

土质边坡剖面上动力响应异常点 与潜在滑动面位置的关系研究

任自铭, 冯仲林, 殷世林

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:通过数值分析对土质边坡动力响应规律进行研究,发现在土质边坡剖面上动力响应参数分布异常的地方跟通常认为的潜在滑动面有很好的对应关系,说明在坡体内发生较大剪应变处土体的动力特性可能已经发生改变,从而使动力传递异常。

关键词:动力响应; 剪应变集中区; 动力特性; 土质边坡; 滑动面

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)01-0021-05

Relationship between the Anomalous Points of Dynamic Response and the Location of Potential Sliding Surface on Section of Soil Slope

REN Zi-ming, Feng Zhong-lin, Yin Shi-lin

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Using numerical analysis on the law of dynamic response of soil slope, it is found that there is a good corresponding relationship between the anomalous points of dynamic response and the location of potential sliding surface on soil-slope section. It shows that the dynamic property of soil where high shear strain has happened may have changed in the slope, and caused the dynamic transmission abnormal.

Key words: Dynamic responses; Concentrated region of shear strain; Dynamic property; Soil slope; Sliding surface

0 引言

边坡动力问题历来是岩土工程和地震工程中关心的重点问题之一,边坡动力响应研究是边坡动力问题研究的重要方面。

地震时地面运动方向是任意的,所以边坡所承受的地震动荷载的作用方向也是任意的。但因为边坡失稳是向临空面的滑移、垮塌,所以水平向外方向的地震作用是斜坡破坏的主要原因^[1]。地震作用的表征因子很多,例如位移、速度、加速度等。根据祁生文等的研究^[2],在地震动作用下边坡对地震作用在竖向和水平向均存在放大作用,而且它们三者的峰值相对坡脚的放大系数在边坡剖面上的分布规律是有一定差异的。但是因为加速度值是一个过程值,可根据它计算出动应力、动应变等,所以通常被

认为是地震响应的控制指标。

本文通过 FLAC^{3D}采用时程分析法对不同坡高和坡度的边坡在不同烈度的地震作用下的动力响应做了大量的数值模拟,把边坡剖面上各监测点在水平向坡外方向上的加速度峰值(PGA)作为主要控制参数,并做对比分析,发现边坡剖面上 PGA 分布异常点与潜在滑动面位置存在很好的对应关系

1 FLAC^{3D}动力计算方法

1.1 边界条件的设置

FLAC^{3D}中求解动力问题的边界条件设置有远置人工边界(截断边界)和粘滞边界两种。如果采用截断边界,为使其对计算结果产生的影响变小,就要

收稿日期:2008-04-18

作者简介:任自铭(1981-),男(汉族),河南禹州人,硕士,助工,主要从事路桥设计。

求把模型的边界取得足够远,把模型的范围取得足够大,从而使边界反射的影响尽可能的小。由于边坡是自然地质体的一部分,其模型究竟取多大才能消除边界的影响,目前还不清楚,所以采用远置人工边界条件的办法不可取。粘滞边界通过在边界的法线方向和水平方向上设置独立的粘壶得以实现,以便吸收来自模型内部的人射波。这种方法易于在时域进行操作,在有限元和有限差分中的有效性已经被证明^[3]。

在 FLAC^{3D} 中可用粘滞边界有两种,即安静边界(Quiet Boundaries)和自由场边界(Free-field Boundaries)。安静边界完全吸收向外传递的波,而自由场边界既可保持边界不反射波的属性,并且对外向传递的波适当地吸收。主网格的侧边界与自由场边界通过黏性缓冲器结合起来,来自自由场网格的不平衡力施加到主网格边界上,这样,平面波向上传递时就不会在边界失真^[4-5]。

一般情况下,边坡模型底面设置安静边界,模拟基础下部无限深的区域;周边采用自由场边界,与底面的安静边界结合使边坡基础部分置于一个半空间无限的自然地质体内,以更接近实际。

1.2 土体力学模型和屈服准则

在动荷载作用下土的变形包括弹性和塑性变形两部分。动荷载较小时主要为弹性变形,动荷载增大时塑性变形逐渐产生和发展。

数值模拟中,采用理想弹塑性本构模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则,屈服函数如下:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma' \quad (2)$$

式中 σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; φ 为摩擦角; c 为粘聚力; σ' 为土体抗拉强度;

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

当土体内某一点应力满足 $f_s < 0$ 时,发生剪切破坏;当满足 $f_t > 0$ 时,发生拉伸破坏。

1.3 动荷载的施加

动力模拟采用时程分析法。由于模型底面设置安静边界,所以输入地震动荷载只能为应力时程。一般研究资料会给定加速度波,可通过时域积分得到速度时程,再通过下式转换得到应力时程由模型底面输入^[4]:

$$\begin{cases} \sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \\ \sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \end{cases} \quad (4)$$

其中: ρ 为材料密度; C_p 为 P 波波速; C_s 为 S 波波

速; v_n 为质点法向速度; v_s 为质点切向速度; σ_s 为切向应力; σ_n 为法向应力。

2 FLAC^{3D} 计算方法的振动台试验验证

2.1 试验设备与模型

本次试验的激振设备是大型电液式地震模拟振动台,台面尺寸为 $4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,承重达 25 t。激振频率为 $0 \sim 15 \text{ Hz}$;最大输出加速度 1.2 g ;传感器选用 CS-LAS 式加速度计;采用自动采集设备同步记录试验数据。

本试验模型箱内部净尺寸 $4 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),利用高强合金钢制剪切槽组装而成。内套特制橡胶膜套筒,减小振动波的反射。兼顾振动台负载能力及模型箱尺寸,本实验几何尺寸相似比取为 10,模型中央横截面具体尺寸及坡面加速度计(图中填充的点)布置如图 1 示,自下而上编号为 1、2、3、4、5、6,台面加速度计编号为 0,加速度计均水平放置。

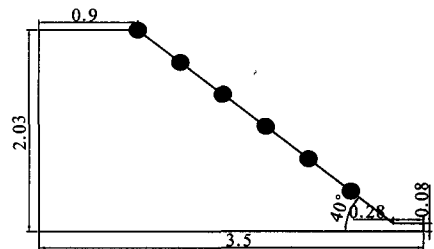


图 1 试验模型中截面尺寸及测点布置图

Fig. 1 The section of test model and distribution of sensors.

2.2 试验结果统计

由相似率计算结果知,模型在以 $10^{\times} \approx 5.62$ 为相似比压缩的加速度波的激励下的动力响应与原型在原波激励下的动力响应一致。

实验荷载采用根据场地地震反应谱人工合成的加速度波压缩 5.62 倍生成的压缩波,峰值分别为 0.065 g 、 0.253 g 和 0.471 g ,压缩时幅值不变。试验过程中动态采集各测点响应时程,统计施加荷载加速度峰值为 0.065 g 和 0.253 g 时各测点的响应峰值。

2.3 数值模拟计算结果

把图 1 中尺寸均放大 10 倍,材料参数根据试验数据及相似率要求用 FLAC^{3D} 建模计算。底面设安静边界,四周设自由场边界,模型如图 2。

用峰值为 0.065 g 和 0.253 g 的原波积分得到

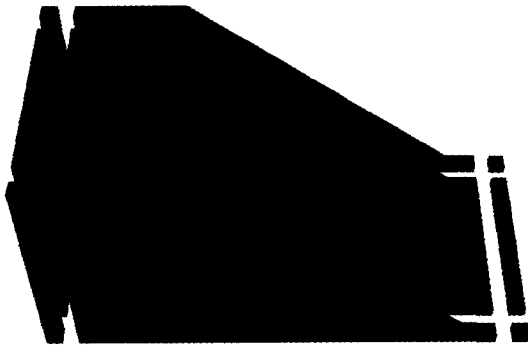


图 2 数值模拟边坡模型示意图

Fig. 2 Dynamic numerical simulation model of the slope.

速度波,再通过式(4)式分别转换得到应力时程从模型底面输入,统计各测点水平向加速度时程峰值。把实验数据和计算结果汇总如图 3 示,其中数值计算中的相对高程均换为对应模型试验中的监测点相对高程。由图可见二者对应良好。所以用 FLAC^{3D} 做土质边坡的动力响应分析是合理并且足够精确的。

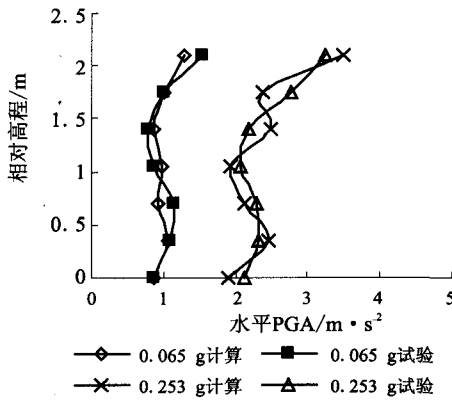


图 3 FLAC^{3D}模拟与振动台试验的坡面 PGA

Fig. 3 PGA along slope surface by FLAC^{3D} and the test.

3 计算模型的建立

3.1 材料参数和地震动荷载的选取

选用规范^[6]中材料实验数据的一种： $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ； $c = 21 \text{ kPa}$ ； $\phi = 21^\circ 24'$ 。模量取值为： $K = 6.66\text{E}7$ ， $G = 3.077\text{E}7$ 。

选取美国 1940 EL Centro 地震波调整加速度峰值至 0.1 g、0.2 g，分别对应烈度为Ⅶ、Ⅷ度地震强度的加速度时程，然后时域积分得到速度时程，再通过式(4)转换得到应力时程由模型底面输入。

3.2 边坡剖面设计

根据文献[2]的研究，粘滞边界设置的远近对边坡动力响应的结果影响很小，况且本文的研究只需得出分布规律，而非具体的响应数值，所以边界无

须设置过远而增加计算负担。本文模型的边界范围取为：基础厚度取坡高的一倍，在边坡两侧也各加宽坡高的一倍。

对于土质顺直边坡来说，由于材料参数已经给定，所以在坡高一定时，边坡能否稳定就仅仅取决于坡度。例如对于 30 m 高边坡来说，当坡度达到 40° 时，在静力作用下已经出现如图 4 所示的贯通的剪应变集中带，即通常认为的潜在滑动面，对此再进行动力分析已没有意义。

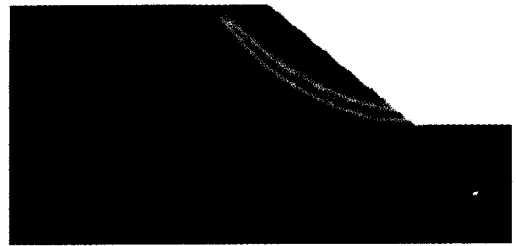


图 4 30 m-40°边坡在重力作用下剪应变增量云图

Fig. 4 Shear-strain increment contour of slop under gravity(30 m-40°)

对于 20 m 高的边坡，当坡度达到 45° 时也是同样的情况。所以设计边坡高度和坡度如表 1。

表 1 设计边坡坡形

坡高/m	20			30			
坡度/°	15	30	40	20	25	30	35

3.3 监测点的布置

根据大量计算结果，潜在滑动面均位于距坡面一倍坡高范围以内。所以本文在边坡的剖面上距临空面一倍坡高范围内划分 5 m×5 m 的格子，把网格点及水平网格线与坡面线的交点设置为监测点，以 20 m-40° 和 30 m-35° 边坡为例示意如图 5(a)、(b)。

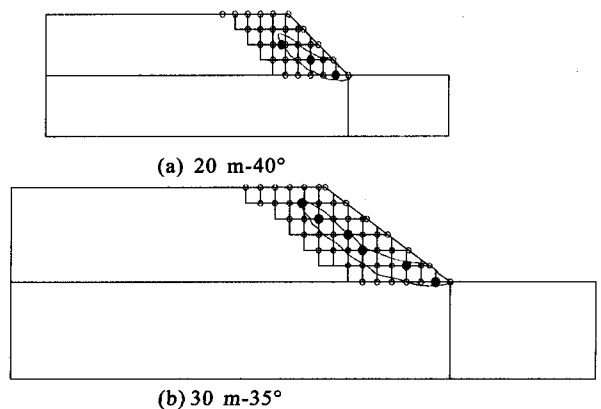


图 5 边坡剖面及测点布置图

Fig. 5 Middle section of the numerical model and distribution of monitoring points.

4 计算结果分析

4.1 水平方向 PGA 统计分析

在动力计算过程中,跟踪这些点的加速度响应,然后统计各响应时程的峰值。限于篇幅,本文仅以曲线图统计显示 20 m-15°、20 m-40°、30 m-20°和 30 m-35°四个模型在施加地震烈度相当于Ⅶ度时的各监测点的响应加速度峰值(图 6(a)、(b)、(c)、(d))。由图可以清晰地看出:在 20 m-15°和 30 m-20°两个模型中,随着高程的增加监测点的 PGA 是逐渐增大的;位于同一相对高程的监测点自坡体内至临空面呈现平缓增加的趋势,这说明坡体内的动力响应的确存在竖直和水平方向的放大作用,再次验证了前人的研究成果。但是在 20 m-40°和 30 m-35°两个模型中,某些点出现了突然增加的异常现象,并且突变点右边,即同一高程内更接近临空面的点的 PGA 的分布也变得杂乱无章。

4.2 剪应变增量云图

确定边坡的变形破坏范围是进行稳定性评价和防治工程设计的关键。李国琛等通过研究认为^[7]:就承受塑性大变形的材料而言,原来平滑分布的变形模式被一种急剧不连续的位移梯度所取代,其特征是大量的剪切变形集中在相对狭窄的带状区域内,边界相对而言近乎平行。因而,对边坡而言,可以通过寻找剪应变集中带的途径来寻找可能的失稳范围和部位。

土体剪切带的形成与土体逐渐破坏理论是当今国际力学界和岩土工程界共同关注的课题^[8]。室内试验土样的剪切破坏、现场路基和地基的滑动破坏以及山体运动的褶皱断层等均可视作局部化剪切带形成的现象。这种局部变形一旦发生,变形将会相对集中在局部化变形的区域内,而区域外的变形相当于卸载后的刚体运动。已有研究表明:在剪切破坏面上的强度是逐渐发挥的,即在剪切带上土的强度不是同时发挥到最大值,土的逐渐性强度特性是剪切带强度发挥的反映。非均匀变形的发展也使得整体上表现土的软化性状是与剪切带产生的结构破坏直接相关。因此,岩土体的失稳(特别是滑动失稳),都是沿剪应变最大的部位发生。大量实例分析结果也证明了这一点。

查看各坡形在各种荷载条件下模拟结果的终态残余剪应变增量云图发现,在同样的坡高和荷载强度下,随着坡度的增大,残余剪应变集中区有逐渐集中变窄、贯通的趋势,如图 7(a)、(b)、(c)、(d)依次

为在地震荷载相当于Ⅶ度时 20 m-15°、20 m-40°、30 m-20°和 30 m-35°模型的残余剪应变云图,均反映了这一趋势。这也说明坡度越小,最大剪应变减小,集

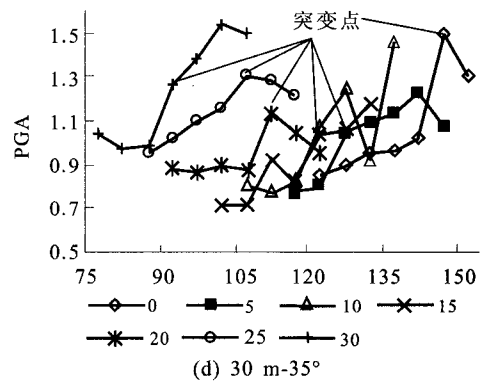
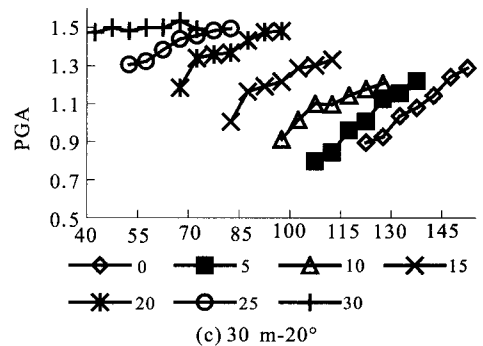
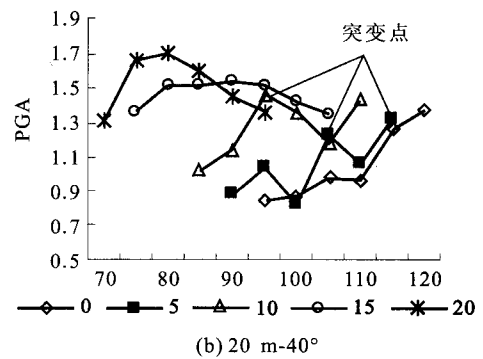
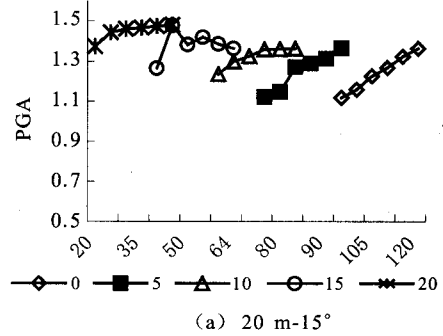


图 6 边坡剖面上各监测点水平 PGA 分布曲线 (各条曲线代表相对坡脚的不同高程)

Fig. 6 The PGA value curves at monitoring points in horizontal direction along slope surface.

中区收缩,对边坡的稳定性影响减小,边坡也就越趋于稳定。

4.3 对比分析

把图7(b)和图7(d)的终态剪应变增量集中带,即潜在滑动面勾出,与布置的监测点位置对比,结果如图5(a)、(b)所示,其中填充的监测点即为上述的PGA分布突变点。可见突变点与带状的残余剪应变集中区具有很好的对应关系。用同样的方法对比,发现在相当于Ⅷ度地震强度的荷载作用下坡度为 30° 的20 m和30 m边坡均存在同样的对应关系,说明这种对应不是偶然的。

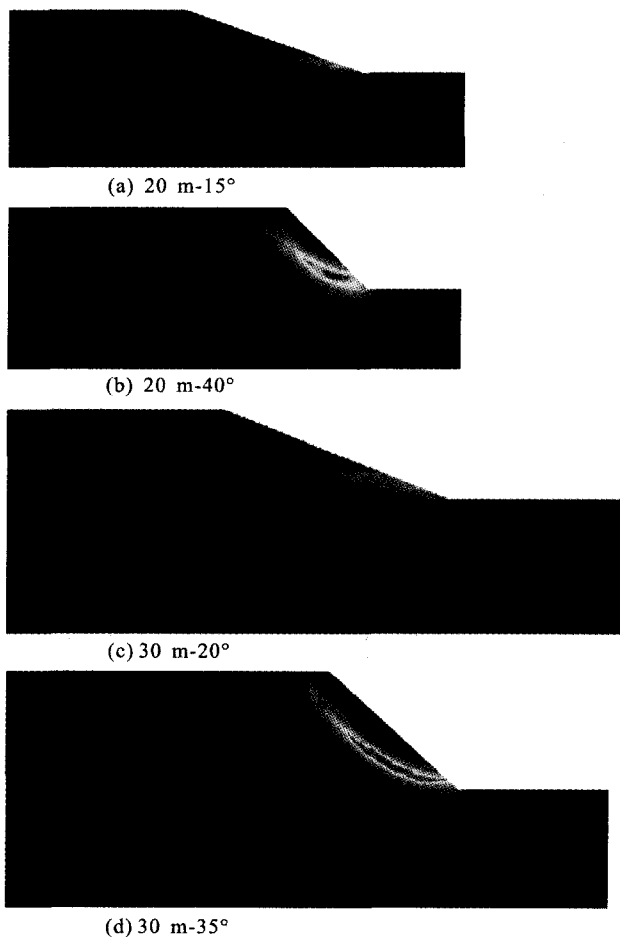


图7 模型终态剪应变增量云图

Fig.7 Shear-strain increment contour in the terminal state.

5 结束语

要搞清地震作用下边坡的失稳机理就必须对其响应规律有足够的认识。由以上计算分析可知,当土质边坡内出现集中的残余剪应变区,也即边坡出现潜在滑动面而可能失稳时,此处土体的动力特性已经改变,甚至已经滑动或者开裂,以致于坡体内的动力响应参数的传递将在此处不再服从之前的规律而导致出现分布异常;反过来说,当监测到坡体内某处的动力传递或者响应参数分布异常时,就说明该处已经发生了较大的剪应变,当异常点连线贯通时,边坡将沿此连线失稳。

本文的研究既为边坡的动力响应出现异常找到了原因,又为地震作用下边坡失稳时机及失稳范围提供了判据。

[参考文献]

- [1] 张倬元,王士天,王兰生,编著. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1993:223-224.
- [2] Qi Shengwen, Wu Faquan, Sun Jinzhong. General regularity of dynamic responses of slopes under dynamic input[J]. Science in China(Series E), 2003, 46 (Suppl.):120-132.
- [3] Kunar R R, Beresford P J, Cundall P A. A tested soil-structure model for surface interaction[R]. India, Rookee Univ., 1977.
- [4] Itasca Consulting Group Inc. FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.00, Users Manual (Volume V)[R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 1997.
- [5] 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.
- [6] 公路工程抗震设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [7] 李国琛, 耶那. 塑性大应变徽结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [8] 张天宝. 高堆石坝的合理边坡形状和稳定性分方法[J]. 水利学报, 1998. (12). 55-59.
- [9] Clough R W, Chopra A K. Earthquake stress analysis in earth dams[J]. J. Engng. Mech., ASCE, 1966, 92(EM2): 51-60.