

# 基于无损检测技术的路基路面状况综合评估

任聿飞<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建省建筑科学研究院有限责任公司,福州 350108;2. 福建省绿色建筑技术重点实验室,福州 350108;  
3. 福建省建研工程检测有限公司,福州 350025)

**摘要:** 为准确评估市政工程中旧道路路基路面状况,采用道路多功能综合检测车、全自动车载落锤式弯沉仪、探地雷达等新兴无损检测手段,通过分析旧道路路面损坏状况、地下病害体和路面结构承载能力的内在联系,对轨道交通旧道路路基路面状况进行综合评估。根据综合评估结果确定了路段病害处治的策略,改变了只能通过路面指标制定设计方案的现状,为轨道交通道路施工恢复设计提供了科学依据。

**关键词:** 路基路面;路面损坏;地下病害体;无损检测;综合评估

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2022)09-0028-06

## Comprehensive evaluation of the subgrade and pavement condition based on nondestructive testing

REN Yufei<sup>1,2,3</sup>

(1. Fujian Academy of Building Research Company Limited, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Building Research and Engineering Inspection Company Limited, Fuzhou 350025, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the subgrade and pavement condition of the old road in municipal engineering, the emerging nondestructive testing methods such as pavement measuring car, in-vehicle falling weight deflectometer and ground penetrating radar are used to comprehensively evaluate the subgrade and pavement condition of the old road in the rail transit system. With the help of analyzing the internal connection between the condition of pavement distress, underground disasters, and bearing capacity of pavement structure, the strategy for the treatment of road disease is proposed according to the comprehensive evaluating results, which may change the current situation that the design scheme can only be made through pavement indicators and may provide the scientific basis for the recovery design about rail transit road construction.

**Key words:** subgrade and pavement; pavement distress; underground disaster; nondestructive testing ; comprehensive evaluation

由于水泥资源丰富且价格低,水泥混凝土的强度和刚度较大,所以城市道路建设的首选为水泥混凝土。近几年,沥青混凝土路面以其经济耐久,维修方便,良好的力学性能等优势,逐渐取代水泥混凝土路面,因此很多城市都在对市区道路进行“白改黑”改造,而对旧水泥混凝土路面进行高质量大修改造设计

的重要前提是准确评估旧道路路基路面状况。

水泥混凝土路面病害产生的原因主要有:①路面在荷载或环境等外界因素作用下技术状况下降;②水泥混凝土路面以下的地下病害发展到路面造成的路面病害。对于第一种病害,通过对路面破除重铺等手段进行处治,该类型的病害一经处治并不会对道路整体的剩余寿命造成影响;对于第二种病害,仅处理路面并不能恢复路面结构承载能力,道路内部损坏状况才是影响路面剩余寿命的主要因素。旧道路不能仅凭路面技术状况对道路整体健康状况进行评估,而需结合道路地下内部状况,才能获

收稿日期:2022-03-09

作者简介:任聿飞(1990—),男,工程师,主要从事市政道路工程、建筑材料检测及咨询工作

通信作者:任聿飞,610312429@qq.com

得更多与路面技术状况关联的综合评估结果。

文章结合实际工程项目,通过道路多功能综合检测车、全自动车载落锤式弯沉仪、二维和三维探地雷达等新兴无损检测手段对既有道路路基路面状况进行检测,通过分析旧道路路面损坏状况、地下病害体、路面结构承载能力等参数的内在联系,推断道路病害的发展规律,实现对旧道路更为准确的综合评估。某轨道交通施工道路恢复工程的旧路面结构为水泥混凝土路面,自建成通车以来,一直是主要客货运车辆的通道,交通量大、超限、超载、重载车辆比例较高,导致路面出现破碎、下沉、严重剥落等病害(路面典型病害见图1)。选取该工程2 km试验路段(起点桩号K15+470,终点桩号K17+470,主车道为双向6车道)进行路基路面状况综合评估,以作为轨道交通施工道路恢复前的设计依据。



(a) 破碎板



(b) 严重剥落

图1 路面典型病害

## 1 路面损坏状况评价

采用武汉光谷的ZOYON-RTM型智能道路多功能综合检测车进行试验段路面的全幅评价。多功能道路综合检测车具有强大的检测、数据分析功能,可以完全代替人工路面病害调查作业,提高检测效率和精度。道路以每1 000 m作为一个单元,不足1 000 m的按一个单元计,将试验段分为2个评定段。参照标准JTJ 073.1—2001《公路水泥混凝土路面养护技术规范》要求,采用路面状况指数和断板率两项指标评定路面破损状况,其中断板率主要用来

评价路面的结构性破损状况,路面状况指数用来评价路面的破损状况,路面损坏状况调查结果如表1所示,表中病害数据以板块数统计,单位为块。由表1可看出,路面损坏程度为中等,板块断裂程度和填缝料损坏严重,几乎所有接缝填缝料损坏,部分板块填缝料损坏,接缝碎裂,泥、砂等杂物侵入接缝,很有可能导致雨水渗入基层和垫层,使基层强度降低。同时,结合二维高频雷达对面层厚度的探测结果,旧混凝土面层平均厚度约为200 mm。混凝土面层偏薄是造成混凝土面板断裂、寿命缩短的重要原因之一。

表1 路面损坏状况调查结果

病害类型	K15+470~			K16+470~		
	K16+470			K17+470		
	轻	中	重	轻	中	重
断裂类	纵、横、斜向裂缝	7	4	14	—	23
	角隅断裂	2	1	13	—	6
位移类	交叉裂缝、断裂板	—	126	118	—	237
	沉陷、胀起	—	—	1	—	6
接缝类	唧泥	—	—	—	—	16
	错台	—	—	16	—	44
	接缝碎裂	—	—	38	—	—
	拱起	—	—	—	—	—
	纵缝张开	—	—	—	—	—
	填缝料损坏	—	827	1 034	—	499
表层类	纹裂或网裂和起皮	—	—	—	—	—
	磨损和露骨	—	—	13	20	—
路面损坏状况指数	坑洞	—	1	—	—	1
	活性集料反应	—	—	—	—	—
	修补损坏	—	—	—	—	—
断板率/%		27.91			49.04	
评定等级		差			差	
路面损坏状况指数		55.94			58.61	
评定等级		中			中	

## 2 道路地下病害体探测

主要采用三维地质雷达探测道路地下病害体。地质雷达利用特制的天线向下发射高频电磁波,电磁波在地下传播过程中,传播速度及幅值受地下介质的介电常数、电导率、磁导率等物性参数的影响,当遇到上述物性参数不同的物体或地层时,电磁波将产生反射绕射波并返回地面构成雷达剖面(GPR剖面)。地下介质的介电常数已知时,可计算出电磁波在介质中的传播速度,根据探测的电磁波旅行时间,求出反射体的深度。地下介质横向和纵向存在不均匀性,故在地面接收到的信号也有所不同,反映在接收信号上为

振幅、频率及相位等参数的变化,经过数据处理后可得到地下不同介质的分布情况及介电常数变化面的位置等参数,可进一步分析出潜在疏松体、脱空、空洞等缺陷的位置。对探地雷达图谱异常体特征的识别,应从波组形态、振幅和相位与频谱等方面进行。道路地下病害体探地雷达图谱特征如表 2 所示。

表 2 道路地下病害体探地雷达图谱特征

地下病害体	图谱特征
脱空	位于地面硬壳层与其下层之间,埋置深度浅,整体振幅强,频率高于背景场,顶部形成连续的同向性反射波组,表现为似平板状形态
空洞	位于地基中,整体振幅强,频率高于背景场,球形空洞反射波组表现为倒悬双曲形态;方形空洞反射波组表现为似平板状形态
疏松体	位于地基中,整体振幅强,频率高于背景场,内部波形杂乱、不规则
富水体	位于地基中,顶部反射波振幅强衰减快,频率低于背景场的频率

探测工作主要采用意大利 IDS 公司的 STREAM-X 型车载式多用途三维探测雷达,接驳频率为 200 MHz 的三维雷达模块,探测深度可达 5 m,主要应用于对大范围地下病害进行三维探测及绘图成像、三维地下管线探测与成像、地下考古探测与成像等。但受市政道路管线及地区土质和地下水位影响,探测深度基本在 3 m 以内。相比于传统二维雷达,三维探地雷达可以同时显示纵断面图,横断面图以及所选深度的水平视图,使得地下病害勘测更加立体、直观,在提高检测质量和效率的同时,也避免二维雷达凭借单一纵断面探测而产生病害漏探的情况。对试验路段主车道进行道路三维全覆盖探测,每条车道布置一条测线。经探测和验证,试验路段存地下病害体 72 处,其中脱空 37 处、空洞 23 处、疏松体 10 处、富水体 2 处,典型缺陷图谱如图 2~5 所示。

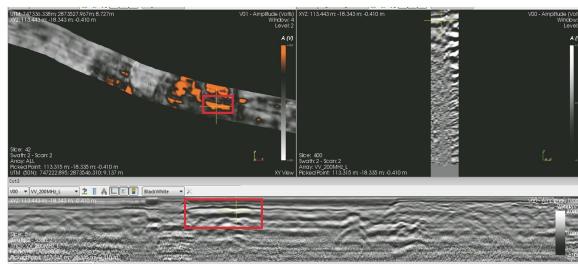


图 2 脱空缺陷图谱(编号 2)

### 3 路面结构承载能力检测

路面结构承载能力是反映道路整体结构(从下至上)共同承载路面以上荷载的能力,为模拟汽车快速

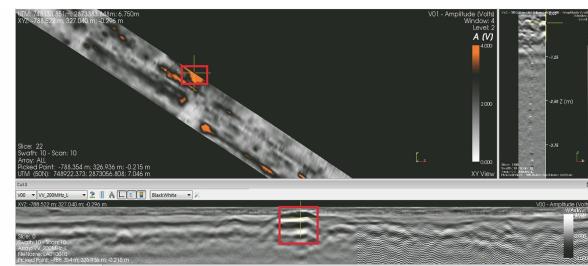


图 3 空洞缺陷图谱(编号 60)

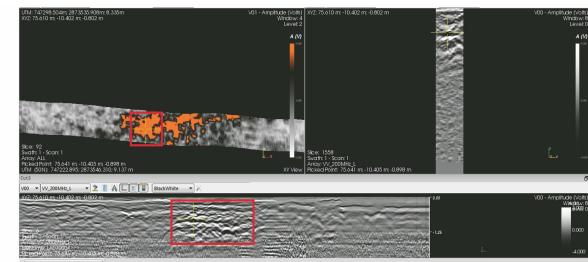


图 4 疏松体缺陷图谱(编号 1)

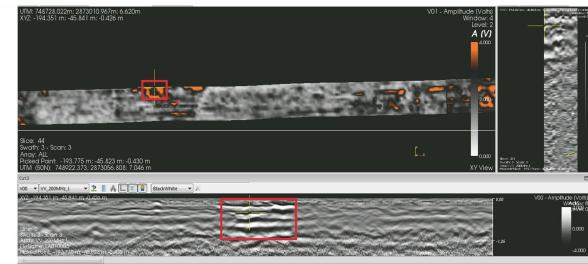


图 5 富水体缺陷图谱(编号 51)

行驶的实际情况,不少国家开发了动态弯沉的测试设备来获得行车作用冲击荷载下的路面结构承载能力,其中落锤式弯沉仪能够自动采集数据(配备计算机),速度快,精度高,已成为世界各国道路界的热门仪器。试验段路面结构承载能力采用北京京谷神箭的 CFWD-10T 型全自动车载落锤式弯沉仪进行检测,车载落锤式弯沉仪将弯沉仪装备在小型汽车上,提高了机动性,使测试更灵便更快速,适合于科研及大范围的路面普查工作。受市政道路管线及地区土质和地下水位等常见制约因素影响,探地雷达探测深度有限,地下病害评估需要结合路面结构承载能力结果作进一步分析,试验段路面结构承载能力检测(测试荷载为 50 kN)结果如表 3 所示。参考工程经验,刚性路面新竣工的水泥混凝土面层弯沉值在 5(0.01 mm)以内,主干路上基层竣工验收弯沉值在 30(0.01 mm)以内。表 3 结果表明,水泥混凝土面层路面结构承载能力在运营多年后有所下降,旧路面作为刚性路表面层,路面结构承载能力总体偏低,但若作为沥青面层下的基层使用,该路面结构承载能力总体良好。同时,面层雷达探测平均厚度约为 200 mm,面层典型芯

表 3 试验段路面结构承载能力检测结果

项目	左幅三车道	左幅二车道	左幅一车道	右幅一车道	右幅二车道	右幅三车道
弯沉平均值(0.01 mm)	20.63	14.90	14.05	17.73	15.53	17.43
弯沉标准差(0.01 mm)	10.94	6.98	12.96	15.05	9.60	9.75

样弯拉强度标准值为 5.66 MPa, 依据 JTGD40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》和 JTGD50—2017《公路沥青路面设计规范》(加铺沥青前旧混凝土基层厚度不应小于 120 mm, 弯拉强度应大于 1.5 MPa) 判断, 该路段旧水泥混凝土层的厚度和强度满足作为基层的要求。综上所述, 考虑在既有道路病害处置后加铺沥青面层作为道路恢复方案。

落锤式弯沉仪板边实测弯沉盆(测试荷载为 50 kN) 可用于评价水泥混凝土面板的接缝传荷能力, 良好的接缝传荷能力可以较好地完成荷载和温度应力在水泥混凝土板间的传递, 从而避免水泥混凝土板内产生过大的应力造成疲劳破坏; 水泥混凝土面板传荷能力的提高也能降低加铺面层底的最大水平拉力, 从而提高加铺面层的疲劳开裂能力。试验段传荷系数检测结果如表 4 所示, 可见, 路段水泥混凝土板接缝传荷性能弱化程度

严重, 约 80% 接缝的传荷系数低于 80%, 约 40% 接缝的传荷系数低于 60%, 水泥混凝土面层的板体性丧失较明显。填缝料严重损坏是造成水泥混凝土板接缝传荷性能弱化的原因之一, 在加铺沥青面层前有必要对面板传荷能力进行加强。

表 4 试验段传荷系数检测结果

项目	分级标准			
	≥80%	60%~80%	40%~60%	<40%
等级	优良	中	次	差
路段占比/%	22.57	37.98	36.03	3.42

#### 4 道路地下病害体与路面结构承载能力、路面损坏状况的相关性分析

针对地下病害体的位置, 对地下病害体与路面结构承载能力、路面损坏状况进行相关比对, 比对结果如表 5 所示。

表 5 地下病害体与路面结构承载能力、路面损坏状况的比对结果

编号	车道位置	路面破损状况	地下病害体; 深度/m; 平面尺寸/(m×m)	弯沉值(0.01 mm)
1	K16+961 左一中部	沉陷伴随断裂板	疏松体; 0.8~1.5; 5.5×1.6	128.42
2	K16+060 左一中部	无	脱空; 0.4~0.5; 5.3×0.7	21.32
3	K16+019 左一左侧	无	脱空; 0.4~0.6; 0.6×0.4	20.22
4	K15+995 左一左侧	无	脱空; 0.3~0.5; 3.2×0.4	18.42
5	K15+970 左一左侧	无	脱空; 0.1~0.2; 7.1×0.5	19.27
6	K15+950 左一中部	无	脱空; 0.2~0.3; 6.3×0.9	22.13
7	K15+630 左一左侧	断裂板	空洞; 0.5~0.8; 0.5×0.5	32.15
8	K15+592 左一中部	断裂板	空洞; 0.6~0.8; 0.3×0.3	28.23
9	K15+668 右一右侧	纵裂	脱空; 0.3~0.4; 7.0×1.1	41.28
10	K15+916 右一中部	断裂板	空洞; 0.2~1.1; 0.4×0.6	133.00
11	K15+935 右一左侧	无	脱空; 0.2~0.3; 0.7×0.4	20.21
12	K16+110 右一中部	无	脱空; 0.2~0.4; 1.7×1.7	22.45
13	K16+148 右一左侧	无	空洞; 0.6~0.9; 1.0×0.8	30.95
14	K16+195 右一右侧	无	脱空; 0.4~0.6; 1.3×0.5	24.20
15	K16+239 右一左侧	纵裂	空洞; 0.7~1.0; 1.1×0.6	48.19
16	K16+275 右一左侧	沉陷伴随断裂板	空洞; 0.2~0.5; 1.2×1.2	66.42
17	K16+320 右一中部	断裂板	脱空; 0.4~0.6; 1.2×1.1	22.15
18	K16+618 右一左侧	断裂板	疏松体; 0.7~1.1; 2.3×2.3	38.27
19	K16+690 右一中部	断裂板	脱空; 0.3~0.6; 2.1×1.2	29.12
20	K16+280 右一中部	无	脱空; 0.4~0.5; 3.7×3.0	23.15
21	K17+338 左二右侧	断裂板	空洞; 0.8~1.3; 0.7×0.9	72.66
22	K16+299 左二中部	无	脱空; 0.2~0.4; 3.3×2.0	23.60
23	K16+260 左二左侧	无	脱空; 0.4~0.5; 2.2×0.8	24.13
24	K16+090 左二左侧	断裂板	空洞; 0.2~0.5; 1.3×0.9	32.15
25	K15+910 左二右侧	无	富水体; 0.7~0.9; 2.3×0.7	28.27

续(表 5)

编号	车道位置	路面破损状况	地下病害体;深度/m;	弯沉值(0.01 mm)
			平面尺寸/(m×m)	
26	K15+845 左二左侧	无	疏松体; 1.1~1.4; 3.1×1.9	25.15
27	K16+200 右二中部	断裂板	脱空; 0.3~0.8; 1.3×0.6	53.59
28	K16+325 右二中部	断裂板	脱空; 0.6~0.7; 1.2×1.4	26.02
29	K17+301 右二中部	断裂板	疏松体; 0.6~1.1; 2.5×1.1	59.43
30	K17+320 右二左侧	断裂板	脱空; 0.3~0.4; 0.8×1.6	21.32
31	K17+335 右二中部	断裂板	脱空; 0.3~0.4; 0.7×0.7	21.16
32	K17+348 右二左侧	沉陷伴随断裂板	脱空; 0.3~0.5; 7.0×1.5	72.24
33	K17+150 左三右侧	无	脱空; 0.5~0.7; 0.6×0.6	32.77
34	K16+955 左三左侧	露骨	脱空; 0.4~0.6; 1.1×0.5	40.86
35	K16+835 左三左侧	沉陷伴随断裂板	脱空; 0.3~0.6; 6.3×0.9	66.04
36	K16+798 左三中部	沉陷	脱空; 0.4~0.6; 0.6×1.2	38.53
37	K16+663 左三中部(检查井边)	陷	脱空; 0.4~0.7; 2.6×1.3	64.17
38	K16+610 左三中部	断裂板	脱空; 0.3~0.4; 2.3×1.1	28.20
39	K16+590 左三左侧	沉陷伴随断裂板	空洞; 0.4~0.8; 0.7×0.9	61.21
40	K16+578 左三中部(检查井边)	断裂板	疏松体; 0.6~0.8; 2.5×1.6	41.06
41	K16+225 左三左侧	断裂板	空洞; 0.3~0.6; 0.7×0.5	52.65
42	K16+210 左三左侧	断裂板	空洞; 0.3~0.6; 0.7×0.7	46.55
43	K16+188 左三中部	断裂板	空洞; 0.2~0.5; 1.0×1.0	28.02
44	K16+030 左三左侧	无	空洞; 0.4~0.6; 0.8×0.8	33.10
45	K15+909 左三左侧	断裂板	空洞; 0.6~0.7; 1.9×0.9	27.12
46	K15+630 左三右侧	断裂板	空洞; 0.5~0.6; 1.5×0.5	32.98
47	K15+755 右三中部	无	空洞; 0.3~0.5; 0.3×0.3	20.12
48	K15+778 右三中部	无	疏松体; 1.0~1.1; 2.2×2.1	19.25
49	K15+840 右三左侧	断裂板	空洞; 0.3~1.0; 0.4×0.4	75.13
50	K15+847 右三中部	无	疏松体; 0.8~1.0; 2.1×1.7	24.12
51	K15+859 右三右侧	纵裂	富水体; 0.4~1.1; 3.5×1.5	54.12
52	K15+880 右三右侧	无	疏松体; 1.1~1.4; 1.2×1.6	31.11
53	K15+900 右三左侧	无	空洞; 1.1~1.3; 1.4×0.5	22.85
54	K16+227 右三中部	无	脱空; 0.2~0.4; 2.4×1.6	24.07
55	K16+250 右三左侧	断裂板	脱空; 0.5~0.8; 2.0×1.0	31.58
56	K16+265 右三右侧	断裂板	脱空; 0.6~0.8; 0.9×0.6	24.26
57	K16+315 右三中部	断裂板	脱空; 0.5~0.7; 6.7×1.5	19.23
58	K16+372 右三中部	断裂板	脱空; 0.5~0.6; 0.8×0.7	21.15
59	K16+490 右三中部	断裂板	空洞; 0.5~0.7; 0.9×0.9	22.15
60	K16+510 右三右侧	横裂	空洞; 0.3~1.5; 1.5×1.0	130.45
61	K16+540 右三左侧	断裂板	脱空; 0.4~0.9; 0.8×0.6	40.15
62	K16+560 右三左侧	断裂板	脱空; 0.4~0.5; 0.4×0.5	32.06
63	K16+588 右三中部	断裂板	脱空; 0.4~0.7; 2.0×1.1	41.98
64	K16+600 右三右侧	断裂板	空洞; 0.6~1.1; 1.2×1.2	47.90
65	K16+624 右三左侧	断裂板	疏松体; 0.6~0.8; 1.3×0.9	29.02
66	K16+805 右三中部	无	脱空; 0.4~0.5; 1.5×1.5	23.74
67	K16+940 右三右侧	无	脱空; 0.6~0.7; 2.2×1.2	31.15
68	K17+280 右三中部	断裂板	脱空; 0.5~0.6; 2.4×1.3	21.15
69	K17+320 右三中部	断裂板	空洞; 0.6~0.7; 1.6×0.5	24.51
70	K17+380 右三中部	断裂板	脱空; 0.3~0.5; 2.0×1.2	22.13
71	K17+400 右三右侧	断裂板	空洞; 0.8~1.0; 1.2×0.8	25.20
72	K17+450 右三右侧	断裂板	疏松体; 0.5~0.7; 2.5×0.6	24.82

通过比对分析,可以得出以下结论。

(1) 纵向(深度方向)或平面尺寸较大的地下病害体在车载作用下一定会在路面形成反射病害,但反射病害不一定表现明显。传统的道路病害调查采用路面损坏状况调查、路面取芯等作为改扩建的设计依据,这些检测方法无法获得连续全断面的路面内部损坏状况,采取的处治方案难以获得长期的养护效果。例如经探地雷达探测和反复验证(见图 6),编号 60 位置存在深约 1.2 m,长约 1.5 m,宽约 1.0 m 的空洞,但该位置路表并未发生沉陷或板块严重破碎,主要原因可能是该位置承受货车重载次数相对较少,且该位置取芯混凝土的换算弯拉强度达到 7.47 MPa,厚度为 292 mm,即混凝土强度高,厚度大,延缓了地下病害体的反射。但该空洞若不进行开挖或者深层注浆处理,仅根据路面损坏结果(横裂)对路面进行简单处理或是不处理直接进行加铺,长远来看将是道路行车安全的重大隐患。



(a) 现场钻孔验证

(b) 空洞内窥状况

图 6 编号 60 空洞缺陷验证

(2) 地下病害大多会在路表有所反映,但部分体积尺寸较小的地下病害体在车载作用下不一定会在路面形成反射病害。

(3) 路面沉陷一定伴随板块断裂,且沉陷位置一定存在较为严重的地下病害体,沉陷位置路面承载能力较差,检查井周围井外渗漏造成的土体疏松和空洞是路面沉陷的原因之一。

(4) 路面结构承载能力可以反映路基路面各层次的整体刚度,地下某结构层次若病害严重,该区域路面结构承载能力一定会变差。结合试验段的弯沉值数据,无地下病害区域路面承载能力相对较好,证明该区域各层次的整体刚度较强,该区域路面病害可能是路面厚度不足、行车重载或环境因素造成的。

(5) 表 5 中板底脱空(脱空位置较浅,位于混凝土板块与其下层间)病害的弯沉值基本都大于 20

(0.01 mm),这也验证了标准 JTJ 073.1—2001 对于单点板底脱空的判定依据。

## 5 道路病害的处治策略

道路病害的处理和病人治病一样,需标本兼治,仅就显露在面上的道路病害加以应急处理是无法彻底根除内在病害的。考虑到旧混凝土路面后期将作为基层使用,将试验段弯沉值大于 30(0.01mm)作为路面结构承载能力不足的判定依据。结合试验段的弯沉值数据可以发现,路面结构承载能力不足的位置皆发生在地下病害体位置附近,所以拟优先考虑处治地下病害,对于承载力严重不足或是地下病害体尺寸较大的局部板块,可对旧路进行局部破除,重新碾压加固,其余脱空板块或小范围地下病害可采取灌浆的方法进行处理。对于断裂板、错台板块、大面积坑洞及纵、横、斜向裂缝的板块均需换板,破损板块处治结束后,用橡胶沥青砂或改性沥青砂重新灌缝以改善面板传荷能力,同时修补轻微裂缝、小面积坑槽及板角断裂等病害。既有道路病害处治结束后,需对路段结构承载能力重新进行复测,若依旧有承载能力不合格的位置,需对该位置病害处治效果进行检查分析,必要时采用其他物探手段对该位置更深层情况进行探测。最后,在水泥混凝土面板上加铺一层优质或改性沥青混凝土面层,以改善旧路面的平整度和防水性能,设计厚度需考虑交通量、使用寿命、旧路结构和气候等因素。

## 6 结语

基于实际工程项目,采取结合道路多功能综合检测车、全自动车载落锤式弯沉仪、二维和三维探地雷达的无损检测手段,通过对道路地下病害体与路面结构承载能力、路面损坏状况的相关性分析,对项目试验段路基路面状况进行综合评估,得到以下主要结论。

(1) 传统的道路调查只能评估路面表面状况,导致后续采取的养护方案只能获得短期的养护效果,难以长效维护,故需要依据多种无损检测数据对道路进行综合评估。

(2) 行车重载作用下,路面厚度不足很可能引起水泥混凝土面板断裂,寿命缩短;接缝料损坏会造成水泥混凝土面板板体性丧失,导致面板接缝传荷性能弱化。

(下转第 51 页)

(3) 研制的检测系统对 304 不锈钢的穿透深度可达 16 mm, 对 5 mm 宽圆形缺陷的有效检测深度达管道厚度的 60%, 系统功能完整, 性能良好。

#### 4 结语

设计研制了承压类管道低频电磁检测系统, 利用仿真对比试验完善了低频电磁传感器的内部结构。试验表明, 该系统对于管道的最佳检测频率为 100~200 Hz, 可实现对直径为 152 mm, 厚度为 16 mm, 埋深为 12.8 mm 的 304 不锈钢管内部缺陷的有效检测。该系统灵敏度高、穿透性强, 体积小, 在承压管道内部损伤无损检测领域具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 《中长期油气管网规划》发布 [J]. 天然气工业, 2017, 37(7):114.
- [2] 李育忠, 郑宏丽, 贾世民, 等. 国内外油气管道检测监测技术发展现状 [J]. 石油科技论坛, 2012, 31(2):30-35,75.
- [3] LOU W M, SHEN C Y, ZHU Z H, et al. Internal defect detection in ferromagnetic material equipment based on low-frequency electromagnetic technique in 20# steel plate [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18

(上接第 33 页)

(3) 试验段旧水泥混凝土路面若作为基层结构则承载能力整体较好, 厚度和强度满足混凝土基层技术要求, 拟将所有路基路面病害处治后的旧水泥混凝土路面作为基层使用。

#### 参考文献:

- [1] 赵为天. 基于三维探地雷达和落锤式弯沉仪的路面结构状况无损评估 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

(16):6540-6546.

- [4] 黄辉, 何仁洋, 熊昌胜, 等. 漏磁检测技术在管道检测中的应用及影响因素分析 [J]. 管道技术与设备, 2010(3):17-19.
- [5] 林俊明. 漏磁检测技术及发展现状研究 [J]. 无损探伤, 2006, 30(1):1-5,11.
- [6] 张成侠. 磁粉探伤在汽轮机叶片质量检测中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2019(1):66-67.
- [7] 郑晖, 林树青. 超声检测 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008:216-222.
- [8] 汪磊, 钱盛杰. 不开罐压力容器内表面腐蚀凹坑的相控阵超声检测 [J]. 油气储运, 2018, 37(11):1291-1295.
- [9] 黄学斌. 红外热像检测技术在承压设备检验中的应用 [J]. 石油化工设备, 2014, 43(4):76-82.
- [10] 唐飞阳亮, 王恒, 张立斌, 等. 相控阵超声与数字射线检测技术在锅炉水冷壁焊缝检测中的应用对比 [J]. 无损检测, 2019, 41(8):58-61,72.
- [11] 岳庚新. 涂层厚度对涡流检测的影响 [J]. 无损检测, 2018, 40(1):34-36.
- [12] GOTOH Y, FUJIOKA H, TAKAHASHI N. Proposal of electromagnetic inspection method of outer side defect on steel tube with steel support plate using optimal differential search coils [J]. IEEE Transaction on Magnetic, 2011, 47(5):1006-1009.

[2] 田歌. 三维雷达探测技术在沥青路面病害调查中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[3] 何必武, 赵为天, 黄文通, 等. 基于落锤式弯沉仪的旧水泥混凝土路面技术状况评估 [J]. 市政技术, 2021, 39(8):17-22.

[4] 张爱江, 吕祥锋, 周宏源, 等. 地质雷达快速检测城市道路路基病害应用研究 [J]. 公路, 2017, 62(12):270-274.

[5] 任聿飞. 福韶路水泥混凝土路面使用状况评价 [J]. 福建建设科技, 2018, (3):75-77.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告