

# 掺有石灰石粉和粉煤灰作为补充胶结材料的自密实轻质混凝土

穆罕默德·里兹瓦, 穆罕默德·哈尼夫, 阿萨德·奥斯曼

所属单位: 巴基斯坦土木与环境工程学院

**摘要:** 本文评估了含有膨胀页岩骨料 (BSA) 的自密实轻质混凝土 (SCLWC) 的力学和结构行为。BSA 是通过在回转窑中使用天然气作为燃料, 将不同大小的页岩颗粒加热到 1200°C 的温度来制造的。粉煤灰 (FA) 和石灰石粉 (LSP) 被用作补充胶结材料 (LSP 和 FA 各替代 10% 的水泥), 以改善所得混凝土的性能。本实验研究的主要参数是抗压强度、弹性模量和微观结构。新鲜状态下的性能 (坍落度流动、V 型隧道、J 型环和 L 型箱) 显示, 与自密实普通重量混凝土 (SCNWC) 相比, SCLWC 的流变行为足够好。SCLWC 的抗压强度下降不多 (2-4%)。轻质骨料倾向于将混凝土行为从延展性转变为脆性, 导致应变能力和弯曲韧性的降低。FA 和 LSP 的加入明显改善了所有龄期的强度和微观结构。该研究对轻质混凝土的结构使用是令人鼓舞的, 它可以降低整体建筑成本。

**关键词:** 自密实; 轻质混凝土; 膨胀骨料; 抗压强度

## Self-Consolidating Lightweight Concrete Incorporating Limestone Powder and Fly Ash as Supplementary Cementing Material

Muhammad Rizwan, Muhammad Hanif, Asad Usman

Affiliation: School of Civil and Environmental Engineering, Pakistan

**Abstract:** This paper assesses the mechanical and structural behavior of self-consolidating lightweight concrete (SCLWC) incorporating bloated shale aggregate (BSA). BSA was manufactured by expanding shale pellets of varying sizes by heating them up to a temperature of 1200 °C using natural gas as fuel in the rotary kiln. Fly ash (FA) and limestone powder (LSP) were used as supplementary cementing materials (10% replacement of cement, each for LSP and FA) for improved properties of the resulting concrete. The main parameters studied in this experimental study were compressive strength, elastic modulus, and microstructure. The fresh-state properties (Slump flow, V-funnel, J-Ring, and L-box) showed adequate rheological behavior of SCLWC in comparison with self-consolidating normal weight concrete (SCNWC). There was meager (2-4%) compressive strength reduction of SCLWC. Lightweight aggregate tended to shift concrete behavior from ductile to brittle, causing reduced strain capacity and flexural toughness. FA and LSP addition significantly improved the strength and microstructure at all ages. The study is encouraging for the structural use of lightweight concrete, which could reduce the overall construction cost.

**Keywords:** Self-consolidating; Lightweight concrete; Bloated aggregate; Compressive strength

### 引言:

轻质混凝土 (LWC) 比普通重量的混凝土更有优势, 因为它减少了荷载, 易于处理, 而且耐久性更好。轻质混凝土已被广泛用于大跨度桥梁和浮动海洋结构。此外, LWC 更好的防火和隔热性能进一步鼓励其在建筑结构中的应用, 如屋顶覆盖物和外墙, 以提高基础设施

的防火安全和隔热性能。LWC 已经使用各种轻质骨料 (LWA) 进行开发, 如膨胀珍珠岩、空心玻璃珠、膨胀粘土和膨胀聚苯乙烯珠。然而, 传统使用的轻质集料在用于水泥基复合材料之前需要通过各种加工步骤, 这不仅增加了它们的生产成本, 而且还释放出与这些过程相关的大量二氧化碳, 这进一步引起了可持续发展的关

注。

尽管轻质混凝土(LWC)的使用可以追溯到公元前3000年,但更重要的轻质混凝土的工作是在过去几十年里进行的。轻质混凝土的使用减少了混凝土的整体重量,从而减少了结构件的尺寸。这可以使大跨度桥梁和高层建筑等结构的成本效益得到提高。除了重量较轻外,轻质混凝土还显示出比普通混凝土更好的抗热性。此外,由于其轻质、多孔的结构,轻质混凝土表现出良好的导热性,易于铺设,而且强度更好。

根据ACI 213R,结构轻质混凝土的单位重量为1350至1900公斤/立方米,最小抗压强度为17兆帕。由天然骨料制成的混凝土,源自坚硬的岩石,其密度为2200至2600公斤/立方米,因为骨料占据了混凝土的主要体积。由于轻质骨料(LWA)的多孔结构,其吸收率非常高,这导致了较低的抗压强度。通过利用不同种类的轻质骨料(LWAs),如膨胀珍珠岩、空心玻璃珠、膨胀粘土和膨胀聚苯乙烯珠来生产LWC。

然而,轻质混凝土的混合设计与传统混凝土不同。使用传统的混合设计将引起材料的离析,以及通过减少骨料的重量来降低强度。为了避免这个问题,轻质混凝土采用了自凝结混凝土(SCC)的混合设计。根据ACI委员会237R-07的规定,SCC是一种有效变形并具有高抗离析能力的混凝土。SCC在其自身重量的作用下流淌,填满可利用的空间,不需要压实。在自流混凝土的生产中,没有一个明确的公认的设计过程,而且可以用各种成分进行生产。每种成分及其特性可能对自密实特性有不同的影响。因此,按照任何给定的SCC方法制备的混合物不一定显示出自密实特性。试用混合料对于做出最终决定是必要的。

自密实轻质混凝土(SCLWC)是一种特殊类型的混凝土,它同时具有轻质混凝土和自密实混凝土(SCC)的优点。因此,对于一个成功的项目,使用轻质混凝土将为各种工程应用提供一个经济的解决方案。使用基于SCC的混合设计方法,可以设计出具有卓越的新鲜和硬化性能的SCLWC混合物。由于SCLWC的特点,它是传统混凝土的一个有吸引力的替代物,因为它具有高的可操作性和显著的重量减少。在任何情况下,对SCLWC的机械和微观结构特性的调查都有限。自凝轻质骨料(SCLC)是一种高流动性的混凝土,具有较高的抗离析性,同时也很轻。然而,可以通过添加超塑化剂或增加浆料含量来实现混凝土的理想流动性,但这也可能导致混凝土的离析。

新鲜混凝土的行为本质上取决于混凝土的可操作性。因此,混凝土必须具有令人满意的新状态特性,这将影响硬化混凝土的特性,包括强度和耐久性。SCLWC的混合设计并不完全遵循LWC或SCC的混合设计;尽管如

此,LWC和SCC的指导方针仍然制约着SCLWC的混合设计。在文献中,现有的SCC的混合设计方法都集中在新的性能上,以达到所需的流动性和自密实能力,而不是抗压强度。因此,SCLWC的强度要求需要特别考虑。

关于自密实轻质混凝土耐久性方面的研究已经完成,结论是SCLWC可以达到足够的流动性,更好的强度和高耐久性。一些研究人员利用不同比例的普通骨料和轻质骨料来生产高强度的自密实轻质混凝土(SCLC)。可以看出,除了使用的骨料类型外,SCNWC和SCLWC的设计没有明显区别。自密实胶凝材料体系反应的变化主要是由于补充胶凝材料(SCMs)的孔隙率、颗粒大小、形状和形态而发生的。使用粉煤灰(FA)和石灰石粉(LSP)等辅助胶结材料被认为是由于可操作性和新鲜及硬化性能而产生的更好的反应。

### 材料和方法

#### 原材料

符合ASTM C-150/C-150M-15标准的普通波特兰水泥(OPC)-I型被选为SCNWC和SCLWC试样的粘合剂。在本研究中,使用了符合ASTMC494的液体超塑化剂(SP)Glenium51,而粉煤灰为F级,表观密度为2.68g/cm<sup>3</sup>。本研究中使用的LSP呈灰色,富含CaCO<sub>3</sub>(97.64%)。在混合之前,要确保两种单片剂都没有结块。使用的细骨料是天然砂,其细模量为2.24。在目前的研究工作中,我们获得了由碎角石组成的正常重量的骨料。粗集料有两种尺寸,即2-8毫米和8-16毫米的颗粒。粗集料的最大尺寸为16毫米,符合ASTM C33标准,比重为2.47(2-8毫米)和2.44(8-16毫米)。碎石灰石被用作SCNWC的粗集料,而膨胀页岩被用作SCLWC的粗集料。沙子的密度、比重和吸水率是根据ASTM C128测定的。FA和LSP的粒度分布(PSD)是通过激光粒度分析完成的,结果显示FA和LSP的D50分别为5.83 μm和14.3 μm。通过X射线粉末衍射分析(XRD)研究了FA、LSP和膨胀页岩的矿物学特性。

#### 混合比例和混合方法

本研究的目的是在使用FA和LSP作为SCM时生产自密实的轻质混凝土;因此,评估了相应的属性,如流变行为、单位重量、抗压强度和由此产生的混凝土的显微结构。此外,为了确定FA和LSP作为SCM的适用性,本文还采用了相应的材料表征技术。SCC的混合组成是按照EFNARC 2005和ACI 237R-07的指导方针设计的。在这项研究中,使用正常重量的粗集料和轻质粗集料以及不同的超塑化剂用量制备了几种试验混凝土混合料。从众多的试验性混凝土混合料中,作者选择了满足自流混凝土工作性要求的合适混合料(即J-环试验、L-Box、V-漏斗试验和坍落度流动试验),生产了四种用于SCNWC和SCLWC的配方。对于所有的配方,水灰比(w/c)保

持不变, 为0.45。

所有的材料都在一个平底搅拌机中混合。首先, 粗骨料被放入搅拌机, 然后是沙子和水泥, 以180转/分(慢速)的速度对各成分进行一分钟的干混。然后, 加入50%的水, 以同样的速度继续搅拌两分钟。然后将SP/增粘剂(VEA)与剩余的水一起加入, 并以360转/分钟的速度继续搅拌三分钟。浇注、养护和测试是按照EN 196-1的规定进行的。混凝土被浇注到钢模中(每个配方在每个测试年龄段都浇注了三个样品)。按照(BSEFNARC 12390-1)的指导方针, 为SCNWC和SCLWC的每个配方浇注直径为150mm×高度为300mm的圆柱体和150×150×750mm<sup>3</sup>的梁。所有四个配方共铸造了48个圆柱体和12个横梁。浇铸好的样品在24小时后脱模, 并放置在固化槽中, 其中含有水, 并控制室温。在测试之前, 样品在水中固化了一段时间。

### 新鲜混凝土测试

#### 一、密度

新鲜混凝土的密度/单位重量是通过测量已知体积的容器的重量来确定的, 该容器完全充满了新鲜混凝土。重量除以体积得出新混凝土的密度。

#### 二、空气含量

新拌自密实混凝土的含气量是按照标准的ASTM C231和EFNARC 12350-7准则来测量的。使用压力法来确定混凝土中的空气含量。

SCC的第三次流动测试 在第一次搅拌SCC后, 按以下顺序进行测试。

- 坍落度流动
- V型隧道
- L型箱
- J型环
- 筛网稳定性测试(抗离析性)

### 硬化混凝土测试

#### 一、密度和吸水率

混凝土样品在28天龄期的密度和吸水率是按照ASTM C642规定的标准进行的。混凝土试样的吸水率是以28天龄期的混凝土试样浸泡在水中前后的重量百分比差来衡量的。

#### 二、抗压强度测试

为了评估替代石灰石粉和粉煤灰的SCNWC和SCLWC的抗压强度, 本文使用SHIMADZU万能试验机(UTM)在每秒0.2兆帕的加载速率下对固化3、7、14和28天的圆柱形试样进行了压缩测试。

#### 三、微观结构

微观结构是通过扫描电子显微镜(SEM)研究的。对于SEM, 本文选择了压缩试验后的SCNWC和SCLWC的样品来研究微观结构、形态和ITZ(界面过渡区)。两

种测试的样品准备都是在实验室里进行的, 将样品放在丙酮中(阻止水化)24小时, 在28天后对圆柱体进行测试。

### 结果

#### 新鲜状态的混凝土性能

SCNWC的新鲜密度随着矿物掺合料即石灰石粉和粉煤灰的加入而增加。含有轻质骨料的混凝土的密度低于含有正常重量粗骨料的混凝土的密度。它随着SCM的增加而略有增加, 但仍在可接受的范围内。SCLWC的密度比SCNWC低30%, 而SCLWC+LSP+FA的密度比对照组少23%。这是由于骨料的多孔性和轻质性造成的。所有四个配方的水灰比(w/c)为0.45, 目标流量为70±2, 其SP需求也低于预期。SCNWC比SCNWC+LSP+FA多需要28.17%的SP, 而SCLWC比SCNWC(即对照组)少需要14.28%的SP。这是由于轻质骨料的多孔结构造成的。SCLWC+LSP+FA比SCLWC多需要33%的SP, 这是因为FA和LSP的表面积很高。

所有的坍落度和T50值都是令人满意的, 在SCNWC和SCLWC的可接受范围内, 即坍落度(650-800毫米)和流动时间(2-5秒)。尽管可以观察到, 当使用轻质骨料时, 坍落度增加, 这可能是由于其圆形和光滑的表面。在流动扩散中, SCNWC+FA+LSP的流量比SCNWC多3%。这是因为添加了FA和LSP, 以及较高的SP含量, 增强了流动性。

同样, V型隧道流量测试的所有数值都在可接受的范围内, 即6-12秒。V型隧道流动时间表示粘度, 它取决于所使用的骨料类型。SCNWC+LSP+FA的V-Funnel流动时间比其他的大, 比控制混合料高7%, 这是由于SCMs的缘故, 而SCLWC的V-Funnel流动比控制混合料低6%, 这是由于骨料的轻质和多孔性质。

L-Box测试结果也在SCNWC和SCLWC的允许范围内, 即0.8-1.0。较低的H2/H1值表明混凝土通过L型箱的能力较差。另外, 骨料的大小也会影响通过能力, 因为骨料卡在钢棒之间会降低通过能力。用轻质骨料替代普通骨料可以提高通过能力, 并且由于其圆形和规则的形状和纹理, 减少了混合料的阻塞倾向。由于轻质颗粒没有互锁性, 使用轻质骨料后, L-Box的流动时间也会减少。控制混合料有很大的高度差, 这可能是由于更高的SP需求。SCLWC的数值比SCNWC少7%, 这可能是由于其多孔性和更好的流动性。

所有四种配方的J-Ring流动和阻塞指数(Bj)都令人满意, 在SCNWC和SCLWC的可接受范围内。J-Ring试验测量的是混凝土通过钢棒的能力。文献表明, 对于SCNWC和SCLWC来说, 坍落度流量和J-Ring值之间的差异应小于或等于50毫米, 以获得更好的通过能力。据观察, J-Ring值随着轻质骨料的使用而增加, 这可能

是由于更好的粘结性和使用恒定的w/c比率,即0.45。SCLWC+LSP+FA的J-Ring流量是最高的,比对照组多出4.10%,这是因为骨料的圆形和骨料的轻质性。

抗离析性/筛子稳定性测试值也很合理,在SCNWC和SCLWC的可容忍范围内,即(5-15%)。所有的SCNWC和SCLWC都显示出良好的抗离析性。SCLWC的筛分稳定性比对照组少10.5%。这是因为骨料的圆形,增加了混凝土的可操作性。

#### 抗压强度

SCLWC在28天时的抗压强度与SCLWC大致相同。对于典型的轻质混凝土,抗压强度随着密度的降低而降低。根据SCNWC和SCLWC的抗压强度随龄期的变化,取三个试样结果的平均值作为代表强度。数据的分散性在平均值的5%以内。

在3天和28天的龄期,SCNWC和SCLWC的抗压强度分别从25到41MPa和23到40MPa。SCLWC和SCNWC的混合设计以相同的抗压强度为目标。如果使用适量的SP、VMA和较低的水粘合剂(w/b),可以得到与普通SCC相同质量的SCLWC。由于用FA和LSP代替了水泥,抗压强度增加。这是由于SCMs的沸石效应和填充剂效应造成的。w/c比在提高28天抗压强度方面起着重要作用。SCLWC的均匀性和单位重量也取决于w/c比率。在含有轻质骨料的混凝土中,SCMs的强度提高更为明显。

#### 微观结构

不同混凝土配方的SEM图像被用来评估孔隙率、ITZ和微观结构的质量。沸石活性增加了水化反应,完善了混凝土的微观结构,这反过来又提高了混凝土的整体性能。掺有FA和LSP的试样显示出二次水合物的形成,这一点从更密实的微观结构中可以看出,从而提高了后期的抗压强度。

#### 结论

为了研究轻质膨胀页岩骨料对自密实混凝土性能的影响,我们进行了一项全面彻底的研究。根据流变学特性、强度和微观结构属性,得出结论:膨胀页岩可用于生产自密实和轻质混凝土,而后续性能可通过添加矿物掺合料如FA和LSP进一步提高。

- SCLWC的抗压强度没有明显下降(2-4%)。轻质集料倾向于将混凝土的行为从延展性转变为脆性。

- 掺入FA和LSP提高了SCNWC和SCLWC的抗压强度。这是因为掺入沸石和填充物的影响。

- 轻质骨料的加入明显改善了SCLWC的可操作性。这是由于LWA的圆形所造成的。与SCNWC相比,SCLWC的坍落度增加(1.39%),而SCLWC的流动时间比SCNWC减少(10%)。

- 加入LWA后,SCLWC的密度降低了35%。由于死

荷载的减少,这种密度的降低可以降低结构的整体成本。

膨胀页岩骨料对生产结构轻质自密实混凝土的适用性以及FA和LSP对改善强度和微观结构的积极作用得到了证实。这在生产自重大大减少的结构方面有重要的应用,由于减少了横截面的构件和较小的地基,这将最终降低建筑物的总成本。然而,由于轻质混凝土固有的脆性,应采用适当的技术,如使用短的不连续纤维。

#### 参考文献:

[1]Kramar D, Bindiganavile V. Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate. *Mater. Struct.* 2011; 44: 735 - 748.

[2]Lu Z, Hanif A, Lu C, et al. A novel lightweight cementitious composite with enhanced thermal insulation and mechanical properties by extrusion technique. *Constr. Build. Mater.* 2018; 163: 446 - 449.

[3]Thomas S, Vadivel M. Innovative Use of Lightweight Fiber Reinforced Concrete as 'Concrete Car Bumper'. *Int. J. Ear. Sci. Eng.* 2016; 9: 538 - 543.

[4]Hanif A, Usman M, Lu Z, et al. Flexural fatigue behavior of thin laminated cementitious composites incorporating cenosphere fillers. *Mater. Des.* 2018; 140: 267 - 277.

[5]Hanif A, Diao S, Lu Z, et al. Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres - Mechanical and thermal insulating properties. *Constr. Build. Mater.* 2016; 116: 422 - 430.

[6]Usman M, Khan AY, Farooq SH, et al. Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. *J. Clean. Prod.* 2018; 190: 679 - 688.

[7]Ahmed W, Khushnood RA, Memon SA, et al. Effective use of sawdust for the production of eco-friendly and thermal-energy efficient normal weight and lightweight concretes with tailored fracture properties. *J. Clean. Prod.* 2018; 184: 1016 - 1027.

[8]Tang P, Brouwers H. The durability and environmental properties of self-compacting concrete incorporating cold bonded lightweight aggregates produced from combined industrial solid wastes. *Constr. Build. Mater.* 2018; 167: 271 - 285.

[9]Hwang CL, Hung MF. Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2005; 1919: 619 - 626.

[10]Wu Z, Zhang Y, Zheng J, et al. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2009; 2323: 2087 - 2092.