



2019年
中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活





筒型基础在浅水复杂地质条件海域

应用研究

华电重工股份有限公司 王小合

2019年11月15日



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



0. 项目最新进展

2019年6月18日水利水电规划设

计总院已原则上同意华电及福建水电院

申请的华电福清海坛海峡风电场A区及

B区合适机位优先考虑浅筒基础方案，

6月25日提交补充修改版报告后，下发

正式通知文件。

下一步将进入详图阶段。

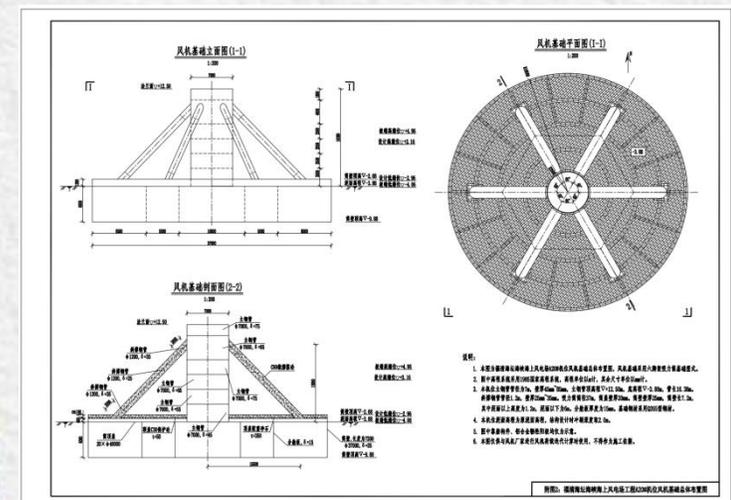
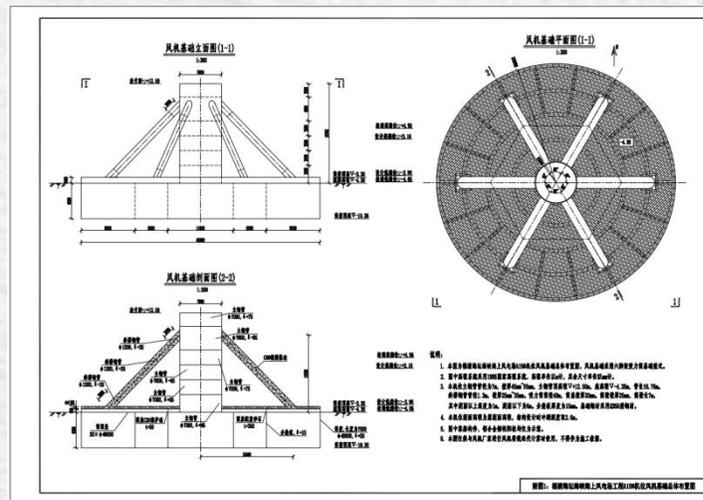
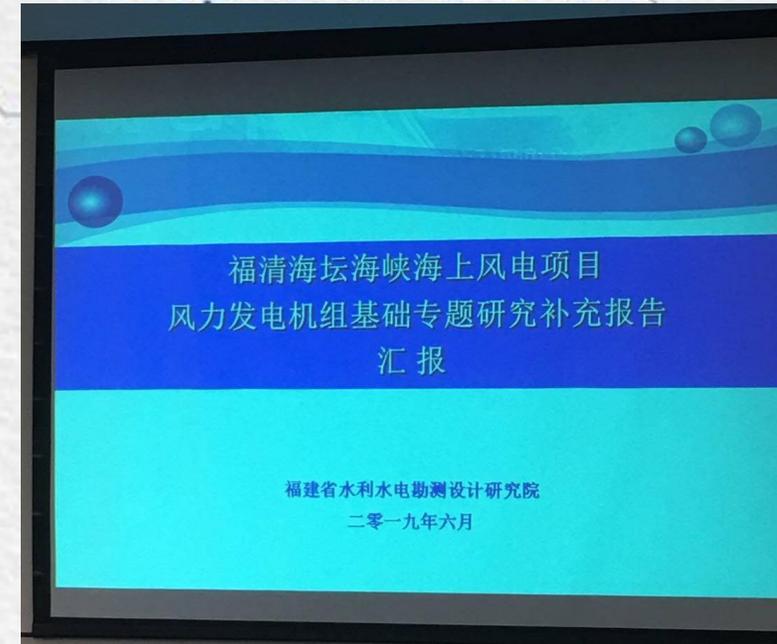
水电水利规划设计总院文件

水电规新〔2019〕101号

关于召开福清海坛海峡海上风电项目风电机组基础专题研究补充报告审查会的通知

各有关单位：

经协商，我院定于2019年6月18日在北京召开评审会议，对福建省水利水电勘测设计研究院编制的《福清海坛海峡海上风电场工程风电机组基础专题研究补充报告》进行技术评审，研究复合筒风电机组基础在本项目的适用性和可行性，届时请你单位派代表参加。邀请单位及代表名额附后。现将有关事项通知如下：



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



1. 项目概况

福清海坛海峡海上风电场工程A区位于福清三山镇塘边村以北浅海养殖区，平均水深**4m~13m**，面积约**16km²**。

设计对象为华电福清海坛海峡海上风电场项目GW154-6700风力发电机组基础结构，该机组的额定功率为**6700kW**，拟定的A区基础顶法兰（也即塔筒底法兰统一高程为**+12.5m**）。

风电场机位水深统计表

表 3.1-1

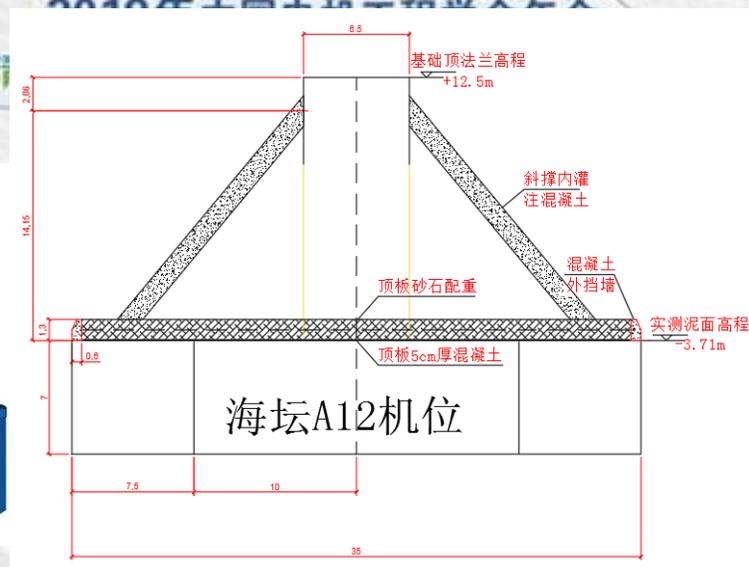
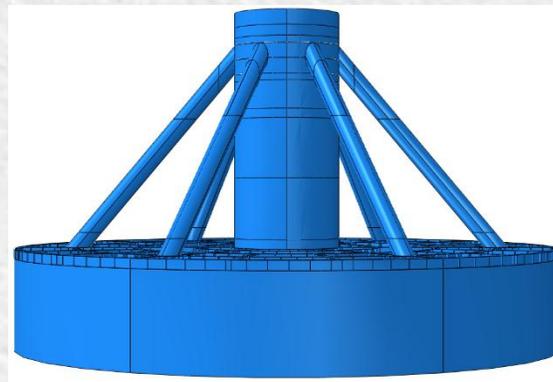
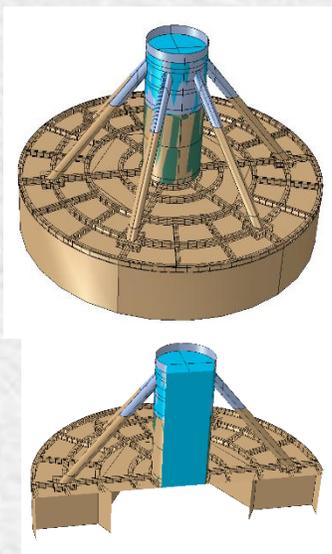
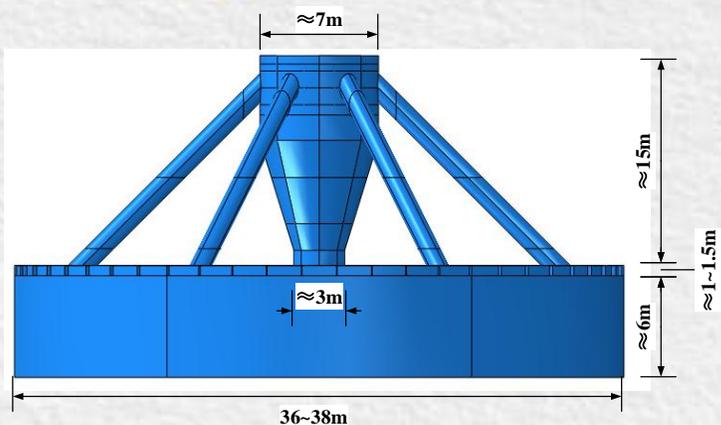
机位编号	可研阶段泥面高程 (m)	实测泥面高程 (m)	机位编号	可研阶段泥面高程 (m)	实测泥面高程 (m)
A01	-4.80	-5.00	B01	-3.60	-3.20
A02	-6.90	-6.30	B02	-4.00	-3.50
A03	-12.30	-10.80	B03	-3.10	-3.70
A04	-10.50	-17.70	B04	-2.20	-3.50
A05	-11.20	-20.60	B05	-2.60	-4.20
A06	-11.30	-17.60	B06	-2.60	-3.90
A07	-12.80	-12.60	B07	-2.60	-4.20
A08	-8.10	-9.50	B08	-2.60	-3.20
A09	-6.90	-6.20	B09	-3.00	-3.60
A10	-5.60	-5.50	B10	-4.40	-3.30
A11	-5.60	-5.20	B11	-3.60	-2.20
A12	-5.10	-4.00	B12	-2.70	-2.50
A13	-5.70	-4.60	B13	-2.70	-2.40
A14	-6.00	-5.20	B14	-2.40	-2.90
A15	-5.90	-5.50	B15	-3.70	-2.50
A16	-6.00	-5.50	B16	-4.30	-2.90
A17	-6.00	-5.50	B17	-4.50	-3.90
A18	-5.50	-5.30	B18	-4.50	-6.50
A19	-4.20	-4.40	B19	-4.80	-2.50
A20	-5.70	-3.90	B20	-6.90	-2.70
A21	-5.00	-5.30	B21	-12.30	-3.70
A22	-4.80	-4.30	B22	-10.50	-2.50
A23	-4.10	-3.70	B23	-11.20	-2.10
A24	-3.50	-3.10	B24	-11.30	-2.30
A25	-4.20	-4.40	B25	-12.80	-2.50
A区平均	-6.71	-7.27	B区平均	-5.16	-3.22
可研阶段工程区机位平均高程 (m)		-5.93	工程区实测机位平均高程 (m)		-5.24

备注：(1) 可研阶段各机位水深为根据风电场8个典型钻孔分析得出的水深。(2) 各机位实测水深为各机位实际钻孔或风电场1:500地形图所得水深。

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



2. 筒型基础结构形式（过程）



A12 机位 D=35m 为例

部位	重量/t	部位	重量/t	部位	重量/t
钢结构	800t~950t	钢结构	850t~1000t	钢结构	850t~1000t
配重	空气中: ≈2500t 水中: ≈1500t	配重	空气中: ≈3000t 水中: ≈2000t	配重	空气中: ≈2500t 水中: ≈1500t

部位	重量/t	
基础钢结构	840	基础重量: 940t
靠船等	100	
斜撑内混凝土	290	基础第一次配重: 590t
斜撑底部混凝土	10.2	
外侧挡板混凝土	160	
顶板 0.05m 混凝土	120	
结构及第一次配重合计重量		1531.4
第二次现场配重砂石料配重		1400t

方案1

新方案2

新方案3

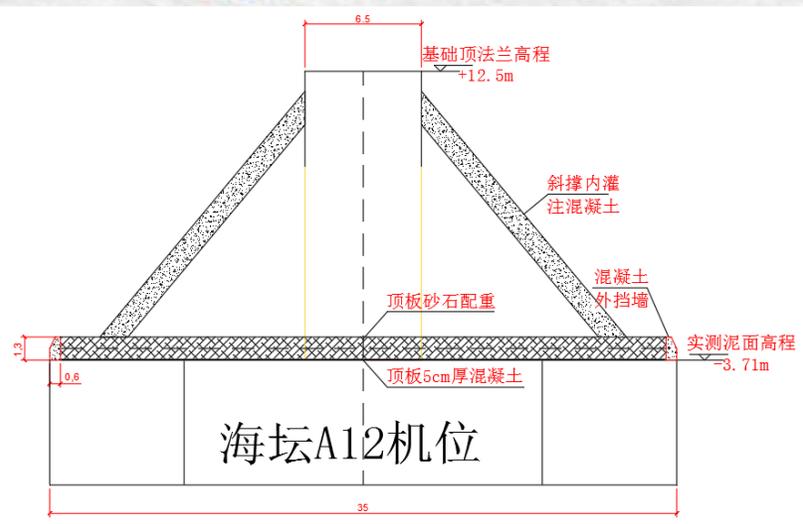
新方案4

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



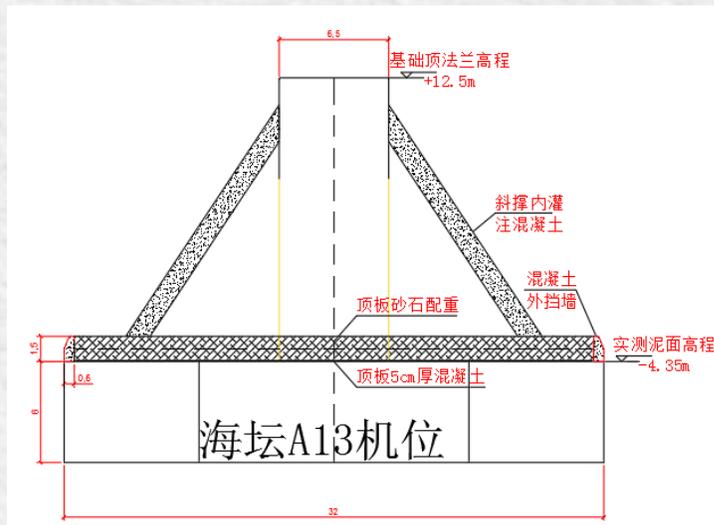
3. 筒型基础结构设计

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



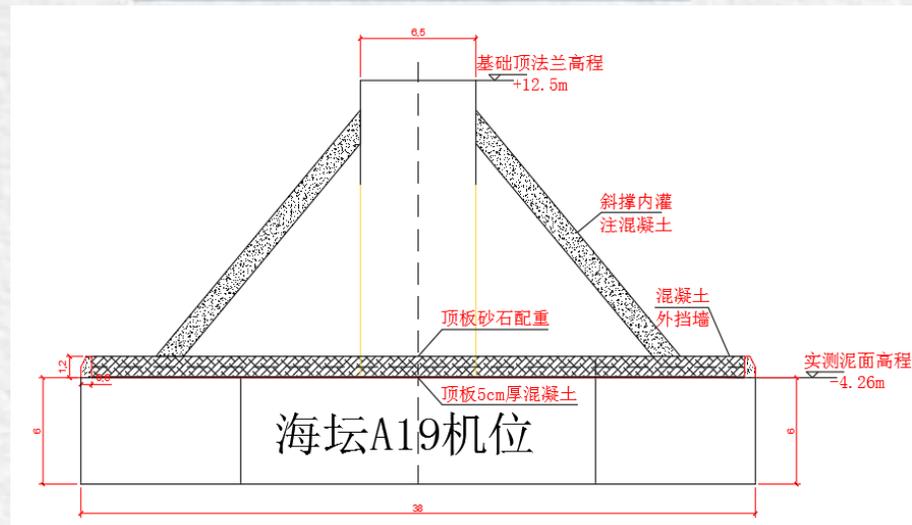
部位	重量/t
钢结构	≈850t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A12机位 (筒径**35m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**7m**)



部位	重量/t
钢结构	≈750t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A13机位 (筒径**32m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**6m**)



部位	重量/t
钢结构	≈890t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

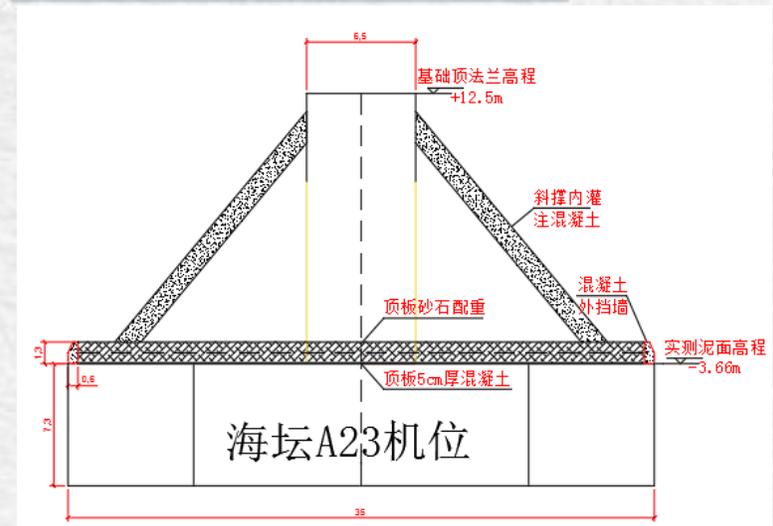
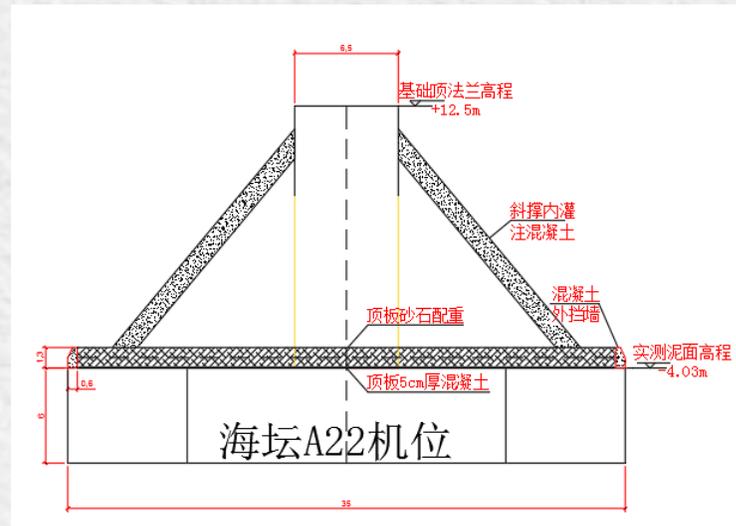
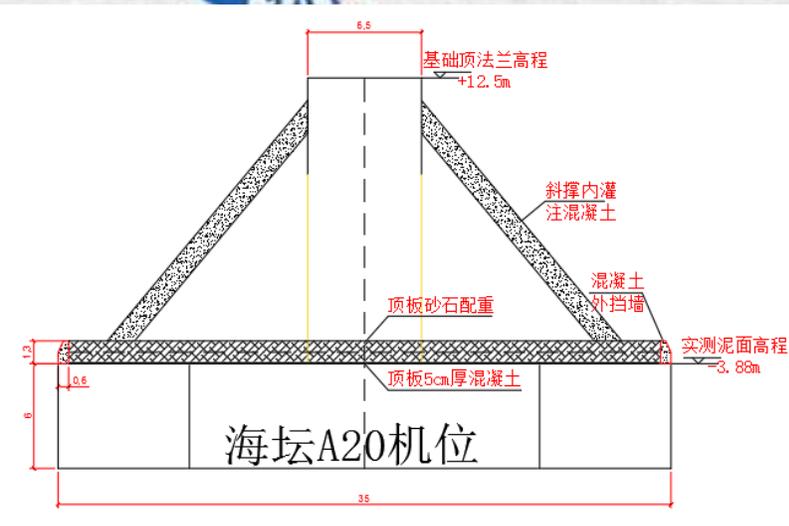
A19机位 (筒径**38m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**6m**)

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



3. 筒型基础结构设计

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



部位	重量/t
钢结构	≈810t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

部位	重量/t
钢结构	≈810t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

部位	重量/t
钢结构	≈840t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A20机位 (筒径**35m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**6m**)

A22机位 (筒径**35m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**6m**)

A23机位 (筒径**35m**)
(分仓板t=15mm, 筒裙高**7.3m**)

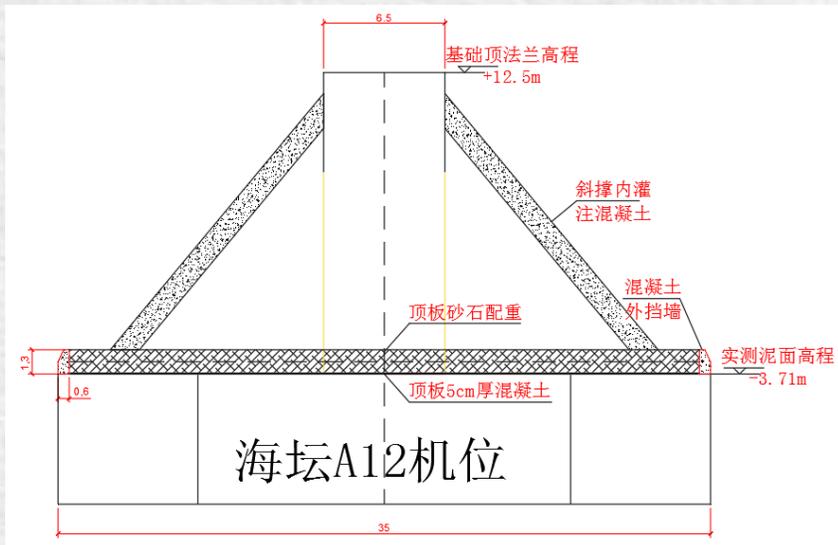
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



3. 筒型基础结构设计 (三种不同筒径 典型机位)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

A12号机位筒型基础钢材用料表



部位	尺寸	体积/m ³	密度t/m ³	重量/t	合计/t
过渡段	高16.21m, 厚度采用渐变形式, 直径为6.5m	17.57	7.85	137.92	846.54
斜支撑	直径1.2m, 中间厚25mm, 上端厚60mm, 下端厚50mm	11.85	7.85	90.02	
钢筒	直径35m, 筒裙高度为7m, 顶盖厚度20mm, 筒裙厚度为25mm, 分舱板的厚度为15mm	51.16	7.85	401.61	
组合钢梁	主梁高0.6m, 宽0.5m, 次梁高0.6m, 宽0.4m, 采用工字钢	27.26	7.85	213.99	

部位	重量/t
钢结构	≈850t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A12机位 (筒径35m)
(分舱板t=15mm)

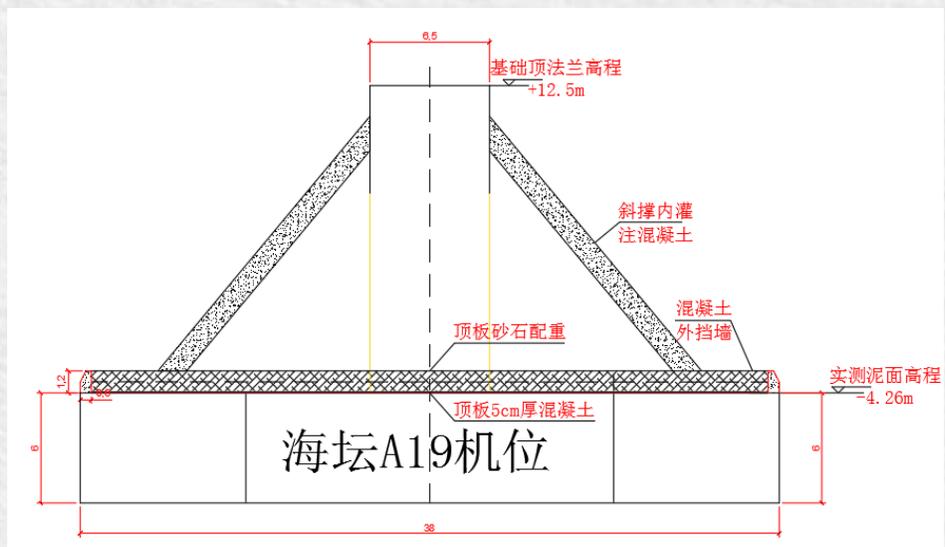


华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



3. 筒型基础结构设计 (三种不同筒径典型机位)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



部位	重量/t
钢结构	≈890t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A19机位 (筒径38m)
(分仓板t=15mm)

A19号机位筒型基础钢材用料表

部位	尺寸	体积/m ³	密度t/m ³	重量/t	合计/t
过渡段	高16.76m, 厚度采用渐变形式, 直径为6.5m	18.25	7.85	143.26	887.04
斜支撑	直径1.2m, 中间厚25mm, 上端厚60mm, 下端厚50mm	11.91	7.85	93.49	
钢筒	直径38m, 筒裙高度为6m, 顶盖厚度20mm, 筒裙厚度为25mm, 分仓板的厚度为15mm	52.64	7.85	413.22	
组合钢梁	主梁高0.6m, 宽0.5m, 次梁高0.6m, 宽0.4m, 采用工字钢	30.20	7.85	237.07	

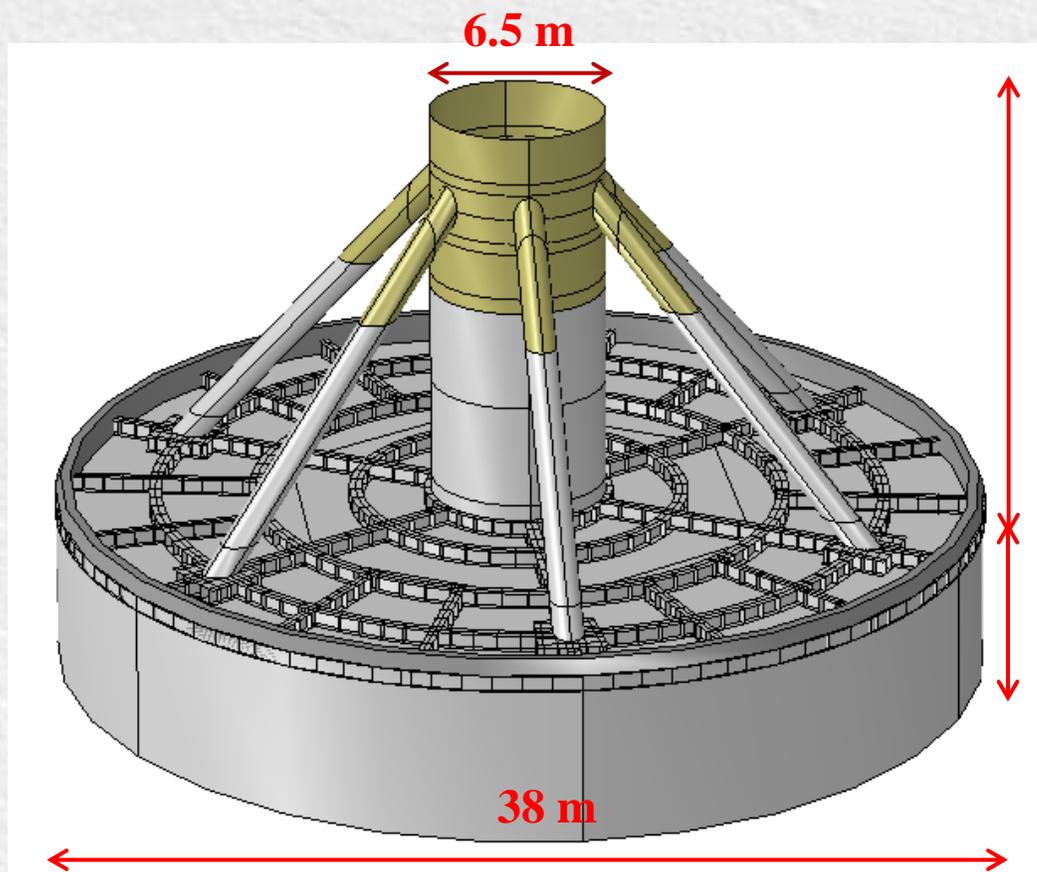


华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

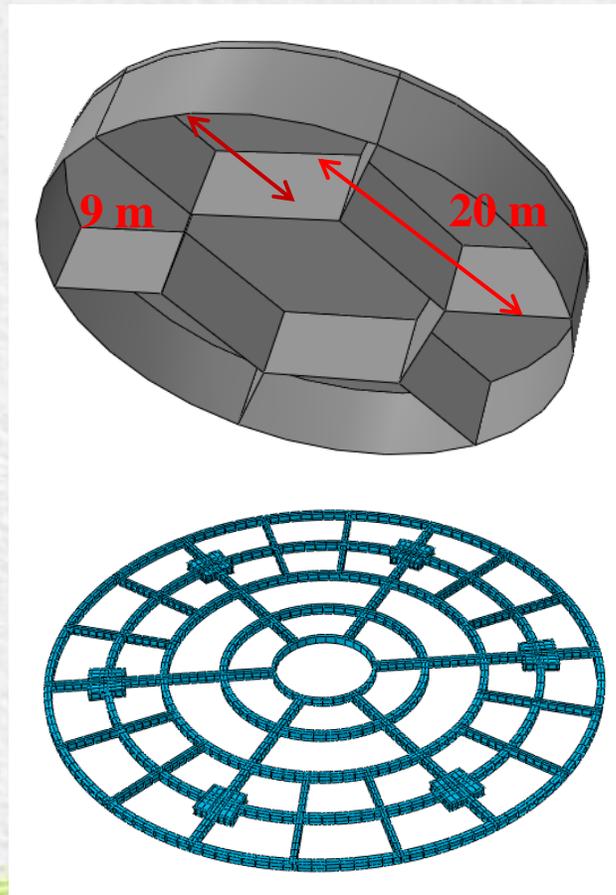


3. 筒型基础结构设计 (三种不同筒径典型机位)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



A19机位基础结构尺寸



组合钢梁

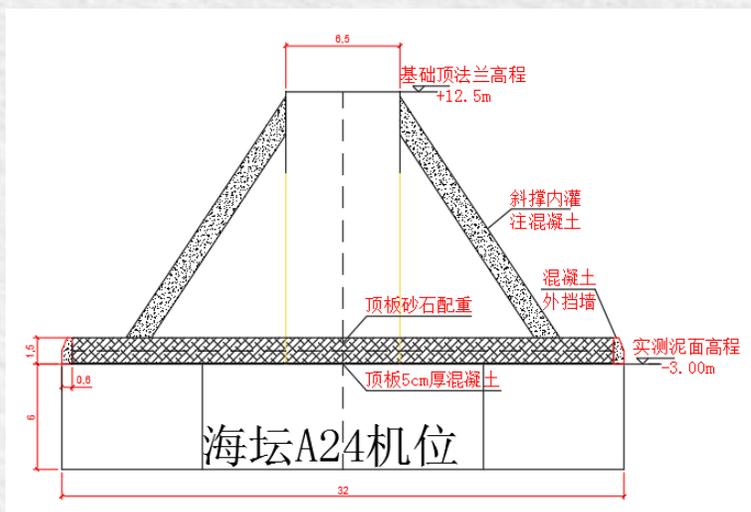


华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



3. 筒型基础结构设计 (三种不同筒径典型机位)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



部位	重量/t
钢结构	≈740t
靠船	≈100t
配重	空气中: ≈2000t 水中: ≈1000t

A24机位 (筒径32m)
(分仓板t=15mm)

A24机位号筒型基础钢材用料表

部位	尺寸	体积/m ³	密度t/m ³	重量/t	合计/t
过渡段	高15.50m, 厚度采用渐变形式, 直径为6.5m	16.78	7.85	131.72	740.17
斜支撑	直径1.2m, 中间厚25mm, 上端厚60mm, 下端厚50mm	11.31	7.85	88.78	
钢筒	直径32m, 筒裙高度为6m, 顶盖厚度20mm, 筒裙厚度为25mm, 分舱板的厚度为15mm	41.31	7.85	324.28	
组合钢梁	主梁高0.6m, 宽0.5m, 次梁高0.6m, 宽0.4m, 采用工字钢	24.89	7.85	195.39	



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会

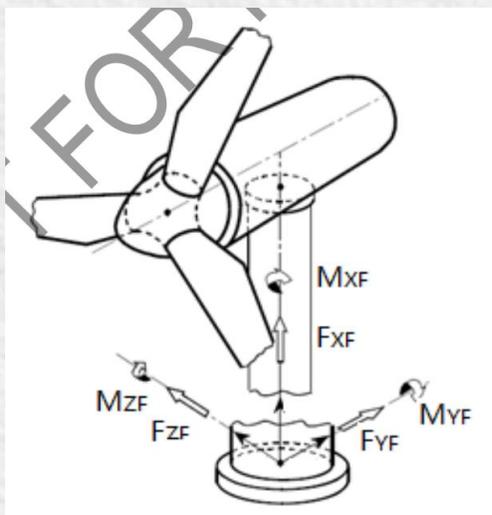
清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.1 上部风机荷载

上部风机荷载参照“金风154/6700直驱机组基础载荷计算报告（高桩承台）”

（LM751P叶片、轮毂高度99m、华电海坛海峡项目）进行取值。

基础坐标系如下图所示，上部结构在极端工况下的荷载情况见下表。



基础坐标系

		极限工况(不含安全系数)									
		塔架法兰									
		Height 12.5m									
		Load Case	Mx kNm	My kNm	Mxy kNm	Mz kNm	Fx kN	Fy kN	Fxy kN	Fz kN	Safety Factor
Mx	Max	62acfax-018	161396	25290	163365	9503	713	-2078	2197	-7113	1
Mx	Min	62astax-008	-161431	-8528	161656	-6447	157	2110	2116	-7210	1
My	Max	22eaaaf+068	10160	134450	134833	-3303	1759	-42	1759	-7241	1
My	Min	62anmax-005	-87283	-124742	152246	-5421	-1406	1138	1809	-7282	1
Mxy	Max	62agfax-006	155292	-70031	170352	5619	-634	-2087	2181	-7279	1
Mxy	Min	23baaax_022	-10	-3	11	26	212	32	214	-7206	1
Mz	Max	22caaaag+083	10250	1807	10408	14380	256	-18	257	-7344	1
Mz	Min	T2eaaax_038	-25046	-4197	25395	-16513	349	388	522	-7115	1
Fx	Max	22eaaaf+068	8803	133243	133533	-3214	1772	-12	1772	-7278	1
Fx	Min	62amlax-006	-51570	-128606	138560	-4553	-1484	631	1613	-7327	1
Fy	Max	62astax-007	-161792	-19179	162925	-5336	20	2098	2098	-7207	1
Fy	Min	62aehax-017	160650	-23937	162424	6954	-5	-2129	2129	-7246	1
Fxy	Max	62acdax-009	163015	11149	163396	7860	517	-2103	2166	-7254	1
Fxy	Min	23caaaax_006	2338	-17849	18002	-6	0	0	0	-7217	1
Fz	Max	71aabbf-103	-18313	29366	34608	-4145	647	214	681	-6707	1
Fz	Min	71aalcd-056	11240	3133	11669	8750	470	-168	499	-7803	1

荷载表

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.2 环境荷载

本风电场离海平面以上100m高度标准空气密度下50年一遇10分钟平均最大风速为**48.4m/s**，极大风速为**67.8m/s**。

根据《华电福清海坛海峡海上风电场海洋水文气象项目海洋水文全潮观测分析报告》中的观测结果，流速按50年一遇重现期取值，其中表层流速取**1.81m/s**，中间层取**1.68m/s**，底层取**1.325m/s**。

其中，基础所承受的风、浪、流荷载利用SACS软件进行建模计算。



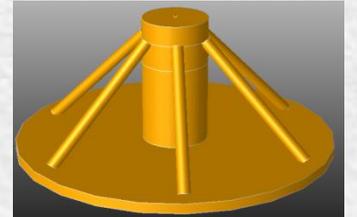
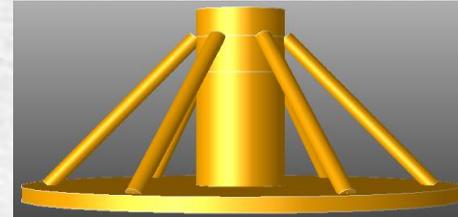
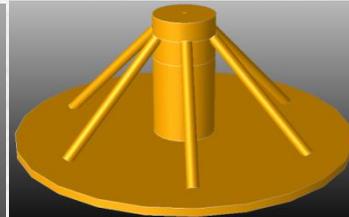
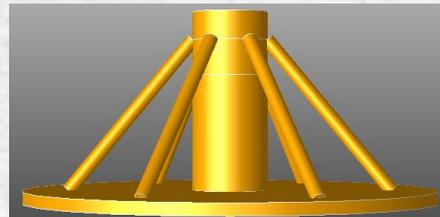
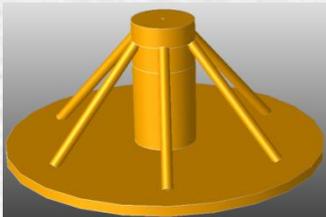
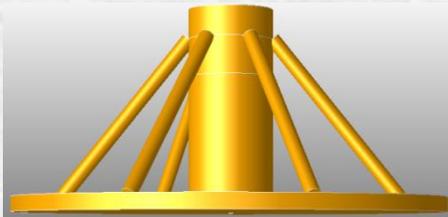
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.2 环境荷载

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



SACS-IU SYSTEM FIXED JOINTS REACTION FORCES AND MOMENTS							
JOINT NUMBER	LOAD CASE	FORCE (X)	KN FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	KN-H MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
0000	SEA	-4646.098	0.000	0.023	0.000	-17953.170	0.000
0001	SEA	-24.301	0.000	-34.513	0.000	-177.456	0.000
0002	SEA	-79.637	21.504	-36.793	-78.117	-468.892	-376.044
0003	SEA	-132.229	-53.916	47.922	342.076	-978.661	-859.245
0004	SEA	-8.571	0.000	78.266	0.000	-294.829	0.000
0005	SEA	-132.229	53.916	47.922	-342.076	-978.661	859.245
0006	SEA	-79.637	-21.504	-36.793	78.117	-468.892	376.044

SACS U81 SELECTseries 3 (v5.6) yaohua DATE 02-AUG-2019 TIME 19:53:41 PST PAGE 5

SACS-IU SYSTEM FIXED JOINTS REACTION FORCES AND MOMENTS							
JOINT NUMBER	LOAD CASE	FORCE (X)	KN FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	KN-H MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
0000	SEA	-4794.503	0.000	0.023	0.000	-18042.551	0.000
0001	SEA	-24.301	0.000	-34.513	0.000	-177.453	0.000
0002	SEA	-79.637	21.504	-36.793	-78.118	-468.891	-376.044
0003	SEA	-132.229	-53.916	47.922	342.077	-978.661	-859.245
0004	SEA	-8.571	0.000	78.266	0.000	-294.827	0.000
0005	SEA	-132.229	53.916	47.922	-342.077	-978.661	859.245
0006	SEA	-79.637	-21.504	-36.793	78.118	-468.891	376.044

SACS U81 SELECTseries 3 (v5.6) yaohua DATE 02-AUG-2019 TIME 19:55:02 PST PAGE 5

SACS-IU SYSTEM FIXED JOINTS REACTION FORCES AND MOMENTS							
JOINT NUMBER	LOAD CASE	FORCE (X)	KN FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	KN-H MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
0000	SEA	-4225.221	0.000	0.023	0.000	-17699.676	0.000
0001	SEA	-24.302	0.000	-34.513	0.000	-177.465	0.000
0002	SEA	-79.637	21.503	-36.793	-78.113	-468.894	-376.045
0003	SEA	-132.230	-53.916	47.922	342.072	-978.664	-859.246
0004	SEA	-8.572	0.000	78.266	0.000	-294.839	0.000
0005	SEA	-132.229	53.916	47.922	-342.072	-978.664	859.246
0006	SEA	-79.637	-21.503	-36.793	78.113	-468.894	376.045

SACS U81 SELECTseries 3 (v5.6) yaohua DATE 02-AUG-2019 TIME 19:40:33 PST PAGE 5

A12机位 (D35) 波流力520.7t ,
作用点距离泥面3.74m ; 波流力对泥面弯矩**19.1MN m**

A19机位 (D38) 波流力535.8t ,
作用点距离泥面3.66m ; 波流力对泥面弯矩**19.2MN m**

A24机位 (D32) 波流力477.7t ,
作用点距离泥面4.03m ; 波流力对泥面弯矩**18.8MN m**



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.3 荷载组合 (以A19机位为例)

极限荷载-标准组合

外部荷载			分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值
竖向力 F_x	kN	-7279	1	1		-7279.000
水平力 F_{yz}	kN	2181	1	1		2181.000
弯矩 M_{yz}	MN m	170.352	1	1		170.352
波流力H	kN	5251.108	1	0.7		3675.776

注：对泥面总的弯矩荷载 $M=220.341$ MN m，水平荷载 $F=5856.776$ kN，竖向荷载 $V=7279$ kN。

极限荷载-结构强度检算荷载

外部荷载			分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值
竖向力 F_x	kN	-7279	1.5	1	1.1	-12010.350
水平力 F_{yz}	kN	2181	1.5	1	1.1	3598.650
弯矩 M_{yz}	MN m	170.352	1.5	1	1.1	281.081
波流力H	kN	5251.108	1.35	0.7	1.1	5458.527

注：对泥面总的弯矩荷载 $M=361.345$ MN m，水平荷载 $F=9057.177$ kN，竖向荷载 $V=12010.35$ kN。

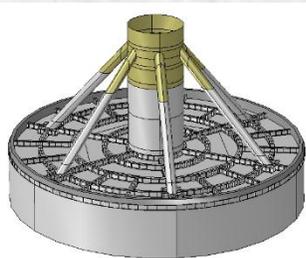


华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.3 荷载组合



海坛6.7MW (A19机位)

(基础结构重约1000t+配重约2000t)

表 3-6 极限荷载-标准组合

外部荷载		分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值	作用点高度
竖向力 Fz	kN	-7279	1	1	-7279.000	16.76
水平力 Fxy	kN	2181	1	1	2181.000	16.76
弯矩 Mxy	MN·m	170.352	1	1	170.352	16.76
波流力 H	kN	4681.829	1	0.7	3675.776	3.655

注: 对泥面总的弯矩荷载 M=220.341MN·m, 水平荷载 F=5856.776kN, 竖向荷载 V=-7279kN。

表 3-7 极限荷载-结构强度检算荷载

外部荷载		分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值	作用点高度
竖向力 Fz	kN	-7279	1.5	1	-12010.350	16.76
水平力 Fxy	kN	2181	1.5	1	3598.650	16.76
弯矩 Mxy	MN·m	170.352	1.5	1	281.081	16.76
波流力 H	kN	4681.829	1.35	0.7	5458.527	3.655

注: 对泥面总的弯矩荷载 M=361.345 MN·m, 水平荷载 F=9057.177kN, 竖向荷载 V=-12010.35 kN。(除波流力外, 作用点高度与法兰面距泥面的高度保持一致, 不同的机位均有所调整)

大丰6.45MW复合筒

(基础结构总重约3600t)

表 2-6 6.45MW 极限工况荷载标准组合值

荷载值			分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值	作用点
上部风机荷载 (金风表 9)	M	MN·m	163.14	1	1	163.14	过渡段顶 (标高 11m)
	H1	kN	1787.47	1	1	1787.47	
	V	kN	-7961.43	1	1	-7961.43	
波浪力 (1%波高)	H2	kN	9219.8	1	0.7	6453.86	泥面以上 9.587m
对泥面荷载	M	MN·m				271.487	
	H	kN				8241.33	

表 2-5 6.45MW 极限工况荷载基本组合值

荷载值			分项系数	组合系数	结构重要性系数	组合值	作用点
上部风机荷载 (金风表 9)	M	MN·m	163.14	1.35	1	242.263	过渡段顶 (标高 11m)
	H1	kN	1787.47	1.35	1	2654.393	
	V	kN	-7961.43	1	1	-11822.7	
波浪力 (1%波高)	H2	kN	9219.8	1.35	0.7	9584.03	泥面以上 9.587m
对泥面荷载	M	MN·m				403.16	
	H	kN				12238.43	

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.4 土质参数 (取值依据)

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.04

土样编号	取土深度	天然状态土的物理性						土粒比重	液塑限试验				渗透系数	标准固结试验			天然快剪试验		固结快剪试验		土的分类 (GB50021-2001) 2009年版
		含水率	密度		孔隙比	孔隙度	饱和度		液限	塑限	塑性指数	液性指数		固结系数	压缩系数	压缩模量	凝聚力	内摩擦角	凝聚力	内摩擦角	
			湿	干																	
			w	ρ											ρ_d	e	n	Sr	Gs	W _L	
m	%	g/cm ³	g/cm ³	-	%	%	-	%	%	-	-	cm ² /s	1/MPa	MPa	KPa	°	KPa	°			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
A19-1-1	8.80-9.00	38.6	1.82	1.31	1.107	52.5	96.2	2.76	38.0	20.5	17.5	1.03	--	2.7×10^{-3}	0.95	2.24	--	--	14.9	11.0	淤泥质粘土
A19-1-2	10.60-10.80	42.9	1.83	1.28	1.148	53.5	100	2.75	37.9	24.0	13.9	1.36	8.8×10^{-8}	1.9×10^{-3}	0.97	2.22	16.6	2.0	--	--	淤泥质粉质粘土
A19-1-3	13.90-14.10	37.2	1.83	1.33	1.068	51.6	95.8	2.75	40.0	20.8	19.2	0.85	--	2.0×10^{-3}	0.92	2.24	16.5	2.5	15.0	10.5	淤泥质粘土
A19-1-4	17.20-17.40	41.0	1.85	1.31	1.099	52.4	100	2.75	39.7	29.6	10.1	1.13	--	2.6×10^{-3}	0.79	2.72	16.6	2.0	14.2	11.1	淤泥质粉质粘土
A19-1-5	20.50-20.70	39.7	1.85	1.32	1.076	51.8	100	2.74	37.0	22.4	14.6	1.18	--	2.0×10^{-3}	0.90	2.32	24.7	3.8	17.7	12.8	淤泥质粉质粘土

福建省闽之星水利水电工程检测有限公司

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.04

土样编号	取土深度	天然状态土的物理性						土粒比重	液塑限试验				渗透系数	标准固结试验			天然快剪试验		固结快剪试验		土的分类 (GB50021-2001) 2009年版
		含水率	密度		孔隙比	孔隙度	饱和度		液限	塑限	塑性指数	液性指数		固结系数	压缩系数	压缩模量	凝聚力	内摩擦角	凝聚力	内摩擦角	
			湿	干																	
			w	ρ											ρ_d	e	n	Sr	Gs	W _L	
m	%	g/cm ³	g/cm ³	-	%	%	-	%	%	-	-	cm/s	cm ² /s	1/MPa	MPa	KPa	°	KPa	°		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
A20-1-1	12.60-13.00	42.8	1.76	1.23	1.244	55.4	95.0	2.76	40.1	24.0	16.1	1.17	2.1×10^{-7}	1.7×10^{-3}	1.29	1.76	18.8	7.1	13.3	14.4	淤泥质粉质粘土
A20-1-2	17.10-17.50	43.8	1.84	1.28	1.164	53.8	100	2.77	38.4	20.9	17.5	1.31	--	7.7×10^{-4}	0.84	2.61	--	--	--	--	淤泥质粘土
A20-1-3	22.40-22.80	41.1	1.84	1.30	1.123	52.9	100	2.76	41.9	24.4	17.5	0.95	--	2.3×10^{-3}	0.61	3.50	--	--	--	--	淤泥质粘土

福建省闽之星水利水电工程检测有限公司

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (取值依据)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.0

土样编号	取土深度 m	颗粒组成									
		粗粒土					细粒土				
		卵石	砾粒	砂粒			粉粒	粘粒			
				粗	中	细					
颗粒大小 (mm)											
		>20	20-5	5-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.075	0.075-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
A20-1-1	12.60-13.00	--	--	--	--	--	7.0	21.3	11.8	7.8	52.1

福建省闽之星水利水电工程检测有限公司

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.04

土样编号	取土深度 m	颗粒组成												不均匀系数	曲率系数	d ₂₀ mm	d ₅₀ mm	土的分类
		粗粒土					细粒土											土名 (GB50021-2001)
		卵石	砾粒	砂粒			粉粒	粘粒										
				粗	中	细												
颗粒大小 (mm)																		
		>60	60-40	40-20	20-5	5-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.075	0.075-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
RSA19-1-1	0.50-0.70	--	--	--	--	4.8	14.8	31.6	44.9	3.9	--	--	--	3.5	0.8	0.118	0.258	中砂
RSA19-1-2	2.30-2.50	--	--	--	--	--	--	3.4	72.4	1.2	7.1	3.0	12.9	47.0	20.0	0.024	0.124	粉砂
RSA19-1-3	5.60-5.80	--	--	--	--	--	3.5	13.1	59.4	6.3	7.2	2.5	8.0	16.2	5.4	0.071	0.121	粉砂

福建省闽之星水利水电工程检测有限公司

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (取值依据)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.04

土样编号	取土深度 m	颗粒组成												不均匀系数	曲率系数	d ₂₀ mm	d ₅₀ mm	土的分类
		粗粒土						细粒土										土名 (GB50021-2001)
		卵石	砾粒	砂粒			粉粒	粘粒										
				粗	中	细												
		颗粒大小 (mm)																
>60	60-40	40-20	20-5	5-2	2-0.5	0.5-0.25	0.25-0.075	0.075-0.05		0.05-0.01	0.01-0.005	<0.005						
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	---	---	mm	mm		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
RSA19-1-4	24.70-24.90	--	--	--	--	--	3.0	11.6	44.0	3.3	8.5	5.8	23.8	42.3	0.3	0.004	0.099	粉砂
RSA19-1-5	27.80-28.00	--	--	--	--	--	0.8	5.4	60.8	2.6	6.7	4.0	19.7	42.7	4.0	0.005	0.110	粉砂
RSA19-1-6	31.40-31.60	--	--	--	--	2.6	1.4	4.3	57.9	3.3	6.8	3.8	19.9	42.3	4.6	0.005	0.108	粉砂
RSA19-1-7	32.30-32.50	--	--	--	--	39.2	22.1	7.4	12.4	3.8	4.3	2.3	8.5	241.4	3.1	0.083	1.140	砾砂
RSA20-1-1	1.10-1.30	--	--	--	--	--	--	2.3	82.9	6.1	3.1	1.1	4.5	1.9	0.8	0.080	0.119	细砂
RSA20-1-2	3.80-4.00	--	--	--	--	2.4	4.5	23.4	54.2	3.5	3.1	1.5	7.4	11.7	3.2	0.084	0.161	粉砂
RSA20-1-3	7.20-7.40	--	--	--	--	3.6	5.1	24.9	43.5	6.1	6.2	2.4	8.2	23.2	4.4	0.072	0.159	粉砂
RSA20-1-4	10.40-10.60	--	--	--	--	--	--	1.1	14.8	32.8	41.0	4.8	5.5	6.2	0.6	0.015	0.048	细粒土

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.4 土质参数 (取值依据)

土的基本性质试验成果总表

工程名称:福清海坛海峡海上风电场工程
委托单位:福建省水利水电勘测设计研究院

工程编号: T-201830
报告日期: 2018.09.04

土样编号	取土深度 m	三轴剪切试验 (100 KPa、200 KPa、300 KPa)		$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}/2$ 应变 ϵ_{50} 平均值
		不固结不排水剪(UU)		
		凝聚力	内摩擦角	
		C KPa	Φ °	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
A8-5-1-1	5.50-5.90	12.9	2.1	3.00
A8-5-2-1	7.60-8.00	11.8	1.6	2.08
A12-1-3	13.30-13.70	19.0	3.0	2.50
A12-1-4	15.10-15.50	15.4	2.1	4.58
A12-1-5	20.10-20.50	18.4	3.2	3.13
A20-1-2	17.10-17.50	20.9	2.0	2.50
A20-1-3	22.40-22.80	20.5	3.1	3.90
A22-1-2	29.00-29.40	24.8	2.3	4.19
A22-1-3	31.80-32.20	11.7	2.9	3.25
A22-1-4	37.15-37.55	9.9	4.2	3.00

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (取值依据)

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

附件 1: 主要岩土层物理力学指标建议值

土名	湿容重 ρ	压缩模量 E _{s0.1-0.2}	承载力特征值 f _s	快剪		预制桩 (钢管桩)				钻孔灌注桩				抗拔系数 λ	饱和单轴抗压强度 fr
				凝聚力 C _q	内摩擦角 φ _q	桩的极限侧阻力标准值 q _{sk}	桩的极限端阻力标准值 q _{pk}	水平抗力系数的比例系数 m 值		桩的极限侧阻力标准值 q _{sk}	桩的极限端阻力标准值 q _{pk}	水平抗力系数的比例系数 m 值			
								m	相应水平位移			m	相应水平位移		
①含淤泥质粉土砂	18.5	3.5	100-120	13-15	11-13	24-28		4.5	10	16-22		5.5	8	0.6	
①-1 含砂淤泥	18	2.5	40-50	8-10	3-4	14-18		4.0	10	12-14		5.0	8	0.6	
②(含泥)粉细砂	18.0	6.0	120-130		22-23	28-35		6.0	10	25-35		14	5	0.5	
②-1 中粗砂	18.7	7.0	140-150		22-25	30-45		8	10	28-40		15	5	0.5	
③淤泥质粉质粘土	18.0	2.5	70-100	12-16	3.0	24-26		4.5	10	20-24		4.0	8	0.6	
③-1 粉质粘土夹薄层粉细砂	19.0	4.5	100-120	21-24	15-16	24-26		4.5	10	20-24		4.0	8	0.6	
③-2 粉质粘土	19.5	5.5	180-200	24-26	12-14	65-75		8.0	10	64-70		18	4	0.7	
④含砾中(细)砂	19.0	7.0	150-190		22-25	55-65		8.0	10	54-63		18	4	0.5	
④-1 粉土	19.4	4.5	130-140	23-26	15-16	28-32		6.0	10	25-30		14	5	0.6	
④-2 含砾中粗砂	19.0	7.0	220-280		25-27	75-80		18	10	73-76		50	4	0.5	
④-3 砂质粉质粘土	19.0	5.0	160-170	10-14	12-15	55-65		6.0	10	53-60		14	4	0.6	
⑤粉细砂	18.5	7.0	150-180		22-24	48-55		8	10	46-50		18	4	0.5	
⑤砾砂	18.7	7.0	160-180		25-27	70-80		12	10	60-70		50	3	0.5	
⑥-1 粘土	19.0	7.0	180-210	20-22	16-19	65-75		8	10	60-70		15	4	0.7	
⑥-2 淤泥	18	2.5	40-50	8-10	3-4	14-18		4.0	10	12-14		5.0	8	0.6	
⑦含砾中(粗)砂	19.0	7.0	150-180		25-27	60-65		12	10	60-70		50	3	0.5	
⑦-1 残积土	19.0	4.0	200-220	22-26	15-17	70-80		8	10	68-78		15	4	0.6	
⑧a-0 全风化花岗岩	19.5	5.5	220-250	23-27	15-17	140-160	5000-6000	12	10	120-140	1200-1400	50	4	0.6	
⑧a-1 散体状强风化花岗岩	21.5	(10.0)	250-300	18-22	18-22	160-180	6000-8000	20	10	125-135	1400-1600		2	0.55	
⑧a-2 碎裂状强风化花岗岩	22.0	(20.0)	350-500		30-35	220-240	9000-10000		10	160-180	1800-2000		1.5	0.5	
⑧b-1 散体状强风化凝灰岩	21.5	(10.0)	240-290	18-22	18-22	160-180	6000-8000	20	10	125-135	1400-1600		2	0.55	

3. 行业标准《高层建筑岩土工程勘察标准》JGJ/T 72—2017 资料
用原位测试参数估算群桩基础最终沉降量时，粉土及砂土的压缩模量 E_s (MPa) 与标准贯入试验击数的经验关系见式 (3-3-16)、式 (3-3-17)，适用深度小于 120m，适用范围 $10 \leq N \leq 50$ 。

粉土及粉细砂： $E_s = (1 \sim 1.2) N$ (3-3-16)

中、粗砂： $E_s = (1.5 \sim 2) N$ (3-3-17)

4. 福建省工程建设地方标准《岩土工程勘察规范》DBJ 13—84—2006 资料
岩土工程勘察等级为乙级及以下的工程，当无载荷试验资料时，花岗岩残积土的变形模量 E_0 (MPa) 可根据标准贯入试验成果按式 (3-3-18) 估算。

$E_0 = 1.167N - 1.053$ (3-3-18)

5. 广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15—31—2016 资料
用实测标准贯入击数 N 估算花岗岩和泥质软岩的残积土、全风化及强风化岩的变形模量 E_0 (MPa)，见式 (3-3-19)。

$E_0 = \alpha N$ (3-3-19)

式 (3-3-19) 中 α 值为载荷试验与标准贯入试验对比而得的经验系数，可按表 3-3-19 取值。

工程地质手册



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 4.4 土质参数（取值依据）

第一章 室内试验 177

土的侧压力系数 ξ 和泊松比 ν 表 3-1-25

土的种类和状态	侧压力系数 ξ	泊松比 ν
碎石土	0.18~0.33	0.15~0.25
砂土	0.33~0.43	0.25~0.30
粉土	0.43	0.30
粉质黏土		
坚硬状态	0.33	0.25
可塑状态	0.43	0.30
软塑和或流动状态	0.53	0.35
黏土		
坚硬状态	0.33	0.25
可塑状态	0.53	0.35
软塑或流动状态	0.72	0.42

标准	地层	密实度				
		松散	稍密	中密	密实	极密
国家标准	砂土	≤ 10	10~15	15~30	> 30	—
天津规范	粉土	—	≤ 12	12~18	> 18	—
	砂土	≤ 10	10~15	15~30	> 30	—
上海规范	粉土、砂土	≤ 7	7~15	15~30	> 30	—
港口规范	砂土	≤ 10	10~15	15~30	30~50	> 50

注：表内所列 N 值不进行探杆长度校正。

二、确定黏性土的状态和无侧限抗压强度

(一) 标准贯入试验锤击数与黏性土状态的关系 (表 3-3-6 冶金部勘察公司资料)

$N_{(F)}$	< 2	2~4	4~7	7~18	18~35	> 35
I_L	> 1	1~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	0.25~0	< 0
土的状态	流塑	软塑	软可塑	硬可塑	硬塑	坚硬

注：1. 适用于冲积、洪积的一般黏性土层。2. 标准贯入试验锤击数 $N_{(F)}$ 是用手拉绳方法测得的，其值比机械化自动落锤方法所得锤击数 $N_{(R)}$ 略高，换算关系如下： $N_{(F)} = 0.74 + 1.12 N_{(R)}$ 适用范围： $2 < N_{(R)} < 23$

(二) 标准贯入试验锤击数与黏性土状态和无侧限抗压强度的关系

1. Terzaghi 和 Peck 的资料 (表 3-3-7)

N	< 2	2~4	4~8	8~15	15~30	> 30
稠度状态	极软	软	中等	硬	很硬	坚硬
				100~200	200~400	> 400

土体泊松比的取值



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (A12-1钻孔) D=35m 有限元计算中土体参数取值

土层编号	土质	层厚 m	浮容重 kN/m ³	粘聚力 kPa	摩擦角 °	E_s (按工程地质参数表)	E_s 按标准贯入击数	E 最终定值
						MPa	MPa	MPa
②	粉细砂	2	8	1	22	6	1	19
①	含淤泥质粉土砂	1	8.5	13	13	3.5	6	6
①-2	中粗砂	1	8.5	1	23	4	---	4
④	细砂	0.7	9	1	25	7	23	23
②	粉砂	2	8	1	23	6	7	7
③-2	粉质粘土	1.5	9.5	26	14	5.5	---	16.5
④	细砂	0.9	9	1	25	7	---	7
③-2	粉质粘土	5.5	9.5	26	14	5.5	---	16.5
⑥-2	淤泥	6.6	8	10	4	2.5	---	7.5
⑤	细砂	1.8	8.5	1	24	7	35	35
⑦	含砾中粗砂	3	9	1	27	7	31.5	31.5
⑧a-2	花岗岩	1.5	12	1	35	20	75	75
⑨a	花岗岩	5.1	---	---	---	---	---	---

注：有限元模型中，砂土弹性模量E依据标准贯入击数反推得到，粘土取 $E=3E_s$ 进行计算。

ZKA12-1钻孔柱状图

工程项目		福清海坛海峡海上风电场工程		坐标	X: 2833001.00 Y: 460560.30			
地面高程	-3.71m	钻孔深度	32.60m	日期	2018.6.5-6			
地层时代	层底高程(m)	层底深度(m)	层厚(m)	柱状剖面比例 1:200	岩性描述	水位(m)	标贯 N63.5	土层编号
						日期	击数 深度(m)	深度(m)
	-5.71	2.00	2.00		(1) 0~2.00m粉细砂②，海积，浅灰色，饱和~很湿，中密，含零星贝壳碎屑。	■	1.35-1.65	KS12-1-1 1.1-2
	-6.71	3.00	1.00		(2) 2.00~3.00m含淤泥质粉土砂①，海积，灰色，臭味，很湿，淤泥约占30~40%，分布较均匀。	■	2.85-3.15	KS12-1-2 3.1-2
	-7.71	4.00	1.00		(3) 3.00~4.00m中粗砂①-2，海积，灰黄，很湿，中密，含10~20%贝壳碎屑和角砂，粒径2~5mm。	■	4.35-4.65	KS12-1-3 4.1-2
	-8.41	4.70	0.70		(4) 4.00~4.70m细砂④，海积，深黄色，湿，中密，含少量粘土质。	■	5.95-6.25	KS12-1-4 5.6-6.8
	-11.91	8.20	1.50		(5) 4.70~6.70m粉砂②，海积，灰色，臭味，湿，松散，含少量淤泥。	■	7.85-8.15	YA12-1-1 7.4-7.6
	-12.81	9.10	0.90		(6) 6.70~8.20m粉质粘土③-2，海积，浅灰色，较湿，可塑，土质纯。其中孔深7.50~8.20m夹薄状粉砂，间距不等，分布不均匀。	■	9.25-9.55	KS12-1-5 8.8-9
	-18.31	14.60	5.50		(7) 8.20~9.10m细砂④，海积，深黄色，较湿，中密，含少量粘土质。	■	11.35-11.65	YA12-1-2 10.9-11.1
	-24.91	21.20	6.60		(8) 9.10~14.60m粉质粘土③-2，浅灰色，较湿，可塑，土质纯。	■	13.95-14.25	YA12-1-3 13.3-13.7
	-26.71	23.00	1.80		(9) 14.60~21.20m淤泥②-2，海积，灰色，臭味，很湿，软塑，较纯，刀切面光滑，局部夹薄状粉砂，分布不均。	■	15.75-16.05	YA12-1-4 15.1-16.5
	-29.71	26.00	3.00		(10) 21.20~23.00m细砂④，海积，浅灰色，密实，较纯，其中孔深22.50~23.00m含少量粗砂。	■	20.75-21.05	YA12-1-5 20.1-20.5
	-29.71	26.00	3.00		(11) 23.00~26.00m含砾中粗砂⑦，海积，浅灰色，湿，中密~密实，角砾约占20%左右，粒径2~4mm，含10%左右细砂，各分布不均匀。	■	22.15-22.45	KS12-1-6 21.8-22
	-31.21	27.50	1.50		(12) 26.00~27.50m碎裂状强风化中粒黑云母二长花岗岩⑨a-2，暗黄色，结构部分破坏，网状裂隙发育，锈质薄膜充填，面粗糙，岩芯破碎呈碎屑，碎块状，岩芯轻敲易断裂。	■	24.15-24.45	KS12-1-7 23.8-24
	-36.31	32.60	5.10		(13) 27.50~32.60m弱风化中粒黑云母二长花岗岩⑨a，暗黄~浅灰色，中粒花岗岩结构，块状构造，裂隙发育，∠10~80°68条，锈质薄膜充填，面粗糙。其中孔深27.50~29.80m呈碎块状、块状。孔深29.80~32.60m呈柱状，长柱状。孔深31.70~32.60m呈浅灰色。	■	25.75-26.05	YA12-1-6 25.1-25.5
						■	27.5-27.57	KS12-1-8 27.1-27.5
						■	29.5-29.55	KS12-1-9 29.1-29.5
校核				记录		图号	A-B-0	

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (A19-1钻孔) D=38m

有限元计算中土体参数取值

土层编号	土质	层厚	浮容重	粘聚力	摩擦角	E_s (按工程地质参数表)	E_s 按标准贯入击数	E 最终定值
		m	kN/m ³	kPa	°	MPa	MPa	MPa
②	粉细砂	0.8	8	1	22	6	---	6
①	含淤泥质粉土砂	3.1	8.5	13	13	3.5	11	11
②	粉细砂	3.3	8	1	23	6	22	22
①-1	含砂淤泥	16	8	8	4	2.5	---	7.5
①	含淤泥质粉土砂	8.9	8.5	13	13	3.5	20	20

注：有限元模型中，砂土弹性模量E依据标准贯入击数反推得到，粘土取 $E=3E_s$ 进行计算。

ZKA19-1钻孔柱状图

工程项目		福清海坛海峡海上风电场工程		坐标		X: 2832779.00 Y: 459065.60		
地面高程		-4.26m	钻孔深度		38.80m	日期		2018.6.7-10
地层时代	层底高度(m)	层厚(m)	柱状剖面比例	1:200	岩性描述	水位(m)日期	标贯 No.5 击数 深度(m)	土样编号 深度(m)
	-5.06	0.80			(1) 0~0.80m细砂②，海积，暗黄色，饱和，松散~稍密，含5%左右贝壳碎屑。			BSA19-1-1 0.5-0.7
	-8.16	3.90			(2) 0.80~3.90m含淤泥质粉土砂①，海积，灰色，臭味，很湿，松散，淤泥约占20~30%，含零星贝壳碎屑，各分布都不均匀。			BSA19-1-2 2.3-2.5
	-11.46	7.20			(3) 3.90~7.20m粉细砂②，海积，浅灰~浅灰夹黄色，很湿，中密，较纯，其中孔深6.20~7.20m呈浅灰夹黄色。			BSA19-1-3 3.9-3.3
					(4) 7.20~23.00m淤泥①-1，海积，灰色，臭味，很湿，软塑，局部夹零星粉砂，个别呈薄状，分布不均。其中孔深7.20~9.10m和12.70~13.20m夹10~20%粉细砂。			YHA19-1-1 8.9-9
					(5) 23.00~32.10m含淤泥质粉土砂①，海积，灰色，臭味，很湿，中密~密实，淤泥占30~40%和5~10%贝壳，各分布都不均匀。			YHA19-1-2 10.6-10.8
					(6) 32.10~33.80m含砾中粗砂④-2，海积，浅灰色，湿，密实，角砾约含10~20%左右，粒径2~4mm，分布不均匀。其中孔深33.60~33.80m夹40%卵石，块径20~50mm，呈亚圆形。			YHA19-1-3 13.9-14.1
					(7) 33.80~38.80m弱风化中粒黑云母二长花岗岩⑥a，肉红色，中粒花岗岩结构，块状构造，裂隙较发育， $L_{10} \sim 75^{\circ} 36$ 条，乳白色钙质或锈质渲染，个别面无充填物，面较粗糙。岩芯较破碎，多呈短柱、柱状，个别长柱状。其中孔深37.00~38.80m岩芯破碎，呈碎块状。			YHA19-1-4 17.9-17.4
	-27.46	23.20						YHA19-1-5 20.9-20.7
								BSA19-1-1 24.7-24.3
								BSA19-1-5 27.8-28
	-36.36	32.10						BSA19-1-6 31.26-31.6
								BSA19-1-7 32.3-32.5
	-38.06	33.80						
	-43.06	38.80						
校核				记录			图号	A-B-0

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



4. 计算边界条件

➤ 4.4 土质参数 (A24-1钻孔) D=32m

有限元计算中土体参数取值

土层编号	土质	层厚	浮容重	粘聚力	摩擦角	E_s (按工程地质参数表)	E_s 按标准贯入击数	E 最终定值
		m	kN/m ³	kPa	°	MPa	MPa	MPa
④	细砂	2.9	9	1	25	7	22	22
⑤	粉细砂	6.95	8.5	1	24	7	30.75	30.75
③	淤泥质粉质粘土	1.45	8	12	3	2.5	---	7.5
⑧a-0	全风化花岗岩	1.7	9.5	23	15	5.5	72	72
⑧a-1	散体状强风化花岗岩	2	11.5	18	18	10	75	75
⑧a-2	碎裂状强风化花岗岩	1.5	12	1	35	20	75	75
⑨a	弱风化花岗岩	9	---	---	---	---	75	75

注：有限元模型中，砂土弹性模量E依据标准贯入击数反推得到，粘土取 $E=3E_s$ 进行计算。

ZKA24-1钻孔柱状图

工程项目		福清海坛海峡海上风电场工程		坐标		X: 2832689.00 Y: 461247.90			
地面高程		-3.00m	钻孔深度		25.50m	日期		2018.6.3-4	
地层时代	层底高程 (m)	层底深度 (m)	层厚 (m)	柱状剖面比例 1: 200	岩性描述		水位 (m) 日期	标贯 No. 5 击数 深度 (m)	土样编号 深度 (m)
	-5.90	2.90	2.90		(1) 0~2.90m细砂④, 海积, 灰黄色, 饱和~很湿, 中密, 含零星贝壳碎屑。			1.35~1.65	SSA24-1-1 0.0~2.9
					(2) 2.90~9.85m粉细砂⑤, 海积, 灰~黄褐色, 湿, 密实, 较纯。其中孔深2.90~4.00m呈灰色, 含少量泥质。			2.90~3.15 4.35~4.60 5.95~6.15	SSA24-1-2 3.0~3.7
					(3) 9.85~11.30m淤泥质粘土③, 海积, 浅灰色, 较湿, 可塑, 土质纯, 刀切面光滑。其中孔深10.95~11.15m夹粉砂, 呈黄褐色。			7.25~7.55 8.05~8.35 9.95~10.25	SSA24-1-3 4.8~5.7 SSA24-1-4 8.0~8.4
	-12.85	9.85	6.95		(4) 11.30~13.00m全风化中粒黑云母二长花岗岩⑧a-0, 浅黄夹浅灰色, 稍湿, 硬塑, 大部分已风化为粘性土, 干钻较易进尺, 岩芯呈砂土状, 浸水易软化。			11.30~11.65	
	-14.30	11.30	1.45		(5) 13.00~15.00m散体状强风化中粒黑云母二长花岗岩⑧a-1, 深黄夹浅灰色, 坚硬, 结构基本破坏, 干钻取芯较困难, 岩芯浸水易崩解。			13.00~13.15	
	-16.00	13.00	1.70		(6) 15.00~16.50m碎裂状强风化中粒黑云母二长花岗岩⑧a-2, 浅灰夹暗黄色, 结构部分破坏, 岩芯手掰易散碎, 呈碎屑, 碎块状。			14.15~14.2 15~15.05	
	-18.00	15.00	2.00		(7) 16.50~25.50m弱风化中粒黑云母二长花岗岩⑧a, 暗黄~肉红色, 中粒花岗岩结构, 块状构造, 网状裂隙发育, L5~89°66条, 锈质薄膜充填, 面粗糙, 岩芯多呈短柱状, 柱状, 个别长柱状。其中孔深16.50~20.30m呈碎块状。孔深16.50~18.00m呈暗黄色, 岩芯表面较粗糙。			15~15.05 16.5~16.54	
	-19.50	16.50	1.50						
	-28.50	25.50	9.00						
校核				记录		图号		A-B-0	

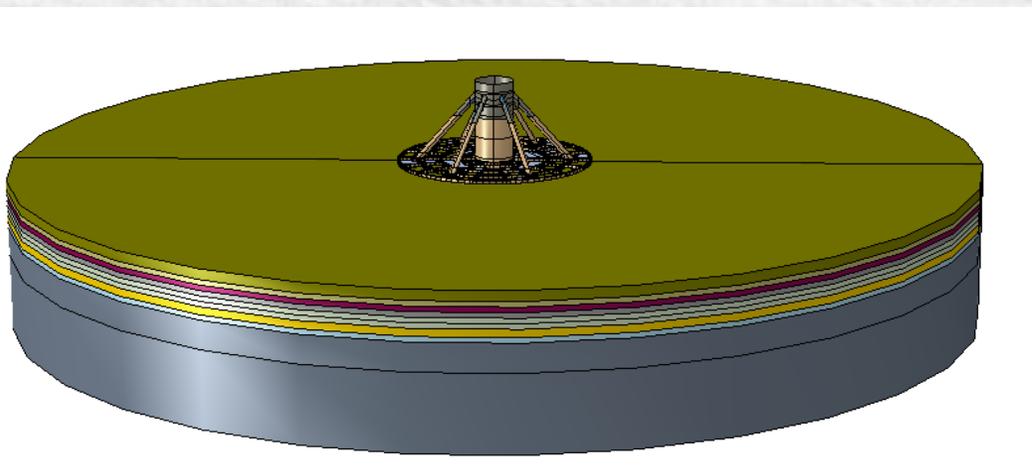
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



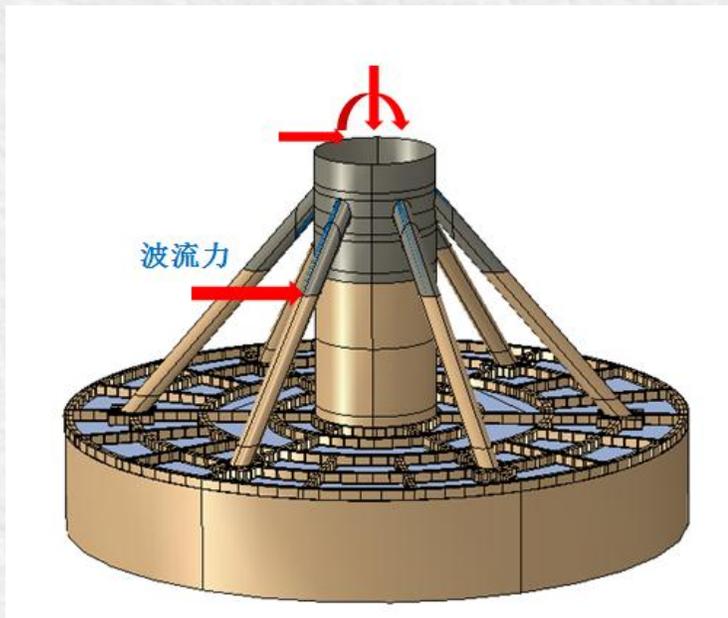
5. 有限元模型

2019年中国
清洁能源 智慧电

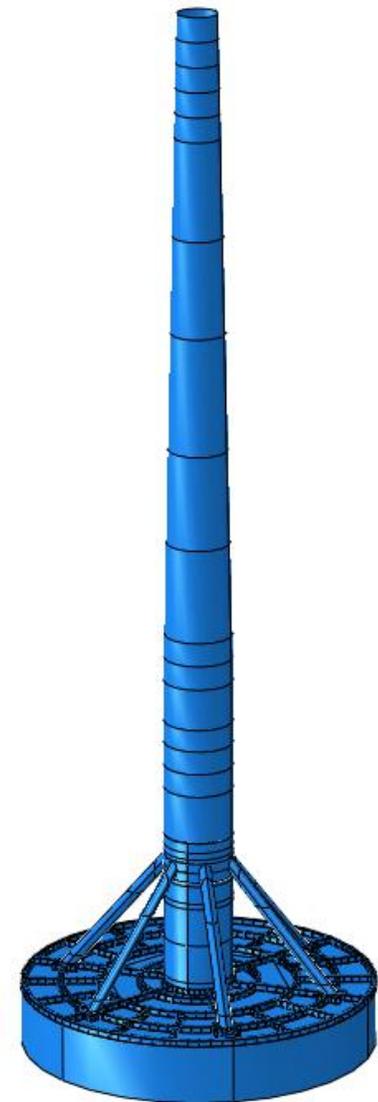
建立筒型基础+土体整体有限元模型，依据上述计算得到的荷载及加载方式，对筒型基础的受力进行分析。



整体模型



加载方式



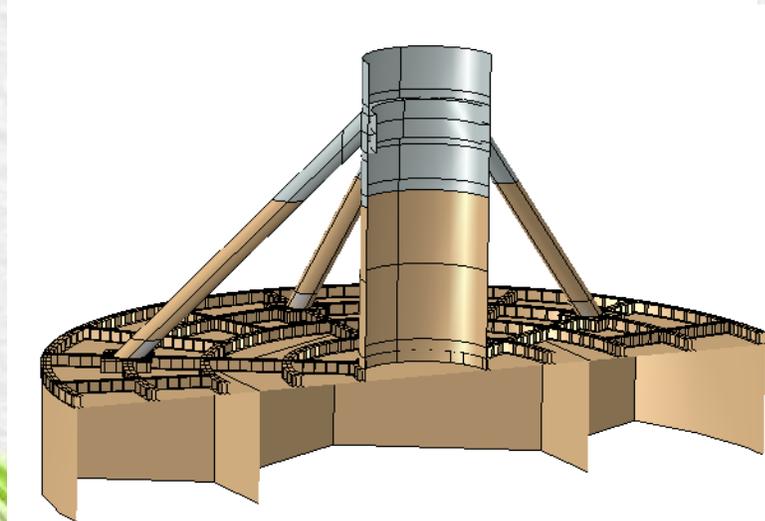
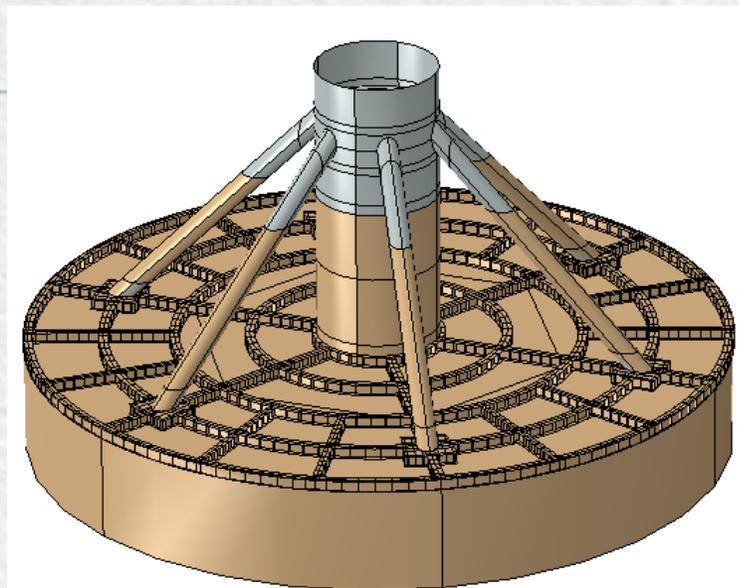
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



6. 结构静力计算结果

计算结果

机位	钢结构 Mises (MPa)	基础倾斜度 (‰)		沉降量(mm)		永久沉降 (mm)	钢材总重 (未含靠船) (t)	配重 (t)
		泥面	法兰	泥面	法兰			
A12机位 (35m)	241.1	3.75	4.84	82.27	33.14	74.76	846.54	2000
A13机位 (32m)	254.5	3.77	5.02	68.70	26.35	36.41	752.58	2000
A19机位 (38m)	212.70	3.434	4.75	94.05	44.35	98.80	887.04	2000
A20机位 (35m)	248.4	4.523	5.65	105.60	45.62	60.92	814.20	2000



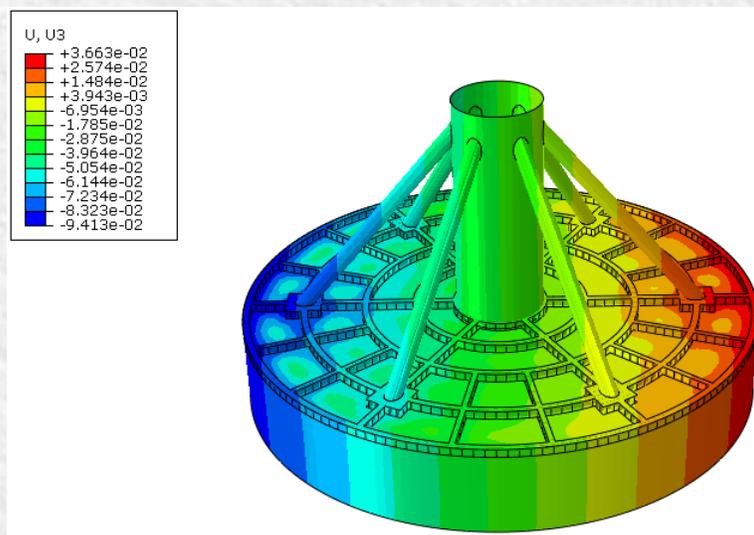
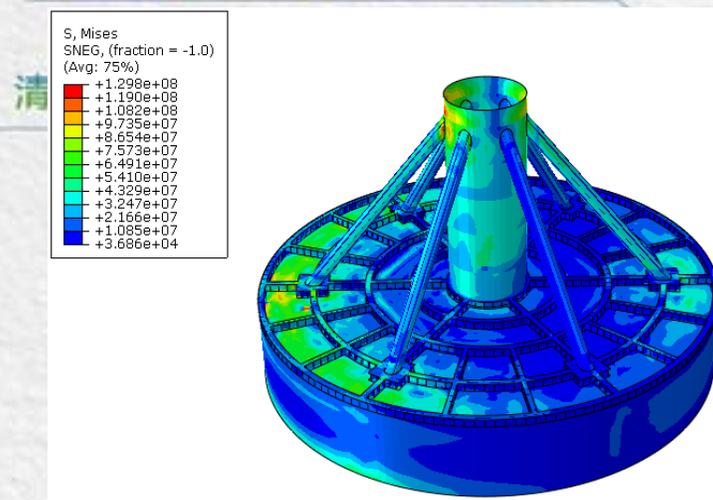
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



6. 结构静力计算结果

计算结果

机位	钢结构 Mises (MPa)	基础倾斜度 (%)		沉降量(mm)		永久沉降 (mm)	钢材总重 (未含靠船) (t)	配重 (t)
		泥面	法兰	泥面	法兰			
A22机位 (35m)	241.9	3.51	4.66	79.42	34.45	54.04	815.69	2000
A23机位 (35m)	238.7	4.37	5.46	101.2	42.89	45.59	837.11	2000
A24机位 (32m)	196.6	2.27	3.28	43.66	19.08	5.78	740.17	2000
A25机位 (32m)	232.2	2.83	4.01	53.41	22.24	14.37	747.47	2000



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

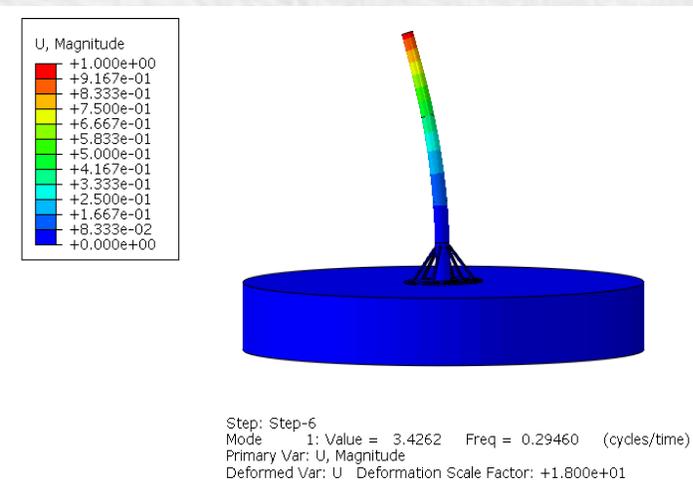


7. 共振校核

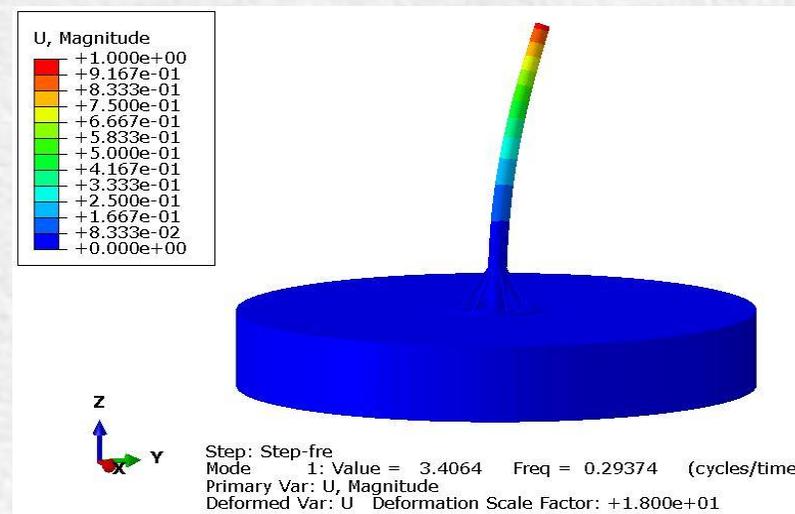
2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

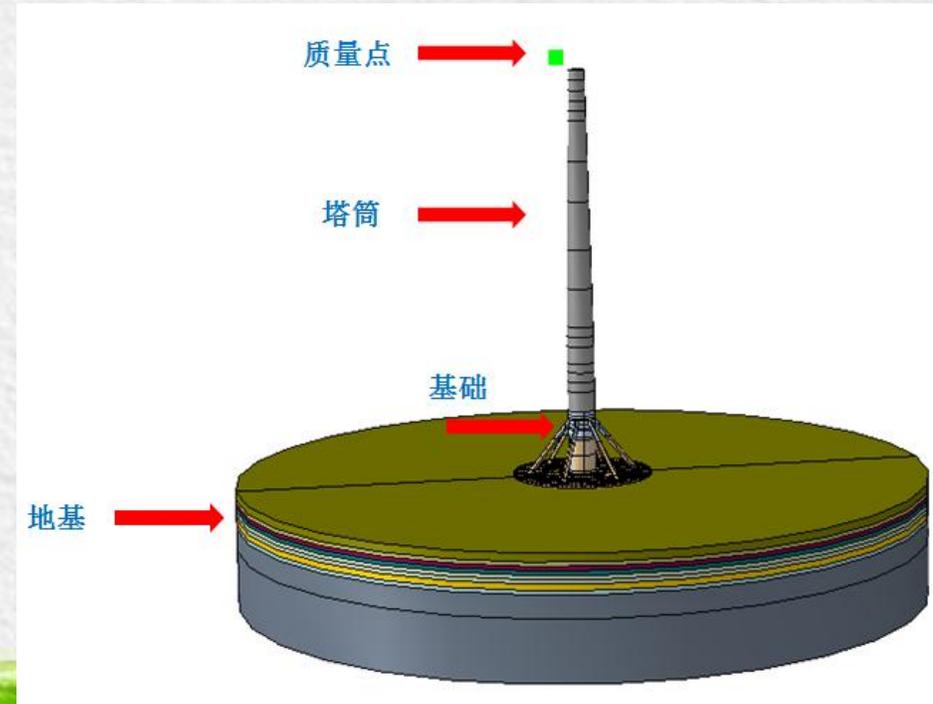
依据基础、塔架结构尺寸及风机偏心坐标与转动惯性矩等数据，考虑机舱实际重量按照偏心质量点利用大型有限元软件ABAQUS建立整个风机结构的有限元模型，分析其**一阶自振频率**。



A12机位
(**0.2946Hz**)



A13机位
(**0.2937Hz**)



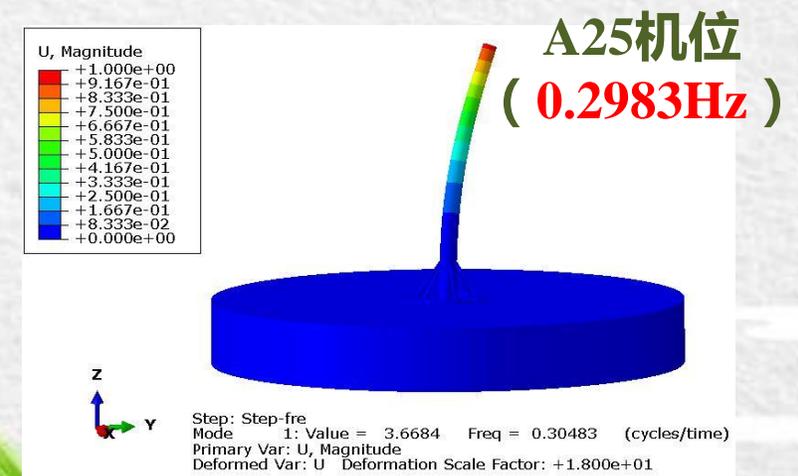
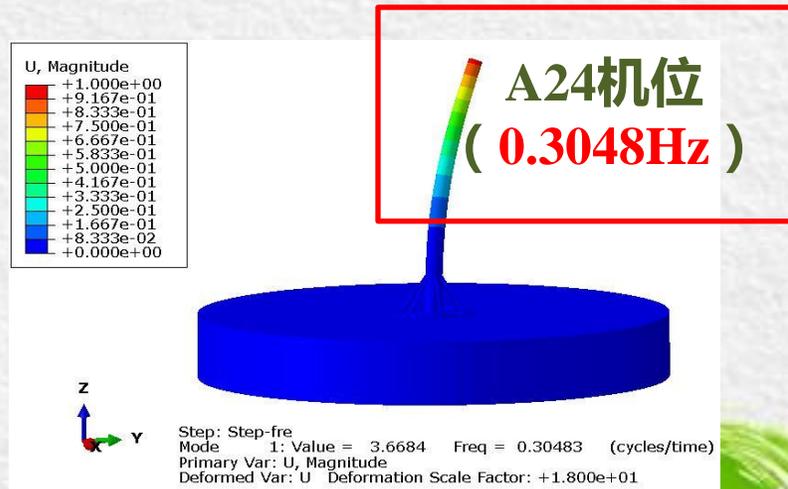
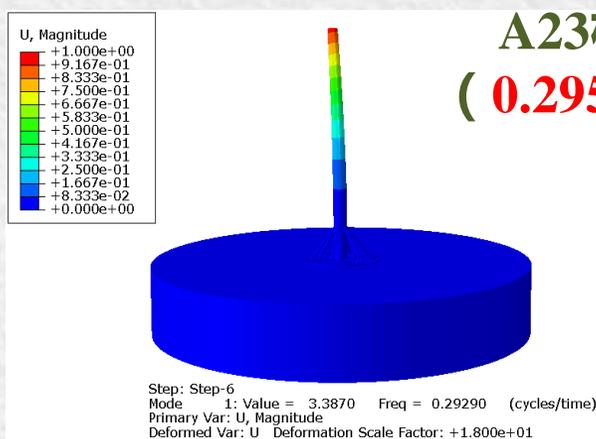
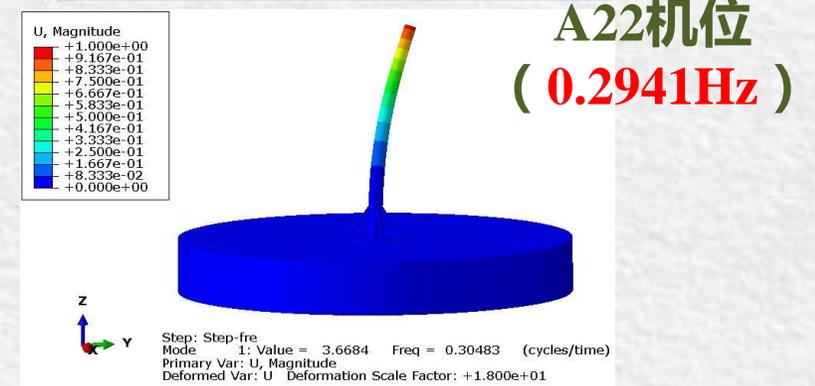
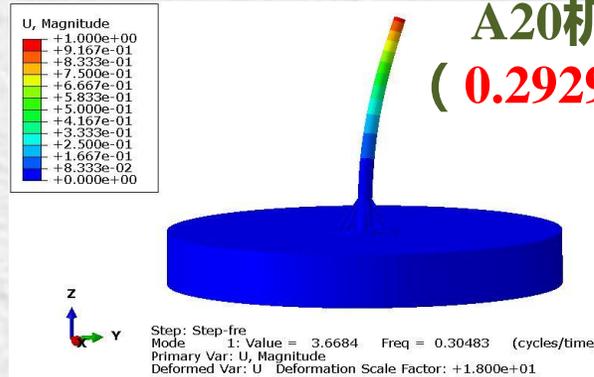
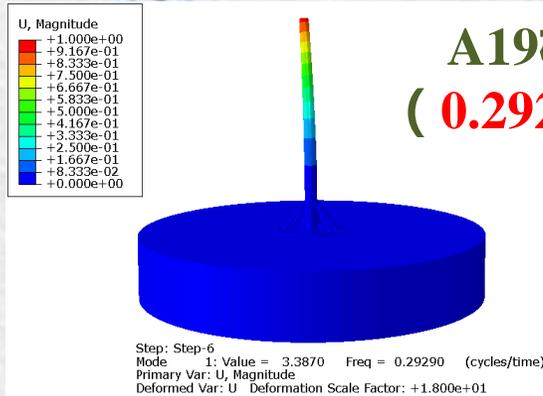
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



7. 共振校核

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



8. 基础下沉阻力计算

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

基于上述方案，对各机位筒型基础进行**无配重**下沉计算，三种不同筒径典型机位计算结果如下。

A12机位（35m）下沉阻力计算

下沉阻力计算方法

筒型基础下沉**单位摩阻力**使用以下公式计算：

$$f_s = c + \sigma_0' \tan \delta$$

筒型基础贯入过程中认为筒内土体不能与筒体共同运动，考虑使用别列柴策夫深基础承载力公式计算其**端阻力**：

$$q_u = q_D N_q + \gamma B N_\gamma$$

3.78 ^o	1.14E+04 ^o	652.6179 ^o	1.21E+04 ^o	0 ^o	72.3434 ^o
3.92 ^o	1.19E+04 ^o	679.6775 ^o	1.26E+04 ^o	0 ^o	74.3438 ^o
4.06 ^o	1.25E+04 ^o	708.1236 ^o	1.32E+04 ^o	0 ^o	80.8162 ^o
4.2 ^o	1.31E+04 ^o	738.2033 ^o	1.39E+04 ^o	0 ^o	82.8974 ^o
4.34 ^o	1.38E+04 ^o	768.3876 ^o	1.45E+04 ^o	0.6594 ^o	84.9613 ^o
4.48 ^o	1.44E+04 ^o	798.6691 ^o	1.52E+04 ^o	1.517 ^o	87.0087 ^o
4.62 ^o	1.51E+04 ^o	829.0413 ^o	1.59E+04 ^o	2.4006 ^o	89.0401 ^o
4.76 ^o	1.58E+04 ^o	857.2727 ^o	1.66E+04 ^o	3.2778 ^o	80.9388 ^o
4.9 ^o	1.64E+04 ^o	883.1412 ^o	1.73E+04 ^o	4.1353 ^o	82.7177 ^o
5.04 ^o	1.71E+04 ^o	909.0218 ^o	1.80E+04 ^o	5.0137 ^o	84.484 ^o
5.18 ^o	1.78E+04 ^o	934.9134 ^o	1.88E+04 ^o	5.9132 ^o	86.238 ^o
5.32 ^o	1.85E+04 ^o	960.8154 ^o	1.95E+04 ^o	6.8336 ^o	87.9802 ^o
5.46 ^o	1.93E+04 ^o	986.7269 ^o	2.03E+04 ^o	7.7752 ^o	89.711 ^o
5.6 ^o	2.00E+04 ^o	1.01E+03 ^o	2.10E+04 ^o	8.7377 ^o	91.4308 ^o
5.74 ^o	2.08E+04 ^o	1.04E+03 ^o	2.18E+04 ^o	9.7212 ^o	93.1398 ^o
5.88 ^o	2.16E+04 ^o	1.06E+03 ^o	2.26E+04 ^o	10.7258 ^o	94.8384 ^o
6.02 ^o	2.24E+04 ^o	1.09E+03 ^o	2.35E+04 ^o	11.7514 ^o	96.527 ^o
6.16 ^o	2.32E+04 ^o	1.12E+03 ^o	2.43E+04 ^o	12.7981 ^o	98.2058 ^o
6.3 ^o	2.40E+04 ^o	1.14E+03 ^o	2.52E+04 ^o	13.8657 ^o	99.875 ^o
6.44 ^o	2.49E+04 ^o	1.17E+03 ^o	2.60E+04 ^o	14.9544 ^o	101.535 ^o
6.58 ^o	2.57E+04 ^o	1.19E+03 ^o	2.69E+04 ^o	16.064 ^o	103.186 ^o
6.72 ^o	2.68E+04 ^o	1.42E+03 ^o	2.82E+04 ^o	17.6247 ^o	124.4836 ^o
6.86 ^o	2.87E+04 ^o	1.43E+03 ^o	3.01E+04 ^o	20.0498 ^o	126.4236 ^o
7 ^o	3.06E+04 ^o	1.44E+03 ^o	3.21E+04 ^o	22.4899 ^o	128.3537 ^o

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



8. 基础下沉阻力计算

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

A19机位 (D38) 下沉阻力计算

2.0	8.95E+03	711.1798	9.66E+03	0	46.8502
2.1	9.68E+03	719.471	1.04E+04	0	48.5963
2.2	1.04E+04	727.7621	1.11E+04	0	50.3218
2.3	1.12E+04	736.0533	1.19E+04	0	52.0277
2.4	1.19E+04	744.3445	1.26E+04	0	53.7152
2.5	1.26E+04	752.6357	1.34E+04	0	55.3852
2.6	1.34E+04	760.9268	1.42E+04	0	57.0386
2.7	1.42E+04	769.218	1.49E+04	0	58.6761
2.8	1.49E+04	777.5092	1.57E+04	0	60.2986
2.9	1.57E+04	785.8004	1.65E+04	0.4446	61.9066
3.0	1.65E+04	794.0915	1.73E+04	1.1417	63.5009
3.1	1.73E+04	802.3827	1.81E+04	1.8442	65.0819
3.2	1.81E+04	810.6739	1.89E+04	2.552	66.6502
3.3	1.89E+04	818.9651	1.97E+04	3.2651	68.2063
3.4	1.97E+04	827.2562	2.05E+04	3.9836	69.7506
3.5	2.05E+04	835.5474	2.13E+04	4.7074	71.2836
3.6	2.13E+04	843.8386	2.22E+04	5.4365	72.8057
3.7	2.21E+04	852.1298	2.30E+04	6.171	74.3173

A24机位 (D32) 下沉阻力计算

5.16	15576.00	1137.60	16714.00	0.00	91.36
5.28	16243.00	1162.30	17406.00	0.00	92.95
5.40	16924.00	1187.10	18111.00	0.00	94.53
5.52	17618.00	1211.90	18830.00	0.00	96.10
5.64	18327.00	1236.70	19563.00	0.91	97.67
5.76	19049.00	1261.50	20310.00	1.84	99.22
5.88	19785.00	1286.30	21071.00	2.79	100.77
6.00	20534.00	1311.10	21845.00	3.75	102.30

八个机位筒型基础均可实现筒型基础沉贯至指定深度。



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



9. 基础承载力校核

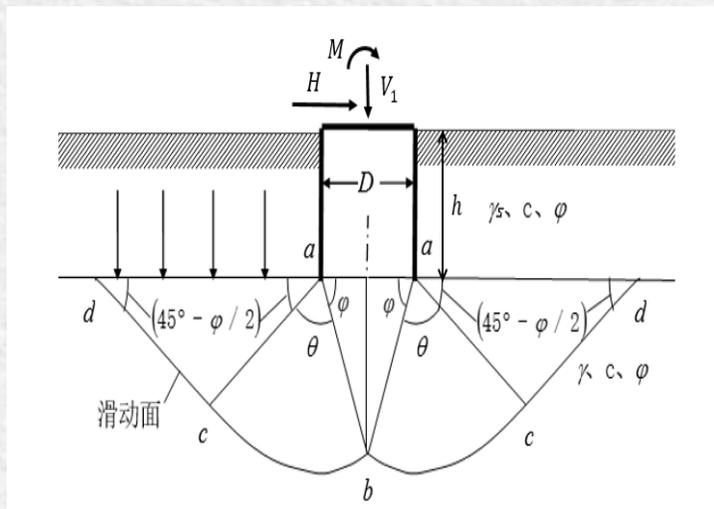
2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

本次计算针对各机位分别进行**极限工况及冲刷工况（单侧冲刷2m）**的承载力校核。

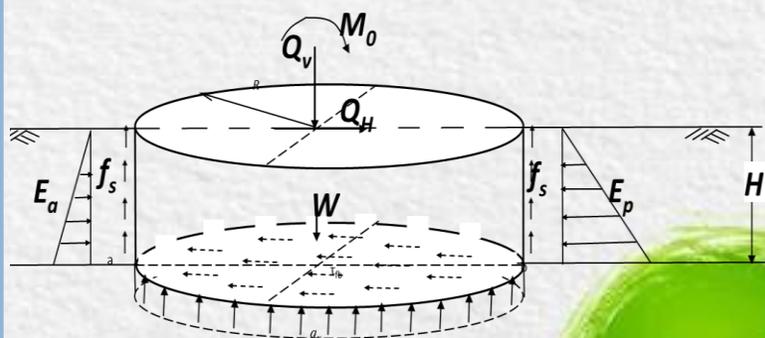
地基竖向承载力

对于筒型基础运行期间，筒内土体与筒型基础可视为协同作用的整体，此时可将筒型基础视为圆柱形墩式基础，采用**太沙基深基础承载理论**进行承载力校核。



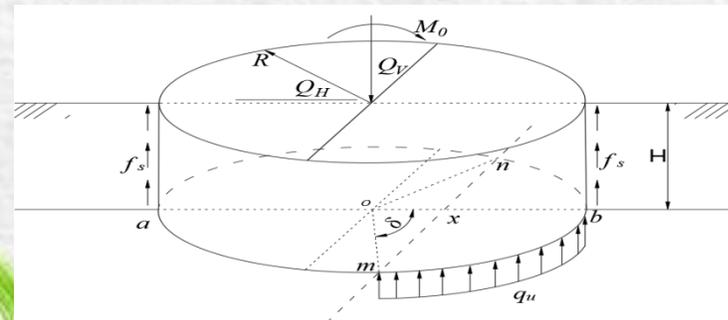
抗滑移稳定性

风机的**水平荷载较大**，因此基础的抗滑移能力是保证基础稳定性的重要组成部分。导致基础产生水平滑动的驱动力包括风机上部传来的水平荷载以及地基土体的**主动土压力**，而抵抗基础产生整体滑动的抗力除了地基土的**被动土压力**外，还应考虑基础底面的摩阻力。



抗倾覆稳定性

海上风电基础结构属于高耸直立结构，其受力特性也是水平荷载大于竖向荷载，主要是**承担大弯矩荷载**，所以其稳定破坏形式也主要是**倾覆失稳**。



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



9. 基础承载力校核

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

校核结果汇总

机位	筒高	竖向承载力安全系数		抗滑安全系数		抗倾安全系数	
		极限 工况	一侧 冲刷	极限 工况	一侧 冲刷	极限 工况	一侧 冲刷
A12	7m	2.91	2.54	5.78	5.16	1.98	1.96
A13	6m	2.84	2.48	4.17	3.66	1.67	1.66
A19	6m	2.10	2.17	4.91	4.33	1.83	1.79
A20	6m	2.99	2.44	4.08	3.56	1.82	1.80
A22	6m	6.85	5.51	4.08	3.56	2.32	2.31
A23	7.3m	3.38	2.91	4.33	3.68	2.12	2.10
A24	6m	3.98	3.21	4.27	3.70	1.74	1.73
A25	6m	4.71	3.97	4.51	3.94	1.91	1.90

均满足承载能力及稳定性设计要求

>2.0

>1.3

>1.6

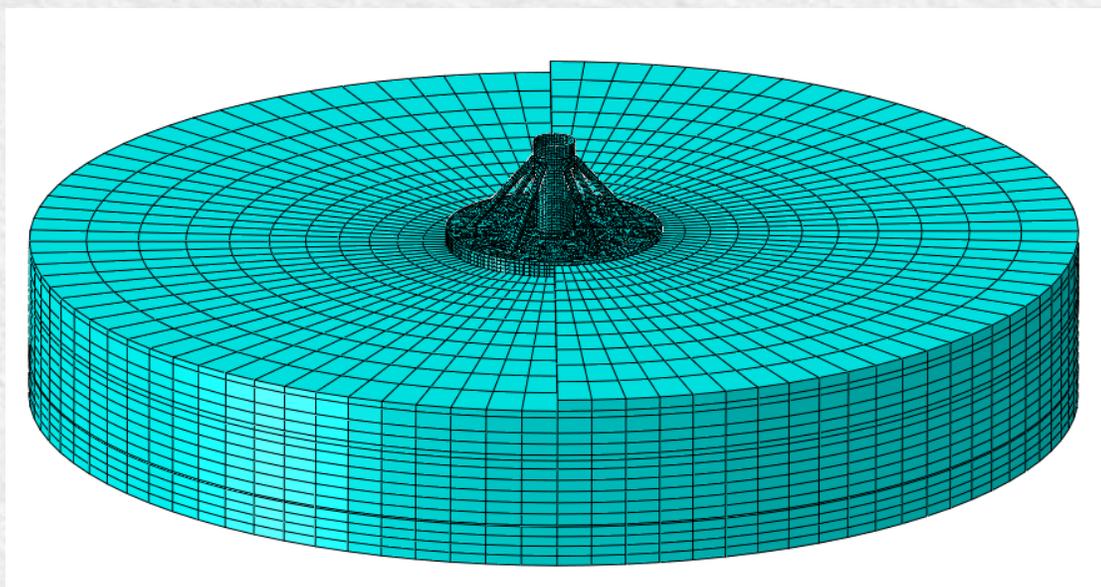
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



10. 基础冲刷有限元计算（单侧冲刷2m）

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

本次计算针对各个机位进行极限标准荷载条件下的冲刷计算，计算筒型基础周围土体**单侧冲刷2m**的不利工况。



冲刷2m模型及网格划分



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



10. 基础冲刷有限元计算（单侧冲刷2m）

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

基础冲刷有限元计算结果

机位	基础倾斜度（‰）		沉降量(mm)	
	泥面	法兰	泥面	法兰
A12机位（35m）	4.33	5.41	95.30	37.87
A13机位（32m）	4.43	5.68	68.70	30.36
A19机位（38m）	4.99	6.33	140.90	67.06
A20机位（35m）	5.60	6.74	134.80	60.09
A22机位（35m）	4.31	5.46	96.38	39.89
A23机位（35m）	5.31	6.40	127.60	56.40
A24机位（32m）	2.98	3.97	56.82	22.66
A25机位（32m）	3.87	5.02	71.16	26.52



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



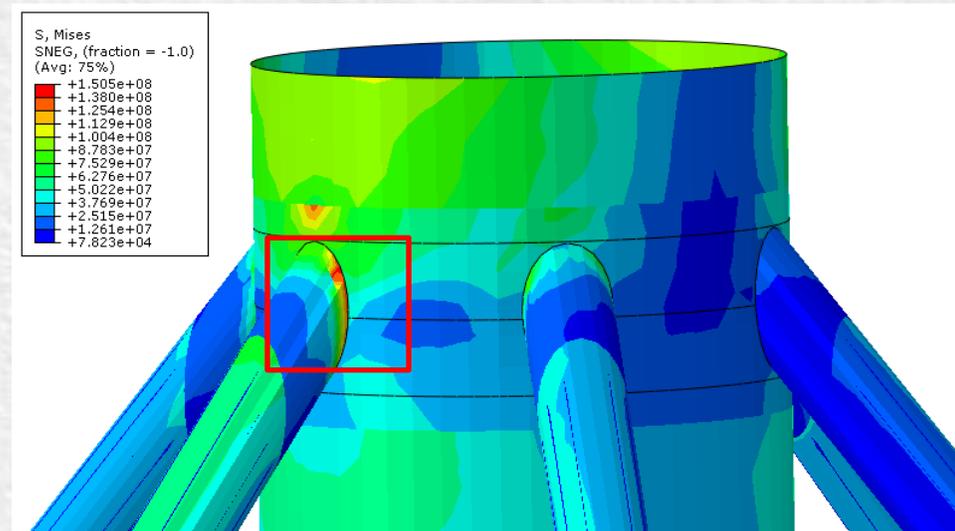
11. 基础结构疲劳计算

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

本次计算针对八个不同机位的疲劳进行分析和校核。

Inverse SN slope [.]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]
3	14968	29442	9905	544	348	337
4	14775	28636	8321	453	273	249
5	16518	29862	7914	433	255	216
6	19242	32014	7946	438	260	202
7	22315	35022	8161	454	278	197
8	25360	38805	8452	479	303	197
9	28213	43020	8770	513	329	200
10	30826	47309	9093	554	355	204
11	33198	51460	9410	599	380	209
12	35346	55389	9717	643	403	214



等效疲劳荷载

疲劳荷载作用下某一热点



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

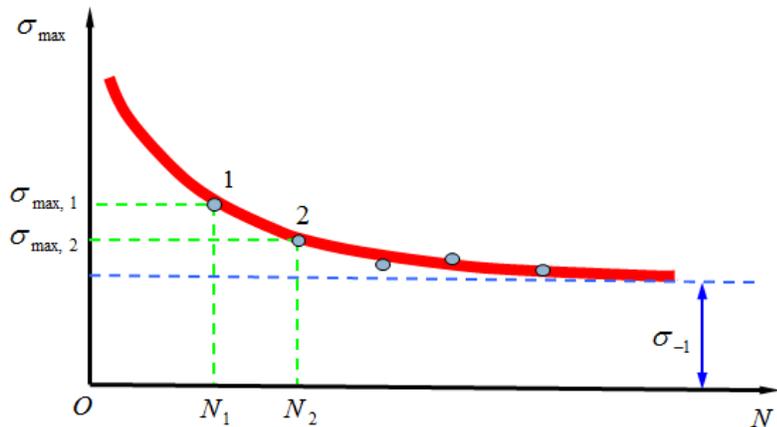


11. 基础结构疲劳计算

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

风机在**25年**的使用寿命内循环次数为**1.0E+7**，疲劳设计因子**DFF取2.0**，取**斜撑焊接处，钢筒过渡段等部位**节点作为热点进行疲劳分析。目前工程上进行疲劳计算应用使用最广泛的是线性累积损伤理论（**Palmgren-Miner准则**），Palmgren-Miner准则是根据功能原理推导出累积损伤计算公式，考虑疲劳设计因子后的疲劳损伤需要满足：

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{W} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{DFF}$$



$$\log_{10} N = \log_{10} a - m \log_{10} \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right)$$

典型的S-N曲线

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



11. 基础结构疲劳计算

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

机位	最大损伤因子
A12	0.0117
A13	0.0300
A19	0.0234
A20	0.0336
A22	0.0158
A23	0.2703
A24	0.0132
A25	0.0251

**均满足疲劳要求
<0.5**



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

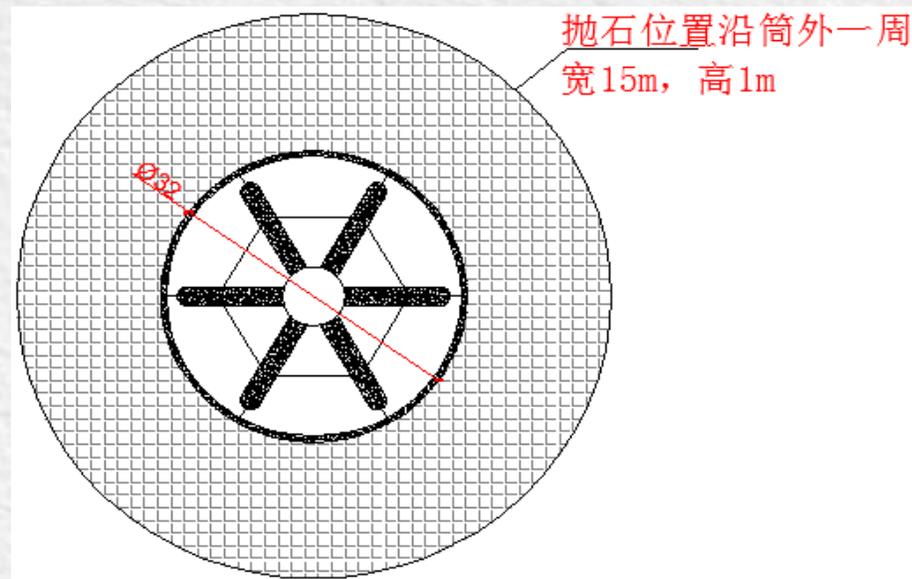
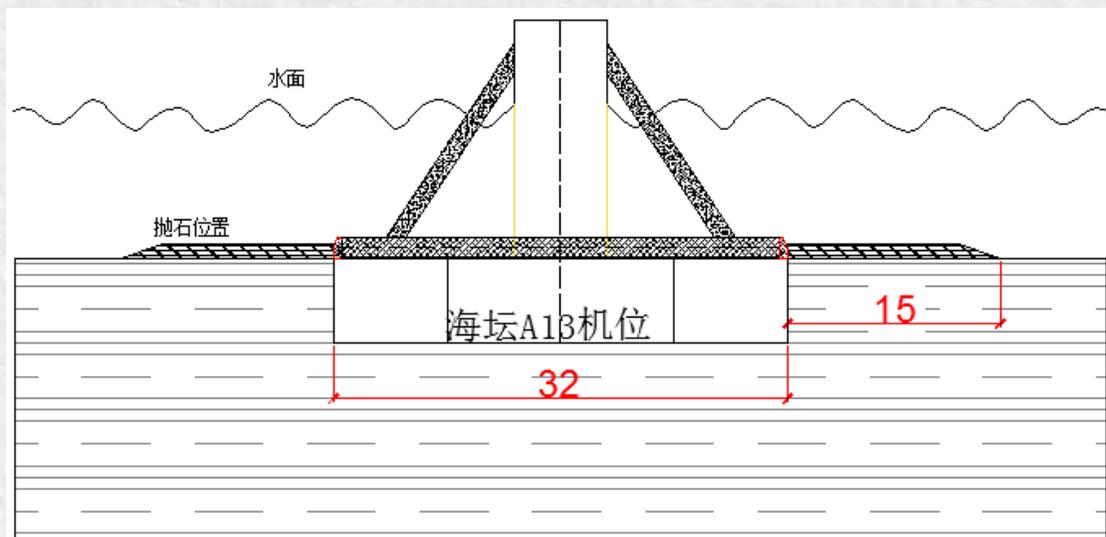


12. 冲刷防护设计

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

对三种不同筒径的冲刷防护设施进行设计。



D32筒径基础冲刷防护设计



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

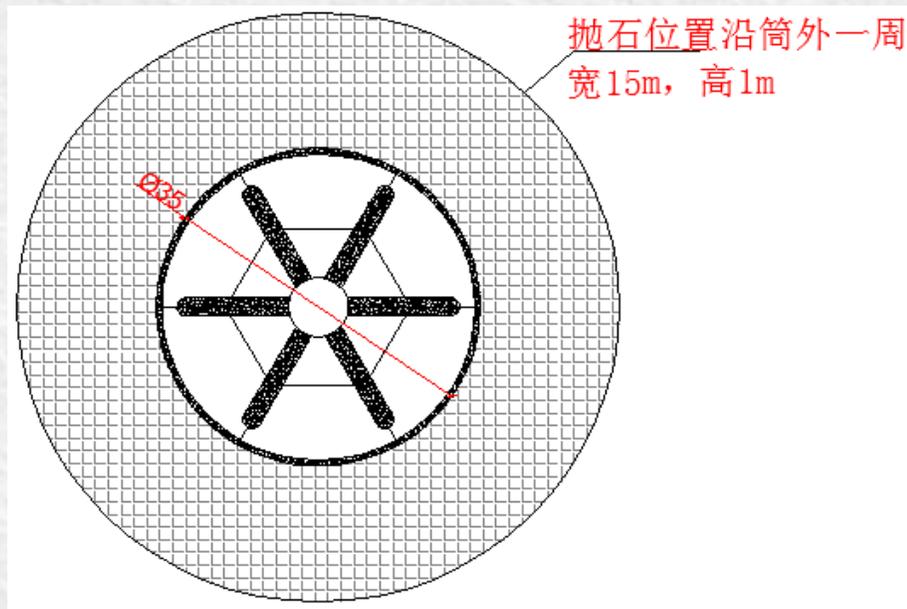
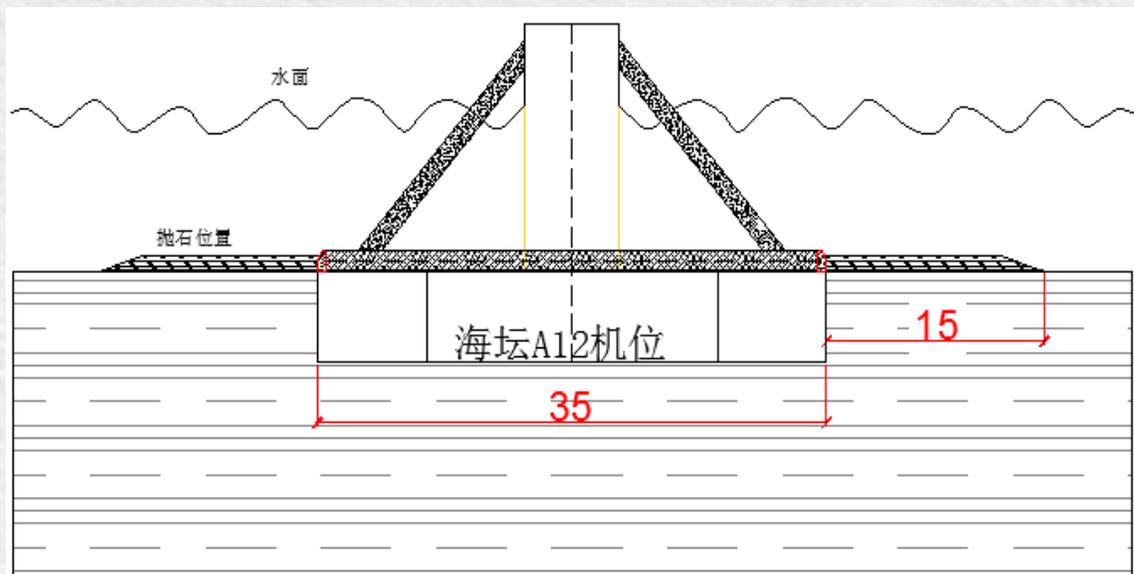


12. 冲刷防护设计

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

对三种不同筒径的冲刷防护设施进行设计。



D35筒径基础冲刷防护设计



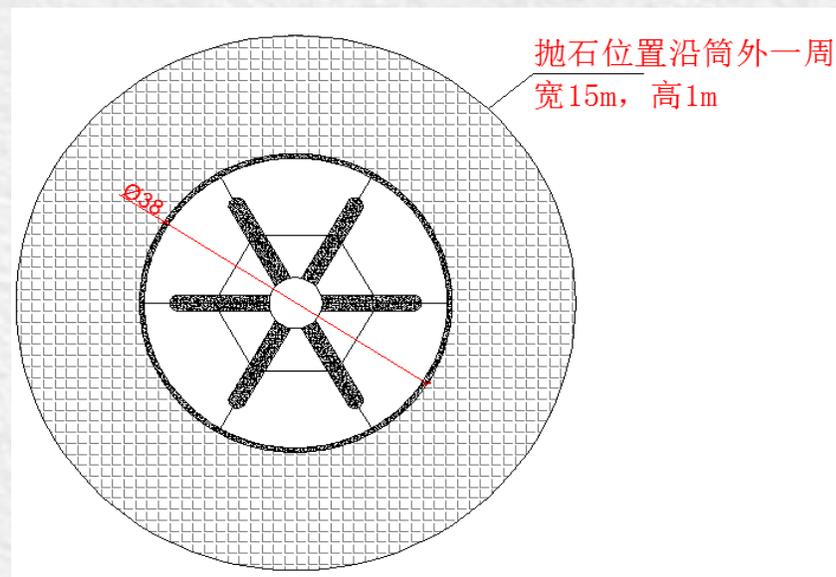
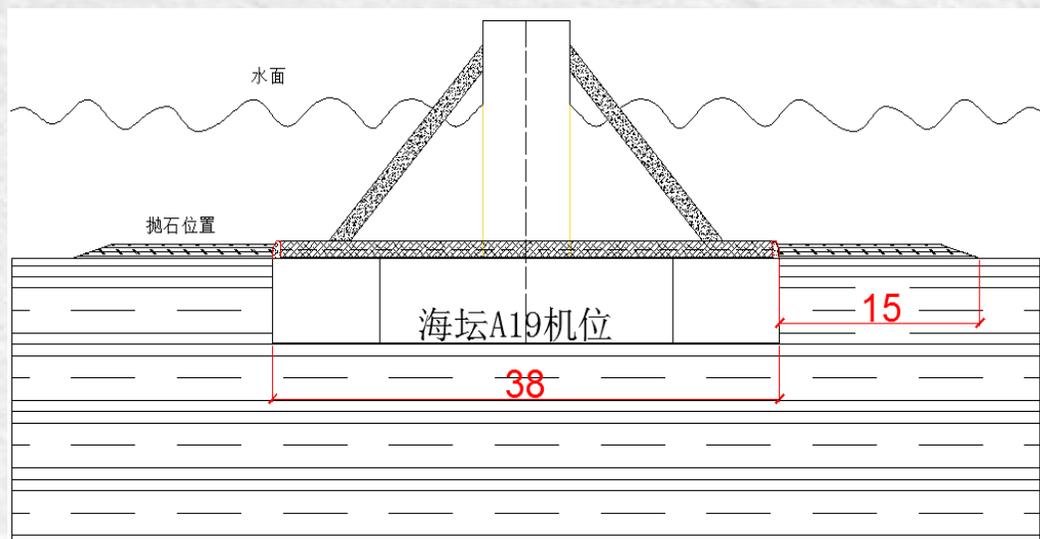
华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



12. 冲刷防护设计

对三种不同筒径的冲刷防护设施进行设计。

2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



D38筒径基础冲刷防护设计



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



12. 冲刷防护设计

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

同时也对不同筒径基础的**抛石量**进行了估计。

筒径(m)	32	35	38
抛石量(m ³)	2000	2200	2300



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



13. 小结

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 13.1 各机位筒型基础计算结果

序号	检算内容	检算结果
1	法兰倾斜率	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (×)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)
2	结构强度	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)
3	共振校核	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (×)、A25 (√)
4	下沉	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)
5	竖向承载力、 抗滑移、抗倾覆	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)
6	冲刷工况	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)
7	基础结构疲劳	A12 (√)、A13 (√)、A19 (√)、A20 (√)、A22 (√)、A23 (√)、A24 (√)、A25 (√)



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



13. 小结

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 13.2 筒型基础设计计算小结

根据上述分析验算结果，八个不同机位采用复合筒型基础结构**基本满足**倾斜率，强度，疲劳，沉降量和承载力要求，但其中**A20机位**法兰倾斜率为**5.65‰**，略大于**5.50‰**。**A24机位**的一阶自振频率为**0.3048Hz**，略大于所给的**0.288~0.3Hz**的要求。



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案



14. 参研项目

2019年中国电机工程学会年会

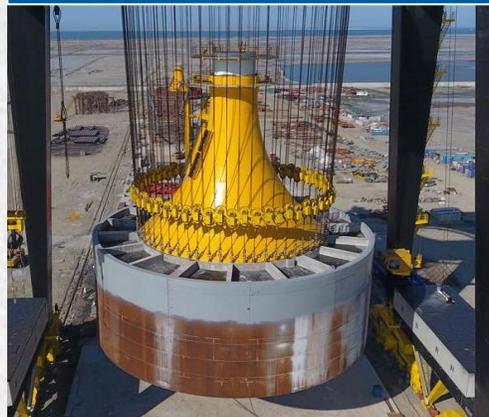
清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 14.1 已完成项目

启东项目



响水项目



大丰项目



项目	启东	响水	大丰-3.3	大丰-6.45
风机 (MW)	2.5	3.0	3.3	6.45
水深 (m)	5	10	18	18
筒直径 (m)	30	30	30	36
筒高 (m)	6	12	9	10
过渡段 (m)	18	18.8	26	26
总重 (t)	2400	2350	2750	3600

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

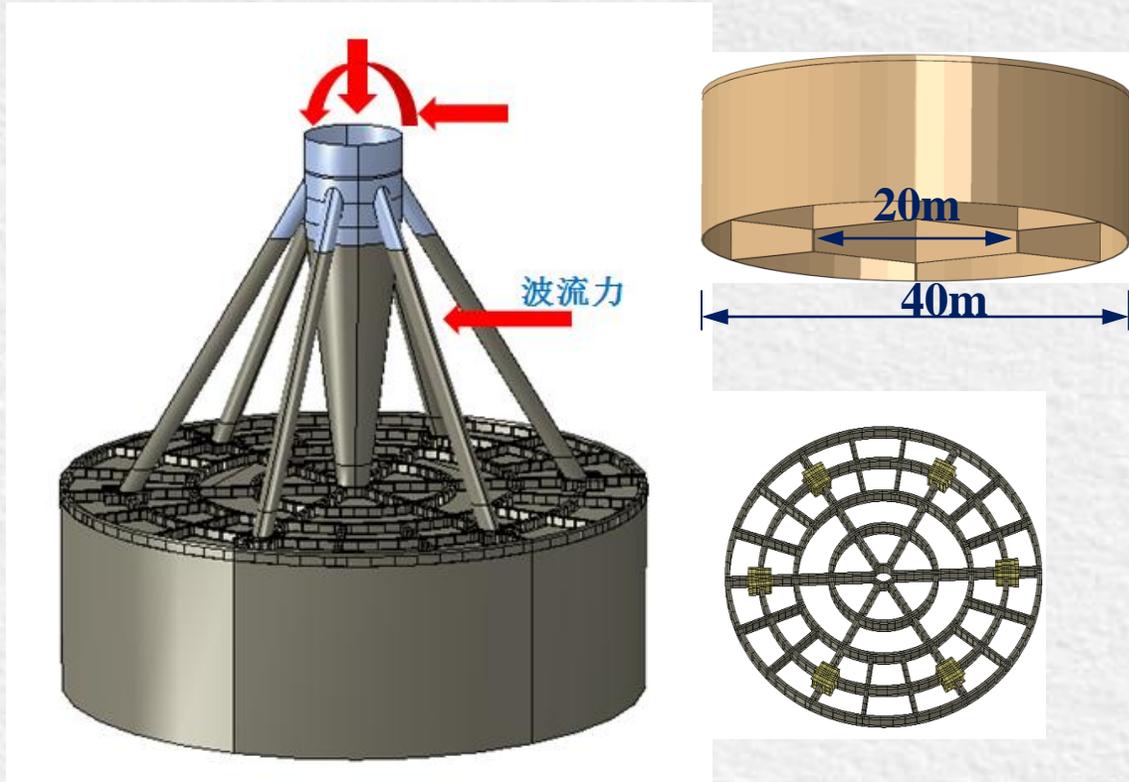


14. 参研项目

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 14.2 华能嘉兴海上风电场筒型基础可行性研究



部位	尺寸	体积/m ³	密度t/m ³	重量/t	合计/t
过渡段	高22.5m, 直径和厚度采用渐变形式, 上部直径为6m(厚度依次为50mm,80mm,50mm,40mm,30mm)	15.43	7.85	121.13	1130.81
斜支撑	直径1.2m, 中间厚30mm, 两端加厚(厚度依次为50mm,30mm,50mm)	16.32	7.85	128.11	
钢筒	直径40m, 顶盖20mm, 筒裙25mm, 分舱板15mm	75.99	7.85	648.35	
组合钢梁	主梁高0.6m, 宽0.5m, 次梁高0.6m, 宽0.4m, 采用工字钢(与斜支撑接触地方厚40mm,其他地方25mm)	27.59	7.85	216.58	
环形支撑肋板	内径4m, 外径6m(厚度25mm)	2.12	7.85	16.64	



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

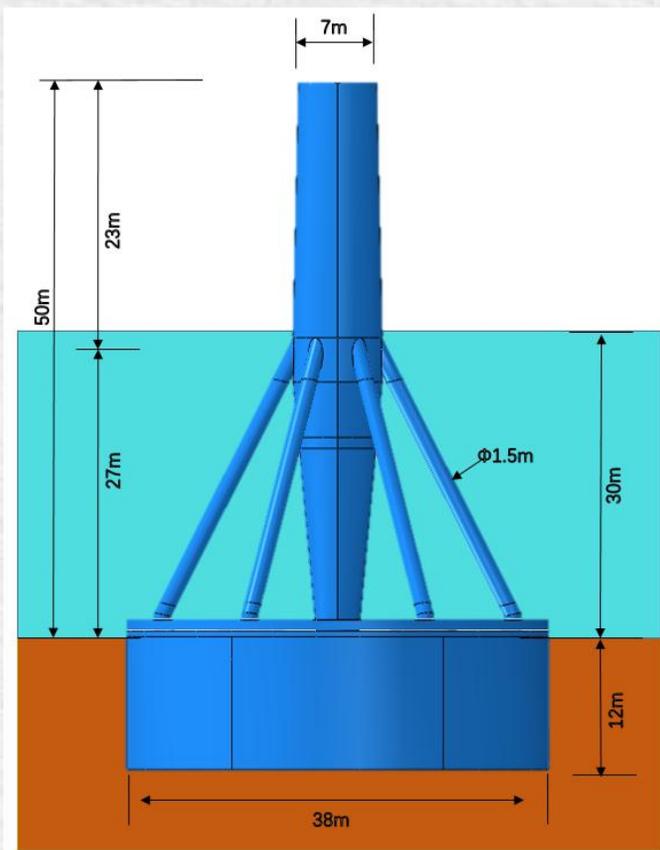
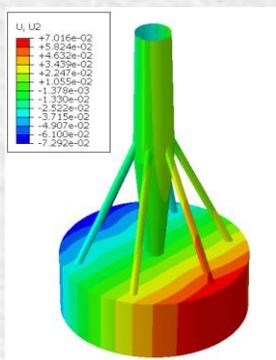
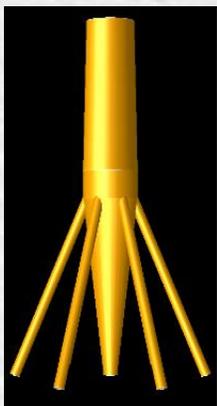


15. 展望

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 15.1 钢制筒



钢质筒型基础 (20-50 m)

- 结构整体均为钢质材料，降低了结构自重及造价；
- 结构受力合理，通过单立柱+斜撑，将上部荷载均匀地传递至筒型基础顶盖，充分发挥了大直径筒型基础顶部主要承载的优势；
- 单立柱+斜撑结构，减小了深水环境下浪流荷载的作用；
- 适用水深范围广（20-50m水深），在软土、砂土、软黏土等地质条件下有较强的适用性。



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

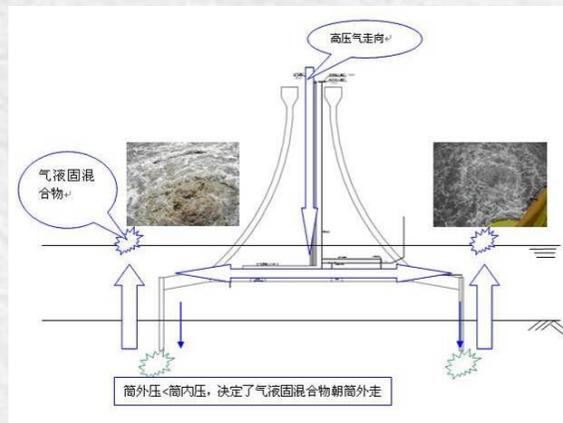


15. 展望

➤ 15.2 混凝土筒壁筒型基础

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活



- 结构整体均为钢筋混凝土材料，提高了基础结构的整体刚度；
- 提出了高压气举破土与负压下沉相结合的方法，解决了大壁厚筒型基础下沉问题。

混凝土筒壁筒型基础
(10-30 m)

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

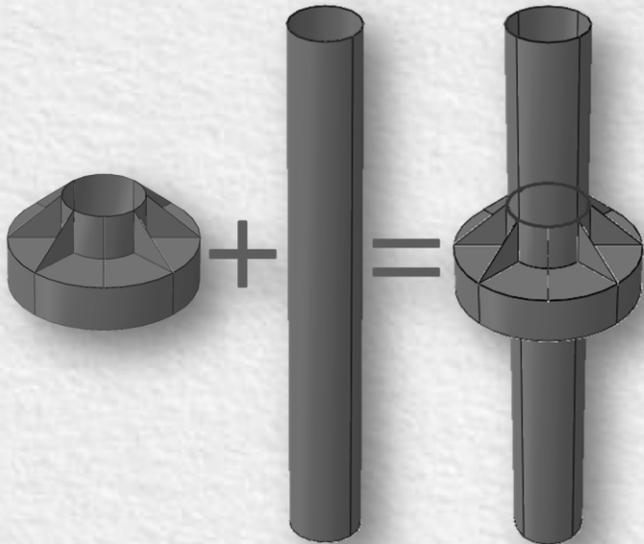


15. 展望

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活

➤ 15.3 复合单桩基础



- **水平荷载**通过桩与筒之间的连接传递给筒型基础，使大部分水平荷载由筒型基础承担。
- **竖向荷载**也有部分传递给筒型基础，由筒型基础竖向抗力承担。
- 在实际工程条件及等用钢量的情况下，桩-筒组合基础极限水平位移、极限竖向位移、泥面处水平位移、基础水平度都比单桩基础明显减低，其中**基础水平度较单桩降低16%**，**泥面处水平位移较单桩减小37%**。



复合单桩基础 (30-50 m)

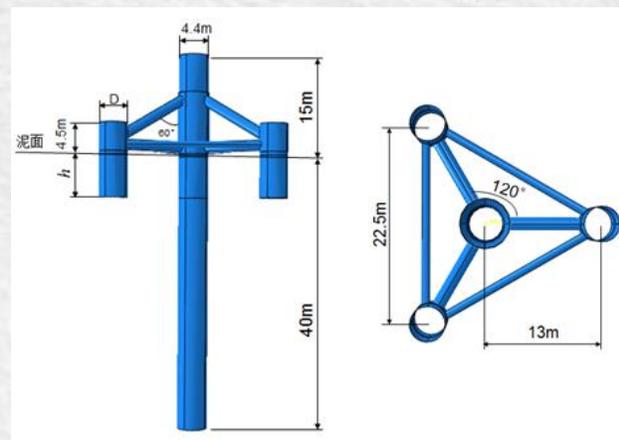
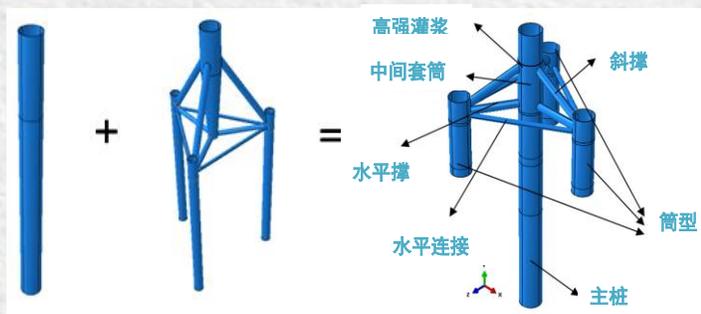
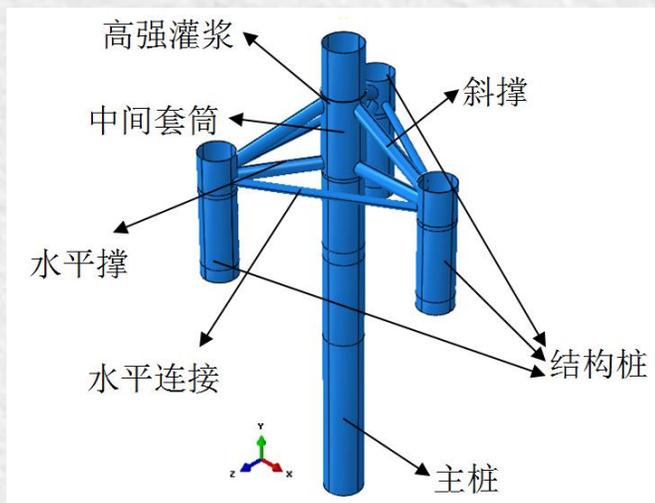


华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

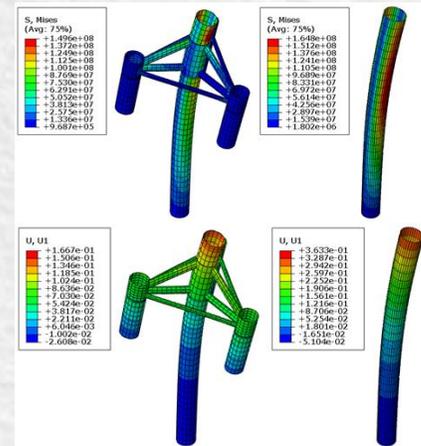


15. 展望

➤ 15.4 复合导管支架式基础



2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



- 与单桩基础相比，导管支架和单桩相结合的新型复合基础受力更加均匀合理。
- 导管支架对复合基础的作用是靠结构桩与土的接触产生的侧摩阻力，进而产生抵消弯矩，减小主桩本身所受弯矩，使得其应力及位移都减小。

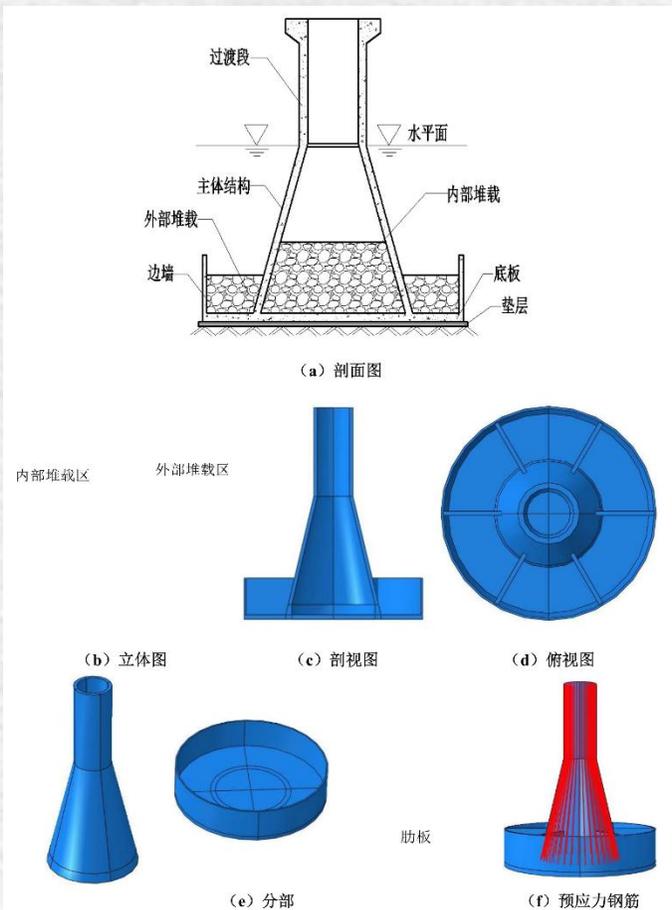
复合导管支架式基础 (30-50 m)

华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

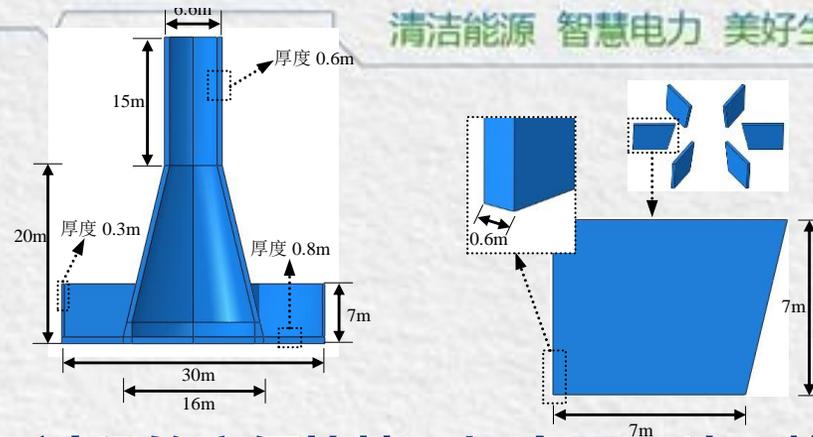


15. 展望

➤ 15.5 可整体浮运重力式基础



2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活



● 为了施工过程的方便快捷，提出了一种可整体浮运重力式基础，该基础结构结合了传统重力式基础与基座式重力式基础的优点，同时具有可整体湿拖浮运的特点，能够实现基础+风机的一体化运输及安装。

● 基础主要由主体结构、过渡段、底板、肋板、边墙、堆载六部分组成。过渡段为重力式基础主体结构和风机塔筒的衔接结构。

可整体浮运重力式基础 (30-50 m)



华电福清海坛海峡海上风电场-六角架浅筒基础方案

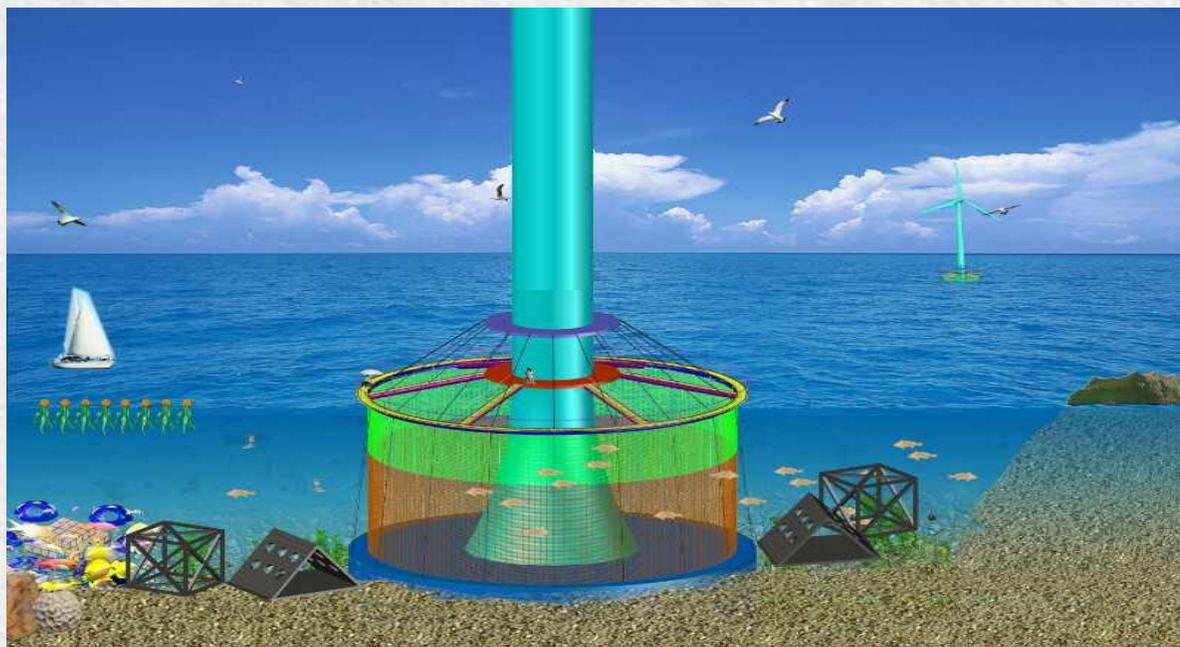


15. 展望

➤ 15.6 其他

2019年中国电机工程学会年会

清洁能源 智慧电力 美好生活



“风光渔游储”发展模式

- 绿色风能、光能与生态渔业、旅游业融合发展
- 依托海上风电，让生态养殖走向深远海



深远海吸力式筒型基础 (30-50 m)



2019年中国电机工程学会年会
清洁能源 智慧电力 美好生活

**感谢各位专家的聆听
敬请各位专家批评指正！**

