

水胶比对高性能混凝土工作性及力学性能影响试验

王 震

(济南华东材料有限公司, 山东 济南 250200)

摘 要 水胶比是决定高性能混凝土工作性及力学性能的重要因素。本文通过对不同水胶比下高性能混凝土拌合物工作性变化规律的试验研究, 探究水胶比对坍落度、扩展度、流动性经时损失的影响机理。在此基础上, 分析水胶比对混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量等力学性能的影响规律, 厘清水胶比和强度发展之间的内在联系。结果表明, 水胶比降低可以明显提高混凝土的力学性能, 但是过低的水胶比会造成混凝土工作性变差, 需要高效减水剂和矿物掺合料协同优化来达到工作性和力学性能的平衡。

关键词 水胶比; 高性能混凝土; 工作性; 力学性能

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.026

0 引言

高性能混凝土具有良好的耐久性、力学性能, 在重大工程中被广泛使用, 水胶比是配合比设计的主要参数, 影响着混凝土的流变性和硬化后的性能。水胶比过低虽然可以提高强度, 但是会使得拌合物变得黏稠, 施工困难; 水胶比过高则强度降低, 耐久性变差。如何通过试验来确定合适的水胶比范围, 使高性能混凝土既具有良好的工作性, 又满足力学性能要求, 这是工程技术人员所关注的重点问题, 对优化配合比设计、保证工程质量有着十分重要的意义。

1 高性能混凝土水胶比设计原理与试验方案

1.1 水胶比的内涵及其对混凝土性能的作用机制

水胶比是混凝土性能的重要影响因素, 其内涵清楚而作用机理繁杂。它准确地反映了混凝土中水和胶凝材料质量的关系, 胶凝材料种类繁多, 包括水泥以及各种矿物掺合料。水胶比对强度及渗透性有较大影响, 低水胶比时水化产物密实, 强度大、渗透性小, 但水胶比过低会阻碍水泥充分水化。水有润滑作用, 对拌合物流动性、黏聚性都有影响。高性能混凝土依靠高效减水剂、矿物掺合料, 在低水胶比的情况下也能得到良好的工作性。对水胶比的作用机理有深刻的认识, 有利于科学配制混凝土来满足各种工程的要求^[1]。

1.2 试验原材料与配合比设计

试验原材料及配合比设计属于混凝土试验的基础工作, 决定着试验是否成功。原材料的选择十分重要。

水泥强度等级要稳定, 粗细骨料的级配要好, 矿物掺合料和高效减水剂也有相应的标准, 保证试验结果的可靠性。配合比设计采用固定胶凝材料总量、砂率, 只改变水胶比的方法, 可以有效地排除其他因素的干扰, 准确地观察到水胶比对混凝土性能的影响。设置合理的水胶比梯度, 根据目标坍落度调节减水剂掺量, 保证拌合物工作性。科学合理的原材料选择、配合比设计给后续试验打下了良好的基础。

1.3 试验方法与测试标准

试验方法和测试标准是得到正确混凝土性能数据的重要途径。严格按照现行国家标准、行业规程执行, 可以保证数据的可比性、重现性。工作性试验包括坍落度、扩展度、坍落度经时损失等方面, 从不同的角度反映拌合物的性能。力学性能测试项目齐全, 有多种强度、弹性模量的测试项目, 试件成型、养护、试验过程均有严格要求, 保证结果准确^[2]。记录环境温度、湿度, 控制振捣时间、频率, 排除外界因素的干扰, 防止由于操作不当造成试验结果的偏差。只有采用科学的试验方法、测试标准, 才能给混凝土性能研究提供可靠的依据。

2 水胶比对高性能混凝土工作性的影响

2.1 水胶比对坍落度与扩展度的作用规律

水胶比对混凝土坍落度、扩展度的影响规律, 属于混凝土工作性研究的重要部分。不同的水胶比区间内, 坍落度、扩展度的变化不是线性的。低水胶比时

作者简介: 王震(1998-), 男, 本科, 研究方向: 土木工程。

流动性差,高水胶比虽然流动性好,但是容易产生离析泌水。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料的加入,又使这一作用规律更加丰富。根据其特点,在不同的水胶比下对流动性产生不同的影响。同时,减水剂起到调节的作用,可以弥补低水胶比下流动性的不足。深入认识这一规律,有利于准确控制混凝土的流动性,满足各种施工环境对混凝土工作性不同的需求,保证施工质量。

2.2 水胶比对黏聚性与保水性的影响

水胶比对高性能混凝土的黏聚性、保水性影响较大,进而影响到混凝土质量及耐久性。水胶比的大小对混凝土的黏聚性、保水性起决定性的作用。水胶比过低或者过高都会造成离析、泌水等现象,影响混凝土的均匀性以及表层的质量,降低耐久性。矿物掺合料对改善保水性有积极的作用,粉煤灰、矿渣粉通过不同的方式减小泌水。水胶比的设计在泵送施工等特殊情况下更应该慎重考虑。只有正确把握水胶比和黏聚性、保水性的关系,才能配制出符合施工要求的高性能混凝土,保证工程结构的长期稳定性、安全性。

2.3 水胶比对流动性经时损失的影响

水胶比对混凝土流动性、经时损失的影响,是评价混凝土可施工时间的重要指标。水泥水化进程、水分蒸发是造成经时损失的主要因素,水胶比起着关键的调节作用。低水胶比混凝土流动性损失快,高水胶比虽然损失缓,但是容易产生泌水硬壳现象。高效减水剂、矿物掺合料可以有效地控制经时损失,不同的品种、掺量的减水剂以及不同的矿物掺合料的效果也不一样。经时损失曲线可以直观地评价混凝土的工作性保持能力。长距离运输或者复杂的施工工程当中,合理选择水胶比以及材料组合,可以保证混凝土抵达现场之后仍然具有较好的可施工性,进而提升施工效率和质量^[3]。

3 水胶比对高性能混凝土力学性能的影响

3.1 水胶比对混凝土抗压强度的影响

抗压强度是高性能混凝土最基本的一种力学性能指标,和水胶比有明显的负相关关系。随着水胶比的降低,混凝土的抗压强度不断提高,但是提高的幅度随着水胶比的减小而逐渐变小。水胶比对于强度的影响,可以从孔隙率的变化来解释。较低水胶比时,水泥水化产物填充到原充水空间里,形成致密结构,毛细孔隙率减小,有效承载面积增大,抗压强度提高。低水胶比可以改善水泥石和骨料的界面过渡区,界面黏结力增大,有利于强度发挥。当水胶比太低的时候,

部分水泥颗粒由于缺水不能充分水化,未水化的水泥颗粒可以填充到微集料中,但是整体的水化产物减少,强度增长受到限制。矿物掺合料的掺入会对水胶比和强度的关系造成影响。粉煤灰的火山灰反应消耗氢氧化钙生成水化硅酸钙,填充孔隙,改善孔结构,在低水胶比条件下起到后期强度的作用。矿渣粉有潜在的水硬性,和水泥协同水化,提高浆体密实度。硅灰的超细颗粒填充到水泥颗粒之间,大大降低孔隙率,使低水胶比混凝土得到超高强度。养护龄期对水胶比和强度的关系也有影响。

3.2 水胶比对混凝土抗折强度的影响

抗折强度体现混凝土抵抗弯曲拉伸的能力,路面、桥面等承受弯拉荷载的结构更需要它。水胶比对于混凝土的抗折强度影响规律和抗压强度大体上一致,但是敏感程度不一样。随着水胶比的减小,抗折强度也呈上升趋势,但是上升的幅度小于抗压强度。抗折强度不但和基体密实度有关,而且和骨料性质、界面过渡区以及纤维增强等有关。低水胶比改善界面过渡区结构,减少微裂缝,提高骨料和水泥石的黏结力,有利于抗折强度发挥。但是抗折强度对于缺陷的敏感度比抗压强度高,微小的孔隙、微裂缝都会造成应力集中,明显降低抗折强度。水胶比对抗折强度的影响一般存在一个阈值,低于这个阈值时强度提高有限,甚至因为脆性增大而降低。矿物掺合料的加入对抗折强度的影响要具体分析。粉煤灰能改善工作性,减小泌水,降低内部缺陷,有利于抗折强度,但是粉煤灰早期活性低,早期抗折强度可能偏低。硅灰能明显改善界面密实度,提高抗折强度,但是掺量过多会增大脆性。在道路混凝土的设计中,在保证抗压强度的基础上,主要考虑水胶比对抗折强度的影响,通过试验来确定最佳的水胶比^[4]。

3.3 水胶比对混凝土弹性模量的影响

弹性模量属于混凝土应力应变关系的关键参数,体现材料抵抗变形的性能。水胶比对弹性模量的影响与对强度的影响规律相同,但是作用机理不同。弹性模量主要是由混凝土组成、孔隙率决定的,骨料的弹性模量远远大于水泥石,所以骨料体积分数对弹性模量的影响较大。水胶比降低会使水泥石的孔隙率变小,水泥石自身的弹性模量增大,从而提高混凝土的整体弹性模量。低水胶比可以改善界面过渡区的应力传递,也可以提高弹性模量。但是弹性模量的变化幅度一般小于抗压强度,因为骨料对弹性模量的贡献大,水胶比的变化只影响水泥石部分。养护龄期对弹性模量的影响是通过水泥水化程度、产物结构来体现的,随着

龄期的增长,水化产物增多,孔隙率降低,弹性模量不断增大。矿物掺合料对弹性模量的影响和对强度的影响相同,火山灰反应生成的水化产物填充孔隙,提高浆体刚度,但是粉煤灰早期反应慢,早期弹性模量可能偏低。在高层建筑、大跨度结构中,弹性模量影响结构的变形及稳定性,必须按刚度要求合理地选择水胶比。

4 水胶比优化与高性能混凝土综合性能平衡

4.1 水胶比与工作性、力学性能的协调关系

水胶比对于高性能混凝土的工作性及力学性能存在矛盾关系,降低水胶比可以提高强度但是会破坏工作性,提高水胶比可以改善工作性但是会降低强度。协调二者的关系就是配合比设计的主要任务。水胶比低时,即使用高效减水剂得到一定的流动性,混凝土的黏度仍然很高,泵送、振捣困难,容易出现施工缺陷,反而影响实际强度发挥。水胶比较高时虽然施工方便,但是强度低、耐久性差,同样影响工程质量。所以有一个合理的水胶比区间,在这个区间内,混凝土既满足施工要求的工作性,又达到设计要求的强度。该区间受原材料品质、减水剂效果、施工工艺等各方面的影响。选用优质骨料、高效减水剂可以扩大合理的水胶比区间,使低水胶比的混凝土仍然具有可施工性。矿物掺合料合理搭配可以调节工作性和强度之间的平衡,粉煤灰改善流动性,矿渣粉和硅灰贡献强度,多元复合使混凝土在较宽水胶比范围内保持良好的综合性能。试验时应根据具体的工程条件,通过系统的试验来确定最佳的水胶比,达到工作性和力学性能的最佳平衡。

4.2 基于水胶比优化的配合比设计方法

根据水胶比优化的配合比设计要综合考虑强度等级、施工条件、原材料特性等各方面因素,采用系统试验和数理统计的方法。设计步骤有确定目标强度和坍落度、选择原材料、设定水胶比梯度、试配调整、性能验证等。目标强度按照结构设计要求和施工变异水平来确定,一般大于设计强度等级以保证合格率。目标坍落度按施工方式而定,泵送混凝土流动性要求高,普通浇筑可放宽。原材料的选择要考虑水泥和外加剂的相容性,做适应性试验。设定水胶比梯度时,应该以经验公式计算出的基准水胶比为中心,向两边延伸,包含工作性及强度范围。试配时要检测新拌混凝土的工作性,调节减水剂的掺量使坍落度符合要求,记录达到目标坍落度所需减水剂的用量。成型试件养护到规定龄期后做力学性能试验,得到强度和水胶比的关系曲线。根据目标强度在曲线上确定所需水胶比,

验证该水胶比下工作性是否满足要求,必要时微调配比。对具有抗渗、抗冻等特殊性能的材料还要做耐久性试验来验证。优化后的配合比在满足强度要求的基础上,尽量提高工作性,保证施工质量与效率。

4.3 矿物掺合料对水胶比效应的调节作用

矿物掺合料在高性能混凝土中不仅可以降低水泥用量来节约成本,更重要的是可以调节水胶比效应,提高混凝土的综合性能。粉煤灰的形态效应使球形颗粒在浆体中起到润滑作用,减少需水量,在相同的水胶比下提高流动性,在保持流动性不变的情况下可以降低水胶比,间接提高强度。粉煤灰的微集料效应填充在水泥颗粒间,使浆体结构更加紧密,界面过渡区得到改善,后期强度提高。矿渣粉的活性高、水化速度快,早期贡献强度大,微填充效应也提高了密实度。硅灰的超细颗粒填充到亚微米级孔隙中,使低水胶比混凝土密实度大大提高,从而大大提高了混凝土的强度和耐久性^[5]。多元复合掺合料产生协同作用,粉煤灰改善工作性,矿渣粉贡献中期强度,硅灰强化界面,使得混凝土在较低水胶比下同时具有良好的工作性和超高强度。

5 结束语

水胶比对高性能混凝土的影响是复杂的,降低水胶比虽然可以提高强度和弹性模量,但是会使工作性变差;提高水胶比虽然可以改善流动性、保水性,但是会损失强度、损害耐久性,而且它的影响还会和其他许多因素相互耦合。但是,矿物掺合料为其调节提供了可能,使低水胶比混凝土具有良好的工作性和高强度。工程中水胶比控制是全过程的。随着工程结构的发展,对它的性能要求越来越高,水胶比的研究也变得越来越精细、系统。未来将研究超低水胶比下混凝土微结构变化,建立性能预测模型,研制新型外加剂、掺合料,为重大工程提供更可靠的依据。

参考文献:

- [1] 王恒惠,高文龙,万晋荣.C80 高强高性能混凝土的配制与施工技术[J].中国水泥,2025(08):135-138.
- [2] 吴梦思,李建军.高性能混凝土在水工结构中的应用[J].水运工程,2025(03):190-195.
- [3] 王双飞,柯国军,彭勃,等.水胶比对超高性能混凝土强度的影响[J].中国粉体技术,2023,29(02):139-148.
- [4] 李世华,郑倩,梁丽敏,等.超高性能混凝土工作性和力学性能的影响因素研究[J].混凝土与水泥制品,2022(12):53-57.
- [5] 聂洁.超高性能混凝土力学性能及扩展度关键影响因素研究[D].长沙:长沙理工大学,2020.