

高性能混凝土配合比设计优化及性能提升

胡恒源

(四川路航建设工程试验检测有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 为了优化高性能混凝土的配合比设计,本研究分析了原材料选择、水胶比控制及外加剂使用等关键要素,并探讨了矿物掺合料的二次水化、纤维增强技术及养护措施对混凝土性能提升的影响,旨在为高性能混凝土的生产与应用提供可靠的设计优化指导和性能提升方案参考。研究结果表明,优选高强水泥和合理级配骨料能显著改善混凝土基体性能;降低水胶比并采用功能性外加剂可大幅提高混凝土密实度和耐久性;矿物掺合料的二次反应和纤维材料的引入可有效增强混凝土抗裂性和抗冲击性;优化养护制度可进一步保障混凝土的长效性能表现。

关键词 高性能混凝土; 配合比; 设计优化; 性能提升

中图分类号: TU528

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.004

0 引言

随着建筑行业的快速发展,传统混凝土已难以满足复杂多变的工程要求。高性能混凝土通过精细的骨料配置和恰当的养护条件,提高材料的均匀性和抗压强度。然而,高成本 and 环境影响限制了其广泛应用。因此,本研究致力于优化配合比设计,探索使用工业副产品和废弃材料替代部分水泥,以降低成本并提升环保性能,对于推动建筑行业可持续发展具有重要意义。

1 高性能混凝土配合比设计优化的关键要素

1.1 原材料的优选与质量控制

高性能混凝土的配合比设计优化首先需要从原材料入手,确保使用的原材料质量优异且性能可靠。水泥作为混凝土的主要胶凝材料,其种类和强度等级直接决定了混凝土的基本性能。在高性能混凝土中,通常选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,其中强度等级多为42.5级或更高,以满足高强度和耐久性需求。高强度水泥不仅能提供足够的初期强度,同时还能在后期表现出优越的耐久性。例如:某项目中使用42.5级硅酸盐水泥,在0.32水胶比、优质骨料及高效外加剂的协同作用下,混凝土28天抗压强度可达80 MPa;若采用32.5级普通硅酸盐水泥,需通过降低水胶比至0.28以下,并复合掺入高活性矿物掺合料(如硅灰 $\geq 10\%$ 、粉煤灰 $\geq 20\%$),方可实现相近强度水平。由此可见,高性能混凝土配合比设计应以胶凝材料体系优化为基础,需综合考量水泥强度等级、水胶比控制、掺合料协同及外加剂匹配等多因素耦合作用。

其次,骨料的选择与级配也是影响混凝土性能的重要因素。优质骨料应具有均匀的粒径分布、良好的级配以及适中的吸水率。在高性能混凝土中,粗骨料的

最大粒径一般不超过20 mm,以确保较好的工作性和强度。在细骨料方面,建议使用符合《建设用砂》(GB/T 14684-2022)的Ⅰ类中砂或特细砂,其粒型良好,杂质含量低,不仅能提供必要的密实性,还能改善混凝土的和易性。

根据试验,砂率从35%增加至38%时,混凝土的流动性显著提高,而抗压强度保持不变;当砂率进一步提高至42%时,尽管流动性继续改善,但抗压强度开始下降。因此,优化的砂率通常在38%左右,既能满足施工性能,又保证了力学性能。此外,骨料的表面粗糙度和压碎指标也是关键控制参数。研究表明,压碎指标不超过10%、吸水率低于1%的骨料能显著提高混凝土的密实度和耐久性。

最后,矿物掺合料的选择与合理掺量也是高性能混凝土配合比设计中的重要组成部分。粉煤灰作为典型的火山灰质材料,其掺量控制在胶凝材料总量的20%~40%,可以通过填充效应和火山灰反应改善混凝土的密实性和后期强度。硅灰因颗粒极细且活性高,通常掺量为5%~10%。当硅灰掺量接近8%时,混凝土抗压强度提升明显,泌水现象减少,塑性收缩裂缝显著降低。矿渣粉通过潜在活性反应和填充作用提升混凝土的耐久性,改善抗化学侵蚀能力,掺量为20%~40%。当矿渣粉掺量接近30%时,混凝土的抗压强度显著提升,氯离子扩散系数明显降低^[1]。

1.2 水胶比的控制与优化

水胶比是影响高性能混凝土性能的核心参数,其控制直接决定了混凝土的抗压强度、耐久性和施工性能。当水胶比较高时,水化反应能够充分进行,混凝土具有较好的工作性,但随之而来的是内部毛细孔隙较多,抗压强度和耐久性降低。当水胶比减小时,水

化产物的密实程度显著提高,毛细孔减少,抗压强度明显上升,耐久性能也随之改善。但过低的水胶比可能导致流动性不佳,混凝土施工难度加大,同时内部水化不完全,最终限制后期强度增长。因此,找到适宜的水胶比范围是配合比设计的核心目标。

控制水胶比的优化方法通常结合试验数据与理论模型。试验方法是通过对不同水胶比条件下的混凝土性能进行系统测试,包括抗压强度、抗折强度、抗渗性能和耐久性指标等。试验数据显示,水胶比为 0.30 时,混凝土的 28 天抗压强度达到 75 MPa,氯离子扩散系数为 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,表现出较好的力学性能和耐久性。如果将水胶比降至 0.25,虽然抗压强度略有提升至 80 MPa,但混凝土的工作性显著下降,混合物拌合难度增加,不利于大规模工程施工。

在理论上,经验公式为优化水胶比提供了计算依据。常用公式为:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{w/c} \right)^n \quad (1)$$

在公式(1)中, f_c 表示混凝土抗压强度(MPa), w/c 为水胶比, K 和 n 是经验系数,取决于水泥强度等级和配合比设计条件。当目标抗压强度为 70 MPa,取 $K=33$ 和 $n=0.7$,计算得到水胶比为 0.32。进一步结合试验数据验证后,水胶比 0.32 被认为是该设计条件下的最佳选择。

在工程实践中,水胶比优化还需综合考虑实际施工条件和长期性能需求。针对高强混凝土,高效减水剂的使用可以在保证工作性的同时降低水胶比,从而改善混凝土的力学性能和耐久性。对于高抗渗要求的耐久性混凝土,水胶比通常需控制在 0.28 以下,通过添加矿物掺合料如硅灰和粉煤灰来进一步提高致密性和抗渗性能。

1.3 外加剂的合理使用

通过优化外加剂的种类、掺量与掺入方式,可以改善混凝土的和易性、强度及耐久性。常用的外加剂包括高效减水剂、缓凝剂、早强剂、引气剂等。高效减水剂通过降低用水量,使混凝土在低水胶比条件下保持良好的流动性,提升抗压强度和耐久性。例如:加入减水率为 30% 的高效减水剂后,混凝土的 28 天抗压强度提高 20% 以上,同时保持良好的施工性能。缓凝剂的使用能延长混凝土的初凝和终凝时间,为复杂结构施工提供充足的操作时间。早强剂的主要功能是加快水泥水化进程,早期强度提升 10% ~ 15%,适合工期紧张的工程。引气剂通过引入微小的稳定气泡,提升混凝土抗冻融性能,同时对泵送混凝土的可泵性有显著改善作用。

外加剂的掺量和掺入方式是外加剂使用的关键点。

掺量过少可能达不到预期效果,而掺量过多可能导致副作用,如引起混凝土离析或影响后期强度。以高效减水剂为例,掺量通常为胶凝材料总量的 0.5% ~ 1.5%。在实际工程中,通过试验确定具体掺量,例如:当掺量为胶凝材料总量的 1.0% 时,减水效果最佳,混凝土的流动性和强度均表现良好^[2]。缓凝剂的掺量控制在胶凝材料总量的 0.1% ~ 0.5%,其使用主要视施工环境温度和工期要求而定。在高温施工条件下,适当增加缓凝剂掺量能够有效延缓凝结时间,确保浇筑和振捣的质量。早强剂的掺量通常控制在 0.5% ~ 2%,用于寒冷环境或需要快速拆模的情况,以满足工期需求和早期强度增长要求。引气剂掺量一般为胶凝材料总量的 0.01% ~ 0.1%,用于提高混凝土的抗冻性和抗渗性,同时对混凝土的施工性能也有明显改善。此外,在掺入方式方面,高效减水剂在搅拌初期与拌合水一同加入,以确保外加剂与水泥充分混合,发挥最佳减水效果。缓凝剂和早强剂的掺入时间应根据其作用特点合理安排。缓凝剂可与拌合水同步加入,而早强剂通常在主胶凝材料完全分散后加入,以确保其活性物质能够尽快发挥作用。引气剂建议在搅拌中期加入,使其在混合过程中充分分散到混凝土基体中,形成均匀的微小气泡。

2 高性能混凝土性能提升的关键技术

2.1 矿物掺合料的二次水化反应

矿物掺合料的二次水化反应通过粉煤灰、硅灰和矿渣等掺合料与水泥水化产物的相互作用,产生更多的胶凝材料,从而显著改善混凝土的强度、耐久性和抗化学侵蚀能力。其机理可以分为三个方面:首先是掺合料的物理填充效应,其次是火山灰反应和潜在活性反应,最后是与水泥水化产物的协同作用。

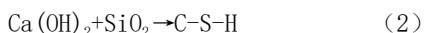
粉煤灰是常见的火山灰质掺合料,主要由活性氧化硅和氧化铝组成。粉煤灰的颗粒呈球状,具有良好的流动性,在混凝土中可以填充空隙,从而提高混凝土的密实性。这种物理效应显著改善了混凝土的工作性和早期强度。此外,在水化过程中,粉煤灰中的活性二氧化硅与水泥水化产生的氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)发生二次水化反应,生成更多的 C-S-H 凝胶。新生成的 C-S-H 凝胶既能提升混凝土的后期强度,也能降低孔隙率和渗透性,从而提高抗化学侵蚀能力和耐久性。

硅灰因其超细颗粒和高活性,常被用于高性能混凝土中。硅灰颗粒的粒径通常为水泥颗粒的 1/100,显著填充水泥颗粒间的孔隙,提高混凝土的致密度。硅灰的高活性使其在混凝土早期就可以参与反应,加速 C-S-H 凝胶的形成,同时减少钙矾石等有害产物的生成。这种反应进一步提升了混凝土的抗压强度和抗折强度,改善了抗裂性能和抗冻融能力。硅灰的掺量通常为胶

凝材料总量的5%~10%,研究表明,当硅灰掺量为8%时,混凝土的28天抗压强度提升约20%,氯离子扩散系数降低50%以上^[3]。

矿渣粉作为潜在活性掺合料,在高性能混凝土中起着重要作用。矿渣粉中含有一定量的氧化钙、氧化硅和氧化铝,在水泥水化过程中,这些成分会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和其他水化产物反应,生成额外的C-S-H凝胶和钙铝酸盐水化产物。矿渣粉的加入减少了孔隙率,提高了混凝土的抗渗性能和抗化学侵蚀能力。掺量通常为凝材料总量的20%~40%。当矿渣粉掺量达到30%时,混凝土的28天抗压强度提升超过12%,氯离子扩散系数降低约40%,并且耐久性明显改善。

掺合料与水泥水化产物的相互作用主要表现在其参与二次水化反应中。在水泥初期水化过程中,生成了C-S-H凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。粉煤灰和硅灰中的活性氧化硅与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成额外的C-S-H凝胶,从而提高混凝土的强度和致密性。矿渣粉则通过活化反应与水化产物生成更稳定的水化产物,同时减少碱性物质的含量,降低了混凝土的碱-硅反应风险。公式可以简化为:



由公式(2)可知,该反应减少了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量,防止其在混凝土孔隙中形成裂缝,还增加了C-S-H凝胶的总量,使混凝土的整体强度和耐久性得到进一步提升^[4]。

2.2 纤维增强技术

钢纤维与聚丙烯纤维在高性能混凝土中的应用有助于提升其抗裂性能和抗冲击性能。钢纤维掺量一般为混凝土体积的0.5%~2.0%,有效桥接混凝土中的微裂缝,限制裂缝扩展并提高抗裂能力。掺量为1.0%时,混凝土抗拉强度提高20%,抗弯强度提高15%,表现出更强的力学性能。钢纤维分布均匀后,裂缝尖端的应力集中减轻,使混凝土在受外力作用下展现出更高的韧性和稳定性,同时提升抗冲击性能,适用于需要耐久承载的工业地坪和抗震结构等工程。

聚丙烯纤维以细小的颗粒分布在混凝土中,掺量范围为混凝土体积的0.05%~0.20%。在硬化初期,聚丙烯纤维能有效减少塑性收缩裂缝的产生。掺量为0.1%时,裂缝宽度减少30%,抗冲击性能提高10%~15%。聚丙烯纤维与水泥基体形成纤维网结构,分散应力,抑制裂缝扩展,使混凝土更具韧性,同时在保持工作性能的基础上延长使用寿命。

钢纤维与聚丙烯纤维各自针对不同的性能需求,在混凝土中发挥增强作用。钢纤维主要改善力学强度和抗冲击性能,而聚丙烯纤维侧重于控制早期裂缝和提高韧性。合理组合和选择两种纤维的种类和掺量,在不同工况下有效提升混凝土的整体性能,满足工程结构在强度、耐久性和施工性上的多重要求。

2.3 养护措施的优化

高性能混凝土性能的提升需要科学控制养护时间、温度和湿度。首先,养护开始时间对性能发展至关重要,应在混凝土浇筑后12小时内进行覆盖保湿养护,以避免早期失水导致自收缩裂缝。在养护环境温度建议控制在 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度保持95%以上,以促进水泥充分水化。通过优化养护工艺(如采用湿热养护),可使14天强度达到28天强度的100%以上,从而缩短养护周期,提高施工效率。充足的养护时间还能够减少内部孔隙,增强抗渗性和抗冻性^[5]。其次,温度对水化速率影响显著。在适宜范围($20 \sim 30^\circ\text{C}$)内,水化反应加快,早期强度提升约20%。但温度超过 50°C 可能引发内部开裂和非均匀水化,影响耐久性。因此需控制温度,避免温度过高或过低,以平衡早期强度增长与长期性能。此外,在湿度管理方面,保持湿度在95%以上有助于防止表面失水,保障内部水化的持续进行。在高湿度条件下,28天抗压强度比干燥环境高10%,氯离子扩散系数降低约20%。通过覆盖湿布、喷雾或塑料薄膜等方式可有效维持湿度,避免裂缝产生并改善耐久性。最后,养护方法直接影响混凝土的性能表现。覆盖湿布适合中小型结构,喷雾养护适用于大面积施工,蒸汽养护用于预制构件,通过控制湿热环境显著加快水化反应。蒸汽养护后7天强度可提升20%~25%,同时减少早期裂缝风险。

3 结束语

本研究探讨了高性能混凝土配合比设计优化及性能提升的关键要素与技术。通过原材料的优选、水胶比的控制、外加剂的合理使用以及矿物掺合料的二次水化反应、纤维增强技术和养护措施的优化,可以提升混凝土的各项性能。未来,随着绿色建筑和可持续发展的需求日益增长,高性能混凝土的研究与应用将更加注重环保性、经济性和实用性,为建筑行业的可持续发展贡献更多力量。

参考文献:

- [1] 王涛.高性能混凝土配合比设计研究[J].交通世界,2024(27):17-20.
- [2] 尹博威.高性能混凝土配合比设计及其力学性能检测研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(11):111-113.
- [3] 孙婧,洪俊哲,宋晓英,等.C60多孔粗骨料高性能混凝土配合比设计[J].建筑科学,2024,40(05):126-133,98.
- [4] 张博文,陆岩,宋修广,等.低碱高性能生态混凝土配合比设计与优化[J].河南科学,2025,43(02):207-217.
- [5] 张嘉伟.高性能混凝土配合比设计与应用[J].大众标准化,2025(02):133-135.