算更加贴合实际工程。

关键词: 等效原则; 轴载换算; 综述

1 引言

迄今为止, 我国沥青路面结构设计都是在弹性层状理论体系的基础上以标准荷载的作用效果为依据, 但是货运汽车等的超限超载运输使得实际路况中的车辆荷载大多超过了标准轴载, 沥青路面实际受力与标准轴载相比明显增大, 因此为使得沥青路面设计更加切合实际, 研究沥青路面的轴载换算至关重要。

按照等效原则可实现沥青路面不同轴载之间的换算。等效可以从两个方面理解, 其一为, 对于同一路面结构车轮 1 作用 N_1 次达到的破坏程度和车轮 2 作用 N_2 次的相同, 则车轮 1 和车轮 2 作用次数 N_1 和 N_2 是等效的; 另一种理解为: 对于同一交通组合经过轴载换算后得到的路面结构厚度是相同的[1]。

车辆换算系数 (等效系数): 使同一种路面结构

达到同一破坏状态的两种车轮的作用次数的比称为等效系数其表达式如式 1。

$$f_i = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

式中 N_1 表示换算的目标轴载, N_2 表示要换算的轴载。

2 传统轴载换算系数

2.1 以路表弯沉值为指标的轴载换算

根据王辉等人[2]的研究结果从理论上得到了不同轴载下弯沉比 $\frac{l_1}{l_2}$ 的简化公式如式 2。

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{p_1 d_1}{p_2 d_2} \cdot \frac{\bar{w}_1}{\bar{w}_2} \cong \frac{p_1}{p_2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^a \quad (2)$$

式中: p_1, p_2 为不同轴载下的单位压力;

d_1, d_2 为当量圆直径;

w_1, w_2 为不同轴载下的载重系数。

通过式 2 可知轴载作用下的弯沉主要是和不同轴载下的单位压力的大小和作用圆的面积有关。

如果单用轴重来表示弯沉比时可用式 3。

$$\frac{l_1}{l_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^b \quad (3)$$

式中 P_1, P_2 为轴重;

b 为换算系数, 我国规范所规定的普通沥青路面 $b=4.35$ 。

如果将以上计算和容许弯沉 $l_R = AN^{-c}$ 联立可知式 4。

$$\frac{l_{R1}}{l_{R2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{-c} \quad (4)$$

根据等效原则, 将式 4 分别带入式 2 和式 3 可知式 5 和式 6。

$$\left(\frac{N_1}{N_2} \right) = \left[\frac{p_2 \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^a}{p_1} \right]^{1/c} \quad (5)$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{b/c} \quad (6)$$

式 5 反映的是轴载作用次数和胎压以及作用面积之间的关系; 式 6 反映的是轴载作用次数和轴重的关系。

如果将设计弯沉 $l_d = 600N_e^{0.2} A_c A_s A_b$ 带入式 3 得到轴载作用次数和胎压之间的相互关系如式 7 所示

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{b/0.2} \quad (7)$$

虽然现行规范取消了沥青路面设计中的设计弯沉指标, 但是弯沉值作为验算指标在沥青路面中占有举足轻重的地位。

2.2 以基底拉应力为指标轴载换算

基底拉应力作为沥青路面力学响应分析的一个重要指标在沥青路面结构设计中也有着不容忽视的地位, 因此研究以基底拉应力为指标的轴载换算公式是极为重要的。

以层底拉应力为计算指标我们有式 8。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^b \quad (8)$$

式 8 建立了层底应力和轴重的关系, 发现层底拉应力的比和和轴重比的 b 次方成正比例关系。

材料的疲劳规律的强度指标-抗拉强度系数 K 用式 9 表示。

$$K = BN^c \quad (9)$$

式中: B, c 为回归系数。

对于抗拉强度系数作比可知容许拉应力 σ_R 的比值与 N 的关系式如式 11 所示。

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\sigma_0 / \sigma_{R1}}{\sigma_0 / \sigma_{R2}} = \frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{R2}} = \frac{B_1 N_1^{c_1}}{B_2 N_2^{c_2}} \quad (10)$$

对于同一结构, $B_1 = B_2, C_1 = C_2$, 此时, 式 10 可以简化成式 11 的形式。

$$\frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{R2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^c \quad (11)$$

联立式 8 和式 11 我们可知基底拉应力和轴重之间的关系如式 12 所示。

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{b/c} \ln \left(\frac{\tau_i}{\tau_s} \right) \quad (12)$$

牛小虎等人[3]通过实验结果得到 $b_i = \frac{\ln(\tau_i/\tau_s)}{\ln(P/P_s)}$ 且 b 的取值范围为 0.5990~0.9589, 平均值的取值范围为 0.7402~0.7452。

疲劳寿命预估方程如式 13 所示。

$$\lg S = -0.192 \lg N_f + \lg 5.682 \quad (13)$$

式中: S 为应力水平; N_f 为疲劳寿命。由式 14 可知材料的疲劳性能系数 $c=0.192$, 此时 $b/c = 3.868 \approx 3.9$

式 13 是层底拉应力和轴载作用次数之间的关系。对比式 7 和式 13 得到基底拉应力和弯沉所确定的轴载换算系数施一致的, 换言之, 以弯沉设计的沥青路面结构和以层底拉应力设计的沥青路面结构一致。

2.3 以路基顶面压应力为标准换算

在弹性层状理论体系的条件下, 以双轮组作用的路基顶面压应变为换算标准, 则应变比如式 14。

$$\frac{\varepsilon_{z1}}{\varepsilon_{z2}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^b \quad (14)$$

路基顶面压应变用式 $\varepsilon_{zd} = 0.8N^{-0.2}$ 表示最为恰当, 因此按照等效轴载原则有式 15。

$$\frac{\varepsilon_{z1}}{\varepsilon_{z2}} = \frac{\varepsilon_{zd1}}{\varepsilon_{zd2}} \quad (15)$$

将前两式带入第三式知式 16。

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{b/0.2} \quad (16)$$

式 16 描述的正是基于路基顶面压应变的轴载换算公式。

综合上述轴载换算公式得到以设计弯沉值和沥青层层底拉应力为设计指标时的轴载换算公式为式 17。

$$N = \sum_{i=1}^k C_1 C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (17)$$

当轴间距大于 3m 时，应按单独的一个轴载计算；当轴间距小于 3m 时，双轴或多轴的按下式计算。 $C_1 = 1 + 1.2(m - 1)$ ， m 是轴数。

2.4 以层间剪应力指标轴载换算

依据弹性层体系理论，可知路面剪应力比 $\frac{\tau_1}{\tau_2}$ 与荷载比 $\frac{P_1}{P_2}$ 的 b 次方成正比。

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^b \quad (18)$$

因为沥青路面的破坏不是一次极限荷载作用的结果而是荷载重复作用的结果，因此可用容许剪应力值作为控制指标进行路面的破坏控制。

$$\tau_R = \frac{\tau_f}{K} \quad (19)$$

式中： τ_f 为抗剪强度； τ_R 为容许剪应力； K 为抗剪强度系数。

对于同一路面结构有式 20

$$\frac{\tau_{R_1}}{\tau_{R_2}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^c \quad (20)$$

将式 20 带入式 18 可知式 21

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{b}{c}} \quad (21)$$

根据牛小虎等人对于 b 和 c 的取值知式 22。

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{3.9} \quad (22)$$

3 计入动荷载的轴载换算公式

根据胡朋等人[4]的研究当计入动荷载时，式 17 转换成式 23 的形式。

$$N = \sum_{i=1}^k C_{1i} C_{2i} n_i Q_j \left(\frac{P_i (1 \pm C_{DL})}{P} \right)^{4.35} \quad (23)$$

其中 C_{DL} 表示动荷载系数。

由于各车型的轴系数和轮组系数不同，在此进行轴载换算，将式 17 和式 23 进行处理，轮组系数和轴系数折算到轴次上，以上两式转化成式 24 和式 25，

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (24)$$

$$N' = \sum_{i=1}^k n_i' \sum_{j=1}^m Q_j \left[\frac{P_i (1 \pm C_{DL})}{P} \right]^{4.35} \quad (25)$$

式中 Q_j 为动荷载系数的分布概率。

4 计入季节修正系数的轴载换算公式

陈仲扬[5]发现不同季节轴载对沥青路面疲劳损坏影响的不同，因此在轴载换算时引入了季节修正系数 β 。根据大量经验发现不同轴载和弯沉之间的关系如式 3 所示，并且 b 的取值为 0.87，设正常季节在轴载 P 作用下路表弯沉值为 L 不利季节时，在轴载 P 的作用下，路表弯沉值则为 L' ，根据等效轴载换算原则，正常季节轴载 P' 作用与不利季节轴载 P 作用，对路面的损害是相同的，即路表所产生的弯沉均为 L' 。因此，根据式 3 有式 26。

$$\left(\frac{P'}{P} \right)^b = \frac{L'}{L} = K \quad (26)$$

由式 26 可知式 27

$$P' = K^{1/b} P \quad (27)$$

因此，在不理季节 P' 作用效果和正常季节 P 作用的作用效果的 $K^{1/b}$ 倍相同。因此由轴载换算可得式 28。

$$\beta = \left(\frac{P'}{P} \right)^{4.35} = K^5 = \left(\frac{L'}{L} \right)^5 \quad (28)$$

当考虑轴载换算的季节修正后，轴载换算式 14 改为式 29

$$N = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_2 \cdot \beta \cdot n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (29)$$

进一步简化为式 30 的形式。

$$N = \sum_{i=1}^k \beta_i N_i \quad (30)$$

5 总结

通过前面的描述说明了轴载换算系数之间的相互换算关系，另外考虑到动载作用和季节调整系数轴载换算，对各轴载换算进行归纳总结如表 1 所示。

本文提到的沥青路面的轴载换算都是在弹性层理论体系的基础上基于等效轴载原则建立的，为了使得更加贴合实际，考虑到诸如动荷载、季节变化对轴载换算公式的影响。在我国现行沥青路面设计规范规定的轴载换算公式的基础加以推广，考虑不同的影响因素引入不同的轴载调整系数。

Table 1. Axle Load Conversion Formula Without Context
表 1. 不同情景下的轴载换算公式

	规范中	动荷载	季节调整系数
因素	标准当量轴载换算 (BZZ-100)	加动荷载于 BZZ-100	加季节性调整系数于 BZZ-100
公式	$N = \sum_{i=1}^k C_1 C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35}$	$N = \sum_{i=1}^k c_{1i} c_{2i} n_i Q_j \left(\frac{P_i (1 \pm C_{DL})}{P} \right)^{4.35}$	$N = \sum_{i=1}^k C_i C_2 \beta n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35}$

本文只是研究了沥青路面分别在动荷载和季节不同的情况下的轴载换算系数。对于其他因素的影响并未考虑，另外对于动荷载和季节变化共同作用下的轴载换算系数并未解决。

References (参考文献)

[1] 田力琼.重轴载条件下沥青路面轴载换算研究[D].武汉理工大学,2010.
Liqiong Tian. Study on axle load conversion of asphalt pavement under heavy axle load condition[D].Wuhan University of Technology,2010

[2] 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.
Hui Wang, Heping Wu. Research on axle exchange based on

deflectionong equivalent for asphalt pavement[J].China Journal of Highway and Transport. 2003, 16(1):19-21

[3] 牛小虎,王孝贤,陈忠达等.层间剪应力等效轴载换算方法[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(11):60-65.
.Xiaohu Niu, Xiaoxian Wang, Zhongda Chen.Method of equivalent axle lode conversion for interlayer shear stress. Road Machinery & Construction Mechanization[J], 2017,34(11):60-65.

[4] 胡朋,潘晓东.考虑动荷载影响的当量轴载换算理论分析[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):91-95.
Peng Hu, Xiaodong Pan. Theoretical analysis of equivalent axle load conversion considering the influence of dynamic load[J]. 2011, 43(6):91-95.

[5] 陈仲扬. 沥青路面荷载换算季节修正系数的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(7).
Zhongyang Chen. Study on Seasonal Correction Coefficient of Asphalt Pavement Load Conversion.[J]. Journal of Guizhou University of Finance and Economics, 2014(7).