

# 砂性土碳酸盐含量对桩基承载力的影响

吴院生<sup>1</sup>, 刘 宁<sup>2</sup>, 蔡 伟<sup>2</sup>, 袁永强<sup>2</sup>

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 含碳酸盐砂性土有孔隙多、颗粒形状不规则、易胶结、易破碎等特点, 其成因、结构机理及工程力学性质与一般石英砂有较大差异, 碳酸盐含量对桩基承载力的影响尤为显著。总结了碳酸盐含量对桩基承载力的影响机理, 介绍国际公认的美国石油行业学会(API)桩基设计规范及英国帝国理工大学(ICP)推荐的计算方法, 并通过沙特某人工岛项目工程实例计算碳酸盐含量对桩基承载力的影响大小。

**关键词:** 砂性土; 碳酸盐含量; 桩基承载力

中图分类号: U 656.1; TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0198-05

## Effect of carbonate content in sandy soil on bearing capacity of pile foundation

WU Yuan-sheng<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>2</sup>, CAI Wei<sup>2</sup>, YUAN Yong-qiang<sup>2</sup>

(1.China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China;

2.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** The sand with carbonate content is characterized by porosity, irregular particle shape, easy cementation, easy breakage and so on while its origin, structural mechanism and engineering mechanical properties are quite different from ordinary quartz sand, especially the carbonate content has a significant impact on the bearing capacity of pile foundation. In this paper, the influence mechanism of carbonate content on the bearing capacity of pile foundation is summarized, and the calculate method recommended by API which is the internationally recognized pile design code and Imperial College(ICP) are introduced. Finally, the influence of carbonate content on the bearing capacity of pile foundation is calculated through an engineering example of an artificial island project in Saudi Arabia.

**Keywords:** sand; carbonate content; pile bearing capacity

传统桩基在砂性土中的侧摩阻力、桩端阻力计算公式及经验取值等基本建立在土体为石英砂基础上, 由于含碳酸盐砂性土在成因及结构机理上同石英砂存在较大差异, 砂土中碳酸盐含量对桩基侧摩阻力及桩端阻力均有一定的折减作用, 降低了桩基承载能力。国外规范标准针对碳酸盐含量对桩基承载力的影响已有较多研究, 并总结出此类土体中桩基承载力的计算方法, 我国工程设计规范中尚未对此问题进行明确的规定。随着

“一带一路”倡议的深度实施, 中国企业在海外基础设施建设中涉及到含碳酸盐砂性土作为地基持力层的工程越来越多, 有必要在设计中考虑碳酸盐含量对桩基础承载力的影响。

沙特某人工岛项目桥梁基础采用打入钢管桩, 工程地质以砂性土为主, 但砂土中含大量的碎贝壳, 经实验室测定, 其砂性土中碳酸盐(主要成分为碳酸钙)含量较高。本文从碳酸盐砂的成因、结构机理以及与桩基作用时的特性展开分析, 了解

折减机理, 结合美国石油行业学会(API)规范和英国帝国理工大学(ICP)方法中提供的计算折减方法, 通过工程实例对比分析碳酸盐含量对桩基承载力的影响大小。

## 1 碳酸盐含量对桩基承载力的影响机理

### 1.1 含碳酸盐砂性土的成因及特性

含碳酸盐砂性土广泛存在于沿海地区, 为海陆交互成因的生物碎屑类混合土, 其中的碳酸盐矿物主要以文石及高镁方解石的形式存在。但由于其沉积过程中未经长途搬运, 形成的土颗粒具有孔隙多、易破碎、形状不规则等特征, 使其力学性质与陆相沉积物有明显的区别<sup>[1]</sup>。碳酸盐含量的变化会导致砂土的物理力学特性表现出明显的差异。

在同等试验条件下, 含碳酸盐砂土的颗粒强度比石英砂小得多, 原因在于文石和方解石表面莫氏硬度分别为 3.5 和 3.0, 而石英石为 7.0, 这也是碳酸盐砂颗粒在受力时容易破碎的主要原因<sup>[2]</sup>。另外, 碳酸盐砂土主要由珊瑚碎屑组成, 棱角尖锐, 在受力情况下, 棱角容易断裂; 而石英砂磨圆度好, 矿物硬度大, 受力时颗粒容易发生滚动而不易破碎。碳酸盐砂孔隙比远高于石英砂, 但在松散和密实情况下, 碳酸盐砂的内摩擦角高于石英砂。

综上, 含碳酸盐砂性土具有孔隙比高、颗粒形状不规则、易破碎, 颗粒间胶结等特殊物理性质, 其中颗粒破碎特性是引起其与传统石英砂力学性质不同的主要因素。

### 1.2 碳酸盐砂土和桩基作用特点

桩土作用主要体现在桩侧摩阻力及桩端阻力两个方面, 其主要作用机理为: 当竖向荷载逐步施加于桩顶时, 桩身上部受到压缩而产生相对于桩周土的向下位移, 同时桩身侧表面受到土的向上摩阻力的作用, 桩身荷载通过桩侧摩阻力传递给桩周土, 致使桩身荷载和桩身压缩变形随深度递减。在桩土相对位移为零处, 桩侧摩阻力尚未

开始发挥作用而等于零。随着荷载的继续增加, 桩身下部的摩阻力逐步被调动起来, 从而将荷载也部分传给桩端土层并使其压缩从而产生桩端阻力。桩端土层的压缩导致桩土相对位移增加, 桩侧摩阻力进一步发挥, 当桩侧摩阻力达到极限后, 位移继续增大, 桩侧摩阻力保持不变, 若继续增加荷载, 其荷载增量全部由桩端阻力承担。若荷载增大到使桩端持力层大量压缩和塑性挤出, 位移将明显增大, 直至桩端阻力达到极限而破坏。一般来说, 靠近桩身上部土层的侧阻力先于下部土层发挥作用, 而侧阻力先于端阻阻力发挥作用。

在过去几十年里, 在不同碳酸盐含量砂土地层上的桩基工程建设中, 基于石英砂基础上的传统计算方法已经被证明存在一定的误差, 其原因主要是由于含碳酸盐砂性土的特殊结构机理, 其侧摩阻力和端阻力均与石英砂存在一定的差异。

#### 1.2.1 侧摩阻力

当砂性土中碳酸盐含量较高时, 桩的挤土加密效应并不明显。对于石英砂土, 在挤土作用下, 桩周土体相对密度会增加, 导致桩周水平应力的增加, 从而出现桩侧摩阻力增加。但对于碳酸盐含量较高的砂土, 沉桩过程中的高应力使更多的砂土颗粒产生破碎, 并伴随桩周土体相对密度的增加, 颗粒破碎越多, 这将导致桩周水平有效应力迅速减小。在此因素影响下, 桩周水平有效应力增加有限, 因此相比石英砂, 相同相对密度下的砂土, 碳酸盐砂桩侧摩阻力偏小, 同时桩侧阻力深度效应中临界深度明显比石英砂小, 即桩入土之后很快就达到极限侧摩阻力, 侧摩阻力不再随深度增加而增大。

#### 1.2.2 桩端阻力

桩端阻力主要受穿过土层及持力层的特性、沉桩工艺、进入持力层深度、桩的尺寸等因素影响。相比石英砂, 含碳酸盐砂土的强度低, 导致桩端阻力较低。桩端阻力的发挥也具有深度效应, 在端阻临界深度内, 桩端阻力随着桩的入土深度

的增加而线性增加，当桩的入土深度超过端阻临界深度时，桩端阻力保持恒定不再增大。与石英砂相比，碳酸盐砂临界深度较小。

根据国内外对碳酸盐砂的研究，碳酸盐砂与桩基作用特点可归纳如下：1) 虽然碳酸盐砂内摩擦角较高，但是打入桩桩周阻力却很低，桩端阻力也较低，一般认为是由颗粒破碎和胶结作用破坏造成的；2) 打入桩桩侧阻力远低于钻孔灌注桩；3) 在碳酸盐砂地质条件下开展桩基设计时，需要考虑碳酸盐含量对桩基承载力的折减效应。

## 2 国外规范标准关于含碳酸盐砂土中桩基承载力的计算方法

### 2.1 美国规范相关计算方法

美国标准 *API recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design* (简称 API RP 2A-WSD)<sup>[3]</sup> 是国际上应用较为广泛的海上钢结构规范之一。规范推荐了含碳酸盐砂性土桩基承载力的计算方法，其计算参数取值可以根据不同的土力学试验结果获得，计算方法实用性强。此方法也被沙特阿美石油公司企业设计标准 SAES-Q-014<sup>[4]</sup> 作为推荐方法。

API 规范给出的开口钢管桩总承载力  $Q_d$  公式为：

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p \quad (1)$$

式中： $Q_f$  为桩侧摩阻力(kN)； $Q_p$  为桩端阻力(kN)； $f$  为单位桩侧摩阻力(kPa)； $q$  为单位桩端阻力(kPa)； $A_s$  为桩侧面积( $m^2$ )； $A_p$  为桩端面积( $m^2$ )。

根据 API RP 2A 中的相关论述，碳酸盐含量小于 20% 的砂性土可视为石英砂，碳酸盐含量大于 80% 的砂性土可视为碳酸盐砂。

对于碳酸盐含量小于 20% 的石英砂土，按照下式计算单位侧摩阻力和单位桩端阻力：

$$f = \beta p'_0 \quad (2)$$

$$q = N_q p'_0 \quad (3)$$

$$\beta = K \tan \delta \quad (4)$$

式中： $\beta$  和  $N_q$  是无量纲侧阻和端阻系数； $\delta$  为桩土间

摩擦角； $K$  为系数，取 0.8； $p'_0$  为有效应力(kPa)。规范中给出了针对不同相对密实度和土体类型的  $\beta$  和  $N_q$  的取值，见表 1。

表 1 API RP 2A-WSD 桩基承载力计算参数

相对密实度	土体类型	桩土间摩擦角 $\delta/(^\circ)$	$\beta$	$f_{\max}/kPa$	$N_q$	$q_{\max}/MPa$
非常松散	砂					
松散	砂					
松散	砂-粉土	15°	0.21°	48°	8°	2°
中等密实	粉土					
密实	粉土					
中等密实	砂-粉土	20	0.29	67	12	3
中等密实	砂	25	0.37	81	20	5
密实	砂	30	0.46	96	40	10
非常密实	砂-粉土	35	0.56	115	50	12
非常密实	砂					

注：\* 在新版 API RP 2A-WSD 中已不体现该类型土层的建议参数，建议采用基于 CPT 的方法进行计算。由于同等密实条件下，碳酸盐砂实测 CPT 较石英砂偏低，也证明了碳酸盐含量对砂性土中桩基承载力存在折减作用。

对于碳酸盐含量大于 80% 的砂性土，单位侧摩阻力和单位桩端阻力可按照下式计算：

$$f = f_{80} = 0.14 p'_0 f_{\max} \quad (5)$$

$$q = q_{80} = N_q p'_0 q_{\max} \quad (6)$$

计算得单位侧摩阻力  $f = 20$  kPa，单位桩端阻力  $q = 3$  MPa。

对碳酸盐含量介于 20%~80% 的砂性土，单位侧摩阻力和单位桩端阻力可按照下式计算：

$$f = f_{si} - (f_{si} - f_{80}) \times \frac{\lg(CC/20)}{\lg 4} \quad (7)$$

$$q = q_{si} - (q_{si} - q_{80}) \times \frac{\lg(CC/20)}{\lg 4} \quad (8)$$

式中： $f_{si}$  及  $q_{si}$  为碳酸盐含量小于 20% 时，按照式(2)~(4) 及表 1 给出的参数计算得到的单位侧摩阻力和单位桩端阻力； $f_{80}$  及  $q_{80}$  为碳酸盐含量大于 80% 时，按照公式(5)~(6) 计算得到的单位侧摩阻力和单位桩端阻力；CC 为碳酸盐含量(%)。需要注意的是，当按照公式(7)~(8) 计算的碳酸盐含量介于 20%~80% 的砂性土单位侧摩阻力和单位桩端阻力值大于表 1 中给出的限值时，取表 1 中限值作为最终计算结果<sup>[5]</sup>。

## 2.2 英国标准相关计算方法

英国帝国理工大学基于大量的研究, 综合考虑土体参数、桩径及不同土层的贯入度, 总结出了不同碳酸盐含量砂性土桩基承载力的计算方法, 以下简称 ICP 方法<sup>[6]</sup>。ICP 方法中将碳酸盐含量低于 50% 的砂性土视为石英砂, 高于 50% 视为碳酸盐砂。

对于碳酸盐含量小于 50% 的砂性土, 单位侧摩阻力和单位桩端阻力可按照下式计算:

$$f = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \cdot \tan\delta \quad (9)$$

$$q = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 q_c [0.5 - 0.25 \lg(D/0.036)] \quad (10)$$

$$\sigma'_{rc} = 0.029 q_c \left( \frac{p'_0}{p_a} \right)^{0.13} \left( \frac{D-2t}{2h} \right)^{0.38} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma'_{rd} = 4 \cdot \frac{q_c}{A + B\eta - C\eta^2} \cdot \frac{\Delta r}{D} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{q_c}{\sqrt{p'_0 p_a}} \quad (13)$$

式中:  $\sigma'_{rc}$  为局部径向有效应力,  $\Delta\sigma'_{rd}$  为桩基加载过程中局部径向有效应力的增量;  $\eta$  为无量纲应力比;  $q_c$  为 CPT 实测锥尖阻力值 (MPa);  $p_a$  为标准大气压强, 取 100 kPa;  $h$  为土层厚度 (m);  $\Delta r$  为桩基粗糙度, 取 0.02 mm; 系数  $A$  取 0.020 3,  $B$  取 0.001 25,  $C$  取  $1.216 \times 10^{-6}$ ;  $D$  为桩径 (m);  $t$  为壁厚 (m)。

对于碳酸盐含量大于 50% 的砂性土, 单位桩端阻力可按照公式(8)计算, 单位侧摩阻力可按照下式计算。

$$f = \sigma'_{rc} \tan\delta \quad (14)$$

$$\sigma'_{rc} = 72 \left( \frac{p'_0}{p_a} \right)^{0.84} \left( \frac{D-2t}{2h} \right)^{0.38} \quad (15)$$

其中, ICP 方法推荐桩土间外摩擦角  $\delta$  可取 25°, 含碳酸盐砂性土水下浮密度可取 7.5 t/m<sup>3</sup>。

## 3 工程实例

沙特某人工岛项目位于波斯湾北部, 项目拟新建桥梁结构为已有陆堤和新建人工岛提供连接。桥梁总长 330 m、宽 14 m, 共 12 个排架, 每排 3 根桩。桩基采用打入钢管桩, 桩径 1.2 m、壁厚 25 mm。桥梁结构见图 1。

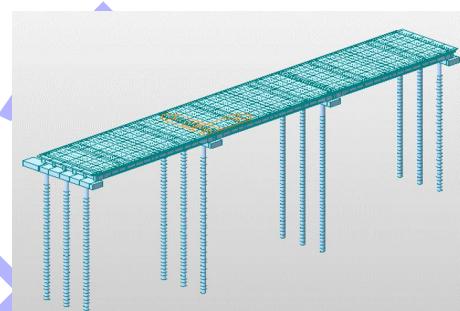


图 1 桥梁结构

根据岩土勘察报告, 该区域表层存在强风化的砂岩, 表层以下以中密及密实的砂性土为主, 各土层均含有一定比例的碳酸盐, 基岩层为由砂岩、钙质岩和泥岩等组成的岩石。本文以桥梁位置处典型钻孔为例, 采用表 2 中给出的土层划分和土体参数, 分别以 API 及 ICP 方法计算了考虑碳酸盐折减效应的桩基承载力, 并与未考虑碳酸盐折减的承载力值进行比较。计算结果见图 2。

表 2 土体物理力学参数

土层	深度/m	天然密度/(t·m <sup>-3</sup> )	桩土摩擦角/(°)	碳酸盐含量/%	锥尖阻力/MPa
强风化砂岩	0~1.5	2.0	33	45	25.0
中密-密实砂土	1.5~5.0	1.8	31	8	7.2
中等密实砂土	5.0~17.8	1.8	27	18	7.0
密实砂	17.8~24.9	1.8	31	91	10.0
中密-密实砂土	24.9~33.0	1.8	30	30	10.0
强风化砂岩	33.0~40.0	2.0	33	30	25.0

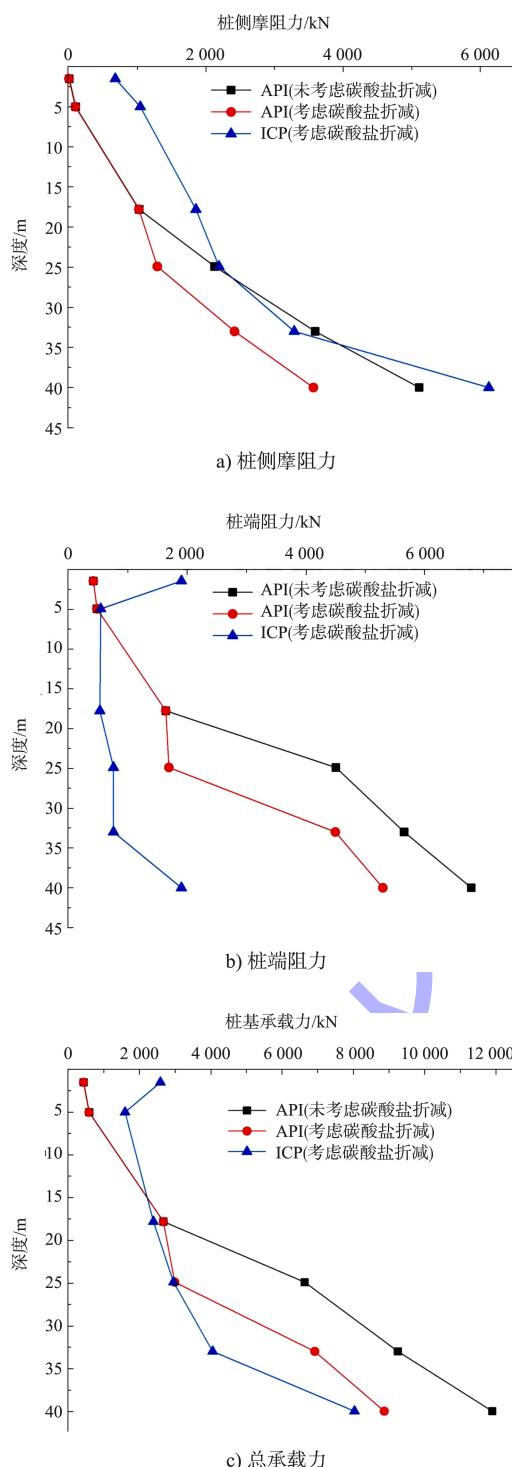


图 2 桩基承载力结果

从计算结果来看：1) 根据 API 方法，考虑碳酸盐含量对桩基承载力折减效应后，总桩基承载力下降约 25%。2) 根据 API 方法，碳酸盐含量在 20%~80% 时，桩侧摩阻力及桩端阻力折减随着碳酸盐含量升高而扩大；碳酸盐含量超过 80% 时，桩基承载力折减超过 50%，折减效应非常明显。

3) API 方法与 ICP 方法考虑碳酸盐折减后，计算结果较为接近。但由于 ICP 方法受静力触探  $q_c$  值影响较大，因此当现场无实测  $q_c$  值时，由不同理论推算得到的  $q_c$  值将会对桩基承载力计算产生较大影响。

#### 4 含碳酸盐砂性土桩基承载力计算方法的对比

1) 由于含碳酸盐砂土不均匀性较为突出，目前国内工程勘察设计中研究尚未深入，《码头结构设计规范》<sup>[7]</sup> 中尚未针对碳酸盐含量对砂性土中桩基承载力的计算影响进行明确的论述。

2) 美国标准 API RP 2A-WSD 主要针对桩基础设计，给出了针对不同碳酸盐含量的桩基承载力计算公式，针对碳酸盐含量较高的土体，桩基承载力折减较为明显，具有较强的实用性和灵活性。

3) 英国标准 ICP 法与美标相似，应用了静力触探(CPT)检测结果，在侧阻力计算时综合考虑了土体参数、桩径及打入深度等因素，相同地质条件下计算结果较美标更为保守，但对于碳酸盐含量的范围划分较为简单，且计算结果受 CPT 检测值影响较大。

#### 5 结论

1) 在计算砂性土中桩基承载力时，须考虑碳酸盐含量的折减效应，确保结构基础安全。美国及英国标准均给出了不同碳酸盐含量所对应的桩基承载力计算公式，美国标准对碳酸盐含量范围划分较细，应用更为广泛。

2) 国外标准推荐的碳酸盐砂土地基中桩基承载力计算方法应用较为成熟、广泛，建议国内工程师在国内外工程设计时可参考借鉴。

3) 随着我国不断推进远海岛礁开发，所采用的回填料碳酸盐含量较高，建议国内勘察设计领域开展相关基础研究工作。

#### 参考文献：

- [1] 白晓宇. 钙质岩土工程性状研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.