DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260539

低等级农村公路水泥混凝土路面板底脱空与结构强度快速评价方法研究

张存明
(东台市交通运输综合行政执法大队,江苏 东台 224200)

摘 要: 针对低等级农村公路水泥混凝土路面传统检测方法设备投入大、流程复杂、基层适用性不足等问题,以某市浦口区三级及四级农村公路为研究对象,开展路面病害调查与结构性能检测研究。在路面状况指数(PCI)和断板率(DBL)评价的基础上,结合低等级农村公路交通量小、结构层次简单、养护经费有限等特点,提出了一种以人工病害调查为基础的水泥路面快速检测与综合评估方法。该方法采用人工敲击与板角弯沉相结合的方式快速判定板底脱空,并借助弯沉测试与钻芯取样验证其可靠性。研究表明,板底脱空比例与PCI、DBL及弯沉检测结果之间的一致性较高,脱空程度可作为反映路面结构性能差异的有效指标。从经济性看,单公里检测费用较常规方法降低60%以上。上述方法检测效率高、成本低,可为低等级农村公路的基层养护决策提供技术支撑。

关键词: 低等级农村公路;水泥混凝土路面;病害检测;快速检测;综合评估
中图分类号: U415;TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0059-04

Research on Rapid Evaluation Method of Slab Bottom Void and Structural Strength of Cement Concrete Pavement of Low-grade Rural Roads

ZHANG Cunming
(Dongtai City Transportation Comprehensive Administrative Law Enforcement Brigade, Dongtai 224200, China)

Abstract: Aiming at the challenges such as large equipment investment, complex process and insufficient applicability to the base layer in the traditional detection methods for cement concrete pavement of low-grade rural roads, taking the third and fourth-class rural roads in Pukou District of a certain city as the research object, the investigation of pavement diseases and the research on structural performance detection are carried out. Based on the evaluation of Pavement Condition Index (PCI) and Disintegration Board Level (DBL), and in combination with the characteristics of low-grade rural roads such as small traffic volume, simple structural hierarchy and limited maintenance funds, a rapid detection and comprehensive assessment method for cement pavement based on artificial disease investigation is proposed. This method quickly determines the bottom void of the plate by combining manual tapping with the bending and sinking of the plate corners, and verifies its reliability through bending and sinking tests and core drilling sampling. The findings indicate that the consistency between the bottom void ratio of the plate and the results of PCI, DBL and deflection detection is relatively high. The degree of void can be used as an effective indicator to reflect the performance differences of pavement structure. From an economic perspective, the cost of detection per kilometer is reduced by more than 60% compared to conventional methods. The above-mentioned method features high detection efficiency and low cost, and can provide technical support for maintenance decision-making of low-grade rural highways at the grassroots level.

Keywords: low-grade rural highways; cement concrete pavement; disease detection; rapid detection; comprehensive evaluation

0 引 言

农村公路是公路网络的重要组成部分,在服务农村居民出行和保障农业生产运输中发挥着基础性作用[1]。其中,三级、四级公路作为低等级农村公路

收稿日期:2026-05-13
作者简介:张存明(1969—),男,高级工程师,从事公路水路工程质量监督检查、交通建设市场行政执法等工作

的主体，占农村公路总里程的绝大部分。早期建设的低等级农村公路路面以水泥混凝土为主，随着服役年限增长，在交通荷载反复作用及环境因素影响下，不同程度地出现裂缝、断板、接缝破损和板底脱空等病害，路面结构性能逐步劣化，行车舒适性与安全性明显下降[2-4]。因此，开展科学有效的路面病害检测与结构性能评估，是制定合理养护决策的重要前提。

目前，水泥混凝土路面检测评价已形成较为完善的技术体系。现行规范主要运用路面状况指数（PCI）、断板率（DBL）等指标[5-6]，结合弯沉测试和地质雷达等手段进行综合评价[7]。上述技术在国家干线公路和高等级公路中应用广泛。然而，弯沉测试和地质雷达等手段在设备投入、操作流程和现场组织方面要求较高，在低等级农村公路大范围、常态化检测中难以推广[8]。与高等级公路不同，低等级农村公路具有交通量小、结构层次简单、路段分散且养护资金极为有限等显著特点，其检测工作更强调经济适用和快速决策[9-10]。当前基层养护单位检测经费短缺，寻找实施简单、成本较低的检测方法，仍有其现实意义[11-12]。

本文以某市低等级农村公路水泥混凝土路面为研究对象，系统开展路面破损状况调查和结构性能测试，结合实际条件，提出了一种适用于低等级农村公路的板底脱空快速调查与结构强度状态判定方法。

1 病害调查方法体系构建

1.1 调查路段选择与概况

本研究选取某市范围内多条低等级农村公路作为调查对象。所选路段均为三级或四级公路，兼顾不同交通荷载水平和路面结构类型，力求覆盖该区域低等级农村水泥混凝土路面的代表性结构形式。调查工作以现场钻芯取样为主要技术手段，同时收集相关设计文件与养护档案。

调查重点围绕低等级农村公路的路面结构组合形式、交通组成特征和运行条件等方面展开。通过对采集数据进行系统整理与统计，掌握不同路段路面结构类型、材料构成特征和路基基本状况等信息，为后续养护技术方案制定提供依据。

1.2 路面破损状况调查方法

1.2.1 评价指标

本研究对低等级农村公路水泥混凝土路面破损状况进行调查评估，主要参照《公路技术状况评定标准》（JTG 5210—2018）[13]和《农村公路技术状况评定标准》（JTG 5211—2024）[14]的相关规定。评价指标选取路面状况指数（PCI）和断板率（DBL）。

1.2.2 板块脱空快速判定方法

板底脱空是低等级农村公路水泥混凝土路面的隐蔽性结构病害，直接影响路面的承载能力和剩余使用寿命。参考国内类似项目的工程经验，本着简便、实用和经济的原则，对不同判定方法进行比较。综合考虑低等级农村公路交通量小、基层多为泥结碎石的特点，本研究采用经验调查法中的人工铁钎敲击结合板角弯沉检测方法进行脱空综合判定。其中，人工敲击法利用铁钎（直径不小于3 cm，长度不小于2 m）敲击板边，通过辨别声音特征初步筛查脱空区域；弯沉法依据《公路路基路面现场测试规程》（JTG 3450—2019）[15]中弯沉法测试水泥混凝土路面脱空的相关规定，通过板角弯沉值进一步定量判别。脱空等级判定标准见表1。

表1 板块脱空判定标准

板角弯沉值（0.01 mm）	脱空判定
≤60	轻微脱空或无脱空
>60，≤100	板块脱空
>100	严重脱空

1.2.3 结构强度与承载能力调查

对完好板块进行板中弯沉测试，评价低等级农村公路路面整体承载能力。通过钻芯取样获取面板厚度和劈裂强度等参数，为结构性能评价提供数据支撑。

2 调查结果与分析

2.1 调查路段总体情况

通过对某市低等级农村公路水泥路面进行实地调研，掌握了不同技术等级道路的路面结构特征。

调查表明，某市低等级农村公路水泥路面结构因道路等级不同而有所区别。三级公路通常采用“泥结碎石基层＋石灰土底基层＋水泥混凝土面层”的组合形式，石灰土掺灰量一般为6%，泥结碎石和石灰土的厚度一般为15～20 cm，水泥混凝土面板厚度一般为20～25 cm，强度等级普遍采用C30。四级公路交通量更小，结构层数和厚度均相应减少，一般采用“石灰土基层＋水泥混凝土面层”的组合形式，石灰土掺灰量一般为10%，石灰土厚度约15 cm，水泥混凝土厚度约20 cm。上述结构组合形式具有典

型的地域特征，反映了低等级农村公路在建设时期“因地制宜、就地取材”的设计理念。

2.2　路面破损状况评价结果

以 100 m 为评定单元，统计各调查路段 PCI、DBL 评价等级及里程百分比。4 条调查路段（分别编号为路段 A、B、C、D）中，路段 A 和路段 B 为三级公路，路段 C 和路段 D 为四级公路，结果分别见表 2 和表 3。

表 2　各路段 PCI 评价结果统计

路段名称	技术等级	优	良	中	次	差
A	三级	67.8%	32.2%	0.0%	0.0%	0.0%
B	三级	40.0%	45.0%	15.0%	0.0%	0.0%
C	四级	22.2%	61.1%	16.7%	0.0%	0.0%
D	四级	11.5%	42.3%	19.2%	15.4%	11.5%

表 3　各路段 DBL 评价结果统计

路段名称	技术等级	优	良	中	次	差
A	三级	33.9%	42.4%	23.7%	0.0%	0.0%
B	三级	30.0%	50.0%	20.0%	0.0%	0.0%
C	四级	27.8%	44.4%	22.2%	5.6%	0.0%
D	四级	0.0%	15.4%	19.2%	30.8%	34.6%

从 PCI 统计结果来看，三级公路整体状况优于四级公路。路段 A 的路面状况最佳，优良率达 100%，未见中等及以下破损等级路段；路段 D 的状况最差，优良率仅 53.8%，次等和差等路段合计占 26.9%，破损范围较大。路段 B 和路段 C 的优良率分别为 85% 和 83.3%，均存在一定比例的中等破损路段。

从 DBL 统计结果来看，趋势与 PCI 一致。路段 A 和路段 B 的断裂病害控制较好，优良率分别为 75.8% 和 80%；路段 C 已出现 5.6% 的次等路段；路段 D 的 DBL“次”“差”等级合计占比高达 65.4%，结构性损坏显著，表明该四级公路路段的承载能力已严重劣化。

2.3　板底脱空状况调查结果

采用“人工敲击＋板角弯沉综合判定法”对 4 条低等级农村公路路段进行板底脱空普查，结果见表 4。

表 4　各路段板底脱空判定结果

路段名称	技术等级	脱空比例 /%
路段 A	三级	45
路段 B	三级	48
路段 C	四级	51
路段 D	四级	54

脱空判定结果与各路段的 PCI 和 DBL 评价等级具有较好的一致性。三级公路路段 A 和 B 的脱空比例低于四级公路路段 C 和 D。路面状况最优的路段 A 脱空比例最低（45%）；路面状况最差的路段 D 脱空比例最高（54%）。

2.4　板中弯沉承载能力调查

对 4 条路段完好板块进行板中弯沉测试，结果见表 5。

表 5　各路段板中弯沉测试结果

路段名称	测点数	平均弯沉	标准差	变异系数 /%	代表弯沉
A	44	60.5	4.27	7.0	66.9
B	45	68.0	4.50	6.6	77.0
C	40	71.5	5.00	7.0	81.5
D	39	75.8	5.12	6.8	83.5

板中代表弯沉测试结果表明，承载能力最优的路段 A 代表弯沉值最小（66.9），与其优良的 PCI 和 DBL 评价结果一致；路段 D 代表弯沉值最大（83.5），结构承载能力最弱。

2.5　板中厚度与强度调查

为评估旧水泥混凝土路面的内在质量，在 4 条路段的代表性位置进行钻芯取样，开展了劈裂强度室内试验。经测量和测试，获取了面板厚度和劈裂强度两项关键参数，汇总于表 6。

从表中可以看到，面板厚度和劈裂强度两项指标在 4 条路段间呈现出一致的阶梯式下降。路段 A 的两项参数均为最优，面板厚度 22.5 cm，劈裂强度 2.93 MPa；路段 D 最低，面板厚度仅 18.2 cm，劈裂强度 2.15 MPa。按技术等级看，三级公路路段（A、B）面板平均厚度 22.2 cm，劈裂强度均值 2.81 MPa；四级公路路段（C、D）则分别降至 18.9 cm 和 2.28 MPa，降幅分别约 15% 和 19%。

表 6　各路段面板厚度和劈裂强度检测结果

路段名称	技术等级	面板厚度 /cm	劈裂强度 /MPa
A	三级	22.5	2.93
B	三级	21.8	2.68
C	四级	19.6	2.41
D	四级	18.2	2.15

3　低等级农村公路水泥路面养护维修建议

综合全线检测结果，针对低等级农村公路水泥混凝土路面普遍存在的板底脱空和强度不足等问题，提出以下养护维修建议：

3.1　板底脱空维修建议

（1）对于板体整体较完整、尚未出现明显断裂的脱空板块，可采用板底压浆方式恢复基层支承。现场调查发现，部分板块虽表面病害不明显，但板角弯

沉已明显增大，车辆经过时伴随轻微振动和异响，此类板块若不及时处理，后期容易进一步发展为断板病害。

（2）压浆材料宜采用流动性较好的水泥浆液或水泥粉煤灰浆液。施工时一般沿板角或板边布设注浆孔，孔距可结合脱空范围适当调整。为防止面板抬升或产生新的裂缝，注浆压力宜控制在0.3～0.5 MPa，并根据现场返浆情况及时停注。压浆完成后，可通过复测板角弯沉对处治效果进行验证。

（3）对于脱空范围较大、板角弯沉明显偏大，且已伴随断裂、错台等病害的板块，应采取局部换板处理。换板前应同步检查基层是否存在积水或软弱问题，新浇筑混凝土面板厚度一般不小于20 cm。

3.2 结构强度不足维修建议

（1）对于面板整体尚完整，但局部出现强度衰减和轻微裂缝扩展的路段，可采用薄层加铺方式进行功能恢复。考虑低等级农村公路交通荷载较小，可在原混凝土面板表面进行清理和拉毛后，加铺沥青混凝土面层，以改善路面平整度并减缓原面板继续开裂。

（2）针对结构性损坏严重的路段，宜实施整体改造。面板厚度不足、劈裂强度偏低且断裂病害集中的路段，可采用加铺结构进行补强。结合低等级农村公路实际情况，宜优先采用“水泥稳定碎石基层＋沥青面层”的组合形式，以提高路面整体刚度和行车舒适性。相比直接重建，该方式施工周期较短，对沿线居民出行影响较小。

（3）现场调查发现，部分强度不足路段不仅存在面板老化，还伴有基层松散、局部沉陷等现象。若仅对面板进行维修，后期仍可能因基层承载不足导致板体再次开裂。对此类路段，建议在维修过程中同步处理基层。对于局部软弱区域，可采用换填级配碎石、水泥稳定碎石等方式提高基层整体稳定性；对长期受水浸泡部位，应优先改善排水条件后再实施结构补强。

4 经济性与适用性分析

与针对高等级公路的传统检测方法相比，本文提出的快速检测体系在多个维度上表现出与低等级农村公路养护管理需求高度契合的优势。

在经济性方面，传统检测方法通常需要配备落锤式弯沉仪（FWD）、地质雷达等大型精密设备，单公里检测费用较高。据测算，FWD检测费用约为800～1 200元/km，地质雷达检测可高达1 500～2 500元/km。本方法主要依赖人工调查和便携式弯沉测试设备，单公里检测费用控制在300～400元，较传统方法综合降低60%以上，能够有效缓解低等级农村公路养护经费不足的突出矛盾。

5 结 语

本文以某市低等级农村公路水泥混凝土路面为研究对象，通过系统开展路面病害调查与结构性能检测，提出了一种适用于低等级农村公路板底脱空与结构强度的评估方法。主要结论如下：

（1）调查路段水泥路面病害以断裂类、接缝类和表层类为主。PCI和DBL两项指标均能反映路面整体技术状况，但对板底脱空等隐蔽性病害的识别能力有限。四级公路路段的病害密度和破损程度明显高于三级公路路段。

（2）人工敲击与板角弯沉相结合的判定方法能够有效筛查板底脱空。调查结果显示，路面状况越差的路段脱空比例越高——PCI优良率从100%降至53.8%时，脱空比例由45%上升至54%，脱空程度可作为快速判断路面结构性能差异的参考依据。

（3）面板厚度与劈裂强度对结构性能影响明显。面板厚度不足、强度偏低的路段更容易出现断板及脱空病害，结构耐久性相对较差。

（4）所建立的检测方法设备需求低、现场实施简便，单公里综合检测费用约300～400元，较传统方法降低60%以上，适用于低等级农村公路养护资金有限条件下的板底脱空快速调查与结构强度状态判定。

参考文献：

[1] 文厚卿，罗兵．农村公路旧路改造中的路面处理技术[J]．居业，2026(4)：29-31.
[2] 王燕霞．农村公路水泥混凝土路面裂缝病害分析与对策[J]．建材发展导向，2026，24(7)：64-66.
[3] 谢伟民．农村公路病害成因分析及预防性养护技术应用研究[J]．交通科技与管理，2026，7(5)：137-139.
[4] 赵寅．农村公路水泥混凝土路面病害及养护措施[J]．城市建设理论研究(电子版)，2026(6)：157-159.
[5] 卢成涛．农村公路沥青路面预防性养护措施研究进展[J]．城市道桥与防洪，2025(6)：269-273.
[6] 曹欣坤．农村公路自动化检测技术应用与路面性能衰变演化规律研究[J]．工程机械与维修，2026(2)：15-17.
[7] 朱洁，俞佳辉，余昆，等．基于平整度指标的农村公路路面使用性能评价方法[J]．城市道桥与防洪，2022(6)：201-206.
[8] 程鹏飞，焦泉铮，王原，等．农村公路路况快速检测技术与设备发

（下转第83页）