

# 某核电厂回填料场地土层地震反应分析

房江锋, 杜龙

(深圳中广核工程设计有限公司, 深圳 518029)

摘要: 采用工程类比法, 获取回填料的动力参数。运用 SHAKE91 计算程序, 计算了回填料场地土层的地震反应。计算结果表明, 经土层的放大作用后地表反应谱加速度幅值较厂址基岩面的反应谱加速度幅值增大明显。文章可为一般回填料场地土层地震反应分析提供参考。

关键词: 安全停堆地震; 回填料场地; 地震反应分析; SHAKE 软件

中图分类号: TU435 文献标志码: A 文章编号: 2095-8676(2016)03-0112-04

## Soil Layer Seismic Response Analysis for a Nuclear Power Plant Backfill Site

FANG Jiangfeng, DU Long

(China Nuclear Power Design Co., Ltd., ShenZhen 518029, China)

**Abstract:** In this paper, used the engineering analogy method, obtain the dynamic parameters of rockfill materials. Calculated the seismic response of backfill site by SHAKE91 calculating program. The calculation results show that the response spectrum acceleration amplitude of backfill site surface increases significantly than the bedrock surface. And this paper can be a reference for seismic response analysis of general backfill site.

**Key words:** safe shutdown earthquake; backfill site; analysis of seismic reaction; shake procedur

核电厂在选址阶段开展地震安全性评价专题, 用于获得厂址基岩面的地震动参数, 作为核电厂的安全停堆地震(SSE或SL-2), 用于抗震I类建构筑物的抗震设计。但是对于一些较重要的建构筑物 and 抗震II物项, 如应急指挥中心、应急设施存储与燃油补给中心等, 由于场地条件局限, 可能会布置在土层场地或者回填料地上, 此时就需要计算该非基岩场地的土层地震反应, 获取场地的地震动参数用于抗震设计。核电厂中需要开展场地土层地震反应的子项体量较小、布置分散, 而计算所需的动力参数获取较为困难(需要采取大量的土样进行动力试验, 对于回填料场地, 需要进行原位动力大三轴试验, 试验周期长, 取得代表性较好的数据困难)。因此, 针对核电厂中的此类场地可通过工程类比

法, 选取合适的土层动力参数进行分析计算。

### 1 SHAKE91 程序原理及建模简介<sup>[1-3]</sup>

本次采用 SHAKE91 程序计算。一维等效线性化方法模型如图 1 所示。等效线性化方法可以分成两部分, 一是线性方程的频域波动求解, 二是土体

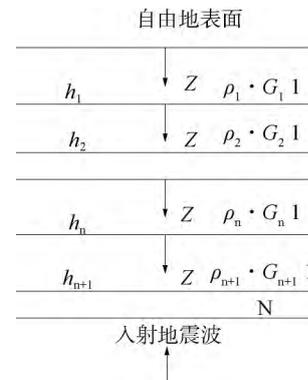


图 1 一维土层地震反应计算模型

Fig. 1 One-dimension soil layers seismic response calculation model

收稿日期: 2016-06-11

作者简介: 房江锋(1984), 男, 陕西西安人, 工程师, 硕士, 主要从事核电厂相关的岩土工程勘察设计工作(e-mail) fangjiaingfeng@cgnpc.com.cn.

非线性的等效线性化处理。对于完全线性弹性介质情况, 将计算基底入射波利用傅氏变换转化为一系列的谐波的叠加。在水平成层, 介质均匀情况下, 第  $n$  层层顶面处的加速度反应幅值  $A(f)$  及层中点处的剪应变幅值  $\gamma_n(f)$  为:

$$A_n(f) = A_{nf}A(f) = \frac{e_n + f_n}{e_N}A(f) \quad (1)$$

$$\gamma_n(f) = \gamma_{nf}A(f) = - \left( e_n e^{ik_n \frac{h_n}{2}} - f_n e^{ik_n \frac{h_n}{2}} \right) \frac{iK_n}{4\pi^2 f^2 e_N} A(f) \quad (2)$$

利用傅氏逆变换可求得在计算基底入射的暂态波  $a(t + z/C_N)$  作用下土层中介质的暂态地震反应。第  $n$  层土层顶面处的加速度反应及中点的剪切应变为:

$$a_n(0, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A_n(f) e^{i2\pi ft} df \quad (3)$$

$$\gamma_n\left(\frac{1}{2}h_n, t\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_n(f) e^{i2\pi ft} df \quad (4)$$

土样动力性能实验结果表明, 土的等效动剪切模量  $G$  与阻尼比  $\lambda$  随应变幅值变化显著, 他们可以表示成如下经验关系:

$$G = \bar{G}_d(\bar{\gamma}) G_0 \quad (5)$$

$$\lambda = \bar{\lambda}(\bar{\gamma}) \quad (6)$$

式中:  $\bar{G}_d(\bar{\gamma})$ 、 $\bar{\lambda}(\bar{\gamma})$  分别为动剪切模量的无量纲系数和阻尼比, 它们是等效滞回应变幅值  $\bar{\gamma}$  的函数, 可用实验来给出其对应的关系值,  $G_0$  为土体最大动剪切模量。

为了描述土体的应力—应变滞回特征, 在 SHAKE 程序中, 复剪切模量定义为:

$$G^* = \{ (1 - 2\zeta^2) + 2\zeta i \sqrt{1 - \zeta^2} \} \quad (8)$$

式中:  $\zeta$  为临界阻尼比, 与能量耗散和最大应变能有关。

因此, 在各土层反应的等效剪应变幅值  $\bar{\gamma}$  已知的情况下, 利用每一层土层中介质的动力复剪切模量  $G_n^*$  取代完全线性弹性土层地震反应分析式中的  $G_n$  后, 再结合其它参数, 可以计算出土层地震反应值。

## 2 场地岩土条件及计算模型

### 2.1 地层岩性

该场地为填方区, 回填厚度约 28 ~ 38 m 之间, 平均约 34 m。岩土工程勘察成果显示, 场地内主要岩土层为: (1) 第四系全新统 ( $Q_4$ ) 地层的人工回填

层 ( $Q_4^{ml}$ )、含砾粘性土 ( $Q_{2-3}^{el+dl}$ ); (2) 上白垩统—第三系的泥质粉砂岩。各地层描述如下:

1) 人工填土 ( $Q_4^{ml}$ ): 杂色, 以黄褐色为主, 主要厂区山体开挖的碎石含黏性土, 褐红色、暗紫色、灰白色, 稍密~密实, 成分以微风化灰质砾岩、砂砾岩碎块为主, 碎石呈棱角状, 分选性差, 混杂大量风化岩石碎屑和粘性土, 碎块石含量约 70% ~ 80%, 块径约 5 ~ 50 cm。

2) 含砾粘性土 ( $Q_{2-3}^{el+dl}$ ): 褐黄色—褐红色, 含 10% ~ 20% 的碎石、角砾, 砾石成份主要为砂岩、灰岩、硅质岩, 粒径不等, 粒径一般为 3 ~ 50 cm, 砾石磨圆度差, 呈次棱角状, 粘性土主要为粘土和粉质粘土, 无摇晃反应, 光滑, 干剪强度高, 韧性高, 可塑—硬塑。厚度 0.3 ~ 8.3 m, 平均厚度 2.8 m。

### 2.2 土层剪切波速

场地内岩土层剪切波速随深度的变化情况见图 2。

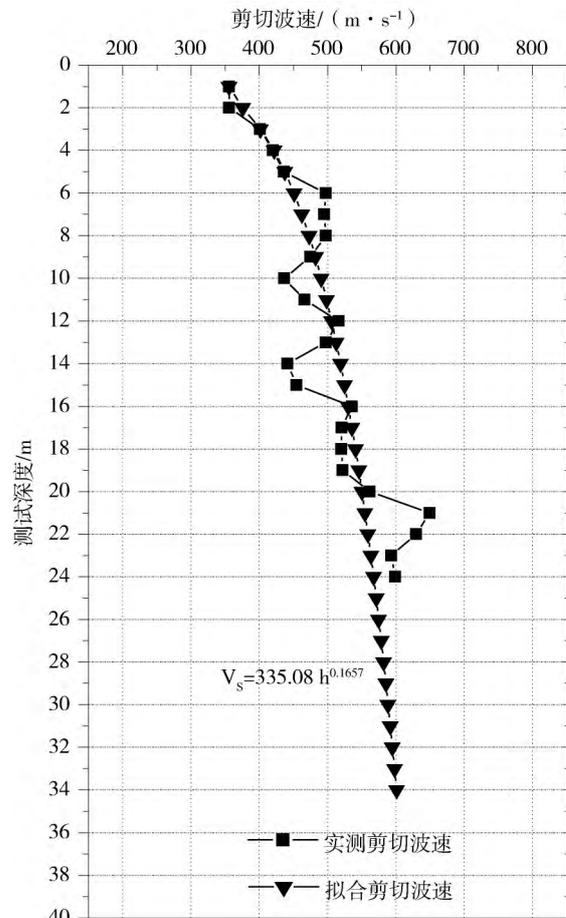


图2 土层剪切波速随深度的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of shear wave velocity with depth in soil layer

### 2.3 土层动力参数

细粒土料的动力特性前人开展了很多研究工作,但粒径较粗的填石料人们的研究相对较少。孔宪京等<sup>[4]</sup>进行了系列筑坝填石料大型动三轴试验,给出了模量比随动剪应变变化的均值平均值曲线及均值上、下界限值曲线,等效阻尼比均值平均线和上、下包线。

迟世春<sup>[5]</sup>等,结合孔宪京等<sup>[1]</sup>试验成果,以及国外文献的动力试验成果,将所汇总的填石料动模量比衰减的样本和阻尼比增长的样本拟合并求取平均曲线及上下各1倍、2倍均方差曲线。假定动模量比与阻尼比试验数据均服从正态分布,并通过概率统计分析,得出模量比衰减和阻尼比增长的上2倍方差曲线、上1倍方差曲线、均值曲线、下1倍方差曲线、下2倍方差曲线代表着填石料试验点落在该曲线下方的概率为98.86%、92.07%、50%、7.935%、1.14%。

本场地回填土的动力参数的选取主要参考迟世春等<sup>[4-6]</sup>的论文中填石料。回填土的动力参数见表1、图3和图4。

含砾粘性土的参数选取按照袁晓明等<sup>[7-8]</sup>论文

中黏土参数,计算参数按照埋深10~20 m黏土进行取值。含砾粘性土和基岩的动力参数见表2。

### 2.4 计算模型

对场地内钻孔揭露的土层厚度进行统计,平均厚度为34 m,取该平均厚度作为模型计算深度,回填地层分层厚度按1 m考虑。剪切波速取场地内跨孔波速测试结果的平均值(见图2),并通过场地剪切波速与深度的变化规律进行统计分析,对场地的剪切波速与深度的关系进行拟合,已获取深层土体的剪切波速,并建立对比模型。

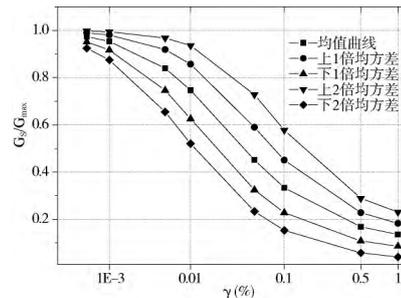


图3 回填土动剪切模量比与动剪应变的关系

Fig. 3 Relationship between dynamic shear modulus ratio and shearing strain of backfill soil

表1 回填土的动力参数

Tab. 1 Dynamic parameter of backfill soil

	$\gamma$ (%)	0.000 5	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1
$G_s/G_{max}$	均值曲线	0.973 43	0.953 139	0.839 627	0.746 511	0.451 184	0.333 413	0.167 931	0.135 38
	上1倍均方差	0.989 786	0.980 65	0.918 88	0.856 845	0.589 842	0.450 785	0.227 978	0.182 983
	下1倍均方差	0.951 621	0.917 092	0.745 826	0.625 783	0.324 656	0.228 213	0.107 946	0.085 823
	上2倍均方差	0.997 32	0.994 32	0.968 275	0.935 31	0.727 962	0.577 454	0.288 844	0.230 432
	下2倍均方差	0.924 888	0.875 02	0.654 632	0.520 205	0.233 419	0.152 978	0.057 964	0.040 87
$\xi$	均值曲线	0.013 663	0.016 626	0.030 539	0.041 414	0.083 603	0.109 016	0.172 774	0.196 397
	上1倍均方差	0.019 192	0.023 113	0.041 519	0.055 721	0.108 335	0.137 915	0.205 111	0.227 543
	下1倍均方差	0.007 947	0.009 91	0.019 01	0.026 134	0.054 737	0.073 082	0.124 499	0.146 148
	上2倍均方差	0.021 159	0.025 716	0.047 506	0.064 383	0.125 269	0.157 742	0.225 662	0.246 339
	下2倍均方差	0.003 487	0.004 827	0.010 871	0.015 541	0.034 517	0.047 191	0.086 261	0.104 889

表2 含砾粘性土和基岩的动力参数参数

Tab. 2 Dynamic parameter of gravelly clay and bedrock

土类	参数	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粘土	$G/G_{max}$	0.996	0.991	0.952	0.909	0.663	0.496	0.164	0.090
	$\zeta$	0.032	0.037	0.053	0.061	0.110	0.147	0.212	0.226
基岩	$G/G_{max}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$\zeta$	0.004	0.008	0.010	0.051	0.021	0.030	0.036	0.046

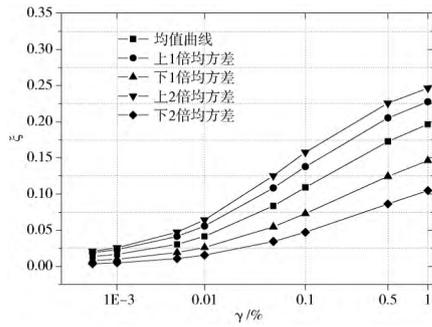
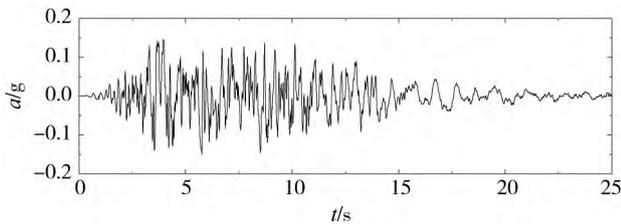


图4 回填土阻尼比与动剪应变的关系

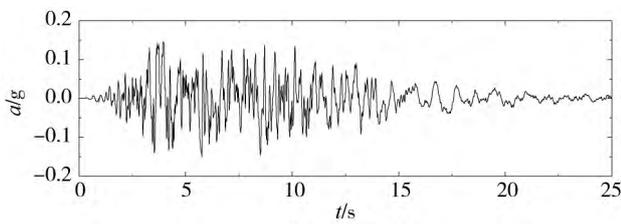
Fig. 4 Relationship between damping ratio and shearing strain of backfill

### 2.5 地震动输入

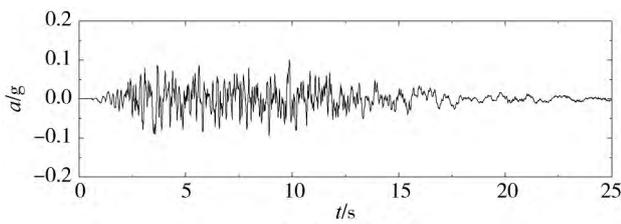
本厂址以 0.15 g 标定的水平向 RG1.60 标准反应谱作为厂址 SL-2 级设计基准地面运动基岩水平向加速度反应谱; 以 0.10 g 标定的竖直向 RG1.60 标准反应谱作为厂址 SL-2 级设计基准地面运动基岩竖直向加速度反应谱。图 5 所示分别为水平分量 1、水平分量 2 和竖向分量地震动时程。



(a) 水平分量1



(b) 水平分量2



(c) 竖向分量

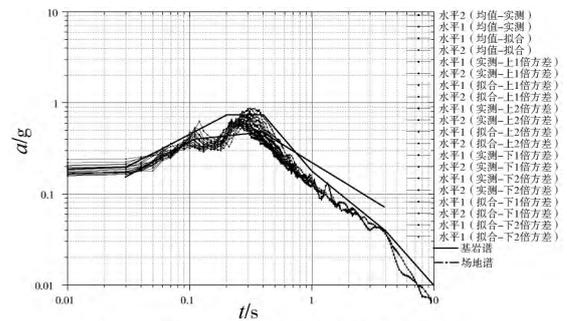
图5 输入地震动时程

Fig. 5 Curves of input acceleration ground motions

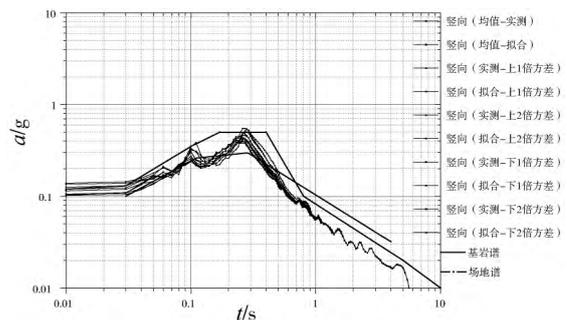
根据《工程场地地震安全性评价》(GB 17741—2005) 第 12.4 节的要求, 在进行场地地震反应计算时, 取基岩地震动时程幅值的 50% 作为一维土层地震反应计算模型的基底入射波输入量, 并假定地震波为从基岩面垂直入射。

### 3 计算结果分析

本次计算的计算模型参数采用实测数据和拟合数据, 未进行不确定性调整, 计算时回填土的动力参数分别选取上 2 倍方差曲线、上 1 倍方差曲线、均值曲线、下 1 倍方差曲线、下 2 倍方差曲线所对应的参数进行计算, 数据分别代表土体参数落在该曲线下方的概率为 98.86%、92.07%、50%、7.935%、1.14%。计算结果汇总见图 6。



(a) 场地 ∇0.00 m 水平加速度反应谱  $\zeta=0.05$



(b) 场地 ∇0.00 m 竖向加速度反应谱  $\zeta=0.05$

图6 土层地震反应计算结果

Fig. 6 Calculation results of soil layer seismic response

计算结果显示, 采用拟合波速计算的结果较实测波速计算结果略小, 两者差异不大; 厂址 SL-2 级设计基准基岩地面运动水平向峰值加速度为 150 gal, 经过土层地震反应后的地表峰值加速度按照选取参数的概率水平由高到低逐渐增大, 变化范围为 156 ~ 221 gal; 厂址 SL-2 级设计基准基岩地面运动 (下转第 126 页 Continued on Page 126)

规范总承包的分包管理。在实施过程,应建立定期的巡查机制,督促落实合同中关于总承包分包管理的相关要求,防止出现总承包商变成空壳、二传手的不良局面。促使总承包切实履行总承包的职责,严格把控核电工程质量。

## 5.2 防止总承包商项目部资源弱化

随着核电总承包模式的深入发展,核电项目爆发式的增长,其资源的争夺战也越演越激烈。资源是总承包项目成功的前提保证,没有优质资源,工程质量只能是空谈。目前国内具有核电总承包能力的供应商很少,往往是一个总承包商承担若干个核电建设项目,也就是所谓的多项目管理。而总承包公司优质资源有限,短时间也无法培育形成,这就形成了在同一个总承包商的各个项目部互相争夺资源,造成项目部资源弱化,实力下降,最终导致工程质量下降。要防范总承包商项目部资源弱化,主要应在合同阶段下功夫,制定相应条款来约束,保证其工程项目得到应有的优质资源。在工程建设过程,业主应定期的对总承包合同要求的资源进行核查,一旦发现与合同要求有差距,就应该及时反馈

并采取相应的纠正措施。让总承包项目的优质资源的监督管理常态化,确保资源满足工程的需要,也利于总承包商对资源进行均衡调配。

## 6 结论

核能是当今能源利用的方向,要利用好核能,就要首先确保核安全,可靠地核安全来源于工程的高质量。在总承包模式下面临着诸多监督管理的挑战,这要求管理人员统筹考虑,统一规划,构建好相应的监督管理机制,从机制上来保证核电工程的质量,从而确保核安全。

参考文献:

- [1] 中国质量协会. 全面质量管理 [M]. 3 版. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- [2] 中国质量协会. QC 小组基础教材 [M]. 2 版. 北京: 中国社会出版社, 2009.
- [3] 杨朝东. 核电工程总承包的质量管理 [J]. 项目管理, 2009 (2): 7-11.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 115 页 Continued from Page 115)

竖向峰值加速度为 100 gal, 经过土层地震反应后的地表峰值加速度按照选取参数的概率水平由高到低逐渐增大, 变化范围为 102 ~ 139 gal; 可见, 经土层的放大作用后地表反应谱加速度幅值有所增大。本场地回填施工质量得到有效控制, 且下 1 倍方差曲线、下 2 倍方差曲线的参数概率水平较低, 综合考虑以上因素, 可采用均值曲线参数的计算结果作为本场地的反应谱。

## 4 结论

本文采用工程类比法, 使用迟世春等统计的堆石料的动力参数拟合关系, 获取不同概率水平下回填土体的动力参数, 运用 SHAKE91 计算程序, 以某核电厂回填场地地震反应为例, 对场地土层进行地震反应分析计算。计算结果表明, 经土层的放大作用后地表反应谱加速度幅值增大明显, 并结合场地回填的质量控制情况, 给出了建议的场地反应谱。研究成果可为一般回填场地土层地震反应分析提供参考。

参考文献:

- [1] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 321-379.
- [2] 齐鑫, 靳超宇. 不同土层地震反应计算程序对比分析 [J]. 防灾减灾学报, 2012, 6(28): 9-15.
- [3] 李亚东, 关天定. 非线性地震反应程序对比及其适用工况 [J]. 广东土木与建筑, 2011, 1(1): 30-32.
- [4] 孔宪京. 筑坝填石料的等效动剪切模量与等效阻尼比 [J]. 水利学报, 2001(8): 20-25.
- [5] 迟世春. 土石坝料动力试验数据的一种统计公式 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 12(9): 5-8.
- [6] 房恩泽. 堆石料的模量阻尼试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 4(13): 173-176.
- [7] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2000, 12(20): 133-139.
- [8] 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, 4(24): 125-132.

(责任编辑 高春萌)