



徐圩防波堤工程桶式基础结构设计

高志伟¹, 李 亚¹, 高树飞², 贡金鑫²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海200032; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 桶式基础结构是一种新型防波堤结构, 目前尚没有成熟的设计标准和施工工艺。结合连云港徐圩防波堤工程, 介绍此结构的设计荷载工况、结构模型试验、有限元分析方法、配筋方法。通过对比土体-结构相互作用模型和简化独立桶体模型, 说明两种分析方法的优劣。以实例对比说明中国规范和美国混凝土学会ACI 318规范关于双向板裂缝宽度的计算方法。

关键词: 桶式基础结构; 结构模型试验; 有限元; 裂缝宽度

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0224-06

Bucket foundation structure design of Xuwei breakwater

GAO Zhi-wei¹, LI Ya¹, GAO Shu-fei², GONG Jin-xin²

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

2. School of civil engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The bucket foundation structure is a new-type breakwater, and there is still no reliable design standards and construction techniques to refer to up to present. Combining with Xuwei breakwater engineering in Lianyungang, we study the load cases, the structure model test, the finite element method (FEM) analysis approach and the reinforcement design method of the structure. The advantages and disadvantages of the soil-structure interaction model and the simplified single bucket model are given by in-depth comparison. Additionally, the Chinese code and ACI 318 code to evaluate the crack width of bidirectional plate are compared via an example.

Keywords: bucket foundation structure; structure model test; FEM; crack width

徐圩防波堤工程采用了桶式基础结构, 它是一种新型薄壁钢筋混凝土结构, 具有可工厂化预制、下沉安装过程无需大型施工设备等优点。桶式结构负压下沉过程, 对气密性要求高, 下沉就位后, 结构整体竖向和水平承载能力高。对此类结构, 目前尚没有成熟的施工工艺和设计标准, 本文在一系列研究的基础上, 重点介绍此结构设计的荷载工况、试验研究成果、结构分析和设计方法等, 供类似工程设计时参考。

1 结构简介

本工程桶式基础结构上部挡浪部分采用两个

圆柱壳形式(上桶), 下桶插入泥面以下, 下桶平面形状近椭圆形(30 m×20 m), 下桶外壁为两个半圆柱壳加竖直平板形式, 内部布置井字形格板用来增加结构整体刚度以及结构与土体之间的摩阻力。结构主要构件尺寸如下: 下桶外壁厚400 mm, 内格板厚300 mm, 顶板厚500 mm, 上桶外径8.9 m, 壁厚400 mm。结构外形见图1。

2 设计工况

桶式结构的施工工艺较为特殊, 荷载工况与一般结构不同。本工程所在场地抗震设防基本烈度为7度, 由于泥面以上结构高度低, 水平地震作

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 高志伟(1974—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计工作。

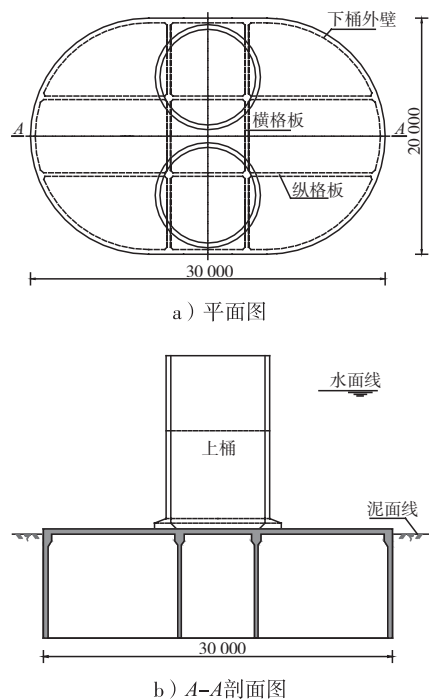


图1 桶式基础结构 (单位: mm)

用远小于波浪作用(设计波高6.34 m),且竖向地震作用无需考虑,故结构设计中不再考虑地震作用组合。根据桶式结构在施工期和使用期所受到的外界荷载或作用情况,确定如下的设计工况。

1) 陆域运输期间。

工况I-1: 自重。

2) 海上运输荷载期间。

工况II-1: 自重+气浮压力。

其中,气浮压力计算过程为:根据气浮稳定条件,可以得到下桶高出水面距离 a (图2),再根据气压平衡条件和竖向静力平衡条件可以得到桶体内封闭气体相对压强 $p_{\text{相对}}$ 。

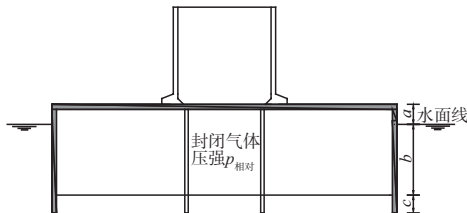


图2 海上运输期结构

3) 下沉施工期间。

结构初始下沉阶段主要依靠重力作用,随着结构下沉,下桶体封闭腔内气体慢慢排出,在此过程中,桶体内部实际受到正压作用,以便维持

结构缓慢匀速下沉;自重下沉过程结束后,通过真空泵抽取下桶内封闭水体,产生负压效应,结构在负压作用下继续下沉,直到设计高程(图3)。

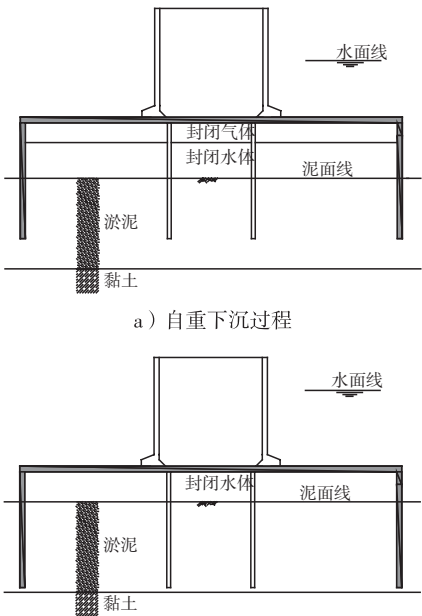


图3 下沉施工期间结构

由于下沉过程中可能出现结构竖轴偏离竖直方向,需要对结构进行纠偏操作。纠偏采用增加某个或多个仓格的负压进行,仓格原压强为 p ,纠偏负压为 Δp ,负压和为 $p + \Delta p$ 。本工程下沉工况考虑入土深度4.5, 6, 8 m共3个控制位置,并分别考虑在这3个位置进行纠偏施工。根据桶壁土体摩阻力、桶壁端阻力、桶体自重,利用静力平衡条件可以推导出桶体仓格内部压强 p ,计算得到3个控制位置下桶内目标压强 p 分别为20 kPa(正压), 50 kPa(负压), 80 kPa(负压),相应的纠偏工况可以按照纠偏负压 Δp 棋盘式间隔分布于下桶仓格考虑。工况如下:

工况III-1: 自重+正压荷载(入土深度4.5 m, 自重下沉阶段)。

工况III-2: 自重+负压荷载(入土深度6 m)。

工况III-3: 自重+负压荷载(入土深度8 m)。

工况III-4: 自重+正压荷载+纠偏负压荷载($\Delta p = 0.2 \text{ atm}$)(入土深度4.5 m, 自重下沉阶段)。

工况III-5: 自重+负压荷载+纠偏负压荷载($\Delta p = 0.2 \text{ atm}$)(入土深度6 m)。

工况III-6: 自重+负压荷载+纠偏负压荷载

($\Delta p=0.2\text{ atm}$) (入土深度8 m)。

4)使用期间。

工况IV-1: 自重+波浪荷载。

3 结构模型试验

负压下沉是本结构施工过程中的关键阶段，必须确保结构在下沉阶段的安全性和可靠性。为此，对桶式结构进行了小尺寸模型试验来模拟结构下沉施工工况，试验在大连理工大学完成^[1]。试验研究了下桶结构在负压下沉过程中的受力性能和气密性。另外，在有限元分析中，诸如材料本构（线性或非线性）、数值求解方法等计算参数的设置对分析结果有较大影响，通过本结构模型试验结果可以校验有限元力学模型选取的合理性，为后续结构原型的有限元分析提供依据。

桶式结构模型试验装置见图4，试验中将结构模型放置于装有融化沥青的钢质容器内，使得桶体内形成封闭空腔，待容器内沥青凝固后再进行负压试验。负压通过真空泵抽出桶体内封闭空气产生，负压大小通过真空表测量。

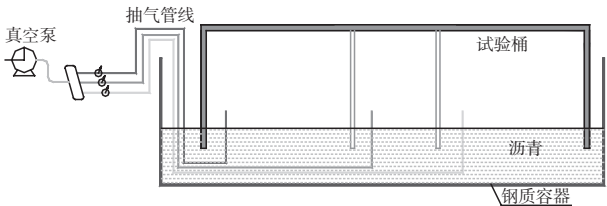


图4 模型试验装置

本试验模型为1:8的缩尺模型，模型混凝土材料和与原型结构相同，均为C40混凝土。模型试验各个物理量的相似比见表1。

表1 模型试验相似比

项目	相似比	项目	相似比
外形尺寸	1/8	密度	1
应力	1	泊松比	1
应变	1	均布荷载	1
弹性模量	1	配筋率	1

负压加载过程中记录气压变化情况和混凝土应变大小，顶板测点位置见图5（B1~B7位于顶板下表面，T1位于顶板上表面）。经过多次试验，发现负压加载过程中结构气密性良好，顶板没有

出现裂缝，应变测试结果见表2。

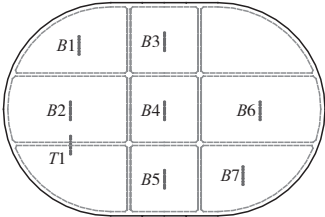


图5 模型试验测点分布

为了与试验结果对比，用有限元单元法对结构进行分析，有限元计算分别采取弹性模型和弹塑性损伤模型（混凝土本构关系和损伤参数设定见文献[2]），计算结果^[1]见表2。可以发现，弹性有限元模型计算结果普遍更接近于模型试验结果，故在结构分析中，可选用弹性有限元力学模型，且弹性计算也与混凝土结构基本设计原则一致。

表2 模型试验和有限元分析结果对比

测点	模型试验	弹性模型		弹塑性损伤模型	
	应变/ 10^{-5}	应变/ 10^{-5}	误差/%	应变/ 10^{-5}	误差/%
T1	10.40	12.9	19.4	17.80	41.6
B1	4.64	5.16	10.1	5.80	20.0
B2	10.10	9.09	11.1	13.50	25.2
B3	3.93	3.16	24.4	5.50	28.5
B4	2.58	2.68	3.7	4.60	43.9
B5	4.58	3.16	44.9	5.80	21.0
B6	9.29	9.09	2.2	13.50	31.2
B7	5.20	5.16	0.8	5.80	10.3

4 结构有限元分析方法

桶式结构在陆域运输工况、海上运输工况时的计算边界条件较为明确，有限元模型容易建立。下沉施工过程中下桶壁逐渐深入土层，可利用有限单元法建立桶体-土体整体模型对此施工过程进行精细化拟静态模拟。不过，设计中可采用简化力学模型，即仅建立桶体模型，不考虑土体在下沉过程中对桶体的侧向约束作用。

结构使用期间主要承受波浪作用，此时下桶和土体的相互作用机理复杂，难以用简单的力学模型进行描述。本工程设计中采用两种有限元模型进行对比分析，分别是土体-结构相互作用模型（Soil-Structure Interaction Model，简称为SSI Model）以及不考虑土体作用的简化独立结构

模型 (Simplified Single Bucket Model, 简称为SSB Model)。下面对两种模型得出的结果进行对比分析。

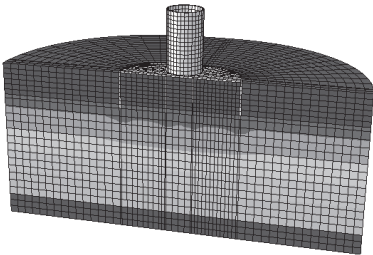
4.1 模型A: 土体-结构相互作用模型 (SSIModel)

可采用ABAQUS软件建立土体和结构相互接触有限元模型, 见图6a)。根据前文试验研究结论, 混凝土可采用弹性本构关系, 土体采用摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 屈服准则^[3], 此屈服准则常用于描述土工材料, 其控制方程为:

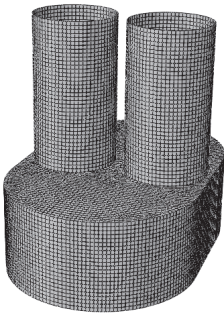
$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi = 0$$

(1)

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为第一、第二、第三主应力 (表达式中无 σ_2 项); c 为土体材料粘聚力; φ 为内摩擦角。



a) SSI有限元模型



b) SSB有限元模型

图6 有限元模型

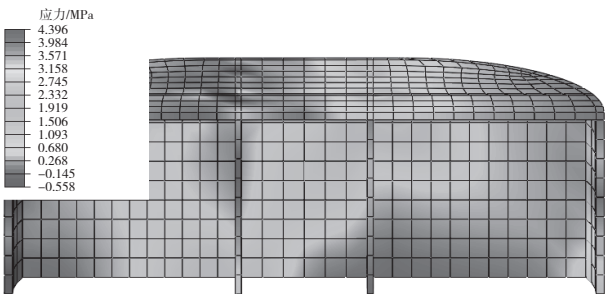
桶体结构和土体之间建立接触对 (Contact Pairs), 接触单元采用弹性库仑摩擦模型, 刚度较小的土体表面设定为接触从面, 桶体表面设定为接触主面。土体物理参数如表3, 计算结果见图7 (仅给出下桶结果)。

表3 土体物理参数

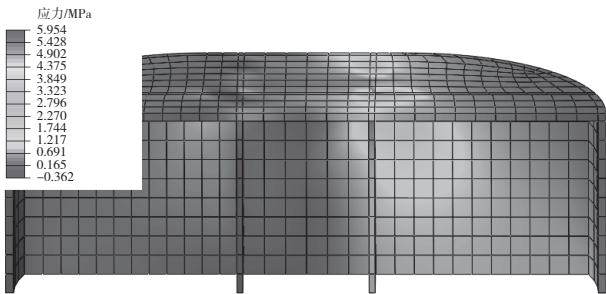
土类	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ kPa
淤泥土	1 550	2.1	0.35	2.5	5.75
粉质黏土	1 860	8.2	0.35	19	32

4.2 模型B: 简化独立桶体模型 (SSB Model)

使用期间外荷载 (波浪力) 引起的较大内力主要分布于上下桶连接区域, 下桶埋置于土体中, 内力必然很小, 不会起到控制作用, 可以考虑采用无土体的结构模型, 见图6b), 计算中仅需约束下桶底部结点的平动自由度, 下桶计算结果见图7。



a) SSI模型



b) SSB模型

图7 第一主应力云图

观察图7所示的第一主应力云图发现, SSI模型、SSB模型计算得到的主应力峰值都分布于上下桶连接区域, 其余区域应力均很小, 在结构设计中不起控制作用。SSI模型计算得到的第一主应力峰值为4.40 MPa, SSB模型计算得到第一主应力峰值为5.95 MPa, 是前者的1.35倍, 主要是因为SSI模型考虑土体作用, 土体变形耗散了外力功, SSB模型的边界条件设置方式则过高计入了下桶顶板变形能。目前土体本构关系的研究十分不成熟 (特别是淤泥质土), 再加上接触问题的强非线性因素, 导致SSI模型计算收敛困难, 数值计算误差较大, 而且还会耗费大量机时。此外, 混凝土薄壁结构设计对精度要求较高, 采用受力、传力明确的力学模型更能保证结构计算和结构设计的可靠性。所以, 实际设计中宜首先选取SSB模型计算, 并用SSI模型进行校核计算。

另外,在结构设计中应该重点关注各个构件连接部位的受力性能,必要时进行局部有限元分析,分析结果可以为构造措施设计提供依据。本结构中上桶所受到的波浪力产生的水平力、弯矩等对下桶产生了复合加载效应,使得连接上下桶的顶板受力复杂,特别是上桶壁对下桶顶板的冲切(或剪切)效应过大,设计中宜采用实体有限单元进行局部分析,所得剪应力 τ_u 应小于顶板受冲切(或剪切)应力 τ_u , τ_u 表达式可以定义为

$$T_u = 0.7\beta_h f_t \lambda \quad (2)$$

式中: β_h 为截面高度影响系数; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; λ 为调整系数,可参考文献[4]中冲切(或剪切)承载力计算公式给出。

5 结构配筋方法

方法1:内力配筋法。采用平截面假定,受压区混凝土本构关系采用理想应力-应变曲线,并且不考虑受拉区混凝土作用。多本规范^[3-5]都给出了内力配筋方法。

方法2:应力配筋法。按计算所得应力确定所需钢筋量,而构件应力可由弹性理论分析方法得到^[6]。水工结构混凝土规范^[5]给出了应力法的一般设计原则。

方法3:钢筋混凝土非线性有限元理论方法。根据能如实反映钢筋混凝土本构关系和粘结、开裂、剪切机理,以及滞回性能的理论模型,通过非线性有限元方法建立钢筋和混凝土联合数值模型,分析钢筋混凝土结构的静动力承载能力,给出混凝土和钢筋的应力。

对于桶式基础结构,如果采用弹性实体有限单元模型计算,配筋方法可以选用方法2,或者通过截面多个高斯点应力进行应力积分得到内力设计值,再按照内力法进行配筋计算;如果采用壳单元模型计算,配筋方法可以选用方法1,并以板(壳)带为对象进行配筋;也可以利用非线性有限元理论方法建模和配筋,即方法3。

配筋方式是限制裂缝开展的重要因素。国内规范计算裂缝宽度的公式为半理论半经验公式,裂缝宽度主要与钢筋应力、保护层厚度等因素有关系,其中钢筋应力需要通过计算得到。配筋方法采用内力法时,钢筋应力可以直接由规范公式计算;采用应力法时,由等应变条件可以求得钢

筋应力;如采用钢筋混凝土非线性有限元方法配筋,钢筋应力结果可以直接给出。

另外,由于顶板在下沉施工阶段需具有良好的气密性,应严格控制其裂缝开展。目前国内规范中裂缝计算主要适用于单向受力构件,而本结构下桶顶板多个区格为双向板,其裂缝开展不同于单向受力构件。美国结构工程专家Nawy等曾对双向板裂缝问题进行较为全面系统的研究,并提出了双向板裂缝计算表达式(Nawy-Orenstein公式)^[7-8],具体如下:

$$w_{\max} \leq K \beta f_s \sqrt{M_1} \quad (3)$$

式中: $w_{\max}$ 为跨中位置处板底最大裂缝宽度; K 为取决于荷载和边界条件的系数^[8],对均匀受荷的约束双向板取 $K=2.8 \times 10^{-5}$,简支板 K 值应乘以1.6,当计算假定边界为简支但实际存在部分约束时,可取 $K=2.8 \times 10^{-5}$; β 为从最外缘受拉纤维和从钢筋形心到中和轴的距离之比; f_s 为钢筋应力; M_1 为网格指数:

$$M_1 = d_1 s_2 / \rho_{t1} \quad (4)$$

式中: d_1 为延伸在1方向上的钢筋直径; s_2 为延伸在2方向上的钢筋间距; ρ_{t1} 为延伸在1方向上的钢筋面积 A_{t1} 除以与方向1垂直的受拉混凝土有效面积。

由于双向板裂缝研究尚不成熟,在国内工程设计中,仍以规范规定的裂缝宽度公式进行各类板的裂缝计算。下面以某边界约束双向板为例,比较水运工程混凝土结构裂缝计算规范公式和Nawy-Orenstein公式计算结果的差异性。板在正常使用极限状态下内力组合值如下: $M_x=120 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_y=99 \text{ kN} \cdot \text{m}$;配筋如下: X 方向钢筋直径16 mm,间距100 mm, Y 方向钢筋直径16 mm,间距150 mm,钢筋类型均为HRB400。保护层厚 $c=40 \text{ mm}$ 。

水运工程混凝土结构裂缝计算规范公式为^[3]:

$$w_{\max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right) \quad (5)$$

各参数取值为: $\alpha_1=1.0$, $\alpha_2=1.0$, $\alpha_3=1.5$, $E_s=2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$, $d=16 \text{ mm}$, $c=40 \text{ mm}$, $\rho_{te}=0.0201$, $\sigma_{s1}=M_x/(0.87A_s h_0)=171.56 \text{ MPa}$,代入式(5)可以得到裂缝宽度 $w_{\max}=0.219 \text{ mm}$ 。

Nawy-Orenstein公式中各参数取值为: $\beta=1.271$, $M_1=d_1 s_2 / \rho_{t1}=177.72 \text{ in}^2$, $f_s=20.88 \text{ ksi}$, $K=2.8 \times 10^{-5}$,代入式(3)可以得到裂缝宽度:

$$w_{\max} \leq K\beta f_t \sqrt{M_1} = 0.252 \text{ mm}。$$

可见, Nawy-Orenstein公式所得到的裂缝宽度比按照中国规范所计算结果偏大, 这与国内许多研究者得出的结论一致^[7]。尽管ACI 318规范中有关于双向板裂缝计算的规定, 但是考虑到双向板裂缝计算理论尚不成熟, 后续的ACI新版规范中取消了相关内容, 而是通过一系列构造措施来限制双向板裂缝。本工程仍然以国内规范规定计算裂缝宽度, 并采取相关构造措施保证结构抗裂性能。

6 结论

1) 通过分析施工流程, 给出了桶式基础结构的设计工况。

2) 通过结构模型试验, 验证了结构负压施工过程中安全性; 通过与有限元计算结果对比, 发现弹性模型计算结果与试验结果较为接近。

3) 对于结构使用期的荷载工况, 土体-结构相互作用模型 (SSI) 计算结果小于简化独立桶体模型 (SSB), 实际设计中宜选取SSB模型进行结构计算, 并用SSI模型进行校核。

4) 给出了桶式基础结构的配筋方法; 对双向

板裂缝宽度计算方法进行了探讨, 通过实例对比分析Nawy-Orenstein公式和国内规范公式裂缝计算结果, 发现前者计算结果偏大。

桶式基础结构是一种新型防波堤结构, 应结合工程实践, 进一步研究其工作机理, 考察结构受力性能, 优化结构设计。

参考文献:

- [1] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [2] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S].
- [3] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [4] 大连理工大学. 连云港港徐圩港区防波堤工程桶式基础结构内力及构造研究[R]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [5] 朱向荣, 王金昌. ABAQUS软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 144-148.
- [6] 李传才, 王兴梅, 刘向东. 高层建筑桩基承台按应力图形配筋的设计方法[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 86-91.
- [7] 张伟伟. 混凝土双向板裂缝宽度计算方法的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [8] ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete and commentary[S].

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

桶式基础结构主要适应于软土地基, 负压下沉, 无需大型施工船机设备; 有效利用软土特性, 减少土方弃土, 利于环保; 大幅减少砂石料的应用, 节约资源, 是结合工程实践创新设计的新型水工基础结构。

该文通过物理模型试验, 验证结构下沉的可行性, 并用有限元法分析变换验证, 分析得到桶式基础结构的合适力学模型, 为工程设计提供有效依据, 为该结构的推广应用打下了基础。

张金成

2014年12月

评委简历:



张金成, 工程硕士, 高级工程师, 中铁港航局集团公司副总工程师、中铁二院(广东)港航工程设计有限公司总工程师。

参与湛江港30万吨级油码头、20万吨级矿石码头, 海南炼化项目30万吨级原油码头等多项港口工程设计建设工作。获交通部优秀设计一等奖、二等奖各1项、交通部优秀咨询三等奖1项。