

文章编号: 1002-0268 (2004) 07-0005-04

重载条件下沥青路面按弯沉等效的轴载换算

李海军, 黄晓明

(东南大学交通学院 江苏 南京 210096)

摘要: 重载高胎压是目前我国干线公路上重要的交通荷载条件。基于调查的重载交通轴载、胎压的组成特点, 考虑干线公路路面典型结构及其材料的非线性性质, 计算得到不同重轴载下、不同轮胎接地压强的理论弯沉。利用理论弯沉与轴载的关系, 通过综合弯沉修正系数, 按弯沉等效原则, 得出在实际重轴载、高胎压条件下, 考虑材料非线性的半刚性沥青路面的轴载换算指数公式, 并通过实际工程测试得到了验证。进一步分析表明, 在反应不同接地压强轮胎对路面损坏的不同和对轴载换算系数的影响方面, 现容许弯沉公式存在不足, 本文依据调查的重轴载作用特点和有关文献资料, 提出了适于重载的容许弯沉公式修正式。

关键词: 道路工程; 轴载换算; 重载; 弯沉等效; 非线性

中图分类号: U416 217

文献标识码: A

Axle Load Conversion Formula Based on Deflection Equivalent for Semi-rigid Base Asphalt Pavement under Heavy-load

LI Hai-jun, HUANG Xiao-ming

(Transportation College Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096 China)

Abstract: Based on the investigation of composition of the heavy-loads which are the main load form to the main-line road, and on the nonlinear elastic property of the road material, the theoretic deflection under different heavy axle loads and different tyre pressure were calculated. By the synthetical corrective coefficient of deflection and the deflection equivalent principle, this paper analyzed the axle load conversion index under different heavy-loads, and the result has been validated by practical project. Further analysis indicated that the present deflection formula is deficient in terms of road damage under different tyre pressure, and the paper proposes a modified formula for the heavy-loads according to investigated data.

Key words: Road engineering; Axle load conversion; Heavy-load; Deflection equivalent; Nonlinear

随着我国经济的快速发展, 公路交通量迅速增大, 汽车轴载以及车胎压力都有较大增加。天津市汽车重超载情况的调查表明, 80kN 以上载重车平均超载率为 50%~70%, 最大超载率达到了 177%, 黄河 162 型汽车后轴载重达到 180kN。河南焦作境内郑一常、洛一常、新一济等几条干线公路上, 单轴轴载超过 120kN 的货车达 24.34%, 还有近 1% 单轴轴载超过 200kN。双轴轴载超过 200kN 的约为 88.51%, 最大双轴轴载重竟超过 500kN^[1]。可以说, 运输车辆重

超载、高胎压现象在我国干线公路上相当普遍。

重交通荷载的出现, 是以一定阶段社会经济的发展状况和运输行业的运行机制为背景的, 有其产生和存在的内因与外因。针对这种交通条件, 应分析其发生发展的条件和规律, 研究它对路面的作用方式, 在路面结构设计及材料设计等方面采取相应的措施, 而不应一味地对重超载车辆进行限、堵、罚。否则, 既解决不了根本问题, 还会在一定程度上限制了运输业的持续发展。世界多数国家有关汽车标准轴载的规

定，都是随着车辆实际轴载的变化而逐步在调整。

本文结合江苏省主干道重载交通的调查情况及有关工程实践，针对半刚性基层沥青路面典型结构，考虑路面材料的非线性及弯沉增长系数对实测弯沉的影响，按弯沉等效原则对重轴载作用下的轴载换算指数进行探讨，以期反应重轴载、高胎压交通条件对路面结构的作用特性。

1 重载交通状况

针对国、省道主干线江苏境内干线公路的交通状况，用动态称重仪（WIM）检测了有代表性的 5 条国、省道干线的车辆轴载分布情况。

1.1 轴载谱的分布

测试路段通行车辆单后轴轴载的分布情况见图 1。

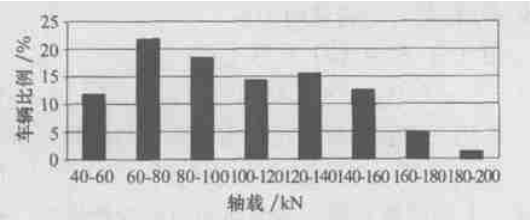


图 1 调查路段车辆单轴轴载分布

1.2 车辆胎压的测试结果

调查车辆的轮胎充气压力测试结果见图 2。

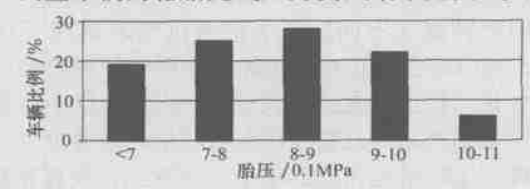


图 2 车辆胎压分布

检测结果表明，随轴载增大，轮胎胎压相应增加，轮胎接地面积也逐渐加大。故而，在重载条件下，较高的轮胎充气压强与轮胎接地压强亦很接近。将轮胎接地压强 p 取为轮胎充气压强，则根据上述实测结果，可将重载车辆轴载 P 与接地压强 p 的关系表示为

$$p_1/p_2 = (P_1/P_2)^{0.66} \tag{1}$$

式中， P_1 为重轴载； P_2 为标准轴载； p_1 为重载轮胎接地压强； p_2 为标准轮胎接地压强。

调查结果表明，国道主干线江苏境内重载交通现象普遍，30% 以上的载重车单轴轴载超过 130kN；承重轴 60% 以上的轮胎充气压力超过 0.8MPa。

2 基于弯沉等效的轴载换算

2.1 考虑材料非线性的理论弯沉

选取目前江苏省高等级公路较常用的半刚性沥青路面结构作为典型结构，各结构层厚度及有关材料参数如图 3 所示。利用路面结构计算程序，取用线弹性层状体系模型及非线性层状体系（考虑土基材料的非线性）模型，得到不同轴载下的理论弯沉，见图 4。

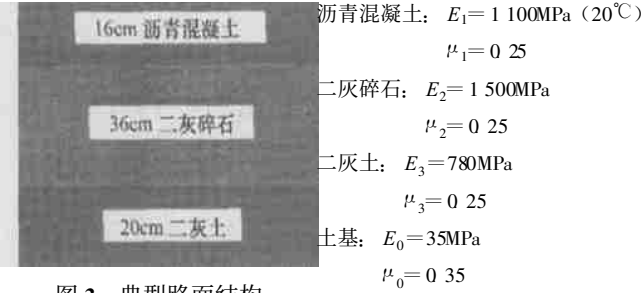


图 3 典型路面结构

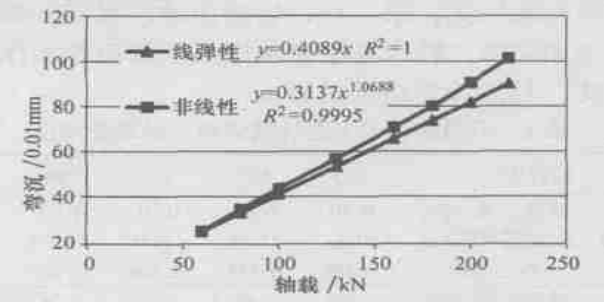


图 4 线弹性、非线性模型下轴载-弯沉关系

可以看出，随着轴载的增加，由材料的非线性贡献的弯沉不断增大，轴载大于 130kN 后趋于明显，轴载-弯沉关系呈指数曲线形式。

2.2 线弹性体系下的轴载换算

2.2.1 实际弯沉与交通量间关系

根据文献 [2]，容许弯沉 l_R 可表示为

$$l_R = A_0 N^{-0.20} \tag{2a}$$

式中， A_0 为路面类型综合系数； N 为累计交通量。

容许弯沉与累计交通量之间的关系，基于不同面层类型、不同公路等级道路的统计结果，并进行了统计回归方程指数的调整，统一调为 0.20。对半刚性基层沥青路面，调整前后指数没有变化，仍为 0.20^[3]。因此，式 (2a) 应用于半刚性基层沥青路面进行交通量与弯沉的对比分析是可行的。但重载情况下，车辆轮胎作用半径及胎压是变化的，实际弯沉也会随之变化（指轴载相同条件下）^[3]，而 (2a) 式不能反应该变化趋势，进而导致低压轮胎有较高的轴载换算指数的不符实际的结论。这里，考虑到车轮荷载作用半径 δ 一般随轴载而改变，而且重载低压轮胎对路面的不利作用相对较小，根据文献 [4]，将 (2a) 式修正为

$$l_R = A_0 N^{-0.20} (\delta/\delta_0)^\alpha \tag{2b}$$

式中, δ 为重载车轮胎荷载圆半径; $\hat{\delta}$ 为标准车轮胎荷载圆半径; α 为指数系数。

由此, 设计弯沉 l_d 、实际弯 l_s 沉与累计交通量 N 之间则有如下关系

$$l_d = l_r / A_r = A_0 N^{-0.20} (\delta / \hat{\delta})^\alpha / A_r \quad (3a)$$

$$l_s = A_r(t) l_d = A_r(t) A_0 N^{-0.20} (\delta / \hat{\delta})^\alpha / A_r \quad (3b)$$

式中, A_r 为路面弯沉增长系数, 半刚性基层路面可近似取为 1.20; $A_r(t)$ 为弯沉测试时, 路面弯沉的增长系数, 1~1.20。

2.2.2 理论弯沉与轴载间关系

根据图 3 所示路面典型结构, 计算线弹性层状体系下不同轴载的路面弯沉。其中, 考虑了轴载增加时的两种轮胎情况: 第一种, 轮胎接地压强随轴载按式 (1) 增加; 第二种, 轮胎接地压强增加而轮胎作用半径不变。具体计算结果见表 1。

表 1 不同轴载下半刚性沥青路面的理论弯沉

轴载/kN	100	130	150	180	200
轮胎 1 接地压强/MPa	0.70	0.83	0.91	1.03	1.10
作用圆半径/cm	10.65	11.16	11.45	11.79	12.03
弯沉/mm	0.425	0.553	0.639	0.767	0.853
轮胎 2 接地压强/MPa	0.70	0.91	1.05	1.26	1.40
作用圆半径/cm	10.65	10.65	10.65	10.65	10.65
弯沉/mm	0.425	0.552	0.637	0.764	0.849

表 1 计算说明, 在上述两种轮胎情况下, 路表计算弯沉在应用范围内几乎相等。线弹性层状体系下, 理论弯沉可表示为

$$l = \frac{2p\delta}{E} w \left[\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots \right] \quad (4)$$

式中, p 为汽车轮胎的接地压强; E 为路面面层模量; $w \left[\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots \right]$ 为理论弯沉系数; h_1 、 $h_2 \dots$ 为路面各层厚度。

可以看出, 如果保持荷载半径 δ 不变, 即轮胎 2 的情形, 则理论弯沉 l 与汽车轮胎接地压强 p 成正比, 也即与轴载 P 成正比, 有

$$l_1 / l_2 = (P_1 / P_2)^\beta \quad (5)$$

式中, 指数 $\beta=1$ 。

将轮胎 1 对应的测试结果, 按上式进行回归, 得回归指数 $\beta=1.004$, 相关系数为 1.000。故可认为在两种轮胎情况下, 皆有 $\beta=1$ 成立。

2.2.3 理论弯沉与实际弯沉间关系

由弯沉等效原则, 轴载 P_1 作用 N_1 次后路面弯沉所控制设计的路面结构与轴载 P_2 作用 N_2 次后路面弯沉所控制设计的路面结构相同, 弯沉增长系数一致, 即 $A_{01}=A_{02}$ 、 $A_{r1}=A_{r2}$ 、 $A_{r1}(t)=A_{r2}(t)$, 故

由 (2b) 及 (3) 式得

$$l_{s1} / l_{s2} = l_{r1} / l_{r2} = (N_1 / N_2)^{-0.20} (\hat{\delta} / \hat{\delta}_2)^\alpha \quad (6)$$

这里通过弯沉综合修正系数来联系式 (5) 与式 (6), 从而建立实际弯沉与轴载间的关系。弯沉综合修正系数 F 表征了标准汽车轴载作用下的实际弯沉与理论弯沉间的关系。根据文献 [2], 有

$$l_s = l^\circ F = l^\circ 1.63 \left(\frac{l_s}{2\hat{\delta}} \right)^{0.38} \left(\frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (7)$$

式中, E_0 为土基模量。

式 (7) 为 97 版设计规范提出, 弯沉测试路段路况良好, 多为半刚性基层沥青路面结构^[4]。因此, (7) 式对半刚性基层沥青路面有较好的针对性。而且, 式中含有的 δ 因子与 p 因子的变化, 能够反应在相同轴载条件下, 不同胎压变化对实际弯沉的影响。

2.2.4 轴载与交通量间关系

由 (5) 式和 (7) 式联立得

$$l_{s1} / l_{s2} = (P_1 / P_2)^{1.30} (p_2 / p_1)^{0.27} \quad (8a)$$

采用一般表示方法, 将实际弯沉与轴载表示为

$$l_{s1} / l_{s2} = (P_1 / P_2)^b \quad (8b)$$

式中, b 为换算系数。考虑前面两种轮胎情形, 得到相应的换算系数 b 分别为 1.12 和 1.03。

以上结果表明, 重轴载较低轮压 (轮胎 1 情形) 下的换算系数较重轴载高轮压的换算系数要高。实测的不同重轴载在不同胎压下的弯沉结果显现了这一点^[5], 弯沉综合修正系数中轮胎作用半径和轮胎压力因子变化的权重也表达了该趋势。但是, 这不应意味着高压轮胎汽车的当量作用次数较低轮压要少——这种与现实实际情况相反的结论。注意到, 换算系数 b 与轴载换算指数的转换要经过由修正过的 (2b) 式得到的 (6) 式。将 (8a) 式与 (6) 式联立, 可得

$$(P_1 / P_2)^{1.30} (p_2 / p_1)^{0.27} = (N_1 / N_2)^{-0.20} (\hat{\delta} / \hat{\delta}_2)^\alpha \quad (9)$$

如果取 $\alpha=0.46$, 则轮胎 1 情形时, 轴载换算指数为 5.20; 轮胎 2 情形时, 轴载换算指数为 5.15, 较轮胎 1 (胎压相对低) 情形时的换算指数小, 与实际情况不符。当 $\alpha=0.54$ 时, 两种轮胎情形的换算指数相等。当 $\alpha>0.54$ 时, 轮胎 2 情形的换算指数大于轮胎 1 的, 与实际情况一致。故文献 [4] 建议的 α 值似偏小。

美国得克萨斯州交通研究所的资料表明, 相同轴载下, 高压胎 (1.5 倍左右标准胎压) 会降低道路使用寿命 50%~66%^[6]。据此, 取胎压为 1.1MPa, 对应较少使用寿命 50% 计, 则相应的 $\alpha=0.72$ 。即 (2b) 式应为

$$l_R = A_0 N^{-0.20} (\delta/\delta_0)^{0.72} \tag{10}$$

轮胎 1 情形时，轴载换算指数为 5.00；轮胎 2 情形时，轴载换算指数为 5.15。换算系数 b 不变，分别为 1.12，1.03。

2.3 非线性层状体系下的换算指数

上述换算系数 b 与轴载换算指数是在线弹性体系的条件下基于 (5) 式得出的。随着车辆轴载的增加，路面土基等材料都会表现出明显的非线性。针对图 3 的典型结构及其材料参数，在考虑材料非线性时，将路表理论弯沉与轴载关系拟合为指数曲线，如图 4 中所示（相关系数 0.999 5）。此时，对应 (5) 式中的 $\beta=1.07$ 。将修正后的 (5) 式再与 (7) 式联立，经过前述转换（取 $\alpha=0.72$ ），得到在非线性体系下：轮胎 1 情形时，换算系数 b 为 1.24，轴载换算指数为 5.60；轮胎 2 情形时，换算系数 b 为 1.15，轴载换算指数为 5.75。

前已述及，土基模量的非线性随轴载增加而趋于明显。因此，根据实测重交通荷载压力及分布情况，考虑到半刚性基层路面土基模量的实值范围，在轴载换算指数的取值上，建议 100kN 轴载对应线性的轴载指数 5.00，180kN 轴载对应非线性下的换算指数 5.60。即下面轴载换算公式

$$N_i/N_0 = (P_i/P_0)^{5+(P_i-P_0)/130} \tag{11}$$

2.4 实测弯沉验证换算系数

天津市公路部门在主要承受重载的津围公路上，进行了重载车型（轴载 180kN，胎压 1.0MPa—轮胎 1 情形）与标准车型（轴载 100kN，胎压 0.7MPa）弯沉的对比试验^[7]。图 5 为在津围公路 K13+500~K108+000 段双向 20m 设 1 比对照点，每 1km 计算弯沉平均值并进行比对，进而汇总的弯沉比值分布图。

对该分布进行统计检验，可得 $l_{180}/l_{100} \sim N(2.10, 0.45)$ 。取 $l_{180}/l_{100}=2.10$ ，则相应的换算系数 $b=1.26$ 。该值与前面得出的非线性模型下的换算系数 1.24，非常接近。

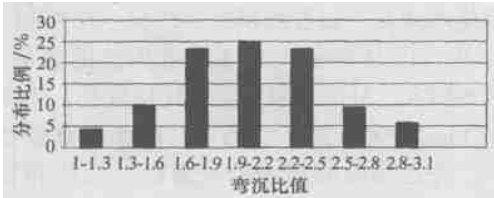


图 5 调查路段弯沉比值的分布

另外，从实测结果还可看出，弯沉比值离散性较大，换算系数相应也有较大的离散性。分析其主要原

因为，测试路段近 100km，在施工段落质量、通行荷载分布、土质水文情况等方面差异较大，对弯沉的影响也增大，特别是在重荷载作用下，非线性差异更加明显，致使测试结果有较大离散性。

3 结论

(1) 国道主干线江苏境内重荷载交通普遍，30% 以上的载重车单轴轴载超过 130kN；承重轴 60% 以上的轮胎充气压力超过 0.8MPa。

(2) 轴载一定条件下，针对半刚性基层沥青路面，轮胎压力在实际使用范围内变化对路面产生的理论弯沉几乎没有影响，但实际弯沉随轮胎压力的减小而增大。因此，重载低胎压的换算系数 b 相对高压胎的要大，但通过修正后的容许弯沉公式转换后，重载高压轮胎的轴载换算指数较大。

(3) 综合弯沉修正系数，反应了路况较好的高等级公路上的理论弯沉与实际弯沉之间的关系，且含有胎压及荷载半径因子，基本反应出重载条件下轮胎压力状态对实际弯沉的影响。因此，应用于重载条件下，半刚性基层沥青路面的轴载换算是可行的。

(4) 为反应不同压力轮胎对路面损坏的不同，及其对轴载换算系数的影响，建议重载作用下的容许弯沉公式修正为 (10) 式。

(5) 在重载交通条件下，针对高等级公路结构形式的轴载换算公式可表示为 (11) 式。

(6) 结构特征及其材料性状差别较大的沥青路面，在重载作用下，其弯沉修正系数及材料非线性会有较大区别，应有不同的轴载换算指数。

参考文献:

[1] 王选仓, 等. 重载沥青路面研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 1998 (4).

[2] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范 (JTJ014-97) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

[3] 武和平, 编著. 高等级公路路面结构设计方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

[4] 朱照宏, 许志鸿, 编著. 柔性路面设计理论与方法 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.

[5] 王辉, 武和平. 半刚性基层沥青路面按弯沉等效的轴载换算公式的研究 [J]. 公路, 2002 (4).

[6] 林绣贤, 编著. 柔性路面结构设计方法 [M]. 北京, 人民交通出版社, 1988.

[7] 黄文元. 高等级公路重载交通沥青路面设计的研究 [D]. 硕士学位论文, 2000.