



2018 十二届  
**SUPER PILE WORLD**  
国际大口径工程井(桩)  
高峰论坛

时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）



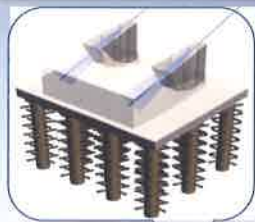
## 演讲嘉宾介绍

殷永高，教授级高级工程师，安徽省交通控股集团有限公司副总工程师，享受国务院特殊津贴专家，安徽省学科带头人，合肥工业大学特聘教授、博导。从事道路与桥梁工程设计、科研以及工程建设相关工作30余年。主要业绩有：合肥至安庆高速公路、涂山淮河大桥、马鞍山长江公路大桥、望东长江公路大桥、池州长江公路大桥。其中马鞍山长江公路大桥相继获得鲁班奖、詹天佑奖以及国际桥梁大会理查德森奖（George S. Richardson Medal）。累计发表学术论文20余篇，撰写专著4部，取得国家及省部级工法5项、专利18项。是根式基础原创技术的发明人，获得安徽省科学技术一等奖1项，二等奖2项；中国公路学会科学技术特等奖2项，一等奖1项。2018年首届安徽省创新争先5位奖章获得者之一。

 安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

## 大直径空心根式桩技术及应用

安徽省交通控股集团有限公司  
二零一八年十月



报告人：殷永高





目录

安徽省交通控股集团有限公司

1. 根式基础简介
2. 根式钻孔空心桩施工工艺
3. 根式钻孔沉管施工工艺
4. 根式沉井施工工艺
5. 工程应用
6. 在海上风电工程中应用探讨

一、根式基础简介

安徽省交通控股集团有限公司

1. 概念

根式基础利用仿生学原理,在传统的桩基础上植入根键形成根式基础,增加桩基的刚度和提高材料利用的效率,以改变桩基的受力特性,充分发挥桩土共同作用,提高基础的承载力。

一、根式基础简介

安徽省交通控股集团有限公司

2. 根式基础的分类

系列根式基础

根式钻孔灌注桩	根式钻孔空心桩	根式钻孔沉管/根式沉井	根式暗礁
直径1.5-3m桩	直径3-6m	直径3-6m/直径6-12m	大尺寸暗礁

二、根式空心桩施工工艺

安徽省交通控股集团有限公司

1. 总体施工流程

二、根式空心桩施工工艺

安徽省交通控股集团有限公司

(a) 护筒打设

护筒采用吊车+振桩锤打设,大直径护筒可采用振桩锤振动小直径护筒带动并字架联动打设大直径钢护筒。

型钢调圆定型 → 小护筒+并字架联动 → 钻孔平台框架限位 → 振桩锤打设就位

二、根式空心桩施工工艺

安徽省交通控股集团有限公司

(b) 钻进成孔

空心桩可采用回旋钻等常规施工工艺成孔。施工时合理控制钻孔顺序,以减小相邻孔位施工扰动的影响,并做好泥浆指标控制,确保施工质量。

钻进成孔      严控泥浆指标      合理安排钻孔顺序





二、根式空心桩施工工艺



(3) 钢筋笼制作与安装

采用高精度全断面定型胎架长线匹配制作大直径钢筋笼，加工精度能满足施工要求。大直径钢筋笼箍筋可分两半制作，内侧采用型钢设加强圈提高钢筋笼的整体刚度。



加强圈及上半圆主筋定位胎模安装



钢筋笼成品

二、根式空心桩施工工艺



(4) 根键顶进

根键采用RMD500-565-2C大直径自平衡顶进装备，实现了单次双根同步顶进，大大提高了顶进的精度和效率。



顶进装置携带根键入孔

二、根式空心桩施工工艺



(5) 内模安装及下放

研发了水下抗高压自浮式内模系统，通过十字撑配合立柱对模板进行定位，内模采用双壁环形封闭结构，自重=浮力，平面分块，约束成圆，具有良好的受力性能，能抵抗超高的水下混凝土径向压力，安拆方便。



内模的安装



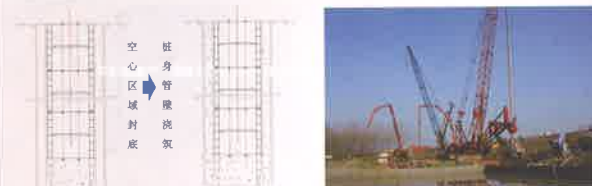
内模的回收

二、根式空心桩施工工艺



(6) 水下混凝土灌注

环形薄壁水下混凝土通过均匀布置的多根导管利用泵车同步泵送供料进行浇筑。浇筑过程中监测混凝土浇筑速度和拔管速度，确保环形薄壁混凝土面整体抬升速度尽可能保持一致，保障混凝土浇筑质量。



三、根式沉管施工工艺



1. 总体施工流程



三、根式沉管施工工艺



(1) 成孔、钢管制作及下沉

根式沉管基础采用常规钻孔灌注桩的“钻埋法”完成超大直径成孔，然后采用常规沉井基础的“预制下沉法”完成钢管下沉。



钻进成孔



钢管制作



钢管下沉



三、根式沉管施工工艺



(4) 管身施工及根键顶进

钢管下放到位后依次进行中心封底施工、外侧壁回填、管身混凝土浇筑, 最后进行根键顶进完成施工。



中心封底 外侧壁回填后管身浇筑 根键顶进

三、根式沉井施工工艺



1. 总体施工流程



三、根式沉井施工工艺



(1) 首节沉井施工及下沉

首节沉井一般高度高、自重较大, 需经计算并适当进行地基处理, 然后靠自重刃脚悬空状态下自由下沉。



三、根式沉井施工工艺



(2) 沉井接高、下沉及封底施工

沉井接高按立内模、绑扎钢筋、预埋根键外钢管及空气幕管道、立外模、混凝土浇筑的顺序进行, 空气幕气逸凹槽的形状采用楔形, 用木架块预留。

沉井封底: 沉井下沉到位后进行刃脚清洗、浇筑封底混凝土。



三、根式沉井施工工艺



(3) 根键顶进及管壁后浇砼施工

采用RMD300-241-1C大直径非对称顶进装备, 实现了超长根键单根顶进。

根键顶进完成后, 现场绑扎钢筋, 及时跟进立模、浇筑后浇管壁砼, 最后完成顶板浇筑。



四、根式基础实用计算方法



$$[R_s] = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i q_{si} + 2m_1 \alpha_1 \sum_{i=1}^n q_{si} \right] + \frac{m_2 \alpha_1}{4} + m_3 h_1 \alpha_1 \sum_{i=1}^n q_{si}$$

$$q_s, q_{si} = m_0 \alpha \left[ f_{cs} + k_2 f_2 (h_i - 3) \right]$$

$$q_{si} = \frac{\left( \frac{f_{cs}}{J} \right)^{1.05} m_0 \alpha}{0.15 n_i + 0.10 m_i + 1.0}$$

主要参数:  
 $h_1$ —根键高度(m);  
 $h_2$ —相邻根键之间距离(m);  
 $f_{cs}$ —柱端、支端和底端土的承载力基本容许值(kPa);  
 $q_{si}$ —与对应的各土层与沉井侧壁的摩擦力标准值;  
 $q_{s_i}$ —与对应的各土层与根键侧面的摩擦力标准值(kPa).







# 2018 第十二届 SUPER PILE WORLD 国际大口径工程并（桩） 高峰论坛

时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）

## 四、根式基础实用计算方法

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

水平承载力计算： $R_h = R_{h0} + R_{hg}$      $R_{hg} = R_{hg1} + R_{hg2} + R_{hg3}$

$$R_{h0} = \frac{E_0 L}{0.95 + 1552D}$$

$$R_{hg1} = \frac{E_0 L}{1.8 + 0.5D}$$

$$R_{hg2} = \frac{E_0 L}{C_1 + C_2 \frac{D}{L}}$$

根桩与水平力作用点距离

根桩与水平力作用点距离

根桩位置与作用力的几何关系

竖向沉降计算： $\begin{Bmatrix} u_i \\ v_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_j \end{Bmatrix}$

水平位移计算： $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \end{bmatrix}$

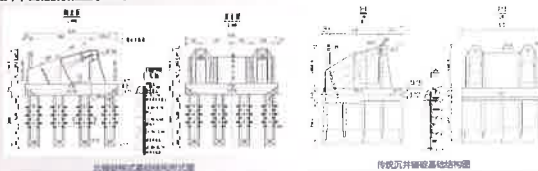
## 五、工程应用

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

### 1. 秋浦河大桥

秋浦河大桥为主跨（98+270）m双塔双跨结合梁悬索桥。北锚碇采用了根式锚碇，由16根5m根式大直径空心桩和45.5m×45.5m×5.5m的承台组成。

传统的设计方案采用45.5m×45.5m×20.5m的沉井基础。高节5米为钢沉井，其余节段为钢筋混凝土沉井，封底混凝土厚5m。



## 五、工程应用

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

### ● 经济性对比

将根式锚碇基础方案与传统的沉井锚碇基础方案进行造价对比，采用根式锚碇基础方案可以节约费用约444万元，仅为沉井基础方案的76%，具有良好的经济效益。

根式锚碇基础和沉井锚碇基础方案造价对比表

方案类型	根式锚碇基础方案	沉井锚碇基础方案
混凝土(m³)	6065.6	10379.75
工程数量		
钢筋(t)	849.5	817.2
钢材(t)	15.2	98.27
造价(万元)	1421	1865

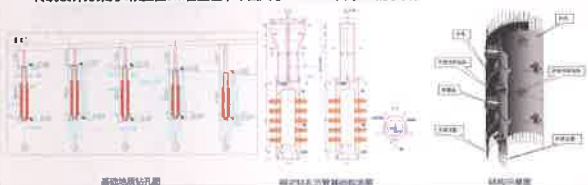
## 五、工程应用

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

### 2. 重东长江公路大桥

重东长江公路大桥江内引桥30#-34#为根式钻孔灌注桩基础，外径5.0m，内径3.2m，壁厚0.90m，长度为43m-59m不等。地质条件及结构尺寸如图：

传统设计方案为4根直径3m普通桩，平面尺寸8m×8m，高2m的承台。



## 五、工程应用

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

### ● 经济性对比

根式钻孔灌注桩基础的合计费用为2616万元，传统方案钻孔灌注桩费用（参照35#-39#墩实际费用计算）合计为3487万元。费用节约871万元，费用节约了25%。

30#-34#根式钻孔灌注桩基础和传统3m钻孔灌注桩基础造价对比表

序号	桩基类型	工程名称	桩径(m)	桩长(m)	材料名称	单位	数量	单价(元)	总价(元)
1	根式锚碇	秋浦河大桥	5.0	128.6	93m钻孔桩	m	1130	16233	18343
2	传统沉井	秋浦河大桥	45.5	20.5	沉井	m	758286	7.71	5846
3	根式锚碇	重东长江大桥	5.0	43-59	光面钢筋	kg	41983	5.99	251
4	传统沉井	重东长江大桥	3.0	2-20	普通钢筋	kg	5623	5.81	326
5	根式锚碇	重东长江大桥	5.0	43-59	声测管	m	4631	31.7	147
6	传统沉井	重东长江大桥	3.0	2-20	钢筋混凝土	m³	869	453.91	394
7	根式锚碇	重东长江大桥	5.0	43-59	承台混凝土	m³	1722	2359.2	4063
8	传统沉井	重东长江大桥	3.0	2-20	承台混凝土	m³	1263	126.3	159
9	根式锚碇	重东长江大桥	5.0	43-59	声测管	m	3040	30.49	92
10	传统沉井	重东长江大桥	3.0	2-20	声测管	m	3040	30.49	92
合计									2616
									3487

## 五、工程应用

安徽省交通控股集团有限公司  
ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

### 3. 小结

- 根式基础在合淮阜高速淮河大桥、马鞍山长江公路大桥、重东长江公路大桥、滁州长江公路大桥、安徽庐江白湖池大道白天庵特大桥、长沙南二环线梅塘湘江大桥等众多工程项目上得到了推广应用，在浙江舟山高速公路项目进行了软土地基中的适用性研究，累计产生经济效益2700余万元。
- 除了在公路交通行业中应用外，根式基础在电力、高铁（桐庐高铁大桥）、港口、海洋风电、高层重载等行业开展了初步应用研究。





# 2018 第十二届 SUPER PILE WORLD 国际大口径工程井(桩) 高峰论坛

时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）

## 五、工程应用



### 3. 小结

- 桩式基础在合淮阜高速公路大桥、马鞍山长江公路大桥、南京长江公路大桥、滁州长江公路大桥、安徽庐江惠远大道白垩天阿特大桥、长沙南北环线跨湘江大桥等众多工程项目上得到了推广应用，在浙江嘉善海盐项目进行了软土地基中的适用性研究，累计已产生经济效益2700余万。
- 除了在公路交通行业中应用外，桩式基础在电力、高铁（铜陵公铁大桥）、港口、海洋风电、高层建筑等行业开展了初步应用研究。



## 六、海上风电工程中应用探讨



### 1. 海洋风电基础的发展

海上风电发展前景良好，海上风电基础造价成本占海上风电场成本的20%-30%，海上风电基础结构优化空间大，传统施工工艺受环境影响大，危险系数高，亟需开发优化的基础结构及施工工艺。

当前阶段国内外海上风电机组基础常用类型包括单桩基础、重力式基础、桩基承台基础、导管架基础等。



## 六、海上风电工程中应用探讨



### 1. 海洋风电基础的发展

海洋风电基础结构施工工法及优缺点分析

序号	基础结构类型	施工工法	优缺点
1	单桩基础	液压打桩锤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 单桩单管桩造价大约1200万左右；</li> <li>• 施工周期短，但需密排设计，则施工难度大，造价高。</li> </ul>
2	重力式基础	大型起重船	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 造价约单桩基础的80%左右；</li> <li>• 自重较大，安装不变，施工工期较长。</li> </ul>
3	多桩承台基础	蒸汽打桩锤/液压打桩锤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建造成本高于单桩基础；</li> <li>• 施工工期长。</li> </ul>
4	导管架基础	蒸汽打桩锤/液压打桩锤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建造成本高于多桩承台基础；</li> <li>• 施工复杂。</li> </ul>

## 六、海上风电工程中应用探讨



### 2. 海洋风电新型桩式基础的研究与设计

结合大连庄河海上风电海域对应地质条件及荷载条件，设计3种新型基础结构形式，具有适用性强、工期短及大幅节约造价等优点。

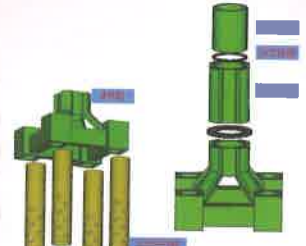


## 六、海上风电工程中应用探讨



### 方案1—支架式桩式沉桩基础

- ▶ A节段由四根直径3m的钢管桩组成，每根钢管桩长22.5m，其中入土段长16m，钢管桩底部13m范围内预留6层根键孔，每层设4个根键孔，展开面成梅花形布置；
- ▶ B节段由桩帽、横梁、斜撑和标准截面段组成，B节段高14m。桩节段为钢结构外壳工厂焊接制造，内设钢板及型钢加劲，斜撑和标准截面段浇筑混凝土成型，下沉施工过程中，B节段桩帽和横梁钢外壳内现场浇筑混凝土成整体节段；
- ▶ C节段为钢管骨架，内置钢筋笼，浇筑混凝土形成整体节段。内筒直径根据风机容量设计与塔柱直径对应，外筒四根空心肋，内筒壁厚约40cm，根肋高约85cm，内筒与根肋轴向等长8m；
- ▶ D节段为钢管骨架，内置钢筋笼，浇筑混凝土形成整体节段。内筒直径根据风机容量设计与塔柱直径对应，内筒壁厚约91cm。

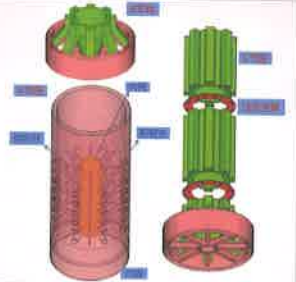


## 六、海上风电工程中应用探讨



### 方案2—大直径变截面桩式沉井

- ▶ 其中，A沉井节段为一外径为13.0m，内径为11.4m的空心环形沉井，井壁厚80cm，内外井壁为12mm厚钢板及纵横、径向加劲型钢组成。A节段高28m，底部并置预置6层根键盒，每层设置8个根键盒。根键盒位置设置内横及对应桁架，以供键顶入时支撑使用。
- ▶ B节段由斜撑、变截面内筒、水平拉杆和外环空心井壁构成。B节段高7m。桩节段为钢结构外壳工厂焊接制造，内设型钢加劲及填充混凝土。斜撑和变截面内筒为浇筑混凝土成型，水平拉杆为型钢构件，外环空心井壁与A节段外环空心井壁构造相同，高3.5m。下沉施工过程中，A/B节段拼装完成后，外环空心井壁灌注混凝土形成整体。
- ▶ C沉井节段为一标准截面段，内筒直径根据风机容量设计与塔柱直径对应，外筒八根空心肋，内筒壁厚约40cm，根肋高约85cm。内筒与根肋轴向等长12.455m。





2018 第十二届  
**SUPER PILE WORLD**  
 国际大口径工程井(桩)  
 高峰论坛

时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）

六、海上风电工程中应用探讨

安徽省交通控股集团有限公司  
 ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

方案3—大直径等截面棍式沉井

- > A沉井节段由内井壁、外井壁、横键及径向连接件组成，为弱结构节段；外井壁直径为7.5m，内井壁直径为5.5m，空心井壁宽1.0m，外井壁轴向长33.0m，内井壁轴向长30.0m，外井壁底部化内井壁长3.0m，顶部由角钢连接加固，形成不停之心刃脚。
- > B沉井节段由外井壁、内井壁及横键组成，内井壁厚约30cm，横键高约70cm，外井壁轴向长3.0m；内井壁及横键轴向长10.41m，外井壁为筒结构，内井壁和横键均为局部高黏土结构。
- > C/C2/C3沉井节段由内井壁和横键组成，内井壁厚约30cm，横键高约70cm，内井壁及横键轴向长9.0m，内井壁和横键均为弱结构土结构。



六、海上风电工程中应用探讨

安徽省交通控股集团有限公司  
 ANHUI TRANSPORTATION HOLDING GROUP CO., LTD.

工期与造价分析

海洋风电桩基基础设计方案工期与造价成本

方案	施工措施	工期	造价成本
方案1	逐段接高+自沉(振动打桩机)+横键插入	约99d	720万
方案2	逐段接高+自沉+横键插入	约16d	910万
方案3	逐段接高+自沉+横键插入	约20d	820万