



钢管桩与上部结构剪力键连接的破坏模式及设计方法*

李倩, 李怡, 赵凌宇, 孔繁

(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 钢管桩与上部结构剪力键连接的设计方法, 国内外相关规范尚无明确的规定, 也没有完整的计算理论。基于现有研究, 探讨钢管桩与上部结构剪力键连接的破坏模式, 分析破坏机理; 阐述钢管桩与上部结构剪力键连接的设计理论、设计方法, 为完善剪力键连接的设计方法提供依据。

关键词: 钢管桩; 剪力键; 破坏模式; 设计方法

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0024-05

Failure modes and design methods of pile-to-pile cap connection with shear keys

LI Qian, LI Yi, ZHAO Ling-yu, KONG Fan

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: So far, the detailed design method of the pile-to-pile cap connection by shear keys has not been provided in various design codes, and the design theory of the shear key connection has not been fully developed. Based on the existing research progress, this paper describes several important failure modes, and discusses potential design methods for the shear key connection of steel tubular piles. The findings of this paper may significantly support the development of design methods for the shear-key pile-to-pile cap connections.

Key words: steel tubular pile; shear key; failure mode; design method

剪力键连接是海工钢管桩与上部结构(桩帽或横梁)连接的主要方式之一, 其主要原理是在钢管桩顶部内壁焊接几道剪力键(或称剪力环), 钢管桩伸入横梁(或桩帽)一小段距离(如100 mm), 在钢管桩顶部2~3 m范围内放置钢筋笼并灌注混凝土^[1], 以确保桩芯混凝土与钢管桩之间具有足够的粘接能力来保证有效的荷载传递。如图1所示。

这一连接形式已越来越多地在大型海工结构、桥梁结构中得以应用, 如杭州湾跨海大桥^[2]、金塘大桥^[3]、Vancouver Convention Centre^[1]等。然而, 国内相关港工规范^[4]目前还没有提及剪力键连接这一方式, 钢管桩与上部结构剪力键连接的设计理论现在也还不完善, 对这一结构的设计方法目前

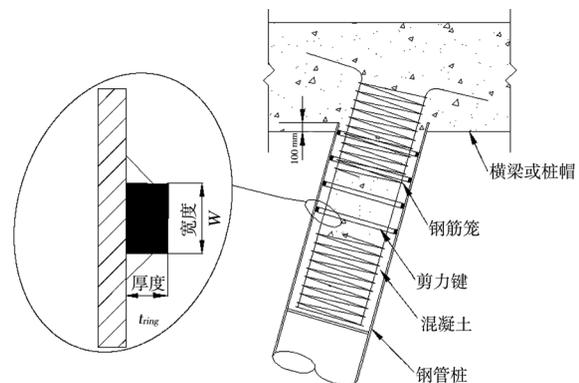


图1 钢管桩与上部结构剪力键连接示意图

均没有专门的明确表述^[5]。故在实际应用中多采用其它类似结构的设计方法, 如钢管桩与灌浆套筒剪力键连接的设计方法。因此, 规范钢管桩与上部结构剪力键的设计方法是一个日渐迫切的问题。

收稿日期: 2013-06-20

*基金项目: 重庆市港航管理局科技项目(SW2013-27); 重庆交通大学研究生教育创新基金(20130102)

作者简介: 李倩(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

基于剪力键的现有研究,从剪力键连接的破坏模式着手,探讨其破坏机理。同时,阐述剪力键连接的设计理论、方法,为港工钢管桩与上部结构剪力键连接的设计方法提供依据。

1 剪力键连接的破坏模式

钢管桩与上部结构的剪力键连接段,是由钢筋、混凝土、钢管、剪力键多种材料构成的复合结构,破坏模式比较复杂,针对其破坏模式的研究目前还处于初步阶段。根据这一连接方式的结构特性,同时借鉴其它类似机制(如灌浆套筒剪力键连接^[6-9]、螺纹钢筋与混凝土之间的粘结以及钢管桩与核心混凝土的粘结^[10-20]等),本文总结了钢管桩与上部结构剪力键连接的几种潜在破坏模式。

剪力键连接方式已在灌浆套筒结构中得以广泛应用(如海上钻井平台)。其破坏模式研究已取得相当的进展。尽管灌浆套筒连接的空间一般比较小、封闭效果好,且没有钢筋笼,它的破坏模式仍可以为分析钢管桩与上部结构剪力键连接提供一定的基础。

螺纹钢筋与混凝土之间的粘结强度主要依靠混凝土与钢筋表面突出肋之间的机械咬合力。钢筋突出的肋对混凝土的作用与钢管桩剪力键对混凝土的作用相似,因此两者在工作机理上有类似之处。

1.1 混凝土在剪力键的压碎破坏

Gebman等^[21]针对钢管桩与上部结构的剪力键连接进行了大量的拉拔试验。结果显示,混凝土在剪力键处的局部压碎破坏是主要破坏模式之一。

轴力作用下混凝土受到剪力键端面的局部挤压。由于桩芯混凝土受钢管桩的环向紧箍作用,并且钢筋笼的纵向钢筋能有效阻碍裂缝的开展,混凝土不会因为裂缝的开展产生劈裂破坏。随着荷载的不断增大,剪力键处的压应力不断增大,在远没有达到钢材屈服强度时,混凝土就被剪力键的挤压力所压碎。混凝土被挤碎后,剪力键又沿着挤碎后粉末堆积物形成的新的滑移面产生较大的相对滑移。如图2所示。

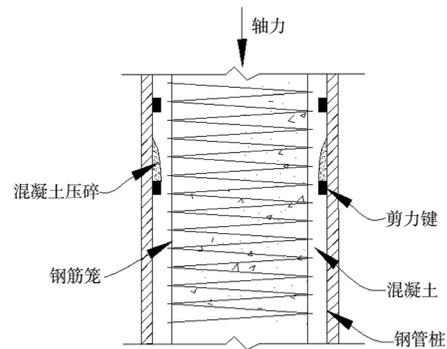


图2 混凝土在剪力键处的压碎破坏

1.2 剪力键间混凝土的折断破坏

类似于螺纹钢筋的肋间混凝土,剪力键间的混凝土在剪力键端面挤压力轴向分力的作用下会受弯受剪,键间的混凝土相对整个核心混凝土犹如伸出的一个“悬臂环梁”。很显然,其抗弯抗剪能力与剪力键的间距、厚度和宽度有关。

如果抗弯能力不足,悬臂环梁在根部会被折断。当各个悬臂环梁均被折断时,环梁根部的各个断面贯通,形成一条贴近剪力键侧面的狭长裂缝。

这种破坏模式已经在灌浆套筒试验中观察到。挪威船级社(DNV)开展了一系列试验^[22]模拟波浪力循环荷载作用对灌浆套筒剪力键连接的影响。当剪力键端面挤压力轴向分力的作用足够大时,悬臂环梁在根部会被折断,受到破坏的水泥砂浆有一条明显的狭长裂缝,沿着剪力键侧面贯穿整个试件。如图3所示。

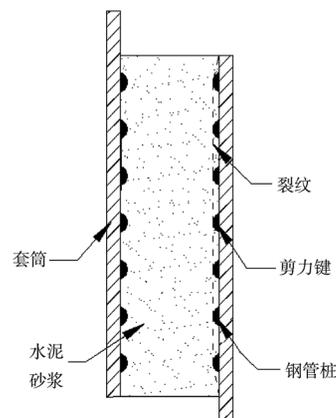


图3 灌浆套筒剪力键间水泥砂浆的折断破坏

1.3 剪力键间混凝土的剪切破坏

由于也受剪力作用,剪力键间的素混凝土悬臂环梁在根部也有可能发生剪切破坏。剪切破坏由悬臂环梁根部产生斜裂缝开始。随着剪力键

端面挤压力轴向分力的增大,当剪力键厚度过大和剪力键间距过近时,斜裂容易造成悬臂环梁剪断,钢管桩与核心混凝土之间将沿着接近剪力键侧面的滑移面发生相对滑移,剪力键与混凝土发生相对脱离的这种剪切破坏也称刮犁式破坏^[23]。

类似的破坏模式已在灌浆套筒试验中观察到。Anders等^[24]对钢管桩与套筒的灌浆连接构件进行了大量的轴向静荷载测试。剪力键对水泥砂浆斜向挤压力形成了滑动阻力^[25],可分为径向分量和轴向分量。径向分量绕着剪力键分布,对水泥砂浆形成一圈圈环压力。当环压力增加到一定值时,水泥砂浆在剪力键处出现斜裂缝,被分割成几个倾斜的受压柱体。随着荷载的增大,水泥砂浆被压碎,最终形成互相贯通的裂缝。如图4所示。

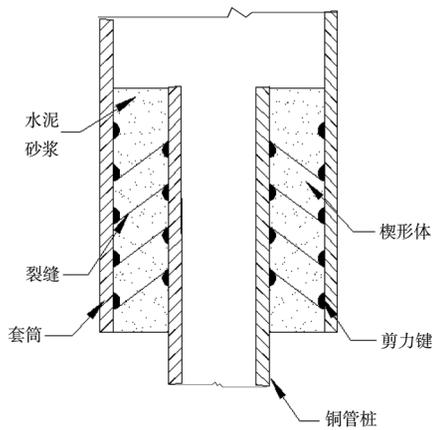


图4 灌浆套筒剪力键间水泥砂浆的剪切破坏

1.4 剪力键连接处钢管屈曲破坏

Gebman等^[21]的试验显示,钢管桩与上部结构剪力键连接部位也会出现钢管屈曲的破坏现象。

从开始施加荷载到混凝土出现裂缝前,钢管受到的力很小,随着荷载增加到一定程度,混凝土内部出现微裂缝。混凝土横向变形系数超过钢材泊松比^[26],混凝土向外膨胀,并处于三向受压状态;钢管受到环向拉力,纵向和径向处于受压状态。同时钢管与混凝土之间的粘接力逐渐被破坏,钢管桩与桩芯混凝土发生滑动后,界面的剪切力主要靠剪力键来承担。钢管桩在剪力键处承受的剪切力不断增大,钢管桩外形发生皱曲和鼓曲,随着荷载的增加外鼓现象也越明显,直到钢

管应力达到屈服极限。如图5所示。

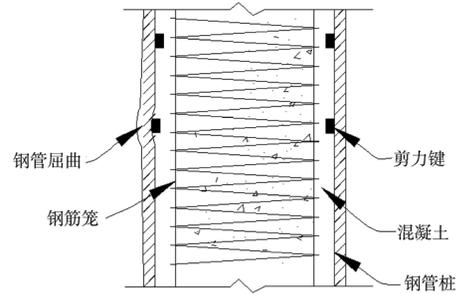


图5 剪力键连接处钢管的屈曲破坏

1.5 其它破坏模式

钢管桩与上部结构剪力键连接也有其它一些破坏模式,但这些模式都很常规,也很容易识别,设计方法都已解决。

要保证桩芯混凝土与钢筋笼共同工作,必须要保证钢筋在混凝土中有可靠的锚固。若在桩芯混凝土中钢筋埋长不足时,有可能会发生钢筋拔出破坏。英标^[27](BS8004)规定,最后一圈剪力键下钢筋长度不得小于锚固长度。

钢筋混凝土柱在受弯时,通常会发生受剪破坏,破坏形态大致分为3类^[28]:斜拉破坏、剪压破坏以及斜压破坏。

剪力键焊接处也往往会导致剪力键失效。焊接产生焊接残余应力以及残余变形,也有可能造成裂缝^[29]。焊接缺陷可能导致局部应力集中和材料的疲劳损伤。剪力键如何结合钢管桩制作过程进行焊接,需要对焊接工艺改造、创新^[30]。

2 剪力键连接的设计方法

钢管桩与上部结构的剪力键连接的破坏模式比较复杂,目前对这一结构的研究还不充分,其设计理论还不完善,相关规范也还没有给出完整详细的推荐设计方法。而钢管桩与套筒灌浆套筒连接的设计理论要成熟得多,比如API RP 2A-WSD^[31]已经提供了轴力作用下的具体设计方法。

目前,针对钢管桩与混凝土剪力键连接的设计方法,Gebman等^[21]进行了大量的轴向拉拔试验,并对不同破坏模式提出了有效的设计方法。由于这些试验主要基于大尺寸模型(如直径2.5 m),并研

究了不同径厚比、不同间距的影响,其结果具有一定的代表性。

1) 钢管桩在截面弯矩达到塑性极限弯矩时,会产生塑性铰,假定钢管桩在剪力键处形成一个塑性铰,上、下侧距离剪力键 l_f 处的钢管桩上,分别形成1个塑性铰,这3个塑性铰为1个塑性区间。如图6所示。

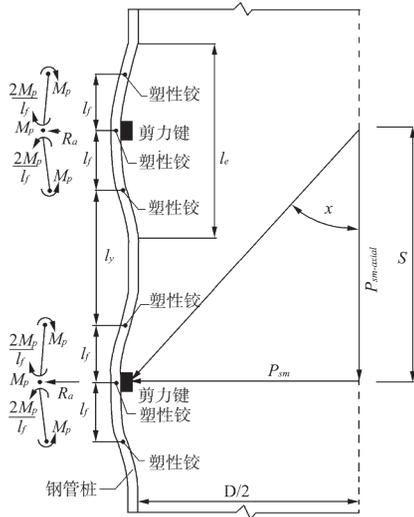


图6 钢管桩塑性铰示意图

$$M_p = f_y Z \quad (1)$$

$$Z = \frac{t^2}{4} \quad (2)$$

$$R_a = \frac{4M_p}{l_f} \quad (3)$$

式中: M_p 为单位长度的塑性弯矩 ($N \cdot mm/mm$); f_y 为钢材屈服强度 (N/mm^2); Z 为单位长度塑性截面模量 (mm^3/mm); t 为钢管桩壁厚 (mm); R_a 为单位长度的侧向力 (N/mm); l_f 为塑性铰长度 (mm)^[21]。

根据图7, 钢管桩和剪力键的侧向承载能力为:

$$P_{sm} = t f_y \left(\frac{tD}{l_f} + 2l_e \right) + 2A_{mech} f_{mech} \quad (4)$$

$$P_{sm-axial} = \frac{P_{sm}}{\tan x} \quad (5)$$

$$l_f = -0.1868 \frac{D}{t} + 62.006 \quad (6)$$

$$l_e = -0.7471 \frac{D}{t} + 222.62 \quad (7)$$

$$x = -8.41 \frac{t_{ring}}{t} + 46.91 \quad (8)$$

式中: $P_{sm}, P_{sm-axial}$ 为钢管桩侧向、轴向极限承载力 (N); f_{mech} 为剪力键屈服强度 (N/mm^2); D 为钢管桩内径 (mm); l_e 为钢管桩变形长度 (mm)^[21]; A_{mech} 为剪力键的截面面积 (mm^2); x 为轴力传递的方向与竖直方向的夹角 ($^\circ$)^[21]。

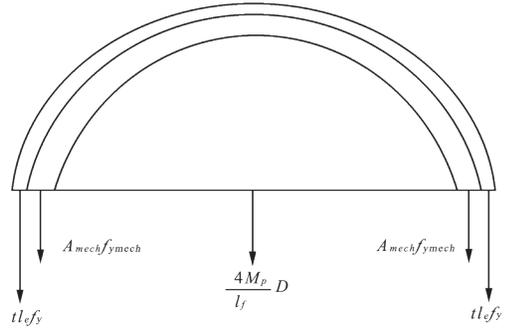


图7 钢管桩和剪力键侧向承载力

2) 计算混凝土极限承载力时, 钢管桩的环向箍力能够增加混凝土的承载力, 剪力键环面的混凝土轴向抗压承载力为:

$$P_{cm} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t_{ring})^2] \left(f'_c + K \frac{2t f_y}{D} \right) \quad (9)$$

式中: P_{cm} 为剪力键处混凝土抗压承载力 (N); t_{ring} 为剪力键厚度 (mm); f'_c 为混凝土抗压强度 (N/mm^2); K 为无因次系数, 取4^[21]。

3) 钢管桩与核心混凝土的粘结力为:

$$P_{fric} = \varepsilon_{sc} E_c A_{core} \quad (10)$$

式中: P_{fric} 为钢管桩与核心混凝土粘结力 (N); ε_{sc} 为钢管与混凝土在协调条件下的应变; E_c 为混凝土弹性模量 (N/mm^2); A_{core} 为包含剪力键截面的核心混凝土截面面积 (mm^2)。

4) 剪力键个数为:

$$N_{mech} = \frac{PF_S}{P_{mech}} \quad (11)$$

式中: P 为轴力 (N); F_S 为安全系数; P_{mech} 为剪力键传递的轴力 (N), 取 P_{cm} 和 $P_{sm-axial}$ 二者中的较小值。

5) 剪力键的间距为:

$$s = l_r + 2l_f \quad (12)$$

$$l_r = l_e + \frac{tD}{2l_f} + \frac{A_{mech}}{t} \quad (13)$$

式中： l_r 为两塑性区域的净距（mm）。剪力键间距不得小于6.5倍的钢筋保护层厚度。

6) 设计流程（图8）。

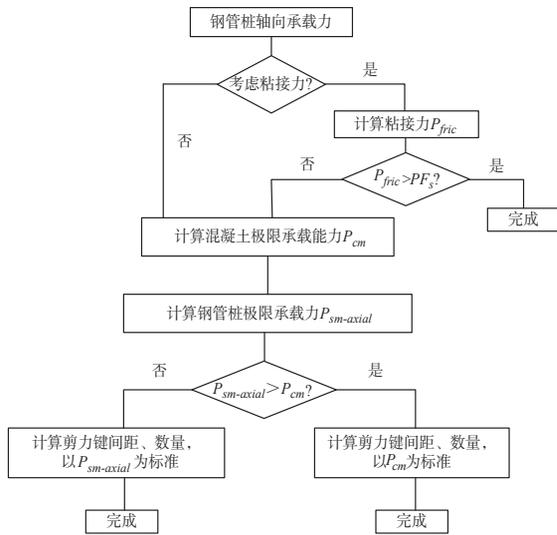


图8 剪力键设计流程

3 结论

钢管桩与上部结构的剪力键连接，是由钢筋、混凝土、钢管、剪力键多种材料构成的复合结构，多种破坏模式共存，且受力复杂。目前其设计理论的研究还不完善，试验研究仅限于轴向拉拔作用。

本文结合现有文献以及类似构件的特点，研究得出：钢管桩与上部结构剪力键连接的关键破坏模式包括混凝土在剪力键的压碎、剪力键间混凝土的折断、剪力键间混凝土的剪切、剪力键连接处钢管屈曲。

综上，极有必要进行弯矩作用下钢管桩与上部结构剪力键连接的破坏试验，并针对以上破坏模式研究有效的剪力键设计方法。

参考文献：

[1] Cowdell M, Kullman H, Macpherson R, et al. Design of the substructure of the Vancouver Convention Centre[C]// Geneva, Switzerland: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 2006.

[2] 徐力, 王东晖. 杭州湾跨海大桥水中墩区钢管桩设计[J]. 公路, 2006(9): 16-20.

[3] 徐力, 张必准. 金塘大桥非通航孔桥基础方案及结构设计[J]. 公路, 2009(1): 168-171.

[4] JTJ 254—2012 港口工程桩基规范[S].

[5] 孙艺, 杨云兰. 海外港口工程钢管桩与上部结构连接方式探讨[J]. 水运工程, 2010(7): 78-81.

[6] 黄立维, 杨锋, 张金接. 海上风机桩基础与导管架的灌浆连接[J]. 水利水电技术, 2009, 40(9): 39-45.

[7] 韩瑞龙, 施卫星, 周洋. 灌浆套筒连接技术与应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(3): 149-153.

[8] 赵媛媛, 姜超. 灌浆套管节点技术研究概况[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 514-517.

[9] 龚顺风, 沈雄风. 海洋平台的灌浆卡箍技术研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 32-37.

[10] 任少华, 赵鸿铁, 薛建阳. 方钢管混凝土粘结强度试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 68-70.

[11] 竺国表, 王珂. 钢管混凝土结构的粘结强度研究[J]. 建筑施工, 2008, 30(5): 372-374.

[12] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 17-29.

[13] 刘永健, 刘君平, 池建军. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 53-57.

[14] 康希良, 程耀芳. 钢管混凝土粘结-滑移本构关系理论分析[J]. 工程力学, 2009, 26(10): 74-78.

[15] 姜绍飞, 韩林海, 乔景川. 钢管混凝土中钢与混凝土粘结问题初探[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(2): 24-28.

[16] 于军华, 康希良. 钢管混凝土中钢与混凝土粘结问题分析[J]. 工业技术, 2008(22): 79.

[17] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J]. 建筑科学, 1996(3): 22-28.

[18] 薛立红, 蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(下)[J]. 建筑科学, 1996(4): 19-23.

[19] 仵建斌, 薛建阳, 赵鸿铁. 方钢管混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(10): 74-77.

[20] 刘永健, 池建军. 方钢管混凝土界面粘结强度的试验研究[J]. 建筑科学, 2005, 36(2): 97-98.

[21] Gebman M J, Ashford S, Restrepo J. Axial force transfer mechanisms within cast in steel shell piles [R]. California: Department of Structural Engineering, University of California, 2006.

[22] DNV. Fatigue Testing of Grouted Connections [R]. Norway: DNV, 1994.

[23] 梁兴文, 王社良, 李晓文. 混凝土结构设计原理[M]. 北