



海港锚地锚位数计算

连石水, 覃 杰, 谢华东, 王 琰

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对海港不同功能锚地锚位数和总锚位数无适用计算方法的问题, 调研国内沿海港口使用、管理部门并收集现有规范及有关文献资料, 分析各种计算方法适用范围、存在问题及局限性。提出引航、候潮、待泊、应急和检验检疫、过驳和避风等锚地锚位数计算方法, 考虑到各功能锚地可共用, 且大风天气时船舶均出港避风, 为此, 认为港口总锚位数宜取避风锚地锚位数与其他功能锚地锚位数之和中的大值。通过实际案例进行验证, 计算结果较为合适, 为海港锚地锚位数计算提供借鉴。

关键词: 海港; 候潮锚地; 待泊锚地; 避风锚地; 锚位数计算

中图分类号: U 641.2⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0071-07

Calculation for anchorage number of seaport

LIAN Shi-shui, QIN Jie, XIE Hua-dong, WANG Yan

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Aiming at the situation that there is still no applicable calculation method for different types and total anchorage number of seaport, and based on the investigation of the domestic coastal port use and management departments, and existing standards and relevant data are collected, this paper mainly analyzes the scope of application and existing problems and limits of different existing calculation methods. And the calculation methods for different types of anchorage numbers are put forward, such as piloting, anchorage waiting for tidal window, lying anchorage, emergency anchorage, inspection and quarantine anchorage, lighterage anchorage, and sheltered anchorage. In consideration of common usage among those types of anchorages and that ships would be cleared out before gale weather, it should be better to choose a larger value between sheltered anchorage numbers and the other anchorage numbers. The calculation results are testified appropriate for practical cases, which could provide a reference for the calculation of the number of anchorages of seaport.

Keywords: seaport; anchorage waiting for tidal window; lying anchorage; sheltered anchorage; anchorage number calculation

1 锚位数的调研分析

通过走访沿海主要港口的使用和监管单位, 对海港锚地锚位数进行调研^[1]。

1) 根据《华东区海港锚地调研报告》成果, 相关调研单位的建议如下:

①上海海事局: 洋山港锚位数与泊位数为 1:1 比较合理, 目前为 1:4。内支线泊位数 16 个, 为

了提高码头利用率, 船舶可以并靠, 则最多可以同时靠泊 40 多艘船舶, 并靠的时候可以同时作业, 但是锚位数仅为 12 个。锚位数与泊位数比例至少为 1:2 才不会对港口运营造成显著的影响。

②宁波舟山港股份有限公司: 宁波港泊位数多, 但锚位数少, 建议锚位数与泊位数为 1:1 较为合适, 并建议按锚泊船舶吃水和船长来进行锚地分

类,不建议采用载质量/总质量对锚地进行分类。

③宁波海事局:锚位数与泊位数一般为 1:2。

④舟山港航管理局和引航站:泊位数与锚位数无必然联系。

⑤舟山海事局:根据实际经验,锚位数和泊位数至少为 1:2,锚位数越多对码头运营的安全越有益。

2)根据《天津港海港锚地调研报告》成果,相关单位建议如下:

①检验检疫工作一般在码头上开展,若是疫区来船,则在锚地上开展。

②天津港没有防台避风锚地、过驳锚地和检验检疫锚地,除了 LNG 船应急锚地(很少使用)外,没有其它的应急锚地。

③有条件时,长航道中段可设置应急锚地,但通过疏浚手段开挖设置应急锚地不经济时,改为在航道上设会船区可能更为适宜。

④引航锚地也逐步淡化,只是由交通运输部海事局公布各水域的引航员登轮点(锚地内也都可以登轮)。

2 锚位数计算方法

2.1 《海港总体设计规范》

锚地规模与数量应根据到港船型及其密度、港口生产组织和水域自然环境等因素综合确定,可根据反映船舶到港规律的排队论模型或其他数学模拟方法推算,在港船舶保证率的选取应视港口的具体情况确定^[2]。

2.2 《海港工程设计手册》

船舶到港(到达)是随机的,每艘船在港装卸服务的时间也是随机的,这种随机服务系统可以用计算机模拟和排队论方法进行计算。对于船舶到达服务遵从一定的统计规律的数学模型,可以用排队论方法计算,也可以按照当地实际连续恶劣天气时间(d)估算或采用其他数学模型进行仿真模拟确定^[3]。

2.2.1 排队论

每艘船在港装卸服务的时间可以遵从负指数分布,二级爱尔兰分布和定长分布的数学模型可

以用负指数分布模型的计算结果进行换算;船舶到达符合泊松分布。锚位数采用的数学模型缩写为 M/M/S 排队模型。

2.2.2 连续恶劣天数法

因大风、大雾等恶劣天气的影响,锚地船舶积压现象时有发生,连续恶劣天气时间越长,锚地及周边水域锚泊船舶数量越多,因此,锚位数与连续恶劣天气时间之间的相关性强。

2.2.3 基于仿真软件的模拟

锚地规模与港区自然条件、吞吐量、航道条件、到港船舶情况、泊位情况、船舶调度规则等因素相关。采用面向对象的仿真软件,可以综合考虑与锚地相关的多种因素,更符合真实的运营情况。仿真既可以模拟分析航道通过能力,又可评估现有锚地容量,作为锚地选划的参考依据。

2.3 相关文献

1)20 世纪 90 年代初,杨玉祥^[4]通过统计得到港口锚地可容纳锚位数与泊位数的比值比较悬殊,有的为 1:5,甚至 1:10;相反,对压船严重的港口,也有出现 1:1 乃至 5:1 的情况。总之,尽管港口锚地规模不相同,但认为港口必须设置锚地则是共性。并且认为港口锚地规模通常不是一次便可定型的,应根据港口建设和扩建发展需要、港口管理技术水平以及船舶调度等多方面因素相应扩大锚地范围,以满足候泊锚位需要。

2)邱珍英等^[5]认为“排队论”公式仅仅适用于待泊锚地,对候潮、避风、联检等其他类型的锚地并不适用。

3)国内有些专家学者^[6-8]在进行锚地规划和研究时,一致认为锚地数量按《海港工程设计手册》连续恶劣天气时间法是比较合适的,并在宁波、舟山、营口等港口锚地规划中采纳。

2.4 适用范围、存在问题及局限性

1)“排队论”方法未明确各功能锚地的锚位数计算,从其推算过程及原理分析可知,该方法可用于计算待泊锚地锚位数。

2)“连续恶劣天气时间”过于笼统,计算结果偏大,未考虑台风预报的因素,提前预报台风,原计划进港船舶会避开台风到港,仅仅是靠泊在

码头船舶需出港避风。

3) 仿真分析可全面分析船舶进出港全过程, 但工作量较大, 实际操作较为困难。

4) 杨玉祥提出的方法与调研成果类似, 建立锚位数与泊位数的比值关系, 但也存在未对各功能锚地的锚位数进行区分的问题。

5) 邱珍英及日本学者提出方法均与锚泊时间有关, 而锚泊时间本身即是个变化较大的值, 也未明确锚地种类。

3 锚位数计算

3.1 锚地分类

根据《海港总体设计规范》及有关文献, 锚地按功能可划分为引航、候潮、待泊、应急、检验检疫、过驳和避风等多种锚地。

3.2 检验检疫、引航、过驳、应急及待泊锚地锚位数计算方法

1) 根据调研结果, 非疫区来船可在码头上进行检验检疫, 疫区来船才需要在锚地上开展, 且该功能锚地亦可与其他功能锚地共用; 引航锚地也逐步淡化, 可由交通运输部海事局公布各水域的引航员登轮点(锚地内也都可以登轮), 视各地海事管理要求, 根据是否外贸船舶、船舶等级或来船的频率进行设置; 因此, 检验检疫、引航锚地的锚位数可不进行单独计算。

2) 货物过驳能够有效克服船舶大型化与航道吃水和深水码头严重不足的矛盾, 海上过驳相当于海上码头, 其锚位数与码头泊位数计算相同; 根据调研, 部分港口(如宁波-舟山港)有少量的应急锚地, 具体根据当地港口的实际生产营运情况和管理要求确定, 目前仅 LNG 船有规定应设置应急锚地, 其数量一般与泊位数相同, 并且可与危险品船共用锚地。

3) 据前述, “排队论”可用于待泊锚地锚位数计算, 计算过程如下:

$1 \leq i < n$ 时,

$$P_i = \frac{\alpha^i}{i!} \cdot P_0 \tag{1}$$

$n \leq i$ 时,

$$P_i = \frac{\alpha^i}{n!} \cdot P_0 \tag{2}$$

$$P_0 = \left[\sum_{j=0}^{n-1} \frac{\alpha^j}{j!} + \frac{\alpha^n}{n! (1 - \alpha/n)} \right]^{-1} \tag{3}$$

$$\alpha = \lambda / \mu \tag{4}$$

则锚位数及保证率为:

$$M_{\omega_2} = \omega_2 - n \tag{5}$$

$$Q_{\omega_2} = \sum_{i=0}^{\omega_2} P_i \tag{6}$$

式中: P_i 为在港有 i 艘船(包括港内和锚地)的状态概率; P_0 为在港无船舶的状态概率; n 为泊位数; λ 为平均每天到达的船舶艘数; $1/\mu$ 为平均每条船占用泊位的天数; α 为平均每天被利用的泊位数; Q_{ω_2} 为在港有 ω_2 艘船舶时的保证率, 根据港口的重要性, 附近有无其它锚地或其它港口锚地可以临时借用等因素确定, 设置锚地的费用少则保证率取大值, 反之取小值; M_{ω_2} 为锚位数。

3.3 候潮锚地锚位数计算

假定乘潮船舶到港时间符合泊松分布, 则在港有 k 艘乘潮船舶的状态概率如下式^[9]:

$$P_k = e^{-\gamma} \cdot \frac{\gamma^k}{k!} \tag{7}$$

式中: P_k 为在港有 k 艘乘潮船舶的状态概率; γ 为平均每天到达的乘潮船舶艘数。

则在港有 ω_1 艘乘潮船舶的保证率如下式:

$$Q_{\omega_1} = \sum_{k=0}^{\omega_1} P_k \tag{8}$$

式中: Q_{ω_1} 为在港有 ω_1 艘乘潮船舶的保证率。

候潮锚地是需要乘潮进出港的船舶等待潮位时使用的锚地, 应综合考虑潮汐特征、航道乘潮保证率、航道管理、乘潮船舶数量及船舶到港时间规律等因素, 候潮锚地锚位数计算如下:

$$M_{\omega_1} = \omega_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \tag{9}$$

式中: M_{ω_1} 为候潮锚地锚位数; ω_1 为对应一定保证率在港乘潮船舶数量, 保证率参考待泊锚地的取值, 取 90% ~ 99%; ε_1 为潮汐特征影响系数; ε_2 为航道管理影响系数。

考虑到乘潮船舶通常为较大吨级, 且来船密度较小, 允许部分潮周期内船舶不能进出港, 此种情况下, 只是连续不能进出港时间较长, 需要

候潮锚地锚位数较多，为此，潮汐特征影响系数如下式：

$t > 24 \text{ h 时,}$
$$\varepsilon_1 = t/24$$

(10)

$t \leq 24 \text{ h 时,}$
$$\varepsilon_1 = 1$$

(11)

式中： t 为根据逐时潮汐数据统计分析得到达到一定保证率时对应连续不能乘潮进出港时间(h)；通过分析湛江、广西、惠州等潮汐资料，保证率可取 90%。

航道管理影响主要是考虑到夜间是否通航的因素，允许夜间通航时，只要潮位合适即可进出港，但有些海域或部分货船夜间是不能进出港的，则需要做更长时间等待，即夜间 12 h 不能进出港，为此，航道管理影响系数如下式：

允许夜间通航时,
$$\varepsilon_2 = 1$$

(12)

当夜间不能通航时,
$$\varepsilon_2 = 1 + 12/t$$

(13)

式中： t 为根据逐时潮汐数据统计分析达到一定保证率时对应连续不能乘潮进出港的时间(h)。

3.4 避风锚地锚位数计算

在大风天气，船舶应离开码头出港避风，根据《海港总体设计规范》，不考虑风暴条件系泊的码头，可按大于 9 级风时船舶离开码头设计，此时，

所需要避风锚地锚位数应综合考虑在港船舶吨级、船舶数量等因素，避风锚地锚位数计算如下式：

$$M_s = n\rho$$

(14)

式中： M_s 为避风锚地锚位数； n 为泊位数； ρ 为泊位利用影响系数，如前述调研资料成果，大风天气情况下港口锚位数较为紧张，且认为锚位数与泊位数比例至少为 1:2，最佳比例为 1:1，结合 JTS 165—2013《海港总体设计规范》，泊位利用影响系数取泊位利用率，范围为 0.47~0.75，泊位数量多时取小值，反之取大值，当 $n=1$ 时取 1。

3.5 总锚位数计算

锚地总锚位数计算考虑以下两种因素：1)在大风天气时，船舶均出港避风；2)引航、检验检疫、候潮、待泊、过驳、避风、应急等锚地可共用。

4 案例分析

- 以 2018 年惠州港为案例，基本情况如下：
- 1)分吨级、分货种船舶数量及载质量见表 1。
 - 2)分吨级、分货种泊位数量见表 2。
 - 3)仅考虑 30 万 t 油船进出港考虑乘潮，航道建设标准为满足 25 万吨级油船满载乘潮和 30 万吨级油船乘潮减载单向通航，航道区域航速为 6 kn，航行调整区域(拖轮协助)航速为 2 kn；乘潮历时 4 h、保证率 80%的乘潮水位 0.99 m；海区为不正规半日潮；允许夜间通航。

表 1 分吨级、分货种船舶数量及载质量

船舶吨级/DWT	成品油、化学品船		集装箱船		散货、杂货船		原油船	
	艘次	平均载质量/t	艘次	平均载质量/t	艘次	平均载质量/t	艘次	平均载质量/t
1 000~2 000	618	1 914	993	1 668	61	2 329	—	—
3 000	1 483	3 729	38	3 339	1 288	4 009	—	—
5 000	1 639	5 484	5	4 929	882	5 127	—	—
1 万	239	9 261	60	8 498	46	8 729	—	—
2 万	90	16 024	6	19 080	61	15 458	—	—
3 万(3.5 万)	30	38 452	—	—	47	41 600	—	—
5 万	132	56 526	—	—	50	50 928	—	—
8 万(7 万)	68	74 882	—	—	26	74 687	—	—
10 万	62	103 555	—	—	—	—	—	—
12 万	102	109 510	—	—	—	—	—	—
15 万	14	156 135	—	—	—	—	—	—
30 万	17	306 850	—	—	—	—	112	306 850

表 2 分吨级、分货种泊位数量

装卸货种	靠泊船舶吨级/DWT	泊位数/个
成品油、化学品	300 000	1
	150 000	2
	50 000	1
	10 000~30 000	12
原油	2 000~5 000	12
	300 000	2
	50 000	2
	1 000~5 000	5
集装箱	50 000~70 000	4
	10 000~30 000	3
	1 000~5 000	11

为简化计算，考虑引航、检验检疫利用其它功能锚地，且本港不考虑应急和过驳锚地。

不同保证率情况下，30 万吨级乘潮船舶候潮锚地锚位数见表 3。 $Q_{\omega_1}=90\%$ 时，锚位数为 1； $Q_{\omega_1}=99\%$ 时，锚位数为 3。

表 3 不同保证率情况下的候潮锚地锚位数

装卸货种	$Q_{\omega_1}/\%$	锚位/个			
		ω_1	ε_1	ε_2	M_{ω_1}
原油	90	1	1	1	1
	99	2	1	1	2
重油、重柴油、燃料油	90	0	1	1	0
	99	1	1	1	1

注：根据 2018 年逐时潮汐数据统计分析得到，保证率为 90% 对应连续不能乘潮进出港时间约为 10 h。

不同保证率情况下待泊锚地锚位数见表 4。 $Q_{\omega_2}=90\%$ 时，锚位数为 15； $Q_{\omega_2}=95\%$ 时，锚位数为 25， $Q_{\omega_2}=98\%$ 时，锚位数为 34； $Q_{\omega_2}=99\%$ 时，锚位数为 41。

表 4 不同保证率情况下待泊锚地锚位数

装卸货种	靠泊船舶吨级/DWT	$Q_{\omega_2}/\%$	在港船舶 (包括港内和锚地 ω_2 /艘)	泊位数 n	待泊锚地 锚位数 M_{ω_2} /个
成品油、 化学品	2 000~5 000	90	20	12	8
		95	24	12	12
		98	28	12	16
		99	31	12	19
	1 万~3 万	90	3	12	0
		95	3	12	0
		98	4	12	0
		99	4	12	0
	5 万	90	6	1	5
		95	8	1	7
		98	10	1	9
		99	11	1	10

续表4

装卸货种	靠泊船舶吨级/DWT	$Q_{\omega_2}/\%$	在港船舶 (包括港内和锚地 ω_2 /艘)	泊位数 n	待泊锚地 锚位数 M_{ω_2} /个
成品油、 化学品	15 万	90	3	2	1
		95	4	2	2
		98	5	2	3
		99	5	2	3
	30 万	90	1	1	0
		95	1	1	0
		98	1	1	0
		99	1	1	0
	原油	90	2	2	0
		95	3	2	1
		98	3	2	1
		99	4	2	2
集装箱	1 000~5 000	90	2	5	1
		95	3	5	2
		98	3	5	2
		99	4	5	3
	1 万~5 万	90	1	2	0
		95	1	2	0
		98	1	2	0
		99	2	2	0
	1 000~5 000	90	11	11	0
		95	12	11	1
		98	14	11	3
		99	15	11	4
散货、 杂货	1 万~3 万	90	2	3	0
		95	2	3	0
		98	2	3	0
		99	3	3	0
	5 万~7 万	90	1	4	0
		95	1	4	0
		98	2	4	0
		99	2	4	0

避风锚地锚位数见表 5。

表 5 避风锚地锚位数

装卸货种	靠泊船舶吨级/DWT	泊位数/个	影响系数 ρ	避风锚地 锚位数 M_s /个
成品油、 化学品	30 万	1	1.00	1
	15 万	2	0.60	2
	5 万	1	1.00	1
	1 万~3 万	12	0.65	8
原油	2 000~5 000	12	0.65	8
	30 万	2	0.55	2

续表5

装卸货种	靠泊船舶 吨级/DWT	泊位数/ 个	影响 系数 ρ	避风锚地 锚位数 M_s /个
集装箱	5 万	2	0. 60	2
	1 000~5 000	5	0. 65	4
散货、杂货	5 万	4	0. 60	3
	1 万~3 万	3	0. 65	2
	1 000~5 000	11	0. 65	8
合计				41

候潮、待泊锚位数之和及避风锚地锚位数计算结果见表 6。

进一步分析惠州港现有锚地情况，并根据需要对锚地进行安排，见表 7。

表 6 总锚位数

装卸货种	锚泊船舶 吨级/DWT	普通锚地 锚位数/个	避风锚地 锚位数/个
成品油、化学品	30 万	1	1
	15 万	2	2
	5 万	7	1
	1 万~3 万	0	8
原油	2 000~5 000	12	8
	30 万	3	2
集装箱	5 万	0	2
	1000~5000	2	4
散货、杂货	5 万	0	3
	1 万~3 万	0	2
	1 000~5 000	1	8
合并		28	41

注：1. 候潮锚地取保证率为 99%，待泊锚地取保证率为 95%；2. 普通锚地为候潮、待泊锚地锚位数之和。

表 7 锚位安排

装卸货种	锚泊船舶吨级/DWT	计算锚位 数/个	锚地分配				
			锚位总数/ 个	各吨级及货种 锚位数/个	锚泊船舶种 类及吨级	计划安排 的锚地	
成品油、化学品	30 万	1	1	1	30 万吨级油船	11 [#]	
	15 万	2	2	2		11 [#]	
	5 万	1	1	1		15 万吨级油船	11 [#]
	1 万~3 万	8	8	8		11 [#]	
	2 000~5 000	8	8	4	15 万吨级油船	8 [#]	
				1	3 万吨级油船	6 [#]	
				1	2 万吨级油船	4 [#]	
				1	5 000 吨级油船	6 [#]	
				1	1 000 吨级油船	1 [#]	
	原油	30 万	3	3	3	30 万吨级油船	11 [#]
5 万		2	2	2	7 万吨级集装箱	7 [#]	
集装箱	1 000~5 000	4	4	1	7 万吨级集装箱	7 [#]	
				1	5 000 吨级集装箱船	2 [#]	
				1	1 万吨级集装箱船	3 [#]	
				1	1 万吨级集装箱船	12 [#]	
散货、杂货	5 万	3	3	3	15 万吨级散货船	9 [#]	
	1 万~3 万	2	2	1	15 万吨级散货船	9 [#]	
				1	10 万吨级散货船	10 [#]	
	1 000~5 000	8	9	1	3.5 万吨级散货箱	7 [#]	
				4	5 000 吨级杂货船	5 [#]	
				4	2 000 吨级杂货船	5 [#]	
合计		42	43	43			

2018 年所需锚位数为 42 个，实际可利用锚位数为 43 个，现状锚地基本能满足现有码头使用要求；根据锚地功能安排，部分锚地水深偏小，不能满足其锚地功能所安排的大船锚泊要求，需要减载

靠泊；锚位数总体有较小富余，锚位分配情况整体呈大吨级船舶锚位充足、而小吨级船舶锚位不足的状态，须通过不同吨级和货种间的整体调配以更好发挥锚位功能。上述情况与实际使用情况较为一致。

5 结论

- 1) 引航、检验检疫、候潮、待泊、过驳、避风、应急等锚地可共用。
- 2) 引航、检验检疫锚地的锚位数可单独计算; 过驳锚地和应急锚地的锚位数应根据港口实际生产需要单独确定; 待泊锚地锚位数可采用“排队论”方法。
- 3) 候潮锚地应综合考虑潮汐特征、航道乘潮保证率、航道管理、乘潮船舶数量及船舶到港时间规律等因素。
- 4) 避风锚地锚位数 $M_s = n\rho$ 。

参考文献:

[1] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.海港锚地设计方法专题研究报告[R].广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2020.

(上接第 53 页)

- 2) 水泥搅拌桩标贯击数与桩芯无侧限抗压强度基本呈线性关系, 标贯击数越大, 无侧限抗压强度越高, 并得出部分土性条件下, 标贯击数与桩芯无侧限抗压强度的简易计算模型。
- 3) 本文得出的 7 与 28 d、7 与 90 d 的标贯击数预测公式, 可在早期对航道整治工程水泥搅拌桩进行施工质量检测, 从而加速工程进度。

参考文献:

[1] 刘松玉, 钱国超, 章定文.粉喷桩复合地基理论与工程应用[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[2] 刘松玉.新型搅拌桩复合地基理论与技术[M].南京: 东南大学出版社, 2012.

[3] OSHIRO Y. Soil Cement Columns (SCC) in Japan[C]//The American Society of Civil Engineers. Grouting 2017: case histories. Reston: ASCE, 2017: 415-423.

[4] PUPPALA A J, PORBAHA A. International perspectives on quality assessment of deep mixing[C]//The American Society of Civil Engineers. Proceeding of GeoSupport Conference 2004. Reston: ASCE, 2004: 826-837.

[5] 上海市基础工程集团有限公司, 苏州嘉盛建设工程有限公司. 建筑地基基础工程施工质量验收规范: GB 50202—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

[2] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港总体设计规范: JTS165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港工程设计手册[M].北京: 人民交通出版社, 2018.

[4] 杨玉祥.关于海港锚地选择及其布置问题的探讨[J].海岸工程, 1991(01): 10-16.

[5] 邱珍英, 徐元, 曾建峰.一种快捷计算锚地锚位数量的通用公式[J].水运工程, 2014(4): 21-23.

[6] 胡云平.宁波水域港口锚地规划与优化[D].上海: 上海海事大学, 2004.

[7] 徐利斌.舟山港锚地规划研究[D].上海: 上海海事大学, 2005.

[8] 于仁海.营口港锚地规划的研究[D].大连: 大连海事大学, 2011.

[9] 连石水, 卢永昌, 孙继斌, 等.海港候潮锚地锚位数计算[J].水运工程, 2020(11): 78-81, 93. (本文编辑 武亚庆)

[6] 徐金明, 刘绍峰, 朱耀耀.岩土工程实用原位测试技术[M].北京: 中国水利水电出版社, 2007.

[7] 封其坚.珠江三角洲地区软土地基水泥搅拌桩处理及其检测方法的研究[D].广州: 华南理工大学, 2010.

[8] 陈甦, 彭建忠, 沈剑林, 等.水泥粉喷桩钻芯检测工程实例[J].岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1891-1893.

[9] 刘松玉, 章定文, 邵俐.标准贯入试验(SPT)在水泥粉喷桩质量评价中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2382-2386.

[10] 石名磊, 朱森林, 张小端, 等.关于水泥系深层搅拌桩检测的探讨[J].重庆交通学院学报(自然科学版), 2000, 19(3): 63-67.

[11] PUPPALA A J, CHITTOORI B S C. Transportation infrastructure settlement and heave distress: challenges and solutions[J]. Journal of Zhejiang University science A (applied physics & engineering), 2012, 13(11): 850-857.

[12] 李广信.高等土力学[M].北京: 清华大学出版社, 2004.

[13] 陈国兴, 刘雪珠.南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J].岩土工程学报, 2004, 26(1): 79-82.

[14] 潘殿琦, 陈勇.深层搅拌桩强度的影响因素与改善措施[J].岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1954-1958.

(本文编辑 王璁)