

· 地基与基础 ·



桩土作用下缺陷大管桩 单桩极限承载力理论计算

袁 谱, 应宗权, 苏林王

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 码头大管桩出现的不同类型缺陷, 如混凝土脱落和钢筋锈蚀, 会造成码头承载能力下降。基于完整桩-土体系的荷载传递理论, 推导获得缺陷桩剩余极限承载力的计算公式。依托工程实践, 考察混凝土剥落和钢筋锈蚀这两种缺陷类型对单桩极限承载力的影响, 并得出相应结论: 混凝土剥落位置对单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力有影响, 混凝土剥落位置位于土层内部会减小单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力, 单桩竖向极限承载力减小 0.07%, 单桩抗拔极限承载力减小 1.72%; 但对桩身竖向承载力却不同, 混凝土缺损对桩身轴心受压承载力减小 25.65%, 钢筋损失对桩身竖向承载力减小 20.95%。混凝土缺损比钢筋缺损对桩身各项承载力的影响要大得多。

关键词: 极限承载力; 缺陷; 大管桩; 理论计算; 港口

中图分类号: TU 473; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0121-04

Theoretical calculation of ultimate bearing capacity of defect large pipe pile in pile-soil condition

YUAN Pu, YING Zong-quan, SU Lin-wang

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: There are different types of defects of large pipe piles, such as concrete shed and steel corrosion, which have an unfavorable influence on the bearing capacity of the dock. Based on the complete pile-soil load transfer system theory, the formula of the remaining bearing capacity of the defect pile is derived. The influence of defects like concrete spalling and steel corrosion on the ultimate bearing capacity of a single is studied. The result reveals that the position of concrete spalling has an influence on the vertical compress ultimate capacity and the vertical uplift ultimate capacity. When it is inside the soil layer, the vertical compress ultimate capacity will have a decrease of 0.07%, while the vertical uplift ultimate capacity will have a decrease of 1.72%. The axial-compression capacity is different, the impact of the defect on the concrete pile on axial-compression capacity is a decrease of 25.65% and that for the steel cohesion on axial-compression capacity reaches a decrease of 20.95%. The concrete defect on the capacity is much greater.

Keywords: ultimate bearing capacity; defect; large pipe pile; theoretical calculation; port

在港口码头结构使用期, 基桩由于海洋环境和荷载的长期作用, 出现混凝土开裂、破损、露筋、锈蚀等损伤, 这些缺陷或多或少会降低基桩承载力, 有些甚至严重威胁到码头的正常使用、降低码头使用寿命, 必须进行及时加固维修才能

保证码头的正常运营。

目前, 对于港口桩基竖向抗压性能研究比较多^[1-3], 同时, 对港口桩基在静载试验和数值模拟方面开展竖向抗拔性能研究^[4-6]。

码头大管桩出现不同类型的缺陷, 如混凝土

收稿日期: 2015-11-05

作者简介: 袁谱 (1981—), 博士, 高级工程师, 从事道路工程和复合材料在土木工程中的应用。

脱落、钢筋锈蚀等等。这些缺陷会造成码头承载能力下降,缺陷桩剩余承载能力如何确定是水运工程研究人员热衷解决的问题。缺陷桩剩余承载力可以借鉴完整桩-土体系的荷载传递推导过程,推导获得缺陷桩剩余承载力的计算公式。本文依托某工程,考察混凝土剥落和钢筋锈蚀这些缺陷类型对单桩极限承载力的影响,并得出相应规律。

1 在桩土作用下缺陷桩极限承载力基本理论

1.1 混凝土剥落-桩土体系的荷载传递

1) 抗压工况。

根据文献[7],借鉴完整桩-土体系的荷载传递推导过程,可推导出混凝土剥落状况下单桩极限承载力 Q_u 由土层阻力 Q'_{uk} (包括总极限侧阻力 Q'_{sk} 和总极限端阻力 Q_{pk} ,式(1)) and 单桩桩顶轴向压力设计值 N' (式(2))决定。若忽略二者间的相互影响,混凝土剥落位置不同, Q'_{uk} 取值不同:如果缺陷发生在土层以上,桩身周长不发生变化, Q'_{sk} 不改变, N' 改变;如果缺陷发生在土层内,桩身周长发生变化, Q'_{sk} 改变, N' 也改变,总之单桩极限承载力 Q_u 取二者之间的最小值,可表示为式(3)、(4)。

$$Q'_{uk} = Q'_{sk} + Q_{pk} = \sum u'_i l_i q_{sik} + A_p q_{pk} \quad (1)$$

式中: l_i 、 u'_i 为桩周第 i 层土厚度和桩身周长(包括缺陷桩身周长); A_p 为桩端底面积; q_{sik} 、 q_{pk} 为第 i 层土的极限侧阻力和持力层极限端阻力。

$$N' = \psi_c f_c A'_{ps} + \beta f_y A_s \quad (2)$$

式中: f_c 为桩身混凝土轴心抗压强度设计值; A'_{ps} 为扣除主筋截面积和剥落面积后的桩身混凝土截面积; A_s 为钢筋主筋截面积之和; β 为钢筋发挥系数, $\beta = 0.9$; f_y 为钢筋的抗压强度设计值; ψ_c 为基桩成桩工艺系数,取0.6~1.0。

若剥落部位在土层以上:

$$Q_u = \min\{Q'_{uk}, N'\} \quad (3)$$

若剥落部位在第 i 层土层内:

$$Q_u = \min\left\{\sum_{i=1, i \neq i-1}^n u_i l_i q_{sik} + u'_{i-1} l_{i-1} q_{sik} + A_p q_{pk}, N'\right\} \quad (4)$$

2) 抗拔工况。

当无抗拔桩的试桩资料时,打入桩单桩抗拔承载力标准值可按地质报告中抗压极限侧摩阻力标准值乘以折减系数来确定^[7]:

$$T'_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u'_i l_i + G \quad (5)$$

式中: T'_{uk} 为基桩抗拔极限承载力标准值; u'_i 为破坏表面周长; q_{sik} 为桩侧表面第 i 层土的抗压极限侧阻力标准值; l_i 为桩周第 i 层土厚度; λ_i 为抗拔系数,一般取0.5~0.8,与土性有关; G 为桩自身有效重力。

1.2 钢筋锈蚀-桩土体系的荷载传递

1) 抗压工况。

在钢筋锈蚀下桩土体系的荷载传递与混凝土剥落下桩土体系相同。根据地质资料,单桩极限承载力 Q_u 由土层阻力 Q'_{uk} (包括总极限侧阻力 Q'_{sk} 和总极限端阻力 Q_{pk}) and 单桩桩顶轴向压力设计值 N' 决定,如式(1)和(6),若忽略二者间的相互影响,单桩极限承载力 Q_u 取二者之间的最小值。

$$N' = \psi_c f_c A'_{ps} + \beta f_y A'_s \quad (6)$$

式中: f_c 为桩身混凝土轴心抗压强度设计值; A'_{ps} 为扣除主筋截面积后的桩身混凝土截面积; A'_s 为扣除钢筋锈蚀截面积后钢筋主筋截面积之和; β 为钢筋发挥系数, $\beta = 0.9$; f_y 为钢筋的抗压强度设计值; ψ_c 为基桩成桩工艺系数,取0.6~1.0。

钢筋锈蚀部位在浪溅区(混凝土剥落在土层以上),参见式(3)。

2) 抗拔工况。

当无抗拔桩的试桩资料时,打入桩单桩抗拔承载力标准值可按地质报告中抗压极限侧摩阻力标准值乘以折减系数来确定,如式(5)所示。

2 工程概况

选取某一工程实例,分析混凝土缺陷对桩基抗压极限承载力的影响。本工程码头引桥共有80根混凝土方桩,其中有35根桩存在较严重的混凝土剥离和竖向裂缝等缺陷,部分基桩出现混凝土破损、淘空、开裂、露筋等缺陷,情况较严重。归

纳统计出混凝土剥落体积为 100 cm × 20 cm × 5 cm, 钢筋锈蚀率为 7%。

$$T_{uk} = 10\ 307.86\ \text{kN}.$$

3 大直径缺陷桩单桩极限承载力计算

3.1 完整桩

该桩桩长 45 m、入土深度 42.42 m、桩径 2 m, 桩采用 C35 混凝土, 主筋强度等级为 HRB335。钻探孔编号为 1#, 孔口高程是 2.65 m, 桩顶设计高程 -3.29 m, 送桩 5.94 m。根据地质勘查报告, 土层深度 42.42 m, 分 7 层, 7 种土类型: 混砂, 密实; 粉质黏土, 可塑; 中砂, 密实; 粉质黏土, 硬塑; 粉质黏土, 可塑; 粉土, 可塑; 中粗砂^[9]。

根据规范^[8]分项系数取 1.4, 选择桩径为 2.00 m 的方桩, 桩周长为 8.00 m, 土层物理性质见表 1, 桩侧阻力及抗拔系数见表 2, 桩身竖向承载力验算见表 3。单桩竖向抗压极限承载力计算的结果为:

$\sum u_i q_{sik} l_i = 18\ 147.60\ \text{kN}$, $q_{pk} A_p = 9\ 200.00\ \text{kN}$, 极限承载力 $Q_{uk} = 19\ 534\ \text{kN}$ 。单桩抗拔极限承载力标准值为: 基桩自重力 $G = 2\ 520.00\ \text{kN}$,

表 1 土层物理性质

地层编号	地层名称及状态	土层层底高程/m	土层厚度 l_i /m
2-1	混砂	-8.24	4.95
4-1	粉质黏土, 可塑	-13.59	5.35
4-2	中砂	-14.09	0.50
5-1	粉质黏性土, 硬塑	-29.42	15.33
5-3	粉质黏土, 可塑	-34.65	5.23
6-2	粉土, 可塑	-38.32	3.67
6-3	中粗砂	-42.42	4.10

表 2 桩侧阻力及抗拔系数

抗压工况		抗拔工况	
极限侧阻标准值 q_{sik} /kPa	桩侧阻力 $q_{sik} l_i$ /(kN/m)	抗拔系数 λ_i	桩侧阻力 $\lambda_i q_{sik} l_i$ /(kN/m)
36	178.20	0.50	89.10
50	267.50	0.70	187.25
60	30.00	0.50	15.00
75	1 149.75	0.70	804.83
40	209.20	0.70	146.44
40	146.80	0.70	102.76
70	287.00	0.50	143.50

注: 抗压工况桩尖平均阻力 $q_{pk} = 2\ 300\ \text{kPa}$ 。

表 3 桩身竖向承载力验算

混凝土强度等级	混凝土抗压强度设计值 f_c /(N/mm ²)	桩身面积 A_p /mm ²	主筋强度等级	主筋抗压强度设计值 f_y /(N/mm ²)	桩身配筋面积 A_s /(mm ²)	成桩工艺系数 ψ_c	桩身抗压强度设计值 $(\psi_c f_c A_p + 0.9 f_y A_s)$ /kN	荷载效应基本组合下桩顶轴向压力设计值 N /kN
35	16.7	4 × 10 ⁶	HRB335	300	6 868.75	0.7	48 614.56	1 000
C20~C40						0.6~0.9		

注: 桩身轴心受压承载力验算 (用于非预应力实心桩) 结果为受压承载力满足要求。

3.2 混凝土剥落

1) 混凝土剥落在土层上方。

该桩的物理参数与 3.1 相同, 地质参数见表 1。混凝土剥落位置在土层上方 (浪溅区), 混凝土剥落面积为 2 000 cm²、体积为 10 000 cm³、质量为 24 387.56 kg。

单桩竖向抗压极限承载力计算结果为:

$\sum u_i q_{sik} l_i = 18\ 147.60\ \text{kN}$, $q_{pk} A_p = 9\ 200.00\ \text{kN}$, 极限承载力 $Q'_{uk} = 19\ 534\ \text{kN}$ 。单桩竖向抗拔极限承载力计算见表 4, 桩身竖向承载力验算见表 5。根据式(3), 得出: $Q_u = \min\{Q'_{uk}, N'\} = 19\ 534\ \text{kN}$ 。

表 4 单桩竖向抗拔极限承载力计算

桩型	桩径/m	桩周长 u /m	基桩自重力 G /kN	极限抗拔承载力 T_{uk} /kN
方桩	2.00	8.00	2 520.00	10 307.86
缺陷方桩	2.00	8.00	2 281.00	10 137.14

表 5 桩身竖向承载力验算

缺陷面积 A_V /mm ²	缺陷桩面积 A'_p /mm ²	桩身抗压强度设计值 $(\psi_c f_c A'_p + 0.9 f_y A'_s)$ /kN	荷载效应基本组合下桩顶轴向压力设计值 N /kN
2 × 10 ⁵	2 933 131.25	36 142.82	1 000

注: 受压承载力满足要求。

2) 混凝土剥落在土层内部。

该桩的物理参数与 3.1 的相同, 地质参数见

表1。混凝土剥落位置在土层内部，在混砂层中，混凝土剥落体积如上。单桩竖向抗压极限承载力计算见表6，单桩竖向抗拔极限承载力计算见表7，桩身竖向承载力验算见表8。

根据式(4)，得出： $Q_u = \min \left\{ \sum_{i=1, i \neq i-1}^n u_i l_i q_{sik} + u'_{i-1} l_{i-1} q_{sik} + A_p q_{pk}, N' \right\} = 19\,521 \text{ kN}$ 。

表6 单桩竖向抗压极限承载力计算

桩型	桩径/ m	桩周长 u/m	$\sum u_i q_{sik} l_i /$ kN	桩端面积 A_p / m^2	$q_{pk} A_p /$ kN	极限承载力 Q'_{uk} / kN
方桩	2.00	8.00	18 147.60	4.00	9 200.00	19 534
缺陷方桩	2.00	7.90	18 129.78	4.00	9 200.00	19 521

表7 单桩竖向抗拔极限承载力计算

桩型	桩径/m	桩周长 u/m	基桩自重 G/kN	极限抗拔承载力 T_{uk} / kN
方桩	2.00	8.00	2 520.00	10 307.86
缺陷方桩	2.00	7.90	2 281.00	10 130.81

表8 混凝土剥落桩身竖向承载力验算

桩身抗压强度设计值 ($\psi_c f_c A'_s + 0.9 f_y A_s$)/kN	荷载效应基本组合下桩顶 轴向压力设计值 N/kN
36 142.82	1 000

注：桩身轴心受压承载力验算（用于非预应力实心桩）；受压承载力满足要求。同表9。

3.3 钢筋锈蚀

混凝土桩钢筋锈蚀常发生在浪溅区，而且是混凝土桩发生混凝土剥落后，钢筋暴露在氧气和海水条件下容易发生锈蚀。该桩的物理参数与3.1的相同，地质参数见表1。混凝土剥落位置和物理性质如上，并且，钢筋锈蚀率为7%。

单桩竖向抗压极限承载力计算与3.2 1)相同，单桩竖向抗拔极限承载力计算见表4，单桩竖向极限承载力验算见表9。根据式(3)，得出： $Q_u = \min \{ Q'_{uk}, N' \} = 19\,534 \text{ kN}$ 。

表9 钢筋锈蚀桩身竖向承载力验算

缺陷桩身面积 A'_s / mm^2	缺陷桩身 配筋面积 A'_s / mm^2	桩身抗压 强度设计值 ($\psi_c f_c A'_s + 0.9 f_y A_s$)/kN	荷载效应基本组合 下桩顶轴向压力设 计值 N/kN
31.4×10^5	6 378.13	38 428.69	1 000

3.4 比较缺陷对桩基承载力的影响

该桩的物理参数与3.1的相同，地质参数见

表1。考虑3种工况：完整桩、混凝土剥落和钢筋锈蚀，并且考虑混凝土剥落位置在土层上方或土层内部，混凝土剥落体积为100 cm×20 cm×5 cm，钢筋锈蚀率为7%。

总结单桩竖向抗压极限承载力计算、单桩竖向抗拔极限承载力计算，桩身竖向承载力验算见表10。分析表10可以看出：混凝土剥落位置对单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力有影响，混凝土剥落位置位于土层内部会减小单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力，单桩竖向极限承载力减小0.07%，单桩抗拔极限承载力减小1.72%；但对桩身竖向承载力却不同，混凝土缺损对桩身轴心受压承载力减小25.65%；钢筋损失对桩身竖向承载力减小20.95%。混凝土缺损比钢筋损失对桩身各项承载力的影响要大得多。

表10 4种工况下极限承载力理论计算值

工况	单桩竖向 极限承载力 最小值/kN	单桩抗拔 极限承载 力/kN	桩身轴心 受压承载 力/kN
完整桩	19 534	10 307.86	48 614.56
混凝土剥落(土层上方)	19 534	10 137.14	36 142.82
混凝土剥落(土层内部)	19 521	10 130.81	36 142.82
钢筋锈蚀	19 534	10 137.14	38 428.69

4 结论

缺陷桩剩余承载力可以借鉴完整桩-土体系的荷载传递推导过程，推导获得缺陷桩剩余承载力的计算公式。依托某一工程，考察混凝土剥落和钢筋锈蚀这类缺陷类型对单桩极限承载力的影响，并得出相应规律：

- 1) 混凝土剥落位置对单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力有影响，混凝土剥落位置位于土层内部会减小单桩竖向极限承载力和单桩抗拔极限承载力，单桩竖向极限承载力减小0.07%，单桩抗拔极限承载力减小1.72%；但对桩身竖向承载力却不同，混凝土缺损对桩身轴心受压承载力减小25.65%。

- 2) 钢筋损失对桩身竖向承载力减小20.95%。混凝土缺损比钢筋损失对桩身各项承载力的影响要大得多。
(下转第161页)