

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907044

# 预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构受力特性分析\*

李 亚<sup>1</sup>, 程泽坤<sup>1</sup>, 朱立锋<sup>2,3</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 当前装配式结构和工业化建造是土木工程重点发展的方向, 预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构作为近海土木工程领域典型的装配式结构, 具有基础性研究意义。采用刚性理论方法、有限单元法、弹性理论方法对该类型连接结构受力特性进行研究, 推导相关理论计算公式, 并基于工程计算实例进行对比分析。研究发现, 若灌浆粘结可靠、杯口和上筒之间固接时, 结构变形较小; 若灌浆粘结失效, 杯口和上筒之间发生摩擦滑移而产生较大位移, 且上筒变位随杯口高度增加而减小, 当杯口高度在 3.0 m 及以上时, 变位数值较为合理。相对刚性理论计算公式, 基于上筒变形形态、接触摩擦传力方式建立的简化弹性理论公式与有限单元法结果误差较小; 其中杯口高度为 2.0 m 时, 平均误差约 10%, 杯口高度为 3.0 m、4.0 m 时, 平均误差降低为 7%、6% 左右, 结果较为接近; 计算结果验证了简化弹性理论公式的合理可行性。

**关键词:** 预制上筒; 基础杯口; 连接; 有限单元法; 变形形态; 接触

**中图分类号:** TU375; U656 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1271-08

## Mechanical Analysis of Precast Upper Cylinder and Lower Foundation Structure with Embedded Cup Type Connection

LI Ya<sup>1</sup>, CHENG Zekun<sup>1</sup>, ZHU Lifeng<sup>2,3</sup>

(1. CCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** At present, prefabricated structure and industrial construction are the key development directions in civil engineering. Precast upper cylinder and lower foundation structure with embedded cup type connection, as a typical prefabricated structure in the field of offshore civil engineering, has fundamental research value. Based on rigid theory, finite element method (FEM) and elastic theory, the mechanical characteristics of this type of connection structure are studied, and relevant theoretical calculation formulas are derived. It is found that if the grouting bond is reliable and the connection between the cup and the upper cylinder is fixed, the structural deformation is small. If the grouting bond fails, there will be friction slip between the cup and the upper cylinder, resulting in a large displacement, and the displacement of the upper cylinder decreases with the increase of  $h_c$  (height of the cup).

\* 收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-11-10

基金项目: 江苏省交通运输科技与成果转化专项资金(2018Y03)资助

作者简介: 李亚(1983—), 男, 高级工程师。主要从事近海土木交通工程结构设计咨询与研究。

E-mail: liyaseu@foxmail.com

When  $h_c$  is not less than 3.0 m, the displacement value is relatively reasonable. Compared with the calculation formula by rigidity theory, the simplified elastic formula based on deformation pattern of the upper cylinder and the theory of contact friction gives close result to that of FEM, and the details are as follows: when the cup height is 2.0 m, the average error is about 10%; when the cup height is 3.0 m and 4.0 m, the average error reduces to about 7% and 6%. The results show that the simplified elastic formula is feasible.

**Keywords:** precast upper cylinder; cup foundation; connection; FEM; deformation pattern; contact

## 引言

目前,为促进建筑业向智慧化、绿色化转型升级,我国正积极探索和大力推进装配式结构及相应工业化建造技术的发展<sup>[1]</sup>。装配式结构是用预制部件在施工现场装配而成的结构,在建筑、桥梁、近海工程等土木领域中均有应用,其中建筑行业中起步早、系统应用较多,建筑中一般通过装配构件节点及接缝处纵向钢筋的连接形成整体式结构,连接方式有钢筋的机械连接、套筒灌浆连接、浆锚连接等<sup>[2]</sup>;在桥梁工程中,为降低大跨结构的施工难度,装配建造方式较早应用于上部主梁的节段预制拼装,近些年随着桥梁建造标准化、快速化的要求,预制拼装桥墩技术也得到研究应用<sup>[3-7]</sup>。在近海土木工程领域的港口结构、海洋风电结构中,薄壁筒体、空心圆墩、大直径钢管等圆筒形构件由于具备消减波浪、水流的形状效应优势,在实际工程中广泛应用,圆筒形构件装配方式主要为嵌套型连接,由于涉及到水上或水下施工连接,其施工工艺与一般陆上土木工程装配结构差别较大。对于海洋风电结构,较早应用了预制拼接技术进行基础和上部结构构件拼接,主要为灌浆套筒连接方式,即通过在内外套筒之间的环形空隙中注入灌浆料形成连接刚度,比如风电塔基础钢桩与导管架套管之间的连接、钢管单桩基础与过渡筒的连接,灌浆套筒连接相对于传统连接方式,连接域范围大,消减了应力集中效应,延性、耗能性、耐腐蚀性优异,适应水下快速施工连接<sup>[8-11]</sup>。近海港口工程中,为贯彻工业化和绿色建造理念,负压式基础、承台基础与上部圆筒拼接等装配式结构逐步得到应用。其中,负压式基础与上部筒体组合体系在直立式防波堤结构中有所应用,由于结构稳定、运输条件限制等因素,负压式基础与上部筒体难以一次预制成型、安装,需要进行上筒二次现浇;随着水下灌浆技术的应用发

展,可以考虑在负压式基础结构顶部设置连接杯口,负压式基础首先下沉安装到位,上部筒体再嵌入安装至杯口内,杯口与上筒壁之间空隙进行水下灌浆连接,形成预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构,该结构预制拼接施工方式降低了海上现浇混凝土量,减少了环境污染。承台基础与上部圆筒组合结构体系适宜应用在近海港口栈桥基础中,承台基础、上部圆筒可采用现浇杯口或承插杯口型式<sup>[12]</sup>进行拼接,预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构属于其中常见的承插杯口型式,该类型结构适应水下灌浆连接,在海洋环境中施工不受潮位限制,现浇量少,适应性强。

国内外对于近海土木工程圆形构件拼接研究目前主要集中在海洋风电结构的灌浆套筒连接,在数值模拟<sup>[13]</sup>、受力性能研究<sup>[14-16]</sup>方面也取得了系列成果。但是,预制上筒-基础杯口嵌入型连接与海洋风电结构的套筒连接相比,有显著不同:上筒结构底部与下部基础接触,存在竖向反力;上筒结构为截面尺度大的胖型构件,结构面内变形大,筒壁存在翘曲变形,嵌入连接应力集中和接触复杂。而海洋风电结构灌浆套筒连接中上下结构间不存在竖向接触面,且结构一般为细长型构件,两者受力、变形行为差别较大,相关计算方法无法适用。由于预制上筒-基础杯口嵌入型连接相关研究目前较少,为适应工程技术发展应用需求,本文拟采用理论分析、推导以及数值手段对该类型连接结构受力特性进行研究,相关成果将为近海土木工程装配式结构实践和研究提供有益借鉴。

## 1 结构型式介绍

### 1.1 结构型式介绍

近海土木工程中预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构,主要有预制上筒-负压式基础桶嵌入型连接(图1)、预制上筒(空心墩)-基础承台嵌入型连接

(图2)等结构型式,其中负压式基础桶通过负压安装到泥面以下,形状一般为圆形、椭圆形等,下部基础结构顶设置杯口,预制上筒和杯口之间通过水下灌浆连接。

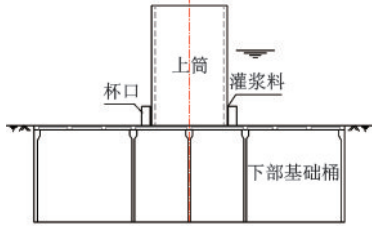


图1 预制上筒-负压式基础桶嵌入型连接

Fig.1 Precast upper cylinder-negative pressure type foundation cylinder with cup type embedded connection

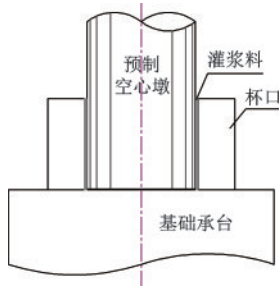


图2 预制上筒(空心墩)-基础承台嵌入型连接

Fig.2 Precast upper cylinder(hollow pier)-platform foundation with cup type embedded connection

### 1.2 连接破坏形式

预制上筒-基础杯口嵌入型连接破坏主要包括连接构件强度不足破坏、灌浆体(GROUT)剪切破坏导致灌浆粘结失效(图3)。构件强度不足问题可通过加强连接配筋或构造解决;由于灌浆体是连接的薄弱环节,且在近海环境波流力作用下,灌浆体容易发生疲劳损伤,灌浆粘结失效是最常见的破坏模式,为确保该不利状态下结构整体稳定安全和可修复性,有必要对粘结失效状态下结构受力机理进行研究。主要通过刚性理论法、有限单元法(FEM)、弹性理论法进行分析研究。

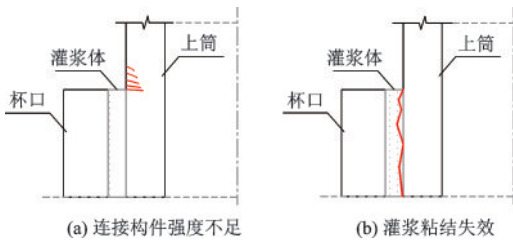


图3 连接破坏形式

Fig.3 Failure mode of connection

## 2 刚性理论计算方法

刚性理论主要假定:(1)预制构件即上筒和杯口为刚性体;(2)灌浆料为弹性体,发生变形并传递接触压力和摩擦力;(3)组合结构符合线性体系。

在刚性假定条件下,不考虑上筒截面变形,在竖向坐标为 $z$ 的某 $x-y$ 平面内,上筒截面沿 $x$ 方向面内位移相同,记为 $\delta(z)$ ,上筒半径为 $R$ ,另定义长度参数 $L, L_i, S, W_i, S$ 及角度参数 $\theta, \theta_i$ 及角度微元 $d\theta$ ,具体如图4所示。

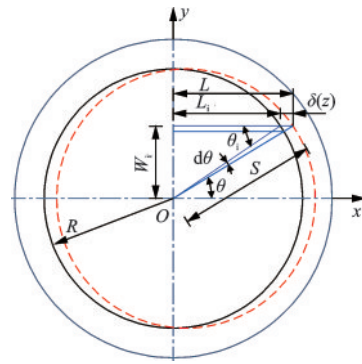


图4 上筒截面计算

Fig.4 Calculation of upper cylinder section

根据图4几何关系,可得到:

$$L_i = R \cos \theta_i \quad (1)$$

$$L = L_i + \delta(z) = R \cos \theta_i + \delta(z) \quad (2)$$

$$W_i = R \sin \theta_i \quad (3)$$

根据三角形正弦公式:

$$R / \sin \theta = \delta(z) / d\theta \quad (4)$$

$$R / \sin \theta = S / \sin(\pi - \theta - d\theta) \quad (5)$$

根据式(5)得到 $S = R \sin(\theta + d\theta) / \sin \theta$ ,则:

$$\Delta R = S - R = R \sin(\theta + d\theta) / \sin \theta - R = R(\cos d\theta + \cos \theta \sin d\theta / \sin \theta - 1) \quad (6)$$

当 $d\theta \rightarrow 0$ 时, $\cos d\theta \rightarrow 1, \sin d\theta \approx d\theta$ ,可得到:

$$\Delta R \approx R \cot \theta d\theta \quad (7)$$

将公式(4)代入式(7)得到:

$$\Delta R \approx \delta(z) \cos \theta \quad (8)$$

对于在坐标 $z=0$ 处位移为零、分布高度为 $h$ 的三角形位移分布模式, $h$ 高度处位移记为 $\delta_0$ ,则:

$$\delta(z) = (\delta_0 / h) z \quad (9)$$

外荷载可分解为力矩 $M$ 和水平力 $P$ ,分别进行力学求解后叠加,分析中考虑上筒底部反力。

## 2.1 力矩 $M$ 作用下结构受力分析

力矩  $M$  作用下结构受力计算模式如图 5 所示, 定义上筒和杯口之间环向空隙灌浆体厚度为  $t_h$ , 上筒底部座浆料厚度为  $t_v$ , 灌浆(座浆)料弹性模量为  $E$ , 筒壁厚度为  $t_b$ , 杯口高度  $h_c = 2h$ ; 上筒侧面压强为  $p_R$ , 底部压强为  $p_z$  (最大压强为  $p_{z,0}$ ), 方向角  $\theta$  处沿高度范围板带摩擦力为  $\bar{f}(\theta)$ ; 上筒杯口高度范围内最大水平变位为  $\delta_h$  ( $z$  位置处为  $\delta(z)$ ), 筒体最大垂直变位为  $\delta_v$ 。

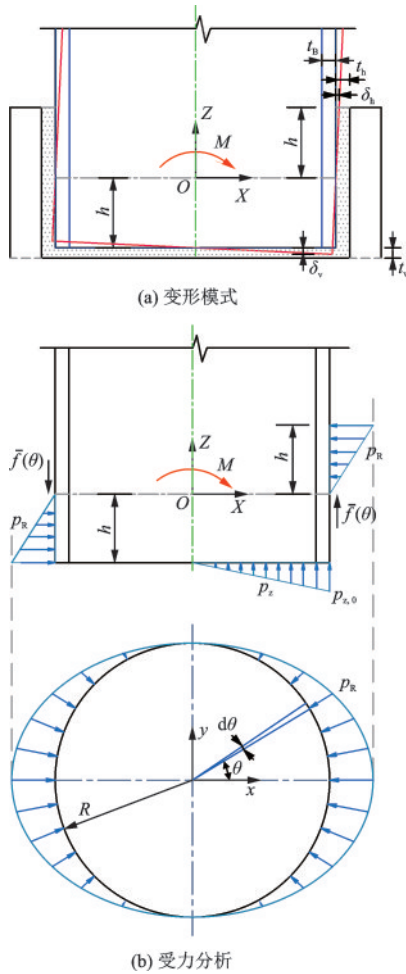


图 5 力矩  $M$  作用下结构受力计算

Fig.5 Stress calculation diagram of structure under moment  $M$

定义  $e_R$  为上筒侧面径向位移反力系数, 则上筒侧面压强:

$$p_R = e_R \Delta R \quad (10)$$

坐标  $z$  处, 单位高度半圆范围内  $x$  方向压力:

$$\bar{p}_x(z) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_R \cos\theta R d\theta = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e_R \Delta R \cos\theta R d\theta =$$

$$e_R R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \delta(z) (\cos\theta)^2 d\theta = \frac{\pi}{2} e_R R \delta(z) \quad (11)$$

则在  $z$  从 0 至  $h$  范围内,  $x$  向压力合力:

$$P_x = \int_0^h \bar{p}_x(z) dz = \int_0^h \frac{\pi}{2} e_R R \delta(z) dz = \int_0^h \frac{\pi}{2} e_R R \frac{\delta_0}{h} z dz = \frac{\pi}{4} e_R R \delta_0 h \quad (12)$$

另外,  $x$  向压力对  $y$  轴的力矩为:

$$M_L^c = \int_0^h \bar{p}_x(z) z dz = \int_0^h \frac{\pi}{2} e_R R \delta(z) z dz = \int_0^h \frac{\pi}{2} e_R R \frac{\delta_0}{h} z^2 dz = \frac{\pi}{6} e_R R \delta_0 h^2 \quad (13)$$

粘结失效面摩擦系数记为  $\mu$ , 接触面微元摩擦力为  $f$ , 方向角  $\theta$  处沿高度范围板带的摩擦力:

$$\begin{aligned} \bar{f}(\theta) &= \int_0^h f dz = \int_0^h \mu p_R dz = \mu \int_0^h e_R \Delta R dz = \\ &= \mu e_R \int_0^h \delta(z) \cos\theta dz = \mu e_R \int_0^h \frac{\delta_0}{h} z \cos\theta dz = \\ &= \frac{1}{2} \mu e_R \delta_0 h \cos\theta \end{aligned} \quad (14)$$

方向角  $\theta$  处宽度  $R d\theta$  板带摩擦力对  $y$  轴力矩为  $\bar{f}(\theta) (R \cos\theta) R d\theta$ , 半圆范围内摩擦力产生总力矩:

$$\begin{aligned} M^f &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \bar{f}(\theta) (R \cos\theta) R d\theta = \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \bar{f}(\theta) R^2 \cos\theta d\theta = \\ &= \frac{1}{2} R^2 \mu e_R \delta_0 h \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2\theta d\theta = \frac{\pi}{4} R^2 \mu e_R \delta_0 h \end{aligned} \quad (15)$$

上筒截面惯性矩  $I_B = \pi R^4 / 4 - \pi (R - t_b)^4 / 4$ , 定义  $e_v$  为筒底竖向位移反力系数, 筒底部受到的压力对  $y$  轴的力矩为:

$$M_B^c = \frac{1}{2} \frac{I_B}{R} p_{z,0} = \frac{1}{2} \frac{I_B}{R} e_v \delta_v \quad (16)$$

根据力矩平衡关系得到:

$$2M_L^c + 2M^f + M_B^c = M \quad (17)$$

根据刚性体转角相同原则, 得到:

$$\delta_v / R = \delta_h / h \quad (18)$$

## 2.2 水平力 $P$ 作用下结构受力分析

水平力  $P$  作用下结构受力计算模式如图 6 所示, 最大水平变位记为  $\delta_P$ , 则  $\delta(z) = \delta_P$ 。

坐标  $z$  处, 单位高度半圆范围内  $x$  方向压力为:

$$\begin{aligned} \bar{p}_x(z) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p_R \cos\theta R d\theta = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e_R \Delta R \cos\theta R d\theta = \\ &= e_R R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \delta_P (\cos\theta)^2 d\theta = \frac{\pi}{2} e_R R \delta_P \end{aligned} \quad (19)$$

则  $x$  方向压力合力值:

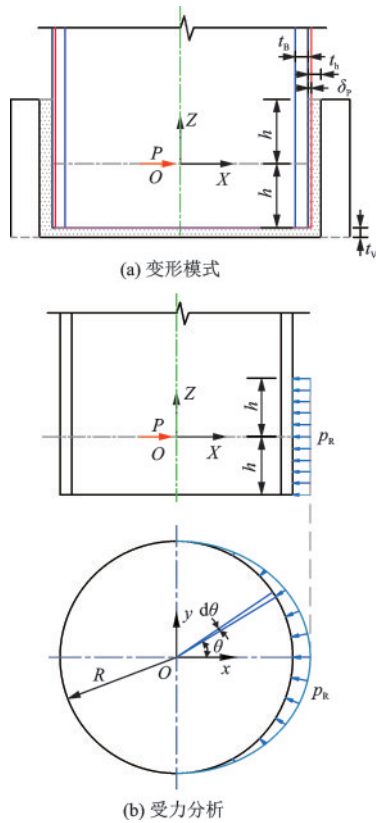


图6 水平力P作用下结构受力计算

Fig.6 Stress calculation diagram of structure under lateral pressure P

$$\bar{p}_x h_c = \pi e_R R h \delta_p = P \quad (20)$$

### 3 有限元分析方法

#### 3.1 计算方法

有限元计算中结构构件设定为弹性材料,嵌入杯口连接力学行为通过接触模型模拟,摩擦力 $f$ 与滑移量 $u$ 关系采用库仑摩擦模型(图7)。

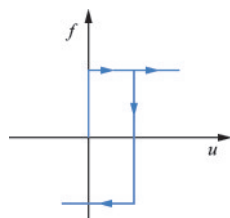


图7 摩擦特性

Fig.7 Diagram of frictional properties

#### 3.2 结构基本尺度

本文研究基于工程实际结构,该结构包括下部基础桶体、上筒(两个),在基础桶体顶板设置杯口

(图8)。结构基本尺度:(1)上筒外径 $D=8.2$  m,高 $H=15.5$  m;(2)基础桶体长 $L_b=36.6$  m,宽 $W_b=20$  m,高 $H_b=11.0$  m;(3)杯口截面宽 $b_c=0.8$  m,高 $h_c=2.0$  m、 $3.0$  m、 $4.0$  m(三种尺度对比);(4)杯口与上筒之间的空隙宽 $t_b=0.1$  m(水下注入高强灌浆料),底部座浆层厚 $t_v=0.02$  m。水平向设计荷载为波浪力,大小约18 860 kN(单组结构)。

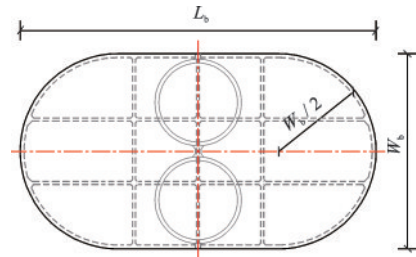


图8 结构平面

Fig.8 Plan sketch of the structure

#### 3.3 有限元计算模型

FEM模型采用三维实体单元(图9),杯口和上筒壁之间设置接触单元。考虑杯口高度 $h_c$ 为2.0 m、3.0 m、4.0 m进行对比分析(局部模型如图10所示)。

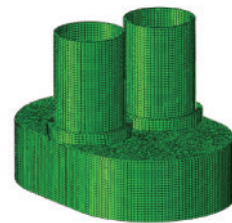


图9 有限元计算模型

Fig.9 FEM calculation model

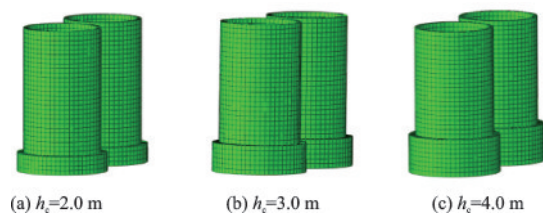


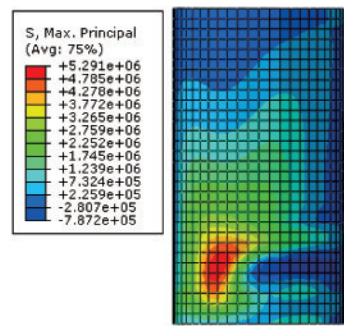
图10 杯口和上筒局部模型

Fig.10 Sub-model: the cup and cylinder

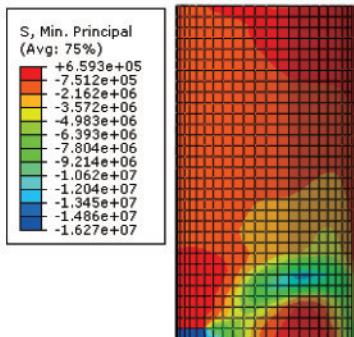
#### 3.4 FEM数值计算结果

这里给出杯口高度 $h_c=3.0$  m时构件计算结果。结构应力计算结果如图11和图12所示。

上筒和杯口之间接触压应力计算结果如图13所示。



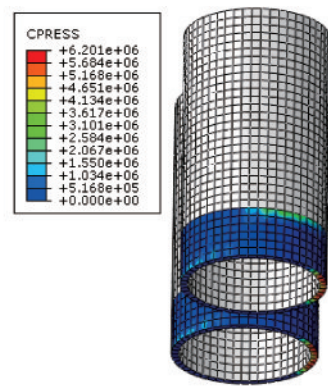
(a) 最大主应力 $S_{max}$  / Pa



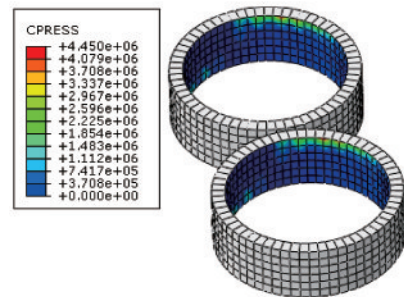
(b) 最小主应力 $S_{min}$  / Pa

图 11 上筒主应力云图

Fig.11 Principal stress of the upper cylinder



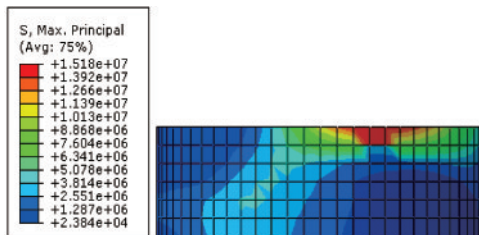
(a) 上筒 / Pa



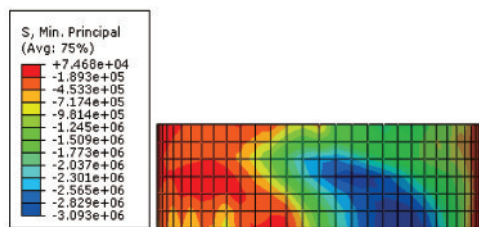
(b) 杯口 / Pa

图 13 接触压应力云图

Fig.13 Contact pressure



(a) 最大主应力 $S_{max}$  / Pa



(b) 最小主应力 $S_{min}$  / Pa

图 12 杯口主应力云图

Fig.12 Principal stress of the cup

杯口与上筒侧壁之间的接触压应力、上筒及杯口结构的变形或变位计算结果见表 1。

若灌浆料部分和预制上筒/杯口粘结可靠,杯口和上筒间相当于固接,此时得到结构变形见表 2。

分析发现,若灌浆料部分和预制上筒/杯口粘

表 1 主要计算结果

Table 1 Summary of calculation results

| 杯口高度<br>$h_c/m$ | 接触压应力/<br>MPa | 上筒最大水平<br>变位/cm | 上筒最大<br>竖向变位/cm | 上筒倾角/<br>$(^\circ)$ | 杯口最大<br>水平变<br>形/cm |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 2.0             | 5.02          | 19.7            | 7.1/-0.22       | 0.46                | 0.31/-0.13          |
| 3.0             | 4.45          | 9.8             | 3.6/-0.17       | 0.23                | 0.31/-0.08          |
| 4.0             | 3.65          | 6.6             | 2.3/-0.15       | 0.13                | 0.36/-0.13          |

表 2 上筒和杯口之间固接时结构变形值

Table 2 Deformation when upper cylinder and cup fixed

| 项 目         | 数 值        |
|-------------|------------|
| 上筒最大水平变形/cm | 1.90       |
| 上筒最大竖向变形/cm | 0.18/-0.19 |

结正常可靠,结构变形较小。若粘结失效,在设计荷载作用下,杯口和上筒之间发生摩擦滑移,上筒位移较大;且对比发现,杯口高度越小,上筒变位越大,当杯口高度在 3.0 m 及以上时,变位大小较为合理。实际工程中,应采用措施确保灌浆材料性能及施工质量,形成杯口和上筒之间的可靠粘结。

## 4 基于弹性变形形态的简化理论计算方法

### 4.1 上筒弹性变形形态

上筒为空间壳体结构,在波浪等水平荷载作用以及特定边限定下,筒壁受到挤压、拉伸、剪切等力学作用,呈现较为复杂的变形行为。对于复杂边界、复杂荷载条件的空间壳体结构,一般可以在理论分析的基础上,结合数值方法进行研究。本文考虑灌浆粘结失效、上筒和杯口之间为接触摩擦传力方式,结合上筒变形形态建立简化理论力学模型。

根据数值分析结果,上筒发生变形后,与杯口之间存在3类接触集中(应力集中)区(图14)。分别为:(1)筒前底端与下桶顶之间接触区1;(2)上筒底前侧面与杯口底侧面之间接触区2;(3)上筒后半区杯口顶位置与杯口顶侧面之间接触区3(1)、3(2)。

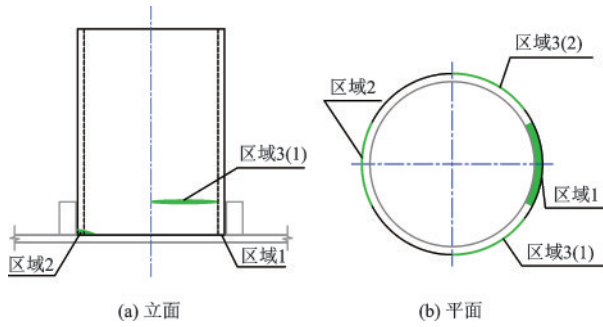


图14 接触集中区分布

Fig.14 Contact areas distribution

### 4.2 简化计算方法

根据前文对上筒和杯口之间3类接触集中区的划分,建立力学简化模型(图15)。假定上筒受到水平荷载 $P$ 作用,作用点距筒底 $L$ ,接触区压力分别为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ (沿 $x$ 方向分力为 $F_{3,x}$ ),竖向接触摩擦力 $V_2$ 、 $V_3$ ,水平接触摩擦力 $H_3$ (沿 $x$ 方向分力为 $H_{3,x}$ ),摩擦系数为 $\mu$ ,接触区3(1)或3(2)范围对应圆心角的一半记为 $\theta_E$ ,上筒直径记为 $D$ 。

根据受力模型图得到力学平衡方程:

$$P + F_2 = 2F_{3,x} + 2H_{3,x} \quad (21)$$

$$PL = V_2 D + 2F_{3,x} h_c + 2H_{3,x} h_c + V_3 D (1 - \sin\theta_E) \quad (22)$$

$$V_2 + V_3 = F_1 \quad (23)$$

$$V_2 = \mu F_2 \quad (24)$$

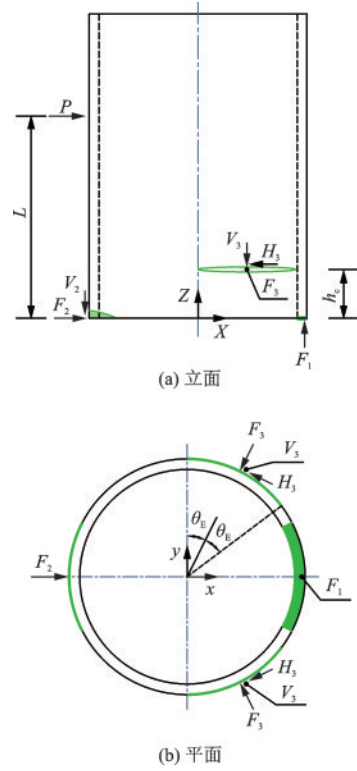


图15 结构受力模型

Fig.15 Structural force-bearing analysis diagram

$$\left( (V_3)^2 + (H_3)^2 \right)^{1/2} = \mu F_3 \quad (25)$$

$$V_3 / H_3 = (D/2)(1 - \sin\theta_E) / h_c \quad (26)$$

另将 $F_{3,x} = F_3 \sin\theta_E$ 、 $H_{3,x} = H_3 \cos\theta_E$ 代入式(21)、(22),可得:

$$P + F_2 = 2F_3 \sin\theta_E + 2H_3 \cos\theta_E \quad (27)$$

$$PL = V_2 D + 2h_c \sin\theta_E F_3 + 2h_c \cos\theta_E H_3 + V_3 D (1 - \sin\theta_E) \quad (28)$$

上式(23)~(28)形成方程组,可对未知量 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $H_3$ 进行求解。

结构接触问题较为复杂,这里基于数值分析确定接触域参数。根据统计分析,接触区长度 $L_c$ 、宽度 $W_c$ 与上筒半径 $R$ 、壁厚 $t_b$ 近似量化关系见表3。

表3 上筒接触范围统计

Table 3 Contact range of upper cylinder

| 编号 | 接触压应力区      | $L_c/R$ | $W_c/t_b$ |
|----|-------------|---------|-----------|
| 1  | 区域1         | 0.85    | 0.50      |
| 2  | 区域2         | 1.50    | 1.50      |
| 3  | 区域3(1)或3(2) | 0.60    | 1.75      |

弹性理论、刚性理论简化计算公式与FEM计算得到接触压应力结果见表4,相对误差如图16所示。弹性理论简化计算方法考虑了结构变形形态,

与FEM分析结果误差较小,其中杯口高度 $h_c=2.0$  m时,平均误差约10%, $h_c$ 为3.0 m、4.0 m时,平均误差约7%、6%,较为接近,误差趋势也验证了杯

口高度取大值时,应力更为均匀。分析结果表明基于弹性变形形态的简化理论公式计算方法的可行性。

表4 接触压应力计算结果  
Table 4 Results of contact pressure

| 接触集中区       | $h_c=2.0$ m |      |      | $h_c=3.0$ m |      |      | $h_c=4.0$ m |      |      |
|-------------|-------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|------|
|             | 弹性理论        | FEM  | 刚性理论 | 弹性理论        | FEM  | 刚性理论 | 弹性理论        | FEM  | 刚性理论 |
| 区域1         | 7.13        | 8.29 | 9.96 | 5.44        | 6.20 | 5.67 | 4.07        | 4.99 | 3.29 |
| 区域2         | 1.90        | 2.58 | 1.78 | 1.45        | 1.53 | 1.79 | 1.09        | 1.12 | 1.41 |
| 区域3(1)或3(2) | 4.12        | 5.02 | 4.70 | 3.70        | 4.45 | 3.74 | 3.36        | 3.65 | 2.87 |

单位:MPa

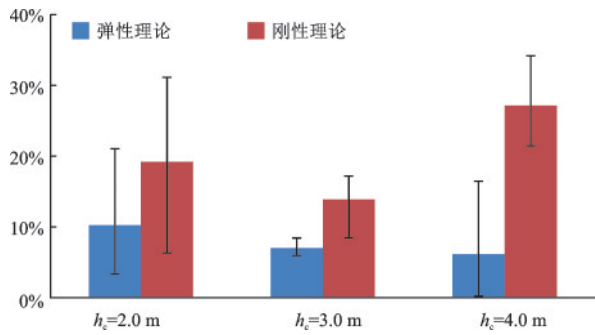


图16 弹性、刚性理论与FEM计算结果相对误差

Fig.16 Error of elasticity or rigidity theory relative to FEM result

## 5 结论

采用刚性理论法、有限元法、弹性理论法对近海土木工程预制上筒-基础杯口嵌入型连接结构进行研究,主要结论如下:

(1)基于工程实例结构对比分析发现,若灌浆粘结可靠,杯口和上筒之间固接时,结构变形较小;若灌浆粘结失效,杯口和上筒之间发生摩擦滑移,位移相对较大,且杯口高度越小,上筒变位越大,当杯口高度在3.0 m及以上时,变位大小较为合理。

(2)基于接触摩擦传力条件、上筒弹性变形形态建立简化理论公式。对比分析发现,相对刚性理论计算公式,弹性理论简化计算公式与FEM结果之间误差较小,验证了公式的适用性。

(3)实际工程设计中,可采用本文方法计算得到相关力学参数,确定连接构件(杯口)尺度,并宜增加抗剪构造设计;施工中应确保灌浆材料性能及施工质量,避免出现粘结失效。

## 参考文献:

- [1] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.  
Wang J, Zhao J D, Hu Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 刘琼,李向民,许清风.预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J].施工技术,2014,43(22):9-14.  
Liu Q, Li X M, Xu Q F. Present research and application of precast concrete structure [J]. Construction Technology, 2014, 43(22): 9-14. (in Chinese)
- [3] 项贻强,竺盛,赵阳.快速施工桥梁的研究进展[J].中国公路学报,2018,31(12):1-27.  
Xiang Y Q, Zhu Sh, Zhao Y. Research and development on accelerated bridge construction technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):1-27. (in Chinese)
- [4] 罗鸣.节段预制拼装桥梁耐久性设计要点研究[J].铁道工程学报,2012,29(2):45-49.  
Luo M. Research on key points of durability design of precast segment assembling bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(2): 45-49. (in Chinese)
- [5] 王景全,王震,高玉峰,等.预制桥墩体系抗震性能研究进展:新材料、新理念、新应用[J].工程力学,2019,36(3):1-23.  
Wang J Q, Wang Zh, Gao Y F, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new applications[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23. (in Chinese)

(本文责编:池营营)

(下转第1294页)