

文章编号:1673-9469(2009)04-0008-05

CFG 桩复合地基桩身材料性能研究

李明东,程祖锋,杜西岗,尹磊
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:通过对大掺量Ⅲa级粉煤灰混凝土构成的 CFG 桩身材料进行力学性能方面的室内试验,讨论了抗压强度与材料配合比、龄期之间的关系,并探讨了桩身材料性能对 CFG 桩承载力的影响。结果显示抗压强度均随着胶凝效率的增大而减小,粉煤灰替代水泥率超过 40%后抗压强度仍能满足设计要求,随着龄期的增长,每一类型、一定胶凝效率试件的抗压强度都有显著提高。

关键词:CFG 桩;粉煤灰混凝土;配合比;粉煤灰;抗压强度

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Study on properties of CFG pile composite foundation of pile materials

LI Ming-dong, CHENG Zu-feng, DU Xi-gang, YIN Lei

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, china)

Abstract: This paper analyzes the relationship between the compressive strength material ratio and the age of concrete respectively, and discusses the bearing capacity impacted by the material properties of the pile through the experiments on materials mechanical properties of CFG pile composed of Grade Ⅲ a large dosage of fly ash concrete. The results show that the efficiency of the compressive strength increases with the gel decreasing, and the compressive strength could still meet the design requirements when the replacement rate of fly ash cement is more than 40%; with the increase of the age, all type and some certain cementation efficiency of the specimen compressive strength are improved significantly.

Key words: CFG pile; fly ash concrete; mix proportion; fly ash; compressive strength

水泥粉煤灰碎石桩简称 CFG 桩(Cement Fly-ash Gravel Pile),是由水泥、粉煤灰、碎石、砂和水按一定比例拌合均匀而制成的具有一定粘结强度的桩。其抗压强度与弹性模量接近低标号的混凝土,所以单桩特性与普通混凝土桩^[1]相似。桩身造价低廉、承载力高,并且所用材料为工业废料,兼具环保效应,应用前景非常广阔。

在 CFG 桩桩体材料特性的试验研究方面,通过对 CFG 复合地基桩体材料的室内配比试验,获得了不同配比情况下桩体材料强度的变化规律,提出了 CFG 桩桩体材料配比时应遵循的某些原则和方法^[2]。通过对 CFG 桩复合地基的主要设计参数(桩径、桩长及桩间距)的正交试验计算,分析了其主要设计参数对地基处理效果的显著性影响

水平,提出了 CFG 桩复合地基优化设计的可靠方法^[3]。

“CFG 桩复合地基^[4]”的研究已经趋于成熟,但是其桩身材料性能的研究仍远落后于工程实践,很多问题仍需进一步探讨、实践和总结。以Ⅲa级粉煤灰作为 CFG 桩材料组成成分,超量取代水泥量,以寻求合理的配合比范围和桩身材料性能对 CFG 桩承载力的影响。

1 原材料与混凝土配合比设计

1.1 材料选用

CFG 桩桩身材料由水泥、粉煤灰、碎石、砂和水,按一定比例混和。水泥采用 425 号普通硅酸

表 1 粉煤灰化学成分及其变化范围

Tab.1 Chemical composition and content of fly ash

化学成分	化学成分度 变化范围 / %	典型低钙 粉煤灰 / %	典型高钙 粉煤灰 / %	我国粉煤灰化学成分 一般范围 / %
SiO ₂	10 ~ 70	54.9	39.9	40 ~ 60
Al ₂ O ₃	8 ~ 38	25.8	16.7	1 735
Fe ₂ O ₃	2 ~ 50	6.9	5.8	2 ~ 15
CaO	0.5 ~ 30	8.7	24.3	110
MgO	0.3 ~ 8	1.8	4.6	0.5 ~ 2
SO ₃	0.1 ~ 30	0.6	3.3	0.1 ~ 2
Na ₂ O, K ₂ O	0.4 ~ 16	0.6	1.3	0.5 ~ 4
烧失量	0.3 ~ 30	—	—	1 ~ 26

表 2 A、B、C、F 和 G 类配合比关系

Tab.2 Mix proportion relation of A, B, C, F and G

	Ⅲa 级低钙粉煤灰					Ⅲa 级高钙粉煤灰					
	A、E 类 ^①					B、F 类 ^②					
K	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.5
C7.5	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	C ₅
C20	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	G ₅

注:①粉煤灰超量取代水泥,②对应前列 A、E 类中的砂全部用粉煤灰取代,③粉煤灰超量取代水泥。

盐水泥,粉煤灰选用邯郸热电厂Ⅲa 级粉煤灰,其细度不大于 30%、含水率不大于 1%、烧失量不大于 8%、需水量比不大于 11.5%,粗骨料碎石最大粒径 40mm,细骨料选用中砂。

1.2 粉煤灰

粉煤灰是细骨料,又有低标号水泥的作用,掺入粉煤灰后可明显增强桩体的后期强度。粉煤灰的质量取决于 Al₂O₃ 和 SiO₂ 的含量。它的粒度成分及各种粒度的相对比例也是影响粉煤灰质量的重要指标。粉煤灰的化学成分取决于原煤灰分的化学成分以及燃烧的程度,它的变化范围是很大的。表 1 提供了粉煤灰化学成分最大、最小的变化范围,典型的低钙粉煤灰和高钙粉煤灰的化学成分,以及我国粉煤灰化学成分的一般范围。

1.3 配合比设计

分别按基准混凝土设计了 C7.5, C20 两种强度的配比,得出每立方米基准混凝土所需的水量 W₀、水泥量 C₀ 以及砂率 S/(S+G)。然后对其中一部分水泥用粉煤灰 F 取代。设定混合材料中 F/(C+F)=0.6,同时满足 C₀=C+KF,则可求出在不同 K 的情况下所对应的 C、F。由已知条件按

绝对体积法求出 S、G。这样,就得到不同 K 值下参照基准混凝土 C7.5, C20 的 CFG 桩桩身材料设计配比 W(W=F W₀):G:F:S:G^[5]。

基于上述情况,实验分为六种类型:A、B、C、E、F、G。其中 A、E 类分别为在一定的 k 值下低钙Ⅲa 级粉煤灰部分取代水泥、按 C7.5、C20 进行设计的配比实验;而 B、F 类是对应以 A、E 为基础,仅以低钙Ⅲa 级粉煤灰等体积取代全部中砂 S; C、G 类分别为在一定的 k 值下Ⅲ级低钙粉煤灰全部以Ⅲa 级高钙粉煤灰等体积代换的配比实验。具体结果见表 2。

2 Ⅲa 级低钙粉煤灰实验结果分析

2.1 标准立方体 R_c 与 K 的关系

图 1 中绘出 A、B、E、F 四种类型的配比在各龄期的 R_c-K 关系曲线。显然,对于任何一种类型配比的试件,在同一龄期内,抗压强度 R_c 均随着胶凝效率 K 的增大而减小。K 值的增大,表明单位数量的粉煤灰取代水泥量的增加,则水泥和粉煤灰用量均相应减少,因此 K 的增大必将导致抗压强度 R_c 的降低。本文试图通过试验,找到最佳胶凝效 K,即在给定的某一龄期需达到设计抗压强度条件下,能够恰好达到该设计抗压强度值所

需的胶凝效率 K 称为最佳胶凝效率 K , 具体结果见表 3。

表 3 最佳胶凝率 K 的范围

Tab.3 Range of best cementation efficiency			
龄期	28 d	60 d	90 d
A类 (C7.5)	0.55~0.75	0.75~0.1	—
E类 (C20)	0.1~0.2	0.3~0.4	0.4~0.5

2.2 标准立方体 R_c 与 β_c 的关系

粉煤灰替代水泥率 β_c 是指粉煤灰的水泥当量 kF 与基准混凝土中的水泥量 ($C_0 = C + kF$) 的比率, β_c 与 K 的关系如下

$$\beta_c = \frac{kF}{c + kF} = \frac{k}{c/F + k} = \frac{k}{2/3 + k} \quad (1)$$

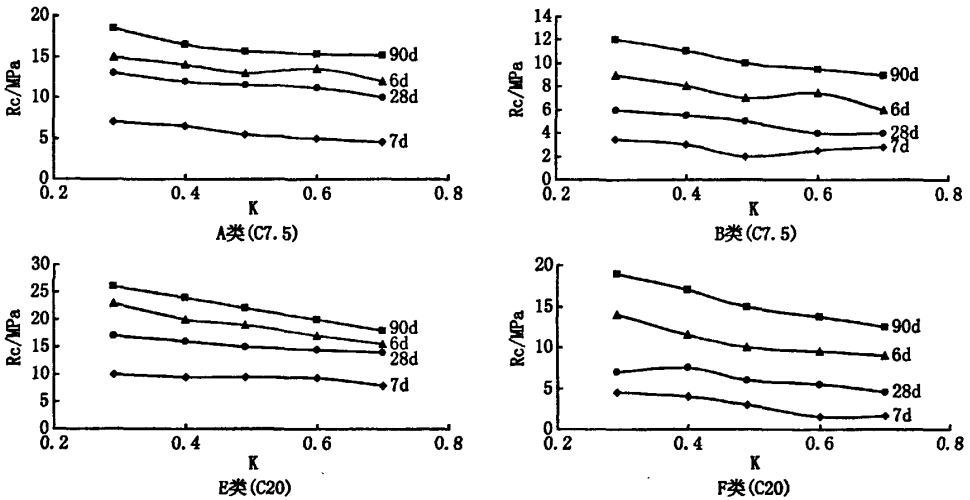


图1 A、B、E、F四种类型的配比在各龄期的 R_c - K 关系曲线

Fig.1 R_c - K curve of mix proportion types including A, B, E, F in the different age

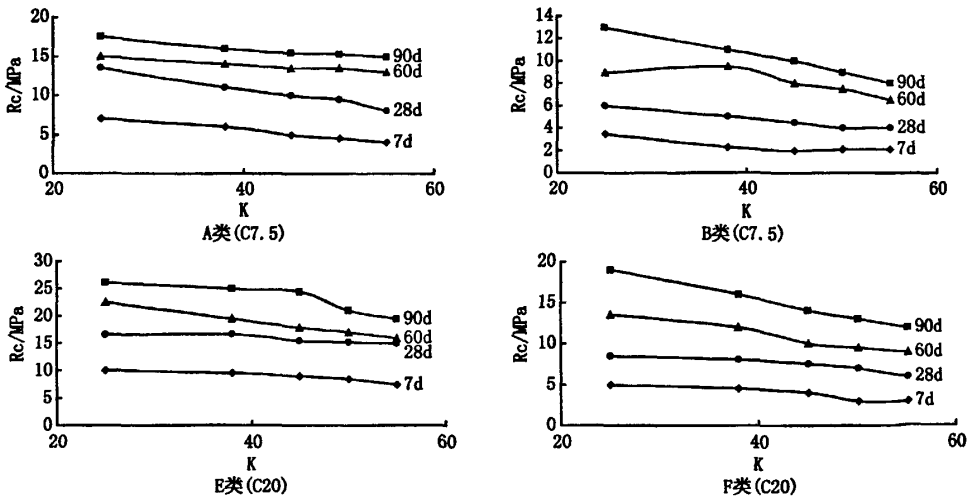


图2 A、B、E、F四种类型的配比在各龄期的 R_c - β_c 关系曲线

Fig.2 R_c - β_c curve of mix proportion types including A, B, E, F in the different age

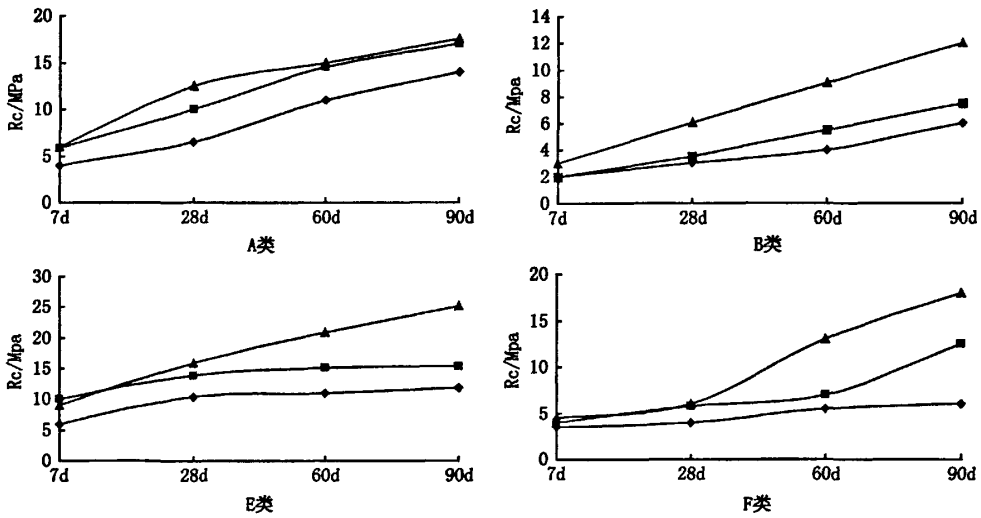


图3 A、B、E、F四种类型的抗压强度与龄期的关系
Fig.3 Relationship between compressive strength and age of concrete

从图 2 中可以看出,对于 90 d 龄期的 $R_c - \beta_c$ 关系,A 类 $\beta_c = 50\%$ 时, $R_c = 15.10\text{Mpa} > 7.5\text{Mpa}$ 强度;E 类 $\beta_c = 44\%$ 时, $R_c = 21.60\text{Mpa} > 20\text{Mpa}$ (E 类设计抗压强度)。

2.3 标准立方体 R_c 与龄期的关系

由标准立方体抗压强度 R_c 与龄期的关系图 3 可见,随着龄期的增长,试件的抗压强度都有显著增长;而且,同一配比类型的试件,强度与龄期的增长幅度不受胶凝效率系数 K 的取值大小的影响。比如,对于 A、E 类试件,7d、28d、60d、龄期分别达到 90d 龄期抗压强度的 41%、66%、84%;而 B、F 类试件,7d、28d、60d、龄期分别达到 90d 龄期抗压强度的 20%、45%、70%^[6-8]。地基处理的桩基础,一般使用 60 - 90d 龄期的抗压强度,可见低等级粉煤灰和大掺量粉煤灰可以取得更大的经济效益。用 28d 强度的强度来作为掺有大量粉煤灰的 CFG 桩身材料强度设计等级的确定依据,CFG 桩身材料的强度是有足够富余的,其可靠性是有保障的。

3 材料性能对 CFG 桩承载力的影响

假设在桩顶荷载 P 的作用下,桩顶下 x 处桩身截面的内力为 N ,桩端阻力为 N_d (取常数),桩截面面积为 A_p ,桩周长为 U ,桩身弹性模量为 E 。在 x 处取一微单元体 dx ,根据力的平衡关系可得

$$N = N + \frac{dN}{dx}dx + kU\gamma_s dx \quad (2)$$

根据变形协调条件及胡克定律分别可得,桩身的微应变为 $\epsilon = dx/x$ (即 $\epsilon = [(\gamma_s + dU/dx - \gamma_s)]/dx$)、 $\epsilon = -N/(A_p E)$,整理得

$$\frac{d^2 \gamma_s}{dx^2} - \frac{kU}{A_p E} \gamma_s = 0 \quad (3)$$

其解为 $\gamma_s = Be^{-ax} + Ce^{ax}$ 。其中 $a = \sqrt{kU_p}/(A_p E)$, $B、C$ 为积分系数。

代入公式(2)其边界条件及初始条件:当 $x = L$ 时 $N = N_d$,当 $x = 0$ 时 $N = P$,则可得 $P - \gamma_s$ 的关系式为

$$P = aA_p E \frac{e^{aL} - e^{-aL}}{e^{aL} + e^{-aL}} \gamma_s + N_d \quad (4)$$

式(4)建立了桩顶荷载与位移、桩周土的特性及桩身材料性能参数之间的关系。

从上式可以看出,桩身材料性能对 CFG 单桩承载力起着明显的作用,确定合理的粉煤灰的掺入量对提高 CFG 单桩承载力及桩身强度有重要作用。另外,掌握单桩承载力的时间效应规律,可为 CFG 桩优化设计进行荷载试验时时间的确定提供可靠的依据。

4 结论

1)CFG 桩桩身材料的试件抗压强度随胶凝效率 K 呈线性变化,相应的胶凝效率取得越大,水泥

用量越少,粉煤灰用量也相应的减少,强度降低。

2)最佳胶凝效率 K 的取值与龄期和设计强度有关。当选用长龄期的抗压强度作为设计标准值时,最佳胶凝效率可取较大值;并且设计强度越高,最佳胶凝效率取值宜越小。需指出的是,该结论仅在 90d 龄期内而言,超过 90d 的情况如何有待研究。

3)随着龄期的增长,当用粉煤灰替代部分水泥时,试件抗压强度在 90d 内一直持续增长。但对于不同胶凝效率 K ,后期增长的幅度相仿。

4)桩身强度随胶凝效率、粉煤灰掺入比等桩身材料性能和龄期的不同而变化。

5)CFG 桩单桩承载力随桩身弹性模量的增加而变大,桩身弹性模量与粉煤灰的掺入量、胶凝效率等桩身材料性能和龄期有关。

参考文献:

[1] 阎明礼, 张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践

[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[2] 范云, 汪英珍. CFG 复合地基桩材特性的试验分析[J]. 地质与勘探, 2002, 38(4): 94-96.

[3] 郭明田, 丁勇. 利用正交试验分析进行 CFG 桩复合地基优化设计[J]. 岩土工程技术, 2003(4): 233-236.

[4] 阎明礼, 吴春林, 杨军. CFG 桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 55-66.

[5] JGJ55-2000, 普通混凝土配合比设计规程[S].

[6] 王大通, 袁童民, 石海. CFG 桩桩身材料强度试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(1): 57-60.

[7] 赵延林, 景海河, 曹洋. 复合土钉支护中土钉内力实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(5): 377-379.

[8] 安景波, 赵思远, 邓志辉. 大抗拔灌注桩优化设计方法[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(4): 295-297.

(责任编辑 马立)

(上接第 3 页)

参考文献:

[1] 孙建琴. 大跨度斜拉立体桁架静动力非线性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.

[2] 汪长林. 斜拉空间桁架结构在静力和竖向地震作用下的受力性能[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.

[3] 邓华. 拉索预应力空间网格结构设计的几个概念[J]. 工业建筑, 2002, 30(10): 64-67.

[4] 董石麟, 邓华. 预应力网架结构的简捷算法及施工张拉全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 18-22.

[5] 冯健, 张耀康. 预应力斜拉网格结构的静力优化分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 33(5): 583-587.

[6] 严慧, 熊卫. 斜拉网架结构静力、动力特性的研究[J]. 工程力学, 1994(增刊), 1379-1384.

[7] 蓝天. 空间钢结构的应用和发展[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4), 2-8.

[8] 曹亮良. 某车站雨棚斜拉立体桁架结构的静力有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

[9] RAJENDRAN M, MURUGADOSS J, JUSTIN S. Optimal de-

sign of space truss using ant colony metaphor and genetic algorithm - a comparative study[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 33(3): 215-224.

[10] 缪正华, 于月民, 丁元柱. 形状记忆聚合物复合材料梁的弯曲变形[J]. 黑龙江科技学院学报, 2008, 18(1): 73-76.

[11] GRECO M, GESUALDO F, VENTURING W, et al. Non-linear positional formulation for space truss analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42(12): 1079-1086.

[12] 孙伟. 预应力钢桁架结构的设计与极限承载力分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 46-50.

[13] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 235-240.

[14] 高永强, 王秀红. 考虑弯曲刚度的斜拉索固有振动特性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 20-24.

[15] 张圣勤. MATLAB7.0 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(责任编辑 马立)