

不同压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响研究

肖永飞 孙安强

中交路桥北方工程有限公司 北京 100176

【摘要】：针对寒区公路未筛分碎石垫层冻胀破坏频发的工程问题，以国道 305 线浑德伦至白音华段公路工程为依托，系统研究不同压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响规律。通过室内冻融循环试验与现场试验监测相结合的方法，设置 85%、90%、93%、95% 四组压实度梯度，分析不同压实度下碎石垫层的冻胀率、渗透系数、压实度衰减率等关键指标变化特征，揭示压实度与抗冻胀性能的内在关联。研究结果表明，压实度提升可显著降低垫层冻胀率，当压实度达到 93% 及以上时，垫层冻胀抑制效果趋于稳定，且冻融循环后的结构稳定性最优；压实度不足 90% 时，垫层孔隙结构易在冻融作用下破坏，导致渗排水能力骤降、冻胀病害加剧。基于研究成果，提出寒区未筛分碎石垫层压实度控制阈值及施工质量管控要点，为寒区公路碎石垫层工程设计与施工提供技术支撑。

【关键词】：寒区公路；未筛分碎石垫层；压实度；抗冻胀性能；冻融循环

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.089

1 引言

1.1 研究背景

我国季节性冻土区占国土面积的 53.5%，其中内蒙古锡林郭勒盟等寒区地域冬季低温持续时间长、极端低温频发，冻融循环作用对公路路基产生严重的冻胀破坏，表现为路面隆起、开裂、翻浆等病害，大幅降低公路使用寿命并增加养护成本。未筛分碎石垫层因具备施工便捷、成本低廉、毛细阻滞与高效排水的双重功能，成为寒区二级及以下公路路基抗冻胀处理的常用措施，其通过阻断水分向冻胀区迁移、加快孔隙水排出，缓解冻融循环对路基的破坏作用。

国道 305 线浑德伦至白音华段公路地处内蒙古锡林郭勒盟寒区，路线全长 24.2km，设计设置 20cm 未筛分碎石垫层作为路基抗冻胀核心结构层。该区域冬季最低气温可达 -30℃ 以下，冻融循环次数年均超过 60 次，碎石垫层的施工质量直接决定公路整体抗冻性能。压实度作为碎石垫层施工质量的核心控制指标，其取值直接影响垫层孔隙结构、渗排水能力与冻胀抑制效果。

但目前针对寒区未筛分碎石垫层压实度与抗冻胀性能的定量关系研究不足，工程中压实度控制缺乏针对性指标，易因压实度不合理导致垫层抗冻胀失效。

1.2 研究目的

（1）揭示不同压实度下寒区未筛分碎石垫层的冻胀演化规律，明确压实度对垫层抗冻胀性能的影响机制；（2）确定适用于内蒙古锡林郭勒盟寒区的未筛分碎石垫层最优压实度控制阈值；（3）提出寒区未筛分碎石垫层压实施工质量管控措施，为工程实践提供技术依据。

1.3 研究意义

理论意义：弥补寒区未筛分碎石垫层压实度与抗冻胀性能定量研究的不足，完善寒区公路路基抗冻胀设计理论，为碎石

垫层结构优化提供试验支撑。

工程意义：针对国道 305 线工程实际提出压实度控制标准，可有效降低寒区公路碎石垫层冻胀病害发生率，延长公路使用寿命，减少养护投入；研究成果可推广至内蒙古乃至全国同类寒区公路工程，助力“交通强国”战略在中西部寒区的落地实施，推动寒区公路建设高质量发展。

1.4 研究内容

（1）寒区未筛分碎石垫层原材料性能测试，确定符合工程要求的碎石颗粒级配与物理性能指标；（2）设计室内冻融循环试验，设置 85%、90%、93%、95% 四组压实度梯度，测试不同压实度下垫层的冻胀率、渗透系数、压实度衰减率等指标；（3）依托国道 305 线工程铺筑试验路，开展现场压实度控制与冻胀监测，验证室内试验结果；（4）分析压实度与抗冻胀性能的内在关联，确定寒区未筛分碎石垫层最优压实度阈值；（5）提出寒区未筛分碎石垫层压实施工工艺与质量管控要点。

1.5 技术路线

本研究采用“理论分析—室内试验—现场验证—成果总结”的技术路线：

（1）收集国内外寒区碎石垫层抗冻胀与压实度相关研究成果，结合工程区域气候与地质条件，确定试验方案；（2）开展原材料性能测试，制备不同压实度的未筛分碎石试样，进行室内冻融循环试验，获取抗冻胀关键指标；（3）在国道 305 线工程现场铺筑不同压实度的试验路，进行现场压实质量控制与长期冻胀监测；（4）对比分析室内试验与现场监测数据，揭示压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响规律；

（5）结合工程实际提出压实度控制阈值与施工质量管控措施，形成研究报告。

2 试验材料与试验方案

2.1 试验材料

试验所用未筛分碎石取自国道305线浑德伦至白音华段公路工程沿线料场,符合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)中碎石垫层原材料技术要求。对碎石进行颗粒级配、表观密度、压碎值、洛杉矶磨耗损失等物理性能测试,测试结果如表1所示。

表1 未筛分碎石物理性能测试结果

测试指标	测试结果	规范要求	符合性
颗粒级配	连续级配,最大粒径 60mm	最大粒径 ≤ 75 mm	符合
表观密度 (g/cm^3)	2.68	≥ 2.60	符合
压碎值 (%)	18.5	≤ 28	符合
洛杉矶磨耗损失 (%)	22.3	≤ 30	符合
含泥量 (%)	0.8	≤ 1.0	符合

试验碎石为连续级配,粒径分布在0.075~60mm之间,其中4.0~60mm粒径碎石占比72%,满足瑞典查尔姆斯大学提出的冻胀抑制最佳粒径占比要求;含泥量0.8%,可有效避免细粒料堵塞孔隙导致渗排水能力下降。

2.2 试验设备

室内试验设备:MTS冻土冻融试验系统、渗透仪、电子万能试验机、环刀、标准击实仪、烘箱等;其中MTS冻土冻融试验系统可模拟-30℃~20℃的温度循环,精准控制冻融速率与循环次数,符合寒区实际气候条件。

现场试验设备:核子密度仪、弯沉仪、全站仪、路基冻胀监测仪、洒水车、振动压路机

(20t)、光轮压路机(18t)等;核子密度仪用于现场压实度快速检测,符合《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)要求。

2.3 试验方案设计

2.3.1 室内冻融循环试验方案

参考《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020)中T 0189-2019土的冻胀力试验方法,设计四组不同压实度的未筛分碎石试样,每组3个平行试样,压实度分别为85%、90%、93%、95%,试样尺寸为 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ (与工程实际垫层厚度20cm匹配)。试验控制条件如下:

含水率:控制为5%,接近工程现场最优含水率;

冻融循环参数:冻结温度-25℃,融化温度20℃,冻结时间12h,融化时间12h,单次冻融循环24h,总循环次数30次,模拟寒区年均冻融循环次数;

补水条件:采用底部补水方式,模拟工程中路基地下水向上补给的实际情况,补水水头5cm。

试验过程中,每5次冻融循环测试一次试样的冻胀率、渗透系数、压实度,试验结束后测试试样的抗压强度与孔隙率,分析不同压实度下试样的抗冻胀性能演化规律。

2.3.2 现场试验路方案

在国道305线浑德伦至白音华段公路K12+000~K12+400段铺筑400m试验路,将试验路分为4个试验段,每段100m,分别采用85%、90%、93%、95%的压实度控制标准,试验段除压实度

外,其余施工参数(摊铺厚度、碾压工艺、原材料)保持一致。施工过程中,采用“初压—复压—终压”的碾压工艺:初压采用光轮压路机静压2遍,复压采用振动压路机强振4~6遍(根据压实度调整碾压遍数),终压采用光轮压路机静压2遍,消除轮迹。

现场监测内容包括:施工过程中每层压实度检测(每1000m²测2点,不少于5点);冬季冻胀期每月监测一次路面冻胀量,采用路基冻胀监测仪精准测量;融沉期监测路面沉降量,分析不同压实度试验段的冻融变形特征,监测周期为1年。

3 试验结果与分析

3.1 室内试验结果分析

3.1.1 压实度对冻胀率的影响

由不同压实度下未筛分碎石试样冻胀率随冻融循环次数的变化规律可知,四组试样的冻胀率均随冻融循环次数增加呈现快速上升后趋于稳定的趋势,且压实度与冻胀率呈显著负相关:

压实度85%的试样冻胀率增长最快,冻融30次后冻胀率达到3.2%,远超规范允许的1.5%冻胀率限值,表明压实度不足时,垫层易发生严重冻胀变形;

压实度90%的试样冻融30次后冻胀率为1.6%,接近规范限值,冻胀抑制效果一般;

压实度93%的试样冻融30次后冻胀率为0.8%,压实度95%的试样冻胀率为0.7%,两组试样冻胀率均远低于规范限值,且冻融20次后冻胀率趋于稳定,冻胀抑制效果优异;

压实度从93%提升至95%时,冻融30次后的冻胀率仅降低0.1%,表明当压实度达到93%及以上时,冻胀抑制效果趋于饱和,继续提高压实度对冻胀率的降低作用有限。

冻胀率与压实度的负相关原因在于:压实度越高,碎石颗粒间孔隙越小且孔隙分布越均匀,可有效减少水分渗入与冰晶生长空间;同时,高压实度下碎石颗粒间咬合作用更强,可抵抗冰晶生长产生的冻胀力,从而降低冻胀率。而压实度不足时,试样孔隙大且连通性差,水分易在孔隙中积聚并冻结,冰晶生

长产生的冻胀力易导致颗粒位移，引发显著冻胀变形。

3.1.2 压实度对渗透系数的影响

由不同压实度下未筛分碎石试样渗透系数随冻融循环次数的变化规律可知，四组试样的渗透系数均随冻融循环次数增加呈下降趋势，且压实度越高，渗透系数衰减速率越慢：

压实度 85%的试样渗透系数衰减最快，冻融 30 次后渗透系数从初始的 0.08cm/s 降至 0.02cm/s，衰减率达 75%，表明试样孔隙结构在冻融作用下严重破坏，渗排水能力骤降；

压实度 90%的试样冻融 30 次后渗透系数降至 0.04cm/s，衰减率为 50%，渗排水能力有所下降；

压实度 93%的试样冻融 30 次后渗透系数为 0.065cm/s，衰减率为 18.75%；压实度 95%的试样渗透系数为 0.07cm/s，衰减率为 12.5%，两组试样渗透系数衰减率均较低，且始终保持较高的渗排水能力。

渗透系数的变化特征反映了试样孔隙结构的稳定性：压实度不足时，碎石颗粒间咬合作用弱，冻融循环中冰晶的冻胀与融化收缩易导致颗粒松动，孔隙堵塞或坍塌，从而降低渗透系数；高压实度下，碎石颗粒紧密咬合，孔隙结构稳定，冻融循环对孔隙的破坏作用小，因此渗透系数衰减慢，可长期保持高效的渗排水能力，及时排出孔隙水，减少冻胀源。

3.1.3 压实度对压实度衰减率与抗压强度的影响

冻融 30 次后，不同压实度试样的压实度衰减率与抗压强度测试结果如表 2 所示。由表 2 可知：

压实度衰减率随初始压实度提升呈显著下降趋势，压实度 85%的试样衰减率达 8.2%，而压实度 93%和 95%的试样衰减率仅为 1.5%和 1.1%，表明高压实度试样的结构稳定性更强，冻融循环对压实质量的影响更小；

抗压强度随初始压实度提升呈上升趋势，压实度 95%的试样抗压强度为 3.8MPa，是压实度 85%试样（1.2MPa）的 3.17 倍，表明高压实度可显著提升垫层的结构强度，增强其抵抗冻胀力与车辆荷载的能力。

表 2 冻融 30 次后试样压实度衰减率与抗压强度

初始压实度（%）	压实度衰减率（%）	抗压强度（MPa）
85	8.2	1.2
90	4.5	2.3
85	1.5	3.5
95	1.1	3.8

3.2 现场试验路监测结果分析

3.2.1 现场压实度检测结果

试验路施工过程中，不同试验段压实度现场检测结果如表 3 所示。由表 3 可知，现场压实度检测值与设计值偏差均在±1%以内，表明碾压工艺可有效实现设计压实度控制目标，其中压实度 93%和 95%试验段需振动压路机强振 6 遍，压实度 90%试验段强振 4 遍，压实度 85%试验段强振 2 遍，碾压遍数与压实度呈正相关。

表 3 试验路现场压实度检测结果

设计压实度（%）	平均检测压实度（%）	偏差（%）	碾压遍数（强振）
85	84.5	-0.5	2
90	90.3	+0.3	4
93	92.8	-0.2	6
95	95.1	+0.1	6

3.2.2 现场冻胀与融沉监测结果

试验路 1 年监测期内，不同压实度试验段的最大冻胀量与融沉量监测结果如表 4 所示。由

表 4 可知，现场监测结果与室内试验结果高度一致：

压实度 85%试验段最大冻胀量达 32mm，融沉量 28mm，冻融变形显著，路面出现轻微开裂；

压实度 90%试验段最大冻胀量 16mm，融沉量 14mm，冻融变形接近规范限值，路面无明显病害；

压实度 93%和 95%试验段最大冻胀量分别为 8mm 和 7mm，融沉量均为 6mm，冻融变形极小，路面结构稳定，无任何冻胀病害。

现场监测结果进一步验证，压实度 93%是寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的关键阈值，达到该阈值后，垫层可有效抵抗冻融循环作用，保持结构稳定。

表 4 试验路最大冻胀量与融沉量监测结果

压实度（%）	最大冻胀量（mm）	最大融沉量（mm）	路面病害情况
85	32	28	轻微开裂
90	16	14	无明显病害
93	8	6	无病害
95	7	6	无病害

4 压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响机制

结合室内试验与现场监测结果,从孔隙结构、水分迁移、力学特性三个方面揭示压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响机制:

4.1 孔隙结构调控机制

压实度直接决定未筛分碎石垫层的孔隙结构特征,包括孔隙率、孔隙大小与孔隙连通性。

低压实度下($<90\%$),垫层孔隙率高,且存在大量大孔隙与连通孔隙,水分易通过连通孔隙入渗并在大孔隙中积聚,低温下水分冻结形成冰晶,冰晶生长产生的冻胀力易导致颗粒位移,引发孔隙坍塌与结构破坏;同时,大孔隙为冰晶生长提供充足空间,加剧冻胀变形。高压实度下($\geq 93\%$),垫层孔隙率低,孔隙以小孔隙为主且分布均匀,连通孔隙少,可有效减少水分入渗与积聚,同时小孔隙限制冰晶生长空间,降低冻胀力产生的可能性;此外,高压实度下碎石颗粒紧密咬合,孔隙结构稳定,冻融循环对孔隙的破坏作用极小,可长期保持良好的结构形态。

4.2 水分迁移阻断机制

未筛分碎石垫层的抗冻胀核心功能是“毛细阻滞+高效排水”,压实度通过调控孔隙结构影响垫层的水分迁移与排水能力。低压实度下,垫层渗透系数虽初始值较高,但冻融循环后孔隙结构破坏导致渗透系数骤降,排水能力丧失,水分无法及时排出而在垫层内冻结,引发冻胀;

同时,低压实度下的大孔隙易形成毛细通道,加速地下水向上迁移,增加冻胀水源。高压实度下,垫层孔隙结构稳定,渗透系数衰减率低,可长期保持高效的渗排水能力,及时排出入渗水分,切断冻胀水源;同时,高压实度下的小孔隙可有效破坏毛细力,阻断地下水向上迁移,从根源上抑制冻胀发生。

4.3 力学特性强化机制

冻融循环过程中,冰晶生长产生的冻胀力与车辆荷载共同作用于垫层,要求垫层具备足够的力学强度以抵抗变形。低压实度下,碎石颗粒间咬合作用弱,垫层抗压强度低,无法抵抗冻胀力与车辆荷载的共同作用,易发生颗粒位移与结构变形,导致压实度衰减、冻胀加剧;高压实度下,垫层抗压强度显著提升,碎石颗粒间的咬合作用与摩阻力可有效抵抗冻胀力与车辆荷载,保持结构稳定性,减少冻融变形与压实度衰减,形成“高压实度—高强度—低冻胀—结构稳定”的良性循环。

5 寒区未筛分碎石垫层压实施工质量管控措施

基于研究成果,结合国道305线工程实际,从原材料控制、碾压工艺优化、压实度检测、质量通病防治四个方面,提出寒区未筛分碎石垫层压实施工质量管控措施,确保垫层压实度达

到93%及以上的抗冻胀阈值。

5.1 原材料质量控制

未筛分碎石应采用连续级配,最大粒径不超过75mm,其中40~60mm粒径碎石占比不低于70%,确保垫层具备良好的渗排水能力与结构稳定性;

严格控制碎石含泥量,含泥量应 $\leq 1.0\%$,避免细粒料堵塞孔隙导致渗排水能力下降;

碎石压碎值 $\leq 28\%$ 、洛杉矶磨耗损失 $\leq 30\%$,确保碎石具备足够的强度,避免碾压过程中颗粒破碎影响压实质量。

5.2 碾压工艺优化

摊铺厚度控制:采用分层摊铺,每层摊铺厚度控制在20cm(与设计垫层厚度一致),严禁超厚摊铺,确保碾压均匀;

碾压设备组合:采用“光轮压路机+振动压路机”组合碾压,初压采用18t光轮压路机静压2遍,消除摊铺离析,稳定碎石颗粒;复压采用20t振动压路机强振6遍,确保压实度达到93%及以上;终压采用18t光轮压路机静压2遍,消除轮迹,使垫层表面平整;

碾压速度与顺序:碾压速度控制在2~3km/h,从试验路两侧向中心碾压,碾压重叠宽度不小于20cm,确保无碾压死角;

含水率控制:施工过程中严格控制碎石含水率为4%~6%(最优含水率区间),含水率过低时应适量洒水,含水率过高时应晾晒,避免含水率不合理影响压实度。

5.3 压实度检测与控制

压实度检测应符合《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 3450—2019)要求,采用核子密度仪进行现场快速检测,每1000m²测2点,且不少于5点,关键项目合格率应不低于95%;

碾压过程中进行跟踪检测,每碾压2遍检测一次压实度,根据检测结果调整碾压遍数,确保最终压实度达到93%及以上;

检测点应均匀分布,包括试验路两侧、中心及碾压交接处,避免检测点分布不均导致的压实度误判;

对检测不合格区域,应及时补压并重新检测,直至压实度达标。

5.4 质量通病防治

摊铺离析防治:采用摊铺机匀速摊铺,摊铺速度控制在1~2m/min,避免摊铺机速度过快导致的粗细颗粒离析;离析区域应及时采用人工补撒细粒料并拌匀,确保级配均匀;

压实度不足防治:严禁超厚摊铺,根据碎石含水率调整碾压工艺,含水率过低时洒水保湿,确保碾压过程中颗粒间的润滑作用;对碾压死角区域采用小型振动夯补压,确保压实均匀;

孔隙堵塞防治:施工过程中严禁泥土、杂物混入碎石垫层,

摊铺前应清理下承层表面杂物,摊铺后及时碾压,避免雨水冲刷导致细粒料下沉堵塞孔隙;

冻融前防护:垫层施工完成后,应及时铺筑上层水稳底基层,避免垫层在冬季冻融前暴露在自然环境中,减少水分入渗与冻胀破坏。

6 结论

本研究以国道 305 线浑德伦至白音华段公路工程为依托,通过室内冻融循环试验与现场试验路监测,系统研究了不同压实度对寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能的影响规律,得出以下主要结论:

压实度与寒区未筛分碎石垫层冻胀率呈显著负相关,与渗透系数稳定性、抗压强度呈显著正相关。冻融 30 次后,压实度 85%的试样冻胀率达 3.2%,而压实度 93%和 95%的试样冻胀率仅为 0.8%和 0.7%,且渗透系数衰减率均低于 20%,结构

稳定性优异。

寒区未筛分碎石垫层抗冻胀性能存在关键压实度阈值 93%,当压实度达到 93%及以上时,垫层冻胀抑制效果趋于稳定,渗排水能力与结构强度可长期保持,冻融变形远低于规范限值;继续提高压实度至 95%,对冻胀率的降低作用有限,且会增加碾压施工成本。

压实度通过孔隙结构调控、水分迁移阻断、力学特性强化三种机制影响垫层抗冻胀性能:高压实度可优化孔隙结构、阻断毛细水分迁移、提升力学强度,从根源上抑制冻胀发生;低压实度下垫层孔隙结构易在冻融作用下破坏,导致渗排水能力丧失、冻胀加剧。

提出的寒区未筛分碎石垫层压实施工质量管控措施,可有效确保垫层压实度达到 93%及以上这一抗冻胀阈值。现场试验监测结果表明,该措施下垫层无冻胀病害,结构稳定性良好。

参考文献:

- [1] 杨凤龙.严寒地区铁路涵洞抗冻胀施工与耐久性安全控制研究[J].智能建筑与工程机械,2026,8(2):37-39.
- [2] 李国春,王成彪.寒区公路路面结构设计与抗冻性能提升[A]2026 中国城建经济研讨会论文集(中册)[C].河南省豫商经济文化交流协会,河南省豫商经济文化交流协会,2026:3.
- [3] 舒永鸣,路建国,覃早,邓菲,李华东,张喆茜.寒区地聚物-剑麻纤维协同固化土路基抗冻胀模型试验研究[J].冰川冻土,2025,47(3):761-769.