

文章编号: 0451-0712(2006)06-0210-04

中图分类号: U445.551

文献标识码: B

# 超大直径桩海水造浆的工艺研究与应用

毛志坚, 林海, 高超

(广东省长大公路工程有限公司 广州市 511430)

**摘要:** 在跨海桥梁桩基施工中, 通过用海水和淡水造泥浆性能指标的试验对比, 找到了能满足杭州湾跨海大桥施工要求的价低质优的海水泥浆, 经过施工实际应用, 仅桩基础就节约直接成本近 200 万元, 取得了良好的经济效益。

**关键词:** 杭州湾跨海大桥; 桩基施工; 试验分析; 海水造浆; 应用

## 1 工程概况及海水造浆工艺研究背景

杭州湾跨海大桥 II 合同段包括北航道桥和北侧高墩区引桥下部结构, 共计 152 根钻孔灌注桩, 其中: 主墩桩基 52 根, 桩径 2.8 m, 平均桩长 125 m; 边辅助墩共计 44 根, 桩径 2.5 m, 平均桩长 93 m; 高墩区引桥墩共计 56 根, 桩径 2.5 m, 平均桩长 92 m。本工程桩基均属于深孔大直径钻孔灌注桩, 为深孔大直径泥浆工艺研究提供了条件。

北航道桥工程区段基岩面均为第四系松散沉积物, 地质复杂, 桥位处海底地形平坦, 覆盖层很厚, 地层岩性分布比较均匀。由于受涨落潮水的影响, 冲淤交互进行, 要求泥浆具有高稳定性和良好的抗渗性能, 才能保证桩基施工有良好的成孔效果。

由于工程地质、水质、泥浆材料等决定着钻孔的泥浆配比, 在不同的海域施工, 应采取不同的泥浆配比。在桩基础开工前, 必须做泥浆比对试验, 从中优化选择泥浆配比。于是利用在厦门海沧大桥、湛江海湾大桥等海湾特大型桥梁施工过程中总结出的海水造浆技术, 对用海水和淡水造浆技术性能作对比, 以配制符合本工程特点的优质泥浆。

## 2 海水泥浆的技术要求

(1) 根据《杭州湾跨海大桥施工专用技术规范》的要求, 终孔后的泥浆指标标准高, 密度要在  $1.03 \sim 1.10 \text{ g/cm}^3$ , 粘度在  $17 \sim 20 \text{ s}$ , 胶体率大于 98%, 含砂率小于 2%, pH 值在  $9 \sim 11$ ;

(2) 因水中含有大量的无机盐类, 故要求泥浆性

能必须稳定, 对盐的敏感性较低, 具有抗盐类污染的较高性能, 性能变化小;

(3) 钻孔泥浆应具有降低失水、稀释、悬浮钻渣功能, 泥皮要薄, 护壁要稳定。

## 3 钻孔泥浆材料的选用

通过检索现有国内外海水泥浆技术的有关文献, 结合杭州湾大桥海域的实际情况, 在保证配制海水泥浆性能指标的前提下, 本着价格经济、性能稳定及便于就地取材的原则, 对不同性质的造浆材料进行了试验对比, 按对比结果选择造浆材料。

### 3.1 水

配制泥浆对水有一定要求, 饮用水可以直接使用, 但使用海水时应做拌和试验。当水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度达到 100 PPm 以上时, 膨润土就会凝聚和沉降分离; 当水中的  $\text{Na}^+$  浓度达到 500 PPm 以上时, 膨润土的湿胀性就下降极快, 达到近于海水浓度时 (3 400 PPm) 就会产生凝聚。为此, 在用海水直接造浆时, 需选用适宜处理剂, 使海水泥浆性能满足要求, 试验中的淡水为饮用自来水, 海水为施工区域内的海水。

### 3.2 造浆土体

结合在湛江海湾大桥的造浆经验, 膨润土和抗盐粘土都具有相对密度低, 含砂量小, 造浆后的泥皮薄, 稳定、固壁能力高, 阻力小和造浆能力大等特点, 故选用膨润土和抗盐粘土作为比选材料。

膨润土加入水后, 水很快进入蒙脱石的晶格层,



膨润土很快湿胀,并在湿胀后成为一种带有电荷的亲水胶体,通过颗粒间的静电斥力,保持稳定的悬浮

状态,使泥浆处于稳定状态。试验中的膨润土物理指标及化学成分见表 1。

表 1 膨润土的物理指标及化学成分

指标名称	粒度	pH 值	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	烧失量
指标值	200 目通过 97%	8.5	71.95%	8.16%	0.56%	1.04%	1.56%	2.12%	1.76%	12.7%

抗盐粘土是以优质凹凸棒粘土为原料,经特殊工艺加工制成的钻孔泥浆材料。抗盐粘土适用于地质钻探、海洋钻井、含盐地质钻井,具有较高的热稳定性和抗盐性,使用它可保护井壁、减少废井率、提高钻井效率、降低钻井成本。试验中抗盐粘土技术标准见表 2。

表 2 一级品抗盐粘土技术标准

指标名称	要求
600 转读数	≥30 格
筛余(200 目)	≤8%

### 3.3 泥浆分散剂

使用分散剂是为了防止盐分或海泥对泥浆的污染,防止钻孔坍塌,提高泥浆的再生功能。常用的有碱类(如:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH)和木质素磺酸盐类(俗称

FCL 铁铬盐)。杭州湾大桥技术规范对 pH 值要求高,选择碱类散剂,可根据需要利用碱的掺量来控制 pH 值的大小。为此在选材试验中,我们分别用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 NaOH,做同配比的泥浆性能试验,并通过比较,合理选择泥浆分散剂。

### 3.4 泥浆增粘剂

使用增粘剂可起到防止钻孔坍塌的作用,在泥浆受盐分或水泥污染时起保护凝胶的作用,同时可提高钻孔效率。一般工程中常用的有羧甲基纤维素,由于海水中阳离子和 Cl<sup>-</sup>的大量存在会降低泥浆粘度,我们选用了具有抗盐性的 CMC,能使泥浆在海水中不降低粘度,并可与任何盐类形成完全溶解的高粘度溶液。CMC 物理化学指标见表 3。

表 3 CMC 物理化学指标

指标名称	外观	有效成分/%	氯化物/%	2%水溶液粘度 mPa·s	干燥减量 %	代替度 D.S	pH 值
指标值	白色絮状粉末	≥80	≤8.0	≥1 400	≤10	≥0.85	6.5~8.0

## 4 钻孔泥浆试验

### 4.1 泥浆试验

钻孔泥浆试配试验共 14 组,是在以往施工实践的基础上,对泥浆配比进行适当调整,并使其具有可比性,泥浆配比试验数据见表 4。

各组配比泥浆的物理性能指标见表 5。

### 4.2 试验分析

#### (1)原状浆分析。

在本标段各工段桩基钻孔过程中,进行了取样和试验工作,得出原状浆不能满足规范要求的结论,仅以 a 组试验加以说明。

在 B10~B19 号桩的出渣口,取一定数量的原状浆,测得密度为 1.25 g/cm<sup>3</sup>,稠度 18 s,含砂率 0.5%,pH 值 7,24 h 胶体率 65%,72 h 胶体率 40%,分层现象严重,泥浆质量非常差,不能满足《杭州湾跨海大桥施工专用技术规范》的要求,直接用原状浆造浆是行不通的。于是在此组试验的基础上,分别用海水和淡水试配了 b 组和 c 组,试验结果表明,c 组由 CMC 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 组成的淡水泥浆性能比较好,c 组和 a 组相比技术性能有所提高,于是又在 c 组的基础

表 4 泥浆配比情况

试验编号	泥浆组分	配比/g
a	B10~B19 号桩原浆	/
b	原状浆+海水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1 000 : 855 : 4.0 : 2.8
c	原状浆+淡水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1 000 : 850 : 6.0 : 2.8
d	膨润土+海水+CMC+NaOH	600 : 3 000 : 4.0 : 6
e	膨润土+淡水+CMC+NaOH	600 : 3 000 : 4.0 : 6
f	膨润土+淡水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 4.0 : 9
g	膨润土+海水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 4.0 : 9
h	膨润土+海水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 4.8 : 10
i	抗盐粘土+海水+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	200 : 1 180 : 3
j	抗盐粘土+淡水+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	200 : 1 180 : 3
k	膨润土+淡水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 4.2 : 10
l	膨润土+海水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 4.0 : 9
m	膨润土+淡水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600 : 3 000 : 3.8 : 9
n	原状浆+海水+CMC+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1 000 : 850 : 7.4 : 2.8

注:(1)b、n 组原状浆是在施工场地取海泥,经海水拌和,制成与 a 组原浆密度、稠度、pH 值非常近似的泥浆;

(2)c 组原状浆是在施工场地取海泥,经淡水拌和,制成与 a 组原浆密度、稠度、pH 值非常近似的泥浆。

上,通过增加泥浆增粘剂 CMC 的量,对其进行优化,基本上达到了预期的效果。



表 5 泥浆的物理性能指标

试验编号	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	稠度/s	含砂率/%	pH 值	24 h 胶体率/%	48 h 胶体率/%	72 h 胶体率/%
a	1.25	18	0.5	7	65	44	40
b	1.14	18	0.4	8.5	72	68	65
c	1.12	20	0.3	9	98	98	97
d	1.11	17	0.4	9	41	35	35
e	1.10	19	0.3	10	49	38	36
f	1.10	28	0.8	8	98	96	95
g	1.10	18	0.8	7	42	42	41
h	1.10	20	1.0	9	98	98	97
i	1.09	22	0.7	10	87	83	80
j	1.09	28	0.7	10	95	90	89
k	1.10	18	0.4	9	99	98	98
l	1.10	17	0.8	9	46	45	45
m	1.10	17	0.4	9	95	94	90
n	1.12	25	0.3	8.5	99	98	96

(2)膨润土和抗盐粘土造浆的比较。

通过膨润土和盐粘土相关配比的泥浆比较,当配置物理指标相接近的泥浆时,抗盐粘土比膨润土用量要小得多,说明了抗盐粘土的造浆效果要好于膨润土,但抗盐粘土作为泥浆组成材料,其市场价格较高,经济效果不明显。

(3)海水和淡水的造浆比较。

通过对膨润土和盐粘土分别配置海水和淡水泥浆,可以看出,淡水造浆的效果无论用膨润土还是盐粘土,同配比的淡水造浆要比海水泥浆密度要小,性能要稳定。但是淡水成本高,施工中要兼顾成本和运输费用。用海水泥浆通过增加一定数量的泥浆分散剂和增粘剂,可以达到同淡水泥浆同样的效果。

选择淡水造浆还是海水造浆,要视工程特点、施工条件,统筹考虑,兼顾成本,优化选择。

(4)稳定性分析。

泥浆稳定性与密度和胶体率的关系,在密度满足施工要求时,72 h 泥浆胶体率是决定性因素,72 h 胶体率越大,稳定性越好,当胶体率相同时,泥浆稠度越大,泥浆越稳定。经研究分析,上述14 组泥浆中c、f、h、k、n 组稳定性要好,72 h 的胶体率都能达到95%。

(5)抗渗性分析。

抗渗性是深孔大直径钻孔灌注桩在施工过程中,根据地质情况,对泥浆性能提出的新要求。一般来说,同地质条件下,深孔大直径钻孔灌注桩在终孔后孔壁受到压力要比浅孔大得多,要求泥浆的抗渗性能要好,使孔壁外海水很难以渗流的方式进入桩孔,从而减弱地下海水对泥浆质量影响的程度。

由于受试验条件的限制,很难做到与施工状态

一致。本次建立了一种试验模型,来尝试判断泥浆的抗渗性能。用海泥做成一个底面封闭的圆筒泥团,泥团外径为34 cm,内径28 cm,高度13 cm。将泥团放入一个内径为37 cm,高度15 cm 的盆内,在盆中注入海水,泥团内注入泥浆,并使海水面与泥浆面保持一定的距离。

通过这种简易模型,来模拟泥浆在桩孔中的状态。相隔一段时间,观察试验模型中的泥浆溶液的物理状态,来大致判断泥浆的抗渗性能。如果泥团中的泥浆一直是浑浊的,我们认为它就是稳定的。按先前预定的抗渗性判断标准,经模拟后发现,稳定性好的泥浆抗渗性能也好。抗渗性好的泥浆,终孔后的泥浆指标也比较稳定。

(6)技术经济分析。

对稳定和抗渗透性能好的泥浆,按材料进货单价,膨润土 230 元/t,抗盐粘土 600 元/t,CMC 22 000 元/t,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>2 100 元/t,淡水 20 元/t,对泥浆成本进行分析计算,技术经济指标见表 6。

5 钻孔泥浆工艺的选择

钻孔泥浆的选择,首先要考虑泥浆的技术性能,保证桩基成孔质量,在此基础上还应结合经济性要求。本标段共计13 个墩,由于B1~B10 墩是搭设栈桥辅助施工,B11~B13 墩依靠船舶运输辅助施工,如果利用海水造浆要消耗较多成本昂贵的 CMC,如果利用淡水造浆,虽然消耗CMC 量少,但淡水消耗量大,船舶和汽车运输费用高,每 m<sup>3</sup> 泥浆需另增 18 元的运输成本。经综合分析后,B1~B13 墩均采用海水造浆,泥浆配比选择h 组。这样既可以保证成孔质



表 6 泥浆技术经济指标分析

验编号	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	72 h 胶体率/%	泥浆体积/m <sup>3</sup>	稠度/s	单位成本/(元/m <sup>3</sup> )	排序
c	1.12	97	0.001 660	20	93.3	3
f	1.10	95	0.003 285	28	92.8	4
h	1.10	97	0.003 286	20	80.5	5
k	1.10	98	0.003 286	18	94.8	2
n	1.12	96	0.001 661	25	101.6	1

量,又能充分利用海水资源,还可节约造浆成本。

公司带来了良好的社会效益。

6 造浆工艺实施

要配置性能良好的泥浆,除了备有优质的原材料外,还应注意施工工艺即拌和工艺,在本工程中尤其注意纤维素 CMC 的水解工艺。其方法是将 CMC 按 1:30~1:60 的比例配成水溶液,用高速搅拌机高速搅动至晶体完全溶解,即溶液表面没有晶体。在加料过程中应不间断地搅拌,施工现场可采用高压循环泵对泥浆进行快速循环(搅拌速度将直接影响泥浆的性能),直至搅拌均匀。

施工工艺如图 1 所示。

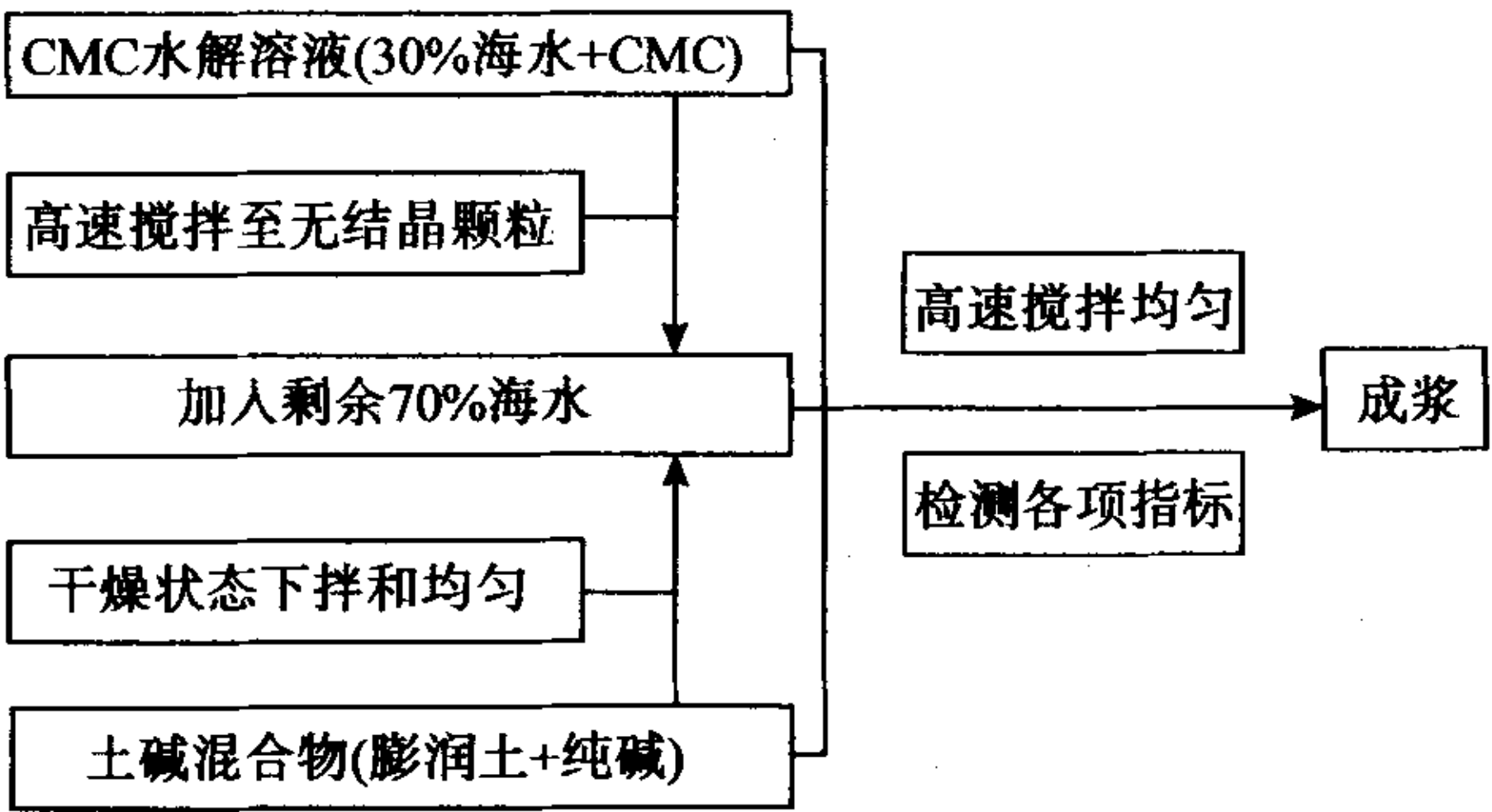


图 1 施工工艺流程

7 海水泥浆的应用

通过现场的泥浆性能论证,对造浆工艺的研究具有重要意义。杭州湾地质复杂,通过对 12 根桩泥浆质量全过程的动态监控,施工过程中针对不同的地质情况,对海水泥浆的各项性能指标进行全过程控制。在钻进过程中,比重由先前的 1.25 调到 1.1,含砂率由 2% 降至清孔后的 0.5%,pH 值 9~11,胶体率不小于 95%,粘度 17~20 s。特别是在 B10 墩 2 号桩,在钻孔过程中,钻头掉落至孔底,处理时间花了 3 个多月,施工中用 h 组泥浆护壁,由于泥浆质量稳定,抗渗性能好,在重新钻孔过程中,没有发现漏浆和塌孔现象,桩孔灌注后,经超声波检测,桩基为 I 类桩。

采用此造浆工艺,桩基成孔质量比较好,截止 2005 年 12 月,桩基经超声波检测,全部为 I 类桩,给

8 造浆工艺研究的经济效益

通过造浆工艺的研究和一段时间的工程应用,我们取得了很好的经济效益和社会效益。

(1)如果桩基钻孔造浆采用试验中最优化的淡水造浆,技术性能最好的泥浆是 k 组,泥浆成本为 94.8 元/m<sup>3</sup>,采用不同的造浆工艺后,海水造浆成本为 80.5 元/m<sup>3</sup>,2.5 m 桩基可节约成本 78.7 万元,2.8 m 桩基可节约成本 59.5 万元。此造浆工艺研究的应用,仅成本就可节约 138.2 万元。

(2)经观察发现,本工艺应用后,桩基成孔时间比以前平均缩短了 1.5 d。按 1.5 d 计算,桩基成孔费用按 0.2 万元/d 计算,可节约成本 45.6 万元。

(3)经以上分析,本造浆工艺的实施,可给项目部产生直接经济效益 183.8 万元。

9 结论

(1)超大直径海上桩基础施工,施工造浆工艺的选择,要结合工程地质和水文条件,同时兼顾施工条件,并分析施工成本,然后确定造浆工艺。

(2)海水泥浆配比应经过严格的试验,优化分析后确定泥浆配比。应用中要根据具体地质条件,对配比进行微调,以满足施工的需要。

(3)原材料选取与搅拌工艺是决定海水泥浆基本性能的重要原因,所以在施工中要正确操作,确保钻孔泥浆的质量。

参考文献:

[1] JTJ 041—2000,公路桥涵施工技术规范[S].  
[2] SY 5490—93,钻井液试验用钠膨润土[S].  
[3] 交通部第一公路工程公司. 公路施工手册——桥涵(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.  
[4] 王中文,刘宏波,蔡爱杰. 海水泥浆在沿海地区钻孔灌注桩中的应用[J]. 桥梁建设,2001,(6).  
[5] 杭州湾大桥指挥部. 杭州湾跨海大桥专用施工技术规范[Z]. 2004.