

文章编号:1674-2974(2015)03-0100-06

## 路桥过渡段容许台阶高度的确定\*

邓 露<sup>1†</sup>, 闫王晨<sup>1</sup>, 朱全军<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015)

**摘 要:**为确定路桥过渡段的容许台阶高度,对车辆通过路桥过渡段时的整车舒适度和车桥安全性进行了研究.以平均加权加速度均方根值作为整车舒适度指标,以车轮动力荷载最小值作为车辆安全性指标,以局部冲击系数作为桥梁安全性指标,提出了一种基于整车舒适度和车桥安全性的容许台阶高度确定方法.分析了车速和台阶高度等因素对整车舒适度和局部冲击系数的影响.结果表明:对高速公路和一级公路,整车舒适度对容许台阶高度的要求更为严格,其次是车辆安全性.对二级公路,容许台阶高度各控制指标的严格程度由高到低依次为:整车舒适度、桥梁安全性和车辆安全性.对二级以下公路,其严格程度由高到低依次为:桥梁安全性、整车舒适度和车辆安全性.该方法从车辆舒适度、车辆安全性及桥梁安全性对台阶高度提出了更合理的控制标准.

**关键词:**路桥过渡段;容许台阶高度;数值模拟;局部冲击系数;舒适度;加权加速度均方根值

中图分类号:U416.01

文献标识码:A

DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2015.03.016

## Determination of Allowable Differential Settlement between the Bridge and the Approach Embankment

DENG Lu<sup>1†</sup>, YAN Wang-chen<sup>1</sup>, ZHU Quan-jun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Communications Research Institute, Changsha, Hunan 410015, China)

**Abstract:** In order to determine the allowable differential settlement between the bridge and the approach embankment, the vehicle comfort and safety of both the vehicle and the bridge were studied when the vehicle traveled through the transient section. A method based on comfort and safety was then proposed to determine the allowable differential settlement. The average weighted root-mean-square acceleration was used as the vehicle comfort evaluation index, the minimum dynamic wheel load was used as the vehicle safety evaluation index, and the local impact factor was used as the bridge safety evaluation index. The effect of vehicle running speed and differential settlement on the vehicle comfort level and local impact factor was analyzed. The results show that for expressways and first-class highways, the vehicle comfort is a more demanding requirement compared with vehicle safety. For secondary highways, the vehicle comfort is the most demanding requirement among the control indices for differential settlements, followed by bridge safety and vehicle safety. For highways below second-class, the bridge safety is the most demanding

\* 收稿日期:2014-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208189,51478176), National Natural Science Foundation of China(51208189,51478176); 湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1014)

作者简介:邓 露(1984—),男,湖南娄底人,湖南大学教授,博士生导师,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: denglu@hnu.edu.cn

requirement, followed by vehicle comfort and vehicle safety. More rational control criteria for differential settlements based on vehicle comfort, vehicle safety and bridge safety can be proposed on the basis of the analysis method of this study.

**Key words:** transient section between bridge and approach embankment; allowable differential settlement; numerical simulation; local impact factor; comfort; weighted root-mean-square acceleration

由于桥头引道和桥台之间不可避免地存在沉降差异,在不设桥头搭板的路桥过渡段往往会形成一定高度的台阶,即“错台型”沉降。由此引起的桥头跳车会影响行车的舒适度和安全性,其冲击作用也会加速桥台、伸缩缝及支座等的破坏。

现有的路面设计规范尚未针对路桥过渡段的差异沉降量提出合理的控制标准。目前,国内外很多学者<sup>[1-3]</sup>根据现场行车调查来确定容许台阶高度。但由于差异沉降受到桥台类型、路堤填料类型和施工工艺等因素的影响,彼此得出的控制标准并不统一,且缺乏理论支持。此外,也有学者<sup>[4-7]</sup>从车辆舒适度及安全性角度对台阶高度的控制标准进行过理论研究,但也存在不足之处。第一,局限于评价单个位置处乘客的单轴向舒适度,未能从整体上模拟车辆多轴向的舒适度情况;第二,对安全性的考虑仅能保证车轮不脱离地面,忽略了跳车产生的冲击作用对桥梁安全的影响。

为此,本文采用半车模型模拟车辆通过路桥过渡段的振动情况,并以平均加权加速度均方根值作为整车舒适度指标,以车轮动力荷载最小值作为车辆安全性指标,以局部冲击系数作为桥梁安全性指标,定量分析了车速和台阶高度等因素对舒适度和安全性指标的影响。最后,基于整车舒适度和车桥安全性提出了更合理的容许台阶高度控制标准。

## 1 车辆经过路桥过渡段的振动模拟

### 1.1 车辆模型选取

路桥过渡段差异沉降控制标准与车型、车载及车速等因素有关。其中,标准车辆的选取又与公路的等级和用途有关。高速公路和一级公路宜以小汽车作为标准车辆<sup>[7-8]</sup>,以车辆安全性和整车舒适度作为容许台阶高度的控制指标。二级及二级以下公路以载重汽车为主<sup>[7]</sup>,兼有长途客车,故以载重汽车和长途客车作为标准车辆,并以标准车辆的安全性、长途客车的整车舒适度和载重汽车对桥梁的冲击作用(即桥梁安全性),作为容许台阶高度的控制指标。参考文献<sup>[7]</sup>和<sup>[9]</sup>,本文以各等级公路设计速度的最大值作为相应的标准车速。各等级公路的标准车

辆、标准车速及容许台阶高度控制标准见表 1。

表 1 各等级公路的标准车辆、标准车速及容许台阶高度控制标准

Tab. 1 Standard vehicle, standard speed and differential settlement control criterion for highways of different grades

公路等级	标准车速 (km · h <sup>-1</sup> )	标准车辆	容许台阶高度 控制标准
高速公路	120	小汽车	车辆安全性;整车舒适度
一级公路	100	小汽车	车辆安全性;整车舒适度
二级公路	80	载重汽车 和长途客车	车辆安全性;桥梁安全性; 客车的整车舒适度
三级公路	40	载重汽车 和长途客车	车辆安全性;桥梁安全性; 客车的整车舒适度
四级公路	20	载重汽车 和长途客车	车辆安全性;桥梁安全性; 客车的整车舒适度

由于路桥过渡段的“错台型”沉降(见图 1)相比一般的道路平整度要大,需要考虑车体的垂向振动与俯仰运动;道路横向的不平整往往可以忽略不计,故不考虑车体横向的摇摆运动。假设车体左右两边质量对称,采用集中质量法将载重汽车简化为 7 自由度半车模型(如图 2(a)所示),将客车和小汽车均简化为 4 自由度半车模型(如图 2(b)所示),具体的车辆模型参数见文献<sup>[7,10,11]</sup>。

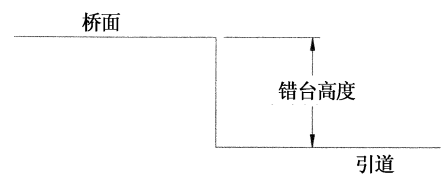


图 1 路桥过渡段示意图

Fig. 1 Sketch of the transition section between the bridge and approach embankment

图 2 中各参数的含义为:  $Z_{v1}$  和  $Z_{v2}$  分别表示车体 1 和 2 质心的垂向位移;  $\theta_{v1}$  和  $\theta_{v2}$  分别表示车体 1 和 2 的俯仰角位移;  $Z_{va}^1, Z_{va}^2$  和  $Z_{va}^3$  分别表示前轴、中轴和后轴的垂向位移;  $K_{vu}^1, K_{vl}^1, K_{vu}^2, K_{vl}^2, K_{vu}^3$  和  $K_{vl}^3$  分别表示前悬挂系统、前轮胎、中间悬挂系统、中间轮胎、后悬挂系统和后轮胎的垂向刚度;  $C_{vu}^1, C_{vl}^1, C_{vu}^2, C_{vl}^2, C_{vu}^3$  和  $C_{vl}^3$  分别为其阻尼系数;  $L_1, L_2$  和  $L_3$  分别为司机处、中间乘客处和后方乘客处到车体 1 质心的距离。客车和小汽车的车辆模型不涉及中轴及相关参数。此外,小汽车模型还不涉

及中间乘客及相关参数.

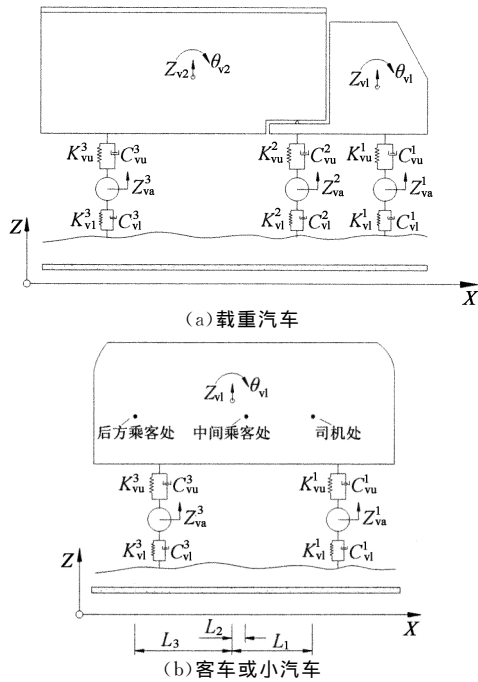


图2 半车模型  
Fig.2 Half vehicle model

1.2 动力学分析

利用拉格朗日公式建立振动方程如下:

$$M_v \ddot{U}_v + C_v \dot{U}_v + K_v U_v = F_v \tag{1}$$

式中:  $M_v$ ,  $C_v$  和  $K_v$  分别表示车辆的质量、阻尼和刚度矩阵;  $U_v$  表示车辆的位移向量;  $F_v$  表示车辆所受的荷载.

司机处、中间乘客处和后方乘客处的垂向加速度  $\ddot{d}_s, \ddot{d}_m$  和  $\ddot{d}_r$  可分别通过如下几何关系式得到:

$$\ddot{d}_s = \ddot{d}_0 - L_1 \times \ddot{\theta}_{v1} \tag{2}$$

$$\ddot{d}_m = \ddot{d}_0 - L_2 \times \ddot{\theta}_{v1} \tag{3}$$

$$\ddot{d}_r = \ddot{d}_0 + L_3 \times \ddot{\theta}_{v1} \tag{4}$$

式中:  $\ddot{d}_0$  为车体质心处的垂向加速度.

参考文献[12]得到客车内司机处、中间乘客处和后方乘客处的舒适度加权系数  $w_1, w_2$  和  $w_3$ , 其值分别为 0.49, 0.31 和 0.20. 参照此标准可得出小汽车内司机处及后方乘客处的舒适度加权系数分别为 0.49 和 0.51.

车内乘客的整体垂向加速度  $a$  则为:

$$a = w_1 \times \ddot{d}_s + w_2 \times \ddot{d}_m + w_3 \times \ddot{d}_r \tag{5}$$

2 容许台阶高度的衡量标准

2.1 整车舒适度水平

ISO 建议以加权加速度均方根值作为舒适度评

价的基本指标<sup>[13]</sup>. 由于车辆通过路桥过渡段的时间很短, 本文采用车辆经过路桥过渡段的“瞬时”加权加速度均方根值, 结合 ISO<sup>[13]</sup> 及郑邸<sup>[12]</sup> 给出的加权加速度均方根值与人体主观感受的关系(见表2), 综合评定车辆通过路桥过渡段时的舒适度.

平均加权加速度均方根值(average weighted root-mean-square acceleration, 简称为 RMS)的计算如下:

$$RMS = (k_{ax}^2 a_{wx}^2 + k_{ay}^2 a_{wy}^2 + k_{az}^2 a_{wz}^2)^{1/2} \tag{6}$$

式中:  $k_{ax}, k_{ay}$  和  $k_{az}$  分别为  $x, y$  和  $z$  轴的加权系数, 其值分别为 1.4, 1.4 和 1.0;  $a_{wx}, a_{wy}$  和  $a_{wz}$  分别为  $x, y$  和  $z$  轴向的“瞬时”加权加速度均方根值, 计算如式(7)所示.

$$a_{wj}(t_0) |_{j=x,y,z} = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_{wj}^2(t) |_{j=x,y,z} dt \right]^{1/2} \tag{7}$$

式中:  $t_0$  为考察时刻;  $\tau$  为持续平均积分时间, 这里取车辆经过台阶前后各 6 m 的总时间;  $t$  为时间变量.

表2 加权加速度均方根值与人体主观感受之间的关系

Tab.2 Relationship between weighted root-mean-square acceleration and people's feeling

总加权加速度均方根值 /(m·s <sup>-2</sup> )	平均加权加速度均方根值 /(m·s <sup>-2</sup> )	人的主观感受
<0.315	<0.315	没有不舒服
0.315~0.63	0.48	稍有不舒服
0.5~1.0	0.74	有些不舒服
0.8~1.6	1.15	不舒服
1.25~2.5	1.83	很不舒服
>2.0	2.0	极不舒服

冯忠居<sup>[2]</sup>通过实地测试和理论分析得出车辆在通过台阶前后的速度降低值  $\Delta v$  与台阶高度  $h$  及速度  $v$  的关系, 如式(8)所示. 减速度  $a_x$  的计算如式(9)所示.

$$\Delta v = 0.145h^{1.09} v^{0.21} \tag{8}$$

$$a_x = \Delta v / \tau \tag{9}$$

简单计算可知, 车辆在经过台阶前后速度变化很小, 但由于通过时间很短, 减速度不可忽略, 可令  $a_{wx} = a_x$ ; 假设车辆沿直线通过路桥过渡段, 则  $a_{wy} = 0; a_{wz}$  可按 ISO 2631—1997 中的频率加权函数  $\omega_k(f)$  (式(10))对  $a$  滤波后得到.

$$\omega_k(f) = \begin{cases} 0.5, & 0.5 < f \leq 2; \\ \frac{f}{4}, & 2 < f \leq 4; \\ 1, & 4 < f \leq 12.5; \\ \frac{12.5}{f}, & 12.5 < f \leq 80. \end{cases} \tag{10}$$

式中:  $f$  为频率, Hz.

由于车辆经过路桥过渡段时的舒适度会不可避免地降低,且过于严格的舒适度要求往往需要较昂贵的养护费用,参考《汽车理论》<sup>[14]</sup>及表 2,本文采用平均加权加速度均方根值等于  $1.15 \text{ m/s}^2$  作为整车舒适度的控制界限.

### 2.2 安全性水平

丁勇<sup>[15]</sup>通过数值模拟得出车辆上桥时对桥台的冲击作用比下桥时更强,故本文仅模拟车辆上桥通过路桥过渡段的情况.

参考文献<sup>[15-16]</sup>,本文采用局部冲击系数  $\mu$  衡量车辆对桥台的冲击,定义式如下:

$$\mu = (F_{\max} - F_s) / F_s \quad (11)$$

式中:  $F_{\max}$  为车轮动力荷载最大值;  $F_s$  为对应的车轮最大静力荷载.利用式(11)可分别计算各车轮对桥台的冲击作用.

中美两国规范<sup>[17-18]</sup>中局部冲击系数的建议值分别为 0.30 和 0.75,差异较大.鉴于桥台刚度比桥面刚度更大,可适当放宽对局部冲击系数的要求.且过于严格的冲击系数要求往往需要较昂贵的桥梁建造及养护费用.本文假定不引起局部冲击系数超过美国规范建议值 0.75 的台阶高度即为满足桥梁安

全性要求的容许台阶高度.

值得一提的是,车轮的动力荷载最小值大于零是车轮不腾空的保证.因此,本文取车轮动力荷载最小值刚好大于零时的台阶高度作为能保证车辆安全性的台阶安全临界高度.

## 3 容许台阶高度控制标准

### 3.1 整车舒适度水平

参考文献<sup>[6]</sup>及<sup>[8]</sup>可知,车辆空载时对人的振动影响更大,故本文所采用的客车和小汽车均为空载状况.

在客车及小汽车分别以相应的标准车速通过不同高度的台阶时,其整车舒适度水平如图 3 所示.由图可知,对同一车型,车速越高,整车舒适度水平越低,即相应的平均加权加速度均方根值越大,且增幅随着台阶高度的提高更为明显;车速越高,满足整车舒适度要求,也就是使得平均加权加速度均方根值不超过  $1.15 \text{ m/s}^2$  的容许台阶高度越小.根据图 3 可得出满足整车舒适度要求的各等级公路的容许台阶高度,见表 3.

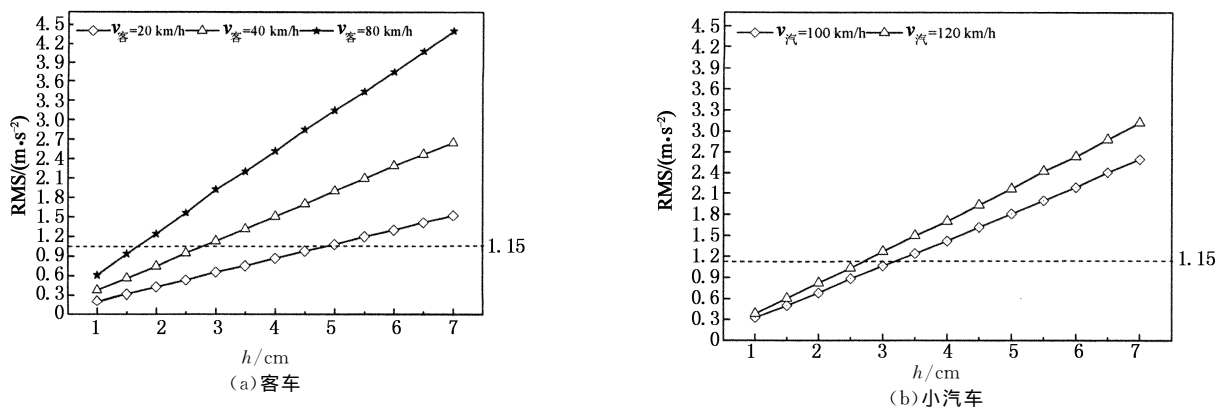


图 3 速度及台阶高度对整车舒适度水平的影响  
Fig. 3 Influence of vehicle speed and differential settlement on vehicle comfort

表 3 满足整车舒适度要求的各等级公路的容许台阶高度

Tab. 3 Allowable differential settlement for highways of different grades that can satisfy vehicle comfort requirement

公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
容许台阶高度/cm	2.5	3.0	1.5	3.0	5.0

### 3.2 安全性影响因素

当载重汽车和小汽车分别以标准车速通过不同高度的台阶时,得出载重汽车和小汽车的台阶安全

临界高度,见表 4.文献<sup>[5-6]</sup>显示空载客车的台阶安全临界高度一般为  $7 \sim 8 \text{ cm}$ ,比载重汽车的要高,故此处只研究了台阶安全临界高度较低的载重汽车.由表 4 可知,载重汽车的车速越大,台阶安全临界高度越小;而对高速行驶的小汽车而言,不大的速度变化对台阶安全临界高度的影响也不大.值得一提的是,小汽车在高速情况下的台阶安全临界高度甚至比速度较低的载重汽车的台阶安全临界高度要高,这很可能是由于小汽车的悬挂及轮胎两者的整体刚度比载重汽车的要小的缘故.

结合表 3 和表 4 可知,对高速公路和一级公路,

由平均加权加速度值均方根值确定的容许台阶高度低于由车轮动力荷载最小值确定的台阶高度,说明整车舒适度对容许台阶高度的要求比车辆安全性的要求更为严格。

当载重汽车以 20 km/h 的速度通过 2 cm 高的台阶时,车轮动力荷载如图 4 所示。由图可知,载重汽车的前轮受力最小,后轮受力最大,故以下仅考虑后轮的局部冲击系数。当载重汽车以标准车速通过不同高度的台阶时,后轮的局部冲击系数如图 5 所示。由图可知,局部冲击系数与台阶高度正相关;对同一台阶,速度越高却并不意味着局部冲击系数也越大。本文中在载重汽车车速为 40 km/h 时,后轮的局部冲击系数最大。

表 4 载重汽车及小汽车的台阶安全临界高度  
Tab. 4 Critical safety differential settlement for truck and car

标准车辆	小汽车	小汽车	载重汽车	载重汽车	载重汽车
公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
台阶安全临界高度/cm	6.0	6.0	3.0	4.0	5.5

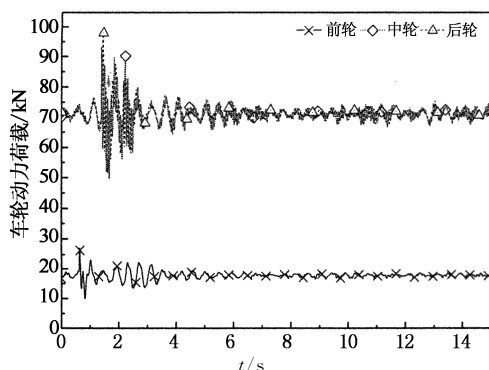


图 4 载重汽车车轮动力荷载  
Fig. 4 Dynamic truck wheel load

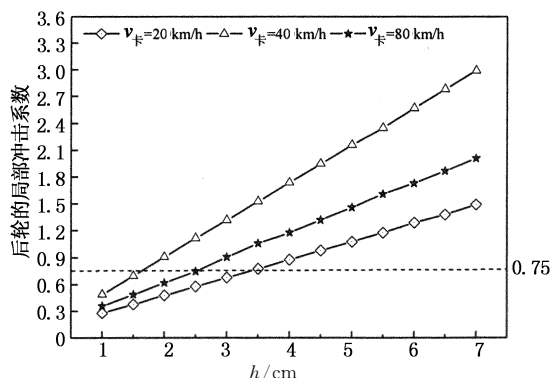


图 5 速度及台阶高度对局部冲击系数的影响  
Fig. 5 Influence of speed and differential settlement on local impact factor

结合表 3,表 4 和图 5 可知,对二级公路的容许台阶高度,各控制指标的严格程度由高到低依次为:

整车舒适度、桥梁安全性和车辆安全性;对二级以下公路,其严格程度由高到低依次为:桥梁安全性、整车舒适度和车辆安全性。

### 3.3 容许台阶高度的控制标准

由上节结论可知,对各等级公路,车辆安全性对容许台阶高度的要求最低,故仅需考虑整车舒适度(表 3)和桥梁安全性(图 5)即可得出满足整车舒适度和车桥安全性要求的各等级公路的容许台阶高度。值得注意的是,表 3 和表 5 中一级公路及高速公路以小汽车为标准车辆,二级及二级以下公路以客车为标准车辆来确定容许台阶高度。

表 5 满足整车舒适度及车桥安全性要求的各等级公路的容许台阶高度

Tab. 5 Allowable differential settlement which can satisfy the requirements of vehicle comfort and safety of both the vehicle and bridge for highways of different grades

公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
容许台阶高度/cm	2.5	3.0	1.5	1.5	3.5

对比由行车调查<sup>[1-3]</sup>确定的容许台阶高度 1.5~4.0 cm,本文针对不同等级的公路提出了更全面的控制标准,且控制范围更严格,为 1.5~3.5 cm,其中考虑了载重汽车对桥台的冲击作用,并且由前面讨论可知,局部冲击系数对容许台阶高度的影响显著。

此外,文献[6]中车辆通过满足舒适度要求的台阶时,其加权加速度均方根值的范围为 0.70~1.41 m/s<sup>2</sup>,与本文所采用的舒适度控制界限所对应的人体主观感受基本一致。

## 4 结 论

本文在模拟半车模型通过未设搭板的路桥过渡段的基础上,以平均加权加速度均方根值作为整车舒适度指标,以车轮动力荷载最小值和局部冲击系数分别作为车辆与桥梁的安全性指标,从整车舒适度和车桥安全性角度对容许“错台型”沉降即容许台阶高度进行了研究,并得出如下结论:

- 1)同一车型通过路桥过渡段的错台时,车速越高,整车舒适度水平越低,即相应的平均加权加速度均方根值越大,且增幅随着台阶高度的提高更为明显。
- 2)载重汽车的车速越大,保证车轮不腾空的台阶安全临界高度越小;对高速行驶的小汽车而言,并

不大的速度变化对台阶安全临界高度的影响不大。

3) 载重汽车的局部冲击系数与台阶高度正相关;而对同一台阶,车速越低并不能保证局部冲击系数越小。

4) 对高速公路和一级公路,整车舒适度对台阶高度的要求更为严格,其次是车辆安全性。

对二级公路的容许台阶高度,各控制指标的严格程度由高到低依次为:整车舒适度、桥梁安全性和车辆安全性;对二级以下公路,其严格程度由高到低依次为:桥梁安全性、整车舒适度和车辆安全性。

基于对3个重要指标的全面分析,本文提出了比以往更合理的容许台阶高度的控制标准,可为工程实践所参考借鉴。

## 参考文献

- [1] 鲍明伟,金太学.公路桥头台阶的防治[J].公路,1994(5):20-23.  
BAO Ming-wei, JIN Tai-xue. Prevention and treatment of differential settlement at the ends of highway bridges[J]. Highway, 1994(5): 20-23. (In Chinese)
- [2] 冯忠居,方贻立.高等级公路桥头跳车的危害及其机理的分析[J].西安公路交通大学学报,1999,19(4):33-35.  
FENG Zhong-ju, FANG Yi-li. Analysis of the harmful effect of vehicle bump at bridge-head of the highway and its mechanism[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4): 33-35. (In Chinese)
- [3] STARK T D, OLSON S M, LONG J H. Differential movement at the embankment/structure interface-mitigation and rehabilitation [R]. Springfield, Illinois: Illinois DOT, 1995.
- [4] 胡思涛,项乔君.公路路桥过渡段容许台阶高度的确定方法[J].公路,2014(2):89-92.  
HU Si-tao, XIANG Qiao-jun. Method of determining the allowable differential settlement at the ends of bridges[J]. Highway, 2014(2): 89-92. (In Chinese)
- [5] 陈景星,冯忠居,郑木莲,等.基于安全性的路桥过渡段差异沉降控制标准[J].公路交通科技,2013,30(2):26-31.  
CHEN Jing-xing, FENG Zhong-ju, ZHENG Mu-lian, et al. Control criterion of differential settlement of bridge approach based on safety[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(2): 26-31. (In Chinese)
- [6] 张洪亮,胡长顺,高江平.路桥过渡段容许台阶高度确定的参数影响[J].公路交通科技,2005,22(3):42-46.  
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun, GAO Jiang-ping. Parameters' influence on determination of allowable differential settlement between bridge and approach embankment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 42-46. (In Chinese)
- [7] 陶向华.路桥过渡段差异沉降控制标准与人车路相互作用[D].南京:东南大学交通学院,2006.  
TAO Xiang-hua. Differential settlement control criterion of bridge-approach and people-vehicle-road interaction[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2006. (In Chinese)
- [8] 张洪亮,胡长顺.基于五自由度车辆模型的桥头搭板容许纵坡变化值研究[J].土木工程学报,2005,38(6):125-131.  
ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun. A study on the allowable differential slope on the approach slab with five-degree-freedom vehicle model[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 125-131. (In Chinese)
- [9] JTG B01-2003 公路工程技术标准[S].北京:人民交通出版社,2003.  
JTG B01-2003 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: People's Communication Press, 2003. (In Chinese)
- [10] 黄志刚,朱慧,梁新成,等.微型轿车七八自由度模型动态仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(2):354-359.  
HUANG Zhi-gang, ZHU Hui, LIANG Xin-cheng, et al. Study on dynamic simulation of subminiature car between model of seven DOF and eight DOF[J]. Computer Simulation, 2011, 28(2): 354-359. (In Chinese)
- [11] DENG L, CAI C S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges[J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 21-31.
- [12] 郑 邠.汽车振动舒适性的测量与评价[J].客车技术与研究,2000,22(4):23-26.  
ZHENG Yun. Measurement and evaluation of vehicle ride comfort[J]. Bus Technology and Research, 2000, 22(4): 23-26. (In Chinese)
- [13] ISO 2631-1-1997, Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. part1: general requirements[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [14] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2000:173.  
YU Zhi-sheng. Automotive theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2000:173. (In Chinese)
- [15] 丁勇,诸葛萍,谢旭,等.考虑车轮-路面接触长度的桥头跳车动力荷载分析[J].振动与冲击,2013,32(9):28-34.  
DING Yong, ZHUGE Ping, XIE Xu, et al. Numerical analysis of dynamic load in bridge-head bumping considering the contact length between tire and road[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(9): 28-34. (In Chinese)
- [16] 丁勇,黄奇,谢旭,等.载重汽车桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J].土木工程学报,2013,46(7):98-107.  
DING Yong, HUANG Qi, XIE Xu, et al. A computational method for the dynamic load in heavy-vehicle bumping at the bridge expansion joint and analysis of the influencing factors[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 98-107. (In Chinese)
- [17] JTJ D21-89 公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,1989.  
JTJ D21-89 General code for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: People's Communication Press, 1989. (In Chinese)
- [18] AASHTO. LRFD bridge design specifications[S]. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.