

# 再生骨料在公路小桥涵结构中的应用性能及优化设计

龙 华

江西全庆建设工程有限公司 江西省抚州 335300

**摘要:** 在“双碳”目标与绿色交通发展理念引领下,再生骨料作为建筑固废资源化利用的核心载体,在公路工程中的应用价值日益凸显。公路小桥涵作为路网的基础节点,其结构设计与材料选择直接关系工程经济性与环保效益。本文以再生骨料混凝土为研究对象,系统分析再生骨料的物理力学特性及混凝土的强度、变形、耐久等基本性能,重点探究其在小桥涵结构中的承载能力、抗裂性能及长期稳定性表现。结合工程实践提出配合比优化、构造措施完善、施工工艺改进的三维优化设计方案,为再生骨料在公路小桥涵中的科学应用提供技术支撑,助力公路工程绿色转型与资源循环利用。

**关键词:** 再生骨料; 公路小桥涵; 应用性能; 配合比优化

## 引言

我国公路建设领域每年产生大量建筑固废,同时新建工程对砂石骨料的需求持续攀升,资源短缺与固废堆积的双重矛盾日益突出。再生骨料通过对建筑废弃物破碎、筛分、提纯加工而成,可替代天然骨料制备混凝土,为化解这一矛盾提供有效路径。公路小桥涵分布广、数量多,结构受力相对简单,为再生骨料的推广应用提供了适宜场景。当前,再生骨料在小桥涵中的应用仍面临性能波动大、设计标准不明确、长期稳定性存疑等问题,部分工程因材料性能把控不当,出现结构开裂、耐久性不足等隐患。因此,深入研究再生骨料混凝土的基本性能,明确其在小桥涵结构中的应用表现,构建针对性的优化设计体系,不仅能降低工程成本、减少固废污染,更能推动公路工程实现“资源—工程—环境”的协调发展。

## 1 再生骨料混凝土的基本性能特点

再生骨料混凝土的性能由再生骨料本身特性与混凝土制备工艺共同决定,与天然骨料混凝土相比,其在物理力学、强度变形及耐久性能上存在显著差异,这些差异直接影响其在小桥涵结构中的应用可行性和适用范围。

### 1.1 再生骨料的物理力学特性

再生骨料的物理力学特性受原生混凝土强度、破碎工艺、杂质含量等因素影响,呈现出明显的复杂性与波动性。物理特性方面,再生骨料表面粗糙多孔,附着部分硬化水泥浆体与砂浆,导致其表观密度低于天然骨料,一般在 $2300\text{--}2500\text{kg/m}^3$ 之间,而天然碎石表观密度通常超过

$2600\text{kg/m}^3$ 。同时,再生骨料的吸水率较高,普遍在3%—8%,是天然骨料的2—4倍,这主要源于其内部孔隙与表面附着砂浆的吸水作用。力学特性上,再生骨料的压碎指标通常为15%—25%,高于天然骨料的10%—15%,表明其抗破碎能力相对较弱。此外,再生骨料的洛杉矶磨耗损失较大,耐磨性稍差,但表面粗糙性带来的界面粘结性能优势,在一定程度上可弥补强度不足的缺陷。这些特性决定了再生骨料混凝土在配合比设计中需重点关注水灰比调整与界面强化措施,以保障混凝土整体性能。

### 1.2 再生骨料混凝土的强度与变形性能

再生骨料混凝土的强度性能与再生骨料取代率密切相关,在取代率0—50%范围内,混凝土立方体抗压强度下降较为平缓,当取代率超过50%后,强度下降趋势明显加快。一般而言,再生粗骨料取代率为30%时,混凝土28d抗压强度可达天然骨料混凝土的85%—95%,满足小桥涵结构的强度要求;当取代率达到100%时,强度仅为天然骨料混凝土的60%—75%,需通过掺加矿物掺合料或外加剂进行强化。轴心抗压强度与劈裂抗拉强度的变化规律与立方体抗压强度基本一致,但其下降幅度更大,表明再生骨料混凝土的抗拉性能相对更弱。变形性能方面,再生骨料混凝土的弹性模量低于天然骨料混凝土,在相同应力作用下产生的弹性变形更大,泊松比略高,约为0.23—0.26。同时,其干燥收缩与徐变变形更为显著,干燥收缩值可达天然骨料混凝土的1.2—1.5倍,这主要由再生骨料高吸水率与内部孔隙结构导致,易引发混凝土早期开裂<sup>[1]</sup>。

### 1.3 再生骨料混凝土的耐久性能

耐久性能是决定再生骨料混凝土在小桥涵中使用寿命的关键因素，主要体现在抗渗性、抗冻性、抗碳化性与抗氯离子渗透性等方面。抗渗性方面，再生骨料的多孔结构使混凝土内部孔隙连通性增强，抗渗等级较天然骨料混凝土普遍降低一个等级，当取代率为 30% 时，抗渗等级可达 P6，满足一般小桥涵的抗渗要求；取代率超过 50% 后，抗渗等级易低于 P4，需采取界面强化措施。抗冻性方面，在反复冻融循环作用下，再生骨料内部孔隙水结冰膨胀易导致混凝土结构破坏，其抗冻等级通常为 F100—F200，低于天然骨料混凝土的 F200—F300，在寒冷地区应用时需控制取代率并掺加引气剂。抗碳化性与抗氯离子渗透性方面，再生骨料表面附着的水泥浆体可消耗部分二氧化碳与氯离子，一定程度上提升混凝土的抗碳化能力，但整体而言，其抗氯离子渗透性仍弱于天然骨料混凝土，在滨海或盐碱地区公路小桥涵中应用需谨慎控制取代率。

## 2 再生骨料在小桥涵结构中的应用性能分析

小桥涵结构主要承受车辆荷载、自重及环境荷载作用，对材料的承载能力、抗裂性能与长期稳定性有明确要求。再生骨料混凝土在小桥涵中的应用性能需结合结构受力特点，从构件承载、抗裂变形及长期性能三个维度进行系统评估。

### 2.1 结构构件的承载能力表现

小桥涵结构构件的承载能力取决于再生骨料混凝土的强度与截面刚度，不同构件的承载表现存在差异。涵台、基础等受压构件，在再生粗骨料取代率  $\leq 30\%$  时，承载能力可满足设计要求，其轴心受压承载力与天然骨料混凝土构件相比下降幅度小于 10%，且因混凝土弹性模量较低，构件受力过程中应力分布更为均匀，有利于延缓裂缝发展。盖板、挑梁等受弯构件，因再生骨料混凝土抗拉强度较低，承载能力下降更为明显，取代率 30% 时，受弯承载力下降约 12%—15%，需通过增大截面尺寸或配置更多受拉钢筋进行补偿。对于承受冲击荷载的桥面铺装层，再生骨料混凝土的抗冲击性能较弱，取代率不宜超过 20%，否则易出现冲击开裂。总体而言，在合理控制取代率并采取强化措施的前提下，再生骨料混凝土可满足小桥涵多数构件的承载要求，其中受压构件的适用性优于受弯、受拉构件<sup>[2]</sup>。

### 2.2 结构的抗裂与变形性能

小桥涵结构的抗裂性能直接关系其防水性与耐久性，再生骨料混凝土的高收缩特性使其抗裂性能成为应用关键。

在干燥环境下，再生骨料混凝土小桥涵易出现早期干燥收缩裂缝，主要集中在涵台与基础交接处、盖板与涵台连接部位等应力集中区域。这些裂缝多为表面微裂缝，宽度一般在 0.05—0.1mm，但若未及时处理，易在荷载与环境作用下扩展。变形性能方面，再生骨料混凝土构件的徐变变形较大，会导致小桥涵结构出现一定的后期沉降与挠度，涵台顶部的水平位移较天然骨料混凝土结构增加约 10%—20%。这种变形在结构设计允许范围内时，可通过设置伸缩缝进行释放；若变形过大，则可能导致结构拼接处开裂、防水层破坏。因此，再生骨料混凝土小桥涵的抗裂设计需重点关注收缩变形控制与构造措施优化<sup>[3]</sup>。

### 2.3 长期荷载下的性能稳定性

长期荷载作用下的性能稳定性是评估再生骨料混凝土小桥涵使用寿命的核心指标，主要体现为强度保持率与结构完整性。通过对已建成的再生骨料混凝土小桥涵进行长期观测发现，在取代率 30%、正常使用荷载作用下，结构构件的强度在使用前 3 年下降约 5%—8%，之后趋于稳定，5 年强度保持率可达 85% 以上。结构完整性方面，使用 5 年后，涵台表面出现少量细微裂缝，但未出现贯通裂缝与结构变形，基础沉降稳定在设计允许范围内。在冻融循环频繁的地区，再生骨料混凝土小桥涵的性能衰减更快，使用 3 年后，涵台表面出现风化剥落，强度保持率降至 75% 左右，需进行表面防护处理。此外，在干湿交替环境下，再生骨料混凝土的抗渗性能逐渐下降，易导致钢筋锈蚀，影响结构长期稳定性。总体来看，再生骨料混凝土小桥涵的长期性能稳定性与使用环境密切相关，在温和环境下表现良好，在恶劣环境下需加强耐久性强化措施。

## 3 面向小桥涵结构的再生骨料混凝土优化设计

针对再生骨料混凝土在小桥涵中的应用特点与性能短板，需从配合比、结构构造、施工工艺三个维度进行优化设计，通过技术手段弥补材料性能缺陷，提升结构整体性能与使用寿命。

### 3.1 配合比的优化设计方法

配合比优化是提升再生骨料混凝土性能的基础，需根据小桥涵构件的受力特点与使用环境确定合理参数。首先，再生骨料预处理是优化前提，需通过水洗去除表面杂质与粉尘，采用饱和面干状态投料，以精准控制混凝土用水量；对强度较低的再生骨料，可进行表面强化处理，如涂刷水泥净浆或掺加硅灰浆体，提升其界面粘结性能。其次，胶凝材料

体系优化需采用“水泥+矿物掺合料”复合体系，矿物掺合料优先选用粉煤灰、矿渣粉，掺量控制在胶凝材料总量的20%—30%，可有效填充再生骨料内部孔隙，改善混凝土密实度。水灰比设计需结合再生骨料吸水率调整，一般比天然骨料混凝土降低0.03—0.05，控制在0.45—0.55之间。例如某乡村公路小桥涵工程，再生粗骨料取代率30%，配合比设计为水泥320kg/m<sup>3</sup>、粉煤灰80kg/m<sup>3</sup>、再生粗骨料1100kg/m<sup>3</sup>、天然砂650kg/m<sup>3</sup>、水180kg/m<sup>3</sup>、减水剂6kg/m<sup>3</sup>，混凝土28d抗压强度达35MPa，满足涵台设计要求，同时干燥收缩值较未优化配合比降低20%。

### 3.2 结构构造措施的优化设计

结构构造措施优化可通过调整截面形式、设置加强筋等方式，弥补再生骨料混凝土性能缺陷。对于涵台等受压构件，可采用变截面设计，在底部与顶部设置加强段，增大截面尺寸以提升承载储备；在涵台与基础交接处设置腋角，减少应力集中，防止裂缝产生。盖板等受弯构件，除增大截面高度外，可采用双层双向配筋，受拉区钢筋保护层厚度增加5—10mm，同时在钢筋表面涂刷防腐涂层，提升抗锈蚀能力。伸缩缝与沉降缝设计需适应再生骨料混凝土的大变形特性，缝宽较天然骨料混凝土结构增加2—3mm，采用弹性更好的橡胶止水带，确保密封防水性能。某高速公路小桥工程中，再生骨料混凝土盖板采用“增大截面高度+双层配筋”方案，截面高度从20cm增至25cm，受拉区配置Φ12@150钢筋，使用3年后未出现可见裂缝，挠度值控制在设计允许范围内，结构性能稳定<sup>[4]</sup>。

### 3.3 施工工艺的优化与质量控制

施工工艺优化与质量控制是保障再生骨料混凝土性能落地的关键，需贯穿搅拌、浇筑、养护全过程。搅拌工艺方面，采用“先干拌后湿拌”的搅拌顺序，先将再生骨料、天然砂、水泥、矿物掺合料干拌20—30s，再加入水与减水剂湿拌60—90s，确保再生骨料充分吸水与材料混合均匀。浇筑工艺需分层进行，每层厚度控制在30cm以内，采用插入式振捣器振捣，振捣时间较天然骨料混凝土延长5—10s，确保混凝土密实，避免蜂窝、麻面等缺陷。养护工艺是控制收缩裂缝的核心，浇筑完成后12h内覆盖土工布洒水养护，养护时间不少于14d，在干燥炎热环境下，需搭设遮阳棚并采用喷淋养护，保持混凝土表面湿润。质量检测方面，除常规强度检测外，需增加收缩率、抗渗性等指标检测，再生骨料混凝土28d干燥收缩率应控制在0.06%以内，抗渗等级

不低于P6。某县乡公路小桥涵施工中，通过严格执行优化后的施工工艺与质量控制标准，再生骨料混凝土构件的一次验收合格率达100%，使用2年后表面完好，无明显裂缝与变形<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

再生骨料在公路小桥涵结构中的应用，是践行绿色交通理念、推动建筑固废资源化利用的重要路径。再生骨料混凝土的基本性能受取代率影响显著，在取代率≤30%时，其强度、耐久性能可满足小桥涵多数构件的设计要求，其中受压构件的适用性优于受弯、受拉构件。但再生骨料混凝土存在收缩变形大、抗拉强度低等短板，易导致结构出现早期裂缝与后期变形，需通过配合比优化、构造措施完善、施工工艺改进构建三维优化体系。配合比优化聚焦骨料预处理与胶凝材料调整，构造优化侧重截面强化与应力释放，施工优化核心在于搅拌、浇筑、养护全过程质量控制，三者协同作用可有效提升再生骨料混凝土小桥涵的性能与稳定性。公路小桥涵的地域差异性与环境复杂性，决定了再生骨料应用需坚持“因地制宜”原则，在温和环境、受压为主的构件中可优先推广应用，在寒冷、盐碱等恶劣环境或受弯、受拉关键构件中需严格控制取代率并强化技术措施。未来，再生骨料在小桥涵中的应用应进一步加强性能检测技术与长期性能评估研究，完善相关设计与施工标准，推动再生骨料混凝土从“可行应用”向“高效应用”转变。通过技术创新与实践推广，让再生骨料在公路工程中发挥更大价值，为交通基础设施建设的绿色高质量发展提供有力支撑。

### 参考文献：

- [1] 谢祥兵,包梦,李广慧,等.基于改进灰熵关联分析的混合型再生粗骨料评价指标及分级研究[J].硅酸盐通报,2022,41(1):354—362.
- [2] 王睿奇,寇长江,胡皓天,等.正硅酸乙酯水解反应参数对再生骨料性能强化效果的影响[J].公路工程,2022(003):047.DOI:10.19782/j.cnki.1674-0610.2022.03.022.
- [3] 赵振宇,张立群,樊旭英,等.再生骨料生产调查与其在普通公路中的应用研究[J].河北建筑工程学院学报,2020,38(1):5.DOI:10.3969/j.issn.1008-4185.2020.01.005.
- [4] 刘国强,姜楠,等.100%粗骨料取代率再生混凝土于高速公路基层中的应用研究[J].绿色环保建材,2021(4):3.
- [5] 刘福军.再生骨料透水混凝土在生态公路防护工程中的应用分析[J].交通建设与管理,2022(004):000.