

某核电站导流堤地震响应及参数敏感性分析

刘博清, 赵杰, 王桂萱

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 地震作用下核电取水导流堤的稳定性对核电安全用水起到至关重要作用。采用等效线性方法对某核电厂导流堤工程典型断面开展有限元动力时程分析, 分别得到 SL1、SL2 地震动作用下导流堤的加速度响应、液化区分布、安全系数。在此基础上考虑到岩土体参数的离散性和随机性, 分析了岩土体动剪切模量变化对导流堤的动力稳定性影响。结果得出了动剪切模量的变化与加速度响应、液化区分布、安全系数之间的规律。成果对类似工程抗震设计具有一定的参考价值和指导意义。

关键词: 导流堤; 动力响应; 加速度; 液化; 安全系数; 敏感性分析

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0165—07

Seismic Response and Sensitivity Analysis of a Diversion Dike Nuclear Power Plant

LIU Boqing, ZHAO Jie, WANG Guixuan

(The R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: The stability of the nuclear power intake diversion dike under the action of earthquake plays a vital role in the safe use of nuclear power. In this paper, the equivalent linear method is used to carry out the finite element dynamic time history analysis of the typical section of the dike works of a nuclear power plant, and the acceleration response, liquefaction zone distribution and safety factor of the diversion dike under SL1 and SL2 ground motion are obtained respectively. By considering the discreteness and randomness of geotechnical parameters, the influence of dynamic shear modulus changes on the dynamic stability of diversion dikes is analyzed, and the variation and acceleration of dynamic shear modulus are obtained, as well as response liquefaction zone distribution, safety factor.

Keywords: dike; dynamic response; acceleration; liquefaction; safety factor; sensitivity analysis

随着我国经济技术的快速发展, 各类资源的日益消耗, 拥有安全、清洁、并且高效特点的核能进入人们的视野, 作为一种新型能源, 不仅可以防止环境污染, 而且为我国能源短缺问题提供一条可行途径^[1]。核电导流堤对核电厂的正常运行及防护起到非常重要的作用, 在核电厂海域工程中具有重要的地位, 但是在强震作用下时, 有发生地基液化、滑动破坏等可能性, 使整体结构不能处于稳定的状态, 严重影响到核电厂的安全用水, 因此对导流堤结构形式开展抗震分析是十分有必要的。

宋丹青等^[2] 主要对岩质边坡动力稳定性方法进行了系统的分析研究, 得出各种方法的优缺点以及发展趋势。王元战等^[3] 通过建立三维有限元模型, 分析倒 T 型导管墙桩基防波堤极限状态下结构的位移分布, 得出结构失去稳定性的过程及失稳的计算方法。杨勋等^[4-5] 结合某核电站防波堤, 应用动力弹塑性分析方法, 分析了防波堤的地震响应特性和破坏机理。王桂萱等^[6] 通过共振柱试验, 测得某核电厂导流堤地基液化土层的动剪切模量、阻尼比、应变幅等参数, 通过回归分析得到了它们之间的

双曲线关系。王丽艳等^[7]采用一种新的塑性模型,分析了砂土的黏性颗粒含量和标准贯入试验击数对海工结构在地震作用下变形的影响。白秋红等^[8]用等价线性法对某核电护岸结构分别进行了 SL1 和 SL2 地震作用下的地震响应分析及稳定性研究。朱庆等^[9]对某一边坡进行数值模拟分析,得出了其特定监测点在动力作用下位移和加速度的稳定性影响。安晓东等^[10]采用有限差分软件 FLAC^{3D},重点对防波堤地基液化问题进行了分析。但是在有限元动力计算和稳定分析中,材料计算参数的选取对计算结果的影响很大,而试验结果本身也具有一定的离散性和随机性,且可能与实际工程中材料的特性有一定的差异,专家对计算参数进行了参数敏感性分析。蔡毅等^[11]介绍了敏感性分析的定义,并且对一些常用方法的利与弊进行了分析。王熠琛^[12]采用了多种计算方法研究了地震作用下边坡稳定影响因素的敏感性问题,得出了各影响因素的敏感性不同以及所选方法不同,其计算结果存在差异。陈志波^[13]研究了边坡稳定安全系数与各敏感因子的相关性,并且建立了回归方程。李英华^[14]把基坑土体的黏聚力、重度、内摩擦角、坡度以及坡高作为研究对象,研究其对某基坑边坡稳定的敏感性。谭晓慧等^[15]对边坡的可靠度指标进行了敏感性分析。在开展土层抗震分析中,土的动剪切模量和阻尼比是地震反应分析中不可或缺的动力参数土,同时也是场地地震安全性评价中必备的内容^[16]。

本文以某核电导流堤结构为工程背景,运用等价线性的计算分析方法对核电导流堤进行地震响应规律分析,得出了在 SL1 和 SL2 地震作用下导流堤的加速度响应、液化分布状况、安全系数。在此基础上,考虑到材料参数的选取对计算结果的影响很大,分析了淤泥、全风化花岗岩和砂土的动剪切模量的变化对稳定性的影响。

1 计算分析方法

1.1 等价线性法

导流堤结构的地震响应状态与土的动力特征密切相关,当输入地震动时,土的动力特性主要受应变幅度、应变速率和循环加载等因素的影响。由于土体具有复杂的非线性特征,当输入的地震动越大时,土体的非线性特性就越明显。等价线性法相比于传统的非线性时程分析方法有计算简便、效率高以及分析参数较少等优点,因此本文采用等价线性法^[17]。等价线性法不但可以有效的分析地震作用下土体的

非线性变化,并且可以缩短大量的计算时间。

1.2 液化分析

砂土颗粒在外力或内力(通常是孔隙水压力)作用下,不能抵抗剪应力时,就会发生液化。当采用总应力法时,液化安全率 F_L 可由下式表示:

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (1)$$

R 为土体的液化动剪应力比,可由三轴循环荷载试验得出,表达式为:

$$R = \frac{\sigma_d}{2\sigma_0} = \frac{\tau_d}{\sigma_0} \quad (2)$$

L 为土体的等效动剪应力比,可通过动力反应分析计算得到,方程式为:

$$L = 0.65 \frac{\tau_{\max}}{\sigma_0} \quad (3)$$

σ_0' 为初始有效平均主应力, τ_{\max} 为地震作用下的土体最大动剪应力。

式(1)中,若液化安全率 F_L 小于 1,则表明土体将会发生液化,对结构的稳定将产生影响,应该采取措施控制,反之,则认为土体无液化危险性。

1.3 安全系数时程计算方法

导流堤的动力稳定安全系数分析是在静力和动力有限元分析的基础上进行的:由静力有限元分析方法计算得到各单元静的 X 方向正应力、 Y 方向正应力和 XY 面上剪应力,叠加上动力有限元分析方法计算得到每个时刻附加动的 X 方向正应力、 Y 方向正应力和 XY 面上剪应力,按照刘红帅等^[18]所给的方法分别计算滑动面各单元静的正应力 σ_{ns} 和剪应力 τ_{ss} 、动的正应力 σ_{nd} 和剪应力 τ_{sd} ,可得到 t 时刻的安全系数 $F(t)$ 为:

$$F(t) = \frac{\int_{\Gamma} \{c_i + [\sigma_{ns,i} + \sigma_{nd,i}(t) \tan \varphi_i]\} dT}{\int_{\Gamma} (\tau_{ss,i} + \tau_{sd,i}) dT} \quad (4)$$

式中: c_i 、 φ_i 为滑动面第 i 单元的抗剪强度指标; $\sigma_{ns,i}$ 、 $\tau_{ss,i}$ 为第 i 单元滑动面上静的法向应力和剪应力; $\sigma_{nd,i}$ 、 $\tau_{sd,i}$ 为 t 时刻第 i 单元滑动面上地震动作用下附加的法向应力和剪应力; Γ 为滑动面。采用地震动时程分析时,上式可以计算出导流堤的安全系数时程,导流堤稳定性的标准则由最小安全系数评价。

2 算例分析

2.1 工程概况

某核电厂导流堤,堤顶高程为 5 m,宽度为 7.2 m,堤心是由常见的 1 kg ~ 500 kg 开山石填筑而成,

由于基底淤泥层较厚,外坡、内坡坡度均为1:1.5。为防止堤前水浪的冲击作用,采用100 kg~150 kg抛填块石进行护底,图1为导流堤典型工程地质剖面 and 设计方案。

2.2 计算模型

计算采用二维平面模型,图2和图3给出了导流堤断面的计算模型,该模型总高度48.2 m,长度为300 m,共剖分为3 364个单元,3 456个节点。

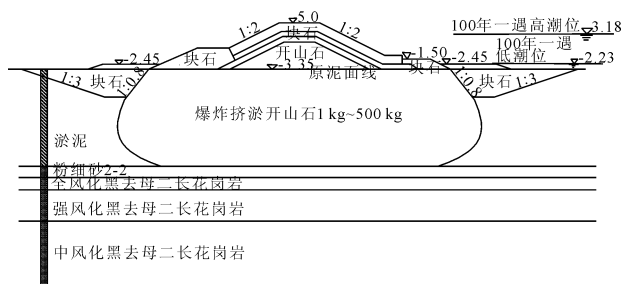


图1 导流堤地质断面图

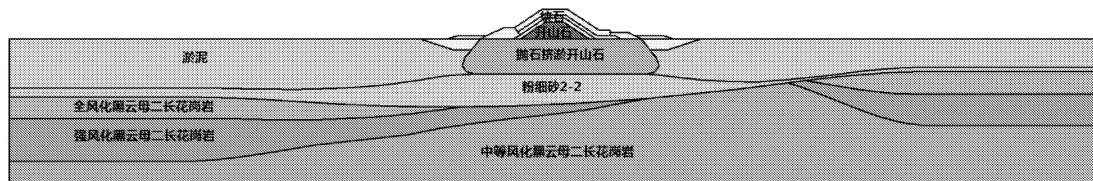


图2 导流堤断面计算简图

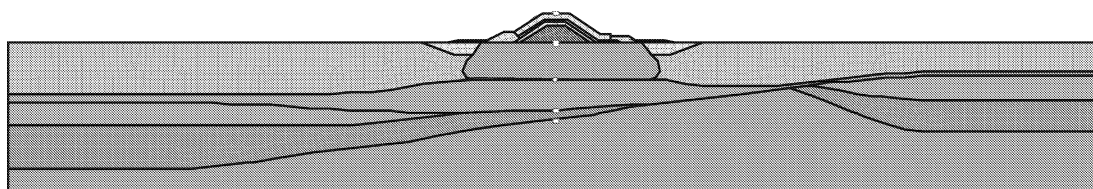


图3 断面加速度监测点布置位置图

2.3 计算参数

导流堤计算参数根据该项目岩土工程勘察报告中的建议值取值。见表1、表2以及表3。

表1 土体力学参数

材料参数	弹性模量 /MPa	饱和重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	泊松比
淤泥② ₂	6.3	16.3	9.0	10.5	0.30
粉细砂② ₄	43.5	19.8	0.0	31.0	0.33
中风化	1000.0	26.5	200.0	36.4	0.27
强风化岩	390.0	20.0	40.0	40.0	0.33
抛石挤淤	120.0	20.0	0.0	42.0	0.33
块石	120.0	20.0	0.0	38.0	0.33

表2 动剪切模量系数K和指数n

土体类型	K	n	土体类型	K	n
块石	1500.0	0.36	全风化花岗岩	477.5	0.77
回填开山石	1500.0	0.36	粉细砂② ₂	501.2	0.40
淤泥② ₁	256.8	1.23	抛石挤淤开山石	1500.0	0.36

表3 导流堤砂土粉细砂②₂ 抗液化应力比

地震震级	等效振动次数	液化应力比		
		$K_c = 1.0$	$K_c = 1.5$	$K_c = 2.0$
7.0	12	0.119	0.165	0.246
7.5	20	0.111	0.158	0.239
8.0	30	0.104	0.152	0.233

2.4 地震波选择

根据核电厂抗震设计规范,计算导流堤抗震稳定时,应同时考虑水平向和竖向地震动,竖向设计加速度峰值不应低于水平向设计加速度峰值的2/3。根据委托单位提供核电厂场地相关资料,该核电导流堤在SL1地震荷载作用下时,水平加速度最大设计值取0.15g,竖向方向为0.1g,在SL2地震荷载作用下时,加速度最大设计值取为在SL1地震荷载作用下时的2倍,动力时程分析采用美国RG1.60地震波,本次抗震分析采用的是阻尼比5%的反应谱,该地震动持时25 s,地震动时程曲线见图4。

3 动力响应分析

3.1 地震加速度响应

加速度响应如图5所示,通过计算对比分析得出,不管是水平还是竖直方向都存在明显的加速度放大效应。SL1地震作用下,导流堤最上方水平加速度峰值为0.403g,最大放大倍数为2.69,竖向加速度峰值为0.298g,最大放大倍数为2.98。SL2地震作用下,导流堤最上方水平加速度峰值为0.667g,最大放大倍数为2.22,竖向加速度峰值为0.549g,最大放大倍数为2.75。

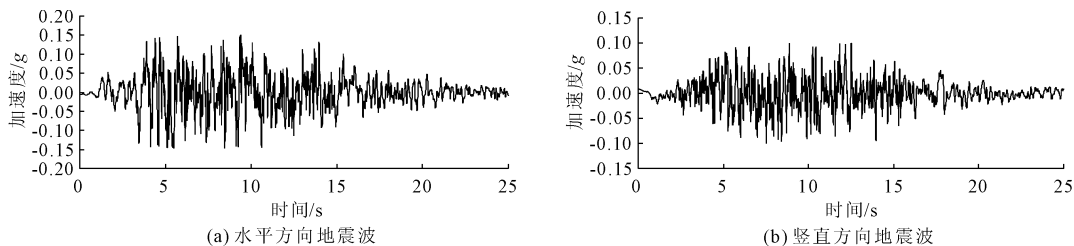


图 4 RG1.60 地震波时程曲线

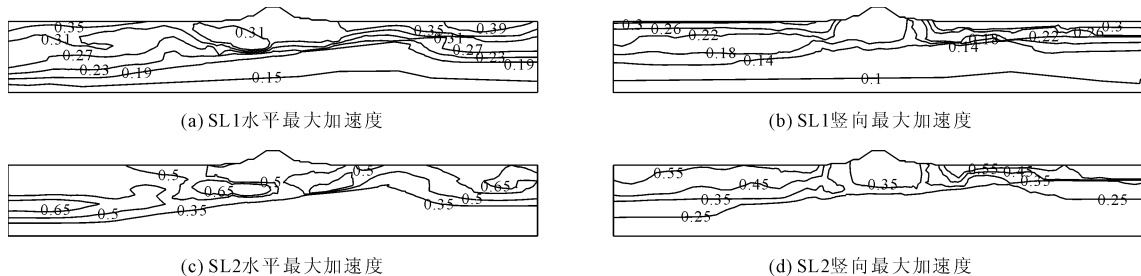


图 5 加速度响应

为方便分析导流堤结构内部加速度变化规律,在土层与土层相接处设置监测点,通过监测每层土层的加速度大小来反映结构内部加速度的放大效应规律。如图 3 所示加速度监测点布置图:在土层相接处共设置六个监测点,其中底部监测点的加速度大小就地震荷载加速度最大设计值,水平方向为 $0.15g$, 竖直方向为 $0.1g$, 通过分析计算得到每个监测点的加速度,将这六个监测点的水平加速度和竖直加速度依次连接形成如图 6 所示的规律曲线:在其他的条件一定下,导流堤结构内部水平加速度和竖向加速度整体上是随着结构的高程增大而变大,高程越高,加速度越大,放大效应越明显。从图 6 可以清晰的看出在高程 -3 m 附近时,加速度有所减小的,说明该地基的加速度放大系数存在临界值,该临界值在 -3 m 到地表范围内。由此可以看出,导流堤各点动力响应加速度峰值以及变化规律不仅与导流堤所遭受的地震动大小有很大的关系,也与导流堤结构地基土的高程密切相关。

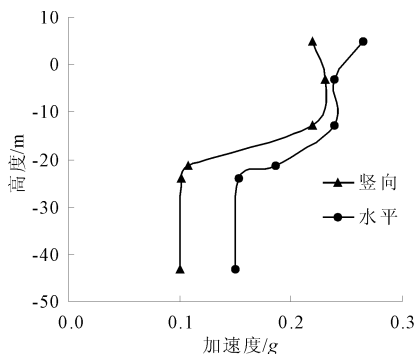


图 6 不同高程各点动力加速度

3.2 地基土层液化区分布

图 7 为该断面的液化区分布图,由图 7 可以看出在 SL1 地震荷载作用下,场区砂土只在两端出现液化现象,当在 SL2 地震荷载作用下,场区砂土几乎出现贯通的液化现象,液化程度较为严重,对场区十分不利。

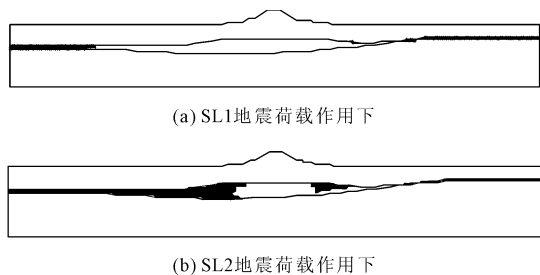


图 7 液化区分布

3.3 动力有限元稳定分析

根据《核电厂海工构筑物设计规范》有关规定,对导流堤按照核安全类物项进行抗震分析时,需进行动力有限元稳定分析。图 8 为该断面动力安全系数时程曲线图,可以看出,在 SL1 地震作用下,最小动力安全系数为 1.2204 ,安全系数大于 1 结构相对稳定;在 SL2 地震作用下,最小动力安全系数为 1.0702 ,结构也是相对稳定的。

4 参数敏感性分析

Hardin 和 Richard 通过对圆粒状和棱角状的石英砂做大量的共振柱试验,分析研究出石英砂在平均有效应力 σ'_0 和不同孔隙比 e 下的剪切模量 G 的变

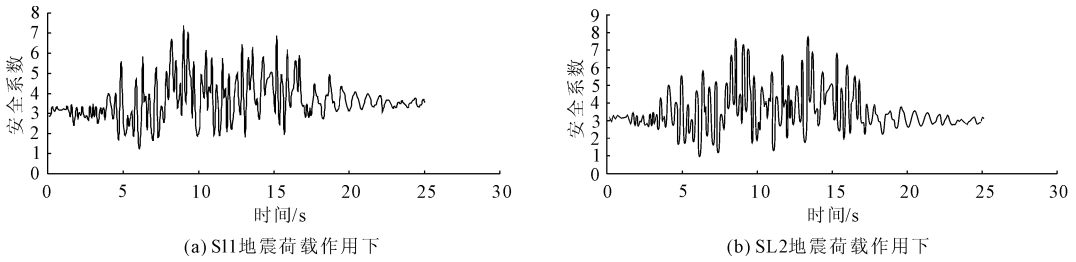


图 8 断面动力安全系数时程曲线

化曲线。一般用剪应变为 1×10^{-6} 时的剪切模量作为初始剪切模量 G_0 , 可将圆粒状砂土的剪切模量用下式表示, 即:

$$G_0 = \frac{6930(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (5)$$

棱角状砂土的剪切模量用下式表示, 即:

$$G_0 = \frac{3270(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (6)$$

式中: G_0 、 σ_0' 的单位 kPa。

由式(5)和式(6)可知, 在发生很小应变时, 砂土的初始剪切模量与平均有效应力的关系为:

$$G_0 \propto \sigma_0^{1/2} \quad (7)$$

黏性土的剪切模量不仅仅受剪应变、孔隙比、平均有效应力的影响, 同时超固结比和时间对其影响也比较显著。可以将黏土的剪切模量用下式表示, 即:

$$G_0 = \frac{3270(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (8)$$

式(8)一般适用于孔隙比小于 1.5 的正常固结黏土。但对于压缩性较大的软黏土, 表达式就为:

$$G_0 = \frac{445(4.4 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (9)$$

式中: G_0 、 σ_0' 的单位 kPa。

本文重点研究了导流堤地基土体动剪切模量变化对动力响应分析结果的影响, 且根据敏感性分析

得出影响导流堤动力稳定的主导因素。

4.1 动剪切模量变化对加速度响应的影响分析

根据该工程海域回填区施工岩土工程勘察报告及上述经验公式, 可以得到场区代表性土体孔隙比和初始动剪切模量的变动区间, 如表 4 所示。以 SL1 地震作用为例, 考虑低水位, 进行动剪切模量变化对导流堤加速度响应的影响分析。

表 4 土体孔隙比参数与动剪切模量变动区间

土样类型	特征值	孔隙比 e	初始剪切模量/ G
淤泥②	最大值	2.757	0.326
	平均值	1.880	1.000
	最小值	0.851	3.086
全风化花岗岩	最大值	1.221	0.638
	平均值	0.929	1.000
	最小值	0.587	1.656
砂土	最大值	0.817	0.772
	平均值	0.687	1.000
	最小值	0.566	1.260

计算得到每个监测点的峰值加速度, 并将 5 个监测点的峰值加速度在不同的动剪切模量下依次连接见图 9 和图 10, 可以看出, 导流堤各监测点的竖向和水平加速度都是随着淤泥和全风化花岗岩的动剪切模量的增大而变大。

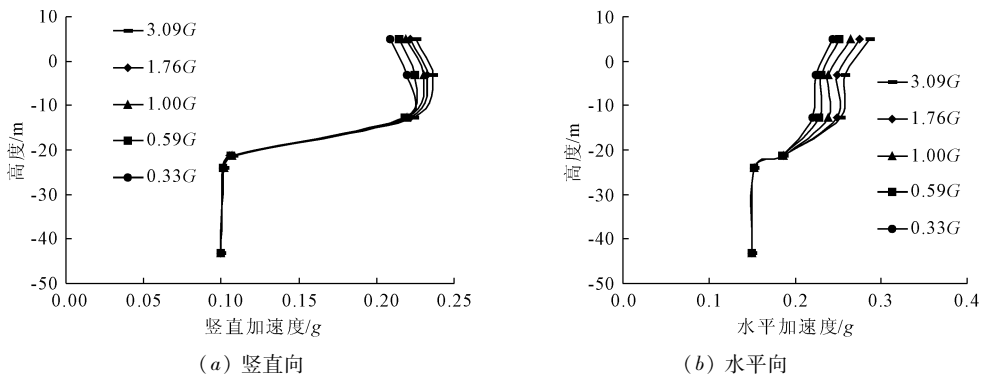


图 9 淤泥动剪切模量变化对加速度响应的影响

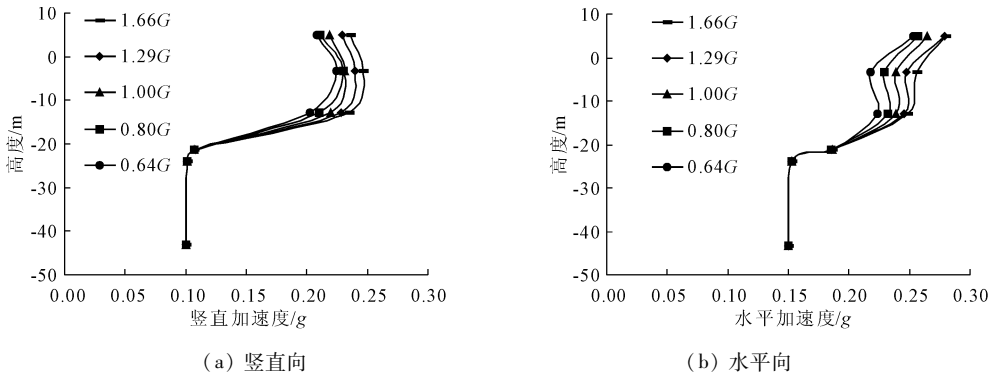


图 10 全风化花岗岩动剪切模量变化对加速度响应的影响

4.2 动剪切模量变化对液化的影响分析

由于 SL1 地震作用下,地基中的砂土层基本不发生液化,于是本文重点分析 SL2 地震作用下砂土

动剪切模量变化对断面液化的影响,以低水位为例。

从图 11 中可以看出,当地基下方砂土层动剪切模量变大时,液化程度趋于严重。

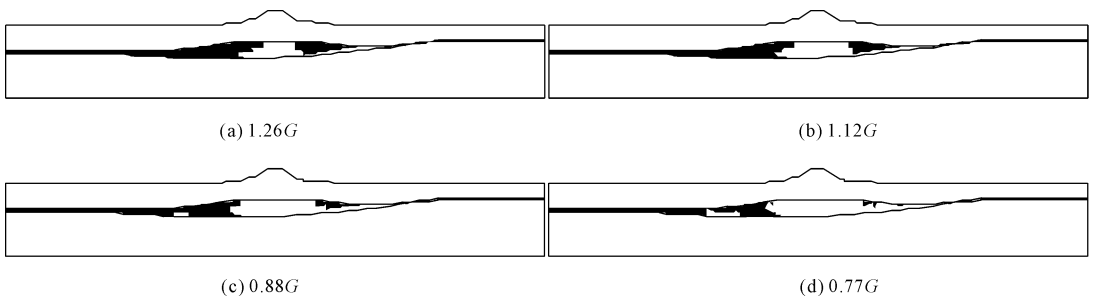


图 11 断面液化分布图 (SL2 低水位)

4.3 动剪切模量变化对动力安全系数的影响分析

图 12、图 13、图 14 分别为淤泥、全风化花岗岩、砂土动剪切模量变化对动力安全系数的影响图,可以看出,动力安全系数随着淤泥和砂土的动剪切模量的增大而变小,但是随着全风化花岗岩的动剪切模量的增大而先减小后增大。

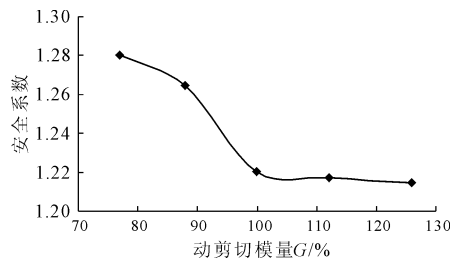


图 14 砂土动剪切模量变化对动力安全系数的影响图

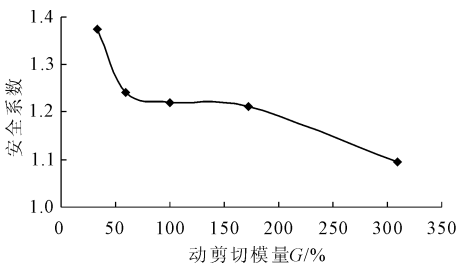


图 12 淤泥动剪切模量变化对动力安全系数的影响图

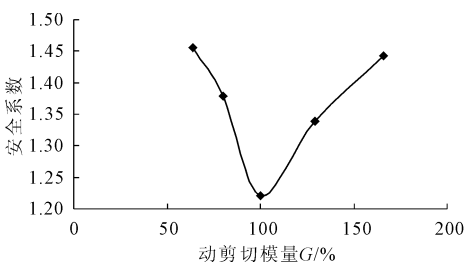


图 13 全风化花岗岩动剪切模量变化对动力安全系数的影响图

5 结论

采用等价线性法模拟土体的非线性,根据计算分析某核电厂导流堤动力响应及参数敏感性分析,得出动剪切模量变化对加速度响应的影响、动剪切模量变化对液化的影响、动剪切模量变化对动力安全系数的影响所得结论如下:

(1) SL1 地震作用下的加速度峰值的放大系数大约为 SL2 地震作用下的 1.3 倍,并且该加速度峰值放大系数存在临界值,该临界值在 -3 m 到地表范围内。

(2) 导流堤的竖向和水平加速度整体上是随着淤泥和全风化花岗岩动剪切模量的增大而变大,但当动剪切模量小于标准值 G 时,这种增长趋势较为

缓慢。

(3) 场区砂土在 SL2 地震作用下的液化程度明显严重于 SL1 地震作用,并且导流堤地基下方砂土层随动剪切模量变大而液化趋于严重。

(4) 在地震荷载作用,导流堤的动力安全系数随着淤泥和砂土的动剪切模量的增大而变小,当淤泥的动剪切模量小于 $0.663G$ 时,这种变小的趋势很严重,当砂土的动剪切模量大于 G 时,动力安全系数基本上没有变化,但是随着全风化花岗岩的动剪切模量的增大而先减小后增大,其中当动剪切模量为 G 时是一个最小值。

参考文献:

- [1] 郭勇,郑砚国. 电力供求、环境保护与核电布局内陆化——基于中国 30 个省份核电需求的实证分析[J]. 系统工程,2008,27(8):57-61.
- [2] 宋丹青,陈志荣,陈俊栋. 岩质边坡地震动力响应研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):1-7.
- [3] 王元战,张连丽,商丹,等. 倒 T 型导管墙桩基防波堤稳定性简化计算方法[J]. 岩土力学,2012,33(6):1839-1844.
- [4] 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.
- [5] 杨勋,王欢欢,余克勤,等. 流-固耦合作用下斜坡式防波堤地震动力响应分析[J]. 工程力学,2016,33(10):248-256.
- [6] 王桂萱,周金领,赵杰,等. 导流堤地基土动力特性的试验研究[J]. 西北地震学报,2011,33(S1):195-198.
- [7] 王丽艳,姜朋明,刘汉龙. 砂性地基中防波堤地震残余

变形机制分析与液化度预测法[J]. 岩土力学,2010,31(11):3556-3562.

- [8] 白秋红,赵杰,王桂萱. 深厚覆盖层上某核电护岸结构地震响应及稳定性分析[J]. 地震研究,2017,40(1):52-58,167.
- [9] 朱庆,王浩. 基于 QUAKE/W 的顺层岩质边坡动力响应特征及稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):76-80.
- [10] 安晓东,赵杰,云高杰. 地震作用下防波堤结构地基液化及变形分析[J]. 地震研究,2017,40(1):59-64,167.
- [11] 蔡毅,邢岩,胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2008,44(1):9-16.
- [12] 王熠琛. 土坡地震稳定性影响因素的敏感性分析[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所,2015.
- [13] 陈志波. 边坡稳定敏感性因子分析及其位移预测[D]. 福州:福州大学,2005.
- [14] 李英华. 深基坑边坡影响因素敏感性分析及变形预测[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [15] 谭晓慧,王建国,刘新荣,等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):115-122.
- [16] 孙静,袁晓铭,孙锐. 土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(2):125-133.
- [17] 宋建希,李建波,林皋. 层状场址自由场动力分析的等价线性法研究[J]. 地震研究,2016,39(1):126-130,182.
- [18] 刘红帅,薄景山,耿冬青,等. 岩质滑坡稳定性有限元分析[J]. 岩土力学,2004,25(11):1786-1790.

(上接第 111 页)

- [12] 王成华,夏绪勇,李广信. 基于应力场的土坡临界滑动面的蚂蚁算法搜索技术[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(5):813-819.
- [13] 薛新华,刘忠正. 基于改进爬山聚类法的模糊神经网络边坡稳定性判别模型[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(4):230-234.
- [14] 何泽干,陈胜宏. 遗传模拟退火算法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学,2004,25(2):316-319.

- [15] 粟塔山,彭维杰,周作益,等. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2001.
- [16] Zhang Xing. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988,114(6):658-671.
- [17] 林永生,陈胜宏. 基于有限元计算的边坡三维滑裂面搜索[J]. 岩土力学,2013,34(4):1191-1196.