



# 负摩擦力对某高桩码头桩基沉降的影响

施斌

(广州航海高等专科学校, 广东广州 510330)

**摘要:** 介绍某高桩码头斜桩下沉桩帽竖向开裂现象, 认为主要原因是斜桩未进入良好持力层、斜桩受负摩擦力作用。提出锤击沉桩对软黏土的触变效应、码头岸坡淤积也会对桩产生负摩擦力, 并对淤泥层、砂土层的负摩擦力系数取值作了比较。

**关键词:** 软土地基; 桩基沉降; 负摩擦力

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>13; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0178-04

## Influence of negative frictional resistance on pile settlement of piled wharf

SHI Bin

(Department of Marine Architecture Engineering, Guangzhou Maritime College, Guangzhou 510330, China)

**Abstract:** Based on the feature of vertical crack of pile caps and settlement of angled pile in a piled wharf, we think the reason lies in that the angled piles in the piled wharf do not enter into favorable bearing stratum and the oblique piles are acted by negative frictional resistance. It is proposed that the thixotropy of soft ground during pile driving and the river deposition can also exert the negative frictional resistance to the pile. The coefficient value of negative frictional resistance is compared between the silty ground and sandy soil.

**Key words:** soft ground; settlement of pile; negative friction resistance

### 1 码头概况

#### 1.1 码头结构形式

珠江三角洲某河口港码头, 结构形式为高桩梁板式, 设计船型为3 000 t沿海散货船, 码头长100.5 m, 宽18 m, 码头两端设栈桥与陆域相接, 码头港池底高程-8.5 m, 码头面高程2.96 m, 码头分2个结构段, 共21个横向排架, 排架间距5 m, 原设计图纸中桩基础全部采用500 mm × 500 mm钢筋混凝土直桩, 施工时交替在每个横向排架的A轴桩内侧或B轴桩外侧增加了一根直径 $\phi$ 500 mm、斜度3:1、扭角15°、带有封闭桩尖的钢管斜桩。桩顶上现浇混凝土桩帽, 其上设置纵横向水平撑和立柱, A轴桩和B轴桩与立柱在同一轴线上, 码头横断面见图1。1991年2月码头竣工并投入使用。

#### 1.2 码头桩基现状

2008年对码头后方进行改造, 原码头结构不

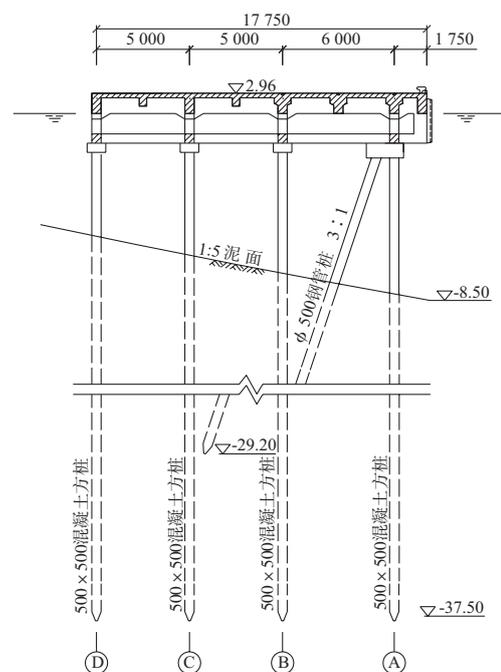


图1 码头横断面

收稿日期: 2012-12-21

作者简介: 施斌(1962—), 男, 教授, 从事港口工程施工与教学。

变，在码头内侧、两栈桥间扩建了桩基结构后平台和龙门吊轨道梁，与整个码头连成一片。2011年对现有码头进行检测，从码头正立面自左向右进行横向排架编号，发现排架4，6，8，10，12，18的A轴桩内侧钢管斜桩有下沉现象且桩帽竖向开裂，排架14，16的A轴桩内侧钢管斜桩下沉并与桩帽脱离（图2，图3）。排架11，13的B轴桩外侧钢管斜桩（向A轴桩向倾斜）也有下沉现象，但桩帽没有明显开裂现象。



图2 斜桩沉降桩帽开裂



图3 斜桩沉降脱离桩帽

## 2 码头工程地质和水下地形

### 2.1 码头区域的地质特征

根据码头设计阶段的工程地质勘察报告，码

头区域工程地质特征自上而下分4层。

#### 1) 淤泥层。

淤泥，暗灰色，饱和，上部含黏土较多，呈流塑-软塑状态，向下粉砂逐渐增加，呈软塑状态，属高压缩性软土，层厚13.9~22.2 m，平均18.7 m。

#### 2) 冲积层。

②<sub>1</sub>淤泥质中粗砂和淤泥质砂卵石层：灰-暗灰色，淤泥一般占20%~50%，卵石直径1~3 cm，占15%~50%，层厚0.4~5.6 m，平均2.1 m，松散状态。

②<sub>2</sub>中粗砾砂、砂卵石及中细砂层：浅灰、土黄和灰白色，中粗砂和砂卵石为主，层厚2.2~7.1 m，平均4.9 m，中密状态。

②<sub>3</sub>亚黏土和轻亚黏土层：土黄和灰白色，中细砂较多，层厚0.4~2.8 m，平均1.4 m，可塑状态。

#### 3) 残积层。

③<sub>1</sub>可塑状态残积层：轻亚黏土和亚黏土，灰、灰黑和灰绿色，黏性较强，层厚0.4~2.8 m。

③<sub>2</sub>硬塑状态残积层：轻亚黏土和亚黏土，灰、灰黑和灰绿色，有黏性，强风化岩块占5%~10%，块度10~40 mm，层厚1.7~8.0 m，平均4.8 m。

③<sub>3</sub>坚硬状态残积层：轻亚黏土，灰-灰黑色，稍有黏性，强风化岩块占10%~30%，岩块可用手折断，层厚0.95~4.95 m。

#### 4) 强风化带。

主要岩石为中侏罗统凝灰质砂岩、炭质页岩、燕山期蚀变砂岩。

根据出现沉降现象桩基附近的钻孔柱状图，土层高程及土的物理指标见表1。

### 2.2 码头区域水下地形

根据码头设计阶段的码头区域水下地形图和

表1 土层高程及土的物理指标

土层层号	土层名称	状态密度	层顶高程/m	层厚/m	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	塑性指数I <sub>p</sub>	液性指数I <sub>L</sub>	孔隙比e	桩侧摩阻力特征值/kPa
①	淤泥	软塑	-5.4	18.0	1.60	19.0	1.10	1.80	5
② <sub>1</sub>	淤泥质中粗砂及淤泥质砂卵石层	松散	-23.4	1.2	1.70			1.20	5~10
② <sub>2</sub>	中粗砂、砂卵石及中细砂层	中密	-24.6	4.9	1.95			0.60	25~30
② <sub>3</sub>	亚黏土和轻亚黏土	可塑	-29.5	0.4	1.91	11.0	0.24	0.70	15~20
③ <sub>1</sub>	轻亚黏土和亚黏土	可塑	-29.9	3.0	1.95	11.0	0.24	0.70	15~20
③ <sub>2</sub>	轻亚黏土和亚黏土	硬塑	-32.9	3.6	1.95	7.2	0.11	0.57	20~35
③ <sub>3</sub>	轻亚黏土	坚硬	-36.5		1.95	7.0	0.10	0.60	35~40
④	强风化岩				1.5~2.2				

码头设计断面图，设计港池底高程-8.50 m，设计岸坡1:5。2007年计划对码头后方进行改造时，测量了水下地形，14，16排架码头前沿港池底高程-7.4 m。2010年又测量了码头水下地形图，14，16排架码头前沿高程-6.7 m。

### 3 钢管斜桩沉降原因分析

2011年对现有码头进行检测，发现上述桩基沉降现象。根据业主反映，2007年已发现钢管斜桩有下沉和与桩帽脱开现象。

码头原设计全部为混凝土直桩，施工时交替在A轴桩内侧和B轴桩外侧增加了钢管斜桩，混凝土直桩和钢管斜桩埋入同一桩帽。由图1可见，码头上部结构立柱与混凝土直桩按原设计在同一轴线，如果混凝土直桩桩顶沉降量不大于钢管斜桩桩顶的沉降量，码头上部结构传到桩基的垂直荷载基本上由混凝土直桩承受，钢管斜桩基本不承受垂直荷载。码头地处河口段，顺岸布置，风浪小，钢管斜桩仅在船舶靠泊时受到一定的船舶荷载作用。

由地质资料和竣工图桩底高程可见，钢筋混凝土直桩桩底高程-37.50 m，已进入③<sub>3</sub>坚硬轻亚黏土层，即进入良好的持力层，桩底处地基沉降量很小；但钢管斜桩桩底高程-29.20 m，大部分在淤泥层，只进入②<sub>2</sub>中密状砂土层4.6 m，其下是可塑亚黏土层。由于码头地基有16 m厚的淤泥、淤泥质土层，码头打桩时对淤泥层发生触变效应，码头淤积对原地基附加压应力作用，使淤泥层、砂土层、亚黏土层发生沉降，而混凝土直桩桩底处土层沉降量和桩身压缩量相对较小，从而对混凝土直桩、钢管斜桩产生负摩擦力，使钢管斜桩下沉。因此，土的负摩擦力作用是钢管斜桩沉降的主要原因。

### 4 关于负摩擦力

#### 4.1 负摩擦力产生的下拉力

图4为桩与桩帽节点图，桩帽截面尺寸1 000 mm × 800 mm，设计桩帽顶面配筋6φ16、混凝土强度等级为R30，截面有效高度 $h_0$ 为724 mm。由图1，2可见，由于纵横向水平撑、直桩、立柱

的节点在直桩与立柱的轴线上，根据图2桩帽开裂破坏状态和图4桩帽节点图，假设立柱、直桩和桩帽固定，斜桩负摩擦力产生的向下载力 $F_1$ 、斜桩自重 $F_2$ 、桩帽钢筋混凝土自重 $q$ 作用在桩帽上，桩帽按固定在直桩上的悬臂梁计算（图5）。

按码头设计和施工时港口工程技术规范(1987)<sup>[1]</sup>中钢筋混凝土受弯构件计算，钢筋设计强度 $f_y$ 为240 MPa，混凝土的设计强度 $R_w$ 为22.0 MPa，桩帽受弯承载能力为205.2 kN·m。

为简化计算便于比较，将斜桩视为桩底高程-29.20 m的直桩，则斜桩自重 $F_2$ 为33.5 kN，经计算，斜桩负摩擦力产生的下拉力 $F_1$ 为374.7 kN。

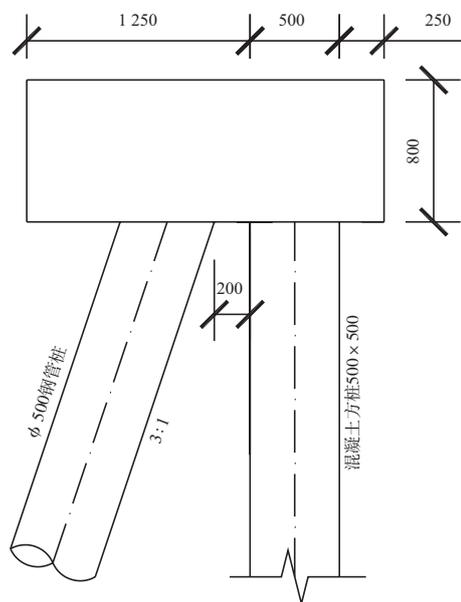


图4 桩与桩帽节点

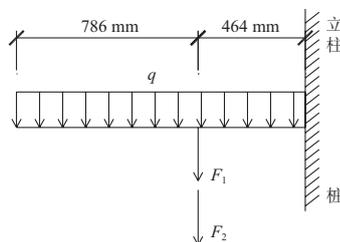


图5 桩帽受力计算简图

#### 4.2 负摩擦力计算

利用结构设计软件，对码头结构进行承载能力极限状态持久组合计算，在永久荷载、设计均布堆载（20 kN/m<sup>2</sup>）、船舶系缆力（250 kN）组合情况下，A轴桩产生最大轴压力，A轴桩内侧有斜桩时桩顶最大轴压力1 373.26 kN，无斜桩时桩顶

最大轴压力1 362.03 kN, 而单桩抗压极限承载力为3 233.59 kN, 说明没有斜桩A轴桩抗压承载力也是足够的。

根据码头断面图和地质钻孔资料, 钢管斜桩穿过淤泥层和淤泥质土层, 进入砂土层。排架14, 16的A轴桩内侧钢管斜桩下沉并与桩帽脱开(图3), 说明斜桩与桩帽连接强度不足, 斜桩桩底以下土层沉降量较大。在地基土层分布基本相同的条件下, 与排架14, 16相邻的排架12, 18的A轴桩内侧钢管斜桩下沉、桩帽开裂(图2), 但斜桩与桩帽连接正常, 阻止了斜桩桩底以下土层沉降而可能出现的斜桩沉降。因此, 可以判断A轴桩内侧钢管斜桩在全桩长范围内都因地基土沉降而受负摩擦力作用。

关于负摩擦力的计算, 文献[2]根据某接岸挡土结构的斜顶桩、板桩、支撑桩和试桩在码头陆域回填后桩力的测试结果, 认为桩力增大是由桩侧负摩擦力造成的, 提出负摩擦力强度最大值: 软弱黏土层为 $q_u/2$ , 其中 $q_u$ 为软弱黏土层无侧限抗压强度; 砂、石层为 $rhKntan\phi$ , 其中 $Kn$ 为静止土压力系数,  $\phi$ 为土的内摩擦角。文献[3]根据在码头接岸桩基承台后方上层为块石棱体下层为挤密砂桩加固的软土地基上的试桩负摩擦力实测结果, 用有限元法和竖向有效应力公式法进行计算研究, 认为两种方法均获得较好的结果, 对于竖向有效应力公式法, 提出负摩擦力系数 $\beta$ : 抛石层为0.38, 砂层为0.32, 砂桩加固淤泥层为0.25, 粉质黏土层为0.30。建筑桩基技术规范<sup>[4]</sup>规定, 当无实测资料时, 负摩擦力采用竖向有效应力法计算, 负摩擦力系数 $\xi_n$ : 饱和软土为0.15~0.25, 黏性土和粉土为0.25~0.40, 砂土为0.35~0.50。

根据2007年地形测量资料, 桩基沉降段码头前沿港池底高程-7.4 m, 比设计高程-8.5 m淤积了1.1 m, A轴桩内侧钢管斜桩泥面高程设计为-7.50 m, 现按淤积至-6.4 m考虑, 按照建筑桩

基技术规范负摩擦力计算方法, 负摩擦力系数 $\xi_n$ 对于淤泥、淤泥质土取0.15, 砂土取0.35, 将钢管斜桩视为桩底高程-29.20 m的直桩, 全桩长受负摩擦力作用, 经计算, 负摩擦力产生的下拉力(垂直向)为568.7 kN, 是由桩帽破坏推算的下拉力374.7 kN的1.5倍, 说明对于未经地基处理的淤泥、淤泥质土和砂土层, 采用建筑桩基技术规范负摩擦力计算方法, 负摩擦力系数取规定值范围的较小值, 计算码头桩基的负摩擦力偏大, 而对桩的承载力设计偏于安全。

## 5 结论

1) 建于软黏土地基上的某高桩码头钢管斜桩沉降, 主要是因为钢管斜桩没有进入良好持力层, 混凝土直桩和钢管斜桩桩端进入不同持力层, 地基土沉降对其产生负摩擦力而引起;

2) 通常, 桩台附近有大面积堆载和填土将对桩产生负摩擦力, 从上述码头钢管斜桩沉降现象可见, 锤击沉桩对软黏土的触变效应、桩受码头荷载作用后对桩周土体产生的摩擦压应力作用、码头下岸坡淤积也会对桩产生负摩擦力;

3) 对于未经地基处理的淤泥、淤泥质土和砂土层负摩擦力计算, 采用建筑桩基技术规范负摩擦力计算方法, 负摩擦力系数取规定值范围的较小值来计算是合适的。

## 参考文献:

- [1] 交通运输部. 港口工程技术规范(1987)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [2] 杨荣喜, 童旭东. 负摩擦力对基桩内力的影响及其结构计算[J]. 水运工程, 2008(1): 62-64.
- [3] 程泽坤, 刘家才. 高回填软土地基中基桩负摩擦力问题[J]. 中国港湾建设, 2008(1): 1-4.
- [4] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)