

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.003

高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展Ⅲ: 斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 16-28. (GAO Shufei, GONG Jinxin, FENG Yunfen. Advances in research on seismic performance and design methods for pile-supported wharves Part Ⅲ: Seismic performance of batter piles and pile-superstructure connections[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(2): 16-28. (in Chinese))

# 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展 Ⅲ: 斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能

高树飞<sup>1</sup>, 贡金鑫<sup>1</sup>, 冯云芬<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:**通过对高桩码头震害的分析,弄清了高桩码头破坏的主要原因。在此基础上,从高桩码头抗震设计方法、桩-土相互作用、斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能等方面,介绍了国内外高桩码头抗震研究的进展,总结了这些研究成果在高桩码头抗震设计规范中的应用,指出了高桩码头抗震性能研究的不足及需要深入研究的问题,并就如何吸收国外高桩码头抗震的研究成果及修订抗震设计规范提出了建议。本文为系列论文第3部分,主要论述了斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能。研究表明,斜桩的抗震性能存在较大争议,国外在桩-上部结构连接形式及隔震技术方面进行了大量理论和试验研究并在码头抗震设计中得到应用,我国在斜桩使用和桩-上部结构连接等方面还需要继续深入研究。

**关键词:**高桩码头; 抗震设计; 斜桩; 桩-上部结构连接

**中图分类号:** U656.1<sup>+</sup>13

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2017)02-0016-13

## 1 斜桩抗震性能

### 1.1 斜桩的作用

在高桩码头桩基中,直桩、斜桩和叉桩(成对布置的斜桩,在高桩码头中斜桩通常成对布置)均被广泛使用。斜桩通过轴向受压和受拉承受部分水平荷载,而不是仅仅通过受剪和受弯,因而比相同尺寸和埋置深度直桩的刚度大。对于需要承受较大水平荷载的结构,斜桩无疑可以提高结构的水平承载力,因此在桩基工程中应用广泛。很多学者对斜桩的水平承载力<sup>[1-3]</sup>,抗拔承载力<sup>[4]</sup>, $p-y$ 曲线<sup>[5]</sup>, $t-z$ 曲线<sup>[5]</sup>和 $Q-z$ 曲线<sup>[5]</sup>进行了研究,研究表明,斜桩的倾斜度对桩水平承载力有较大影响<sup>[1]</sup>,轴向恒荷载对倾斜群桩水平承载力的影响取决于桩基布置、桩的斜度和土的密实度。其中 Komatsu 等<sup>[3]</sup>采用容许速度场法推导了地震作用下斜桩的水平承载力计算式,并将计算结果与试验结果进行了对比,符合较好。由于斜桩的水平承载力较高,而高桩码头在运营中需要足够的水平刚度承受船舶荷载,因而一般会在轨道梁下方设置叉桩以承受门机荷载(竖向荷载)以及船舶荷载(水平荷载),叉桩能较为有效地控制码头的位移并减少直桩数目进而降低建造成本,从此角度看,叉桩的使用合理且有效。部分研究者<sup>[6-7]</sup>开展了运营荷载(船舶荷载和堆载等)下叉桩内力研究,分析了叉桩桩顶受力的变化规律和最不利工况。

### 1.2 斜桩码头的地震反应

**1.2.1 地震中较差的性能表现和规范对斜桩的考虑** 如专题(I)所述,在历次地震中叉桩的表现较差,如

收稿日期: 2015-07-16

基金项目: 交通运输部项目“强震区港口工程结构抗震设计研究”(JTSBD 2013 02 130)

作者简介: 高树飞(1989—),男,安徽蚌埠人,博士研究生,主要从事港口工程结构设计与抗震研究。

E-mail: gaosf1989@qq.com

1989年 Loma Prieta 地震中 Oakland 港第七街码头的叉桩出现大量破坏,而采用全直桩的 Howard 码头并未出现大的破坏,故相对而言叉桩的抗震性能不如直桩<sup>[8]</sup>。因此,直桩被认为是一种简单、有效地承受地震荷载的构件。不仅在高桩码头中,在其他结构的桩基础中,斜桩在地震中的表现也不令人满意,如 1991 年 7.5 级的 Costa Rica 地震中, Rio Banano 桥的斜桩遭受弯曲和剪切破坏,而直桩的破坏较少<sup>[9]</sup>。正由于在地震中斜桩的糟糕表现,因而许多规范禁止或限制使用斜桩抵抗地震作用,如法国抗震规范 AFPS<sup>[10]</sup>, 欧洲规范 8<sup>[11]</sup>, POLA, POLB 和 ASCE/COPRI 61-14 等。其中 POLA 和 POLB 均禁止在未经港口方事先批准的情况下在新建码头中使用斜桩,但对于质量不大的结构允许使用斜桩,如陆侧锚碇和靠船墩。ASCE/COPRI 61-14 规定,在结构满足地震荷载引起所有的力、位移和协调要求时,此时允许使用斜桩,而这些要求仅可通过基于位移的设计方法予以实现,除非结构被设计成在 DE 水平地震(ASCE/COPRI 61-14 规定的地震水平,50 年内超越概率为 2%)下保持弹性,否则禁止使用基于力的设计方法设计斜桩。另外还要满足一些限制条件,如禁止使用屈曲作为受压桩的屈服机制。MOTEMS 未禁止和限制斜桩的使用,但是由于其本身为基于位移的抗震设计标准,斜桩结构的设计采用基于位移的设计方法验算斜桩的变形是否满足要求,如果在斜桩破坏后其他结构构件未到材料应变限值,那么可以认为码头是稳定的,还可以继续承受地震荷载,故还应评估斜桩破坏后码头的性能,如图 1 所示的码头 Pushover 曲线。不同于国外规范,我国《水运工程抗震设计规范》(JTS 146—2012)未限制叉桩的使用,并规定在斜桩结构桩基布置中适当增加叉桩,但亦规定在抗震设防烈度为 8 度、9 度地区的高桩码头宜采用全直桩结构。日本《港湾设施技术标准与解说》没有限制斜桩的使用,但日本采用的桩以钢管桩为主,钢管桩的强度和变形性能要好于钢筋混凝土桩或预应力混凝土桩,而且由于钢管桩水平承载力较大<sup>[12]</sup>,全直桩结构较为常见。

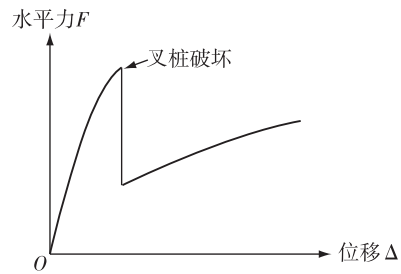


图 1 带有斜桩的码头 Pushover 曲线

Fig. 1 Pushover curve for wharf with batter piles

**1.2.2 斜桩破坏的原因及其缺点** 地震中高桩码头叉桩的主要破坏形式是桩顶处与上部结构连接处的局部开裂和断裂,产生这种破坏的原因主要是在基于力的抗震设计中假定斜桩仅通过轴力承受水平地震力,导致桩的侧向刚度很大而缺少足够的强度和延性适应由地震引起的岸坡变形产生的弯矩和剪力<sup>[13]</sup>。由此可见,由于叉桩的刚度较大,地震中承受了更大的地震力,包括地震引起的较高轴力,桩的轴力在上部结构内产生较大剪力,因此叉桩的破坏是一种非延性破坏(受压、受拉或受剪破坏),从图 1 亦可以看出。另外,叉桩也可能发生拔出破坏,易于遭受运动作用引起的破坏。总而言之,造成地震中高桩码头叉桩性能表现较差的原因主要有:采用基于力的设计方法,桩-上部结构的细部设计较差及对叉桩屈服后结构的运动缺乏足够理解<sup>[14]</sup>。对于高桩码头抗震设计,基于位移的设计比基于力的设计在设计斜桩方面更好。普遍认为使用斜桩的缺点包括:震后土体沉降和震前土体固结引起的附加弯矩、桩帽上过大的力、由于地震引起的拉力造成抗弯承载力下降、当斜桩不对称时引起的结构扭转反应以及由于体系刚度变大而引起的结构剪力增大等<sup>[15]</sup>。

**1.2.3 斜桩的性能争议及相关研究** 如果斜桩真如其在许多地震中表现的那样,在地震活跃区要禁止斜桩的使用,但是越来越多的研究和震后调查表明,至少在一些场合且设计得当的情况下,斜桩的存在对于结构和其本身的益处大于害处。高明等<sup>[16]</sup>通过对梁板式高桩码头进行振动台试验发现,未设置叉桩的码头面动力放大系数(码头面加速度与输入地震动加速度的比值)为 16.8,远大于设有叉桩的码头的 5.5,说明叉桩在很大程度上减小了码头地震反应。对于其他有斜桩的结构,也有类似发现。Lam 和 Martin 研究表明<sup>[17]</sup>,斜桩的刚度效应可能会减小液化土中桩帽位移和桩身弯矩。Guin 研究发现斜桩在很多方面可以改善桥梁的地震反应<sup>[18]</sup>。另外,还有一些震后调查表明斜桩对结构的抗震性能有利。例如在 1995 年的神户地震(6.9 级)中,设置了斜桩的 Maya 码头组合岸壁(格型墙和由桩基支撑的平台)经受了地震的破坏,其位移仅为 20 cm,而相邻带有直桩的码头完全破坏(位移约为 3 m)<sup>[19]</sup>。还有新西兰 1987 年 Edgecumbe 地震的震后调查中,发现一座桥墩承受住了液化引起的约为 2 m 的地面扩展,主要因为斜桩提供了足够的侧向刚度<sup>[20]</sup>。

因此许多研究者开展了有斜桩结构的抗震性能研究,以明确斜桩对结构抗震性能是利还是害,以及如果对斜桩进行合理的设计并使其具有承受桩顶荷载(轴力、弯矩和剪力)的能力和足够的延性,那么地震中斜桩的表现是否还是差。对水平地基上有斜桩群桩基础(非高桩码头结构)地震反应的研究主要有以下几方面。

(1)有限元分析表明,斜桩可以更好地发挥其轴向刚度,进而减小地震作用引起的剪力和弯矩,改善码头的抗震性能<sup>[21]</sup>。Poulos<sup>[22]</sup>采用边界元法研究了有斜桩群桩在水平力、竖向力、水平地基变形和竖向地基变形的内力和变形,研究表明斜桩对群桩承受水平和竖向力有利,特别是可减小水平变形。Padrón等<sup>[23]</sup>则通过边界单元法得到了有斜桩基础的阻抗函数。离心模型试验表明<sup>[24-25]</sup>,斜桩提高了群桩的侧向刚度并降低了泥面以下的桩身弯矩。Esoffier等的离心模型试验<sup>[25]</sup>还表明,与倾斜桩群相比全直群桩有更复杂的变形模式,斜桩增加桩的轴力,对桩帽处的最大弯矩影响很小,但却使相邻直桩的最大弯矩增大。Okawa等<sup>[26]</sup>通过离心模型试验研究发现,在松散砂土中,斜桩降低了上部结构的加速度幅值以及桩-桩帽连接处的最大弯矩,并改变了群桩的整体变形模式。Esoffier对两个简单的群桩进行了对比离心模型试验<sup>[27]</sup>,一个模型为两根直桩,另一个模型为一根直桩和一根斜桩,研究表明斜桩的作用受输入震动频率成分影响,在桩帽处斜桩引起不可忽略的残余弯矩、较大的水平刚度以及较大的转动。

(2)直桩群桩受惯性作用影响较大,而斜桩受运动作用影响较大<sup>[26]</sup>。在水平地基变形作用下,斜桩的存在使群桩的转动显著增加,并使桩顶轴力和弯矩增加<sup>[22]</sup>。Deng等的研究<sup>[28]</sup>表明,相比直桩,斜桩在地震中受到的轴力更大,主要由运动作用引起,因而应注意连接的设计。

(3)研究<sup>[29]</sup>表明,斜桩对桩和结构反应有利与否取决于上部结构的高度和桩-上部结构连接(固接和铰接),对于较高结构,如高的桥墩,设有对称的斜桩且桩-桩帽为铰接时,桩和结构的反应最令人满意,铰接连接对于隔震似乎不够理想,对上部结构低矮的结构,桩-上部结构的连接影响较小。Giannakou等<sup>[30]</sup>认为在单纯的运动作用下,斜桩的确表现很差,在静力的岸坡水平变形作用下,表现也不好,斜桩对抗震是利还是害取决于上部结构传递给斜桩的倾覆弯矩和剪力的相对大小。Sadek和Shahrour<sup>[31]</sup>研究了桩-桩帽连接形式对倾斜微型桩抗震性能的影响,发现桩顶铰接趋于使桩的轴力和弯矩减小。Kavazanjian<sup>[32]</sup>认为可通过对桩-上部结构连接进行合理的设计以使斜桩在保持经济性的同时承受不同的水平荷载。

对于设有叉桩的高桩码头地震反应的研究主要有以下几方面。

(1)叉桩的位置和倾斜度对高桩码头桩基的内力和变形有显著影响<sup>[33]</sup>。横向水平地震作用下,结构位移、弯矩、剪力、扭矩反应随着叉桩扭角的增大而增大,而桩轴力则随着叉桩扭角的增大而减少,纵向水平地震作用下则恰好相反,扭角的选取宜考虑多向激励的影响以及其他水平荷载<sup>[34]</sup>。陶桂兰等<sup>[35]</sup>建议在叉桩不会碰桩的情况下采用桩基双轴对称的布置形式。梁雨兰和喻泽红<sup>[36]</sup>在分析了全直桩、排架采用叉桩和在全直桩排架后设置叉桩的3种高桩码头结构内力后认为,叉桩置于码头承台时,码头结构刚度相对较大,叉桩承受较大轴力作用,发生拉压破坏可能性较大,叉桩处面板承受较大剪切作用,发生剪切破坏可能性较大;叉桩置于全直桩码头后方时,叉桩的水平位移、刚度和轴力相对较小,发生拉压破坏的可能性降低。

(2)地震作用较弱时,相比于全直桩码头,有斜桩码头的刚度较大,水平位移、直桩桩顶弯矩和水平力均较小,但残余位移较大;地震作用较强时,由于斜桩变形能力较差,混凝土容易压碎,丧失水平承载力<sup>[37]</sup>。Ravazi等<sup>[38]</sup>在比较了相同桩数的全直桩码头和有一对叉桩的码头后认为,叉桩较高的侧向刚度提高了码头的侧向刚度,也使码头的地震反应增大。叉桩作为码头中刚度最大的构件,承担了大部分地震力,设有叉桩的码头延性不如全直桩码头,叉桩最易在桩上部结构连接处发生破坏。Schlechter等<sup>[39]</sup>通过离心模型试验研究了设置叉桩和未设置叉桩的码头地震反应,量化了叉桩对高桩码头地震反应的影响,认为叉桩相比于周围的直桩承担了更多的侧向荷载(9~20倍),当不设置叉桩时,直桩的最大弯矩显著增加(1.4~3.9倍);在桩与上部结构连接处,叉桩的最大弯矩为直桩的40%~100%;不设置叉桩时,码头位移增加约30%,在同一地震水平下,未设置叉桩时,码头面板和岸坡变形会有所增加。滨田纯次等<sup>[40]</sup>对高桩码头进行了比尺为1:30振动台试验,研究表明设置斜桩的码头的地震反应主要受基底地震动的影响,而全直桩码头的地震反应

主要受接近地表的地震动影响。部分学者对叉桩节点和叉桩的耗能能力进行了研究,李文贵和龙炳煌<sup>[41]</sup>研究了钢管叉桩节点的滞回曲线、骨架曲线、延性系数、割线刚度以及耗能能力并分析了桩帽的配箍率、混凝土强度等级、轴压比以及桩芯配筋率等参数对叉桩节点抗震性能的影响;李向梅<sup>[42]</sup>分析了叉桩斜度和入土深度对耗能的影响。Oyenuga等<sup>[43]</sup>对Oakland港叉桩-面板连接进行有限元分析后认为叉桩体系是非常刚硬且脆性的,典型的破坏模式开始于受拉桩的受拉开裂,剪切破坏不太可能发生在破坏的初始阶段,采用外包混凝土对叉桩进行加固不是一种有效的措施。

(3)事实上,大部分地震中破坏的老旧结构中的叉桩均是按传统的基于力的设计方法进行设计,缺少今天先进的分析方法。采用基于位移的设计方法和经过细致构造设计的叉桩是可行的,并可大幅减少建造成本。采用隔震技术或“地震保险丝(Seismic Fuse)”的混合叉桩体系已在一些工程中得到应用<sup>[44-45]</sup>。MOTEMS采用基于位移的抗震设计方法,对于普通叉桩,规定应按下述步骤评估叉桩破坏后的码头性能:①确定斜桩-上部结构连接的破坏模式(受压、受拉、屈曲和剪切破坏)和相应的水平位移;②当达到斜桩破坏时的水平位移时,释放斜桩和上部结构之间的水平力;③对码头进行推覆直到后续的破坏发生。

图1即为按上述步骤对码头进行推覆得到的Pushover曲线。随后即可确定不同地震水平下的能力和需求,确定结构是否满足性能要求。

由于叉桩在地震作用下的延性较差,采用隔震装置不失为一种有效的方法<sup>[43]</sup>,图2为采用隔震装置的码头示意图<sup>[14]</sup>。目前仅洛杉矶港136号泊位采用了隔震技术<sup>[46]</sup>,并未大规模使用,主要是因为高桩码头的排架数较多,而一个排架内的叉桩可能不止一对,需要的隔震装置数量可能数以百计,无疑会大大增加建造成本,故而在使用隔震技术时必须仔细考虑成本效益。洛杉矶港136号泊位桩基由四排钢管叉桩和一排预应力混凝土直桩组成,叉桩由桩帽连接在一起,桩帽再通过滑动摩擦阻尼器与面板连接,直桩则采用传统的连接方式与面板连接,使阻尼器发生滑动的水平力大体上高于船舶荷载,但低于(大约75%)使桩发生首次屈服的荷载。Kilborn等研究了采用铅芯橡胶支座对设有叉桩的码头进行抗震加固的可行性<sup>[47]</sup>,并同采用打入额外桩基的方法进行了成本对比,发现采用铅芯橡胶支座更具成本优势。

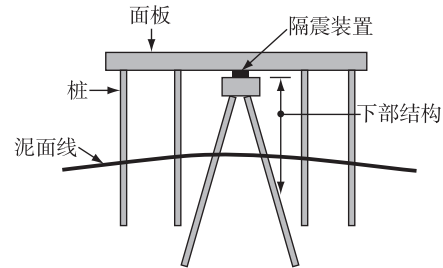


图2 设置隔震装置的码头

Fig. 2 Wharf with seismic isolation

对于叉桩在地震作用下的非线性行为(破坏方式),即面板出现塑性铰、桩沉陷或屈曲、受拉桩拔出和桩-面板连接屈服,ASCE/COPRI 61-14认为面板属于能力保护构件,故禁止在面板内出现塑性铰;而桩沉陷不切合实际,因为打入桩的轴向抗压承载力通常比抗拔承载力大,因此对于大部分高桩结构不会发生;屈曲亦不切合实际,并且桩-土之间的滑动通常不是一种可靠的能量耗散机制,因为打入桩承载力的变化需要选取适宜的超强系数,该系数太大以至于对大多数的应用都不适用;故而受拉连接屈服是斜桩发生非弹性行为最可靠的位置。ASCE/COPRI 61-14采纳了Harn<sup>[44-45]</sup>提出的一种“保险丝连接”,如图3所示,采用套管使锚固钢筋无粘结,允许受拉桩相对于受压桩变长,引起面板关于受压桩发生“撑杆跳”(Pole Vault),如图4<sup>[14]</sup>所示。带有类似“保险丝”连接的叉桩通常不适用于桩基自由长度较短的码头,因为桩身弯矩较大<sup>[14]</sup>。Ravazi等<sup>[38]</sup>建议不使用叉桩,如果必须使用叉桩,则建议不用同一节点连接斜桩和直桩,并使竖向荷载完全由直桩承担,同时使用“结构保险丝”以提高体系的延性,吸收大部分能量,使破坏集中在“结构保险丝”内,如图5所示。长滩港T集装箱码头<sup>[48]</sup>采用了如图6所示的“地震保险丝”,码头桩基由7排直桩和一对设在陆侧的叉桩(抗震桩,承受大部分水平地震荷载)组成,“保险丝”给码头提供了足够的非弹性变形能力以避免桩基破坏,所有叉桩通过一根连续的顶推梁(Thrust Beam)连接在一起,并通过一根钢管梁(“保险丝”)与面板连接在一起,当钢管梁在弯矩和剪力作用下发生屈服时,面板和顶推梁之间发生相对运动。

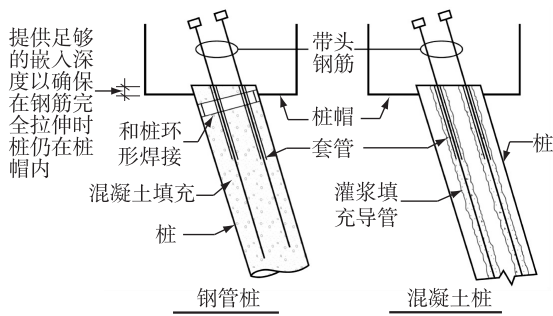


图3 受拉“保险丝”连接  
Fig. 3 Tension fuse connection

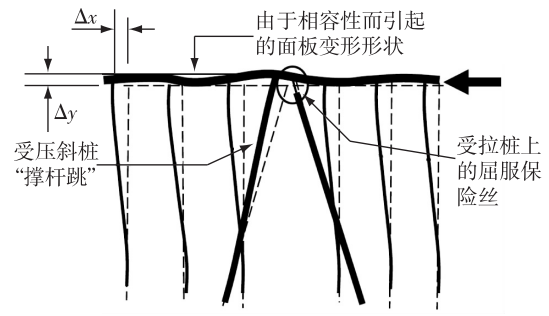


图4 采用“保险丝”连接的码头变形形状  
Fig. 4 Displaced shapes of wharf with fuse connection

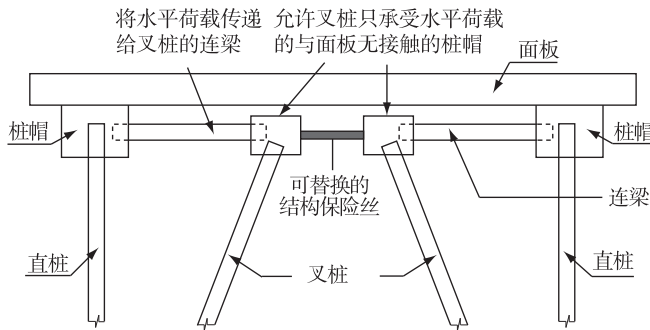


图5 采用“结构保险丝”的码头  
Fig. 5 Wharf with structural fuse

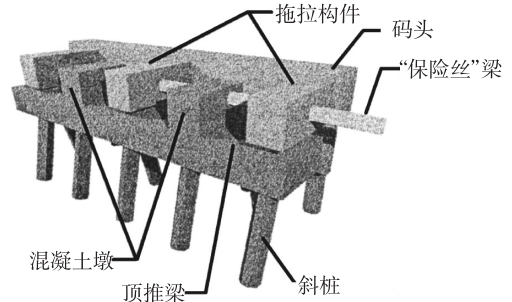


图6 长滩港T码头地震“保险丝”示意  
Fig. 6 Illustration of seismic fuse at pier T terminal, port of Long Beach

## 2 桩-上部结构连接的抗震性能

### 2.1 桩-上部结构连接震害

桩与上部结构的连接,可以采用无桩帽连接(即桩直接与上部结构连接),也可以设置桩帽,桩通过桩帽与上部结构连接<sup>[49]</sup>,图7为ASCE/COPRI 61-14中桩-面板连接形式(美国高桩码头中无梁板式码头较为常见)<sup>[14]</sup>,图中应变渗透(Strain Penetration)即为钢筋的滑移。上部结构的各种荷载通过节点传给桩基,而地基变形对桩基的影响也通过节点传给上部结构,所以连接部位受力比较复杂,是高桩码头易发生破坏的位置<sup>[49]</sup>。地震作用下桩-上部结构连接的破坏主要包括连接混凝土剥落和锚固钢筋的屈曲、拔出及断裂。图8为1989年Loma Prieta地震中Oakland港码头发生的预应力混凝土桩-面板连接的破坏<sup>[50]</sup>,图中保护层混凝土完全剥落,核心混凝土也受到影响,由于预应力筋已经裸露,可见破坏较为严重。

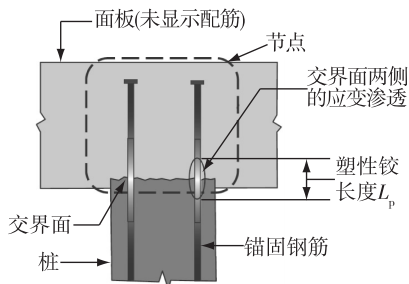


图7 桩-面板连接方式  
Fig. 7 Pile-to-deck connection



图8 Loma Prieta地震中桩-面板连接破坏  
Fig. 8 Damage at a pile-deck connection during Loma Prieta earthquake

## 2.2 桩-上部结构常用连接形式及其抗震性能

**2.2.1 常用连接形式** 图9和10分别为ASCE/COPRI 61-14给出的钢管桩和预应力混凝土桩连接形式示例,基本上涵盖了高桩码头中常用的连接形式。因为斜桩在地震中的表现较差,ASCE/COPRI 61-14主要介绍了直桩的连接形式,另外图中直桩的连接形式也会用于斜桩,只是具体处理的方式不同,构造大致相同,而且在强震区基本不推荐使用叉桩,故本文主要讨论直桩的连接和抗震性能。ASCE/COPRI 61-14按桩-面板交界面处的强度与桩身强度的相对大小,将连接分为全弯矩(Full Moment)连接和部分弯矩(Partial Moment)连接,全弯矩连接和部分弯矩连接分别为交界面处弯曲强度等于和小于交界面下桩身弯曲强度的连接,图9中(a)和(d)以及图10中(a)和(b)均为全弯矩连接,图10中(c)~(e)可以为全弯矩连接也可以为部分弯矩连接,与配筋数量有关,其余为部分弯矩连接。桩-面板连接的选择与多种因素有关,如结构类型、地震反应、桩长度、桩类型、土体刚度、非地震侧向荷载大小(如波浪荷载和船舶荷载)、震后修复能力以及腐蚀和寿命周期成本等,另外,没必要所有的桩采用同样的连接<sup>[14]</sup>。

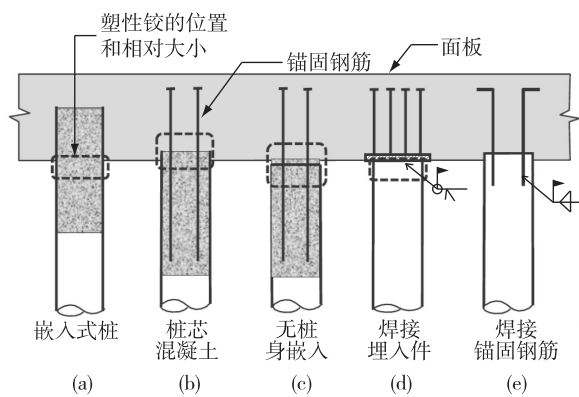


图9 钢管桩连接示例

Fig. 9 Examples of steel pipe pile connections

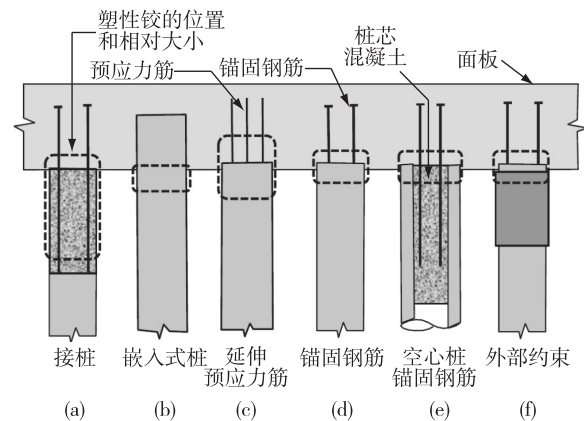


图10 预应力混凝土桩连接示例

Fig. 10 Examples of prestressed concrete pile connections

图9(a)和(e)及图10(a)和(e)分别为我国港口工程桩基规范建议的钢管桩和预应力混凝土桩连接形式。由于我国在港口工程中常用的桩型为预应力混凝土管桩,而美国常用的为八边形实心预应力混凝土桩,故而连接的具体构造,如配筋和深入上部结构的深度并不相同,具体要求见相关规范。POLA和POLB均建议采用锚固钢筋实现桩与上部结构的连接,这也是美国最常用的连接形式<sup>[51]</sup>,不允许通过将预应力筋延伸至面板内。在美国,桩通常伸入上部结构内3~4 in(75~100 mm),然后将锚固钢筋放入金属或PVC波纹管内并灌浆,再伸入面板内,以实现桩与上部结构连接<sup>[52]</sup>。图11所示的锚固钢筋为美国西海岸高桩码头最常用的T形头钢筋(T-headed Dowel Bar),T形头钢筋是通过在螺纹钢筋的端部焊接方形或圆形钢板制成的<sup>[53]</sup>,其他锚固钢筋连接形式如图12所示,其中(d)有粘结钢筋(Bond Bar)连接,是将带球形头的钢筋放入桩中预留的波纹管内并灌浆,再将一端为球形头的T形头钢筋与锚固钢筋绑扎在一起来实现的,如图13所示<sup>[54]</sup>。图10中(b)和(d)两种连接形式为POLA和POLB推荐的连接形式,图12未示出对锚固钢筋起约束作用的螺旋箍筋。当需要将锚固钢筋弯起时(图12中(a)和(c)),PIANC建议向内弯曲而不是向外弯曲,因为当传递到向外弯曲的钢筋的拉力很大时,拉力会使节点的拉应力增大,而节点已经承受由节点剪力引起的较高拉应力,进而使节点剪切裂缝向弯钩外侧延伸,特别是当弯钩低于面板顶层钢筋时,如图14(a)所示,如果锚固钢筋弯钩比图示位置更低,问题可能更为复杂,桩和面板间力的传递变得更不确定并且面板底部的混凝土可能脱落;当锚固钢筋较高且向内弯曲时,如图14(b)所示,钢筋的弯起导致锚固力直接反向作用于连接受压的拐角处,传力较为稳定。尽管图14(b)所示构造的传力形式较为稳定,但弯起锚固钢筋对面板内受弯钢筋的布置产生明显干扰,造成施工困难,故宜使用有粘结钢筋和带头钢筋(图12中(b)和(d)),这两种

构造在美国洛杉矶港和奥克兰港广泛使用。虽然采用有粘结钢筋构造可较好地与螺旋箍筋一起发挥作用,但有粘结钢筋使节点区变得拥挤,故使用带头钢筋较为适宜<sup>[55]</sup>。



图 11 T 形头钢筋  
Fig. 11 T-headed bar

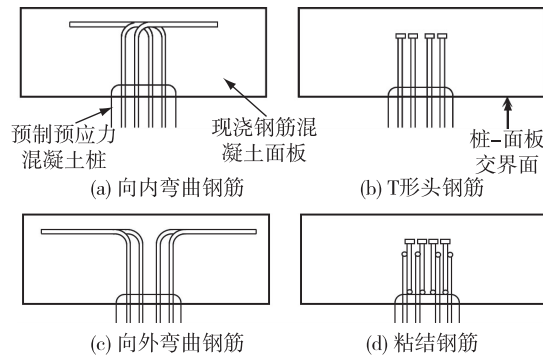


图 12 典型的锚固钢筋构造  
Fig. 12 Typical dowel bar connection details

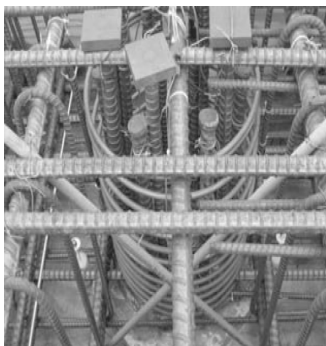


图 13 有粘结钢筋构造  
Fig. 13 Details for bond bars

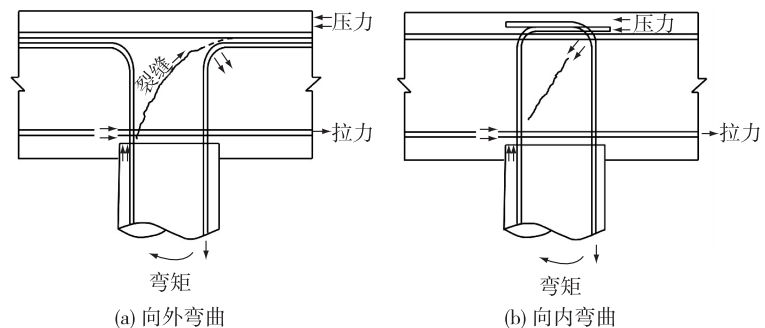


图 14 锚固钢筋的弯起锚固  
Fig. 14 Anchorage with hooked dowels

2.2.2 常用连接形式的抗震性能 很多研究者对桩-板连接形式进行了理论和试验研究,部分研究并非专门针对码头结构,但由于连接形式类似,仍有参考价值,主要研究有以下几方面。

(1) 钢管桩连接。Stephens 和 Mckittrick<sup>[56]</sup>对钢管桩嵌入上部结构的连接(图 9(a))进行了试验研究,钢管桩伸入桥梁帽梁 1 倍桩径,表明需要相当多的配筋才可强迫塑性铰出现在钢管桩内,从而达到保护上部结构的目的;试验还表明通过简单的计算即可足够准确地预测连接的破坏,即预测管桩中塑性铰的形成。研究表明<sup>[57]</sup>,采用桩芯混凝土的连接(图 9(b))具有较好的变形能力,几乎没有强度和刚度退化,而且由于管壳承压在面板上增大了弯曲力臂,连接也表现出较高的超强(Overstrength)承载力,如图 15 所示。对于桩身(钢管)不嵌入面板的连接(图 9(c)),桩的支承作用对弯曲力臂影响不大,连接的超强弯矩也不大<sup>[58]</sup>。研究发现<sup>[59]</sup>,管壁上焊接剪切环可有效将剪力从桩芯混凝土传递给管壁。对于焊接埋入件的连接(图 9(d)),试验研究表明锚固钢筋会发生滑移和断裂<sup>[60]</sup>。对于焊接锚固钢筋的连接(图 9(e)),ASCE/COPRI 61-14 规定,如果其非弹性性能不够好,不允许使用,因为焊接可能会使锚固钢筋发生脆性破坏。

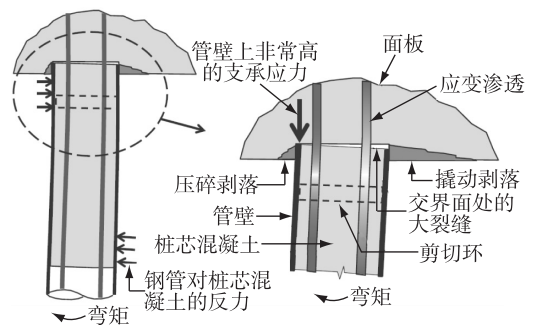


图 15 桩芯混凝土性能  
Fig. 15 Concrete plug performance

(2) 预应力混凝土桩连接。接桩钢筋混凝土连接段(图 10(a))用于打入桩桩顶标高低于上部结构底标高的情况,非弹性变形大部分发生在该连接段,滞回曲线较为饱满且强度退化小<sup>[55]</sup>。对于桩伸入上部结构

的连接(图 10(b)),只要嵌入足够深就可保证连接具有足够的承载力<sup>[61]</sup>,但嵌入的桩造成节点不连续,从而使节点抗剪计算变得较为复杂。Joen 通过试验研究了桩伸入桩帽、将预应力筋伸入桩帽(图 10(c))和通过锚固钢筋与桩帽连接(图 10(d))的连接方式<sup>[62]</sup>,表明桩嵌入桩帽的形式最好,只将预应力筋延伸入桩帽的连接次之,采用锚固钢筋的连接较差,除非使用的锚固钢筋很多,建议用螺旋箍筋约束伸入桩帽内的预应力筋。但是,POLA 和 POLB 禁止将预应力筋延伸至桩帽的做法。有锚固钢筋连接的性能受钢筋数量和轴力影响较大,轴力可提高连接的强度,但也使连接的变形能力严重退化。另外,对锚固钢筋的约束在某种程度上影响着连接的性能,主要是混凝土的开裂形式和连接内非弹性变形的分布,对连接的总体性能或延性无显著影响<sup>[55]</sup>。Krier 通过试验研究了采用 8-10#钢筋(POLA 的抗震桩连接)和 4-9#钢筋(POLA 的非抗震桩连接)的锚固钢筋连接<sup>[54]</sup>,两种连接均在桩-面板界面处出现了大裂缝,而桩上出现了一些细小裂缝,当延性需求约为 3 时,保护层剥落,抗震桩表现良好,但还是出现明显的承载力下降;试验还表明两种连接在超过 POLA 规定的应变极限后变形能力均有富余,说明采用规范的性能要求安全有效。Sritharan 和 Priestley 的试验表明<sup>[63]</sup>,图 12(d)所示的连接具有较好的延性,没有必要将图中的 T 形头钢筋和球形头钢筋紧密布置在一起使用。对于空心桩锚固钢筋连接(图 10(e)),如果连接使用的锚固钢筋数量过多,支撑于桩外壁的桩芯混凝土产生的水平反力会使桩外壁产生纵向裂缝<sup>[14]</sup>。外部包裹(如碳纤维布等)常用于结构的改造和维修,在新建结构中亦有使用(图 10(f)),但目前尚未见到采用外加约束的高桩码头连接段抗震性能的研究。Bell 对洛杉矶港的桩-板连接进行了足尺试验<sup>[64]</sup>,一个为采用锚固钢筋的预应力桩连接,另一个为 H 形钢桩连接(桩伸入面板内),研究表明现有码头桩-板连接能经受住洛杉矶港规定的地震动水平下的塑性变形。

(3) 试验<sup>[54-55,63-66]</sup>表明,桩-面板连接处的撬动转角主要发生在桩-面板界面处,如图 16 所示。在地震反复荷载作用下,桩-面板界面间隙反复张开、闭合,表现为下列过程:①桩受拉开裂;②桩-板界面锚固钢筋受拉屈服和局部弯曲;③撬动引起连接段受拉面混凝土剥落;④连接段受压面压碎;⑤桩受压混凝土压碎;⑥螺旋箍筋屈服导致核心混凝土约束失效,弯曲力臂和受剪承载力减小;⑦连接段退化使锚固钢筋受剪导致其屈曲和断裂<sup>[14]</sup>。

**2.2.3 连接段数值模拟** 在高桩码头抗震分析中,常采用集中塑性铰模型模拟桩的非线性性能,塑性铰出现在桩-上部结构连接段。对连接段截面进行弯矩-曲率分析,乘以计算的塑性铰长度,确定塑性铰段恢复力模型的骨架曲线,再选取合适的恢复力模型,即可考虑桩的弹塑性对高桩码头结构进行非线性数值分析。在地震作用下,连接段钢筋会发生滑移(应变渗透),故在分析中应予以考虑,POLB 通过采用一个应变渗透长度  $l_{sp}$  来考虑钢筋滑移对码头水平位移的影响,如图 17 所示,这一方法亦为 POLA 和 ASCE/COPRI 61-14 所采用。图中面板以下 16 in(400 mm)的桩长为钢筋混凝土截面,是为了考虑预应力筋发挥作用所需的长度。较为复杂的方法是采用纤维模型和转动弹簧模拟桩-上部结构连接,采用纤维模型模拟桩,利用 OpenSees 软件中的零长度单元模拟转动弹簧,零长度单元用于模拟钢筋的滑移<sup>[51]</sup>。

Caiza<sup>[51]</sup>利用 OpenSess 软件建立桩-面板连接模型模拟了 Jellin<sup>[65]</sup>试验的试件,试件采用 T 形头锚固钢

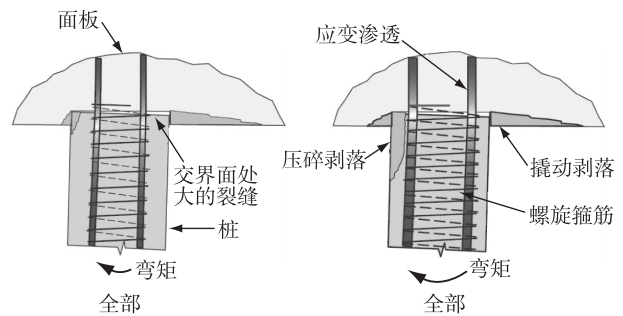


图 16 全弯矩连接和部分弯矩连接的性能

Fig. 16 Performance of partial and full moment connections

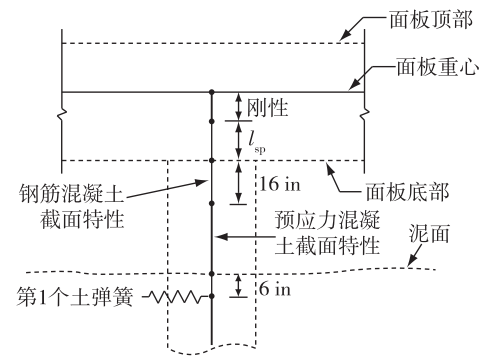


图 17 考虑应变渗透长度的桩-面板连接模型

Fig. 17 A pile-deck connection model with strain penetration length



筋连接(图 10(d)),研究了钢筋滑移对连接总转角的贡献,如图 18 所示,图中转角比为钢筋滑移引起的转角与连接总转角之比。Caiza 还研究了不同结构参数(混凝土强度、纵筋和箍筋配筋率、预加应力及轴压比)对连接性能的影响,建议采用损伤指数反映连接的非线性状态。Foltz 对桩-面板连接进行了试验研究<sup>[67]</sup>,认为钢筋滑移量的大小与加载的幅值有关,钢筋滑移是造成弯曲引起的转角与实测总转角存在差别的主要原因,在较低的荷载作用下,桩身弯曲变形引起的转角占连接总转角的 30%,钢筋滑移引起的转角占 70%,随着破坏的发展,钢筋滑移引起的可占到 90%。另外,Foltz 使用 ATENA 软件模拟了采用高性能纤维增强水泥基复合材料(HPFRC)制作的桩-上部结构连接,研究表明相比于普通钢筋混凝土连接,HPFRCC 连接的受弯和受剪承载力大幅度提高,破坏前的转动能力很大。

### 2.3 新型桩-上部结构连接形式及抗震性能

如果设计中计算表明采用前述常用的连接形式无法满足抗震性能要求,也可采用其他形式的连接,只要经理论分析或试验验证其性能满足设计要求即可。一些学者提出了新型连接,主要是用隔离材料将桩-板界面隔离,图 19 为 Jellin<sup>[65]</sup>和 Stringer<sup>[66]</sup>提出的新型连接形式,Stringer 提出的连接形式是在 Jellin 的连接基础上将承压垫板换为环形而成的。Jellin 通过低周往复试验研究了其所提出的连接的抗震性能,并与传统采用 T 形头锚固钢筋的连接进行了对比,试验表明垫板可减轻和延缓桩的破坏,而柔性膨胀材料(泡沫塑料)防止面板破坏。Stringer 的试验表明,采用环形垫板的连接相比于全截面采用垫板的连接,桩开裂较早,但桩和面板混凝土受压剥落的时间较晚,发生严重混凝土剥落的时间相当。Jellin 和 Stringer 试验采用的垫板材料均为棉粗布。Soderberg 和 Lind 提出了一种与 Jellin 形式类似的连接<sup>[68]</sup>,只是承压垫板采用的材料为纤维增强橡胶,分析后认为垫板可降低地震中连接的局部应力和破坏,提高连接的柔性,保证在连接强度不下降的情况下码头具有更大的水平变形。Chiaromonte 等研究了采用传统 T 形头锚固钢筋连接和 Stringer 提出的连接(承压垫板分别为粗棉布和合成橡胶)的码头地震反应<sup>[69]</sup>,表明新型连接明显减轻了码头的破坏。

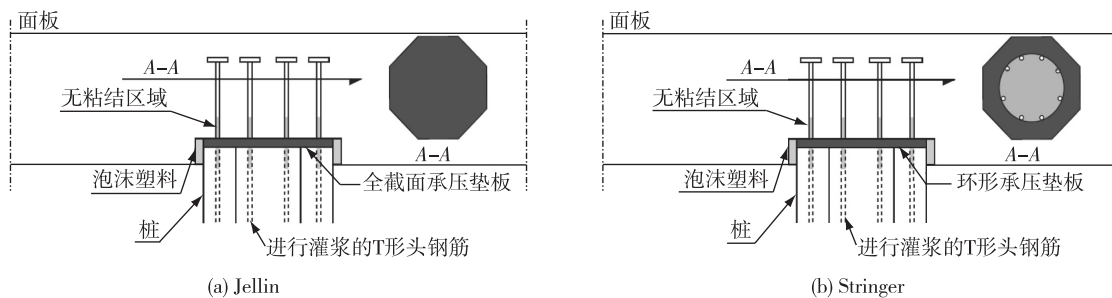


图 19 新型桩-面板连接

Fig. 19 New type of pile-deck connection

## 3 结 语

由于混凝土的受压变形能力比较差,高桩码头的斜桩和叉桩在地震中的表现总体比较差,因此关于抗震中使用斜桩和叉桩及限制使用斜桩和叉桩的争论很多,尚需进一步研究。地震“保险丝”可以很好地帮助叉桩承受地震荷载,但仅对横向地震动有效,在纵向,码头的抗震性能还是需要依赖桩的延性,有必要开展进一步研究使其对多向激励也发挥作用。对于采用隔震装置和“保险丝”连接的码头抗震性能的研究还比较匮乏,如何设计此类结构还缺少系统和有效的方法,因此应开展进一步的理论和试验研究。已有的研究主要针

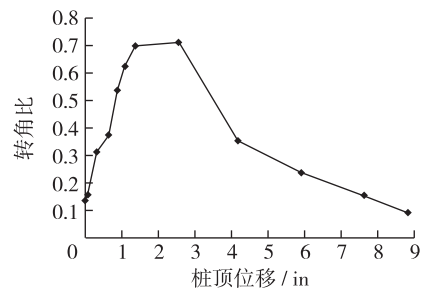


图 18 钢筋滑移对连接总转角的贡献

Fig. 18 Contribution of rebar slip to total rotation of pile-deck connection

对混凝土斜桩,对于钢管斜桩的研究不多,有必要开展进一步研究。

桩-面板连接是高桩码头抗震的关键部位,采用合理的连接形式对码头抗震性能至关重要。目前设计中一般对连接段采用纤维法进行荷载-变形分析,但由于桩与面板的连接方式不同,特别是采用桩-板界面隔离的形式,这种计算方法可能不再合适(这种情况主要呈现为以桩承压点为支点的转动)。另外,轴力对桩-上部结构连接的性能退化影响较大,而高桩码头不同桩基的轴力并不相同,应进一步研究轴力对连接性能的影响。对于斜桩-上部结构连接的试验研究还很匮乏,虽然抗震设计中不建议采用传统连接方式的叉桩,但仍有很多老码头采用该形式连接,所以应对其抗震性能进行评估以确定有无必要对码头进行抗震加固。关于老码头的升级改造,对桩-上部结构连接采用纤维增强织物(碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维等)包裹是一种简便有效的方法,但相关研究不多。另有研究<sup>[55]</sup>表明,增加桩长和减小桩径可以提高连接的延性和变形能力,应量化桩长和桩径的影响以使连接设计更为合理。目前,我国对于桩-上部结构连接的研究主要集中在承载力方面<sup>[70-72]</sup>,对变形方面关注较少,缺乏相关试验研究。我国采用的桩型与国外不同,连接形式也较为单一,不宜直接采用国外的相关研究成果,应结合国内的实际开展深入的理论和试验研究。

### 参 考 文 献:

- [1] NARASIMHA R S, VEERESH C. Influence of pile inclination on the lateral capacity of batter piles in clays [C] // The Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 1994, 1: 498-503.
- [2] ZHANG L M, MCVAY M C, HAN S J, et al. Effects of dead loads on the lateral response of battered pile groups [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 561-575.
- [3] KOMATSU A, MAEDA Y, SAKATA T. Study on seismic bearing capacity of grouped piles with battered piles [C] // 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004, Paper No. 3294.
- [4] NAZIR A, NASR A. Pullout capacity of batter pile in sand [J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4(2): 147-154.
- [5] CHAEMMANGKANG P. Behavior of batter piles in sand [D]. Illinois: University of Illinois, 2001.
- [6] 唐东洋, 翟钢军, 熊洪峰. 不同作用力下高桩码头叉桩受力分析 [J]. 水道港口, 2010, 31(6): 609-614. (TANG Dongyang, ZHAI Gangjun, XIONG Hongfeng. Force analysis for inclined pile of high-piled wharfs under different forces [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(6): 609-614. (in Chinese))
- [7] 刘现鹏, 熊洪峰, 赵冲久. 高桩码头叉桩最不利受力工况分析 [J]. 水道港口, 2011, 32(6): 427-433. (LIU Xianpeng, XIONG Hongfeng, ZHAO Chongjiu. Analysis of the most unfavorable load case for inclined piles of high-piled wharf [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011, 32(6): 427-433. (in Chinese))
- [8] 谢世楞. 奥克兰港高桩码头的震害对比 [J]. 港工技术, 1990(4): 13-17. (XIE Shileng. Damage contrast between the pile-supported wharves at Port of Oakland [J]. Port Engineering Technology, 1990(4): 13-17. (in Chinese))
- [9] PRIESTLEY N, SINGH J, YOUNG T, et al. Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 reconnaissance report [R]. Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute, 1991.
- [10] Association Française de Génie Parasismique, Recommandations AFPS 90 [S]. (in French)
- [11] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 5: foundations, retaining structures, and geotechnical aspects [S]. 2003.
- [12] 横田弘, 川崎進, 菅原亮, 等. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析 [R]. 日本運輸省港湾空港技術研究所, 1999. (YOKOTA Hiroshi, KAWASAKI Susumu, SUGAWARA Ryo. Ultimate structural performance of steel-pile supported wharves [R]. The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan, 1999. (in Japanese))
- [13] WERNER S D. Seismic guidelines for ports [M]. New York: ASCE, 1998.
- [14] ASCE/COPRI 61-14 Seismic design of piers and wharves [S].
- [15] GAZETAS G, MYLONAKIS G. Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues [J]. Geotechnical Special Publication, 1998, 2(75): 1119-1174.
- [16] 高明, 赵颖, 靳道斌. 桩基码头抗震试验研究及动力分析 [J]. 水利水电科学研究, 1981(4): 37-50. (GAO Ming, ZHAO Yin, JING Daobin. Seismic experimental studies and dynamic analysis of pile-supported piers [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1981(4): 37-50. (in Chinese))

- [17] LAM I, MARTIN G R. Seismic design of highway bridge foundations, Vol II, Design procedures and guidelines. Report No. FHWA/RD-86/102[R]. Virginia: Federal Highway Administration, 1986.
- [18] GUIN J. Advances in soil-pile-structure interaction and non-linear pile behavior[D]. New York: State University of New York at Buffalo, 1997.
- [19] KASTRANTA G, GAZETAS G, TAZOH T. Performance of three quay walls in Maya Wharf: Kobe 1995[C]//Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering, Paris, 1998.
- [20] BERRILL J B, CHRISTENSEN R J, KEENAN R J, et al. Lateral spreading loads on a piled bridge foundation[C]//Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures: Special Technical Session on Earthquake Geotechnical Engineering, Rotterdam, Netherlands, 1997: 173-183.
- [21] SADEK M, ISAM S. Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(6): 473-485.
- [22] POULOS H G. Raked piles—virtues and drawbacks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 795-803.
- [23] PADRÓN L A, AZNÁREZ J J, MAESO O, et al. Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(12): 1343-1367.
- [24] JURAN I, BENSLIMANE A, DRABKIN S, et al. Centrifuge model tests on single, groups and networks of micropiles[R]. New York: Polytechnic University, 1998.
- [25] ESCOFFIER S, CHAZELAS J L, GARNIER J. Centrifuge modelling of raked piles[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 689-704.
- [26] OKAWA K, KAMEI H, KIMURA M, et al. Dynamic behaviour of a group-pile foundation with inclined piles in loose sand[J]. Physical Modelling in Geotechnics, 2002(2): 729-734.
- [27] ESCOFFIER S. Experimental study of the effect of inclined pile on the seismic behavior of pile group[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 42: 275-291.
- [28] DENG N, KULESZA R, OSTADAN F. Seismic soil-pile group interaction analysis of a battered pile group[C]//4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, June, 2007: 25-28.
- [29] GEROLYMOS N, GIANNAKOU A, ANASTASOPOULOS I, et al. Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(4): 705-722.
- [30] GIANNAKOU A, GEROLYMOS N, GAZETAS G, et al. Seismic behavior of batter piles: elastic response[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(9): 1187-1199.
- [31] SADEK M, SHAHROUR I. Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 461-468.
- [32] KAVAZANJIAN E. A driven-pile advantage: Batter piles[J]. Pile Driver, 2006(4): 21-25.
- [33] RAHIMI M R, BARGI K. Efficient arrangement of batter piles of a pile-supported wharf in sands[C]//5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference, Sydney, 2010: 1307-1314.
- [34] 陶桂兰, 陈祥, 王定. 叉桩扭角对高桩码头抗震性能影响分析[J]. 水道港口, 2012, 33(5): 423-428. (TAO Guilan, CHEN Xiang, WANG Ding. Impact analysis of fork pile's torsion angle on seismic performance of high-pile wharf[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(5): 423-428. (in Chinese))
- [35] 陶桂兰, 陈祥, 王定. 高桩码头叉桩布置形式抗震性能分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 469-474. (TAO Guilan, CHEN Xiang, WANG Ding. Seismic performance analysis of fork pile arrangement type of high-pile wharf[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4): 469-474. (in Chinese))
- [36] 梁雨兰, 喻泽红. 叉桩布置对高桩码头地震动力反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 143-149. (LIANG Yulan, YU Zehong. Seismic performance of the pile-supported wharf with varied batter pile patterns[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 143-149. (in Chinese))
- [37] 李颖, 贡金鑫. 有斜桩和无斜桩高桩码头地震反应的非线性有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 1-13. (LI Ying, GONG Jinxin. Nonlinear finite element analysis of seismic performance for wharf structures with and without batter piles attached[J]. Journal of Hydro-Science and Engineering, 2011(2): 1-13. (in Chinese))
- [38] RAVAZI S A, FAHKER A, MIRGHADERI S R. An insight into the bad reputation of batter piles in seismic performance of wharves[C]//4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, 2007: 25-28.
- [39] SCHLECHTER S M, DICKENSON S E, MCCULLOUGH N J, et al. Influence of batter piles on the dynamic behavior of pile-

- supported wharf structures[C]//Proceedings of the Ports 2004 Conference, Houston, Texas. 2004: 420-430.
- [40] 濱田純次,菅野高弘,上部達生,等.斜杭式栈橋の地震時挙動に関する模型振動実験[C]//土木学会論文集,2001: 101-113.(HAMADA Junji, SUGANO Takahiro, UWABE Tatsuo, et al. Shaking table tests for dynamic response of a wharf with coupled batter piles[C]//Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 2001: 101-113. (in Japanese))
- [41] 李文贵,龙炳煌.高桩码头叉桩节点抗震性能有限元数值模拟[J].建筑科学与工程学报,2010,27(4): 86-95.(LI Wengui, LONG Binghuang. Finite element numerical simulation of seismic behavior for batter pile joint in pile-wharf structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 86-95. (in Chinese))
- [42] 李向梅.高桩码头叉桩抗震性能研究及其有限元分析[D].武汉:武汉理工大学,2007.(LI Xiangmei. Research and FEA of batter pile's anti-seismic behavior on pile-wharf structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [43] OYENUGA D, ABRAHAMSON E, KRIMOTAT A, et al. A study of the pile-wharf deck connection at the port of Oakland[C]//Ports' 01: America's Ports: Gateway to the Global Economy. ASCE, 2001:1-10.
- [44] HARN R E. Have batter piles gotten a bad rap in seismic zones? (Or everything you wanted to know about batter piles but were afraid to ask)[C]//Ports 2004: Port Development in the Changing World. ASCE, 2004: 1-10.
- [45] HARN R E. Displacement design of marine structures on batter piles[C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada, 2004.
- [46] ZMUDA R, WEISMAIR M, CASPE M. Base isolating a wharf using sliding friction isolators at the port of los angeles[C]//Ports' 95, ASCE, 1995: 1263-1274.
- [47] KILBORN J, HARN R, FIRAT Y. Seismic retrofit of piers supported on battered piles using lead-rubber bearings[C]//Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future, ASCE: 71-80.
- [48] JOHNSON R K, RIFFENBURGH R, HODALI R, et al. Analysis and design of a container terminal wharf at the Port of Long Beach[C]//Ports' 98, ASCE, 1998: 436-444.
- [49] 王炳煌.高桩码头工程[M].北京:人民交通出版社,2010.(WANG Binghuang. Pile-supported wharf engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [50] SERVENTI G M, JORDAN M A, FOTINOS G, et al. The design of earthquake damage repairs to wharves before the earthquake occurs[C]//Ports 2004: Port Development in the Changing World, ASCE, 2004: 297-306.
- [51] CAIZA SANCHEZ P. Seismic modeling, analysis and design of structural concrete pile-deck connections [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [52] ROEDER C W, GRAFF R, SODERSTROM J, et al. Seismic performance of pile-wharf connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3): 428-437.
- [53] CUBAS A, FOLTZ R, LAFAVE J. Seismic performance of pile-wharf connections[R]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [54] KRIER C J. Seismic testing of full-scale precast prestressed pile to deck connections[D]. California: University of California, San Diego, 2006.
- [55] ROEDER C W, GRAFF R, SODERSTROM J L, et al. Seismic performance of pile-wharf connections[R]. Washington: University of Washington, 2002.
- [56] STEPHENS J E, MCKITTRICK L R. Performance of steel pipe pile-to-concrete bent cap connections subject to seismic or high transverse loading; phase 2, Report No. FHWA/MT-05-001/8144[R]. Montana: Montana State University, 2005.
- [57] PARK R J T, PRIESTLEY M J N, WALPOLE W R. The seismic performance of steel encased reinforced concrete bridge piles [J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1983, 16(2): 123-140.
- [58] SILVA P F, SEIBLE F. Seismic performance evaluation of cast-in-steel-shell (CISS) piles[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(1): 36-49.
- [59] GEBMAN M, ASHFORD S, RESTREPO J. Axial force transfer mechanisms within cast-in-steel-shell piles, Report No. UCSD/SSRP-06/16[R]. California: University of California at San Diego, 2006.
- [60] STEUNENBERG M, SEXSMITH R G, STIEMER S F. Seismic behavior of steel pile to precast concrete cap beam connections [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(4): 177-185.
- [61] HARRIES K A, PETROU M F. Behavior of precast, prestressed concrete pile to cast-in-place pile cap connections[J]. PCI Journal, 2001, 46(4): 82-92.
- [62] JOEN P H. Seismic performance of prestressed concrete piles and pile-pile cap connections[D]. Christchurch, New Zealand:

- University of Canterbury, 1987.
- [63] SRITHARAN S, PRIESTLEY M J N. Seismic testing of a full-scale pile-deck connection utilizing headed reinforcement[R]. California; University of California, San Diego, 1998.
- [64] BELL J K. Seismic testing of existing full-scale pile-to-deck connections: precast prestressed and steel piles[D]. California; University of California, San Diego, 2008.
- [65] JELLIN A. Improved seismic connections for pile-wharf construction[D]. Washington; University of Washington, 2008.
- [66] STRINGER S. Seismic performance of improved damage resistant pile to wharf deck connections[D]. Washington; University of Washington, 2010.
- [67] FOLTZ R. Structural behavior and modeling of high-performance fiber-reinforced cementitious composites for earthquake resistant design[D]. Illinois; University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [68] SODERBERG E, LIND D, LONI S. Innovative wharf details: elastomeric bearing pile-deck connection and finned monopile[C] //Ports'13: 13th Triennial International Conference, ASCE, 2013: 1-10.
- [69] CHIARAMONTE M M, ARDUINO P, LEHMAN D E, et al. Seismic analyses of conventional and improved marginal wharves [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(10): 1435-1450.
- [70] 竺存宏, 张凤珍, 郑锋勇. 大管桩与上部结构直接连接方案的试验研究[J]. *水道港口*, 1992(1): 8-16. (ZHU Cunhong, ZHANG Fengzhen, ZHENG Fengyong. Study on design concept of direct connection of a large pipe pile to the upper structure of a dock[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1992(1): 8-16. (in Chinese))
- [71] 宋玉普, 王茂林, 赵国藩. 高桩码头大管桩桩帽力学性能的三维非线性有限元分析[J]. *海洋学报*, 1996, 18(2): 131-137. (SONG Yupu, WANG Maoling, ZHAO Guofan. Three-dimensional finite element analysis of mechanical performance for large pipe pile cap of pile-supported wharf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(2): 131-137. (in Chinese))
- [72] 李平先, 张雷顺, 赵国藩. 预应力混凝土管桩与桩帽连接节点轴拔性能原型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(7): 81-86. (LI Pingxian, ZHANG Leishun, ZHAO Guofan. Prototype test on the axial pull-out behavior of the joint of prestressed concrete pipe pile and pile cap[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(7): 81-86. (in Chinese))

## Advances in research on seismic performance and design methods for pile-supported wharves Part III : Seismic performance of batter piles and pile-superstructure connections

GAO Shufei<sup>1</sup>, GONG Jinxin<sup>1</sup>, FENG Yunfen<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *School of Architecture and Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China*)

**Abstract:** The main reasons resulting in the poor seismic performance of the open type wharf with standing piles are clarified by examining extensive documented case studies of the damaged pile-supported wharves. The state of the art of the research on the open type wharf with standing piles, from the aspects of the seismic design methods, soil-pile interaction, seismic performance of the batter piles and pile-deck connections, is presented, and the applications of the research findings from the seismic codes for the pile-supported wharves are summarized, and the deficiencies concerning the researches and the problems needed to be further studied are pointed out. Some suggestions to revise the domestic seismic design codes and specifications are made. This is the third part of the series papers which discuss the seismic performance of the batter piles and pile-superstructure connections. The research results show that there is a great controversy in the seismic performance of the batter piles, and extensive theoretical and experimental studies on the pile-superstructure connections as well as the isolation technique have been carried out and the related findings applied to the seismic design of the wharves. And subsequent researches should be still conducted on the usage of the batter piles and pile-superstructure connections.

**Key words:** pile-supported wharves; seismic design; batter piles; pile-superstructure connections