



美国高桩码头抗震设计规范 ASCE/COPRI 61-14 解读

孙 艺¹, 孙 英²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 郑州铁路职业技术学校, 河南 郑州 450052)

摘要: 鉴于美国高桩码头结构抗震设计没有统一行业准则难以统一管理的现状, 美国土木工程师协会 ASCE 在美国国家标准协会 ANSI 的授权下, 以各已建港口的抗震设计准则为基础编制了 ASCE/COPRI 61-14《顺岸式和突堤式高桩码头抗震设计》。该规范从地震设防标准、性能要求、设计方法及构件抗震设计和构造要求等进行详细规定, 涵盖近年来国际上最新的抗震研究成果, 对推动高桩码头抗震设计的发展具有重要意义。为便于国内设计人员更好地理解该规范, 介绍规范的编制背景以及设计理念, 并结合工程经验对其各部分内容进行详细的解读和说明。同时, 与国内码头抗震设计规范进行简要对比, 为设计理念和方法都相对落后的国内规范进一步修订提供参考。

关键词: 高桩码头; 抗震设计规范; 静力非线性分析

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0073-08

Interpretation for American seismic design code of pile-supported wharves

ASCE/COPRI 61-14

SUN Yi¹, SUN Ying²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Considering the current situation that there is no a consensus code for seismic design of port structures to unify manage difficultly in America, American Society of Civil Engineers (ASCE) is accredited by the American National Standards Institute (ANSI) to develop ASCE/COPRI 61-14 *Seismic Design of Piers and Wharves* on the basis of local design criterions for some existing ports. This code provides detailed provisions for seismic level, seismic performance objects, seismic design methods and seismic design and construction requirements of components, and includes the latest achievements of seismic research in the world in recent years, and it is significant to promote the development of seismic design for pile-supported wharves. In order to help domestic engineering technicians understand this code with ease, we introduce the compilation background and design philosophy, and interpret and explain each part of the code in detail combining with engineering experience. Moreover, we briefly compare the differences between this standard and domestic code, which can provide the references for the further revision of backward domestic code.

Keywords: pile-supported wharves; seismic design code; nonlinear static analysis

相较于其他形式, 高桩结构更适用于开敞海域、软土地基, 且因结构轻便抗震性能更好, 因此在港口工程中得到广泛应用。但历史上高桩码

头依然遭受不同程度的破坏, 如 1976 年唐山地震中的天津新港、1994 年美国 Northridge 地震中的洛杉矶港和 1995 年日本阪神地震中的神户港。因

此，有必要对高桩码头进行合理的抗震设计以减轻地震引起的损失。国内外早期港工结构的抗震设计均依据建筑抗震设计规范开展，但随着码头震害的不断出现，人们逐渐认识到港工结构与民用建筑在震害方面造成的结果差异很大，抗震设计方法也应有所调整，各国港口管理部门逐渐开始制定港工结构抗震设计规范。

经研究发现，功能不同的结构设施因地震产生的后果也不同，结构设计在保护人的生命安全同时，还要考虑损坏造成的经济影响，基于性能的抗震设计方法由此产生^[1]。由于结构的诸多性能指标中，位移(变形)与结构的破坏程度息息相关，而且也易于被工程技术人员接受，故基于位移的抗震设计方法就成为实现性能化抗震设计的有效途径。美国在其主要港口建设时，也基于此方法相继制定了相应的码头抗震设计准则，如洛杉矶港的 POLA^[2]、长滩港的 POLB^[3] 和加州的 MOTEMS^[4]。由于各个港口遵循的抗震准则不同，对统一管理造成了困难，因此美国国家标准协会 ANSI 授权美国土木工程师协会 ASCE 在上述码头抗震准则的基础上制定了统一的高桩码头抗震设计行业标准，即 ASCE/COPRI 61-14《顺岸式和突堤式高桩码头抗震设计》^[5]。该规范归纳了近年来国际上高桩码头抗震设计领域的最新研究成果，从抗震设防标准、性能要求、设计方法到构件抗震设计和构造措施等方面都进行了详细的说明，对高桩码头抗震设计的发展具有重要意义。

此规范在海外工程中被广泛使用，但国内对此的关注度并不高，仅李荣庆等^[6]对规范的条文进行了介绍，但对于规范的限制条件、所采用方法的原理和背景并未进行解读，不便于设计人员更好地理解和使用该规范。因而，本文结合工程经验对该规范的适用条件和基本原则、性能要求、采用的计算方法和构造措施进行详细解读，以说明其原理和背景，而不是逐条介绍规范的条文；同时对比其与国内码头抗震设计规范的异同，以供工程设计人员参考，也为国内规范的进一步修订提供参考。

1 规范适用条件和基本原则

此规范的编写主要是为了覆盖美国结构荷载规范 ASCE/SEI 7-05 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*^[7] 中未包含的非公用设施的码头结构，仅适用于商业或工业用途且其桩基材料为钢或混凝土的高桩码头结构，不适用于海洋平台和 LNG(液化天然气)码头结构，也不适用于人流量较大的游轮码头及提供零售娱乐功能的其他码头结构，其限制条件意味着采用此规范设计的码头结构，地震时人员生命因为人流量极少(只有保证港口运营的必需人员)容易得到保障且地震引起的经济损失较少。

ASCE/COPRI 61-14 规定，在进行抗震设计之前，应已经按静力和非地震荷载对结构进行设计。这意味着，结构的详细尺寸和布局已经确定，已满足非地震工况结构安全要求，抗震设计的本质是抗震能力的复核与调整。

不管选择何种抗震设计方法，此规范规定的方法均体现了延性设计理念，其设计原则是强梁弱柱，弱弯强剪，其中柱为延性构件，而梁作为能力保护构件，与民建结构的设计理念完全相反，这主要是因为码头与民用建筑地震时造成的主要灾害不同，人员生命安全相对容易得到保证；同时对于桩基而言，桩的特定部位在地震时出现塑性铰使结构变为机构，以适应地震大的变形，但是塑性铰出现后在地震作用下桩基对应部位抗剪承载力会迅速下降，因此抗震设计要保证桩不会出现剪切脆性破坏，抗剪按超强设计。

2 抗震设计步骤

该规范抗震设计的步骤为：1) 根据港口功能定位确定码头结构抗震设计的重要性等级、地震参数及对应性能目标；2) 选定抗震设计方法，并根据地质地震分析报告确定对应地震动输入参数；4) 分析地震时地质影响(液化、岸坡稳定引起的侧向位移)，并确定桩土相互作用模型及参数；5) 建模计算不同抗震等级下结构的抗震需求；6) 进行

结构构件抗震能力验算;7)选定桩-码头上部结构连接细部构造,采取合适的构造措施;8)码头上部重要的附属设施抗震设计(起重机和管线)。不难看出,ASCE/COPRI 61-14 对于高桩码头抗震设计有较为具体的规定,设计步骤较为详尽,便于设计人员开展工作。

3 抗震性能目标

根据港口功能定位,ASCE/COPRI 61-14 首先将结构重要性分为高、中和低 3 类,然后将结构的破坏程度分为“生命安全保护”“可控和可修复的破坏”和“最小破坏”3类,最后根据不同地震动等级定义不同的结构破坏程度,见表 1。

表 1 最小地震灾害和性能要求

地震水平	地震灾害和性能等级		结构重要性等级		
	地震动超越概率	性能等级	高	中	低
运营地震(OLE)	50a 超越概率 50% (重现期 72a)	最小破坏	✓	-	-
偶遇地震(CLE)	50a 超越概率 10% (重现期 475a)	可控和可修复的破坏	✓	✓	-
设计地震(DE)	50a 超越概率 2% (重现期 2475a)	生命安全保护	✓	✓	✓

由表 1 可看出,ASCE/COPRI 61-14 采用了 3 个地震水平,对于不同地震水平规定了不同的性能水平,在保证生命安全的前提下允许结构出现一定程度的破坏,便于设计人员在设计时考虑地震可能产生的经济损失,这就是性能化抗震设计理念,相比而言,我国《水运工程抗震设计规范》^[8] 目前依然采用单水准抗震设防和靠结构强度抵抗地震的设计理念。

正如前文所述,变形是结构破坏最直观的体现,而材料应变与变形有着最为直接的对应关系,故 ASCE/COPRI 61-14 采用材料应变衡量结构的破坏程度,并以此来定义结构的抗震性能目标,见表 2(表中仅为钢管桩在“可控和可修复破坏”情况下的材料应变限值)。由于结构一旦发生破坏,材料必然会进入非线性阶段(材料屈服),无论对于钢筋混凝土还是钢结构,都会形成具有一定承载能力又能相对转动的截面或区段,即塑性铰,故材料的应变限值针对的就是塑性铰。ASCE/COPRI 61-14 在确定材料应变限值时参考了 PLOB、PLOA 和 MOTEMS 等标准,而这些标准都是基于强梁弱柱的原则和试验结果确定的,梁不允许先于柱产生破坏,且土内桩发生破坏不易修复,对其应变限值要求严格,因此试验主要是针对桩与上部结构连接处开展的,并未针对其他部分。

表 2 材料应变限值(CLE)

桩型	材料	塑性铰位置		土内深处 (>10D _p)
		桩顶	土内	
钢管		-	$\varepsilon_s \leq 0.025$	$\varepsilon_s \leq 0.035$
钢管桩	混凝土	$\varepsilon_c \leq 0.025$	-	-
	钢筋	$\varepsilon_s \leq 0.6\varepsilon_{smd} \leq 0.06$	-	-

注: ε_c 为混凝土应变; ε_s 为钢筋应变; D_p 为桩径; ε_{smd} 为钢筋峰值应力对应的应变。

由表 2 可看出,对于港工结构最常使用的钢管桩桩顶应变并不做限制,这是因为桩顶处钢管桩仅起到对桩芯混凝土提供围压产生套箍效应以增强混凝土刚度的作用,塑性铰只发生在桩芯钢筋混凝土结构中^[9]。从不同位置处应变限值大小可看出,桩的塑性铰位置出现的合理顺序依次为桩顶、土内及土内深处,合理的塑性铰发展顺序也是结构抗震复核分析重要的内容之一。

4 抗震设计荷载组合

与我国《水运工程抗震设计规范》不同,ASCE/COPRI 61-14 地震荷载组合并不考虑船舶荷载及其他环境荷载(风、浪、流等),且仅考虑 10% 的均载,所有荷载的分项系数取 1,则为(1 ± 0.5 PGA)· $D + 0.1L + 1.0H + 1.0E$ (PGA 为地面峰值加速度; D 为恒载; L 为均载; H 为除了地震荷载之外的荷载引起的土压力; E 为水平地震惯性力)。

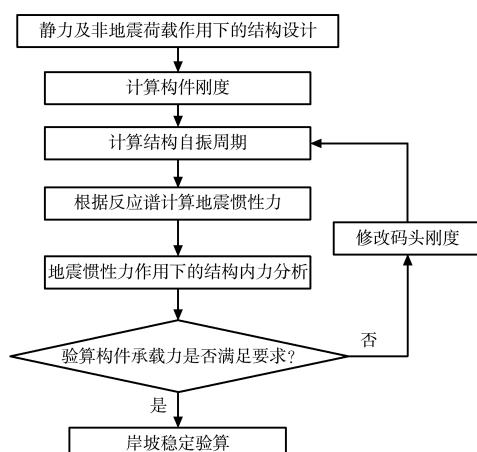
需要注意的是, ASCE/COPRI 61-14 规定地震惯性力与地震引起的岸坡变形所产生的运动作用不能同时组合, 这主要是因为两者产生的最大作用效应点相距过远, 前者在桩头, 后者在入土的桩身, 且两者发生的时间不一致, 如岸坡变形主要由土体内孔隙水压的变化引起, 而孔隙水压上升及消散都需要时间, 相对地震惯性力的产生有一定的滞后。规范中现有荷载组合中也未考虑岸坡的运动作用, 但地震设计时如岸坡有变形, 必须要复核此工况产生的影响, 以防入土桩基被剪坏。

5 抗震设计方法

ASCE/COPRI 61-14 采用基于力的抗震设计方法和基于位移的抗震设计方法, 并分别给出对应不同抗震方法下构件抗震设计计算及构造细则; 而我国《水运工程抗震设计规范》不管结构重要性等级如何, 基于力的设计方法是最基本的抗震设计方法, 构件抗震设计及构造均以此方法为基础。

5.1 基于力的抗震设计方法

此方法是传统的抗震设计方法, 将地震作用简化为地震惯性力, 与其他作用在结构上的荷载进行组合计算, 进而验算结构的承载力是否满足结构安全, 基本设计流程如图 1 所示。



ASCE/COPRI 61-14 虽然采用 3 个地震水准, 但基于力的设计方法章节规定地震荷载参考美国荷载规范 ASCE 7-05, 其采用 50 a 超越概率为 2%

的设计地震, 但设计地震谱加速度为场地最大考虑地震加速度的 2/3, 相当于 475 a 一遇的地震水平。需要注意的是, 对于此规定, 设计时可以借鉴, 但是不能教条地完全照搬, 这主要是因为不同国家的地震反应谱有其特殊性, 特征周期的长度往往不同。

此方法是反应谱法, 属于简化的弹性分析方法, 不涉及材料的非线性, 但实际地震时, 结构不可避免会出现刚度和强度退化的非线性特征, 为了弥补弹性计算方法无法考虑非线性特征的不足, ASCE/COPRI 61-14 引入反应修正系数 R 和变形放大系数 C_d (表 3)以及等效刚度系数(表 4)。

表 3 不同构件的设计系数

延性构件	R	C_d
实心预应力混凝土桩	2	2
钢管桩	2	2
满足规范第 7 章条文的连接	1	1
斜桩	1	1
其他试验的连接	由试验或有限元分析计算确定, 且必须经过管理机构的批准	由试验或有限元分析计算确定, 且必须经过管理机构的批准

表 4 码头构件弹性截面特性

码头构件	等效刚度系数 EI_{eff}/EI_g
桩与上部结构钢筋锚固连接	$0.3+N/(f'_c A_g)$
钢桩	1
带着钢套筒的混凝土桩	$(E_s I_s + 0.25 E_c I_c) / (E_s I_s + E_c I_c)$
上部结构	0.5

注: E 、 E_s 、 E_c 分别为弹性模量、钢的弹性模量、混凝土的弹性模量; I_{eff} 、 I_g 、 I_s 、 I_c 分别为等效惯性矩、总惯性矩、混凝土截面惯性矩、钢截面惯性矩; N 为压力; f'_c 为最小 28 d 混凝土强度; A_g 为毛截面面积。

表 3、4 在计算时联合使用, 但值得注意的是, 表 4 仅针对直桩结构中桩与上部结构连接处桩的刚度折减, 不适用于斜桩, 因为斜桩本身适应变形能力小, 结构刚度大, 是不允许出现塑性的, 因此刚度也不应折减。

建模时桩土模拟可采用嵌固点法, 但不同嵌固点方法取值会造成计算桩长不同, 即使采用 $p-y$ (反力-位移)曲线弹簧模拟, 但实际高桩码头结构下泥面总是变化的, 不同桩的自由长度、入土深

度并不完全相同,结构自振周期不同、延性也会存在很大的差异,结构不同部位产生的地震效应也不同,因此规范规定采用同样的系数是不合理的,计算结果的偏差不可避免。而我国《水运工程抗震设计规范》引入考虑结构弹塑性、岸坡和土压力等多种因素的综合影响系数来考虑结构的延性,但是对于不同类型不同材质的高桩码头均采用同样的系数,与上述原因一样不太合理。

综上,国内外规范基于力的设计方法因其设计假定,均不可避免地引起结构设计偏差,同时历史也证明它存在很多不足,但因其对设计人员及软件使用要求不高,简单好用,规范规定此方法仅限于地震重要性等级“低”的工程或者地震较小的工程(设计1 s地震反应谱加速度 $S_{ds} < 0.33g$,等效设计地震加速度小于 $0.13g$)或是地震时不考虑任

何延性(延性系数取1)抗震设计时主要结构构件都在弹性范围之内的工程。同时,随着计算机技术的提升及抗震认识及理念的不断更新,其最终必定会被基于位移的抗震设计方法所取代。

5.2 基于位移的抗震设计方法

ASCE/COPRI 61-14 采用基于位移的方法,是在PLOA、PLOB 和 MOTEMS 等规范和标准的计算方法基础上确定的基于性能的抗震设计的基本方法。与基于力的抗震设计方法直接验算地震作用下结构强度不同,此方法以对应地震动等级下提前设定好的结构位移反应为目标位移(以表2中不同结构位置处的材料应变极限为判定标准,即是预定的结构位移反应,也称位移能力),设计时通过比较需求位移与能力位移的大小来验算结构的抗震性能是否满足要求。此方法具体抗震设计流程见图2。

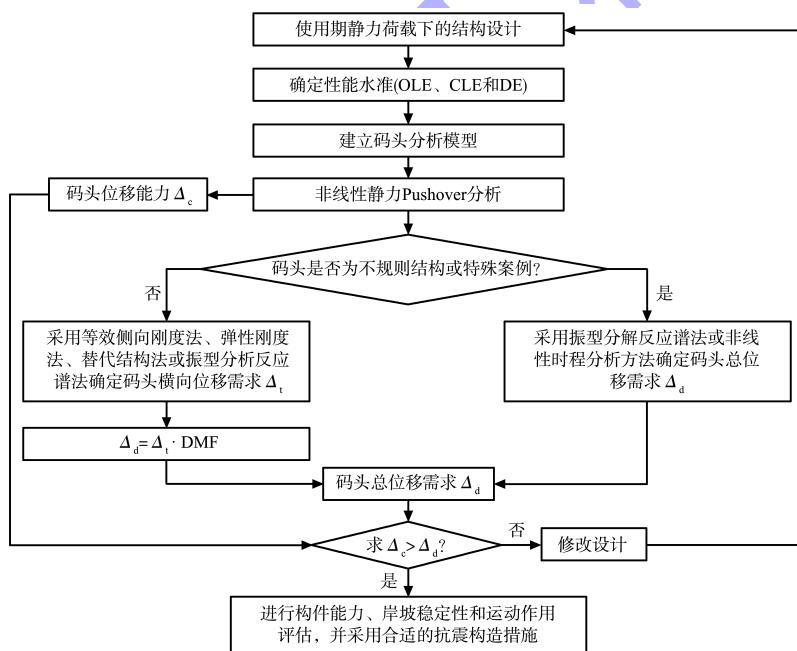


图2 基于位移的高桩码头抗震设计流程

设计时需要注意,规则结构可以直接采用简化的二维模型进行分析,而不规则结构和特殊案例须建立三维整体模型进行分析,这主要是因为布置不对称的码头(包括平面布置及竖向布置)因结构质量及刚度的不均匀,地震时会有扭转效应;而特殊案例(需要考虑相邻结构段之间、码头和上部设备相互作用)则会因相邻结构段产生碰撞导致

应力集中或码头振动不同步、上部设备的质量及振动与结构不一致改变结构自振周期及体系的阻尼进而影响整个结构体系的抗震效果等,简单的分析方法会导致设计偏差较大。

5.2.1 位移能力分析

位移能力即目标位移,ASCE/COPRI 61-14 规定采用非线性静力 Pushover 分析或非线性时程分

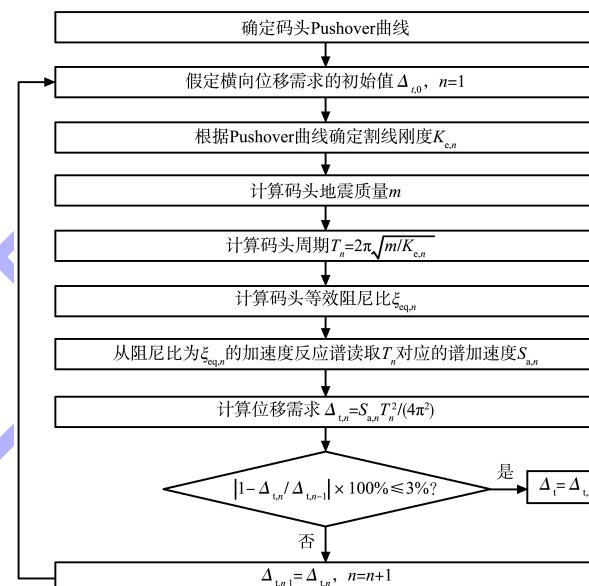
析方法确定。非线性时程分析方法因为地震时程曲线不太容易获得，在实际设计中很少采用，规范首选二维非线性静力 Pushover 分析方法，可进行三维分析但不强制。这主要是因为实际设计中，进行三维推覆分析对设计人员理论基础理解力要求更高，且需要更高的电脑配置，耗费大量时间，对于常规结构，简单处理后得到的效果与二维差别不大。

非线性 Pushover 分析通过在结构质量中心施加单调递增的水平荷载，得到结构的荷载-变形曲线，以及桩身各个部位塑性铰形成的顺序。在分析中材料进入非线性，ASCE/COPRI 61-14 给出了材料的非线性应力-应变关系，但应注意的是，这些关系针对的是美国常用的材料型号和种类；在数值分析模型中，规范规定桩基采用非线性文克尔地基梁模型，桩与土的相互作用由 $p-y$ 曲线非线性弹簧模拟，但如果桩打在较浅的岩面上或者土的影响不敏感时，可直接采用嵌固点法。桩的非线性由集中塑性铰（构件塑性变形集中于一定区域）模拟，塑性铰的恢复力模型采用 POLB 的理想双线性模型，桩顶塑性铰的计算长度根据桩与上部结构不同的连接方式采用不同公式进行计算，土内塑性铰长度取 2 倍桩径，在分析中通过监控特定区域塑性铰的弯矩-转角变化，再根据塑性铰长度及截面弯矩-曲率分析获取材料的应变变化，最后根据表 2 中的应变限值确定不同地震水准下码头的目标位移。

5.2.2 位移需求分析

位移需求即每一地震水准下码头上部结构的最大水平位移。需要注意的是，此处的位移需求是在分析中采用不受地基土和桩影响的基于地表地震动确定的反应谱、忽略码头岸坡自由场变形影响的惯性作用下的码头水平位移^[10]。ASCE/COPRI 61-14 推荐的位移需求分析方法有振型分解反应谱法、非线性静力需求分析法和非线性时程分析法等。振型分解反应谱法是一种弹性分析方法，因此规范规定，除非在分析中使用割线刚度而不再使用初始刚度，否则在结构屈服之后此方法不再适用。一般情况下，码头结构在地震作用

下都会进入屈服状态，在结构屈服之后，通常采用非线性静力需求分析法。虽然高桩码头结构严格来说并不属于单自由度体系，但其质量基本集中于上部，原始反应谱分析表明对于横向位移，90%的贡献质量在基本模态中被考虑，可简化为单自由度体系，因此规范中推荐采用的非线性静力需求分析方法是替代结构法，即原有结构用一个等效单自由度体系代替，用割线刚度计算其自振周期，在地震下的耗能则用等效黏滞阻尼代替，替代结构法的流程如图 3 所示。



注：n 为迭代次数。

图 3 替代结构法流程

替代结构法是简化求取结构最大弹塑性位移的等效线性化方法，相比于时程分析，其计算量小、过程简单，但此方法只能得到结构的最大位移反应。另外，基于码头一般纵向对称，为了降低计算量，替代结构法通常取单排架进行横向地震反应分析，虽然实际地震是三向的，但竖向地震对高桩码头的影响不大，故一般仅考虑水平地震的影响。此外，码头岸坡通常是倾斜的（开敞式码头除外），整个码头的刚度中心偏向陆侧，但码头上部结构的质量分布是均匀的，质量中心基本在码头上部结构中心附近，这样就造成码头刚度中心和质量中心不在同一位置，而纵向水平地震惯性力作用在质量中心，就会使码头发生扭转，

如图4所示。

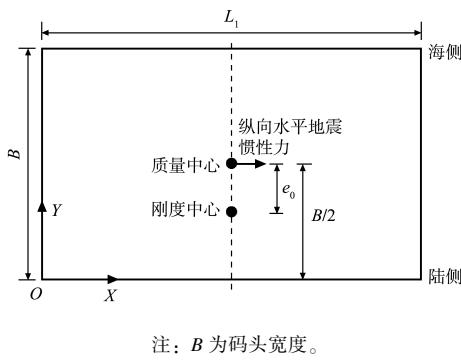


图4 码头的刚度中心和质量中心

为了得到结构总的位移需求, 规范引入一个考虑码头扭转和不同方向水平地震的影响的动力放大系数 DMF, 公式为:

$$DMF = \sqrt{1 + [0.3(1+20e_0/L_1)]^2} \quad (1)$$

式中: L_1 为码头分段的长度, e_0 为刚度中心和质量中心的偏心距。式(1)适用于码头长宽比大于 3 的情况。

需要注意的是, 工程中高桩墩式结构及我国常见的码头结构其长宽比通常小于 3, 对于此类结构, 可以直接进行非线性三维地震响应分析, 不需要进一步转换, 或采用式(2)计算地震动力放大系数(此公式为实际海外工程设计中咨询工程师推荐的方法):

$$DMF = \bar{u}/u \quad (2)$$

式中: \bar{u} 为采用三维振型反应谱分析方法计算并考虑纵横向振型影响的结构平均水平位移; u 为上述替代结构法计算出的结构横向位移。

6 结构构件抗震设计及构造要求

不同于我国码头抗震设计标准, ASCE/COPRI 61-14 对于高桩码头的抗震构件设计及构造措施规定得较为详细。如前述, 上部结构及桩的抗剪为能力保护构件, 按照超强设计, 详细计算参见规范规定。需要注意的是, 实际设计过程中, 为了节省工程量, 设计可根据塑性发展的有效区域(即节点连接周边)进行超强设计, 其他部位根据地震工况组合算出的正常内力进行设计。

由于码头的破坏一般集中于桩-上部结构连接

处, ASCE/COPRI 61-14 在众多已有研究成果的基础上规定了不同连接形式的构造要求和计算方法, 对于不同连接形式的抗震性能, 比如桩伸入上部结构的深度、最小配箍率、主筋的最小锚固长度和塑性铰弯矩-曲率曲线的线性化方法等, 如图5所示(图中为海工结构中最常使用钢管桩的连接形式, 其他材料桩的连接形式见规范)。

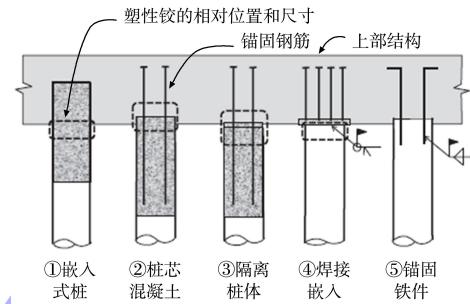


图5 钢管桩连接形式示例

上述桩与上部结构的连接主要针对直桩结构, 设计中②、③形式比较常用, 其他 3 种方式基本不采用, 这主要是因为②、③属于部分弯矩传递连接, 塑性铰主要发生在桩芯钢筋混凝土结构中, 对钢管桩要求不高; 而其他 3 种方式限制颇多, 工程量大, 施工复杂, 实现比较困难。①属于全弯矩传递连接, 为了防止钢管桩桩身出现失稳, 此连接方式桩头在一定范围内要灌混凝土并配置大量的钢筋, 表 2 中的应变极限也不再适用; 而⑤焊接会使锚固铁件发生脆性破坏而不允许连接出现塑性; ④虽然允许桩出现塑性, 但对桩头连接钢板要求过高, 如钢板不能出现塑性, 必须按照 ANSI/AISC 360-05^[11] 的要求采用全焊透方式进行焊接, 打桩偏位不能大于 3 in(约 7.6 cm)等。

7 结语

1) ASCE/COPRI 61-14 是国际上关于高桩码头抗震设计的最新规范, 凝聚了众多学者近几十年来在码头抗震方面的经验和技术成果, 代表了最先进的抗震设计理念, 在国际上具有较大影响力, 对于推动码头抗震设计的发展具有重要意义。

2) 该规范从抗震设防标准、抗震性能目标、设计方法、判定准则到抗震构件设计及构造措施

等均有较大程度的创新，规定简洁明了但完整清晰，便于设计人员理解和操作，对国内设计人员而言，此规范的出版及正确的解读结束了以往海外工程抗震设计时设计人员到处搜寻文献及国际规范规定，却因各种规定不统一造成设计的张冠李戴，设计成果被国际咨询工程师卡住的局面。

3) 此规范仅适用于人流量少的商业或工业码头，其编制背景及针对的对象是美国典型的码头结构形式和材料，设计人员使用此规范时须注意其适用范围、限制条件及每一抗震规定的理论背景，结合工程所在地的地震动响应、材料特性、码头功能定位及结构特征等灵活处理。

4) 此规范虽然先进，但并未完全解决高桩码头抗震的所有问题，如斜桩结构、预应力桩结构及上部设备及附属设施的规定仍不够详细，真正使用时依然存在困难，应做进一步研究。

5) 与此规范相比，我国《水运工程抗震设计规范》不仅荷载组合过于保守，单一的抗震设防标准及基于强度的设计方法与其多水准抗震设防且基于性能的抗震设计理念及方法相比也比较落后，抗震构造措施规定也不明确，未来国内规范的修订有必要借鉴此规范。

6) 如借鉴此规范修订我国规范，建议对我国港工结构地震动参数的获取及选用、桩土模拟、岸坡影响及荷载组合进行修正，并针对我国的典型码头形式和材料开展相应的研究，完善结构构件抗震设计及构造措施，同时希望我国规范修订时完善现有不足的同时能就 ASCE/COPRI 61-14 未解决的问题给出更为明晰的解决方法，这不仅利

于推动我国码头抗震设计的进步与发展，也将对国际码头的抗震设计发展做出贡献。

参考文献：

- [1] 日本地震工学会, 基于性能的抗震设计研究委员会. 基于性能的抗震设计: 现状与课题[M]. 王雪婷, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] Port of Los Angeles. Code for seismic design, repair, and upgrade of container wharves[S]. Los Angeles: Port of Los Angeles, 2010.
- [3] Port of Long Beach. Wharf design criteria (version 3.0) [S]. Long Beach: Port of Long Beach, 2012.
- [4] California State Lands Commission. Marine oil terminal engineering and maintenance standards (MOTEMS) [S]. Sacramento: California State Lands Commission, 2007.
- [5] American Society of Civil Engineers. Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPRI 61-14 [S]. Reston: ASCE, 2014.
- [6] 李荣庆, 吴澎. 美国《码头抗震设计标准》要点分析[J]. 水运工程, 2016(5): 39-44.
- [7] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-05 [S]. Reston: ASCE, 2006.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [9] 高树飞. 基于位移的高桩码头抗震设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [10] BLANDON C A. Seismic analysis and design of pile-supported wharves[D]. Pavia: Pavia University, 2008.
- [11] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360-05[S]. Chicago: AISC, 2005.

(本文编辑 王璁)

欢迎投稿 欢迎订阅