

Lightweight Aggregate and Lightweight Aggregate Concrete Development and Application Status

Xingjun Lv, Jie Xu, Jiaye Chen, Shijie Zhang, Yuming Liu, Lixin Lu, Xiaojian Wang

School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian
Email: lvxingjun@163.com

Received: Jan. 18th, 2013; revised: Feb. 26th, 2013; accepted: Mar. 4th, 2013

Copyright © 2013 Xingjun Lv et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Lightweight aggregate concrete due to its unique performance advantage, has developed very rapidly in recent years. This paper introduces the development and application situation of artificial lightweight aggregate, analyzes lightweight aggregate concrete performance advantages and the existing problems, and prospects the future development of the lightweight aggregate concrete.

Keywords: Lightweight Aggregate Concrete; Features; Existing Problem; Apply; Development

人造轻骨料及轻骨料混凝土的发展与应用现状

吕兴军, 徐杰, 陈家辉, 张世界, 刘宇明, 卢立鑫, 王潇健

大连理工大学建设工程学部, 大连
Email: lvxingjun@163.com

收稿日期: 2013年1月18日; 修回日期: 2013年2月26日; 录用日期: 2013年3月4日

摘要: 轻骨料混凝土由于其特有的性能优势, 近年来发展迅速。本文介绍了人造轻骨料的发展与应用现状, 对轻骨料混凝土的性能优势和存在的问题方面进行了分析, 并展望了轻骨料混凝土未来的发展。

关键词: 轻骨料混凝土; 性能优势; 存在问题; 应用; 发展

1. 引言

轻骨料又称轻集料, 按材料来源可分为工业废料轻骨料, 天然轻骨料及人造轻骨料。由于工业废料轻骨料和天然轻骨料有很大的局限性, 如天然轻骨料质地不均匀, 强度不达标等, 故在实际工程中主要使用人造轻骨料^[1]。

人造轻骨料又称陶粒(砂), 是使用粘土、粉煤灰等材料, 经过制粒, 养护或者烧结而成的轻质骨料。按照制备轻骨料的材料不同, 可以把人造轻骨料分为7类, 见表1。

人造轻骨料最早在美国开始生产, S. J. Hayde 于

Table 1. The types and characteristics of artificial lightweight aggregate

表 1. 人造轻骨料的种类及特性

序号	分类	特性
1	粉煤灰陶粒	性能较好、环保、可以自然养护
2	黏土陶粒	性能好、质量均匀、原料缺
3	页岩陶粒	强度高
4	垃圾陶粒	原料充足、成本低、制备能耗少
5	煤矸石陶粒	利废、环保、强度高
6	生物污泥陶粒	利废、环保
7	河底泥陶粒	利废、性能接近黏土陶粒

1917年取得了利用回转窑烧制人造轻骨料的专利,1928年美国将此方法用批量生产人造轻骨料,欧洲各国纷纷效仿,人造轻骨料的生产和二战后逐渐开始流行,美国和前苏联发展最快。人造轻骨料在生产初期,大部分应用于结构保温材料使用,很少用于承重结构。但在20世纪50年代前后,由于人造轻骨料技术的革新,这种情况得到很大的改善,使用人造轻骨料配制的混凝土被广泛用于大跨度单层工业房屋的薄盖,以及工业民用的各种预制现浇建筑物。20世纪八十年代左右,美国人造轻骨料技术已经渐渐成熟,开始用于配制强度在30 MPa以上的混凝土,并将其应用于民用建筑以及桥梁等工程,建造了大量的建筑物,如美国著名的休斯顿贝壳广场大厦、芝加哥的波因特湖塔式建筑等^[2]。

我国对于人造轻骨料的研究起步较晚,二十世纪中期,山东博山利用水泥回转窑,生产了我国第一批粘土陶粒,揭开了人造轻骨料在我国发展的序幕。20世纪60年代初在河南平顶山,建成了第一座轻骨料混凝土大桥,即洛河大桥。但由于历史原因,直到20世纪70年代末,我国轻骨料才开始快速发展。但与国外人造轻骨料技术相比,还有一定的差距,我国现在市场出售的人造轻骨料基本是600~900级的普通陶粒,存在质量差异大,吸水率大、筒压强度不高等缺点,大部分应用于房屋建筑外墙板和砌块的生产,所配置的轻骨料混凝土强度在20~25 MPa,且表观密度较高,使得其使用和发展受到了一定的限制。随着陶粒生产技术的发展,高强、高性能陶粒的出现,给轻骨料混凝土的发展和应用带来了新契机,越来越多的轻骨料混凝土在工程中得到了应用。

2. 轻骨料混凝土的应用现状

随着我国经济的飞速发展,各类工程项目建设如火如荼,轻骨料混凝土以其优异的性能、良好的经济性,在桥梁建设、超高层建筑、海洋平台的建设中得到了广泛的应用。

2.1. 桥梁工程

Stolma 大桥完工于1998年,位于挪威,是目前世界上应用轻骨料混凝土建设的桥梁中跨度最大的桥梁。*Stolma* 大桥的跨径为94 m + 301 m + 72 m,总长为467 m。其主跨中间长度为184 m,采用了密度

为1931 kg/m³的LC60轻骨料混凝土。其余部分采用了C65普通混凝土。该桥工程总造价约1.625亿美元。

Raftsunder 大桥完工于1998年,位于挪威,大桥的跨径为86 m + 20 m + 298 m + 125 m,总长为711 m。其主跨中间224 m采用了密度为1931 kg/m³的LC60轻骨料混凝土,同样,桥梁其余部分采用了C65的普通混凝土。*Raftsunder* 大桥的工程造价约12.5亿NOK^[3]。

永定新河大桥引桥完工于2000年,是我国轻骨料混凝土应用最为成功的一个典型范例,该桥是位于唐津高速公路上,跨径为55 m + 110 m + 22 m,总长为1565.5 m。其中,引桥采用预应力轻骨料连续梁桥,南引桥结构为(3 × 35) m + (4 × 35) m + (30 + 3 × 35) m,北引桥结构为3 m × (4 × 35) m + (5 × 35) m。其南北引桥工程的上部结构中应用了密度等级为1900 Kg/m³为LC40的轻骨料混凝土。并由于轻骨料混凝土的使用,降低工程造价700余万元人民币。

蔡甸汉江大桥2001年通车,位于京珠国道主干线、武汉外环公路的重要桥梁,总长为1607 m。由于竖向预应力钢筋超过原设计桥面高度,进而导致无法直接铺设沥青层,其桥面便采用了接近1200 m³的轻骨料混凝土。并达到了减轻桥梁自身重量600 t以上,节约资金达400万元。

2.2. 高层建筑

珠海国际会议中心^[4]完工于2000年,位于珠海市,建筑面积约11万平方米,属于框剪结构体系,主楼地下1层,地上24层。为满足其建筑功能的两项变更的要求,在9层以上的轴线范围内采用轻骨料混凝土,有效地减轻了结构自重,共使用了约1115 m³轻骨料混凝土。节省资金20多万元,缩短施工周期半年以上。

宜昌滨江国际大厦完工于2006年,位于湖北武汉,总高101.1 m,大屋面高度93.6 m,总建筑面积为36197.9 m²。采用轻骨料混凝土陶粒混凝土建造,共用LC40轻骨料混凝土2990 m³,LC35轻骨料混凝土3650 m³,有效解决了地基的承载力问题,获得较大经济效益。

武汉市证券大厦位于武汉市新华路,共68层,楼高336米。主体结构为钢结构,楼板采用C30普通混凝土,为满足施工时业主的变更要求,从60层开

始使用干容重不超过 1900 kg/m^3 的 LC35 的轻骨料混凝土,有效节约了成本,发挥了轻骨料混凝土的优良性能。

2.3. 海洋平台

众所周知,随着陆地资源开发的陆续开展,陆地资源已经得到了较大地开发,很多资源已经濒临枯竭,人们都把未来的眼光大都放在了海洋资源的开发与应用上,而海洋资源的开发,首当其冲面临的问题,便是如何在海洋中建立一个能进行资源开发的平台。所以,适合海洋中应用的混凝土的研究便应运而生。

由于海洋中混凝土处于远比陆地更为恶劣的环境^[5],而轻骨料高强混凝土由于本身重量轻、强度高,在抗冻、抗渗、耐蚀、抗疲劳等性能方面都优于普通混凝土,因而它在港口、码头等海工建筑中能更好的发挥优势,也广泛应用于海洋平台的建设。

3. 轻骨料混凝土的性能优势

3.1. 密度低、比强度高

根据国标“轻骨料混凝土技术规程 JGJ 51-2002”规定^[6],轻骨料混凝土用轻粗骨料、轻砂或普通砂、水泥和水(也可能添加外加剂)配制而成,其干表观密度不大于 1950 kg/m^3 。对于 LC40 以上强度的高强轻骨料混凝土来说,密度大多介于 $1500\sim 1950 \text{ kg/m}^3$ 之间;普通混凝土的密度则在 2450 kg/m^3 左右。相比之下同体积轻骨料混凝土比普通混凝土轻了 $20\%\sim 40\%$ 。而高强轻骨料混凝土的强度以及工作性足以达到工程要求,也就是使用相同强度的轻骨料混凝土代替普通混凝土可以大幅度降低结构自重,减轻地基压力,提高建筑面积,节省施工费用。

3.2. 抗震性好

我们知道,地震力与建筑上部结构的自重成正比关系。由于轻骨料混凝土密度较低,故自重较轻,地震力也会相应降低。而轻骨料混凝土的弹性模量又比普通混凝土低,结构自振周期变长,变形能力较大,消耗了更多的能量以用于形变。例如 1976 年唐山地震,天津的四栋轻骨料混凝土建筑基本完好,周围其他的建筑都遭到不同程度的破坏,这有力证明了轻骨料混凝土具有高抗震性的特点^[7]。

3.3. 耐久性好

轻骨料混凝土具有较高耐久性,这体现在低渗透性、高抗冻性和无碱骨料反应。较低的水灰比、较密实的骨料周围界面以及无温度微裂缝等原因使得轻骨料混凝土具有较低的渗透性。当轻骨料混凝土处于低温条件下,只有当骨料颗粒处于完全饱和状态时,骨料才会成为冻结膨胀破坏的对象;而轻骨料具有多孔性,这意味着很难会出现这种破坏的情况。轻骨料的多孔性^[8]还可以缓解碱骨料反应所带来的应力,从而使轻骨料结构免遭破坏,所以在轻骨料混凝土近百年的应用历史中,从未有过受碱骨料反应而破坏的事例。

3.4. 热物理性能好

轻骨料混凝土的线膨胀系数通常低于普通混凝土,这也意味着在温度影响下出现卷曲和弯曲的可能性较低。轻骨料混凝土是多孔性材料,导热系数低,热阻大,有较好的耐热性。高温作用下温度由外向里的传播速率低,可在一定程度上保护钢筋。所以轻骨料混凝土结构的保温、耐火和耐高温等特性远强于普通混凝土。有数据表明,当建筑物发生火灾时,普通混凝土结构的耐火时间约为 1 h,而轻骨料混凝土结构的耐火时间可达 $3\sim 4 \text{ h}$ 。在 700°C 高温下^[9],轻骨料混凝土能保持室温时强度的 80% 以上,而普通混凝土只能保持不足 70%,甚至低于 40%。

3.5. 生态环保

普通混凝土的骨料基本都要依靠开山挖石取得,这如今已导致大量山林良田被毁。而人造轻骨料是配制轻骨料混凝土的主要原料。人造轻骨料可由工业和生活废弃物如煤矸石、粉煤灰、生活垃圾等煅烧制成。大量使用人造轻骨料配置混凝土取代普通混凝土,可以大大减少人们对自然资源的开采,还可以变废为宝,使得混凝土产业绿色化。尤其是在大力倡导可持续发展战略的大背景下,轻骨料混凝土的生态优势更为明显。

4. 轻骨料混凝土的几个关键问题

4.1. 轻骨料混凝土的强度问题

轻骨料混凝土的强度一直是制约轻骨料混凝土发展的主要因素。在较低密度下提高轻骨料混凝土的

强度是当务之急。影响轻骨料混凝土强度的因素有很多,包括轻骨料强度、掺合料用量等。

首先是骨料问题,在特定轻骨料应用条件下,混凝土的抗压强度存在一个峰值。这个强度峰值主要取决于轻骨料的筒压强度^[10],因此提高轻骨料本身强度是关键。目前我国轻骨料生产技术与国外先进水平相比还有一定差距,轻骨料产品的主要性能还不够理想。

其次,掺合料对轻骨料混凝土强度也有较大的影响,文献[11]中,作者做了以内蒙古东部区的天然浮石为粗骨料,通过在轻骨料混凝土中掺入粉煤灰0%、15%、20%、30%、45%、60%的试验,将其3d、7d、14d、21d、28d、90d的抗压强度进行对比,得到对于天然浮石轻骨料混凝土,20%为最佳粉煤灰掺量。

另外还有很多其他办法可以提高轻骨料混凝土强度。比如文献[12]中,作者研究发现当采用真空预湿法、浸水预湿法对轻骨料进行预湿后,对提高轻骨料混凝土后期强度有利。

如上所述,尽管国内外很多文献已经提出了提高轻骨料混凝土强度的方法,但是都具有片面性,不能对所有的问题都适用。

4.2. 轻骨料混凝土的骨料上浮问题

由于轻骨料的密度等级一般在200~1000 kg/m³之间,也就是比水的密度还低,所以轻骨料和水在混凝土成型初期上浮,而密度较大的水泥浆则下沉。这就导致了轻骨料混凝土质量分布的不均匀以及骨料分布的不均匀性。使轻骨料混凝土产生分层,严重影响混凝土的工作性能和耐久性。对比同批混凝土7d和28d的强度说明,轻骨料的上浮对硬化混凝土早期强度影响不大,但对后期强度影响较大^[13]。

为解决轻骨料混凝土中的骨料上浮问题,文献[14]中作者通过对轻骨料上浮物理机理的分析,从拌制成型工艺上研究并提出了轻骨料混凝土搅拌成型工艺的投料顺序。一定程度上改善了骨料上浮的问题。文献[15]中作者研究了几种外加剂对轻骨料混凝土均质性的影响,结果表明掺加引气剂和聚丙烯酰胺对于解决骨料上浮问题都有较好的效果。

4.3. 轻骨料混凝土的收缩和徐变问题

收缩和徐变是轻骨料混凝土应用需解决的主要

问题之一。轻骨料混凝土的徐变是指其在恒定荷载作用下,其应变随时间而持续增长的特性。轻骨料混凝土的收缩与徐变主要与其胶凝材料用量、水胶比、及轻骨料的弹性模量有关。一般认为轻骨料混凝土的收缩比普通混凝土大,徐变系数比普通混凝土小。在文献[16]中,作者通过大量的实验发现,高含水率的轻骨料混凝土收缩在早期小于普通混凝土,在后期超过普通混凝土,最终收缩大于普通混凝土。轻骨料混凝土的徐变值一般比普通混凝土高,但由于轻骨料混凝土较低的弹性模量,所以其徐变系数比普通混凝土的低。同时,有研究表明^[17],水灰比在0.32~0.43的LC60~LC90的高强轻骨料混凝土的弹性模量比同强度普通混凝土的低20%~30%。在固定荷载作用下,弹性模量越低,混凝土产生的应变值越大,所以轻骨料混凝土的变形值比普通混凝土的大。

过大的收缩变形往往会造成结构物的开裂。特别是在桥梁结构中一般都采用预应力,轻骨料混凝土的收缩徐变会造成预应力损失,将会对桥梁结构产生比较大的影响^[18]。

文献[19]研究发现高强轻骨料混凝土的收缩随轻骨料含水率和绝干密度的增大、胶凝材料用量的减少而减小。采用混合骨料(高、低吸水性轻骨料混合或轻骨料与普通密度粗骨料混合)、添加膨胀剂,将有助于减小高强轻骨料混凝土的收缩。

文献[20]作者研究了陶粒品种对轻骨料混凝土变形性能的影响,陶粒强度是影响混凝土弹性模量的重要因素,在轻骨料混凝土表观密度、水灰比相同的条件下,陶粒强度越高,混凝土弹性模量越大。所以提高陶粒强度也有助于改善轻骨料混凝土的收缩和徐变问题。

尽管在理论上对于轻骨料混凝土的收缩徐变性质进行了大量研究,但是在实际工程中,轻骨料混凝土的收缩和徐变问题对工程的影响仍然一直存在。此问题还需进一步探讨。

5. 轻骨料混凝土的发展展望

轻骨料混凝土与普通混凝土相比优势明显,但是在我国的应用目前仍主要集中在制备非承重的混凝土制品,比如轻骨料混凝土砌块、墙板等;应用于承重结构的还比较少,要使轻骨料混凝土满足我国建筑业的需要,扩大应用范围,还需要在以下几方面进行

深入研究:

第一, 提高人造轻骨料质量。虽然我国人造轻骨料的生产相比以前有了较大的进步, 但是由于我国人造轻骨料企业总体来说规模较小, 生产工艺陈旧, 质量不稳定。制造的轻骨料性能不均匀, 大部分都是普通轻骨料, 高性能轻骨料较少, 并且造价与普通骨料相比要高出几倍甚至十几倍。单从混凝土单方造价上考虑, 相比普通混凝土造价较高。只有扩大人造轻骨料生产, 提高生产技术, 研究以及引进国外先进生产线, 提高质量、降低造价, 才能使得轻骨料混凝土满足建筑的需要。

第二, 轻骨料混凝土标准的制定。轻骨料混凝土在我国的应用于发展已经经历了几十年, 我国对于轻骨料混凝土的标准还是 1998 年制定的标准, 相关技术以及标准都已经不能满足指导的要求。高强、高性能陶粒的出现, 2002 年制定的轻骨料混凝土技术规程已经不能满足轻骨料混凝土配合比的设计。故对于轻骨料以及轻骨料混凝土相关的标准以及技术规程的制定, 也是需要我国科研工作人员研究的一个重要问题。

由于轻骨料混凝土性能优越, 与普通混凝土相比拥有更多的发展空间, 将会逐渐普及用于高层、保温及耐火性要求高的建筑、大跨桥梁等大型建筑。但是要在在工程中大量应用轻骨料混凝土尚需我国工程技术人员进行更多的试验与研究, 只有在大家共同努力下, 轻骨料混凝土的应用将会逐步增加。

参考文献 (References)

[1] 李寿德, 陈烈芳, 宋淑敏. 我国人造轻骨料及轻骨料混凝土

的现状与发展概况[J]. 砖瓦, 2006, 2: 48-51.

- [2] 徐锦平, 陈建华, 周绍豪. 轻骨料混凝土的应用研究及展望[J]. 国外建材科技, 2007, 5: 11-13.
- [3] 冯江, 童代伟, 郝增恒, 秦小平, 陈平. 轻集料混凝土在桥梁工程中的应用及效益分析[J]. 公路交通技术, 2006, 3: 74-77.
- [4] 周云, 张雄, 张永娟. 轻集料混凝土的研究和应用[J]. 上海建材, 2008, 2: 22-24.
- [5] 邝静喆, 韩纯苇, 黎英, 祁景玉. 轻质高性能海洋混凝土的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2002, 2: 43-44.
- [6] JGJ 51-2002. 轻骨料混凝土技术规程[S]. 2003.
- [7] 胡曙光, 王发洲. 轻集料混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [8] A·M·内维尔. 混凝土的性能[M] (第四版). 刘数华, 冷发光, 李新宇, 陈霞译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 龚洛书, 柳春圃. 轻集料混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [10] H. J. Chen, T. Yen, T. P. Lia and Y. L. Huan g. Determination of the dividing strength and its relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 29-37.
- [11] 王萧萧, 申向东. 不同掺量粉煤灰轻骨料混凝土的强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 1: 69-73, 78.
- [12] 尚培东, 董祥. 轻骨料施工预处理方法对高强轻骨料混凝土各龄期强度影响的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2011, 3: 201-204.
- [13] 王志伟, 吴国友, 李秋义. 轻集料混凝土中轻集料上浮的试验研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2007, 2: 70-73.
- [14] 王艳, 欧阳青, 王鹏. 轻骨料砼搅拌成型工艺试验研究[J]. 公路与汽运, 2010, 1: 90-91, 122.
- [15] 刘丽芳. 轻集料混凝土匀质性的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006.
- [16] 孙海林, 叶列平, 丁建彤, 郭玉顺. 高强轻骨料混凝土收缩和徐变试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 6: 765-767, 780.
- [17] 孙海林, 丁建彤, 叶列平. 高强轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 2002 年全国桥梁学术会议论文集[C]. 2002: 7.
- [18] 张效良, 穆金虎. 预应力轻骨料混凝土收缩徐变引起应力损失的计算方法[J]. 太原工学院学报, 1981, 3: 1-11.
- [19] 宋培晶, 丁建彤, 郭玉顺. 高强轻骨料混凝土的收缩及其影响因素的研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 2: 138-144.
- [20] 刘立, 赵顺增, 杨亚晋, 曹淑萍, 吴勇. 陶粒品种对轻骨料混凝土变形性能的影响研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2009, 4: 38-41, 56.