

粉煤灰地聚合物混凝土力学性能影响因素的研究综述

张 岩 罗李亭 何梓湘

(长江大学 城市建设学院 湖北荆州 434023)

摘 要: 粉煤灰地聚合物混凝土是一种新型的绿色建筑材料, 具有优良的力学性能、耐久性与耐腐蚀性等特点。通过大量文献的研究成果表明, 粉煤灰地聚合物混凝土力学性能受多种因素的影响, 本文基于近年来国内外学者对粉煤灰地聚合物混凝土力学性能的试验分析, 总结了碱灰比、NaOH 浓度、热养护温度与时间四个因素对粉煤灰地聚合物混凝土的抗压强度的影响规律, 可为粉煤灰地聚合物混凝土的应用提供参考。

关键词: 粉煤灰地聚合物混凝土; 力学性能; 影响因素

1. 引言

硅酸盐水泥混凝土是世界上应用最为广泛的传统建材, 但其重要原材料——水泥在生产过程中产生大量二氧化碳已经成为世界关注的焦点^[1]。2016 年我国加入《巴黎气候变化协定》成为缔约方, 同时我国“十三五”规划《纲要》提出了控制温室气体排放的重点任务。水泥行业是工业门类中二氧化碳排放大户, 其在低碳改革中首当其冲, 因此找到一种能够替代水泥的绿色建筑材料势在必行, 地聚合物的开发为解决这一问题提供了新的方向。

地聚合物是由含硅铝酸盐物质的天然矿物(如偏高岭土、火山灰等)、工业固体废弃物(如粉煤灰、矿渣等)为主要材料在碱性激发剂的作用下, 溶解后再聚合生成由 $[\text{SiO}_4]$ 和 $[\text{AlO}_4]$ 四面体构成三维立体网状结构的无机聚合物^[2]。由于地聚合物独特的结构, 使其具有许多硅酸盐水泥基材料难以达到的优异性能, 在力学性能、耐热性等方面尤为突出^[3]。

粉煤灰地聚合物混凝土因其节约能源、减少环境污染, 能实现废弃物再利用而成为各国学者的研究热点^[4]。本文通过查阅国内外对粉煤灰地聚合物混凝土的研究文献, 归纳四个主要因素对其力学性能的影响规律并做出阐述总结。

2. 粉煤灰地聚合物混凝土力学性能影响因素

本文所述的地聚合物混凝土是以粉煤灰为胶凝材料, 加入碱激发剂、骨料、水等按照一定配合比制作出来的一种建筑用材料。本文基于国内外大量的试验结论, 列举了四种主要的影响因素。

2.1 碱灰比 (AAS/FA)

碱灰比即材料中的碱液总质量与所用粉煤灰质量的比值。Aliabdo^[5]研究发现当碱灰比在 0.3 到 0.4 之间时, 随着碱灰比的增大, 混凝土抗压强度也在增加, 但当碱灰比超过 0.4 时, 抗压强度会降低, 但仍然高于碱灰比为 0.3 时的抗压强度。Bhikshma^[6]研究了碱灰比在 0.3-0.5 时粉煤灰地聚合物的抗压强度, 试验结果表明随着碱灰比的增加, 抗压强度也随之增加。Ghafoor^[7]与 Ferdous^[8]发现当碱灰比超过 0.5 时, 抗压强度的变化出现的相反的情况, 随着碱灰比的增大, 混凝土的抗压强度降低。

总之, 当碱灰比在 0.3-0.5 的情况下, 较多的碱溶液能更好的与粉煤灰发生聚合反应, 使其在早期产生较高强度, 但当碱灰比超过 0.5 时, 剩余的碱溶液不会参与反应, 使最终抗压强度降低。

2.2 NaOH 浓度

NaOH 与粉煤灰的接触反应导致了粉煤灰中的硅酸盐与铝酸盐浸出, 一般 NaOH 溶液浓度越高, 浸出量就越多, 从而与硅酸盐溶液反应产生更高强度的地聚合物。

Hardjito^[9]在固定其他参数的情况下, 发现当 NaOH 溶液浓度从 8M 到 14M 时, 混凝土抗压强度随之增大。孟宪建^[10]发现 NaOH 浓度在 14M 时对粉煤灰地聚合物混凝土抗压强度的影响效果显著。Ghafoor^[7]研究表明, NaOH 溶液浓度越高, 地聚合物混凝土抗压强度就越高, 在 NaOH 溶液浓度达到 14M 时, 抗压强度达到了最高, 但随着浓度继续增加, 抗压强度开始下降。Azzahran^[11]发现在碱溶液浓度为 12M 前, 试件的抗压强度逐渐增加, 当 NaOH 溶液浓度由 12M 增至 14M 时, 试件抗压强度降低, 但总体高于浓度为 10M 时的强度。

综上所述, 低浓度的 NaOH 无法充分与粉煤灰发生反应, 导致最终的抗压强度降低。而当 NaOH 溶液浓度过高时, 剩余的 NaOH 不会继续发生反应, 使混凝土的抗压强度在后续不会发生明显的变化。因此 NaOH 浓度应控制在 10M-14M 较为合适。

2.3 热养护温度

在聚合反应中较低的热养护温度使粉煤灰在碱性溶液中的溶解速率降低, 最终导致聚合反应的进程变慢。温度的升高会提高粉煤灰溶解速率并加速碱性活化剂与粉煤灰之间的反应速率, 有利于地聚合物混凝土的早期强度发展^[12]。

Hardjito^[9]得出在 100° C 以内, 随着温度的升高, 抗压强度也呈现出明显上升的趋势, 但在 60° C 后, 抗压强度虽然继续增加, 但增长率有所降低。毛明杰^[13]试验中研究了构件在温度为 20-80° C 条件下的抗压强度变化, 发现温度上升使其抗压强度升高。赵海君^[14]研究了不同碱灰比下试件抗压强度随着温度的变化, 发现无论何种碱灰比, 地聚合物混凝土的抗压强度均随着温度的升高而升高, 但在 100° C 后, 抗压强度均出现了明显的下降。Abdulkareem^[15]的

试验显示了适合地聚合物强度发展的温度为 70° C, 超过该温度, 虽然强度会继续增大, 但是增大幅度降低。

因此, 当热养护温度在 60-80° C 以内, 可以使粉煤灰地聚合物混凝土形成较好的抗压强度, 较低的温度不利于聚合反应的发生, 升高温度可以加速粉煤灰在碱激发剂中的溶解速度, 但当温度较高并超过 100° C 时, 水分的蒸发使得混凝土提前开裂, 造成抗压强度急剧减小。

2.4 热养护时间

地聚合物混凝土相较于普通硅酸盐混凝土的区别之一在于地聚合物混凝土的早期强度较高, 在热养护的条件下, 随着养护时间的增加, 聚合反应进行的更加彻底, 速率进一步加快。

Hardjito^[9]研究的结果表明, 在 24 小时以内, 抗压强度随着养护时间的增长, 其增长幅度较为明显, 在养护时间超过 24 小时后, 抗压强度的增长缓慢。尹明^[6]与 Joseph^[17]研究在 100° C 的高温条件下, 固化时间对混凝土抗压强度的影响, 发现在 24h 内抗压强度增长明显, 超过 24h 后抗压强度虽有增长, 但增长率大幅降低。Abdulkareem^[15]研究了 6-24h 的养护时间对试件抗压强度的影响, 发现 24h 可以使得试件获得最佳的抗压强度, 超过 24h 的固化时间, 可能导致地聚合物结构发生破坏, 使得强度大大降低。

热养护时间越久, 聚合反应就越充分, 地聚合物混凝土的强度就越高。当热养护时间超过 24h 后, 聚合反应进行完全, 抗压强度不会发生随时间明显的变化, 因此可使热养护时间设置在 24h。

3. 结论

(1) 根据试验结果, 当碱灰比在 0.3-0.5 范围内, 随着碱灰比的增加, 混凝土的抗压强度也随之增加, 但当碱灰比超过 0.5 时, 碱灰比与抗压强度显示出相反的发展趋势, 推测是由于过多碱溶液抑制了反应的进行, 导致前期形成的抗压强度降低。

(2) 当 NaOH 溶液的浓度在 10M-14M 之间时, 粉煤灰地聚合物混凝土能形成较高的抗压强度, 当 NaOH 溶液浓度较低时会使其无法与粉煤灰发生充分的反应, 浓度较高则剩余的 NaOH 则不会继续参与反应, 因此选择合适的 NaOH 溶液的浓度是获得较高的目标抗压强度的关键。

(3) 粉煤灰地聚合物混凝土在热养护阶段时, 可以将温度设置在 60-80° C 之间并控制 24h 的养护时间, 较低的温度会降低聚合反应的速率不利于强度的形成; 过高的温度会使的体系中水过早的蒸发并形成小孔, 使得结构抗压强度降低。过短的热养护时间会使反应未进行完全, 达不到目标的抗压强度, 时间过长则抗压强度变化不明显。因此时间控制在 24h 较为适宜。

参考文献:

[1] 龚越. 中国水泥行业大气污染物和 CO₂ 排放清单及减排成本研究[D]. 浙江大学, 2022.
[2] Komljenovic M, Bascarevic R, Bradic R. Mechanical and

microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3): 35-42.

[3] Panias D, Giannopoulou I P, Perraki T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers[J]. Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects, 2007(1/3): 301.

[4] 张祥成, 孟永彪. 浅析中国粉煤灰的综合利用现状[J]. 无机盐工业, 2020, 52(02): 1-5.

[5] Aliabdo A A, Elmoaty A, Salem H A. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance[J]. Construction and Building Materials, 2016.

[6] Bhikshma V, Reddy M K, Rao T S. An experimental investigation on properties of geopolymer concrete (no cement concrete)[J]. 2012.

[7] Ghafoor M T, Khan Q S, Qazi A U, et al. Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature[J]. Construction and Building Materials, 2021(Mar.1): 273.

[8] Ferdous M W, Kayali O, Khennane A. A detailed procedure of mix design for fly ash based geopolymer concrete[C]// 4th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures. Melbourne, 2013: 11.

[9] Hardjito B D, Rangan B V. Development and Properties of Low-calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete[J]. Perth, 2005.

[10] 孟宪建. 粉煤灰基地聚合物混凝土抗压强度及吸水率研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(3): 33-36.

[11] Siti Fatimah Azzahran Abdullah et al. Effect of Alkali Concentration on Fly Ash Geopolymers[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 343(1)

[12] 饶绍建, 王克俭. 高温短期养护对低钙粉煤灰地质聚合物性能的影响[J]. 材料导报, 2011, 25(S1): 477-479.

[13] 毛明杰, 任进阳, 张文博, 陈伟. 粉煤灰地聚合物混凝土的力学性能研究[J]. 混凝土, 2016(05): 78-80.

[14] 赵海君, 严云, 胡志华. 粉煤灰基地聚混凝土性能的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2007(04): 18-20.

[15] Abdulkareem, O.A. & Ramli, Mahyuddin. (2015). Optimization of Alkaline Activator Mixing and Curing Conditions for A fly Ash-Based Geopolymer Paste System. Modern Applied Science. 9.61.

[16] 尹明, 白洪涛, 周吕. 粉煤灰地质聚合物混凝土的强度特性[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2723-2727.

[17] Joseph B, Mathew G. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete[J]. entia Iranica, 2012, 19(5): 1188 - 1194.