

某核电厂软基海堤地震动力响应规律及工程对策探讨

孙 锋¹, 潘 蓉¹, 周 群¹, 卢兴利², 常 猛¹ (1. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

[提 要] 某海堤工程是核电厂专设的防御设计基准外部事件的屏障工程,其在极限安全地震震动(SL-2)作用下的动力响应规律受到高度关注,也是海堤稳定性评价的基础。针对该海堤深厚软土地基的场地条件,讨论了 FLAC 3D 程序计算时边界条件的设置、动力时程的输入等内容,并建立基于自由场边界条件的三维力学模型对海堤抗震进行非线性计算,分析了海堤加速度、位移及剪切破坏等动力响应规律,在此基础上提出了软基海堤抗震加固的工程对策,可供设计参考。

[关键词] 非线性动力分析; 海堤工程; 极限安全地震震动(SL-2); 软土地基; 核电厂

[中图分类号] TU271.5 [文献标识码] A

Study on Dynamic Response Analysis and Engineering Countermeasure of Coastal Levee on Soft Soil Foundation of Nuclear Power Plant

Sun Feng¹, Pan Rong¹, Zhou Qun¹, Lu Xing-li², Chang Meng¹ (1. Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Coastal levee engineering is a barrier engineering in defending the design basis external events in nuclear power plant. The dynamic response laws under ultimate safety ground motion(SL-2) plays a key role in evaluating the stability of sea wall, which is of importance to the safety of NPP. Based on the soft soil foundation feature of geological unit B, the problems about boundary conditions, dynamic time series, and rational damping for geological body during using FLAC 3D are discussed. 3-D seismic nonlinear dynamic numerical analysis model is built by using free-field boundary in FLAC 3D, which can embody the coupling interaction between soil and structure. Furthermore, the earthquake response laws are put forward, such as PGA, displacement, and shear-strain increment. The results can contribute to further researches on the mechanism of sea wall instability under earthquakes and design of strengthening project.

Keywords: nonlinear dynamic response analysis; coastal levee engineering; ultimate safety ground motion(SL-2); soft soil foundation; nuclear power plant

E-mail: sunmartin@163.com

1 引言

某海堤工程是核电厂专设的防御设计基准外部事件的屏障工程。日本福岛核事故后,核电厂在设计基准外部事件下的安全倍受全社会关注,海堤为核电厂抗震 I 类物项,其在极限安全地震震动(SL-

2) 作用下的动力响应特征和变化规律受到各方高度关注,也是海堤地震稳定性评价的基础。众所周知,土体是非线性很强的材料,地震动强度越大,土体的非线性越强烈。震害经验指出,土质愈软,覆盖土层愈厚,结构震害愈严重,反之则轻^[1~4]。在岩土地震工程中,等效线性方法广泛应用于计算地基土体中波的传播以及土与结构的动力相互作用,等效线性方法采用的是等价非线性粘-弹性模型,其非线性特性表现为剪切模量和阻尼比随剪应变幅值变化,这种变化关系由试验给出,目前世界各国在核

[收稿日期] 2014-03-26

[基金项目] 大型先进压水堆核电厂国家科技重大专项-CAP1400 安全评审技术及独立验证试验(项目编号: 2011ZX06002-10-16); 环境保护部行业科研专项(201309056)

电厂的实际设计工作中一般也采用该方法。但是,随着等效线性化方法在工程实践中的应用增多,该方法也暴露出一些不当之处,特别是计算软弱土层或软土地带时,误差较大。FLAC 3D 有限差分软件可以很好地解决非线性动力分析问题,已经成功用于岩土开挖、边坡稳定性以及地震动力响应分析等诸多领域^[5-7]。

本文针对该海堤工程 1+450 断面深厚软土地基的场地条件,利用 FLAC 3D 软件中的动力分析模块,建立三维自由场边界条件下考虑土体-结构相互作用的计算模型,对海堤在地震作用下的动力响应规律(主要是加速度响应和位移响应)进行研究,在此基础上提出软基海堤加固的工程对策。

2 FLAC 非线性动力计算原理

2.1 非线性动力计算方法

FLAC 3D 采用完全非线性分析方法,基于显式差分方法,求解全部运动方程。相对于等效线性方法而言,完全非线性分析方法具有可以遵循任何制定的非线性本构模型、自动计算永久变形、同时模拟压缩波和剪切波的传播以及两者耦合作用时对材料的影响等优势。在强震作用下,这种耦合作用的影响很重要,比如在摩擦型材料中,法向应力可能会动态地减小,从而降低土体的抗剪强度。

FLAC 3D 动力分析过程一般分为两个步骤:震前的静力平衡计算和施加动力荷载后的动力响应分析。在第一步中通过模拟填筑或开挖,得到静力作用下的平衡结果。第二步是在第一步计算的基础上,施加动力荷载进行计算。

2.2 边界条件设置

在动力问题中,模型周围边界条件的选取是一个重要问题^[8]。根据波动理论,当地震波遇到不同介质界面时将产生折射和反射,并与频率相接近的波相互干涉。为准确模拟实际场地中地震波的传播过程,FLAC 3D 中提供了粘性边界和自由场边界两种边界条件来减少模型边界上波的反射。

对诸如大坝或海堤之类的地面结构进行动力反应分析时,在模型各侧面的边界条件须考虑为没有地面结构时的自由场运动。FLAC 3D 通过在模型四周生成二维和一维网格来实现这种自由场边界条件。主体网格的侧边界通过阻尼器与自由场网格进行耦合,自由场网格的不平衡力施加到主体网格的边界上。由于自由场边界提供了与无限场地相同的

效果,因此向上的面波在边界上不会产生扭曲。

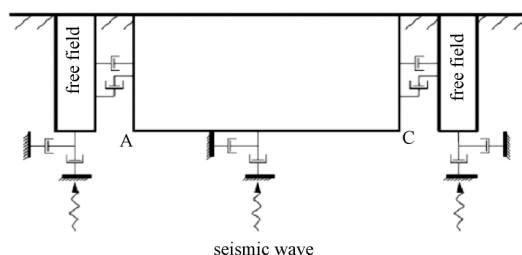


图 1 FLAC 3D 中的动力加载及边界约束模式
Fig. 1 The mode of dynamic loads and boundary in FLAC 3D

2.3 阻尼的选取

阻尼的产生主要来源于材料的内部摩擦以及可能存在的接触表面的滑动。对于动力问题中的阻尼,需要在数值模拟中重现自然系统在动荷载作用下的阻尼大小。目前,FLAC 3D 动力计算提供了 3 种阻尼形式供用户选择,分别是瑞利阻尼、局部阻尼和滞后阻尼。瑞利阻尼较常用,瑞利阻尼最初应用于结构和弹性体的动力计算中,以减弱系统的自然震动模式的振幅。通常可以用下式来表示:

$$c = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

其中: α 、 β 分别为质量阻尼常数和刚度阻尼常数。

瑞利阻尼中的质量分量相当于连接每个节点和地面的阻尼器,刚度分量则相当于连接单元之间的阻尼器。虽然两个阻尼器本身是与频率有关的,但是通过选取合适的系数,可以在有限的频率范围内近似获得频率无关的响应。瑞利阻尼的两个参数分别是最小临界阻尼比和最小中心频率,可以按照下列公式求得:

$$\xi_{\min} = (\alpha \cdot \beta)^{1/2} \quad (2)$$

$$\omega_{\min} = (\alpha/\beta)^{1/2} \quad (3)$$

对于岩土材料而言,临界阻尼比的范围一般是 2%~5%,而结构系统的临界阻尼比为 2%~10%。在使用弹塑性模型进行动力计算时,相当多的能量消散于材料发生的塑性流动阶段,因此,只需设置一个很小的阻尼比(比如 0.5%)就能满足要求^[6]。

3 海堤动力模型的建立

3.1 海堤工程概况

某核电厂海堤是土石混合结构的构筑物,全长 1818 m,原设计堤顶高程为 8.0 m(黄海高程),挡浪墙高度 1.0 m,是抗震 I 类构筑物,于 1986 年施工完成。为了探讨海堤地震动力响应的一般规律,选取

典型断面 1+450 进行分析,海堤由 8.0 m 平台、5.5 m 平台、3.0 m 平台等 3 种填土高度平台组成,总宽度 89.3 m。地质报告显示:软土地基以粉质粘土和淤泥质粘土为主(参见表 1),海堤土体计算参数见参考文献 [9]。

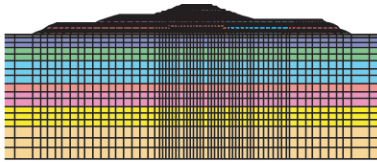


图 2 1+450 断面
Fig.2 Section of 1+450

表 1 海堤软土地基计算参数

Table 1 Mechanical parameters of soft soil foundation

名称	厚度 (m)	容重 (g/cm ³)	压缩模量 (MPa)	泊松比	变形模量 (MPa)
粉质粘土	1.0	19.1	2.0	0.30	1.49
淤泥质粘土	2.5	17.9	1.8	0.35	1.12
淤泥质粉质粘土	4.0	18.0	1.8	0.35	1.12
淤泥质粘土	6.0	17.6	2.8	0.35	1.74
淤泥质粉质粘土	2.5	18.0	3.5	0.35	2.18
粘土夹粉砂	4.0	19.2	3.5	0.30	2.60
淤泥质粉质粘土	5.5	18.7	3.5	0.35	2.18
粉质粘土	9.0	19.3	9.4	0.30	6.98

3.2 场地地震时程输入

海堤的地震动响应与海堤所遭受的地震动特性密切相关。海堤按抗震 I 类要求,厂址设计基准地面运动参数确定如下:厂址 SL-2 级设计基准地面运动基岩水平向、竖向峰值加速度值分别为 0.15g、0.10g。

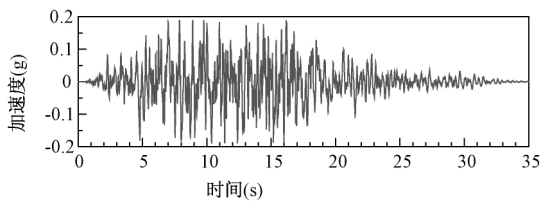


图 3 人工合成的加速度时程曲线(SL-2 水平向)
Fig.3 Input seismic horizontal acceleration time history(SL-2)

在堤坝和其他大型上部结构与地基动力相互作用分析和隧道、管道等地下设施的地震响应分析及

抗震设计中,地震作用均应从基底输入 [6];海堤平面以下为深厚软土地基,-35m 以下为基岩,可以将此基面作为地震波的入射基面。

3.3 计算模型与边界条件

考虑到填土较高,影响范围较大,模型横断面侧边界取至离海堤堤脚 3 倍堤面宽度,底部边界取至基岩表面(-35m)模型在底面采用粘性边界,四周采用自由场边界。本构模型和屈服准则分别采用理想弹塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 强度准则。计算模型、边界条件见图 4 所示。

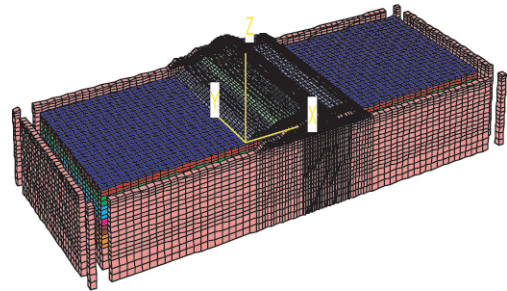


图 4 海堤地震动力计算模型
Fig.4 Dynamic numerical model of coastal levee on soft soil foundation

4 计算结果与分析

4.1 加速度峰值响应

为了描述地震作用下海堤内部加速度响应规律,定义海堤轴线附近不同高程点动力响应加速度峰值(PGA)与基岩表面(-35m)动力响应加速度峰值的比值为 PGA 放大系数(地面高程为 0 点)。图 5 给出了海堤轴线附近监测点水平向、竖向加速度峰值随高程的变化规律。

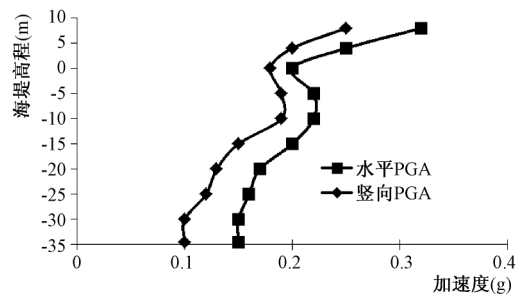


图 5 海堤不同高程各点动力响应加速度峰值
Fig.5 Dynamic response accelerations with different depth for coastal levee engineering

从图 5 可以看出,总体上海堤内部加速度自基岩到堤顶在竖直方向随高程增加而逐步增大,但在

接近地面时(-10m 到地表) ,PGA 放大系数均有不同程度的降低,说明深厚软土地基厚度对应于 PGA 放大系数存在临界值,超过该临界厚度值,PGA 放大系数逐步降低;这也是软土地基结构地震加速度峰值响应规律明显区别于刚性地基的一个明显例证。对地表来讲,土层的加速度 PGA 放大系数约为 1.3 ~ 1.8。

自地面到堤顶,PGA 放大系数急剧增大,堤顶竖向 PGA 放大系数为 2.5,水平 PGA 放大系数为 2.1。同时计算表明,沿海堤水平方向,从海堤轴线到海堤前后坡面,加速度放大系数基本呈线性增大趋势,到坡面增幅略有减小。

同时,PGA 放大系数随振幅的增大呈现递减趋势,这种线性可能与土体的剪切应变增大后,土体刚度降低、阻尼增大有关。随着土体输入地震动强度的增加,土体表现出明显的非线性。随着地震波频率的增加,海堤堤顶 PGA 放大系数也呈现下降趋势,因其高频段的能量分布较多,土体对其滤波效应明显增强。因此,海堤的加速度反应及其分布规律与海堤所遭受的地震动特性密切相关。

4.2 断面位移场

跟踪堤顶某点的位移历程,可以发现,初始阶段位移震荡较大,随后趋于平缓,临近结束时位移呈现出稳定的趋势,即产生了永久位移;计算终态时,在地震作用下,海堤坡面尤其是坡脚附近的水平位移和竖向沉降较其它部位明显大得多,最终水平位移 0.29m,最终竖向沉降 0.16m(见图 6)。

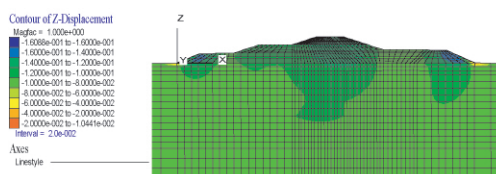


图 6 最终竖向沉降云图

Fig. 6 Vertical displacement contour in terminal state

4.3 动力破坏机制分析

从图 7 可看出,在地震终止时,除地基中下部深度部分单元外,其余大部分土体单元发生剪切破坏,土体均受剪切应力作用。特别是,海堤坡面和坡脚处以受拉破坏和剪切破坏的单元为主。边坡塑性区贯通并不一定意味着边坡整体破坏,塑性区贯通是破坏的必要条件,但不是充分条件,还要看塑性应变是否具备发展的边界条件。

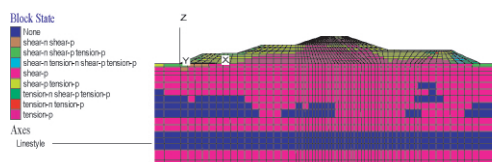


图 7 计算终态土体塑性状态

Fig. 7 Plastic state contour in terminal state

从海堤地震荷载作用下不同时刻的剪应变增量云图可以看出,地震作用下,剪应变增量慢慢增大,到地震结束时,剪应变增量最大值发生在海堤坡脚附近,主要是剪-拉破坏引起,所以强震动力边坡稳定性分析时不能忽略受拉破坏的影响。

4.4 提高软土地基承载力

软弱粘土的特点是压缩性大、抗剪强度小、地基承载力低。由以上分析可知,软土地基滤掉了地震波中的中高频分量,延长了结构的周期,增大了上部海堤的地震反应。

根据有关文献对沿海软基海堤的研究,提高海堤稳定性可从两方面采取措施:①对软土堤基进行加固处理,以降低堤基的压缩性和提高承载力;②合理设计堤身,通过断面型式、堤身填筑材料和施工工序的优化提高整体稳定性。本文假定地基加固后,地基计算参数提高 30%(剪切模量、体积模量),通过分析得到了海堤不同高程各点的动力响应加速度峰值(见图 8)。

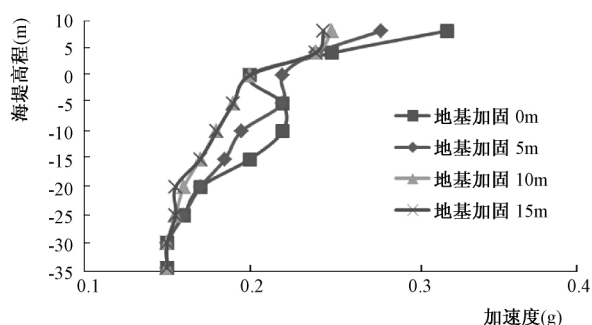


图 8 海堤地基加固后不同高程各点动力响应加速度峰值
Fig. 8 Dynamic response accelerations with different strengthening depth for coastal levee engineering

从图 8 可以看出,海堤地基加固厚度 10m 左右时,上部海堤结构的动力响应加速度峰值下降幅度最大;地基加固 10m 以上,上部海堤动力响应加速度峰值降低效果并不明显。计算结果表明,对深厚软土地基海堤浅层进行加固处理,会有效增大上部

海堤结构的抗震能力。因此,海堤地基加固处理中,应对地基加固深度进行优化论证,选用合理深度达到最优的抗震效果。

5 结论

(1) 深厚软土地基底部基岩输入的地震波对海堤存在垂直放大和临空面放大作用。海堤内部加速度峰值在竖直方向随高程增加而增大,到坡顶时急剧增大,但深厚软土地基对加速度峰值的放大存在临界厚度;水平方向自海堤中轴线到前后坡面也呈现增大趋势。同时,海堤的加速度反应及其分布规律与海堤所遭受的地震动特性密切相关。

(2) 计算结果表明,SL-2级地震作用后,海堤产生了较强的永久变形,坡面尤其是坡脚附近的水平位移和竖向沉降较其它部位大得多,最终水平位移0.29m,最终竖向沉降0.16m;堤顶竖向PGA放大系数为2.5,水平PGA放大系数为2.1。

(3) 强震作用下海堤动力破坏是随时间发展的,其破坏机制可以根据动力计算得到的单元受拉破坏与剪切破坏状态云图、剪应变增量云图综合确定。在地震终止时,除地基中下部深度部分单元外,其余大部分土体单元发生剪切破坏,海堤坡脚附近则主要是剪-拉破坏。

(4) 对深厚软土地基海堤浅层进行加固处理,将有效地增大上部海堤结构的抗震能力。深厚软土地基条件下海堤的地震动响应是一个十分复杂的问题,本文的研究没有考虑水位的变化,但得到的动力响应数值和残余变形可作为海堤地震稳定性分析的参考。

参考文献(References):

- [1] 邹德高,徐斌,孔宪京. 边界条件对土石坝地震反应的影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(S2): 101~106
Zou De-gao, Xu Bin, Kong Xian-jing. Study of Influence of Boundary Condition on Rockfill Dam Seismic Response[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S2): 101~106(in Chinese)
- [2] 黄井武,陈晓平,陈华,等. 广东沿海软基堤坝破坏机制及工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3393~3399
Hang Jing-wu, Chen Xiao-ping, Chen Hua, et al. Failure and Mechanism and Engineering Countermeasure of Coastal Levee on Soft Soil Foundation of Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3393~3399(in Chinese)
- [3] 徐长节,蔡袁强. 杭州钱塘江防洪堤抗震分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 66~72
Xu Chang-jie, Cai Yuan-qiang. Aseismic Analysis of Flood Protection Levee of Qiantang River in Hangzhou Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 66~72(in Chinese)
- [4] Leroueil S. Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects[J]. ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engrg, 1996, 122(7): 534~543
- [5] 刘汉龙,费康,高玉峰. 边坡地震稳定时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553~556
Liu Han-long, Fei Kang, Gao Yu-feng. Time History Analysis Method of Slope Seismic Stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553~556(in Chinese)
- [6] 刘春玲,祁生文,童立强,等. 利用FLAC 3D分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2730~2733
Liu Chun-ling, Qi Sheng-wen, Tong Li-qiang, et al. Stability Analysis of Slope under Earthquake with FLAC 3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2730~2733(in Chinese)
- [7] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 918~923
Xu Guang-xing, Yao Ling-kan, Li Chao-hong, et al. Dynamic Response of Slopes under Earthquakes and Influence of Ground Motion Parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918~923(in Chinese)
- [8] Lin Meei-ling, Wang Kuo-lung. Seismic Slope Behavior in A Large-scale Shaking Table Model Test[J]. Engineering Geology, 2006, 86(2-3): 118~133
- [10] 孙锋,潘蓉,等. 秦山核电厂一期海堤软土地基沉降规律的耦合分析[J]. 核安全, 2011, 4(4): 18~24
Sun Feng, Pan Rong, Zang Ding-li. Coupling Analysis on the Soft Ground Settlement Laws in Qinshan Nuclear Power Phase I Sea Wall Project[J]. Nuclear Safety, 2011, 4(4): 18~24(in Chinese)

[作者简介] 孙 锋(1978~),男,博士,高级工程师,主要从事核电厂厂址与土建方面的审评与研究工作