

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.06.001

高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能 and 设计方法研究进展 I: 震害和抗震设计方法[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 1-8. (GAO Shu-fei, GONG Jin-xin, FENG Yun-fen. Advances in research on seismic performance and design methods for pile-supported wharves Part I: Earthquake damage and seismic design methods[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 1-8.)

国内外高桩码头抗震性能 and 设计方法研究进展

I: 震害和抗震设计方法

高树飞¹, 贡金鑫¹, 冯云芬²

(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, 阐明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, 论述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。对国内如何吸收国外高桩码头抗震的研究成果及抗震设计规范的修订方向提出了建议。该系列论文分为3部分, 此为第1部分, 主要介绍了高桩码头的震害和破坏形式以及高桩码头的抗震设计方法。分析表明, 基于位移的设计方法是国外高桩码头抗震设计的主要发展方向, 我国应开展相关研究, 将基于力的抗震设计规范修订为基于位移的抗震设计规范。

关键词: 高桩码头; 震害; 破坏形式; 抗震设计方法

中图分类号: U656.1⁺13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)06-0001-08

港口作为水陆联运的枢纽, 对区域和国家的经济具有举足轻重的影响。码头作为重要的港口设施之一, 对于维持港口的正常运营必不可少。码头结构除承受其自身重力、堆货荷载、起重运输机械荷载、船舶荷载、波浪力等荷载外, 对于处于地震区的码头, 还要遭受地震作用。国内外近年来的港口工程震害表明, 码头结构在地震作用下易于遭到破坏, 并会带来极大的直接和间接经济损失, 如1995年的Hyogoken-Nanbu地震, 造成神户港的维修费用高达55亿美元, 且由于地震引起的港口运营中断仅在1年内就造成60亿美元的间接经济损失^[1], 因而研究码头结构的抗震性能对于减轻地震损失具有重要意义。

高桩码头作为重要的码头结构型式之一, 具有对波浪反射小、泊稳条件较好、对挖泥超深的适应性强和砂石料用料少等特点, 并且特别适用于软土地基, 因而在港口工程中得到广泛应用。目前, 我国的高桩码头抗震设计主要是基于《水运工程抗震设计规范》(JTS 146-2012)^[2]。该规范采用基于力的设计方法, 而国外的主流标准规范已采用基于位移的抗震设计方法^[3], 相对于基于位移的方法, 基于力的方法存在诸多不足之处, 如无法反映结构达到承载力之前和之后的性能。而且, 我国规范仍采用单一的设防水准, 未体现基于性能的抗震设计理念。另外在抗震概念设计和构造措施上也存在严重不足, 比如我国规范仍规定在桩基布置中适当增加叉桩, 而国外标准^[4-7]禁止或限制叉桩的使用, 或采用基于位移的设计方法进行叉桩的设计。

我国高桩码头抗震研究始于1976年唐山大地震后, 在地震后的数十年间开展了大量理论和试验研究, 而随着时间推移, 由于我国沿海地区再未发生过破坏性地震, 高桩码头抗震研究基本停滞不前。随着我国港口工程企业逐步向海外发展, 发现国内抗震设计标准与国外标准之间存在巨大差异和不足, 而国外很多港口

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

都位于强震区,对此提出了与国外标准进行对接研究的课题,以期为国内企业开拓国外市场提供技术支持。另外,世界范围内地震活动日益增强,我国沿海地区未来发生破坏性地震的可能性日渐增大,有必要深入开展高桩码头抗震研究。因此,本文在对高桩码头震害进行分析的基础上,通过参考大量相关文献的研究,详述了国内外高桩码头抗震研究的进展(主要是中国和美国的研究,部分涉及日本),并指出存在的不足和今后需深入研究的问题,为国内高桩码头抗震设计方法的改进和规范的修订提供参考。

1 高桩码头震害和破坏形式

与板桩码头和重力式码头不同,高桩码头的上部结构暴露在泥面以上,重心在面板所在平面,因此,高桩码头的地震破坏主要发生在下部桩基。下面是国内外几次重大地震中高桩码头的典型震害。

1976年唐山地震使天津新港高桩码头遭受不同程度的破坏。天津新港的主要码头结构型式为梁板式,在排架中设置一对叉桩,原地面至-5 m为回填土,-13 m以上为褐灰色黏土。地震造成大量叉桩断裂、桩帽开裂和面板露筋,不同泊位叉桩的受损程度不同,最多的出现高达70%的叉桩开裂,结构震害主要是由上部结构受到的地震惯性力引起的。部分码头的后板桩斜支撑桩结岸结构发生板桩挠曲倾斜,斜支撑桩约有95%发生不同程度的损坏,受压桩劈裂,受拉桩出现1~3条裂缝。码头出现沉降,最大达7.2 cm,并且部分码头出现近百处喷砂现象^[8]。

1989年的美国 Loma Prieta 地震给奥克兰港的第七街码头造成了严重破坏,码头断面如图1所示。地震面波震级为7.1级,峰值地面加速度为0.25~0.30 g。地震中回填砂的液化导致码头大面积沉降和侧向扩展,最大沉降约1ft(0.3 m),内侧门机轨道由于支撑在填料上而发生破坏。内侧斜桩破坏,主要为受拉破坏,部分为剪切和受压破坏^[9]。该码头桩基的破坏可以视为在软土地基中使用叉桩抵抗水平运动而发生破坏的典型案例,叉桩在码头中为刚性最大的部件,在地震中出现过大的应力集中。内侧斜桩的受拉破坏主要由回填土液化和相关的侧向扩展引起的回填土海侧运动造成的。

1990年的菲律宾 Luzon 地震造成 San Fernando 港的政府1号码头发生破坏,码头断面如图2所示,此次地震面波震级为7.8级。地震中由于桩入土部分的变形造成较大的码头海侧位移,码头面板出现大量裂缝,最大宽度达0.7 m;桩帽亦发生开裂,并出现纵筋弯曲和剪断。码头破坏主要由地基土侧向变形引起^[9]。

1994年的美国 Northridge 地震造成洛杉矶港的 APL 码头发生破坏,地震面波震级为6.8级。APL 码头127号泊位的断面图见图3(a),地震造成斜桩和桩帽脱离。图3(b)为126号泊位的断面,地震造成陆侧桩桩帽出现细微裂缝,回填土出现液化;另外,伸缩缝处出现8 cm的相对位移,并造成门机轨道损坏,码头最大水平位移约0.1 m^[9]。两个泊位采用的桩型相同,不同之处只在于是否设置叉桩,设置叉桩的码头结构破坏较为严重。

1995年的日本 Hyogoken-Nambu 地震造成日本神户港 Takahama 码头发生破坏,地震震级7.2级(里氏震级),峰值地面加速度(PGA)为0.53 g。码头断面图如图4所示,混凝土面板支承在3根钢管桩上,桩径为700 mm,从海侧到陆侧壁厚分别为10,12和14 mm,桩穿过砂土层进入由砾石和更新世黏土组成的持力层。

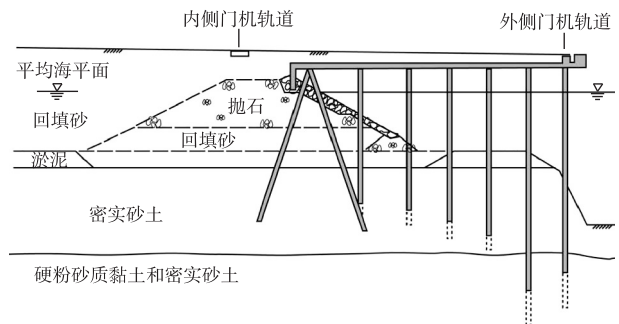


图1 奥克兰港第七街码头断面

Fig. 1 Cross-section schematic of 7th Street terminal wharf in port of Oakland

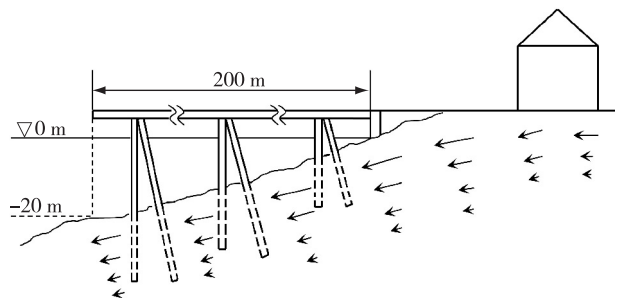


图2 San Fernando 港的政府1号码头断面

Fig. 2 Cross-section schematic of government pier No. 1 in port of San Fernando

在桩帽和桩入土部分均发现钢桩发生了屈曲, 破坏与冲积砂土的大变形有关^[9]。图 5^[9] 为震后调查中取出的钢管桩, 可见发生了屈曲破坏。

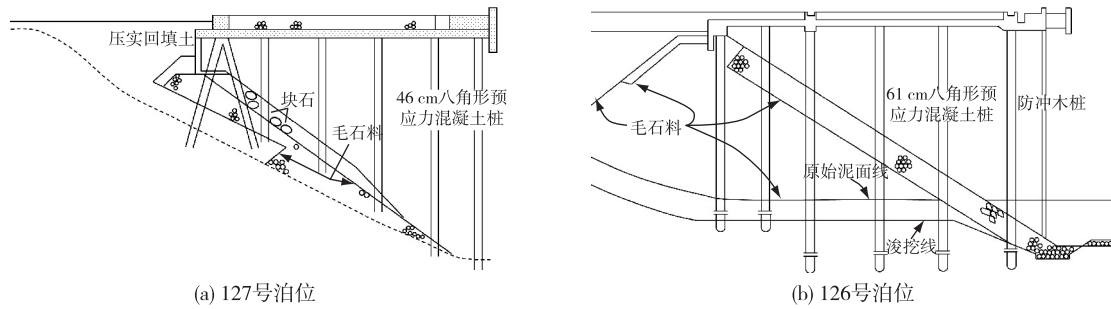


图3 洛杉矶港 APL 码头断面

Fig. 3 Cross-section schematic of APL terminal in port of Los Angeles

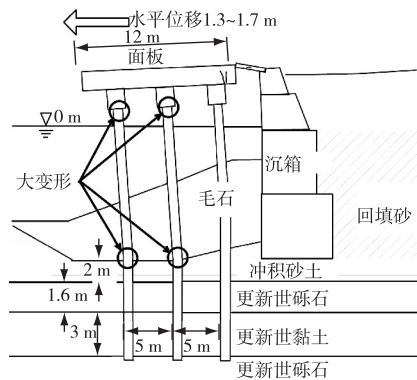


图4 Takahama 码头断面

Fig. 4 Cross-section schematic of Takahama wharf



图5 Takahama 码头的桩基破坏

Fig. 5 Failure of piles at Takahama wharf

造成高桩码头变形/破坏的主要原因是地震引起的上部结构惯性力和软弱地基土的变形以及挡土结构对上部结构的水平力。对于建在坚硬地基土上并有稳定岸坡的高桩码头, 上部结构的惯性力是造成结构破坏的主要原因^[9], 桩身最大弯矩出现在陆侧桩的顶部, 如图 6(a) 所示; 如果岸坡顶部或挡土墙顶部的变形过大, 码头上部结构会出现较大的海侧位移, 如图 6(b) 所示; 对于建造在软弱地基土上的高桩码头, 岸坡变形会直接引起桩的海侧变形, 如图 6(c) 所示。在传统的基于力的高桩码头设计方法中, 对第一种破坏模式的考虑较为完善, 而对其他模式的关注不够。

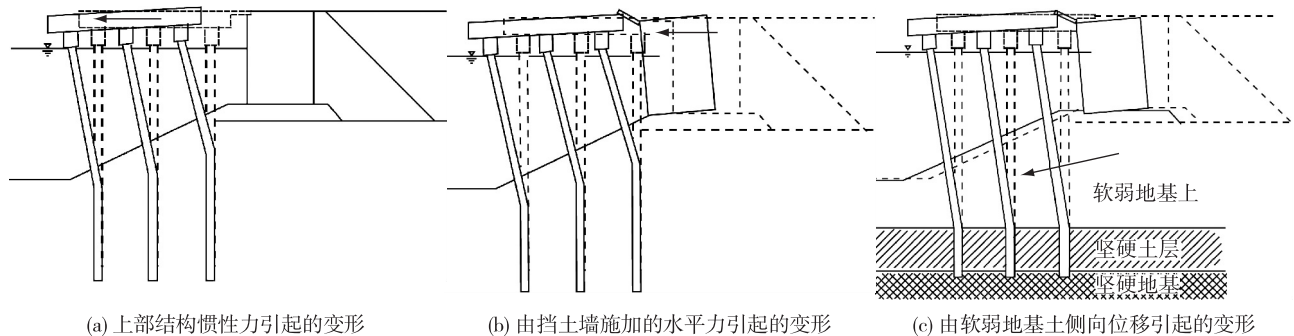


图6 高桩码头变形/破坏模式

Fig. 6 Deformation/failure modes of pile-supported wharves

归纳来讲,高桩码头上部结构主要受水平地震惯性力作用,而且其刚度、强度相对桩基较大,震害相对较轻,主要为水平振动引起的桩台碰撞、错动、挤压及扭转,并且在前方和后方桩台的伸缩缝处以及相邻结构段分缝处的面板和路面混凝土损坏较普遍。另外,由于上部结构的破坏造成门机轨道的损坏,以及上部结构的振动造成的门机破坏亦较为常见。高桩码头的震害主要集中在下部桩基础上,主要破坏形式为桩-土相互作用(地基土液化和软硬土层变化)引起的桩身变形过大、叉桩破坏、桩-上部结构连接破坏、回填土液化、挡土结构破坏以及岸坡失稳等。

2 抗震分析和设计方法

2.1 基于力与基于位移的抗震设计方法

传统的基于力的设计方法主要关注结构安全,但无法有效控制地震对码头的损坏程度及造成的损失,而基于性能的抗震设计方法通过控制结构在设计地震下的破坏水平实现预先设定的性能目标。对于高桩码头而言,地震破坏造成的主要损失不是码头的结构成本,而是码头破坏造成的港口运营中断。另一方面,基于力的抗震设计方法通常采用单一水准设防,利用等效地震力进行结构极限承载力设计,而基于性能的设计方法采用不同水准的设计地震,并针对不同水准采用不同的性能目标。由于在反映结构抗震性能的诸多指标(力、变形/位移、速度、加速度、损伤和能量等)中,变形/位移与结构损伤密切相关,可以与以应变为基础的极限损伤状态紧密结合在一起,再加上工程人员对变形/位移较为熟悉,易于接受,因而采用变形/位移对结构性能进行控制,即基于位移的抗震设计方法^[10]。

美国奥克兰港首先在 20 世纪 90 年代末使用基于位移的设计方法,采用 3 个水准的设计地震,并针对每一水准规定了相应的性能目标。基本在同一时期,美国长滩港和洛杉矶港也开始使用基于位移的抗震设计方法,随后加州土地委员会(California State Lands Commission)针对加州的油码头也按照基于位移的抗震设计方法编制了相应标准^[1,3]。经过多年的发展,长滩港和洛杉矶港采用的抗震设计标准分别为《长滩港码头设计标准》(简称 POLB)^[4]和《洛杉矶港集装箱码头抗震设计、升级和维修规范》(简称 POLA)^[5],而加州土地委员会制定的标准为《海洋油码头工程和维护标准》(简称 MOTEMS)^[6],美国其他港口一般参照这几种标准进行高桩码头抗震设计。为改变美国高桩码头抗震设计标准不统一的状况,美国土木工程师协会在前述几种标准的基础上于 2014 年颁布了《顺岸式和突堤式高桩码头抗震设计》(ASCE/COPRI 61-14)^[7],该标准同时采用了基于力和基于位移的抗震设计方法,规定基于位移的方法适用于所有设计类别的结构(设计类别根据结构的重要性确定),而基于力的设计方法只允许用于设计类别为“低”的结构。在国际上,国际航运协会在 2001 年颁布的《港口结构抗震设计指南》(简称 PIANC)^[9]和日本港湾协会在 2007 年颁布的《港湾设施技术标准与解说》^[11]就是基于性能的抗震设计标准。《港湾设施技术标准与解说》虽然采用了基于性能的抗震设计理念,但仍然对桩基进行抗弯承载力验算,这与中国规范类似。

在上述美国标准中,基于位移的抗震设计方法要求给出结构在不同设计水准地震下结构的位移反应(位移需求),以及结构在不同材料应变水平下的位移能力,并通过比较位移需求与位移能力验算结构的抗震性能是否满足要求。图 7 为 POLB 中的抗震分析流程图,其他标准与之类似,图 7 中 Δ_d 为码头的横向位移需求, Δ_c 为码头的总位移需求, f_{DM} 为动力放大系数,

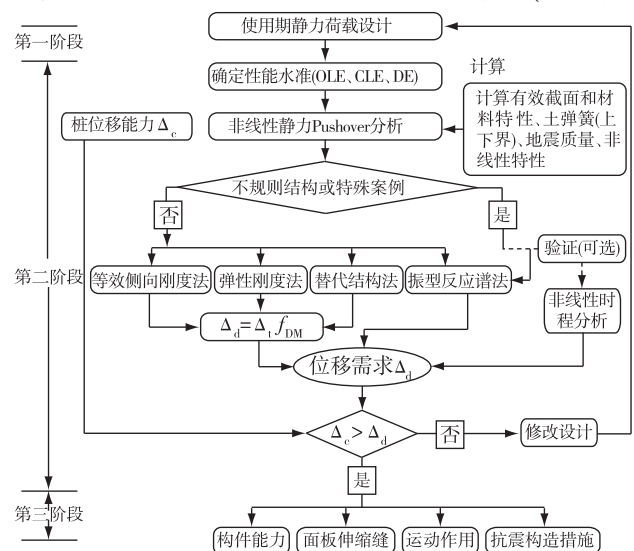


图 7 POLB 中的抗震分析流程

Fig. 7 Flow diagram for seismic analysis of POLB

Δ。为位移能力。由图7可以看出,进行基于位移的抗震设计之前,首先应完成使用荷载下的静力设计,再计算每一地震水准下的位移需求和位移能力,确定位移能力是否大于位移需求。对于高桩码头而言,由于其上部结构一般为整体连续结构,刚度较大,而且上部结构的质量占整个码头结构质量的绝大部分,故在抗震计算中一般是取一个排架及其上部结构按平面问题求解,并将其视为单自由度体系。

2.2 位移能力

在基于位移的高桩码头抗震设计方法中,位移能力(Displacement Capacity)为在不超过材料应变限值的情况下的面板最大水平位移,一般使用非线性静力Pushover分析或非线性时程分析法确定,标准推荐的方法为二维非线性静力Pushover分析,并允许使用三维分析,但不是必须的^[7]。Pushover分析中采用非线性Winkler地基上的梁模型模拟码头结构,如图8所示,土体用土弹簧代替,弹簧一端与桩节点连接,另一端固定,土弹簧的非线性由 $p-y$ 曲线模拟;桩的非线性一般由塑性铰模拟,在分析中通过监控塑性铰的弯矩-转角变化,再根据截面弯矩-曲率分析及塑性铰长度获取材料的应变变化,进而根据标准规定的应变限值确定不同地震水准下码头的位移能力。

塑性铰材料应变限值实质上反映的是结构破坏程度,在基于位移的抗震设计方法中是通过控制材料的应变实现要求的性能目标的。不同标准给出的应变限值不同,反映了不同标准的性能目标并不相同。另外,不同标准给出的塑性铰计算长度计算方法亦不相同,而且均未给出土内塑性铰深度的计算式。土内塑性铰长度和深度不仅对于确定位移能力有较大影响,而且影响位移需求的确定。POLA和POLB给出的桩顶塑性铰计算公式未考虑桩径的影响,ASCE/COPRI 61-14则根据桩-上部结构连接形式的不同给出不同的塑性铰计算公式,对于土内铰长度,3种标准均规定为2倍桩径,不考虑土体特性和桩身材料的影响,特别是土体特性,随着土塑性的发展,塑性铰的位置和长度均会发生变化。MOTEMS采用的塑性铰长度计算公式来自文献[12],但文献[12]确定塑性铰长度时考虑的桩型并不是港口工程的常用桩型,而且MOTEMS未给出钢管桩的塑性铰长度确定方法。有学者^[13]针对标准中给出的塑性铰长度存在的问题,利用纤维模型确定了塑性铰长度并同标准给出的长度进行了对比,但并未给出相应的计算公式。

塑性铰长度作为确定位移能力和位移需求的重要参数,现行标准给出的计算式存在前述诸多不足,仍需进一步深入研究。另外,可通过采用分布塑性铰模型^[14]代替集中塑性铰模型进而回避塑性铰长度的计算,该模型在可能出现塑性铰的位置设置多个塑性铰,塑性铰的长度取为塑性铰间距,但这无疑会增加计算量,仍需进一步研究予以完善。再者,国外规范普遍采用材料极限应变定义结构的破坏,而目前港口工程中普遍使用的商业软件并不能方便地提供此类数据,故有必要开展研究以寻求其他较为简便易用的定义结构破坏状态的指标。

2.3 位移需求

在基于位移的抗震设计中,需要确定每一地震水准下结构的最大位移,即位移需求(Displacement Demand)。常用的方法有振型分解反应谱法、非线性静力需求分析和非线性时程分析等。由于振型分解反应谱法是一种弹性分析方法,所以在结构屈服之后不能再使用,或者在分析中使用割线刚度而不再使用初始刚度^[7]。在结构屈服之后,通常采用非线性静力需求分析方法(Pushover分析),在码头抗震标准中常用的是替代结构法,即用一个等效单自由度体系代替原有结构,等效体系的周期采用割线刚度计算,体系的耗能等效黏滞阻尼表征。很显然采用不同等效阻尼比计算公式,得到的需求位移会有很大不同,在此法中需求位移的求解是一个迭代过程。

POLB和POLA采用的等效阻尼比的滞回阻尼部分是D. N. Grant等^[15]利用时程分析得到的,而

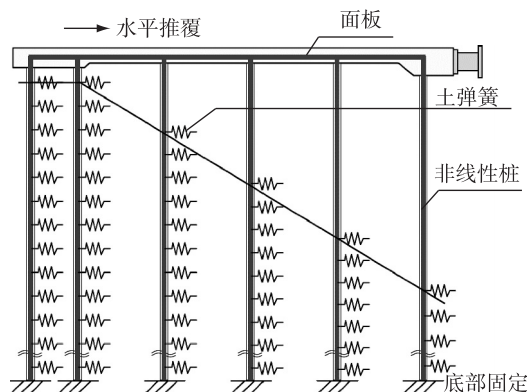


图8 Pushover分析模型示例

Fig. 8 An illustrative model for pushover analysis

MOTEMS 和 ASCE/COPRI 61-14 采用的等效阻尼比计算公式是 M. J. Kowalsky^[16] 基于 Takeda 滞回模型提出的公式。研究^[17]表明,同一地震水准并采用相同反应谱的情况下,由 MOTEMS 和 ASCE/COPRI 61-14 采用的等效阻尼比计算公式得到的需求位移较大。由于不同标准采用的等效阻尼比计算式并非专门针对高桩码头确定的,都存在一定不足,并不能反映高桩码头体系的结构特点和土体对体系耗能的贡献,因而有必要采用合理的方法确定高桩码头体系的等效阻尼比。高树飞等^[18]将高桩码头体系的滞回耗能分为桩基塑性铰耗能和土体土弹簧耗能两部分,根据一个振动循环内“替代结构”的等效黏滞阻尼与高桩码头体系桩基塑性铰耗能和土弹簧耗能之和相等的原则确定了体系的等效阻尼比,其提出的等效阻尼比计算公式可以适用于不同桩型和土体类型。

表 1 POLB 中的动力放大系数 f_{DM}
Tab. 1 Dynamic magnification factor f_{DM} for POLB

地震水平	土弹簧(p - y 曲线)	f_{DM}		
		独立码头段	端部结构段	中部结构段
OLE	上限/下限	$1.80 - 0.05L_L/B \geq 1.10$	$1.55 - 0.04L_L/B \geq 1.10$	
	上限	$1.65 - 0.05L_L/B \geq 1.10$	$1.35 - 0.02L_L/B \geq 1.10$	1.10
CLE/DE	下限	$1.50 - 0.05L_L/B \geq 1.10$	$1.16 - 0.02L_L/B \geq 1.10$	

注:① L_L 为最短路部码头段长度; B 为码头段宽度。②土弹簧的上下限规定可参看文献[4]。

替代结构法通常用于分析一个排架,即是一种单振型、单方向的计算方法,无法考虑地震中码头纵向和横向同时激励的情况、扭转效应及相邻码头段间的相互作用,因而在计算中通过一个动力放大系数 f_{DM} 将排架的横向位移需求转化为总的位移需求。表 1 为 POLB 和 POLA 采用的动力放大系数,式(1)为 MOTEMS 和 ASCE/COPRI 61-14 采用的动力放大系数。

$$f_{DM} = \sqrt{1 + (0.3(1 + 20e/L_L))^2} \quad (1)$$

式中: e 为刚度中心和质量中心的偏心距。

式(1)来源于文献[19],表 1 中的 f_{DM} 则取自文献[20],前者是通过理论推导得到的,后者是通过时程分析得到的,但由于采用的码头计算模型不同,得到的经验计算式亦不相同。很显然,采用不同公式计算 f_{DM} ,得到的计算结果也会不同。时程分析由于计算结果离散性大,易于受到选取的地震动的影响,在需求位移确定中只是一种补充方法,POLB 规定必须在管理部门同意下方可使用。

2.4 延性设计

在高桩码头抗震设计中,码头应设计为延性体系。在高桩码头中桩为延性构件,而梁板则为能力保护构件,允许桩内出现塑性铰,而梁板内不出现塑性铰,即“强梁弱柱(桩)”^[4]。为此,桩中剪力及梁板弯矩均按能力保护的原则确定,通过采用值为 1.25 的超强系数实现^[4,7]。之所以将桩作为延性构件,是因为桩的维修较为容易且成本较低,而且由于码头承受的竖向荷载较大,如门机荷载、流动运输机械荷载和堆货荷载等,造成上部结构的刚度较大,另外桩的损坏对码头运营影响较小。从高桩码头震后恢复运营和修复的角度看,建议高桩码头抗震设计中应考虑出现破坏的部位依次为桩帽、桩顶和桩入土部分。

3 结 语

采用基于位移的高桩码头抗震设计方法已经成为一种趋势,相关的理论已经较为完善。由于国外标准规定的应变限值以及塑性铰长度均是针对国外的材料、桩型和节点形式经试验或理论研究后确定的,若将其直接引入我国的抗震设计标准中未必合适,故应开展相应的研究以确定适合于我国高桩码头的材料应变限值和塑性铰长度计算方法,为国内标准的修订提供参考。

虽然采用替代结构法确定高桩码头的需求位移已经为不同标准采纳,但由于不同等效阻尼比模型对计算结果的影响较大,容易让设计人员无所适从,无法对计算结果的准确性有足够的判断,虽然文献[18]提出

的公式较为合理,但计算过程较为复杂,因而高桩码头体系的等效阻尼比仍需进一步深入研究。由于替代结构法只能确定码头横向位移,仍需一个动力放大系数来考虑多向加载的影响,而不同动力放大系数计算式得到的计算结果又不同,因而对于动力放大系数的适用性仍需进一步探讨,可考虑采用三维 Pushover 分析法进行相关研究。此外,替代结构法无法考虑地震动的不确定性,而时程分析固然可以克服这一缺陷,但该方法计算较为复杂且计算量大,故有必要探求一种新的地震位移需求的简便计算方法。

参 考 文 献:

- [1] WERNER S D, DICKENSON S E. Hyogoken-Nanbu Earthquake of January 17, 1995: A post-earthquake reconnaissance of port facilities [R]. Committee of Ports and Harbors Lifelines of the Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE), ASCE, 1995.
- [2] JTS 146—2012 水运工程抗震设计规范[S]. (JTS 146—2012 Code for seismic design of water transport engineering[S]. (in Chinese))
- [3] 高树飞,贡金鑫. 基于位移的高桩码头抗震设计方法[J]. 水运工程, 2014(10): 39-46. (GAO Shu-fei, GONG Jin-xin. Displacement-based seismic design method for pile-supported wharf [J]. Port & Waterway Engineering, 2014(10): 39-46. (in Chinese))
- [4] Port of Long Beach. Wharf design criteria (Version 3.0) [S]. 2012.
- [5] The Port of Los Angeles. Code for seismic design, repair, and upgrade of container wharves[S]. 2010.
- [6] California Building Code, Chapter 31F, Marine oil terminal engineering and maintenance standards (MOTEMS) [S]. 2013.
- [7] ASCE/COPRI 61-14. Seismic design of piers and wharves[S]. 2014.
- [8] 叶柏荣. 天津新港高桩码头地震危害的调查和分析[J]. 水运工程, 1981(12): 30-34. (YE Bo-rong. Investigation and analysis of earthquake disaster to pile-supported wharves at Tianjin New Port[J]. Port & Waterway Engineering, 1981(12): 30-34. (in Chinese))
- [9] Permanent International Association for Navigation Congresses(PIANC). Seismic design guidelines for port structures[S]. 2001.
- [10] PRIESTLEY M J N, CALVI G M, KOWALSKY M J. Displacement-based seismic design of structures[M]. IUSS Press, Pavia, ITALY, 2007.
- [11] 日本港湾协会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説[S]. 2007. (Harbor Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. 2007. (in Japanese))
- [12] BUDEK A M, PRIESTLEY M J N, BENZONI G. Inelastic seismic response of bridge drilled-shaft RC pile/columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(4): 510-517.
- [13] SAEEDY N E. In-ground plastic hinge analysis for piles used in marine oil and LNG terminals[D]. California: California Polytechnic State University, 2013.
- [14] CHIOU J S, YANG H H, CHEN C H. Plastic hinge setting for nonlinear pushover analysis of pile foundations [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [15] GRANT D N, BLANDON C A, PRIESTLEY M J N. Modeling inelastic response in direct displacement-based design. Report No. ROSE 2004/02[R]. Pavia, Italy: European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, 2005.
- [16] KOWALSKY M J. Displacement-based design: a methodology for seismic design applied to RC bridge columns [D]. La Jolla: University of California at San Diego, 1994.
- [17] 高树飞,贡金鑫,冯云芬. 高桩码头 Pushover 分析影响因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(10): 1-14. (GAO Shu-fei, GONG Jin-xin, FENG Yun-fen. Investigation on influencing factors of pushover analysis for pile-supported wharves[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(10): 1-14. (in Chinese))
- [18] 高树飞,贡金鑫,冯云芬. 考虑桩土相互作用的高桩码头体系等效阻尼比及 Pushover 分析[J]. 海洋工程, 2015(5): 24-34. (GAO Shu-fei, GONG Jin-xin, FENG Yun-fen. Equivalent damping ratio and pushover analysis for pile-supported wharf system considering pile-soil interaction[J]. The Ocean Engineering, 2015(5): 24-34. (in Chinese))
- [19] BENZONI G, PRIESTLEY M J N. Seismic response of linked marginal wharf segments[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2003, 7(4): 513-539.
- [20] BLANDON C A. Seismic analysis and design of pile supported wharves[D]. Pavia, Italy: Rose School, 2007.

Advances in research on seismic performance and design methods for pile-supported wharves Part I : Earthquake damage and seismic design methods

GAO Shu-fei¹, GONG Jin-xin¹, FENG Yun-fen²

(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 damage reasons resulting in poor seismic performance of the high-pile-supported wharves are clarified by examining extensive documented case histories of the damaged pile-supported wharves. The state of the art of the research on the pile-supported wharves, from the aspects of the seismic design methods, soil-pile interaction, seismic performance of the batter piles and the pile-deck connections, is presented, and the application of the findings from the seismic design codes for the pile-supported wharves is summarized, and the deficiencies in the studies and the problems need to be further studied are pointed out in this paper. Some suggestions are made as to how to absorb foreign research results about the seismic research on the high-pile-supported wharves and revise the seismic design codes for the pile-supported wharves. This paper is the first part of a series of papers, which mainly presents the earthquake damage, failure behavior of the pile-supported wharves and seismic design methods for the pile-supported wharves. Research results show that the design method based on displacement is the main development direction of the seismic design for the pile-supported wharves abroad, therefore, our country should carry out related seismic researches and revise the seismic design codes for the pile-supported wharves from that based on the force to that based on the displacement.

Key words: pile-supported wharves; earthquake disasters; failure modes; seismic design methods