

不同类型纤维加固的硫铝酸钙水泥基混凝土的工程性能评估

路易吉·卡塔内奥, 萨拉·阿弗劳萨贝特

所属单位: 意大利建筑环境部

摘要: 硫铝酸钙 (CSA) 水泥与普通波特兰水泥 (OPC) 相比, 由于其二氧化碳排放量较低, 最近获得了越来越多的关注。本文评估了不同类型的纤维对不同水灰比 (0.35 和 0.28) 的 CSA 基混凝土工程特性的影响。在这项研究中, 金属纤维包括双钩端钢纤维和钩端钢纤维, 以及非金属纤维 (即聚乙烯醇 (PVA) 纤维) 被利用, 纤维含量为 1%。混凝土的机械性能在不同的养护年龄被评估。混凝土混合物的尺寸稳定性也得到了检验。结果表明, 通过在混凝土中引入纤维, 无论纤维类型如何, 混凝土的工程性能都得到了改善。此外, DHE 钢纤维对 CSA 水泥基混凝土的抗折性能有重要影响, 并导致挠度硬化行为。据观察, 纤维特别是 PVA 纤维会导致收缩变形的减少。微观结构测试表明, 棱镜状的埃特灵石是 CSA 水泥基混凝土的主要水化产物。

关键词: 硫铝酸钙水泥; 纤维增强混凝土; 双钩端钢纤维; PVA 纤维; 机械性能; 尺寸稳定性

Evaluation of Engineering Properties of Calcium Sulfoaluminate Cement-based Concretes Reinforced with Different Types of Fibers

Luigi Cattaneo, Sara Afroughsabet

Affiliation: Department of Built Environment, Italy

Abstract: Calcium sulfoaluminate (CSA) cement has recently gained increased attention due to its lower amount of CO₂ emissions, as compared to that of the ordinary Portland cement (OPC). This paper evaluates the impact of different types of fibers on the engineering features of CSA-based concretes at different water-cement ratios of 0.35 and 0.28. In this study, metallic fibers including double hooked-end steel fibers and hooked-end steel fibers, and non-metallic fibers (i.e., polyvinyl alcohol (PVA) fibers) were utilized at fiber content of 1%. The mechanical properties of concretes were assessed at different curing ages. Dimensional stability of the concrete mixes was also examined. The morphology of the fractured specimens was studied by using the SEM method. The results indicate that the engineering properties of concrete were improved by introducing fibers to the concrete, irrespective of fiber type. The results show that DHE steel fiber has an important effect on the flexural performance of CSA cement-based concretes and results in deflection-hardening behavior. It was observed that fibers and particularly PVA fibers cause a decrease in shrinkage deformation. Microstructure tests demonstrate that prismatic ettringite is the main hydration product of CSA cement-based concrete. The SEM observation also confirms that the inclusion of CSA cement in concrete improves the cohesiveness between the fibers and cement matrix.

Keywords: calcium sulfoaluminate cement; fiber-reinforced concrete; double hooked-end steel fibers; PVA fibers; mechanical properties; dimensional stability

引言:

混凝土是世界上最常用的建筑材料之一。随着这些建筑的老化,许多混凝土结构迫切需要有效和持久的修复。例如,在美国,几乎有27%的公路桥梁需要维修或更换。各种先进的材料和技术已经被开发并应用于修复项目中。不幸的是,据估计,多达一半的混凝土修复失败,约3/4的失败是由于缺乏耐久性。在以前的研究中,大多数研究人员专注于提高修复材料的强度或修复材料与混凝土基体之间的粘结强度。然而,随着强度的增加,脆性更加明显,因为它更容易开裂。为了达到民用基础设施的持久修复,混凝土修复材料应具有较高的拉伸延展性,以抑制脆性断裂。

波特兰水泥混凝土被用于不同类型的基础设施,其在全球的巨大消耗量使其成为地球上使用最多的材料。传统的混凝土是一种含有普通波特兰水泥(OPC)、骨料和水的复合材料,其比例分别为12%、80%和8%。OPC不被认为是一种生态友好的材料,因为它的生产导致了整体二氧化碳排放的一个重要部分。使用替代粘合剂,如硫铝酸钙(CSA),水泥可以成为减少二氧化碳排放量的一个有希望的解决方案。CSA水泥是由加州大学伯克利分校的Alexander Klein于20世纪60年代首次开发的。此后,各种CSA水泥于20世纪70年代在中国成功生产,并被归类为"第三水泥系列"。CSA水泥根据其性能有多种应用,这种粘结剂在中国已成功用于生产混凝土管道、桥梁、预制混凝土、防水层、预应力混凝土、喷射混凝土和低温建筑的混凝土。

CSA熟料的主要成分是叶腊石(C_4A_3S),根据原材料的组成,它可能包含一些次要的相,如白云石(C_2S)、硫酸钙($C\bar{S}$)和铝铁矿(C_4AF)。CSA熟料中ye'implite含量的增加会导致早期强度的提高,而belite含量的提高会导致后期强度的提高。一般来说,提高硫酸钙的含量会导致混凝土的强度降低,而它的存在会加速CSA水泥的水化过程。因此,通过在CSA水泥中添加硫酸钙,有望在早期年龄获得更高的强度。然而,应该注意的是,加入超过25%的硫酸钙会由于水泥基体的开裂而导致强度下降。CSA水泥的尺寸稳定性特征受添加到生料中的石膏和无水石膏含量变化的影响很大。石膏($CaSO_4$)含量在18-20%、22-24%和高于25%之间的存在,分别导致了凝固过程中的轻微收缩、最小的尺寸变化和明显的膨胀。水泥基材料在抗拉强度方面是弱材料,因此,混凝土具有脆性行为,裂缝实际上是不可避免的。一旦施加的载荷超过了混凝土的抗拉强度,就会产生不同规模的裂缝。

此外,混凝土的收缩会在早期阶段造成裂缝,随后由于暴露于有害物质而缩短了混凝土结构的使用期限。

在制造具有更多机械特性的复合材料时,引入离散纤维被认为是一种有利的解决方案,因为它可以控制裂缝的扩展。此外,纤维可以通过改善混凝土基体和纤维之间的内聚力来减少干燥收缩变形,这有助于物理抑制收缩,或控制裂缝(纤维在混凝土收缩中最重要的作用)。尽管如此,纤维在混凝土中的效率是不同的,取决于一些重要的因素,如纤维类型、纤维的弹性模量和纤维长宽比。尽管与其他建筑材料相比,混凝土有很多优点,但其脆性会缩短结构的使用寿命。此外,干燥收缩对于大面积的混凝土结构来说是至关重要的,由于裂缝的形成,会降低混凝土的整体强度和耐久性。

本研究的目的是探讨不同纤维对用CSA水泥制造的混凝土工程性能的影响。其他研究人员已经对CSA水泥基混凝土的性能,特别是其水化产物进行了评估。此外,纤维增强混凝土(FRC)作为一种具有增强延展性和耐久性特征的材料被开发出来,其他研究人员对其机械和耐久性能进行了深入研究。据作者所知,以前没有发表过研究不同纤维对CSA水泥基混凝土特性的影响的工作。双钩端钢纤维、钩端钢纤维和聚乙烯醇纤维被利用,纤维含量为1%。在0.35和0.28两种水灰比下制造了8种混凝土混合物。在不同的养护年龄,评估了混凝土混合物的机械性能和尺寸稳定性。这项研究的结果是非常有希望的,表明引入DHE钢纤维可以大幅提高CSA水泥基复合材料的工程性能。

结果和讨论

抗压强度

水灰比为0.35和0.28时,混凝土的抗压强度测试结果表明,通过引入任何类型的纤维,混凝土的抗压强度都有所提高。FRC抗压强度的提高可以归因于纤维控制裂缝扩展的能力,以及减少裂缝发展的速度。据观察,在水灰比为0.35时,试样的抗压强度得到了发展,由于在CSA混合料中加入了纤维,抗压强度从1%增加到13%。还可以看到,与PVA纤维相比,钢纤维在提高混凝土强度方面更为有效。这可能是由于钢纤维具有比PVA纤维更高的弹性模量和抗拉强度,这对控制宏观裂缝的扩展和提高抗压强度非常重要。在混凝土中加入1.0%的HE钢纤维后,56天时的抗压强度最高(即92.9MPa)。Song和Hwang报告了钢纤维对FRC抗压强度的积极影响。据观察,加入1.5%的钢纤维含量,抗压强度提高了15.3%。在水灰比为0.28时制作的混凝土试件的抗压强度也出现了类似的趋势。结果表明,无论纤维类型如何,纤维的引入都会导致FRC抗压强度的增加。这种提高从2%到20%不等,取决于纤维类型和测试年龄。CSA-HE1混合料在56天时达到了97.7兆帕的抗压强度,这在所有混合料中表现得最好。根据水灰比、纤维

含量和试验龄期的不同, 变异系数方面的数据散布范围为2.6%至5.2%。

结果进一步表明, 与水灰比为0.28的混凝土相比, 以较高的水灰比(即0.35)生产的混凝土的强度发展要高。例如, 水灰比为0.35的FRC的平均28天和56天抗压强度比其7天强度高出19%和25%, 而在水灰比为0.28的FRC中, 这一增幅为12%和16%。这可以解释为, 在水灰比为0.28的混凝土中, 可用的自由水被 ye' 消除石消耗得非常快, 以生成 $ettringite$, 而可用于进一步水化和强度增加的水较少。另一方面, 在水灰比为0.35的混凝土中, 进一步的反应发生在较晚的龄期, 从而发展出更高的强度增长。

高性能混凝土在压缩载荷下的破坏模式显示, 普通CSA试样被严重破坏, 其行为几乎是爆炸性的。然而, 纤维的加入极大地改变了混凝土的破坏模式。我们注意到, 在类似的纤维含量下, PVA纤维比DHE钢纤维能更好地抑制混凝土中微裂缝的扩展, 因为它们在每体积混凝土中的纤维数量更多。

劈裂抗拉强度

水灰比为0.35和0.28的不同FRC混合料的劈裂拉伸强度结果显示, 引入纤维, 特别是DHE钢纤维, 可以显著提高混凝土的劈裂拉伸强度。例如, 在水灰比为0.35的情况下, 用1%的DHE钢纤维加固的混凝土拌合物在7天、28天和56天时的劈裂抗拉强度与参考CSA混凝土相比, 分别增加了59%、76%和78%。CSA-HE1混合料的劈裂抗拉强度提高了28%到52%, 而CSA-PVA1混合料与CSA混合料相比, 根据试验龄期的不同, 这一提高幅度从25%到28%。与钢纤维相比, PVA纤维的抗拉强度和弹性模量较低, 而且PVA纤维主要有助于控制微裂缝的产生。因此, PVA纤维对劈裂拉伸强度的影响不能与钢纤维相比。此外, 在目前的研究中使用的DHE钢纤维, 由于锚定机制, 与其他纤维相比, 产生了明显增加的拉力, 这导致了拉伸强度的提高。Noushini等人也调查了不同长度和不同纤维含量的PVA纤维的影响。据报道, 分裂抗拉强度的提高在11%和32.5%之间, 取决于纤维长度和含量。

对于水灰比为0.28的FRC, 观察到与水灰比为0.35的混凝土有类似的趋势。在混凝土中加入纤维会导致劈裂抗拉强度的提高, 而不考虑纤维的类型。可以看出, 一旦采用1%的DHE钢纤维, 就能达到最高的劈裂抗拉强度。例如, 在7天、28天和56天时, 这种混合物的劈裂抗拉强度分别比普通CSA混凝土增加了65%、88%和81%。据观察, CSA-HE1混合料的劈裂抗拉强度增加了51%到63%, 而CSA-PVA1混合料与CSA混合料相比, 根据试验龄期的不同, 增加了19%到24%。根据水灰比、

纤维含量和试验龄期的不同, 劈裂拉伸强度试验结果的变异系数在3.3%至7.4%之间。

结果进一步证明, 与普通CSA混凝土相比, 试样的养护对FRC强度的提高有更大的影响。例如, 水灰比为0.35的FRC的平均28天和56天劈裂拉伸强度比其7天强度高42%和57%。这表明, 由于水泥膨胀, 纤维和水泥基体之间的化学内聚力随着时间的推移而增加, 并因此导致了混凝土分裂抗拉强度的增加。通过降低水灰比, 减少了养护龄期对提高混凝土劈裂抗拉强度的影响。例如, 水灰比为0.28的FRC的28天和56天的平均劈裂抗拉强度比其7天的劈裂抗拉强度高30%和42%。原因是在低水灰比(即0.28)的混凝土中, 自由水在早期被大量消耗, 并在7天时形成较高的强度。因此, 在后期(即28天和56天), 混凝土内部缺乏自由水来进一步进行水泥水化。

弹性模量

水灰比为0.35和0.28的不同FRC混合物的28天弹性模量的结果显示, 金属纤维的加入导致混凝土弹性模量的增加可以忽略不计, 而在混凝土中引入PVA纤维则稍微降低了其弹性模量。含有钢纤维的混凝土弹性模量的提高可以归因于钢纤维对复合材料刚度的影响。弹性模量测试结果的变化系数在1.9%和4.8%之间, 取决于水灰比、纤维含量和测试龄期。Beigi等人研究了纤维类型对自密实混凝土的弹性模量的影响。结果发现, 纤维的引入对混凝土的弹性模量影响不大。他们的结果显示, 与参考混凝土相比, FRC的弹性模量在某些情况下略有下降。这与本研究中获得的结果很一致。

弯曲载荷-MOD曲线

不同纤维增强混凝土在7天、28天和56天的养护龄期的荷载-MOD曲线的结果显示, 无论纤维类型如何, 在所有的养护龄期, 纤维的加入都导致了混凝土最大抗弯载荷的增加。例如, CSA-DHE1、CSA-HE1和CSA-PVA1混合料的抗折强度提高幅度分别为55%至73%、37%至42%和7%至15%, 这取决于测试年龄。可以注意到, 与本研究中考虑的其他FRC相比, 含有1%DHE钢纤维的混凝土表现出最高的抗弯强度。DHE钢纤维的锚定机制、高抗拉强度和高弹性模量是对CSA-DHE1混合料的抗弯强度提高有重要贡献的主要因素。Simões等人证明, 与传统的钢制FRC相比, 用DHE钢纤维加固的混凝土样品在纤维拉出试验中取得了明显更高的峰值荷载, 正因为如此, 混凝土的抗弯强度可以得到大幅提高。结果进一步表明, 混凝土的Load-MOD行为是明显不同的, 这取决于所使用的纤维类型。可以看出, 在CSA混凝土中引入1%的DHE钢纤维导致了混凝土的挠度硬化行为, 而用1%的HE钢纤维加固的混凝土则表现出挠度软化的性能。

结果还表明, CSA-DHE1混合料的最大挠曲载荷匹配的CMOD从1.26毫米到2.11毫米不等, 而CSA-HE1混合料则从0.39毫米到0.72毫米不等, 取决于试验龄期。这可以归因于DHE钢纤维由于其较高的长度、抗拉强度和锚定机制, 有能力抑制混凝土中宏观裂缝的广泛蔓延。相反, HE钢纤维由于其较低的抗拉强度和长度, 在第一条裂缝出现后提高了混凝土的抗弯承载能力, 最高CMOD等于0.72, 并由于广泛的裂缝产生而引起了挠度-软化行为。此外, 研究结果表明, 在混凝土中加入PVA纤维会略微增加抗折载荷, 在第一条裂缝出现后, PVA纤维无法连接大裂缝并阻止裂缝进一步扩展。因此, 抗弯荷载明显降低, CSA-PVA1混合料的承载能力出现了几乎平坦的行为。

一般来说, 对于水灰比为0.28的混凝土混合料, 在水灰比为0.35时, 形成了类似于混凝土抗弯行为的趋势。无论纤维类型如何, 添加纤维都会增加混凝土的抗折强度。例如, CSA-DHE1、CSA-HE1和CSA-PVA1混合料的抗折强度的改善范围分别为86%至92%、47%至56%和10%至20%, 取决于测试年龄。同样, 在CSA-DHE1混合料中实现了挠度硬化行为, 而添加其他种类的纤维则导致了挠度软化行为。结果表明, CSA-DHE1混合料达到了最高的抗弯强度--其56天的抗弯强度为16.9MPa。

尺寸稳定性

水灰比为0.35和0.28的不同纤维增强混凝土在干燥条件下的尺寸稳定性测试结果表明, 在CSA混凝土中加入纤维后, 无论纤维类型如何, 都会引起收缩污点的减少。据观察, HE钢和PVA纤维在第1天完全取消了混凝土的膨胀, 而在含有1%DHE钢纤维的混合料中发生了相当于 $50\mu\text{m/m}$ 的膨胀。CSA-DHE1、CSA-HE1和CSA-PVA1混合料在56天时的收缩应变分别为276、220和 $227\mu\text{m/m}$, 与CSA混合料相比, 减少了9%、27%和25%。HE钢和PVA纤维在抑制混凝土收缩方面的效率较高, 这可以解释为水泥复合材料中的纤维数量较多, 这导致了这些混凝土的体积稳定性。此外, Passuelo等人报告说, PVA纤维可以通过改变混凝土内部的水运动来减少混凝土的自由收缩。

结论

本文评估了不同类型的纤维对CSA水泥基混凝土工程性能的影响。根据实验结果提出了以下结论:

1. 结果表明, 无论纤维类型如何, 添加纤维都会引起混凝土抗压强度的提高。在水灰比为0.35的情况下, FRC的抗压强度的提高从1%到13%不等, 而在水灰比为0.28的情况下, 这种提高从2%到20%不等, 取决于纤维类型和测试年龄。

2. 在CSA水泥基混合料中加入1%的纤维, 特别是DHE钢纤维, 会使FRC的劈裂抗拉强度和弯曲强度增加。在CSA混凝土中引入DHE钢纤维会导致混凝土的挠曲硬化行为, 而用HE钢纤维或PVA纤维加固的混凝土则表现为挠曲软化反应。FRC的后裂缝行为的改善可以解释为DHE钢纤维通过锚定机制抑制了宏观裂缝的发展。

3. 混凝土中加入纤维对FRC的弹性模量没有重要影响。

4. 在CSA水泥基混凝土中引入离散纤维可以减少FRC的收缩变形, 与水灰比和纤维类型无关。CSA-PVA1在不同的混合料中显示出最低的收缩率, 在水灰比为0.35和0.28时, 其最终收缩率分别降低了25%和27%。

参考文献:

- [1]Wang, J.Y.; Chen, Z.Z.; Wu, K. Properties of calcium sulfoaluminate cement made ultra-high-performance concrete: Tensile performance, acoustic emission monitoring of damage evolution and microstructure. *Constr. Build. Mater.* 2019, 208, 767 - 779.
- [2]Celik, K.; Meral, C.; Mancio, M.; Mehta, P.K.; Monteiro, P.J. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Constr. Build. Mater.* 2014, 67, 14 - 19.
- [3]Mehta, P.K.; Monteiro, P.J. *Microstructure, Properties and Materials*; McGraw-Hill Professional: New York, NY, USA, 2006.
- [4]Hanein, T.; Galvez-Martos, J.L.; Bannerman, M.N. Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. *J. Clean. Prod.* 2018, 172, 2278 - 2287.
- [5]Juenger, M.C.G.; Winnefeld, F.; Provis, J.L.; Ideker, J.H. Advances in alternative cementitious binders. *Cem. Concr. Res.* 2011, 41, 1232 - 1243.
- [6]Bye, G.C. *Portland Cement: Composition, Production and Properties*; Thomas Telford: London, UK, 1999; p. 206.
- [7]Zhang, L.; Su, M.; Wang, Y. Development of the use of sulfo- and ferroaluminate cements in China. *Adv. Cem. Res.* 1999, 11, 15 - 21.
- [8]Péra, J.; Ambroise, J. New applications of calcium sulfoaluminate cement. *Cem. Concr. Res.* 2004, 34, 671 - 676.
- [9]Sharp, J.H.; Lawrence, C.D.; Yang, R. Calcium sulfoaluminate cements—low-energy cements, special cements or what? *Adv. Cem. Res.* 1999, 11, 3 - 13.
- [10]Georgin, J.F.; Ambroise, J.; Péra, J.; Reynouard, J.M. Development of self-leveling screed based on calcium sulfoaluminate cement: Modelling of curling due to drying. *Cem. Concr. Compos.* 2008, 30, 769 - 778.