

膨润土掺量对混凝土力学性能和耐久性的试验分析

麻文录

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450001

摘要: 针对混凝土结构开裂、耐久性不足等问题, 将钠基膨润土作为矿物掺合料等量替代水泥, 分别按0%、5%、10%、15%和20%五种掺量进行试验, 在固定水胶比条件下测试其力学性能和耐久性表现。试验发现, 适量掺入膨润土有助于改善混凝土内部结构, 提升抗渗、抗冻等耐久性能; 但掺量过高会对力学强度带来不利影响。综合各项指标, 10% ~ 15%的掺量范围较为适宜, 可为膨润土混凝土的配合比设计提供一定参考。

关键词: 膨润土; 混凝土; 力学性能; 耐久性; 微观结构

引言

混凝土结构在使用过程中容易出现开裂和耐久性下降的问题, 掺加矿物掺合料是改善其性能的常用手段之一。膨润土具有比表面积大、吸附能力强等特点, 同时具备一定的填充作用和火山灰活性, 能够优化混凝土内部孔隙结构。本文通过控制变量法, 系统研究膨润土掺量对混凝土工作性、力学性能及抗渗、抗冻、抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 结合微观形貌揭示作用机理, 确定合理掺量范围。

一、试验材料与方案设计

1. 试验原材料

试验采用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥, 初凝时间

145min, 终凝时间210min, 28d抗压强度48.6MPa, 抗折强度7.8MPa。选用钠基膨润土, 蒙脱石含量92%, 膨胀倍数25倍, 经干燥粉碎过0.075mm筛。细骨料为细度模数2.6的中砂, 含泥量1.2%。粗骨料为5~25mm连续级配碎石, 压碎值8.5%。外加剂采用聚羧酸系高效减水剂, 减水率25%。拌合用水为城市自来水。

2. 试验配合比设计

试验遵循等水胶比等骨料用量原则, 水胶比固定为0.50, 以膨润土替代水泥质量为变量, 配合比见表1。各组通过调整减水剂用量, 将坍落度控制在80mm左右, 满足施工和易性要求。

表1 混凝土配合比 (kg/m³)

组别	膨润土掺量/%	水泥	膨润土	细骨料	粗骨料	水	减水剂
1	0	360	0	820	1050	180	3.6
2	5	342	18	820	1050	180	3.8
3	10	324	36	820	1050	180	4.1
4	15	306	54	820	1050	180	4.4
5	20	288	72	820	1050	180	4.7

3. 试验仪器与设备

试验使用单卧轴混凝土搅拌机、150mm标准试模、3000kN压力试验机、电子天平、坍落度筒、混凝土抗渗仪、快速冻融试验机、扫描电子显微镜、标准养护箱等设备, 所有仪器均经校准, 满足精度要求^[1]。

4. 试验步骤

先按设计配合比称量原材料, 之后将干料放入搅拌机中搅拌2min, 使其混合均匀, 然后加入水和减水剂继续搅拌3min。拌合物制备完成后, 装入试模并用振动台振捣密实。试件在室内静置24h后拆模, 随即移入标准养护室, 分别进行为期7d、28d和90d的养护。到达养护龄期后, 依据规范开展抗压、劈裂抗拉、弹性模量测试, 每组3个试件取平均值。耐久性试验包括逐级加压抗渗、50次快冻法抗冻、5%硫酸钠溶液浸

作者简介: 麻文录, 1980年8月12日, 籍贯: 青海省互助县, 藏族, 男, 最高学历: 本科, 当前职称: 高级工程师, 研究方向: 水利水电。

泡侵蚀。取28d试件进行喷金处理，用SEM观测微观结构。

5. 试验数据处理方法

试验过程中产生的数据，借助Excel和Origin软件进行整理和统计。主要计算各组数据的平均值和标准差，同时绘制膨润土掺量与各项性能指标、工程成本之间的关系曲线，以便直观地观察变化趋势，为机理探讨提供数据支撑。

二、膨润土掺量对混凝土力学性能的试验结果与分析

1. 膨润土掺量对混凝土拌合物和易性的影响

和易性是衡量混凝土拌合物施工难易程度的重要指标。从试验结果来看，随着膨润土掺量的增加，拌合物

的坍落度呈现逐渐降低的趋势。未掺膨润土的对照组坍落度为82mm，掺量为5%、10%、15%、20%时，76mm、70mm、63mm、55mm。与此同时，黏聚性和保水性逐步提升，对照组出现轻微离析，保水性一般，而掺加膨润土后拌合物无离析泌水现象，保水性明显改善。这是因为膨润土亲水性极强，吸附大量水分使浆体黏度增加，胶体特性又能改善水泥浆体与骨料的黏结力^[2]。试验中通过调整高效减水剂掺量，有效缓解了坍落度下降问题，确保拌合物满足施工要求。

2. 膨润土掺量对混凝土抗压强度的影响

(1) 不同龄期抗压强度变化规律

不同膨润土掺量下混凝土各龄期的抗压强度测试结果如表2所示。

表2 不同膨润土掺量混凝土各龄期抗压强度

膨润土掺量	7d抗压强度 (MPa)	28d抗压强度 (MPa)	90d抗压强度 (MPa)
0%	30.2	45.2	49.3
5%	31.6	44.5	48.9
10%	32.5	44.8	48.6
15%	29.8	40.3	43.5
20%	25.4	36.5	39.8

从表中可以看出，随着膨润土掺量增加，抗压强度呈现先略有提升后持续下降的趋势，不同龄期变化规律基本一致。7d龄期时10%掺量组强度最高，达32.5MPa，较对照组提升7.6%；28d龄期时10%掺量组强度44.8MPa，接近对照组的45.2MPa；90d龄期时10%掺量组强度48.6MPa，略低于对照组的49.3MPa。掺量超过10%后强度下降明显，20%掺量组28d强度仅36.5MPa，较对照组下降19.2%。膨润土掺量越高，后期强度增长速率越慢，掺量超过15%后期强度增长不明显。

(2) 强度变化机理分析

从微观层面分析，适量掺入膨润土对混凝土抗压强度有积极作用。当掺量控制在5%~10%范围内时，膨润土颗粒较为细小且分布均匀，能够有效填充水泥石内部的孔隙，使孔径细化，大孔数量减少，结构变得更密实。作为天然火山灰材料，其活性硅、铝成分能与水泥水化产生的氢氧化钙发生二次反应，生成具有胶凝性的C-S-H凝胶。这种凝胶可进一步填充孔隙，增强水泥浆体与骨料的胶结作用，从而提升强度。掺量超过10%后，过量膨润土会稀释水泥浆体，减少水化反应的水泥量，导致水化产物不足。同时膨润土吸水膨胀会在内部产生较大应力，引发微裂缝，这些裂缝随掺量增加而增多扩

展，破坏结构整体性，最终导致强度显著下降^[3]。

3. 膨润土掺量对混凝土劈裂抗拉强度的影响

(1) 试验结果分析

劈裂抗拉强度的变化趋势与抗压强度基本一致，同样是随着掺量增加先升后降，在掺量为10%时达到峰值。7d龄期时10%掺量组强度2.85MPa，较对照组提升8.8%；28d龄期时3.72MPa，略高于对照组的3.68MPa；90d龄期时4.05MPa，接近对照组的4.08MPa。值得注意的是，抗拉强度的变化幅度小于抗压强度，20%掺量下仍达3.02MPa，较对照组下降26.0%，低于同期抗压强度下降幅度。说明膨润土对混凝土抗拉性能的改善作用有限，主要依靠提升内部结构密实度来增强抗拉能力，对韧性改善效果不明显。

(2) 破坏特征分析

观察试件破坏时的形态可以发现，不同掺量组之间差异较为明显。未掺膨润土的对照组呈现出典型的脆性断裂特征，裂缝宽度较大且扩展速度较快，试件破坏后散落比较严重，基本看不出延性。5%~10%掺量组破坏时裂缝较细，延伸速度较慢，破坏后仍能保持一定整体性，延性略有提升。这是因为适量膨润土填充孔隙，增强了水泥浆体与骨料的黏结力，有效抑制裂缝扩展^[4]。

掺量超过15%后,内部微裂缝增多,破坏时裂缝数量明显增加且宽度不均匀,延性下降,破坏形态逐渐接近脆性断裂,这与过量膨润土导致的内部结构缺陷密切相关。

4. 膨润土掺量对混凝土弹性模量的影响

从28d的弹性模量测试结果来看,随着膨润土掺量增加,弹性模量呈逐渐下降趋势,下降幅度随掺量增加而加大。具体来看,掺量为0%、5%、10%、15%、20%时,弹性模量分别为 3.45×10^4 MPa、 3.32×10^4 MPa、 3.21×10^4 MPa、 2.98×10^4 MPa、 2.75×10^4 MPa。这是因为膨润土的加入降低了混凝土密实度,增加内部孔隙率,导致刚度下降,弹性变形能力提升。

三、膨润土掺量对混凝土耐久性的试验结果与分析

1. 膨润土掺量对混凝土抗渗性的影响

(1) 抗渗试验结果

从抗渗试验结果来看,随着膨润土掺量增加,混凝土的抗渗等级逐步提高。掺量为15%时达到最高的P10,对应渗水压力1.0MPa,超过15%后抗渗等级略有下降至P9,但仍高于对照组的P7。这说明膨润土能有效改善混凝土抗渗性能,10%~15%掺量范围内抗渗效果最优。

(2) 抗渗机理分析

膨润土的保水性和填充作用能填充内部毛细孔隙,细化孔径,减少渗水通道。同时其与水泥水化产物反应生成的C-S-H凝胶可堵塞孔隙,增强结构致密性,从而提升抗渗性能。过量膨润土会导致内部微裂缝增多,这些裂缝成为渗水通道,反而降低抗渗性能。

2. 膨润土掺量对混凝土抗冻性的影响

(1) 抗冻试验结果

50次冻融循环后,各掺量组质量损失率和强度损失率随膨润土掺量增加逐渐下降,10%~15%掺量组抗冻性能最优。10%掺量组质量损失率1.2%、强度损失率8.5%;15%掺量组质量损失率1.1%、强度损失率8.2%;20%掺量组两项指标分别升至1.5%和10.3%,但仍低于对照组的2.3%和15.6%。

(2) 抗冻机理分析

膨润土填充内部孔隙,减少孔隙中自由水含量,降低冻融循环中水分结冰膨胀产生的内应力。其保水性可延缓内部水分迁移,减少冻融损伤。过量膨润土导致的微裂缝会成为冻融损伤的薄弱环节,加速结构破坏,使抗冻性能略有下降。

3. 膨润土掺量对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响

(1) 抗硫酸盐侵蚀试验结果

试件浸泡在5%硫酸钠溶液中28d、56d后,强度损失率随膨润土掺量增加逐渐下降,15%掺量组抗侵蚀性能最优。28d时15%掺量组强度损失率4.8%,56d时为8.9%;20%掺量组两项指标分别升至5.3%和9.7%,仍低于对照组的8.2%和14.5%。

(2) 抗硫酸盐侵蚀机理分析

膨润土的吸附性能可吸附部分硫酸盐离子,减少其与水泥水化产物的反应,降低硫酸盐侵蚀产物生成量,减少体积膨胀和结构破坏。内部密实度提升也能阻止硫酸盐离子渗透,增强抗侵蚀能力。过量膨润土导致的内部缺陷会加速离子渗透,降低抗侵蚀性能^[5]。

4. 膨润土掺量对混凝土工程成本的影响分析

(1) 成本测算依据

以试验配合比为基础,结合当前市场材料单价(水泥420元/t、膨润土120元/t、减水剂8000元/t),测算不同掺量下混凝土的单方材料成本,成本构成仅包含水泥、膨润土、减水剂费用(细骨料、粗骨料、水费用占比低且掺量未调整,成本变化可忽略)。

(2) 成本变化规律

随着膨润土掺量增加,混凝土单方材料成本呈持续上升趋势,具体测算结果如表3所示。

从表3可见,膨润土掺量与混凝土单方成本呈负相关。核心原因在于膨润土单价(120元/t)远低于水泥单价(420元/t),随着膨润土替代水泥比例升高,水泥用量减少带来的成本降幅超过减水剂用量增加的成本增幅,最终使单方成本呈下降趋势。其中20%掺量组单方成本较对照组降低1.6%,成本优势显著。

表3 不同膨润土掺量混凝土单方材料成本(元/m³)

膨润土掺量/%	水泥成本	膨润土成本	减水剂成本	单方总成本	较对照组增幅
0	151.2	0	28.8	180.0	0
5	143.64	2.16	30.4	176.2	+3.4%
10	136.08	4.32	32.8	173.2	+1.8%
15	128.52	6.48	35.2	170.2	+0.1%
20	120.96	8.64	37.6	167.2	-1.6%

5. 耐久性 & 成本综合评价

结合抗渗、抗冻、抗硫酸盐侵蚀试验结果与成本数据，采用综合评分法评价发现：10%–15% 掺量时，混凝土耐久性表现最优，各项耐久指标均处于高位，同时单方成本较对照组仅微增0.1%–1.8%，实现了性能与成本的最佳平衡；20% 掺量组虽成本最低，但力学强度下降明显，耐久性优势大幅削弱，工程应用风险较高。对比力学性能最优的10% 掺量，综合确定10%–15% 为膨润土在混凝土中的合理掺量范围，可兼顾力学性能、耐久性与经济性。

四、膨润土改善混凝土性能的机理探讨

1. 物理作用机理

膨润土颗粒细小，可填充水泥浆体与骨料之间的空隙，以及水化过程中产生的毛细孔隙，细化孔径分布，减少大孔隙比例，使内部结构更密实。其良好的亲水性和保水性可吸附大量水分，缓慢释放供水泥水化，延长水化进程，减少表面干裂，提升混凝土整体性。

2. 化学作用机理

膨润土属于天然火山灰质材料，其中的活性硅铝成分能够与水泥水化生成的氢氧化钙发生反应，形成具有胶凝性的水化硅酸钙凝胶。这种凝胶可以进一步填充孔隙，增强水泥浆体与骨料之间的胶结作用，从而提升混凝土的力学性能和耐久性。

3. 微观结构演变机理

SEM 微观照片显示，对照组内部孔隙较多且孔径较

大，C-S-H凝胶分布不均匀。10%–15% 掺量组内部孔隙细小均匀，C-S-H凝胶致密，膨润土颗粒与水泥浆体结合紧密。20% 掺量组内部出现微裂缝，C-S-H凝胶分布不均，孔隙率增加。微观结构的演变直接影响宏观性能，密实均匀的微观结构能显著提升力学性能和耐久性。

结束语

通过本次试验研究，明确了膨润土掺量对混凝土力学性能和耐久性的影响规律及作用机理，确定了合理掺量范围，为膨润土在混凝土工程中的推广应用提供了理论与实践支撑。

参考文献

- [1] 张永. 膨润土对酸激发地聚合物物理力学性能的影响[D]. 桂林电子科技大学, 2024.
- [2] 宋佳佳. 掺加膨润土的多元复合微粉对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响[D]. 太原理工大学, 2023.
- [3] 赵玉磊. 膨润土与偏高岭土对混凝土基本力学性能和抗渗性的影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [4] 徐海峰. 天然及高温活化膨润土对混凝土力学性能的影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2022.
- [5] 陈灿. 膨润土对混凝土抗渗透性能的影响研究[D]. 沈阳建筑大学, 2020.