

基于结构自保温的高性能页岩陶粒混凝土试验研究*

杨健辉^{1,2} 陈静² 张鹏² 秦本东² 赵红兵³

(1. 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南焦作 454000;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南焦作 454000; 3. 焦作市住建局, 河南焦作 454000)

摘要: 为了配制出高性能页岩陶粒混凝土, 以强度和导热系数为设计目标, 通过正交试验, 得到了强度等级不低于 LC40 的页岩陶粒混凝土最佳配合比, 并分别研究了河砂、不同纤维对陶粒混凝土性能的影响。结果表明, 河砂对混凝土强度影响不大, 而钢纤维掺量为 2% 时, 其抗压、抗折、劈拉强度均有明显提高, 并优于其他纤维品种; 陶粒混凝土的轴心与立方体抗压强度接近, 且弹性模量较低, 峰值应变与总应变较大。最后, 对假定的几种结构混凝土和围护结构的保温措施, 采用热工模拟计算, 得到了节能率不低于 65% 的一体化建筑保温系统。

关键词: 页岩陶粒混凝土; 增强纤维; 强度; 本构关系; 抗震验算; 导热系数

DOI: 10.13204/j.gyjz201412020

EXPERIMENTAL STUDY ON HIGH-PERFORMANCE SHALE CERAMSITE CONCRETE BASED ON INSULATION STRUCTURE

Yang Jianhui^{1,2} Chen Jing² Zhang Peng² Qin Bendong² Zhao Hongbing³

(1. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Civil Engineering of Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454000, China; 3. Housing Construction Bureau of Jiaozuo, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to make up high performance ceramsite concrete (HPCC) and be applied in engineering practice, the best mixture ratio of high-strength shale ceramsite concrete (HSSCC) no less than LC40 is obtained by orthogonal tests based on the indexes of strength and thermal conductivity, then the effects of sand and different fibers on physical-mechanical properties of CC are studied. The test results show that the sand has little effect on strength, but steel fibers have a great deal when added 2%, the compressive strength, splitting strength and flexural strength are all higher than ordinary one. Besides, the axial strength is similar to cube compressive strength, and the elastic modulus is lower, the peak strains and the total strains are larger. In the end, the integration system of insulation building is founded and the economy energy rate is not less than 65% by aseismic check based on the upper test results, including of the physical-mechanical properties, and the supposed several types of structure concretes and outer protective structures.

Keywords: shale ceramsite concrete; strengthen fiber; strength; constitutive relation; aseismic check; thermal conductivity coefficient

虽然我国对轻骨料混凝土的研究及应用始于 40 多年前, 但由于当时经济、技术等各方面原因, 并没有在实际工程中被广泛应用^[1]。但近几年来, 随着我国国民经济的飞速发展, 人民生活水平日益提高, 带动着建筑技术的更新换代周期日趋缩短。同时, 伴随着建筑向大跨度、高层和超高层等多样化方向发展, 尤其是《居住建筑节能设计 65% 标准》的执行以及《2010—2020 年中国长期科学和技术发展目标规划纲要》要求, 轻骨料混凝土因其具有保温、隔热、保湿、耐火、抗冻、轻质高强、良好的抗震性和抗爆

炸冲击性、高耐久性和抗裂性以及显著的综合经济效益等优点, 而获得了前所未有的广阔发展前景。

目前, 我国陶粒混凝土主要应用于低强度的非承重结构, 而在承重结构中应用还较少。但随着轻

* 国家自然科学基金项目(41172317); 深部矿井建设省重点学科开放实验室开放基金(2011KF-01); 河南省教育厅科技攻关项目(2010A560010)。

第一作者: 杨健辉, 男, 1969 年出生, 博士(后) 教授。

电子信箱: yjh_dr@163.com

收稿日期: 2014-08-16

骨料生产的多样性以及轻骨料混凝土制备技术的进步,其性能得到了极大提高,高强轻骨料的生产也已形成一定的规模^[2]。在此背景下,轻骨料混凝土逐渐在高层建筑和大跨度桥梁等工程中获得应用。如珠海国际会议中心采用了 LC30 泵送轻骨料混凝土,武汉证券大厦 64~68 层楼板使用了 LC35 轻骨料混凝土,云南建工医院主体结构使用 LC40 轻骨料混凝土,天津永定新河大桥引桥应用了预应力 LC40 高强轻骨料混凝土,京珠高速公路湖北段蔡甸汉江大桥和洛阳新区牡丹桥桥面均使用了 LC40 泵送纤维增强轻骨料混凝土^[3]。

虽然高强轻骨料混凝土在桥梁工程方面已经取得一定的市场份额,但还仅仅是很小的一部分,而且在不同的国家,高强轻骨料混凝土的应用情况相差很大^[4-6]。因此,本课题组针对页岩陶粒素混凝土和陶粒纤维混凝土的物理力学性能以及单轴压应力下的本构关系进行试验研究,并按目前常用的几种保温围护结构,对焦作市一具体民用建筑工程进行了热工模拟计算,以期对相关工程提供借鉴。

1 试验原材料

1.1 粗骨料

采用河南美赛克科技有限公司生产的页岩陶粒,密度等级为 800 级,堆积密度为 755 kg/m³,经预防水处理后 24 h 吸水率由 10.9% 降为 6.3%,粒径为 5~20 mm,颗粒级配良好。

1.2 细骨料

采用河南美赛克科技有限公司生产的页岩陶砂,密度等级为 900 级,堆积密度为 806 kg/m³,经预防水处理后 24 h 吸水率由 23.8% 降为 13.4%,粒径不大于 5 mm,颗粒级配良好。

1.3 水泥

采用焦作市坚固水泥厂生产的 P·O 42.5R 坚固牌普通硅酸盐水泥。

1.4 矿物外加剂

粉煤灰:采用平顶山姚孟电厂所生产的 I 级粉煤灰。其化学成分见表 1。

表 1 粉煤灰化学成分

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
58.96	28.94	3.51	1.70	0.74	2.24	0.52

硅灰:采用新乡海运特种水泥公司所生产的硅灰,化学成分见表 2。

表 2 硅灰化学成分

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	烧失量	水分
85~90	3.2	2.2	<1.8	<4.2	<2

1.5 化学外加剂

采用河南银洲新型建材有限公司生产的 EAST-SAF 型高效减水剂和早强剂。其中,减水剂掺量为水泥质量的 1.8%,减水率为 22%,采用后掺法;早强剂掺量为水泥质量的 2%~4%。

1.6 增强纤维

钢纤维(郑州禹建钢纤维有限公司生产的波浪形钢纤维)、仿钢纤维(山东泰山工程材料有限公司生产的波浪形仿钢纤维)和聚丙烯纤维(山东泰安智荣工程材料有限公司生产的聚丙烯束状单丝纤维),其性能指标如表 3 所示。

表 3 不同纤维的物理性能指标

纤维种类	密度 $\rho/(g \cdot m^{-3})$	抗拉强度 f_t/MPa	弹性模量 E/GPa	极限伸长率 $\delta/\%$
聚丙烯纤维	0.91	350~700	3.0~5.0	15~35
钢纤维	7.8~7.9	1470~2500	176~196	1.0~2.0
仿钢纤维	0.91	>490	7.1	—

2 最佳配合比设计及试验结果分析

混凝土配合比设计采用松散体积法,即以给定的 1 m³ 混凝土的粗细骨料松散总体积为基础进行计算,然后按照设计要求以混凝土干表观密度为依据进行校核,最后通过试验调整得出配合比。配合比按照 JGJ 51—2002 《轻骨料混凝土技术规程》规定进行,正交试验设计为 6 因素 3 水平,如表 4 所示。

表 4 因素水平

水平	水泥 (A)	粉煤灰 (B)	硅灰 (C)	陶粒 (D)	陶砂 (E)	水 (F)
1	400	50	35	520	700	140
2	450	60	40	535	750	150
3	500	70	45	550	800	160

搅拌采用强制式搅拌机。先将粗骨料和细骨料充分搅拌均匀(干拌),然后加入水泥、粉煤灰等干拌,使其充分混合后,加水搅拌 1 min,最后将剩余水和减水剂同时加入拌和 2 min。

试验步骤及试验方法参照 GB 50081—2002 《普通混凝土力学性能试验方法标准》、GB/T 1743.1—2010 《轻集料及其试验方法》和 JGJ/T 10—2010 《轻

骨料混凝土技术规程》,采用标准试验方法测试。其中,立方体抗压、劈裂抗拉、干表观密度与吸水率试件的规格均为 150 mm × 150 mm × 150 mm,抗折试件规格为 100 mm × 100 mm × 400 mm,轴心抗压强度试件的规格为 100 mm × 100 mm × 300 mm。试验结果分别如表 5—表 7 所示。

因抗压强度权重大于导热系数权重,综合表 6 与表 7 的结果,最终选择最优组合为 D₁A₂E₁B₂C₂F₃,即各材料的质量比为:水泥:粉煤灰:硅灰:陶粒:陶砂:水 = 1:0.133:0.089:1.156:1.556:0.356,混凝土水泥用量为 450 kg/m³。

普通混凝土材料导热系数为 1.74 W/(m²·K)^[7]以内,而页岩陶粒混凝土导热系数在 1.0 W/(m²·K)以内,如表 7 所示。较低的导热系数,可有效减少热量的传递,增大蓄热功能,从而实现能源节约。

3 物理力学性能

根据表 6、表 7 中所得到的最佳配合比,28 d 龄期时混凝土的物理力学性能指标如表 8 所示。

表 5 试验设计与结果

Table 5 The designs and results of orthogonal experiments

试验号	水平因素							f_{cu} /MPa	λ /(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
	1A	2B	3C	4D	5E	6F	7		
1	1	1	1	1	1	1	1	57.12	0.61
2	1	2	2	2	2	2	2	43.34	0.69
3	1	3	3	3	3	3	3	45.11	0.71
4	2	1	1	2	2	3	3	42.96	0.82
5	2	2	2	3	3	1	1	52.77	0.93
6	2	3	3	1	1	2	2	50.26	0.66
7	3	1	2	1	3	2	3	56.98	0.96
8	3	2	3	2	1	3	1	45.14	0.84
9	3	3	1	3	2	1	2	47.87	0.95
10	1	1	3	3	2	2	1	42.27	0.71
11	1	2	1	1	3	3	2	41.63	0.76
12	1	3	2	2	1	1	3	40.09	0.64
13	2	1	2	3	1	3	2	54.75	0.72
14	2	2	3	1	2	1	3	46.41	0.80
15	2	3	1	2	3	2	1	44.45	0.92
16	3	1	3	2	3	1	2	47.25	0.98
17	3	2	1	3	1	2	3	50.32	0.88
18	3	3	2	1	2	3	1	48.56	0.85

注: λ 表示导热系数。

表 6 28 d 抗压强度 f_{cu} 分析

Table 6 The analysis of compressive strengths f_{cu}

水平因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	极差 R	因素主次	最优方案
1A	269.56	291.60	296.12	44.93	48.60	49.35	4.42		
2B	301.33	279.61	276.34	50.22	46.60	46.06	4.16		
3C	284.35	296.49	276.44	47.39	49.42	46.07	3.35		
4D	300.96	263.23	293.09	50.16	43.87	48.85	6.29	DAEBCF	D ₁ A ₃ E ₁ B ₁ C ₂ F ₁
5E	297.68	271.41	288.19	49.61	45.24	48.03	4.37		
6F	291.51	287.62	278.15	48.59	47.94	46.36	2.23		
7	290.31	285.10	281.87	48.39	47.52	46.98	1.41		

表 7 导热系数 λ 分析

Table 7 The analysis of thermal conductivity λ

水平因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	极差 R	因素主次	最优方案
1A	4.12	4.85	5.46	0.69	0.81	0.91	0.22		
2B	4.8	4.9	4.73	0.80	0.82	0.79	0.03		
3C	4.94	4.79	4.7	0.82	0.80	0.78	0.04		
4D	4.64	4.89	4.9	0.77	0.82	0.82	0.04	AED(CF)B	A ₁ E ₁ D ₁ C ₃ F ₃ B ₃
5E	4.35	4.82	5.26	0.73	0.80	0.88	0.15		
6F	4.91	4.82	4.7	0.82	0.80	0.78	0.04		
7	4.86	4.76	4.81	0.81	0.79	0.80	0.02		

表 8 以最优配合比配制的页岩陶粒混凝土物理力学性能指标

Table 8 The physical and mechanical properties of shale ceramicsite concrete according to the optimal proportion

立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	轴心抗压强度 f_c /MPa	劈裂抗拉强度 f_{ts} /MPa	抗折强度 f_r /MPa	干表观密度 ρ_g /(kg·m ⁻³)
55.72	51.78	3.87	5.06	1 828.2

经过反复试验,试验结果稳定,达到了结构陶粒混凝土的设计强度要求。

轴心抗拉强度采用普通混凝土的关系式计算^[8]:

$$\frac{f_{cu}}{f_t} = 6.4 + 0.122 3f_{cu} \quad (1)$$

由式(1)得计算结果为 4.22 MPa,略高于劈裂抗拉强度,但低于抗折强度。

此外,由表 8 可知,全轻页岩陶粒混凝土的轴心抗压强度接近于其立方体抗压强度,二者比值约为 0.93,不同于采用轻粗骨料、普通砂的轻

骨料混凝土(二者比值为0.815)和普通混凝土(二者比值为0.76)。其主要原因是全轻混凝土孔隙率大、材质疏松,在轴向荷载作用下,试件横向约束作用较轻粗骨料、普通砂的半轻骨料混凝土和普通混凝土弱,导致其立方体抗压强度与轴心抗压强度相比增加不多,且较普通混凝土略大些^[9]。

表9 LC50 页岩陶粒混凝土配合比设计

Table 9 The proportioning design of shale ceramsite concrete for LC50

编号	水泥	粉煤灰	硅灰	陶粒	陶砂	河砂	水	减水剂	早强剂
1-1	450	60	40	520	700	0	160	8.01	8.78
1-2	450	60	40	520	665	35	160	8.01	8.78
1-3	450	60	40	520	630	70	160	8.01	8.78
1-4	450	60	40	520	595	105	160	8.01	8.78

表10 LC50 页岩陶粒混凝土试验结果

Table 10 The test results of shale ceramsite concrete for LC50

编号	坍落度 T/mm	黏聚性	保水性	28 d 抗压强度 f_{cu} /MPa
1-1	165	良好	良好	55.7
1-2	173	良好	一般	49.6
1-3	179	一般	一般	53.2
1-4	185	一般	稍微沁水	54.6

由表10可知,1)页岩陶粒混凝土拌合物的和易性随着河砂替代率的增大而变差;2)当河砂替代率为0时强度最大。和易性变差是原本由陶砂所吸附的一部分水分,不能被替代的普通河砂所吸附而成为游离水,从而使坍落度逐渐增大。这说明,在最佳配合比条件下,不需要用河砂替代陶

3.1 河砂替代率对混凝土性能的影响

由于河砂远较页岩陶砂便宜,以致在工程中大量采用河砂替代陶砂,从而导致混凝土性能劣化。为探讨河砂对页岩陶粒混凝土的和易性与强度的影响,在最佳配合比条件下,分别以0%、5%、10%和15%的普通河砂去替代页岩陶砂,如表9所示,其试验结果如表10所示。

砂,陶粒混凝土即可满足工程要求。另一方面,河砂替代部分或完全替代陶砂,虽然在适当配合比条件下也能满足要求,但在泵送过程中将会增大堵管的风险,这是因为河砂密度较大,会在新拌混凝土中快速沉淀,导致混凝土质量事故发生,如增加裂缝风险、增加导热系数等弊病。此外,由于陶粒与陶砂的多孔性,在混凝土养护中,可以配合粉煤灰等活性掺材充分发挥内养护功能,从而可有效提高后期强度。

3.2 钢纤维掺量对混凝土的影响

为探讨钢纤维对陶粒混凝土的和易性及其他力学性能的影响,在最佳配合比条件下,分别选择体积率^[10-12]为0%、0.5%、1%、1.5%、2%、3%和5%进行试验,如表11所示,其试验结果如表12所示。

表11 不同掺量钢纤维的混凝土配合比

Table 11 The concrete proportioning design under different contents of steel fibers

编号	水泥/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	陶粒/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	陶砂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	钢纤维/ %	水/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	早强剂/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
2-1	450	60	40	520	700	0.0	160	8.01	8.78
2-2	450	60	40	520	700	0.5	160	8.01	8.78
2-3	450	60	40	520	700	1.0	160	8.01	8.78
2-4	450	60	40	520	700	1.5	160	8.01	8.78
2-5	450	60	40	520	700	2.0	160	8.01	8.78
2-6	450	60	40	520	700	3.0	160	8.01	8.78
2-7	450	60	40	520	700	5.0	160	8.01	8.78

表12 试验结果

Table 12 The experimental results

编号	T/ mm	黏聚性	保水性	f_{cu} / MPa	f_r / MPa	f_{ts} / MPa
2-1	165	良好	良好	55.7	5.1	3.9
2-2	160	良好	良好	58.5	5.9	4.6
2-3	156	良好	良好	61.8	6.8	5.3
2-4	152	良好	良好	63.1	7.4	6.5
2-5	143	良好	良好	66.3	8.2	7.9
2-6	141	一般	一般	66.5	8.1	7.6
2-7	138	不太好	一般	63.4	7.9	7.1

由表12可知,1)当钢纤维掺量从0%增加到5%时,坍落度逐渐变小,即流动性变差,和易性越来越差;2)当钢纤维掺量增加到2%时,立方体抗压强度的增长率最大可达20%。但随着钢纤维掺量的继续增加,强度虽有增长,但增幅并不大;3)当钢纤维掺量由0%增加到2%,陶粒混凝土的抗折强度增幅达65%,但钢纤维掺量增加到3%和5%时,抗折强度反而会减小;4)当钢纤维掺量达2%时,劈裂抗拉强度

的增幅可超过 1 倍,但如果掺加过量,其强度并不能有效提高;5) 钢纤维对劈裂抗拉强度的增强效果优于抗折强度。这表明,钢纤维的最大掺量为 2% 时,钢纤维陶粒混凝土的韧性已经得到了明显提高。

4 单轴压应力条件下混凝土的本构关系

4.1 应力-应变曲线

分别制作最优配合比页岩陶粒素混凝土试件,以及钢纤维 2.0%、仿钢纤维和聚丙烯纤维掺量分别为 0.5% [13] 的混凝土试件以及混掺仿钢纤维与聚丙烯纤维掺量分别为 0.35% 和 0.15% 的混凝土

试件,其试验结果如表 13 所示。

由图 1 和试验现象可知,LC50 页岩陶粒混凝土试件在受力初期处于弹性变形状态;到达比例极限时,应力、应变继续增长,并随着时间的推移,能听到试件的劈裂声,说明试件已进入弹塑性阶段,此时应变增长速率大于应力的增长速率;当压应力接近峰值应力时,试件表面出现了竖向短小细微裂缝,应变急剧增长;接着细微裂缝继续扩展,形态逐渐变粗变长,直至试件完全破坏,且破坏是突发性的,能够听到破坏时的爆裂声,这表明高强页岩陶粒混凝土的破坏也属于脆性破坏。

表 13 应力-应变试验数据

Table 13 The experimental data of stress-strain

4-1 组(陶粒混凝土)		4-2 组(聚丙烯纤维陶粒混凝土)		4-3 组(钢纤维陶粒混凝土)		4-4 组(仿钢纤维陶粒混凝土)		4-5 组(聚丙烯纤维+仿钢纤维陶粒混凝土)	
应力/MPa	纵应变/ 10^{-6}	应力/MPa	纵应变/ 10^{-6}	应力/MPa	纵应变/ 10^{-6}	应力/MPa	纵应变/ 10^{-6}	应力/MPa	纵应变/ 10^{-6}
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.49	70	5.21	398	7.46	412	6.43	421	8.75	486
10.50	504	13.21	521	19.34	612	12.70	536	14.74	693
14.51	712	17.53	642	32.40	1 175	16.72	672	21.35	1 104
18.42	937	27.15	1 057	46.78	1 413	26.21	1 179	28.31	1 285
25.50	1 245	32.07	1 309	52.82	2 863	33.17	1 347	35.50	1 587
33.55	1 836	42.79	1 476	54.41	3 120	41.27	1 521	46.50	1 563
38.72	2 357	53.57	3 012	49.84	3 861	47.84	1 457	52.17	2 912
51.80	2 905	51.67	2 951	39.25	4 699	52.45	2 964	46.10	3 503
43.47	3 415	45.71	4 017	30.14	4 876	49.89	2 893	39.25	3 706
36.15	3 745	36.21	4 531	22.35	6 034	42.34	3 785	28.73	4 205
27.50	4 121	23.74	5 103	13.21	8 104	32.79	4 412	22.37	4 715
18.47	4 658	14.71	7 135	10.79	10 896	26.17	4 647	13.54	6 532
17.45	5 874	10.13	11 213	9.81	13 213	17.21	5 394	9.71	9 500
7.90	8 345	9.76	13 541	7.05	—	12.45	7 326	6.35	11 657
5.62	11 276	9.01	—	6.12	—	10.97	10 357	3.03	12 708
2.71	12 545	—	—	—	—	8.89	13 247	2.79	—
2.13	—	—	—	—	—	7.32	—	—	—

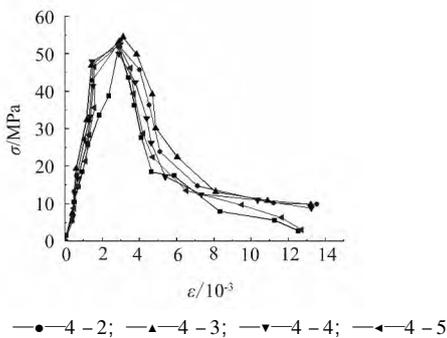


图 1 单轴受压应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves of different kinds of concrete under uniaxial stresses

将 LC50 页岩陶粒混凝土与 C50 普通混凝土的应力-应变曲线相比较可知: 1) 上升段相似; 2) 对于下降段, 在同等应力条件下, 陶粒混凝土较普通混凝土的应变大(如峰值应变约 700×10^{-6}), 这表明

陶粒混凝土的延性较好。

由各纤维混凝土的峰值应力比较可知, 其峰值应力与延性遵循同一规律, 即钢纤维陶粒混凝土 > 聚丙烯纤维陶粒混凝土 > 仿钢纤维陶粒混凝土 > 仿钢纤维 + 聚丙烯纤维。

根据试验结果和 JGJ 12-2006 《轻骨料混凝土结构设计规程》中推荐公式, LC50 页岩陶粒混凝土分段式应力-应变方程如式 (2) 所示。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = 1.5 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - 0.5 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (2a)$$

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{(b+2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}}{1 + b \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2} \quad \varepsilon > \varepsilon_0 \quad (2b)$$

式中: 符号规定同 JGJ 12-2006; b 取 -1.868。

4.2 弹性模量

本试验中,页岩陶粒混凝土的轴心抗压强度为 51.78 MPa,在 20%~40% 的抗压强度范围内处于弹性变形阶段,因此选取 20%~40% 抗压强度范围

内的控制荷载和纵向形变作为计算弹性模量的依据。其中,实测弹性模量和由 JGJ 51—2002 中的公式计算得到的理论弹性模量(干表观密度取表 8 中的实测值 1 828.2 kg/m³)如表 14 所示。

表 14 弹性模量的试验结果与理论结果

Table 14 The test results and theoretical results of elastic modulus

编号	F/kN	占轴心抗压强度比例/%	σ/MPa	$E/10^3 MPa$	$f_{cu,k}/MPa$	$E_t/10^3 MPa$	相对误差/%
5-1	110.74	20.3	10.52	28.31	55.7	27.558	2.73
	155.26	28.5	14.75	27.69	55.7		0.48
	193.37	35.5	18.37	27.45	55.7		0.39

注: F 表示控制荷载; σ 表示应力; E 表示实测弹性模量; E_t 表示理论弹性模量; $f_{cu,k}$ 表示立方体抗压强度标准值。

由表 14 可知,弹性模量的实测值与理论计算值非常接近,说明本试验结果的可靠性以及所提出的应力-应变模型的合理性。

表 15 地震力作用下不同混凝土结构的层间位移角

Table 15 The displacement angles between layers for two kinds of concrete structures under the action of earthquake force

类型	周期/s	结构总质量/t	最大层间位移角	
			X 方向	Y 方向
LC40 轻骨料混凝土 (12 个标准层)	2.066 7	53 784.375	1/5 167	1/4 240
C40 普通混凝土 (11 个标准层)	2.053 9	53 886.359	1/4 399	1/3 701

5 建筑结构热工模拟计算及造价分析

5.1 工程概况

焦作市某大厦为九层框架结构,属中高层建筑^[14],无地下室,长 46.8 m,宽 15.9 m,建筑高度 31.2 m,层高 3.3 m,建筑面积 6 924.24 m²。楼梯间采暖,采暖期天数为 98 d^[15],采暖期室外平均温度为 1.4 °C^[15],建筑体积 22 850 m³,换气体积 V 为 14 852.49 m³。

5.2 热工模拟计算

本方案中,框架结构采用承重页岩陶粒混凝土,内、外墙均分别采用 100 mm 厚、200 mm 厚粉煤灰砌块,20 mm 厚陶砂发泡保温砂浆(导热系数为 0.106 W/(m²·K)),屋顶为不上人屋面,采用发泡页岩陶砂(陶粒)混凝土(导热系数为 0.141 3 W/(m²·K)),由文献[15]中的公式计算可得,采暖耗煤量为 4.72 kg/m²。根据 1980 年我国通用设计能耗水平(耗煤量为 25.2 kg/m²),可知本方案的节能率为 79.9%。由文献[12]可知,若框架结构采用普通混凝土,外墙外保温采用聚苯板保温,其节能率为 67.8%,采暖耗煤量为 8.113 kg/m²。

分别将钢纤维陶粒混凝土框架结构、聚丙烯纤维陶粒混凝土框架结构、仿钢纤维陶粒混凝土框架结构、混掺仿钢纤维和聚丙烯纤维陶粒混凝土框架结构取代本方案中的页岩陶粒混凝土框架结构,其节能率分别为 76.2%、81.06%、77.62%、81.19%。

如宜昌滨江国际大厦采用了页岩陶粒混凝土框架剪力墙结构,对该工程分别用普通混凝土和陶粒混凝土进行位移角计算,结果如表 15 所示。

由表 15 可知,在地震作用下,轻骨料混凝土标准层层间位移角最大可减少 17.4%,符合各国规范及工程经验^[16]。此外,文献[17]也指出,与普通混

凝土框架结构相比,在 El centro 波作用下,层间位移减小最大可达 24.2%;在天津波作用下,层间位移角减小最大达到 32.0%。因层间位移角的减小对结构破坏起到抑制作用,从而减少地震作用对结构的破坏。

5.3 造价分析

在本工程中,若采用页岩陶粒混凝土,建筑物自重可由原来的 104 986 kN 降至 87 443.73 kN,重量减轻了 17%。因此,原来的桩径可减小 200 mm,每根桩可因此节省 C20 普通混凝土用量 9.33 m³,32 根桩总共可节省混凝土用量 298.56 m³。焦作市 C20 商品混凝土的价格为 270 元/m³,因此仅基础一项即可节省造价约 8.1 万元。综合考虑,可减少劳动强度 20%,减少材料运输重量 30%~40%,降低工程造价 10%。

6 结 语

1) 通过对页岩陶粒混凝土的性能影响分析,采用正交试验的方法,得到了强度等级不低于 LC40 的最佳配合比。即,水泥:粉煤灰:硅灰:陶粒:陶砂:水=1:0.133:0.089:1.156:1.556:0.356,混凝土水泥用量为 450 kg/m³。

2) 对河砂替代页岩陶砂的试验发现,随着替代率增加,混凝土拌合物的和易性逐渐变差,虽然强度有所增大,但均未能超出 0 替代率时的强度。

3) 通过不同纤维掺量试验,表明随着钢纤维掺

量的增加,页岩陶粒混凝土的抗压、抗折和劈拉强度均有所增加,但抗压强度的增幅不大,而抗折强度和劈裂抗拉强度的增加则较为显著,其最佳掺量为2%。其他纤维也有类似规律,其对抗压强度的增强效果依次是:钢纤维、聚丙烯纤维、仿钢纤维、30%聚丙烯纤维+70%仿钢纤维。

4) 由于轻骨料混凝土的孔隙率较大,在轴向荷载作用下,试件横向约束作用较弱,使得全轻页岩陶粒混凝土的轴心抗压强度接近于其立方体抗压强度,二者比值约为0.93。

5) LC50页岩陶粒混凝土与C50的普通混凝土应力-应变曲线类似,但应变较大。各纤维混凝土的峰值应力大。依次为有钢纤维陶粒混凝土>聚丙烯纤维陶粒混凝土>仿钢纤维陶粒混凝土>仿钢纤维+聚丙烯纤维陶粒混凝土。同时,其弹性模量也较低,因此当结构采用轻骨料混凝土时可最大程度提高抗变形能力,从而减少地震作用对结构的破坏,因此更适宜于抗震、防爆等结构。抗震验算结果也证明了这一观点。

6) 通过对焦作市一具体建筑的框架结构分别采用上述不同种类混凝土的热工模拟计算结果可知,当采用页岩陶粒混凝土,内、外墙均采用20mm厚陶砂发泡保温砂浆,屋顶保温也采用发泡页岩陶砂(陶粒)混凝土时,节能率为79.9%,满足65%节能标准。同时,可减轻劳动力强度20%,减少材料运输重量30%~40%,降低工程造价10%。

参考文献

[1] 姚燕. 新型高性能混凝土耐久性的研究与工程应用[M]. 北京: 中国建筑材料工业出版社, 2004: 23-57.

[2] 高振华,郭玉顺,木村薰,等. 高性能轻骨料的生产、性能及成因剖析[J]. 混凝土, 2001(2): 3-6.

[3] 王玉,杨健辉,吕凌艳,等. 基于陶粒骨料的混凝土试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 635-637.

[4] 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[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会第十五次年会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002: 787-793.

[5] Melby K, Jordet E A, Hansvold C. Long-Span Bridges in Norway Constructed in High-Strength LWA Concrete [J]. Engineering Structures, 1996, 18(11): 845-849.

[6] Gao J M, Sun W, Morino K. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High-Strength Lightweight Concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(1): 307-313.

[7] JGJ 51-2002 轻骨料混凝土技术规程[S].

[8] Lionello, Bortolotti. Interdependence of Concrete Strength Parameters [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(1): 25-26.

[9] 王海龙. 轻骨料混凝土早期力学性能与抗冻性能的试验研究[D]. 包头: 内蒙古农业大学, 2009.

[10] 宋小雷,孙燕秋,曾志兴. 钢纤维陶粒混凝土基本力学性能的试验[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 81-83.

[11] 霍俊芳. 钢纤维改善轻骨料混凝土力学性能研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(12): 96-99.

[12] 王玉. 基于结构保温的高性能陶粒混凝土试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.

[13] 吴平安,刘宜平,杨洁,等. 高强高性能混杂纤维轻骨料混凝土的试验研究[C]//中国力学学会第18届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 2011: 163-169.

[14] GB 50096-2011 住宅设计规范[S].

[15] 徐占发. 建筑节能技术实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 257-279.

[16] 刘世美. 地震作用下底框架结构层间位移变形分析[J]. 有色冶金设计, 2011, 38(1): 32-35.

[17] 张广成,彭桂蒸,单礼会,等. 高强陶粒混凝土抗震性能研究[J]. 低温建筑技术, 2010(3): 42-44.

(上接第16页)

2) 双向压弯作用下,试件滞回曲线不够饱满,耗能能力一般。平面外弯矩越大,试件的平面内抗侧承载力越低,极限位移越小,变形能力越差,滞回耗能性能和延性性能也越差。

3) 双向压弯试件的平面外位移随着平面内水平往复荷载的作用而不断增加,且随着试件进入塑性阶段变形增幅明显增大,呈发散趋势。

4) 双向压弯试件底部截面在弹性阶段基本满足平截面假定。

参考文献

[1] 聂建国,陶慕轩,樊健生,等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究

新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 52-60.

[2] 聂建国,卜凡民,樊健生. 低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 74-81.

[3] 陈锦石,张军. 盐城广播电视塔双钢板组合剪力墙结构技术[J]. 施工技术, 2011, 40(15): 17-20.

[4] 吴杰,陈麟,吴珊瑚. 新型高强混凝土组合剪力墙受剪性能研究[J]. 广州大学学报, 2012(1): 77-82.

[5] 陈涛,肖从真,田春雨,等. 高轴压比钢-混凝土组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 1-7.

[6] JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S].

[7] Hitaka T, Matsui C, Sakai J. Cyclic Tests on Steel and Concrete-Filled Tube Frames with Slit Walls [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(6): 707-727.