

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2011. 02. 019

地基土弹性模量对薄壁筒桩海堤结构的影响分析

沈自力¹, 刘卫未²

(1. 浙江同济科技职业学院水利系 浙江 杭州 311231 ; 2. 浙江大学建筑工程学院岩土所 浙江 杭州 310027)

摘要 利用刚度等效原则 , 将筒桩结构简化为二维问题 , 研究不同土体弹性模量对结构内力和位移的影响。研究结果表明 , 提高淤泥质土弹性模量 , 对海底地基土体进行抛石处理 , 一方面可以有效减小筒桩海堤的侧向变形 , 另一方面可以提高海堤的整体稳定性。薄壁筒桩海堤结构经济效益突出 , 有很好的应用前景。

关键词 地基土 ; 弹性模量 ; 薄壁筒桩 ; 海堤结构

中图分类号 :TV871 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2011)02-0077-04

Effect of elastic modulus of foundation soil on seawalls with thin-walled tubular piles//SHEN Zi-li¹, LIU Wei-wei²
(1. Department of Hydraulic Engineering, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract : By means of the equivalent stiffness method , the structure of a seawall with cast-in-place tubular piles was simplified into that on a two-dimensional plane. The effect of different elastic moduli of soils on internal force and displacement of the structure was studied. The results show that the increase of the elastic modulus of muddy soils and the riprap treatment of foundation soils on seabed may effectively reduce lateral deformation of the seawall structure with cast-in-place tubular piles on one hand and improve its overall stability on the other hand. The seawalls with thin-walled tubular piles have significant economic benefits and good application prospects.

Key words : foundation soil ; elastic modulus ; thin-walled tubular pile ; seawall

海堤是海岸防护的主要工程措施之一。海堤结构设计不合理、地基处理不当或外部荷载作用引起地基失稳等是目前海堤损毁的主要原因。

从结构优化角度出发 , 最小断面的堤型最经济 (占地面积小) , 而上、下部统一设计的结构有最好的稳定性。大直径现浇混凝土薄壁筒桩 (以下简称筒桩) 作为海堤兼具以上优点 , 从而应用前景广阔。

本文研究的筒桩不同于预应力管桩和近岸工程中常用的钢管桩 , 其采用现场浇筑 , 且桩径较大 , 目前多用于路基处理中。筒桩用于海堤结构设计中主要基于以下 3 点 : ① 占地少 , 政策处理优势明显 ; ② 结构整体稳定性高 ; ③ 筒桩承载力大 , 工后沉降小 , 混凝土用量省。

筒桩可以为现浇素混凝土筒桩 , 若外荷载较大 , 也可在内外套管间下设钢筋笼 , 再浇筑混凝土 , 形成现浇钢筋混凝土薄壁筒桩。该桩可自由组合成单排联体结构和双排框架结构 (图 1、图 2)。桩顶可用现浇钢筋混凝土压顶梁连接 , 2 排桩之间用系梁连接 , 在水深较大的海域或软土较深地区 , 水平向荷载较

大 , 多采用双排框架结构 (若为挡土结构 , 可不用系梁 , 排桩间土体用土工织物或其他方法处理) , 其稳定性好 , 强度高 , 抗冲击能力强。

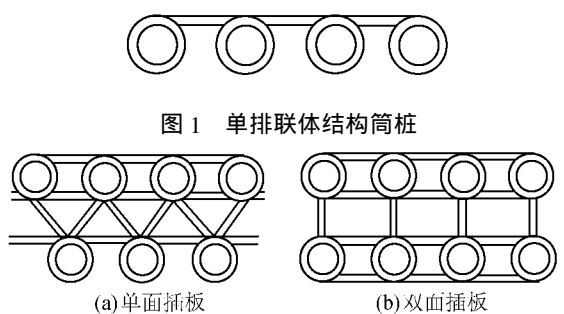


图 1 单排联体结构筒桩

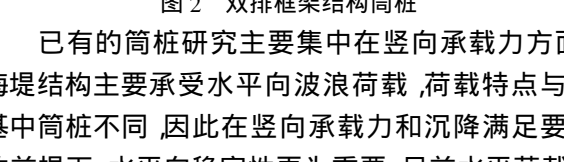


图 2 双排框架结构筒桩

已有的筒桩研究主要集中在竖向承载力方面 , 海堤结构主要承受水平向波浪荷载 , 荷载特点与路基中筒桩不同 , 因此在竖向承载力和沉降满足要求的前提下 , 水平向稳定性更为重要 , 目前水平荷载下该结构性状研究未全面开展^[1]。笔者通过有限元方法研究地基土弹性模量对筒桩海堤结构的影响 , 并在此基础上提出优化设计建议。

1 有限元分析

1.1 简化分析方法

筒桩海堤结构是一个复杂的三维问题,海堤长度远大于其他方向的尺寸,且荷载分布大致均匀,因此可按抗弯刚度等效原则^[2]将筒桩结构转换为连续挡墙,桩和连系梁采用可承受弯矩的梁单元模拟,从而将三维问题简化为平面应变问题进行研究,相应的换算公式为

1/12 (d + t) h^3 = 1/64 π (d^4 - d_1^4) (1)

式中:d为筒桩外径;d_1为筒桩内径;t为壁厚;h为换算的连续墙厚度。

1.2 有限元分析模型

为模拟桩土共同作用,结合现有研究成果^[3-4],在建模和计算过程中采用以下假定:①采用四结点二维平面单元,网格划分如图3所示。②土体假设为均质各向同性弹性材料,采用线弹性本构模型。③桩和连系梁用可承受抗弯矩的梁单元模拟,按桩土界面上设置 Goodman 接触面单元,可考虑二者相对滑移,材料按钢筋混凝土参数构建。④不考虑海堤结构施工和水位变化对土体性质的影响。⑤地表和填土表面为自由面,远处竖向边界有水平向位移约束,底面边界有水平、竖直方向位移约束。

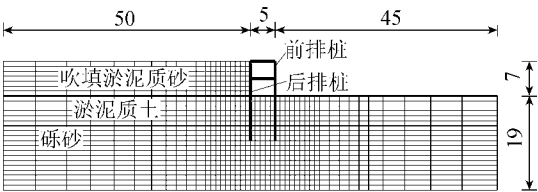


图3 有限元网格划分(单位:m)

2 工程实例

以广东省惠州市某工程为研究对象^[5],研究2种荷载组合:正常使用条件下最不利荷载组合和施工条件下最不利荷载组合。前者只考虑结构后填土的作用(图4),认为填土一次完成;后者只考虑波浪力的作用(图5),波浪力计算方法参照 JTJ 213—

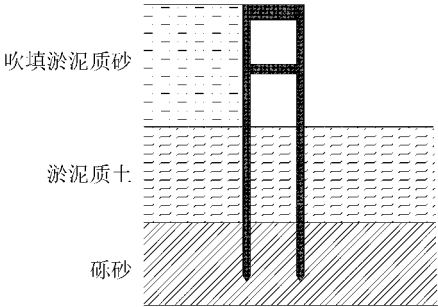


图4 正常使用条件下最不利荷载组合

1998《海港水文规范》^[6]。

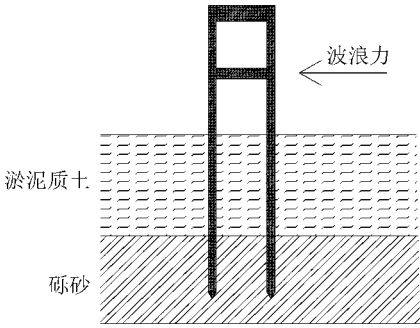


图5 施工条件下最不利荷载组合

基岩以上土体分3层:基岩、残积层(主要为砂岩风化后的残留物)和沉积层(主要为淤泥或淤泥质土)填土为淤泥质砂,分布如图4所示,具体参数见表1。双排筒桩结构的前、后排桩长均为16m,桩径为1500mm,壁厚为180mm,桩中心距为3m,排距为5m,系梁截面尺寸为0.3m×0.6m,连系梁距桩顶距离为3.5m,桩体和连系梁的密度为2500kg/m³,弹性模量 E = 2.5 × 10⁴ MPa,泊松比 ν = 0.15;接触面切向刚度 k_s = 500 kN/m,法向刚度 k_n = 10⁵ kN/m。由工程水文地质资料以及 JTJ 213—1998《海港水文规范》^[6]相关规定,确定堤顶高程为+4.5m,见图6,波态为近破波,波浪力 P = 288 kN,作用于泥面以上4.4m处。

表1 土体参数

名称	厚度/ m	ρ/(kg·m ⁻³)	c/ kPa	φ/ (°)	E/ MPa	μ	K ₀
吹填淤泥质砂	7	1700	0	18	3	0.45	0.51
淤泥质土	6	1850	15	21	3	0.41	0.46
砾砂	5	2000	17	40	12	0.31	0.39
基岩		2500			2 × 10 ⁴	0.30	0.39

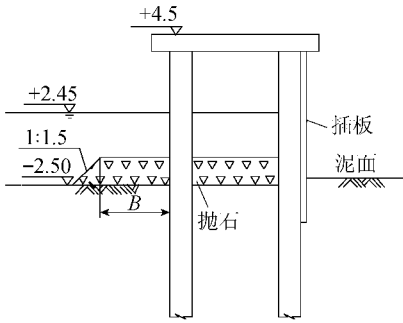


图6 波浪力示意图(单位:m)

3 海底土体弹性模量的影响

3.1 不同土体弹性模量的影响

由图4可见,筒桩要穿过6m厚的淤泥质土进入砾砂持力层,这部分土体对筒桩稳定和变形的影响值得关注,尤其对于施工期。

研究表明,前、后排桩最大水平位移都发生在桩

顶处,然后随深度逐渐递减,桩底处位移最小。

由于压顶梁和中间系梁的作用,前、后排桩之间的相互作用得到加强,位移曲线形式非常相似,都随着淤泥质土土体弹性模量的增大逐渐变陡,桩顶与桩底的位移差别也逐渐减小。图7为不同土体弹性模量对应的前排桩水平位移。

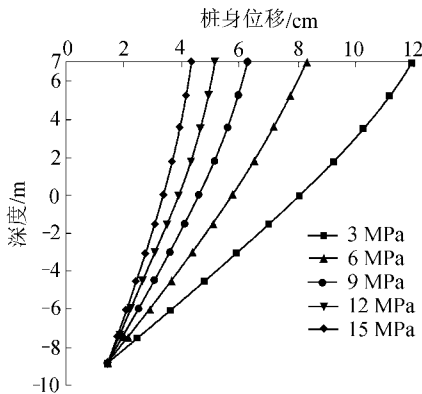


图7 不同土体弹性模量下前排桩水平位移

淤泥质土对前、后排桩弯矩的影响非常显著。淤泥质土弹性模量增大时,虽然前、后排桩桩顶处弯矩和桩身最大正弯矩变化不大,但桩身最大负弯矩却显著减小,因此提高淤泥质土弹性模量可以有效减小筒桩侧向变形,并大幅度减小前、后排桩最大桩身弯矩。如图8所示。

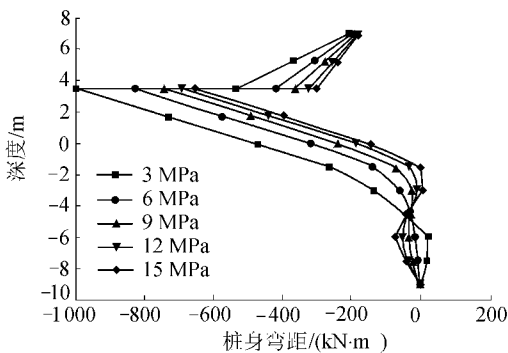


图8 不同土体弹性模量下前排桩弯矩

3.2 抛石的影响

对淤泥质土体进行处理可以有效提高筒桩海堤结构的稳定性,常用的抛石法不仅可以加固海底地基,还能起到消浪作用。为确定合适的抛石范围 B (图6),分别取 $B=2d, 3d, 4d, 6d$ (d 为筒桩外径)计算,设计抛石层高为2 m,抛石外侧的坡比为1:1.5,将抛石当作1层土体单元来模拟, $E=2\times 10^4$ MPa, $\nu=0.3$, $\rho=2000$ kg/m³。

研究发现,抛石的影响非常大,随着抛石范围的增大,桩身水平位移不断减小,如图9所示。抛石对桩身上部水平位移的影响远大于对桩端的影响。抛石后,位移曲线变陡,桩身不同位置处位移差别减小,当抛石范围达到 $4d$ 时,最大水平位移已不在桩

顶,而在泥面处。

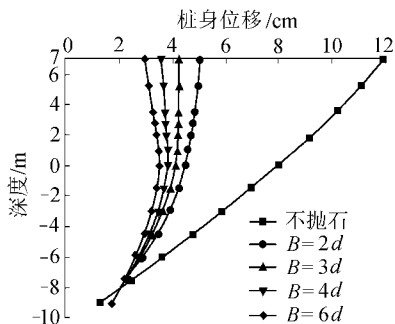


图9 不同抛石范围下前排桩水平位移

抛石与否对前、后排桩弯矩影响也很显著。抛石后,前、后排桩桩顶弯矩和抛石顶部以上桩身弯矩有所减小,桩身最大负弯矩却随之增大,如图10所示。相比而言,抛石范围对桩身弯矩的影响不是很大,尤其是当抛石范围达到 $4d$ 以后,桩身弯矩基本不变。

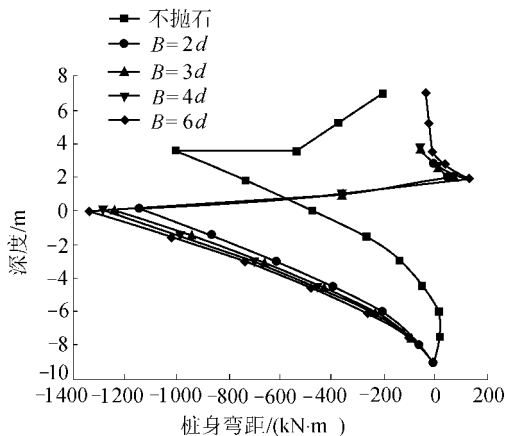


图10 不同抛石范围下前排桩弯矩

计算表明,抛石可以有效减小桩身侧向变形,但是会增大前、后排桩桩身弯矩,抛石范围达到 $4d$ 以后,抛石范围对桩身弯矩的影响已经很小,因此筒桩海堤堤前可以抛石护堤,考虑到经济因素,建议抛石范围 B 为 $3d$ 。

4 结构稳定分析

充分运用上述研究成果,对筒桩海堤结构进行优化。针对文中研究的工程,具体体现在:①对海堤淤泥质土进行处理,取抛石范围 $B=4.5$ m,使其土体弹性模量达到8 MPa, $\nu=0.4$;②系梁刚度提高2倍;③排距为6 m;④系梁距桩顶距离不变,筒桩桩径、壁厚不变。

计算结果表明,优化以后桩顶位移为0.25 cm;后排桩最大桩身弯矩为-712 kN·m,前排桩最大桩身弯矩为1082 kN·m。桩身所能承受的极限弯矩可根据JTJ 267—1998《港口工程混凝土结构设计规

范^[7]计算,本工程 的单体筒桩极限弯矩为 1 772.47 kN·m。由此可见,前、后排桩桩身弯矩均未超出桩身极限弯矩。

筒桩间用系梁和压顶梁刚性连接,因此整体刚度较大。整体稳定计算简化为水泥土重力式挡土结构模式,表 2 为正常使用下最不利荷载组合和施工条件下最不利荷载组合的抗滑移、抗倾覆稳定计算结果。

表 2 不同工况下筒桩海堤结构稳定性验算结果

工 况	抗倾覆	抗滑移
正常使用下 最不利荷载组合	$\gamma_d = 1.6 (> 1.5)$ 满足规范要求	$\gamma_d = 2.9 (> 1.4)$ 满足规范要求
施工条件下 最不利荷载组合	$\gamma_d = 1.5 (> 1.5)$ 满足规范要求	$\gamma_d = 2.1 (> 1.4)$ 满足规范要求

注: γ_d 表示抗力分项系数。

由表 2 计算结果可知,该工程筒桩海堤的稳定性满足规范要求。

通过上述演算分析可知,增加排距和系梁刚度可以减少侧向变形,但后者减小侧向变形更加有效。地基土弹性模量增大时,虽然前、后排桩桩顶处弯矩和桩身最大正弯矩变化不大,但桩身最大负弯矩却显著减小。因此,提高淤泥质土弹性模量可以有效减小筒桩侧向变形,并大幅度减小前、后排桩最大桩身弯矩,同时提高海堤整体稳定性。

5 结 论

对新型海堤结构——筒桩结构海堤进行了研究,重点研究了淤泥土土体弹性模量对结构内力和变形的影响,得到了以下结论:

a. 提高淤泥质土弹性模量可以有效减小筒桩的侧向变形,并大幅度减小前、后排桩最大桩身弯矩。

b. 海底淤泥进行抛石处理既可以有效减小筒

桩海堤的侧向变形,还可以提高海堤的整体稳定性,防止波浪冲刷带走堤底泥沙。研究结果表明,当抛石范围 $B = 3d$ 时,筒桩侧向变形较小,而且前后排桩最大桩身弯矩增幅不大。

c. 筒桩海堤结构有很多优点,但应用时一定要注意其适用条件。若涂面较低,且持力层较深,超出筒桩目前施工最大桩长的情况时,要慎重考虑,或结合其他措施联合使用。

d. 本文虽然通过简化建立了双排结构筒桩的有限元模型,并通过典型工程进行了计算验证分析,但是模型设定与工程实际还有诸多不符,例如各连接处是否能满足刚性连接、土体采用线弹性计算模型等,同时也缺乏更多的实际工程资料验证,因此使用时要根据工程实际进行模型优化。

参考文献:

[1] 王哲.大直径灌注筒桩承载性状研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[2] 蔡袁强,阮连法,吴世明,等.软黏土地基基坑开挖中双排桩式围护结构的数值分析及应用[J].建筑结构学报,1999,20(4):65-71.

[3] 俞建霖,曾开华,温晓贵,等.深埋重力-门架式围护结构性状研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1578-1584.

[4] 熊巨华,杨敏,冯又全.水泥土复合式围护结构的稳定性验算方法[J].工业建筑,1999,29(8):32-43.

[5] 郑尔康,姜贤放.大亚湾石化区筒桩结构海堤及相关工程优化设计报告[R].惠州:铁道第四勘察设计院大亚湾分院,2003.

[6] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].

[7] JTJ 267—1998 港口工程混凝土结构设计规范[S].

[8] YB9258—1997 建筑基坑工程技术规范[S].

(收稿日期 2010-04-08 编辑:方宇彤)

(上接第 76 页)

[2] 王爱勤,张承志.水工混凝土的碱骨料反应问题[J].水利学报,2003,34(2):117-121.

[3] 卢都友,许仲梓,吕亿农,等.集料 ASR 活性检测方法评述[J].南京化工大学学报,2000,22(3):72-77.

[4] McCoy W J, Caldwell A G. New approach to inhibiting alkaliaggregate expansion[J]. Journal of the American Concrete Institute,1951,22(9):693-706.

[5] 莫祥银,许仲梓,吴科如.不同因素对外加剂抑制碱集料反应的影响[J].混凝土与水泥制品,2002(4):3-6.

[6] 李光伟,周麒麟.锦屏一级水电站大坝混凝土的碱骨料反应[C]//王任坤.水工大坝混凝土材料和温度控制研究与进展.北京:中国水利水电出版社,2009:68-74.

[7] 周麒麟.两河口水电站砂板岩骨料碱活性抑制试验研究[J].水电站设计,2008(3):50-53.

[8] 李光伟,周麒麟.硅粉对碱硅反应的抑制作用[J].商品混凝土,2008(5):29-31.

[9] 周麒麟,李光伟.磷渣抑制集料碱硅酸反应的试验研究[J].水利水电科技进展,2008,28(2):39-41.

[10] RAMACHANDRAN V S, Mailvaganan NP miscellaneous in concrete admixtures handbook[M]. New Jersey: Noyes Publications,1984:525-526.

[11] DL/T5151—2001 水工混凝土砂石骨料试验规程[S].

[12] 天津化工研究院.无机盐工业手册:下册[M].2版.北京:化学工业出版社,1995:67-69.

[13] 莫祥银,许仲梓,吴科如.不同因素对外加剂抑制碱集料反应的影响[J].混凝土与水泥制品,2002(4):3-6.

[14] 吴建华,邓敏,张士萍.锂盐抑制碱硅酸反应研究进展[J].材料导报,2008,22(专辑X):187-189.

(收稿日期 2010-07-23 编辑:高建群)