

免蒸压 PHC 管桩的研制与工程应用

王成启¹, 谷坤鹏¹, 王春明², 周郁兵², 张宜兵²

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 200032;

2. 中交第三航务工程局有限公司南京分公司预制厂, 210001)

摘要:为降低 PHC 管桩生产过程中的能源消耗和简化生产工序, 采用优选的混凝土配合比和蒸汽养护制度并充分利用环境温度对 PHC 管桩蒸养后所发挥的作用, 开发出免蒸压 PHC 管桩工艺技术。所开发的免蒸压 PHC 管桩混凝土抗压强度满足规范要求, 具有较高的弹性模量、耐久性和较低的脆性, 其耐久性和抗脆性优于蒸压 PHC 管桩混凝土, 且沉桩效果良好。

关键词: PHC 管桩; 蒸汽养护; 免蒸压; 规范; 耐久性

Abstract: To reduce the energy and simplify the production process in PHC piles production process, non-autoclaved PHC piles technology is developed by adopting suitable concrete mix proportions and steam curing system as well as the function of ambient temperature to the PHC piles after steam curing. The compressive strength of non-autoclaved PHC piles can conform to the specification and standard, and its elastic modulus and durability are better and its brittleness is less. The durability and brittleness resistance are superior to the steam curing PHC piles, and the effect on pile driving is good.

Key words: PHC piles; Steam curing; Non-autoclaved; Specification and standard; Durability

中图分类号: TU525 文献标识码: B 文章编号: 1000-4637(2011)04-29-06

0 前言

目前, 国内 PHC 管桩的生产厂家普遍采用两次蒸汽养护(常压蒸汽养护与高压蒸汽养护, 简称蒸压养护)进行 PHC 管桩生产, 以使 PHC 管桩在较短的时间内获得出厂强度^[1-3]。常压蒸汽养护是在温度低于 100℃条件下进行养护, 包括静停、升温、恒温、降温过程; 而蒸压养护需在蒸汽压力 0.95~1.0MPa 和温度 170~180℃的条件下, 养护 10~20h。蒸压养护是耗能与耗时最多的工序, 一般来说, 以燃油锅炉为例, 每蒸压养护 1m³ 混凝土约耗油 25kg, 且耗用时间较多^[4]。此外, 蒸压养护需要高压釜, 生产投入比较高; PHC 管桩出釜时温度很高, 若经过有效的降温处理, 则温差足以使桩身混凝土产生裂缝, 给 PHC 管桩的耐久性带来不利影响。

PHC 管桩因其具有优异的力学性能、制桩周期短、价格低而在工业民用建筑、市政工程、港口码头以及跨海大桥等大型工程中得到广泛的应用。随着

水运工程建设的高速发展, PHC 管桩的需求量逐年增加, 同时国家、业主以及设计单位也对 PHC 管桩的节能环保、性能、质量以及经济性提出了更高的要求。本文通过混凝土配合比和养护技术研究并充分利用环境温度对 PHC 管桩蒸养后所产生的作用, 开展免蒸压 PHC 管桩性能研究, 开发出一次蒸汽养护 PHC 管桩工艺技术, 并选择具体工程开展应用性试验。开发一次蒸汽养护 PHC 管桩免蒸压工艺可简化施工环节、节约成本、对 PHC 管桩产品节能减排和保护环境具有重要意义。

1 试验研究

1.1 试验原材料

(1) 水泥: 安徽产 52.5 II 型硅酸盐水泥, 其物理力学性能指标如表 1 所示。

(2) 掺合料: S95 粒化高炉矿渣粉, 其物理力学性能指标见表 2。

(3) 细骨料: 细度模数为 2.6 的中砂, 含泥量

表 1 水泥的性能指标

抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		凝结时间/min		比表面积	烧失量	氧化镁	SO ₃
3d	28d	3d	28d	初凝	终凝	/(m ² /kg)	%	%	%
6.2	9.1	31.8	60.1	144	204	370	2.59	1.56	2.01

表2 粒化高炉矿渣粉的性能指标

活性指数/%		密度	比表面积	SO ₃	烧失量
7d	28d	/(g/cm ³)	/(m ² /kg)	%	%
83	107	2.88	408	0.11	0.17

0.6%,泥块含量0.2%。

(4)粗骨料:5~25mm连续级配的碎石(由5~10mm和10~25mm两级配配制而成,5~10mm和10~25mm的比例为1:4),含泥量为0.4%,泥块含量为0.1%。

(5)减水剂:上海产HP400高效减水剂

(6)拌合水:普通自来水。

1.2 配合比

采用活性较高的粒化高炉矿渣粉作为矿物掺合料,本研究选用S95粒化高炉矿渣粉,水胶比为0.25~0.30,S95粒化高炉矿渣粉掺量为10%~40%,胶凝材料用量为470~550kg/m³,用水量为125~145kg/m³,砂用量为640~730kg/m³,粗骨料用量为1100~1200kg/m³,减水剂用量为4.0~5.5kg/m³。

1.3 试验方法

(1)力学性能试验

抗压强度试验按JTJ270-98《水运工程混凝土试验规程》中有关规定进行。

(2)耐久性试验

电通量试验按ASTM C1202《混凝土抗氯离子

渗透性标准试验方法》进行;氯离子扩散系数试验按NT BUILD 443《硬化混凝土:快速氯离子侵蚀试验方法》进行。

(3)养护制度

按设计的养护制度采用蒸汽养护,控制升降温速率和恒温时间,混凝土蒸养后进行标准养护,到规定龄期进行混凝土力学性能和耐久性试验。

(4)扫描电子显微镜

采用日本产JSM-5600LV低真空扫描电子显微镜观察混凝土内部结构形貌,扫描电子显微镜分辨率为3.5nm,仪器的加速电压为20kV。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土性能

(1)抗压强度

所开发的免蒸压PHC管桩和蒸压PHC管桩混凝土标准养护下的抗压强度如表3、图1所示。从表3和图1可以看出,经过免蒸压的PHC管桩混凝土3d抗压强度已大于80MPa,28d抗压强度大于90MPa,表明在一定温度作用下,免蒸压PHC管桩混凝土在较短的时间能满足有关规范要求;在90d龄期,免蒸压养护、蒸压养护混凝土抗压强度增幅分别为27.0%、8.3%,蒸压混凝土抗压强度增幅较小。由此可见,免蒸压PHC管桩混凝土后期强度持续增加。

(2)弹性模量

表3 免蒸压和蒸压PHC管桩混凝土抗压强度

养护方式	1d	3d	5d	7d	10d	14d	28d	56d	90d
免蒸压后标准养护	79.1	83.9	87.7	91.2	92.8	93.6	96.7	99.4	101.4
蒸压后标准养护	96.5	97.1	97.8	98.1	98.5	98.8	99.3	100.1	103.5

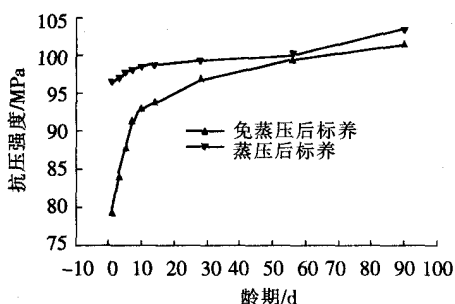


图1 免蒸压和蒸压PHC管桩混凝土抗压强度

免蒸压和蒸压PHC管桩混凝土同条件蒸养后标准养护下的弹性模量如表4所示。表4的3d和90d的弹性模量测试结果表明,免蒸压PHC管桩混凝土的弹性模量高于蒸压PHC管桩。

(3)脆性

混凝土抗拉强度与抗压强度之比(简称拉压

表4 免蒸压和蒸压PHC管桩混凝土弹性模量 10⁴MPa

养护方式	3d	90d
免蒸压后标准养护	4.05	4.59
蒸压后标准养护	3.49	3.95

比)常作为宏观上衡量混凝土脆性的一项最简便、适用的指标,拉压比值降低就意味着混凝土的脆性增加^[5-9]。免蒸压和蒸压桩节切割混凝土90d抗压强度、劈拉强度、拉压比以及弹强比的测试结果如表5

表5 管桩切割混凝土拉压比和折压比

养护方式	抗压强度 /MPa	劈拉强度 /MPa	抗折强度 /MPa	拉压比	折压比
免蒸压后标准养护	86.8	5.11	6.88	0.0589	0.0793
蒸压后标准养护	95.8	5.02	6.25	0.0524	0.0652

所示。从表 5 可以看出,与免蒸压混凝土相比较,蒸压混凝土的拉压比和折压比较小,表明蒸压混凝土的脆性稍大。

(4) 抗氯盐侵蚀性能

在南京分公司预制厂分别制作免蒸压和蒸压 PHC 管桩,切割符合规范要求的试件进行电通量和氯离子扩散系数试验,测试结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,PHC 管桩 28d 的电通量为 719C,56d 的电通量为 585C,均小于 1000C,且小于蒸压 PHC 管桩混凝土,免蒸压 PHC 管桩混凝土具有较高的耐久性。此外,表 6 的氯离子扩散系数还表明,免蒸压 PHC 管桩混凝土的氯离子扩散系数较低,小于蒸压 PHC 管桩混凝土,具有较高抗氯盐侵蚀能力。

表 6 PHC 管桩混凝土电通量和扩散系数

养护方式	28d 电通量/C	56d 电通量/C	90d 氯离子扩散系数/(m ² /s)
免蒸压后标准养护	719	585	1.08×10 ⁻¹²
蒸压后标准养护	985	851	2.89×10 ⁻¹²

(5) 抗冻性

切割免蒸压和蒸压 PHC 管桩试件,按照规范进行了 PHC 管桩抗冻性试验,经历 400 次冻融循环,免蒸压混凝土相对动弹性模量为 99%,重量损失率为 0,经历 1000 次冻融循环,其相对动弹性模量仍为 97%,重量损失率仍为 0;蒸压混凝土经历 400 次冻融循环相对动弹性模量为 92%,重量损失率为 0.21%,经历 1000 次冻融循环,其相对动弹性模量为 90%,重量损失率为 1.20%。图 2 和图 3 分别为免蒸压和蒸压 PHC 管桩混凝土 1000 次冻融循环后的外观,图 2 和图 3 清楚表明,蒸压混凝土已发生剥



图 2 免蒸压混凝土外观(1000 次冻融循环)



图 3 蒸压混凝土外观(1000 次冻融循环)

落,而免蒸压混凝土外观良好。因此,免蒸压混凝土和蒸压混凝土均具有比较高的抗冻性,但免蒸压混凝土的抗冻性相对较好。

2.2 微观分析

分别对免蒸压和蒸压后标准养护 28d 混凝土取样,进行扫描电子显微镜观察,测试照片分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 显微照片可以看出,免蒸压混凝土骨料与水泥水化产物的界面较为紧密,但局部也存在微裂缝,这表明,高温养护对免蒸压混凝土的内部结构会产生一定的影响。从图 5 中的照片可以看出,蒸压混凝土骨料表面附着一层水泥水化产物,但骨料与水化产物存在明显的微裂缝,且结构较为酥松,180℃高温作用对蒸压混凝土的内部结构产生不利的影响。从两种养护制度对混凝土结构比较可以发现,蒸压对混凝土结构产生一定破坏,导致混凝土的耐久性下降,蒸压 PHC 管桩混凝土耐久性低于免蒸压 PHC 管桩混凝土。



图 4 免蒸压混凝土扫描电子显微镜照片(28d)

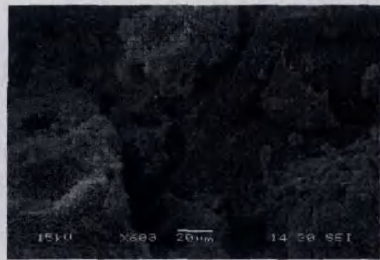


图 5 蒸压混凝土扫描电子显微镜照片(28d)

3 技术经济分析与应用前景

3.1 技术分析

表 7 为免蒸压 PHC 管桩与蒸压 PHC 管桩主要技术指标比较。从表 7 的比较可以看出,两种 PHC 管桩的抗压强度均能满足规范要求;蒸压 PHC 管桩弹性模量较低,其抗氯盐侵蚀以及抗冻性等耐久性比免蒸压 PHC 管桩要差。因此,当采用免蒸压方式生产 PHC 管桩时,对提高 PHC 管桩混凝土的耐久性有利。

根据免蒸压和蒸压 PHC 管桩性能指标,表 8 列出了免蒸压和蒸压 PHC 管桩的特点。从表 8 可以

表7 免蒸压PHC管桩与蒸压PHC管桩性能指标的比较

项目	试件制作与龄期	免蒸压PHC管桩性能指标	蒸压PHC管桩性能指标	免蒸压PHC管桩与蒸压PHC管桩性能比较
抗压强度	混凝土标养28d	>90MPa	>90MPa	均大于C80, 蒸压PHC管桩混凝土早期强度较高, 但免蒸压PHC管桩混凝土强度逐渐增加, 后期与蒸压PHC管桩混凝土相近。
弹性模量	混凝土标养28d	>4.5×10 ⁴ MPa	>3.5×10 ⁴ MPa	蒸压PHC管桩混凝土的弹性模量较小。
脆性(拉压比)	90d管桩切割	<0.060	<0.055	蒸压PHC管桩混凝土的脆性稍大。
电通量	28d标养	<800C	<1000C	蒸压PHC管桩混凝土的电通量较大。
氯离子扩散系数	90d留样	<1.5×10 ⁻¹² m ² /s	<3.0×10 ⁻¹² m ² /s	蒸压PHC管桩混凝土的氯离子扩散系数较大。
抗冻性	28d管桩切割	1000次冻融循环的相对动弹性模量为97%, 重量损失率为0	1000次冻融循环的相对动弹性模量为92%, 重量损失率为0.21%	免蒸压PHC管桩混凝土的抗冻性较好。

表8 免蒸压和蒸压PHC管桩的特点

种类	优点	缺点
免蒸压PHC管桩	制桩成本较低, 桩混凝土耐久性有所提高, 桩耐打性有所增加。	养护时间稍长, 出厂时间相对较长。
蒸压PHC管桩	养护时间短, 出厂周期较短, 桩混凝土的收缩较小。	制桩成本较高, 桩混凝土耐久性相对较低。

看出, 当采用免蒸压方式生产PHC管桩时, 应注意控制养护制度, 保证混凝土获得一定的脱模强度; 当采用蒸压生产PHC管桩时, 应严格控制蒸压的养护制度, 保证其耐久性。

3.2 经济分析

采用免蒸压工艺可以省略蒸压环节, 蒸压环节需高压釜、人工并消耗大量的能源, 会增加PHC管桩的成本。表9为每mPHC管桩蒸压所需的成本, 采用免蒸压工艺, 每mPHC管桩可节约成本15元。因此采用免蒸压PHC管桩可以大量节约能源和成本, 具有显著的经济效益, 同时还可减少废气排放, 有利于环保。

表9 PHC管桩蒸压每m所需成本

项目	每m消耗量	单价	成本/(元/m)
燃煤消耗	10 kg	1元/kg	10.0
起重人工	0.026 工日	50元/工日	1.3
养护人工	0.026 工日	50元/工日	1.3
用电消耗	1kW·h	0.8元/kW·h	0.8
水	0.05t	1.8元/t	0.1
设备折旧	1台	1.5元/台·m	1.5
合计			15.0

3.3 应用前景

PHC管桩的免蒸压技术可以节约PHC管桩生产过程中蒸压养护的成本, 符合“节能减排”的战略

要求, 能够给企业带来更大的经济效益。以三航局南京分公司预制厂年产PHC管桩混凝土7万m³来计算, 年节约成本将达208.6万元。

目前, PHC管桩在港口码头、桥梁以及工业民用建筑等工程中获得广泛应用。通过本课题研究, 系统地解决PHC管桩配合比设计与生产工艺和相关技术问题, 使PHC管桩性能获得改善并降低成本: (1) 可使免蒸压PHC管桩满足规范的各项要求, PHC管桩混凝土的抗氯盐侵蚀性能、抗冻性等耐久性较高, 保证了PHC管桩的产品质量, 可应用于海洋工程和北方等耐久性要求较高的环境; (2) PHC管桩混凝土脆性有所改善, 保证使用性能和耐打性; (3) 免蒸压PHC管桩还可减少制桩的环节、降低成本和节约能源, 从而有利于环保。因此, 免蒸压PHC管桩具有非常广泛的应用前景。

4 工程应用

4.1 工程概况

生产的免蒸压PHC管桩在安徽省芜湖新联造船有限公司三山造船项目2#舾装码头进行了应用。该工程位于芜湖市三山区临江工业园, 场址上游为在建的华电电厂, 下游为在建的芜湖三山海螺港务有限公司。本次施工的是2#舾装码头及两座引桥, 总投资3278万元, 2009年5月28日开工、2010年3月31日竣工。工程共6个分段, 每分段8

个排架,每排架下设 5 根直桩(PHC AB 800 型)和 1 对叉桩 (PHC C 800 型),引桥 2 座 (PHC AB 800 型)。桩型和数量如表 10 所示。

表 10 工程所需的桩型和数量

桩型	桩长/m	数量/根
PHC AB 800	35	16
PHC AB 800	37	60
PHC AB 800	40	240
PHC C 800	41	120
合计		436

4.2 检验结果

(1)抗压强度

混凝土抗压强度检测结果如表 11 所示。从表中可以看出,3d 自然养护的 PHC 管桩混凝土抗压强度均大于 80MPa,平均值达到 84.2MPa,达到出厂的要求。对标准养护 PHC 管桩混凝土按统计方法评定,评定结果如表 12 所示,表中数据表明,28d 标准养护混凝土平均抗压强度达到 90.7MPa,PHC 管桩混凝土达到 C80 的要求。

表 12 PHC 管桩混凝土抗压强度检验评定结果

组数	平均值 m_{fcu}	标准值 $f_{cu,k}$	最小值 $f_{cu,min}$	标准差 S_{fcu}	检验证定	
					$m_{fcu}-\lambda S_{fcu}$ $\geq 0.90f_{cu,k}$	$f_{cu,min} \geq \lambda_2 f_{cu,k}$
47	90.7	80	84.2	3.45	合格	合格

注:当试件组数为 10~14 时, $\lambda_1=1.70, \lambda_2=0.90$;当试件组数为 15~24 时, $\lambda_1=1.65, \lambda_2=0.85$;当试件组数 ≥ 25 时, $\lambda_1=1.60, \lambda_2=0.85$ 。 S_{fcu} 的计算值小于 0.06 $f_{cu,k}$ 时,取 $S_{fcu}=0.06f_{cu,k}$ 。

(2)耐久性

成型了两组电通量和一组氯离子扩散系数试件,试件与免蒸压 PHC 管桩同条件养护后进行标准养护,分别测试混凝土 28d 和 56d 的电通量和 90d 氯离子扩散系数,电通量和氯离子扩散系数的测试结果如表 13 所示。表 13 中测试数据表明,免蒸压 PHC 管桩混凝土 28d 和 56d 的电通量均小于 1000C,90d 的氯离子扩散系数小于 $1.5 \times 10^{-12} m^2/s$,具有较高抗氯盐侵蚀能力。

4.3 沉桩情况

沉桩由中交二航局施工,采用海盛 1# 打桩船,

表 13 PHC 管桩混凝土电通量的测试结果

28d 电通量 /C	56d 电通量 /C	90d 氯离子扩散 系数/(m^2/s)
674	585	1.09×10^{-12}

表 11 PHC 桩抗压强度检测结果

浇筑日期	1d 强度/MPa	3d 强度/MPa	28d 强度/MPa
	(常压蒸养)	(自然养护)	(标准养护)
2009-05-21	80.5	86.8	91.7
2009-05-22	76.6	82.3	89.6
2009-05-23	77.3	83.4	92.2
2009-05-24	75.7	81.9	93.5
2009-05-25	78.0	84.2	92.1
2009-06-03	80.8	86.7	89.5
2009-06-04	76.5	83.9	87.6
2009-06-05	78.6	87.1	92.0
2009-06-06	81.5	88.3	96.8
2009-06-07	76.0	84.2	90.9
2009-06-08	77.9	82.6	85.6
2009-06-09	78.2	85.2	86.5
2009-06-10	77.4	86.0	87.0
2009-06-11	73.9	80.6	84.2
2009-06-12	78.1	85.9	95.9
2009-06-13	79.9	83.8	87.7
2009-06-14	77.9	83.4	87.1
2009-06-15	75.3	81.2	92.8
2009-06-16	80.8	84.7	90.1
2009-06-17	79.8	86.3	96.0
2009-06-18	77.3	83.6	93.1
2009-06-19	76.4	82.4	94.7
2009-06-20	81.2	87.6	93.0
2009-06-21	78.2	84.3	95.9
2009-06-22	78.6	85.3	88.4
2009-06-23	76.5	86.7	89.5
2009-06-24	77.0	83.4	85.7
2009-06-25	75.6	81.6	92.0
2009-06-26	74.7	80.9	85.0
2009-06-27	79.2	85.7	94.9
2009-06-28	77.6	84.4	93.3
2009-06-29	70.8	86.4	95.3
2009-06-30	77.6	82.3	87.8
2009-07-01	71.8	84.8	92.1
2009-07-02	77.6	88.2	94.6
2009-07-03	81.6	85.6	87.4
2009-07-04	73.7	80.9	85.7
2009-07-05	78.4	81.5	90.4
2009-07-06	77.3	84.9	92.3
2009-07-07	76.4	82.7	87.8
2009-07-08	75.8	82.2	89.5
2009-07-09	79.8	86.4	92.4
2009-07-10	79.0	85.3	90.5
2009-01-11	80.7	87.1	97.0
2009-07-13	74.4	80.4	88.2
2009-07-14	75.4	81.2	86.1
2009-07-15	76.9	83.3	91.9
平均值	77.5	84.2	90.7

桩垫为 30cm 的纸垫,替打的长度为 1m。不同桩型的免蒸压 PHC 管桩的沉桩数据和沉桩情况见表 14 及图 6 和图 7 所示。从表 14 的沉桩数据及图 6 和图 7 可以看出,除 8-5-B 号桩位外,所有直桩和斜

表14 不同桩型的PHC管桩沉桩数据

制桩编号	桩位号	锤型	总锤击数	最后贯入度/(mm/击)		桩身完整性
				设计	实际	
1#,B型桩	1-5-G	D-100	1715	5~10	5.6	完好
2#,AB型桩	2-5-G	D-100	1898	5~10	3.1	完好
43#,C型桩	1-5-E	D-100	1244	5~10	8.1	完好
207#,AB型桩	1-5-F	D-100	755	5~10	8.3	完好
81#,AB型桩	10-5-C	D-128	1334	5~10	7.6	完好
154#,AB型桩	9-5-C	D-128	1556	5~10	6.7	完好
167#,AB型桩	8-5-C	D-128	1551	5~10	7.1	完好
168#,AB型桩	8-5-B	D-128	1307	5~10	7.1	桩头破裂,距设计标高1m
254#,AB型桩	6-5-A	D-128	1246	5~10	6.7	完好
172#,AB型桩	7-5-A	D-128	1075	5~10	9.1	完好
175#,AB型桩	8-5-A	D-128	968	5~10	7.7	完好
253#,AB型桩	9-5-A	D-128	1507	5~10	7.1	完好
155#,AB型桩	9-5-B	D-128	1259	5~10	7.1	完好
367#,AB型桩	10-5-B	D-128	1394	5~10	7.7	完好
153#,AB型桩	10-5-A	D-128	1743	5~10	7.7	完好
386#,AB型桩	1-6-C	D-128	1652	5~10	6.2	完好
387#,AB型桩	2-6-B	D-128	1092	5~10	8.3	完好
412#,AB型桩	1-6-B	D-128	1018	5~10	7.7	完好
312#,AB型桩	1-6-A	D-128	1249	5~10	7.7	完好

桩全部顺利打下,贯入度满足设计要求,桩身完好。8-5-B号桩桩头破裂,距离设计标高1m,但其贯入度满足设计要求,这可能与地质条件和打桩等因素影响有关。

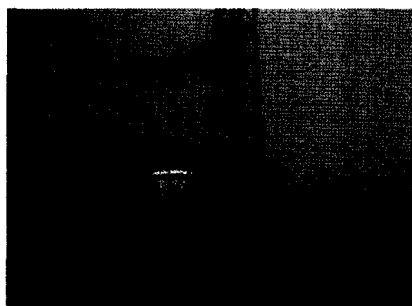


图6 免蒸压PHC管桩沉桩时的情况



图7 免蒸压PHC管桩沉桩后的情况

5 结语

本文通过配合比、养护制度、PHC管桩性能以

及工程应用性试验等研究,开发出一次蒸养的免蒸压PHC管桩,其抗压强度满足规范要求,并具有较高的耐久性、弹性模量以及较低的脆性,改善了蒸压PHC管桩性能;免蒸压PHC管桩可节省成本且节能环保,每mPHC管桩可节约成本15元,具有较好的经济效益和推广应用前景。所开发研制的免蒸压PHC管桩在工程中获得了应用,应用情况表明,出厂的强度满足规范要求并具有较高的耐久性,沉桩效果良好。

参考文献:

- [1] 严志隆,黄绍江,章杰春. 掺磨细砂的PHC管桩的有关性能研究. 混凝土与水泥制品,1996(2):26-27.
- [2] 涂波涛,严炳士,李贵民. 关于磨细砂、矿渣微粉在PHC管桩混凝土中的双掺研究. 广东建材,2008(1):33-34.
- [3] 严志隆,陆酉教,仲以林. PHC管桩混凝土耐久性. 混凝土与水泥制品,2008(6):26-29.
- [4] 阮起南. 预应力混凝土管桩[M]. 北京:中国建材工业出版社.
- [5] 袁玲,陈贤树,李化建. 矿物掺合料对高强混凝土断裂脆性的影响. 建材技术与应用,2001(4):3-5.
- [6] 刘数华,方坤河,曾力. 降低高强混凝土脆性的试验研究. 建筑材料学报,2005(4):150-153.

收稿日期:2011-03-04

作者简介:王成启(1964-),男,博士、教授级高工。

通讯地址:上海市肇嘉浜路829号

联系电话:13916115548,021-64695035