

粉煤灰添加剂对矿渣水泥混凝土性能的影响

贾西克·斯托尔斯基, 施特·乔维, 亚当·斯尼亚克

所属单位: 波兰土木工程和大地测量学院

摘要: 本文介绍了粉煤灰的添加对矿渣水泥混凝土的特定物理和机械参数的影响。本文进行了实验测试, 以测量氯离子在混凝土中的迁移、混凝土在压力下暴露于水的密封性以及混凝土的抗压强度。另外, 本研究测试了用CEM IIIA 42.5和32.5水泥制成的六个系列的混凝土混合物。通过添加粉煤灰作为部分水泥替代品, 对基础混凝土混合料进行了修改, 添加量为25%和33%。对所得结果的比较分析表明, 在紧固性方面有明显的改善, 特别是在以CEM IIIA 32.5水泥为基础的混凝土中, 以及含有粉煤灰添加剂的混凝土对氯离子渗透的抵抗。在含有粉煤灰添加剂的混凝土中, 显示出较慢的初始强度增长速度和较长的成熟期强度。根据研究结果, 作者建议改变欧洲标准化体系, 允许在用CEM IIIA 42.5或32.5水泥等级制造的混凝土中使用粉煤灰添加剂。

关键词: 混凝土; 粉煤灰; 矿渣水泥; 氯离子迁移

Influence of Fly Ash Additive on the Properties of Concrete with Slag Cement Anna

Jacek Stolski, Szcze Zychowiz, Adam Sniak

Affiliation: Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Poland

Abstract: This paper presents research on the impact of fly ash addition on selected physical and mechanical parameters of concrete made with slag cement. Experimental tests were carried out to measure the migration of chloride ions in concrete, the tightness of concrete exposed to water under pressure, and the compressive strength of concrete. Six series of concrete mixes made with CEM IIIA 42.5 and 32.5 cement were tested. The base concrete mix was modified by adding fly ash as a partial cement substitute in the amounts of 25% and 33%. A comparative analysis of the obtained results indicates a significant improvement in tightness, especially in concrete based on CEM IIIA 32.5 cement and resistance to chloride ion penetration for the concretes containing fly ash additive. In the concretes containing fly ash additive, a slower rate of initial strength increases and high strength over a long period of maturation are shown. In accordance with the presented research results, it is suggested that changes to the European standardization system be considered, to allow the use of fly ash additive in concrete made with CEM IIIA 42.5 or 32.5 cement classes.

Keywords: Concrete; Fly ash; Slag cement; Chloride ion migration

引言:

如今, 持续发展和生态学原则是混凝土构件设计中的一个重要问题。此外, 为了一个可持续的未来, 保护资源和环境已经成为当今最大的挑战之一。混凝土技术中越来越频繁地使用基于矿物添加剂的混合水泥所带来的变化, 这些矿物添加剂是其他工业或农业生产过程的副产品, 不仅对减少二氧化碳排放有好处, 而且还构成了所谓的可持续绿色混凝土概念的基础。

由绿色混凝土制成的结构在环境上是可持续的, 其

建造方式使其在整个生命周期内(包括使用寿命)对环境的总影响降到最低。在这种情况下, 所谓的绿色建筑应该是节能的, 由环境友好的材料制成。在这种结构中使用的混凝土必须满足强度和耐久性的要求, 其组成部分应以环保的方式获得、生产和使用。此外, 绿色建筑是确保可持续性的必要组成部分。根据Thatcher和Milner的说法, 绿色建筑中的健康、福祉和效率是其居住者的重要动力。

在过去的几十年里, 随着新一代复合材料, 即

绿色混凝土复合材料的发展,大大增加了含有不同类型的辅助胶凝材料(SCMs)的混凝土混合物的生产。这些材料一般可分为:(1)工业废料,如粉煤灰(FA)、硅灰(SF)、磨细的高炉矿渣(GGBFS);(2)农业-养殖废料,如:竹子、小麦、大麦、玉米、橄榄、香蕉、剑麻、枣树、象草;(3)农业-养殖废料,如:牡蛎、长春花、贻贝。

粉煤灰(FA)是热电厂和发电厂煤粉燃烧过程中的副产品,通过认证后,可以作为混凝土的添加剂使用。使用粉煤灰和高炉矿渣作为水泥和混凝土混合物的添加剂,可以实现废物回收,降低建筑材料的生产成本,减少混凝土的碳足迹,并对混凝土的某些物理性能产生积极影响。

到目前为止,所进行的研究集中在基于CEM I水泥的粉煤灰添加剂的混凝土性能上。EN 206+A1:2016-12标准允许在使用CEM I和CEM IIA水泥制造的混凝土中加入粉煤灰,其用量分别不超过水泥重量的33%和25%,灰分系数 $k=0.4$ 。然而,该标准没有规定在使用CEM III水泥(含高炉矿渣)制造的混凝土混合物中添加粉煤灰。Van Noort指出,矿渣的数量和来源对使用矿渣水泥制成的混凝土的抗腐蚀因素有很大影响。此外,使用矿渣水泥制造的混凝土会面临更多的碳化现象。这种影响主要涉及CEM IIIB水泥。实验研究表明,在使用CEM IIIA水泥制造的混凝土中,如果矿渣含量不超过57%,碳化现象与使用CEM I水泥制造的混凝土相当。

因为有大量的高炉矿渣,比例在35%到65%之间,CEM III水泥可以被归类为生态水泥粘合剂,具有低碳足迹和高可回收性的特性。矿渣是冶金行业的副产品,是在高炉中冶炼铁矿石的结果。由于其水力特性,高炉矿渣是一种宝贵的水泥成分。在水泥中使用高炉矿渣可以减少波特兰熟料的用量,这对生态环境是有利的。波特兰熟料的生产是一个高度能源密集的过程,对环境有不利影响。

使用CEM III粘结剂的混凝土的主要应用领域是基础板、大型地基脚、地下连续墙和地下储罐的结构件。这是由于需要提供低的混凝土收缩率,抗硫酸盐侵蚀,或低的水化热。基础板被设计为暴露等级XD3,因为它们容易受到氯化物的腐蚀。根据标准EN 206+A1:2016-12,对于暴露等级XD3,要求的最低混凝土强度等级为C35/45,最大水灰比为 $w/c=0.45$,CEM I或CEM IIA水泥的最低含量为320 kg/m³。

本研究的目的是证明使用粉煤灰作为添加剂,在强度等级为32.5和42.5的CEM IIIA N LH HSR NA水泥中占

25%以上的重量,如何影响混凝土的物理和机械性能。

材料

用于测试的样品是用CEM IIIA 42.5N水泥和CEM IIIA 32.5N水泥制备的三个系列的混凝土混合物。这些系列的混凝土混合料在替代矿渣水泥的粉煤灰添加剂的数量上有所不同。在测试中,使用了以下材料:

- 矿渣水泥CEM IIIA 42.5和CEM IIIA 32.5
- 粉煤灰
- 细集料--最大尺寸为2.0毫米的坑砂
- 粗集料--天然砂砾,最小和最大尺寸为2.0和8.0毫米
- 木质素磺酸盐和萘基掺合物
- 聚羧酸盐基掺合物
- 纯净的实验室管道水

混凝土混合物

本研究使用了CEM IIIA 42.5N水泥(代号CM1-0, CM1-25, CM1-33)和使用CEM IIIA 32.5N水泥(代号CM2-0, CM2-25, CM2-33)。本研究参考了混凝土混合料CM1-0和CM2-0满足暴露等级XD3的要求,设计时假设 $w/c=0.45$,不添加粉煤灰。接下来,通过添加粉煤灰来改变参考混凝土混合料的组成,同时减少水泥和砂石骨料,假设 $w/(c+k \times f a)=0.45$ 不变。然后,通过使用粉煤灰作为部分水泥替代物对参考混凝土混合料进行了修改。在CM1-25和CM2-25混凝土混合料中,粉煤灰含量为水泥重量的25%,而在CM1-33和CM2-33混凝土混合料中使用了最大的粉煤灰量,即水泥重量的33%。

测试和结果

混凝土中氯离子迁移的研究

硬化混凝土中的氯离子迁移系数是按照NT BUILD 492标准中提出的方法测定的。本文的测试是针对CM1-0、CM1-25、CM1-33系列的混凝土样品进行的。从每个样品上切下三个直径为100毫米、高度为50毫米的圆盘,并进行后续测试。氯离子迁移系数是由一定电压的外部电场引起的瞬时氯离子流确定的。在测试之前,盘子的侧边用环氧树脂保护,并用Ca(OH)₂溶液浸泡。Dnssm系数的值是根据所施加的电压、在测试开始和结束时测量的电解质的温度以及氯离子渗透的深度来确定的,这是在一个轴向分割的样品上测量的。该研究在48小时内进行。

对于没有添加FA的混凝土,即CM1-0,以及使用了占水泥重量25%的FA的CM1-25的混凝土,都获得了"良好"的抗氯离子渗透性类别的称号。然而,比较氯离子迁移系数的平均值,我们可以注意到,在含有FA添加

剂的混凝土中,其数值明显下降。CM1-25混凝土获得的系数平均值比CM1-0混凝土获得的系数值低26%,而对于含有最大数量灰分(占水泥重量的33%)的CM1-33混凝土,其系数值低43%之多。此外,CM1-33混凝土被归入抵抗氯离子渗透的最高类别,定义为“非常好”。含有FA添加剂的混凝土样品的氯离子迁移系数的降低与氯离子渗透的平均深度直接相关。在CM1-0混凝土中,离子渗透的深度几乎是CM1-33混凝土的两倍。

混凝土的透水率

所有系列样品的混凝土水密性测试都是在成熟120天后进行的。测试是在边长为150毫米的立方体样品上进行的,其侧面用防水树脂保护。样品被暴露在加压的水中。为此,本研究使用了测试混凝土透水率的仪器55-C0246/6。该设备由一个带夹具的钢架组成,带有液压系统、阀门、水压指示器和透明测量瓶。该设备适用于同时测试多达六个立方体的样品,并能在最大压力为10巴的情况下供水。水压每24小时增加0.2MPa,范围在7.4-8.0MPa。最后的压力,相当于80米的水阻力,保持24小时。然后将样品分割,用电子卡尺测量水渗入混凝土的深度。根据水渗入混凝土深度的测量结果,计算出测试样品的水渗入混凝土的平均深度。

在测试过程中,在任何情况下都没有发现水渗入混凝土样品的情况。对结果的比较分析表明,应用FA后,水渗入混凝土的深度有所减少。随着FA添加剂量的增加,平均水渗入混凝土的深度减少。与基于CIII 32.5水泥的混凝土相比,使用FA在更大程度上提高了基于CIII 42.5水泥的混凝土的密实度。添加较少灰分的混凝土(CM1-25)确定的水渗透深度的平均值 w_m 比不添加灰分的混凝土(CM1-0)确定的值小10%,而在添加最大灰分的情况下(CM1-33),它小19%之多。反过来,在以CEM IIIA 32.5水泥为基础的混凝土中,加入FA会导致CM2-25混凝土的平均值 w_m 下降68%,CM2-33混凝土的平均值 w_m 与未加入FA的混凝土(即CM2-0)相比,下降高达87%。

混凝土抗压强度的测试

本研究对边长为100mm的立方体样品进行测试,以测量混凝土的抗压强度。另外,对混凝土配方CM1-0、CM1-25、CM-33和CM2-0、CM2-25和CM2-33在随后的1至234天的混凝土成熟期进行了测试。样品按照标准进行了储存。测试是按照标准进行的,使用MEGA 6-3000-150液压机。

应用FA添加剂后,混凝土的抗压强度有明显的延迟增加。这种现象在CM1混凝土的成熟时间小于28天

和CM2混凝土的成熟时间小于56天时最为强化。应该注意的是,CM2-0混凝土在成熟期第4天的早期强度要高于CM1-0混凝土的强度。在混凝土成熟56天后,CM1-0和CM1-33的混凝土强度差异不超过5%。然而,对于CM2-0和CM2-33的混凝土,这一差异为14%。对于长期成熟期,CM1-0、CM1-25和CM1-33混凝土的强度差异保持在同一水平,强度的降低随着FA添加量的增加而增加。

在长期熟化的CM2混凝土中,即超过90天,观察到CM2-33混凝土的强度相对于CM2-25混凝土增加了4%。根据这项研究的结果,可以说FA作为基于矿渣水泥的混凝土的添加剂,在混凝土的早期和长期熟化后,会导致混凝土强度的下降。然而,在以CEM IIIA 32.5水泥为基础的混凝土中,使用超过30%的FA添加剂不会迅速导致混凝土抗压强度的降低,就像在以波特兰水泥为基础的混凝土中观察到的那样。

讨论

本研究所进行的试验表明,在含有高炉矿渣水泥的混凝土中使用II型添加剂形式的FA是有用的。试验结果表明,在基于矿渣水泥的混凝土混合物中添加FA,可以提高混凝土的紧实度和抗氯离子侵蚀的能力。这两个参数在制作基础板这样的结构件时特别重要。使用能抵抗外部不利因素渗透的紧密混凝土是非常重要的,不仅对混凝土的耐久性,而且对保护钢筋混凝土结构免受腐蚀也是非常重要的。限制氯离子的渗透对于保护钢筋免受腐蚀尤为重要。由氯化物引起的腐蚀是非常危险的,因为它最初是无症状的。因此,它导致钢筋形成永久性损伤,这可能导致结构的突然破坏。氯化物引起的腐蚀现象还因水分而加剧。对于所分析的混凝土配方,在使用FA添加剂后,观察到混凝土对氯离子和水的渗透的抵抗力明显增加。这些参数的增加是随着FA用量的增加而观察到的。试验结果表明,对于使用CEM IIIA水泥的42.5级和32.5级混凝土,在使用FA添加剂后,混凝土被水渗透的情况明显减少。水的渗透深度和氯离子对混凝土的渗透深度之间的关系已经确定。通过使用FA添加剂大大限制了基于CEM IIIA 32.5和42.5级矿渣水泥的水渗透深度,这将大大降低氯离子的渗透深度,这对于设计为暴露等级XD3并暴露于大量氯离子侵蚀的结构来说尤为重要。

在短暂的熟化时间后,FA添加物明显降低了CM1和CM2混凝土的抗压强度。随着成熟时间的延长,本研究对象到含有FA添加剂的混凝土强度的增加。此外,在成熟的第二阶段,从第56天开始,以CEM IIIA 32.5水泥为基础,含有最多33%FA添加剂的CM2-33混凝土被发现

比含有 25% FA 添加剂的 CM2-25 混凝土的强度要高。对比试验结果, 基于 CEM III 32.5 水泥并添加 FA 的混凝土比基于 CEM III 42.5 水泥并含有相同比例 FA 添加剂的混凝土在初始成熟阶段具有更大的抗水渗透能力和强度下降。在使用 CEM III 32.5 水泥的混凝土中, 抗压强度和劈裂时的抗拉强度都没有像使用 CEM IIIA 42.5 水泥的混凝土那样随着 FA 添加剂含量的增加而按比例下降。试验结果还表明, 使用 FA 作为基于 CEM IIIA 32.5 水泥的混凝土的添加剂是有用的, 因为混凝土的密实度有明显的改善。尽管如此, 应该记住, 在混凝土成熟的最初时间内, 混凝土的强度会降低, 这一点在设计时必须考虑。鉴于所获得的测试结果, 改变国家标准化体系以允许在基于 CEM IIIA 42.5 和 32.5 矿渣水泥的混凝土中添加粉煤灰是一个值得考虑的问题。

结论

从研究期间获得的结果中得出了以下结论:

1. 粉煤灰的加入增加了矿渣水泥制成的混凝土的紧密性和对氯离子渗透的抵抗力。
2. 粉煤灰降低了压力下水对基于 CEM IIIA 32.5 矿渣水泥的混凝土的渗透深度, 其程度大于基于 CEM IIIA 42.5 水泥的混凝土。与不含粉煤灰的参考混凝土相比, 加入 FA 后, CM1-33 混凝土的压力下水渗透深度降低了 19%, CM2-33 混凝土的压力下水渗透深度降低了 87%。
3. 本研究证明了混凝土在压力下对水渗透的抵抗力和对氯离子渗透的抵抗力之间的关系。对 CM1-0、CM1-25 和 CM1-33 混凝土的试验结果进行比较, 添加 FA 对降低混凝土压力下水渗透深度平均值 w_m 的影响与氯离子渗透到混凝土中的平均深度 x_m , t_{ot} 的减少成正比。这种减少的比例系数在 $w_m x_m, t_{ot} = (2.6, 2.7)$ 范围内。
4. 在基于矿渣水泥的混凝土中加入 FA 会降低初始和长期成熟时间的抗压强度。在以 CEM IIIA 42.5 水泥为基础的混凝土中, 在应用了水泥重量 25% 和 33% 的 FA 添加剂后, 抗压强度的降低是相似的, 不超过 5%。这既适用于标准成熟期, 即 28 天后, 也适用于延长成熟期, 即 190 天后。基于 CEM IIIA 32.5 矿渣水泥的混凝土在使用 FA 添加剂后, 其特点是抗压强度明显下降, 在成熟期 28 天后, 抗压强度为 23% (系列 CM2-25)。在超过 120 天的长熟化期后, 含有 FA 添加剂的混凝土抗压强度的降低不超过 10%。
5. 在基于矿渣水泥的混凝土中使用 FA 添加剂是有益的, 其用量最多为水泥重量的 33%。所进行的研究表明, 与在基于 CEM IIIA 42.5 水泥的混凝土中添加 25% 的水泥

相比, 添加 33% 的 FA 不会明显影响抗压强度, 对于基于 CEM IIIA 32.5 水泥的混凝土, 甚至会导致该强度的增加。这些观察结果是指标准和长熟化期。增加粉煤灰的添加量明显增加了混凝土的密封性和对氯离子渗透的抵抗力。

参考文献:

- [1]Harilal M, Rathish VR, Anandkumar B, et al. High-performance green concrete (HPGC) with improved strength and chloride ion penetration resistance by synergistic action of fly ash, nanoparticles and corrosion inhibitor. *Constr. Build. Mater.* 2019; 198: 299 - 312.
- [2]Joshaghani A. The effect of trass and fly ash in minimizing alkali-carbonate reaction in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017; 150: 583 - 590.
- [3]Jasiczak J, Szymański P, Nowotarski P. Impact of moisture conditions on early shrinkage of ordinary concrete with changing W/C ratio. *Arch. Civ. Eng.* 2014; 60: 241 - 256.
- [4]Hu X, Shi C, Shi Z, et al. Early age shrinkage and heat of hydration of cement-fly ash-slag ternary blends. *Constr. Build. Mater.* 2017; 153: 857 - 865.
- [5]Rutkowska G, Małuszyńska I. Research of properties of concrete with the use of fly ash. In *Żywnieria Ekol.* 2014; 53 - 64.
- [6]Golewski GL. Estimation of the optimum content of fly ash in concrete composite based on the analysis of fracture toughness tests using various measuring systems. *Constr. Build. Mater.* 2019; 213: 142 - 155.
- [7]Sadowski T, Golewski GL. A failure analysis of concrete composites incorporating fly ash during torsional loading. *Compos. Struct.* 2018; 183: 527 - 535.
- [8]Golewski GL, Sadowski T. The fracture toughness the K_{IIIc} of concretes with F fly ash (FA) additive. *Constr. Build. Mater.* 2017; 143: 444 - 454.
- [9]Golewski GL. Effect of curing time on the fracture toughness of fly ash concrete composites. *Compos. Struct.* 2018; 185: 105 - 112.
- [10]Cai X, He Z, Tang S, et al. Abrasion erosion characteristics of concrete made with moderate heat Portland cement, fly ash and silica fume using sandblasting test. *Constr. Build. Mater.* 2016; 127: 804 - 814.
- [11]Rutkowska G, Wichowski P, Franus M et al. Modification of ordinary concrete using fly ash from combustion of municipal sewage sludge. *Materials* 2020; 13: 487.