

基于舒适性的软土地区公路行驶质量评价方法

陈仁朋^{1,2†}, 朱建宇¹, 姜正晖³, 贾瑞雨⁴

- (1. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058;
2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006;
4. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要:针对软土地基公路工后沉降大、分布范围广, 现有国际平整度指数 IRI 评价方法存在很大局限性的问题, 提出了基于行车舒适性的软土地区公路行驶质量评价方法. 首先采用五自由度 1/2 车辆模型, 计算比较了道路纵面线形拟合方法和数据间距对车辆振动加速度计算结果的影响, 获得了车辆振动的加权加速度均方根值; 根据 ISO2631 振动舒适性标准提出评价司乘人员的舒适性 DCI 和 RQI 计算公式及参数取值; 结合软土地基及非软土地基两种路段沉降情况, 比较了本文方法与国际平整度指数 IRI 方法评价结果的区别. 分析发现, 在非软土地基公路, 本文方法与 IRI 方法评价结果接近; 而在软土地基公路, 两者的结果差异较大, 本文方法更加符合工程师的直观感觉.

关键词:道路安全工程; 沉降; 评价方法; 车辆-道路相互作用

中图分类号:U412.33

文献标志码:A

Evaluation Method of Driving Quality of Roads Constructed in Soft Soil Area Based on Driving Comfort

CHEN Renpeng^{1,2†}, ZHU Jianyu¹, JIANG Zhenghui³, JIA Ruiyu⁴

- (1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering (Zhejiang University) of the MOE, Hangzhou 310058, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China;
4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design & Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: The post-construction settlement of road constructed on soft ground is significant and widespread. The current international roughness index (IRI) subjects some limitations. Hence, based on the driving comfortableness, this study proposed an assessment method for driving quality of roads on soft ground. Firstly, the influences of fitting methods and the distance of fitting points on the vehicle vibration acceleration were evaluated by five-degree 1/2 vehicle-road interaction model. The weighted root mean square of vehicle acceleration was thus obtained. Secondly, based upon the standard for vibration comfortableness (ISO2631), the equations for DCI and RQI for assessing the

* 收稿日期:2019-05-07

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0800207), National Key R&D Program of China(2016YFC0800207); 国家自然科学基金资助项目(41472244), National Natural Science Foundation of China(41472244)

作者简介:陈仁朋(1972—), 男, 浙江衢州人, 湖南大学教授, 浙江大学兼职教授

† 通讯联系人, E-mail: chenrp@hnu.edu.cn

comfortableness of driver and passenger were developed. Finally, on the basis of two scenarios of soft ground and non-soft ground, the evaluation results calculated from the methods in this study and IRI were compared. The results demonstrate that, in the non-soft ground, the results are similar. In contrast, the results in soft ground are quite different, and the methods proposed in this study are more in line with the engineers' visual sense.

Key words: road safety engineering; settlement; evaluation method; vehicle-road interaction

由于软土压缩性高,软土地基公路在通车后往往会发生较大的沉降和不均匀沉降,并随着养护加铺荷载的增大而进一步增加。过大沉降引起的道路纵面线形变差不仅会影响车辆行驶的舒适性,严重时危及行车安全。针对公路行驶质量,目前许多研究着重于公路局部路面不平整状况,忽略了公路长距离范围沉降的影响。根据我国现行规范,表征路面状况的指标是平整度指标^[1-2],其中以国际平整度指数 IRI 应用最广泛。但 Mactutis 等^[3],Papagiannakis 等^[4]、以及 Todd 等^[5]认为国际平整度指数 IRI 与行驶舒适性不具有很好的相关性;Yu 等^[6]和 Liu 等^[7]认为 IRI 的分级临界值并不适用于所有等级的公路。实际工作中也发现采用平整度方法评价纵面线形变化较大但局部较为平整的路段,其结果与驾乘感受有较大出入。

许多学者在国际平整度指数 IRI 方法之外进行了有益的探索。王崇涛^[8]以瞬时加权加速度为评价指标,提出了不同车速下路桥过渡段最大容许沉降量和最大容许纵坡变化值。高志伟^[9]采用车辆-路面耦合模型提出了基于车辆行驶平顺性的公路软基过渡段沉降控制标准。苏曼曼^[10]利用动力学仿真软件建立了桑塔纳和东风货车整车模型,提出了沥青道路一般路段和路桥过渡段的平整度仿真评价方法和实测评价方法。

另外,还有许多学者从沉降值的角度出发,分析沉降值与行车舒适性的关系。邓露等^[11]研究认为各等级公路的路桥过渡段差异沉降应该控制在 1.5~4 cm 之间;Long 等^[12]提出当坡差超过 0.8%~1.0%时,差异沉降对行车舒适性有较大影响。

总的来说,现有研究局限于局部路段的评价(比方说路桥过渡段),缺乏对公路整体线形的把握,并且没有提出系统且便于实际操作的方法。因此,本文引入 ISO2631 标准^[13]中加权加速度均方根值和人体舒适程度的对应关系,采用五自由度 1/2 车辆模型^[14]

模拟计算车辆在道路上行驶产生的振动加速度。在此基础上,提出了基于行车舒适性的软土地区公路行驶质量评价方法,并采用试验对比的方式验证了其合理性。

1 纵面线形拟合方法和数据间距分析

本文提出的沉降评价方法在计算时需要连续的公路纵面线形。但车载激光仪提供的实测路面高程是基于一定纵向间距采集的离散数据点,所以需要在兼顾效率和准确性的前提下,使用合适的方法对其进行拟合。一般来说,由于龙格现象^[15]等弊端,不宜采用多项式插值法对离散的高程数据进行拟合。下面主要分析分段线性插值法、三次样条插值法和分段 Hermite 插值法这 3 种分段低次插值法的拟合效果。

以杭金衢 K2~K7 路段为例^[6],对纵向数据点间距分别为 1 m、2 m、4 m、8 m、16 m 的 5 种情况分别采用 3 种分段低次插值方法拟合得到纵面线形。之后,采用长安微型汽车模型参数,以 120 km/h 的行驶速度分别计算车辆在 3 种拟合公路纵面线形上行驶时的振动加速度。计算结果如图 1~3 所示。

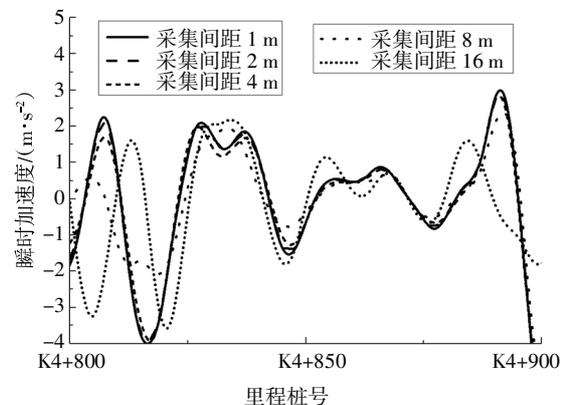


图 1 分段线性插值法拟合结果计算的车辆振动加速度
Fig.1 Vehicle acceleration calculated according to the result of piecewise linear interpolation method

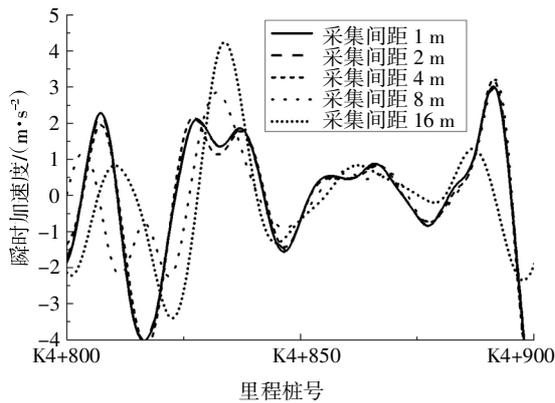


图2 分段 Hermite 插值法拟合结果计算的车辆振动加速
Fig.2 Vehicle acceleration calculated according to the result of piecewise hermite interpolation method

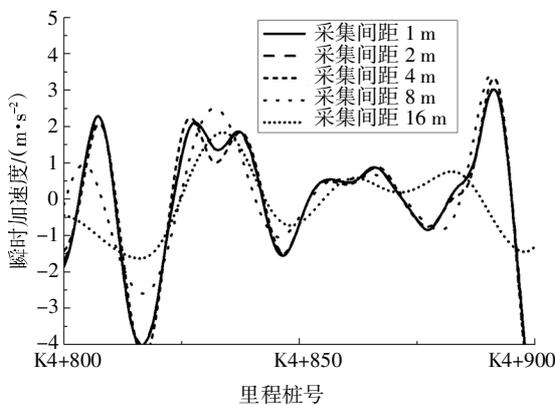


图3 三次样条插值法拟合结果计算的车辆振动加速
Fig.3 Vehicle acceleration calculated according to the result of cubic spline interpolation method

2 实测数据与计算加权加速度均方根值的对比

为了验证采用五自由度 1/2 车辆模型计算车辆振动加速度的准确性, 本文在两个桥头路段进行了现场实验^[17]. 现场实验结果与理论计算结果对照可以验证本文采用五自由度 1/2 车辆模型计算车辆振动加速度的准确性. 其中理论计算结果基于达朗贝尔原理计算得到^[16].

验证五自由度 1/2 车辆模型的合理性主要是验证假设的合理性. 由于假设不涉及具体的车长和车重等具体参数, 所以本文选取别克轿车(君越)与吉普车(指南者)作为实验车辆. 实验车辆的主要参数如表 1 所示. 由于无法准确获取车辆轮胎、座椅和悬挂系统的等效阻尼系数和等效刚度系数, 所以这些系数按照长安微型汽车模型的相关数值选取, 轴距、自重等则按照实验车辆的自身数据选取.

表 1 实验车辆基本参数

Tab.1 Basic parameters of experimental vehicles

测试车型	(长/宽/高)/mm	整车质量/kg	轴数	轴距/mm	轮距(前/后)/mm
吉普轿车	4 465/1 812/1 663	1 544	2	2 635	1 520/1 520
别克轿车	5 018/1 866/1 459	1 510	2	2 905	1 599/1 602

别克轿车和吉普车以 50 km/h 的速度依次通过北桥和南桥, 测得两辆车前排座椅的瞬时加速度. 图 4 和图 5 是瞬时加速度时程曲线的实测值与理论值. 实测的别克轿车通过北桥和南桥的瞬时加速度峰值为 11.06 m/s² 和 7.83 m/s², 计算值分别为 8.97 m/s² 和 7.51 m/s². 实测的吉普车通过北桥和南桥的瞬时加速度峰值分别为 8.1 m/s² 和 6.07 m/s², 计算值分别为 9.21 m/s² 和 7.79 m/s². 从图 4 和图 5 可以看出, 实测值与计算值在趋势上基本吻合.

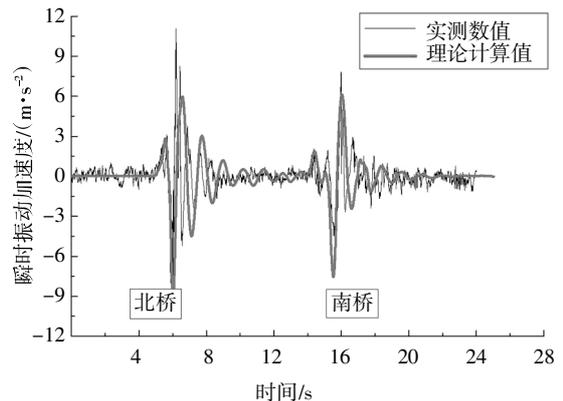


图4 别克轿车计算加速度与实测加速度的对比
Fig.4 Comparison of calculated and measured acceleration values of Buick

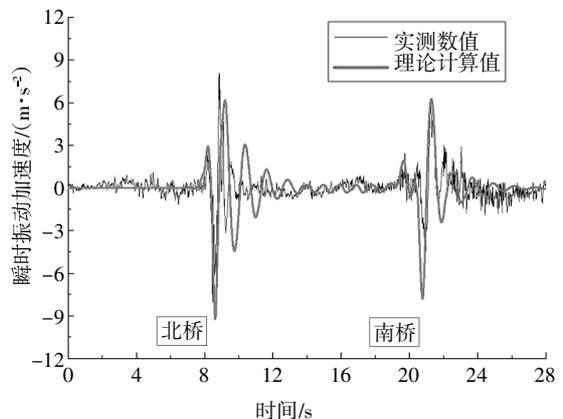


图5 吉普车计算加速度与实测加速度的对比
Fig.5 Comparison of calculated and measured acceleration values of Jeep

由于本文的评价方法是基于加权加速度均方根值进行的,所以需要进一步比较实测和计算的加权加速度均方根值之间的差异.将别克轿车和吉普车以 20 km/h、30 km/h、40 km/h 和 50 km/h 速度通过北桥时实测的振动加速度和计算振动加速度转换成加权加速度均方根值,并取其峰值进行比较,如图 6 和图 7 所示.从图可以看出,不论是别克轿车还是吉普车,在通过北桥时实测的加权加速度均方根值峰值与计算值都非常接近.在 4 种行驶速度下,实测值与计算值的平均绝对差异为 0.39 m/s².总体来说,采用五自由度 1/2 车辆模型计算车辆振动加速度可以满足评价要求.

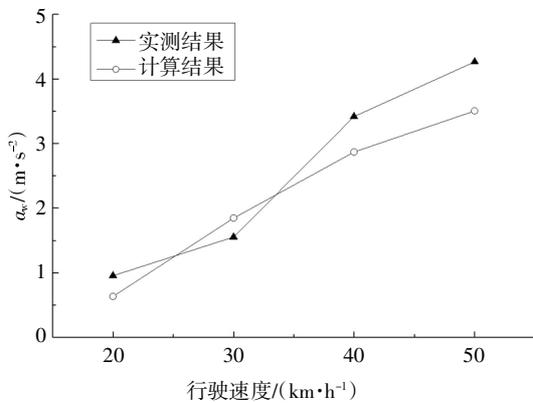


图 6 别克轿车计算值与实测加权加速度均方根值的对比
Fig.6 Comparison of calculated and measured weighted-root-mean square acceleration values of buick

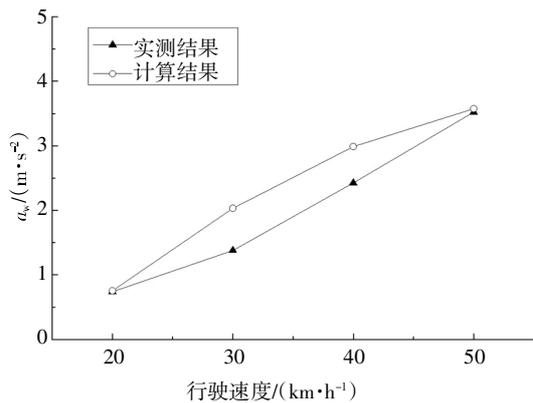


图 7 吉普车计算值与实测加权加速度均方根值的对比
Fig.7 Comparison of calculated and measured weighted-root-mean square acceleration values of Jeep

3 整体行驶质量评价方法

3.1 基于舒适性的整体沉降评价基本思路

图 8 为基于行车舒适性进行公路行驶质量评价的过程.首先利用车载激光仪检测公路纵面高程数

据,然后采用分段线性插值法拟合离散的高程数据,使之成为连续的公路纵面线形.采用车辆-道路相互作用分析模型求解瞬时振动加速度,再根据 ISO2631 标准计算加权加速度均方根值.

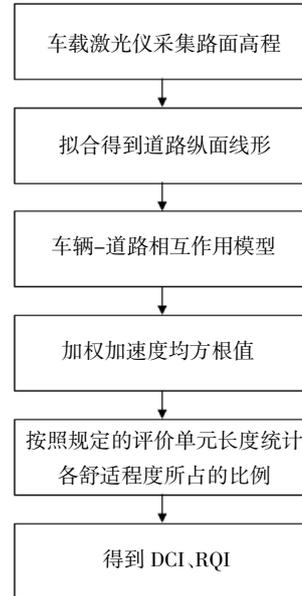


图 8 基于行车舒适性的公路行驶质量评价过程
Fig.8 Evaluation methods of diving quality based on driving comfort

根据 ISO2631 标准,按照选定的评价单元,统计每一评价单元内加权加速度均方根值对应的不同舒适程度所占的比例 n_i . ISO2631 标准规定的不同舒适程度对应的加权加速度均方根值范围有重合.为了便于应用,对不同舒适程度对应的加权加速度均方根值范围重合的部分取其中间点作为分界点,见表 2.

表 2 分割后加权加速度均方根值与行车舒适性的关系
Tab.2 Relationship between weighted RMS acceleration and driving comfort after being segmented

加权加速度均方根值 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	人体舒适程度
<0.315	保持舒适
0.315~0.565	稍不舒适
0.565~0.9	有些不舒适
0.9~1.425	不舒适
1.425~2.25	非常不舒适
>2.25	特别不舒适

在得到不同舒适程度所占比例的基础上,计算行车舒适性指数 DCI、行驶质量指数 RQI,得到评价结果.本文提出 DCI 代替平整度方法中的 IRI 来进

行道路行驶质量评价. 国际平整度指数 IRI 是 1/4 车辆模型以 80 km/h 行驶产生的累积竖向位移值, 单位为 m/km. 本文提出 DCI 指标来综合表征在某一个评价单元内不舒适程度的累积情况. 不舒适程度越高的点对不舒适程度累积的贡献越大. 相应地, 在 DCI 的计算公式中, 不舒适程度越高, 其对应的权重也应该越大. 因此, 假设各个不舒适程度对不舒适度累积的贡献应当正比于其不舒适程度. 根据 ISO2631 标准, 不舒适程度可以用加权加速度均方根值表示, 所以取各个不舒适程度所对应的加权加速度均方根值的下限作为其权重系数, 用 ω_i 表示, 具体取值如表 3 所示. 结合不同的舒适程度在某一个评价单元内所占的比例 n_i , 采用加权方法计算单个评价单元内不舒适程度的累积, 如式(1)所示.

表 3 各舒适程度对应的权重系数

Tab.3 Coefficient corresponding to different comfort degrees

人体舒适程度	加权加速度均方根值 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	对应比例 $f/\%$	权重系数 ω_i
保持舒适	<0.315	n_1	0
稍不舒适	0.315~0.565	n_2	0.315
有些不舒适	0.565~0.9	n_3	0.565
不舒适	0.9~1.425	n_4	0.9
非常不舒适	1.425~2.25	n_5	1.425
特别不舒适	>2.25	n_6	2.25

$$DCI = \omega_1 \cdot n_1 + \omega_2 \cdot n_2 + \omega_3 \cdot n_3 + \omega_4 \cdot n_4 + \omega_5 \cdot n_5 + \omega_6 \cdot n_6 \quad (1)$$

3.2 评价过程及实例分析

3.2.1 工程概况

杭金衢高速公路经过杭州、绍兴、金华、衢州等地区, 全长 289 km, 软基路段约 25.5 km, 于 2003 年建成通车. 根据 2012 年对杭金衢高速软基路段老路的沉降检测^[7], 软基路段的月沉降速率最大达 2.58 mm/月, 具体分布情况见表 4.

表 4 杭金衢高速月沉降速率统计表

Tab.4 Monthly statistical table of settlement rate

序号	沉降速率/(mm·月 ⁻¹)	观测点个数	所占比例/%
1	[0, 0.5)	522	54
2	[0.5, 1.5)	236	25
3	[1.5, 2.5)	189	20
4	[2.5, 2.58]	9	1
合计	—	956	100

3.2.2 公路质量评价示例

下面以杭金衢高速软基段 K2~K12 段为例, 说明评价过程.

首先, 根据测得的路面高程数据拟合得到公路纵面线形, 继而求得加权加速度均方根值. 根据表 3 统计出每一评价单元内各舒适性程度所占的比例 n_i . 国检等一般以一公里为一个评价单元, 所以本文也以一公里作为一个评价单元, 将杭金衢高速 K2~K12 段划分为 10 个评价单元. 评价统计结果如表 5 所示. 根据工程实际需要, 对评价单元长度的取值可以更为灵活.

表 5 各舒适程度对应的比例

Tab.5 The proportion of different comfort degrees

(a)前半部分

桩号	保持舒适	稍不舒适	有些不舒适
K2-K3	15.58	27.77	28.57
K3-K4	12.99	32.77	15.98
K4-K5	6.59	16.35	39.26
K5-K6	14.05	19.65	24.58
K6-K7	16.25	41.63	22.91
K7-K8	9.49	44.86	32.50
K8-K9	11.22	60.54	23.34
K9-K10	14.42	33.67	30.90
K10-K11	7.69	44.26	30.44
K11-K12	20.01	26.58	43.59

(b)后半部分

桩号	不舒适	非常不舒适	特别不舒适
K2-K3	22.48	5.59	0.00
K3-K4	25.27	10.26	2.73
K4-K5	22.24	10.99	4.56
K5-K6	24.04	16.65	1.03
K6-K7	11.85	5.53	1.83
K7-K8	12.69	0.47	0.00
K8-K9	4.90	0.00	0.00
K9-K10	17.92	3.10	0.00
K10-K11	13.65	2.43	1.53
K11-K12	3.38	0.00	0.00

根据表 3 和表 5, 结合式(1)可以求出 K2~K12 段的行车舒适性指数 DCI, 如表 6 所示.

表 6 K2-K12 路段的 DCI

Tab.6 DCI of K2-K12

桩号	DCI
K2~K3	53.09
K3~K4	62.86
K4~K5	73.28
K5~K6	67.76
K6~K7	48.72
K7~K8	44.58
K8~K9	36.66
K9~K10	48.60
K10~K11	50.34
K11~K12	36.04

路况越好的公路对应的 DCI 越低,这与一般 DCI 数值越高行驶质量越好的习惯不相符.因此借鉴平整度方法中 RQI 的计算方法,将 DCI 转换为 RQI 进行评价.平整度方法中 RQI^[18]的计算方法如式(2)所示.本文采用 RQI 作为评价指标,计算形式与平整度 IRI 方法一致,如式(3)所示.

$$RQI = \frac{100}{1 + a_0 e^{a_1 \cdot IRI}} \quad (2)$$

$$RQI = \frac{100}{1 + a_0 e^{a_1 \cdot DCI}} \quad (3)$$

对于理想的平直公路,DCI 为 0,对应于平整度方法中 IRI 为 0 的情况,此时 RQI=100/(1+a₀).a₀应当尽量小使得 RQI 接近理想值 100,本文参照《公路技术状况评定标准》将 a₀ 取为 0.026. a₁ 采用试算的方法得到.具体步骤为:工程师们根据主观感受和实验对杭金衢高速和杭宁高速部分路段打分,然后采用试算法使得算出的 RQI 值与打分尽可能一致,从而得到 a₁ 的值为 0.05.

根据式(3)可以计算得到行驶质量指数 RQI,结合表 7,可以给出杭金衢高速 K2-K12 段的评价结果,如表 8 所示.

表 7 RQI 与评价等级的对应关系

Tab.7 Correspondence between RQI and evaluation grade

评价等级	优	良	中	次	差
RQI	≥90	80~90	70~80	60~70	<60

表 8 K2-K12 路段的评价结果

Tab.8 Evaluation results of K2-K12

桩号	RQI	舒适度
K2~K3	73.01	中
K3~K4	62.40	次
K4~K5	49.65	差
K5~K6	56.50	差
K6~K7	77.09	中
K7~K8	80.55	良
K8~K9	86.01	良
K9~K10	77.20	中
K10~K11	75.64	中
K11~K12	86.38	良

4 不同车辆类型对评价结果的影响

不同车辆由于自重和轴距等参数的不同,在经过同一路段时产生的振动加速度必然有所不同.这种不同会对评价计算结果产生影响.本节选取两种车型:长安微型客车和大客车,采用两种车型典型行驶速度(长安微型客车的速度为 120 km/h,大客车的速度为 100 km/h)对杭金衢高速部分路段进行了评价,比较车型对评价结果的影响.

从表 9 可以看出,13 个评价单元中,有 9 个评价单元的评价结果完全一样,占比 69.2%;有 4 个评价单元的评价结果相差一个等级,占比 30.8%;没有评价结果相差超过两个等级的评价单元.因此可以看出,本文方法对于不同的车型有着良好的适应性,在工程中固定采用某种车型(如长安微型汽车)是可以接受的.

表 9 不同车型的评价结果对比

Tab.9 Comparison of evaluation results between different types of vehicles

桩号	大客车	长安微型
K14~K15	中	良
K15~K16	良	良
K16~K17	良	良
K17~K18	中	中
K18~K19	中	良
K19~K20	良	良
K20~K21	中	中
K21~K22	差	差
K22~K23	中	良
K23~K24	次	次
K24~K25	良	良
K25~K26	良	优
K26~K27	优	优

5 与 IRI 方法的比较及合理性说明

根据前文所述, 本文所采用的评价方法比传统 IRI 方法更能反映路面线形的变化. 结合公路变形特点来看, 对于软土路基, 路基沉降大、范围广; 而对于非软土地基, 路基的变形以局部的小变形为主. 结合以上两点, 可以推测, 对于软土地基公路, 使用本文评价方法得到的结果应该与平整度方法得到的结果相差较大; 而对于非软土地基公路相差应该较小.

本节选取杭金衢高速软土路基段 K21~K26 以及非软土路基段 K351~K356 各 5 km 分别使用两种方法进行评价. 软土路基段与非软土路基段的典型沉降后纵面线形如图 9 所示. 可以看到对于非软土地基公路, 沉降后的纵面线形与原设计线形相差不大, 变形以局部小范围为主, 未发生大规模的沉降. 而在软土地基公路发生了较大规模的沉降, 线形凹凸不平, 局部最大沉降达到 0.5 m 以上.

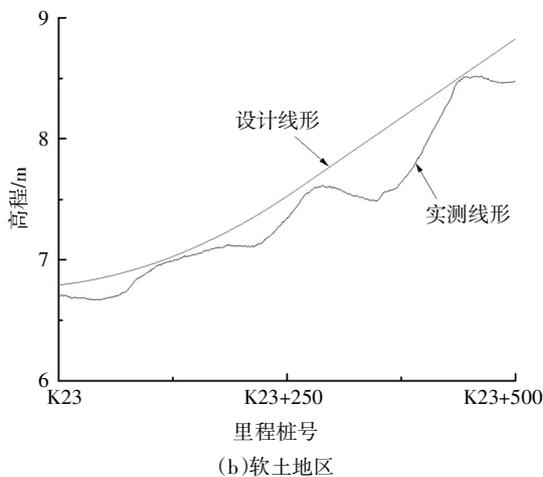
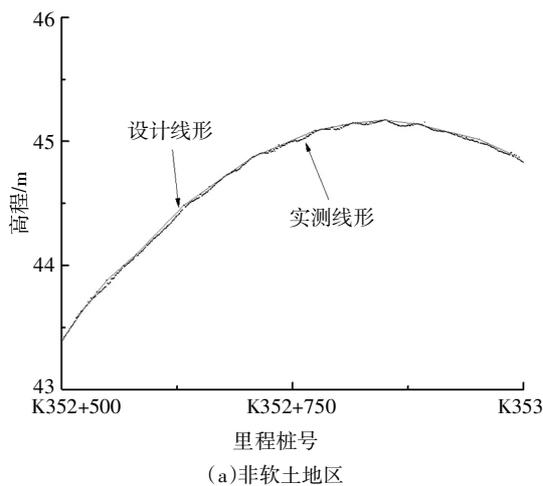


图 9 软土和非软土地区的典型沉降后纵面线形图

Fig.9 Typical alignments after construction in soft and non-soft soil areas

采用本文方法与平整度 IRI 方法评价这两段路面得到的结果见表 10 和表 11. 对软土地基公路, 采用本文评价方法得到的结果与平整度 IRI 方法得到的结果相差大, 本文评价方法得到的结果区分性更好, 与工程经验也更为接近. 对于非软土地基公路, 两种评价方法得到的结果非常接近.

表 10 软土地基路段评价结果对比

Tab.10 Comparison of evaluation results on soft soil

桩号范围	本文评价方法		平整度评价方法 ^[8]	
	RQI	评价结果	RQI	评价结果
K21~K22	53.5	差	94.0	优
K22~K23	82.6	良	93.8	优
K23~K24	60.6	次	94.5	优
K24~K25	86.1	良	95.0	优
K25~K26	91.4	优	94.8	优

表 11 非软土地基路段评价结果对比

Tab.11 Comparison of evaluation results on non-soft soil

桩号范围	本文评价方法		平整度评价方法 ^[8]	
	RQI	评价结果	RQI	评价结果
K351~K352	89.3	良	87.9	良
K352~K353	72.4	中	87.6	良
K353~K354	83.7	良	87.1	良
K354~K355	82.2	良	89.0	良
K355~K356	91.0	优	91.5	优

6 结论

本文研究了基于行车舒适性的软土地区公路行驶质量评价方法. 通过行驶车辆理论模型计算车辆振动的加权加速度均方根值, 根据 ISO2631 振动舒适性标准提出了评价司乘人员的舒适性 DCI 和 RQI 计算公式及参数取值, 比较了本文方法与国际平整度指数 IRI 方法评价结果的区别. 主要研究结论如下:

1) 将加权加速度均方根值作为公路整体行驶质量的评价依据, 提出了软土地基公路整体行驶质量评价的计算方法以及评价标准. 该方法不依赖于测量具体的沉降值, 在软土地区适用性好、实操性强.

2) 将本文提出的基于行车舒适性的公路行驶质量评价方法与既有的 IRI 方法进行了比较. 可以看

出在软土地区本文方法得到的结果与 IRI 方法相差较大,而在非软土地区二者相差不大。

参考文献

- [1] JTJ 073.2—2001 公路沥青路面养护技术规范[S]. 西安:陕西旅游出版社,2001:3.
JTJ 073.2—2001 Technical specifications for maintenance of highway asphalt pavement [S]. Xi'an:Shanxi Travel & Tourism Press,2001:3. (In Chinese)
- [2] JTJ 073.1—2001 公路水泥混凝土路面养护技术规范[S],北京:人民交通出版社,2001:13.
JTJ 073.1—2001 Technical Specifications of cement concrete pavement maintenance for highway [S]. Beijing:China Communication Press,2001:13. (In Chinese)
- [3] MACTUTIS J,ALAVI S,OTT W. Investigation of relationship between roughness and pavement surface distress based on West Track project [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2000 (1699):107—113.
- [4] PAPAGIANNAKIS A,RAVEENDRAM B. International standards organization-compatible index for pavement roughness [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,1998 (1643):110—115.
- [5] TODD K B,KULAKOWSKI B T. Simple computer models for predicting ride quality and pavement loading for heavy trucks [J]. Transportation Research Record,1989 (1215):137—150.
- [6] YU J,CHOU E,YAU J T. Development of speed-related ride quality thresholds using international roughness index [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2006 (1974):47—53.
- [7] LIU C,HERMAN R. Road profile,vehicle dynamics,and ride quality rating[J]. Journal of Transportation Engineering,1999,125 (2):123—128.
- [8] 王崇涛. 路桥过渡段差异沉降与动力响应研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2010:10—22.
WANG C T. Study on differential settlement and dynamic response for bridge-approach [D]. Xi'an:School of Highway,Chang'an University,2010:10—22. (In Chinese)
- [9] 高志伟. 基于行驶平顺性的公路软基过渡段均衡沉降控制研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2012:49—71.
GAO Z W. Balanced settlement control of transition of section on highway soft ground based on ride comfort [D]. Xi'an:School of Highway,Chang'an University,2012:49—71. (In Chinese)
- [10] 苏曼曼. 基于整车模型的沥青路面平整度评价方法研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2014:106—108.
SU M M. Research on asphalt pavement roughness evaluation method based on full-car model [D]. Xi'an:School of Highway,Chang'an University,2014:106—108. (In Chinese)
- [11] 邓露,闫王晨,朱全军. 路桥过渡段容许台阶高度的确定[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(3):100—105.
DENG L,YAN W C,ZHU Q J. Determination of allowable differential settlement between the bridge and the approach embankment[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(3):100—105. (In Chinese)
- [12] LONG J,OLSON S,STARK T,et al. Differential movement at embankment-bridge structure interface in Illinois [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,1998 (1633):53—60.
- [13] ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1:General Requirements [S]. Geneva:International Organization for Standardization,1997:14—16.
- [14] 陈仁朋,贾瑞雨,姜正晖,等. 不均匀沉降条件下车-路相互作用及道路纵面设计分析[J]. 中国公路学报,2017,30(4):1—8+23.
CHEN R P,JIA R Y,JIANG Z H,et al. Analyses of vehicle-road interaction under the condition of uneven settlement and road profile alignment design [J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(4):1—8+23. (In Chinese)
- [15] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:17—18.
LI Q Y,WANG N C,YI D Y. Numerical analysis [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2008:17—18. (In Chinese)
- [16] 贾瑞雨. 基于行车舒适性的高速公路沉降评价和扩建纵面设计研究[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院,2016:58—61.
JIA R Y. Study on expressway settlement evaluation and profile design of extension project based on driving comfort[D]. Hangzhou:College of Civil Engineering and Architecture,Zhejiang University,2016:58—61. (In Chinese)
- [17] 姜正晖. 杭金衢拓宽路面检测报告[R]. 杭州:浙江省交通规划设计研究院,2012:22—31.
JIANG Z H. Detection report of widened road's pavement of Hang-Jinqu highway [R]. Hangzhou:Zhejiang Institute of Transportation Planning and Design,2012:22—31. (In Chinese)
- [18] TG F80.1—2004 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2004:23—33.
JTG F80.1—2004 Quality inspection and evaluation standards for highway engineering [S]. Beijing:China Communication Press,2004:23—33. (In Chinese)