

海洋工程中灌浆连接段若干规范比较

王衔¹, 陈涛^{1*}, 赵淇¹, 元国凯²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 灌浆连接是海洋工程中最常用的连接方法之一。文章比较了其适用的五部规范及推荐做法: 英国健康与安全执行局《海上结构桩与套管连接技术报告(HSE-Pile/sleeve connections—2001)》, 美国石油协会《海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法(API RP 2A-WSD—2007)》, 国际标准化组织《石油和天然气行业固定海上钢结构规范(ISO 19902—2007)》, 挪威的石油技术法规《钢结构设计规范(NORSOK-N-004—2013)》, 挪威船级社《海上风机结构设计规范(DNV-OS-J101)》, 给出了上述规范的验算方法及适用范围。由于灌浆连接段在使用中的受力形式不断复杂化, 本文进一步研究了规范《DNV-OS-J101》的发展历程, 为该行业的设计人员理解该规范验算方法概述及适用范围的发展提供了帮助。

关键词: 海洋工程; 灌浆连接段; 规范比较; 验算方法; 适用范围; 发展历程

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)01-0086-05

Comparison of Several Design Specifications for Grouted Connections in Marine Engineering

WANG Xian¹, CHEN Tao^{1*}, ZHAO Qi¹, YUAN Guokai²

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The grouted connection is one of the mostly commonly used joint in marine engineering. This paper compares five specifications or recommended practice used for design of grouted joint in offshore wind turbines foundation. They are Offshore Technology Report from UK Health & Safety Executive (HSE-Pile/sleeve connections-2001); Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design from American Petroleum Institute (API RP 2A-WSD—2007); Petroleum and natural gas industries —Fixed steel offshore structures from International Standard (ISO 19902—2007); Design of steel structures from NORSOK STANDARD (NORSOK-N-004—2013) and Design of Offshore Wind Turbine Structures from Det Norske Veritas(DNV-OS-J101). The outline of the checking method and the applicable scope of the specification or recommended practice above is summarized. Furthermore, because of the increasing complexity of the loading condition for grouted connections, this paper gives a development process of DNV specifications, which could help designers to understand the evolution of this specifications in its checking method and applicable scope.

Key words: marine engineering; grouted connections; comparison between specifications; checking method; applicable scope; development process

灌浆连接作为海洋工程中最为常见的连接形式

之一, 被大量应用于结构的连接及节点的补强中。灌浆连接的方式较早可追溯到上世纪 60—70 年代的海上石油平台中, 用于海上石油平台与其桩管之间的连接^[1]。随后在海洋石油平台工程中, 灌浆连接的形式有了进一步发展, 产生了如灌浆套筒连接^[2]、T 形圆管灌浆节点^[3]等结构补强形式。

海上风机基础中上部结构与桩管的连接是灌浆连接得到应用的又一重要领域, 这方面的研究成果

收稿日期: 2016-01-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划): (2015CB057700)

作者简介: 王衔(1991), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要从事海上风机基础灌浆连接段受力疲劳性能研究(e-mail)91wangxian@tongji.edu.cn。

* 通讯作者: 陈涛(1980), 男, 安徽合肥人, 副教授, 博士, 主要从事结构疲劳性能研究(e-mail)t.chen@tongji.edu.cn。

和工程应用较为丰富, 在此不做列举。此外, 灌浆连接的方式还在海洋运输管道的锈蚀修补方面得到了应用^[4]。

除上述应用以外, 在海洋工程领域灌浆连接段还有许多应用形式, 在此不再一一列举。总的来说, 灌浆连接所连接的钢管在向更大的直径厚度比(薄壁管构件)方向发展, 所使用的灌浆材料也从早期使用的普通混凝土向更为复杂的膨胀混凝土或具有超高强度、高模量的高性能灌浆材料方向发展。灌浆连接段的形式也从原有的直立圆柱形向更丰富的形式(如圆台形)发展。

1 规范关于灌浆连接段验算的比较

如前所述, 灌浆连接段较早出现在海洋石油平台中, 因此早期的灌浆连接段规范一般只能适用于海上石油平台中, 其主要受力形式是承受轴向荷载, 而基本没有弯矩作用, 在随后出现的海上风机基础中, 导管架结构基础与海洋石油平台最为接近。然而海上风机基础中所使用的灌浆连接段的受力形式则更为复杂; 这是由于其上部结构承受风荷载作用, 并向下部基础传递, 同时下部结构承受海浪作用, 故而基础灌浆连接段承受风浪荷载的耦合

作用, 必须考虑弯矩的影响, 这在单桩结构基础中尤为明显; 同时由于风浪荷载的时变性, 在 20 年的服役期内灌浆连接段会承受多达 10^9 次疲劳荷载, 对疲劳性能要求较高。因此, 海上风机基础灌浆连接段应进行轴力与弯矩耦合下的极限强度状态和疲劳极限状态验算。

各规范适用的基础类型及荷载状况如表 1 所示, 而各规范适用的几何尺寸及材料参数如表 2 所示。应当注意的是表 2 给出的各规范的几何尺寸及材料参数适用范围绝大多数并不是通过分析得到或具有明确的物理含义, 仅仅代表了确定规范的试验时所包含的范围^[5]。

英国健康与安全执行局(HSE)《海上结构桩与套管连接技术报告^[6]》采用了“标准粘结强度”的概念用于灌浆连接段轴向承载力的验算, 认为轴向承载力是钢管与灌浆材料较小接触面的面积与标准粘结强度的乘积。在标准粘结强度公式中综合考虑了钢管和灌浆材料的直径与厚度比值及两种材料弹性模量比值的影响, 引入了径向刚度 K 这一参数, 并被以后的多部规范^[8-10]所采用; 但是该报告无法考虑弯矩的作用, 且如表 2 所示, 报告要求灌浆连接段长度与内部桩管的直径的比值需要大于等于 2,

表 1 各规范适用的基础类型及荷载状况

Table 1 Ranges of Application for Load Condition and Grouted Connection Type in Different Specifications

规范或推荐做法	基础类型	剪力键	灌浆段形状 (圆柱/圆台)	可进行的验算	其他验算	备注
HSE(2002)	导管架	有/无	圆柱	极限强度	轴力	—
API(2007)	导管架	有/无	圆柱	极限强度	轴力	提及除轴力外的荷载需要妥善分析, 未给出具体方法
ISO(2007)	导管架	有/无	圆柱	极限强度	轴力 + 扭矩	早龄期损失; 简单的疲劳评估
NORSOK(Rev. 2013)	导管架	有/无	圆柱	极限强度	轴力 + 扭矩 弯矩 + 剪力	浆体内加筋的要求
				疲劳极限	轴力 + 弯矩 扭矩	
DNV-OS-J101 (2014)	单桩	无	圆柱	极限强度	剪力 + 弯矩	概述: 早龄期损失; 磨损概述; 有限元计算方法概述; 灌浆施工
		有	圆台 圆台/圆柱	极限强度 疲劳极限	扭矩 + 弯矩 + 轴力 + 剪力 概述性 $S-N$ 曲线	
	有	圆柱	极限强度 疲劳极限	弯矩 + 轴力 + 安装误差修正 扭矩		
		圆柱	极限强度 疲劳极限	明确的 $S-N$ 曲线 剪力 + 弯矩 轴力 明确的 $S-N$ 曲线		

表2 各规范适用的几何尺寸及材料参数范围

Table 2 Application Limits for Geometric and Material Parametric Equations in Different Specifications

参数	HSE (2002)	API (2007)	ISO (2007)	NORSOK (Rev. 2013)	DNV-OS-J101 (2014)	
					单桩灌浆段 (TP 在桩外为例)	导管架灌浆段 (后桩为例)
桩径厚比	$24 \leq D_p/t_p \leq 40$	$D_p/t_p \leq 40$	$20 \leq D_p/t_p \leq 40$	$20 \leq D_p/t_p \leq 40$	$10 \leq D_p/t_p \leq 30$	$10 \leq D_p/t_p \leq 30$
套管(过渡段)径厚比	$50 \leq D_s/t_s \leq 140$	$D_s/t_s \leq 80$	$30 \leq D_s/t_s \leq 140$	$30 \leq D_s/t_s \leq 140$	$9 \leq D_s/t_s \leq 70$	$15 \leq D_s/t_s \leq 70$
浆体径厚比	$10 \leq D_g/t_g \leq 45$	$7 \leq D_g/t_g \leq 45$ $t_g \geq 38 \text{ mm}$	$10 \leq D_g/t_g \leq 45$ $t_g \geq 40 \text{ mm}$	$10 \leq D_g/t_g \leq 45$	—	$10 \leq D_g/t_g \leq 45$ (推荐)
浆体强度 (MPa)	—	$17.25 \leq f_{cu} \leq 110$ $f_{cu} \cdot h/s \leq 5.5$	$20 \leq f_{cu} \leq 80$	$20 \leq f_{cu} \leq 80$	—	—
灌浆连接段长度	$L/D_p \geq 2$	—	$1 \leq L_c/D_p \leq 10$	$1 \leq L_c/D_p \leq 10$	$1.5 \leq L_g/D_p \leq 2.5$ (推荐)	$1 \leq L_g/D_p \leq 10$ (推荐)
高度	$0 \leq h/D_p \leq 0.006$	—	$0 \leq h/D_p \leq 0.012$	$0 \leq h/D_p \leq 0.012$	$h \geq 5 \text{ mm}$	$h \geq 5 \text{ mm}$
间距	$0 \leq D_p/s \leq 8$	$D_p/s \leq 8$	$D_p/s \leq 16$	$D_p/s \leq 16$	$s \geq \sqrt{R_p t_p}$	$s \geq 0.8 \sqrt{R_p t_p}$
剪力键高度/间距	$0 \leq h/s \leq 0.04$	$h/s \leq 0.1$	$0 \leq h/s \leq 0.1$	$0 \leq h/s \leq 0.1$	$h/s \leq 0.1$	$h/s \leq 0.1$
形状	$1.5 \leq w/s \leq 3$	$1.5 \leq w/s \leq 3$	$1.5 \leq w/s \leq 3$	—	$1.5 \leq w/s \leq 3$	$1.5 \leq w/s \leq 3$

*注:关于灌浆连接段长度的符号: L 代表灌浆连接段的全长; L_c 和 L_g 均表示灌浆连接段的有效长度,只是各规范符号定义不同

而在现阶段实际应用中,此条件很难满足。同时,现阶段海上风机中灌浆连接段具有钢管大径厚比(径厚比约在 60~100)的特点,这使得现阶段灌浆连接段的设计验算方法难以满足该报告对钢管径厚比的要求。

美国石油协会(API)《海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法^[7]》对于轴向承载力的计算也采用了与 HSE 报告相同的概念,即认为轴向承载力等于允许传递应力值乘以接触面面积,同时采取更加经验的无剪力键灌浆连接段允许传递应力值,此值与几何参数和材料性能无关,为一定值;当布置剪力键时,该规范允许传递应力值再加上剪力键部分的贡献,使用剪力键高度与间距的比值 h/s 这一参数表示剪力键部分的贡献。规范提出的灌浆材料单轴抗压强度适用范围为 $17.25 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 110 \text{ MPa}$,而现阶段在灌浆连接段中广泛使用的高强灌浆材料强度已经远超出 110 MPa ;此外如表 1 所述,规范中虽然提到除轴力之外的其它荷载形式需要进行合理的分析及测试,但未给出具体的设计方法。

国际标准化组织(ISO)《石油和天然气行业固定海上钢结构规范^[8]》考虑了轴力与扭矩的叠加,二者的计算均假设应力均匀分布,并且采用矢量叠加的方式计算组合应力,设计中应满足矢量和应力值小于灌浆材料与钢管接触面应力传递强度。值得注意的是此规范提出的接触面应力传递强度的计算方法,对应于两种不同的可能破坏模式,定义了两

种接触面应力传递强度值,分别是摩擦滑动决定的强度 $f_{g,sliding}$ 和灌浆材料本身破坏决定的强度 $f_{g,shear}$,取二者的较小值作为接触面应力传递强度代表值 f_g 。其中 $f_{g,sliding}$ 由灌浆材料强度、剪力键高度与间距比和灌浆连接段的径向刚度 K 决定。而 $f_{g,shear}$ 只由灌浆材料强度和剪力键高度与间距比决定。此后的 NORSOK^[9] 及 DNV-OS-J101^[10] 规范沿用了这种接触面强度的定义。此外,本规范仍有许多可借鉴之处,如:考虑到灌浆连接段端部的不确定性,提出了“有效灌浆连接段长度”概念,并在规范^[9-10] 得到了沿用;规范附录中定义的“早龄期循环”概念也在规范^{[3],[8]} 得到了沿用。但是,ISO 规范仍无法考虑弯矩作用的情况,且与 API 规范相似,规范限制了灌浆材料单轴抗压强度的适用范围为 $20 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 80 \text{ MPa}$ 。

挪威的石油技术法规(NORSOK)《钢结构设计规范^[9]》沿用了 ISO 规范对于轴力和扭矩联合作用下的灌浆连接段的相关计算,并在此基础上,增加了弯矩和剪力联合作用下灌浆连接段底部压应力值的验算,以防止灌浆材料在接触压力和摩擦力共同作用下,内部出现过大大拉应力而发生开裂。但此规范的适用范围是海上石油平台灌浆连接段,涉及“軀板位置”等概念,使其运用到其他领域的灌浆连接段设计验算中具有一定的难度;然而此规范是极少数提出弯矩作用下灌浆连接段验算的规范之一,仍对复杂受力形式下灌浆连接段的设计有巨大的借

鉴意义。此外本规范还首次提出了对如下荷载情况下的钢管与灌浆材料接触面剪应力(压应力)进行疲劳极限状态的验算: 轴力和交替弯矩联合作用, 反复弯矩和剪力联合作用, 以及反复扭矩作用; 但此规范验算方式与常用规范不同, 并未给出疲劳荷载下的 $S-N$ 曲线, 而是需要设计人员提供“100 年一遇环境作用弯矩 $M_{p, Env, Sd}$ 、100 年一遇环境作用的设计扭矩 $M_{t, Env100, Sd}$ ”, 其实质是将疲劳问题转化成等效静力作用下的应力值的验算。

挪威船级社 (DNV) 《海上风机结构设计规范^[10]》在总的概述中, 明确了其适用范围: 专门针对海上风机中圆柱形单桩基础、圆台形单桩基础和圆柱形导管架基础的灌浆连接段; 指出单桩灌浆连接段有无剪力键均可, 但承受轴力时需要设置剪力键或做成圆台形, 且不可做成圆台形的同时设置剪力键; 增加了对导管架基础的设计验算方法, 明确导管架灌浆连接段应当设置剪力键, 并将其分成先桩法和后桩法导管架基础, 对应不同的设计方法, 但实质上这两种灌浆连接段的设计方法完全相同, 如图 1 所示, 可以认为将先桩法导管架灌浆连接段上下颠倒即得到后桩法灌浆连接段。如表 1 所示, DNV 规范对极限强度状态下每一种结构形式的不同类型灌浆连接段的不同荷载状况的相关验算进行了详细分类, 并给出了灌浆材料的 $S-N$ 曲线以及不同类型灌浆连接段构件的疲劳极限状态的 $S-N$ 曲线, 基本满足了现阶段海上风机基础灌浆连接段在

复杂受力状态下进行设计验算的需要。但是值得注意的是, 规范中给出的构件 $S-N$ 曲线较为保守, 一般只可作为满足设计要求, 并不能准确的预估灌浆连接段构件的疲劳寿命。

2 DNV 规范发展历程

如前所述, 最新版 DNV-OS-J101 (后简称 DNV) 规范^[10]已可基本满足海上风机基础中灌浆连接段在负载受力状态下的设计验算工作, 然而其发展也经历了几个较为明显的阶段。

DNV 规范经历了如下几个主要版本的发展: 04-06^[11](2004 年 06 月版本, 后含义相同)、07-10^[13]、10-10^[17]、11-09^[18]、13-01^[20]、14-05^[10] 版本, 其中 04-06 版本在 2005 年 04 月(后简称为 05-04^[12])进行了修订; 07-10 版本分别在 08-10^[14]、08-12^[15]、09-11^[16]进行了三次修订; 10-10^[17]版本是为了配合 DNV 所有电子版规范的出版发行而推出的, 其内容与 09-11 版本完全相同; 11-09 版本在 11-10^[19]进行了修正; 13-01 版本因为页眉日期的错误在 13-02^[21]推出了勘误版本。

根据各版本规范章节“Sec9. 灌浆连接段设计建造”的内容是否做出调整, 可将各版本 DNV 规范划分成如表 3 所示的 4 个阶段, 现简要说明各阶段设计验算方法。

阶段 1 对轴力和扭矩联合作用下灌浆连接段的

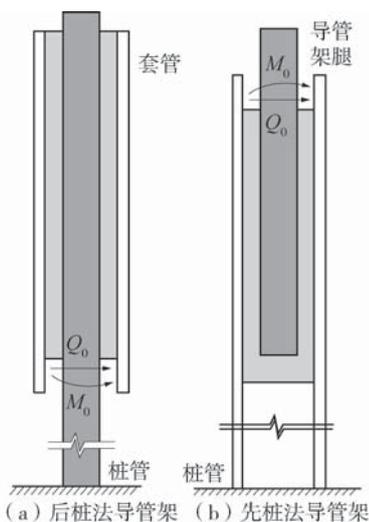


图 1 典型导管架基础灌浆连接段
Fig. 1 Grouted Connection in Jacket Structure

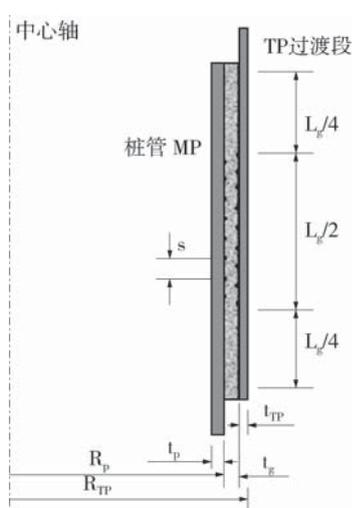


图 2 单桩灌浆连接段剪力键布置^[3]
Fig. 2 Arrangement of Shear Keys in Monopile Grouted Connection

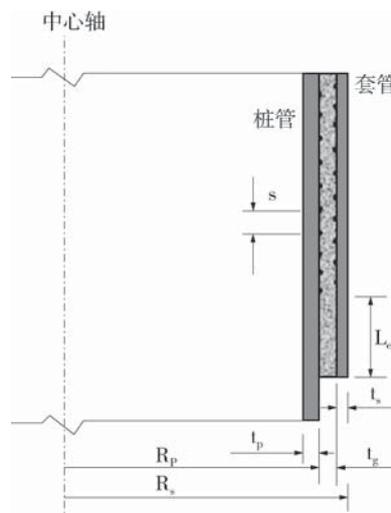


图 3 后桩法导管架灌浆连接段剪力键布置^[3]
Fig. 3 Arrangement of Shear Keys in Jacket Structure with Post-installed Pile

表3 各版本 DNV 规范适用的基础类型及荷载状况

Table 3 Application Limits for Different Versions of DNV Specifications for Type of Grouted Connection and Load Condition

序号	版本或修订	基础类型	剪力键	灌浆段形状 (圆柱或圆台)	可进行的验算	其他验算	
1	04-06 ~ 08-12	未明确	有/无	圆柱	极限强度 疲劳极限	轴力+扭矩 引用 FIB/CEB 报告 SR90/1 中高强混凝土 S-N 曲线	弯矩+剪力荷载下的概述 以及有限元建模要求; 材 料参数; 灌浆段施工要求
2	09-11 ~ 10-10	未明确	有/无	圆柱	同上	同上	同上; 且增加无剪力键圆 柱形和圆台形灌浆段轴向 承载力利用率的规定; 明 确摩擦系数不可超过 0.4
3	11-09 ~ 13-02	单桩	无 无 有 有/无	圆柱 圆台 圆柱 圆柱/圆台	极限强度 极限强度 极限强度 疲劳极限	剪力+弯矩 扭矩+弯矩+轴力+剪力 轴力+扭矩+无明显弯矩 概述性的 S-N 曲线	磨损概述; 有限元计算方 法概述; 灌浆施工概述
4	14-05				同表 1		

设计验算方法与 ISO 规范基本相同, 只是两种接触面强度值的定义和计算方法不同, 在此不做赘述。

然而阶段 1 版本的 DNV 规范的准确性却遭到了实践的质疑, 如文献^[22]所述, 经过此规范设计的已建成海上风机基础无剪力键灌浆连接段在 2009—2010 年出现了大量滑移破坏病害。故在 09-11 版本规范变更说明中有: DNV 已经明确现有的规范不能完全反映实际灌浆连接段的物理状态, 会高估其轴向承载力; DNV 已经开始进行试验研究, 在得到研究成果并发布新版本的规范以前, 需要对每一灌浆连接段都进行具体分析以保证安全^[16]。并且在 Sec. 9 的概述中, 增加了对轴向承载力利用率的规定, 明确摩擦系数不可超过 0.4, 如表 3 所示。

应当明确这种规定只能起到暂时性作用, 根据文献^[5], 若满足上述规定, 则灌浆连接段长度需要达到直径的 30~45 倍, 这显然无法在实践中运用。

2009 年 11 月至 2011 年 2 月, DNV 对大直径无剪力键灌浆连接段的承载力进行了试验研究, 得到研究报告^[23], 并将研究成果写进了 11-09 版本规范, 明确了此规范只针对单桩基础灌浆连接段设计, 导管架灌浆连接段设计需参考 NORSOK 规范; 给出了无剪力键圆柱形及圆台形灌浆连接段抗弯承载能力, 以及圆台形灌浆连接段对轴力和扭矩的承载能力的验算方法, 而对有剪力键圆柱形灌浆连接段轴力和扭矩承载力的验算仍沿用以前版本, 并注明此情况只在无明显弯矩的条件下成立; 然而此规定显然与实际单桩基础灌浆连接段受力形式不符, 因而

此版本规范仍不能完全满足设计人员使用的需要。

为解决 11-09 版本规范的不足, DNV 在 2011 年 2 月至 2012 年 5 月, 进行了新一轮灌浆连接段性能试验研究^[23], 重点研究带剪力键灌浆连接段的抗弯性能; 同时, 2007—2011 年, 德国劳氏船级社 (GL) 联合德国汉诺威大学针对灌浆连接段受力性能分两阶段开展了一系列试验研究^[22]; 2013 年 9 月, GL 和 DNV 正式合并为 DNV? GL, 两方的研究成果得以汇总, 为最新版 DNV 规范^[10]的制定奠定了基础。对最新版本规范的概述已经如前文所示, 后文只简述此规范中的重要变化。

对单桩基础, 在沿用前一版无剪力键灌浆连接段相关设计验算方法的同时, 废除了只承受轴力和扭矩而无明显弯矩作用的有剪力键圆柱形灌浆连接段的相关内容, 明确了这类灌浆连接段承在弯矩作用下的理论受力机理和承载力计算方法; 规定了此类灌浆连接段中剪力键必须排布在灌浆连接段的中间部位, 如图 2 所示。同时, 增加了有剪力键灌浆连接段相对倾斜安装误差的计算公式和整体错位误差的说明, 并引用了 ISO 规范^[8]提出的两种接触面强度的计算方法。值得注意的是, 前文中的所有剪力键都为水平剪力键, 而规范^[10]为考虑灌浆连接段承受扭矩作用, 在灌浆连接段内增加了竖向剪力键, 并给出了相关计算公式。在参数方面, 重要参数的变动如下: (1) 有剪力键的灌浆连接段规定灌浆材料和钢管接触面摩擦系数由 0.4 变更为 0.7, 而无剪力键灌浆连接段摩擦系数维持 0.7 不变;

(2) 钢管与灌浆材料之间接触压应力的限值从 1.2 MPa 提高为 1.5 MPa。

在新增加的导管架基础相关验算中, 对于后桩法导管架灌浆连接段, 规范明确了套管 (sleeve) 直径大于桩管直径, 即桩管在套管内, 如图 3 所示; 因剪力键易引起应力集中, 导致灌浆材料的开裂, 故灌浆连接段下部受明显弯矩作用影响的 $l_e/2$ 区段内不宜布置剪力键。对先桩法导管架基础, 规范明确了桩腿 (Jacket-leg) 直径小于桩管; 同样, 由于剪力键附近的应力集中, 灌浆连接段上部受明显弯矩作用影响的 $l_e/2$ 区段内不宜布置剪力键, 其中 l_e 为弹性长度, 其概念来源于温克尔弹性地基的相关理论^[24]。

在疲劳极限状态的设计中, 新增了对带剪力键的圆柱形灌浆连接段疲劳问题的概述, 可适用于单桩和导管架中带剪力键的灌浆连接段; 并结合有剪力键的单桩和导管架灌浆连接段的极限强度状态验算, 分别增加了对应的 $S-N$ 曲线, 为疲劳设计提供了有效依据。

3 结论

由于我国对灌浆连接段的设计验算尚无较为明确的设计规范, 仍需参考国外的相关设计理论。故本文比较了灌浆连接段设计验算中适用的五部规范及推荐做法, 并进一步研究了 DNV 规范的发展历程, 可以得到如下的结论:

1) 早期在海洋石油平台中的灌浆连接段主要受轴力和扭矩的作用, 受力形式较为简单, 因而规范的验算方法也比较简单, 随着灌浆连接段应用的推广, 更加复杂的结构形式和受力形式也使得规范对其验算方法更加精细, 规范的适用范围也进一步扩大。

2) 最新版 DNV 规范^[10] 结合了最新的试验和理论研究成果, 为复杂受力条件下的灌浆连接段抗弯承载力的设计验算提供了最新的方式和手段。因此荷载以弯矩为主的灌浆连接段应当主要参考此规范; 而以轴力为主要荷载的灌浆连接段可在适用范围允许条件下, 综合参考上述五部规范及推荐做法。

3) 最新版 DNV 规范^[10] 给出的灌浆连接段抗弯承载力验算公式具有理论基础, 但在公式的理论推导验算中引入了较多的人为假定以简化计算, 其可

靠性有待进一步的实践验证。

4) 目前 DNV 规范是世界范围内认可度较高的规范之一, 有较高的借鉴价值; 但是应当注意的是其系列规范会不断结合最新的研究成果, 故更新速度较快, 需要设计人员不断更新已有知识。本文讨论的 DNV 规范发展历程, 可为复杂受力状态下灌浆连接段的相关设计人员加深对该规范的理解提供帮助。

参考文献:

- [1] BILLINGTON C J, LEWIS G H G. The Strength of Large Diameter Grouted Connections[C]//Offshore Technology Conference, 1978.
- [2] BOSWELL L F, D'MELLO C. The Fatigue Strength of Grouted Repaired Tubular Members[C]//Offshore Technology Conference, 1986.
- [3] ETTERDAL B, ASKHEIM D, GRIGORIAN H, et al. Strengthening of Offshore Steel Components Using High-strength Grout: Component Testing and Analytical Methods[C]//Offshore Technology Conference, 2001.
- [4] LEONG K H, LEONG A Y L, RAMLI S H, et al. Testing Grouted Sleeve Connections for Pipelines Repairs[J]. Portugal: IRF, 2009.
- [5] WILKE F. Load Bearing Behaviour of Grouted Joints Subjected to Predominant Bending[M]. Shaker, 2013.
- [6] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE. Pile/sleeve Connections: Offshore Technology Report[R]. England: Her Majesty's Stationery Office, St Clements House, 2-16 Colegate, Norwich NR3 1BQ, 2002.
- [7] API RP 2A-WSD (ERRATA AND SUPPLEMENT 3). API Recommended Practice: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-working Stress Design[S]. 2007.
- [8] ISO 19902: 2007 (E), Petroleum and Natural Gas Industries-Fixed steel offshore structures[S]. 2007.
- [9] NORSOK-N-004, NORSOK STANDARD: Design of steel structures Rev. 3[S]. 2013.
- [10] DNVS-OS-J101, Det Norske Veritas; Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2014.
- [11] DNVS-OS-J101, Det Norske Veritas; Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2004.
- [12] DNVS-OS-J101, Det Norske Veritas; Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2005.
- [13] DNVS-OS-J101, Det Norske Veritas; Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2007.
- [14] DNVS-OS-J101, Det Norske Veritas; Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2008.

(下转第 95 页 Continued on Page 95)

针对目前海外项目的具体情况, 由于设计合同的约定, 在运用规范时应在中美规范中按更高的要求选用。而作为工程总承包方, 设计院又往往面临尽量降低成本的巨大压力。鉴于此, 在满足结构安全适用性的前提下, 本文对海外电站项目钢结构的防火设计提出如下建议:

1) 针对主厂房(包括燃机房、汽机房等), 建议按照 NFPA 850 的要求执行, 不可燃物受到防火保护的前提下, 可不对整个结构进行防火涂装, 而是根据《火力发电厂与变电站设计防火规范》, 对主油箱附近构件和电缆夹层的承重结构进行规定小时数的防火涂装。

2) 针对集控楼, 建议按照 NFPA 5000 里关于建筑物层数、面积、灾害等级等特征决定具体耐火极限小时数, 进而确定梁、柱、楼板的具体时限要求。

3) 针对电厂其他建构筑物, 如栈桥、转运站

等, 建议按照 NFPA 850 和《火力发电厂与变电站设计防火规范》的要求执行, 不对整个结构进行防火涂装。

参考文献:

[1] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
 [2] GB 50016—2006, 建筑设计防火规范[S].
 [3] GB 50229—2006, 火力发电厂与变电站设计防火规范[S].
 [4] ROGER L, BROCKENBROUGH, FREDERICK S. Merritt. 美国钢结构设计手册[K]. 上海: 同济大学出版社.
 [5] ASTM E119: Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Material[S].
 [6] NFPA 5000: NFPA 5000® Building Construction and Safety Code® 2009 Edition[S].
 [7] NFPA 850: NFPA® 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations 2010 Edition[S].

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 91 页 Continued from Page 91)

[15] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2008.
 [16] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2009.
 [17] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2010.
 [18] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2011.
 [19] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2011.
 [20] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2013.
 [21] DNV-OS-J101, Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures[S]. 2013.
 [22] KLOSE M, AMOL Mulve, MARC Mittelstaedt. Grouted Connections-offshore Standards Driven by the Wind Industry[C]// The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012.
 [23] LOTSBERG I, BERTNES H, LERVIK A. Joint Industry Project-capacity of Cylindrical Shaped Grouted Connections with Shear Keys[R]. Norway: Technical Report No. 2011 - 1415, Rev. No. 05. Det Norske Veritas, 2012.
 [24] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.

(责任编辑 黄肇和)

(下转第 114 页 Continued from Page 114)

[6] 汪猛, 容浩. 小议 IEC 防雷标准中直击雷的防护[J]. 电气应用, 2005(12): 20-23.
 WANG Meng, RONG Hao. Discussion of Direct Lighting Flash in Code for Protecting Against Lightning[J]. Electrotechnical Application, 2005(12): 20-23.
 [7] 蒋麦占. 如何处理《建筑物防雷规范设计规范》和 IEC 标准的关系(上)——不能回避规范的适用范围和防雷风险管理[J]. 电气工程应用, 2007(2): 5-11.
 JIANG Maizhan. How to Deal with The Relationship Between <Code for Design Protection of Structures Against Lightning> and IEC Standard(Part 1)-Scope of Application and Risk Management[J]. Application of Electrical Engineering, 2007(2): 5-11.

(责任编辑 郑文棠)