

文章编号:1673-2049(2008)04-0083-05

自密实轻骨料混凝土配合比设计及 基本力学性能试验

吴智敏, 张小云, 张云国

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:采用全计算法中水量计算公式和固定砂石体积法中粗骨料、砂子的固定体积分数相结合的方法,根据流动扩展度和L槽试验参数优选出强度等级为SCLC40和SCLC50的自密实轻骨料混凝土的配合比。分析了自密实轻骨料混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、弹性模量等主要力学性能参数,并与普通混凝土的基本力学性能进行了对比。结果表明:自密实轻骨料混凝土具有强度高、韧性好、弹性模量小等特点,所得结论为自密实轻骨料混凝土的工程应用提供了参考。

关键词:自密实轻骨料混凝土;力学性能;吸水率;抗压强度

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

Mix Proportion Design and Basic Mechanical Property Experiment of Self-compacting Lightweight Concrete

WU Zhi-min, ZHANG Xiao-yun, ZHANG Yun-guo

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Mix proportions for self-compacting lightweight concretes (SCLC) were chosen by formulas for the water content of overall calculation method and fixed volume content of aggregate method. On the basis of the parameters of flowing diameter and L-box, optimizing mix proportions for SCLC40 and SCLC50 were designed. The parameters of principal mechanical properties of SCLC, such as compression strength, cleavage extension strength, creasing resistance and elastic modulus were analyzed, and the basic mechanical properties of SCLC were compared with normal concrete. The results show that SCLC has higher strength, better tenacity and smaller elastic modulus and so on. The result provides a reference for the project application of SCLC.

Key words: SCLC; mechanical property; water absorbency; compression strength

0 引言

自密实轻骨料混凝土(SCLC)是在自密实混凝土(SCC)的基础上发展起来的,它是用轻骨料代替普通骨料配制成一种表观密度小于 $1\,950\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的新型高性能混凝土。目前各国学者对自密实混凝土

和轻骨料混凝土的研究已经比较成熟。自密实混凝土具有强度高、耐久性好、自动填充成型、改善施工环境等优点,同时在高流动性条件下粗骨料易下沉造成离析现象,影响混凝土质量;轻骨料混凝土具有密度小、耐久性好、弹性模量小、抗震性能好和保温、隔声、防潮等优点,但由于骨料本身密度小,容易

引起轻骨料上浮,导致混凝土不均匀而出现分层现象,使得混凝土质量下降。自密实轻骨料混凝土兼有自密实混凝土和轻骨料混凝土的特性,同时可克服轻骨料混凝土在大坍落度条件下轻骨料易于上浮、自密实混凝土大流动性条件下普通骨料易于下沉的缺点。自密实轻骨料混凝土在高层建筑、防火结构、抗震结构、大跨度屋面、桥梁、隧道、浮式结构和海洋工程等领域有着广泛的应用前景。

目前各国对自密实轻骨料混凝土的研究还很少。从现有的文献来看,对自密实轻骨料混凝土的研究主要是基于自密实混凝土的研究方法,即将普通自密实混凝土中的石子替换成轻骨料,并参考轻骨料混凝土的试验研究方法对自密实轻骨料混凝土进行试验研究和性能评价。

Choi 等^[1]在研究自密实轻骨料混凝土的配合比设计时,引进压缩系数 P_f ,即所有粗骨料和细骨料在压实状态下的密度和松散状态下的密度比值,通过多次调整 P_f ,得到了自密实轻骨料混凝土的配合比。这种方法就是参考了 Su 等^[2]关于自密实混凝土配合比的设计方法。吴中伟等^[3]提出了用固定砂石体积法配制自密实轻骨料混凝土。这种方法固定粗骨料体积为固体体积的 50%,细骨料体积为砂浆体积的 40%,根据工作性能的要求反复调试确定最终配合比。此方法经验的成分比较多,并且结果的离散性比较大。

对自密实轻骨料混凝土的基本力学性能的研究主要集中在轻骨料对混凝土力学性能的影响。Kobayashi^[4]通过试验发现表面粗糙的轻骨料自密实混凝土比表面光滑的轻骨料自密实混凝土抗压强度更高一些。Choi 等根据试验数据提出的自密实轻骨料混凝土的效率(混凝土的抗压强度与密度的比值)比普通混凝土高。

本文中采用全计算法和固定砂石体积法相结合的方法,通过多次实验室试配,根据流动扩展度和 L 槽试验参数优选出强度等级为 SCLC40 和 SCLC50 的自密实轻骨料混凝土的配合比。这种方法实现了自密实轻骨料混凝土配合比设计中理论与试验的结合。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)和《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)的试验方法,对自密实轻骨料混凝土 SCLC40 和 SCLC50 的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、静弹性模量等主要力学性能与普通骨料自密实混凝土、普通混凝土进行了对比研究,得出了自密实轻骨料混凝土强度高、韧性好、弹性模量小等结论。

1 试验材料

水泥采用大连小野田普通硅酸盐水泥 P. O 42.5R 型号水泥,其性能指标见表 1。粉煤灰采用秦皇岛一级粉煤灰,细骨料采用大连普通河砂,粗骨料采用宜昌页岩陶粒。页岩陶粒是以风化页岩为主要原料,并经过科学的选择配料及工艺处理过程而形成的一种新型节能建材,它具有强度高、重度小、吸水率低、保温、隔热、所配置的混凝土抗震性好等特点。试验采用 2 种页岩陶粒类型——圆球型和碎石型。这 2 种骨料均为 5~20 mm 的连续粒径,其主要的物理力学性能和吸水率如表 2、3 所示。减水剂采用西卡(SIC)3301。

表 1 试验用水泥性能指标

Tab. 1 Performance Indexes of Cement in Experiment				
初凝时间/ min	终凝时间/ min	不同龄期(d)下的抗压强度/MPa		安定性
		3	28	
1~40	5~30	≥25.0	≥46.0	合格

注:安定性采用煮沸法测定。

表 2 页岩陶粒的主要物理力学性能

Tab. 2 Principal Physical and Mechanical Properties of Shale Haydite					
表观密度/ (kg·m ⁻³)	筒压强度/ MPa	不同粒径(mm)的通过率/%			
		<5	5~10	10~16	>16
1 363	6.0	16.6	43.6	25.7	14.1

表 3 页岩陶粒的吸水率

Tab. 3 Water Absorbencies of Shale Haydite					
陶粒类型	不同时间(h)下的吸水率/%				
	0.5	1.0	2.0	6.0	24.0
圆球型	2.66	2.71	2.48	2.73	4.00
碎石型	2.89	3.33	3.25	3.42	4.00

由于上述 2 种类型骨料属同一种材料,它们的性能都是相同的,故不加区分。

2 配合比设计

配制自密实轻骨料混凝土的关键是使其流动性和抗离析性相统一^[5],即保证混凝土拌和物在大流动性条件下,轻骨料不上浮、不漂移,具有较好的和易性。本文中采用全计算法^[6]与固定砂石体积法^[7]相结合的方法,并通过大量试配试验优选出了强度等级为 SCLC40 和 SCLC50 的自密实轻骨料混凝土的配合比。

2.1 计算原理

固定砂石体积法是根据高流动自密实混凝土的流动性、抗离析性和配合比各因素之间的平衡关系,在试验研究的基础上得到的一种能较好适应高流动

自密实混凝土特点和要求的配合比计算方法。首先设定每立方米混凝土中粗骨料的松堆体积分数为 50%~55%,计算出粗骨料用量和砂浆含量;其次设定砂浆中砂的体积分数为 42%~44%可得到砂的用量和浆体的含量;最后根据传统水胶比定则和胶凝材料中的掺和料比例计算用水量、胶凝材料用量和水泥及掺和料各自的用量。

全计算法的基本假设是混凝土各组成材料(固、气、液三相)具有体积加和性;砂石的空隙由干砂浆填充;干砂浆的空隙由水填充;干砂浆由水泥、细掺料、砂和空气间隙所组成。笔者根据以上假设建立了普遍使用的混凝土体积模型,推导出用水量和砂率的计算公式,并结合传统的水胶比定则即可全面定量地确定混凝土各组成材料的用量。

2.2 各组成材料用量计算过程

粗骨料用量为

$$m_g = \alpha \rho'_g \quad (1)$$

式中: m_g 为粗骨料用量; α 为粗骨料的固定体积分数,本试验中取 $\alpha=51\%$; ρ'_g 为粗骨料的堆积重度。

砂子用量为

$$m_s = \beta V_m \rho_s \quad (2)$$

式中: m_s 为砂子用量; β 为砂子的固定体积分数,本试验中取 $\beta=0.43$; V_m 为砂浆体积; ρ_s 为砂子的表观密度。

水用量为

$$V_w = (1 - V_g - V_s - V_a) \left[1 + \frac{1}{\rho_c (1 - \varphi) + \varphi \rho_f} \frac{m(c+f)}{m(w)} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: V_w 为水用量; V_g 、 V_s 分别为粗骨料和砂子的体积; V_a 为含气量,取 $V_a=1\%$; ρ_c 、 ρ_f 分别为水泥密度和粉煤灰密度; φ 为粉煤灰体积掺量(体积分数); $\frac{m(c+f)}{m(w)}$ 为胶水比, $m(c+f)$ 为胶凝材料用量, $m(w)$ 为水的用量。

胶凝材料用量为

$$m(c+f) = \frac{V_w}{m(w)/m(c+f)} \quad (4)$$

$$m(c) = (1 - x)m(c+f) \quad (5)$$

$$m(f) = xm(c+f) \quad (6)$$

式中: x 为掺和料掺量(质量分数,下文同),本试验中取 $x=30\%$; $m(c)$ 、 $m(f)$ 分别为水泥和粉煤灰用量。

高效减水剂用量:根据具体情况高效减水剂的质量分数在 1%~2%之间取值。

2.3 试验结果

通过实验室试配,对比不同砂率、粉煤灰及减水

剂用量下 SCLC40 和 SCLC50 的流动扩展度和 L 槽试验,获取的自密实轻骨料混凝土最优配合比及工作性能试验结果如表 4、5 所示。

表 4 SCLC 的最优配合比

Tab. 4 Optimizing Mix Proportions of SCLC

骨料类型	强度等级	各材料用量/(kg·m ⁻³)					减水剂质量分数/%
		水泥	粉煤灰	砂子	粗骨料	水	
碎石型	SCLC40	396.9	170.1	780.3	416.0	187.1	1.20
	SCLC50	425.0	182.2	787.0	408.0	176.1	2.00
圆球型	SCLC40	396.9	170.1	780.3	416.0	187.1	1.10
	SCLC50	424.9	182.1	787.0	408.0	176.1	1.80
普通骨料	NASCC40	396.9	170.1	780.3	808.8	187.1	1.50

注:NASCC 表示普通骨料自密实混凝土,粉煤灰掺量 30%。

表 5 工作性能试验结果

Tab. 5 Test Results for Workability

参 数	圆球型骨料		碎石型骨料	
	SCLC40	SCLC50	SCLC40	SCLC50
流动扩展度 L/mm	705	735	760	730
T_{500} /s	6.1	8.0	4.7	8.8
L 槽通过率/%	84	94	98	94

注: T_{500} 为混凝土流动扩展度直径达到 500 mm 所用时间。

试验结果表明:根据优选出来的配合比配制的自密实轻骨料混凝土的基本工作性能符合欧洲规范 EFNARC 对二级自密实混凝土的规定(流动扩展度 L 为 660~750 mm; $T_{500} > 2$ s;L 槽通过率则大于等于 80%)。

图 1、2 分别为自密实轻骨料混凝土流动扩展度试验图及试件硬化后切开的断面。从图 1、2 中可以看出,混凝土拌和物流动性很好,没有离析现象。从图 2 还可以看出,该混凝土试件轻骨料分布均匀,无上浮的现象。

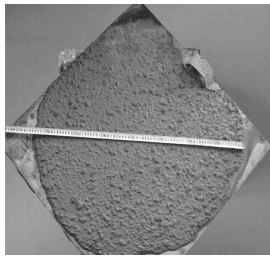


图 1 SCLC 扩展度

Fig. 1 Divergence of SCLC

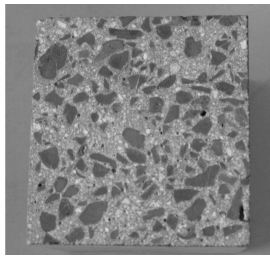


图 2 SCLC 断面

Fig. 2 Section of SCLC

3 力学性能试验

3.1 抗压强度

试验采用尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试件,成型后在温度为(20±2)℃、相对湿度

大于等于 95% 的标准条件下养护,测出 28 d 的抗压强度。试验对预湿骨料、粉煤灰掺量变化的自密实轻骨料混凝土试件和普通自密实轻骨料混凝土试件抗压强度进行了对比,试验结果见表 6。

表 6 SCLC 的抗压强度
Tab. 6 Compression Strengths of SCLC

骨料类型	圆球型		碎石型					普通骨料	
	SCLC40	SCLC50	SCLC40	SCLC50	SCLC50(YS)	SCLC50(F35)	SCLC50(F25)	NASCC50	NAC50
抗压强度	31. 81	38. 52	42. 70	48. 50	46. 31	40. 89	48. 30	49. 90	48. 80

注:YS 为预湿轻骨料;F35 为粉煤灰掺量 35%;F25 为粉煤灰掺量 25%;NAC 为普通混凝土。

从表 6 可以看出:相同强度等级下,碎石型自密实轻骨料混凝土的抗压强度高于圆球型自密实轻骨料混凝土,因为碎石型轻骨料表面粗糙、有棱角,可与水泥浆更好地黏结,提高了骨料与水泥浆的黏结强度,有利于增强混凝土的整体抗压强度。相同强度等级下,轻骨料混凝土强度低于普通骨料混凝土,其原因在于轻骨料本身筒压强度低于普通骨料。同条件下预湿轻骨料自密实混凝土的强度低于没有预湿的情况,其原因可能在于不预湿的轻骨料在拌和物中吸收骨料周围的水分,降低了水灰比,从而提高了骨料之间的黏结强度。相反地,预湿轻骨料在拌和物中释放水分,提高了水灰比,降低了黏结强度;其他条件相同时,粉煤灰的掺量越大强度越小,其原因在于粉煤灰的水化反应弱于水泥;普通骨料自密实混凝土抗压强度要略高于普通混凝土。

3.2 抗折强度

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002) 进行自密实轻骨料混凝土劈裂抗折强度试验。该试验中所采用的试件尺寸为 150 mm×150 mm×400 mm,加载速率为 0.05~0.08 MPa·s⁻¹,记录破坏荷载及破坏位置。试件破坏时折断面位于 2 个集中荷载之间。为便于比较,还进行了普通混凝土抗折试验,试验结果见表 7。

表 7 SCLC 的抗折强度

Tab. 7 Flexural Strengths of SCLC

骨料类型	强度等级	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	折压比
圆球型	SCLC40	3. 26	31. 81	1/9. 76
	SCLC50	2. 75	38. 52	1/14. 01
碎石型	SCLC40	2. 95	42. 70	1/14. 47
	SCLC50	3. 69	48. 50	1/13. 14
普通骨料	NASCC50	4. 53	49. 90	1/11. 02
	NAC50	4. 52	48. 80	1/10. 80

从表 7 可以看出:相同强度等级下,碎石型自密实轻骨料混凝土的抗折强度大于圆球型自密实轻骨料混凝土;相同骨料类型的自密实轻骨料混凝土,随着强度等级的增加抗折强度呈增加趋势;普通骨料自密实混凝土和普通混凝土抗折强度大于自密实轻

骨料混凝土;相同强度等级下,折压比从大到小排序为普通混凝土、普通骨料自密实混凝土、碎石型自密实轻骨料混凝土、圆球型自密实轻骨料混凝土。

3.3 劈裂抗拉强度

由于直接测量混凝土的抗拉强度有一定难度,目前用劈裂抗拉法间接测定。混凝土 28 d 劈裂抗拉强度与 28 d 立方体抗压强度之比(拉压比) 可以反映混凝土的脆性。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002) 进行自密实轻骨料混凝土劈裂抗拉强度试验,试验采用尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试件,试验结果见表 8。

表 8 SCLC 的劈裂抗拉强度比较

Tab. 8 Comparisons of Splitting Tensile Strengths of SCLC

骨料类型	强度等级	劈裂抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	拉压比
圆球型	SCLC40	3. 07	31. 81	1/10. 36
	SCLC50	3. 46	38. 52	1/11. 13
碎石型	SCLC40	2. 93	42. 70	1/14. 57
	SCLC50	3. 10	48. 50	1/15. 65
	SCLC50(YS)	4. 43	46. 31	1/10. 45
普通骨料	NASCC50	3. 27	49. 90	1/15. 26
	NAC50	3. 33	48. 80	1/14. 65

从表 8 可以看出:相同骨料类型的自密实轻骨料混凝土拉压比随着强度的增加而减小,表明强度越高脆性越大;相同强度等级下,碎石型自密实轻骨料混凝土拉压比小于圆球型自密实轻骨料混凝土,表明碎石型自密实轻骨料混凝土的脆性更大;相同强度等级下自密实轻骨料混凝土的拉压比值略小于普通混凝土,表明自密实轻骨料混凝土的脆性要大于普通混凝土;相同强度等级下,预湿自密实轻骨料混凝土的拉压比小于无预湿的情况,说明预湿自密实骨料混凝土的脆性大。从劈裂试验现象来看,劈开自密实轻骨料混凝土试件时,轻骨料本身直裂,而普通混凝土的开裂大部分在水泥浆与骨料的黏结界面处。这主要还是由于轻骨料筒压强度较普通骨料低的缘故。

3.4 弹性模量

弹性模量是材料在弹性变形阶段内应力-应变

的比值。它表征材料抵抗弹性变形的能力,反映材料发生弹性变形的难易程度。本试验采用静态应变采集系统记录试验数据,试件尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm,骨料类型为碎石型陶粒。试验步骤:①测出试件的 28 d 轴心抗压强度 f_{cp} 值;②用 30%轴心抗压强度的荷载值对试件预压 3 次;③以基准应力 0.5 MPa 和 30%轴心抗压强度时的荷载逐级反复加载、卸载(每次加载持续时间为 30 s),分别记录试件两侧基准应力 0.5 MPa 和 10%、20%、30%轴心抗压强度所对应的变形值;④计算静弹性模量和泊松比,求平均值,试验结果见图 3、4。

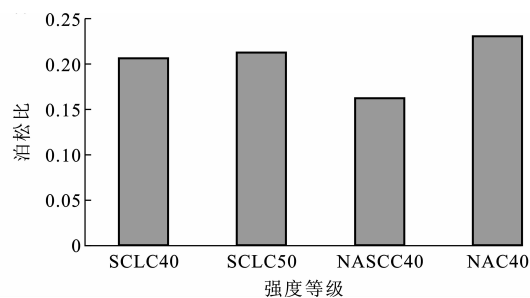


图 3 SCLC 的弹性模量

Fig. 3 Elastic Moduli of SCLC

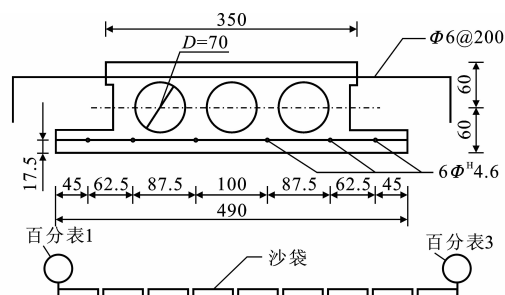


图 4 SCLC 的泊松比

Fig. 4 Poisson's Ratios of SCLC

从图 3、4 中可以看出,自密实轻骨料混凝土强度越高,弹性模量越大,泊松比越大。这说明强度越高,混凝土抵抗变形能力越强;相同强度等级下,自密实轻骨料混凝土弹性模量和泊松比小于普通混凝土,其原因在于自密实轻骨料混凝土应用了高效减水剂,降低了水的用量,胶凝材料用量相对增加,变形也随之增加。

4 结 语

(1)应用圆球型和碎石型 2 种类型的页岩陶粒,通过计算和试配相结合的方法优选出了表观密度小于 $1\,950\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,流动扩展度为 $(750\pm 50)\text{ mm}$,强度等级为 SCLC40 和 SCLC50 的结构用高强自密实轻骨料混凝土的配合比。

(2)轻骨料的筒压强度、粒径级配、颗粒形状和

吸水率对自密实轻骨料混凝土的力学性能起着至关重要的作用。碎石型陶粒与砂浆界面黏结强度明显大于圆球型陶粒。

(3)自密实轻骨料混凝土的强度低于相同等级的普通混凝土,粉煤灰的掺量越大,强度越低。但是由于自密实轻骨料混凝土的密度小,所以自密实轻骨料混凝土的强度值要远远大于普通混凝土。

(4)自密实轻骨料混凝土的强度大于普通轻骨料混凝土。

(5)自密实轻骨料混凝土比普通混凝土韧性好,弹性模量小,结构自振周期小,有利于结构的抗震和提高结构的可靠性。这是由于自密实轻骨料混凝土胶凝材料用量多于普通混凝土。

参考文献:

References:

- [1] CHOI Y W, JIM Y J, SHIN H C, et al. An Experimental Research on the Fluidity and Mechanical Properties of High-strength Lightweight Self-compacting Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (12): 1595-1602.
- [2] SU N, SUH K C, CHAI H W. A Simple Mix Design Method for Self-compacting Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31 (12): 1799-1807.
- [3] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High Performance Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [4] KOBAYASHI K. Characteristics of Self-compacting Concrete in Fresh State with Artificial Light-weight Aggregate [J]. Journal of the Society of Materials Science, 2001, 50 (9): 1021-1027.
- [5] CHANG P K. An Approach to Optimizing Mix Design for Properties of High Performance Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 (4): 623-629.
- [6] 陈建奎, 王栋民. 高性能混凝土 (HPC) 设计新法——全算法 [J]. 硅酸盐学报, 2000, 28 (2): 194-198.
CHEN Jian-kui, WANG Dong-min. New Mix Design Method for HPC — Overall Calculation Method [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28 (2): 194-198.
- [7] 余志武, 潘志宏, 谢友均, 等. 浅谈自密实高性能混凝土配合比的计算方法 [J]. 混凝土, 2004 (1): 54-57.
YU Zhi-wu, PAN Zhi-hong, XIE You-jun, et al. Comments on Mix Calculation Method of Self Compacting High Performance Concrete [J]. Concrete, 2004 (1): 54-57.