

# 冻融循环下道路基层材料耐久性分析

段孟中

中铁二院（成都）咨询监理有限责任公司 四川成都

**【摘要】**随着道路建设发展，冻融循环地区基层材料耐久性受关注。本文聚焦此问题，分析常见基层材料受冻融影响的性能变化，探讨抗压、抗折强度改变及水稳定性差异，对比不同材料耐久性优劣，为道路设计、施工选材提供依据，助力提升冻融区道路寿命。

**【关键词】**冻融循环；道路基层材料；耐久性；抗压强度；水稳定性

**【收稿日期】**2025 年 2 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 26 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250089

## Durability analysis of road subgrade materials under freeze-thaw cycle

Mengzhong Duan

CREEC (Chengdu) Consulting and Supervision Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

**【Abstract】** As road construction advances, the durability of subgrade materials in freeze-thaw cycles has gained attention. This paper focuses on this issue, analyzing the performance changes of common subgrade materials under freeze-thaw effects, exploring differences in compressive and flexural strength as well as water stability. It compares the durability advantages and disadvantages of different materials, providing a basis for road design and material selection during construction, thereby enhancing the lifespan of roads in freeze-thaw zones.

**【Keywords】** Freeze-thaw cycle; Road subgrade material; Durability; Compressive strength; Water stability

### 引言

在寒冷地区，道路频繁经受冻融循环考验。冻融作用使基层材料结构受损，引发裂缝、松散等病害，降低道路承载与服务能力，增加维修成本。研究冻融循环下基层材料耐久性，对优化道路设计、保障长期稳定运行意义重大，关键是明晰材料特性变化规律。

### 1 冻融对材料强度影响

在寒冷地区，道路基层材料常年承受着冻融循环的严峻考验。冻融循环期间，材料内部的水分会随温度波动而发生相变。当温度降至冰点以下，水分结冰，体积膨胀约 9%。这一膨胀过程在材料内部产生强大的冻胀应力，就像一个个微小的楔子，不断作用于材料的微观结构。随着冻融循环次数增加，应力反复施加，材料内部微裂纹不断萌生、扩展并相互贯通<sup>[1]</sup>。这些微观结构的变化逐渐在宏观性能上体现，导致材料的抗压、抗折强度发生极为显著的变化，极大影响了道路基层的承载能力与使用寿命。

水泥稳定碎石作为一种常见且应用广泛的道路基

层材料，在道路铺设初期，凭借其较高的强度特性，能够出色地承载路面传来的各类车辆荷载，为道路结构提供稳固支撑。一旦遭遇冻融循环的恶劣作用环境，材料内部孔隙中的水分便成为影响其性能的关键因素。当温度降至冰点以下，孔隙中的水分迅速结冰，形成的冰晶恰似尖锐且坚硬的利器，毫不留情地撑开原本紧密有序的孔隙结构。

相比之下，石灰土受冻融循环的影响程度相对较小。石灰土中的粘性成分发挥了重要作用，这些粘性物质具有一定的可塑性和缓冲能力，能够在一定程度上吸收和分散冻胀力，减轻冰晶膨胀对材料结构的直接冲击。但是，这并不意味着石灰土能够完全抵御冻融的侵蚀<sup>[2]</sup>。随着冻融循环次数的不断增加，石灰土中的水硬性结合料在持续的冻胀力冲击下，其固化作用逐渐失效。多次冻融后，石灰土的强度同样会出现可观的跌幅，研究显示，在经历较多冻融循环后，石灰土的抗压强度可能下降 30% - 40%。

### 2 水稳定性变化探究

作者简介：段孟中，男，汉族，湖南娄底，工程师，大学本科，研究方向为道路桥梁。

水在道路基层材料的冻融破坏进程中占据着举足轻重的地位,堪称影响材料耐久性的核心要素之一。当基层材料暴露于自然环境时,一旦受到降水的淋溶或地下水的渗透侵袭,便极易吸纳水分而达到饱和状态。以二灰稳定砂砾这种在道路建设中广泛应用的基层材料为例,其内部结构在饱水状态下会发生极为显著的改变。在低温环境降临后,材料孔隙中的水分逐步开始冻结。由于冰的密度相较于水更小,在冻结过程中,水分体积会急剧膨胀,幅度可达约 9%。这一膨胀过程所产生的巨大压力,宛如一颗颗隐匿于材料内部的微小“炸弹”,持续且猛烈地作用于材料内部的孔隙壁以及颗粒之间。每一次的膨胀施压,都会对材料的微观结构造成难以修复的损害,长此以往,这种不可逆的损伤不断积累,严重威胁着道路基层材料的结构完整性与耐久性。

当温度逐步回升,材料随之进入融化阶段。在冻结过程中,材料因内部水分结冰膨胀,孔隙被显著撑开。而到了融化阶段,这些被撑开的孔隙并不会完全恢复至初始状态,而是在材料内部遗留部分永久性孔隙。这些新增孔隙就如同在材料内部开辟出一条条更为便捷的“水路”,为水分的储存与流通提供了极大便利,使得材料在后续环境变化中更容易再次吸收水分并达到饱和状态<sup>[3]</sup>。如此周而复始,每一轮冻融循环都如同对材料内部结构发起一次强烈冲击。以二灰稳定砂砾基层为例,当该基层的水稳定性表现欠佳时,这种冲击所带来的负面影响尤为突出。历经多次冻融循环后,二灰与砂砾颗粒之间原本稳固且紧密的粘结力,会在反复的冲击下逐渐减弱,原本井然有序、稳定的结构开始变得松散,颗粒间的相互约束作用大幅降低。

在排水不畅的路段,问题将进一步恶化。积水无法及时排出,持续浸泡基层,使得材料长期处于饱水状态,大大增加了冻融循环发生的频率与强度。二灰稳定砂砾基层在这样的环境下,极易出现软化现象,表面变得泥泞,甚至出现唧泥情况,即材料中的细颗粒在水压力作用下被挤出基层表面。这不仅严重削弱了基层对路面结构的支撑能力,导致路面出现不均匀沉降、坑洼等变形问题,还极大地降低了车辆行驶的舒适度与安全性<sup>[4]</sup>。司机在这样的路面上行驶时,需要频繁调整车速与方向,增加了驾驶疲劳感,同时车辆失控的风险也显著提升。深入探究水稳定性在冻融循环下的变化规律,对提升道路基层材料的耐久性、保障道路交通安全具有至关重要的意义。

### 3 材料微观结构剖析

在探究冻融循环对道路基层材料耐久性影响的过程中,材料微观结构的变化成为关键研究方向。科研人员运用扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)以及 X 射线断层扫描(X-CT)等高分辨率观测设备,对经历不同次数冻融循环作用后的材料样本进行了多维度、深层次的细致观察<sup>[5]</sup>。在 SEM 的高倍视野下,可清晰看到材料内部孔隙结构的演变,原本规整的孔隙在冻融应力反复作用下逐渐扩张、连通;AFM 则从纳米尺度揭示了材料表面微观形貌的改变,粗糙度明显增加;X-CT 技术更是以无损的方式,为研究人员呈现出材料内部三维空间的微观结构变化情况。由此,科研人员揭示出一系列微观层面的显著变化。

冻融循环对材料微观结构的破坏首先体现在孔隙结构的改变上。随着冻融次数的增加,材料内部孔隙呈现出变大、增多的趋势。在低温环境下,材料孔隙中的水分冻结成冰,体积膨胀约 9%,这一膨胀力如同楔子一般作用于孔隙周围的材料基体,使得孔隙壁承受巨大压力,进而导致孔隙逐渐扩大。当温度回升,冰融化成水,孔隙壁在经历反复的拉伸与压缩后,部分薄弱区域出现破裂,新的孔隙由此产生。水泥基材料的水化产物在冰晶的持续挤压下,原本紧密有序的结构变得紊乱。水化硅酸钙等凝胶体的连续性遭到破坏,内部的微观通道被拓宽或阻断,严重影响了材料内部的物质传输与力学性能的传递。

在粒料结构的道路基层材料中,粘结料与骨料之间的界面在反复冻融循环下也面临严峻挑战。粘结料的作用是将骨料牢固地粘结在一起,协同承受外部荷载。冻融过程中孔隙水的冻胀与融缩,使得粘结料与骨料界面处产生复杂的应力状态。这种应力的反复作用导致界面逐渐脱粘,原本紧密结合的界面出现微小裂缝与间隙<sup>[6]</sup>。随着冻融循环次数的累积,这些微小缺陷不断扩展、连通,极大地削弱了粘结料与骨料之间的粘结力,使得材料整体的协同受力能力大幅下降。宏观上,这直接反映为道路基层材料的强度降低、变形增大,最终导致路面出现裂缝、坑槽等病害,严重影响道路的使用性能与寿命。

### 4 材料耐久性对比

在道路工程中,基层材料的耐久性至关重要,其直接关系到道路的使用寿命与维护成本。对多种常用基层材料进行综合对比分析,有助于明晰不同材料在冻融循环环境下的性能表现。沥青稳定基层凭借其良好的柔性脱颖而出,在面对冻融变形时展现出一定的适应能力。这是因为沥青材料具有黏弹性,能够在温度变

化导致的体积膨胀与收缩过程中,有效缓冲应力,故而具备较强的抗裂性能。沥青稳定基层并非十全十美,其在高温环境下的稳定性存在明显短板<sup>[7]</sup>。当夏季气温飙升,沥青会变软,在车辆荷载反复作用下,易出现车辙、拥包等病害,限制了其在高温地区的广泛应用。

无机结合料稳定类材料则呈现出另一番特性。在材料使用前期,这类材料能提供充足的强度与刚度,为道路结构提供坚实支撑。但在长期冻融循环的恶劣考验下,其耐久性出现明显分化。以水泥类和石灰粉煤灰类材料为例,水泥类无机结合料稳定材料的耐冻性相对较弱。水泥水化产物在低温下容易遭受冻胀破坏,冰晶的形成与生长会在材料内部产生微裂缝,随着冻融循环次数增加,裂缝不断扩展、贯通,致使材料性能劣化。而石灰粉煤灰类材料在耐冻性方面则表现得更为出色,其复杂的火山灰反应生成的稳定产物,能增强材料结构的密实度,有效抵抗冻融破坏,展现出更好的耐久性。

鉴于不同基层材料在冻融循环下的性能差异,在实际工程中合理选材就显得尤为关键。需要全面权衡地区气候条件、交通荷载强度等多方面因素。对于寒冷地区且交通荷载繁重的路段,单一基层材料往往难以满足所有性能需求。此时,采用复合式基层搭配方案不失为良策。将抗裂性好的沥青稳定基层铺设在上面层,以应对低温开裂问题;把耐冻性佳的石灰粉煤灰类无机结合料稳定材料置于下面层,承受较大的交通荷载<sup>[8]</sup>。通过这种组合方式,有望充分发挥不同材料的优势,兼顾道路在冻融环境下的抗裂、耐冻以及承载等多方面性能要求,延长道路使用寿命,降低全寿命周期成本,为寒冷地区的交通基础设施建设提供可靠保障。

## 5 结语

展望未来,随着材料科学进步,新型抗冻融道路基层材料有望涌现。借助纳米技术、纤维增强等手段改良

现有材料微观结构,提升抗冻耐久性。施工中,精细化控制含水量、压实度等指标,结合智能监测系统实时跟踪基层状态,精准养护,将大幅延长寒冷地区道路使用寿命,保障交通网络畅达高效。

## 参考文献

- [1] 周智,储昭胜,周潜,等.高强度收缩固化原位土道路基层材料及其工程应用[J].建材世界,2025,46(01):18-22.
- [2] 程方泽.共振碎石化技术应用于路面改造的工艺研究[J].工程技术研究,2025,10(02):74-76.
- [3] 唐光启,谢高奇,于诚谦,等.浅谈固土岩复合材料在道路基层中的应用分析[J].四川水泥,2025,(01):230-232.
- [4] 严伟清.建筑垃圾再生材料在城市道路基层中的应用探究[J].科技与创新,2024,(23):188-190.
- [5] 田红云,邓庆凯,孟文诚,等.顶管淤泥改良道路底基层材料配方机理研究[J].岩土工程技术,2025,39(01):150-158.
- [6] 何柳君.道路基层碱激发材料加固的经济性研究及工程实际应用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(29):178-180.
- [7] 翁秀信.改性水泥碎石基层材料在市政道路中的应用研究[J].建筑机械化,2024,45(10):118-121.
- [8] 王世伟,杨松.固化铁尾矿砂基层材料的工程应用可行性研究[J].公路,2024,69(10):69-74.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

