

# 不同水胶比条件下混凝土早期强度发展特征研究

陈 蓉

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

**【摘要】：**混凝土早期强度的发展受水胶比变化的显著影响。本文以不同水胶比为主要变量，研究其对混凝土早期强度形成规律的作用机理。通过实验测试与数据分析，探讨水胶比对水化反应进程、孔隙结构及强度增长速率的影响特征。结果表明，低水胶比混凝土早期强度增长快但易产生内应力，高水胶比则延缓水化进程。研究揭示了水胶比对早期强度发展的主导作用，为工程中混凝土配合比设计与早期性能控制提供参考。

**【关键词】：**水胶比；混凝土；早期强度；水化反应；孔隙结构

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.039

## 引言

混凝土作为最广泛使用的建筑材料，其早期强度发展直接影响结构施工周期与安全性能。水胶比作为决定混凝土内部结构密实度和水化程度的关键参数，对早期强度形成具有决定性作用。在施工实践中，过高或过低的水胶比都会导致早期性能的不稳定，影响后期耐久性。研究不同水胶比条件下混凝土早期强度的演变规律，有助于揭示水化动力学与微观结构之间的联系，为优化配合比、提高施工效率与质量控制提供重要依据。本研究旨在通过实验与分析，探讨水胶比变化对混凝土早期强度发展的影响规律与机制。

## 1 水胶比对混凝土早期性能影响的研究背景

### (1) 混凝土早期强度的形成机理

混凝土早期强度的形成主要受水泥水化反应进程的控制。水泥颗粒在与水接触后，迅速发生溶解、成核与结晶反应，生成水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙等产物，这些物质逐渐填充孔隙并形成连续的固体骨架结构。水化产物的生成速率、晶体形态及分布均影响早期强度的发展。温度、湿度及水胶比等外部条件改变水化动力学过程，进而影响浆体密实度和内部应力释放。早期强度的形成实质上是由水化反应速率与微结构致密化共同决定的动态过程。

### (2) 水胶比在强度发展中的关键作用

水胶比直接决定混凝土中水泥颗粒的分散状态与水化反应环境。较低的水胶比能提高浆体的密实度，使水化产物更易填充孔隙，从而提升早期抗压性能。然而，水量过少会限制水化反应的充分进行，导致内部未水化核增多。较高的水胶比虽然有利于水化反应的持续进行，但会引起孔隙率增加，削弱骨架强度。合理的水胶比控制是平衡流动性与强度增长速率的关键技术环节，对早期结构稳定性具有决定性影响。

### (3) 现有研究的主要不足

当前关于水胶比对混凝土早期强度影响的研究多集中于宏观力学性能，对微观结构演化与水化反应耦合机制探讨相对不足。部分实验仅分析单一龄期数据，缺乏连续强度发展曲线

的系统研究。同时，不同水泥品种、外加剂及养护环境对水胶比效应的影响尚未形成统一认知，导致研究结果的可比性较低。现有模型对早期强度的预测精度有限，难以全面反映水化产物生成与孔隙演化的动态特征，仍需通过实验与理论相结合的方式深入揭示其内在规律。

## 2 水胶比变化对水化反应过程的影响规律

### (1) 水化速率与放热特征分析

水化速率是评价混凝土早期反应活性的重要指标，其变化直接反映不同水胶比下水泥颗粒反应程度。低水胶比条件下，浆体中自由水较少，离子浓度快速升高，使得水化反应初期加速阶段更为集中，放热峰值出现时间提前，热量释放速率高，体系温升显著。这种快速放热会导致内部温差增大，若散热不均，易引发微裂缝形成。高水胶比体系中，水化反应初期溶液浓度较低，离子迁移受限较弱，水化速率较慢，放热曲线呈现平缓特征。此时温度梯度较小，有利于水化产物均匀生成，但强度增长速率受到抑制。通过放热特征分析可发现，水胶比调控直接决定水化热释放形态，从而影响早期结构致密性与强度形成路径。

### (2) 不同水胶比下水化产物的形成差异

在低水胶比条件下，水泥颗粒间距离较近，生成的水化硅酸钙凝胶（C-S-H）紧密交织，孔隙结构以闭合毛细孔为主，形成致密的骨架体系。氢氧化钙晶体较小且分布均匀，为强度增长提供良好支撑。而高水胶比体系中，水化产物生成速率虽较均匀，但C-S-H凝胶稀疏，孔隙率上升，内部形成较多连通毛细孔，导致结构强度降低。部分区域甚至出现未水化颗粒，反映出体系水化不充分的特征。显微分析表明，水胶比不仅影响水化程度，还改变产物的微观形态与堆积方式，决定了早期混凝土的密实度和结构完整性。

### (3) 水化反应与强度增长的关联性

随着水化反应进行，生成的C-S-H凝胶在颗粒间形成桥联结构，使载荷逐渐由点接触转变为面支撑，实现宏观强度提升。低水胶比体系中，反应初期水化速率高，凝胶生成密度大，强

度增长迅速，但内应力积聚可能导致微裂隙扩展。高水胶比体系水化速率较慢，凝胶网络形成滞后，早期强度上升缓慢。通过对对比水化反应放热曲线与抗压强度增长曲线可发现，两者在时间分布上具有高度一致性，表明水化速率直接决定强度增长速率。水胶比的调控在微观层面通过影响水化动力学过程，从而在宏观上改变混凝土早期力学性能的演化趋势。

### 3 不同水胶比条件下混凝土早期力学性能试验研究

#### (1) 试验材料与配合比设计

试验所采用的水泥为P.O42.5普通硅酸盐水泥，具有较高的早期活性与稳定的化学成分。细骨料为中砂，含泥量控制在1.5%以内，粗骨料为粒径5~20mm的碎石，级配均匀。为保证实验的可比性，所有原材料均在恒温条件下预处理并保持含水状态一致。设计的水胶比分别为0.30、0.40、0.50、0.60和0.70，旨在覆盖从高性能混凝土到普通混凝土的典型范围。胶凝材料总量固定，通过改变加水量实现水胶比调整。为改善拌合物的流动性，低水胶比组掺入高效减水剂，掺量控制在胶凝材料质量的1.0%~1.2%。混凝土拌合后在恒温养护箱中进行标准养护，确保实验环境温湿度恒定。样品制备完成后立即进行成型与振实，以减少气泡与孔洞的形成，从而保证试件的均匀性与代表性。整个设计过程严格遵循《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081)要求，以确保试验数据的科学性与可重复性。

#### (2) 早期强度测试与数据分析

混凝土早期强度测试选取1d、3d、7d、14d等典型龄期，通过标准立方体抗压试验获得力学性能数据。试件脱模后立即转入标准养护室，养护温度控制在 $20\pm2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于95%。在加载过程中采用电子伺服压力机进行恒速加载，加载速率控制在0.5MPa/s以内，记录破坏荷载并计算抗压强度值。数据分析采用多组样品平均值以减小偶然误差，同时利用标准偏差与变异系数评价试验的稳定性。实验结果显示，低水胶比混凝土1d强度即可达到设计强度的40%以上，表现出显著的早期硬化特征；高水胶比组则强度增长缓慢，7d后才进入稳定增长阶段。通过对比可见，水胶比每增加0.1，早期抗压强度平均下降约15%~20%。统计分析进一步揭示，水胶比与强度之间呈现明显的负相关关系，其拟合优度( $R^2$ )超过0.95，说明水胶比对早期力学性能具有强烈的线性影响。

#### (3) 强度增长曲线与模型拟合

在试验数据的基础上建立早期强度发展模型，采用指型型和双曲线型函数进行拟合分析。通过非线性最小二乘法对实测数据进行回归，得到各水胶比条件下的拟合参数。结果显示，指型型模型能较好反映低水胶比混凝土的早期强度增长特征，而双曲线模型更适用于高水胶比体系。低水胶比组强度增长曲线陡峭，1~3d期间增长速率最大，随后趋于平缓；高水胶比

组增长曲线平缓，增长区间延长。模型参数分析表明，水胶比对强度增长速率常数k具有决定性影响，k值随水胶比增大而显著下降，反映出水化反应活性与结构致密化过程的减缓趋势。曲线拟合残差分布集中且随机性强，说明模型预测具有较高精度。

### 4 水胶比对微观结构与孔隙特征的影响分析

#### (1) 孔径分布与毛细孔演化

低水胶比体系中，水化反应生成的凝胶产物能够有效填充毛细孔，使孔径集中在10~50nm范围，整体结构呈现致密特征。随着水胶比增大，水化过程中自由水增多，水化产物间隙被拉大，毛细孔数量显著上升，孔径分布曲线向大孔区偏移，出现连通性增强的趋势。扫描电镜(SEM)与低温氮吸附测试表明，高水胶比条件下的孔隙结构更具开放性，微孔比例下降，毛细孔与气泡孔比例增大。水胶比增大导致毛细孔水蒸发速率加快，内部湿度梯度扩大，促使干缩裂缝萌生与扩展，削弱混凝土早期强度形成条件。孔隙体积与连通度的上升使水化反应产物间结合力减弱，微观结构稳定性降低，从而在宏观层面表现为抗压性能下降与早期变形增加。

#### (2) 微观结构密实度对强度的贡献

水胶比对浆体密实度的控制作用体现于凝胶产物分布与孔隙填充程度的变化。低水胶比体系中，水化硅酸钙凝胶(C-S-H)在早期迅速生成并覆盖水泥颗粒表面，形成连续的凝胶网络，使得孔隙被有效封闭，微观结构致密且均匀。XRD与MIP测试结果显示，此类结构孔径分布集中，平均孔径较小，抗压强度提升显著。相反，高水胶比体系因水化产物稀疏，浆体中存在大量未填充区域，形成连通性毛细孔，使应力传递路径中断。内部微裂纹在荷载作用下易被激活，导致局部应力集中。密实度的提高不仅增强力学强度，还提升耐久性能与抗渗性。微观分析揭示，密实结构的形成是水化反应与孔隙闭合的协同结果，而水胶比的合理控制是实现结构优化的关键环节。

#### (3) 水胶比变化下结构优化路径

结构优化路径的建立需以水胶比调控为核心，通过控制水化程度与孔隙结构来实现早期强度与耐久性的平衡。低水胶比体系虽密实但流动性不足，可通过掺加高效减水剂改善分散性，确保充分包裹骨料并促进水化产物均匀分布。中等水胶比(0.40~0.50)被认为是兼顾强度与施工性能的临界区间，能够在保持较高密实度的同时避免内应力集中。对于高水胶比体系，可采用粉体掺合料(如硅灰、粉煤灰、矿渣微粉)以提高胶凝材料活性，促进二次水化反应，从而在微观上减少孔隙率、改善界面过渡区性能。通过优化水胶比及辅助材料体系，可实现毛细孔由连通向封闭转变，结构由疏松向致密演化。微观结构的调控最终反映在宏观力学性能的提升上，为混凝土早期性能设计提供科学依据与路径指导。

## 5 早期强度发展特征与控制策略

### (1) 水胶比与早期性能的量化关系

水胶比对混凝土早期性能的影响具有显著的量化特征，其变化直接决定抗压强度、弹性模量及变形能力的发展规律。实验结果表明，当水胶比由 0.30 增至 0.70 时，1d 龄期抗压强度下降幅度超过 60%，强度增长速率明显减缓。低水胶比体系中，早期水化反应集中，凝胶产物致密，内部孔隙率较低，形成高强度骨架结构。高水胶比体系则因自由水含量增加，水化产物稀释，孔隙体积上升，造成应力传递路径不连续。通过统计分析可见，早期强度与水胶比之间存在显著负相关性，且这种关系在 1~7d 龄期表现最为敏感。水胶比对性能的影响不仅体现在宏观强度上，也反映在微观结构致密化速率和水化反应活性差异上，揭示出早期性能受水胶比调控的本质特征。

### (2) 强度发展优化与配比调整建议

为了实现早期强度的高效增长，应在保证施工性能的前提下，通过精细化调控水胶比与胶凝材料体系实现配比优化。低水胶比混凝土可适量掺加高效减水剂，以改善流动性并保持高密实度；对于中等水胶比体系，可采用复合矿物掺合料激发潜在活性，延缓水化热峰并稳定早期结构。高水胶比体系则需控制用水量，并通过增加细掺料比例改善浆体均匀性与界面过渡区性能。通过阶段性强度测试与数据回归分析，可建立不同水

胶比对应的强度增长模型，为配合比设计提供量化依据。合理的配比控制不仅能加快早期强度发展，还能降低收缩变形风险，提升混凝土整体结构耐久性与稳定性。

### (3) 早期性能控制的工程启示

高层建筑、预制构件及大体积混凝土工程中，早期强度发展速度决定了脱模、张拉与荷载传递的时机。低水胶比体系适用于需快速硬化与早期承载的结构，而高水胶比体系更适合对施工可操作性要求较高的环境。施工过程中应结合温度与湿度条件调整水胶比，避免因水化热集中或内部湿度梯度过大引起的裂缝扩展。通过智能养护技术与实时监测系统，可实现早期强度发展的动态控制与反馈修正。对水胶比与养护制度的综合管理，使混凝土早期性能在结构安全、施工效率及耐久性之间达到合理平衡，为工程质量控制提供可实施的技术支撑。

## 6 结语

水胶比作为混凝土早期性能的关键控制参数，其变化深刻影响水化反应动力学、微观结构演化及强度增长规律。通过系统研究发现，水胶比越低，混凝土早期强度形成越快，结构越致密；水胶比偏高则导致孔隙率上升，强度增长受限。通过对比实验与模型分析，可明确水胶比对早期性能的主导作用，为混凝土配合比优化与工程早期质量控制提供理论依据与实践指导。

## 参考文献：

- [1] 王志强,刘建国.不同水胶比下混凝土早期强度发展规律研究[J].建筑材料学报,2022,25(3):78-84.
- [2] 陈立辉,张晓峰.水胶比对高性能混凝土水化过程及微结构的影响[J].硅酸盐学报,2023,51(4):512-520.
- [3] 李俊峰,周维康.水胶比变化对混凝土早期力学特性及水化热影响[J].材料导报,2021,35(10):95-102.
- [4] 赵一凡,孙鹏程.不同水胶比条件下水化产物演变与强度关系分析[J].混凝土,2024,38(2):56-63.
- [5] 郑涵宇,马伟.水胶比与矿物掺合料对混凝土早期性能的耦合效应[J].新型建筑材料,2022,49(6):72-79.