

塑性混凝土抗压强度关键影响参数的作用机制研究

李 闯¹, 李 恒²

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²华侨大学土木工程学院, 福建 厦门

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

塑性混凝土作为一种柔性工程材料, 因其极限变形能力大、抗裂性能好和高抗渗性(渗透系数小)等优点, 近些年广泛地应用于筑坝、土石围堰、高层建筑基础防渗、边坡护坡等工程中。本文参考国内外塑性混凝土有关文献, 总结了对于塑性混凝土材料强度的影响因素, 并分析了影响其强度的内在作用机制原理。在此基础上, 基于COMSOL Multiphysics对塑性混凝土进行了冻融循环的数值模拟, 为材料优化及防护设计提供多尺度量化依据。得出结论: 渗透率与扩散系数随冻融次数的非线性增长, 强度随冻融次数增加而弱化。

关键词

塑性混凝土, 抗压强度, 应力 - 应变曲线

Research on the Action Mechanisms of Key Influencing Parameters for Compressive Strength of Plastic Concrete

Chuang Li¹, Heng Li²

¹College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Plastic concrete, as a flexible engineering material, is characterized by its high ultimate deformation

文章引用: 李闯, 李恒. 塑性混凝土抗压强度关键影响参数的作用机制研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 923-928.

DOI: 10.12677/hjce.2025.144099

capacity, good crack resistance, and high impermeability has been widely used in dam construction, earth rock cofferdam, high-rise building foundation anti-seepage, slope protection and other engineering projects in recent years. This paper summarizes the influencing factors on the strength of plastic concrete and analyzes the intrinsic action mechanisms by referencing relevant domestic and foreign literatures on plastic concrete. On this basis, numerical simulations of freeze-thaw cycles on plastic concrete are conducted using Comsol Multiphysics, providing a multi-scale quantitative basis for material optimization and protective design. The conclusions show that the permeability and diffusion coefficient exhibit nonlinear growth with the number of freeze-thaw cycles, while the strength degrades gradually as the number of freeze-thaw cycles increases. These findings offer theoretical and technical support for improving the durability design of plastic concrete in cold regions.

Keywords

Plastic Concrete, Compressive Strength, Stress-Strain Curve

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塑性混凝土是将膨润土、黏土、水泥等胶凝材料与砂、石、水等原料搅拌、浇筑、凝结而成的柔性工程材料,其强度介于土和普通混凝土之间。与普通混凝土相比,塑性混凝土有如下优点:① 弹性模量低(一般为 100~3000 Mpa,普通混凝土弹性模量大于 10,000 Mpa),更好地适应工程中与地基变形不一致问题;② 极限变形能力强,抗裂性能远高于普通混凝土;③ 抗渗性能好,降低了构筑物的渗漏量,很大程度上提高了工程的安全性;④ 工程经济性高,黏土代替了其他胶凝材料,减少了水泥的使用,从而节约了工程的成本。

由于这些优点,塑性混凝土防渗墙被广泛应用于各项水利工程中。作为地下工程,其结构自身处于三向受力状态,由于抗压强度随围压的升高近似呈现线性增加的关系,因此在构筑物抗压强度不是很高的情况下也能承受较高的压力。然而,塑性混凝土的抗压强度不能过低,否则会影响其抗渗和变形性能,更有甚者会发生强度破坏。

2. 塑性混凝土强度的影响因素

2.1. 胶凝材料对塑性混凝土强度的影响

一些胶凝材料地加入改变了普通混凝土原有的性能,与此同时提高了其变形和防渗性能。塑性混凝土的水胶比、水泥和膨润土掺量都会对其强度产生影响。如王四巍等[1]通过室内试验研究表明:塑性混凝土的抗压强度随水泥用量的增加而增加,随膨润土的掺量和水胶比的增加而降低,塑性混凝土的最大体积压缩量随膨润土增加而增加。唐贝等[2]通过室内三轴试验,并采用扫描电镜和 X 射线衍射技术从宏观和微观两个方面揭示了塑性混凝土性能演变的机理,实验表明:峰值应力随膨润土的用量增加而显著减低,峰值应变逐渐增加;揭示了:膨润土对塑性混凝土的性能的改变主要是通过反复交替和相互协同的塑化效应和固化效应;膨润土对塑性混凝土的收缩起到促进的作用。除了胶凝材料掺量的影响,其类型也会影响其强度指标[3],如相同条件下掺钠基膨润土的塑性混凝土的抗压强度是掺钙基膨润土塑性混凝土的两倍以上。

2.2. 龄期对塑性混凝土强度影响的机理

塑性混凝土的抗压强度亦受龄期的影响。一方面, 塑性混凝土比普通混凝土的水胶比大, 从而导致水泥的水化速率降低, 延缓了塑性混凝土的强度发展。另一方面, 由于膨润土的加入, 塑性混凝土的强度发展将是塑化效应和固化效应反复交替、相互制约的结果。塑化效应是指膨润土中的主要矿物成分蒙脱石吸水膨胀的过程中会形成一层薄膜附着在水泥颗粒的表面(图 1), 阻止了水泥的水化反应。固化效应属于二次水化反应(图 2), 其反应速度慢, 反应不充分, 且塑化效应将直接削弱固化效应, 进一步延缓塑性混凝土的强度发展。

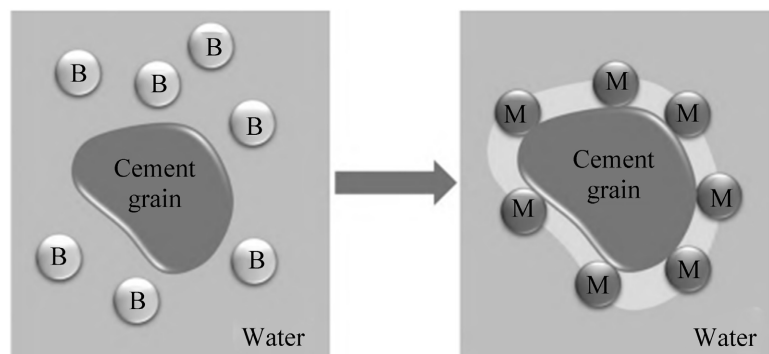


Figure 1. Plasticization effect
图 1. 塑化效应

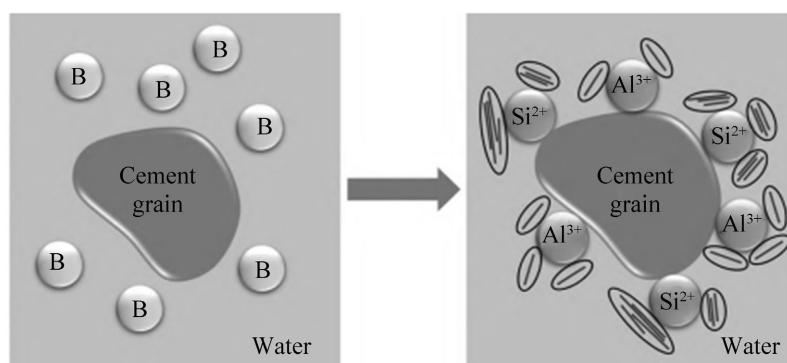


Figure 2. Solidification effect
图 2. 固化效应

众多研究人员展开了对塑性混凝土龄期的探索, 研究表明: 塑性混凝土较比普通混凝土强度发展缓慢, 标准养护 28 d 后强度仍有较大的提升[4] [5]。如: 段文雷[5]研究了不同龄期的塑性混凝土立方体抗压强度, 以 280 d 为最终强度, 则 28 d 达到最终强度的 83%, 56 d 达到最终强度的 90%, 112 d 达到了最终强度的 96%左右。李清富对比了塑性混凝土 28 d 龄期和 90 d 龄期的立方体抗压强度, 养护龄期 90 d 的塑性混凝土立方体抗压强度比养护龄期 28 d 的提升了 38.6%~40.1%。

2.3. 加载对抗压强度结果的影响及机理

2.3.1. 加载形式

单轴试验测量强度比较简单: 试件仅在轴向压力作用下, 侧向自由变形时的极限抗压强度。但塑性混凝土在实际过程中, 几乎不可能处于单轴受压、受压或纯剪切状态, 事实上塑性混凝土一般处于三个

方向主应力值不相等($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)的三维受压状态, 因此就需要进行室内三轴试验, 三轴抗压强度是指试件在轴向压力与侧向围压($\sigma_2 = \sigma_3$)共同作用下的极限强度。单轴压缩试验和三轴压缩试验对比见表 1。

Table 1. Comparison between uniaxial and triaxial tests
表 1. 单轴试验与三轴试验对比

单轴试验		三轴试验
应力状态	仅在轴向施加荷载, 横向无约束	常规三轴试验: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 真三轴试验: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
强度特性	反映基本力学指标	强度随围压显著提升
破坏模式	脆性拉伸破坏为主	延性剪切破坏为主
变形特性	无法分析体积变化	可研究剪胀/剪缩效应

大量试验表明: 三轴围压强度相比单轴压缩有较大的提升, 峰值应力随着围压的升高而呈现近似线性增长。徐毅安[6]研究了试样在不同围压下的抗压强度, 当围压从 0 MPa 增加至 0.9 MPa 时, 抗压强度增加率约为 125.2%; 胡良明等人[7]研究了: 常规三轴下, 几种不同配合比的塑性混凝土在不同围压下的抗压强度及其应力 - 应变曲线特征。根据应力 - 应变曲线特征。应力 - 应变曲线可以分为以下四个阶段: ① 初始阶段: 开始施加三向应力后, 试件变形迅速, 应力 - 应变曲线斜率增长较快; ② 随着压力增加, 侧向压应力约束塑性混凝土横向变形能力增加, 试件内部裂缝的产生和延伸被延缓; ③ 当应力增加到较大阶段后, 塑性变形开始发展, 应变增长迅速, 应力增加缓慢, 应力 - 应变曲线斜率变缓; ④ 水平段: 当到达峰值点后, 应力趋于稳定。

真三轴试验方面, 王四巍[8]通过 LY-C 型拉压真三轴仪进行了两类加载模式的塑性混凝土真三轴试验。第一类, 保持侧向压力恒定的情况下加载。试验表明: 初始阶段和曲线上升段长度增加, 峰值点的应力和应变显著提升, 下降段的应力下降缓慢。主应力随着第二、三应力的增加而增加, 应变范围为: 2%~5%; 第二类, 保持侧位移近似恒定下加载。在一定范围内, 侧向压力随轴向压力增加而增加, 抗压强度可以达到单轴压缩的 9 倍以上。此外还明确了: 单轴压缩和侧位移恒定的三轴压缩, 其应力 - 应变曲线峰前为弹性变形; 侧压恒定真三轴压缩和常规三轴压缩下峰前为塑性变形。

2.3.2. 加载速率

加载速率对塑性混凝土强度的影响机理可归结为材料粘性行为、孔隙水效应及微观结构响应的综合作用。在特定加载速率范围内(如 0.05~0.15 MPa/s), 塑性混凝土的抗压强度随速率增加呈上升趋势, 这主要源于其粘性基体(如水泥 - 膨润土复合胶凝材料)的应变速率依赖性: 高速加载时, 胶凝材料的粘性阻力增强, 抑制微裂纹扩展, 同时孔隙水因动态加载产生“Stefan 效应”, 形成反向压力对抗裂纹扩展, 从而提升强度。此外, 柔性界面层(如粘土或膨润土)在高速下通过粘弹塑性行为耗散能量, 延缓破坏进程, 而低速加载则因应力松弛和孔隙水“楔入效应”导致强度降低。破坏模式亦随速率变化, 从低速下的脆性拉伸破坏转变为高速下的剪切破坏, 表现出更高的残余强度。研究进一步表明, 此类材料的最优加载速率需结合其配合比与工程需求综合确定, 以平衡测试精度与动态强化效应。

2.3.3. 循环加载

塑性混凝土防渗墙难免会经受地震、水流冲击等因素引起的反复荷载作用。循环加 - 卸载对塑性混凝土强度不利, 众多实验表明: 循环荷载降低了塑性混凝土的强度, 循环荷载对强度的影响在早龄期更为明显。王四巍试验[8]得出: 循环单轴加载的塑性混凝土峰值强度比单调单轴加载的峰值强度有所降低,

降低幅度在 15%之内。塑性混凝土循环荷载下的损伤机理主要表现为多尺度累积损伤：微观上，循环应力引发骨料 - 基体界面过渡区微裂纹成核与扩展，伴随孔隙水压波动加剧界面脱粘；细观层面，反复加载导致粘弹性基体(如膨润土 - 水泥复合相)的能量耗散能力下降，刚度退化与残余应变累积；宏观上，损伤呈现非线性演化特征，初期裂纹分散化分布后逐步贯通形成主导剪切带，最终引发延性 - 脆性混合破坏模式。

2.4. 冻融循环对强度结果的分析

2.4.1. 破坏机理和损伤现象

和循环荷载损伤机理相似，塑性混凝土冻融循环也会导致材料内部结构的微观破坏，从而使得材料强度下降。目前，国内外对于冻融循环的研究主要从冻融损伤机理和冻融进行分析研究。冻融破坏机理方面，Powers 与 Helmuth [9] [10]对于混凝土的冻害机理的静水压与渗透压解释认可度较高。冻融损伤现象方面，冻融损伤的破坏机制可归纳为双重效应：① 内部劣化机制，表现为水相变诱导的微裂纹网络形成与扩展，导致材料宏观力学性能(强度、刚度及弹性模量)显著弱化，并伴随孔隙连通性增加引发的渗透率与离子扩散系数增大；② 表层退化效应，表现为冻胀应力驱动的表面剥蚀导致保护层厚度减薄，削弱混凝土对内部结构的防护能力。

2.4.2. 冻融循环的数值模拟研究进展

内部微结构损伤是力学性能非线性退化的主导因素，其演化过程与冰晶成核 - 生长动力学及多孔介质水热力耦合行为密切相关。相较于表层物理剥落，前者通过劣化材料本征属性对结构耐久性产生更深远影响。由此可见，冻融循环是一个多场、多相的复杂过程。为更好模拟和理解冻融损伤机制，学者借助数值分析软件对冻融循环开展了一系列研究。

河海大学章青[11]采用 μic 模型创建硬化水泥浆的几何结构，捕捉孔隙的空间分布。研究利用基于冰形成和结晶热力学的近场动力学(Peridynamics, PD)方法，研究了在冻融循环下水泥净浆的冻融损伤演变及其力学性能的劣化。模拟揭示了混凝土冻融损伤的全过程，包括内部裂纹的起裂和扩展，以及表面冻融剥落。水泥净浆的冻融损伤随着冻融循环次数的增加而加剧，裂纹的扩展减少了构成水泥净浆微观结构骨架的相互连接，导致抗拉强度和弹性模量降低。

2.4.3. 基于 COMSOL Multiphysics 冻融循环的数值模拟

COMSOL Multiphysics 模拟塑性混凝土冻融循环的关键步骤包括[12]：首先基于试验标准构建三维或轴对称几何模型，并耦合传热、多孔介质传质及固体力学模块，定义材料热 - 湿 - 力参数(如热导率、渗透系数、弹塑性本构)；其次设置周期性温度边界(-20~10℃循环)及饱和水分条件，通过全耦合求解器联立相变传热方程、达西定律及热湿膨胀应力方程；随后采用局部加密网格捕捉温度梯度与微裂纹萌生，进行瞬态求解并输出饱和度分布、孔隙压力及损伤因子；最终通过质量损失率、动弹性模量衰减等指标评估耐久性，结合实验数据验证模型，并利用参数敏感性分析优化孔隙率等关键变量，实现多物理场协同作用下的冻融损伤演化预测。

COMSOL 模拟塑性混凝土冻融循环过程可获取以下关键数据：温度场分布(含冻结锋面移动路径及相变潜热演化)、孔隙水饱和度与未冻水含量的时空变化、热 - 湿 - 力耦合作用下的应力张量(主应力、剪应力)及应变能密度分布，以及基于损伤变量(如各向同性损伤因子)的裂纹扩展规律；同时可量化冰晶膨胀压与孔隙水压力动态响应，揭示渗透率与扩散系数随冻融次数的非线性增长；结合质量损失率、动弹性模量衰减率等耐久性指标，评估材料抗冻等级，并通过参数敏感性分析筛选孔隙率、热膨胀系数等关键影响因素，为抗冻材料优化及防护设计提供多尺度量化依据。

3. 总结

- (1) 文章总结了影响塑性混凝土强度的一些重要因素, 分析了其原理机制;
- (2) 值得注意的是, 强度和变形是一个相互联系的研究整体, 不能割裂探讨;
- (3) 基于 COMSOL Multiphysics 冻融循环的数值模拟揭示: 渗透率与扩散系数随冻融次数的非线性增长。结合质量损失率、动弹性模量衰减率等耐久性指标, 可为设计提供多尺度量化依据;
- (4) 使用参数化扫描功能, 评估孔隙率、渗透系数对损伤演化的影响权重, 可优化材料配比。

参考文献

- [1] 王四巍, 李小超, 李杨, 高丹盈. 膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 33-37.
- [2] 唐贝, 崔澈, 张宝增, 江志安. 膨润土对塑性混凝土力学性能的影响及微观机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(12): 1254-1261.
- [3] 高丹盈, 严克兵, 胡良明, 宋帅奇. 膨润土类型对塑性混凝土性能的影响[J]. 水力发电学报, 2009, 28(3): 112-116.
- [4] 胡黎明, 濮家骝. 龄期对围堰塑性混凝土防渗墙的影响[C]//第八届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 1999: 21-25.
- [5] 段文雷. 塑性混凝土不同龄期力学性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [6] 徐毅安, 邓博团. 不同围压及加载速率下的塑性混凝土动力特性研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(3): 71-76.
- [7] 胡良明, 朱军福, 贾欣, 等. 塑性混凝土三轴受压本构关系试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 136-141, 148.
- [8] 王四巍. 单轴和三轴应力下塑性混凝土性能研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [9] Powers, T.C. (1945) Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *American Concrete Institute Journal*, **16**, 245-272.
- [10] Powers, T.C. and Helmuth, R.A. (1953) Theory of Volume Change in Hardened Portland Cement Paste during Freezing. *Highway Research Board*, **32**, 285-297.
- [11] Li, X., Gu, X., Xia, X., Madenci, E., Chen, A. and Zhang, Q. (2024) Peridynamic Simulation of Micro-Internal Damage and Macro-Mechanical Properties of Cement Paste under Freeze-Thaw Cycles. *Journal of Building Engineering*, **93**, Article ID: 109759. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.109759>
- [12] 段安. 受冻融混凝土本构关系研究和冻融过程[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2009.