



高耐久性大管桩混凝土配制技术与应用

王成启¹, 张兆民²

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司 上海 200032;

2. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315803)

摘要: 为了提高大管桩混凝土的耐久性, 开展高耐久性大管桩混凝土配制技术试验研究与应用。在传统大管桩混凝土配合比的基础上, 采用矿渣粉改善混凝土的性能, 通过复掺矿渣粉与硬石膏保证大管桩混凝土的脱模强度, 对各配合比的混凝土进行维勃稠度、抗压强度、电通量和扩散系数试验, 并采用室内试验确定的混凝土配合比进行生产应用。结果表明, 单掺矿渣粉明显改善了大管桩混凝土耐久性, 但会导致大管桩脱模强度降低; 采用石膏粉和矿渣粉复合可明显提升大管桩混凝土脱模强度, 并具有良好的耐久性。采用高耐久性大管桩混凝土配合比生产的大管桩管节外观质量良好, 混凝土抗压强度等级达到 C70, 电通量小于 800 C, 具有较高的耐久性。

关键词: 高耐久性; 大管桩; 脱模强度; 电通量

中图分类号: U654; U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0027-06

Preparation technology and application of high durability large pipe pile concrete

WANG Chengqi¹, ZHANG Zhaomin²

(1. China Communications Shanghai Third Harbor Engineering Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Ningbo Branch of China Communications Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo 315803, China)

Abstract: In order to improve the durability of concrete for large pipe piles, we carry out the test research and application of high durability concrete preparation technology for large pipe piles. Based on the traditional concrete mix ratio for large pipe piles, we apply the slag powder to improve the performance of concrete, and ensure the concrete demoulding strength of large pipe pile by the composite of gypsum powder and slag powder. We carry out the Webe consistometer, the compressive strength, electric flux and diffusion coefficient tests for each mix ratio, and use the concrete mix ratio determined by laboratory test to apply in the actual production. The results show that adding slag powder alone can significantly improve the durability of concrete for large pipe piles, but it leads to a decrease in the demoulding strength of large pipe piles. The composite of gypsum powder and slag powder can significantly improve the demoulding strength of large pipe pile concrete and has good durability. By using a high durability concrete mix ratio for large pipe piles, the appearance quality of the produced pipe joints is good, the compressive strength of the concrete reaches C70, and the electrical flux is less than 800 C, which has high durability.

Keywords: high durability; large pipe piles; demoulding strength; electrical flux

后张法预应力混凝土大直径管桩(简称大管桩)是一种采用离心、振动和辊压三复合工艺成型, 并经蒸养和水养后拼接张拉、灌浆自锚的预应力混凝土

管桩, 其混凝土具有高密度、低水灰比、高强度、低渗透性等技术特点, 自 1950 年开发成功以来, 已在港口、码头、桥梁等工程中得到广泛应

收稿日期: 2024-01-08

作者简介: 王成启 (1964—), 男, 博士, 教授级高工, 从事工程材料研究。

用^[1]。在20世纪80年代中后期，我国引进美国大管桩制桩技术，并成功开发研制了大管桩，其具有承载力高、耐锤击性能好等技术特点，已在华东与华南沿海港口工程中得到广泛应用^[2-4]。已建港口工程的调查表明大管桩工程应用状况良好，受到各界的好评，并产生了良好的社会与经济效益^[5]。

随着我国港口工程建设的不断发展，对混凝土结构耐久性也提出更高的要求，在要求港口工程具有50~100年的使用寿命^[6]的同时也对大管桩混凝土耐久性提出更高的要求。尽管大管桩采用离心、振动和辊压三复合成型工艺，具有一定的耐久性，并在众多港口码头中获得应用^[7]，但为满足50~100年的使用寿命，大管桩耐久性仍须不断提升。提高混凝土耐久性重要途径是在混凝土中掺入粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料^[8]。由于粒

化高炉矿渣粉等矿物掺合料掺入混凝土中与水泥水化产物进行二次水化反应，由此会导致混凝土早期强度下降，使大管桩脱模强度降低，并对脱模性能产生一定的影响。因此，需要开展高耐久性大管桩配制技术研究，开发研制出高耐久性并具有较高脱模强度的大管桩混凝土，以满足大管桩生产和工程应用的需要。

1 高耐久性大管混凝土配制试验

1.1 原材料

1.1.1 水泥

采用句容台泥水泥有限公司生产的52.5R II型硅酸盐水泥。对其性能指标进行试验，安定性合格，其他性能指标见表1。达到了52.5 II型硅酸盐水泥的质量标准。

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/ (m ² ·kg ⁻¹)	烧失量/ %	氧化镁/ %	三氧化硫/ %
3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝				
6.2	9.0	32.3	61.2	159	202	372	2.59	1.56	2.01

1.1.2 粒化高炉矿渣粉

采用宝钢生产的S95粒化高炉矿渣粉，其物

理力学性能指标见表2。达到了S95粒化高炉矿渣粉的技术要求。

表2 粒化高炉矿渣粉的物理力学性能指标

活性指数/%		密度/(kg·m ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	流动度比/%	烧失量/%
7 d	28 d				
77	104	2 900	428	105	0.19

1.1.3 石膏

采用石膏粉，属斜方晶系的硫酸盐类矿物，

摩氏硬度3.2，相对密度2.9，化学组成见表3。

表3 石膏化学组成测试结果

Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	烧失量	结晶水	酸溶钾	酸溶钠
0.041	40.65	0.087	1.09	0.76	54.83	0.007 6	2.67	0.26	0.027	0.040

1.1.4 细集料

采用细度模数为2.7的II区中砂，有关性能指标测试结果见表4，符合大管桩混凝土所用砂的有关技术标准要求。

表4 砂的技术指标测试结果

表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	轻物质/ %	含泥量/ %	泥块 含量/%
2 620	1 510	0.21	0.6	0.1

1.1.5 粗集料

的检测结果见表 5, 满足有关标准技术要求。

采用 5~20 mm 连续级配的碎石, 其性能指标

表 5 粗骨料的性能指标测试结果

表观密度/(kg·cm ⁻³)	堆积密度/(kg·cm ⁻³)	含泥量/%	泥块含量/%	坚固性/%	压碎指标/%	针片状含量/%	空隙率/%
2 820	1 510	0.3	0.1	1.9	5.1	5.0	46.0

1.1.6 减水剂

聚羧酸系高性能减水剂, 其性能测试结果见表 6,

采用上海高铁化学有限公司生产的 GTS-413 型

满足高性能减水剂的质量要求。

表 6 GTS-413 型聚羧酸系高性能减水剂测试结果

固含量/%	密度/(kg·m ⁻³)	水泥净浆流动度/mm	pH 值	Cl ⁻ 含量/%	碱含量/%	减水率/%
18.1	1 045	256	7.6	0.01	0.48	25.6

1.1.7 拌合用水

采用城市自来水。测得拌合用水的性能指标见表 7。

表 7 拌合水的性能指标

pH 值	Cl ⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ 含量/(mg·L ⁻¹)	可溶物/(mg·L ⁻¹)	不溶物/(mg·L ⁻¹)
7.6	12.81	14.0	234	14

1.2 配合比

为提高大管桩混凝土耐久性, 在传统大管桩混凝土配合比 A₀ 的基础上, 采用矿渣粉改善混凝土的性能, 其中矿渣粉的掺量分别为 10%、15%、20%、25% 和 30%, 见表 8 的系列 1; 为保证大管桩混凝土脱模强度, 采用硬石膏激发矿渣粉活性, 开展复掺矿渣粉与硬石膏混凝土试验, 其中矿渣粉的掺量分别为 10% 和 15%, 其配合比见表 8 的系列 2 和 3。

表 8 混凝土配合比

系列	编号	水泥	矿渣粉	石膏粉	砂	碎石	水	减水剂
1	A ₀	481.0	0	0	575	1 280	126	4.81
	A ₁	432.9	48.1	0	575	1 280	126	4.81
	A ₂	408.8	72.2	0	575	1 280	126	4.81
	A ₃	384.8	96.2	0	575	1 280	126	4.81
	A ₄	360.8	120.2	0	575	1 280	126	4.81
	A ₅	336.7	144.3	0	575	1 280	126	4.81
2	B ₁	428.1	48.1	4.8	575	1 280	110	4.81
	B ₂	418.5	48.1	14.4	575	1 280	110	4.81
	B ₃	408.8	48.1	24.1	575	1 280	110	4.81
3	C ₁	404.0	72.2	4.8	575	1 280	110	4.81
	C ₂	394.4	72.2	14.4	575	1 280	110	4.81
	C ₃	384.7	72.2	24.1	575	1 280	110	4.81

1.3 试验方法

1.3.1 维勃稠度

大管桩混凝土为干硬性混凝土, 采用维勃稠度测试混凝土工作性, 混凝土维勃稠度试验按照 JTS/T 236—2019 《水运工程混凝土试验检测技术规范》^[9] 的有关规定进行。

1.3.2 抗压强度

采用振动台振动成型混凝土试件, 分两层加料, 振动时间控制在 2 min 左右, 以混凝土振动出浆作为控制标准。混凝土抗压强度试验按 JTS/T 236—2019 的有关规定进行。

1.3.3 耐久性

混凝土电通量和扩散系数(RCM法)试验按GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》^[10]的有关规定进行。

1.3.4 养护制度

试块成型后放入高低温养护箱进行蒸汽养护,脱模后再继续标准养护至规定龄期。蒸养制度为:静停2 h,恒温55℃,恒温时间4 h,升降温速率小于20℃/h。

2 试验结果与分析

2.1 维勃稠度和抗压强度

测得系列1~3的维勃稠度和抗压强度见表9。可以看出,单掺矿渣粉系列1,随着矿渣粉掺量的增加,混凝土维勃稠度呈现不断降低趋势,当矿粉掺量从0%增加到30%时,混凝土维勃稠度由25 s降低到18 s,表明矿渣粉具有改善减水剂的塑化效果;掺入硬石膏的系列2和3混凝土的减水剂用量相同,在用水量比基准混凝土减少16 kg/m³情况下,其与减水剂复合的混凝土的维勃稠度与基准混凝土相当,表明硬石膏具有明显的减水作用。

表9 混凝土维勃稠度和抗压强度测试结果

系列	编号	维勃稠度/s	抗压强度/MPa				
			脱模	1 d	3 d	7 d	28 d
1	A ₀	25	47.1	58.5	65.1	66.6	74.1
	A ₁	24	45.2	54.2	62.7	68.1	75.1
	A ₂	23	44.4	52.3	57.1	70.7	76.8
	A ₃	22	43.2	50.3	56.1	71.2	77.3
	A ₄	21	41.5	49.2	54.8	74.0	77.8
	A ₅	18	40.0	48.9	51.9	75.1	78.9
2	B ₁	24	54.4	68.0	81.4	81.3	90.0
	B ₂	25	56.4	65.6	75.8	78.1	89.3
	B ₃	25	57.8	66.5	72.7	77.0	87.4
3	C ₁	25	47.2	55.5	63.8	61.5	79.9
	C ₂	25	48.8	57.3	69.6	67.0	75.8
	C ₃	25	49.6	61.1	69.0	65.6	71.8

由表9系列1单掺矿粉混凝土抗压强度测试结果可以看出,当矿渣粉掺量为10%~30%时,随

着矿渣粉掺量的增加,编号为A₀~A₅的混凝土脱模和1 d抗压强度呈现不断降低趋势,掺矿渣粉混凝土抗压强度明显低于基准混凝土(A₀);当3 d龄期时,随着矿渣粉掺量增加,混凝土抗压强度仍呈现不断降低趋势,掺矿粉混凝土的抗压强度低于基准混凝土(A₀);当7和28 d龄期时,掺矿粉混凝土抗压强度进一步增加,随着矿粉掺量的增加,抗压强度不断增加,且抗压强度明显高于基准混凝土(A₀)。由此可见,掺入一定量矿渣粉会使混凝土脱模、1和3 d的抗压强度降低,对混凝土脱模强度产生一定影响,在大管桩脱模时易于产生粘皮现象,但后期强度会有一定程度增加。

由表9还可看出,掺入硬石膏系列2和3混凝土的脱模强度均明显高于基准混凝土,表明掺入石膏可明显增加混凝土的脱模和1 d抗压强度;当硬石膏掺量为1%、3%和5%时,系列2混凝土脱模强度分别比基准混凝土(A₁)增加了20.4%、24.8%和27.9%,系列3混凝土脱模强度分别比基准混凝土(A₂)增加了6.3%、10.0%和11.7%,这表明随着石膏掺量增加,混凝土脱模强度不断增加,但增加量呈不断减小趋势,且随着矿渣粉掺量不断增大,混凝土的脱模强度呈不断降低趋势;随着龄期的增加,掺入硬石膏的混凝土抗压强度均不断增加。

当在水泥水化产物氢氧化钙的碱性环境条件下,加入一定数量的石膏,矿渣的活性被充分激发。一方面在水泥水化产物的碱性环境,造成了促进矿渣的分散和溶解,并形成水化硅酸钙和水化铝酸钙的条件^[11-12];另一方面,在Ca(OH)₂存在的条件下,石膏能与矿渣中的活性Al₂O₃化合,生成水化硫铝酸钙。在形成这种水化产物时,较多地消耗了溶液中的铝离子,并反过来又加速了矿渣的水化过程,上述这两类作用互相促进,使矿渣的潜在活性能够得到比较充分的激发,促进矿渣水化反应,提高混凝土的抗压强度。

2.2 电通量和扩散系数

测得单掺矿渣粉及矿渣粉与石膏复合混凝土

电通量和扩散系数见表 10。可以看出, 随着矿渣粉掺量增加, 28 和 56 d 混凝土电通量以及 56 d 扩散系数均不断减小, 掺入不小于 10% 的矿渣粉混凝土 56 d 电通量小于 800 C、56 d 扩散系数不大于 $2.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 满足 JTS/T 167-17—2020《港口工程后张预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程》^[13] 和 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》^[14] 所规定的 800 C 的质量要求。

表 10 混凝土电通量和扩散系数测试结果

系列	编号	电通量/C		56 d 扩散系数/ ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
		28 d	56 d	
1	A ₀	1 224	927	3.3
	A ₁	845	690	2.6
	A ₂	682	547	2.2
	A ₃	659	467	2.1
	A ₄	632	437	1.7
	A ₅	562	355	1.5
	2	B ₁	662	406
B ₂		556	393	1.1
B ₃		529	357	0.9
3	C ₁	586	473	1.3
	C ₂	550	454	1.0
	C ₃	512	452	0.8

由表 10 还可看出, 复掺矿渣粉与硬石膏混凝土 28 和 56 d 龄期电通量和扩散系数明显低于单掺矿渣粉混凝土, 掺入硬石膏混凝土 28 d 的电通量均小于 800 C, 且随着硬石膏掺量增加, 混凝土电通量和扩散系数呈不断减小趋势, 具有较高的耐久性, 可满足 JTS/T 167-17—2020《港口工程后张预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程》和 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》所规定的 800 C 的质量要求。

3 应用

3.1 混凝土配合比

根据室内试验研究确定的混凝土配合比见表 11, 进行大管桩管节生产试验。

表 11 混凝土配合比

表 11 混凝土配合比						kg/m ³
水泥	矿粉	硬石膏	砂	石	水	减水剂
390	72	19	575	1 280	116	4.81

3.2 大管桩管节制作

分别进行大管桩混凝土拌制, 采用离心、振动和辊压三复合工艺进行大管桩管节成型制作, 生产的管节进行蒸汽养护, 管节生产及脱模后的外观见图 1。测得气温为 12~19 ℃, 拌制的混凝土维勃稠度为 25 s, 均满足生产要求, 管节脱模后的外观良好, 脱模时无粘皮现象。



a) 离心成型管节



b) 脱模管节

图 1 大管桩管节生产及脱模后的外观

3.3 性能试验

将混凝土试块放入蒸养池中进行同条件蒸汽养护, 分别测试不同龄期混凝土抗压强度、电通量和扩散系数, 见表 12。可以看出, 混凝土脱模强度为 66.8 MPa, 由于脱模强度显著增加, 制作的管节外观良好, 未出现粘皮现象; 混凝土的 28 和 56 d 龄期的混凝土电通量分别为 625 和 570 C,

均小于 800 C, 可满足有关要求。此外, 随着龄期的增加, 混凝土抗压强度均不断增加, 混凝土 28 d 抗压强度大于 70 MPa, 56 d 抗压强度大于 90 MPa。因此, 试验结果表明, 混凝土的抗压强度和脱模效果以及电通量均满足要求。

表 12 混凝土抗压强度、电通量和扩散系数测试结果

脱模	抗压强度/MPa				电通量/C		28 d 扩散系数/ (10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)	
	1 d	3 d	7 d	28 d	56 d	28 d		56 d
66.8	67.8	68.8	70.9	79.6	92.8	625	570	2.33

4 结论

1) 采用矿渣粉矿物掺合料, 开展了大管桩混凝土强度和耐久性试验, 单掺矿渣粉明显提高了混凝土耐久性, 降低了电通量, 但会使混凝土脱模强度降低, 导致大管桩脱模时发生粘皮现象。

2) 针对掺入矿渣粉导致大管桩混凝土脱模强度降低的情况, 提出了矿渣粉与硬石膏复合的大管桩混凝土配制方法, 试验研究表明其具有较高的脱模强度和耐久性。

3) 采用研制的矿渣粉与硬石膏复合混凝土配合比, 开展大管桩混凝土管节生产试验, 应用情况表明, 大管桩脱模效果良好, 混凝土强度等级达到 C70, 混凝土电通量小于 800 C, 具有良好的耐久性。

参考文献:

[1] 汪冬冬, 王成启, 时蓓玲, 等. 大管桩现场取样分析与耐久性研究[J]. 中国港湾建设, 2008(1): 39-43.
 [2] 刘鹏飞. 混凝土大管桩及其在我国港口工程中的应用[J]. 水运工程, 1997(8): 19-22.

[3] 陈耀平. 预应力混凝土大管桩的应用思考与建议[J]. 水运工程, 2002(12): 27-29.
 [4] 沈迪州, 丁建军, 方育平. 妈湾 5 号泊位大管桩码头设计及结构特点[J]. 中国港湾建设, 2004(6): 21-24.
 [5] 丁捍东, 王林, 董建纲, 等. 大管桩使用情况调查[J]. 港工技术与管理, 2001(5): 55-65.
 [6] 杨国平, 李荣庆. 提高港口工程结构设计使用年限的可行性研究[J]. 水运工程, 2019(2): 28-33, 45.
 [7] 汪冬冬, 王成启, 时蓓玲. 大管桩混凝土力学性能、抗氯离子渗透性和抗冻性研究[J]. 水运工程, 2010(12): 37-41.
 [8] 王成启. 海工高性能混凝土配制技术[J]. 水运工程, 2006(2): 9-12.
 [9] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
 [10] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
 [11] 贾艳涛, 孙伟, 郑克仁, 等. 硅酸盐水泥-矿渣复合浆体的水化反应进程研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6): 1548-1553, 1564.
 [12] 高嵩, 李秋义, 吴本清, 等. 超细矿渣粉水化反应特征及活性评价[J]. 混凝土, 2016(1): 96-98, 102.
 [13] 浙江省交通规划设计研究院有限公司. 港口工程后张预应力混凝土长管节管桩设计与施工规程: JTS/T 167-17—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
 [14] 中交四航工程研究院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王璁)

征订通知

2025 年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志官方网站 www.sygc.com.cn 首页下载中心下载“2025 年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部