

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.002

# 考虑粘弹性人工边界的高耸进水塔结构 地震动态响应分析

刘云贺, 郑晓东, 张小刚

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 边界条件的选取对结构的计算设计有着显著的影响。本文通过 ANSYS 有限元方法建立了三维进水塔模型,接着分别采用无质量固定边界和粘弹性人工边界模拟了高耸进水塔结构在地震作用下的位移、应力和接触的分布规律,最后对进水塔抗震安全性进行了计算分析。结果表明:与无质量固定边界相比,在粘弹性人工边界条件下,塔体顶部峰值位移减小了 10%~30%,塔体峰值应力减小了 15%~30%,塔体  $x$  正向最大张开值和  $y$  正向最大张开值均有所减小,塔体稳定安全系数时程最小值增大了 20%。研究结果表明粘弹性人工边界在实际工程设计中具有一定的精确性和适用性。

**关键词:** 高耸进水塔; 粘弹性人工边界; 动态响应分析; 接触分析

**中图分类号:** TV312

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2016)02-0134-08

## Considering the analysis of high intake tower seismic dynamic response at the viscoelastic artificial boundary

LIU Yunhe, ZHENG Xiaodong, ZHANG Xiaogang

(School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The selection of boundary conditions has a significant impact on the design of the structure. In this paper, three-dimensional finite element models are established by ANSYS. This paper uses the massless fixed boundary and viscoelastic artificial boundary to simulate high intake tower structure of distribution of displacement, stress and contact in the earthquake state. Finally, the seismic safety of the intake tower is calculated and analyzed. Compared with the massless fixed boundary, in the viscoelastic artificial boundary the tower top peak displacement is reduced by 10% to 30%, the tower peak stress is reduced by 15% to 30%, the tower  $x$  positive direction and  $y$  positive direction of the largest open values are reduced, and the minimum value of tower body stability safety coefficient is increased by 20%. Results show that the viscoelastic artificial boundary has certain precision and applicability in practical engineering design.

**Key words:** high intake tower; the viscoelastic artificial boundary; dynamic response analysis; contact analysis

进水塔是引水和泄水系统最前端的水工建筑物,是水利枢纽工程宣泄洪水的安全通道。它的整体抗震稳定性关系到整个引水、泄水系统甚至大坝的安危<sup>[1]</sup>,因此,进水塔的整体稳定性和抗震性能成为结构设计重点。在地震激励作用下,进水塔-地基是一个受力整体,两者之间的运动和变形相互影响,其中边界条件的选取对进水塔-地基结构的设计影响比较大。

目前,国内外在对进水塔地震动力响应及抗震安全性的研究方面取得了一定的成果,赵海涛<sup>[2]</sup>等采用振型分解反应谱法研究了进水塔的地震动力响应,刘亚琴<sup>[3]</sup>等采用动力时程法对沙牌水电站进水塔进行了震损模拟,李宁<sup>[4]</sup>等采用时程分析和反应谱法对紫平铺进水塔进行了动态响应研究。上述研究成果大多是以无质量固定边界为基础的,在研究过程中忽略了地基辐射阻尼效应,这会使得地震波在

收稿日期: 2015-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154/E090801)

作者简介: 刘云贺,男,教授,博导,博士,研究方向为水工结构抗震。E-mail: liyunhe1968@163.com

边界断面上发生反射,影响结构-地基相互作用的应力场和位移场,从而最终影响结构-地基模拟结果的准确性和真实性。

廖振鹏等<sup>[4]</sup>研究表明,解决边界断面上地震动反射问题的有效办法是采用人工边界条件。国内很多学者对人工边界进行了数值研究,并得出以下结论,结构的尺寸越大,跨度越大,地基辐射阻尼的动力反应影响也就越显著,例如考虑地基辐射阻尼以后,五嘎冲拱坝<sup>[5]</sup>动应力结果相应降低了 25%~52%,大朝山重力坝<sup>[6]</sup>主应力结果最大降幅可达 50%,双江口土石坝<sup>[7]</sup>加速度降低了 15%~30%。喻虎圻等<sup>[8]</sup>对河床式厂房的研究表明,厂房的地震动响应最大降幅可达 64.36%,张青等<sup>[9]</sup>对长河坝进水塔的分析表明,应力结果降低了 15%~20%。

本文通过 ANSYS 有限元软件建立了三维有限元模型,分别采用无质量固定边界和粘弹性人工边界模拟了高耸进水塔结构在地震状态下的位移、应力和接触的分布规律,并将两种边界下的计算结果进行了比较。研究结果可为进水塔动力分析中边界条件的选取提供参考。

## 1 粘弹性人工边界模型

1994年,Deeks 和 Randolph 提出了粘弹性人工边界。粘弹性人工边界条件作为一种应力边界条件,其应力是边界节点速度和位移的函数,表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_{lx}(t) = -K_{lx}u_{lx}(t) - C_{lx}\dot{u}_{lx}(t) \\ \sigma_{ly}(t) = -K_{ly}u_{ly}(t) - C_{ly}\dot{u}_{ly}(t) \\ \sigma_{lz}(t) = -K_{lz}u_{lz}(t) - C_{lz}\dot{u}_{lz}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $l$  为人工边界节点编号,取  $1, 2, \dots, n$ ;  $\sigma_{lx}(t)$ 、 $\sigma_{ly}(t)$ 、 $\sigma_{lz}(t)$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上人工边界节点  $l$  处的应力;  $u_{lx}(t)$ 、 $u_{ly}(t)$ 、 $u_{lz}(t)$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上人工边界节点  $l$  处的位移;  $\dot{u}_{lx}(t)$ 、 $\dot{u}_{ly}(t)$ 、 $\dot{u}_{lz}(t)$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上人工边界节点  $l$  处的速度;  $t$  表示某一个时刻;  $K_{lx}$ 、 $K_{ly}$ 、 $K_{lz}$  分别表示在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上人工边界节点  $l$  处的弹性系数;  $C_{lx}$ 、 $C_{ly}$ 、 $C_{lz}$  分别表示在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上人工边界节点  $l$  处的阻尼系数。

对于三维有限元模型<sup>[7,10]</sup>,如图 1 所示,粘弹性人工边界节点  $l$  的法向弹性系数和阻尼系数以及切向弹性系数和阻尼系数分别为:

$$\begin{aligned} K_{IN} &= \alpha_N \frac{2G}{r}, C_{IN} = \alpha_p \\ K_{IT} &= \alpha_T \frac{G}{r}, C_{IT} = \alpha_s \end{aligned}$$

其中,  $K_{IN}$  为切向弹性系数;  $C_{IN}$  为切向阻尼系数;  $K_{IT}$  为法向弹性系数;  $C_{IT}$  法向阻尼系数;  $\rho$  为介质密度;  $G$  为介质剪切模量;  $r$  为人工边界节点到散射源的长度;  $c_s = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$  为介质横波波速;  $c_p = \left(\frac{\lambda + 2G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$  为介质纵波波速;  $\lambda$  为介质 Lamé 常数;  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  分别为粘弹性人工边界法向和切向参数。

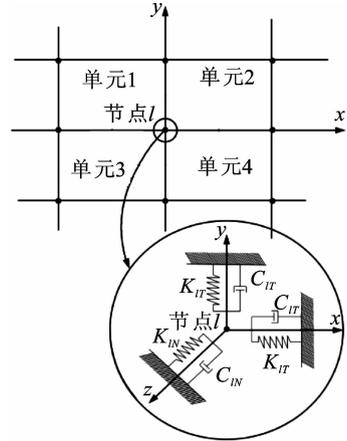


图 1 三维有限元模型弹簧阻尼单元示意图

Fig. 1 Sketch map of spring damping unit of three dimensional finite element models

因为粘弹性人工边界具有较好的鲁棒性,人工边界参数  $\alpha_N$ 、 $\alpha_T$  在一定范围内取值,阻尼系数均可以得到较好的计算结果。刘晶波等<sup>[10]</sup>给出了二维和三维问题中  $\alpha_N$  和  $\alpha_T$  的取值范围及推荐值,对于三维问题,  $\alpha_N$  取值为  $4/3$ ,  $\alpha_T$  取值为  $2/3$ 。

图 2 为进水塔粘弹性人工边界地震动输入模型。

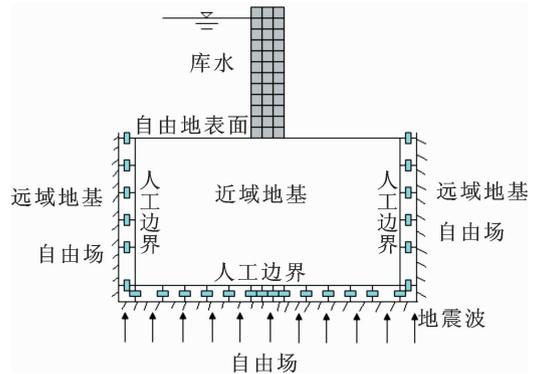


图 2 进水塔粘弹性人工边界地震动输入模型

Fig. 2 Intake tower viscoelastic artificial boundary seismic input model

本文通过在人工边界节点上施加等效荷载的方式来实现地震动的输入,即将地震波动的位移和速度时程转换为等效节点荷载施加于人工边界上,完成地震动的输入。地基的波场包括已知的人射自由

场和由基础上附加结构反射形成的散射场。在截断边界处,附加结构反射形成的散射场已被人工边界吸收掉,因此在人工边界处仅考虑自由场输入<sup>[8]</sup>。

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

以某水电站的塔式进水塔为原型进行建模,进水塔塔顶高程为 2 721.00 m,进水口底板高程为 2 640.0 m,底板厚 5.0 m,地基深度取 1 倍塔体高度,上下游地基长度均取 67.5 m,左右侧地基长度均取 50 m。进水塔塔体-地基模型如图 3 所示。

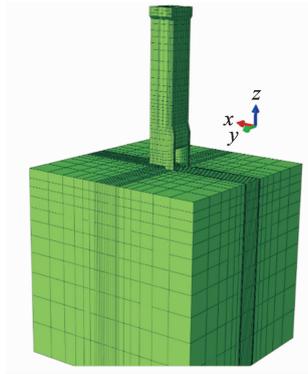


图 3 塔体-地基有限元模型

Fig. 3 The tower body-foundation finite element model

本文以 ANSYS 有限元软件为基础建立了进水塔-地基有限元模型,接着利用非线性动力时程法对该有限元模型进行了研究分析。进水塔塔体和地基均采用 solid45 实体单元,单元类型为线性六面体、沙漏控制、缩减积分,网格划分后单元个数为 18 080,结点个数为 22 176。附加质量采用 mass21 质量单元。计算坐标系采用笛卡尔坐标系,坐标原点选在进水塔底板上边前沿中点处, $x$  轴正方向为顺水流方向, $y$  轴正方向垂直于水流方向, $z$  轴正方

向垂直向上指向塔顶。求解结构自身的动力特性是结构地震动力分析的第一步,通过模态分析可以得到结构各阶的自振周期和自振频率<sup>[11]</sup>。通过有限元软件分析可知,该进水塔前四阶的自振频率分别为:1.762 6 Hz、1.854 9 Hz、7.160 6 Hz、8.465 1 Hz,进水塔前四阶振型如图 4 所示。

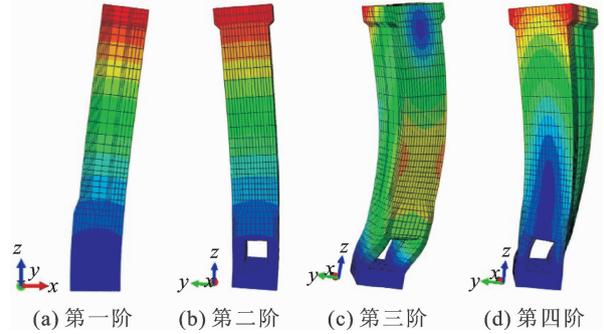


图 4 进水塔前四阶振型图

Fig. 4 Intake tower four vibration modes

参考《水工建筑物荷载设计规范》和《水工混凝土结构设计规范》<sup>[12-13]</sup>,选用的混凝土力学参数如表 1 所示。泄洪洞进水塔塔座(2663.00 高程以下)混凝土强度等级为 C30;塔筒(2663.00 高程以上)混凝土强度等级为 C25。混凝土的本构模型按《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》中的混凝土本构关系进行计算,岩体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 塑性模型。塔基岩体力学参数如表 2 所示。

表 1 混凝土力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of concrete

混凝土强度等级	静态轴心抗压强度 / (MPa)	动态轴心抗压强度 / (MPa)	动态轴心抗拉强度 / (MPa)	静态弹性模量 / (MPa)	泊松比
C25	22.4	29.1	2.91	$2.80 \times 10^4$	0.167
C30	26.2	34.1	3.41	$3.00 \times 10^4$	0.167

表 2 塔基岩体力学参数

Tab. 2 Tower foundation rock mechanical parameters

岩性	岩体类别	风化程度	干密度 $g/cm^3$	抗压强度 / MPa		模量 / GPa		摩擦系数	粘着力 / MPa
				干	饱和	弹模	变模		
中厚层砂岩	Ⅲ1	微风化	2.70	60~80	40~60	10~12	8~10	0.9~1.0	0.7~0.8

由本工程相关资料和《水工建筑物抗震设计规范(SL203-97)》可知,该进水塔为 1 级水工建筑物,工程抗震设防类别为甲类,工程场地类别为 I 类,地震设防烈度为 8 度,基本烈度为 7 度。

本文取基准期 100 年超越概率为 2% 的地震动参数作为设计地震,相应的水平地震动峰值加速度

为  $0.304m/s^2$ ,特征周期  $T_g = 0.2s$ ;设计反应谱最大值  $\beta_{max} = 6.71$ 。根据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》的规定可知,三个方向输入的地震波峰值比为  $x:y:z = 1:0.85:0.65$ 。拟合出三条地震人工波,总时长 30 s,时间步长为 0.01 s,如图 5 所示。

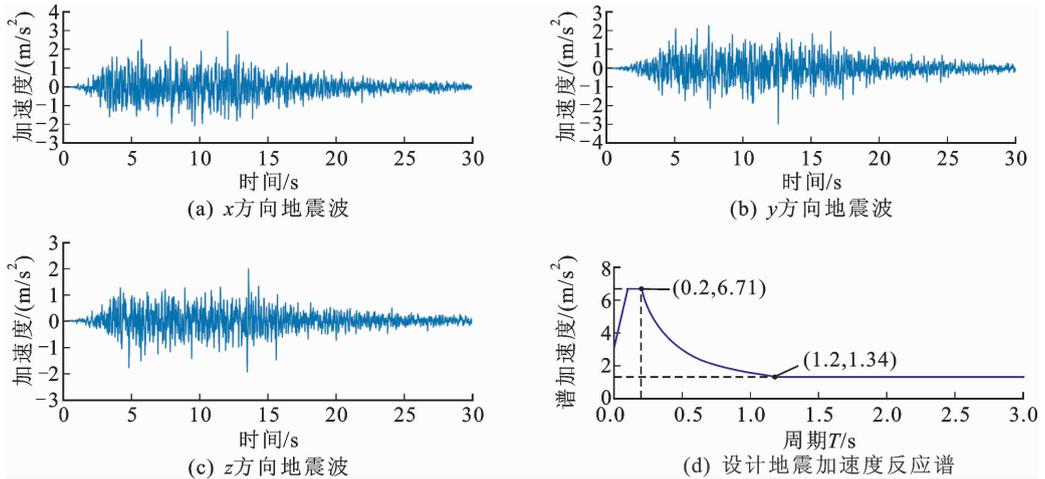


图5 设计人工地震波

Fig.5 Design of artificial seismic waves

2.2 动态位移分析

以塔顶中部关键点1为代表,其结点单元编号为6788,如图6所示。同时输入3个方向的地震动,即顺水流x方向地震波、垂直水流y方向地震波、竖向z方向地震波,设计人工地震动见图5,得到关键点1在三个方向的最大位移和出现时间,如表3所示。

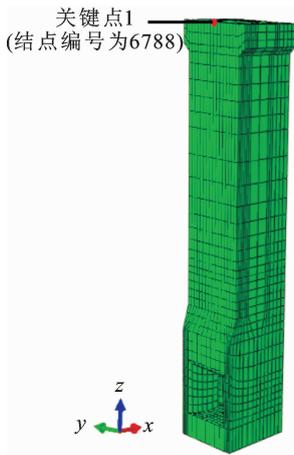


图6 塔体顶点示意图

Fig.6 The top of tower schematic diagram

表3 塔体关键点1的相对位移极值及出现时间

Tab.3 The key point 1 of the tower and the emergence time of relative extreme displacement

计算工况及降幅	顺水流方向		垂直水流方向		竖向	
	位移极值/cm	出现时间/s	位移极值/cm	出现时间/s	位移极值/cm	出现时间/s
无质量固定边界	10.60	12.94	7.32	7.34	1.12	12.93
粘弹性人工边界	7.12	12.91	6.57	7.36	0.95	12.72
位移极值降幅/%	32.83		10.25		15.18	

由表3可以得出:与无质量固定边界相比,在粘弹性人工边界条件下,塔体顶部峰值位移减小了10%~30%。这是由于地基为弹性体所致。地基的地震动反应会影响塔体的动力反应,无质量地基均匀输入情况下地基位移反应较小,而在考虑辐射阻尼效应的粘弹性人工边界条件下,有质量地基产生较大变形和沉降,位移变化较大。因此,地震动能量向远域地基逸散的辐射阻尼效应对塔体的动力反应有重要影响,在进行结构动力反应分析时,考虑地基辐射阻尼效应是十分必要的。

2.3 动态应力分析

在无质量固定边界和粘弹性人工边界条件下,塔体应力分布最不利时刻均为12.80s,其第一主应力 $\sigma_1$ 和第三主应力 $\sigma_3$ 分布如图7和图8所示,图中单位为Pa。

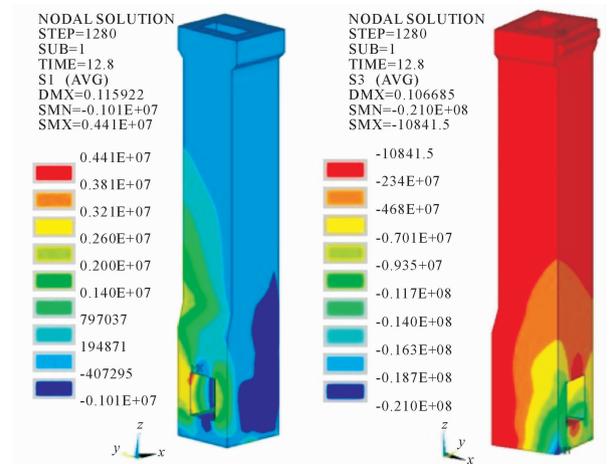


图7 无质量固定边界条件下塔体主应力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 云图

Fig.7 The tower principal stresses  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  contour in the condition of massless foundation

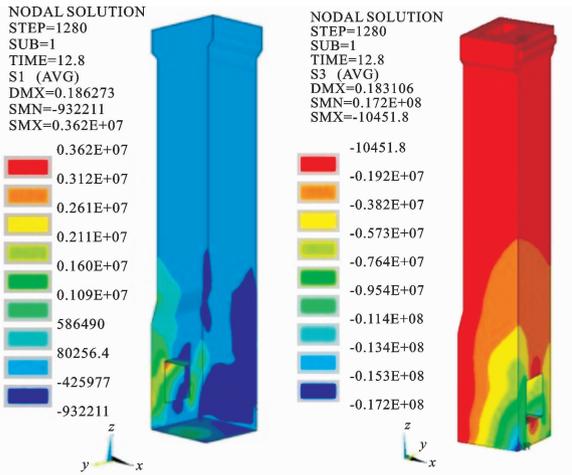


图 8 粘弹性人工边界条件下塔体主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  云图

Fig. 8 The tower principal stresses  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  contour in the condition of viscoelastic artificial boundaries

由图 7 和图 8 可知,在这两种边界条件下,塔体第一主应力极值点均未出现在塔体与地基接触面角缘处,而是在进水口应力集中部位,第三主应力极值点均出现在塔体与地基接触面角缘处。

表 4 为塔体应力极值比较。由表 4 可以看出,在遭遇基准期为 100 年超越概率为 2% 的罕遇地震作用时,两种边界条件下,第一主应力极大值均超出混凝土动态轴心抗拉强度标准值;第三主应力极小值均未超出混凝土动态轴心抗压强度标准值。与无质量固定边界条件相比,在粘弹性边界条件下,塔体应力极值减小了 15%~20%。

表 4 塔体应力极值比较

Tab. 4 Comparison of extreme stresses at the tower

计算工况及降幅	第一主应力极大值/MPa	第三主应力极小值/MPa
无质量固定边界	4.41	-21.0
粘弹性人工边界	3.62	-17.2
应力极值降幅/%	17.91	18.10

### 2.4 接触分析

塔体与地基采用面-面接触分析,地基目标面用 Targe170 单元来模拟,塔体接触面用 Conta173 单元来模拟,因为塔体与地基之间没有滑动,即采用理想粗糙接触,塔体与地基交界面的各关键点如图 9 所示。

在无质量固定边界条件下, $x$  正向位移最大时刻(12.92s)和  $y$  正向位移最大时刻(7.32s)接触面的接触状态和张开云图如图 10 和图 11 所示,图 11 中的单位为 m。

在粘弹性人工边界条件下, $x$  正向位移最大时刻(12.81s)和  $y$  正向位移最大时刻(7.33s)接触面的接触状态和张开云图如图 12 和图 13 所示,图 13 中的单位为 m。

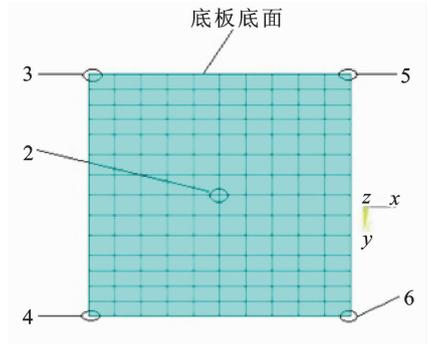


图 9 塔体和地基交界面各关键点

Fig. 9 The tower and foundation interface each key points

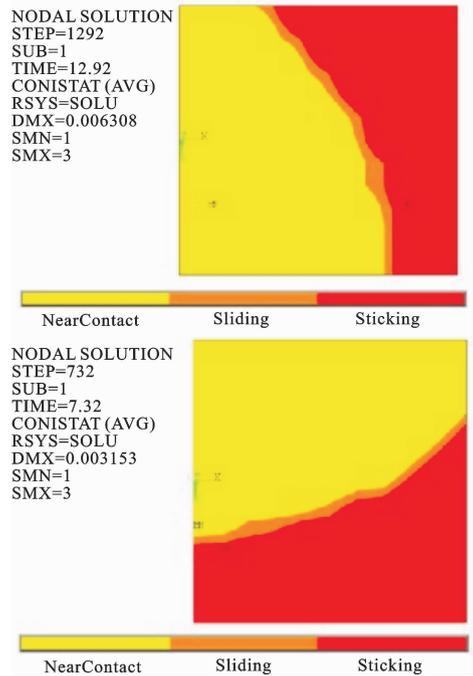


图 10 无质量固定边界条件下塔基接触面在 12.92s 和 7.32s 时刻的接触状态

Fig. 10 Tower-foundation interface contact status at 12.92s and 7.32s in the condition of massless fixed boundary

由图 10 和图 11 可以看出,无质量固定边界条件下,在  $x$  正向位移最大时刻(即 12.92 s),塔体与地基间薄弱面的上游侧部分被拉裂,下游侧部分处于粘结状态,在关键点 4 附近接触面张开值最大,为 0.622 cm;在  $y$  正向位移最大时刻(即 7.32 s),塔体与地基间薄弱面的左侧部分被拉裂,右侧部分处于粘结状态,靠近关键点 3 处接触面张开值最大,为 0.329 cm。

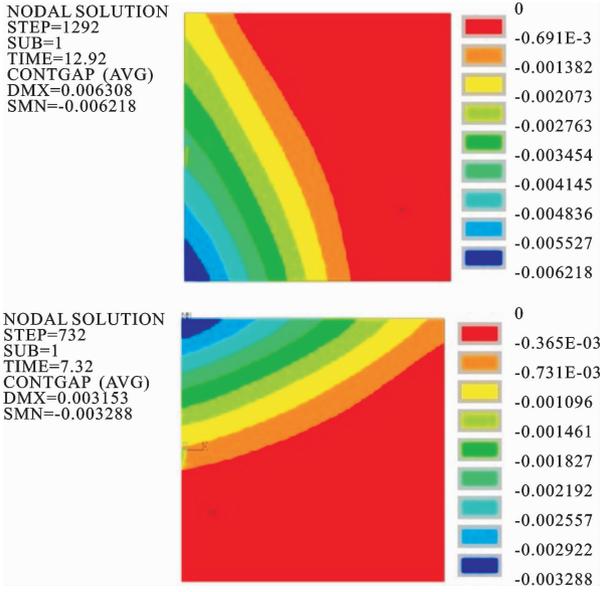


图 11 无质量固定边界条件下塔基接触面在 12.92s 和 7.32s 时刻的张开值

Fig. 11 Tower-foundation interface open at 12.92s and 7.32s in the condition of massless fixed boundary

与地基间薄弱面的左侧部分被拉裂,右侧部分处于粘结状态,靠近关键点 3 处接触面张开值最大,为 0.136 cm。

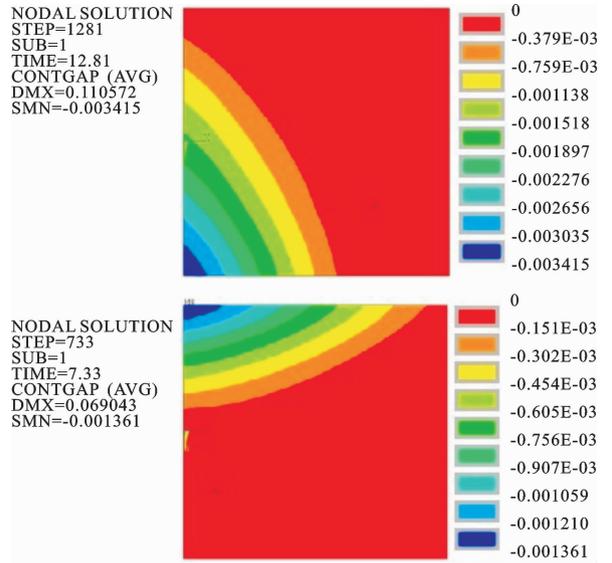


图 13 粘弹性人工边界下塔基接触面在 12.81s 和 7.33s 时刻的张开值

Fig. 13 Tower-foundation interface open values at 12.81s and 7.33s in the condition of viscoelastic artificial boundaries

综上所述,无质量固定边界模型考虑了并不存在的反射地震动,与粘弹性人工边界模型相比,塔体  $x$  正向最大张开值和  $y$  正向最大张开值均有所增大,这会引起工程造价估算值偏大,而粘弹性人工边界则更加合理地反应了地震动的作用机理,能更有效的模拟地震动的远域能量消散。

### 3 进水塔整体稳定性评价

#### 3.1 进水塔抗滑稳定分析

根据《水电站进水口设计规范》,进水塔抗滑稳定安全系数用抗剪断强度计算公式计算:

$$K_C = \frac{f \cdot N + c \cdot A}{Q} \quad (2)$$

$$N = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \sigma_z^j}{H^j} \quad (3)$$

$$Q_x = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \tau_{zx}^j}{H^j}, Q_y = \frac{\sum_{j=1}^m V_j \tau_{zy}^j}{H^j} \quad (4)$$

式中,  $K_C$  表示抗滑稳定系数,  $f$  为建基面的抗剪断摩擦系数,  $c$  为建基面的粘聚力,  $A$  表示建基面的面积,  $Q$  表示建基面上的全部切向作用力之和,  $N$  为基础面上全部法向作用力之和,  $m$  为单元数,  $\sigma_z^j$  为单元的正应力,  $V^j$  为单元的体积,  $H^j$  为单元沿  $z$  方

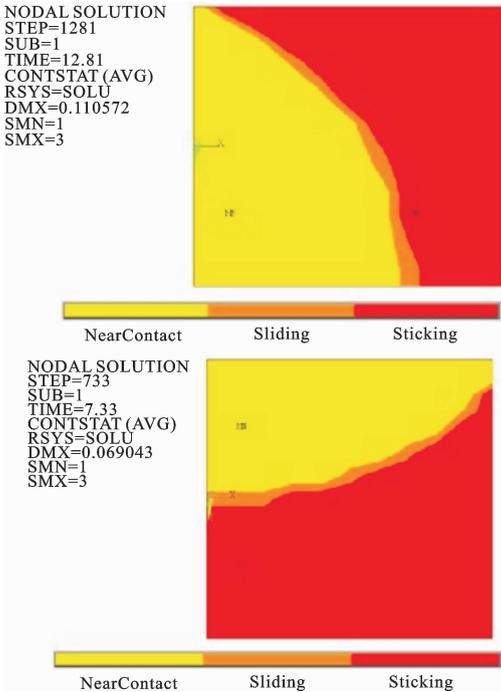


图 12 粘弹性人工边界条件下塔基接触面在 12.81s 和 7.33s 时刻的接触状态

Fig. 12 Tower-foundation interface contact status at 12.81s and 7.33s in the condition of viscoelastic artificial boundaries

由图 12 和图 13 可以看出,粘弹性人工边界条件下,在  $x$  正向位移最大时刻(即 12.81 s),塔体与地基间薄弱面的上游侧部分被拉裂,下游侧部分处于粘结状态,靠近关键点 4 处接触面张开值最大,为 0.342 cm;在  $y$  正向位移最大时刻(即 7.33 s),塔体

向的尺寸,  $\tau_{xz}^i$ 、 $\tau_{zy}^i$  为单元的剪应力,  $Q_x$ 、 $Q_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上全部切向作用力之和。

将式(3)和(4)代入式(2)计算得到进水塔抗滑稳定安全系数如表5所示。

表5 塔体抗滑稳定安全系数极值比较  
Tab.5 Comparison of the tower stability safety coefficient extrema

计算情况及升幅	$x$ 方向极小值	$y$ 方向极小值
无质量固定边界	6.50	4.50
粘弹性人工边界	6.87	5.51
安全系数极值升幅/%	5.69	22.44

由表5可以看出,两种边界下,塔体抗滑稳定安全系数时程最小值全部大于1,说明进水塔在整个地震过程中没有滑动的可能,整体抗滑稳定性满足规范要求,且富裕度较大。与无质量固定边界条件相比,粘弹性人工边界条件下,塔体抗滑稳定安全系数时程最小值增大了5%~20%,这与分析的塔体位移和应力反应规律相一致。

### 3.2 进水塔抗倾覆稳定分析

根据《水电站进水口设计规范》,进水塔抗倾覆稳定安全系数为:

$$K_s = \frac{M_0}{M} \quad (5)$$

$$M_0 = \sum_{j=1}^m \frac{V^j \sigma_z^j z^j}{H^j} \quad (6)$$

$$M_x = \sum_{j=1}^m \frac{V^j \tau_{xz}^j z^j}{H^j}, M_y = \sum_{j=1}^m \frac{V^j \tau_{zy}^j z^j}{H^j} \quad (7)$$

式中,  $K_s$  表示抗倾覆安全系数,  $M_0$  为基础计算面上全部倾覆力矩之和,  $M$  表示基础计算面上全部抗倾覆力矩之和;  $z^j$  为单元中心  $z$  坐标,  $M_x$ 、 $M_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的全部抗倾覆力矩之和。

当  $K_s > 1.0$  时,塔体没有倾倒的趋势,至少在这一时刻是稳定的。

当  $K_s < 1.0$  时,塔体有了倾倒的趋势,此时塔体是不稳定的。

将式(6)和(7)代入式(5),计算得到进水塔抗倾覆稳定安全系数如表6所示。

表6 塔体抗倾覆稳定安全系数极值比较  
Tab.6 Comparison of the tower stability safety coefficient extrema

计算工况及升幅	$x$ 方向极小值	$y$ 方向极小值
无质量固定边界	12.82	6.60
粘弹性人工边界	15.47	7.85
安全系数极值升幅/%	20.67	18.95

由表6可以看出,两种边界条件下塔体抗倾覆稳定安全系数时程最小值全部大于1,说明进水塔在整个地震过程中没有倾覆的趋势,整体抗倾覆稳定性满足规范要求,且富裕度较大。与无质量固定边界条件相比,粘弹性人工边界条件下,塔体抗倾覆稳定安全系数时程最小值增大了20%,这与分析的塔体位移和应力反应规律相一致。

## 4 结论

本文通过 ANSYS 有限元软件建立了三维进水塔模型,并分别采用无质量固定边界和粘弹性人工边界,模拟了地震动作用下进水塔结构位移、应力和接触的分布规律。通过分析可以得到如下结论:

1) 无质量固定边界均匀输入方法的计算结果是偏保守的;而粘弹性人工边界则更真实地反应了地震动的作用机理,能更合理的模拟地震动的远域能量消散,因此,在进行塔体结构动力反应分析时,考虑地基辐射阻尼效应是十分必要的。

2) 在遭遇基准期为100年超越概率为2%的罕遇地震作用时,进水塔在两种边界条件下的抗滑和抗倾覆稳定性均满足规范要求且富裕度较大。与无质量固定边界条件相比,粘弹性人工边界条件下,塔体稳定安全系数时程最小值增大了20%,与塔体位移和应力反应规律相一致。

### 参考文献:

- [1] 李宁,李骞,任堂,等.汶川地震紫坪铺进水塔的动态响应研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1127-1134.  
LI Ning, LI Qian, REN Tang, et al. Dynamic response analysis of Zipingpu intake tower under Wenchuan earthquake action[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1127-1134.
- [2] 赵海涛,罗勇军,王潘绣,等.高耸钢筋混凝土进水塔结构抗震稳定性分析与安全评估[J].水利与建筑工程学报,2012,10(6):106-109.  
ZHAO Haitao, LUO Yongjun, WANG Panxiu, et al. Seismic stability analysis and safety assessment for reinforced concrete intake tower structure [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(6):106-109.
- [3] 刘亚琴,赵兰浩,钱文江.沙牌水电站进水塔震损模拟分析[J].水利水电技术,2015,46(1):30-33.  
LIU Yaqin, ZHAO Lanhao, Qian Wenjiang. Simulation analysis on seismic damage of intake tower of Shapai Hydropower Station[J]. Water Resources and Hy-

- dropower Engineering, 2015, 46(1):30-33.
- [4] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [5] 陈平,何蕴龙,陈海霞. 地基边界对五嘎冲拱坝地震动力响应的影晌[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5):554-559.  
CHEN Ping, HE Yunlong, CHEN Haixia. Effect of foundation boundary on earthquake dynamic response of Wugachong arch dam[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(5):554-559.
- [6] 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.  
HE Jiantao, MA Huaifa, ZHANG Boyan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8):960-969.
- [7] 李宏恩,李同春,田景元,等. 黏-弹性人工边界在双江口土石坝动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(增1):189-192.  
LI Hongen, LI Tongchun, TIAN Jingyuan, et al. Application of viscoelastic artificial boundary to dynamic response analysis of Shuangjiangkou rock-fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1):189-192.
- [8] 喻虎圻,何蕴龙,曹学兴,等. 基于粘弹性边界的河床式厂房地震动动力响应分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(1): 27-33.  
YU Huqi, HE Yunlong, CAO Xuexing, et al. Seismic analysis of powerhouse in river channel based on viscoelastic boundary[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(1): 27-33.
- [9] 张青,徐元杰,夏明镓,等. 长河坝进水口粘弹性人工边界有限元分析[J]. 中国水运, 2015, 15(3): 180-183.  
ZHANG Qing, XU Yuanjie, XIA Mingtan, et al. The intake of Changhe dam viscoelastic artificial boundary finite element analysis[J]. China Water Transport, 2015, 15(3): 180-183.
- [10] 刘晶波,杜义欣,闫秋实. 粘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(增1):37-42.  
LIU Jingbo, DU Yixin, YAN Qiushi. Viscoelastic artificial boundary and seismic input in the general finite element software realization[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(S1):37-42.
- [11] 陶磊,张俊发. 远场大震对深厚覆盖土层地基上超高层建筑的影响分析[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(1):79-84.  
TAO Lei, ZHANG Junfa. Influence and analysis of suoer-rise building on soil layer with deep deposit subjected to strong far-field ground motion[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(1): 79-84.
- [12] 中华人民共和国电力工业部. 水工建筑物荷载设计规范(DL/5077-1997)[S]. 北京:中国电力出版社, 1997.
- [13] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范(SL/191-2008)[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

(责任编辑 周 蓓)