



# 黏弹性人工边界在坞式闸室结构 动力计算中的应用

张丽<sup>1</sup>, 陶桂兰<sup>2</sup>

(1. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 应用 ANSYS 通用有限元软件编制黏弹性人工边界的计算程序, 通过算例验证该计算方法的可行性。建立基于黏弹性人工边界的坞式闸室结构的动力计算模型, 对坞式闸室结构进行固定边界和黏弹性边界下不同边界范围的动力计算分析。计算结果表明: 与固定边界相比, 黏弹性人工边界有更高的可靠性。在地震动力作用下, 闸墙顶部的动力加速度响应最为明显, 在闸墙底部拉应力响应最大; 闸室底板下部受拉, 最大拉应力值大于闸墙的最大应力; 地基深度范围取值在 2~3 倍以上结构底宽时, 结构响应已趋于稳定。

**关键词:** 黏弹性边界; 坞式闸室; 动力响应; 地基范围

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0087-07

## Application of viscoelastic artificial boundary in dynamic calculation of chamber structure

ZHAGN Li<sup>1</sup>, TAO Gui-lan<sup>2</sup>

(1. Ningbo China Communications Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** We use general finite element software ANSYS to simulate viscoelastic artificial boundary calculation program. The feasibility of the program is verified by an example. The dynamic calculation model of chamber structure is established based on the calculation model. Under conditions of fixed boundary and viscoelastic artificial boundary, dynamic calculation of different boundary range is programmed. The results show: compared with fixed boundary, viscoelastic artificial boundary is more reliable. Under the action of earthquake, acceleration response is most obvious at the top of the lock wall. The maximum value of the tension stress response is in the bottom of the lock wall. The stress in the bottom of the ship lock appears as tension stress in downside, and the maximum tensile stress value in lock bottom is larger than that in the lock wall. The structural responses to stabilize when the boundary range takes 2~3 times the size of the lock bottom.

**Keywords:** viscoelastic boundary; chamber structure; dynamic response; boundary range

无限地基的模拟是结构-地基动力相互作用分析中的核心问题之一, 处理无限域问题的较好解决方法是在截取的有限域断面上设置人工边界。目前发展的人工边界一般分为两大类, 一种是全局人工边界, 另一种是局部人工边界。例如边界

元, 属于全局人工边界, 它具有较高的精度, 但由于全局耦合性, 计算需要耗费大量的时间; 与全局人工边界相比, 局部人工边界在计算时间上优势明显, 具有良好的实用性, 在实际工程中获得了广泛的应用。

收稿日期: 2016-04-25

作者简介: 张丽 (1989—), 女, 硕士, 从事水运工程规划、设计、研究等方面工作。

在众多的局部人工边界中，最简单的局部人工边界是 Lysmer 等提出的黏性人工边界<sup>[1]</sup>，它施加简便、适用性较强、概念清楚、易于程序实现、应用广泛，已经被引入一些规范<sup>[2-3]</sup>和大型通用有限元软件中。但是，黏性边界精度低，尤其是不能模拟无限地基的弹性恢复能力，对于较为复杂的大型结构，有时位移结果会出现较大漂移，不能满足工程精度的要求<sup>[4]</sup>。Deek 在柱面波理论基础上建立了二维时域人工边界<sup>[5]</sup>，刘晶波在这一边界基础给出了二维平面内时域黏弹性人工边界<sup>[6]</sup>。黏弹性人工边界克服了黏性边界引起的低频漂移问题，能够模拟人工边界外半无限介质的弹性恢复性能，具有良好的低频和高频稳定性，应用方便。该边界与通用有限元软件容易结合，在 ANSYS、NASTRAN、MARC 等软件商都已经初步实现，并经过实际工程验证能够满足工程精度的要求，具有良好的稳定性。由于有较高精度和良好适用性，黏弹性人工边界在结构-地基动力相互作用相关的科研和工程问题中得到越来越广泛的应用。

本文采用大型有限元计算软件 ANSYS，应用 APDL 语言编制了程序，对土基上船闸坞式闸室结构建立了考虑黏弹性人工边界的动力有限元模型，通过算例验证了该程序及波动输入方法的正确性，分别在固定边界和黏弹性边界条件下，研究了坞式闸室结构的动力计算边界选取范围大小影响的情况。

### 1 黏弹性人工边界及在 ANSYS 软件中的实现方法

#### 1.1 黏弹性人工边界原理

黏弹性人工边界基于波场分离，通过在边界上设置一系列由线性弹簧和阻尼器组成的简单物理元件来吸收射向人工边界的入射波动能量和反射波的散射，从而达到模拟波射入人工边界的透射过程。在任意距点源半径为  $R$  的人工边界点  $i$  上的应力条件为<sup>[7]</sup>：

$$\sigma_i(R, t) = -\rho C_B \dot{u}_i(R, t) - K_B u_i(R, t) \quad (1)$$

等价于阻尼系数  $C_B$  的阻尼器并联上一个刚度系数为  $K_B$  的线性弹簧。

二维黏弹性人工边界单元等效物理系统的刚度系数  $K_B$  和阻尼系数  $C_B$  分别为<sup>[4]</sup>：

$$\text{切向边界} \quad \begin{cases} K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R} \\ C_{BT} = \rho c_S \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{法向边界} \quad \begin{cases} K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R} \\ C_{BN} = \rho c_P \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和(3)中， $K_{BN}$ 、 $K_{BT}$ 分别为法向与切向刚度系数； $C_{BN}$ 、 $C_{BT}$ 分别为法向与切向的阻尼系数； $R$ 为波源至人工边界点的距离； $c_S$ 、 $c_P$ 分别为压缩波(S波)和剪切波(P波)波速； $G$ 为介质剪切模量； $\rho$ 为介质密度； $\alpha_T$ 、 $\alpha_N$ 分别为黏弹性人工边界切向、法向参数，在二维问题中， $\alpha_T$ 、 $\alpha_N$ 分别在  $[0.35, 0.65]$ 、 $[0.8, 1.2]$  范围内取值，均可以得到良好的计算结果<sup>[8]</sup>。

#### 1.2 黏弹性边界的实现方法

ANSYS 软件是目前最先进的大型通用结构有限元分析软件之一，利用 ANSYS 的 APDL 语言进行二次开发，通过设置边界单元的方式，模拟黏弹性人工边界的弹簧-阻尼并联单元，可实现黏弹性人工边界的模拟。

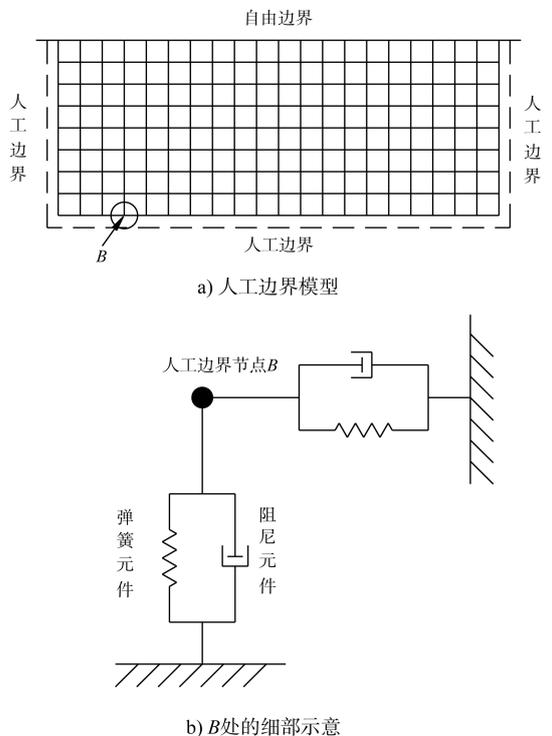


图1 二维黏弹性人工边界

实现方法如下: 对于二维有限元模型(图 1), 在截断边界的每个结点上设置弹簧-阻尼器单元<sup>[9-10]</sup>。根据边界结点  $B$  坐标计算该点到计算区域中心的距离  $L$ , 由式(2)和式(3)分别得到结点  $B$  的法向弹簧刚度  $K_{BN}$ 和阻尼系数  $C_{BN}$ 、切向弹簧刚度  $K_{BT}$ 和阻尼系数  $C_{BT}$ , 即可实现该结点的黏弹性人工边界添加。最后对边界结点进行循环即可实现整体模型的黏弹性人工边界。

### 1.3 地震动输入

在人工边界上实现地震动输入时, 不同的人工边界条件会对输入方法产生影响。对固定边界, 通常采用直接输入地震波加速度时程的方法。对黏弹性边界, 刘晶波通过将地震波动输入问题化为波源问题, 即将输入地震波动转化为作用于人工边界上的等效荷载的方法来实现波动输入<sup>[6]</sup>。

黏弹性人工边界上的运动由两部分产生: 入射波和散射波。由位移连续条件和力学平衡条件, 人工边界上任一点  $B$  的运动方程为:

$$m_B \ddot{u}_{Bi}(t) + C_B \dot{u}_{Bi}(t) + K_B u_{Bi}(t) = F_{Bi}^f(t) + F_{Bi}^s(t) \quad (4)$$

式中:  $K_B$ 、 $C_B$  为结点  $B$  的人工边界参数;  $F_{Bi}^f$ 、 $F_{Bi}^s$  分别为模拟边界自由场和散射场在  $B$  结点沿  $i$  方向施加的等效结点荷载。

入射波是要输入的地震波, 需采用一定的方法输入到计算区域; 散射波是在波传播过程中由结构和基础产生的, 由人工边界吸收。在计算区域上, 将散射波和入射波的作用转化成波场作用来对结构进行分析。模拟边界自由场时, 在黏弹性边界结点上需要施加的荷载由两部分组成: 一是克服人工边界单元刚度与阻尼所需的应力, 二是自由场在人工边界处的应力; 模拟散射场时, 人工边界结点上施加的应力近似由黏弹性边界来提供, 无需在边界结点上附加额外的荷载。

在仅考虑自由场的情况下, 平面问题  $S$  波从人工边界底部垂直入射的等效结点荷载计算公式为<sup>[11-12]</sup>:

底边界:

$$F_{Bx}^y(t) = A_B [K_{BT} u_s(t) + C_{BT} \dot{u}_s(t) + \rho c_s \dot{u}_s(t)] \quad (5)$$

侧边界:

$$\begin{cases} F_{Bx}^- (t) = A_B [K_{BN} u_s(t - \Delta t_1) + C_{BN} \dot{u}_s(t - \Delta t_1) + \\ K_{BN} u_s(t - \Delta t_2) + C_{BN} \dot{u}_s(t - \Delta t_2)] \\ F_{By}^- (t) = A_B C_{BT} [\dot{u}_s(t - \Delta t_1) - \dot{u}_s(t - \Delta t_2)] \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{Bx}^+ (t) = F_{Bx}^- (t) \\ F_{By}^+ (t) = -F_{By}^- (t) \end{cases}$$

式中:  $\Delta t_1 = l/c_s$ ,  $\Delta t_2 = (2L-l)/c_s$ ;  $L$  为底边界到地表的距离;  $l$  为侧边界上结点  $B$  到底边界的距离;  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  分别为  $B$  结点处入射  $S$  波和地表反射  $S$  波的时间延迟;  $A_B$  为人工边界上边界结点  $B$  的影响范围; 等效结点荷载的下标代表结点号和分量方向, 上标代表结点所在人工边界的外法线方向, 与坐标轴方向一致为正, 相反为负。

本文用等效结点荷载的方法编制了计算程序, 可以方便有效地求出边界结点的等效结点荷载, 在底部边界和侧面边界分别循环加载, 从而实现黏弹性边界单元的波动输入。

## 2 黏弹性边界及波动输入方法验证

从二维半无限域中截取  $800 \text{ m} \times 400 \text{ m}$  的有限范围, 顶面自由, 用  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的单元进行离散, 在其底面和两个侧面上设置黏弹性人工边界<sup>[12]</sup>。材料参数: 介质弹性模量为  $E = 13.28 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $\mu = 0.25$ , 质量密度为  $\rho = 2.7 \text{ t/m}^3$ 。计算可得此种材料的剪切波速约为  $c_p = 2\,425 \text{ m/s}$ , 压缩波速约为  $c_s = 1\,400 \text{ m/s}$ 。

考虑脉冲波从底部垂直输入, 入射波的位移方程为:

$$s(t) = \begin{cases} \sin(4\pi t) - 0.5\sin(8\pi t) & (t \leq 0.5 \text{ s}) \\ 0 & (t > 0.5 \text{ s}) \end{cases} \quad (7)$$

波形见图 2。

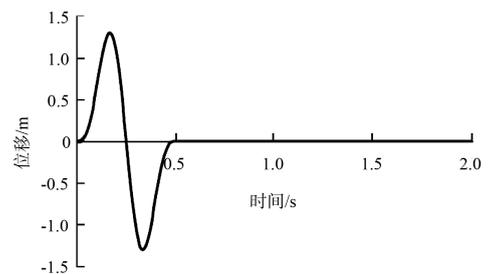


图 2 脉冲波位移曲线

经计算，得到模型底部和顶部特征点(图3)的水平方向位移响应时程曲线(图4)。地震波从底部及侧面各个结点以等效结点荷载形式输入，向上传播，底部最先出现动力响应；经过一段时间，表面上特征点出现地震动力响应，在顶面上的特征点位移响应明显增大，且顶部特征点地震波响应值为底部的2倍。反射的地震波从顶部传回底部，再次引起底部特征点震动，到达人工边界被吸收，整个系统恢复平静。本模型结果与文献[6]一致，表明本文黏弹性边界单元及波动输入程序是正确的，黏弹性人工边界有效。

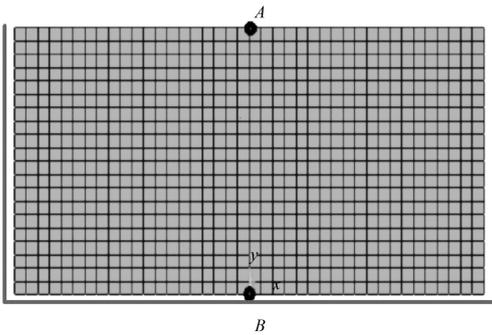


图3 模型及特征点位置

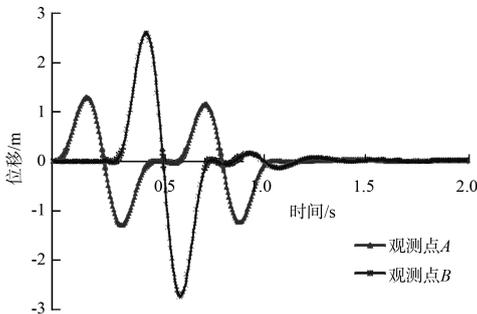


图4 特征点位移时程

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

位于江苏的某船闸，闸址区处于锅底山与峰山剥蚀低丘之间的鞍部，地势相对低洼，第四系较发育。闸址处的地质情况比较复杂，以黏土为主，为较差的土基。闸室结构采用钢筋混凝土坞式结构，是典型的土基闸室结构<sup>[13]</sup>。口门宽度23.0 m，底板厚2.5 m，闸墙顶高程25.5 m，底板顶高程13.0 m，闸室结构的总宽27.4 m。

根据江苏省地震局地震工程研究院提出的“船闸场地地震安全性评价工作研究报告”和“船

闸场地震动参数确定和地震地质灾害评价工作报告”，该船闸闸址区位于郟庐断裂带内，闸址区地震基本烈度为 VIII 度(强)。其上闸首 50 a 超越概率 10% 的地表水平峰值加速度为 0.306g，下闸首 50 a 超越概率 10% 的地表水平峰值加速度为 0.322g。本文对此工程进行地震动力数值分析，以加速度峰值 0.322g 进行计算。

#### 3.2 模型及参数设置

##### 1) 计算模型。

从均质二维半无限空间截取有限计算区域，用有限单元法进行离散，两个方向网格尺寸均取 1 m，离散后单元为四边形单元。混凝土结构采用线弹性本构模型，土体采用  $D-P$  非线性本构模型<sup>[14-15]</sup>。结构单元与地基单元均选用 PLANE42 单元，结构与土体的接触采用接触对单元：TARGE169 和 CONTA171 单元模拟土体与结构的相互接触作用，对于本文研究闸室与地基相互作用，假设结构与土体的接触为滑动不分离接触，在分析过程中根据接触变化调整接触间隙和接触刚度。黏弹性人工边界单元通过设置切向和法向的 COMBIN14 单元，即在每个结点设置两个 COMBIN14 单元，并联形成人工边界条件，相当于在计算区域外侧及底侧拓展一层单元<sup>[16]</sup>。地震动荷载以等效结点荷载的方式加载在分析区节点上。图 5 为坞式闸室结构二维计算模型及特征点。本文在进行固定边界和黏弹性人工边界的边界范围讨论时，计算宽度为 3 倍结构底宽，总宽 82.2 m；计算深度取值范围变化从 1 倍到 6 倍底宽。为了对固定边界与黏弹性人工边界的响应情况进行对比，建立不同边界条件下的数值模型，采用相同的加速度时程法进行动力加载，具体计算工况见表 1。

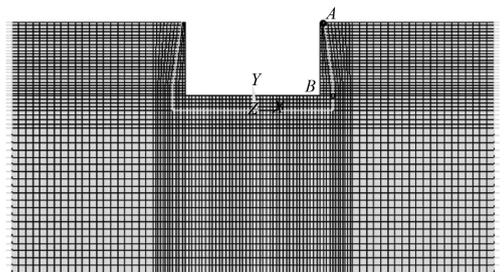


图5 闸室二维计算模型及特征点

表 1 地基截取范围工况

固定边界工况	地基深度范围	黏弹性边界工况	地基深度范围
G1	1B	N1	1B
G2	2B	N2	2B
G3	3B	N3	3B
G4	6B	N4	6B

2) 计算参数。

材料参数取值分别为: 坞式船闸结构, 弹性模量  $E = 30 \text{ GPa}$ , 密度  $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ , 泊松比  $\mu = 0.16$ ; 地基与回填土, 变形模量  $E = 300 \text{ MPa}$ , 密度  $\rho = 1.95 \text{ t/m}^3$ , 泊松比  $\mu = 0.36$ , S 波波速  $c_s = 238 \text{ m/s}$ , P 波波速  $c_p = 508 \text{ m/s}$ 。模型输入地震动加速度曲线采用“中国天津地震记录”, 从中截取 10 s 地震波, 参照水运工程抗震设计规范, 对于二类场地土, 加速度峰值  $0.322g$ 。计算时间步长取  $0.01 \text{ s}$ 。调整后的地震波输入加速度曲线见图 6。

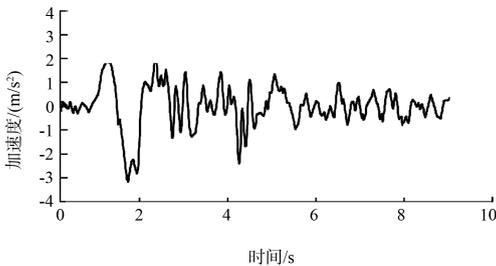


图 6 输入地震动加速度时程曲线

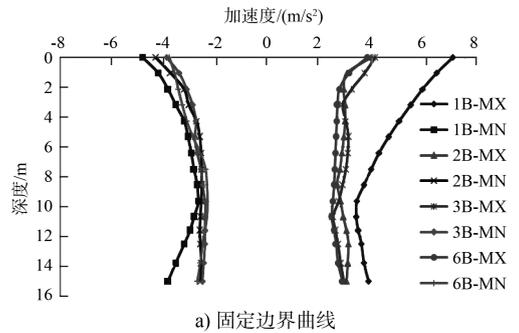
固定边界直接输入图 6 地震波加速度时程, 黏弹性人工边界采用等效荷载时程模拟图 6 地震波。由前文所述的验证模型可知, 底部的入射波会在自由表面放大约 1 倍, 因此在黏弹性人工边界下的实际输入地震波时程为图 6 的 1/2。

3.3 结果分析

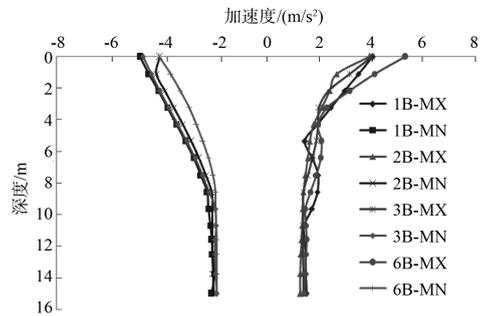
1) 结构加速度响应。

从结构响应加速度峰值曲线(图 7)可以看出, 对于不同的计算工况, 响应加速度峰值均发生在闸墙顶部, 闸墙加速度从底部到顶部呈放大的趋势; 固定边界条件下, 1 倍地基深度(G1 工况)的加速度峰值变异明显, 地基深度取值在 2 倍结构

底宽以上时, 加速度峰值变化接近; 黏弹性边界条件下, 加速度峰值曲线在地基范围取值变化情况下变化不大, 从 1 倍边界到 6 倍边界变化过程中, 峰值加速度分布情况接近。从特征点的加速度时程结果(图 8)可以看出, 在波动输入初期, 黏弹性边界响应与固定边界相似, 震动达到稳定后, 固定边界下的加速度响应强于黏弹性边界下的加速度响应; 对比特征点 A、B 的加速度响应曲线, 在地震动力作用下, 闸墙顶部特征点 A 的加速度时程值明显大于特征点 B 的加速度时程值, 闸室的响应加速度最大值在闸墙顶端附近最大, 闸墙底部相对较小; 两种人工边界条件下, 加速度放大系数约为 2.5~3.0。

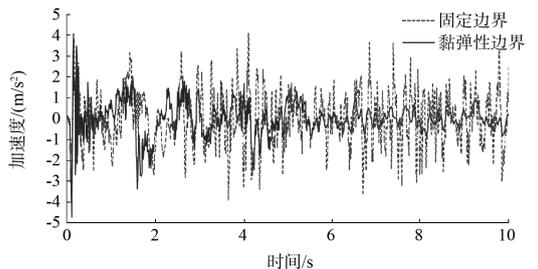


a) 固定边界曲线



b) 黏弹性人工边界曲线

图 7 结构响应加速度峰值



a) 特征点A

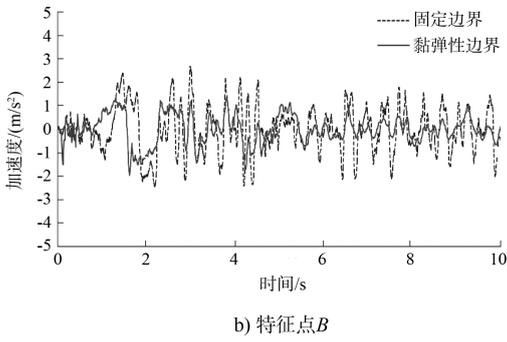


图8 地基范围3倍底宽的加速度响应时程对比

2) 结构应力响应。

结构应力见图9~11。

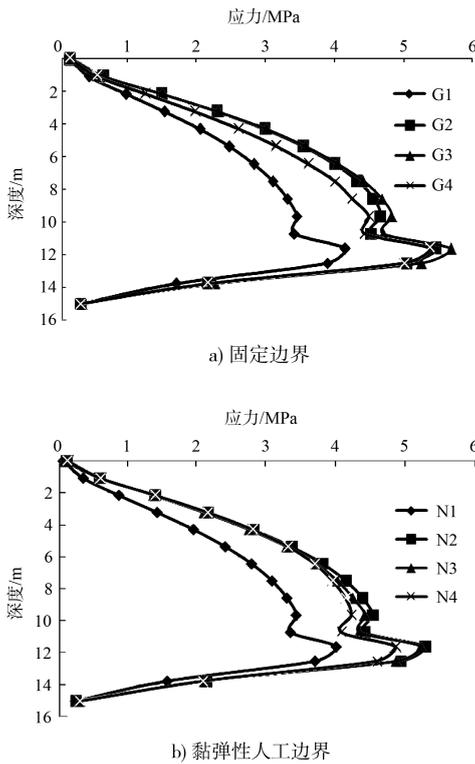


图9 结构响应应力峰值

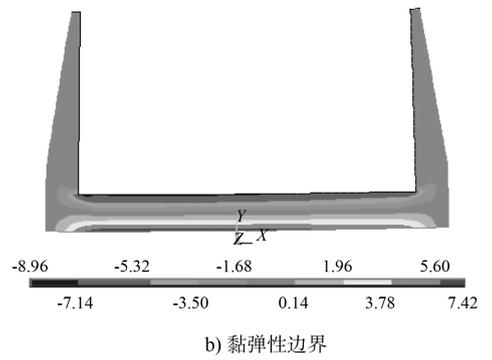
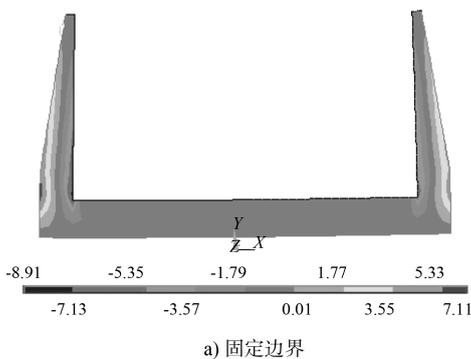


图10 固定边界与黏弹性边界Y方向应力云图 (单位: MPa)

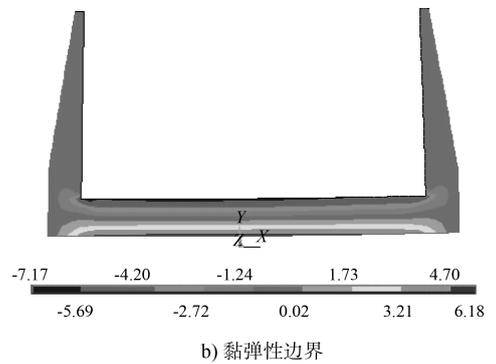
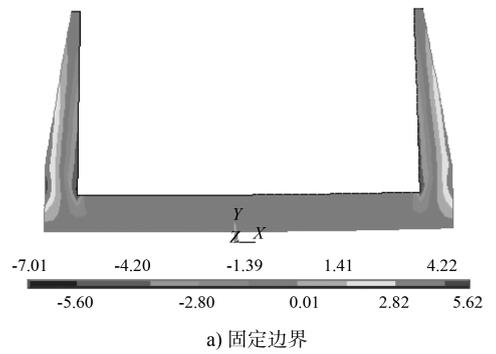


图11 固定边界与黏弹性边界X方向应力云图 (单位: MPa)

在水平向的地震动力作用下，右闸墙外侧的拉应力峰值见图9。固定边界及黏弹性边界条件下的地基范围取1倍底宽，结构的响应应力与较大的地基范围存在明显差异。从闸室结构出现最大应力时刻的响应应力云图(图10、11)可以看出，在水平地震荷载作用下，闸墙呈现外侧受拉、内侧受压的受力状态，闸室底板呈现底板上侧受压、下侧受拉的情况；黏弹性边界下，闸墙应力响应最大值约为5620 kPa，位于闸墙与底板的交界附

近, 闸室底板响应最大值约为 6 180 kPa; 固定边界下, 闸墙应力响应最大值约为 7 110 kPa, 位于闸墙与底板的交界附近, 闸室底板响应最大值为 7 420 kPa; 固定边界应力响应值大于黏弹性人工边界条件下的响应值。

#### 4 结论

1) 通过对比固定边界与黏弹性人工边界坞式结构的动力响应发现, 固定边界实现简单, 但是稳定性差, 地震波在固定边界上的反射放大了地震作用; 黏弹性人工边界利用阻尼单元吸收了地震波的反射, 并利用弹簧单元模拟介质的弹性恢复能力, 体现出良好的低频和高频响应的稳定性。与固定边界相比, 黏弹性人工边界有更高的可靠性。

2) 针对土基上的坞式船闸结构, 建立多种工况下的地震动力数值模型, 计算结果表明: 地基深度范围取值在 2~3 倍以上结构底宽时, 结构响应值已趋于稳定。因此, 建议地基深度范围取值 2~3 倍结构底宽, 计算条件允许情况下可截取更大的计算范围。

3) 在地震动力作用下, 沿闸墙高度, 闸墙顶部的动力加速度响应最为明显; 应力响应在闸墙底部最大; 闸室底板下部受拉, 最大拉应力值大于闸墙的最大应力。考虑抗震设计, 应在闸墙底部及底板下部做好防护措施。

#### 参考文献:

[1] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. J engng mech div: ASCE, 1969, 95: 759-877.

[2] Livermore Software Technology Corporation. LS. DY-NA Theoretical Manual [R]. USA: Livermore Software

Technology Corporation, 1998.

- [3] 国家地震局. GB 50267—1997 核电站抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [4] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 黏弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27: 37-42.
- [5] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of engineering journal, 1998, 31(3): 55-64.
- [6] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [7] 苑举卫, 杜成斌, 陈灯红. 基于 ABAQUS 的三维黏弹性边界单元及地震动输入方法研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(3): 9-14.
- [8] 刘晶波, 李彬. 三维黏弹性静-动力统一人工边界[J]. 中国科学: E 辑, 2005, 35(9): 966-980.
- [9] 柳锦春, 还毅. 人工边界及地震动输入在有限元软件中的实现[J]. 地下空间与工程学报, 2011(7): 1 774-1 779.
- [10] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- [11] 杜修力, 赵密. 基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1 063-1 069.
- [12] 陈灯红, 杜成斌, 苑举卫. 基于 ABAQUS 的黏弹性边界单元在重力坝抗震分析中的应用[J]. 世界地震工程, 2010, 26(3): 127-132.
- [13] 陶桂兰. 土基上船闸坞式结构与周围介质的动力相互作用研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [14] 徐明磊. 双铰底板式船闸闸室结构与土体的动力相互作用[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 张丽. 考虑黏弹性边界坞式结构的动力响应研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [16] 赵建锋, 杜修力, 韩强, 等. 外源波动问题数值模拟的一种实现方式[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 52-58.

( 本文编辑 武亚庆 )