



# 基于 FLAC-2D 的斜坡式防波堤地震响应分析

郭士勇, 李声文

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 随着我国港口工程建设步伐向海外迈进, 高震地区防波堤地震稳定性问题变得尤为突出, 但国内分析防波堤地震响应的文献十分匮乏。基于 FLAC-2D 软件, 探讨几何模型建立、边界条件设置及阻尼选取, 对比对地基进行处理及未处理两种情况的地震响应结果, 为其它工程提供相关参考。

**关键词:** 斜坡式防波堤; 地震响应; FLAC-2D

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0064-05

## Seismic response analysis of rubble-mound breakwater based on FLAC-2D

GUO Shi-yong, LI Sheng-wen

(CCCC Fourth Harbor Engineering Consultants Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** With the pace of domestic harbor construction to overseas, the seismic stability problem of breakwater has become particularly prominent in high intensity earthquake area. But domestic references about how to analyze the seismic response of breakwater are insufficient. Based on FLAC-2D, some remarkable problems about geometrical modeling, boundary condition and applying damping are discussed and results of seismic response analysis in the cases of foundation treated and untreated are compared, which can serve as reference for similar projects.

**Key words:** rubble-mound breakwater; seismic response; FLAC-2D

目前, 国内外对地震作用下边坡稳定性分析主要有以下几种方法: 拟静力法、概率分析方法、数值分析方法和试验法<sup>[1]</sup>等。我国的水运工程抗震设计规范<sup>[2]</sup>采用拟静力法, 这种方法在高震地区会导致设计断面过于保守。而数值分析方法是目前采用最多的研究方法, 常用的数值分析方法是有限元法和有限差分法。FLAC 就是美国 ITASCA 公司基于有限差分法开发的一款商业化软件, 能对基坑、边坡、矿产及隧道等结构在各种外荷载作用下受力、变形、稳定及动力特性等方面做出全面的分析<sup>[3]</sup>。本文基于实际工程, 采用 FLAC-2D 5.0 分析某斜坡式防波堤的地震稳定性, 并从几何模型建立、边界条件设置、阻尼参数及结果对比等几个方面进行讨论。

### 1 工程概况

某海外防波堤工程位于中美洲加勒比海沿岸, 当地地震基岩峰值加速度为  $0.30g$ 。根据勘察资料, 该工程地质主要以砂质为主, 局部存在黏土层, 表面细砂层密实度较差, 在地震作用下存在液化风险。拟建防波堤采用抛石斜坡式结构, 堤顶高程  $5.1\text{ m}$ , 顶宽  $8.6\text{ m}$ , 典型断面泥面高程  $-12.5\text{ m}$ , 坡面斜率为  $1:1.5$ , 护面块体采用  $5\text{ t}$  扭王字块体。垫层及棱体分别采用  $250\sim 500\text{ kg}$  和  $800\sim 1\,000\text{ kg}$  块石, 堤心采用  $1\sim 500\text{ kg}$  开山块石。为了保证防波堤安全, 对表面细砂层进行振冲密实处理。防波堤典型断面见图 1。

收稿日期: 2013-11-21

作者简介: 郭士勇 (1985—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口及航道工程设计。

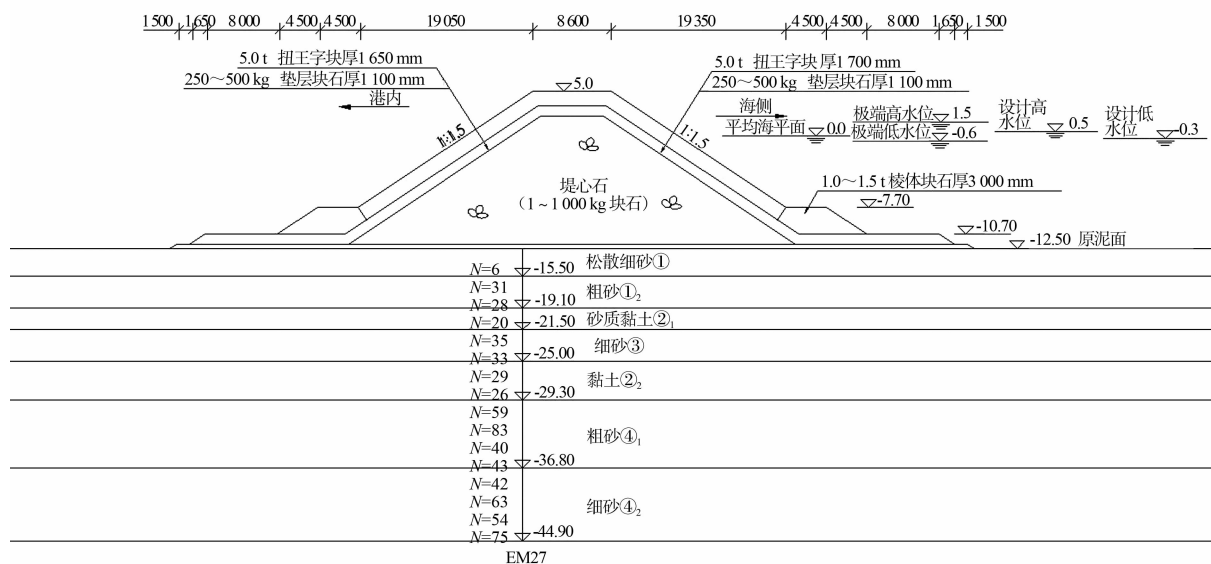


图 1 防波堤典型断面

## 2 数值模型的建立

### 2.1 几何模型

在进行地震分析时,模型的网格大小控制着地震波传播的数值精度。Kuhlemeyer 等<sup>[4]</sup>的研究表明,数值模型最大网格尺寸  $L_{max}$  必须要小于输入地震波最小波长  $\lambda$  的  $1/8 \sim 1/10$ , 而地震波波长  $\lambda$  与土体剪切波速  $C_s$  及地震波频率  $f$  有关, 即:

$$L_{max} \leq \left( \frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) \lambda \quad \text{且} \quad \lambda = \frac{C_s}{f} \quad (1)$$

本文计算中,输入地震波最大频率为 10 Hz。土体最低剪切波速为 192 m/s; 因此,计算允许最大网格尺寸为 1.92 m, 建模最大网格尺寸为 1.2 m。计算模型共剖分 16 430 个网格和 19 741 个结点, 见图 2。模型中采用的材料参数及本构关系见表 1。

表 1 模型材料参数及本构关系

地层	泊松比 $\nu$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	剪切波速 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	剪切模量 $G / \text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	粘聚力 $C / \text{kPa}$	本构关系
细砂④ <sub>2</sub>	0.30	2 040	406	$3.36 \times 10^8$	42.0	0	Mohr-Coulomb
粗砂④ <sub>1</sub>	0.30	2 005	378	$2.86 \times 10^8$	40.0	0	Mohr-Coulomb
黏土② <sub>2</sub>	0.49	2 050	274	$1.54 \times 10^8$	25.2	96.7	Mohr-Coulomb
细砂③	0.30	1 980	290	$1.67 \times 10^8$	32.0	0	Mohr-Coulomb
砂质黏土② <sub>1</sub>	0.49	2 040	250	$1.28 \times 10^8$	23.4	80.3	Mohr-Coulomb
粗砂① <sub>2</sub>	0.30	1 950	219	$9.35 \times 10^7$	32.0	0	Mohr-Coulomb
松散细砂①(处理后)	0.30	1 950	192	$7.19 \times 10^7$	28.0	0	Mohr-Coulomb
松散细砂①(处理前)	0.30	1 950	172	$5.77 \times 10^7$	24.0	0	Finn model
块石	0.30	2 000(1 700)	320	$1.74 \times 10^8$	42.0	0	Mohr-Coulomb
扭王字块	0.30	1 650(1 140)	500	$2.85 \times 10^8$	45.0	5.0	Mohr-Coulomb

注: 括号中为材料水上密度。

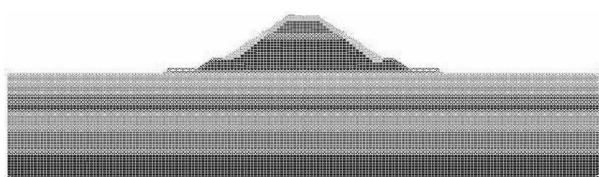


图 2 防波堤动力数值分析计算模型

## 2.2 边界条件

### 2.2.1 静态边界

针对动力分析中地震波在模型边界的反射问题, Kuhlemeyer 等<sup>[4]</sup>提出了静态边界条件, 具体做法是在模型边界设置自由阻尼器从而实

现吸收入射地震波的目的。但由于模型边界上的阻尼是根据速度分量计算得到的，如果再施加速度就会使静态边界失效，因此，地震波通过用速度时程转换的应力时程输入到模型中，转换关系如下：

$$\sigma_s = -2\rho C_s v_s \quad (2)$$

式中： $\sigma_s$ 为施加在静态边界上的剪应力（kPa）； $v_s$ 为切向速度分量（m/s）。

### 2.2.2 自由场边界

在斜坡堤数值模型中，模型侧面的边界条件须考虑为没有地面结构时的自由场运动以便模拟无限边界。FLAC-2D 通过在模型侧面生成网格的方法来实现这种自由场边界。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。因此，地震波在边界上也不会产生扭曲。

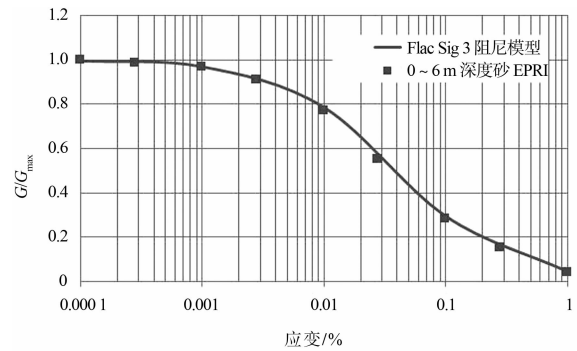
## 2.3 阻尼设置

### 2.3.1 滞后阻尼

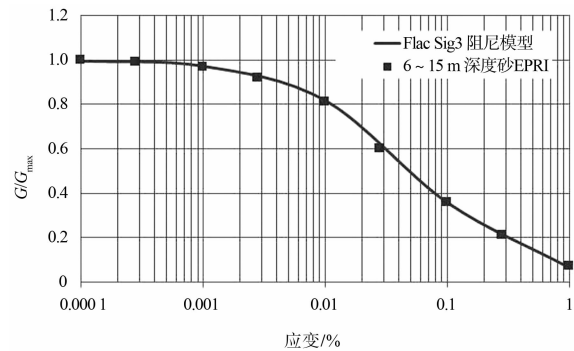
FLAC-2D 将土动力学中岩土体的滞后特性用阻尼的形式加入到程序中，通过使用模量衰减系数来描述土体的非线性特性。FLAC-2D 提供了4种滞后阻尼模型，这4个模型均需要根据循环剪切试验来得到模量折减曲线并进行回归拟合分析。本计算采用 Sign3 滞后阻尼模型，并利用 EPRI<sup>[5]</sup>及 Vucetic 等<sup>[6]</sup> 相关数据进行拟合，相关结果见表2及图3。

表2 Sign3 滞后阻尼参数

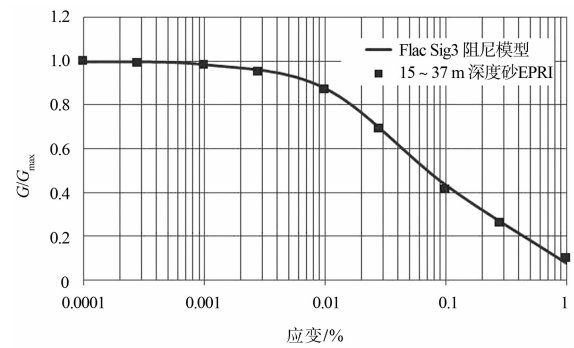
地层	$a$	$B$	$X_0$
细砂④ <sub>2</sub>	1.00	-0.45	-1.12
粗砂④ <sub>1</sub>	1.00	-0.45	-1.12
黏土② <sub>2</sub>	1.00	-0.47	-0.85
细砂③	1.00	-0.48	-1.28
砂质黏土② <sub>1</sub>	1.00	-0.47	-0.85
粗砂① <sub>2</sub>	1.00	-0.46	-1.40
松散细砂①	1.00	-0.46	-1.40
块石	1.00	-0.45	-0.98
扭王字块	1.00	-0.45	-0.98



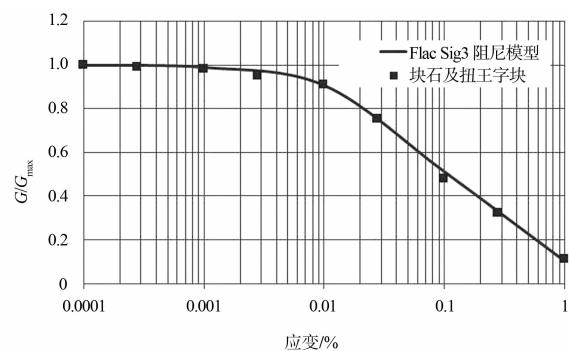
a) 0~6 m深度砂



b) 6~15 m深度砂



c) 15~37 m深度砂



d) 黏土

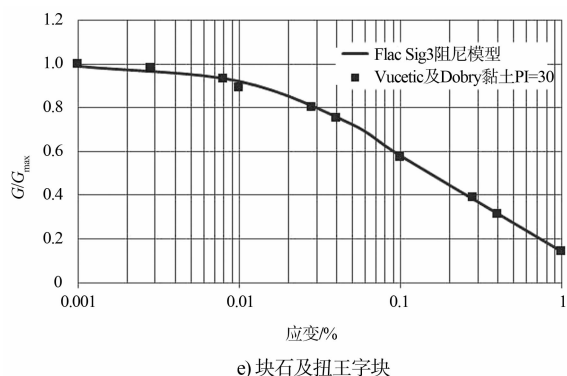


图3 滞后阻尼参数拟合曲线

### 2.3.2 瑞利阻尼

瑞利阻尼是与频率相关的,但是在一定的频率范围内,瑞利阻尼基本又与频率无关。对于任何动力问题,可以对速度时程进行谱分析得到速度谱与频率之间的关系。经验上直接选取岩土体的阻尼比参数为0.5%。

### 2.4 地震波的输入

本工程地震波是源于该工程地震分析报告中人工合成的地震波,其谱密度函数为IBC<sup>[7]</sup>中地震加速度谱。地震波加速度时程曲线采样步长为0.005 s,总时程为16.0 s,见图4a)。利用FLAC-2D内部函数对地震加速度曲线进行谱分析、滤波、积分及基线校正等一系列操作后得到地震速度时程曲线,见图4b),并利用式(2)转化为应力输入到模型中。

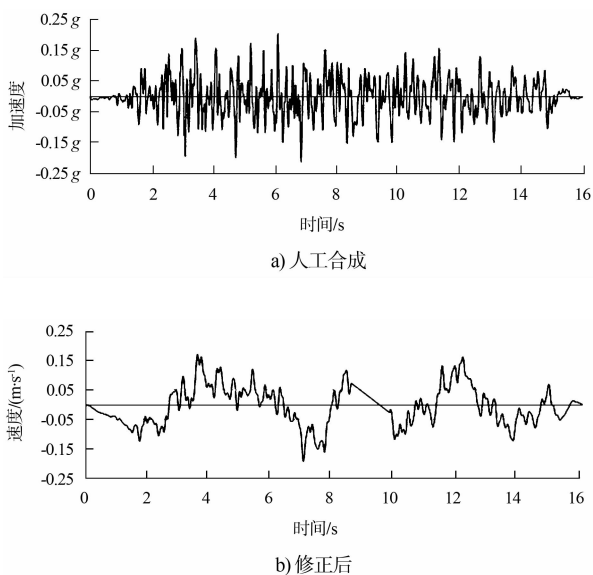


图4 地震速度时程曲线

### 3 结果分析

图5显示了经过地基处理后防波堤水平向位移、竖向位移及地震动剪应力的计算结果。从图中可以看出,防波堤最大水平位移达到13.6 cm,其主要发生在防波堤两侧坡脚处,而竖向位移主要发生在防波堤的堤顶处,最大达到了14.1 cm,整个防波堤位移呈对称分布。地震动剪应力主要分布在防波堤堤底处,呈圆弧状,最大处达到了0.056 MPa。

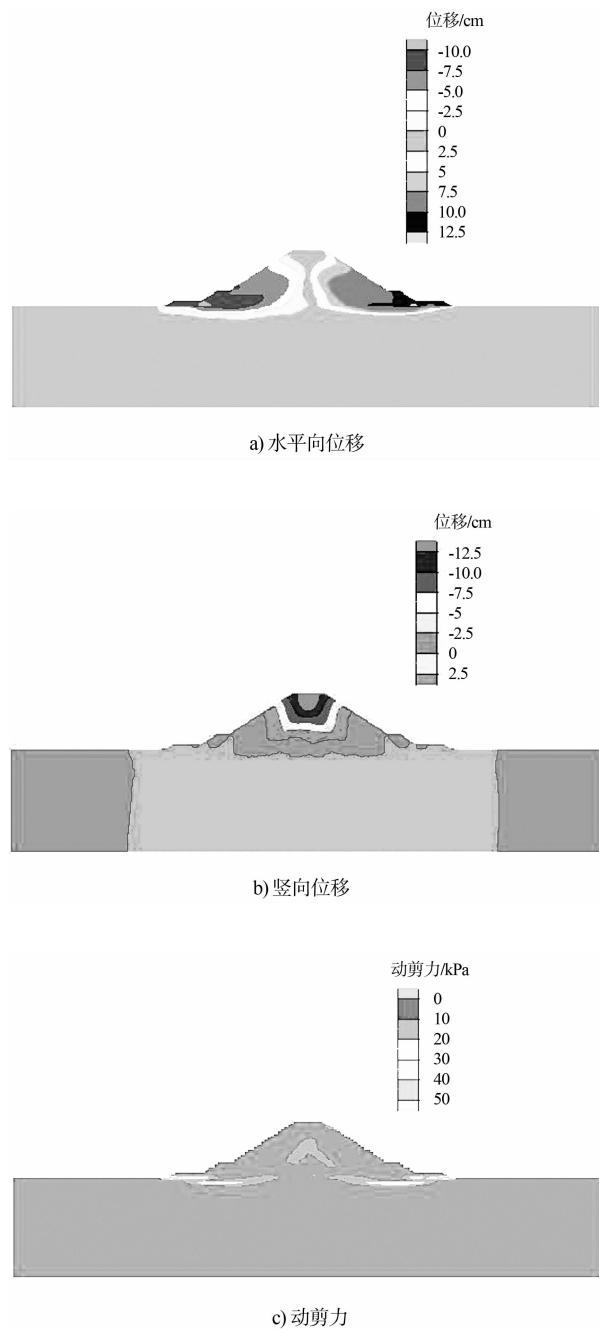


图5 地基处理后地震参数

图 6 显示了未经地基处理后防波堤水平向位移、竖向位移及地震动剪应力的计算结果。从图中可以看出，由于表层地基发生液化，防波堤整体形态发生较大变化，防波堤最大水平位移达到 3.35 m，而竖向位移也达到了 2.78 m，整个防波堤位移分布也并不对称。在防波堤左半部形成了明显的地震动剪应力带，若地震波再持续，地震动剪应力将继续增长，防波堤将发生大规模坍塌。

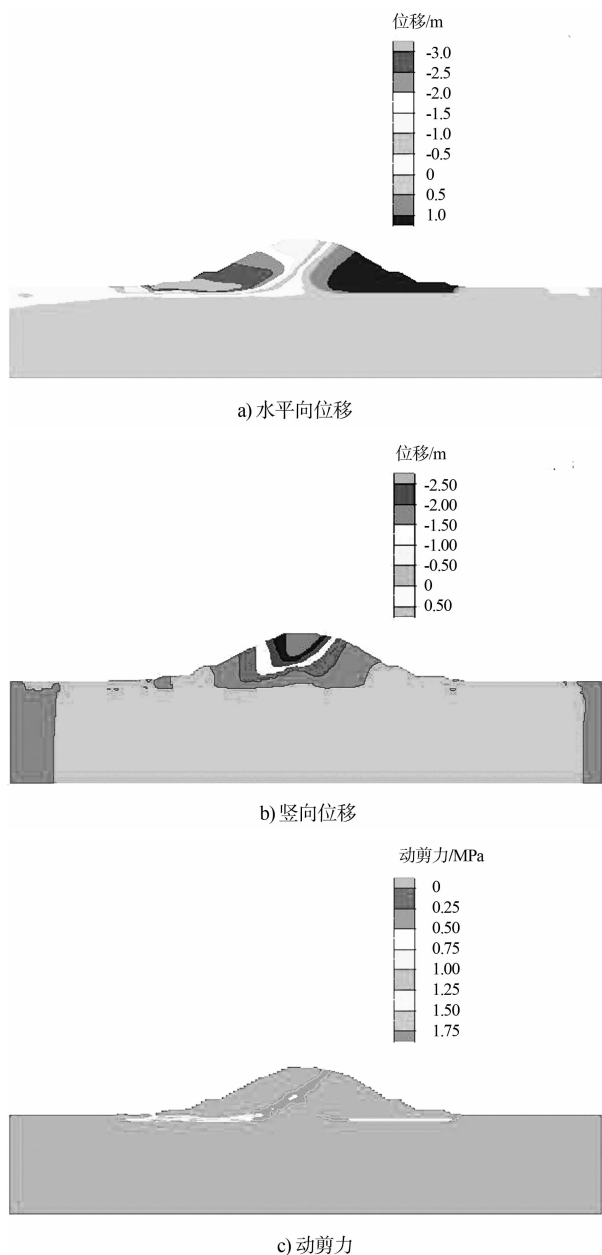


图 6 地基未处理地震参数

### 4 结语

1) 应根据土体剪切波速及地震波频率来确定合适的模型网格的尺度，在保证计算精度的前提下不致计算时间过长。

2) 可通过设置两侧的自由场边界以及底部的静态边界来确保地震波能够有效施加到模型上，不会在模型的底部及两侧产生反射。

3) 利用已有文献中土体循环剪切试验数据来拟合土体的滞后阻尼参数，通过模量衰减系数来模拟土体非线性特征。

4) 计算结果表明，在地震作用下，防波堤水平位移主要发生在坡脚处，竖向位移主要发生在堤顶处；堤身内部动剪应力分布形状显示了防波堤滑裂面呈圆弧形。

5) 通过对地基处理和未处理两种工况计算结果的对比，明确了地基处理的必要性。

### 参考文献:

- [1] 刘立平. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(3) : 83-87.
- [2] JTS 146—2012 水运工程抗震设计规范 [S].
- [3] Itasca Consulting Group Inc. FLAC Version 5.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua Users Manual) [M]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [4] Kuhlemeyer R L, Lysmer John. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. Journal of Soil Mech & Foundations Div: ASCE, 1973, 99(5) : 421-427.
- [5] Electric Power Research Institute. Method and Guidelines for Estimating Earthquake Ground Motion [R]. Hillview: Electric Power Research Institute, 1993.
- [6] Vucetic M, Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response [J]. Journal of Geotechnical Engineering: ASCE, 1991, 117(1) : 89-107.
- [7] IBC 2012, International Building Code [S].

( 本文编辑 武亚庆 )