

井周路面病害特性及平整度模型研究

赵全满, 刘瑶, 吴楠, 李志刚, 胡文军

(山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为研究井周路面病害特性及路面平整度模型,对济南市经十东路、新泺大街、天辰路、雪山路总计600处检查井及井周路面展开病害调查,分析病害特性,测试经十东路井周路面及常规路面平整度,基于谐波叠加法构建井周路面及常规路面平整度模型。研究结果表明:检查井及井周路面病害以检查井沉陷及路面裂缝类为主;井周路面病害区域半径一般为0.4~0.8 m;检查井沉陷量一般为0~10 mm,检查井上、下行处沉降差导致的坡度差一般为-1%~1%;经十东路上,常规路面平整度标准差、国际平整度指数、最大间隙值、行驶质量指数和路面功率谱密度分别为0.6 mm、1.02 m/km、3.0 mm、95.2和 $9.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}$,路面行驶质量评价为优,平整度等级为A;而井周路面相应指标分别为6.2 mm、10.3 m/km、35.0 mm、4.5和 $41.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}$,路面行驶质量评价为差,路面平整度等级为B,井周路面平整度状况明显比常规路面差。

关键词:道路工程;井周路面;路面病害;谐波叠加法;平整度

1 前言

城市管网是市政设施的重要组成部分,被喻为“城市的动脉”,而检查井是城市管网必不可少的重要组成部分。目前,中国大多数的检查井为砖砌结构,少数为水泥混凝土、塑料结构,与周围路面结构及材料明显不同,成为道路的薄弱部位。同时,在城市地下管网建设中,受制于其他管网的布置和路幅宽度的影响,有相当数量的检查井位于城市主干路、次干路及支路的道路范围内,在车辆荷载作用下病害频发,常出现检查井沉陷、井盖断裂及井周路面沉陷、开裂、剥落等病害。

检查井及井周路面出现病害后,不仅影响了城市道路的美观,影响市容,而且严重影响行车舒适性,甚至威胁行车安全,造成严重的交通事故。因而有必要对井周路面破坏机理展开研究,目前研究方法以病害调查和数值模拟为主。病害调查方面,分别有学者针对广州、天津、长沙等地的检查井及井周路面病害展开现场调查,划分病害类型和等级,分析病害产生原因,提出相应的防治措施;数值模拟方面,通过建立检查井及井周路面模型,计算井周路面在车辆静荷载作用下

的拉、压、剪应力,揭示其破坏机理,为检查井结构设计和施工提出合理化建议。井周路面破坏后应及时对其进行处治,目前井周路面处治技术方面,研究多集中于高性能材料及新施工技术,高性能材料包括高性能水泥修补材料、复合材料、树脂水泥、纤维水泥混凝土等,并应用于一些实际工程,效果良好;施工工艺方面提出了现浇扩大式检查井加强圈创新施工技术,指出该技术可有效延长井周路面使用寿命,提高行车舒适性。目前,中国检查井结构多以砖砌为主,而欧美、日本、俄罗斯等发达国家90%以上的检查井都已采用塑料预制井。与塑料预制井相比,砖砌结构具有施工进度慢、对周围环境影响大、井体耐久性差、井体易开裂等缺点,因而中国检查井和井周路面破坏问题远远比国外严重得多。

研究井周路面病害时,需对以下3个方面进行探索:①井周路面主要病害形式;②井周路面破坏失效范围;③井周路面平整度状况及其与常规路面的区别,为获得车辆荷载特性奠定基础。因而,该文采用病害调查与理论分析相结合的方法,在检查井及井周路面病害调查的基础上,划分病害类型,分析病害成因,确定井周路面破坏失效范围,基于谐波叠加法构建井

收稿日期:2021-02-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51709160);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2018BEE039);山东建筑大学博士研究生科研基金资助项目(编号:Z0301);山东省住房和城乡建设科技计划项目(编号:2018-K4-01)

作者简介:赵全满,男,博士,副教授。

周路面平整度模型,为车辆经过检查井及井周路面时车辆动载特性、行车舒适性评价、井周路面破坏机理等研究奠定基础,解决井周路面行车舒适性差、易破坏的问题,有效延长道路使用寿命,提升城市整体形象。

2 检查井及井周路面病害调查

检查井病害发展十分迅速,2018年12月济南市世纪大道与凤鸣路交叉口某一检查井完成施工,检查井为砖砌结构,井周路面采用冷补料,施工完成后检查井及井周路面平整度良好。2019年3月调查发现,检查井出现明显沉陷,沉陷量达到5 cm,已严重威胁行车舒适及安全。

调查时,应选取代表城市不同等级、不同使用年限的城市道路展开病害调查,考虑到快速路为立体交叉及控制出入,基本不布置检查井;支路以服务功能为主,交通功能较弱,交通量较小,因而重点调查主干路和次干路。2019年3月对济南市经十东路(主干路,调查300处检查井)、新泺大街(主干路,调查100处检查井)、天辰路(次干路,调查100处检查井)、雪山路(次干路,调查100处检查井)展开病害调查,调查内容包括井周路面病害类型、病害范围、检查井沉陷量。病害调查前对4条道路的养护维修情况进行了调研,经调研可知:经十东路于2004年9月修建,井周路面已经历多次修补;雪山路2014年5月修建,2018年6月井周路面已做环形修补;天辰路、新泺大街均于2016年7月修建。

2.1 病害调查

检查井及井周路面病害调查时,将病害分为4大类:检查井病害、裂缝类病害、破损类病害、变形类病害。其中检查井病害包括沉降、凸起、井盖断裂;裂缝类病害包括井周路面网裂、龟裂、块裂和一般裂缝;破损类病害包括坑槽、松散、修补;变形类病害包括井路面的沉陷、车辙、波浪拥包。调查过程中发现:检查井病害以沉降为主,少量的凸起,无井盖断裂;经十东路300处井周路面全部进行过修补,修补材料以沥青混凝土为主,少量为水泥混凝土材料,具体调查结果见图1,各类病害比例见表1。

由图1及表1可知:检查井及井周路面病害以检查井沉陷(或凸起)及裂缝类为主,破损类病害相对较少(30%以下),变形类病害极少(3%以下)。结合其使用年限,发现所有的检查井及井周路面均产生不同类型、不同程度的病害,病害发生的先后顺序为:检查井

的沉降(新泺大街和天辰路已通车3年)→井路路面的开裂(雪山路已通车5年)→井路路面的沉陷(经十东路已通车15年,且已经全部修补过)。

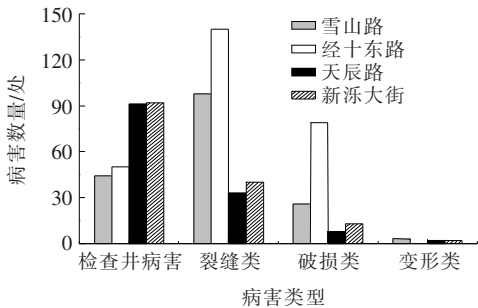


图1 济南市道路检查井及井周路面病害调查结果

表1 检查井及井周路面病害类型及比例

线路名称	比例/%			
	检查井病害	裂缝类	破损类	变形类
经十东路	17	47	26	0
天辰路	91	33	8	2
新泺大街	92	40	13	2
雪山路	44	98	26	3

2.2 病害范围调查

在井周路面病害类型调查的同时,分别对4条道路进行了井周路面病害范围的调查,病害范围用圆形区域表示(包括井盖),大小以半径 r 表示,若病害区域非圆形,测量其面积,将其等效为半径为 r 的圆形区域,病害调查结果如图2所示。

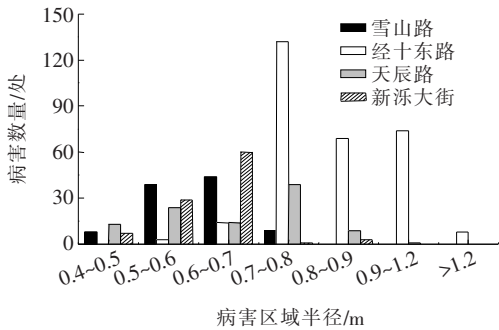


图2 井周路面病害范围调查结果

由图2可知:雪山路91%的井周路面病害区域半径集中于0.4~0.7 m,天辰路90%的井周路面病害区域半径集中于0.4~0.8 m,新泺大街89%的井周路面病害区域半径集中于0.5~0.7 m,经十东路92%的井周路面病害区域半径集中于0.7~1.2 m。计算平均值可知:雪山路、天辰路、新泺大街、经十东路井周路面病害区域平均半径分别为0.61、0.64、0.66和0.84

m。由此可见,当道路使用年限较短时(天辰路、新冻大街已经使用了 3 年,雪山路已经使用了 5 年),井周路面病害范围较小,病害半径主要集中于 0.4~0.8 m,随着路面使用年限的增加,病害区域半径逐渐增加,而且大半径的病害区域所占比例显著增加。

由于经十东路已使用 15 年,已达到设计使用寿命,认为井周路面病害范围已达极限,即认为井周路面破坏区域半径极限值为 1.2 m(97%的保证率)。因而,重新定义井周路面为:以检查井井盖中心为圆心,1.2 m 为半径的城市道路检查井周围路面。

2.3 检查井沉降量调查

对经十东路、天辰路两条道路各 80 处检查井的沉陷量进行调查,调查时将沉陷量大小区间分为 0~5、5~10、10~15、15~20 和 >20 mm 5 个区间,统计分布于不同沉陷量区间的检查井的数量。调查过程中发现,井盖不同位置沉陷量不同,车辆先经过的井盖“上行”方向点沉陷量往往小于车辆“下行”方向点的沉陷量(示意图如图 3 所示),导致路面坡度发生变化,形成坡度差 $\Delta i = (\text{下行点沉陷量} - \text{上行点沉陷量}) / \text{检查井直径}$,检查井沉陷量及坡度变化统计调查结果见表 2。

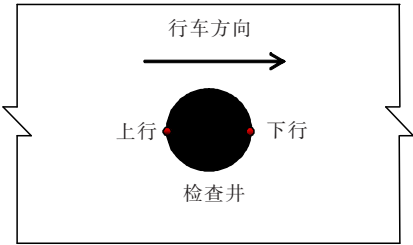


图 3 上、下行方向点示意图

表 2 检查井沉陷量及坡度变化统计

沉陷量/ mm	数量/个				坡度差/ %	数量/个	
	天辰路		经十东路			天辰 路	经十 东路
	上行	下行	上行	下行			
0~5	62	59	54	49	-3~-1	0	7
5~10	11	13	11	15	-1~0	77	32
10~15	2	3	1	4	0~1	3	31
15~20	5	2	7	8	1~2	0	10
>20	0	3	7	4>2	0	0	

由表 2 可知:检查井沉陷量一般较小,主要集中于 0~10 mm,其原因为两条道路的井周路面沉降均被处治过,但仍有少量沉陷量>20 mm 病害存在;检查井上、下行处沉降差导致的坡度差 Δi 主要分布于-1%~1%,调查结果最大值为 1.8%,最小值为-2.1%。

调查分析检查井上、下行方向点沉降差的原因为:井周路面平整度比普通路面差,当车辆经过井周路面时,车辆将发生明显的振动,产生冲击荷载,车辆经过“上行”点后车辆冲击荷载进一步加大,导致“下行”点沉降量加大,形成路面坡度差。

2.4 路面健康状况及养护对策分析

通过对井周路面病害及检查井沉降调查发现:

(1) 经十东路,井周路面总体状况良好,其以裂缝类病害为主,仅需对相应较宽裂缝做封缝处理,少量沉降较大的检查井整体进行高度提升。

(2) 雪山路,井周路面总体状况不良,所有井周路面均有不同程度的裂缝,接近一半的检查井有少量沉陷,但其平整度尚且良好,仅需对较宽的裂缝进行封缝处理。

(3) 天辰路和新冻大街,井周路面总体状况较差,井周路面开裂严重,检查井沉降明显,路面平整度总体较差,应对病害较为严重的部分井周路面进行铣刨、加铺处理,对沉降较大的检查井进行高度提升,对较宽裂缝进行封缝处理。

2.5 病害原因分析及处治措施研究

2.5.1 原因分析

结合现场调查及参考相关文献得到检查井及井周路面病害的原因为:

(1) 检查井及井周材料存在刚度差异。检查井井身结构和井周路基、路面材料类型明显不同,刚度有所不同,相同荷载作用下其变形量不一致,导致结构的差异沉降。

(2) 井周路基路面压实不足,由于检查井结构的存在,使得井周路基、路面材料难以压实,密实度的不足导致井周材料强度差,车辆荷载作用下井周路面易于开裂。

(3) 井周路面不平整,检查井及井周路面病害导致的路面不平整,使得车辆经过时产生较大的冲击荷载,加速检查井及井周路面的破坏。

(4) 井圈强度不足,车辆荷载作用下易发生破坏,导致井盖下沉。

(5) 车辆的超载,加速了检查井的沉降及井周路面的破坏。

2.5.2 处治措施

通过以上分析发现,井周路面病害以井周路面开裂和检查井沉陷为主,特提出如下处治措施:

(1) 轻微裂缝类
当井周路面产生裂缝后,应及时对井周路面裂缝

进行灌缝处治,以防止雨水沿裂缝进入基层及路基,导致下部结构强度降低,诱发更为严重的病害。可采用的灌缝材料包括:溶剂型改性沥青、乳化沥青、纤维沥青、橡胶沥青密封胶、有机硅、灌缝胶、环氧树脂类、聚氨酯类等。

(2) 块裂、龟裂及坑槽类病害

当井周路面出现块裂、龟裂及坑槽类等较为严重的路面病害时,应当挖除井周路面,重新铺筑新的路面材料。目前,城市道路检查井井周路面修补材料以热拌沥青混凝土为主,其摊铺和碾压时要求具有较高的温度,受环境影响较大。而且井周路面具有范围小、间距大等特点,施工时混凝土温度下降快,严重影响了混凝土的强度及新旧料之间的黏结,大大缩短了路面使用寿命,导致井周路面频繁破坏。因而,建议井周路面采用高性能冷补材料如环氧树脂类冷补沥青混合料或浇筑式沥青混凝土或快凝型水泥混凝土等材料作为井周路面的修补材料。

(3) 检查井沉降类病害

为减少检查井沉降类病害,在路面施工及养护维修时应严格控制井周路基、路面材料的压实度,必要时对路基土用石灰、水泥等进行处治,或直接用碎砾石、液态粉煤灰等材料代替土以填筑井周路面,提高承载力;检查井严禁采用砖砌式结构,可采用预制式混凝土结构或塑料检查井等新型结构;井圈尽量采用扩大式加强井圈结构,或采用加筋及铺筑土工格栅的方式提高井圈承载力。

3 井周路面平整度特性分析

根据前文病害调查结果,并考虑经十东路作为城市主干路,交通量大,行车舒适性要求高,而且经十东路现已使用了15年,历经多次处治,经历了检查井及井周路面的所有病害,极具代表性。因而选取经十东路为代表性道路进行平整度特性分析。分析时,对经十东路井周路面及常规路面进行平整度测试,通过相关指标分析评价其平整度状况;利用谐波叠加法,构建平整度数学模型,确定井周路面及常规路面平整度等级。

3.1 平整度状况调查及评价

采用简单易行的三米直尺进行平整度测试,根据井周路面定义,测试井周1.2 m范围内长度2.4 m的路面平整度状况,每处检查井测试33.3 cm,每隔10 cm用塞尺测试路面高程差,即每处井周路面测试25

个点,总计测量80处检查井,测量总长度192 m;常规路面测量时,测量距离检查井2 m外的路面状况,每处检查井测量33.3 cm,每隔10 cm用塞尺测试路面高程差,即每处常规路面测量31个点,测量总长度240 m。然后分别将80处井周路面及常规路面视为连续路面,分别对其平整度状况进行评价。目前《公路工程质量检验评定标准》中对路面平整度的评价主要包括3个指标:平整度标准差 σ 、国际平整度指数 IRI (结合式 $\sigma=0.6IRI$ 进行计算)、最大间隙值 Δh ,相关规范要求及测试计算结果见表3。

表3 平整度数据调查结果

分类		σ / mm	IRI / [(m·(km ⁻¹))]	Δh / mm
规范	高速或一级公路	≤1.2	≤2.0	—
要求	其他等级公路	≤2.5	≤4.2	≤5
测试	井周路面	6.2	10.30	35.0
结果	常规路面	0.6	1.02	3.0

由表3可以看出:井周路面各项平整度指标均不符合规范要求,而常规路面平整度状况良好,均符合规范要求。由此可见,井周路面平整度状况明显比常规路面差。

3.2 路面行驶质量评价

为评价井周路面平整度对车辆行驶质量的影响,结合JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》,引入行驶质量指数(RQI)对其进行评价,具体计算见式(1),路面行驶质量等级划分标准见表4。

$$RQI = \frac{100}{1 + a_0 e^{a_1 IRI}}$$

(1)

式中: a_0 为系数,高速公路、一级公路取0.026,其余取0.0185; a_1 为系数,高速公路、一级公路取0.65,其余取0.58。

表4 路面行驶质量等级划分标准

评定指标	RQI	评定指标	RQI
优	≥90	次	60~70
良	80~90	差	<60
中	70~80		

经十东路为城市主干路,其相关设计及计算参照一级公路,根据表3中 IRI 测试结果,结合式(1)可得:井周路面 $RQI_1=4.5$,路面行驶质量等级为差;常规路面 $RQI_2=95.2$,路面行驶质量等级为优。由此

可见,井周路面行驶质量明显比常规路面差。

4 井周路面平整度评价及模型的建立

路面功率谱是路面平整度的重要评价方式之一,当把车辆视为线性系统时,路面功率谱密度函数结合车辆振动特性分析,可用于车辆荷载动态特性、行车舒适性评价、路面养护时机等问题研究。根据式(2)计算路面功率谱密度 $G_q(n)$,按照相关标准可将路面平整度等级分为 8 个等级,如表 5 所示(采用谐波叠加法构建井周路面及常规路面平整度模型)。

表 5 路面平整度状况分级

路面等级	$G_q(n_0)/(\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$		
	下限	几何平均值	上限
A	8	16	32
B	32	64	128
...
H	131 072	262 144	524 288

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (2)$$

式中: n 为空间频率,为波长 λ 的倒数; n_0 为空间参考频率,为 0.1 m^{-1} ; w 为频率指数,一般取 2; $G_q(n_0)$ 为 n_0 条件下的功率谱密度值,根据表 5 取值。

由于汽车隔振系统的抗振作用,车辆仅对某些特定的路面空间频率响应较大,假定路面空间频率上、下限为 n_1 和 n_2 ,则:

$$G_q(n) = \begin{cases} G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w}, & n_1 \leq n \leq n_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

n_1 和 n_2 的确定要保证车辆以正常速度行驶时,路面平整度引起的车辆振动频率包含汽车的固定频率。假定车速为 $v(\text{m/s})$,路面平整度空间频率为 n ,则车辆所受的激振频率 $f = vn$ 。若车辆的主要固有频率为 (f_1, f_2) ,则可以反过来计算路面平整度空间频率上、下限值,见式(4)。载重车固有频率一般为 $0.7 \sim 15 \text{ Hz}$,车速为 $10 \sim 50 \text{ m/s}$ 。

$$n_1 = \frac{f_1}{v}, n_2 = \frac{f_2}{v} \quad (4)$$

为包含载重汽车的固有频率,令 $f_1 = 0.5 \text{ Hz}$, $f_2 = 30 \text{ Hz}$,由式(4)计算可得, $n_1 = 0.01 \text{ m}^{-1}$, $n_2 = 3 \text{ m}^{-1}$ 。为避免在计算路面功率谱密度时频率混叠,应

保证路面平整度测量时采样间距 $\Delta x \leq \frac{1}{2n_2} = 0.167 \text{ m}$,该文取 0.1 m 。同样,为保证获得足够的采样点得到路面功率谱,要求路面总长度 $L \geq \frac{1}{n_1} = 100 \text{ m}$,该文井周路面取 192 m ,常规路面取 240 m ,井周路面采样点总量为 $N = L/\Delta x = 1920$ 个(常规路面 2400 个)。因而在路面空间频率上、下限 $[n_1, n_2]$ 范围内,可求得 N 个空间频率值,如式(5)所示。

$$n_i = n_1 + (i-1/2) \times \Delta n \quad (5)$$

式中: $\Delta n = \frac{n_2 - n_1}{N}$; i 为第 i 个采样点。

代入数值 $\Delta n = 0.001495 \text{ m}^{-1}$,由式(3)可得路面平整度的方差为:

$$\sigma^2 = \int_{n_1}^{n_2} G_q(n) \text{d}n \quad (6)$$

将区间 $[n_1, n_2]$ 划为 n 个小区间,则每个小区间的中间空间频率 $n_i (i=1 \sim n)$ 处的功率谱密度函数值为 $G_q(n_i)$,用它来代替在这个区间上 $G_q(n)$ 值,那么式(6) \approx 式(7)。结合路面功率谱密度 G_q 的概念,则路面平整度方差如式(7)所示。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n G_q(n_i) \times \Delta n \quad (7)$$

令 $A_i = \sqrt{G_q(n_i) \times \Delta n_i}$,则 $\sigma^2 = \sum_{i=1}^n A_i^2$,将式(2)代入式(7),可得式(8)。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n G_q(n_0) \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^{-w} \Delta n \quad (8)$$

由前文可知: $\Delta n = 0.0015 \text{ m}^{-1}$, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$, $w = 2$,结合表 3 经十东路井周路面及常规路面平整度调查数据 σ 分别为 6.2 mm 和 0.6 mm ,代入式(8)计算可得功率谱密度 $G_q(n_0)$ 分别为 $41.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}$ 和 $9.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}$ 。查表 5 可知,井周路面及常规路面平整度等级分别为 B 级和 A 级,可见井周路面平整度明显比常规路面要差。

正弦波函数 $\sqrt{2}A_i \sin(2\pi x n_i + \theta_i)$ 的标准差为 A_i ,因而可以将 n 个这样的正弦函数数据叠加构成随机路面数学模型,如式(9)所示。

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2}A_i \sin(2\pi x n_i + \theta_i) \quad (9)$$

式中: x 为路面水平方向距离; θ_i 为满足正态分布的分布于区间 $[0, 2\pi]$ 的随机数值。

根据式(2)~(9),结合路面平整度调查数据及路面功率谱密度计算值,利用 Matlab 编程计算,得到经十东路井周路面及常规路面的平整度数据,如图 4

所示。

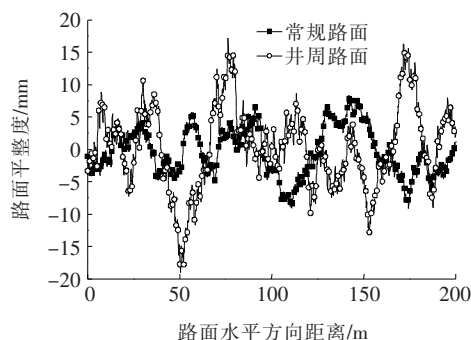


图4 经十东路井周路面及常规路面平整度

由图4可知:井周路面平整度分布于 $-20\sim 20$ mm,而常规路面平整度分布于 $-10\sim 10$ mm,井周路面平整度状况比常规路面差得多。随机路面数学模型获得的路面平整度可应用于车辆动载特性分析、行车舒适性评价等研究中。

5 结论

(1) 检查井及井周路面病害以检查井沉陷及裂缝类为主,破损类病害相对较少(30%以下),变形类病害极少(3%以下)。

(2) 当道路使用年限较短时,井周路面病害范围较小,病害半径一般为 $0.4\sim 0.8$ m,随着路面使用年限的增加,病害区域半径逐渐增加,而且大半径的病害区域所占比例显著增加,井周路面破坏范围最大半径为 1.2 m(97%的保证率)。

(3) 由于多数检查井及井周路面养护及时,检查井沉陷量一般较小,一般为 $0\sim 10$ mm,但仍有少量沉陷量 >20 mm;检查井上、下行处沉降差导致的坡度差一般为 $-1\%\sim 1\%$,最大值为 1.8% ,最小值为 -2.1% 。

(4) 常规路面平整度指标 σ 、 IRI 、 Δh 、 RQI 、 $G_q(n_0)$ 分别为 0.6 mm、 1.02 m/km、 3.0 mm、 95.2 、 9.0×10^{-6} m²/m,路面行驶质量为优,平整度等级为A;而井周路面相应指标分别为 6.2 mm、 10.3 m/km、 35.0 mm、 4.5 、 41.0×10^{-6} m²/m,路面行驶质量为差,

路面平整度等级为B,井周路面平整度状况明显比常规路面差。

参考文献:

- [1] 金招华.城市道路检查井盖设施与路面平顺结合数值计算分析[D].华南理工大学硕士学位论文,2018.
- [2] 曲啸天,赵强,赵吉业,等.基于实测不平度的路面等级分析与评价[J].中外公路,2019(1).
- [3] 周育名,李金明,李平,等.考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法[J].中外公路,2019(1).
- [4] 贺梦琦,魏连雨.城市道路检查井井周受力分析研究[J].河北工业大学学报,2014(3).
- [5] Chen L Y, Wang M Y, Chao C C, et al. Assessment of Asphalt Concrete Pavement Quality by Using Infrared Thermal Imaging Technology[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(3): 331–338.
- [6] 李少成.检查井与城市道路路面顺接施工技术研究[D].山东大学硕士学位论文,2008.
- [7] 司义德.车行道检查井井周病害快速处置技术[J].中国给水排水,2015(14).
- [8] Chang J R, Yang S R, Lin K H. Performance of New Resin Cement in Rapid Manhole Vertical Adjustment [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(2): 857–862.
- [9] Wang Y, Kong L, Chen Q, et al. Research and Application of a Black Rapid Repair Concrete for Municipal Pavement Rehabilitation Around Manholes [J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 204–213.
- [10] 薛爱新,王洁光,王海军,等.高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J].中外公路,2019(3).
- [11] 陆歆逸.塑料检查井在苏州工业园区住宅小区排水工程中的应用研究[D].苏州科技大学硕士学位论文,2017.
- [12] 吴立鹏.城市道路车道上检查井病害综合防治技术研究[D].武汉工程大学硕士学位论文,2018.
- [13] JTG F80/1—2017 公路工程质量检验评定标准[S].
- [14] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].
- [15] GB/T 7031—1986 车辆振动输入路面平度表示方法[S].
- [16] 史石荣.重载车辆条件下的车路耦合动力分析模型和车路相互作用分析[D].重庆交通大学硕士学位论文,2012.