

CFG 桩复合地基桩身材料配合比室内试验研究

王 飞¹, 杨金利²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043;

2. 西北综合勘察设计院, 西安 710003)

摘 要: 结合某铁路客运专线 CFG 桩复合地基处理, 对构成 CFG 桩的桩身材料进行了一系列物理力学特性试验研究。试验研究结果确定了合理的 CFG 桩桩身材料配合比, 得出的配合比可以满足工程不同的强度(C15、C20)要求和施工工艺(振动沉管施工、长螺旋钻管内泵压施工)要求, 可供相关工程参考。在实际应用中, 应尽早利用立方体试件 7 d 龄期的抗压强度, 或棱柱体试件 7 d 龄期的轴心抗压强度, 估算 28 d 强度, 以缩短建设周期, 降低工程成本。试验结果表明粗骨料粒径对于混凝土试件弹性变形模量的影响不大, 只要满足施工工艺要求, 不必考虑粗骨料粒径对于桩身强度的影响。

关键词: CFG 桩; 桩身材料; 配合比; 试验研究

作者简介: 王飞(1967—), 男, 陕西杨凌人, 高级工程师, 主要从事路基工程的勘察、设计与咨询。

0 引 言

水泥、粉煤灰、碎石、石屑加水拌和形成的高黏结强度桩, 简称 CFG 桩。桩与桩间土以及褥垫层一起形成复合地基。CFG 桩 1997 年被列为国家级工法, 在国内地基处理领域得到广泛的应用。随着 CFG 桩由最初的振动沉管打桩机施工, 发展到目前的长螺旋钻管内泵压 CFG 桩混合料施工, 成桩工艺对桩身材料配合比以及桩身混合材料的要求发生了很大变化。

本文的试验研究, 以某铁路客运专线路基 CFG 桩复合地基处理为依托, 结合 CFG 桩不同的施工工艺, 通过不同的坍落度、不同的粗骨料粒径、不同的强度要求, 采用立方体和棱柱体两种不同 CFG 试件, 分别研究 7 d、14 d、28 d、90 d 龄期抗压强度、割线模量, 计算分析不同龄期试件的弹性抗压强度及弹性模量; 分析研究试块不同龄期抗压强度关系、割线模量关系; 分析研究不同龄期立方体试件抗压强度与棱柱体试件轴心抗压强度的关系。通过试验研究, 力求寻找试件 7 d 龄期的各项指标与后期龄期指标值之间的关系, 解决实际工程中试验控制工期的难题, 确保 CFG 桩的设计与施工质量, 达到缩短工期、提高效益的目标。

1 试验研究内容、方法及预期目标

1.1 试验研究内容

为使试验研究具有广泛的指导意义, 满足不同施工工艺, 并使试验结果具有可对比性, 试验采用两种不同碎石粒径(5~20 mm、5~31.5 mm)、两种坍落度(30~50 mm、160~200 mm)、两种试配强度(C15、C20)、两种试件尺寸(立方体、棱柱体)共组成八个配合比, 分四个龄期(7 d、14 d、28 d、90 d)开展试验研究, 通过坍落度试验和 7 d 抗压强度值调整确定桩身材料配合比以及八种配合比试件的集料用量。

各种组合情况配合比的试件个数及编号具体见表 1 和表 2。

1.2 试验研究方法

通过室内试验与分析研究相衔接的方法, 根据工程实际需要开展试验研究。

1.3 试验研究预期目标及成果内容

(1) 立方体试块

① 立方体试件 7 d、14 d、28 d、90 d 抗压强度试验;

② 不同龄期立方体试件的抗压强度及割线模量;

③ 不同龄期立方体试件的弹性抗压强度及弹

- 性模量；
 (2) 棱柱体试块
 ① 棱柱体试件 7 d、14 d、28 d、90 d 轴心抗压强度试验；
 ② 统计分析棱柱体试块不同龄期棱柱体轴心抗压强度 f_{ck} 和割线模量；
 ③ 棱柱体试块不同龄期的弹性抗压强度及弹性模量；
 (3) 统计分析不同龄期立方体试件抗压强度与棱柱体试件轴心抗压强度的关系。

表 1 各种组合情况配合比的试件个数及编号

强度等级	坍落度 (mm)	主要试验项目	7 d		14 d		28 d		90 d	
			个数	编号	个数	编号	个数	编号	个数	编号
$f_{cu} \geq 15$ MPa	30~50	立方体抗压强度	12	F11C7-1~ F11C7-12	12	F11C14-1~ F11C14-12	12	F11C28-1~ F11C28-12	12	F11C90-1~ F11C90-12
		棱柱体抗压强度	12	F11P7-1~ F11P7-12	12	F11P14-1~ F11P14-12	12	F11P28-1~ F11P28-12	12	F11P90-1~ F11P90-12
	160~200	立方体抗压强度	12	F12C7-1~ F12C7-12	12	F12C14-1~ F12C14-12	12	F12C28-1~ F12C28-12	12	F12C90-1~ F12C90-12
		棱柱体抗压强度	12	F12P7-1~ F12P7-12	12	F12P14-1~ F12P14-12	12	F12P28-1~ F12P28-12	12	F12P90-1~ F12P90-12

注：碎石 5~20 mm 粒径的配比编号 1~6；碎石 5~31.5 mm 粒径的配比编号 7~12，共计 192 个试件。

表 2 各种组合情况配合比的试件个数及编号

强度等级	坍落度 (mm)	主要试验项目	7 d		14 d		28 d		90 d	
			个数	编号	个数	编号	个数	编号	个数	编号
$f_{cu} \geq 20$ MPa	30~50	立方体抗压强度	12	F21C7-1~ F21C7-12	12	F21C14-1~ F21C14-12	12	F21C28-1~ F21C28-12	12	F21C90-1~ F21C90-12
		棱柱体抗压强度	12	F21P7-1~ F21P7-12	12	F21P14-1~ F21P14-12	12	F21P28-1~ F21P28-12	12	F21P90-1~ F21P90-12
	160~200	立方体抗压强度	12	F22C7-1~ F22C7-12	12	F22C14-1~ F22C14-12	12	F22C28-1~ F22C28-12	12	F22C90-1~ F22C90-12
		棱柱体抗压强度	12	F22P7-1~ F22P7-12	12	F22P14-1~ F22P14-12	12	F22P28-1~ F22P28-12	12	F22P90-1~ F22P90-12

注：碎石 5~20 mm 粒径的配比编号 1~6；碎石 5~31.5 mm 粒径的配比编号 7~12，共计 192 个试件。

2 桩身配合比及集料设计试验

CFG 桩桩身材料配合比设计与试配是 CFG 桩桩基工程的重要组成部分，对保证工程质量、控

制工程投资起着重要作用。确定 CFG 桩混合料配合比的主要参数包括：用水量、混合料密度、石屑率、水灰比、粉灰比等。试验研究在参阅大量现有资料，进行若干次试配后，经过优化和筛选，最终确定的桩身材料定型配合比见表 3。

表 3 桩身材料定型配合比

配合比	水灰比 (%)	水泥 (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)	石屑 (kg/m ³)	碎石 (kg/m ³)		水 (kg/m ³)	粉灰比 (%)	石屑率 (%)
					5~20 mm	5~31.5 mm			
F11-I	0.99	211	219	445	1117	—	208	1.04	0.28
F12-I	0.92	261	232	403	1 064	—	240	0.89	0.28
F21-I	0.75	286	235	419	1 045	—	215	0.82	0.29
F22-I	0.73	340	211	364	1 037	—	248	0.62	0.26
F11-II	1.00	202	212	452	793	340	201	1.05	0.28
F12-II	0.98	246	239	420	737	316	242	0.97	0.28
F21-II	0.77	266	221	430	755	323	205	0.83	0.28
F22-II	0.75	328	198	407	715	307	245	0.60	0.28

注：1. I 为碎石 5~20 mm 粒径的配比，II 为碎石 5~31.5 mm 粒径的配比；

2. F11、F12 为 $f_{cu,28} \geq 15$ MPa；F21、F22 为 $f_{cu,28} \geq 20$ MPa。

3 CFG 桩立方体试件的物理性能研究

3.1 不同龄期试件的抗压强度及其与 28 d 抗压强度关系研究

表 4 是试验研究得出的不同配合比不同龄期的 CFG 桩立方体试件抗压强度值及其与 28 d 立方体抗压强度的比值。由表 4 可以看出,对于强

表 4 立方体试件不同龄期抗压强度 f_{cu} 及其与 28 d 抗压强度 $f_{cu, 28}$ 比

配合比	7 d 龄期		14 d 龄期		28 d 龄期		90 d 龄期	
	f_{cu} (MPa)	$f_{cu}/f_{cu, 28}$	f_{cu} (MPa)	$f_{cu}/f_{cu, 28}$	f_{cu} (MPa)	$f_{cu}/f_{cu, 28}$	f_{cu} (MPa)	$f_{cu}/f_{cu, 28}$
F11-I	9.17	0.52	11.64	0.66	17.72	1.00	24.17	1.36
F12-I	10.00	0.57	10.53	0.60	17.63	1.00	26.02	1.48
F11-II	9.42	0.56	12.25	0.73	16.82	1.00	24.01	1.43
F12-II	8.85	0.58	12.06	0.79	15.33	1.00	22.98	1.50
平均值	9.36	0.56	11.62	0.70	16.88	1.00	24.30	1.44
F21-I	13.94	0.56	18.35	0.74	24.91	1.00	33.50	1.34
F22-I	13.76	0.60	18.39	0.80	22.91	1.00	39.23	1.71
F21-II	12.44	0.48	17.12	0.66	25.97	1.00	35.45	1.37
F22-II	11.73	0.52	15.98	0.71	22.49	1.00	30.57	1.36
平均值	12.97	0.54	17.46	0.73	24.07	1.00	34.69	1.44

综合两种强度值的 CFG 立方体试件,平均 7 d 的抗压强度达到 28 d 抗压强度的 55%左右;平均 14 d 的抗压强度达到 28 d 抗压强度的 72%左右;平均 90 d 的抗压强度达到 28 d 抗压强度的 144%左右。

度值为 C15 的 CFG 立方体试件,其平均 7 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 56%左右;14 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 70%左右;90 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 144%左右。对于强度值为 C20 的立方体试件,其平均 7 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 54%左右;14 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 73%左右;90 d 抗压强度达到 28 d 抗压强度的 144%左右。

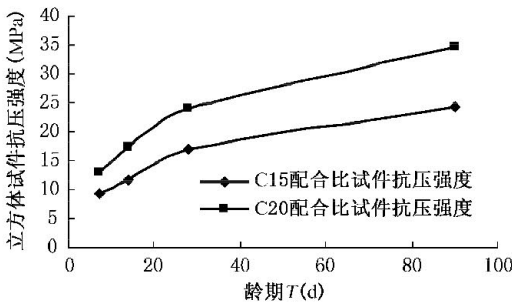


图 1 立方体试件抗压强度 f_{cu} 与龄期 T 的关系曲线

将立方体试件抗压强度 f_{cu} 看作是龄期 T 的函数,从图 1 的关系曲线分析,则 f_{cu} 随龄期 T 单调增长,但增长速率逐渐减慢,函数趋于收敛。而且 F2X(C20)立方体试件抗压强度的增长速率在 28 d 以前明显大于 F1X(C15),但在 28 d 以后两者趋于相等。

3.2 立方体试件不同龄期割线模量分析

割线模量是应力应变曲线上的任意点 M 与原点连线的斜率,割线模量由应力应变曲线上直接得

出。本试验研究中 M 取 50% f_{cu} 和 100% f_{cu} 的点来研究割线模量与龄期的关系,两点的割线模量分别记为 E_{50} 和 E_{100} 。 E_{50} 和 E_{100} 的统计见表 5。

通过分析 E_{50} 和 E_{100} ,CFG 立方体试件的规律性不强,离散性很大,尤其在初期(7~28 d)。这主要是因为此龄期内混凝土强度较低,立方体的受压变形量很小,混凝土受压过程中产生的一些微观裂纹造成的位移相对于变形总量形成突变,在应力应变曲线上形成拐点,引起变形模量的突变,导致 E_{50} 的无明显规律性。

立方体试件割线模量与龄期的关系曲线见图 2。

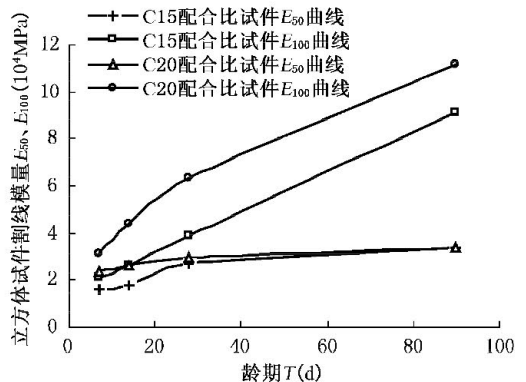


图 2 立方体试件割线模量 E_{100} 、 E_{50} 与龄期 T 的关系曲线

表 5 立方体试件不同龄期割线模量 E_{50} 和 E_{100}

配合比	7 d 割线模量		14 d 割线模量		28 d 割线模量		90 d 割线模量	
	$E_{50}(10^4\text{MPa})$	$E_{100}(10^3\text{MPa})$	$E_{50}(10^4\text{MPa})$	$E_{100}(10^3\text{MPa})$	$E_{50}(10^4\text{MPa})$	$E_{100}(10^3\text{MPa})$	$E_{50}(10^4\text{MPa})$	$E_{100}(10^3\text{MPa})$
F11-I	2.21	2.24	2.23	2.62	2.24	3.67	3.95	9.17
F12-I	1.81	1.91	1.69	2.39	2.91	3.69	2.83	13.43
F11-II	0.86	2.45	1.21	3.34	1.98	4.47	2.93	7.13
F12-II	1.62	1.98	1.94	2.16	3.62	3.80	3.65	6.77
平均值	1.62	2.14	1.77	2.63	2.69	3.91	3.34	9.12
F21-I	2.39	2.82	2.87	4.67	2.52	6.39	2.82	12.07
F22-I	2.80	2.91	2.16	3.22	3.02	4.73	3.27	11.37
F21-II	2.43	3.71	3.30	5.36	2.71	6.92	2.99	11.17
F22-II	1.79	3.20	2.13	4.45	3.62	7.22	4.57	10.13
平均值	2.35	3.16	2.62	4.42	2.97	6.32	3.41	11.18

4 CFG 桩棱柱体试件的物理性能研究

4.1 CFG 桩棱柱体试件不同龄期轴心抗压强度及其与 28 d 轴心抗压强度关系研究

表 6 是试验研究得出的不同配合比不同龄期的 CFG 桩棱柱体试件抗压强度值及其与 28 d 棱柱体抗压强度的比值。通过表 6 分析,对于强度值为 C15 的 CFG 棱柱体试件,其平均 7 d 轴心抗

压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 49%左右;14 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 67%左右;90 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 154%左右。对于强度值为 C20 的棱柱体试件试件,其平均 7 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 51%左右;14 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 72%左右;90 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 163%左右。

表 6 棱柱体试件不同龄期轴心抗压强度 f_{ck} 及与 28 d 轴心抗压强度 $f_{ck,28}$ 比

配合比	7 d 龄期		14 d 龄期		28 d 龄期		90 d 龄期	
	$f_{ck}(\text{MPa})$	$f_{ck}/f_{ck,28}$	$f_{ck}(\text{MPa})$	$f_{ck}/f_{ck,28}$	$f_{ck}(\text{MPa})$	$f_{ck}/f_{ck,28}$	$f_{ck}(\text{MPa})$	$f_{ck}/f_{ck,28}$
F11-I	6.90	0.47	9.16	0.62	14.79	1.00	22.84	1.54
F12-I	7.27	0.48	8.95	0.59	15.19	1.00	22.19	1.46
F11-II	6.99	0.49	10.18	0.72	14.16	1.00	21.33	1.51
F12-II	6.71	0.52	9.57	0.74	12.85	1.00	21.32	1.66
平均值	6.97	0.49	9.47	0.67	14.25	1.00	21.92	1.54
F21-I	10.84	0.49	16.13	0.72	22.34	1.00	33.80	1.51
F22-I	11.25	0.61	14.47	0.78	18.53	1.00	34.95	1.89
F21-II	9.03	0.44	14.14	0.69	20.39	1.00	31.76	1.56
F22-II	8.74	0.49	12.55	0.71	17.71	1.00	27.72	1.57
平均值	9.96	0.51	14.32	0.72	19.74	1.00	32.06	1.63

综合两种强度值的 CFG 棱柱体试件,平均 7 d 的轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 50%左右;平均的 14 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 70%左右;平均的 90 d 轴心抗压强度达到 28 d 轴心抗压强度的 158%左右。

将棱柱体试件轴心抗压强度 f_{ck} 看成是以龄期 T 为变量的函数,则此函数与立方体试件抗压强度与龄期的函数有着相同的增长及收敛特征,即在 28 d 龄期以前,F2X(C20)的强度增长速率大于 F1X(C15)的强度增长速率;28 d 龄期以后,两

者逐渐变小且趋于相等。关系曲线见图 3。

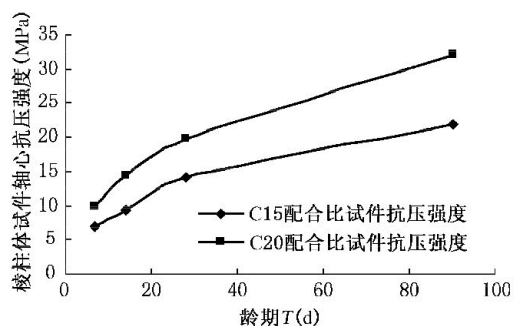


图 3 棱柱体试件轴心抗压强度 f_{ck} 与龄期 T 的关系曲线

4.2 不同龄期弹性模量

棱柱体受压时,在应力应变曲线的原点作一切线,其斜率为混凝土的原点模量,是混凝土的一

项重要力学参数,它反映了混凝土所受应力与所产生应变之间的关系。棱柱体不同龄期弹性模量 E_c 与轴心抗压强度 f_{ck} 见表 7。

表 7 不同龄期弹性模量 E_c 与轴心抗压强度 f_{ck}

序号	配合比	7 d		14 d		28 d		90 d	
		$E_c/10^4\text{MPa}$	f_{ck}/MPa	$E_c/10^4\text{MPa}$	f_{ck}/MPa	$E_c/10^4\text{MPa}$	f_{ck}/MPa	$E_c/10^4\text{MPa}$	f_{ck}/MPa
1	F11-I	1.82	6.90	2.10	9.16	2.44	14.79	2.72	22.84
2	F12-I	1.73	7.27	1.92	8.95	2.37	15.19	3.19	22.19
	1、2 平均值	1.78	7.08	2.01	9.06	2.40	14.99	2.96	22.52
3	F11-II	1.68	6.99	1.94	10.18	2.24	14.16	2.99	21.33
4	F12-II	1.86	6.71	1.98	9.57	2.19	12.85	2.71	21.32
	3、4 平均值	1.77	6.85	1.96	9.88	2.22	13.50	2.85	21.32
	1、2、3、4 平均值	1.77	6.97	1.98	9.46	2.31	14.25	2.90	21.92
5	F21-I	1.98	10.84	2.18	16.13	2.36	22.34	2.78	33.80
6	F22-I	1.98	11.25	2.18	14.47	2.29	18.53	2.68	34.95
	5、6 平均值	1.98	11.04	2.18	15.30	2.32	20.44	2.73	34.38
7	F21-II	1.99	9.03	2.36	14.14	2.73	20.39	3.00	31.76
8	F22-II	1.88	8.74	1.95	12.55	2.26	17.71	2.48	27.72
	7、8 平均值	1.94	8.88	2.16	13.34	2.50	19.05	2.74	29.74
	5、6、7、8 平均值	1.96	9.96	2.17	14.32	2.41	19.74	2.74	32.06

通过研究表明,弹性变形模量随龄期呈单调增长,增长速率随龄期的增大而减小。比较不同配合比的弹性变形模量发现,F1X(C15)在 7 d 和 14 d 的弹性变形模量(1.77、1.98)普遍小于 F2X(C20)的弹性变形模量(1.96、2.17),而在 28 d 和 90 d,随着龄期的增长,F1X(C15)的弹性变形模量(2.31、2.90)赶上甚至超过了 F2X(C20)的弹性变形模量(2.41、2.74)。分析认为主要是 F1X(C15)配合比的粉灰比较大的原因。掺入适当的粉煤灰会对混凝土弹性变形模量产生显著影响。粉煤灰的掺入,会改善混凝土的弹性变形模量,而粉煤灰的活性越好,这种改善的效果越明显。

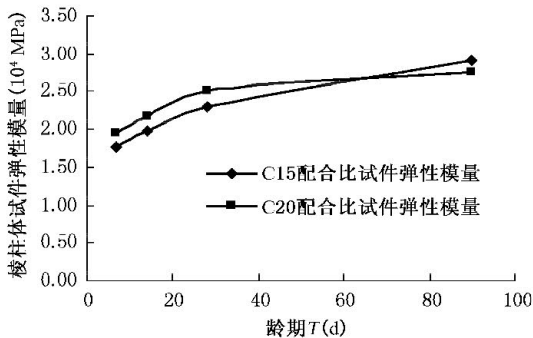


图 4 棱柱体试件弹性模量 E_c 与龄期 T 的关系曲线

弹性变形模量与混凝土的其他力学性能有着密不可分的关系,以棱柱体试件轴心抗压强度为研究对象,由弹性变形模量与龄期的关系曲线(图

4),可看出,随着轴心抗压强度的增大,试件的弹性变形模量也在增大,而且两者成线性比例关系增长。

5 立方体抗压强度与棱柱体轴心抗压强度

对不同龄期立方体抗压强度与棱柱体轴心抗压强度值进行对比分析得出表 8。从表 8 可以看出,对于强度值为 C15 的试件,7 d 时,棱柱体轴心抗压强度大约是立方体抗压强度的 74%;14 d 约是 81%;28 d 约是 84%;90 d 约是 90%;对于强度值为 C20 的试件,7 d 时,棱柱体轴心抗压强度大约是立方体抗压强度的 77%;14 d 约是 82%;28 d 约是 82%;90 d 约是 92%。强度与龄期的关系曲线见图 5。

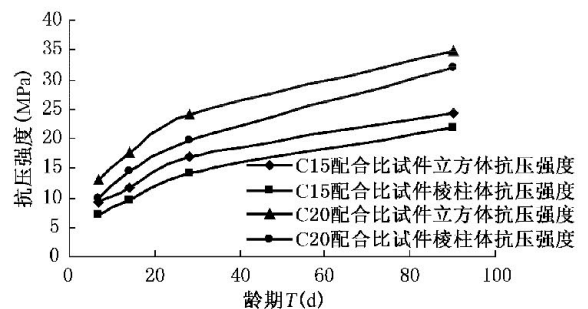


图 5 立方体和棱柱体试件抗压强度 f 与龄期 T 的关系曲线

表 8 不同龄期立方体抗压强度 f_{cu} 与棱柱体轴心抗压强度 f_{ck} 关系

配合比	7 d 龄期			14 d 龄期			28 d 龄期			90 d 龄期		
	f_{cu} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ck}/f_{cu}	f_{cu} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ck}/f_{cu}	f_{cu} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ck}/f_{cu}	f_{cu} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ck}/f_{cu}
F11-I	9.17	6.90	0.75	11.64	9.16	0.79	17.72	14.79	0.83	24.17	22.84	0.94
F12-I	10.00	7.27	0.73	10.53	8.95	0.85	17.63	15.19	0.86	26.02	22.19	0.85
F11-II	9.42	6.99	0.74	12.25	10.18	0.83	16.82	14.16	0.84	24.01	21.33	0.89
F12-II	8.85	6.71	0.76	12.06	9.57	0.79	15.33	12.85	0.84	22.98	21.32	0.93
平均值	9.36	6.97	0.74	11.62	9.46	0.81	16.88	14.25	0.84	24.30	21.92	0.90
F21-I	13.94	10.84	0.78	18.35	16.13	0.88	24.91	22.34	0.90	33.50	33.80	1.01
F22-I	13.76	11.25	0.82	18.39	14.47	0.79	22.91	18.53	0.81	39.23	34.95	0.89
F21-II	12.44	9.03	0.73	17.12	14.14	0.83	25.97	20.39	0.79	35.45	31.76	0.90
F22-II	11.73	8.74	0.75	15.98	12.55	0.79	22.49	17.71	0.79	30.57	27.72	0.91
平均值	12.97	9.96	0.77	17.46	14.32	0.82	24.07	19.74	0.82	34.69	32.06	0.92

通过分析表明,同一强度指标的 CFG 桩试件,棱柱体轴心抗压强度总是小于立方体抗压强度,二者之间呈规则的线性关系:

$$f_{ck} = \alpha f_{cu}$$

6 研究结论与建议

(1) 在实际应用中,应尽早利用立方体试件 7 d 龄期的抗压强度,相对客观的估算 28 d 强度,当其达到或超过 28 d 龄期的 55% 时,一般可以认为其 28 d 龄期强度满足要求。亦可利用棱柱体试件 7 d 龄期的轴心抗压强度,比较客观的估算 28 d 轴心抗压强度,当其达到或超过 28 d 龄期的 50% 时,亦可认为其 28 d 龄期强度满足要求,以缩短建设周期,降低工程成本。

(2) 用立方体试件的割线模量去研究 CFG 试件的其他物理性能是不适宜的,这一点与现行《普通混凝土力学性能试验方法标准》上要求测量弹性模量所用试件为棱柱体试件的规定是一致的。

(3) 通过比较不同骨料粒径的 CFG 试件的弹性变形模量,变化不大,说明粗骨料粒径对于混凝土试件弹性变形模量的影响不大。因此对于 CFG 桩,只要满足成桩的施工工艺,不必再考虑粗骨料粒径对于桩身强度的影响。

(4) 通过分析表明,同一强度指标的 CFG 桩试件,棱柱体轴心抗压强度总是小于立方体抗压强度,二者之间呈规则的线性关系: $f_{ck} = \alpha f_{cu}$ 。这一结论符合混凝土抗压强度的规律。证明试验研究结论正确。

(5) 试验研究采用的八组配合比立方体试件

的抗压强度值都达到了较为理想的结果,由此得出的配合比可供相关工程参考。

(6) 试验研究过程中,通过调查对比,实际应用中不同程度地用卵石取代了部分碎石;用砂取代了石屑,并掺外加剂,从而降低了配合比中的水泥、粉煤灰用量。这种做法可以降低工程造价,但却改变了真正意义上的 CFG 桩配合比,不利于质量控制,因此建议施工中,严格按照设计参数实施,确保 CFG 桩的工程质量。

参 考 文 献

- [1] GB/T14685—2001 建筑用卵石、碎石[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [2] GB/T14684—2001 建筑用砂[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [3] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [4] 王忠德,等. 实用建筑材料试验手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [5] GB50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [6] 张应立. 现代混凝土配合比设计手册[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [7] JGJ55—2000 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京:中国建材工业出版社,2001.
- [8] GB/T50080—2002 普通混凝土拌和物性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [9] 赵顺波,许成祥,周新刚. 混凝土结构设计原理[M]. 上海:同济大学出版社,2004.
- [10] 程文灏,康谷贻,颜德姮. 混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.