

文章编号: 0451—0712(2006)08—0176—04

中图分类号: U414. 18

文献标识码: B

高性能轻骨料混凝土在桥梁工程中应用的研究进展

刘数华, 阎培渝

(清华大学土木工程系建筑材料研究所 北京市 100084)

摘 要: 阐述了高性能轻骨料混凝土在桥梁工程中应用的研究现状, 总结高性能轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用的优点。分析高性能轻骨料混凝土面临的主要问题, 针对这些问题, 提出一些解决方法。并对高性能轻骨料混凝土在桥梁工程中应用的经济性做简单分析。最后展望以后的研究重点。

关键词: 轻骨料混凝土; 高性能混凝土; 桥梁工程; 研究进展

1 轻骨料混凝土简介

用轻粗骨料、轻砂(或普通砂)、水泥和水等配制而成的干表观密度不大于 $1\,850\text{ kg/m}^3$ 的混凝土称为轻骨料混凝土(Light Weight Aggregate Concrete, LWAC)。其中由轻砂作细骨料配置而成的轻骨料混凝土为全轻混凝土, 由普通砂或部分轻砂作细骨料配置而成的轻骨料混凝土为砂轻混凝土。

轻骨料混凝土按用途可分为 3 大类: (1) 保温轻骨料混凝土, 主要用于保温的围护结构或热工构筑物; (2) 结构保温轻骨料混凝土, 主要用于既承重又保温的围护结构; (3) 结构轻骨料混凝土, 主要用于承重构件或构筑物。

很明显, 能应用于桥梁结构构件中的是结构轻骨料混凝土。各国对结构轻骨料混凝土的定义有所不同。如美国混凝土协会规范(ACI213—87)对结构轻骨料混凝土定义为: 28 d 圆柱体抗压强度不小于 17.24 MPa 、干表观密度不大于 $1\,850\text{ kg/m}^3$ 、全部或部分采用轻骨料配制而成的轻骨料混凝土。而在 ACI 318—95 中规定, 依据 ASTM C567 的测试方法, 干表观密度不超过 $1\,840\text{ kg/m}^3$ [1]。

2 高性能轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用

目前, 高性能轻骨料混凝土(High Performance Light Weight Aggregate Concrete, HPLWAC)也

逐步应用于桥梁工程中。

20 世纪 50 年代, 美国开始建造轻骨料混凝土桥。Chesapeake 海湾桥于 1952 年建成, 全长 $6\,500\text{ m}$ 。其中主桥悬索桥的桥面, 采用轻骨料混凝土。至 1986 年, 美国已建轻骨料混凝土桥梁有 400 余座。

近年有更大的发展, 高性能轻骨料混凝土用于钢与混凝土组合结构的桥面, 中等跨径的 T 梁与箱梁, 大跨径连续梁与连续刚构及斜拉桥的梁体。在欧洲国家, 1979 年德国建成科隆莱茵河桥, 主跨 185 m 、中部 62 m 采用高性能轻骨料混凝土。法国 Ottmarshrim 桥, 主跨 172 m 、中部 100 m 采用高性能轻骨料混凝土。荷兰 1968 年~1982 年间建成 12 座轻骨料混凝土桥, 其中主跨 $112\sim 157\text{ m}$ 桥, 上部结构全部采用轻骨料混凝土。挪威以生产莱卡陶粒闻名, 1999 年建成世界跨径最大的预应力混凝土连续刚构桥。Raftsundstd 桥主跨 298 m 、中部 224 m 采用高性能轻骨料混凝土。Stolma 桥主跨 301 m 、中部 184 m 采用高性能轻骨料混凝土。

我国在 20 世纪 50 年代开始研究建造轻骨料混凝土桥, 但技术发展缓慢。1960 年河南省平顶山市用粘土陶粒混凝土建成港河拱桥, 跨径 50 m 。其后, 南京长江大桥、黄河桥等部分桥面, 采用轻骨料混凝土。1965 年~1968 年间, 上海地区用轻骨料混凝土修建中小桥 30 余座, 最大跨径仅为 23 m , 混凝土强

度低于 C30, 材料与技术水平和国外相比有较大差距。20 世纪 90 年代我国轻骨料混凝土技术有所发展。2000 年建成的天津永定新河桥, 引桥长 1 500 m, 跨径为 35 m, 全部采用轻骨料混凝土。这是我国应用新材料、新技术建筑现代轻骨料混凝土桥梁的开端。

3 高性能轻骨料混凝土的性能优点

由于普通混凝土存在着自重大、保温隔热性能差等缺点, 从而影响了它在某些工程中的应用。随着建筑技术的发展, 建筑物趋向高层化和大型化, 因此, 减轻高层建筑和大跨度构件的自重, 增加结构的保温隔热性能, 提高建筑物抗震性能已显得十分重要, 这些都促进了轻骨料的发展^[2]。

目前世界轻骨料年产量在 1.5 亿 m^3 以上, 其中约 3/4 为人造骨料, 天然轻骨料仅占 1/4。天然轻骨料的种类主要有浮石、火山渣等, 人造轻骨料的种类主要有页岩陶粒、粘土陶粒、粉煤灰陶粒、煤矸石陶粒、膨胀矿渣、膨胀板岩、膨胀蛭石和膨胀珍珠岩等。用轻粗骨料、轻细骨料(或普通砂)、水泥和水配制成的混凝土, 其干表观密度不大于 $1\,900\text{ kg/m}^3$ 的称为轻骨料混凝土。轻骨料混凝土与普通混凝土不同之处在于骨料中存在着大量的孔隙, 由于这些孔隙的存在, 赋予它许多优越的性能。

(1) 轻骨料中孔隙的存在降低了骨料的颗粒表观密度, 从而降低了轻骨料混凝土的表观密度, 其容重一般为 $800\sim 1\,900\text{ kg/m}^3$, 作承重结构用的轻骨料混凝土的容重约为 $1\,400\sim 1\,900\text{ kg/m}^3$, 比普通混凝土约小 20%~30%。

(2) 虽然多孔轻骨料的强度低于普通骨料, 但是由于轻骨料的孔隙在拌和料搅拌时具有吸水作用, 造成轻骨料颗粒表面的局部低水灰比, 增加了骨料表面附近水泥石的密实性。同时, 因轻骨料表面粗糙且具有微孔, 提高了轻骨料与水泥石的粘结力。这样, 在骨料周围形成了坚硬的水泥石外壳, 约束了骨料的横向变形, 使得骨料在混凝土中处于三向受力状态, 从而提高了骨料的极限强度。轻骨料混凝土的强度与普通混凝土相接近, 这是轻骨料混凝土轻质高强的原因。

(3) 轻骨料混凝土强度一般可达 15~50 级, 最高可达 70 级。在国外已经获得 28 d 强度达到 55.5 MPa, 而容重只有 $1\,660\text{ kg/m}^3$ 的结构轻骨料混凝土。1976 年意大利弗瑞利地区发生地震烈度为

9.0 级地震, 该地区 4 种墙体结构的房屋遭到不同程度的严重毁坏: 石材墙体结构建筑(古建筑)全部毁坏; 砖混结构建筑(1920 年建造)40%以上毁坏; 框架建筑(1945 年建造)20%以上毁坏; 只有浮石混凝土小砌块墙体建筑(1966 年修建)遭到损坏为 5%。当然, 4 种墙体结构建筑遭到毁坏和损坏的情况, 也与墙体采取的抗震结构措施有关, 但从这里可以看出, 轻骨料混凝土小砌块建筑由于自重轻, 其抗震性能优于砖混结构建筑。1976 年唐山大地震时京津地区几十栋使用轻骨料混凝土的工业与民用建筑基本上完好无损, 周围的砖混结构房屋则遭受严重破坏或倒塌, 不少工厂砖砌烟囱震裂倒塌, 北京高井电站 120 m 高的陶粒混凝土烟囱则完好无损。

(4) 多孔轻骨料内部的孔隙, 还使其导热系数低、保温性能好, 容重为 $800\sim 1\,400\text{ kg/m}^3$ 的轻骨料混凝土是一种性能良好的墙体材料, 其导热系数为 $0.23\sim 0.52\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 与普通粘土砖相比, 不仅强度高, 整体性好, 而且保温性能良好。用它制作墙体时, 在同等的保温要求下, 可使墙体的厚度减少 40%以上, 而墙体自重可减轻一半以上。

(5) 轻骨料混凝土由于导热系数低, 耐火性能好, 在高温作用下, 可保护钢筋不遭受破坏。对于同一耐火等级, 轻骨料钢筋混凝土板的厚度可以比普通混凝土减薄 20%以上。

(6) 轻骨料混凝土还具有生产工艺简单、施工适用性强和技术经济效益高等优越性, 是一种很有前途的新型建筑材料。

而高性能轻骨料混凝土相对于普通高强混凝土应用于桥梁工程的优点主要体现在如下 4 个方面。

(1) 轻质高强: 目前研究成果表明, LWAC 能达到大跨度预应力混凝土桥梁要求的 CL50、CL60 强度等级, 而此时密度可保持在 $1\,800\sim 1\,900\text{ kg/m}^3$, 自重可以比普通混凝土低 20%~30%。当 HPLWAC 用于建造桥梁的上部结构时, 这种轻质特性带来的效益将是非常显著的。表现为: ①使桥梁的跨度增大, 减少桥墩的数量; ②需要较少的预应力钢筋、普通钢筋; ③提高桥梁的活荷载承载能力; ④在不增加恒载的前提下, 可以提高截面的高度; ⑤降低基础处理的费用, 尤其在沿海软土基础上, 由于基础处理费用相对较高, 节省的幅度将更大; ⑥降低原材料和构件的运输和安装费用。

(2) 抗震性能好: 地震作用和上部结构的自重成正比, 当桥梁结构采用 HPLWAC 后, 由于整个结构

体系自重的下降,将降低水平地震作用。同时,由于 HPLWAC 的弹性模量较低,桥梁结构的自振周期将变长,变形能力增强,梁体破坏时将能消耗更多的变形能。因此,HPLWAC 结构的抗震性能较好。

(3) 抗裂性能较好:同普通混凝土相比,HPLWAC 的热膨胀系数和弹性模量较小,使得由于冷缩和干缩作用引起的拉应力相对较小,表现为 HPLWAC 构件的抗裂性较好。这对改善桥梁的耐久性,延长桥梁使用寿命是非常有利的,并有助于降低桥梁建成运营后的维护费用。

(4) 耐久性好:使用轻骨料能有效避免混凝土的碱骨料反应问题,并具有较强的抗渗性、抗冻性,使得桥梁的使用寿命得以延长。同时由于 LWAC 中的骨料—基体间材性相差较小(对比于普通骨料混凝土),即具有较强的弹性相容性,可以避免由于应力集中而引起的微裂缝的产生。另外,LWAC 中粗骨料与水泥浆体间界面接触区性能优于普通混凝土,轻骨料与浆体间的抗拉强度甚至大于轻骨料自身的抗拉强度。并由于轻骨料具有一定的吸水性,其保持的水分有利于水泥的后期水化作用(即 LWAC 的内部自养护),从而增强 LWAC 的耐久性,避免较小微裂缝的产生,提高其抗渗性。

HPLWAC 具有很多性能优点,被广泛应用于国外桥梁建设中,而我国却发展较迟缓。可能一方面由于相关的技术标准没有建立起来,设计工程师们缺乏可供利用的理论依据;另一方面,对高强轻骨料混凝土应用于桥梁结构中缺乏准确客观的认识,对轻骨料混凝土的性能存在顾虑。

4 高性能轻骨料混凝土的主要问题

目前轻骨料混凝土配制过程中主要存在如下问题:(1)为降低轻骨料的吸水率、改善新拌轻骨料混凝土的工作性,普遍在其表面涂蜡、聚苯乙烯乳液等防水材料或施工前预湿轻骨料,这些做法降低了轻骨料混凝土的力学性能或降低其抗冻耐久性,并使生产制作变得复杂;(2)在大的初始坍落度时,轻骨料易上浮离析,采用振捣施工时尤为突出,使硬化后混凝土的均质性差、耐久性下降,并降低其力学性能;(3)提高水泥掺量虽能改善新拌混凝土的工作性,但增大了轻骨料混凝土的收缩裂缝和温度裂缝引起的危害,降低混凝土的耐久性,同时又增加工程造价。因此,工程结构迫切需要制作简单、工作性好、能免振捣自密实施工、硬化后质量好、体积稳定性

好、高耐久、经济的高性能轻骨料混凝土^[3]。

4.1 高品质轻骨料的研究开发

目前,我国已能配制 C30 以上的轻骨料混凝土。在天津、北京、上海等地强度为 C30 的粉煤灰陶粒、粘土陶粒混凝土已用于预应力空心板和屋面板。这些陶粒的堆积密度一般为 $700 \sim 800 \text{ kg/m}^3$,筒压强度为 $3.0 \sim 4.0 \text{ MPa}$,C30 轻骨料混凝土的密度一般都在 1800 kg/m^3 左右。实践表明:天然轻骨料表面多孔、颗粒强度较低,用它研制的 C30 轻骨料混凝土,水泥用量高达 500 kg/m^3 左右,技术经济上不合理。只有轻质、高强、优质的陶粒才能满足轻骨料混凝土在承重结构上应用日益广泛的需要^[4]。

4.2 轻骨料混凝土拌和物中离析问题

轻骨料混凝土在振捣过程中骨料的上浮是制约其在工程中的应用的主要问题之一,尤其是泵送施工的高强轻骨料混凝土,流动性大,对其在振捣过程中的抗离析的研究很重要。轻骨料本身的表面特性对新拌混合物的分层度影响很明显:表面较光滑或呈球形的陶粒抗离析性较差,表面多孔而粗糙或呈碎石形的陶粒抗离析性较好。粗骨料的绝对体积越大,混凝土拌和物的分层度也越大^[5]。因此,如何提高轻骨料混凝土的抗离析性也是一个值得研究的重大课题。

4.3 轻骨料混凝土的泵送问题

轻骨料混凝土易分层离析,坍落度损失快以及轻骨料在压力作用下会吸收混凝土中的水分而导致堵泵等问题,是妨碍轻骨料混凝土可泵性的关键问题。

由于目前尚没有合适的轻骨料混凝土可泵性试验评价办法,最初的轻骨料混凝土泵送试验是采用在搅拌站内用生产设备拌制,在厂内模拟生产,用 37 m 泵车做泵送试验。选取了泵送及施工性能优良的 5 组轻骨料泵送混凝土的配合比,作为施工配比用于试点工程,结果是施工过程中仍然经常发生堵泵^[6]。究其原因,可能为:(1)大批量生产轻骨料混凝土时,由于轻骨料很难做到含水率始终一致或达到饱和;(2)轻骨料混凝土及其试验办法中的吸水性测试办法不能反映实际施工中轻骨料的吸水特性,这是因为实际施工中,轻骨料处于含水状态,这与标准测试时绝干初始状态下的吸水特性不同,轻骨料在泵压作用下会进一步吸水导致混凝土拌和物状态恶化,影响混凝土的可泵性;(3)施工中不可能频频通过试泵来确定混凝土拌和物的可泵性。

提高轻骨料混凝土的可泵性可从以下 3 方面

入手。

(1)轻骨料的优选是配制良好可泵性轻骨料混凝土的必不可少的重要环节,试配过程中应同时考虑成本等因素。

(2)超大掺量粉煤灰、硅粉等掺合料,以增大胶凝材料用量,增加混凝土拌和物的粘聚性,改善混凝土拌和物流动性和保水性,并能在一定程度上防止轻骨料上浮。

(3)选择合适的混凝土外加剂。可尝试采用各种增黏剂与高浓度高效减水剂以及缓凝保坍等组分进行复配。

4.4 轻骨料混凝土的强度问题

轻骨料混凝土具有轻质、高强、隔热、抗震、耐火等优异技术性能,在高层建筑、防火结构、抗震结构、大跨度屋面、桥梁、隧洞、浮式结构和海洋工程等领域有着广泛的应用前景。对高强轻骨料混凝土的研究目前主要停留在高强的研究阶段,但却是未来发展的必然趋势。

在轻骨料混凝土的配合比设计时,总的拌和用水量=有效用水量+附加用水量,并用有效用水量计算有效水灰比,由有效水灰比判定混凝土的强度^[7]。该方法存在以下问题:(1)在水泥浆体凝结硬化过程中,附加用水量是一个动态的变量,并因施工条件不同而不同,无法计算;(2)有效水灰比的有关理论建立的基础是重骨料,其吸水率小于1.8%;(3)轻骨料弹性模量小、吸水率大,有效水灰比越小,混凝土试块的强度越高,但在受约束状态下产生收缩缝的趋势越大,这对轻骨料混凝土的耐久性有很大危害。

在道路、桥梁工程中,抗折强度极其重要。粗骨料级配对混凝土的抗折强度影响很大,合理的级配可大大提高抗折性能^[8]。因此,如何得到这个合理级配甚为重要。

4.5 轻骨料混凝土的裂缝及耐久性问题

轻骨料由于其孔隙率较大,吸水率也较大,轻骨料混凝土拌和物在凝结硬化过程中可能会出现较大面积的塑性裂缝^[9],其干缩值也较大。因此,如何抑制这些收缩带来的裂缝以及提高其耐久性也很重要。

5 问题解决的对策

5.1 矿物掺合料

粉煤灰和磨细矿渣的复合掺入能显著提高高性能轻骨料混凝土的强度、抗渗及抗冻性能。在不掺入

引气剂的情况下,轻骨料混凝土的抗冻性达F200以上。轻骨料混凝土的扫描电镜照片表明:粉煤灰和磨细矿渣的综合效应,使火山灰反应更加充分, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低,轻骨料与水泥石的界面过渡区得到强化,混凝土结构更加密实,其抗渗、抗冻性能得到进一步提高^[10]。

5.2 纤维

在轻骨料混凝土中掺入钢纤维,可以有效地提高基体混凝土的抗拉强度、抗折强度及抗裂强度;虽然钢纤维的加入对抗压强度的提高没有太大帮助,但加入钢纤维后,混凝土的延性大大提高。因此,试件在破坏时吸收了较多的能量,钢纤维轻骨料混凝土的抗压韧性有很大改善;钢纤维轻骨料混凝土的弹性模量比普通混凝土低,这虽然意味着发生变形的可能性略大,在地震情况下却不容易遭受外力破坏。

钢纤维最大的问题是锈蚀。采用聚丙烯纤维、玻璃纤维等其他纤维对轻骨料混凝土性能的影响如何值得研究。

5.3 外加剂

外加剂被认为是混凝土的第五元素,在混凝土中掺入外加剂能在很大程度上提高混凝土的各方面性能。因此,外加剂对轻骨料混凝土性能的影响如何值得研究。

6 经济性评价

采用轻骨料混凝土可以降低建筑物的自重30%~40%,减少劳动强度20%,减少材料运输量0~40%,降低了工程造价,特别适用于高层建筑,仅楼板一项就可降低建筑物自重15%~16%,用于屋面可使屋面自重降到150~200 kg/m²,并节省钢材10%左右,其综合经济效益十分显著。

7 展望

针对以上提出的一些问题。我们认为还应在以下4个方面继续深入地做一些研究工作:

(1)轻骨料自身的水化特性;

(2)轻骨料混凝土高强及超高强问题;

(3)提高轻骨料混凝土的抗折强度、韧性、抗裂性、耐磨性;

(4)轻骨料混凝土的耐久性及其拌和物的引气问题,在有抗冻性要求的地方,引气剂在拌和物中的引气效果,特别是振捣过程对轻骨料混凝土引气效果的影响。

文章编号：0451—0712(2006)08—0180—05

中图分类号：U414. 16

文献标识码：B

含泥量对 HAS 稳定粒料强度和干缩特性的影响

薛永杰，冯柳羽，侯浩波

(武汉大学资源与环境科学学院 武汉市 430072)

摘 要：无机胶凝材料稳定粒料作为基层材料的干缩特性是影响其长期使用性能的重要因素之一。通过室内击实与干缩试验，研究 HAS 稳定粒料中的含泥量对其强度以及干缩特性的影响规律。采用回归分析方法，获得干缩应变和平均干缩系数与失水率的关系；同时采用灰色关联分析方法，论证了含泥量对 HAS 稳定粒料干缩特性(最大干缩应变和最大平均干缩系数)的重要影响。分析结果可为道路 HAS 固化剂稳定粒料基层设计和施工提供参考数据。

关键词：HAS 稳定粒料；含泥量；干缩特性；灰关联

无机结合料稳定粒料基层是目前应用范围最广的高等级公路路基结构形式之一。作为一种半刚性材料，其干缩特性是影响其长期使用性能的重要因素之一。这主要是因为混合料内部的水分不断减少的同时发生了水化作用、吸附作用、分子间力的作用、材料矿物晶体或胶凝体间层间水的作用和碳化收缩作用等引起的半刚性材料体积收缩造成的^[1]。而材料的干缩程度或干缩性(最大干缩应变和平均干缩系数)的大小与被稳定粒料中的含泥量也就是粒料中含有塑性指数大于 17 的细粒土或中粒土的含量有很大关系。粒料中存在塑性指数较大的细粒土或中粒土时，会对稳定粒料的最终干缩性能产生非常不利的影响。一般，粒料中含泥量越

大，混合料的最终干缩应变或平均干缩系数就越大，无机结合料稳定粒料基层收缩开裂的可能性就越大。

本文通过室内击实试验、强度试验与干缩试验，以一种灰渣胶凝材料——HAS 土壤固化剂来稳定粒料，利用 HAS 土壤固化剂在常温下固化含泥石屑而无需冲洗和筛分的优点，研究了 HAS 稳定粒料中的含泥量对其强度和干缩特性的影响规律，采用了回归与灰色关联分析方法进行了论证。同时将试验结果与路基工程中常用的水泥稳定粒料的相应指标进行比较分析，探讨了 HAS 稳定粒料作为基层材料特别是作为稳定高含泥量粒料，其在抗干缩开裂方面的优越性。

收稿日期：2006—03—16

参考文献

[1] 任志刚,王发洲. 高强轻骨料混凝土大跨径桥梁结构设计参数分析[J]. 国外建材科技,26(3).

[2] 吴茂华,刘龙江. 轻骨料混凝土的抗震性能[J]. 砖瓦, 2003,(11).

[3] 黄智山,巴恒静. 大坍落度高性能轻骨料混凝土的研究[J]. 新型建筑材料,2002,(2).

[4] 吴丽芳,钱慧丽,刘娟红. 高强粉煤灰轻骨料的研制[J]. 粉煤灰综合利用,2002,(5).

[5] 李渝军,丁建彤. 泵送高强轻骨料混凝土的抗离析性能[J]. 混凝土,2005,(3).

[6] 王龙志,林开成,张海霞,杨勇. 轻骨料混凝土泵送技

术的研究与应用[J]. 新型建筑材料,2004,(12).

[7] 黄智山,巴恒静. 大坍落度高性能轻骨料混凝土的研究[J]. 新型建筑材料,2002,(2).

[8] 邓初道. 粗骨料级配对道路混凝土抗折强度的影响[J]. 山西建筑,2005,(8).

[9] 孙大明,等. 粗骨料对轻骨料混凝土塑性收缩裂缝的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2004,(8).

[10] 刘娟红,宋少民. 粉煤灰和磨细矿渣对高强轻骨料混凝土抗渗及抗冻性能的影响[J]. 硅酸盐学报,33(4).

[11] 陈莹,曾志兴. 钢纤维轻骨料混凝土的强度和变形性能[J]. 华侨大学学报(自然科学版),24(4).