

DOI: 10.11779/CJGE201904014

# 水中沉井下沉期侧壁摩阻力分布试验研究

褚晶磊, 马建林\*, 蒋炳楠, 李孟豪, 张凯

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 以沪通长江大桥主墩沉井为背景, 开展深水大截面沉井模拟下沉试验。通过对整个动态下沉过程的分析, 确定了侧壁有效应力受下沉速率、压力松弛、倾斜、翻砂突沉等因素影响。停止吸泥后, 侧壁有效应力由动态的分布形式转为准静态, 整体呈减小趋势, 表现为极值点的减小和压力松弛区的恢复。沉井侧壁台阶的设置可减小沉井侧壁总摩阻力, 其减小主要来自沉井直壁段。发现阶梯式沉井侧壁受力分为线性区、台阶影响区、过度区和压力松弛区, 建立了基于台阶影响的沉井竖直状态下侧壁摩阻力计算模型, 并结合沪通大桥#29沉井现场监测试验加以验证。沉井倾斜会引起侧壁有效应力分布的改变, 挤土产生的增大土压力可达对应侧主动土压力的3~4倍。

**关键词:** 动态下沉; 侧摩阻力; 垂向分布; 台阶; 倾斜

中图分类号: TU753.64 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)04-0707-10

作者简介: 褚晶磊(1993-), 男, 硕士研究生, 从事深基础理论及应用研究。E-mail: 974189517@qq.com。

## Experimental study on side friction distribution of caissons during sinking in water

CHU Jing-lei, MA Jian-lin, JIANG Bing-nan, LI Meng-hao, ZHANG Kai

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A sinking simulation experiment on a deep and large caisson is carried out based on the main caisson of Shanghai-Nantong Bridge. Through the analysis of the whole dynamic sinking, it is determined that the effective stress on the sidewall is affected by various factors such as sinking rate, pressure relaxation, inclination, sand-casting and sudden sinking. After stopping sand suction, the effective stress of the sidewall changes from a dynamic distribution to a quasi-static one, the overall trend is decreasing and shows the reduction of extreme points and recovery of pressure relaxation zone. The arrangement of the step can reduce the total side friction of the caisson, and the reduction mainly comes from the vertical section of the caisson. It is found that the sidewall of stepped caisson can be divided into linear zone, step zone, excess zone and pressure relaxation zone. A model for calculating the side friction of the caisson in vertical state is established based on the influences of the step and verified by the on-site monitoring tests on No. 29 caisson of Shanghai-Nantong Bridge. The inclination of caisson causes a change in the effective stress distribution of the sidewall, and the increased earth pressure generated by the compaction is 3~4 times the active earth pressure of the corresponding side.

**Key words:** dynamic sinking; side friction; vertical distribution; step; inclination

## 0 引言

中国深水大跨桥梁建设如火如荼, 沉井作为可靠的深基础形式得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。考虑到更大的水深以及更复杂的地质条件, 沉井下沉期间面临难沉、倾斜、翻砂突沉等一系列问题, 如何保证沉井平稳下沉并达到预定深度是其施工的关键<sup>[6]</sup>。深水大截面沉井下沉过程中侧壁摩阻力大小及分布是其结构设计<sup>[7]</sup>以及各种助沉措施选取的重要依据<sup>[8]</sup>。

目前国内外学者对沉井侧壁摩阻力的研究已经取得一系列的成果。模型试验方面, 王建等<sup>[9]</sup>研制了能够直接测量沉井侧壁阻力的微型摩阻力仪, 开展沉井

下沉阻力的模型试验, 研究了沉井下沉时侧壁摩阻力随入土深度的变化特征, 但侧壁数据点有限; 穆保岗等<sup>[10]</sup>设计了3组不同尺寸的沉井模型模拟下沉, 分析沉井下沉期荷载分布特征受施工行为影响, 但所测分布为特定位置随下沉深度变化曲线, 且为干砂环境; 数值模拟方面, 刘青<sup>[11]</sup>通过数值模拟并结合实测数据研究了不同土性和井壁刚度条件下沉井的侧壁土压力

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2013G001-A-2); 国家重点研发计划专项课题(2016YFC2203)

收稿日期: 2018-04-17

\*通讯作者 (E-mail: majianlin01@126.com)

分布情况,但是在模拟砂土中的分布没有实测数据验证;现场监测方面,陈晓平等<sup>[12]</sup>通过对海口某大桥主墩沉井下沉监测,得到了沉井侧壁摩阻力的分布规律,并提出了下沉阻力的计算模型;穆保岗等<sup>[13]</sup>通过对南京长江四桥北锚碇沉井下沉监测,发现沉井侧壁凹槽部位的土压力明显小于凸起部位,设置凹槽可以有效降低侧摩阻力;蒋炳楠<sup>[14]</sup>通过对沪通大桥沉井下沉和接高过程中沉井端部土压力和侧壁土压力的特性进行了分析,并结合沉井施工过程中土压力的特性提出适用于超深大沉井的下沉阻力修正计算方法。

本文开展深水大截面沉井模拟下沉试验,采用了不排水吸泥下沉措施,分析了沉井在动态下沉过程中侧壁有效应力变化规律,讨论了下沉末期侧壁摩阻力分布及倾斜对其影响,并与规范和实际沉井监测数据进行对比分析。

## 1 试验介绍

沪通长江大桥主墩沉井尺寸为  $89.6 \text{ m} \times 58.7 \text{ m} \times 115 \text{ m}$ ,是目前世界规模最大、下沉最深的沉井<sup>[15-17]</sup>。深水大截面沉井模拟下沉试验是以其为原型进行的大型缩尺试验,缩尺比例约为 1:70,模拟沉井的整个动态下沉过程。模型的尺寸如图 1 所示,120 cm  $\times$  90 cm  $\times$  140 cm(高),自重 20 kN,内外井壁两层 5 mm 钢板在刃脚处焊接后作为内外井壁,井壁厚度 10 至 15 cm,两层钢板之间填充砂土,沉井中间设置 82 cm  $\times$  52 cm 的井孔用于取土,侧壁底部设有台阶,台阶高度 30 cm,宽度 4 cm。

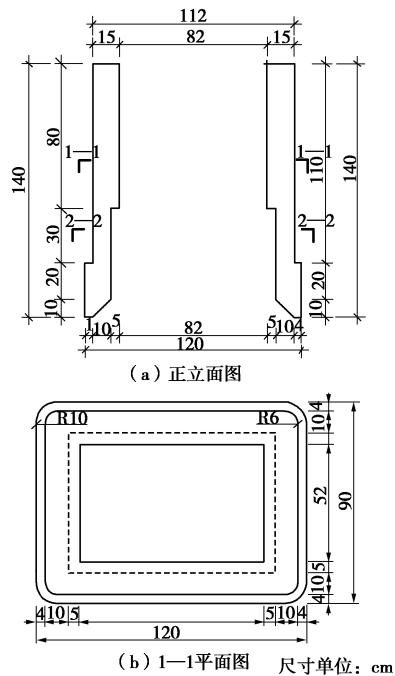


图 1 沉井模型尺寸示意图

Fig. 1 Diagram of caisson model size

沉井外井壁的冲孔直径为 20 mm,嵌入直径为 19 mm 土压力盒和孔隙水压力计,其表面与外井壁平齐,用金属焊接胶黏接,之后在缝隙处涂入中性硅胶作防水处理。传感器导线从沉井内外井壁中间导出至沉井顶部后再沿试验槽接入数据采集箱。沉井侧壁设 6 个截面,每个截面 10 个测点,其中土压力盒 7 个(共 42 个),孔隙水压力 3 个(共 18 个)。以南侧壁与截面 1 处为例,埋设布置及编号如图 2 所示。

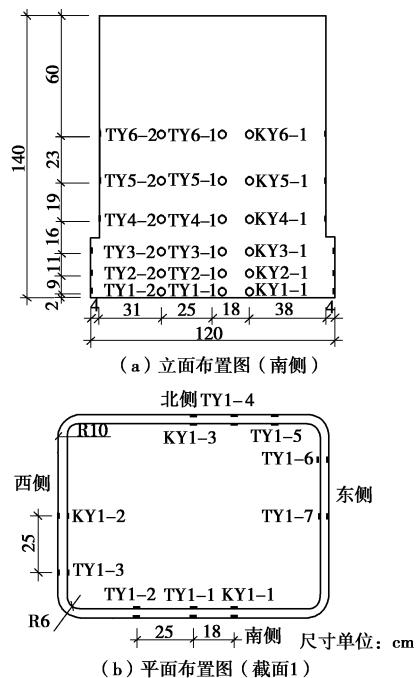


图 2 侧壁仪器布置示意图

Fig. 2 Diagram of instrument layout on sidewall

土压力盒采用 BWX 型应变式土压力传感器,稳定性好,第  $x$  截面( $x$  取 1 至 6)第 a 侧(a 取 1 至 7)的土压力盒编号为  $TYx-a$ ,同理,第  $x$  截面( $x$  取 1 至 6)第 b 侧(b 取 1 至 3)的孔隙压力计编号为  $KYx-b$ ,第  $x$  截面东侧的孔隙水压力通过  $KYx-b$  换算得到。各处的有效应力为该处土压力与孔隙水压力的差值。截面 1, 2, 3 处的土压力盒量程为 50 kPa, 截面 4, 5, 6 处的量程为 30 kPa; 孔隙水压力计的量程均为 50 kPa, 传感器实测值为试验时读数减去初始读数。

试验槽内净尺寸为  $4.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (高),采用壁厚为 1 cm 的钢板拼接而成。槽内先铺设 15 cm 厚的砂垫层,再铺设两层防水布作防水处理,最后分层填土并均匀压实,填土总高度为 2 m。试验砂土各参数如表 1 所示,颗粒级配曲线如图 3 所示,为中粗砂。

测得各传感器初值后,沉井模型预先埋至台阶缩进处,入土约 0.3 m,填土完成后,试验槽内加水至液面高出土体,静置 3 d,使试验砂土充分饱和,期间,试验室内温度变化不大,传感器初值稳定。试验前

加水至土体表面以上 0.1 m。沉井东南角点设置激光位移计测量沉井动态下沉量, 东南两侧顶面中点安置倾角仪, 两者共同确定沉井下沉姿态。在距沉井南侧井壁中点外 10, 20, 35 cm 处设置位移计, 并用支架固定, 用以测量沉井下沉过程中河床面高度变化, 如图 4 所示。

表 1 试验砂土参数

Table 1 Parameters of sand

饱和重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	孔隙比	渗透系数 /(m·s <sup>-1</sup> )	井壁摩 擦系数
19.5	0	41	0.68	$9.7 \times 10^{-4}$	0.5

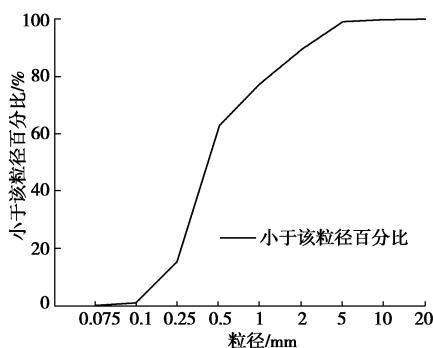


图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve

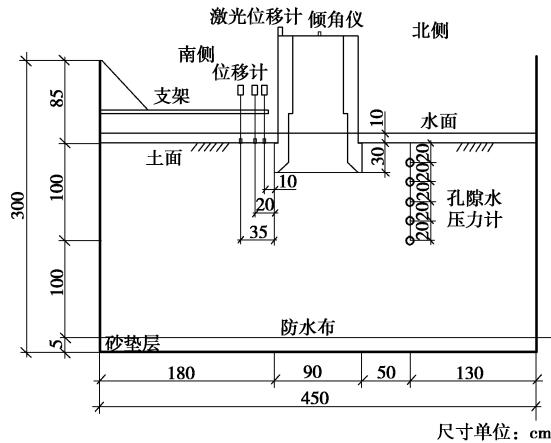


图 4 试验槽示意图

Fig. 4 Diagram of experiment tank

固液循环系统由两台功率 4 kW 的抽砂泵, 两个变频器, 两个容积 1.5 m<sup>3</sup> 水箱, 进出水管 (带阀门) 等组成。1 号抽砂泵从井内抽砂至水箱, 通过水箱滤网滤砂后, 由 2 号抽砂泵将水抽回井内。通过变频器对抽砂泵进行调速控制, 保持沉井内外液面基本相平。试验槽西侧设置框架式操作台, 顶面与填土面相平, 操作人员自身重力将通过操作台传至试验槽底部, 以减小对土体迁移及附加应力的影响。试验整体布置如图 5 所示。

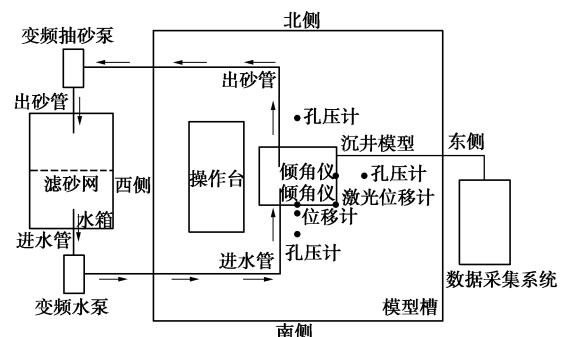


图 5 试验整体示意图

Fig. 5 Diagram of overall experiment

试验开始前, 对抽砂管和进水管进行灌水, 排出空气后关闭阀门, 伸入沉井内液面以下。就位后, 打开阀门并开启抽砂泵, 调节转速, 建立固液循环。观测员于操作台上观测沉井姿态及井内翻砂现象, 操作员通过调节抽砂管的位置控制沉井下沉姿态。沉井因底部的砂土被抽走而逐渐下沉, 直至下沉到预定深度。

## 2 沉井动态下沉过程分析

本次试验分两次吸泥下沉, 第一次下沉共计 1342 s, 下沉量为 53.4 cm, 平均下沉速率为 2.39 cm/min, 第二次下沉共计 1085 s, 下沉量为 19.1 cm, 平均下沉速率为 1.06 cm/min, 两次下沉间隔 1 h 14 min, 累计下沉 72.5 cm。试验中可观察到砂土涌入井内, 此为翻砂现象, 亦可通过吸泥管触感变化感觉到, 但由于翻砂次数较多, 为了保证试验的连续性, 未对翻砂内侧砂面进行测量。

由于数据量较多, 现取截面 1 处的测点, 有效应力随下沉深度的变化如图所示, 因南北倾角及其变化幅度较小, 故对沉井下沉过程分析时可以南北侧测点为主; 而东西倾角较大, 对沉井下沉中姿态影响的分析可以东西侧测点为主。

随着沉井动态下沉, 截面 1 的有效应力整体呈先增大后减小趋势 (图 6)。200~400 s 间, 沉井呈摆动下沉, 有效应力出现震荡, 并在 400 s 处回落, 其中 335 s 时沉井发生突沉, 突沉量为 2.3 cm, 突沉前有效应力迅速上升, 突沉后又迅速下降; 400~500 s 间, 沉井下沉速率由慢速转为快速, 下沉缓慢时有效应力增大, 下沉加快时有效应力减小; 600~850 s 间, 沉井继续下沉, 620 s 时发生局部翻砂, TY1-1 处有效应力迅速回落, TY1-2 处受翻砂影响小, 有效应力则缓慢下降, TY1-5 处则由于翻砂量小, 有效应力稍有回落, 之后又继续上升直至 750 s 时再次发生翻砂, 有效应力迅速回落; 850~1100 s 间, 南侧发生翻砂, TY1-1 与 TY1-2 处有效应力迅速回落, 而在翻砂之前, 有效应力急剧上升, 此次翻砂并未引起突沉; 1200~1342 s, TY1-1, TY1-2, TY1-5 均稳定在 2~4 kPa,

1198 s 后沉井下沉量很小, 第一次下沉基本停止, 应力逐渐趋于稳定; 1600~2100 s 间, 沉井下沉至较深处且下沉缓慢, 沉井南侧刃脚底部由于吸泥取土而脱空, TY1-1 有效应力呈下降趋势并出现负值; 2140 s 时, TY1-2 处局部翻砂, 有效应力迅速回落, 沉井加速下沉, TY1-1 与 TY1-2 有效应力随之急剧上升直至下沉到位(2190 s), 停止吸泥取土后, 应力消散, TY1-1 有效应力为 0 kPa, 沉井该处处于脱空状态, TY1-2 与 TY1-5 有效应力稳定在 3.5 kPa 左右。东侧和西侧有效应力对比发现, 200~800 s 间, 两侧有效应力的增与减、波峰与波谷相互对应, 说明该时间段东西侧有效应力主要受沉井姿态的影响。

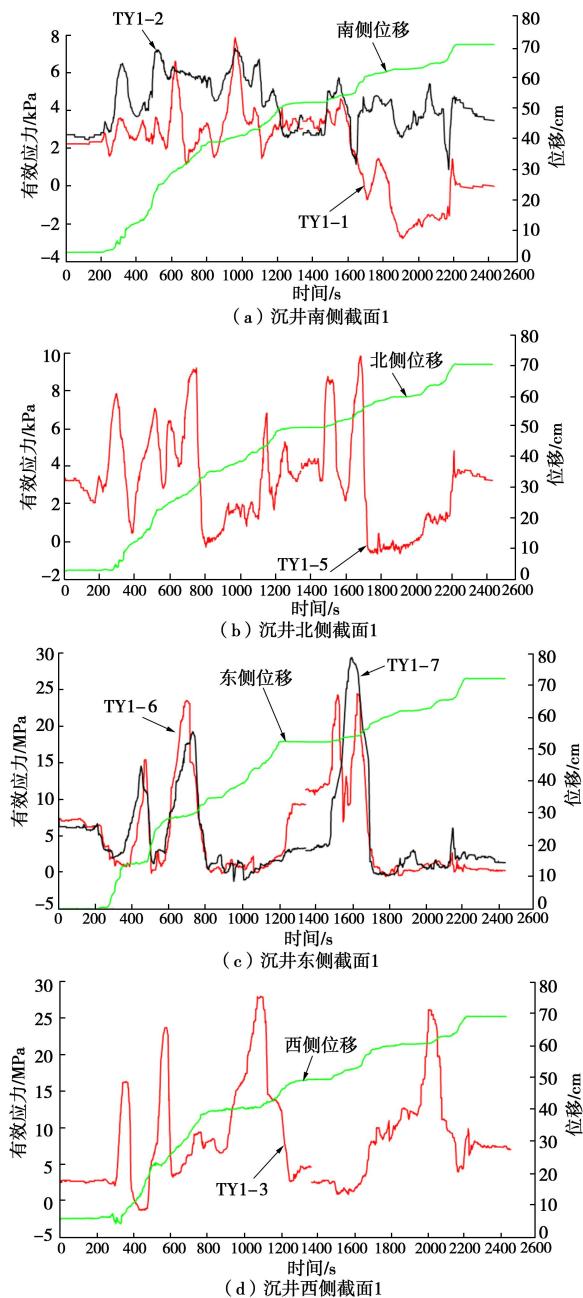


图 6 侧壁有效应力随下沉深度变化(截面 1)

Fig. 6 Change of effective stress on sidewall with depth of sinking (Section 1)

分析以上可知, 沉井在下沉期间侧壁有效应力与下沉速率有关, 下沉速率加快, 有效应力减小, 下沉速率减缓, 有效应力增加; 翻砂和突沉会使侧壁有效应力急剧变化, 表现为翻砂前迅速上升, 翻砂后又迅速下降; 沉井姿态的改变也会引起侧壁有效应力变化; 吸泥取土会造成压力松弛, 使侧壁有效应力的分布形式发生改变, 侧壁底部有效应力整体趋势为先增大后减小。

### 3 沉井侧壁摩阻力竖向分布

由于东西侧存在较大倾斜, 对侧壁摩阻力分布影响较大, 取南北侧进行对比研究。试验第 1198 s 后, 沉井第一次下沉基本停止。通过布置在井外的位移计所测数据, 得出井外河床面高度平均下降约 3 cm。南北两侧有效应力沿沉井侧壁的分布如图 7 所示, 南侧有效应力取 TYx-2 处的值, 北侧有效应力取 TYx-5 的折算值。

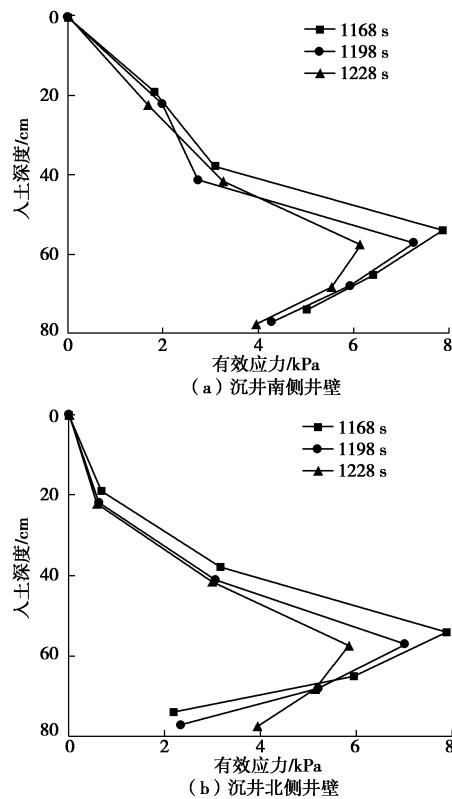


图 7 沉井侧壁有效应力分布图(南北)

Fig. 7 Distribution of effective stress on caisson sidewall (south and north)

试验第 1168 s 对应沉井停止吸泥取土前 30 s, 1198 s 对应沉井停止吸泥取土时, 1228 s 对应沉井停止吸泥取土后 30 s。1168 s 至 1198 s, 沉井处于吸泥下沉末期, 下沉量约 3 cm, 下沉速率 6 cm/min。1198 s 至 1228 s, 沉井停止吸泥取土后逐渐稳定, 下沉量约 0.4

cm。1168 s 至 1228 s, 南北倾角在-1.1° 与-0.9° 之间变动 (向北倾斜为正), 幅度为 0.2°, 由于倾斜角度及变化幅度较小, 井壁对土体的绝对挤压量小, 故其对沉井侧壁有效应力分布的影响较小。

分析图 7, 1198 s 时的侧壁有效应力较 1168 s 时稍有减小, 摩阻力也相应减小, 沉井下沉加快, 与试验现象相符。1198 s 时停止吸泥取土, 下沉速率骤减, 但此时侧壁有效应力分布形式与 1168 s 时相似, 这是由于停止吸泥取土时, 刀脚内侧泥面高度增加, 沉井端部分担的力变大, 这种变化不会立刻传递至侧壁土体, 故侧壁有效应力分布形式不会立刻改变, 即仍保持动态下沉中的分布形式。1228 s 时沉井侧壁有效应力减小, 表现为有效应力极值点的减小以及分布形式的改变, 这是由于 1198 s 至 1228 s 沉井处于刚停止吸泥取土并向稳定状态转变的过程, 没有吸泥等外力因素的影响, 侧壁土体在重力作用下向刃脚底部迁移, 压力松弛效应逐渐恢复, 侧壁有效应力减小, 并从动态的分布形式向准静态分布形式转变。沉井北侧截面 1 处的有效应力在 1168 s 与 1198 s 时约为 2 kPa, 南侧截面 1 处有效应力在 1168 s 时约为 5 kPa, 在 1198 s 时约为 4 kPa, 而两处有效应力在 1228 s 时均恢复至 4 kPa, 这是由于在下沉末期, 吸泥操作产生的南北两侧压力松弛区的大小不同导致两侧截面 1 处有效应力的差异, 但并未产生南北侧倾角大幅变化。

规范<sup>[18]</sup>给出了侧壁摩阻力的经验分布形式, 当侧壁设置有台阶时, 沉井侧壁摩阻力沿井壁外侧的分布形式可按图 8 采用。而试验结果表明, 吸泥取土会造成刃脚内侧土压力小于刃脚外侧, 外侧土体向内侧迁移, 从而形成压力松弛区, 如图 9 所示, 沪通大桥#29 沉井现场监测试验亦得出相同结论, 侧壁摩阻力的整体分布表现为上部小、台阶处大、刃脚处次之。故模型试验中侧壁摩阻力亦会成中间大两边小的形式, 且在台阶缩进处不会发生突变, 与现行规范所建议的分布形式有所不同。

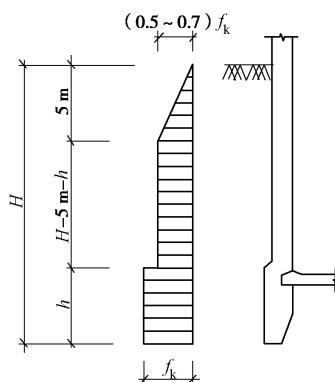


图 8 阶梯式沉井侧摩阻力经验分布

Fig. 8 Empirical distribution of side friction on stepped caisson

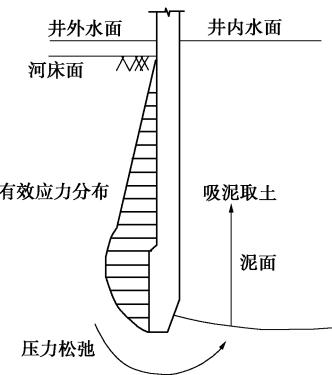


图 9 有效应力分布示意图

Fig. 9 Schematic diagram of distribution of effective stress

为使数据更具代表性, 采用南北侧各截面处的有效应力平均值及表 1 中试验砂土与井壁的摩擦系数, 计算出 1168~1198 s 沉井动态下沉过程中以及 1228 s 沉井处于准静态时各截面处单位摩阻力平均值如表 2 所示, 通过分段 (直线与二次曲线) 拟合并给出沉井处于相应状态下的侧壁摩阻力分布形式, 如图 10 所示。

表 2 沉井侧壁各处摩阻力值

Table 2 Values of side friction of caisson

动态		准静态	
入土深度 /cm	摩阻力 /kPa	入土深度 /cm	摩阻力 /kPa
20.5	0.64	22.4	0.58
39.5	1.50	41.4	1.56
55.5	3.75	57.4	2.99
66.5	2.93	68.4	2.66
75.5	1.72	77.4	1.97

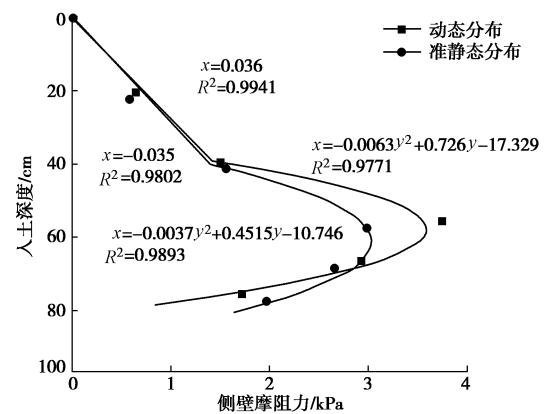


图 10 侧壁摩阻力分布图

Fig. 10 Distribution of side friction

根据上图分布, 假定河床面至截面 4 处为线性分布区, 截面 4 至台阶缩进处为台阶影响区, 台阶缩进处至极值点为过度区, 极值点至侧壁底部为压力松弛影响区。根据图 10, 计算出侧壁各分区的总摩阻力以及平均摩阻力如表 3 所示。

表3 沉井侧壁各分区摩阻力值

Table 3 Values of side friction of each partition

状态	摩阻力	直壁		台阶	
		线性区	台阶影响区	过度区	压力松弛区
	总摩阻力/(N·cm <sup>-1</sup> )	2.81	2.14	3.43	5.26
动态	分担比	0.21	0.16	0.25	0.38
平均摩阻力/kPa	0.71	2.38	3.43	2.63	
平均比	0.08	0.26	0.37	0.29	
	总摩阻力/(N·cm <sup>-1</sup> )	3.00	1.94	2.88	5.16
准静态	分担比	0.23	0.15	0.22	0.40
平均摩阻力/kPa	0.72	2.16	2.88	2.58	
平均比	0.09	0.26	0.34	0.31	

从动态和准静态所处时间点来看,姿态变化很小,可不计入影响。考虑到拟合的相关性和公式的使用简便,侧壁底部至截面4处的沉井侧壁摩阻力分布按二次曲线拟合。根据拟合曲线,沉井侧壁摩阻力极值点出现在距侧壁底部约20 cm处,即约2/3台阶高度处。沉井侧壁摩阻力动态分布与准静态分布对比并结合上表数据,可知,沉井由动态转为准静态后,侧壁摩阻力共计减少4.8%,其中台阶影响区减小9.3%,过度区减小16.0%,压力松弛区减小1.9%,而线性区摩阻力增加6.8%,分布形式也稍有改变,体现为准静态分布过度区的摩阻力分担比下降,压力松弛区的分担比上升,这是由于停止吸泥取土后,压力松弛效应在土体自重作用下逐渐恢复,松弛区内的有效应力最大值缩小,最小值增大,更为均匀。线性区与台阶影响区连接处较动态分布更为平缓,这是由于台阶的设置可以减小沉井下沉时的侧壁摩阻力,而这一作用在沉井处于准静态时发挥减小。准静态分布是一种趋于稳定的分布形式。

图10 动态分布下,沉井入土78.5 cm,台阶占比约0.38,其摩壁阻力分担比为0.63。穆保岗等<sup>[10]</sup>的沉井细观试验中采用无台阶半沉井模型,下沉深度约59 cm,侧压力共计约为23.1 N/cm,河床面以下36.5 cm(占比0.62)段侧压力约为12.4 N/cm,推出摩阻力分担比为0.54。相同占比下,台阶的设置使直壁段摩阻力分担比减小了31%。无台阶沉井平均单位侧壁摩阻力为最大单位摩阻力的0.76,而设置台阶后,该值降至0.51,减小了33%。在最大单位侧壁摩阻力一定的情况下,台阶的设置可减小直壁段的摩阻力,从而减

小侧壁总摩阻力。

综上,本文提出一种基于台阶影响的沉井侧壁摩阻力计算新方法,计算模型如图11所示。

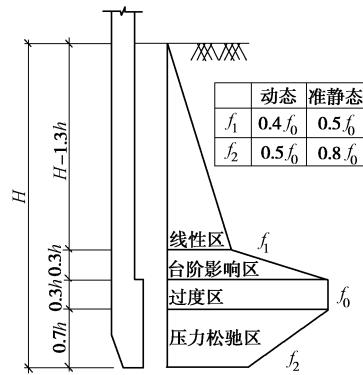


图11 侧壁摩阻力计算示意图

Fig. 11 Calculation diagram of side friction

其中,  $h$ 为台阶高度,  $H$ 为入土深度,  $f_0$ 为过度区平均有效应力,实际工程中建议取相应状态下台阶处所测土压力最大值(扣除孔压),单位面积侧壁摩阻力计算公式下式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{动态: } f = \mu f_0 \text{ 动} (0.2 + 0.775h/H), \\ \text{准静态: } f = \mu f_0 \text{ 静} (0.25 + 0.83h/H). \end{array} \right\} \quad (1)$$

根据沪通大桥#29沉井监测试验结果,拟合出沉井入土深度为40 m时的有效应力分布曲线,如图12所示。

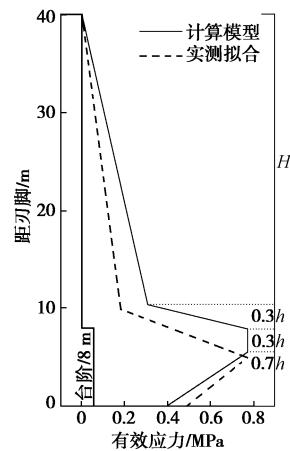


图12 40 m埋深下有效应力分布

Fig. 12 Distribution of effective stress at depth of 40 m

#29沉井侧壁底部压力松弛效应明显,而台阶的设置有效的减小了下沉阻力,本文所提出计算方法的理念与之相符,计算模型亦与现场监测所拟合的曲线接近。

取施工过程中倾斜较小的几个工况,代入本文所提侧摩阻计算方法,台阶高度为8 m,下沉按动态计算,接高按准静态计算,得到以下结果如表4所示,

并与现场监测结果、沉井规范计算值对比如图 13 所示 (表中侧摩阻力均为沉井平均侧摩阻力)。

表 4 沪通大桥#29 沉井侧摩阻计算

Table 4 Calculation of side friction of No. 29 caisson of Shanghai-Nantong Bridge

工况	入土深度/m	测点距刃脚/m	有效应力/MPa	换算 $f_0/kPa$	计算侧摩阻/kPa	实测侧摩阻/kPa	规范取值/kPa
2015-03-18 下沉	15.73	2	0.17	251	74	82	15
2015-05-13 接高	23.89	5	0.34	340	92	106	16
2015-05-18 下沉	24.02	5	0.37	370	85	100	16
2015-05-28 下沉	29.97	5	0.45	450	91	94	16
2015-08-10 接高	31.50	5	0.41	410	94	125	16

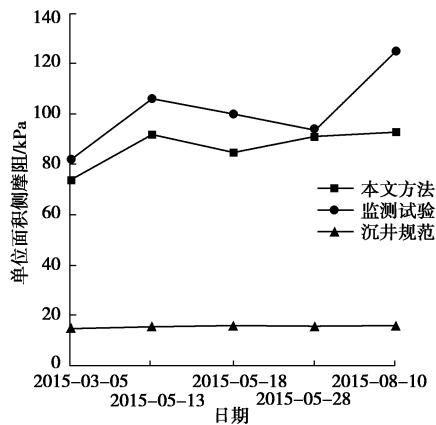


图 13 不同工况下单位侧摩阻力对比图

Fig. 13 Comparison of lateral frictions under different working conditions

计算结果表明, 规范取值与现场实测结果相差太大, 不适用于深水大截面沉井的侧壁摩阻力计算, 而本文提出模型的侧摩阻力分布形式和计算结果均与实测相近, 可为其他同类沉井施工提供参考。

需要指出的是, 该计算模型依据模型试验提出, 使用的砂土土性与沪通大桥现场相近, 对于其他土类暂时未有研究, 且仅适用于沉井处于竖直状态下。

#### 4 倾斜对沉井侧压力影响

本组试验沉井第一次下沉末期, 吸泥取土靠近东侧。1168 s 至 1228 s 沉井始终处于向东倾斜状态, 东西倾角 (向东倾斜为正) 变化如图 14 所示, 平均倾角为  $3^\circ$ 。1168 s 至 1198 s 东西侧倾角从  $2.8^\circ$  增加至  $3.3^\circ$ , 1198 s 至 1228 s 又从  $3.3^\circ$  减小至  $2.6^\circ$ , 即沉井在动态下沉阶段向东倾斜了  $0.5^\circ$ , 而停止吸泥取土后, 沉井向西回正了  $0.7^\circ$ 。

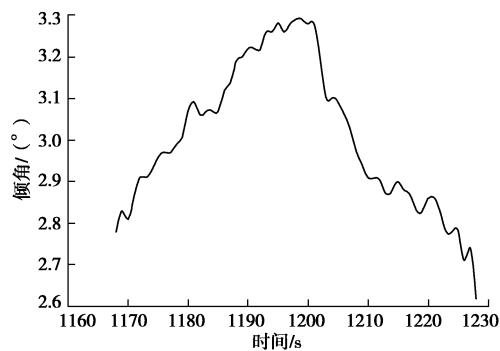


图 14 东西倾角变化图

Fig. 14 Diagram of east-west dip

南北两侧有效应力沿沉井侧壁的分布如图 15 所示, 南侧有效应力取 TYx-3 处的值, 北侧有效应力取 TYx-6 处的值, 两者在空间上的位置相互对应。

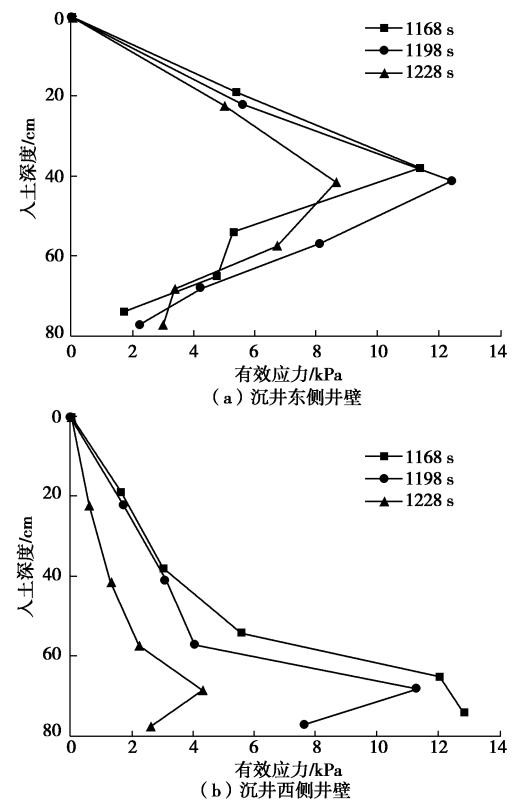


图 15 沉井侧壁有效应力分布图 (东西)

Fig. 15 Distribution of effective stress on caisson sidewall (east and west)

上一节中, 南北倾角及其变化幅度较小, 对沉井侧壁摩阻力的分布影响小, 与图 7 对比, 东侧井壁有效应力呈上部大下部小, 极值点上移至截面 4 处, 西侧井壁有效应力呈上部小下部大, 极值点下移至截面

2处。1168 s时沉井向东倾斜了 $2.8^\circ$ （顶部相对底部偏移6.8 cm），其受力模式如图16所示，沉井东侧壁上部挤压土体形成介于静止土压力与被动土压力之间的增大土压力，而下部有脱离土体的趋势而形成主动土压力，同理，西侧壁下部为增大土压力，上部为主动土压力，故造成了极值点的偏移，截面2处西侧增大土压力为东侧主动土压力的3倍，截面4处东侧增大土压力为西侧主动土压力的4倍。

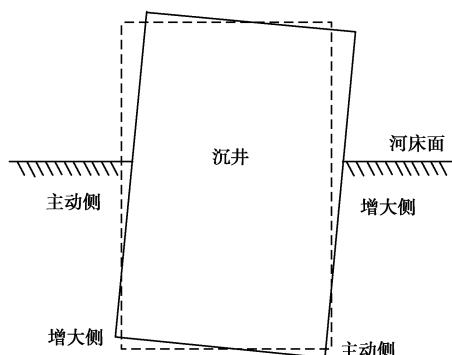


图16 沉井倾斜受力示意图

Fig. 16 Forces on inclined caisson

1168 s至1198 s沉井继续向东倾斜至 $3.3^\circ$ （顶部相对底部偏移8.1 cm），东侧壁上部继续挤压土体，有效应力增大，西侧壁稍有松弛，有效应力减小；由于吸泥取土靠近东侧，沉井东侧压力松弛区较大，截面1处的有效应力较西侧小的多；沉井继续向东倾斜的过程中，由于西侧沉井壁的土体相对地往西侧刃脚底部迁移，西侧壁截面1处有效应力减小幅度较大。1198 s至1228 s沉井停止吸泥取土后，东侧刃脚有效应力会增大，东西侧壁及刃脚有效应力对沉井的合力矩使其向西回正，该过程中，东西侧壁有效应力因松弛而减小，西侧刃脚的有效应力迅速增加，发挥承载作用更大，故西侧壁有效应力减小的幅度较东侧更大。1228 s时沉井处于向东倾斜约 $2.6^\circ$ （顶部相对底部偏移6.4 cm）的准静态位置，沉井东侧壁上部仍为增大土压力，西侧壁上部为主动土压力，两侧下部因土体松弛均为主动土压力。

沪通大桥#29沉井第一次下沉末期侧壁有效应力（距刃脚2 m）变化如图17所示，沉井不同侧高差如图18所示，2015年3月10日，沉井下游低于上游1.15 m，南侧低于北侧0.48 m，上游底部为增大侧，南侧底部为主动侧，实测上游侧土压力为0.39 MPa，南侧土压力为0.29 MPa，实测数据表明，倾斜对沉井侧壁土压力的影响与试验结果一致。

蒋炳楠<sup>[14]</sup>在研究超深大沉井侧壁摩阻力时发现，当沉井埋深为22 m时，倾角为 $0.29^\circ$ （顶部相对底

部偏移0.53 m）时，同截面测点增大侧土压力约为主动侧土压力的2.5倍，当沉井埋深为56 m时，倾角为 $0.46^\circ$ （顶部相对底部偏移0.84 m）时，增大侧约为主动侧的5倍。而本次试验中，沉井向南倾斜约 $1^\circ$ （顶部相对底部偏移2.4 cm）时，南北两侧的有效应力分布形式接近，受倾斜影响很小；沉井向东倾斜约 $3^\circ$ （顶部相对底部偏移7.3 cm）时，东西两侧增大土压力是主动土压力的3~4倍，此时试验沉井倾角约为现场的7倍。这是由于产生增大土压力的实质因素是倾斜引起的绝对挤土位移，从机理上分析倾斜对土压力变化影响时较为复杂，本文仅讨论沉井竖直状态下的计算公式，倾斜下沉井侧摩阻力的计算公式有待进一步研究。虽然室内试验模型较小，埋深较浅，但相同的规律可为以后研究倾斜对沉井侧压力改变的机理积累基础。

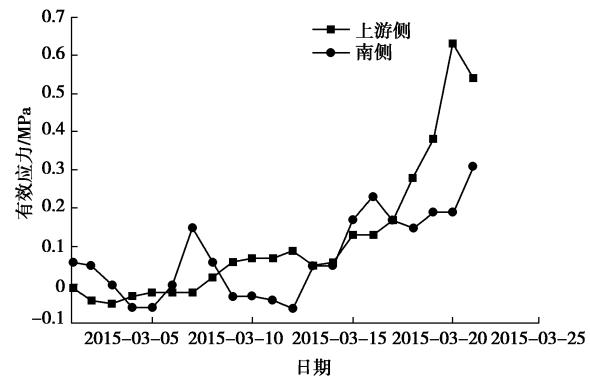


图17 同埋深不同侧土压力对比图

Fig. 17 Comparison of different lateral pressures at same depth

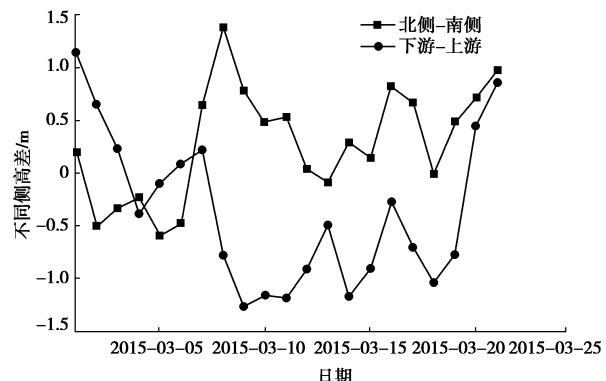


图18 沉井不同侧高差

Fig. 18 Differences of altitudes at different sides of caisson

## 5 结 论

本文通过深水大截面沉井下沉模拟试验，结合沪通大桥#29沉井现场监测结果，分析了沉井在下沉过程中侧壁摩阻力分布及变化规律，得到以下结论：

(1) 侧壁有效应力受下沉速率、压力松弛、倾斜、翻砂突沉、台阶设置等因素影响, 沉井下沉末期, 停止吸泥取土后, 侧壁有效应力由动态的分布形式转为准静态, 动态对应于工程中的下沉, 准静态对应于接高, 具体表现为有效应力极值点减小, 压力松弛区恢复。

(2) 沉井侧壁台阶的设置可减小沉井侧壁总摩阻力, 其减小主要来自沉井直壁段。当台阶高度为入土深度的 0.3 倍时, 侧壁总摩阻力减小约 30%。

(3) 阶梯式沉井侧壁受力可分为线性区、台阶影响区、过度区和压力松弛区, 并根据各分区试验数据建立并验证了基于台阶影响的沉井竖直状态下侧壁摩阻力计算模型。

(4) 沉井动态下沉中, 倾斜会引起侧壁有效应力分布的改变, 沉井上部挤土会使该侧应力极值点上移, 下部挤土会使该侧应力极值点下移, 挤土产生的增大土压力可以达到对应侧主动土压力的 3~4 倍左右。

本文对侧壁摩阻力分布进行了深入研究, 提出的两种状态, 4 个分区以及计算模型对沉井结构设计、施工及助沉措施选取有重要参考意义。试验发现的沉井倾斜对侧壁有效应力的影响与沪通大桥#29 沉井现场监测结果接近, 可为今后沉井倾斜影响机理研究提供依据。

## 参考文献:

- [1] WALEY G, ALLENBY D, KILBURN D. Examples of open caisson sinking in Scotland[J]. Geotechnical Engineering, 2009, **162**(1): 59~70.
- [2] 叶政青, 李珍烈, 张觉生. 沉井[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. (YE Zheng-qing, LI Zhen-lie, ZHANG Jue-sheng. Caissons[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1983. (in Chinese))
- [3] 段良策, 殷 奇. 沉井设计与施工[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006. (DUAN Liang-ce, YIN Qi. Design and construction of caissons[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 张凤祥. 沉井沉箱设计、施工及实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (ZHANG Feng-xiang. Design, construction and examples of caissons and open caissons[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [5] 张 勋, 黄茂松. 砂土中沉井加桩复合基础水平静力及循环模型试验[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 2): 121~124. (ZHANG Xun, HUANG Mao-song. Model tests on a caisson-pile composite foundation in sand subjected to lateral static and cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S2): 121~124. (in Chinese))
- [6] 张 鸿, 刘 鹏, 肖文福. 泰州大桥中塔深水超深巨型沉井施工技术[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 559~563. (ZHANG Hong, LIU Peng, XIAO Wen-fu. Construction technology of super-large deepwater caisson of middle tower of Taizhou Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 559~563. (in Chinese))
- [7] 王 岩. 大型沉井荷载分布模式研究[D]. 南京: 东南大学, 2011. (WANG Yan. Study on load distribution pattern of large caisson[D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in Chinese))
- [8] 冯广胜, 盛 华, 罗瑞华. 城市桥梁超大沉井关键施工技术[J]. 桥梁建设, 2015, **45**(4): 107~112. (FENG Guang-sheng, SHENG Hua, LUO Rui-hua. Key construction techniques for very huge caisson of a city bridge[J]. Bridge Construction, 2015, **45**(4): 107~112. (in Chinese))
- [9] 王 建, 刘 杨, 张 煜. 沉井侧壁摩阻力室内试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 659~666. (WANG Jian, LIU Yang, ZHANG Yu. Model test on sidewall friction of open caisson[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 659~666. (in Chinese))
- [10] 穆保岗, 别 倩, 赵学亮, 等. 沉井下沉期荷载分布特征的细观试验[J]. 中国公路学报, 2014, **27**(9): 49~56. (MU Bao-gang, BIE Qian, ZHAO Xue-liang, et al. Meso-experiment on caisson load distribution characteristics during sinking[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, **27**(9): 49~56. (in Chinese))
- [11] 刘 青. 沉井结构侧壁土压力分布研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010. (LIU Qing. Study for the lateral earth pressure of open caisson structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese))
- [12] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 148~152. (CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 148~152. (in Chinese))
- [13] 穆保岗, 朱建民, 牛亚洲. 南京长江四桥北锚碇沉井监控方案及成果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 269~274. (MU Bao-gang, ZHU Jian-min, NIU Ya-zhou. Monitoring and analysis of north anchorage caisson of Fourth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2011, **33**(2): 269 - 274. (in Chinese))
- [14] 蒋炳楠. 沪通大桥超深大沉井下沉阻力及突沉现场监测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. (JIANG Bing-nan. Resistance and suddenly sinking monitor research of deep and large open caisson of Hutong bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [15] 高宗余. 沪通长江大桥主桥技术特点[J]. 桥梁建设, 2014, **44**(2): 1 - 5. (GAO Zong-yu, Technical characteristics of main bridge of hutong changjiang river bridge[J]. Bridge Construction, 2014, **44**(2): 1 - 5. (in Chinese))
- [16] 徐 力, 高宗余, 梅新咏. 沪通长江大桥公铁合建斜拉桥桥塔基础设计[J]. 桥梁建设, 2015, **45**(3): 7 - 12. (XU Li, GAO Zong-yu, MEI Xin-yong. Design of pylon foundations for rail-cum-road cable-stayed bridge of Hutong Changjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2015, **45**(3): 7 - 12. (in Chinese))
- [17] 李军堂. 沪通长江大桥主航道桥沉井施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2015, **45**(6): 12 - 17. (LI Jun-tang. Key techniques for construction of open caissons of main ship channel bridge of hutong changjiang river bridge[J]. Bridge Construction, 2015, **45**(6): 12 - 17. (in Chinese))
- [18] CECS 137: 2015 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S]. 2015. (CECS 137: 2015 Specification for structural design of reinforced concrete sinking well of water supply and sewage engineering[S]. 2015. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学理论和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex”数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部