

粉煤灰和不同细度磨砂替代水泥对砂浆碱硅反应的影响

吉桑吉安苏万, 贾图拉皮塔库尔·苏瓦特

所属单位: 曼谷城乡规划部

摘要: 碱硅反应 (ASR) 是确保混凝土材料长期耐久性的重要考虑因素, 特别是对于那些含有反应性骨料的材料。尽管已证明粉煤灰 (FA) 可用于防止 ASR 膨胀, 但目前的文献中并未明确定义填料效应和 FA 细度对 ASR 膨胀的影响。因此, 本研究旨在检验填料和 FA 细度对 ASR 砂浆膨胀的影响。具有两种不同细度的 FA 被用于替代普通波特兰水泥 (OPC), 其粘合剂的重量百分比为 20%。与 FA 相同细度的河沙 (RS) 也被用于以与 FA 相同的速率替代 OPC。本文用 RS (一种惰性材料) 代替 OPC 以观察 FA 对 ASR 的填充效果。结果表明, 与对照砂浆相比, FA 和 RS 提供了较低的 ASR 膨胀。本研究中的细粉煤灰和粗粉煤灰在减轻砂浆的 ASR 膨胀方面具有几乎相同的效果。对于填充效果, 较小颗粒的 RS 对 ASR 降低的影响大于具有较粗颗粒的 RS。通过用 FA 和 RS 部分替代来降低砂浆混合物中的 OPC 含量, 可以显著缓解 ASR 膨胀。

关键词: 碱硅反应; 混合水泥; 填料; 水泥基材料; 粉煤灰; 砂浆

Influence of Cement Replacement with Fly Ash and Ground Sand with Different Fineness on Alkali-Silica Reaction of Mortar

Jitsangiam Suwan, Jaturapitakkul Suwat

Affiliation: Department of Town and Country Planning, Bangkok

Abstract: The alkali-silica reaction (ASR) is an important consideration in ensuring the long-term durability of concrete materials, especially for those containing reactive aggregates. Although fly ash (FA) has proven to be useful in preventing ASR expansion, the filler effect and the effect of FA fineness on ASR expansion are not well defined in the present literature. Hence, this study aimed to examine the effects of the filler and fineness of FA on ASR mortar expansion. FAs with two different finenesses were used to substitute ordinary Portland cement (OPC) at 20% by weight of binder. River sand (RS) with the same fineness as the FA was also used to replace OPC at the same rate as FA. The replacement of OPC with RS (an inert material) was carried out to observe the filler effect of FA on ASR. The results showed that FA and RS provided lower ASR expansions compared with the control mortar. Fine and coarse fly ashes in this study had almost the same effectiveness in mitigating the ASR expansion of the mortars. For the filler effect, smaller particles of RS had more influence on the ASR reduction than RS with coarser particles. A significant mitigation of the ASR expansion was obtained by decreasing the OPC content in the mortar mixture through its partial substitution with FA and RS.

Keywords: alkali-silica reaction; blended cement; filler; cement-based materials; fly ash; mortar

引言:

粉煤灰 (FA) 是火电项目中煤炭燃烧的矿物副产品。它是一种废料, 被倾倒在毗邻热电厂和城镇的土地上。在印度, 每年产生 9500 万吨飞灰, 占地约 65, 000 英亩。预计 2031-2032 年的煤炭需求量和飞灰产生量分别约为 18 亿吨和 6 亿吨。对垃圾填埋场空间减少以及废

物处理成本急剧增加的环境问题产生了迫切需要寻找新的、更经济和环保的方法来回收这种废物。

目前, 泰国的湄茂发电厂每年生产约 210 万吨粉煤灰。粉煤灰也是一种众所周知的矿物外加剂, 已被广泛接受用作火山灰材料, 以部分替代混凝土中的普通波特兰水泥 (OPC)。粉煤灰作为火山灰材料的使用不断增

加,因为它改善了砂浆和混凝土的性能,即长期的可加工性、耐久性和强度。通常,粉状燃烧产生的飞灰具有球形颗粒形状和高细度。然而,一些飞灰也含有不规则或有棱角的颗粒。飞灰颗粒的大小和形状因来源和燃烧条件而异。飞灰的化学成分还取决于煤的特性和燃烧条件。FA已经研究了很长时间,并不断开发以改善混凝土的许多性能。2010年,Sharma等人研究了14个火电厂FA特性的影响,发现钙含量和粒径是影响混凝土抗压强度的主要参数。抗压强度是选择混凝土配合比时要考虑的重要因素,使用FA可以提供与OPC混凝土一样高的抗压强度。此外,在混凝土混合物中用FA代替OPC可以生产高强度混凝土,在28天时的抗压强度为77.3至82.5 MPa。一旦FA被接受为提高混凝土抗压强度的一种方法,许多研究人员就开始研究FA以改善混凝土的其他性能,例如可加工性和耐久性。FA的使用可以显著改善浆料和砂浆的基本性能,例如正常稠度、凝结时间和水需求。

在耐久性方面,已证明用FA(按粘合剂重量计)替代20%至50%的OPC可产生比不含FA的混凝土具有更低透水性的混凝土。此外,类似的FA含量已被用于生产比OPC混凝土更耐硫酸钠和硫酸镁的混凝土。FA是一种流行的火山灰,用于防止氯化物在海洋环境中渗透到混凝土中。与OPC混凝土相比,FA的使用还有助于降低再生骨料混凝土的氯化物渗透深度,对于没有FA的再生骨料混凝土而言,氯离子渗透深度约为2-2.5倍。此外,FA已被用于改善含有再生骨料的混凝土的新鲜和机械性能。FA还被用作主要的胶结材料,用于生产具有零OPC和碱活化材料的电石渣-FA混凝土。

特克等人证实FA是一种很好的火山灰,可用于控制碱-二氧化硅反应(ASR)。已经确定使用20%的低钙F类FA与石灰石粉末混合可以减轻ASR膨胀。萨哈等人指出,使用F类FA可以比C类FA更显著地减少ASR扩展。然而,Moser等人的研究结果表明,FA的使用并不总是有助于减少具有非常高反应性骨料的砂浆的ASR膨胀。在他们的研究中,据报道,对照砂浆在14天时ASR膨胀为0.70%。同时,用C类FA代替20%的OPC未能在14天时将ASR降低到0.20%以下。

尽管许多研究人员已证明FA是一种可用于防止ASR膨胀的火山灰材料,但膨胀的主要减少可能是由于其他因素,例如填料效应或混合物中OPC含量的减少。此外,填料效应和FA细度对ASR膨胀的影响在目前的文献中还没有得到很好的定义。因此,本研究旨在考察用不同细度的FA代替OPC对砂浆ASR膨胀的影响。为了

观察细度对ASR膨胀的影响,作者还考虑了FA的两个细度水平,以与FA相同细度的磨碎河砂(RS)替代与FA相同比例的OPC,研究FA和RS的填料对砂浆ASR膨胀的影响。

材料

一种从泰国水泥制造商获得的低碱水泥,根据ASTM C150归类为I型,用于浇注所有砂浆。粉煤灰(FA)是从泰国美茂发电厂收集的,该发电厂使用粉煤燃烧系统燃烧褐煤。FA直接从工厂获得并按原样使用。FA的细度通过称量保留在325号筛子上的FA颗粒来测量。原始FA有32.8%的颗粒保留在325号筛子上,这不超过ASTM C618定义的34%的限制。该FA被称为“33FA”。然后通过球磨机研磨FA,使其5.0重量%的颗粒保留在325号筛子(5FA)上。为了研究填料对砂浆ASR膨胀的影响,本文使用河沙作为惰性材料。本研究中使用的河沙是从泰国中部收集的。为了检查FA的细度对ASR的影响,RS也被研磨成与FA具有相同的细度。

完成研磨过程后,通过X射线衍射(XRD)分析5FA和5RS的结晶度。5FA有石英(SiO_2)、碳酸钙(CaCO_3)和莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)晶体,而5RS主要有石英晶体。然而,RS中的石英不与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应并被视为惰性材料,因为XRD图下的面积非常小。没有分析33FA和33RS的XRD结果,因为假设33FA和33RS的结果分别与5FA和5RS的结果相似。钦达普拉西特等人 and Kroehong等人证明不同细度的粉煤灰和棕榈油灰(来源相同)的XRD结果只有微小的差异。

许多先前的研究已经确定,火山灰材料的细度对其化学成分几乎没有影响。5FA的化学性能符合ASTM C618中C级FA的要求,要求 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 之和大于50%, SO_3 小于5%,烧失量小于低于6%,而碱当量($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)为2.8%(按重量计)。5RS的主要氧化物是 SiO_2 ,占其含量的92.5%,其余为其他氧化物。

结果与讨论

含FA砂浆的ASR扩展

破碎的活性粗骨料用作细骨料的对照砂浆(CT)在14天时ASR膨胀为 $0.234 \pm 0.013\%$,超过0.20%,表明使用的细骨料根据ASTM C1567,应归类为高反应性骨料。此外,这种高反应性骨料具有高ASR砂浆膨胀率,类似于粗面岩、粗安岩、流纹岩和玻璃骨料。研究提出了在没有火山灰的砂浆或混凝土中发生ASR的各种机制。一些研究人员发现,增加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量可以提高ASR产品的产量。此外,侯等人证明了OPC的添加与ASR凝胶的开发之间存在直接关系。在CT砂浆中发现

了 ASR 膨胀产物的形成, 因为 NaOH 溶液提供了高碱度水平, 而主要钙源在水合过程中由 OPC 释放。然而, 通过添加矿物或火山灰材料部分替代 OPC 来降低混合物中的 OPC 含量可以减少 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量, 从而降低 ASR 膨胀程度。

含有 20% 的 5FA 或 33FA 的砂浆的 ASR 膨胀低于 CT 砂浆。5FA 和 33FA 迫击炮在 14 天时膨胀率为 $0.101 \pm 0.008\%$ 和 $0.112 \pm 0.010\%$, 在 28 天时分别增加到 $0.231 \pm 0.010\%$ 和 $0.233 \pm 0.020\%$ 。在砂浆混合物中用 FA 或其他火山灰部分替代 OPC 可减少 ASR 膨胀, 这与许多先前研究的结果一致。在这项研究中, 作为 OPC 替代品的 FA 的细度对砂浆的 ASR 膨胀程度有边际影响。这与 Aydin 等人报道的结果一致。他们发现来自同一来源的原始 FA 和地面 FA 之间的变化对 ASR 扩展程度没有显著影响。例如, 含有 5FA 和 33FA 的砂浆在 14 天时的膨胀率分别为 0.101 0.008 和 0.112 0.010%。虽然 Aydin 等人的结果表明, 含有原始和粉煤灰的砂浆在 14 天时的 ASR 膨胀率分别约为 0.095% 和 0.085%。可以清楚地看出, 由于 ASR 不超过 5%, 粉煤灰细度的降低可以减少砂浆的膨胀。

Topçu 等人描述了一种通过添加火山灰来减少 ASR 膨胀的机制。他推断 FA 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之间的火山灰反应 (来自水泥水化反应) 导致孔隙溶液中的 pH 值降低。林加德等人指出, 由低 CaO 和高 SiO_2 火山灰制成的辅助胶凝材料 (SCM) 是降低孔隙溶液碱度的最关键因素。孔隙溶液中羟基离子浓度的相应降低可以防止 ASR 膨胀或降低其程度。相反, 当前研究中使用的 FA 含有大量的 CaO (25.2 wt.%) 和少量的 SiO_2 (33.2 wt.%), 但它也减少了砂浆的膨胀。Topçu 等人解释说, 由于形成致密的糊状结构, FA 的火山灰反应可以降低碱和二氧化硅之间的反应性。这也导致随后能够渗透糊状基质的水或溶液的量减少。已显示, 用 FA 或其他火山灰替代 OPC 的比例越高, 硬化浆料中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量就越低。此外, 由于火山灰反应会部分消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 它还会降低碱性反应物的可用性。此外, Hong 和 Glasser 提出, Al_2O_3 含量也可能对 SCM 粘合剂的碱容量有重要影响。

含有 FA 的砂浆或混凝土中 ASR 膨胀的减少归因于粘合剂中碱的减少。然而, 限制 ASR 扩展的主要因素是混合物中 OPC 的含量较低, 这是通过使用 FA 作为 OPC 的部分替代品来实现的。为了验证这一说法, RS (惰性材料) 被用来代替 OPC 而不是 FA, 以证明水泥含量对 ASR 膨胀的影响。

含 RS 砂浆的 ASR 扩展

根据 RS 砂浆的 ASR 膨胀与浸泡时间之间的关系, 结果显示, 与 CT 砂浆相比, 砂浆中 5RS 和 33RS 替代 OPC 导致 ASR 膨胀较低。5RS 砂浆在 14 天时 ASR 膨胀率低于 0.10%, 表明 20% 的 5RS 含量可以将砂浆的 ASR 膨胀程度从高反应水平降低到无害水平 (小于 0.10%)。然而, 应该注意的是, RS 是磨碎的河砂, 由于其高结晶度, 它是一种惰性材料。因此, ASR 膨胀的缓解是粘合剂基质中 OPC 含量降低的结果。

用 5RS (高细度) 代替 OPC 比用 33RS (低细度) 代替 OPC 更能降低砂浆的 ASR 膨胀, 因为 5RS 颗粒可以更好地填充空隙并抵抗 1 N NaOH 溶液渗透到砂浆中。例如, 5RS 砂浆在 14 天时的 ASR 膨胀率为 0.061%, 而 33RS 砂浆的 ASR 膨胀率为 0.112%。RS 的细度是影响砂浆中 ASR 降低的重要因素之一。与细度较低的 RS 相比, 较细的 RS 还为砂浆提供了更高的抗压强度, 这主要是由于填料的作用。虽然用 RS 代替 OPC 可以减少 ASR 膨胀, 但它也会导致砂浆的抗压强度降低。因此, 在控制 ASR 膨胀中使用 RS 还必须考虑砂浆所需的抗压强度。

含 FA 和 RS 砂浆的 ASR 扩展

5FA 砂浆在 28 天时的膨胀率高于 5RS 砂浆。然而, 5FA 迫击炮的 ASR 膨胀与 5RS 迫击炮在 10 天之前的时期相似。这主要是由于早期 FA 的缓慢火山灰反应。10 天后, 5FA 砂浆的膨胀率不断增加, 直至 28 天时达到 0.231%, 而 5RS 砂浆在 28 天时的 ASR 膨胀率为 0.093%。5FA 砂浆的 ASR 膨胀增加大于 5RS 砂浆, 因为 5FA 中的 CaO 增加了混合物的碱度。在 33FA 和 33RS 迫击炮中可以观察到类似的行为, 其中 33FA 迫击炮的非反应期略长于 5FA 迫击炮 (14 天之前)。另一方面, 33FA 和 33RS 砂浆之间的 ASR 膨胀差异低于 5FA 和 5RS 砂浆之间的差异, 因为 33FA 中较粗的 CaO 比 5FA 中的较细的 CaO 反应更慢且不完全。

不同细度 RS 填料对砂浆 ASR 膨胀的影响

更细颗粒的填充效果提高了砂浆或混凝土的机械性能和耐久性能。由于 33RS 和 5RS 是磨碎的河砂, 主要由石英组成, 不与 OPC 水化产物反应, 因此认为 33RS 和 5RS 砂浆之间不同的膨胀减少主要是由于 RS 材料的填充作用。

RS 引起的填料效应是降低 ASR 膨胀的重要因素, 并且填料效应在后期具有更高的有效性。例如, 由于填料的作用, 5RS 在 14 天和 28 天时的 ASR 砂浆膨胀率分别发生了 0.177% 和 0.283% 的变化。应该注意的是, 膨胀的负值表明与 CT 砂浆相比, ASR 砂浆的膨胀减少了。OPC 含量从 100 重量% 降低到 80% 意味着在反应性聚

集体中可用于与 SiO₂ 反应的 Ca(OH)₂ 量较低, 因此 ASR 产物的含量较低。此外, Ca(OH)₂ 与活性骨料中的 SiO₂ 不断发生反应, 浸泡 5 天后填料效果明显, 浸泡时间越长效果越明显。

当 OPC 仅占 80% 时, 加入 5RS 和 33RS 的砂浆(砂浆中 OPC 含量相等)的 ASR 膨胀率分别为 0.177 和 0.122%, 低于 CT 砂浆的 ASR 膨胀率。同时, 将 RS 细度从 33RS 提高到 5RS, 在 14 天和 28 天的 ASR 扩展中产生了约 0.055% 和 0.092% 的绝对增长。值得注意的是, RS(33RS 和 5RS)的填料效果不如粘合剂中 OPC 减少 20% 有效, 因为砂浆中 OPC 减少 20% 将 ASR 膨胀降低到约 0.122% (当使用 33RS 作为 OPC 的替代品) 或 0.177% (当使用 5RS 作为 OPC 的替代品时), 而 33RS 和 5RS 的填充效果对 ASR 膨胀的降低在 14 天时仅为 0.055%。

结论

根据本次粉煤灰和不同细度地砂替代水泥对砂浆碱硅反应影响的研究结果, 总结如下:

1. 使用 5 和 33 wt.% 的颗粒保留在 325 号筛子上的 FA 代替 20% 的 OPC 降低了砂浆的 ASR 膨胀。减少的程度取决于 FA 替代 OPC, 而不是 FA 的细度。

2. 使用 RS 部分替代 OPC 通过降低 OPC 中可用的 Ca(OH)₂ 含量来降低砂浆的 ASR 膨胀。

3. RS 的填料作用是降低砂浆 ASR 膨胀的一个因素。此外, 细度较高的 RS 的填充效果比细度较低的 RS 更有效。

4. 使用不同细度等级的 C 级 FA (在 325 号筛上保留 5% 和 33% 重量) 代替 20% 的 OPC, 14 天时 ASR 膨胀降低 50% 以上。此外, 建议降低砂浆中的 CaO 含量 (通过降低 OPC 含量) 在减轻 ASR 膨胀方面比水泥替代材料的填充效果更有效。

参考文献:

[1]Topçu, İ.B.; Boşga, A.R.; Billir, T. Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li₂CO₃. Waste Manag. 2008, 28, 878 - 888.

[2]Aydın, S.; Karatay, Ç.; Baradan, B. The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortar. Powder Technol. 2010, 197, 68 - 72.

[3]Lindgård, J.; Andiç-Çakır, Ö.; Fernandes, I.; Rønning, T.F.; Thomas, M.D. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. Cem. Concr. Res. 2012, 42, 223 - 243.

[4]Duchesne, J.; Bérubé, M.A. The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR: Another look at the reaction mechanisms part I: Concrete expansion and portlandite depletion. Cem. Concr. Res. 1994, 24, 73 - 82.

[5]Ichikawa, T. Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. Cem. Concr. Res. 2009, 39, 716 - 726.

[6]Turanlı, L.; Uzal, B.; Bektas, F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. Cem. Concr. Res. 2005, 35, 1106 - 1111.

[7]Hong, S.Y.; Glasser, F.P. Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels: Part II. Role of alumina. Cem. Concr. Res. 2002, 32, 1101 - 1111.

[8]Tangpagasit, J.; Cheerarot, R.; Jaturapitakkul, C.; Kiattikomol, K. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. Cem. Concr. Res. 2005, 35, 1145 - 1151.

[9]Jaturapitakkul, C.; Tangpagasit, J.; Songmue, S.; Kiattikomol, K. Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. Constr. Build. Mater. 2011, 25, 4287 - 4293.

[10]Kroehong, W.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C. Effect of palm oil fuel ash fineness on packing effect and pozzolanic reaction of blended cement paste. Procedia Eng. 2011, 14, 361 - 369.

[11]Esteves, T.C.; Rajamma, R.; Soares, D.; Silva, A.; Ferreira, V.M.; Labrincha, J.A. Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. Constr. Build. Mater. 2012, 26, 687 - 693.