

· 地基与基础 ·



桩基码头 T 构地连墙组合结构动力响应分析

邢佩旭, 李新国, 胡志敏

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 埃及塞德港集装箱码头二期工程成功应用桩基码头 T 构地连墙组合结构。计算结构地震工况下位移响应时, 由于结构三维特性明显, 采用三维模型校正典型工程下的二维模型参数, 再利用二维平面模型进行各工况计算; 选取 3 条典型地震波, 分别计算 Level 1 和 Level 2 两个地震水准, 计算结果显示, 结构满足抗震要求。

关键词: 桩基码头 T 构地连墙组合结构; 地震响应分析; 模型校正; 平面计算

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0131-05

Dynamic response analysis of quay wall with pile and diaphragm wall combined structure

XING Pei-xu, LI Xin-guo, HU Zhi-min

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In Egypt Port Said Container Terminal Phase II, pile and diaphragm wall combined wharf structure was successfully applied. When calculating the displacement of the structure under seismic condition, due to the obvious 3D structure feature, a 3D model was adopted to correct the two-dimensional model under a typical case, then the corrected two-dimension model was used in various cases; three typical seismic waves were chosen with two seismic standards, i. e. Level 1 and Level 2, for the dynamic analysis, and the results showed that the structure satisfied the requirement under the case of earthquake.

Key words: pile and diaphragm wall combined wharf structure; seismic response analysis; model correction; two-dimensional model

地下连续墙技术起源于欧洲, 是根据打井和石油钻井使用泥浆和下水浇筑混凝土的方法而发展起来的。20 世纪 50—60 年代该项技术在西方发达国家及前苏联得到推广, 成为地下工程和深基坑施工中有效的技术。1958 年, 我国水电部门首先在青岛丹子口水库用此技术修建了水坝防渗墙^[1]。目前我国在建筑深基坑支护、防渗工程等领域都广泛应用地连墙技术。

20 世纪 80 年代后期, 我国开始在京唐港采用地连墙技术建设码头, 但起初主要应用在万吨级左右的码头结构。近年来, 将地连墙结构应用在大型码头结构中在国内外均有尝试。为减小结构土压力荷载, 设计了遮帘式地连墙码头结构^[2],

并成功应用在某 10 万吨级泊位建设中, 还有应用前后双地连墙的形式。总体上, 目前普遍应用的地连墙结构断面刚度较小、承载能力小, 影响地连墙结构在大型深水泊位中的应用。

埃及塞德港集装箱码头二期工程成功应用了桩基码头 T 构地连墙组合结构。由于这一组合结构的三维特性明显, 且结构抗震设计要求高, 因此在进行结构动力响应分析时, 采取了三维、二维模型计算相结合的方法。

1 项目概况

埃及塞德港集装箱码头二期工程位于苏伊士运河红海入海口支航道, 码头岸线长 1 200 m, 码头

收稿日期: 2013-11-03

作者简介: 邢佩旭 (1973—), 男, 高级工程师, 主要从事海外工程的研究、开发及管理工作。

结构按靠泊4个15万吨级集装箱船设计,前沿设计水深-17.5m(预留远期疏浚至-18.5m),码头面高程2.50m。工程位置在-50.0m以上多为软弱黏土层,场地自然高程约2.50m。码头结构适合采用干地施工、先形成挡土结构后挖泥的结构。

码头宽35m,结构为桩基地连墙混合结构,桩基排架间距7m,典型排架由3根桩和现浇横梁

组成,海侧桩和陆侧桩采用T形桩(高4.2m,翼缘宽度2.8m),中间桩采用矩形桩(高5.0m,宽度0.8m),桩基底高程-52.50~-56.00m。相邻排架前后排桩间采用现浇地连墙连接,形成连续挡土面。上部结构通过现浇横梁将断面上3根桩连接成整体,再通过轨道梁和纵梁形成框架,面板采用预制+现浇的叠合结构(图1)。

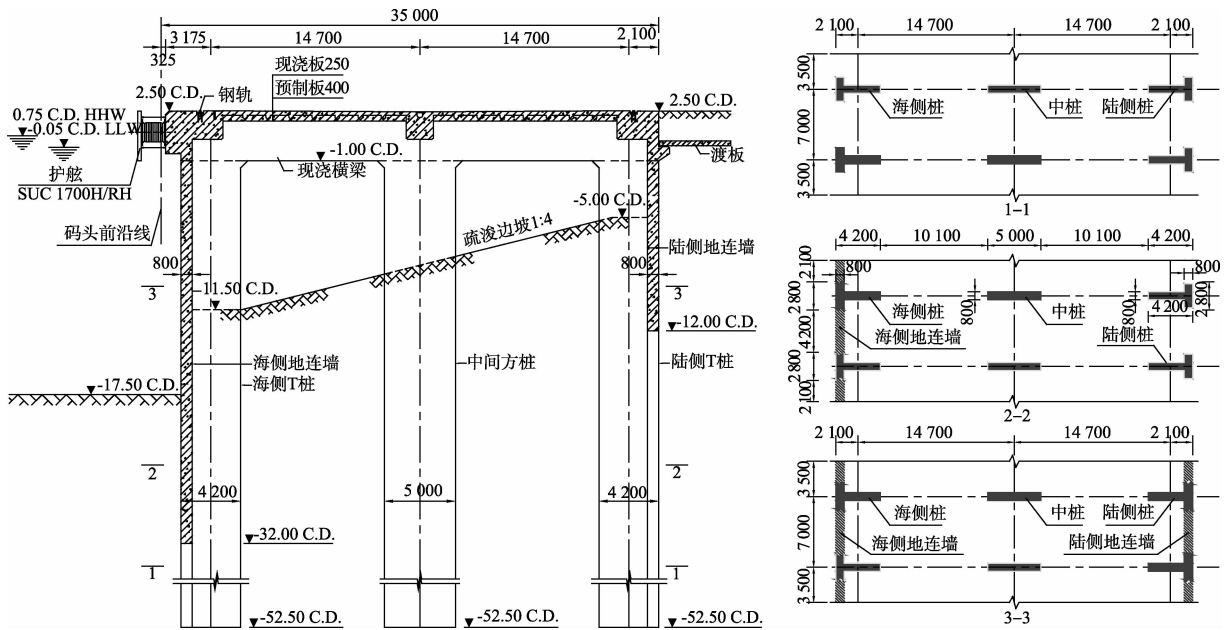


图1 码头典型排架断面结构

2 动力计算概述

桩基码头T构地连墙组合结构三维特性明显、桩土相互作用机理复杂,静力计算采用了三维实体有限元模型与杆件有限元模型相结合的计算方法^[3],动力计算采用了类似方法,分别进行了位移和内力计算。

根据国际航运学会港口结构抗震设计指南^[4]和业主要求,项目设2个抗震设防等级:

1) Level 1: 可服务,地震后码头经过简单、极少量维修,即可恢复运营,对应的地震峰值加速度为0.08g;

2) Level 2: 可维修,地震后经过合理的维修,码头主体结构可以恢复功能,对应的地震峰值加速度为0.12g。

同样根据国际航运学会港口工程抗震设计指南(PIANC WG34)^[4]表3.2,抗震性能等级确定

为Grade A(表1)。

表1 结构抗震性能等级

性能等级	设计地震	
	Level 1	Level 2
S级	破坏度 I:可服务	破坏度 I:可服务
A级	破坏度 I:可服务	破坏度 II:可修复
B级	破坏度 I:可服务	破坏度 III:接近倒塌
C级	破坏度 II:可修复	破坏度 IV:倒塌

3 地震波输入

位移计算采用二维平面有限元和三维实体有限元进行典型排架的对比计算和参数修正,最后利用二维平面有限元进行多个代表断面的计算。

地震工况下的动力计算采用时程分析法,分别利用PLAXIS(二维)和FLAC(三维)程序。利用修正了峰值加速度的El Centro(1940)地震波对二维和三维模型进行参数校正,最后采用校正好参数的二维模型,再计算了Loma Prieta(1989)和San

Fernando (1971) 地震波 (图 2~4)。

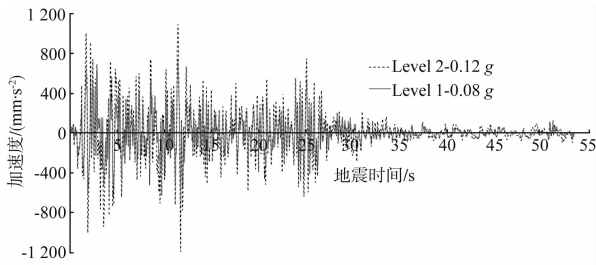


图 2 El Centro (1940) 地震波

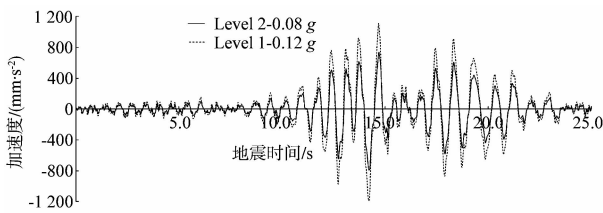


图 3 Loma Prieta (1989) 地震波

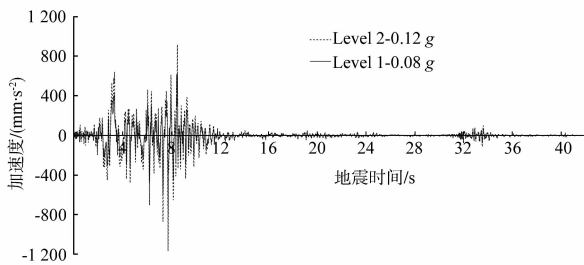


图 4 San Fernando (1971) 地震波

4 计算条件

4.1 材料参数

地震工况下混凝土结构可能由于裂缝开展而导致结构强度折减, 在计算过程中, 考虑混凝土结构刚度折减为原刚度的 70%。计算模型中采用的土体参数见表 1。

表 1 土体参数

土层编号	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 E/MPa
S01 砂土	1.78	0	30	25.0
S02 砂土	1.64	0	33	25.0
S03 砂土	1.95	0	35	25.0
S04 黏土	1.67	10	20	20.1
S05 黏土	1.65	60	0	18.3
S06 砂土	1.95	0	39	50.0
S07 黏土	1.90	130	0	58.7
S08 砂土	1.95	0	39	50.0*

注: * 50 MPa 为层顶模量, 深度每增加 1 m, 模量增加 1 MPa。

4.2 计算工况

结合抗震设防的 2 个等级和采用的 3 条典型地震波, 计算工况见表 2, 其中工况 1-1 和 1-2 为相同计算参数下的二维、三维模型参数校正。

表 2 计算工况

工况	峰值加速度	地震波	计算模型
1-1	0.12g	El Centro	三维
1-2	0.12g	El Centro	二维
2	0.12g	Loma Prieta	二维
3	0.12g	San Fernando	二维
4	0.08g	El Centro	二维
5	0.08g	Loma Prieta	二维
6	0.08g	San Fernando	二维

4.3 计算模型

二维计算利用 PLAXIS 程序, 采用 15 节点单元建模, 对土体采用“中等程度”, 对结构区域采用加密线, 边界条件为“标准吸收边界(动力)”, 以吸收地震波的反射; 对土体采用 M-C 模型, 通过在底边界施加水平方向地震波, 结构采用平面应变模型。模型中选择 4 个点以观测其动力响应, 分别位于码头顶面 A 点、前沿泥面 B 点、桩底 C 点和模型底部 D 点。计算模型如图 5 所示。

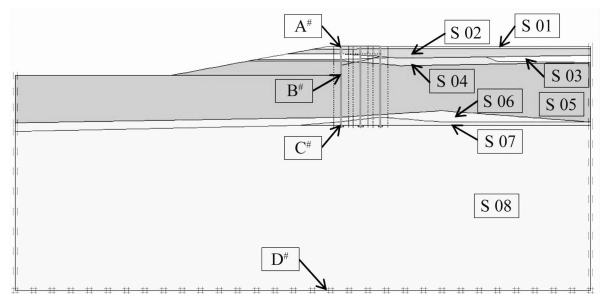


图 5 二维平面有限元计算模型

三维计算利用 FLAC 程序, 建立三维实体空间有限元模型, 桩-土材料之间建立摩擦单元, 取典型排架 (7 m) 为计算单元。计算模型如图 6 所示。

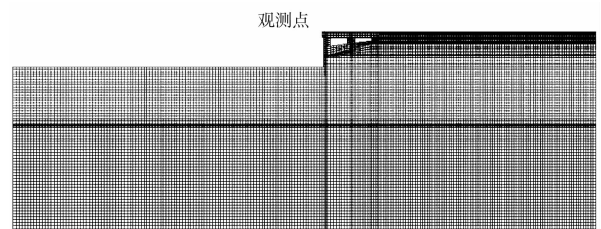


图 6 三维空间实体有限元计算模型

5 结果分析

5.1 计算结果对比

由于结构的三维特性明显，所以采用三维模型计算更符合工程实际。但三维模型分析需要较大的时间投入，因此利用三维模型校正二维模型的参数，进而利用二维模型进行体表断面的计算。1-1 和 1-2 工况计算结果对比如图 7~8 所示。二维和三维模型计算结果基本一致后，可以将二维模型应用到更多工况计算。

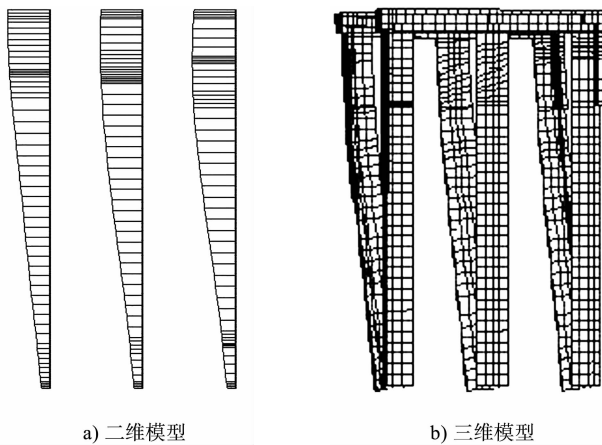


图 7 桩基水平位移示意

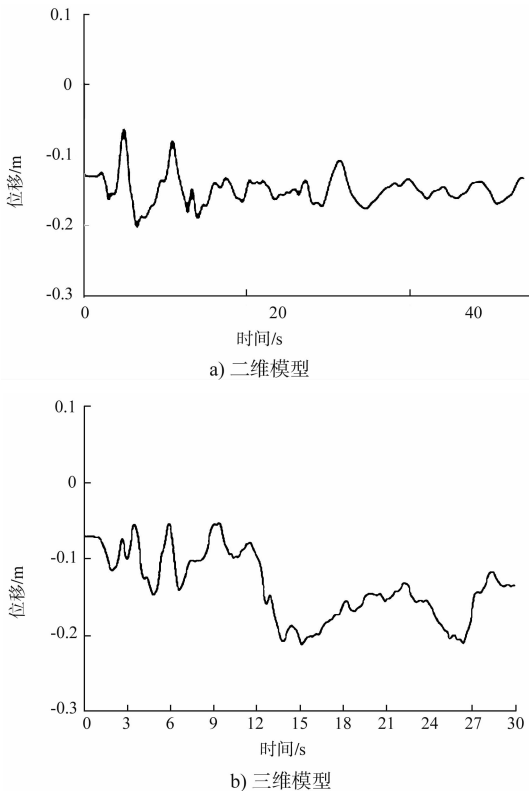


图 8 A 点位移响应

5.2 主要计算结果

对应 El Centro (1940) 和 Loma Prieta (1989) 地震波，在 Level 2 工况下，各监测点的位移响应见图 9，各工况下是大位移响应值见表 3。

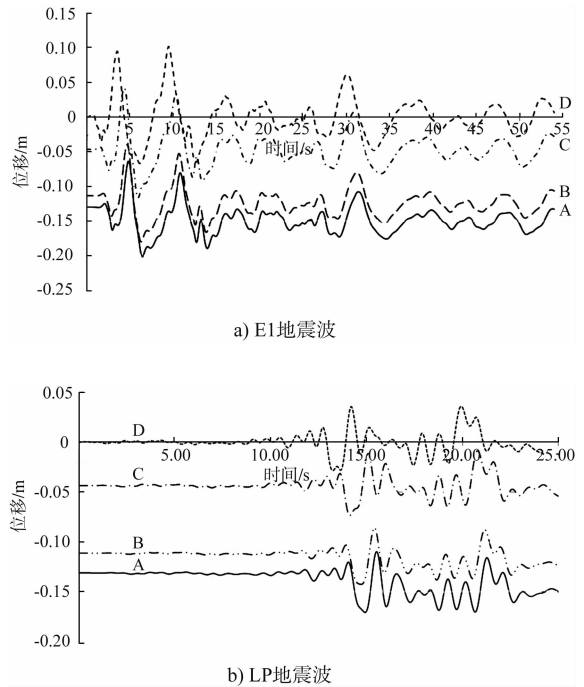


图 9 Level 2 各监测点位移

表 3 各计算工况最大水平位移响应值 m

计算工况	A	B	C	D
1-1	0.215			
1-2	0.201	0.179	0.115	0.066
2	0.172	0.142	0.073	0.028
3	0.159	0.138	0.075	0.031
4	0.181	0.160	0.097	0.062
5	0.156	0.132	0.063	0.019
6	0.146	0.126	0.065	0.021

5.3 结构变形限值

参考国际航运学会港口工程抗震设计指南 (PIANC WG34)^[4]表 4.2 和表 4.3，推荐的板桩墙结构和桩基结构地震破坏标准，本工程地震变形限值见表 4。

表 4 结构变形限值

破坏度等级	残余位移	
	海侧位移	海侧斜度
破坏度 I	小于 1.5% 结构高度	小于 3°
破坏度 II	无要求	无要求

结构最大高度 (AB 点距离) 21 m, 根据计算结果 (表 3), Level 1 下最大相对水平位移发生在工况 5, 对应结构倾斜度为 1.143%, 满足抗震性能等级 A 级的要求。

虽然抗震性能等级 A 级对在 Level 2 下的水平位移没有要求, 但本工程计算结果显示 Level 2 下最大相对水平位移发生在工况 2, 对应结构倾斜度为 1.429%, 对应破坏度为破坏度 I: 可服务, 高于 WG34 的破坏度 II: 可修复要求。

6 结语

1) 对三维和二维多个工况的地震位移响应计算表明, 结构在工程地震工况下的最大位移响应符合要求。在对结构进行位移响应计算的同时, 为核算结构内力水平, 还采用拟静力法进行了地震工况下的结构内力计算, 结果显示地震工况下内力小于正常使用工况下内力^[3]。

2) 桩基地连墙组合码头结构, 是介于桩基和地连墙结构间的新型结构, 与这两种传统结构相比, 具有受力合理、断面刚度大、承载力强、施工设备相对简单等优点。结构三维特性明显,

地震工况采用完全的三维模型计算各工况下的位移响应, 计算周期过长, 通过典型工况的对比计算和参数校正, 可以采用二维平面模型进行多工况计算。

3) T 构桩基组合码头应用尚属首次, 项目设计计算过程时间紧, 只进行了数学模型计算, 后续将结合物理模型试验进行相关研究。

参考文献:

- [1] 史佩栋. 使用桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 王成环. 挖入式港池采用地连墙结构码头的施工实践[J]. 中国港湾建设, 2000(4): 6-14.
- [3] 胡家顺. 桩基地连墙码头结构新形式应用与研究[J]. 水运工程, 2011(9): 165-169.
- [4] Work Group No.34 of the Maritime Navigation Commission International Navigation Association Seismic Design Guidelines for Port Structures (PIANC WG34) [M]. Steenwijk, The Netherlands: Grafisch Productiebedrijf Corter, 2001.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 121 页)

3) 选取吴淞国际邮轮码头为例, 通过连续仿真试验, 获得航道通过能力、靠离泊折减系数、影响的船舶艘次和延误等参数, 量化靠离泊作业对通过能力的影响, 为码头岸线利用提供参考。

参考文献:

- [1] 李云斌. 天津港主航道通过能力(饱和度)评价与预测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 10-11.
- [2] 张蕾. 长江干线典型航道通过能力仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 4-5.
- [3] 李强. 汉江航道通过能力现状及提高措施[J]. 中国水运, 2013(1): 16-36
- [4] 谈超凤, 于敏. 集装箱码头泊位通过能力影响因素及相关指标研究[J]. 中国港口, 2012(3): 12-42.
- [5] 宋向群, 梁文文. 船型组合对沿海散货港区航道通过能力的影响[J]. 水运工程, 2012(8): 8-36.

- [6] 董宇, 姜晔, 何良德. 内河航道通过能力计算方法研究[J]. 水运工程, 2007(1): 12-36.
- [7] 米罗诺夫 V P, 林竟云. 提高航道通过能力和安全性的方法研究[J]. 水运工程, 1979(S2): 12-36.
- [8] 上海海事大学. 长江下游长江口至南京港航道通过能力建模研究[R]. 上海: 上海海事大学, 2013: 34-40.
- [9] 卞艺杰. 航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2000(8): 27-30.
- [10] 周鹏飞, 肖美贞. 集装箱码头船舶服务系统仿真建模与输入参数处理[J]. 上海海事大学学报, 2011, 32(2): 29-33.
- [11] 王辉. 船舶乘潮进出港通航组织方案研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 36-37.
- [12] 上海海事大学. 吴淞口国际邮轮码头工程通航安全评估[R]. 上海: 上海海事大学, 2009: 2-8.

(本文编辑 武亚庆)