

文章编号:1671-6833(2006)02-0102-05

人车路系统分析模型在差异沉降指标确定中的应用

陶向华¹, 王 鹏², 曾凡奇¹

(1.河南省交通基本建设质量检测监督站,河南 郑州 450005;2.郑州大学环境与水利学院,河南 郑州 450002)

摘 要:在对设置桥头搭板的路桥过渡段路面进行简化后,建立了车辆通过搭板时的人车路垂向振动系统分析模型;通过模态分析方法求解并计算了车辆下桥时的人车系统的位移响应,速度响应和加速度响应;利用所建的人车路系统分析模型对车辆经过路桥段时的振动特性进行了评价;并结合公路线形特点确定了路桥过渡段差异沉降指标与搭板坡差、桥面坡差、车速、载重、搭板长度等因素之间的关系,最终从功能性的角度提出路桥过渡段的搭板容许坡差应不超过0.4%。

关键词:人车路系统;分析模型;路桥过渡段;差异沉降;容许坡差

中图分类号:U 416.2

文献标识码:A

0 引言

桥头跳车是目前我国高速公路质量“通病”的一种。它是路桥作为相连不同类型的结构在自重荷载和交通荷载作用下产生的差异沉降导致。当台背填土以及地基沉降累积达到一定程度时,桥台和路堤交界处产生明显的台阶,车辆行驶经过台阶时,乘客将感觉到明显的起落跳动和不适,从而形成桥头跳车。

为了减轻由桥台和桥梁引道之间的差异沉降所引起的桥头跳车现象,常在桥台和引道之间设置桥头搭板。把台阶缓和到一定长度范围,使乘客不至于感到突发的跳动。搭板沉降前后的坡差(简称搭板坡差)的大小是桥头跳车严重与否的决定因素。

目前国内外多根据现场调查确定搭板容许坡差 $[\Delta i]$ 。Wahls通过对美国大量桥头进行调查,结果发现桥台后填土竖向位移不大于100 mm,水平位移不大于50 mm时不致使桥与路面产生结构损坏,建议取容许坡差5‰。美国各州则没有统一的标准规定搭板容许坡差值,一般当 $[\Delta i]$ 在1/200内时有比较满意的行驶舒适性,当 $[\Delta i]$ 达到1/125时则建议采取修补措施。原联邦德国莱昂哈特指出,对于高速公路, $[\Delta i]$ 不大于1/300,但通

常为1/200。宁通一级公路桥头行车调查表明,对90~100 km/h的车速,当 $\Delta i \leq 0.5\%$ 时没有跳车感觉。京石公路桥头使用状况调查指出,对60 km/h的车速, Δi 在0.5%以下时没有跳车感觉。沪嘉高速公路试验研究指出在桥台处设搭板,邻近桥梁构筑物的路堤容许工后沉降10 cm,并在50 m范围内逐步过渡到容许工后沉降30 cm,其沉降差为4‰。另外一部分学者忽略桥面沉降坡差,对桥面与搭板之间的容许坡差 $[\Delta i_2]$ 进行了研究。国内张奎鸿认为,当 $[\Delta i_2]$ 在0.2%~0.3%范围内可避免跳车。叶见曙提出 $[\Delta i_2]$ 为0.2%,桥面的容许沉降坡差 $[\Delta i_1]$ 为0.2%,两者相加得搭板的容许坡差 $[\Delta i]$ 为0.4%^[1-4]。

从上述搭板容许坡差的规定可以看出,它们彼此之间不仅数值上不统一,在参数影响的考虑上也不一致。由于桥头跳车对行车的影响既涉及路面(包括桥头)坡度,又涉及车速、载重与行车方向,同时也与乘客的主观心理因素有关,因而在解决桥头跳车这一技术难题时,必须综合考虑这些因素,从汽车理论的行驶平顺性角度和乘客的舒适性角度,即对人车路垂向振动系统进行研究,从而妥善解决桥头跳车问题。

作者从人车路相互作用的角度对桥头跳车问

收稿日期:2006-01-02;修订日期:2006-02-28

基金项目:交通部西部建设科技项目(200231800032)

作者简介:陶向华(1976-),女,河南安化人,河南省交通基本建设质量检测监督站工程师,博士,主要从事路基路面工程与路面检测研究。

万方数据

题进行理论分析,同时通过现场调查,结合公路线形特点确定路桥过渡段差异沉降指标与搭板坡差、桥面坡差、车速、载重、搭板长度等因素之间的关系,最终从功能性的角度确定路桥过渡段差异沉降指标,为路桥过渡段台背回填的工程实践提供可参考的设计指南。

1 设置搭板的路桥过渡段计算模型

1.1 人车路系统分析模型的建立

根据实际调查,本文将设置搭板的路桥过渡段路面简化为如图1所示的折线形状^[5]。图中, α 为桥面沉降前后的转角,其正切值为桥面沉降坡差 Δi_1 ; β 为桥面与搭板之间的夹角,其正切值为桥面与搭板之间的坡差 Δi_2 ; 设 θ 为桥面与搭板之间的夹角,则 $\theta = \alpha + \beta$,其正切值为搭板沉降坡差 $\Delta i = \Delta i_1 + \Delta i_2$; 由于 α, β 和 θ 都很小,为了计算的简使用其弧度值代替其正切值; v 为车速。另设 L 为搭板长度, Δh 为路桥过渡段的差异沉降量,则 $\Delta h = L \cdot \theta$ 。

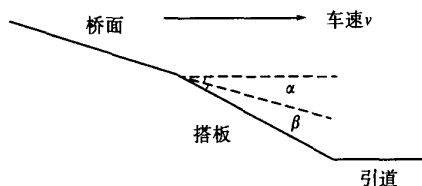


图1 设置搭板时的路桥过渡段示意图

Fig.1 Roadbed-bridge transition section with the approach

当车辆经过路桥过渡段时会出现台阶式跳车,引起人车系统的振动。在分析人车系统的振动时,将人车路系统分析模型简化为图2所示的三自由度等效系统对沉降引起的响应进行分析,其中各弹簧和阻尼均视为线性。图中, m_3 为人体质量; m_2 为簧载质量,即车身部分质量,包括所有车身弹簧悬架的汽车部件,如车架、车身和货厢等; m_1 为非簧载质量,即轮胎质量; k_3 为座椅刚度(弹性系数); k_2 为车身悬架刚度; k_1 为轮胎刚度; c_3 为座椅阻尼; c_2 为悬架阻尼; c_1 为轮胎阻尼; z_3 为座椅垂直位移; z_2 为车身垂直位移; z_1 为轮轴垂直位移; u 为路面垂向的位移坐标(包括桥面、搭板和引道路面)。

1.2 通过路桥过渡段车辆振动方程的建立和求解

1.2.1 方程的建立和初始条件的确定

车辆通过路桥过渡段路面为受迫振动,由D'Alembert原理或牛顿第二定律,三质量(自由度)等效系统如图2所示,建立运动微分方程为^[6]

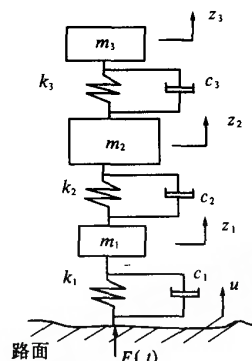


图2 三自由度等效系统计算模型

Fig.2 Three DOF calculation model

$$\begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_3 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_3 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & c_3 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 & 0 \\ -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1 u + c_1 \dot{u} \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式简写为: $M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = \{F(t)\}$ 。式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵。

设车辆动载荷变化为 $F_{动}$,路面对车辆的垂直作用力为 $F(t)$,方向以向上为正,则

$$F_{动} = k_1(u - z_1) + c_1(\dot{u} - \dot{z}_1) \quad (2)$$

$$F(t) = F_{动} + F_{静} = k_1(u - z_1) + c_1(\dot{u} - \dot{z}_1) + 9.8(m_1 + m_2 + m_3) \quad (3)$$

以车辆进入搭板时为初始时刻,以桥面末端的水平面为基准面。搭板位移为 $u = v \cdot t \cdot (\alpha + \beta) = v \cdot \theta$, t 为车辆行驶的时间。

假设车辆刚进入搭板时,此时由于桥台的沉降坡差引起的车辆振动已趋于稳定,则初始速度和初始位移矩阵为

$$\begin{aligned} \{z_0\} &= \begin{bmatrix} z_3(0) \\ z_2(0) \\ z_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \alpha \\ v \cdot \alpha \\ v \cdot \alpha \end{bmatrix}, \\ \{\dot{z}_0\} &= \begin{bmatrix} \dot{z}_3(0) \\ \dot{z}_2(0) \\ \dot{z}_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

在初始条件和路面位移确定后,便可对振动方程计算和求解,从而得到各质量的位移、速度和加速度,车辆动载荷和路面对车辆的垂直作用力。

1.2.2 方程的求解

对于三自由度人车路系统振动方程,实际的工程应用中广泛采用模态分析方法进行计算。

根据所建立的人车路系统模型和已知的初始条件,由杜哈梅积分和式(1)计算可以得到系统在模态坐标下垂直方向的位移响应为^[7]

$$q_i = e^{-\xi_i \omega_{ni} t} \left(\frac{\dot{q}_{0i}}{\omega_{ni}'} \sin \omega_{ni}' t + \frac{1}{m_p \omega_{ni}'} \int_0^t A_n^{(i)T} \{f(\tau)\} e^{\xi_i \omega_{ni}' \sin \omega_{ni}' (t-\tau)} d\tau \right),$$

$$(i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

式中:前一部分为初始条件下的自由振动,后一部分为在激励力 $f(\tau) = k_1 v \theta + c_1 v \dot{\theta}$ 作用下的系统的响应; \dot{q}_0 称为系统在模态坐标下的初始条件,即 $t=0$ 时的初始速度列阵,它们与物理坐标下的初始速度 \dot{z}_0 的关系为 $\dot{q}_0 = A_n^{-1} \dot{z}_0 = A_n^{-1}$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_3(0) \\ \dot{z}_2(0) \\ \dot{z}_1(0) \end{bmatrix}, \{A_n\} = [A_n^{(1)} \quad A_n^{(2)} \quad A_n^{(3)}] \text{ 为正则振}$$

型矩阵; ω_{ni} 和 ω_{ni}' ($i=1, 2, 3$) 分别为无阻尼和有阻尼的固有频率; ξ_i ($i=1, 2, 3$) 为阻尼比。

将式(5)进行坐标变换,得到初始条件下人车系统在物理坐标下垂直方向的位移响应为

$$Z = A_n Q = \sum_{i=1}^3 q_i A_n^{(i)} \quad (6)$$

从而根据各位移响应可计算人车系统在搭板上行驶时的瞬时速度和瞬时加速度。

2 搭板容许沉降坡差的确定

2.1 搭板容许坡差确定的控制指标

设置搭板时的桥头跳车现象主要通过车辆振动性能来反应。作者从车辆行驶的安全性和乘客的乘坐舒适性两方面来确定搭板容许坡差。

2.1.1 行驶安全性评价

在评价行驶安全性时,要求动载系数 DLC(动态载荷除以静态载荷)尽可能小。由图 1 和式(2)可求出车辆动载系数 DLC。

当车辆的动载大于静载时,轮胎会跳离地面,这会影响到轮胎与地面的附着性能,从而影响整车的驱动性、制动性和行驶的安全性。为了避免这种情况的发生,要求尽可能保证轮胎的动载和静载的比值的概率小于 1/3。

2.1.2 乘坐舒适性评价

广义来说,舒适性是乘坐车辆的人对乘车品质的综合反应评价。狭义来说舒适性是车辆运行

产生的振动(加速度)对乘坐车辆的人的影响问题,即“振动舒适度”或“平稳性”。车辆行驶过程中,加速度与汽车的振动有着密切的关系,常要求尽可能降低加速度来达到人体的舒适程度。

近年来,国际标准化协会在综合大量资料的基础上,提出了 ISO2631-1^[8]:1997《人承受全身振动的评价》标准。该标准是基于人体的健康影响、舒适性和人体感觉而建立的评价标准,并建议采用计权加速度的均方根值(RMS)作为统计值,关于振动激励下的舒适性响应评价如表 1 所示,目前已被许多国家标准所采纳。因而本文将参考该标准采用加速度均方根值来反映乘坐舒适性。

表 1 振动激励下的舒适性响应评价 ISO 2631-1:1997

Tab.1 The comfort response under the vibration ISO 2631-1:1997

加速度均方根值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	人的舒适程度
< 0.315	没有不舒适
0.315 ~ 0.63	稍有不舒适
0.5 ~ 1.0	有些不舒适
0.8 ~ 1.6	不舒适
1.25 ~ 2.5	很不舒适
> 2.0	极不舒适

2.2 影响搭板容许坡差的各因素分析

在采用 Matlab 进行模拟计算与分析时,三自由度人车系统模型中各实际参数取值如表 2 所示。根据编程计算得出跳车现象常发生在搭板的末端。下面将从安全性和舒适性的角度讨论车速、桥面沉降坡差、搭板坡差、载重和搭板长度与搭板容许坡差的关系。

表 2 简化的人车路系统模型性能参数

Tab.2 The simple vehicle model parameters

质量/kg			弹性系数或刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)			阻尼系数/($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)		
m_1	m_2	m_3	k_1	k_2	k_3	c_1	c_2	c_3
1 100	8 900	100	3 500	2 000	80	4	40	4

2.2.1 车速 v 的影响

车速 v 分别取 70, 80, 90 和 100 km/h, 搭板长度为 10 m, 计算结果由图 3 和图 4 可以看出, 车速越快, 车辆的动载荷和人体的加速度值越大, 人体的感觉越强烈, 就越容易跳车。这说明在确定搭板容许坡差时, 车速是一个非常重要的因素, 搭板的容许坡差根据车速来定。经计算分析得出, 当车速为 80 ~ 100 km/h 时, 差异沉降 h 应不超过 4 cm (相应的沉降坡差 $\Delta i \leq 0.4\%$), 这时人体感觉才不太激烈, 没有剧烈的颠簸现象。

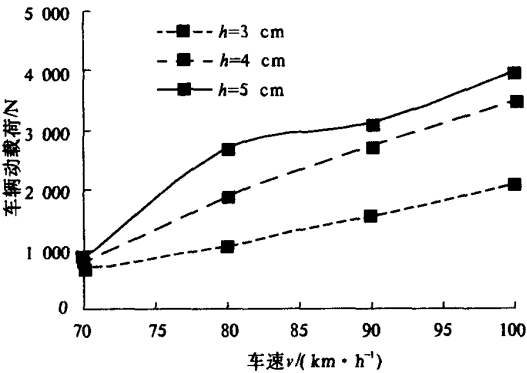


图 3 车速与搭板沉降对车辆动载荷的影响
Fig.3 The effect of velocity and slab settlement on vehicle dynamic load

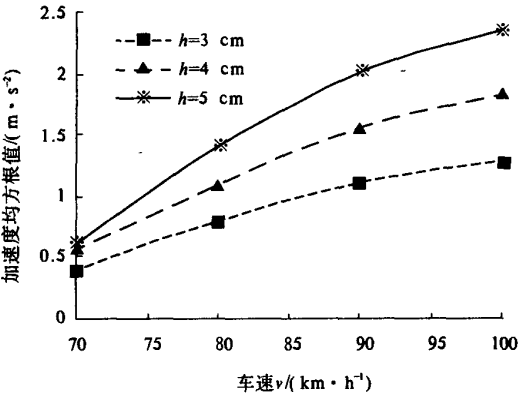


图 4 车速和搭板沉降对加速度均方根值的影响
Fig.4 The effect of velocity and slab settlement on acceleration RMS

2.2.2 桥面沉降坡差 Δi_1 的影响

桥面沉降坡差分别取 0, 0.05%, 0.1% 和 0.15%, 搭板沉降坡差取 0.4%, 车速取 80 km/h, 计算结果如表 3 所示. 由表可知: 虽然搭板沉降坡差不变, 但随着桥面沉降坡差的增加, 车辆动载荷和加速度均方根值都减小, 即对车辆振动的影响减小. 因而桥面沉降坡差对于搭板容许坡差的确定有一定的影响, 从理论分析来说增大桥面坡差可一定程度地减少桥头跳车现象.

表 3 桥面沉降坡差对结果的影响

桥面沉降坡差/%	车辆动载荷/N	加速度均方根值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
0.00	3 305	1.21
0.05	2 599	1.15
0.10	1 892	1.09
0.15	1 185	1.04

2.2.3 搭板坡差 Δi 的影响 (搭板长度 L 不变)

搭板长度 L 不变时, 搭板坡差 Δi 分别取 0.2%, 0.3%, 0.4% 和 0.5%, 计算结果见表 4. 由表可看出随着搭板坡差的增加, 车辆动载荷和加

速度均方根值都增加, 此时主要考虑舒适性的影响. 当搭板沉降坡差达到一定的程度时, 已超过人体的最大不舒适度. 同时也说明了搭板的最大容许坡差 Δi 应不超过 0.4%.

表 4 搭板坡差对结果的影响

搭板坡差/%	车辆动载荷/N	加速度均方根值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
0.2	239	0.50
0.3	1 066	0.80
0.4	1 900	1.10
0.5	2 720	1.41

2.2.4 搭板长度 L 的影响 (路桥差异沉降不变)

当路桥差异沉降 Δh 不变时, 改变搭板长度. 板长分别取 8, 9, 10, 12 和 15 m, 计算结果见表 5. 由表 5 可以看出, 随着板长的增加, 加速度均方根值逐渐减小, 说明板长是影响行车舒适性的一个重要因素. 但是从经济上考虑, 搭板太长会提高造价, 因而当路桥过渡段差异沉降 $\Delta h \leq 5\text{cm}$ 时, 选取 10 m 左右的搭板长度是比较合适的. 实际中应根据所期望的路桥差异沉降来确定不同的容许搭板长度, 即不同的容许沉降坡差.

表 5 搭板长度对结果的影响

搭板长度/m	加速度均方根值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
8	1.88
9	1.54
10	1.10
12	0.34
15	0.14

2.2.5 载重的影响

目前存在这样一种看法, 即: 空载的车辆比满载的车辆在行驶过程中更容易发生振动. 虽然空载车辆的静载要小于满载车辆的静载, 然而由于空载车辆的剧烈垂直振动, 导致了空载车辆在行驶过程中除了对路面施加静载外, 还要作用由于剧烈垂直振动而引起的更大的额外载荷, 因此空载车辆对路面的综合作用就可能不小于满载车辆对路面的作用力.

我们对载重进行理论计算与分析, 满载时取车身质量 $m_2 = 8\,900\text{ kg}$, 半载时取 $m_2 = 5\,950\text{ kg}$, 空载时取 $m_2 = 3\,000\text{ kg}$, 计算结果见下表 6. 可以看出, 和空载时相比, 满载时加速度均方根值减小了, 因而在确定搭板容许沉降坡差时应采用空载的车辆. 同时也发现尽管空载时静载减小, 但是振动增加, 动载冲击作用力也增加, 这与目前的看法是一致的, 空载车辆更容易跳离路面, 发生跳车的危险.

表6 载重的影响

Tab.6 The effect of vehicle load

载重状态	车身质量/kg	车辆动载荷/N	动载系数	加速度均方根值/(m·s ⁻²)
满载	8 900	1 900	0.02	1.10
半载	5 950	3 500	0.05	1.85
空载	3 000	4 528	0.11	2.21

3 结论

本文基于人车路相互作用建立了乘客、车辆与路桥过渡段路面的垂向振动系统分析模型,采用模态分析法求解了系统振动方程,并运用 Matlab 软件进行了计算机仿真计算,编写了相关程序从功能性的角度确定了路桥过渡段差异沉降指标。

(1) 车速增加,车辆对路面的动态冲击作用增加,对人体的振动越剧烈。通过计算发现,当车速为 80 ~ 100 km/h 时,差异沉降 Δh 应不超过 4 cm(相应的容许沉降坡差 $\Delta i \leq 0.4\%$),这时人体感觉才不太激烈,没有剧烈的颠簸现象;

(2) 当搭板沉降坡差不变时,随着桥面沉降坡差的增加,车辆动载荷和人体振动都有减小。因而桥面沉降坡差越大,搭板容许沉降坡差就越大;

(3) 随着搭板坡差的增加,车辆动载荷和加速度均方根值都增加,此时主要考虑人体舒适性的影响。当搭板沉降坡差达到一定的程度时,已超过人体的最大不舒适度。同时也说明了搭板的最大容许坡差应不超过 0.4%;

(4) 实际中应根据所期望的路桥差异沉降来

确定不同的容许搭板长度,即不同的容许沉降坡差。当路桥过渡段差异沉降量 $\Delta h \leq 5$ cm 时,选取 10 m 左右的搭板长度比较合适;

(5) 车辆空载时对人的振动影响更大,空载车辆在同样车速下比满载车辆较容易发生跳车现象,因而确定搭板容许沉降坡差时宜采用空载时的车辆。

参考文献:

- [1] 叶见曙. 桥头引道工后沉降控制标准的研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 12 ~ 17.
- [2] 何兆益, 周虎鑫. 高等级公路软土地基容许工后不均匀沉降指标研究[J]. 重庆交通学院学报, 1996, 15(1): 48 ~ 54.
- [3] WAHLS H E. Design and construction of bridge approaches [A]. Transportation Research Board, NCHRP Synthesis of Highway Practice 159 [C]. Washington, DC: National Research Council, 1990. 14 ~ 18.
- [4] 张小庆, 王明中, 杜莉莉. 加阻尼的 Winkler 地基上多块板的动力分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(1): 97 ~ 99.
- [5] 张洪亮, 胡长顺. 路桥过渡段桥头搭板容许坡差确定的参数影响[J]. 长安大学学报, 2003, 23(3): 11 ~ 14.
- [6] MITSCHKE M. 汽车动力学(B卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [7] 靳晓雄, 张立军. 汽车振动分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [8] ISO 2631 - 1:1997, Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole - body Vibration[S].

Application on People - Vehicle - Road Analysis Model on Differential Settlements of Bridge - Approach

TAO Xiang - hua¹, WANG Peng², ZENG Fan - qi¹

(1. Henan Provincial Communications Quality Control Institute, Zhengzhou 450005, China; 2. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The people - vehicle - road analysis model has been established through the simplification of bridge - approach with the slab when the vehicle passes the transition section. Secondly, the mode analysis method is employed to calculate the displacement, velocity and acceleration of people and vehicle when the vehicle is coming down from the bridge. Thirdly, the vibration characteristics of vehicle are evaluated according to the analysis model. Lastly, the relationships between differential settlements and different factors, such as slab slope, bridge slope, velocity, vehicle load and slab length, are studied to decide the permissible allowable slab slope within 0.4% from the angle of functional index.

Key words: people - vehicle - road; analysis model; bridge - approach; differential settlement; permissible slope