文章编号：1671－8496－(2026)－04－0019－07

高速公路超高缓坡路段 OGFC 排水路面应用研究

曹治国
（广东能达公路养护股份有限公司，广东 广州 510045）

摘　要：针对高温多雨地区高速公路超高、缓坡等复杂线形路段在强降雨条件下存在“水滑”事故的安全隐患，以佛山—开平高速公路典型事故多发路段为对象，开展集成化治理技术研究。通过系统检测诊断，明确了事故主因并非路面材料抗滑不足，而是路面几何线形施工偏差导致排水路径紊乱、雨天形成连续水膜。为此，提出并实施“几何线形精准修复－高性能 OGFC（开级配磨耗层）排水磨耗层铺筑－立体排水系统优化”的一体化治理方案：通过基于三维激光测量数据的路面调坡设计，恢复了顺畅的表面排水路径；采用 SBS 复合高黏度改性沥青与骨架空隙结构设计了 OGFC－13 混合料，构建了高效的内部排水通道；配套完善纵向盲沟与横向排水系统，确保雨水快速排出。工程实施后跟踪评估表明：整治路段渗水系数提升 72 倍，径流系数降低 58.8%，路表干燥时间缩短 78.7%；潮湿状态下横向力系数提升 38.1%，抗滑衰减率由 30.0% 降至 6.5%，雨天安全性能得到根本性改善。

关键词：道路工程；排水路面；OGFC；超高缓坡路段；几何线形修复；雨天抗滑
中图分类号：U416.2　　**文献标识码**：A

Research on the Application of OGFC Drainage Pavement in Ultra High Slope Sections of Highways

CAO Zhiguo
(Guangdong LongDa Superhighway Maintenance Co., Ltd., Guangzhou 510045, Guangdong, China)

Abstract: In response to the safety hazards of “water slide” accidents that are prone to occur in complex linear sections of highways such as super high and gentle slopes in high-temperature and rainy areas under heavy rainfall conditions, this article focuses on the typical accident prone sections of the Foshan-Kaiping Expressway and conducts research on integrated management technology. Through system detection and diagnosis, it has been determined that the main cause of the accident is not insufficient anti-skid properties of the road surface materials, but rather the disruption of the drainage path caused by deviations in the geometric shape of the road surface during construction and the formation of a continuous water film on rainy days. To this end, an integrated treatment plan of “precise geometric repair, high-performance OGFC (open graded friction course) drainage wear layer paving, three-dimensional drainage system optimization” has been proposed and implemented. By using 3D laser measurement data for road slope design, a smooth surface drainage path has been restored; OGFC－13 mixture was designed using SBS composite high viscosity modified asphalt and skeleton void structure, and an efficient internal drainage channel was constructed; the vertical blind ditch and horizontal drainage system were completed to ensure rapid drainage of rainwater. After the project, the tracking evaluation showed that the water infiltration coefficient of the renovated road section increased by 72 times, the runoff coefficient decreased by 58.8%, and the road surface drying time shortened by 78.7%. Under humid conditions, the lateral force coefficient increased by 38.1%, the anti-slip attenuation rate decreased from 30.0% to 6.5%, and the safety performance in rainy weather was fundamentally improved.

Key words: road engineering; drainage pavement; OGFC; ultra high gentle slope section; geometric line repair; anti slip on rainy days

收稿日期：2025-12-26
作者简介：曹治国，工程师，本科，研究方向为路桥建设

在高温多雨地区，沥青路面在重载交通与复杂气候耦合作用下，普遍面临高温稳定性与抗水损害性能不足的挑战[1-3]。其中，由路面表面积水引发的“水滑”现象是雨天交通事故的重要诱因[4]，尤其在具有超高、缓坡等复杂几何线形的路段，传统的表面径流排水模式效率低下[5]，极易在“零坡点”或横坡过渡区形成危险水膜，导致路面附着系数在潮湿状态下急剧下降，构成显著的安全隐患[6]。

为提升路面排水效率与雨天抗滑性能，国内外学者开展了大量研究。以开级配磨耗层（open graded friction course，OGFC）为代表的排水路面技术，因其内部连通的孔隙结构能够迅速排走表层雨水，有效减少溅水和水雾，提高轮胎－路面接触的附着力，已成为改善雨天行车安全的重要研究方向[7-8]。现有研究多集中于OGFC材料配合比设计、路用性能评价及其在一般平纵断面路段的应用[9-11]，然而，针对其在高风险几何线形路段，特别是超高缓和曲线与长下坡组合的复杂区段的系统性应用研究尚显不足。在此类路段，路面实际线形偏差、排水路径紊乱与结构内部排水需求相互交织，对OGFC路面的设计、施工及其与既有排水系统的协同提出了更高要求。值得注意的是，对于因几何线形偏差导致“水滑”的事故路段，治理关键在于“主动排水”而非“被动抗滑”。OGFC通过其18%～22%的总空隙率，可改变传统密级配路面“表面漫流”的局限，构建“表面下渗－内部侧向排”的立体排水模式，即使在“零坡点”附近也能迅速消除水膜。

鉴于此，本研究以典型高风险几何线形路段为对象，旨在基于现有OGFC研究成果，探索一套“几何线形精确修复、高性能OGFC磨耗层铺筑、立体排水系统优化”的针对性治理技术体系。通过系统检测诊断事故成因，精细化设计并实施整治方案，并对工程效果进行长期跟踪评估，验证该集成技术在极端条件下的有效性，为提升类似复杂路段的安全性提供系统的理论依据与工程实践参考。

1 典型路段事故特征与成因分析

1.1 路段概况

佛开（佛山—开平）高速公路某典型超高缓和曲线段位于长下坡末端与弯道组合的复杂线形区，其复杂的几何特征给雨天行车安全带来了巨大挑战。该路段主要几何设计参数如表1所示。

表1 路段几何设计参数

参数类别	指标名称	设计值/范围
平曲线	平曲线半径（R）	约1 300 m
	缓和曲线长度（L_s）	约182 m
纵断面	平均纵坡（i）	约－2.5%（下坡）
横断面	标准横坡	2%
	超高渐变段横坡范围	－2.7%～＋3.7%
	路基宽度	标准八车道

由表1可知，该路段在长下坡的线形基础上，叠加了平曲线与超高渐变段。车辆在长下坡路段速度易升高，而进入超高渐变区域时，横坡从负值（内倾）向正值（外倾）过渡，期间经过理论上的“零坡点”。这一区域排水路径复杂，易成为事故易发段。2021—2022年，该路段发生多起交通事故。值得注意的是，2022年5月1日至6月18日，该区域出现持续强降雨，平均累积雨量达135.6～195.9 mm，局部达到特大暴雨级别。降水进一步增加了该时段交通事故的发生频率。

1.2 路面状况综合检测与评估

为探究事故发生原因，对该路段的路面状况进行了综合检测，涵盖宏观功能指标、几何线形参数以及局部排水状态，旨在系统识别潜在安全缺陷。

1.2.1 路面抗滑性能检测与分析

路面抗滑性能是评价行车安全性的重要指标。采用横向力系数测试车，在干燥天气下对各车道进行了路面抗滑指数（SRI）连续测量，车道分区如图1所示，测试结果如表2所示。

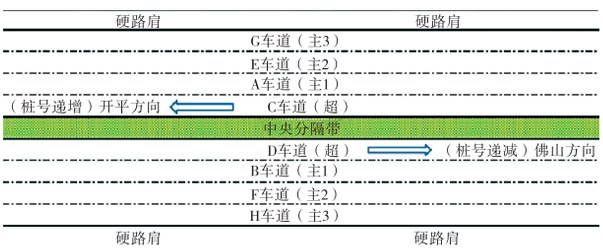


图1 车道分区

表2 事故多发路段典型车道抗滑性能检测结果

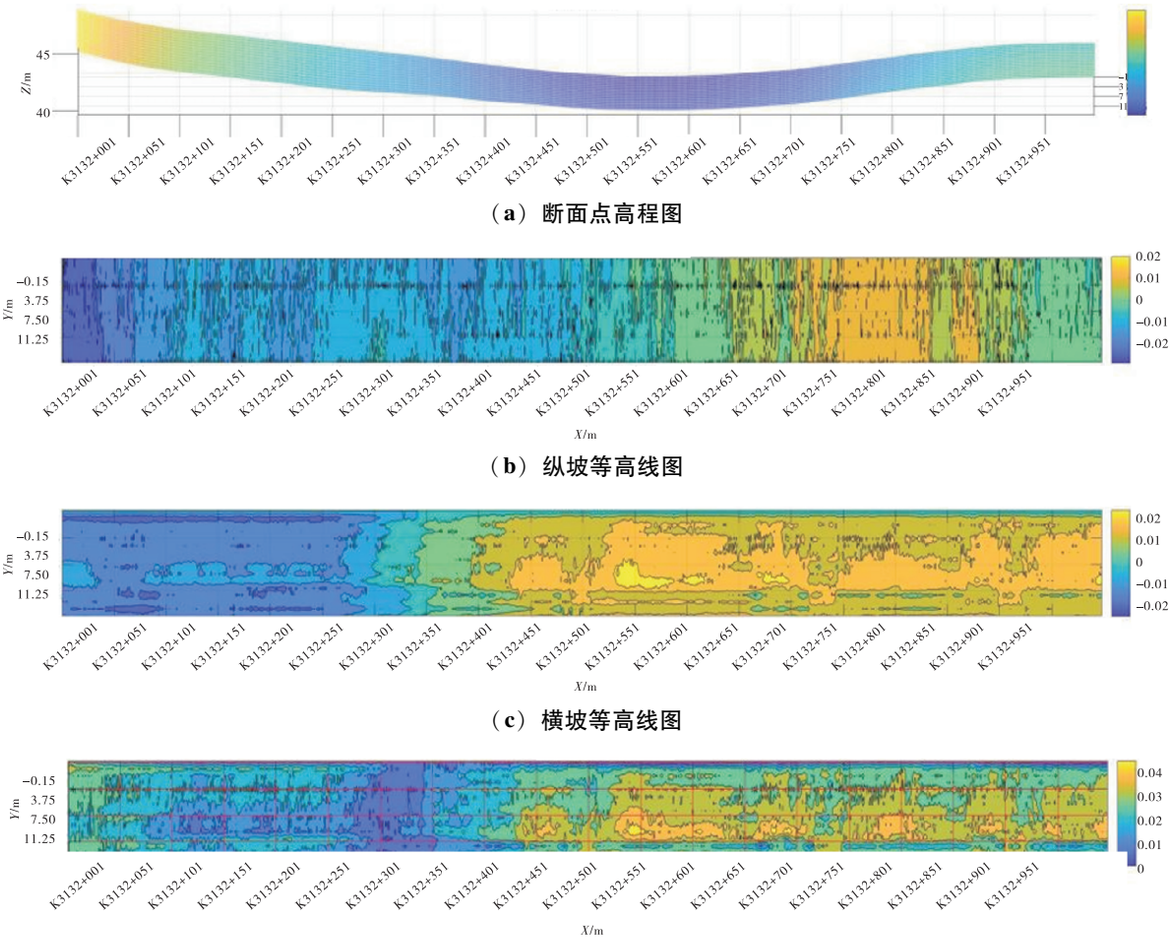
车道	SRI平均值	车道	SRI平均值
C车道	92.08	D车道	92.98
A车道	90.91	B车道	91.66
E车道	88.86	F车道	87.15
G车道	91.09	H车道	90.74

依据《公路技术状况评定标准》（JTG 5210—

2018），各车道 SRI 平均值均在 87 以上，表明在干燥条件下，该路段路面抗滑性能等级为“优”。这说明路面材料本身具有足够的抗滑能力，并非材料普遍磨光或破损导致事故。然而，干燥条件下的性能优良也表明在潮湿条件下抗滑性能可能存在显著衰减，路表排水能力不足可能是雨天附着系数骤降的关键因素。

1.2.2 路面几何线形与排水路径分析

为深入探究排水问题，采用高精度三维激光断面仪与水准测量技术，对路面纵、横坡及平整度进行了网格化实测，并与设计值进行对比。典型路段实测标高、纵坡与复合坡度如图 2 所示。



（a）断面点高程图

（b）纵坡等高线图

（c）横坡等高线图

（d）合成坡度等高线图

图 2　典型路段实测高程及坡度分布

分析发现，在 28 个典型检测断面中，实测横坡与设计值一致的断面仅有 4 个，符合率仅为 14.3%。多数断面存在系统性偏差：正向（外倾）横坡实测值普遍小于设计值，而负向（内倾）横坡实测值普遍大于设计值。这种偏差导致路面实际排水坡度变缓，径流速度降低。

更严重的是，在同一断面内，不同车道的横坡值存在显著差异。在超高渐变段，内侧车道（如超车道）的横坡值明显小于相邻车道，部分断面甚至出现相邻车道坡向相反的情况（即一车道向外排水，相邻车道向内汇水）。这种车道间坡向不一致的现象，严重破坏了路面横向排水的连续性与一致性，导致径流在车道交界处紊乱、汇集。此外，道路等高线图（图 3）显示，事故区域存在局部凹陷，这些“排水洼地”破坏了设计的平滑坡面，削弱了径流驱动力，进一步增加了积水风险。

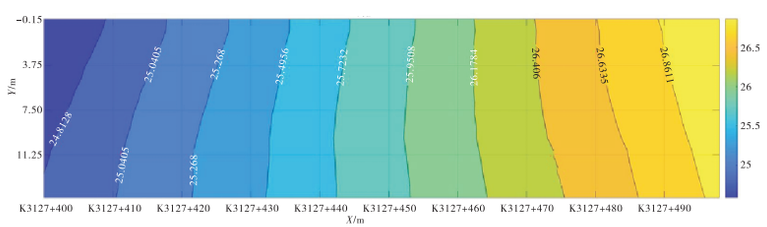


图 3　等高线图

1.3 事故原因分析

综合检测与分析结果表明，该路段事故多发并非由于路面材料抗滑性能不足，而是几何线形偏差、排水路径紊乱与强降雨共同作用所致。具体而言，路面实测横坡严重偏离设计值，且车道间坡向不一致，破坏了系统性排水路径。局部凹陷与不利合成坡度进一步导致径流迟缓与汇集。在强降雨条件下，这些缺陷共同促使“零坡点”附近形成大面积超标水膜，使路面实际抗滑能力在雨天急剧降至危险水平，从而引发交通事故。

2 治理方案设计与施工关键技术

为系统性解决佛开高速公路典型超高缓坡路段雨天水滑安全隐患，采用“几何线形修复－高性能排水磨耗层铺筑－排水系统优化”集成化治理方案。该方案以综合检测结果为基础，通过修复排水路径、提升路面抗滑与排水能力、完善排水出口，形成完整的技术体系。

2.1 路面调坡设计

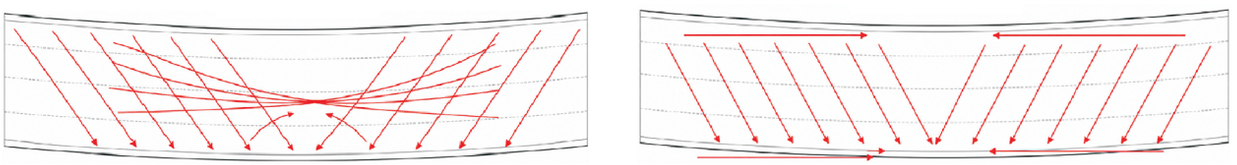
2.1.1 设计目标与约束条件

根据前期路面几何线形检测结果，本工程路面调坡设计围绕三方面展开：首先通过修正横坡系统偏差，使实际横坡尽可能贴近优化后的设计值。同时消除车道间反向坡与显著坡度差，确保横坡沿行车方向平滑渐变。最后，填补局部凹陷，保证路面平整，无汇水点。为确保工程实施合理可行，需满足以下约束条件：①最小干预原则。在满足排水功能的前提下，尽量减少铣刨与加铺厚度，以控制工程成本、减少旧料废弃，并降低对道路结构层与附属设施的影响。②行车平稳性约束。调坡后的纵坡变化率与横坡渐变率需满足《公路路线设计规范》（JTG D20—2017）的要求，避免产生行车不适感或新的安全隐患。③标高控制基准。以对行车安全和排水影响最大的超车道（内侧车道）标高为主控制基准进行拟合，尽可能减少中分带护栏的抬升或拆装量。

2.1.2 设计流程与方法

路面调坡设计包括数据获取、模型构建、纵坡优化、横坡计算与分类处置五个步骤。

首先基于三维激光扫描数据构建路面数字高程模型（DEM），并生成现状等高线图以识别坡度平缓区与局部凹陷，分析得到现状路面排水路径见图4（a）。其次以超车道实测纵断面为基础，采用最小二乘法拟合满足规范要求的优化纵坡线，并依据原设计超高渐变公式计算各断面理想横坡值，优化“零坡点”附近横坡变化率，确保合成坡度不小于0.5%，合成坡度计算公式见式（1）。最后根据优化设计标高与现状标高的差值（Δh），将路面划分为三类进行精细化处置，见表3。



（a）原设计排水路径　　（b）优化设计后排水路径

图4　优化前后路面排水路径

表3　分类调坡处置设计

处置类别	厚度条件（Δh）/cm	处置措施	目标
A类：直接加铺	≤4	原路面铣刨4 cm上面层后，直接加铺4 cm OGFC－13	微调标高，提供排水磨耗面层
B类：铣刨找平＋加铺	4＜Δh≤6.5	①铣刨原上面层； ②用改性AC－13C找平至设计基准面； ③加铺4 cm OGFC－13	消除中度凹陷，恢复平整
C类：结构调平＋加铺	＞6.5	①铺设改性AC－13C调平层［厚度＝（Δh－4）cm］ ②加铺4cm OGFC－13	纠正严重几何偏差，重构排水坡度

$$i_h = \sqrt{i_z^2 + i_q^2} \tag{1}$$

式中：i_h为路面合成坡度，%；i_z为路面纵坡，%；i_q为路面横坡，%。纵坡与横坡均采用带符号的坡度值参与计算，合成坡度取其平方和的平方根。

调坡设计后生成的排水路径如图4（b）所示。路面坡度均匀顺直，排水路径明确。最长排水路径由原超过100 m缩短至约50 m，合成坡度显著提升，为OGFC层发挥功能奠定了几何基础。

2.2 高性能 OGFC 排水磨耗层设计

在完成路面几何线形修复后，加铺一层 OGFC，构建兼具抗滑与主动排水功能的面层系统，实现雨天附着系数的稳定维持。

2.2.1 材料配比与技术要求

为确保 OGFC 排水磨耗层在重载交通及南方多雨环境下具有良好的长期性能，对原材料提出以下严格要求：沥青结合料采用 SBS 复合高黏度改性沥青，其 60℃动力黏度不低于 100 000 Pa·s、软化点不低于 90℃，PG 等级为 PG 94－22，以确保高温稳定性和对集料的强效黏结；粗集料选用坚硬、耐磨且与沥青黏附性良好的玄武岩或辉绿岩，严格控制针片状颗粒含量（＜10%）与洛杉矶磨耗值（＜20%）。细集料采用机制砂并严格控制含泥量，填料以石灰岩矿粉为主，可掺入不超过 2% 的普通硅酸盐水泥以增强混合料的水稳定性与早期强度。级配采用 OGFC－13，设计孔隙率目标为 20% ±2%，其级配设计中值见表 4。

表 4　级配设计中值

筛孔尺/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	0.075
通过率/%	100	95	58	21	15	5

2.2.2 结构组合与界面处理设计

OGFC 排水磨耗层整体结构厚度设计为 4 cm，铺筑于已完成调坡修复的下承层之上，设定依据如下。①功能需求：4 cm 厚度足以形成稳定、连通的空隙结构，满足对排水层厚度的最低要求，确保高效排水和抗滑耐久性。②结构约束：该项目为既有路面养护改造工程，需严格控制总加铺厚度，避免抬升护栏、桥梁净空等附属设施，4 cm 是平衡功能与干预强度的最优选择。③工程实践：在国内外排水路面应用中，应用最广泛、技术最成熟的 OGFC－13 厚度是 4 cm，便于质量控制。

在保证排水功能、抗滑性能与结构耐久性的同时，控制总加铺厚度，减少对桥梁净空及护栏标高等既有设施的影响。为确保层间黏结可靠、防止水分侵入与施工期剥落，在 OGFC 层与下承层之间设置高黏改性乳化沥青黏层，采用 SBS 改性乳化沥青，将洒布量控制在 1.0～1.2 kg/m^2，其破乳后形成的富沥青膜不仅能提供强黏结力，还可起到封闭下承层表面、阻隔施工期水分下渗的作用，从而保障结构整体性与耐久性。

2.2.3 特殊部位与排水衔接设计

在 OGFC 层铺筑范围的路肩边缘设置纵向碎石盲沟（宽 10 cm × 深 4 cm），内部铺设透水土工布并填充洁净碎石，作为 OGFC 层内部横向渗透水的收集与排出口，构成内部排水系统的重要组成部分。同时，结合调坡设计对路缘石开口与集水井位置进行优化布置，确保 OGFC 层表面及内部排出的水能被迅速汇入中央分隔带或路侧的排水主系统，从而在超高渐变段等复杂线形区形成完整、连贯、高效的“路面—边缘—主系统”三级排水路径，保障排水功能的长效性与可靠性。

2.3 排水系统优化设计

为确保路面汇集的水流能够被及时、顺畅地导离路基范围，防止水分滞留对路面结构及路侧边坡造成损害，对既有排水系统进行了系统性评估与针对性优化。优化设计遵循“汇集－传输－排放”的系统性原则，重点强化纵向与边缘排水设施，并补充完善横向排水通道，形成与调坡修复及 OGFC 铺装相协同的立体排水体系。

2.3.1 纵向与边缘排水系统优化

在 OGFC 加铺层外侧全路段连续设置纵向碎石盲沟，作为汇集路面渗透水的“收集总管”。盲沟采用矩形断面（宽 15 cm × 深 4 cm），内填单一级配洁净碎石以保障透水性，底部铺设透水土工布防止细粒侵入堵塞。在超高渐变段等径流方向变化、汇水集中区域，新建或接长 C25 钢筋混凝土纵向集水沟，并确保其沟底纵坡与调坡后的路面合成坡度一致（不低于 0.5%），以实现快速汇流与平顺导排。

2.3.2 横向排水系统补强

为将纵向汇集的水流迅速引排至路外，在集水沟端部或低点增设直径 300 mm 的钢筋混凝土横向排水管，管底坡度不小于 1%，出口处做好消能与防冲刷处理。同时，全面疏通中央分隔带既有横向排水管，并在 OGFC 层与分隔带路缘石交界处采用预留间隙的盖板构造，使路面水能够通过 OGFC 层横向排入分隔带集水沟，最终经由横向管排离路基，形成完整、闭合的排水路径。

3 OGFC 混合料生产与铺装工艺控制

为实现高性能 OGFC 路面的设计要求，保证其排水、抗滑及耐久性，必须对混合料的生产、运输、摊铺及压实全过程工艺进行精细化控制。

3.1 拌和生产过程精细化控制

OGFC 混合料采用“高温拌和、适宜储运、控温摊铺”的温度控制策略。集料加热温度控制在 190～200℃，沥青加热温度为 165～175℃，混合料出厂温度严格控制在 175～185℃。生产过程中需持续监测各环节温度，确保 95% 以上运输车

辆温度达标，具体控制标准见表5。

为保障级配稳定与沥青裹覆均匀，采用干拌15 s、湿拌不少于45 s的工艺，确保混合料色泽一致、无花白料。油石比误差须控制在±0.3%以内，并通过电子计量与实时监控系统实现动态调节。

表5 OGFC－13混合料施工全过程温度控制标准

控制环节	控制温度范围/℃	控制目标
集料加热温度	190～200	充分烘干，保证出料温度
沥青加热温度	165～175（SBS改性）	保证良好流动性，防止老化
混合料出厂温度	175～185	核心控制点，95%车辆须达标
混合料到场温度	≥170	保证施工的和易性
摊铺温度	≥160	保证初始压实度
初压起始温度	≥150	保证压实效果，防止推移
终压完成温度	≥90	成型稳定，开放交通

3.2 运输与摊铺过程均质性控制

运输车辆须清洁并涂刷隔离剂，采用“前－后－中”顺序装料以减少离析，全程覆盖保温篷布。摊铺采用两台履带式摊铺机梯队作业，搭接宽度为5～10 cm，摊铺速度控制在1.5～3 m/min。螺旋布料器应保持高转速、中料位，确保混合料在全宽范围内均匀分布，避免出现离析。

3.3 压实工艺与成型控制

压实遵循“紧跟、慢压、高频低幅”原则。初压采用11～13 t双钢轮压路机，高频低幅振动碾压1～2遍；复压采用同型号压路机或12～15 t轮胎压路机，振动或揉搓碾压2～3遍；终压采用双钢轮压路机静压1～2遍消除轮迹，终压完成时路面温度不低于90℃。对路缘、接缝等部位采用小型压实设备补充碾压，确保全断面压实均匀。纵向接缝采用热接缝工艺，横向接缝为垂直平接缝，施工前需涂刷高黏乳化沥青。碾压过程中可通过铺砂法初步评估构造深度，完工后通过钻孔取芯校核空隙率，确保其在设计目标值±2%范围内。

通过上述工艺控制，保障OGFC路面在设计空隙率范围内形成稳定骨架结构，实现预期排水、抗滑与耐久性能。

4 工程实施效果综合评估

为科学、客观验证集成化整治方案的实际效能，在工程完工后对路段开展为期1个雨季周期（2023年4—9月）的系统跟踪监测与综合评估。评估聚焦排水性能与抗滑安全性能两大核心指标，通过现场实测获取定量数据，与整治前基准状态进行对比分析，明确方案的技术有效性与应用价值，所有测试均严格遵循JTG 5210—2018相关规范执行。

4.1 排水性能改善效果分析

采用渗水系数测试、自然降雨径流观测、路表干燥时间记录三种方法，从路面渗透能力、径流调控特性、积水消散速度三个维度，系统验证整治方案对排水缺陷的治理效果。测试点位全覆盖原事故高发的超高渐变段（K3132＋100～K3132＋950），同时每个指标设置10个平行测试点，取平均值作为代表值，确保数据可靠性。

4.1.1 渗水系数对比分析

渗水系数是反映路面排水能力的重要指标，采用沥青路面渗水仪进行现场测试，测试结果如图5所示。由图可知，整治后路面渗水系数代表值达6 120 mL/min，较原路面提升72倍且合格率为100%，远超出规范要求，这是因为OGFC－13混合料18%～22%的总空隙率，形成了“表面＋内部”双重排水模式，改变了原密级配路面“表面漫流”的局限，可有效避免雨水在“零坡点”附近汇集形成积水。

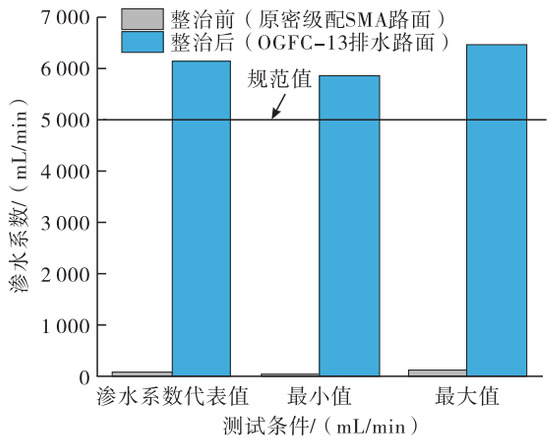


图5 整治前后路面渗水系数对比

4.1.2 降雨径流与干燥时间对比分析

选取重现期2年的自然降雨（降雨强度为25 mm/h，与2022年事故高发期降雨强度相当）作为观测条件，记录路表径流系数与干燥时间。由表6可知，径流系数降至0.35，仅35%雨水形成表面径流，其余通过OGFC层下渗排出；结合调坡设计（最长排水路径缩短至50 m、合成坡度≥0.5%）与立体排水系统，显著加快了径流导排。路表干燥时间缩短至4.8 min，连续水膜与积水现象消除，减少了“水滑”事故的工况条件，验证了整治方案对排水缺陷的治理效果。

表 6　整治前后降雨径流特性与干燥时间对比

观测指标	整治前	整治后	改善幅度
径流系数	0.85	0.35	降低 58.8%
路表无积水干燥时间/min	22.5	4.8	缩短 78.7%
连续水膜存在时长/min	18.3	0	完全消除
积水深度最大值/mm	8.2	0	完全消除

4.2 抗滑安全性能提升评估

通过构造深度、横向力系数（SFC）两项指标，分别从路面宏观构造与实际摩擦性能角度评估抗滑效果，其中 SFC 测试分别在干燥、潮湿（模拟雨天）两种状态下进行，确保评估全面性。

4.2.1 构造深度对比分析

采用铺砂法进行构造深度测试，测试结果如图 6 所示。由图 6 可知，整治后构造深度代表值提升 35.9% 且分布更均匀，这是因为 OGFC－13 混合料的骨架空隙级配设计形成的大量表面宏观纹理，增大了轮胎与路面的接触面积和机械咬合力，能有效消除雨水膜，同时调坡修复与精细化施工避免了局部抗滑薄弱区域，为雨天抗滑提供了可靠物理基础。

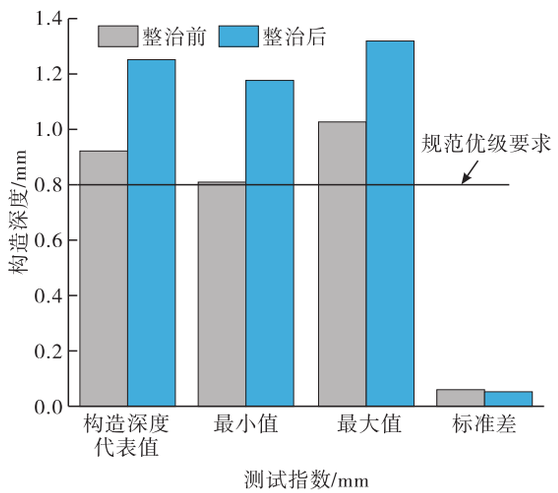


图 6　整治前后构造深度测试结果

4.2.2 横向力系数对比分析

采用横向力系数（SFC）测试车进行现场测试，测试速度 60 km/h，潮湿状态通过路面洒水模拟自然降雨环境（洒水量 0.5 L/m^2），结果如表 7 所示。干燥状态下 SFC 值改善幅度较小，与原路面抗滑性能本身达标一致，而潮湿状态下 SFC 值提升 38.1% 且远超规范要求，抗滑衰减率从 30.0% 降至 6.5%。这是“构造深度优化＋排水性能改善”的协同结果，OGFC 层既增大了摩擦系数，又通过高效排水避免水膜削弱摩擦力，确保雨天行车抗滑性能稳定，提升了路段安全性能。根据交警部门提供的统计数据，该治理路段在整治完成后的第一个完整雨季（2023 年 4—9 月，与整治前 2022 年同期对比），雨天交通事故率由整治前的 2.85 起/百万车公里降至 0.23 起/百万车公里，事故率降幅达 91.9%。该数据有力佐证了本研究集成化治理方案在提升雨天行车安全方面的显著工程实效。

表 7　整治前后不同状态下横向力系数对比

测试状态	整治前 SFC 值	整治后 SFC 值	规范要求	改善幅度	抗滑性能衰减率
干燥状态	60	62	54	3.3	—
潮湿状态	42	58	54	38.1	6.5
干燥－潮湿状态衰减率	30.0%	6.5%	—	—	—

5 结论

本研究聚焦高速公路超高缓坡路段雨天行车安全问题，通过系统化诊断与集成化治理，得到以下主要结论：

（1）综合检测分析表明，事故多发并非由于路面抗滑材料失效，而是路面实际几何线形与设计严重偏离所致。横坡系统性偏差、车道间坡向矛盾以及局部凹陷，共同导致排水路径紊乱、径流水膜聚集，致使潮湿状态下路面附着系数急剧下降，造成安全隐患。

（2）提出并实践了“几何线形修复－OGFC 排水磨耗层铺筑－排水系统优化”的一体化治理策略。通过基于三维实测数据的路面调坡设计，恢复了顺畅的表面排水路径。同时，铺筑高空隙率 OGFC 层，构建了高效的内部排水通道；配合完善的边缘与横向排水系统，实现了从路表到路外的快速排水，显著提升了雨天抗滑稳定性。

（3）为期一个雨季的跟踪监测表明，治理后路段渗水能力提升 72 倍，径流系数降低 58.8%，路表干燥时间缩短 78.7%。潮湿状态下路面横向力系数提升 38.1%，抗滑衰减率由 30.0% 降至 6.5%，雨天交通事故率降低 91.9%，雨天行车安全得到可靠保障。本研究成果为存在类似复杂线形与排水问题的高等级公路养护改造提供了系统的技术路径与实践范例。

参考文献：

[1]黄优，冯勃雄，刘朝晖，等. 高 RAP 掺量高模量沥青混合料研究[J]. 中外公路，2025，45(5)：131-140.

（下转第 47 页）

度对桩基的承载特性均有影响，其中溶洞高度的影响较为显著。在最大荷载 Q = 20 kN 作用下，当溶洞高度 h 从桩径的 2 倍增加到 4 倍时，桩顶沉降增大 13.3%，桩端承载力提高 12.3%。当溶洞宽度从桩径的 3 倍增加到 6 倍时，桩顶沉降和桩端承载力分别增大 5.0% 和 6.5%。

（2）通过有限元分析模型进一步研究了溶洞桩基的承载特性，结果表明，随着桩顶荷载的增大，桩侧摩阻力和桩端承载力均增大，但桩侧摩阻力增幅较快；当荷载继续增大时，侧摩阻力提供的承载力变小，桩端承受的荷载增大。此外，随着桩顶荷载的增大，溶洞顶部会逐渐形成张拉破坏区，最终导致溶洞顶部岩层坍塌破坏，形成分离拱塌区。

（3）采用有限元分析模型计算的 Q-s 曲线与物理模型试验拟合的结果较为吻合，两者的桩基极限承载力相互验证且基本保持一致。本研究为岩溶地区桥梁工程桩基的设计与研究提供了科学依据及参考。

参考文献：

[1]吴忠杰,古鹏翔,蒙海. 喀斯特地貌山区高速公路工程建设管理技术研究[J]. 西部交通科技,2016(11):7-11,92.

[2]李治锟. 岩溶区桩基承载特性影响因素研究[D]. 西安:西安科技大学,2023.

[3]侯振坤,刘宇鹏,凌造,等. 岩溶区桩基承载特性研究综述[J]. 科学技术与工程,2024,24(11):4369-4379.

[4]龚先兵. 岩溶区基桩荷载传递机理及其竖向承载力研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[5]何庆华,于泽泉,岳伟杰,等. 岩溶地区桩基础竖向承载力及岩溶顶板安全厚度计算方法[J]. 广东土木与建筑,2021,28(3):21-28.

[6]李宇杰,冯忠居,何静斌,等. 陡坡段穿越溶洞桩基竖向承载特性离心试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(11):2384-2392.

[7]冯忠居,陈慧芸,白少奋,等. 公路桥梁桩基穿越超大型溶洞的荷载传递机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3700-3711.

[8]雷勇,李鹏甲,刘泽宇,等. 岩溶区穿越溶洞桩基极限承载力及破坏模式试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1343-1353.

[9]王其昂,吴子燕,刘露. 基于 Hilbert-Huang 变换与理想带通滤波器的系统识别[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(6):1065-1070,1233-1234.

[10]王其昂,王浩博,周明利,等. 基于非参数贝叶斯方法的结构损伤识别研究[J]. 振动工程学报,2025,38(2):260-267.

[11]王其昂,刘泉,马占国,等. 基于稀疏贝叶斯学习与改进 D－S 证据理论多源数据融合的结构性能评估[J/OL]. 工程力学:1-9[2026-07-16]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241108.1410.018.

[12]贾大卫,吴子燕,王其昂. 考虑结构极限状态随机性的多维易损性分析[J]. 自然灾害学报,2020,29(1):89-100.

[13]王伟. 岩溶区溶洞型桩基承载机理及溶腔整治技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[14]赵香梅. 深厚回填土中大直径嵌岩灌注桩承载特性现场试验及有限元模拟[D]. 青岛:青岛理工大学,2024.

[15]宋晓婷. 溶洞及其处理措施对桩基稳定性影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2022.

（上接第 25 页）

[2]殷胜光,刘博,乔欢,等. 极端高温天气下高速公路沥青路面泛油问题及预防措施[J]. 公路,2025,70(11):145-151.

[3]李秀君,马怀彧,赵麟昊,等. 微观角度下的多功能改性沥青抗水温耦合特性[J]. 公路交通科技,2025,42(11):47-53.

[4]段同军,刘杰,葛均峰,等. 高速公路改扩建工程多孔隙水泥稳定碎石盲沟的施工技术应用[J]. 中国公路,2022(13):90-92.

[5]李刚,冯冬林. 高速公路沥青路面易积水问题专项处治技术[J]. 中国公路,2023(22):94-95.

[6]麻辉东,毛璐凯,张海忠,等. 高等级公路超高过渡段设计 B 值取值的探讨[J]. 公路交通技术,2021,37(2):1-7.

[7]关宏信,李俊资,高煜,等. PAM－10/OGFC－10 沥青混合料渗水性能对比研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(3):107-115.

[8]孙军,王钊栋,李伟雄. 基于介电常数－空隙率模型的排水路面面域水膜厚度模型构建与验证[J]. 广东交通职业技术学院学报,2024,23(4):19-24.

[9]华涛. OGFC 排水性沥青混凝土路面施工技术要点分析[J]. 交通科技与管理,2024,5(17):98-100.

[10]王建华,赖益梁,郭成,等. 成型温度对 OGFC－5 干法高黏复合沥青混合料路用性能的影响[J]. 南昌大学学报(工科版),2023,45(1):59-64,102.

[11]徐俊鹏,郑传峰,包崇昊,等. 寒区大空隙沥青混合料性能衍化效应研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(4):20-29.