

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1981

No. 16

轻骨料混凝土在保温墙板中的应用

Use of Lightweight Aggregate Concrete in
Insulating Concrete Panels

中国建筑科学研究院

CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

提 要

本文以大量的试验研究资料论述了解决轻骨料混凝土墙体结露及改善保温性能两种技术途径,阐明了对全轻混凝土及陶粒无砂混凝土原材料和配合比设计的技术要求,提出了减少水泥用量及改善和易性的有效措施,并对全轻混凝土的热物理性能及其碳化性能进行了较系统的试验研究。

同时,还介绍了浮石全轻混凝土、页岩陶粒炉下灰全轻混凝土、粉煤灰陶粒全轻混凝土外墙板在大庆、沈阳、唐山等地以及粉煤灰陶粒无砂混凝土复合外墙板在天津、西安等地的工业与民用住宅建筑中试点的概况和经验。

轻骨料混凝土专题协作组的主要参加单位

中国建筑科学研究院混凝土研究所

辽宁省建筑科学研究所

天津市建筑科学研究所

大庆油田管理局科学研究设计院

黑龙江省低温建筑科学研究所

陕西省建筑科学研究所

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

山东省建筑科学研究所

Use of Lightweight Aggregate Concrete in Insulating Concrete Panels

Kung Lo-shu Shi Xing-sheng Su Man-qing Chen Yu-mei

Abstract

This paper discusses two approaches to the solution of condensation and insulation of lightweight aggregate concrete wall on the basis of a large number of experimental data, illustrates the technical requirements of raw materials and mix designs of all-lightweight concrete and no-fines concrete, puts forward effective measures for reducing cement content and improving workability, and gives an account of the systematic experiments on the thermal characteristics and carbonation properties of lightweight aggregate concrete.

The paper also outlines the construction of and experience gained from the pilot projects of industrial and residential buildings built with prefabricated exterior panels made from pumice all-lightweight concrete, expanded shalebottom-ash concrete and sintered pulverized fuel-ash concrete in Daqing, Shen rang and Tangshan, as well as those built with composite exterior panels made from sintered pulverized fuel-ash no-fines concrete in Tien jin and Shian.

目 录

一、问题的提出	(1)
二、两种技术途径	(1)
三、全轻混凝土的保温性能	(11)
四、碱化与钢筋锈蚀	(13)
五、技术经济效果简析	(17)
六、结论	(18)

轻骨料混凝土在保温墙板中的应用

轻骨料混凝土专题协作组

(龚洛书 施杏生 苏曼青 陈玉梅执笔)

一、问题的提出

为了减轻墙体自重,保证墙体的保温性能,国外用于墙体的轻骨料混凝土容重一般为 $1000\sim 1400$ 公斤/米³,容重小于 1000 公斤/米³的超轻混凝土的应用也越来越多。在我国,用于墙体的轻骨料混凝土的容重大都是 $1600\sim 1800$ 公斤/米³,容重大、导热系数高,其保温性能与普通砖墙相近。因此,轻骨料混凝土的优越性不能充分发挥出来。

据调查,在我国华北、东北地区长期以来使用以普通砂作细骨料的砂轻混凝土外墙板。在北京,这种外墙板的厚度为 28 厘米;在沈阳为 30 厘米;其总热阻都比当地的 37 砖墙小,因而保温性能差,特别是刚竣工 $1\sim 2$ 年内,混凝土墙体的含水率较大(可达 $15\sim 20\%$ 左右),导热系数显著增加,热阻降低,冬季结露,特别是墙角和山墙更为严重,直接影响轻骨料混凝土外墙板的推广使用。

本专题的目的就是要根据国家建工总局建筑科技发展计划的要求,探讨降低轻骨料混凝土容重、改善保温性能的措施,特别对其保温性能、碳化及其钢筋锈蚀问题,作进一步研究。并在工程上试点,以利今后的推广和应用。

二、两种技术途径

为改善墙体的保温性能,使混凝土的容重小于 1400 公斤/米³,导热系数小于 0.45 千卡/米·时·度,本协作组主要采用轻砂制作全轻混凝土外墙板和陶粒无砂混凝土制作复合外墙板两种技术途径。

现将有关技术关键问题分述如下:

(一) 采用轻砂制作全轻混凝土外墙板

1. 对原材料的技术要求

要配制容重小于 1400 公斤/米³、标号不小于 100 号的全轻混凝土,首先必须选择适宜的粗细骨料。根据就地取材的原则,协作组选用的粗骨料主要有粉煤灰陶粒、页岩陶粒及浮石,细骨料主要有膨胀珍珠岩砂、炉下灰及浮石砂。其主要技术性能指标列于表1。

所选用的粗骨料除应满足“轻骨料及轻骨料混凝土技术规定和试验方法”J 78-2(暂行规定)(以下简称“技术规定”)及有关标准的要求外,最关键的是粗细骨料的松散容重必须控制在一定范围内。试验证明,粗骨料的松散容重最好小于 700 公斤/米³,采用 500 公斤/米³左右的超轻骨料,其技术效果将更优越。

大庆科研设计院的试验说明,采用浮石砂作细骨料是浮石综合利用的好办法。但浮石砂的松散容重大,所以,还必须掺入一定量的膨胀珍珠岩砂(约占用砂量的 70%),才能使混凝土的容重满足小于 1400 公斤/米³的要求。

序 号	试 验 单 位	粗细骨料名称和产地	松散容重 (公斤/米 ³)	颗粒容重 (公斤/米 ³)	筒压强度 (公斤/厘米 ²)	吸水率 (%)
1	大庆科研设计院	克东浮石	626~730	1450	14.5	14.0 (24小时)
2	辽宁省建研所	本溪页岩陶粒	650	1428	47.7	3.7
3	混凝土研究所	天津粉煤灰陶粒	715	1250	45.5	16.5
4	混凝土研究所	北京煤矸石陶粒	515	900	13.5	7.5
5	大庆科研设计院	克东浮石砂	1120	—	15.0	14 (24小时)
6	辽宁省建研所	辽宁电厂炉下灰	890	1500	—	11.7
7	混凝土研究所	肇东膨胀珍珠岩砂	580	1000	—	30.5
8	混凝土研究所	肇东膨胀珍珠岩砂	299	538	—	66.0
9	混凝土研究所	豆店膨胀珍珠岩砂	85	—	—	150~200
10	大庆科研设计院	大庆膨胀珍珠岩砂	120	—	—	400.0

辽宁建研所的试验表明,采用电厂的炉下灰(实际上是较粗的煤灰,其细度模量为2.67)是利用工业废料作细骨料的好途径,不仅价格低廉(运至沈阳预制厂约8元/米³),且其技术性能也可满足使用要求。虽然炉下灰的松散容重较大,用它配制成的全轻混凝土的容重也较大(约1485公斤/米³),但由于炉下灰含有70%以上玻璃质的或中空的玻璃质小颗粒,所以其混凝土的导热系数较小(约0.36千卡/米·时·度),完全可满足使用要求。

用膨胀珍珠岩砂作细骨料,可大幅度降低全轻混凝土的容重。混凝土研究所的试验证明,膨胀珍珠岩砂越轻,配制全轻混凝土所需的粗细骨料总体积(V_{Q+S})越大,材料用量越大,致使全轻混凝土的造价也相应提高。因此,膨胀珍珠岩砂的松散容重不宜太小。但对膨胀珍珠岩来说,松散容重越小,膨胀倍数越大,劳动生产率越高、成本越低。试验证明,用200级至800级的膨胀珍珠岩砂配制全轻混凝土是较合理的,可获较好的技术经济效果。

2. 全轻混凝土配合比的设计

全轻混凝土配合比的设计按“技术规定”提出的松散体积法进行,有的单位还按正交设计进行优选。

由于全轻混凝土所采用的轻砂品种和松散容重有很大不同,所以,为配制容重小于1400公斤/米³、标号为100号的全轻混凝土,配合比设计中所选用的砂率(S_p)和粗细骨料总体积(V_{Q+S})也有所不同。一般说来,轻砂容重越小,所需砂率越大,粗细骨料总体积也越大(表2)。

全轻混凝土配合比指标比较

表 2

序 号	试 验 单 位	混凝土品种	轻 砂		砂率 S_p (%)	粗细骨料 总体积 V_{Q+S} (米 ³)	水泥用量 (公斤/米 ³)	性 能 指 标	
			品 种	γ_s				R_{28} (公 斤/厘米 ²)	$\gamma_{干}$ (公 斤/米 ³)
1	辽宁建研所	页岩陶粒混凝土	炉下灰	890	40	1.4~1.5	300	146	1485
2	大庆科研设计院	浮石混凝土	浮石砂	1120	43	1.60~1.65	300	125	1270
3	混凝土研究所	粉煤灰陶粒混凝土	珍珠岩砂	120	38	1.65	300	134	1180
4	同上	同上	同上	85	35	1.49	273	162	1189
5	同上	同上	同上	299	35	1.44	273	169	1260
6	同上	煤矸石陶粒混凝土	同上	580	32	1.65	300	119	933

注:各配合比的净水泥灰比为0.5~0.6。

辽宁建研所采用松散容重为 890 公斤/米³ 的炉下灰作细骨料, 在水泥用量为 300 公斤/米³ 时, 其合理砂率为 40%, $V_{Q+S}=1.4\sim 1.5\text{米}^3$, 与“技术规定”的要求基本相符。

但当采用膨胀珍珠岩砂作细骨料时, 由于其容重变化大, 压缩比相差也较大, 相应的粗细骨料总体积变化也较大。混凝土研究所的试验说明, 当采用松散容重为 600 级的膨胀珍珠岩砂时, 合理的 $S_p=35\%$, $V_{Q+S}=1.44\text{米}^3$; 当采用 300 级的膨胀珍珠岩砂时, 合理的 $S_p=35\%$, $V_{Q+S}=1.49\text{米}^3$; 当采用 100 级的膨胀珍珠岩砂时, 合理的 $S_p=38\%$, $V_{Q+S}=1.65\text{米}^3$ (图 1)。

这个试验结果与大庆科研设计院采用部分膨胀珍珠岩砂作细骨料时所用的 V_{Q+S} 是相近的。

由于所采用的粗骨料的粒型不同, 其所需的合理砂率也有所不同。从表 2 可看出, 表面多孔的碎石型的浮石, 其砂率约为 42%; 而圆球型的粉煤灰陶粒作粗骨料时, 较合理的砂率为 35~38%。

试验说明, 全轻混凝土和普通混凝土一样, 其强度变化的规律, 仍然符合水灰比法则。因此, 在施工中严格控制用水量是十分重要的。混凝土研究所将全轻混凝土强度 (R_{11}) 与灰水比 (C/W) 的试验结果进行回归分析得出的结果如表 3 所示。

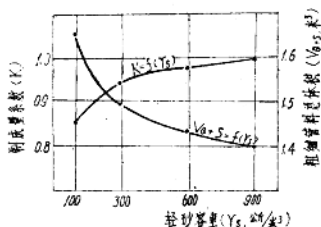


图 1 制成量系数和粗、细骨料总体积与轻砂容重的关系

全轻混凝土强度公式比较

表 3

粗 骨 料			细 骨 料		强 度 公 式	相关系数
品 种	γ_s	R_1	品 种	γ_s 等级		
粉煤灰陶粒	715	45.5	膨胀珍珠岩砂	100	$R_{25} = 28.62 \frac{C}{W} + 47.9$	0.708
煤矸石陶粒	515	13.5	同上	100	$R_{25} = 42.2 \frac{C}{W} + 22.5$	0.860

由表 3 可看出: 全轻混凝土和普通混凝土不一样, 由于轻骨料品种不同, 松散容重及筒压强度差异很大, 再加上颗粒级配、骨料吸水率等的影响, 要用一个简单的公式来统一地表达其强度与水灰比的变化规律是困难的。这个问题还有待进一步研究解决。

3. 节约水泥、改善混凝土和易性的措施

由于轻骨料表面粗糙多孔, 特别是在采用轻砂作细骨料时, 其水泥用量一般比同标号砂轻混凝土或普通混凝土高, 且混凝土拌合物的和易性也较差。为进一步节约水泥用量, 改善混凝土的和易性, 在配制全轻混凝土时, 主要采用如下两种措施:

(1) 掺入粉煤灰

黑龙江省低温所、辽宁省建研所、混凝土研究所的试验都说明, 在全轻混凝土拌合物中掺入一定量的粉煤灰, 可显著改善其和易性, 还可达到节约水泥的目的。掺入磨细粉煤灰可比原状灰收到更好的效果。

混凝土研究所的资料说明, 为节约一定量的水泥, 必须掺入过量的粉煤灰, 以弥补少用水泥的强度损失。如按表 2 的配合比, 每立方米水泥用量从 300 公斤降至 270 公斤, 即降低 10%, 则应掺入占水泥用量 20% 的粉煤灰。唐山试点工程说明, 采取这个措施, 仍可使粉煤灰陶粒全轻混凝土的容重和标号满足设计要求。

辽宁建研所的试验也说明,页岩陶粒炉下灰混凝土的水泥用量从300公斤/米³降至240公斤/米³(降低20%),再掺入100公斤的粉煤灰(其掺量为水泥用量的33%),混凝土的标号仍可达到100号。

(2) 掺入外加剂

掺入减水剂可改善全轻混凝土拌合物的和易性,并可节约水泥用量,特别是对泌水较严重的浮石和炉下灰混凝土效果更好。

混凝土研究所的试验说明,在粉煤灰陶粒全轻混凝土拌合物中,掺入占水泥用量0.2~0.25%的木钙减水剂可改善混凝土拌合物的和易性,或在和易性不变的条件下,减少用水量10%时,可使混凝土的强度提高10%左右。其效果与在普通混凝土中使用相似。

辽宁建研所采用维生素C的下脚料及纸浆废液制成的复合外加剂(其用量分别占水泥用量的3%和0.6%),掺入页岩陶粒炉下灰混凝土或全炉下灰混凝土拌合物中,可显著改善混凝土拌合物的和易性,并提高混凝土的密实性和抗压强度,且可提高全轻混凝土的抗碳化性能。

应该指出的是,在全轻混凝土拌合物中加入外加剂时,为充分发挥其效果,应首先将其溶于附加水中,待拌合物加水搅拌后,再加入外加剂水溶液,继续搅拌至均匀为止。

4. 主要物理力学性能

全轻混凝土的主要物理力学性能按“技术规定”的试验方法进行测定。

试验说明,按所选定的配合比,各协作单位所配制的全轻混凝土的各项物理力学性能指标基本上可满足设计及“技术规定”的要求。

现将主要试验结果列于表4。

全轻混凝土的主要物理力学性能

表4

序号	试验单位	混凝土品种	γ_s (公斤/米 ³)	R_{28} (公斤/厘米 ²)	R'_L (公斤/厘米 ²)	R_k (公斤/厘米 ²)	$E \times 10^4$ (公斤/厘米 ²)	$\lambda_{干}$ (千卡/米·时·度)	抗冻性25次强度损失(%)	收缩 毫米/米
1	辽宁省建研所	页岩陶粒炉下灰混凝土	1485	146	15.2	138	10.60	0.360	5.5	0.448
2	大庆科研设计院	浮石全轻混凝土	1270	125	12.7	142	10.60	0.408	11.2	—
3	混凝土研究所	粉煤灰陶粒珍珠岩砂混凝土	1180	134	9.6	116	8.27	0.310	6.7 (M50)	0.643 (360天)
4	同上	同上	1189	162	12.3	166	9.10	0.316	35次合格	—
5	同上	同上	1260	169	15.6	171	10.80	0.335	16.6 (M50)	—
6	同上	煤矸石陶粒珍珠岩砂混凝土	993	119	7.2	101	5.44	0.250	6.7 (M50)	0.640 (360天)

从表4的资料可看出,由于所采用的轻骨料品种不同,全轻混凝土的主要物理力学性能也相应变化在一定范围内。显然,起决定性作用的是轻骨料的松散容重。

如上所述,配制全轻混凝土的轻粗骨料的松散容重最好小于700公斤/米³(见表1)。事实上,为配制全轻混凝土,轻粗骨料的容重越小越好。混凝土研究所采用北京建材所试制成功的煤矸石陶粒($\gamma_s=515$ 公斤/米³)可配制 R_{28} 大于100公斤/厘米²、容重小于1000公斤/米³的全轻混凝土,各项性能指标也都较好。可以说,这些指标已接近国外先进水平。

从表4的资料说明,轻砂的品种及松散容重对全轻混凝土的容重及其导热系数有显著影响。当采用容重较大的轻砂时,混凝土的容重及导热系数都显著增加。但在目前条件下利用

工业废料炉下灰及浮石砂与膨胀珍珠岩砂作细骨料,混凝土性能指标都可满足使用要求,从经济观点看,也是合理的,应大力推广。

混凝土研究所用不同松散容重的膨胀珍珠岩砂配制成的全轻混凝土,当其容重等级超过300级时,混凝土容重和导热系数增加较多,而当用100级的膨胀珍珠岩砂时,除水泥用量较大,砂率较高外,某些力学指标也是较差的(如 R_L/R_{L1} 仅为0.06)。由此再一次说明,采用200~300级的膨胀珍珠岩砂是较合理的。

另外必须说明的是,全轻混凝土具有一定的抗碳化能力,在正常使用条件下,钢筋无须作特殊的防锈处理,其耐久性完全可以得到保证,此问题后面有专门论述。

5. 试点工程概况

为了检验全轻混凝土的施工性能及其使用性能,上面三种全轻混凝土分别在本地区进行了工程试点,现概述如下:

(1) 概况

大庆地处寒冷地区,60年代末以来,大庆油田科研设计院等单位就开始利用二克山的浮石配制混凝土,以解决油田建设建筑材料严重不足问题。十几年来,随着油田基本建设的发展,浮石混凝土已广泛用于井口房、计量站、热电站等工业建筑。1973年开始,又逐步研制和采用浮石砂及膨胀珍珠岩砂作细骨料,制作浮石全轻混凝土外墙板。近两年来,根据本专题计划的要求,进一步总结经验,对浮石全轻混凝土的物理力学性能进行了较系统的试验研究,并在民用住宅及工业墙板上大量应用,收到了较显著的技术经济效果,为加速油田建设起了积极作用。现在正拟将浮石轻混凝土用于装配式民用住宅大板建筑的定型设计,计划每年推广这种住宅建筑1.5~2.0万平米。

利用工业废料炉下灰是解决当前轻砂品种少、供应不足的一种好办法,用它配制成的页岩陶粒全轻混凝土在工程上试点,由于混凝土拌合物和易性良好,深受工人的欢迎。现在,沈阳市正在进一步解决轻粗骨料的生产和供应问题,待此问题解决后,用这种炉下灰作细骨料的全轻混凝土,将得到进一步推广。

根据原重建唐山计划,拟在唐山建年产20万 m^3 的粉煤灰陶粒厂及年产10万 m^3 的膨胀珍珠岩砂厂各一座,所以,粉煤灰陶粒珍珠岩砂全轻混凝土外墙板试点工程选择在唐山,但因

全轻混凝土试点工程概况

表5

序号	混凝土品种	工程地点	结构类型	外墙板主尺寸(长×高×厚)	建筑面积(万 m^2)
1	浮石全轻混凝土	大庆	装配式民用住宅 大板建筑及工业 外墙板	民用墙板 3.3×2.9×0.32米 工业墙板 8.0×1.2×0.25米	16.0
2	同上	哈尔滨 齐齐哈尔 牡丹江	同上	同上	3.35
3	页岩陶粒炉下灰 混凝土	沈阳市三好街小区	装配式民用住宅 大板建筑	3.3×2.9×0.3米	0.75
4	粉煤灰陶粒珍珠 岩砂混凝土	唐山市邵家庄小区	整体预应力装配 式板柱结构	4.48×2.43×0.22米	0.55

种种原因,这两座工厂至今尚未兴建。试点工程所用粉煤灰陶粒及膨胀珍珠岩砂只好从天津购入,因此造价较高。但由于墙体自重轻,保温性能好,墙体厚度薄,使成本高的问题得到了缓和。另外,其抗震性能较好,对于强震区的唐山市来说,采用全轻混凝土作外墙板是有其特殊的作用的。

(2) 生产中的几个问题

全轻混凝土外墙板的生产工艺简单,施工方便,不需特殊设备,一般可利用预制构件厂的现有设备进行生产。但根据全轻混凝土拌合物重量较轻的特点,必须采用强制式搅拌机进行搅拌。各单位在试点工程中所采用的生产工艺的有关参数列于表6。

全轻混凝土外墙板生产工艺简况

表6

序号	混凝土品种	原材料处理	搅 拌 工 序			成型方式	养护方法及其制度
			设 备	投料顺序	搅拌时间		
1	浮石全轻混凝土	不预湿	强制式搅拌机 容积1500升	1/3水→粗、细骨料→水泥→2/3水	2~3分	平模流水工艺插入式振动成型,水泥砂浆抹面、压光	隧道窑干热养护,静停6小时,恒温12小时,最高温度80°C
2	页岩陶粒炉下灰混凝土	不预湿	强制式搅拌机 容积750升	粗、细骨料→水泥→水	3分	平模流水工艺插入式振动成型,静停1.5小时后进行抹面处理	折线窑干热养护,养护制度为3+3+8+10小时,最高温度80~90°C
3	粉煤灰陶粒珍珠岩砂混凝土	陶粒预湿	强制式搅拌机 容积375升	粗、细骨料、水泥一次投料→水	1~2分	平模台座工艺,静停后抹面、上盖塑料薄膜及草袋	热台座养护,养护制度为3+10+10+1小时,最高温度60~65°C

试点工程实践表明,按所选定的配合比,全轻混凝土拌合物的塌落度一般为2~3厘米,和易性好,具有良好的施工性能,混凝土研究所在唐山试点工程实测表明,100号全轻混凝土抗压强度的变异系数为0.15,混凝土容重的变异系数为0.023,说明其匀质性是较好的。

为使全轻混凝土获得较好的匀质性,在施工中,除按有关规范的要求严格控制原材料的质量及配合比各组分材料的称量等问题外,还采取了如下几点措施:

1) 粗骨料预湿

试验和试点工程表明,由于粉煤灰陶粒吸水率较大,为了改善混凝土拌合物的和易性,减少其塌落度在施工过程中的损失,在搅拌前进行饱和或半饱和预湿是较合理的,陶粒预湿后还可使全轻混凝土的强度得到提高。

2) 控制搅拌时间

不同搅拌时间对全轻混凝土性能的影响

表7

序号	测定项目	搅拌前	搅 拌 时 间 (分)		
			1	2	3
1	粉煤灰陶粒破碎率 (%)	22.4	32.4	33.2	37.2
2	混凝土抗压强度 (公斤/厘米 ²)	134*	167	197	234
3	混凝土干容重 (公斤/米 ³)	1180*	1268	1333	1345

注: *为试验人工搅拌时的测定结果。

由于采用强制式搅拌机拌合, 搅拌时间过长, 易造成陶粒破碎。实测表明, 随着搅拌时间的增加, 陶粒的破碎率增加, 抗压强度及容重也有所提高(表7)。全轻混凝土容重的提高, 对墙体保温性能不利。这在浮石全轻混凝土及页岩陶粒炉下灰全轻混凝土现场施工中也发现有类似现象, 一般现场机械搅拌的全轻混凝土拌合物的容重比实验室测定值约高100~150公斤/米³。因此, 我们认为, 全轻混凝土总搅拌时间不宜超过2分钟。

(二) 用陶粒无砂混凝土制作夹心复合墙板

1. 特点及对原材料的要求

在缺少轻砂或轻砂昂贵的地区, 用无砂大孔陶粒混凝土与普通轻骨料混凝土联合使用, 制作复合外墙板, 这是降低墙板自重, 改善保温性能的另一有效途径。

这种无砂陶粒混凝土夹心复合墙板的特点在于:

(1) 不用轻砂或普通砂作细骨料, 混凝土具有多孔、自重轻、保温性能好的特点。实际上是藉助粗骨料接触间的空隙(有人称之为“空气集料”)以降低混凝土的容重;

(2) 无砂混凝土, 用水泥作胶结料, 其用量仅用以包裹骨料并将颗粒间粘结起来, 不须用它来填塞空隙。因此, 水泥用量较省。

(3) 用无砂混凝土作为保温层, 用普通陶粒混凝土(即密实的砂粒混凝土)作结构层, 墙体的钢筋就配置在这结构层中。所以钢筋不须作特殊的防锈处理。

(4) 无砂混凝土夹心复合墙板, 其工艺虽然较单一材料的墙板复杂, 但与加气混凝土复合墙板和振动砖墙板相比工艺还是较简单的。

(5) 由于不用细骨料, 水泥用量又较省, 且钢筋不须作防锈处理, 因此, 造价较低, 是一种技术经济指标较好的新型外墙板。

用轻骨料配制无砂混凝土, 对其所用轻粗骨料必须有一定要求。试验结果说明, 采用圆球型的、颗粒强度较高、级配单一的轻骨料, 比采用碎石型的轻骨料配制成无砂混凝土具有较好的结构质量系数指标(表8)。

轻骨料混凝土结构质量系数(K)比较 表8

序 号	试 验 单 位	混 凝 土 品 种	轻 骨 料		粒 型	混 凝 土		K
			γ_s	R_t		$\gamma_{干}$	R_{28}	
1	天津建研所	粉煤灰陶粒混凝土	670	45.0	圆球型	1580	170	0.107
2	混凝土研究所	粉煤灰陶粒混凝土	715	45.5	圆球型	1172	110	0.094
3	同 上	煤矸石陶粒混凝土	515	13.5	圆球型	950	114	0.120
4	同 上	粉煤灰陶粒无砂混凝土 ^a	715	45.5	圆球型	990	54	0.054
5	天津建研所	粉煤灰陶粒无砂混凝土	670	45.0	圆球型	950	55	0.059
6	陕西建研所	粉煤灰陶粒无砂混凝土	838	99.0	圆球型	1060	60	0.056
7	混凝土研究所	煤矸石陶粒无砂混凝土	515	13.5	圆球型	845	29	0.034
8	同 上	火山渣无砂混凝土	634	—	碎石型	1167	42	0.036
9	同 上	同 上	815	—	碎石型	1205	46	0.038

注: 表中密实混凝土的水泥用量为250—300公斤/米³, 火山渣无砂混凝土的水泥用量为250公斤/米³, 其它为150—200公斤/米³

从表8可看出, 选用圆球型的、筒压强度较高的粉煤灰陶粒制作无砂混凝土, 其结构质量系数($K = \frac{R_{28}}{\gamma_{干}}$)都高于筒压强度较低的煤矸石陶粒或是碎石型的天然轻骨料。

由此, 我们认为, 选用粉煤灰陶粒配制无砂混凝土作为复合外墙板的保温层是较合理的。

粉煤灰陶粒的主要性能指标列于表 9。

粉煤灰陶粒的主要物理力学性能

表 9

试 验 单 位	松散容重 (公斤/米 ³)	振实容重 (公斤/米 ³)	颗粒容重 (公斤/米 ³)	筒压强度 (公斤/厘米 ²)	吸 水 率 (%)	粒径范围 (毫米)
天津建研所协作组	670	730	1250	45	17	5~20
陕西建研所协作组	838	932	—	79	10~12	5~12

2. 复合外墙板的结构构造

粉煤灰陶粒无砂混凝土复合外墙板按其用途区分，主要有两种型式：

(1) 工业建筑用外墙板

陕西建研所及有关单位研制的粉煤灰陶粒无砂混凝土复合工业墙板，边肋为 150 号的陶粒砂轻混凝土，底层为 140 毫米厚的 50 号陶粒无砂混凝土，面层为 20 毫米厚的 100 号水泥砂浆。受力钢筋及构造钢筋均埋设在陶粒混凝土与水泥砂浆中。墙板的主要外形尺寸为 6000 × 1500 × 160 毫米。

(2) 民用建筑用外墙板

天津市建研所与有关单位研制的粉煤灰陶粒无砂混凝土复合外墙板，其外表层为 40 毫米厚的 150 号陶粒混凝土，中间夹层为 180 毫米厚的 50 号大孔混凝土。中间不设肋。受力钢筋及构造钢筋均埋设在陶粒混凝土结构层中。为防止复合墙板出厂前堆放时或在使用过程中，雨水渗入墙体内，制作墙板时在墙板上边缘及窗台板部位分别现浇 40 毫米厚的陶粒混凝土作保护层。主要外墙板的尺寸为 3270 × 2912 × 260 毫米。

复合工业墙板及民用墙板，因外表层为 20 毫米厚的水泥砂浆面层或 40 毫米厚的陶粒砂轻混凝土，根据天津市建研所的模拟淋雨试验说明，可以经受相当于暴雨连续作用 24 小时而不透水，具有良好的抗渗性能。

墙板接缝采用材料防水。板缝用聚氯乙烯胶泥等防水胶泥嵌塞，防水效果较好。

3. 陶粒无砂混凝土的配制

粉煤灰陶粒无砂混凝土配合比的设计，没有统一的方法，主要参照有关资料，根据试配确定。

(1) 水泥用量的选择

根据混凝土设计标号的要求，配制 50 号左右的粉煤灰陶粒无砂混凝土，每立方米混凝土水泥用量一般以 150~200 公斤为宜（表 10）。陕西研究所的试验说明，为提高混凝土的强度，在水泥用量不变的情况下，可掺入适量的粉煤灰（约为水泥用量的 20% 左右）。掺入适量的普通砂，虽可显著提高混凝土的强度，但其容重也急剧增加，使其保温性能显著下降。因此，在保温用的无砂混凝土中不宜掺用普通砂。

(2) 陶粒用量的确定

每立方米陶粒无砂混凝土所需的陶粒用量，一般可按其振实容重取用，若按其松散容重折算，则每立方米混凝土所需的陶粒体积约为 1.08~1.2 米³。

(3) 水灰比

无砂混凝土所需水灰比可选择的范围较小。这是由于陶粒吸水率较大，且经常随其容重的增加而有所波动。陕西建研所经试验认为，其净水灰比一般为水泥标准稠度的 1~1.3 之

序 号	试 验 单 位	粉煤灰陶粒松散容重 (公斤/米 ³)	水 泥 用 量 (公斤/米 ³)	抗、压 强 度 (公斤/厘米 ²)	容 重 (公斤/米 ³)
1	陕西建研所协 作组	西安陶粒 839	150	43.6	1089
			170	54.6	1123
			200	64.9	1139
			225	76	1155
2	混凝土研究所	天津陶粒 715	150	37	925
			180	53	1010
			210	58	1030
			240	65	1030

间。因此，在施工中对其用水量必需严格控制，一般以成型时拌合物不流浆为宜，否则，将影响混凝土的质量。

根据试配结果，复合墙板所用的陶粒无砂混凝土配合比列于表11。

50号粉煤灰陶粒无砂混凝土配合比

表11

序 号	试 验 单 位	每米 ³ 混 凝 土 材 料 用 量 (公斤)				制 成 量 系 数	
		水	泥	陶 粒	净 用 水 量		附 加 水
1	天津建研所协作组	150		730	45~53	124	1.02
2	陕西建研所协作组	150		948	56	118	1.03

4. 复合墙板的生产工艺

陶粒无砂复合墙板的生产工艺与普通混凝土预制构件基本相似，其主要差别在于前者在混凝土搅拌时必需有两套设备（以强制式搅拌机为宜），或是一套设备依次搅拌两种混凝土拌合物，其次就是在成型时，必须作好工艺流程的安排，加强施工管理，以获得良好的生产效果。

工业建筑复合墙板在台座上平模生产，边模为钢制，既可节约木材又可保证墙板外形的准确，其生产工艺流程为：

支模→安放肋部钢筋→铺设肋部的陶粒混凝土及底层的无砂混凝土→安放钢筋网片→铺放面层水泥砂浆→用表面振动梁振捣。

民用建筑复合墙板可在现场也可在预制厂生产，其制作工艺流程为：

支模→安放钢筋网片→铺底层陶粒混凝土→平板振捣器振实→铺设无砂混凝土→安放钢筋网片→铺面层陶粒混凝土→平板振捣器振实。

由于复合板采用无砂混凝土作保温层，在生产时必需严格控制各个工序，特别应注意：

(1) 控制各层混凝土的虚铺厚度，使振实后各层的厚度能保证满足设计要求；

(2) 选用轻型的平板振动器，其功率不应大于1.1千瓦。且必需严格控制振动时间，使经振捣后面层液化的混凝土拌合物中的水泥砂浆，不流淌入无砂混凝土夹心层。同时，还可使无砂混凝土不过分振实，以免影响其保温性能。

陕西建研所用表面振动梁振实面层混凝土，不仅效率高，且可保证表面层水泥砂浆的成型质量。

复合墙板的生产工艺,虽较单一材料外墙板复杂,但不需特殊设备,易于上马,熟练掌握后,其生产效率还是较高的。据天津构件三厂试生产的初步考核,生产一块普通陶粒混凝土板约需20分钟,如果采用两台搅拌机分别搅拌陶粒混凝土和无砂混凝土,两块或三块复合墙板进行流水连续均衡生产,其生产效率与生产单一材料的陶粒混凝土板相近。

5. 主要技术性能

复合外墙板所采用的50号陶粒无砂混凝土的主要物理力学性能,参照“技术规定”进行试验。其主要性能指标列于表12。

复合墙板用陶粒混凝土主要性能指标

表12

序号	试验单位及混凝土品种	γ 干 (公斤/米 ³)	R_{28} (公斤/厘米 ²)	R'_L (公斤/厘米 ²)	R_a (公斤/厘米 ²)	R 折 (公斤/厘米 ²)	R 剪 (公斤/厘米 ²)	$E \times 10^4$ (公斤/厘米 ²)	λ 干 (千卡/米·度·时)	抗冻性
1	陕西建研所协作组	1060	59.8	6.1	70.3	20.6	17.5	8.66	0.330	M25合格
2	天津建研所协作组	950~1050	55~65	9.0	43.0	13.0	18.0	6.40	0.270	M25合格
		1580	170	—	150.0	—	29.0	13.90	0.550	M25合格
		1176*	—	—	148.0	—	24.0 (平行复合面)	11.80	—	M25合格

* 系按复合板多层混凝土厚度的比例制成的试件

复合工业墙板与民用墙板的综合折算容重分别为 1220 和 1176公斤/米³, 完全可以满足小于 1400公斤/米³ 的要求。

复合墙板具有良好的结构性能。陕西建研所协作组对工业复合板进行结构试验的结果表明,在标准荷载 $P_1=240$ 公斤/厘米² 时,挠度为 $\frac{1}{800}$, 未出现裂缝,结构安全系数大于 2.5。完全可满足设计要求。

天津建研所协作组对民用复合板进行结构检验,同时与37砖墙板及普通砂轻陶粒混凝土板进行对比(见表13)。

三种墙板侧向水平推力试验结果

表13

墙 板 种 类	初 裂 荷 载 (吨)	破 坏 荷 载 (吨)	最大裂缝宽度 (毫米)	侧向位移(毫米)	
				2 吨 时	6 吨 时
民用复合板	7.00	9.70	12	0.180	0.288
37砖墙板	3.00	6.00	8~9	1.600	—
普通陶粒混凝土板	10.20	11.00	10	0.125	0.262

试验结果表明,陶粒无砂混凝土复合墙板侧向刚度与普通陶粒混凝土墙板相近,而远远大于37砖墙板。陶粒无砂混凝土复合墙板破坏试验说明,陶粒密实混凝土与陶粒无砂混凝土迭合面之间粘结牢固,在外荷作用下,共同工作良好。

6. 工程试点概况

在民用建筑用的陶粒无砂混凝土复合墙板研制成功的基础上,1979年夏天在天津市建研所内建成一幢780平米的五层装配式大板住宅建筑。经冬季保温测试,复合外墙板均无结露现象,保温性能良好。

通过试点工程生产与应用表明,复合板浇筑、成型、养护、脱模、运输及安装都达到设计要求。现在,天津市建委和建工局拟在市内某新建住宅区推广,住宅建筑设计已完成,预计今年可完成1万多平米。

工业复合墙板结合西安市变压器厂工程,已于1981年初建成一万多平米的工业厂房试点,试点工程同样表明,各项性能指标及施工安装达到预期效果。为今后进一步推广创造了良好条件。

三、全轻混凝土的保温性能

保温性能是全轻混凝土重要性能之一,也是大家共同关心的重要问题。建研院物理所等单位,根据专题计划的要求,对全轻混凝土的保温性能进行了较为系统的试验研究,为外墙板的热工设计和生产,提供了必要的依据。

(一) 全轻混凝土的热物理性能

建研院物理所对国内现有的几种轻骨料(粉煤灰陶粒、粘土陶粒、碱土陶粒、页岩陶粒、珍珠岩陶粒、浮石、大颗粒膨胀珍珠岩、自然煤矸石)配制的不同容重的全轻混凝土进行了干燥及不同湿度状况下热物理系数测定研究工作,试验结果说明:

1. 全轻混凝土是一种容重轻、保温性能较好的建筑材料,其干容重都可小于1400公斤/米³,最轻仅700公斤/米³,其导热系数一般为0.15~0.40千卡/米·时·度。与普通混凝土相比容重减少 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$,导热系数仅为其 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 倍。

2. 全轻混凝土由于采用轻砂作细骨料,使混凝土的容重比砂轻混凝土低,导热系数也比砂轻混凝土小,从而提高了全轻混凝土的保温性能。例如用普通砂作细骨料的粉煤灰陶粒砂轻混凝土,其干容重一般为1700~1800公斤/米³,相应的导热系数为0.6~0.7千卡/米·时·度;而用膨胀珍珠岩砂作细骨料的粉煤灰陶粒全轻混凝土,其干容重仅为1192~1236公斤/米³,相应的导热系数为0.27~0.32千卡/米·时·度。

试验还说明,为了提高全轻混凝土的强度,在细骨料中掺入部分普通砂,对其保温性能的改善是十分不利的。例如:容重相近的粘土陶粒和碎砖混凝土,由于粘土陶粒掺了148公斤普通砂,其导热系数比碎砖混凝土增加了9.3%(见表14)。因此,为了提高全轻混凝土的强度,掺入部分普通砂,并不是一种经济合理的措施。

全轻及砂轻混凝土的导热系数 表14

每米 ³ 混凝土材料用量(公斤)				容重(公斤/米 ³)	导热系数 (千卡/米·时·度)	抗压强度 (公斤/厘米 ²)
粗骨料	普通砂	珍珠岩砂	水 泥			
陶粒 763	14.8	46.2	290	1301	0.386	120~130
碎砖 819	—	47.0	289	1335	0.353	100

3. 全轻混凝土的导热系数是随着容重的增加呈指数函数变化,大量试验资料统计分析可得下列经验公式:

$$\bar{\lambda}_{\text{干}} = 0.0699e^{0.001288\gamma_{\text{干}}} \quad (1)$$

式中 $\bar{\lambda}_{\text{干}}$ ——干燥条件下导热系数平均值(千卡/米·时·度);

$\gamma_{\text{干}}$ ——干燥条件下混凝土的容重(公斤/米³);

e ——自然对数的底。

4. 全轻混凝土的导热系数随湿度的提高呈线性增加, 当体积湿度每增加 1% 时, 导热系数增加 0.02~0.05。

若已知全轻混凝土的干容重及其导热系数, 就可以利用下面经验公式求得任何湿度下的导热系数值:

$$\lambda_{\text{湿}} = \lambda_{\text{干}} + (0.0104 - 1.895 \times 10^{-5} \gamma_{\text{干}} + 1.76 \times 10^{-5} \gamma_{\text{干}}^2) W, \quad (2)$$

式中 W ——混凝土的重量含水率 (%)。

5. 试验结果表明, 骨料的化学成份和结构组成对全轻混凝土的导热性能有很大影响。例如: 在干容重相同的情况下, 页岩陶粒、粉煤灰陶粒和粘土陶粒混凝土, 由于它们的化学成份, 内部结构组成不同, 它们的导热系数是不同的, 并且随容重变化的速率也不完全相同。粘土陶粒混凝土随容重变化导热系数增加的速率最快, 即容重每增加 100 公斤/米³, 其导热系数增加 0.051 千卡/米·时·度, 而粉煤灰陶粒和页岩陶粒混凝土的导热系数随容重增长的速率则较低, 当容重每增加 100 公斤/米³, 其导热系数增加 0.039 千卡/米·时·度左右; 但在同等容重下, 页岩陶粒混凝土却比粉煤灰陶粒混凝土的导热系数高 0.05 千卡/米·时·度。

还要指出的是, 含玻璃体较多的轻骨料, 比含有晶体或微晶体轻骨料的导热系数小。例如: 容重为 1283 公斤/米³ 的浮石混凝土, 导热系数为 0.30 千卡/米·时·度, 而容重分别为 1258 和 1294 公斤/米³ 的粘土陶粒和页岩陶粒混凝土, 其导热系数分别为 0.354 和 0.395 千卡/米·时·度, 比浮石混凝土约高 18% 和 31%。此外, 根据经验公式计算得出的不同容重下各种陶粒和浮石混凝土的导热系数值(图 2), 也可以清楚看出, 容重大于 1100 公斤/米³ 的粉煤灰陶粒混凝土比粘土陶粒和页岩陶粒混凝土的导热系数小; 而容重小于 1400 公斤/米³ 的浮石混凝土又比陶粒混凝土的导热系数小。

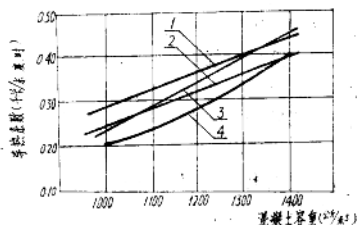


图 2 全轻混凝土导热系数与容重的关系

- 1—页岩陶粒混凝土 2—粉煤灰陶粒混凝土
3—粘土陶粒混凝土 4—浮石混凝土

6. 全轻混凝土的比热与材料的化学成分及所占的重量百分比有关, 但与混凝土的容重关系不大。在干燥状态下绝大多数的全轻混凝土的比热基本在 0.19~0.21 千卡/公斤·度范围内。然而比热是随湿度的提高呈线性增加, 基本上在一个较狭窄的带中或扇形区域内变化。为使用方便, 根据试验资料可取: 重量湿度每增加 1%, 比热增值为 0.0066 千卡/公斤·度。

7. 全轻混凝土的导温系数随容重的提高而增加。由于浮石混凝土的导热系数比陶粒混凝土小, 因而, 其导温系数也较小。试验说明, 绝大多数全轻混凝土的导温系数随湿度的增加有所降低, 但变化的幅度不大。

(二) 全轻混凝土外墙板的保温性能

为了检验轻骨料混凝土在保温墙体中的应用效果, 辽宁科研所对单一混凝土墙板, 无砂混凝土墙板, 复合墙板等三种不同结构形式共计十七种全轻混凝土的外墙板进行了模拟试验, 其结果表明:

(1) 三种不同结构型式的外墙板当采用 30 厘米厚时, 其热阻值都优于 37 砖墙, 其中以复合板保温效果最好, 总热阻最大;

(2) 将实测的全轻混凝土外墙板的内表面温度值按室内温度 $+18^{\circ}\text{C}$ 、室外温度 -20°C 进行换算, 其内表面温度都在 12.3°C 以上, 故极限允许室内相对湿度高达70%, 即在室内温度 $+18^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度小于70%的条件下, 采用这些30厘米厚的外墙板基本不会结露。

为检验陶粒无砂复合外墙板的保温性能, 天津建研所协作组曾在1980年1月对780平方米的试点工程进行实地观测。当天室外最低温度为 -11°C , 最高温度为 -4°C , 房间内温度一般为 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为50~60%。整幢建筑物的复合外墙板面均未发现有结露现象。只有外墙板垂直缝处, 由于板缝浇筑普通陶粒混凝土, 未做保温处理, 而有所结露。因此, 总的说来, 这种粉煤灰陶粒无砂混凝土复合外墙板的保温性能是较好的。

但是, 全轻混凝土外墙板在实际使用中, 有时未达到预定的效果, 特别是在外墙角, 山墙及接缝等处未采取保温处理容易结露, 其主要原因是:

(1) 由于生产外墙板时, 对原料配合比等缺乏严格控制, 并且实验室与现场搅拌工艺不一样, 易使实际容重比原设计偏大(约10%)。因而影响了外墙板的保温性能。

(2) 在使用初期, 建筑物外墙板的含水率大大超过其平衡含水率, 故实测的保温效果往往不能令人满意。但随着使用年限的推延, 其含湿率逐渐减小, 墙板的保温效果也将随之得到改善。

因此, 在进行热工计算时, 必须考虑混凝土容重及平衡含水率提高对墙体保温性能的影响。

四、碳化与钢筋锈蚀

(一) 轻骨料混凝土的碳化问题

1. 关于碳化机理

混凝土研究所与黑龙江低温研究所通过X光衍射分析和差热分析试验说明, 轻骨料混凝土的碳化与普通混凝土一样, 在非侵蚀性介质的正常使用条件下, 都是空气中的二氧化碳与水泥水化产物起作用的结果。因此, 可以借助和利用普通混凝土碳化问题研究的一系列方法和成果, 对轻骨料混凝土, 特别是全轻混凝土的碳化问题作进一步的研究。

2. 碳化特征曲线

山东建研所与协作组各有关单位的大量试验证明, 轻骨料混凝土的碳化具有与普通混凝土相类似的特征曲线。碳化初期, 由于 CO_2 在混凝土中的渗透与扩散的速度较快, 碳化深度的发展也较迅速。在后期, 随着时间的增长, 碳化速度则逐渐衰减, 并趋于平衡。

因此, 在非侵蚀性介质的正常温度条件下, 轻骨料混凝土的碳化深度与碳化时间的关系, 和普通混凝土一样, 可近似地用幂函数方程表示:

$$X = at^b \quad (3)$$

式中 X —轻骨料混凝土的碳化深度(毫米);

t —碳化龄期(实验室快速碳化为天; 自然碳化年为年);

a —碳化速度系数;

b —指数常数, $b < 1$ 。

混凝土研究所根据快速碳化试验(CO_2 浓度 $20 \pm 3\%$, 温度 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $70 \pm 5\%$)的实测值与公式(3)的计算值相比较, 并经数理统计检验初步证明, 为简化起见, 公式(3)中的指数常数 b , 可与普通混凝土一样, 取 $b = 0.5$ (图3)。

碳化速度系数 a , 在上述特定试验条件下主要取决于混凝土本身的质量——抗渗性与碱