

地震作用下边坡的动态响应规律研究

毕忠伟^{1, 2}, 张 明¹, 金 峰¹, 丁德馨²

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 南华大学 城市建设学院 湖南, 衡阳 421001)

摘 要: 以印度 Koyna 地震为输入动荷载, 利用 ABAQUS 软件建立了一个均质土坡动力数值分析模型。在此基础上, 分析了该地震作用下边坡的动力响应规律。结果表明, 边坡对地震加速度存在放大作用, 坡顶水平向峰值加速度为 1.0 m/s^2 , 约为输入地震峰值加速度的 3 倍; 坡顶竖向峰值加速度为 0.8 m/s^2 , 约为输入地震峰值加速度的 3.2 倍; 在当土体发生破坏以后坡体位移随地震持时的增加而增大, 存在变形累积效应。研究结果有助于进一步揭示边坡在地震作用下的失稳机制。

关 键 词: 边坡工程; 动态响应; Koyna 地震; ABAQUS

中图分类号: TD 322^{+.4}

文献标识码: A

Dynamic response of slopes under earthquakes

BI Zhong-wei^{1, 2}, ZHANG Ming¹, JIN Feng¹, DING De-xin²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Taking Indian Koyna earthquake as input dynamic loads, a dynamic numerical analysis model of soil slopes is established by ABAQUS program. Based on this, the dynamic response under earthquake is analyzed. It is shown that the slope has an amplification effect on earthquake acceleration. The horizontal peak acceleration in the slope roof is 1.0 m/s^2 ; approximately 3 times of the inputted earthquake peak acceleration; the vertical peak acceleration in the slope roof is 0.8 m/s^2 ; approximately 3.2 times of the inputted earthquake peak acceleration. When the soil body is damaged, the slope body displacement will be enlarged along with the increase of the earthquake duration time, which causes a distortion cumulative effect. The results are helpful to further researches on the slope instability mechanism under earthquake.

Key words: slope engineering; dynamic response; Koyna earthquake; ABAQUS

1 引 言

地震是触发边坡失稳的重要原因之一。我国多山地、多地震的地理地质条件不可避免地带来了大量和地震作用有关的边坡问题^[1-3]。随着西部大开发战略的实施和国民经济的持续发展, 相当多的大型基础设施如南水北调西线、三峡工程等水利枢纽工程以及山区高速公路和铁路客运专线将建在强震区, 岩土边坡的地震稳定性问题日趋突出^[4]。

目前, 边坡地震稳定性分析的常用方法有规范推荐的拟静力法、滑块分析法以及动力有限元法, 这些方法都还没有达到成熟的水平^[5]。为了进一步了解地震作用下边坡失稳机制, 为边坡地震稳定性

分析提供科学的依据, 首先必须对地震作用下边坡动力响应特征和变化规律进行深入的研究。边坡的动力响应包括加速度、速度、位移、动应力和动应变响应等, 其中边坡的加速度反应及其分布规律是评价边坡地震动力响应性状的基本资料。边坡的地震动力响应与边坡所遭受的地震动特性密切相关, 地震动特性一般包括地震动强度、频谱特性和持时等 3 个方面, 其对边坡动力响应的影响规律是一个十分重要的问题^[6-8]。

ABAQUS 软件可以很好地解决非线性动力分析问题, 已经成功地应用于岩土开挖、边坡稳定性及地震动力响应分析等诸多领域。本文建立了一个均质土坡模型, 利用 ABAQUS 软件进行了动态参

数的数值模拟,对边坡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的影响进行了一些尝试性的探讨。

2 边坡动力分析模型及参数选取

2.1 计算模型

为了探讨边坡地震动力响应的一般规律,采用一个均质土坡模型,取长 $\times$ 高=105 m $\times$ 40 m的区域为模拟范围,边坡高为20 m,坡角为45°,坡顶后缘长度为55 m。对边坡做有限元网格划分,得到节点3 059个,单元2 800个,如图1所示。

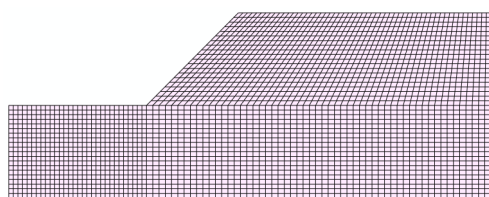


图1 边坡的网格划分
Fig.1 Mesh generation of slopes

2.2 物理力学参数

为充分反映地震动参数对边坡动力响应的影响,模型采用单一的均质土层,物理力学参数见表1。计算中材料为弹塑性材料,分别跟踪坡脚点、破面中点和坡顶点的位移和速度。

表1 土体力学参数表
Table 1 Mechanical parameters of soil

参数	密度 /(g/cm ³)	弹模 /MPa	体模 /MPa	剪模 /MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)	阻尼
数值	2.07	78.4	50.4	29.8	0.31	13.1	28	0.02

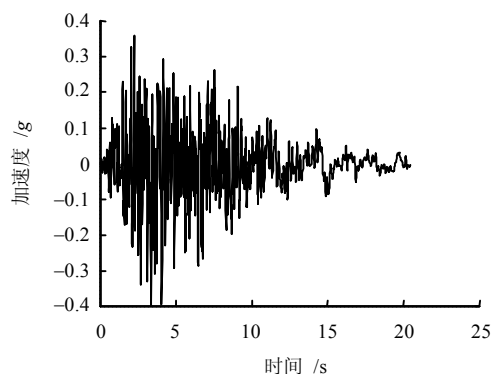
2.3 边界条件

对边坡这样的半无限体进行模拟时,必须处理实际上趋于无穷远的边界问题^[9-10]。静态分析所采用的固定边界或弹性边界,在动力分析中将导致向外传播的波反射回模型,且不允许必要的能量发散。目前,解决动力问题边界条件设置的通用方法有:简单截断边界、黏滞边界、透射边界和边界元及无限元方法等,设置人工边界条件在动力分析中应用时,需要把模型的边界取得足够远,范围取得足够大,从而使边界反射的影响尽可能小。但具有半无限开放的地质体边坡,目前还不清楚模型究竟取多大才能消除边界的影响,同时扩大边界范围大大增加了数值模拟计算时间。本文采用 ABAQUS 在动力分析中的静态边界和自由场边界,模型在底

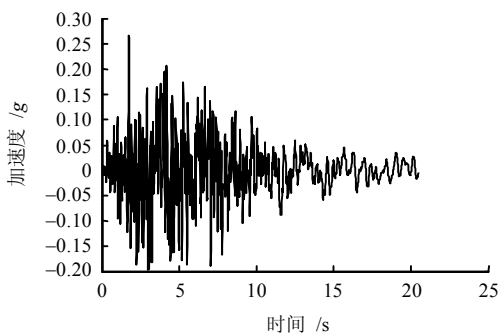
面采用静态边界,四周采用自由场边界。本构模型和屈服准则分别采用理想弹塑性本构模型和 D-P 模型强度准则。

2.4 地震荷载

为模拟地震动参数对边坡动力响应的影响,输入 1976 年发生在 Koyna 地区的地震波进行考虑。本文地震加速度按照实际场地采用水平方向和垂直方向地震波共同作用于边坡基底底部,地震波计算时间取 10 s,水平向最大加速度为 0.315 m/s²,竖向最大加速度为 0.26 m/s²。加速度-时程分布如图 2 所示。



(a) 水平方向



(b) 竖直方向

图2 基底输入加速度历程
Fig.2 Acceleration input process on the base

3 地震作用下边坡动力响应规律

首先进行自重静力平衡,本例的地应力平衡很容易获取,初始位移在 10⁻⁸ 数量级,在此基础上施加 Kayno 地震荷载。

3.1 位移场分布

跟踪边坡的位移变化(如图 3)可以发现,在 0~4 s 之间,位移不随地震的持时而发生改变;在 4 s 左右,边坡坡面向临空面的水平侧向位移在地震荷载加速度最大值附近达到最大值(11.36 mm),其

后位移值随地震波呈现波动变化, 但有逐渐增大的趋势。可见土体在地震中, 如果处于弹性阶段时, 最大位移表现为地震最大加速度对边坡土体破坏造成的结果, 而当土体进入塑性以后, 变形开始累积 (如图 4)。

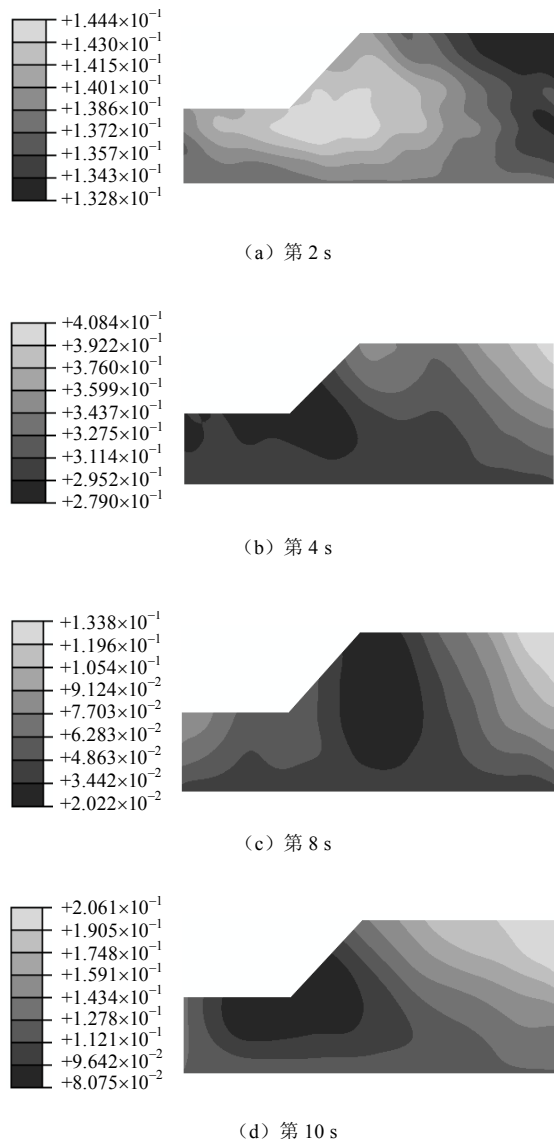


图 3 不同时刻的位移云图

Fig.3 Displacement nephogram at different times

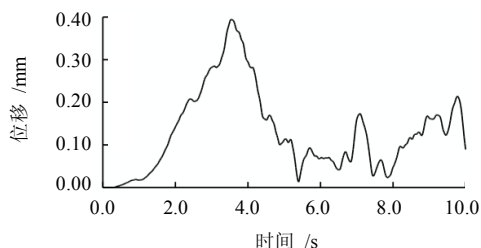


图 4 坡面中点位移-时程图

Fig.4 Displacement curve of the middle point in the slope surface

3.2 加速度响应

为了描述地震作用下边坡加速度响应规律, 绘制坡顶处测点的加速度-时程曲线, 将坡顶加速度时程曲线与边坡底部加速度-时程曲线进行对比。图 5 给出了坡顶加速度的变化规律。从图中可以看出, 在地震过程中, 坡顶水平方向峰值加速度为 -1.0 m/s^2 , 约为输入峰值加速度的 3 倍; 坡顶垂直方向峰值加速度为 0.8 m/s^2 , 约为输入地震峰值加速度的 3.2 倍。

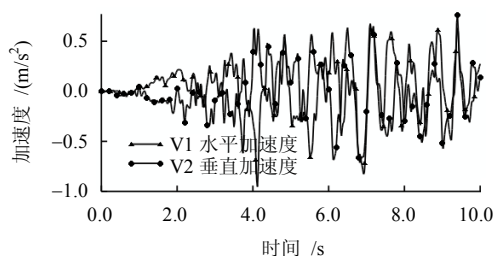


图 5 坡顶水平加速度-时程图

Fig.5 Horizontal acceleration curves in the slope roof

3.3 地震波频谱特性与坡体的放大作用

上述加速度响应规律可归结为坡体对输入地震波的垂直放大作用和临空面放大作用, 其垂直放大作用可从地震波频谱特性变化规律作出解释, 临空面放大作用可从地震波在界面发生的反射现象给予探讨。由于土体自身材料阻尼的存在, 本文阻尼为 0.02, 阻尼使得土体能吸收一部分波的能量, 对高频段的地震波存在滤波作用; 另外, 土体能对地震波低频段的能量起到放大作用。因此, 输入地震波经过模型土介质传播后, 其频谱特性发生了明显的改变。坡体由下到上各点对应的加速度傅氏谱谱值在 $2.5 \sim 10 \text{ Hz}$ 范围逐内渐减小, 在 $1 \sim 2.5 \text{ Hz}$ 范围内逐渐变大。

由弹性波散射理论可知, 坡底垂直入射的波传播到坡面时将产生波场分裂现象, 分解为同类型的反射波和新类型的反射波 (转换波), 各种类型的波相互叠加形成复杂的地震波场, 使得加速度峰值在坡面和坡顶靠近坡肩段急剧增大。

3.4 持时的影响

持时是地震的重要参数, 是导致结构破坏的重要因素。本文采用 Koyna 作为输入荷载, 持时 10 s。不同时刻的位移云图及加速度-时程图可看出, 持时对加速度峰值响应的影响并不明显, 而对位移的影响很大, 位移存在累积效应, 在 4 s 以后随着时间

的增长而增大。

4 结 论

利用 ABAUQS 对地震荷载作用下均质土坡的响应规律进行了数值模拟,以 Koyana 地震作为输入荷载,对边坡的动力反应(如加速度、位移等)随时程的变化而发生的响应进行了研究,建立的模型能够很好地实时反映边坡的地震反应情况。依据边坡动力反应过程中的大变形、塑性区域贯通情况等可以对边坡的稳定性作出分析和判断。为相关工程问题的分析提供了参考价值。

值得指出的是,边坡在地震作用下的动力响应是一个十分复杂的问题,同时影响边坡动力响应的因素多种多样。本文的结论基于一个均质土坡模型,没有考虑边坡形态、坡体材料等的影响,因此,对边坡在地震作用下的动力响应特征和变化规律还需要进一步的研究。

致谢:感谢合作导师张楚汉院士对本文的指导!

参 考 文 献

- [1] 陈昌凯,阮永芬,熊恩来. 地震作用下边坡稳定的动力分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1054—1057.
- [2] 王成虎,何满潮,刘墨山. 某水电站高边坡在地震作用下的稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 249—251.
- [3] 徐光兴,姚令侃,李朝红. 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.
- [4] 李海波,肖克强,刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385—2394.
- [5] 张友锋,袁海平. FLAC3D 在地震边坡稳定性分析中的应用[J]. 江西理工大学学报, 2008, 29(5): 23—26.
- [6] 王义锋,郑文棠,石崇. 岩质高边坡的地震时程响应分析[J]. 三峡大学学报(自然版), 2008, 30(3): 1—5.
- [7] 刘红帅,薄景山,刘德东. 岩土边坡地震稳定性评价方法研究进展[J]. 防灾科技学院学报, 2007, 9(3): 20—27.
- [8] 刘汉龙,费康,高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553—556.
- [9] 唐洪祥,邵龙潭. 地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1318—1324.
- [10] 祁生文. 单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 518—523.