

绿色再生骨料混凝土在市政建筑工程中的性能改良机理

张淑芳¹ 蒙核量²

1. 武汉市洪山区城市更新服务中心 湖北 武汉 430070

2. 武汉市测绘研究院 湖北 武汉 430022

摘要: 绿色再生骨料混凝土可实现建筑废弃物资源化利用, 契合市政工程绿色低碳发展需求, 其性能改良是推广应用的关键。本文从再生骨料自身特性、胶凝材料体系、外加剂作用及配合比优化四个维度, 系统剖析性能改良机理, 通过界面缺陷修复、孔隙结构优化、组分协同调控等方式, 改善再生骨料混凝土的工作性、强度与耐久性, 解决应用中的性能短板, 为该材料在市政建筑工程中的规模化、高质量应用提供理论支撑, 助力市政工程可持续发展。

关键词: 再生骨料混凝土; 市政建筑工程; 性能改良; 机理; 资源化利用

引言: 随着市政建筑工程规模化推进, 建筑废弃物排放量逐年攀升, 既造成资源浪费, 也带来环境压力。再生骨料混凝土作为绿色环保建材, 可将建筑废弃物转化为可用骨料, 缓解资源短缺与环境负担。但再生骨料存在界面缺陷、孔隙率高、表面特性不佳等问题, 导致其混凝土性能难以满足市政工程严苛要求, 限制了推广应用。因此, 深入剖析绿色再生骨料混凝土的性能改良机理, 优化其各项性能指标, 对推动市政工程绿色转型、实现资源循环利用具有重要意义。

1 再生骨料自身特性改良机理

1.1 再生骨料界面缺陷改良机理

旧砂浆与原生骨料之间附着的水化产物构成了再生材料特有的薄弱界面层, 该区域因微裂纹密集分布和钙矾石晶体定向生长而呈现出明显的力学弱环特征^[1]。通过碳化处理使CO₂渗透至旧砂浆内部, 与游离Ca(OH)₂反应生成CaCO₃晶体填充微裂缝, 可使界面粘结强度获得实质性提升。硫酸钠溶液浸泡能促使旧砂浆中未完全水化的水泥颗粒发生二次水化反应, 新生成的C-S-H凝胶桥接原生骨料表面与旧砂浆基体之间的空隙, 从而修复破碎造成的界面损伤。聚合物乳液在骨料表面成膜后, 膜层与水泥浆体之间形成化学键合, 有效抑制了应力集中区域裂纹的扩展路径, 使界面区的断裂韧性得到显著改善。

1.2 再生骨料孔隙结构优化机理

再生骨料内部存在大量因旧砂浆剥落和骨料本身开裂而形成的连通孔隙网络, 总孔隙率通常远高于天然骨料。这些连通孔隙在荷载作用下成为应力集中的源头, 并为水分和侵蚀性介质提供了快速传输通道。掺入纳米SiO₂颗粒可通过火山灰反应在孔隙壁面沉积非晶态凝胶, 逐步缩小孔径并将大孔转化为无害的凝胶孔, 从而降低骨料的吸水率。水玻璃溶液浸渍后与骨料内部Ca(OH)₂

反应生成硅酸钙沉淀, 沉淀物堵塞毛细孔道并提升骨料的表观密度。微波加热处理使骨料内部自由水快速汽化产生微膨胀压力, 该压力迫使裂缝面贴合闭合, 孔隙连通性随之降低。逐步升温的热处理工艺还能促使旧砂浆中的脱水产物重新结晶, 填补因脱水收缩产生的微孔隙, 使骨料整体致密化程度明显提高。

1.3 再生骨料表面特性调控机理

再生骨料表面因残留旧水泥浆而呈现出不规则的粗糙形态和较高的比表面积, 这种特性导致拌合物需水量增大且工作性难以控制。盐酸溶液洗涤可溶解表面附着的松散水化产物, 暴露出骨料本体的矿物晶面, 使表面微观纹理趋于规整。硅烷偶联剂分子中的烷氧基水解后与骨料表面羟基缩合形成共价键, 疏水性有机链段朝外排列, 大幅降低了骨料与水的亲和性。纳米CaCO₃颗粒在机械研磨作用下嵌入骨料表面微凹坑中, 一方面填补了表面缺陷, 另一方面增加了与新水泥浆体的机械咬合力。电化学沉积技术能在骨料表面均匀生长一层致密的钙钛矿薄膜, 该薄膜不仅阻隔了水分向骨料内部的渗透, 还为后续水泥水化提供了成核位点, 促进了界面区水化产物的致密生长。

2 胶凝材料体系改良机理

2.1 胶凝材料组分协同作用机理

水泥基胶凝材料与矿物掺合料之间存在显著的化学互补效应, 粉煤灰中的玻璃微珠在Ca(OH)₂溶液中缓慢溶解, 释放出活性SiO₂和Al₂O₃参与二次水化反应, 生成的低钙C-S-H凝胶填充于水泥骨架间隙, 使浆体孔隙率持续下降。矿渣粉因含有较高比例的铝相, 在碱性激发下优先生成钙矾石与C-A-S-H凝胶, 这类产物对硫酸盐侵蚀具有天然抵抗能力, 弥补了普通硅酸盐水泥抗侵蚀性不足的缺陷。硅灰以极细的无定形颗粒填充于水泥颗粒

之间的微空隙,起到物理微集料效应,降低了浆体的渗透系数^[2]。三元胶凝体系中,水泥提供早期强度所需的水化热与C-S-H凝胶,粉煤灰贡献后期火山灰活性以持续致密化,矿渣粉则通过铝酸盐反应提升耐久性,三者和时间轴上形成强度与抗渗性能的递进式增长。多元组分的掺入还能有效调节水化放热速率,避免大体积浇筑时因温峰过高而引发的热应力裂缝,这对市政工程中大面积路面与管廊底板的施工尤为关键。

2.2 胶凝材料水化反应调控机理

水灰比的精确调控直接决定了水泥水化产物的种类与分布形态,低水灰比条件下水泥颗粒周围的水分被迅速消耗,C-S-H凝胶以短纤维状密集交织,形成高连通度的致密网络结构。缓凝剂分子吸附在水泥熟料表面后延缓了C₃A与水的初始反应,使钙矾石晶体在后期缓慢析出,避免了因早期过度膨胀造成的微裂纹。早强组分加速C₃S的溶解速率,促使水化硅酸钙在数小时内大量生成,为再生骨料提供了更快的早期握裹力。碱激发环境下,高pH值溶液破坏了矿渣玻璃体的Si-O-Si键网络,使四面体结构解聚为单体并与Ca²⁺重新配位,形成以三维交联为主的地聚合物骨架,该骨架的化学稳定性远超普通水化产物。养护制度的优化同样影响反应路径,蒸汽养护加速了水热合成反应,使托贝莫来石等高温稳定相提前生成,浆体微观结构更加均匀。

2.3 胶凝材料与再生骨料界面粘结强化机理

再生骨料表面残留的旧砂浆层与新拌浆体之间存在明显的化学势差,新水泥浆体中的Ca²⁺向旧砂浆孔隙内迁移,在界面处形成梯度分布的水化产物层,该层的C-S-H凝胶针状晶体垂直于骨料表面生长,产生机械锚固效应。聚合物改性水泥浆体在界面区形成连续的有机-无机互穿网络,聚合物膜桥接了新旧砂浆之间的微裂缝,使界面断裂能显著提升。掺入纳米CaCO₃的浆体中,纳米颗粒优先在骨料表面旧砂浆的微孔内成核沉积,形成纳米晶须增强的过渡层,该层的弹性模量介于新旧砂浆之间,有效缓解了刚度突变引发的应力集中。矿渣掺合料释放的Al³⁺与骨料表面溶解的Ca²⁺反应生成水化铝酸钙填充物,进一步密合了界面微隙,使粘结强度随养护龄期持续增长。

3 外加剂改性作用机理

3.1 外加剂对混凝土工作性的改良机理

再生骨料表面覆盖的旧砂浆层使材料比表面积远超天然骨料,拌合过程中自由水被骨料迅速吸附,浆体流动性在数分钟内便出现明显衰减。聚羧酸减水剂分子通过主链上的羧酸根基团与水泥颗粒表面钙离子螯合,长侧链在颗粒外围构建空间位阻层,原本因静电吸引而团

聚的水泥凝团由此解絮,内部包裹的水分获得释放,浆体屈服应力随之降低。保水型外加剂中的纤维素醚组分在骨料界面处吸附形成凝胶膜,该膜具有选择透过性,能够延缓自由水向骨料内部迁移的速率,使坍落度在较长时段内保持稳定。引气剂的表面活性分子在机械搅拌剪切场中被分散至浆体各处,形成大量直径10至100微米的封闭微气泡,气泡之间以及气泡与骨料颗粒之间构成滚动接触,颗粒间的干摩擦转化为湿润摩擦,宏观上表现为拌合物粘聚性改善,离析和泌水倾向明显减弱。粘度调节组分则通过氢键网络束缚部分自由水,在不额外加水的条件下提高浆体屈服值,使拌合物在泵送和浇筑过程中维持均匀的流变形态,避免因重力作用导致的骨料下沉和浆体上浮。

3.2 外加剂对混凝土强度形成的调控机理

早强组分中的硫酸盐离子优先与水泥中的铝酸三钙反应,在数分钟内生成针状钙矾石晶体,这些晶体在再生骨料表面密集成核,为后续硅酸三钙水化产生的C-S-H凝胶提供了大量锚固位点,新旧界面处的微观握裹力在早期便获得显著增强。减水剂通过分散水泥颗粒使实际水灰比大幅降低,颗粒间平均间距缩小后水化产物的搭接几率成倍增加,浆体内部形成连续致密的固体骨架,宏观抗压强度随毛细孔隙率的减少而呈非线性增长。膨胀剂中的硫铝酸钙在有水环境中迅速水化生成高硫型钙矾石,结晶过程伴随体积膨胀,该膨胀力在受限条件下转化为预压应力,恰好抵消了浆体因化学收缩和自干燥引起的拉应力,微裂纹在强度增长阶段被有效抑制。纳米外加剂将粒径在数十纳米的SiO₂颗粒均匀分散于浆体中,纳米颗粒一方面填充于水泥水化产物之间的微孔隙,另一方面与Ca(OH)₂发生二次火山灰反应生成纳米级C-S-H凝胶,浆体孔结构由以微米级毛细孔为主转变为以纳米级凝胶孔为主,抗压强度和弹性模量因此获得协同提升。

3.3 外加剂对混凝土耐久性的提升机理

密实剂中的活性硅组分与水泥水化释放的Ca(OH)₂发生坡莫反应,生成的不溶性硅酸钙凝胶逐步沉积并封堵浆体中的毛细孔道,渗透系数由此下降数个数量级,氯离子和硫酸根离子穿过浆体所需的扩散路径显著延长。引气剂在浆体内构建的封闭气泡网络在冻融循环中扮演膨胀缓冲腔角色,孔隙水结冰时产生的静水压力被气泡压缩变形所吸收,浆体内部的拉应力峰值被控制在抗拉强度以下,表层剥落和内部损伤得以避免^[1]。有机硅憎水剂分子凭借低表面张力渗入混凝土表层数毫米深度,与孔壁表面的硅羟基发生缩合反应生成甲基硅氧烷疏水层,毛细吸水作用被大幅削弱,外部水分侵入量减少后碳化反应

的底物供应不足,碳化前沿推进速率明显放缓。纳米 TiO_2 光催化组分分散于混凝土表层后,在紫外线激发下产生活性氧物种,能够分解附着在表面的有机污染物并破坏微生物细胞膜结构,从而抑制霉菌和地衣在潮湿环境中的定殖与产酸活动,材料表面的生物化学劣化过程由此得到延缓。

4 配合比优化改良机理

4.1 骨料级配优化的改良机理

再生骨料经破碎后颗粒形状不规则且级配连续性差,粗颗粒间空隙无法被细颗粒有效填充,导致浆体包裹层厚度不均。基于最紧密堆积理论调整粗细骨料比例,可使骨料总体孔隙率降至最低,水泥浆仅需填充颗粒间隙而非包裹整个骨料表面,胶凝材料用量随之减少。连续级配曲线越平滑,骨料堆积密度越高,浆体在骨料间形成的润滑膜越薄且分布越均匀,拌合物的内摩擦力显著降低。间断级配虽能提升堆积密度,但粗骨料与细骨料之间的粒径跳跃易造成浆体局部富余或匮乏,需通过调整砂率来平衡工作性与强度之间的矛盾。再生粗骨料表面附着的旧砂浆在级配优化后充当了天然微集料,填塞于主骨料间隙中,相当于在宏观级配之上叠加了一层微观级配效应,使复合骨料体系的整体密实度获得双重提升。

4.2 水胶比调控的改良机理

水胶比直接控制浆体中自由水与胶凝材料的比例关系,比值降低意味着单位体积内有效胶凝组分增多,水化产物生成量增大,毛细孔道被凝胶体逐步充填。对于再生骨料混凝土而言,过低的水胶比会加剧骨料高吸水率带来的自干燥效应,浆体在硬化前便因失水而无法完成充分水化,反而削弱强度。存在一个临界水胶比区间,在该区间内浆体既能补偿骨料吸水损失,又能保证足够的流动性以实现均匀密实。胶凝材料总量增加后,即使水胶比保持不变,绝对用水量的上升也会提升浆体对骨料的包裹厚度,界面过渡区宽度扩大使应力传递更加平缓,宏观抗压强度获得改善。掺入超细矿物掺合料后,等效水胶比概念被引入,超细颗粒的比表面积效应使得实际

参与水化反应的水量远超名义水胶比所反映的数值,需重新校核有效水胶比以确保配合比设计的准确性。

4.3 组分比例协同优化的改良机理

胶凝材料、骨料、外加剂与水四组分之间存在多维耦合关系,单一参数调整往往引发其他性能指标的波动。增加粉煤灰掺量虽能改善后期强度与耐久性,但早期强度发展滞后,需通过提高水泥用量或掺入早强组分来弥补。再生骨料替代率上升导致需水量增大,减水剂掺量须相应提高以维持坍落度,但过量减水剂引发的过度分散会使浆体粘聚性下降,骨料下沉造成底部疏松。砂率偏低时粗骨料间接触点增多,浆体薄膜易被挤破而产生干缩裂缝;砂率偏高则总比表面积增大,需水量激增,浆体包裹层过薄导致界面粘结弱化。通过正交试验或响应面法建立多目标优化模型,在强度、工作性与耐久性之间寻找帕累托最优解,使各组分比例达到一种动态平衡状态,任何单一组分的微调都不会引起性能的剧烈波动,配合比的鲁棒性由此得到保障。

结束语

绿色再生骨料混凝土的性能改良是多维度、多组分协同作用的结果,再生骨料自身特性优化奠定基础,胶凝材料体系调控强化核心性能,外加剂改性补齐应用短板,配合比优化实现综合性能平衡。这些改良手段的协同作用,可有效改善再生骨料混凝土的工作性、强度与耐久性,使其满足市政道路、管廊等工程的使用要求。该改良路径实现了建筑废弃物资源化利用与市政工程绿色发展的有机结合,为绿色建材在市政领域的广泛应用提供了坚实的理论与技术支撑。

参考文献

- [1]刘迪,吕镇,柏桂安,等.不同取代率再生骨料对房屋建筑混凝土力学性能影响研究[J].砖瓦,2026(2):36-39.
- [2]张雄,蒲润利,梁静.绿色混凝土在建筑施工中的应用研究[J].佛山陶瓷,2026,36(2):164-166.
- [3]李疏影,谭勇庆,胡帅,等.再生骨料混凝土的可持续发展之路[J].建筑与施工,2026,5(2):127-129.