

DOI:10.11918/201808092

新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准

郑俊¹,丁振杰^{2,3},吕庆¹,范祥⁴,娄宝娟²

(1. 浙江大学 建筑工程学院,杭州 310058;2. 宁海县交通建设工程质量安全监督站,浙江 宁波 315600;
3. 宁海县交通集团有限公司,浙江 宁波 315600;4. 长安大学 公路学院,西安 710065;)

摘 要: 针对如何合理制定隧道建设引起的路面沉降控制基准的难题,以行车舒适性控制标准为出发点,同时考虑既有公路的不平整度和隧道建设引起的路面沉降槽形态特征,基于理论推导提出了一个较完整的解决方案. 首先,选择行车竖直方向上振动加速度为舒适性指标;其次,采用理想正弦函数加以刻画公路路面纵断面曲线,通过求导得到行车竖直方向振动加速度与既有公路的纵断面曲线特征参数的关系;再次,用 Peck 公式描述隧道建设引起的路面沉降槽形态特征,通过求导得到行车竖直方向上振动加速度与沉降槽形态参数的关系;然后,根据叠加原理可得到行车最大竖直方向上振动加速度的计算公式,该公式考虑了既有公路的不平整度和隧道建设引起的路面沉降的影响;最后,基于加速度值与人体主观感觉的关系,提出了路面沉降控制基准确定公式. 结果表明:行车舒适性与既有公路纵断面曲线的波长成正比,与振幅成反比;行车舒适性与路面沉降槽宽度系数成正比,与隧道中心线处路面最大沉降值成反比;行车舒适性与行车速度的平方成反比例. 通过适当降低行车速度是放宽沉降控制基准的有效方法.

关键词: 隧道工程;隧道建设;理论研究;路面沉降;下穿公路;Peck 公式

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)03-0051-08

Control standard for settlement of pavement caused by a new tunnel passing underneath an existing highway

ZHENG Jun¹, DING Zhenjie^{2,3}, LÜ Qing¹, FAN Xiang⁴, LOU Baojuan²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Ninghai Supervision Station of Traffic Construction Engineering Quality and Safety, Ningbo 315600, Zhejiang, China; 3. Ninghai County Communications Group Co., Ltd., Ningbo 315600, Zhejiang, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710065, China)

Abstract: It is a big problem to reasonably formulate the control standard for settlements of pavement caused by tunnel construction. To address this problem, this study proposed a complete solution based on strict theoretical deduction, which took the driving comfort control standard as the starting point, and considered both the roughness of existing highway and the morphological characteristics of pavement settlement trough caused by tunnel construction. First, the vertical vibration acceleration was selected as the comfort index. Second, the ideal sinusoidal function was used to depict the longitudinal curve of highway pavement, and the relationship between the characteristic parameters of the existing highway longitudinal curve and the vertical vibration acceleration was revealed by derivation. Third, the Peck formula was applied to describe the morphological characteristics of pavement settlement trough induced by tunneling, and the relationship between the morphological characteristic parameters and the vertical vibration acceleration was obtained by derivation. Fourth, the formula for calculating the maximum vertical vibration acceleration was established by incorporating the overlapping effect of the existing highway roughness and the pavement settlement induced by tunneling. Finally, based on the relationship between the acceleration value and the subjective feeling of human body, the formula for determining the control standard of pavement settlement was proposed. Results show that the driving comfort was directly proportional to the wave length of the existing highway longitudinal curve and inversely proportional to its amplitude; the driving comfort was directly proportional to the width coefficient of the settlement trough and inversely proportional to the maximum settlement value of the pavement at the tunnel center line; and the driving comfort was inversely proportional to the square of the driving speed. Therefore, an effective way to relax the settlement control standard is to reduce the driving speed properly.

Keywords: tunnel engineering; tunnel construction; theoretical research; pavement settlement; passing underneath highway; Peck formula

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(41502268);
浙江省交通运输厅科研计划(KH20170421);
浙江省自然科学基金(LY18E090002)

作者简介: 郑俊(1987—),男,博士,副教授,硕士生导师;
吕庆(1978—),男,教授,博士生导师

通信作者: 范祥, fanxiang224@126.com

近年来,随着中国基础设施大规模建设,铁路、公路等级大幅提高,路网密度逐步增大,出现了大量新建隧道下穿既有运营公路的情况^[1]. 新建隧道下穿既有公路的施工不可避免地会对地层产生扰动,

从而引起不同程度的路面沉降^[2],劣化了路面的平整度.而路面平整度是直接影响行车安全性和舒适性的关键因素,不良的路面平整度会影响行车安全,降低行车舒适性,增大行车噪音污染,加速路面结构层破坏等^[3].因此,开展新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准研究,科学、合理地选择路面沉降控制基准,具有重要的社会经济价值.

类似于文献[4]总结的各国对路基沉降控制标准研究经历的3个阶段,本文认为新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准的研究大致也可以分为3类.第1类以允许最大沉降值为指标的控制标准,一般采用北京、深圳地铁等的经验值30 mm作为其控制基准值^[5-6].该方法简单、容易实施,但是其忽略了不同隧道自身特性(岩土体工程地质特性、隧道形状、尺寸、施工方法等)、公路自身特性(行车速度和既有平整度等)及它们的位置关系(隧道埋深和它们相交角度等)的差异性,具有较大的盲目性.第2类以允许纵向坡差或平整度为指标的沉降控制标准,如朱正国等^[2]在考虑路基高度、隧道尺寸、埋深、地质和施工方法影响条件下,通过FLAC数值计算软件对单双线铁路隧道下穿公路进行数值模拟,分析路面沉降规律,得到了沉降槽宽度系数和最大沉降量的预测模型,结合平整度要求及沉降槽宽度系数预测模型制定了铁路隧道下穿公路引起的路面沉降控制基准.文献[7]基于数值模拟结果利用Peck公式^[8]拟合出沉降曲线,通过沉降曲线的最大斜率小于公路纵向坡差而确定路面沉降控制基准.该类方法的优点是考虑了隧道自身特点,但忽略了公路自身特性和隧道与公路的相交角度.第3类以人体进行振动舒适性为指标的控制标准,以车辆-路面耦合系统动力响应分析为基础,提出的沉降控制标准考虑了行车速度等因素,该标准合理性相对较高^[9],文献[1]在该方向进行了一些很好的初探性的研究工作,以路面平整度和路面行驶的舒适性为依据,把路面纵向沉降断面假定为二次抛物线形,得出了在隧道与路面正交下穿的情况下隧道开挖对路面纵向影响范围内的最大沉降值,继而制定相应的路面沉降控制基准.文献[1]提出的路面沉降控制基准的优点是同时考虑了行车速度和沉降曲线,缺点是忽略了既有公路的平整度和隧道自身特性直接假定沉降曲线为二次抛物线,且仅考虑了隧道与公路垂直相交的情况.

沉降控制标准的制定逐渐由安全性控制标准向舒适性控制标准发展^[4](注意舒适性控制标准高于安全性控制标准).本文的目的是以舒适性控制标准为出发点,同时考虑既有公路的不平整度和隧道

建设引起的路面沉降槽形态特征,提出一种新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准的确定方法.该方法确定的沉降控制基准有如下优点:1)体现了“以人为本”的原则,沉降控制基准最终落实到行车的舒适性上;2)通过路面沉降槽形态特征反映了岩土体工程地质特性和隧道形状、尺寸、埋深等特性;3)考虑了行车速度和既有公路的不平整度;4)考虑了隧道与公路相交角度的影响.

1 行车舒适性指标的选择

在影响舒适性的诸多因素中,人体感受到的振动对行车舒适性影响大,而路面平整度是引起车辆振动的主要原因^[10].良好的路面平整度能保证车辆经济、舒适、安全地通行;不良的路面平整度会增大行车阻力,并使车辆产生附加振动作用,由此产生的振动加速度会造成行车颠簸,影响驾乘人员的舒适性和健康^[10].

车辆在路面上行驶过程中,人体感受到的振动分为前后、左右、上下3个方向^[11],不同方向的振动加速度产生的原因不同^[10].研究发现,前后方向振动加速度产生原因主要为行驶过程中的速度变化,左右方向振动加速度产生原因主要为车辆自身的振动特性,上下方向振动加速度产生密切的原因为路面平整度;同时上下方向(竖直方向)振动加速度远大于其他两个方向^[10-12],因此,本文选择竖直方向振动加速度作为行车舒适性指标.

2 竖直方向振动加速度的评价方法

在正常行驶(非变道)情况下,车辆一般都是沿公路纵轴线方向运动的,故车辆的竖直方向振动加速度主要是由路面纵断面上的不平整引起的.因此,本文在评价车辆竖直方向振动加速度时仅考虑路面纵断面上的平整度.

2.1 既有公路路面不平整度的影响

由于一般路面状态是十分复杂的随机波形,在国内外出版的论文专著中,很多学者及研究人员提出用波形函数来描述不平整道路的路面^[10-13],其中使用广泛的是采用文献[14]提出的正弦函数来表征不平整的路面.对于新建下穿隧道施工前的既有公路的路面,本文也采用理想正弦函数加以刻画,因而公路路面纵断面曲线方程^[10,13-14]为

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right). \quad (1)$$

其中: y 为实际路面距路面纵向设计线的高度差,mm; A 为正弦波路面的振幅,mm; L 为正弦波路面的波长,m; x 为正弦波路面水平方向位移,m.

记行车速度为 v , 则有

$$x = vt, \tag{2}$$

其中 t 为时间. 将式(2)代入式(1), 得

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right). \tag{3}$$

对式(3)两边同时对时间 t 求导, 可得

$$v_y = \frac{2\pi v A}{L} \cos\left(\frac{2\pi vt}{L}\right), \tag{4}$$

其中 v_y 为车辆竖直方向上的速度. 对式(4)两边同时对时间 t 求导, 有

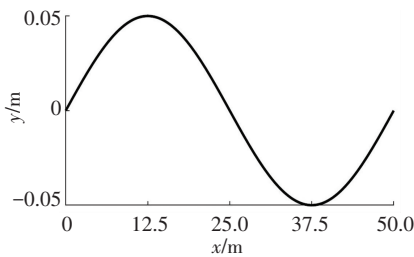
$$a_y = -\frac{4\pi^2 v^2 A}{L^2} \sin\left(\frac{2\pi vt}{L}\right), \tag{5}$$

其中 a_y 为车辆竖直方向上振动加速度. 由于 a_y 是矢量, 其正负号代表不同方向. 显然当 $vt = (0.25 + n)L$ 或 $(0.75 + n)L$ (n 为自然数, $(0.25 + n)L$ 表示波峰, $(0.75 + n)L$ 表示波谷) 时, a_y 达到最大值, 可表述为

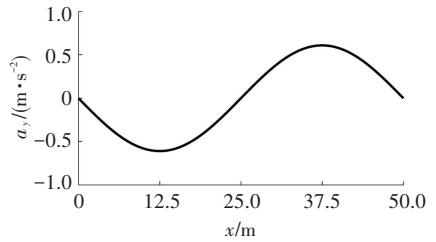
$$a_{y\max} = \frac{4\pi^2 v^2 A}{L^2}. \tag{6}$$

实际公路路面的波长和振幅可以通过仪器测得, 近年来国内外研发了不少路面平整度快速测量装置, 如华南理工大学研制的车载式路面平整度测量系统^[15]. 国际道路协会常设委员会 (PIARC) 对于引起路面不平整度的路面波长范围定义如下: 短波 0.5 ~ 5.0 m, 中波 5 ~ 15 m, 长波 15 ~ 50 m^[16]. 因此, 在缺少实测数据时, 可选用 3 m、10 m 和 30 m 作为典型代表性波长加以分析^[17-18]. 振幅值也可以根据道路路面状况进行估计, 如文献[19]指出一般公路不平整度的幅值约为几十毫米, 高等级公路的幅值的变化是 5 ~ 100 mm.

假定 $A = 50$ mm, $L = 50$ m, $v = 100$ km/h, 则由式(1)可得该公路路面纵断面曲线, 如图 1(a) 所示; 由式(5)可得相应的车辆竖直方向上振动加速度曲线, 如图 1(b) 所示. 图 1 进一步直观表明: 车辆行驶到波峰或波谷时产生的竖直方向上振动加速度最大, 相应的舒适度也最差, 这 and 人们平时乘车体验一致.



(a) 路面纵断面



(b) 车辆竖直方向上振动加速度

图 1 路面纵断面和车辆竖直方向上振动加速度对比

Fig. 1 Comparison between longitudinal curve of highway pavement and vertical vibration acceleration curve of vehicle

2.2 隧道施工的影响

如前文所述, 新建隧道下穿既有公路的施工不可避免地会对地层产生扰动, 必然会引起不同程度的路面沉降^[2], 从而在地表形成沉降槽. 沉降槽在与隧道走向垂直方向上一般呈现如图 2 所示的形态, 它的水平延伸范围称为沉降槽宽度^[20]. 理论上沉降槽的延伸范围是无限的, 但从工程实践的角度, 一般将可能对环境或各类建筑物、构筑物等造成不利影响的距离称为沉降槽宽度^[20].

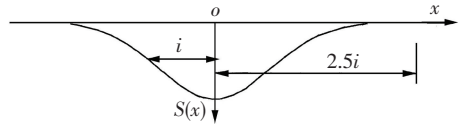


图 2 地表沉降横向分布典型曲线^[21]

Fig. 2 Typical transverse distribution curve of the pavement settlement profile^[21]

关于沉降槽形态, 众多学者开展了大量的研究, 主要确定方法可以分为 4 类: 1) 理论解析法, 由于实际地层工程地质条件过于复杂, 该方法不太适用于实际工程; 2) 经验公式法, 其代表性公式为 Peck 公式^[8], 是目前广泛使用的方法; 3) 数值模拟方法, 近年来使用越来越多的方法, 但受计算参数难以准确测定和岩土体本构关系的局限性等限制, 目前仍难以得到准确的定量结果; 4) 现场监测, 结果可靠, 但是不能直接预测沉降槽形态.

记沉降槽曲线为 y , 为了便于表述, 本文先选用 Peck 公式来描述沉降槽曲线形态, 那么有^[8,21]

$$y = -S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right). \tag{7}$$

式中, y 为距离隧道中心线为 x 处的地表沉降值; $S_{\max}$ 为隧道中心线处地表最大沉降值; x 为距隧道中心线的水平距离; i 为地表沉降槽宽度系数, 即沉降槽曲线反弯点至隧道中心线的水平距离, 这样沉降槽曲线近似为正态分布曲线. 注意式(7) 中的负号表示向下沉降.

如图 3 所示, 记公路与隧道纵轴线方向 (走向)

夹角为 θ , AA' 为公路纵轴线方向, BB' 为隧道走向垂直方向, AA' 与 BB' 的交角记为 γ . 若仅考虑隧道施工引起的路面不平整 (即假定 AA' 方向上的既有路面绝对平整), BB' 方向上的沉降曲线假定为近似正态分布曲线 (符合 Peck 公式), 则根据式 (7) 和图 3, 仅考虑新建隧道施工影响引起的公路路面的纵轴线方向上的路面曲线可表述为

$$y = -\cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right). \quad (8)$$

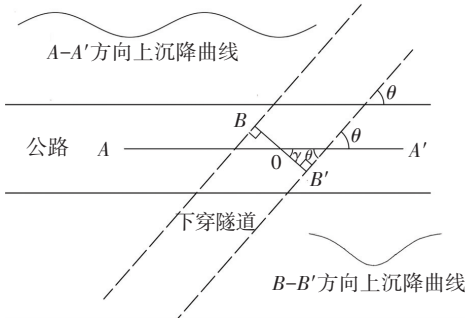


图 3 公路与下穿隧道相交示意图

Fig.3 Schematic diagram of intersection between highway and under crossing tunnel

记汽车到达最大沉降点处的时间 t 为 0, 将式 (2) 代入式 (8), 得

$$y = -\cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right). \quad (9)$$

对式 (9) 两边同时对时间 t 求导, 可得

$$v_y = \cos\gamma S_{\max} \frac{v^2 t}{i^2} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right), \quad (10)$$

其中 v_y 为车辆竖直方向上的速度. 对式 (10) 两边同时对时间 t 求导, 有

$$a_y = \cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right) \left(\frac{v^2}{i^2} - \frac{v^4 t^2}{i^4}\right), \quad (11)$$

其中 a_y 为车辆竖直方向上振动加速度. 由图 3 可知, γ 与 θ 互余, 故式 (11) 可表述为

$$a_y = \sin\theta S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right) \left(\frac{v^2}{i^2} - \frac{v^4 t^2}{i^4}\right), \quad (12)$$

对式 (12) 两边同时对时间 t 求导, 可得到竖直加速度的导数为

$$a_y' = -\sin\theta S_{\max} \left(\frac{v^4}{i^4}\right) \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right) \left[t\left(3 - \frac{v^2 t^2}{i^2}\right)\right]. \quad (13)$$

令 $a_y' = 0$, 可求得 a_y 达到极值时 t 的值为

$$t = 0, \quad (14)$$

$$t = \pm\sqrt{3} \frac{i}{v}. \quad (15)$$

注意本分析过程将汽车到达最大沉降点处的时间记为 0, 故 t 为负表示汽车达到最大沉降点前的时

间. 将式 (14)、(15) 分别代入式 (12), 有

$$a_y \Big|_{t=0} = \sin\theta S_{\max} \frac{v^2}{i^2}, \quad (16)$$

$$a_y \Big|_{t=\pm\sqrt{3}\frac{i}{v}} = -\sin\theta S_{\max} \frac{v^2}{i^2} 2\exp(-1.5) \approx -0.45\sin\theta S_{\max} \frac{v^2}{i^2}. \quad (17)$$

因为 a_y 是矢量, 其正负号代表不同方向, 对比式 (16)、(17) 的绝对值可知当 $t = 0$ 时 (即最大沉降处) 车辆竖直方向上振动加速度取得最大值, 最大值可表述为

$$a_{y\max} = \sin\theta S_{\max} \frac{v^2}{i^2}. \quad (18)$$

2.3 既有公路路面不平整度和隧道施工的叠加影响

本小节讨论既有公路路面不平整度和隧道施工的叠加引起的车辆竖直方向上的振动加速度的评价方法. 如图 3 所示, 假定 AA' 方向上的路面曲线为正弦曲线, BB' 方向上的沉降曲线为近似正态分布曲线 (符合 Peck 公式). 如前文所述, 式 (5) 表明, 对于正弦波公路路面仅考虑路面不平整度时, 车辆竖直方向上振动加速度在正弦波的波峰或波谷处达到最大值; 式 (16)、(17) 表明, 仅考虑隧道施工引起的路面沉降时, 车辆竖直方向上振动加速度在最大沉降处达到最大值. 因此, 当正弦曲线的波谷与沉降曲线的最低点重合时, 二者引起的竖向振动加速度大小均取得最大值, 且方向一致均, 为二者最不利组合. 考虑这二者的叠加效应和二者的最不利组合, 则根据式 (1) 和式 (7), 考虑新建隧道施工影响的公路路面的纵轴线方向上的路面曲线可表述为

$$y = A \sin\left(2\pi \frac{x + \frac{3}{4}L}{L}\right) - \cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right). \quad (19)$$

将式 (2) 代入式 (19), 得

$$y = A \sin\left(2\pi \frac{vt + \frac{3}{4}L}{L}\right) - \cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right). \quad (20)$$

注意式 (19) 是基于 $x = 0$ 为曲线最低点建立的坐标系, 即式 (20) 中汽车到达曲线最低点的时间 t 为 0. 对式 (20) 两边同时对时间 t 求导, 可得

$$v_y = \frac{2\pi v A}{L} \cos\left(2\pi \frac{vt + \frac{3}{4}L}{L}\right) + \cos\gamma S_{\max} \left(\frac{v^2 t}{i^2}\right) \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right), \quad (21)$$

其中 v_y 为车辆竖直方向上的速度. 对式 (21) 两边同

时对时间 t 求导,有

$$a_y = -\frac{4\pi^2 v^2 A}{L^2} \sin\left(2\pi \frac{vt + \frac{3}{4}L}{L}\right) + \cos\gamma S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right) \left(\frac{v^2}{i^2} - \frac{v^4 t^2}{i^4}\right), \tag{22}$$

其中 a_y 为车辆竖直方向上振动加速度. 由图 3 可知, γ 与 θ 互余, 故式(22)可表述为

$$a_y = -\frac{4\pi^2 v^2 A}{L^2} \sin\left(2\pi \frac{vt + \frac{3}{4}L}{L}\right) + \sin\theta S_{\max} \exp\left(-\frac{v^2 t^2}{2i^2}\right) \left(\frac{v^2}{i^2} - \frac{v^4 t^2}{i^4}\right). \tag{23}$$

根据前文的分析可知,当 $t = 0$ 时,式(23)中的前后两项同时达到最大值,即在曲线最低点的竖向振动加速度最大,这显然和人们乘车体验一致. 因此,同时考虑既有公路路面不平整度和隧道施工的影响的叠加效应和二者的最不利组合时,行车竖向振动加速度最大值可表述为

$$a_{y\max} = \frac{4\pi^2 v^2 A}{L^2} + \sin\theta S_{\max} \frac{v^2}{i^2}. \tag{24}$$

3 路面沉降控制基准确定

正如前文所述,竖直方向振动加速度选为行车舒适性指标,而加速度值 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) 与人体主观感觉的关系^[11,22]为: 小于等于 0.315, 没有不舒服; 0.315 ~ 0.565, 稍有不舒适; 0.565 ~ 0.9, 有些不舒服; 0.9 ~ 1.425, 不舒适; 1.425 ~ 2.25, 很不舒适; 大于 2.25, 极不舒适. 当通过式(6)、(18)、(24) 得到车辆最大竖直方向上振动加速度 $a_{y\max}$ 后,对照加速度与人体主观感觉的关系,可得到仅考虑既有公路路面不平整度的影响、仅考虑隧道施工的影响、考虑二者叠加影响下的行车舒适度.

从前述加速度与人体主观感觉的关系可知,加速度部分区间重叠,为了便于使用将重叠部分改取中间值,如 0.315~0.63 与 0.5~1.0 有重叠区间,因而改为 0.315~(0.63+0.5)/2 与 (0.63+0.5)/2~1.0, 具体修正如下: 小于等于 0.315, 没有不舒服; 0.315 ~ 0.565, 稍有不舒适; 0.565 ~ 0.9, 有些不舒服; 0.9 ~ 1.425, 不舒适; 1.425 ~ 2.25, 很不舒适; 大于 2.25, 极不舒适.

若不考虑既有公路路面平整度的影响,式(18)可变形为

$$S_{\max} = \frac{a_{y\max} i^2}{\sin\theta v^2}. \tag{25}$$

若考虑既有公路路面平整度的影响,式(24)可

变形为

$$S_{\max} = \left(\frac{a_{y\max}}{v^2} - \frac{4\pi^2 A}{L^2}\right) \frac{i^2}{\sin\theta}. \tag{26}$$

从修正的加速度与人体主观感觉的关系中选定加速度控制标准,代入式(25)或式(26),可得到路面沉降控制基准.

4 算例

4.1 算例 1

本算例仅考虑既有公路路面不平整度的影响,以高等级公路为例,介绍式(6)的使用方法. 对于高等级公路,其波长 L 一般较长,在此假定为 30、40、50 m;车速 v 分别假定为 60、80、100、120 km/h;高等级公路的幅值为 5~100 mm^[19],在此振幅 A 分别假定为 5、20、40、60、80、100 mm.

根据式(6)可计算出车辆的最大竖直方向上振动加速,结果见图 4.

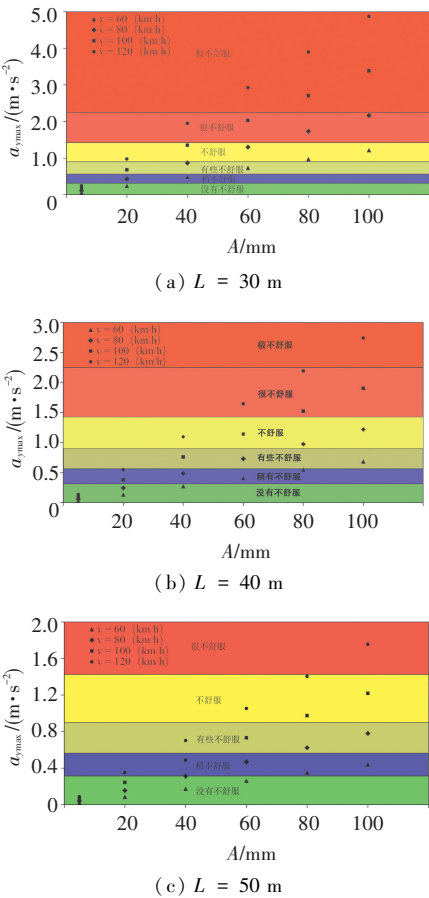


图 4 行车舒适性与振幅、行车速度的关系(算例 1)

Fig.4 Relationship between driving comfort, amplitude, and driving speed (Case 1)

图 4 清晰地表明:1) 行车舒适性与路面振幅成反比,与行车速度成反比,与波长成正比;2) 对于特定的波长和振幅,提高行车舒适性的方法是控制行车速度;3) 对于特定波长和行车速度,提高行车舒

适性的方法是减小振幅;4)对于特定振幅和行车速度,提高行车舒适性的方法是增大波长。 L 分别取30、40、50 m, A 取5~100 mm, v 取60~120 km/h,根据式(6)计算 $a_{y\max}$,将它们的关系绘成三维图(图5)。图5可以进一步直观地表明了 $a_{y\max}$ 与 A 成正比关系,与 v 成正比关系,与 L 成反比关系。将修正的加速度与人体主观感觉的关系中“有些不舒服”与“不舒服”的分界线(面) $a_y = 0.9 \text{ m/s}^2$ 也绘制在图5中,即图5中的“有些不舒服平面”,这样通过图5可以大致看出当 L 分别取30、40、50 m时,不同的 v 和 A 组合对应的行车舒适性是位于“有些不舒服平面”以下还是以上。

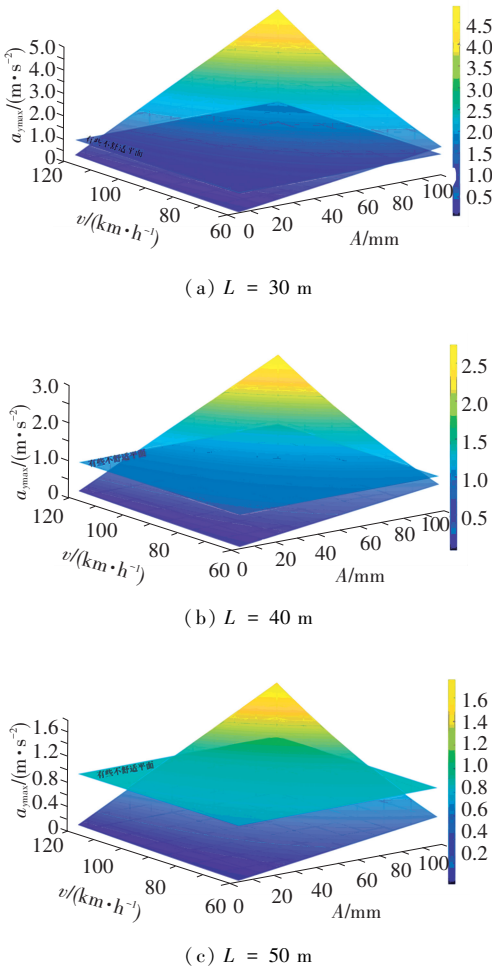


图5 $a_{y\max}$ 与路面振幅、行车速度的关系(算例1)

Fig.5 Relationship between the maximum vertical vibration acceleration, amplitude, and driving speed (Case 1)

4.2 算例2

本算例仅考虑隧道施工的影响,介绍式(18)的使用方法。由式(18)可知,获得行车最大竖直方向上的振动加速度的关键是隧道施工引起的沉降槽形态特征参数 $S_{\max}$ 和 i ,本算例 $S_{\max}$ 和 i 的数据采用文献[23]拟合实测数据得到的地铁隧道施工引起的路面沉降槽形态特征参数(表1)。

表1 某隧道施工引起的地面沉降槽的形态参数^[23-24]

Tab.1 Morphological parameters of ground settlement trough caused by construction of a tunnel^[23-24]

断面编号	隧道埋深 H/m	$S_{\max}/\text{mm}$	i/m
1	6.09	55.15	4.35
2	8.37	55.70	4.64
3	9.78	42.39	4.77
4	10.37	37.51	5.39
5	11.37	30.16	6.40
6	12.72	24.51	9.34

隧道与公路的夹角 θ 分别假定为30、60、90°,车速 v 分别假定为60、70、80、90、100、110、120 km/h,将表1中的数据代入到式(18)进行计算,计算结果见图6。由图6可知不同隧道与公路夹角、不同行车速度在不同埋深断面处的行车舒适性。图6也表明行车舒适性与行车速度成反比,与隧道和公路夹角成反比。

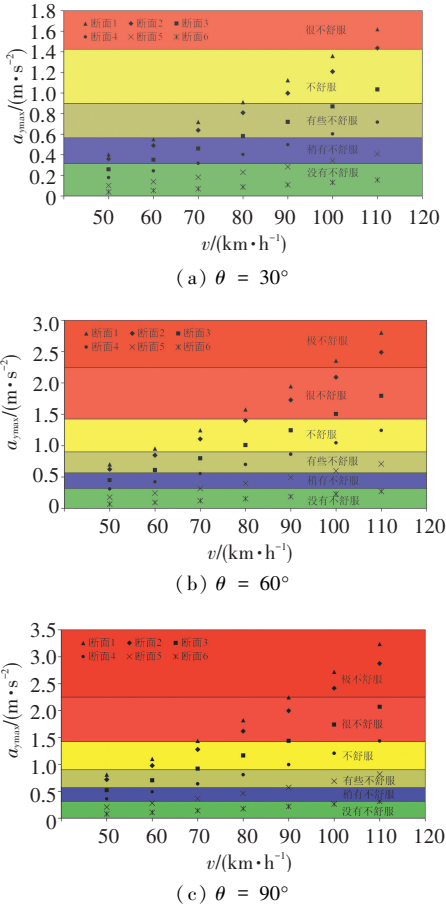


图6 行车舒适性与行车速度的关系(算例2)

Fig.6 Relationship between driving comfort and driving speed (Case 2)

对于同一地层在不同埋深建设同一尺寸的隧道,显然埋深越大对地面的影响越小,对行车舒适性影响越小。为了进一步定量研究隧道埋深与行车舒适性的关系,根据表1拟合出 i 与 H 和 $S_{\max}$ 与 H 的关系为

$$i = 0.040\ 2H^3 - 0.945\ 2H^2 + 7.413\ 6H - 14.82\ 6,$$

(27)

$$S_{\max} = 0.420\ 7H^3 - 12.488H^2 + 114.02H - 271.04.$$

(28)

它们的拟合相关系数均等于 0.999,可见拟合效果非常好. 将式(27)、(28)分别代入到式(18)中,埋深 H 取 6 ~ 15 m,车速 v 取 60 ~ 120 km/h,对于不同的 θ (分别取 30°、60°、90°)可以作出 $a_{y\max}$ 与 H 和 v 的三维关系图,结果见图 7.

图 7 可以进一步直观地表明 $a_{y\max}$ 与 H 成反比关系,与 v 成正比关系. 将修正的加速度与人体主观感觉的关系中“有些不舒服”与“不舒适”的分界线(面) $a_y = 0.9\ \text{m/s}^2$ 也绘制在图 7 中,即图 7 中的“有些不舒服平面”,这样通过图 7 可以大致看出对于不同的 θ ,不同的 H 和 v 组合对应的行车舒适性是位于“有些不舒服平面”以下还是以上.

4.3 算例 3

本算例介绍如何利用式(26)确定新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准值问题. 假定有一条运营高速公路,其设计时速 $v = 120\ \text{km/h}$,路面纵断面曲线服从正弦曲线,波长 $L = 50\ \text{m}$,振幅 $A = 15\ \text{mm}$;现新建一条圆形隧道下穿该高速公路,隧道埋深 $H = 10\ \text{m}$,断面直径为 12 m;高速公路与隧道纵轴线方向(走向)夹角 $\theta = 60^\circ$. 假定沉降槽曲线遵从 Peck 公式,沉降槽宽度系数 i 服从国内外应用较多的公式^[21, 25]:

$$i = 0.575H^{0.9}D^{0.1}.$$

(29)

将以上数据代入式(25)、(26)可以得到考虑和不考虑既有公路的不平整度时不同舒适性控制标准下允许的最大沉降值,结果见表2.为了对比,将

低于设计行车速度 ($v = 100\ \text{km/h}$ 和 $v = 80\ \text{km/h}$) 的计算结果也列入了表 2 中.

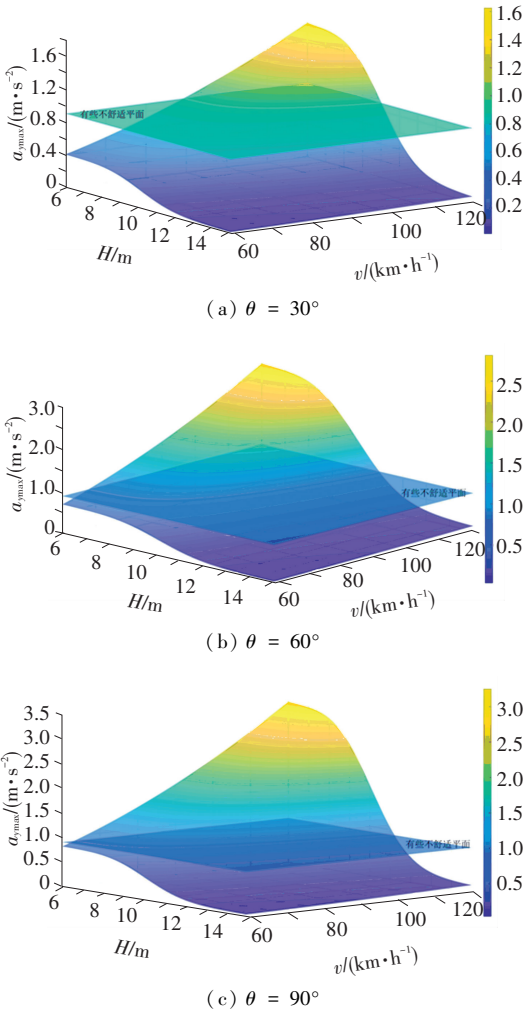


图 7 $a_{y\max}$ 与隧道埋深、行车速度的关系(算例 2)

Fig. 7 Relationship between the maximum vertical vibration acceleration, tunnel depth, and driving speed (Case 2)

表 2 不同行车速度允许的最大沉降值(算例 3)

Tab.2 Maximum allowable settlement with respect to different driving speeds (Case 3)

行车舒适性 控制标准	$a_{y\max} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	$S_{\max} / \text{mm}$					
		$v = 120\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$		$v = 100\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$		$v = 80\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	
		不考虑	考虑	不考虑	考虑	不考虑	考虑
没有不舒服	0.315	11.2	1.8	16.2	6.8	25.3	15.9
稍有不舒服	0.565	20.1	10.8	29.0	19.6	45.3	35.9
有些不舒服	0.900	32.1	22.7	46.2	36.8	72.2	62.8
不舒适	1.425	50.8	41.4	73.1	63.7	114.3	104.9
很不舒适	2.250	80.2	70.8	115.5	106.1	180.4	171.0
极不舒服	> 2.250	> 80.2	> 70.8	> 115.5	> 106.1	> 180.4	> 171.0

注:不考虑是指不考虑既有公路的不平整度;考虑是指考虑既有公路的不平整度.

表 2 表明:1) 当 $v = 120\ \text{km/h}$ 时,随着行车舒适性控制标准放宽松,允许的最大沉降值逐渐增大,不考虑既有公路的不平整度时由 11.2 mm 增大到

80.2 mm,而考虑则由 1.8 mm 增大到 70.8 mm;2) 若将“有些不舒服”选为行车舒适性控制标准,不考虑和考虑既有公路的不平整度时,则新建隧道引起的

路面沉降控制标准分别为 32.1 mm 和 22.7 mm,故不考虑会带来 41.4% 的偏差;3) 若将行车速度限制在 100 km/h 时,同样将“有些不舒服”选为行车舒适性控制标准,则不考虑和考虑既有公路的不平整度时沉降控制标准分别为 46.2 mm 和 36.8 mm,较以设计时速行驶时分别提高了 43.9% 和 62.1%;4) 若将行车速度限制在 80 km/h 时,同样选择“有些不舒服”为行车舒适性控制标准,则不考虑与考虑既有公路的不平整度时新建隧道引起的路面沉降控制标准分别为 72.2 mm 和 62.8 mm,较以设计时速行驶时分别提高了 124.9% 和 176.7%;5) 新建隧道引起的路面沉降控制标准制定时应考虑既有公路的不平整度和行车速度,放宽沉降控制标准有效的方法是适当地降低行车速度。

5 结 论

1) 针对新建隧道引起的路面沉降控制基准问题,本文从行车舒适性控制标准为出发点,提出了一个较完整的解决方案,最终给出了行车最大竖直方向振动加速度 $a_{y_{\max}}$ 的计算公式和路面沉降控制基准确定公式。

2) 该方案在考虑了既有路面平整度和隧道施工引起的沉降槽曲线形态的基础上,还考虑了隧道与公路的相交角度与行车速度的影响,比较符合工程实际。

3) 行车舒适性与既有公路纵断面曲线的波长成正比,与振幅成反比,与路面沉降槽宽度系数成正比,与隧道中心线处路面最大沉降值成反比,与行车速度的平方成反比例。

4) 通过适当降低行车速度是放宽沉降控制基准的有效方法。

参考文献

- [1] 张鹏,谭忠盛. 浅埋隧道下穿公路引起的路面沉降控制基准[J]. 北京交通大学学报,2008,32(4):137
ZHANG Peng, TAN Zhongsheng. Pavement settlement standard induced by shallow buried tunnel to under-traverse highway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(4): 137
- [2] 朱正国,黄松,朱永全. 铁路隧道下穿公路引起的路面沉降规律和控制基准研究[J]. 岩土力学,2012,33(2):558
ZHU Zhengguo, HUANG Song, ZHU Yongquan. Study of road surface settlement rule and controlled criterion for railway tunnel under-crossing highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 558
- [3] 赵岩. 基于高速公路舒适性的不均匀沉降标准研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2011,35(6):1245
ZHAO Yan. Study on the standard of non-even settlement for driving comfortableness of expressway[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(6): 1245
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国公路交通学术研究综述·2012[J]. 中国公路学报,2012,25(3):2
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. An academic research summary on highway and transport; 2012[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 2
- [5] 毛远凤,沈宇鹏,马建南,等. 地铁盾构下穿高速公路的路面变形特征分析[J]. 铁道标准设计,2013(8):84
MAO Yuanfeng, SHEN Yupeng, MA Jiannan, et al. Feature analysis of express highway pavement's deformation caused by metro shield tunneling under the express highway[J]. Railway Standard Design, 2013(8): 84
- [6] 赵方青. 石太铁路下穿高速公路浅埋暗挖施工[J]. 路基工程,2005(2):44
ZHAO Fangqing. Shallow buried excavation construction of expressway under Shitai railway[J]. Subgrade Engineering, 2005(2): 44
- [7] 崔蓬勃,陈晶晶. 高速铁路隧道下穿高速公路地表沉降影响分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报,2015(2):21
CUI Pengbo, CHEN Jingjing. Analysis on influence of ground surface settlement on highway with high-speed railway tunnel passing below[J]. Journal of Jiangsu Jianzhu Institute, 2015(2): 21
- [8] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: State of the Art Report, 1969: 225
- [9] 程兴新,王选仓,高志伟. 基于路面破坏响应的差异沉降控制标准[J]. 长安大学学报(自然科学版),2010(5):31
CHEN Xingxin, WANG Xuancang, GAO Zhiwei. Control criterion of subgrade differential settlement based on pavement damage response[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010(5): 31
- [10] 许伦辉,宋聪聪. 基于加速度干扰的路面平整度评价与行车舒适性研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(2):116
XU Lunhui, SONG Congcong. A study on evaluation of pavement roughness and riding comfort based on acceleration noise model[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(2): 116
- [11] 北京理工大学,北京航天医学工程研究所,中国铁道科学研究院. 1997 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价: ISO 2631-1[S]. 北京: 中国标准出版社,2007
Beijing Institute of Technology, Beijing Aerospace Medical Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science. 1997 Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration; ISO 2631-1[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007
- [12] 王雪如. 基于乘车舒适性的高速公路路面平整度评价方法研究[D]. 北京: 北京工业大学,2014
WANG Xueru. A study on evaluation method of expressway pavement roughness based on riding comfort theory[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014
- [13] 王锋,张金喜,苏蕊蕊. 基于舒适性考虑的波浪形减速路面设计方法研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2012,40(5):651
WANG Feng, ZHANG Jinxi, SU Ruiwei. Study on design method of wave-shape pavement based on riding comfort[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 651
- [14] SAYERS M W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile[J]. Transportation Research Record, 1995(1501): 1