



沉箱式靠船防波堤结构地震响应数值分析

倪晓雯¹, 刘子宜²

(1. 山东建研检测检验科技有限公司, 山东 济南 250031;

2. 深圳市招商前海湾置业有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 针对沉箱式靠船防波堤结构在地震作用下的安全性评估问题, 基于有限单元法, 采用考虑砂土液化模式的广义弹塑性本构算法建立沉箱式靠船防波堤二维断面计算力学模型, 开展地震波作用下结构时间历程动力响应数值模拟研究, 并根据计算结果对结构的安全性进行评价。研究表明: 在峰值0.1g的多遇地震作用下, 沉箱式靠船防波堤结构的最大水平和竖直加速度放大倍数约为1.6, 符合地震波在分层土体中传播的一般规律; 在多遇地震作用下, 防波堤的整体抗滑安全系数和主要沉箱构件的最不利抗倾和抗滑稳定性系数均大于设计标准; 在峰值0.2g的罕遇地震作用下, 广义弹塑性本构模型可以准确模拟地震过程中, 地基粉细砂层的孔隙水压力上升和抗液化安全系数降低的过程。在此基础上, 计算模型可以准确评估沉箱式靠船防波堤在地震作用下的累积变形量, 从而充分论证防波堤结构在罕遇地震下的可靠性。

关键词: 沉箱式靠船防波堤; 广义弹塑性模型; 加速度分布; 砂土液化; 变形响应

中图分类号: TV148; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0175-06

Numerical analysis of seismic response for caisson type berthing breakwater structure

NI Xiaowen¹, LIU Ziyi²

(1. Shandong Jianyan Testing and Inspection Technology Co., Ltd., Jinan 250031, China;

2. Shenzhen Merchants Qianhai Bay Real Estate Co., Ltd., Shenzhen, 518101, China)

Abstract: To the safety evaluation of the caisson type berthing breakwater structure under earthquake action, this paper establishes a two-dimensional computational model of the caisson type berthing breakwater based on the finite element method and the generalized elastoplastic constitutive algorithm, which considering sand liquefaction mode. Numerical simulation research on the time history dynamic response of the structure under earthquake wave action is carried out, and the safety of the structure is evaluated based on the calculation results. The research results indicate that under the frequent encountered earthquake action with a peak acceleration value of 0.1g, the maximum horizontal and vertical acceleration amplification factor of the caisson type berthing breakwater structure is about 1.6, which conforms to the general law of seismic wave propagation in layered soil. Under frequent encountered seismic action, the overall anti-sliding safety factor of the breakwater and the most unfavorable anti-tilting and anti-sliding stability factors of the main components caisson are both greater than the design standards. Under rare encountered earthquakes with a peak acceleration value of 0.2g, the generalized elastoplastic constitutive model can accurately simulate the process of pore water pressure increase and liquefaction resistance safety factor decrease in the fine sand layer of the foundation during earthquakes. On this basis, the calculation model can accurately evaluate the cumulative deformation of the caisson type berthing breakwater under earthquake action, thereby fully demonstrating the reliability of the breakwater structure under rare encountered earthquakes.

Keywords: caisson type berthing breakwater; generalized elastoplastic constitutive model; acceleration distribution; sand liquefaction; deformation response

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 倪晓雯 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程研究。

防波堤是现代港口与海洋工程中的重要水工建筑物，用于降低波浪对一定区域内作业环境的影响。在地质条件较为恶劣的地区，防波堤在地震过程中遭遇结构性损伤导致失能将严重影响掩护区域内的作业条件。因此开展防波堤结构抗震分析，掌握防波堤在地震作用下的动力响应机理，准确评估防波堤结构在地震作用下的安全性和可靠性，具有重要的科学和工程意义。

目前国内外研究人员针对地震作用下的土体与结构相互作用开展了大量的分析研究。等价线性法是国内外技术人员常用的分析方法^[1]，该方法依赖于土体动参数试验结果和工程经验，不能准确描述地震过程中的土体状态变化，在大变形模拟中与实际情况相差较大^[2]；在地震变形计算方面，极限平衡理论是防波堤结构震后残余变形评估的主要方法^[3]，该方法基于滑块模型，结合地震加速度的变化过程，采用经验图表确定滑动体的累积位移量，主要缺点是不能准确描述滑动体的范围，也无法表达刚体内的弹塑性变形情况^[4]；弹塑性本构模型的时间历程分析法是近年来逐渐兴起的一种分析计算方法，该方法可以准确地分析结构在地震过程中每一时刻的动力响应，充分描述土体结构在高围压、复杂加载历史、水压力变化等一系列非线性情况下的力学特性，最终直观地展示结构在地震作用下的变形^[5]。相比其他方法，基于弹塑性本构模型的有限元计算方法可以为工程提供更合理、高效的解决方案^[6]。

沉箱式靠船防波堤是一种新型的兼顾靠船功能的防波堤结构形式，通过在防波堤内侧的斜面上设置一组阶梯形布置的沉箱，为船舶靠泊提供必要的临空面和作业平台，以此实现特定规模的船舶靠泊作业，实现岸线资源的高效利用。本文从结构抗震能力角度出发，对沉箱式靠船防波堤结构在设计地震情况下的动力响应进行评估，对量化评估极端情况下结构的安全性和变形情况具有较强参考价值。

1 工程概况

本工程位于广东省陆丰市，规划建设的防波堤为抗震 II 类建筑物，防波堤接岸的根部位置设置可靠船作业平台结构，对应的典型断面见图 1。针对不利地质条件下的防波堤靠船断面开展抗震数模分析，验证构筑物的抗震稳定性，为其结构设计提供安全可靠的依据。

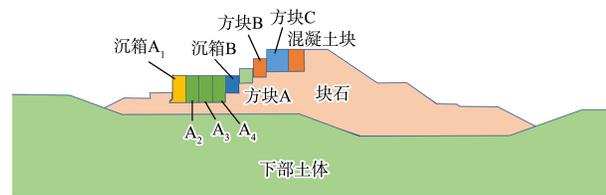


图 1 沉箱式靠船防波堤结构断面

根据工程所在地的地震安全评估结果^[7]，在区域 SL-1 级地面水平峰值加速度为 0.1g，竖向峰值加速度为 0.1g；SL-2 级地面水平峰值加速度为 0.2g，竖向峰值加速度为 0.2g。工程所在的 SL-2 级地面运动水平向与竖向加速度反应谱(5%阻尼比)参数见表 1。

表 1 基岩水平向和竖向加速度反应谱

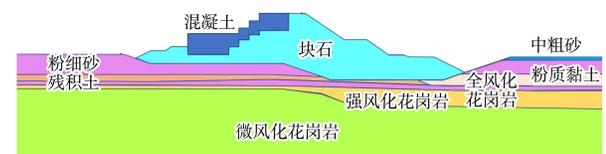
周期/s	水平向加速度反应谱	周期/s	竖向加速度反应谱
0.03	0.200g	0.03	0.200g
0.14	0.540g	0.14	0.540g
0.28	0.540g	0.21	0.540g
1.20	0.190g	1.20	0.130g
4.00	0.027g	4.00	0.018g

注：阻尼比为 0.05。

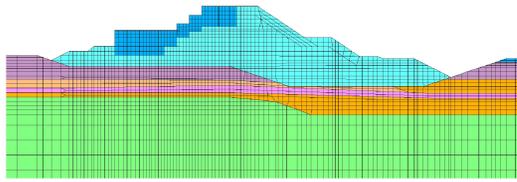
2 计算模型建立

2.1 有限元网格划分

采用动力有限元方法对沉箱式靠船防波堤结构进行建模与分析，选取土层最不利的防波堤靠船平台断面进行计算。典型结构断面以及有限元网格划分见图 2，断面共 4 972 个单元，5 130 个节点。



a) 断面土层



b) 断面有限元网格

图 2 沉箱式靠船防波堤结构断面计算模型

2.2 参数设置

基于动力固结方程的弹塑性排水有效应力分析方法能够很好地模拟地基土的残余变形以及超

孔隙水压力上升、扩散和消散过程^[8]。因此, 广义弹塑性方法更适合研究海工构筑物遭遇地震时的变形过程^[9]。目前, 广义弹塑性模型在地下管线、地铁、加筋挡土墙和心墙堆石坝等方面均有所应用^[10]。

在分析计算过程中, 针对模型中涉及水压力聚集与消散的土体材料(主要包含全风化、残积土和粉细砂)应用广义弹塑性模型。对应的模型参数见表 2。

表 2 土层广义弹塑性本构模型计算参数

土层名称	G_0	K_0	m_s	m_v	H_{10}	m_1	M_f	M_g	α_f	α_g	β_0	B_1	H_{u0}	m_u	γ_{dm}	γ_{hu}	r_d
全风化	410	379	0.800	0.800	700	0.80	0.9	1.37	0.25	-0.10	20	0.010	700	0.80	15	3.5	10
残积土	162	150	0.750	0.750	200	0.75	0.8	1.25	0.45	-0.50	20	0.010	200	0.80	10	3.5	10
粉细砂	336	309	0.633	0.633	300	0.43	1.0	1.25	0.20	-0.25	20	0.015	300	0.43	12	3.5	10

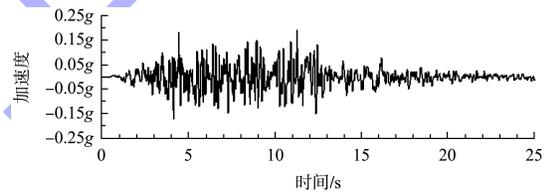
注: K_0 、 G_0 分别为弹性体积模量和剪切模量, m_v 和 m_s 为不同围压下的压缩系数, H_{10} 为塑性模量系数, m_1 、 M_f 、 M_g 分别为不同状态下的临界塑性状态参数, α_f 、 α_g 分别为不同状态下的质量阻尼参数, β_0 、 B_1 分别为不同状态下的刚度阻尼参数, H_{u0} 为初始塑性模量系数, m_u 为循环作用下的压缩系数, γ_{dm} 、 γ_{hu} 、 γ_d 为模型中的循环抗剪系数。

在计算过程中, 水位对计算结果影响较为显著。由于高水位时地震惯性力大于低水位, 且高水位的有效应力小于低水位, 因此高水位是液化和变形分析的控制工况, 本文仅计算高水位工况。

2.3 边界条件设置

考虑到自重力作用主要产生竖向变形, 因此静力计算时, 两侧采用水平约束, 竖向自由的边界。在动力计算时, 模型底部施加黏性边界, 以模拟地基无限域辐射阻尼的作用。

本次计算输入场地地震动参数, 地震峰值加速度分别采用 SL-1 和 SL-2 水准。地震过程主要采用时间历程法, 计算过程中采用人工合成的地震加速度对模型进行加载, 人工合成地震波采用随机相位法基于反应谱迭代合成, 确保合成地震波的等价性。SL-2 工况对应的人工合成地震加速度时间历程见图 3。



b) 竖直

图 3 SL-2 人工合成地震波时间历程曲线

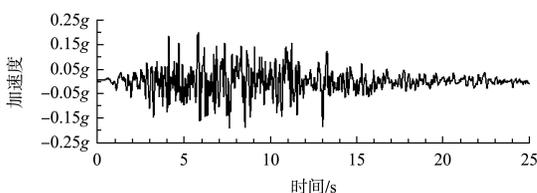
由图 3 可知, 地震波从 0~4 s 内变化幅度逐渐增加, 在 4~12 s 内保持稳定的随机震动强度, 在 12~25 s 内震动幅度逐渐衰减。

为确保地震波对模型的准确加载, 地震加速度的输入方法是从中风化花岗岩层或微风化花岗岩层输入剪切力。实际实施过程中将地表地震波幅度的 1/2 转化为剪切力对模型进行加载, 可准确模拟地震对工程场地的作用。

3 计算结果分析

3.1 SL-1 工况下结构断面动力响应

地震作用下土体与结构复合体系的加速度响应分布是分析判断系统安全性的重要参考依据, 也是用于初步判断模型地震计算结果正确性的直观参数。沉箱式靠船防波堤结构在水平和竖直方



a) 水平

向的地震加速度峰值响应结果见图 4。

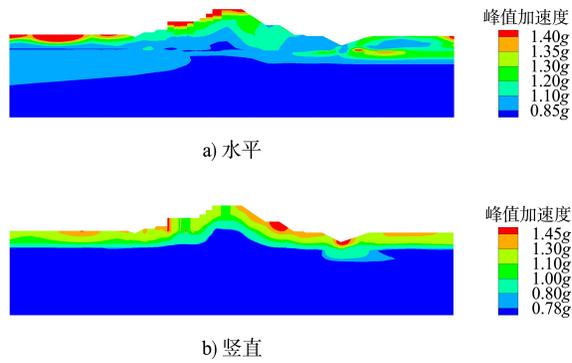


图 4 SL-1 地震作用下结构峰值加速度响应分布

由图 4 可知：SL-1 地震作用下高水位时沉箱式靠船防波堤结构的水平加速度的最大放大倍数为 1.47~1.68(相对地表基岩)，竖向加速度的最大放大倍数为 1.53~1.63。计算结果符合土工构筑物加速度反映的一般规律，相关计算结果见表 3。

表 3 SL-1 地震作用下结构最大峰值加速度响应

断面	水位	水平		竖直	
		加速度/ (m·s ⁻²)	放大 倍数	加速度/ (m·s ⁻²)	放大 倍数
沉箱式靠船防波堤	高水位	1.63	1.66	1.58	1.61

结合图 4 和表 2 中的结果可知，在 SL-1 地震作用下，防波堤地基的地表层粉细砂区域出现较为强烈的加速度响应，因此该区域存在较大的土体液化可能性。为准确评估土体液化可能的范围和液化后的强度衰减特性，提取了模型的砂土液化安全率，其分布见图 5。

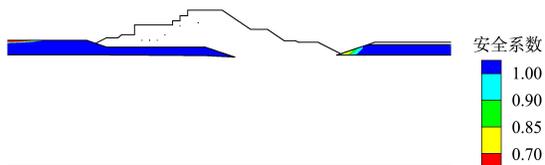


图 5 SL-1 地震作用下粉细砂层抗液化安全系数分布

由图 5 可知：SL-1 地震作用下，沉箱式靠船防波堤断面底部的砂土的抗液化安全系数在绝大多数空间范围内均大于 1.0，未发生液化，仅防波堤坡脚及其外侧砂土浅层出现液化的可能性，由此判断，SL-1 地震工况下，沉箱式靠船防波堤不存在显著的不稳定现象。

3.2 SL-1 工况下断面稳定性时程响应

除了结构整体的加速度响应分布外，沉箱式靠船防波堤的整体滑动安全性和沉箱箱体的抗倾、抗滑稳定性是定量评价地震作用下结构可靠性的主要指标。采用圆弧滑动法对地震过程中所有时刻的防波堤整体稳定性进行极限平衡校核，得到地震作用下沉箱式靠船防波堤的整体边坡稳定安全系数时间历程曲线见图 6。

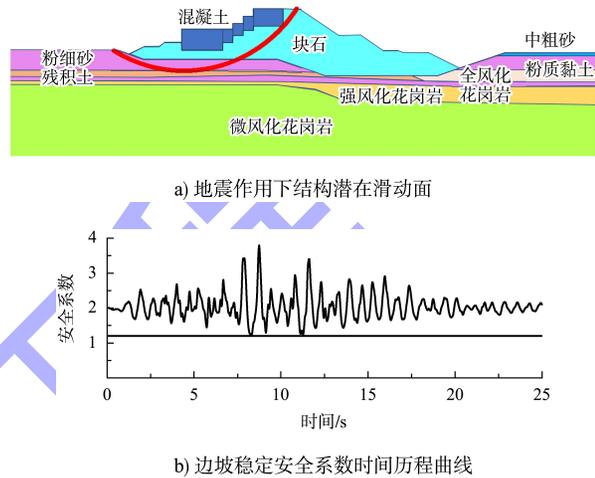
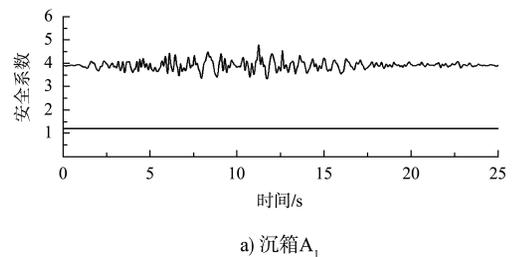


图 6 SL-1 地震作用下结构整体稳定性时程结果

由图 6 可知：地震过程中，沉箱式靠船防波堤的最危险滑弧受到结构右侧块石和较好地基的制约，穿过粉细砂层向左侧发展，对整个沉箱靠船构件的稳定性造成了一定影响。从边坡稳定安全系数时间历程曲线结果中可以看到：地震过程中，沉箱式靠船防波堤的边坡稳定系数平均值为 2.0，最大安全系数接近 4.0，最不利情况下安全系数为 1.2。因此根据计算结果，SL-1 工况下沉箱式靠船防波堤的整体边坡稳定性满足设计要求。

在结构整体稳定性的基础上，靠船沉箱的局部抗倾和抗滑稳定性也是评价结构安全性的重要指标。SL-1 工况下选取典型结构沉箱 A₁、沉箱 B、方块 B 提取抗滑安全系数时间历程见图 7。



a) 沉箱 A₁

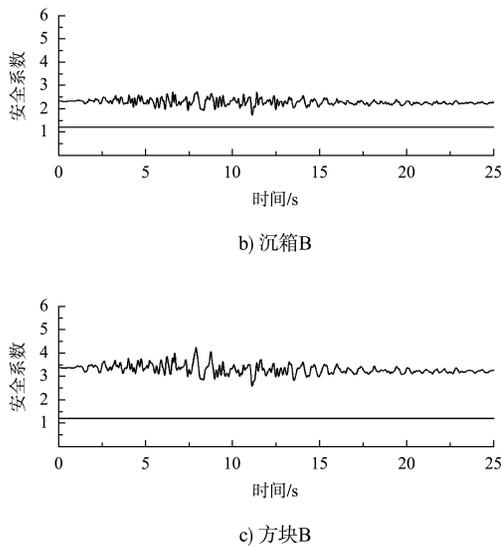


图 7 靠船构件地震作用下抗滑安全系数时程结果

由图 7 可知: SL-1 地震作用下高水位时, 沉箱 A₁ 的抗滑安全系数平均值为 4.0, 最不利工况下的安全系数为 3.33; 沉箱 B 受到后方方块的挤压作用, 对应的安全系数平均值为 2.3, 最不利工况下的安全系数为 1.73; 方块 B 的抗滑安全系数平均值为 3.4, 最不利工况下的安全系数为 2.58。SL-1 工况下典型结构的抗倾与抗滑安全系数计算结果见表 4。

表 4 SL-1 地震作用下典型结构最不利抗倾与抗滑系数

沉箱类型	抗滑系数	抗倾系数
沉箱 A ₁	3.33	2.07
沉箱 B	1.73	1.56
方块 B	2.58	3.36

结合图 7 和表 4 中的结果可知, 在 SL-1 地震作用下, 防波堤主要结构的最不利抗倾和抗滑稳定性系数均大于设计标准, 因此沉箱式靠船防波堤结构设计满足抗震要求。

3.3 SL-2 工况下结构断面变形响应

地震设计过程中, 通常需要在考虑多遇地震 (SL-1) 烈度下结构承载能力的基础上, 进一步考虑罕遇地震 (SL-2) 作用下结构的弹塑性变形, 以确保结构形变处于可接受状态。

SL-2 等级地震的加速度峰值为 0.2g, 显著大于 SL-1 等级对应的 0.1g, 因此结构断面中的粉细砂层发生液化的风险大大增加。为了准确评估土体液化可能的范围和液化后的强度衰减特性, 分

析 SL-2 工况下模型砂土层的孔隙水压力和液化安全率分布见图 8。

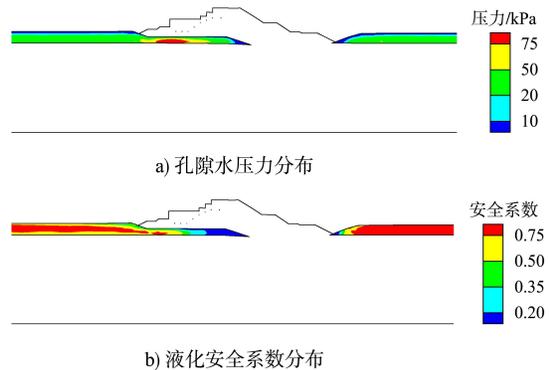


图 8 SL-2 地震作用下防波堤断面安全性

从计算结果可知: 震后堤体下部地基的砂土孔压力达到 50~80 kPa, 孔压力较大导致防波堤地基液化的安全系数大范围降低至 1.0 以内, 使得地基弱化从而产生较大的地震变形。

根据上述分析, 为了考虑砂土液化对结构变形的影响, 进一步采用广义弹塑性本构模型, 对断面在地震作用下的非线性动力响应开展时间历程分析。计算得到的断面变形结果见图 9。

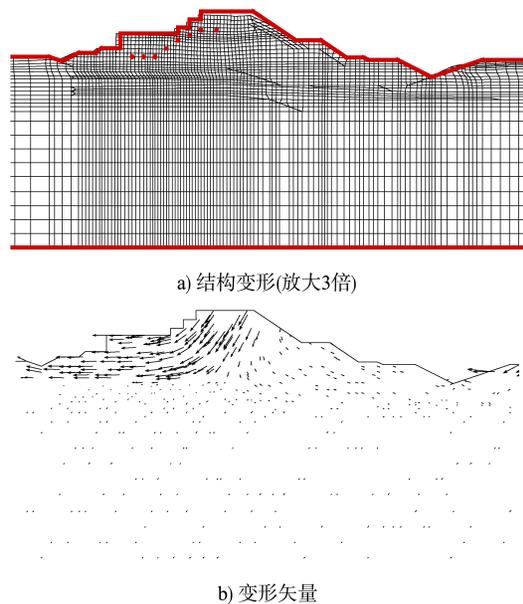


图 9 SL-2 地震作用下防波堤变形

由图 9 可知: 在本构模型中考虑了土体液化变形机制后, 防波堤断面产生一定程度的变形, 变形量主要集中在沉箱一侧, 从变形矢量结果中可以看到, 地震产生的主要变形呈塑性滑动趋势, 滑动区域与圆弧滑动法计算结果一致。

SL-2 工况下，防波堤断面的最大水平和竖直位移见表 5。从表中可以看到，在 0.2g 的水平和竖直加速度共同作用下，沉箱式靠船防波堤断面的最大竖向位移达到 0.69 m，靠船侧水平位移达到 0.73 m，海侧最大水平位移达到 0.13 m，总体而言，位移幅度较为有限。因此计算结果表明：沉箱式靠船防波堤结构可以满足 SL-2 地震工况下的变形限制要求。

表 5 SL-2 地震作用下防波堤最大变形量

竖向沉降/m	靠船侧水平变形/m	海侧水平变形/m
0.69	0.73	0.13

4 结论

1) 本抗震计算模型，在峰值 0.1g 的多遇地震作用下，沉箱式靠船防波堤结构的最大水平加速度放大倍数为 1.47~1.68，最大竖向加速度的放大倍数为 1.53~1.63。计算结果符合地震波在分层土体中传播的一般规律。

2) 基于地震作用过程中任意时刻的结构整体和局部安全系数分析结果，在峰值 0.1g 的多遇地震作用下，防波堤的整体抗滑安全系数和主要结构构件的最不利抗倾、抗滑稳定性系数均大于设计标准，因此沉箱式靠船防波堤结构设计满足抗震要求。

3) 在峰值 0.2g 的罕遇地震作用下，广义弹塑性本构模型可以准确模拟地震作用下地基粉细砂层的孔隙水压力上升和液化安全系数降低的过程。在此基础上，计算模型可以准确开展沉箱式靠船防波堤在地震作用下的累积变形计算评估，从而充分论证防波堤结构在罕遇地震下的变形量符合安全使用标准。

参考文献:

[1] DICKENSON S E, YANG D S. Seismically-induced deformations of caisson retaining walls in improved soils[J]. Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, 1998, 75(2): 1071-1082.

[2] LIU H L, SUSUMU Iai, KOJI Ichii. Evaluation of deformation to the pneumatic caisson foundation of kobe Ohashi Bridge[C]// Report of Port and Harbour Research Institute. Japan: Port and Harbour Research Institute, 1997: 18-23.

[3] 杨勋,王欢欢,余克勤,等.行波激励下防波堤地震动力响应分析[J].岩土力学,2014,35(6):1775-1781.

[4] 刘立平.防波堤的震损机理与抗震设防[J].水运工程,1992(3):12-15.

[5] 李炎保,蒋学炼,刘任.防波堤损坏特点与其成因的关系[J].海洋工程,2006,24(2):130-138.

[6] 邓楚键,何国杰,郑颖人.基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J].岩土工程学报,2006,28(6):735-739.

[7] 汪明武,井合进,飞田哲男.栈桥式构筑物抗震性能动态离心模型试验的数值模拟[J].岩土工程学报,2005,27(7):738-741.

[8] 李增志,别社安,任增金.抛石防波堤稳定性的离散单元法分析[J].工程力学,2009,26(S1):111-114.

[9] 叶剑红, JENG D S, CHAN A H C. 非饱和砂质海床在复合防波堤下固结的数值研究[J].工程地质学报,2012,20(4):639-648.

[10] KUCUKARSLAN S, COSKUN S B, TASKIN B. Transient analysis of dam-reservoir interaction including the reservoir bottom effects [J]. Journal of fluids & structures, 2005, 20(8): 1073-1084.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 96 页)

[4] 覃杰,杨孟愚,厉萍,等.超大型石化临港工业码头平面布局[J].水运工程,2012(2):50-54.

[5] 朱忠余,靳如刚,高峰.浙江 LNG 码头总平面布置试验研究[J].水运工程,2013(10):102-106.

[6] 郝忠毅.长兴岛 30 万吨油码头平面布置与码头结构方案优化[D].大连:大连理工大学,2012.

[7] 成崇华,程培军.宁波港大榭岛 30 万 t 级油码头平面布置[J].港工技术,2009,46(6):11-13.

[8] Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Ltd. OCIMF-Manifold recommendations for liquefied gas carriers [M]. Edinburgh: Witherby Publishing Group Ltd, 2011.

[9] 中交水运规划设计院有限公司.海港总体设计规范: JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.

(本文编辑 王传瑜)