"重心可调式工装叶片"在海上 风机叶轮高空整体拆卸中的应用

张成芹,刘玉霞

(中交三航(上海)新能源工程有限公司 上海 200137)

摘要:海上风机叶片发生断裂故障时,通过设计和制作工装叶片,替换断裂叶片,实现海上风机叶轮高空整体拆卸。工装叶片设计重量和重心位置与风机叶片保持一致,替代风机叶片安装后,不 产生额外偏心力矩,对叶轮主轴无不良影响。工装叶片的应用,能够实现使用两台吊机完成叶轮 的拆卸和溜尾翻身,提高风机维修施工的安全性,降低维修成本。文章以工装叶片的应用实例证 明,应用工装叶片能够方便快捷地实现海上风机叶轮高空整体拆卸。

关键词:海上风机;风机叶轮;叶轮高空整体拆卸;重心可调式工装叶片;工装叶片应用

0 引言

海上风电产业已成为我国开发清洁能源的一 个重要新领域,海上风电逐步向风机大型化、叶片 大型化方向发展。海上风机叶轮由叶片和轮毂组 合而成,叶轮中心距海平面高度较高,为90m左 右,叶片长度较长,为60m左右。由于叶轮直径较 大,叶片在工作时受到气动弯曲载荷作用,容易出 现叶片断裂^[1]。发生叶片断裂故障后,需将叶轮整 体拆除,以便进行风机检修和更换断裂叶片。海上 风机叶片断裂的位置和角度具有随机性,叶片断裂 后叶轮重心偏位,偏心力矩造成风机叶轮不能正常 盘车和变桨,给叶轮拆除带来了困难。

为此,风电施工企业对叶轮整体拆卸的方法进 行了探索和实践,通常通过制作平衡梁,利用3台吊 机抬吊实现陆上风电机组叶轮整体拆卸的施工技 术^[2],该方法虽然能够实现叶轮整体拆卸,但存在如 下问题:①叶轮需要盘车至"人字形"位置,叶轮的 盘车位置受到限制;②除了需要配备适于叶轮整体 拆卸时的主吊机外,还需在另外2台溜尾吊机抬吊 另外2叶片实现叶轮整体翻转。

由于海上作业受风、浪、流等环境因素影响较 大,如果完全照搬陆上施工的方法,选择多台自升 式平台施工,却因现场施工船舶站位受限,成本过 高,不宜采用;如果采用自升式平台与2台起重船配 合施工,由于起重船吊重过程中受海况的影响,吊 点不稳定,容易造成二次事故,同时在高空安设溜 尾吊具时风险性较大,容易产生次生危机,所以海 上风机叶轮整体拆卸目前还缺少安全高效的方法。 为了解决海上风机叶轮拆卸的难题,根据风机设备 的特点和船机设备的实际情况,设计制作一种"重 心可调式工装叶片",作为专用工具用于海上风机 叶轮高空整体拆卸。

1 叶轮高空整体拆卸原理

工装叶片用于叶轮高空整体拆卸原理如图1所 示,其过程为:(a)风机叶片断裂示意图;(b)切割叶 尖与叶根连接部分,使叶尖和叶根分离,缓慢将拆 除的叶尖吊离;(c)采用一台吊机将受损叶片的叶根 拆除;受损叶片完全拆除后,剩余2支叶片在重力作 用下产生回转力矩自动回转至"人字形"位置;(d) 采用1台主吊机吊起工装叶片(序号1)与叶轮竖直 对接,在机舱用螺栓将工装叶片安装在叶轮上;由 于工装叶片的重量和重心位置与风机叶片相同,总 长度比风机叶片短,使用现有的自升式平台上的吊 机即可实现工装叶片的安装,且无需专用吊具;(e) 将叶轮盘车至2叶片呈"正Y型"位置,利用主吊 机,将叶根吊带安装在2片向上的叶片上,缓慢提升 使吊带稍带力;使用1台辅助吊机与工装叶片的溜 尾翻身吊点相连,以便辅助翻身;拆除轮毂与发电机 之间螺栓,使轮毂与发电机脱开,即拆下叶轮;(f)叶 轮完成翻身动作,将其缓慢放置在预定位置。



图 1 工装叶片应用于叶轮高空拆卸的原理

2 工装叶片设计原则与构造

为保证工装叶片能够替代风机叶片安装于轮 毂上,工装叶片的设计应遵循以下原则。

(1)总重和重心位置应同风机叶片基本一致, 替代叶片安装于风机叶轮上,在叶轮盘车时,不产 生偏心力矩,对叶轮转轴和风机其他部位的性能无 不良影响。

(2)工装叶片端部为法兰,法兰内外径、安装孔 中心距、安装孔直径与风机叶片端部法兰一致。

(3)配置叶轮翻身吊耳,使用自升式平台上两 台吊机实现叶轮翻身,以达到拆卸目的。

(4)通过设置或增减部分移动载荷,调整工装 重量和重心位置,模拟可拆叶片,以用于不同机型 的叶轮拆卸。

根据以上设计原则设计工装叶片构造如图 2 所示,其主要参数如表 1 所示。工装叶片总重和重心 位置与海上某风场 3 MW 直驱风力发电机组风机叶 片的重量和重心位置基本相同。图 2 中①为根部连 接法兰,与叶片根部法兰完全一致,用于安装于风机 叶轮上;②为桁架结构,一方面可减轻工装叶片的重 量,使重心尽量靠尖部,另一方面便于拉缆风;③为竖 直吊装吊耳;④为筒体;⑤为可调式配重,其内圈与筒 体外圈有一定间隙,能沿着筒体轴向滑动,用于调节 工装叶片重心;⑥为叶轮溜尾翻身辅助吊耳。



图 3 为过渡法兰安装示意图,图 3 中①为工装 叶片连接法兰;②为过渡段法兰,通过设计过渡段, 工装叶片可替代不同机型的叶片。

表 1 工装叶片主要参数(以某型 3MW 机型为例)

总长/m	最大外径/m	总重/t*(可调)	重心位置/m(可调)
30	2.65	14.8	距跟部 18.2



图 3 过渡法兰安装示意图 ①工装叶片连接法兰;②过渡段法兰

3 强度校核

3.1 工装叶片竖直吊装时

3.1.1 吊耳强度校核

工装叶片竖直起吊用吊耳的受力情况如图 4 所示,吊耳所受工装叶片自重 G 为 14 800 kg,吊耳型号 为 Φ 219x8 的 20 # 钢管,其许用应力为[τ]=188 MPa (安全系数取 1.3)。

吊耳的截面积为:

$$S_1 = \frac{3.14 \operatorname{x}(21.9^2 - 20.3^2)}{4} = 5\ 300\ \mathrm{mm}^2$$

吊耳所受剪应力为:

$$\tau_1 = \frac{G}{2x S_1} = 13.96 \text{ MPa} < [\tau]$$



3.1.2 简体结构稳定性校核

筒体结构如图 2 中所示,型号为 Φ1 200 mm×
8 mm,材料为 Q235A,总长 L 为 9 107 mm。

筒体结构 Q235A 钢材压杆的柔度限 值:λp=100

该长杆件的细长比为:

 $\lambda = \frac{\mu L}{i} = \frac{2x9107}{420} = 43.4 < \lambda p$

式中, µ 为压杆长度系数, 对于悬臂梁, 取 2; *i* 为筒体的截面惯性半径。

稳定性满足要求。

3.2 桁架结构弯曲强度校核

3.2.1 工装叶片水平悬臂工况

工装叶片安装于叶轮法兰上,当转到水平位置时,相当于悬臂梁,其距离法兰较近处的结构所受 弯矩最大,需校核桁架结构的弯曲强度,桁架结构 受力见图 5。





桁架主截面如图 6 所示,桁架主弦杆型号为 Φ 219 mm×8 mm,材料为 20 # 钢,主弦杆材料许用 弯曲应力[σ]=188 MPa (安全系数取 1.3)。单根 主弦杆横截面面积 A_0 =53 cm²;单根主弦杆横截面 惯性矩 I_0 = 2 954 cm⁴;组合横截面的形心轴距上 主弦杆中心距离 Z_0 =84.15 cm。

组合横截面的惯性矩为:

 $I_2 = 4I_0 + 4Z_0^2 A_0 = 4 \times 2954 + 4 \times 84.15^2 \times 53$



=1 513 035 cm⁴

组合横截面的截面模量为:

 $W_2 = I_2/(21.9/2 + Z_0) = 1\ 513\ 035/95.1$ = 15 909 cm³

桁架所受弯矩为:

 $M_1 = 14\ 800 \times 10 \times 18.\ 20 = 2\ 693\ 600\ N$ ・m 桁架所受的弯曲应力:

 $\sigma_1 = \frac{M_1}{W_2} = \frac{2\ 693\ 600}{0.\ 015\ 909} = 169.\ 3\ \mathrm{MPa} < \lceil \sigma \rceil$

工装叶片水平悬臂工况,桁架结构满足强度 要求。

3.2.2 叶轮抬吊工况

当叶轮处于图 1 中的(f)状态时,桁架的受力示 意图如图 7 所示,此时桁架受到由抬吊力 F_2 引起 的弯矩, F_2 距桁架端部的距离 L_3 为 29.5 m, F_2 距 叶轮中心的距离 L_2 为 32 m;两叶片根部所受的抬 吊力均为 F_1 , F_1 距叶轮中心的距离 L_1 为 4.2 m; 叶片和工装叶片的重量均为 14 800 kg,轮毂重量为 26 613 kg;主弦杆材料许用弯曲应力[σ]=188 MPa (安全系数取 1.3)。

由于:

 $2F_1 + F_2 = (3 \times 14\ 800 + 26\ 613) \times 10 = 710\ 130\ N$

 $2F_1 L_1 \cdot \sin 30^\circ = F_2 L_2$

求得: $F_2 = 43733N$

桁架所受弯矩为:

 $M_2 = F_2 L_2 = 43733 \times 32 = 1290123$ N•m 桁架所受的弯曲应力:

$$\sigma_2 = \frac{M_2}{W_2} = \frac{1\ 290\ 123}{0.\ 015\ 909} = 88\ \mathrm{MPa} < [\sigma]$$



图 7 叶轮抬吊工况桁架结构受力示意图

应用实例 4

江苏某海上风场某机位风机叶片发生折断,发电 机出现故障,如图 8(a)所示,需将叶轮整体拆下,更换 新叶片,拆除故障发电机和安装新发电机。该风机为 3 MW 直驱式风力发电机组,轮毂中心高度 85 m(距 平均海平面),叶片长度为 59.5 m。由于折断叶片的 角度影响盘车,使用工装叶片实现叶轮整体拆除。

叶轮整体拆卸之前,先拆除折断的风机叶片, 再使用自升式平台的150 t 副钩吊装工装叶片的吊 点,使工装叶片与叶轮竖直对接,螺栓固定,组成完 整叶轮,如图 8(b)所示。

利用风力或吊机进行叶轮盘车至叶片呈"正 Y 型",如图 8(c)所示。

利用自升式平台的1000t主吊机,在叶轮两片 向上叶片上安装叶根吊带,并缓慢提升使吊带稍带 力,拆除轮毂与发电机之间螺栓,缓慢回收1000 t 吊机臂架,增大叶轮与机位间的安全距离,并通过 缆风控制及调整叶轮状态,如图 8(d)所示。

将叶轮吊回自升式平台的甲板至工装叶片的 溜尾吊带可以与自升式平台的 360 t 辅吊进行联 系。降低叶轮至工装叶片下段距离平台甲板面一 定高度,缓慢收紧 360 t 辅吊吊带,使工装叶片受 力,翻转叶轮。叶轮完成翻身动作后,缓慢放置于 象腿工装上,如图 8(e)所示。

结论 5

海上风机叶轮高空拆卸没有先例,工装叶片应





(a)故障风机

(b)安装工装叶片





(c)叶轮盘车至"正Y型"

(d)叶轮整体拆除



(e)叶轮翻身至水平状态 图 8 应用实例

用于海上风机高空叶轮拆卸,不仅减少了风机外部 高空作业风险,而且使用自升式平台船上自有的2 台吊机,能够实现叶轮的高空整体拆卸和溜尾翻 身,无需另配起重船,降低了维修成本,为海上风机 叶轮高空整体拆卸提供了一种新工艺,值得推广 应用。

参考文献

- [1] 杨超,李辉,胡姚刚,等.叶轮不平衡下的风力机自适应独立变 桨控制策略[J].电力系统自动化,2015.39(15):35-41.
- [2] 刘春.风电机组叶轮整体拆卸施工技术[J].基层建设,2017, 02:93-94.

上海地区陆域及近海砂类土 CPT-SPT 相关关系研究

杨靖晖,孟永旭,王浩,宋禹廷

(上海勘测设计研究院有限公司 上海 200434)

摘要:文章结合多个陆域及近海勘察项目,研究分析了上海地区各类砂类土的 P_s-N 相关性。通 过 SPT 修正与不修正击数与 CPT 的关系分析,证实了上海地区标贯击数无需修正。提出的适合 于上海地区砂类土的 P_s-N 经验公式可进一步用于工民建及海上风电天然地基承载力和桩基承 载力的计算。

关键词:砂类土;CPT-SPT 相关关系;标贯修正;P,-N 经验公式

0 引言

标准贯入试验(SPT)和静力触探试验(CPT)是 目前岩土工程和海上风电场勘察中最常用的两种 原位测试方法。对于砂类土,标准贯入试验在试验 中可取样进行室内颗分试验,但是在测量深度及力 学参数计算上有较多限制^[1],成果应用相对困难;静 力触探所获得的数据连续性好,且在上海地区积累 了大量的经验公式,有很强的适用性,但是在密实 砂土中通常难以进行^[2-4]。上海地区大量的工程实 践,积累了丰富的 CPT 和 SPT 试验成果,从中提取 有效数据,建立 P_s与 N 的相关关系。可充分利用 P_s的相关经验公式,使 SPT 得到更广泛的应用。

CPT和 SPT 试验成果因仪器、试验原理等不同,在实际操作中所获得的试验数据常需要经过一定的修正。众多专家学者对 SPT 的修正和相关关系进行了大量的研究,取得了诸多成果。 H.B. Seed、宇都一马、朱小林、冯铭璋等通过试验研究,对 SPT 的 N 值做了杆长修正和上覆土压力修 正^[5-6];高建生、刘均哲等^[7]、刘欣良等^[8]分析了土 性类别、平均粒径、黏粒含量等因素对 SPT-CPT 相 关关系的影响。上海地区经验标准贯入试验击数 无需修正,有必要从 P₅-N 关系中分析其合理性。

通过笔者单位完成的上海地区 58 个岩土工程 和部分海上风电场工程勘察项目共 363 组数据,结 合相关规范^[9-11],分析 P_s与 N 相关关系。

1 数据选取

上海位于长江三角洲东南前缘,地形平坦,河 港密布,境内可分为湖沼平原、滨海平原、河口砂嘴 砂岛、潮坪地带和剥蚀残丘 5 种地貌类型。海域以 滨海和沿海地貌为主。砂类土普遍分布于各种地 貌类型地基土中。本研究选取的数据标本主要来 源于②₃、③₂、⑤₂、⑦₁层。

在实际工程中,同一工程相同位置一般不会同 时进行标准贯入试验和静力触探试验。因此需要 尽量选取相关性较好,相似度足够大的土体试验数 据作为样本。本次选取数据有两类,第一类数据为 各工程的各层砂类土的平均 P_s 值和 N 值,第二类 数据是带深度信息的具体工程某两个孔的 P_s 值和 N 值。第二类数据的选取标准为:①勘探孔间距不 大于 50 m 的相同深度数据作为一组;②同一深度 指 N 值试验深度下对应的相同平均深度的 P_s 平均 值,如,SPT 深度为 40.15~40.45 m,那么 CPT 深 度选取 40.0~40.5 m 的 P_s 平均值。③以工民建项 目数据为主,海上风电场次之。

第一类数据共涉及 58 个工程项目,包含上海地 区⑦1以上大部分砂类土层,共计 102 组;第二类数 据共涉及其中分布在临港、周浦、南汇、崇明、闵行 等区域的 10 个工程的数据,共计 261 组,其中粉细 砂 194 组,砂质粉土 67 组。 2 相关关系研究

2.1 SPT 实测击数 $N 与 P_s$ 的相关性

2.1.1 将第一类数据布于 P_s-N 坐标

将第一类数据直接展布于 $P_s - N$ 坐标中如图 1(a)所示。由图可知,总体上 P_s 与 N 呈良好的线 性关系。按照最不利情况考虑,可通过区域下线 P_s =0.254N-0.9 计算,最有利情况考虑可采取上线 P_s =0.31N+3.40 计算。综合推荐采用 P_s = 0.278N+0.93。

按土性分类线性回归处理可近似得到不同砂 类土 *P*_s-N 相关关系如图 1 中(b)、(c)、(d)所示。 通过固定截距,拟合得到表 2。



耒 1	ㅈᄐ	1 十 性 劢	* + p	— N	北合:	幺幺弌
1X I	~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		• IN	110 - 7	ᅮᅲᆪ

土质	拟合式	R^{2}
砂类土(一般式)	$P_{s} = 0.278N + 0.93$	0.844 6
砂质粉土	$P_{s} = 0.268N + 0.93$	0.817 4
粉砂	$P_{s} = 0.278N + 0.93$	0.7377
粉细砂	$P_{\rm s} = 0.283N + 0.93$	0.823

由图 1 及表 1 可知,总体上 $P_s - N$ 呈良好的 线性关系, R^2 基本可达 0.8 以上,在显著性程度 $\alpha = 0.05$ 时可得 $F = (n-2) \frac{R^2}{1-R^2} \gg F_{0.95}(1,n-2)$; $P_s - N$ 拟合线的斜率随着粒径的增大而略微 增大,变化范围小,总体上斜率值在 0.28 左右。在 工程实际中,通过标贯击数 N 值和静力触探 P_s 值 可以判定砂类土密实度,此两种原位测试手段判别 砂土密实度都具有很强的可靠性。根据相同临界 密实度对应一组相应的 P_{s} 和 N 值^[12],通过固定截 距等于 0.93,将临界的 3 组 P_{s} -N 值代入,所拟合 的 P_{s} -N 图线斜率在 0.294 左右,与以上分析也是 接近的。

2.1.2 将第二类数据布于 P_s-N 坐标

将第二类数据不考虑深度影响按粒径展布于 P_s-N 坐标中,固定线性回归截距为 0.93,查看系数 k 值变化情况以及相关系数,并相对应代入表 2 各式计算偏差。砂质粉土和粉细砂的 P_s-N 相关 关系如图 2 所示,代入拟合式偏差情况如表 3 所示。 由图 2 可知,在 261 组数据量下线性关系明显,可通 过 $F = (n-2) \frac{R^2}{1-R^2} \gg F_{0.95} (1,n-2)$ 的显著性 检验。由表 2 可知,计算偏差平均值基本在 15%以 内,直接用一般式计算时砂质粉土较之粉细砂较 大。故在实际运用中,对于粉细砂建议可直接采用 一般式①计算,而针对 P_s 值较小或者 N 值较小的 砂类土,应根据颗分结果,采用表 1 相应公式进行计 算。对于粒径较小的砂类土,也应根据颗分试验结 果定名后,采用相应计算式。



图 2 部分工程粉细砂 P_s-N 关系

表 2 部分工程不同土性砂类土 P_s-N

拟合关系式计算偏差

土名	样本数	式①	式②	式④
砂质粉土	67	25.04%	14.58%	/
粉细砂	194	12.94%	/	12.85%

2.2 SPT 修正击数 N 与 P, 的相关性

对于标准贯入试验,试验深度的不同意味着杆 长、上覆土压力和水压力的不同,也影响了锤击有 效能量的传导。相比之下,杆长和上覆土压力对 SPT影响较大,专家学者就这两者对 SPT 的影响展 开了大量研究分析。 2.2.1 杆长修正下的 P_s-N 相关关系研究

杆长修正的本质是考虑传输给触探杆的锤击 能量随杆长变化而变化。现国内外对杆长修正问 题的认识有着很大的分歧,主要分为两种。①以牛 顿碰撞理论为基础计算提供的修正,如,《建筑地基 基础设计规范》(GBJ-89)和以此为基础发展的北 京市勘察院修正、水工建筑勘察修正以及日本东海 大学宇都一马修正、日本《桥梁下部构造设计施工 基准》修正、三航院冯铭璋修正等。这类修正总体 上随着杆长的增大,能量损失增大,修正系数逐渐 减小。②以弹性杆件弹性波动理论为基础提供的修 正,如,美国 ASTM(D4633-1988)、ISO 22476-3-2005、同济大学朱小林修正等。这类修正总体上修正 系数随着杆长增大而增大,一般在杆长超过一定值时 (10 m 左右),修正系数取 1,与上者取值规律相反。 由于试验数据的局限性,本研究采取了6种具有代表 性的修正方案来研究杆长对 $P_s - N$ 相关关系的影响 (表 3),代入拟合计算结果(表 4)。

由表 4 可知,杆长修正的理论基础不同,修正趋势也有所差异。修正后所拟合的 P_s-N₁线性关系降低,由 N 反算的 P_s值与试验值偏差有所增加。因此,从统计规律上,N 值在上海陆域及近海相关工程计算中,不作杆长修正更为合理。

提出者	λ		
地质工程手册(数据	$\lambda = 1.2 - 0.163 \ln(L)$		
拟合)			
	$\lambda = 0.000\ 7\ L^2 - 0.032\ 33L + 1.085\ 87,$		
よ て 拘 和	$L < 21 \mathrm{m}$		
小丄规性	$\lambda = 0.000 \ 134 \ L^2 - 0.0158 \ 11L + 0.976$		
	$432, L \geqslant 21 \mathrm{m}$		
东海大学宇都一	$\lambda = 1, L < 20 \mathrm{m}$		
马等	$\lambda = 1.06 - 0.003 L$, $L \geqslant 20 m$		
日本《桥梁下部构造	$\lambda = 1 - \frac{L}{L}$		
设计施工基准》	200		
冯铭璋等	$ λ = α(1 - \frac{L}{200}) $, α 为探杆弯曲耗能修正		
	系数		
100	杆长大于10m不修正,小于10m时修正		
150	系数小于1查表选用		

表 3 杆长修正系数 λ 计算方法

修正方法	$Ps-N_1$ 线性拟合式	相关系数 R ²	反算 P _s 平均 偏差率/%
未修正	$P_{\rm s} = 0.283N + 0.93$	0.823	12.84
地质工程 手册	$P_s = 0.5329 N_1 + 0.575$	0.57	14.41
水工规程	$P_{s} = 0.5844 N_{1} + 0.3315$	0.5639	14.67
字 都 — 马等	$P_s = 0.3233N_1 + 1.0768$	0.5996	13.86
日本桥梁 规程	$P_s = 0.3935 N_1 + 0.8395$	0.5686	14.34
冯铭璋等	$P_{s} = 0.4405 N_{1} + 2.7375$	0.4564	16.83
ISO	$P_{s} = 0.288 N_{1} + 1.5112$	0.6165	13.64

表 4 杆长修正反算 P。偏差

2.2.2 上覆土压力修正下的 P_s-N 相关关系 研究

对采取的数据分别通过 Gibb 和 Holtz(1957)、 Peck 等(1974)、Seed 等(1983)、Skempton(1986)、 ISOB 标准等 6 种修正方案进行修正,对比未修正 数据,按深度范围分段将数据展布于 $P_s - N$ 平面 中以考察深度的影响。土压力修正系数 cN 如表 5 所示。

表 5 上覆土压力修正系数 cN 计算方法一览

提出者	cN
Gibb 和 Holtz(1957)	$c_N = \frac{39}{0.\ 23\sigma'_{V0} + 16}$
Peck 等(1974)	$c_N = 0.77 lg \ (\frac{2000}{\sigma'_{V0}})$
Seed 等(1983)	$c_N = 1 - 1.25 lg(\frac{\sigma'_{V0}}{100})$
Skempton(1986)	$c_N = \frac{55}{0.\ 28\sigma'_{V0} + 27}$
Skempton(1986)	$c_N = \frac{75}{0.\ 27\sigma'_{V0} + 48}$
ISO	$c_N = \sqrt{\frac{98}{\sigma'_{V0}}}$

修正方法	$P_{\rm s}/N_2$ – h	相关系数	反算 <i>P</i> _s 偏
	拟合式	R^{z}	差率/%
未修正	$P_{\rm s} = 0.283 {\rm N} + 0.93$	0.823	12.84
Gibb 和	$P/N_{a} = 0.0184h \pm 0.1777$	0 5277	13 81
Holtz	1 s/1v2 0.0104 <i>n</i> + 0.1777	0.0211	13.01
Peck 等	$P_{\rm s}/N_2 = 0.345 {\rm e}^{(0.014{\rm h})}$	0.3964	13.55
Seed 等	$P_{\rm s}/N_2 = 0.118 {\rm e}^{(0.0625 {\rm h})}$	0.804	18.36
Skempton (1)	$P_{\rm s}/N_2 = 0.374 {\rm e}^{(0.0193 {\rm h})}$	0.556	13.44
Skempton (2)	$P_{\rm s}/N_2 = 0.011h + 0.2496$	0.4208	13.90
ISO	$P_{\rm s}/N_2 = 0.4082 \ {\rm e}^{(0.0117{\rm h})}$	0.3127	13.52

表 6 上覆土压修正反算 P、偏差一览

由表 5 和表 6 可知,当前的上覆土压力修正是 将上覆土压力统一修正到 100 kPa 水平进行考虑, 虽然各种方法不一,但原则上都是在杆长小于 10 m 时对标贯击数进行放大,大于 10 m 时进行折减。 在以上各种方法的上覆土压力修正下,P_s-N 线性 关系愈发离散,呈低度相关,拟合式反算的偏差率 也较之未修正前较大,这样的线性关系是不可靠 的。Seed 上覆土压力修正拟合式相关系数可达 0.804,但反算 P_s的平均偏差率亦可达 18.36%,较 之未修正时的 12.85%高,亦不宜采用。因此,从统 计规律上,N 值不作上覆压力的修正更为合理。

总体可知,在上海陆域及近海,深度修正对 P_s-N相关关系影响不显著。建议在上海地区工 程实践中,可不考虑上覆土压力修正而按照土性直 接采用表2各式作计算。

3 结语

依托笔者单位的工程项目,适当选取数据,通 过合理分组和线性回归方法分析上海地区静力触 探 P_s与标准贯入试验 N 之间的相关关系,共得到 以下结论。

(1)通过 58 个工程,102 组平均数据,分析得到了上海地区近似 P_s-N 相关关系,并将其代入 194

组具体工程数据进行检验,整体适用性良好。

(2) P_s-N 拟合线的斜率随着粒径的增大而增 大,总体上斜率在 0.28 左右,在上海或相似地区,缺 乏试验成果时,可采用表 2 的 P_s-N 经验公式做初 步估算。

(3)分别分析了标贯击数杆长修正和上覆土压 力修正条件下 P_s-N 相关性。修正条件下相关性 更差。上海地区经验不修正是合理的。

(4)以上得到的 P_s-N 经验公式可将 SPT 成 果转化为 P_s值,按照上海市岩土工程勘察规范 (DGJ08-37-2012)表 14.4.4 和 14.5.5 确定陆域 或近海项目的天然承载力计算和桩基承载力计 算中。

参考文献

- [1] 杨文卫,岳中琦,世界各地标准贯入试验比较和共同问题.工程 勘察 2008;(1):5 - 15
- [2] 于吉求,沈慧珍等.用静力触探法评价饱和砂土地震液化问题. 四川建筑科学研究 1979;(8):
- [3] 刘松玉,吴燕开.论我国静力触探技术(CPT)现状与发展.岩土 工程学报 2004;26(4):553—556
- [4] 王偲,于彥江,寇贝贝.海洋原位试验方法综述[J].海洋开发与 管理,2017,34(1):81-86.
- [5] 袁钟,李思源,申伯熙.标准贯入试验的应用及贯入击数的影响 因素[J].港工技术,2002(4):50-52.
- [6] 周瑞林,贾向荣,刘京红.对标准贯入试验中杆长修正问题的探 讨[J].西部探矿工程,2006,18(7):12-14.
- [7] 高建生,刘哲钧.SPT 和 CPT 的相关关系分析[J].工业建筑, 1993(5):35-37.
- [8] 刘欣良,黄志宏,任亚群,等.SPT-CPT 相关关系及影响因素 分析[J].科学技术与工程,2012,12(28):7443-7448.
- [9] 上海市岩土工程勘察设计院.DGJ08-37-2012 上海市岩土工 程勘察规范[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2012.
- [10] 《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册(第四版)[M].北 京:中国建筑工业出版社,2007.
- [11] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范:GB50021-2001 [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [12] 邢皓枫,徐超,石振明.岩土工程原位测试[M].上海:同济大 学出版社,2005.