

浅析海上风电灌浆连接段力学研究发展及趋势

陈珂[✉], 张力, 廖侃

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]海上风电机组基础与上部结构连接通常采用灌浆连接方式, 保证灌浆连接段的安全性至关重要, 灌浆连接段的研究一直是重点和难点。[方法]对过往海上风电灌浆连接段的相关力学研究进行综述, 介绍了海上风电灌浆材料的基本力学性能, 总结了灌浆连接段的受力机理和影响承载力的因素, 并对现有规范设计和未来研究方向进行阐述。[结果]灌浆连接段对灌浆材料的使用要求严苛, 需要使用高强灌浆料。在轴压作用下, 灌浆连接段通常表现为斜压短柱的延性破坏模式, 承载力主要受到灌浆连接段径向刚度、剪力键的高距比和形状、灌浆连接段长径比以及灌浆材料强度的影响。相关设计规范对极限承载力的设计均有明确的设计方法, 但在疲劳设计方面研究较少, 存在不完善的情况。[结论]因此, 尚需进一步研究灌浆连接段浸没在水中的疲劳性能。同时, 未来在试验研究上需要采用足尺或小缩尺的试件, 在数值研究上需要采用精细化的数值模型进行分析。

关键词: 灌浆连接段; 轴向承载力; 疲劳; 浸没; 受力机理

中图分类号: TK89; TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0057-07

开放科学(资源服务)二维码:



Brief Analysis of the Development of Mechanical Research and Trends of Grouted Connection of Offshore Wind Turbine

CHEN Ke[✉], ZHANG Li, LIAO Kan

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

Abstract: [Introduction] The connection between offshore wind turbine foundation and superstructure is usually made by grouting. It is crucial to ensure the safety of the grouted connections, and the study of grouted connections is always a key and difficult point. [Methods] A review of relevant mechanical studies on grouted connections of offshore wind turbines was conducted. The basic mechanical properties of grouted materials for offshore wind turbines were described. The force mechanism of grouted connections and the factors affecting the bearing capacity were summarized, and the existing code design and future research directions were described. [Result] The grouted connection has severe requirements for the use of grouting materials. Therefore, the high-strength grout needs to be used. Under axial compression, the grouted connections usually exhibit a ductile damage mode of the compression struts. The bearing capacity of grouted connections is mainly influenced by the radial stiffness of grouted connections, the height-to-spacing ratio of shear keys, the shape of shear keys, the length-to-diameter ratio of grouted connections and the strength of grouting materials. The relevant design codes have clear design methods for the design of ultimate bearing capacity, but there are few studies and imperfections in fatigue design. [Conclusion] Therefore, it is necessary to further research the fatigue performance of grouted connections submerged in water. Moreover, it is necessary to use full-scale or small-scale specimens in future experimental studies, and refined numerical models need to be used for analysis in numerical studies.

Key words: grouted connection; axial bearing capacity; fatigue; immersion; force mechanism

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-12-07 修回日期: 2022-01-24

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

灌浆连接段将上部风机结构的自重和风浪荷载传递至基础,是整个支撑结构中至关重要的连接部件。连接段灌浆作业是钢管桩沉桩与安装基础承前启后的关键工序,灌浆材料的力学性能是关系着海上风机是否能稳定运行重要因素。连接段中的高强灌浆料将处于复杂应力状态,现有的剪切键设计方法将导致灌浆料产生不同的破坏模式,进而影响灌浆连接段的承载力。此外,当灌浆连接段浸没于水中时,液体将会渗入灌浆体中的裂缝中,影响连接段长期性能。

为保证灌浆连接段的安全性,需要探明其受力机理。本文回顾了灌浆连接段的研究历程,这有利于完善现有设计体系,找到发展方向。

1 灌浆材料

随着海上风电行业的迅猛发展,对灌浆材料的要求也愈发严苛,目前采用的高强灌浆材料抗压强度一般在 110 MPa 以上,未来随着深海风电的逐步开展,风电机组功率越来越大,对灌浆料的要求将会越来越高,不仅仅在强度上也会体现在其他的相关性能。针对海上风机基础灌浆的特殊受力性能及施工条件,高强灌浆料需要具备流动性好、早期强度高、最终强度高、抗疲劳性能好等特点^[1]。高强灌浆材料通常是水泥基材料,与水混合后形成均匀、可流动且可泵送的灌浆料,凝固后内部是致密的。主要依靠由高强灌浆料中的细骨料(特殊级配及材料)、水泥基及其他添加剂组成的整体来承受外部荷载,因而具有极高的早期强度、最终强度与弹性模量。高强灌浆材料与混凝土的物理力学性能比较相似,在测定抗压强度的标准试件尺寸上,各个规范的要求不一致,这样就存在尺寸效应,从研究角度考虑,可采用边长 75 mm 的立方体试件作为高强灌浆材料的标准试件^[2]。抗压强度直接影响灌浆连接段的轴压承载力,考虑海上风电施工条件苛刻特点,对灌浆材料的 1 d 强度(早强)与 28 d 强度(最终强度)要求很高。同时,对应于目前岸上工程所常提及的高性能混凝土,在是否添加钢纤维上也存在区别。

灌浆连接段作为传递荷载的一个关键部位,不仅传递了竖向荷载,还要传递巨大的弯矩,抗折强度 f_{ct} 表示的是灌浆材料在承受弯矩时的极限折断应力,又称抗弯强度。我国水运工程混凝土试验规程规定

混凝土抗折强度是以 150 mm×150 mm×550 mm 的梁式试件,在标准养护条件下达到规定龄期后(28 d)试验测定。

海上风机在服役期间承受外部荷载循环次数多达 $10^8 \sim 10^9$ 次,因此灌浆材料的疲劳性能是一个关键性能。目前对于灌浆材料疲劳性能的试验研究非常有限,丹麦奥尔堡大学学者 Sørensen^[3] 采用直径 60 mm、高 120 mm 圆柱体试件研究灌浆材料疲劳性能。试验荷载幅值分为静力抗压强度的 45%、60% 和 76% 3 种,试验频率分为 0.35 Hz、5 Hz 和 10 Hz 3 种。每组试验前进行 6 个试件的静力抗压强度测试,取其平均值作为该组的平均抗压强度。试验结果表明:空气中灌浆材料的疲劳寿命与荷载频率基本无关,反而水中灌浆段试件的疲劳强度在受到循环荷载作用后,要低于空气中的试件在同样荷载作用后的强度;对均在水中测试的试件进行对比,0.35 Hz 荷载频率作用下的试件疲劳寿命荷载显著低于 5 Hz 及 10 Hz 工况。

2 灌浆连接段

2.1 灌浆连接段轴压受力机理

风机支撑结构中灌浆连接段是 20 世纪从海上油气平台发展而来。Lamport^[4] 等人通过对 6 种不同形式的灌浆连接段进行静力试验发现,带剪力键的灌浆连接段的破坏模式在试验中展现为延性的破坏模式。从图 1 中可以看出在荷载达到某一极限值后将会产生一个较大的滑移。而在卸载之后,滑移量将保持不变,继续对试件进行加载,其极限承载力及刚度与第 1 次加载时相当,但是当荷载达到极限承载力之后将产生相比第 1 次更大的滑移。

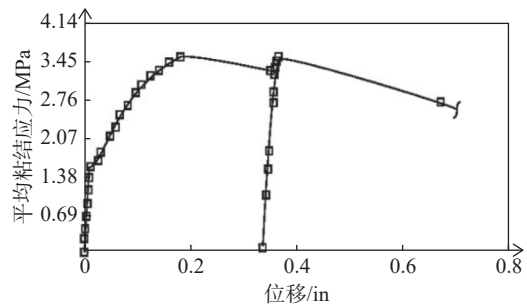


图 1 带剪力键灌浆连接段轴压荷载-位移曲线^[4]

Fig. 1 Axial compression load-displacement curve for grouted connection with shear keys^[4]

而在 Lamport^[4]与 Aritenang^[5]对灌浆连接段进行静力试验后对试件进行观察发现,在灌浆连接段设置剪力处的灌浆料将被产生的裂纹分割为多个受压短柱,最后的破坏形态为受压短柱被压碎,且由于剪力键的存在造成了应力集中现象,这使得灌浆料将更加容易萌发裂纹。

而 Wilke^[6]通过对其试验中得到的荷载-位移曲线及观察灌浆材料的破坏模式认为带剪力键的灌浆连接段受力过程可分为3个阶段。在灌浆连接段轴压试验中,其荷载位移曲线在前期将保持线性增加,当荷载位移曲线不再保持线性时,灌浆连接段开始进入破坏阶段。阶段一:灌浆连接段在上下端部的剪力键处出现裂缝,此时剪力键位置处的灌浆体在三向应力状态下的应力值已经大于了灌浆材料的多轴应力强度,如图2(a)所示;阶段二:荷载不断增加,剪力键受压侧的楔形灌浆体被压碎破坏,内力重分布于全部剪力键上,此时各剪力键上受力均匀,因此各受压短柱的倾斜角度将相同。此阶段灌浆连接段荷载位移曲线斜率不断减小,如图2(b)所示;阶段三:荷载继续增加,将出现一个连续的受剪区域,出现一条从第一个剪力键贯穿到最后一个剪力键的受剪裂缝,再一次引起内力重分布,如图2(c)所示。

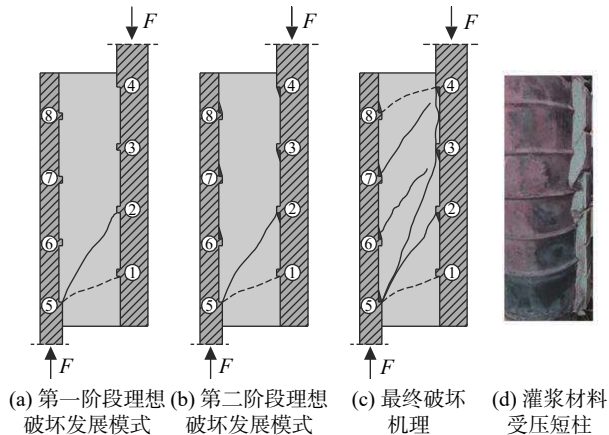


图2 带剪力键灌浆连接段轴压破坏过程

Fig. 2 Axial compression failure process in grouted connections with shear keys

Chen^[7]等学者针对先桩法和后桩法两种不同施工技术的导管架基础中的灌浆连接段进行轴压试验。试验结果再次证明了轴压荷载是通过灌浆连接段从一根钢管逐渐传递到另一根钢管的。同时,在传递轴向荷载的过程中,剪力键起着重要作用。特别是

灌浆连接段两端的剪力键,其作用尤为重要。随着轴向荷载的增加,灌浆连接段两端的剪力键的贡献变得更加明显。

综上所述可以看出,带剪力键的灌浆连接段的轴压破坏模式为一种延性破坏,而其承载力主要由两部分提供,其一是灌浆材料与钢管之间的黏着力和摩擦力,其二是在剪力键之间形成的斜压短柱提供的轴向承载力。

2.2 影响灌浆连接段承载力的因素

影响带剪力键的灌浆连接段轴压承载力的主要因素包括:灌浆连接段径向刚度;剪力键的高度、间距和形状;灌浆连接段长径比;灌浆材料强度。

Aritenang^[5]和 Billington^[8-9]等学者的研究中发现灌浆连接段的径向刚度的提高将增加灌浆连接段的轴向承载力,主要原因有两个:(1)径向刚度的提高有助于提升钢管和灌浆料之间的摩擦力和机械咬合力;(2)径向刚度提升将提高钢管对灌浆材料的约束作用,这将提高灌浆材料在三向受压情况下的抗压强度。

灌浆连接段中的剪力键的高度存在限制,理论上其最小高度为0,最大高度为灌浆料厚度的一半。在 Lamport^[4]以及 Billington^[9]的研究中均发现灌浆连接段剪力键高度的增加有助于提升灌浆连接段的承载能力。剪力键间距的改变也会对灌浆连接段的轴压承载力造成较大的影响,如果将剪力键之间的距离减小而不改变其他参数,将会使得灌浆连接段中的受压短柱增加,且受压短柱的长度减小,这将会提高灌浆连接段的承载能力。如果剪力键之间的距离过大,灌浆连接段破坏机理将类似于无剪力键灌浆连接段,发生灌浆材料与灌浆接触面之间的滑移破坏,其破坏模式如图3(b)所示。如果剪力键之间的间距过小,在剪力键外部将会形成一个新的滑移面,其破坏机理将类似于无剪力键灌浆连接段。灌浆连接段将会产生如图3(c)所示的破坏模式,这反而会使得灌浆连接段承载力减小。

Krahl^[10]等学者认为当剪力键的高度 h 和剪力键的间距 s 的比值不同时,灌浆连接段将呈现出不同的破坏模式,当 h/s 的值处于一个合适的大小时,灌浆体的破坏模式如图3(a)所示,剪力键受压侧楔形体先被压碎,其后产生一条贯穿灌浆体受压短柱的剪切裂缝,灌浆连接段发生滑移破坏,这种破坏形

式下灌浆连接段承载力较高。Billington^[8]及 Forsyth^[11]等人均研究了 h/s 对灌浆连接段承载力的影响,其中 Forsyth 认为存在一个合适 h/s 值可以使得灌浆连接段承载力最大,并且 h/s 的最佳值与灌浆连接段的径向刚度 k 密切相关,在 Forsyth 的研究中显示 h/s 的值为 0.075 时名义粘结强度 f_{bu} 将达到最大值。

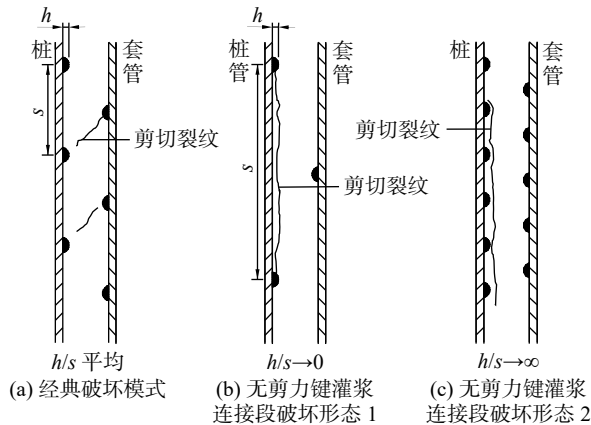


图 3 带剪力键灌浆连接段的不同破坏形态

Fig. 3 Different failure patterns of grouted connections with shear keys

不同的剪力键形状也将对灌浆连接段的轴向承载力产生不同的影响, Boswell^[12]将三角形剪力键、半圆形剪力键以及矩形剪力键放在一起对比研究,结果显示三角形剪力键较其他形式的剪力键性能更好。而仲伟秋^[13]等采用有限元法分析了不同形状剪力键附近灌浆体的应力状态,结果显示半圆形剪力键更容易使得灌浆连接段端部出现应力集中现象。

Billington^[8]对长径比 L/D 对带剪力键灌浆连接段承载力的影响进行了探究,在其研究结果中显示,随着 L/D 的增加灌浆连接段极限承载力先增加后减小。但其研究存在一定的局限性,其研究对象主要为导管架基础灌浆连接段,且灌浆材料强度较低,灌浆连接段直径 D 较小,因此长径比 L/D 对带剪力键灌浆连接段承载力的影响还需要进一步讨论。

针对灌浆材料强度对灌浆连接段轴压承载力 Billington^[8-9]和 Lewis 等人进行了试验研究,研究结果显示无论是否存在剪力键,灌浆连接段的等效粘结强度 f_{bu} 与灌浆材料立方体抗压强度 f_{cu} 的平方根成正比。试验结果如图 4 和图 5 所示,可以看到对无剪力键的试件其承载力的离散性较大,而有剪力

键的灌浆连接段可以比较好地吻合上述规律。并且从图 4 中可以发现当 f_{cu} 大于 50 MPa 后 f_{bu} 的强度将无法继续提升,因此对无剪力键的灌浆连接段灌浆材料强度超过一定值后将无法继续提升其承载力。

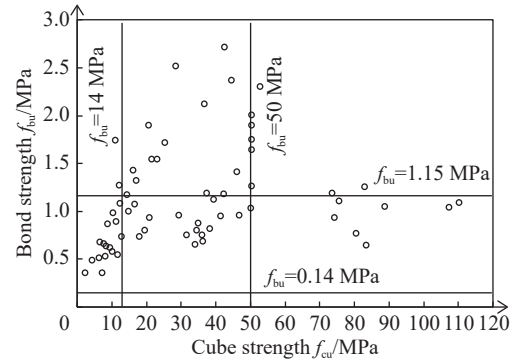


图 4 浆体抗压强度对无剪力键灌浆连接段承载力的影响^[8]

Fig. 4 Effect of grout compressive strength on the bearing capacity of grouted connections without shear keys^[8]

2.3 规范设计方法

依据 DNVGL 相关规范的要求,灌浆连接段的设计需要进行强度,疲劳,施工期的稳定性,最大误差,压碎,腐蚀等方面校核,在前面两小节中,主要针对其受力机理及承载力提出相关建议,对其极限强度方面的相关探讨,具体计算方式在规范中已有相关列出,因此本节主要针对目前研究甚少的疲劳方面进行相关探讨。

国际标准化组织 (ISO) 委员会于 1994 年收集整理相关试验数据,提出轴向疲劳设计建议的 $S-N$ 曲线,疲劳极限承载力约为静载极限承载力的 20%。

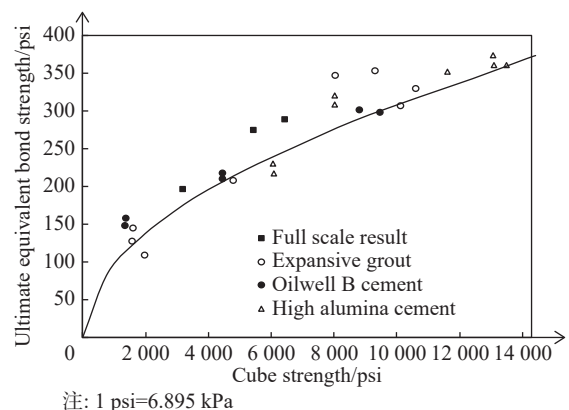


图 5 浆体抗压强度对有剪力键灌浆连接段承载力的影响^[9]

Fig. 5 Effect of grout compressive strength on the bearing capacity of grouted connections with shear keys^[9]

但同时指出剪力键高度和间距的比值大于 0.04 的试验数据缺乏, 需要谨慎使用。对于 HSE 和 API 规范来讲, 两者并未给出灌浆连接段的疲劳设计方法。NORSOK 规范需要设计人员提供“100 年一遇的设计弯矩和扭矩”, 实质是将疲劳分析转化成等效静力作用下的应力值进行验算。

DNVGL 规范结合有限的试验数据^[14] 提出了灌浆连接段疲劳设计时可采用的关系曲线: 建立了单层剪力键上的作用力与其承载力的比值 y 和疲劳循环次数 N 的相关曲线。由于试件数量有限, 该曲线是一条考虑了保证率的下包络线, 较为保守。通过该曲线, 可以得到某一疲劳荷载条件下的损伤, 再通过损伤的线性叠加得到总的损伤。

学者 Solland^[15] 根据试验数据, 提出了新的规范公式。该组数据较多地集中在大应力幅度、较少循环次数的破坏下, 对于循环次数较多的试验并没有涉及到。如图 6 所示, 对应 2×10^6 次循环, 荷载幅与静载极限承载力的比值在 0.05 左右。

Lee^[16] 等学者基于自己的试验数据和数值模拟, 结合先前的试验研究数据进行对比分析, 评估了在干燥条件下承受单向可逆循环荷载的带剪切键的高强灌浆连接段的疲劳性能, 提出了干燥条件下单向循环荷载条件下的设计公式。研究结果显示灌浆强度、剪切键密度和应力比对疲劳性能有显著影响。综合考虑这些影响, 根据保守设计方法, 通过试验数据库的下限近似值得到了设计方程, 如图 7 所示。

此外, DNVGL 还建议采用精细化数值建模, 对灌浆连接段进行分析, 获取局部的应力状态, 进而开展疲劳性能评价并结合整体的应力水平进行判断是否失效(图 8)。

灌浆连接段疲劳性能分析可从钢结构、灌浆材料以及两种材料组成的构件整体 3 个角度展开。钢结构的疲劳性能分析主要分为钢材材料层次和焊接节点两个方面。在灌浆连接段中, 由于焊接节点的敏感性以及剪力键附近应力较为集中, 因此通常可能出现的疲劳破坏的位置为焊接剪力键附近的灌浆材料。值得注意的是局部的失效以及裂纹产生后, 灌浆连接段仍然可以承受外部的荷载。规范指出需要交错剪力键形成的斜压短柱上 3 个关键截面进行应力分析, 见图 9 中所示的 A_{c0}, A_{c1}, A_{c2} 面, 但可操作性

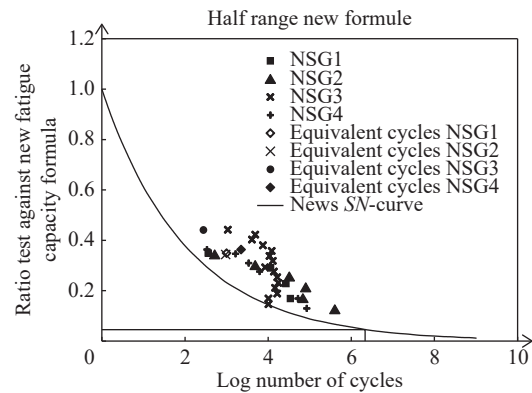


图 6 Gunnar Solland 提出灌浆连接段轴向疲劳 S-N 曲线^[15]
Fig. 6 Axial fatigue S-N curve for grouted connections proposed by Gunnar Solland^[15]

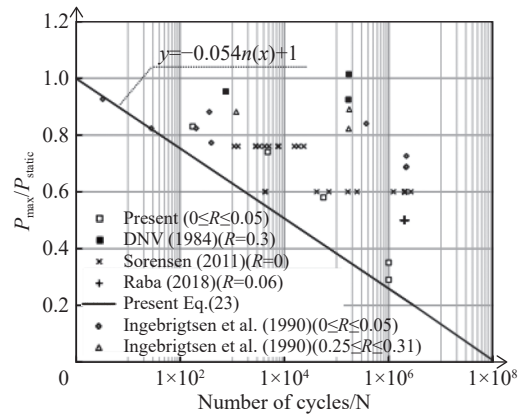


图 7 干燥条件下单向循环荷载条件下设计方程^[16]
Fig. 7 Design equation for unidirectional cyclic loading conditions under dry conditions^[16]

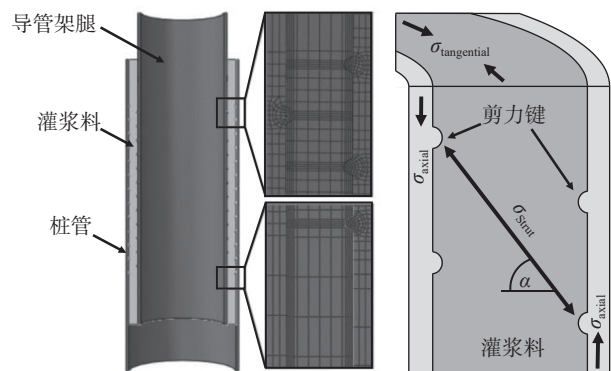


图 8 灌浆连接段精细化数值分析
Fig. 8 Refined numerical analysis of grouted connections

以及细节等相关问题还需进一步明确, 由于灌浆连接段的荷载条件表现出显著的多向应力情况, 建议

对于疲劳评估,依据灌浆单独应力循环下最大主压应力这一特殊方向。

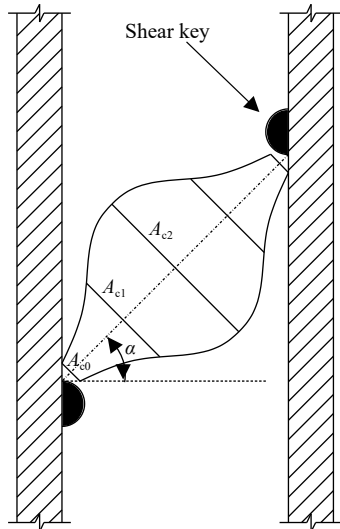


图 9 灌浆连接段 3 个关键截面

Fig. 9 Three critical sections of the grouted connection

3 后续灌浆连接段研究的方向

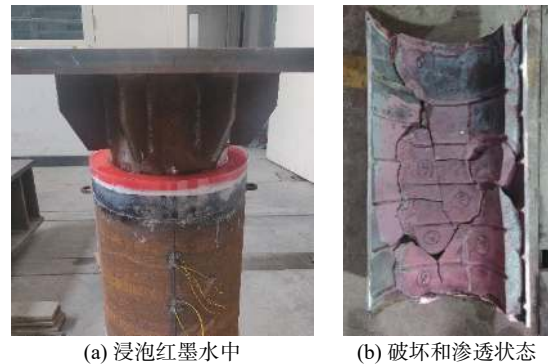
3.1 灌浆连接段浸没水中的疲劳性能

DNVGL 规范中针对浸没水中的灌浆料的疲劳,提供了一个简单的 $S-N$ 曲线的修正。DNVGL 规范的 $S-N$ 曲线仅对于干燥环境下的灌浆连接段,对于水下或者浪溅区中的灌浆料性质需要考虑水的影响。如果灌浆连接段暴露于水中,在计算损伤之前,每一个应力区间的容许循环次数需要减小。对于应力范围在压-压变化内 N_i 应该提议为 0.8 次方(也就是 $N_i^{0.8}$),对于应力范围在压-拉变化内 N_i 应该提议为 0.65 次方(也就是 $N_i^{0.65}$)。该方法未从构件的层次上考虑荷载及循环次数不同所产生的影响,也未考虑灌浆连接段长度以及裂缝开裂对其产生的影响,仅仅是从灌浆料本身进行了材料疲劳性能的折减。

Schauman^[17] 研究了小尺寸灌浆连接段浸没在海水中的轴向疲劳性能。试验发现,水中试件的平均疲劳寿命相较于空气中试件的平均疲劳寿命有着显著的下降,平均疲劳寿命由 200 万次下降到 5 万次。试验中发生了灌浆材料的析出,这可以在一定程度上解释疲劳寿命的下降。Dallyn^[18] 对大尺寸灌浆连接段试件进行了水中疲劳试验研究,疲劳寿命表现出与小尺寸试件同样的变化。同时,水中试件的破坏模式不再是灌浆材料斜压短柱破坏,而是变成了

套管和灌浆材料的接触面材料破坏。

同济大学针对灌浆连接段在海水浸泡作用下的疲劳性能进行试验。如图 10 所示,在对灌浆连接段进行轴向疲劳荷载加载的过程中,在灌浆连接段上部注入红墨水,模拟灌浆连接段浸泡在海水中的状态,同时记录红墨水渗入量。图 10(b) 为灌浆连接段疲劳试验后红墨水渗入情况,通过红墨水在灌浆体中的分布可以推断出其渗入路径。其研究表明,当灌浆连接段浸没于水中并承受疲劳荷载时,液体将会渗入到灌浆体产生的裂缝之中,同时与空气中的试件疲劳试验结果进行对比,表明液体的渗入将会严重劣化灌浆连接段疲劳性能,但其劣化机理有待进一步研究。



(a) 浸泡红墨水中 (b) 破坏和渗透状态

图 10 浸泡灌浆连接段及疲劳后状态

Fig. 10 Soaking and post-fatigue conditions of the grouted connection

3.2 灌浆连接段原型试验的研究

DNVGL 规范中关于灌浆料的破坏模式给出了压碎破坏的情况,但是根据试验证明灌浆连接段存在带裂缝工作的情况,在空气中干燥的情况下,其依然存在继续承受荷载能力。对海上风电灌浆连接段,目前已经进行了各个灌浆料厂家的灌浆原型试验,由于加载设备的能力问题,加载仅限于满足当前工程的极限承载能力,通过多次试验发现,原型试验极限承载力都不存在问题,但是其破坏状态还难以确定。

根据同济大学进行的缩尺破坏试验来看,破坏基本集中于灌浆连接段的上部两根钢管连接位置,该处存在灌浆连接段与单根钢管的刚度突变,破坏一般是钢管鼓曲产生的破坏。其内部灌浆料还未达到极限承载能力状况,并且由于缩尺的破坏试验模型与实际足尺的工程用的灌浆连接段存在一些边际效应的不同,同时存在着材料非线性,接触非线性等

情况,因此,未来的研究方向可以围绕灌浆连接段不同缩尺比例的影响以及极限承载力和疲劳工况的组合试验展开进行。

4 结论

本文通过回顾灌浆连接段发展历程,阐述灌浆料相关指标的测试。并对灌浆连接段的轴向承载力影响因素,规范的设计方法进行探讨。进一步结合当前研究的发展和海上风电的发展趋势,讨论浸没水中的疲劳设计和破坏准则等关键问题,指出未来尚需进一步采用精细化的数值模型进行分析,同时需要采用足尺或小缩尺模型进行极限承载力和疲劳试验。

参考文献:

- [1] 元国凯,汤东升,刘晋超,等.海上风电机组基础灌浆技术应用与发展[J].南方能源建设,2017,4(1):10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
YUAN G K, TANG D S, LIU J C, et al. Grouting technology application and development in offshore wind farm [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(1): 10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
- [2] 夏中升,沙建芳,郭飞,等.超高强水泥基灌浆材料力学性能尺寸效应[J].混凝土,2021(10):17-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.10.005.
XIA Z S, SHA J F, GUO F, et al. Size effect of mechanical properties of ultra-high strength cement-based grouting materials [J]. *Concrete*, 2021(10): 17-22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.10.005.
- [3] SØRENSEN E V. Fatigue life of high performance grout in dry and wet environment for wind turbine grouted connections [J]. *Nordic Concrete Research*, 2011(44): 1-10.
- [4] LAMPORT W B, JIRSA J O, YURA J A. Grouted pile-to-sleeve connection tests [C]//OTC. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, April 27-30, 1987. Houston: OTC, 1987. DOI: 10.4043/5485-MS.
- [5] ARITENANG W, ELNASHAI A S, DOWLING P J, et al. Failure mechanisms of weld-beaded grouted pile/sleeve connections [J]. *Marine Structures*, 1990, 3(5): 391-417. DOI: 10.1016/0951-8339(90)90011-F.
- [6] WILKE F. Load bearing behaviour of grouted joints subjected to predominant bending [M]. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2014.
- [7] CHEN T, WANG X, GU X L, et al. Axial compression tests of grouted connections in jacket and monopile offshore wind turbine structures [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109330. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109330.
- [8] BILLINGTON C J, LEWIS G H G. The strength of large diameter grouted connections [C]//OTC. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 7-10, 1978. Houston: OCT, 1978. DOI: 10.4043/3083-MS.
- [9] BILLINGTON C J, TEBBETT I E. The basis for new design formulae for grouted jacket to pile connections [C]//OTC. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 5-8, 1980. Houston: OCT, 1980. DOI: 10.4043/3788-MS.
- [10] KRAHL N W. Axial strength of grouted pile-to-sleeve connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 889-905. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1985)111:4(889).
- [11] FORSYTH P, TEBBETT I E. New test data on the strength of grouted connections with closely spaced weld beads [C]//OTC. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2-5, 1988. Houston: OTC, 1988. DOI: 10.4043/5833-MS.
- [12] BOSWELL L F, D'MELLO C. The fatigue strength of grouted repaired tubular members [C]//OTC. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 5-8, 1986. Houston: OTC, 1986. DOI: 10.4043/5307-MS.
- [13] 仲伟秋,滕丽荣.剪力键形状对海上风电场灌浆连接段影响[J].低温建筑技术,2014,36(3):72-74. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2014.03.040.
ZHONG W Q, TENG L R. The shape influence of shear key on wind turbine grouted connections [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2014, 36(3): 72-74. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2014.03.040.
- [14] DNVGL. Support structures for wind turbines: DNVGL-ST—0126 [S]. Norway: DNVGL, 2018.
- [15] SOLLAND G, JOHANSEN A. Design recommendations for grouted pile sleeve connections [J]. *Marine Structures*, 2018, 60: 1-14. DOI: 10.1016/j.marstruc.2018.03.001.
- [16] LEE J, LEE K, KIM S, et al. Evaluation of fatigue strength of high-strength grouted connections subjected to unidirectionally reversible cyclic loading [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109384. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109384.
- [17] SCHAUMANN P, RABA A, BECHTEL A. Fatigue behaviour of grouted connections at different ambient conditions and loading scenarios [J]. *Energy Procedia*, 2017, 137: 196-203. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.373.
- [18] DALLYN P, EL-HAMALAWI A, PALMERI A, et al. Experimental investigation on the development of wear in grouted connections for offshore wind turbine generators [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 89-102. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.028.

作者简介:



陈珂

陈珂(通信作者)

1985-,男,湖南衡东人,高级工程师,硕士,主要从事土建、水工、海工结构的工作(email)chenke@gedi.com.cn。

(编辑 李辉)