

文章编号: 1002-0268 (2000) 01-0010-04

刚性路面超限车辆轴载换算关系的探讨

彭 波, 田 波

(同济大学道路与交通工程系, 上海 200092)

摘要: 我国目前水泥路面设计规范对行车荷载的考虑主要是 80 年代以前的情况, 调查认为现在公路车辆的超限现象严重, 部分轴载已超出规范研究范围, 并且路面结构型式也有所变化, 因而有必要对原有的轴载换算方法进行外延分析, 提出更符合当前情况的轴载换算方法。

关键词: 超载; 轴载换算; 有限元计算

中图分类号: U416

文献标识码: A

Study on Axle Load Conversion Method for Overweight Vehicles on Rigid Pavement

PENG Bo, TIAN Bo

(Transportation Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092 China)

Abstract: The current design specification for cement concrete pavement was made based on the vehicle axle load pattern in the 1980s. The axle load survey showed that there were many over loaded vehicles, with some of the axle load over the specified standard; and there are some changes of the pavement structure. Therefore it is necessary to reconsider the original axle load conversion method, to make it more appropriate to meet the current conditions.

Key words: Over load; Axle load conversion; Finite element calculation

1 问题的提出

我国规范对行车荷载的考虑主要沿用 1986 年以前的调查情况, 即单轴 130kN, 双联轴 320kN 以下。近年来, 道路上的交通流构成、车辆荷载参数均发生了较大变化, 重车比例和轴荷载级别均有较大增长, 一些进口车型如斯太尔、太脱拉等设计轴载达到单轴 13t, 双联轴 26t, 且出现三联轴型式, 轮胎最高设计内压达到 0.85MPa。同时超载现象普遍, 上海市通过对干线公路中型以上货车的 WIM (动态称重) 系统调查发现最重的单、双、三轴分别达到 17t, 32t 和 43t, 远远超出规范公式的适用范围, 因此, 对超重车辆的轴载换算需对规范方法进行外延。美国 AASHTO, 德国、南非和加拿大等道路研究机构都对车辆超限的损坏做过研究, 认为除了轴荷载还应考虑轮压对路面的损耗作用, 但国外的研究大都基于经

验法基础。此外, 近 20 年来我国刚性路面的半刚性基层应用广泛, 它具有较高的刚度和抗弯拉强度, 为面层提供更强的支撑作用, 而原有规范在修正基顶回弹模量时低估了基层对结构承载力的影响。

本文主要采用理论分析法, 应用有限元计算求解各类轴型更大范围内的荷载应力关系, 按等效疲劳损耗原则进行不同轴载间的换算。在计算过程中对基层顶面的模量修正采用姚祖康教授针对半刚性基层特点提出的修正方法^[1], 更加强化了基层在路面整体结构中的作用。

2 荷载应力关系计算

2.1 计算模型

选择带有半刚性基层和垫层的 4 层体系作为典型路面结构, 见表 1。其中基层模量的取值范围从 500~8 000MPa, 分别代表石灰稳定土、二灰碎石、水

泥稳定碎石和贫混凝土，假设各层间完全连续接触。

表 1

水泥混凝土面层	$E_c=30000\text{MPa}$	$h_c=20\sim30\text{cm}$,	$\mu_c=0.15$
半刚性基层	$E_1=500\sim8000\text{MPa}$	$h_1=20\sim30\text{cm}$,	$\mu_1=0.25$
砾石砂垫层	$E_2=150\sim300\text{MPa}$	$h_2=20\sim30\text{cm}$,	$\mu_2=0.35$
土基	$E_0=20\sim80\text{MPa}$		$\mu_0=0.35$

荷载应力计算工具选用同济大学根据 WESLIQ ID 改编的有限元程序，依据弹性薄板假设，按位移法求解，采用弹性固体地基假设。考虑到半刚性基层的结构特点，采用新的方法计算多层地基组合下基顶当量回弹模量值 $E_t^{[2]}$ ，假设路面结构自上而下各层的材料模量及厚度分别为 $E_c, E_1, \dots, E_n, E_0$ 和 $h_c, h_1, \dots, h_n$ ，顶面荷载作用半径为 δ 则有

$$E_t=m\cdot E_0$$

对于 3 层地基

$$\ln m=0.255\ln\frac{E_2}{E_0}+0.104\ln\frac{E_1}{E_0}+0.340\ln\frac{h_2}{\delta}+0.624\ln\frac{h_1}{\delta}-0.321\tag{1}$$

对基顶计算回弹模量的修正采用姚祖康教授在 1996 年针对半刚性基层材料提出的调整值^[1]，保证率为 90%时

$$n=\frac{E_{tc}}{E_t}=-1.08+0.029\cdot h\cdot\left(\frac{E_c}{E_t}\right)^{\frac{1}{3}}\tag{2}$$

式中， n ——基顶模量修正系数；

h ——面层厚度，cm；

E_c, E_t ——面层混凝土模量及基顶实测当量回弹模量，MPa；

E_{tc} ——根据面层板顶实测弯沉曲线换算的基顶当量回弹模量，MPa。

2 2 单元划分及荷载型式

对边长 $4\times5\text{m}$ 的水泥混凝土板进行单元划分，以最不利位置的无传力杆纵缝中点为应力控制点，采用的荷载型式见图 1。根据对目前国内各重型货车的构造调查^[3]，取多联轴型式的联轴间距平均值 140cm，双轮组两轮间中心距 34cm，轮组间距 180cm。考虑到重型和超限车辆的增加，计算模型中参考上海地区的 WIM 称重调查情况将包含的荷载范围扩大，即单轮组单轴（前轴）80kN，双轮组单轴 200kN，双联轴 360kN 和三联轴 500kN。为了体现轮压变化对产生荷载应力的影响，本文在荷载组合中还加入了轮压变量，同样考虑到车辆可能通过提高轮胎内压的手段来实现超限运输，对轮压的取值范围也有

所扩大，计算所用最大轮压为 1.0MPa。

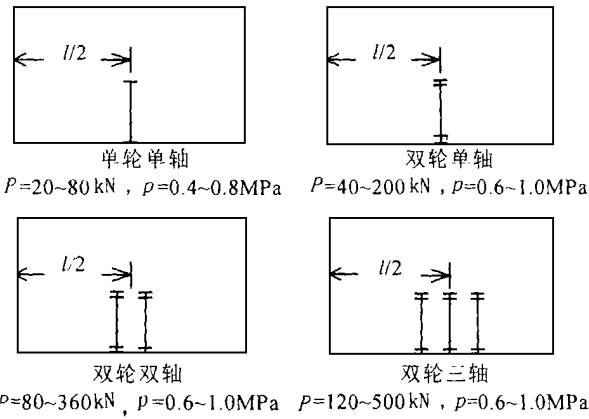


图 1 有限元荷载图示

2 3 计算结果

将计算得到的荷载应力结果按规范中的形式 ($\sigma=A\cdot l^m\cdot\frac{P^n}{h^2}$) 重新标定系数 A, m, n ，表 2 中仅列出单轮单轴的回归结果，可以发现随着轮压的变化，回归系数 A 和 n 有一定的增长趋势，且轮组数越少这种趋势越明显。例如单轮单轴的轮压分别为 0.5 和 0.8MPa 时， A 值的差异已达到 60%以上，说明轮压是影响荷载应力关系的一个不可忽视的参数。因此本文在原有的关系式中加入对轮压 P 的参数（指数 t ），即

$$\sigma=A\cdot l^m\cdot\frac{P^n}{h^2}\cdot P^t\tag{3}$$

表 2

轴型	轮压 (MPa)	A	m	n	标准差 s	相关系数 R
单轮单轴	0.5	1.1236	0.8479	0.6492	0.0371	0.9972
	0.6	1.4382	0.7769	0.6809	0.0332	0.9982
	0.7	1.6823	0.7301	0.7038	0.0302	0.9987
	0.8	1.8767	0.6961	0.7221	0.0279	0.9990

重新整理后得出表 3 的结论。表 3 中双轴和三轴组的轮压系数 t 的回归数值很小，这是由于计算模型中假设水泥路面为刚性板，刚性板受到的集中荷载越多，表现出来的力学反映越接近受均布力时的效果，而每个集中荷载的均布力效果（即压强作用）相应被削弱，从而解释了轮组数越少的轴组荷载，其轮压对产生应力的影响越大。

2 4 验证

我国规范的应力计算结果已经得到验证，在其取值适用范围内是可靠的^[4]，因而将公式（3）的计算

表 3

轴型	A	m	n	t	s	R
单轮单轴	1. 8612	0. 7544	0. 6925	0. 3856	0. 0401	0. 9992
双轮单轴	0. 6714	0. 8414	0. 7918	0. 2666	0. 0446	0. 9989
双轮双轴	0. 3700	0. 7566	0. 8223	0. 0082	0. 0408	0. 9991
双轮三轴	0. 2694	0. 7514	0. 8560	0. 0197	0. 0363	0. 9988

结果与规范方法的计算结果相比较（见表 4）。此处所用验证荷载和结构参数均符合规范取值： $l=70\text{cm}$ ， $h_c=24\text{cm}$ ，轮压 $P=0.7\text{MPa}$ ，双轮组单轴 $P=40\sim120\text{kN}$ ，双轮组双轴 $P=80\sim240\text{kN}$ 。在此范围内两者的相对误差保持在 8% 以内，可以认为本文所选的计算工具和单元划分过程基本合理，计算结果比较可靠，而且对规范未考虑的单轮单轴和三联轴型式荷载进行了补充。

表 4

轴 型	双轮组单后轴				
轴重 (kN)	40	60	80	100	120
本文算法	0. 7041	0. 9706	1. 2189	1. 4545	1. 6804
规范算法	0. 7353	1. 0279	1. 3037	1. 5676	1. 8225
相对误差 x%	4. 24	5. 57	6. 50	7. 21	7. 79
轴 型	双轮组双后轴				
轴重 (kN)	80	120	160	200	240
本文算法	0. 6415	0. 9030	1. 1509	1. 3892	1. 6200
规范算法	0. 6502	0. 9019	1. 1375	1. 3619	1. 5778
相对误差 x%	1. 34	-0. 12	-1. 17	-1. 99	-2. 67

3 材料的疲劳特性

我国目前的规范中采用室内小梁疲劳试验的结果

$$\lg \frac{\sigma_p}{\sigma_f - \sigma_t} = \lg a - b \lg N \tag{4}$$

式中， σ_p ， σ_f ， σ_t 分别代表荷载应力，材料强度极限和温度应力； N 表示荷载作用次数； a ， b 为与失效概率和应力比有关的回归系数，规范中取 $a=1.0$ ， $b=0.0516$ 。也就是说荷载应力一达到混凝土的强度极限板就会立刻断裂。尽管这与路面板的承受荷载情况相比偏于保守，但考虑到实际道路受环境、气候及施工因素的不利影响，规范中仍采用了修正的小梁疲劳方程。应当指出，在试验室条件下水泥混凝土板在板底开裂之后还能承受多倍于出现初裂时的荷载作用次数，但在实际道路环境中，板底开裂意味着水分更容易渗入，一旦形成积水很容易产生冲刷和板底脱空，则混凝土失去基层支撑很快就会断裂。

4 轴载换算关系

依据等效疲劳损坏原则假设第 i 级轴载每次作用的疲劳损耗为

$$D_i = \frac{1}{N_i} = \left[\frac{\sigma_{pi}}{a (\sigma_f - \sigma_t)} \right]^{\frac{1}{0.0516}} \tag{5}$$

若规定以 100kN ， 0.7MPa 的双轮组单轴为标准轴荷载，则各轴型的各级轴载的标准轴换算系数可定义为

$$\eta_i = \frac{D_i}{D_s} = \frac{N_s}{N_i} = \left[\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_s} \right]^{19.38} \tag{6}$$

式中， D_i ， D_s ——分别为任意轴载和标准轴作用一次引起的疲劳损坏；

σ_{pi} ， σ_s ——分别为任意轴组荷载和标准轴产生的荷载应力。

为了简化计算，去除结构因素的影响，这里将换算轴载与标准轴在相同路面结构下进行比较。由于目前高等级路面的结构强度普遍提高，面层的相对刚度半径有所降低，可近似取 $l=60\text{cm}$ 。考虑到重型车辆的增多和其它车辆的普遍超载情况，取换算车辆的双轮组轮压 $P_i=0.80\text{MPa}$ ，单轮组轮压 $P_i=0.60\text{MPa}$ ，分别计算各分类轴型的标准轴换算系数

单轮单轴： $\eta_i = \left[\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{ps}} \right]^{12.8}$

$$= \left[\frac{1.8612 \times 60^{0.7544} \times 0.6^{0.3856}}{0.6714 \times 60^{0.8414} \times 0.7^{0.2666}} \times \frac{P_i^{0.6925}}{100^{0.7918}} \right]^{19.38}$$
$$= [0.0457 \times P_i^{0.6925}]^{19.38} = [0.0116 \times P_i]^{13.42}$$

双轮单轴： $\eta_i = [0.0104 \times P_i]^{15.34}$

双轮双轴： $\eta_i = [0.0043 \times P_i]^{15.94}$

双轮三轴： $\eta_i = [0.0035 \times P_i]^{16.95}$

由于双轮组轴型的换算指数都在 $15.34\sim16.95$ 之间，差别不大，可以近似取其平均值 16，单轮组单轴取作 13.5，则各级轴载的标准轴换算系数为

$$\eta_i = (\alpha \cdot P_i)^\beta \tag{7}$$

式中， α 为轴型系数，单轮单轴时取 0.0116，双轮单轴时取 0.0104，双轮双轴取 0.0043，双轮三轴取 0.0035； β 为换算指数，与轮型有关，单轮时取 13.5，双轮时取 16。

5 与规范方法的比较

将经过荷载应力计算公式外延分析的结论式（7）与直接采用现行规范公式的轴载换算结果式（8）进行比较（见图 2），可以看出，由于考虑了轮压的变化（由 0.7MPa 提高到 0.8MPa ），超限范围轴载换算系数相应增加，例如当单轴 $P=170\text{kN}$ 时，外延后的

换算系数是规范计算结果的 1.3 倍, 双联轴 $P=300\text{kN}$ 时是规范计算结果的 1.65 倍, 因此, 如果直接采用规范的换算方法可能低估超限荷载的疲劳损坏作用。

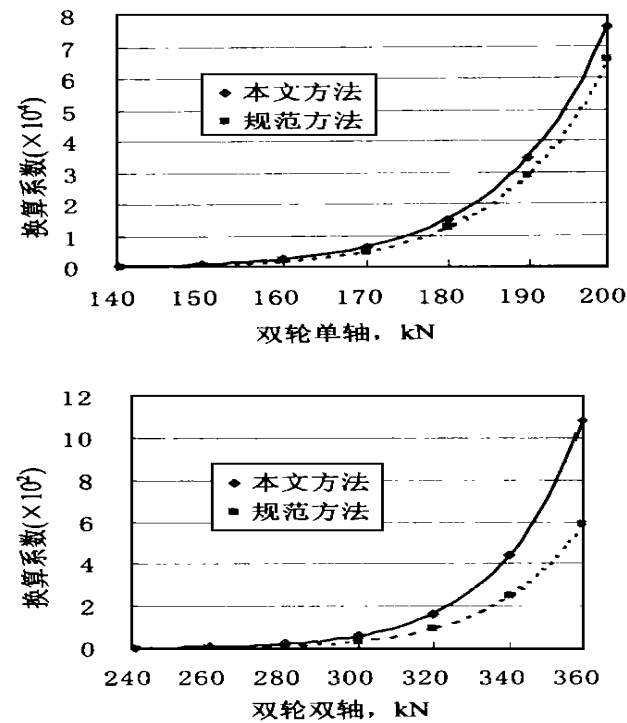


图 2 外延后的轴载换算公式与规范公式的比较
规范轴载换算公式

$$\eta_i = \alpha \cdot \left(\frac{P_i}{100}\right)^{16} \tag{8}$$

式中, α 为轴型系数, 单轴时取 1, 双轴时 $\alpha = 5.2827 \times 10^{-11} \times l^{2.785} \times P_i^{-0.3767}$ 。

6 结论

1. 在进行结构的荷载应力计算过程中考虑了半刚性基层有效提高结构承载能力的作用, 并在计算中采用不同轴型和轮压的荷载模型;

2. 按等效疲劳损耗原则进行轴载换算, 提出适用于超限范围的轴载换算公式

$$\eta = (\alpha \cdot P_i)^\beta;$$

3. 将本文的结论与直接采用规范方法算得的结果进行比较, 认为根据现在的车辆荷载条件, 采用原有的规范公式低估了超限轴荷载的疲劳损坏作用。

参考文献:

[1] 姚祖康. 水泥混凝土面层下二灰碎石基层设计回弹模量值的取用. 华东公路, 1997 (2).
[2] 姜爱锋. 二灰碎石基层材料的组成结构和性能及其水泥混凝土路面结构分析. 同济大学博士论文, 1998.
[3] 于宝明, 姚祖康. 混凝土路面临界荷位分析. 中国公路学报, 1989 (1).
[4] 中国汽车工业总公司等编. 中国汽车车型手册. 山东科技出版社, 1993.

(上接第 4 页) 设计与施工技术规范》(JTJ 017—96) 中, 路堤的沉降 S 按下式计算

$$S = S_d + S_c + S_s \tag{7}$$

式中, S_d ——瞬时沉降量;
 S_c ——固结沉降量;
 S_s ——次固结沉降量。

对一般粘性土来讲, 其中固结沉降量是地基土沉降中的主要部分。鉴于沉降计算涉及土体内应力分布、应力应变关系、土体侧向变形、路堤施工速率、地基土的扰动、土的物理力学性质的测试方法和采用的计算指标、土的次固结等复杂因素存在, 实践上常用分层总和法来推算固结沉降, 然后在乘一综合性的经验系数后, 求出总沉降量。即(7)式的另一表达式为

$$S = m \times S_c$$

式中, m 为修正系数。

本文通过有限元分析加筋路堤的沉降, 提出在路堤底部加入格栅层后, 结构的总沉降可以通过下式来计算

$$S = m_1 \times m \times S_c$$

式中, m_1 为路堤底部加入格栅后的沉降修正系数, 取 0.9~0.85。

参考文献:

[1] 钱家欢, 殷宗泽主编. 土工原理与计算 (第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
[2] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术. 北京: 人民交通出版社, 1991.
[3] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
[4] 赵维炳, 殷宗泽等. 土工数值分析方法. 河海大学岩土工程研究生教材, 1995-09.
[5] 喻泽红. 格栅与土相互作用机理的有限元分析. 长沙: 长沙交通学院学位论文, 1995.
[6] 交通部第一公路勘察设计院. 公路软土地基路堤设计与施工设计技术规范 JTJ 017-96. 北京: 人民交通出版社, 1997.
[7] Bergado D T, Anderson L R. Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments. America: ASCE press, 1997.
[8] Jewell R A. Soil Reinforcement with Geotextiles. London: CIRIA, 1996.