

· 港口 ·



淤泥质海岸桶式结构设计

李 武, 程泽坤

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 位于淤泥质海岸上构筑物的设计技术难点之一就是选择何种结构形式以实现工程建设目标。桶式结构可以回避海上软土地基处理技术难点, 是适合于淤泥质海岸的一种新型结构。介绍该新型桶式结构在应用中的结构选型、结构稳定性验算和结构设计方法以及工程应用情况等, 可供类似工程应用时参考。

关键词: 淤泥质海岸; 桶式基础; 验算方法

中图分类号: TV 141

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0042-06

Design of bucket-based structure on silt coast

LI Wu, CHENG Ze-kun

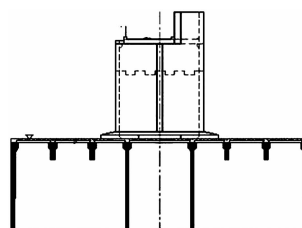
(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: One of the technical difficulties in structures design is to choose the structural type in order to achieve the project goal on the muddy coast. The bucket-based structure can avoid technical difficulties of maritime soft handle, and is a new structure suitable for the silt coast. This paper describes the structure selection of the new bucket-based structure in the application, checking method of structural stability, structural design method, and engineering applications, etc. It is available for reference when the bucket-based structure is applied to similar engineering.

Keywords: silt coast; bucket-based structure; checking method

位于淤泥质海岸的海相软土, 一般具有土层厚、含水量高、压缩性高、灵敏度高、强度低等物理学特性, 是港口水工建筑物、驳岸、围堤等近岸工程建设中重点研究和处理的对象。对于工程中软土地基的处理通常有两种方式, 即通过加固改善软土特性或采用结构回避软土加固处理。地基加固处理方式是对软土地基进行排水固结、爆破挤淤、清淤置换等处理, 能够收到较好的工程效果。然而对工程量、工期、砂石料供应、造价、水上施工、环境等因素较为突出的工程, 地基加固处理方式有时不能够完全胜任, 因此必须通过技术创新开发新结构来解决。为此, 在查阅大量文献资料的基础上, 依托连云港港徐圩港区

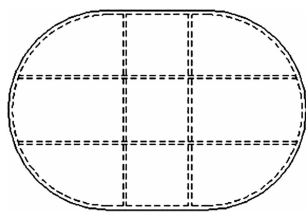
防波堤工程的建设, 提出了适合软土地基的多格舱混凝土新型桶式基础结构^[1-3] (图1), 并开展了一系列应用研究和实践工作^[4-9], 实践证明该新结构能够满足设计功能要求。本文主要介绍该新型桶式结构在应用中的结构选型与特点、结构稳定性验算和结构设计方法、施工中的关键技术以及工程应用情况等, 可供类似工程参考。



a) 正视图

收稿日期: 2014-06-11

作者简介: 李武 (1978—), 男, 博士后, 高级工程师, 从事港口设计与研究。



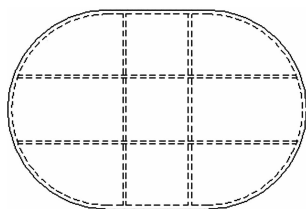
b) 俯视图

图1 多格舱混凝土桶式基础结构

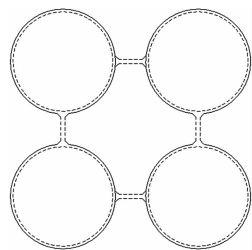
1 结构形式

桶式结构是一种具有桶盖、壳壁、由内隔板围成的多格舱空间混凝土结构,通过设置在桶盖上的排气/排水装置,实现结构下沉、纠偏等施工操作,具有结构整体性好、承载能力高、施工下沉装备简单等特性。

桶式基础结构形式可以根据工程地质条件、结构功能、水深条件、施工能力、工程造价、工期要求等因素选择确定。一般可采用椭圆形多格舱、矩形多格舱、圆形多格舱等平面形式,以利于下沉或纠偏等操作(图2)。桶式基础结构可以与上部结构一体,也可以上下部结构分离等。



a) 椭圆形多格舱



b) 圆形多格舱

图2 桶式结构典型的平面形式

桶式结构不需要对结构下软土地基进行加固改造,盖板、壳壁、隔板及下卧土层把软土封闭在壳内,通过软土与结构相互作用,提高结构的承载能力,共同承担其上部结构所传递的荷载。桶式结构具有以下特点:

1) 桶式结构适用于在软土地基上建造海堤、

围堤、驳岸、风电基础等结构,持力层埋藏适中,一般水深在-3 m以下的区域。尤其适用于新回填成陆的港区,可大大减少陆域形成围堤、驳岸建设中重复投资问题。

2) 桶式基础结构单元工厂化制作,预制质量高,较容易满足结构下沉/纠偏施工对气密性的要求。

3) 桶式结构单元水上施工工艺简单,靠排气、排水即可实施下沉/纠偏施工,无振动、无噪声等。

4) 桶式结构应用在海堤、围堤上时,与传统的淤泥土通过地基处理技术建堤比较,一定条件下,具有节省建设成本、缩短施工周期、施工期风险小、节约石料资源等优点,符合“资源节约型、环境友好型”的建设要求。

2 结构设计

2.1 结构单元主尺度

桶式结构主尺度主要由地质条件、结构功能要求和施工技术条件等控制。对桶式结构分为上桶和下桶两部分,上桶结构断面尺度根据使用功能、水深确定,下桶结构的断面尺度主要由水深、地质条件、结构滑移、倾覆、浮游稳定性、功能要求和施工技术条件等因素确定;下桶结构高度应进入软土一定深度,作为驳岸使用时应进入下卧好土层不小于1.0 m;下桶平面长度应满足结构抗滑、抗倾稳定性要求;下桶平面宽度满足施工条件要求;格舱的数量应在4个及以上,并对称布置;桶盖板、隔板、侧板均由结构施工荷载、使用荷载作用下承载力控制;结构的单元尺度应满足浮游稳定、使用期变形要求等。

2.2 主要工况

桶式结构设计应按照承载能力极限状态和正常使用状态下多工况组合进行设计计算,主要计算内容包括施工期结构承载能力、浮游稳定、下沉/纠偏计算、限裂复核等,使用期结构承载能力、滑移、倾覆、沉降、变位、限裂复核等。主要工况如下:

1) 施工期。

工况1,桶式结构单元出运:自重+牵引;工

况2, 桶式结构单元浮运: 自重 + 浪 + 流 + 牵引力; 工况3, 桶式结构单元下沉/纠偏: 自重 + 抽气、抽水/加气。

2) 使用期。

工况4, 桶式结构-地基-波浪共同作用; 工况5, 桶式结构受港侧回填土压力与结构共同作用。

2.3 主要验算、计算方法

2.3.1 结构稳定性验算

笔者提出了条件极限平衡计算方法, 具有计算参数少、利于使用者掌握的优点。基本思路是假设结构和内部土体发生刚体小转动, 合力中心位置不因转动而发生改变, 桶内土体参与抗倾计算的重力根据真空度和桶壁摩擦力确定; 结构各个方向受力平衡, 竖向和水平向极限平衡互不影响; 极限弯矩平衡根据地基承载力的极限分布形式计算。计算简图见图3。

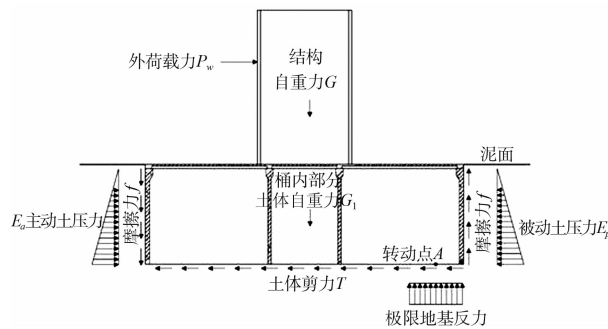


图3 条件极限平衡计算方法计算简图

由水平力平衡推算结构单元断面抗滑稳定验算式:

$$k_s = \frac{P_{E_p} + T}{P_w + P_{E_a}} \quad (1)$$

式中: k_s 为水平抗滑抗作比系数; P_w 为上部桶上作用的水平波浪力设计值; P_{E_a} 为迎浪侧的主动土压力设计值; P_{E_p} 为背浪侧的被动土压力设计值; T 为桶底部的水平切力设计值。

由竖向力平衡推算结构单元断面承载力验算公式:

$$k_0 = \frac{F_k}{V_d} \quad (2)$$

式中: k_0 为承载力抗作比系数; F_k 为计算面上地

基承载力的竖向合力标准值; V_d 为作用于计算面竖向合力的标准值。

由桶底转动点的力矩平衡推算结构单元倾覆稳定性验算式:

$$K_0 = \frac{M_\sigma + M_{E_p} + M_f}{M_w + M_{E_a}} \quad (3)$$

式中: K_0 为抗倾覆稳定性抗作比系数; M_σ 为地基反力的抗倾力矩设计值; M_{E_p} 为桶外土压力差的抗倾力矩设计值; M_f 为桶内外竖向摩擦力的抗倾力矩设计值; M_w 为外荷载的倾覆力矩设计值; M_{E_a} 为桶外主动土压力的倾覆力矩设计值。

抗倾验算的一般步骤为: 1) 对结构取隔离体, 求出结构合偏心力矩, 确定结构偏转方向。2) 计算水平和竖向的合力, 求出地基反力。3) 由极限承载力和地基反力, 求出极限弯矩平衡下地基反力分布。4) 求出地基反力的合力, 并计算与竖向合力形成的极限力矩。5) 计算总极限抗倾极限力矩与总倾覆弯矩的比值, 确定抗倾稳定性抗作比系数。

2.3.2 浮游稳定性验算

桶式结构为顶端封闭下端敞开的倒置杯体, 其浮游不同于沉箱或船舶在水中的漂浮。对于多隔舱桶体浮游稳定性, 从几何、压强、力学的关系来开展气浮体与浮游体稳定计算公式之间的关系研究, 推导出符合气浮体的稳定计算公式, 以桶式结构平面为矩形为例。

1) 计算简图 (图4)。

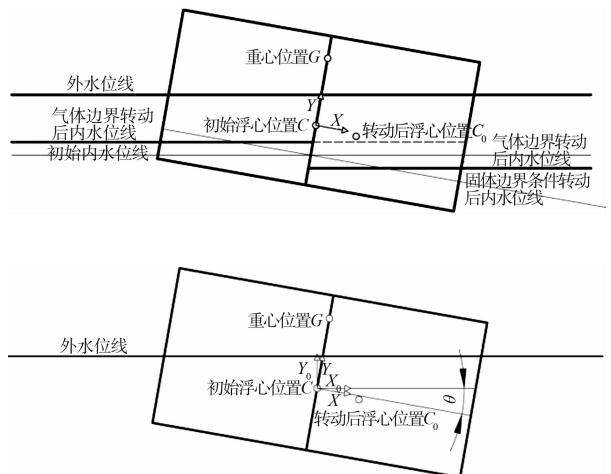


图4 转动 θ 角后气体压强稳定后计算简图及相对转换坐标系

2) 基本假定。

结构内气体不能外溢; 计算过程中总浮力保持不变; 结构内气体各向压强相同, 桶内水位面始终为平面; 静水中。

3) 计算公式。

推导出矩形断面结构 n 舱稳定判别通式为:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2} \rho - (Y_G - Y_C) \geq 0 \quad (4)$$

式中: n 为结构单元的格舱数; ρ 为浮游稳定定倾半径; Y_G 为结构重心位置; Y_C 为结构初始浮心位置; $Y_G - Y_C$ 为结构定倾半径。

由式(4)可知, 当结构为单舱结构(桶或杯状结构)即 $n=1$ 时, 底在上面使重心在上面, 浮心在下面, 形成倾覆力矩, 气浮不稳定, 符合判别式的条件; 当结构分舱数 n 达到无穷大, 近似为实体, 因此气浮稳定的定倾半径与浮游稳定定倾半径无限接近, 判别式可以通用。

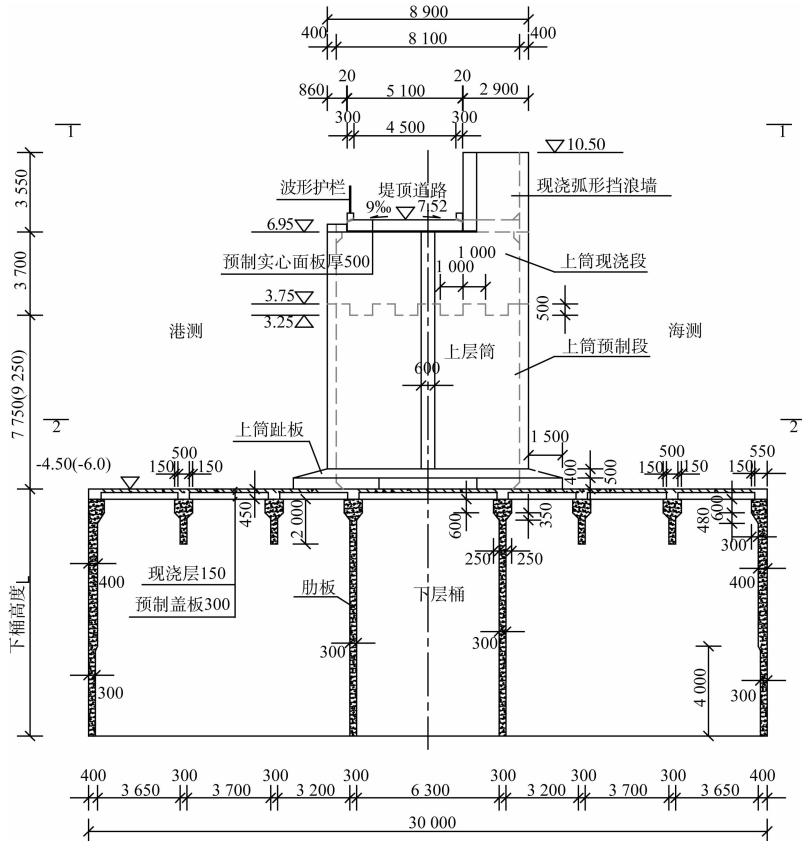
2.3.3 结构内力计算方法

桶式结构是个空间壳体结构, 结构内力不能以常规方法计算, 必须借助大型通用有限元分析

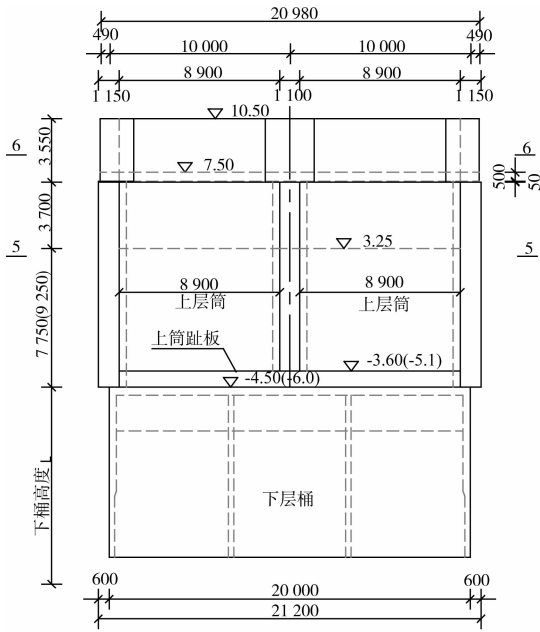
软件如 ABAQUS、ANSYS 等建立空间模型进行计算分析。结构一般采用壳体单元, 土体本构模型采用摩尔-库伦模型(M-C模型)和扩展的 Drucker-Prager 模型(D-P模型)进行模拟, 分析过程采用总应力法、快剪指标。

3 工程实例

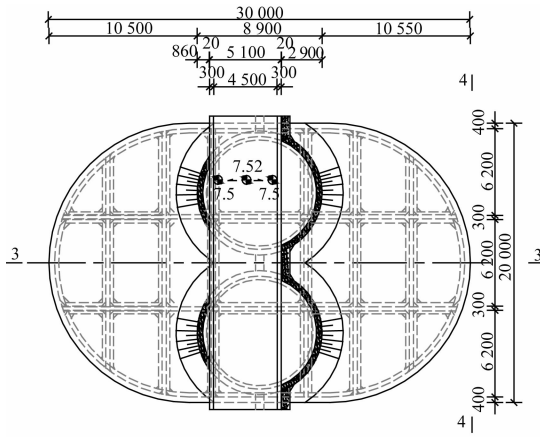
桶式基础结构形式依托连云港港徐圩港区防波堤工程的建设提出并在该工程中首次使用。结合工程位置处的地质、水深和波浪条件, 桶式结构的主要尺度为: 基础桶体的长轴 30 m、短轴 20 m、高度 9.5 ~ 11.5 m, 下桶壁厚 40 cm, 隔板的壁厚 30 cm, 桶顶板厚 50 cm, 上桶壁厚 40 cm, 结构总高 25.0 m 左右, 结构见图 5。结构下沉到位后的基础桶口进入持力层 1 m 以上, 下沉完成后采用块石做护底, 防护范围海侧 25 m, 内侧 20 m。通过结构验算, 结构抗滑验算的抗作比 1.50, 抗倾验算的抗作比 1.35, 下沉力与下沉阻力比 1.6, 浮游稳定等均满足要求。



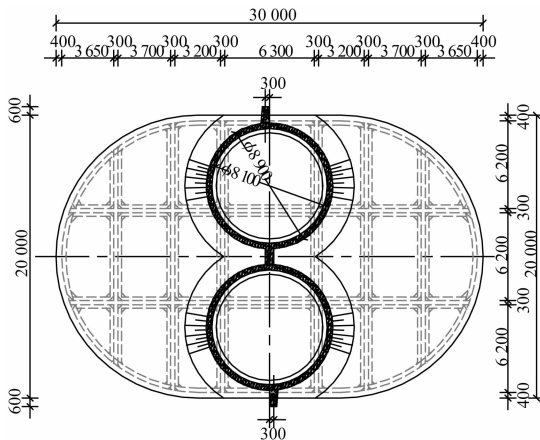
a) 3-3桶式基础标准结构



b) 4-4桶式基础结构立面



c) 俯视图1



d) 俯视图2

图5 徐圩港区防波堤工程桶式结构

为了解桶体下沉时结构受力监测界面土压力监测、孔隙水压力监测及钢筋内力变化等内容。布置监测仪器如下：

1) 土压力计。

布置在下桶、盖板和隔板等部位，共布置75支土压力计。①下桶侧壁布置10条测线，其中测线T1、T2、T3、T4埋设5支土压力计，其余测线T5~T10埋设3支土压力计；②隔板布置4条测线，测线T11~T14埋设3支土压力计；③盖板测线T15布置9支土压力计；④下桶底部测线T16布置16支土压力计，其中桶壁底部和隔板底部均布置8支土压力计。

2) 孔压计。

布置在下桶、隔板等部位，共布置9支土压力计。①下桶侧壁布置2条测线K1、K2，每条测线埋设3支孔压计；②隔板布置测线K3，埋设3支孔压计。

监测结果分析：T1-1~T1-3、T2-1~T2-2的最大值出现在下沉过程中，T1-4~T1-5、T2-3~T2-5的最大值出现在下沉完成以后。由于桶体下部先入土体，而且桶体下部入土较深，所以，下桶下部土压力计所受的土压力最大值都出现在下沉过程中；下桶上部入土以后，土体已有所扰动，土体应力释放，所以应力峰值未出现在下沉过程中，而下沉完成以后，扰动土体的应力有所恢复，所以下桶上部所受土压力峰值出现在下沉完成以后。下沉完成以后，受涨潮影响，各测点土压力出现10~20 kPa的正弦周期性波动，波动周期约12 h。

为验证土压力测值的准确性，把T1、T2的实测值与计算值进行对比分析。根据《连云港徐圩港区直立式防波堤试验段工程岩土工程勘察报告》，桶体下沉范围内的土质情况见表1。

表1 桶体下沉范围内的土质情况

地层编号	地层岩性	顶板高程/m	平均厚度/m	平均密度/(g·cm ⁻³)
I ₁	淤泥	-4.7	3.6	1.65
I ₂	淤泥	-8.3	6.6	1.60
II	粉质黏土	-14.9	4.5	1.89

各测点下沉到指定位置后的高程及相应水深 (按正常水位考虑) 见表 2。

表 2 各测点高程及相应水深 (静水位 3.5 m)

测点	高程/m	水深/m
T1-1、K1-1、T11-1	-14.5	18.0
T1-3、K1-2、T11-2	-10.5	14.0
T1-5、K1-3、T11-3	-6.5	10.0
T2-1、K3-1、T12-1	-15.0	18.5
T2-3、K3-2、T12-2	-11.0	14.5
T2-5、K3-3、T12-3	-7.0	10.5

根据 IV 桶下沉 GPS 数据, 下沉过程中几个时刻的下沉深度见表 3。

静水位到海底土体表面的深度为 8.2 m, 针对

表 3 IV 桶下沉深度对照 (静水位 3.5 m)

时刻	相对设计高程偏差/m	水深/m
16:31	9.35	9.65
20:15	4.26	14.74
22:35	2.58	16.42
1:35	0.79	18.21
4:35	0.18	18.82

表 3 各时间点 T1、T2 测线上 6 测点计算土所得压力与监测仪器上的土压力见表 4, 由于受潮位影响, 计算土压力值与检测值有一定的出入。

从表 4 可以看出, 通过勘测报告提供的高程和土体密度计算出的土体有效应力与实测值大致相仿, 变化规律也一致, 这证明了土压力计测值准确。

表 4 计算土的有效应力与监测土的有效应力

时间	T1-1	T1-3	T1-5	T2-1	T2-3	T2-5	kPa
16:31	2.79(4.36)	0	0(0)	5.53(1.38)	0(0)	0(0)	
20:15	35.04(38.17)	10.01(9.42)	0(0)	38.04(30.28)	13.26(1.38)	0(0)	
22:35	41.12(46.59)	20.93(15.78)	0(0)	48.12(41.20)	24.12(19.04)	0(0)	
1:35	51.54(56.14)	31.86(41.5)	6.56(7.38)	58.86(66.12)	34.86(29.20)	9.82(0)	
4:35	59.52(60.97)	35.52(39.4)	10.53(11.32)	62.52(61.05)	38.52(15.85)	13.78(18.41)	

注: 括号中数值为监测数值。

4 结语

1) 桶式结构是一种能够适应水下软土地质条件的结构形式, 可以用作建设防波堤、驳岸、围堤等结构, 在水深和软土较厚的区域使用, 与传统的抛石结构比较, 具有工期、造价优势。

2) 围绕该结构形式的应用开展了系列研究, 形成了该新型结构主尺度的确定方法、结构设计的主要考虑工况、结构稳定性和竖向承载力的验算方法、结构内力及强度计算、结构施工技术较为完善的技术体系, 为桶式基础结构的应用奠定了基础。

3) 通过试验段工程的实践验证, 较全面地检验了设计方法和施工工艺以及现场监测和检测技术手段, 说明桶体结构的设计方法、预制、出运、浮运、定位、负压下沉、纠偏等施工工艺是可行的, 为该新型结构的推广应用奠定了良好基础。

4) 由于桶体结构体型大、质量大, 在施工下沉纠偏过程中, 应充分考虑桶体结构在纠偏过程中惯性因素, 防止桶体产生过大的倾斜, 给工程实施带来不可预见的后果。

参考文献:

[1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港港徐

圩港区防波堤工程工程可行性研究报告[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2012.

[2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港港徐圩港区直立式结构东防波堤工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2012.

[3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港港徐圩港区斜坡式结构东防波堤工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2012.

[4] 李武, 吴青松, 陈甦, 等. 桶式基础结构稳定性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 42-47.

[5] 李武, 陈甦, 程泽坤, 等. 水平荷载作用下桶式基础结构稳定性研究[J]. 中国港湾建设, 2012(5): 14-18.

[6] 上海大学. 桶式基础防波堤结构整体工程特性的数值分析[R]. 上海: 上海大学, 2012.

[7] 南京水利科学研究院. 连云港港徐圩港区防波堤工程离心模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

[8] 南京水利科学研究院. 新型桶式基础防波堤与地基动力相互作用数值模拟研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

[9] 大连理工大学. 桶式基础结构构造及内力研究[R]. 大连: 大连理工大学, 2011.

(本文编辑 武亚庆)