

文章编号: 1000-7598(2010)11-3404-07

水平向与竖向地震动的时程耦合模式 对边坡动力安全系数的影响

黄 诚¹, 王安明², 任伟中¹

(1. 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, 武汉 430071; 2. 华北水利水电学院, 郑州 450045)

摘 要: 通过沿滑面的应力积分法和动力时程分析法, 研究了水平向、竖向地震动单独作用对边坡动安全系数的影响, 发现竖向地震动与水平向地震动一样也对边坡抗震稳定性有显著的影响。在此基础上, 重点探讨了实际地震的双向地震动同时作用时, 其时程耦合模式对动力安全系数的影响, 结果表明, 常用的加速度峰值耦合模式和随机耦合模式都不能充分体现出竖向地震动与水平向地震动的叠加效应, 进而造成对安全系数的高估; 文中提出的最大地震作用效应耦合模式才是最危险的耦合模式, 其所得稳定性安全系数时程的极值更小。在考虑多向地震的边坡抗震分析中, 由于多维地震动的强烈随机性, 应考虑出现这种最大地震作用效应耦合的可能性, 以得到工程设计中偏于安全的动力稳定性安全系数值。

关 键 词: 地震; 边坡稳定性; 竖向地震动; 时程耦合; 应力积分法; 时程分析法; 动安全系数

中图分类号: P315.8

文献标识码: A

Influence of time combination pattern of horizontal and vertical ground motions on slope seismic safety factor

HUANG Cheng¹, WANG An-ming², REN Wei-zhong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Firstly, influence of only horizontal or vertical earthquake loading on slope seismic safety factor is examined using stress integration along sliding surface and the dynamic FEM time-history analysis method. It is shown that under most conditions the vertical ground motion has the same significant effect on slope stability as the horizontal earthquake motion. Then, the effects of the time combination pattern of horizontal and vertical accelerograms on the dynamic safety factor are considered. It is concluded from the analysis results that the pattern with peak acceleration values meeting in time domain and the random time combination pattern may lead to over estimation of safety factors because of not giving the most significant superimposing effect for the vertical earthquake loading and the pattern with maximum action effects meeting in time domain is the severest pattern which allows for the minimum value of safety factor to be obtained. Due to the largely unknown behavior and random nature of earthquakes, the possibility for the pattern with maximum action effects meeting in time domain should be considered for slope under multiple-dimensional earthquake action to get the more conservative safety factor for the engineering design.

Key words: earthquake; slope stability; vertical ground motion; time combination pattern; stress integration method; time-history analysis; dynamic safety factor

1 引 言

传统的边坡地震动力响应分析, 对水平地震动作用考虑较多而往往忽视了竖向地震动作用, 而水平地震动能显著降低斜坡动力稳定性, 这已属共识。据多次典型地震的灾后实地调查结果都表明, 在近

震或发震断层附近区域产生了较强的竖向地震动, 其中有一些竖向加速度峰值超过了水平向加速度峰值^[1-2], 尤其在强震的震中附近, 竖向与水平地震动加速度峰值的比值为 0.5~2.4, 平均接近于 1。

关于竖向加速度对边坡抗震性能影响的研究日益受到重视^[3]。究竟竖向地震动对边坡动力稳定性

收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 51008298, No. 40772186); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ08064); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2009CB724602)。

第一作者简介: 黄诚, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土工程抗震及地质灾害治理方面的研究工作。E-mail: tjhuangcheng@163.com

的影响有多大, 是否可以忽略? 现已有不少研究者对此进行了有益的探讨。栾茂田^[4]针对不同的滑裂面形式, 同时考虑滑动体的水平向与竖向响应加速度时, 潜在滑动体的地震位移总是小于仅考虑水平向响应加速度时所得到的位移, 滑动体的位移取决于滑动体上地震中水平向与竖向响应加速度的综合作用。黄建梁^[5]将竖向加速度幅值取为水平向加速度幅值的 2/3, 对仅考虑水平加速度; 同时考虑水平与竖向加速度; 二者保持同相位、同时考虑水平向与竖向加速度但二者相位差为 180°等 3 种不同情况进行了对比计算, 表明竖向地震加速度的影响可以忽略。Ling^[6]认为, 当水平加速度加大时, 竖向加速度对边坡抗震性能和滑移位移的影响不容忽视。以上这些初步研究成果表明, 地震动输入方式对边坡动力稳定评价的影响应当考虑, 同时考虑水平向和竖向加速度输入时, 竖向加速度及其与水平加速度的组合方式将在一定程度上增大或降低斜坡、堤坝的稳定安全系数及滑移量^[7-9]。综上所述, 文献所得结论仍然显得不太一致, 可能低估了竖向地震动的叠加作用效应。

考虑到地震动竖向、水平向加速度分量的峰值并非同时出现, 而当其分别作用于斜坡时, 其最大反应也同时出现, 因而有一个峰值在时间上的遇合问题, 如何考虑这 2 种分量的地震作用效应最大值的时间遇合, 组合出最不利的总地震作用效应是一个值得深入研究的问题。

为了研究竖向、水平向地震动双向同时输入时的时间遇合方式对斜坡动力稳定性的影响, 本文采用 El Centro(NS)波作为输入地震动, 针对所给定的斜坡模型, 分别计算了地震动单向作用时的动安全系数时程, 在此基础上, 又研究了双向地震动的时程遇合模式对动力安全系数的影响, 找到了最大作用效应遇合的最不利模式。

2 边坡动安全系数的求解

要准确地定量评价竖向地震动与水平向地震动作用的时间遇合模式对斜坡动力稳定性的影响, 不能采用粗略的拟静力法, 只能采用精细的时程分析法, 求出斜坡动力反应的全过程, 包括动力安全系数的完整时程, 并据此进行定量评价。

为此, 首先要定义一个既能准确评价斜坡动态稳定性, 又方便动力有限元法求解的安全系数。传统的极限平衡条分法用于静态边坡稳定分析已经十分成熟, 但用于地震动力有限元法时程分析则显得相当不便。所以, 本文采用了近年来随着有限元技

术流行而兴起的应力积分法定义斜坡动力稳定性安全系数。

2.1 沿滑面的应力积分法求动安全系数

动力有限元能够给出每一时刻边坡的动应力场, 结合极限平衡法, 就能够给出边坡每一时刻的安全系数, 边坡最危险滑面上的整体稳定性安全系数定义为滑面上的抗滑剪切力与下滑剪切力之比^[10]。此时, 由于抗滑剪切力与下滑剪切力均为时间的函数, 因此安全系数也是随时间变化的函数。动力安全系数时程可以直观地反映边坡安全的实时储备情况, 能了解边坡在地震动作用下动力稳定性的变化范围^[11]。本文用稳定性系数的最小值来定量评价输入地震动对斜坡动力稳定性的影响。

应力积分法求解安全系数的具体计算步骤为: 采用动力有限元时程法按一定频率计算地震过程中各个时刻的坡体动应力场, 就可获得各时刻与潜在滑面对应单元高斯点的应力; 然后, 将滑面分成 m 个条块, 通过插值得到滑面上第 i 条块底部中点的动应力 $\sigma_x^i(t)$ 、 $\sigma_y^i(t)$ 、 $\tau_{xy}^i(t)$, 条块长度为 l_i ; 利用下面的应力张量转轴式(1)即可求得对应条块底部的法向动应力 $\sigma_n^i(t)$ 和切向动应力 $\tau_m^i(t)$ (该条块的正应力和剪应力), 如图 1 所示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n^i(t) &= \frac{1}{2}[\sigma_x^i(t) + \sigma_y^i(t)] + \\ &\quad \frac{1}{2}[\sigma_x^i(t) - \sigma_y^i(t)]\cos(2\alpha_i) + \tau_{xy}^i(t)\sin(2\alpha_i) \\ \tau_m^i(t) &= \frac{1}{2}[\sigma_x^i(t) - \sigma_y^i(t)]\sin(2\alpha_i) - \tau_{xy}^i(t)\cos(2\alpha_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: α_i 为滑动面与 x 轴正方向的倾角, 以逆时针方向转动为正。该点在滑动面上的抗剪强度由式(2)确定。

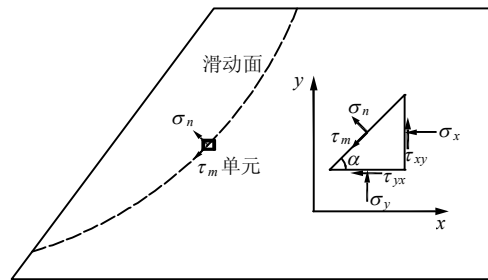


图 1 边坡滑面上一点的应力状态
Fig.1 Stress state of a point on the slip surface

$$\tau_u^i(t) = c_i + \sigma_n^i(t) \tan \varphi_i \quad (2)$$

式中: c_i 、 φ_i 为滑动面第 i 条块的抗剪强度指标。而边坡的整体抗滑安全系数可定义为沿滑动面的总抗滑剪力与总下滑剪力之比, 可由式(3)的应力积分法公式求得。

$$F_s(t) = \frac{\int_{\Gamma} [c_i + \sigma_n^i(t) \tan \varphi_i] d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau_m^i(t) d\Gamma} \approx \frac{\sum_{i=1}^m (c_i + \sigma_n^i(t) \tan \varphi_i) l_i}{\sum_{i=1}^m \tau_m^i(t) l_i} \quad (3)$$

式中: Γ 为滑动面。应力积分沿整个滑面进行, 而对于圆弧滑动面, 式(3)即为沿滑动面的抗滑力矩之和与滑动力矩之和的比。

整体动力安全系数明确地表达了潜在滑动面的宏观安全储备随时间的变化趋势, 为边坡地震动力稳定性定量评价奠定了基础。

2.2 动安全系数求解程序的编制与验证

根据上述定义, 本文编制了计算程序 KStressInt.F90 用来求解沿某一固定滑面(圆弧形或折线形)的动力安全系数, 如果不考虑动应力的作用(动力分析的静力起点), 则动安全系数退化为常规的静力安全系数。而静力安全系数可用很多成熟的条分法求出, 本文根据这种思路对应力积分程序求得的稳定性安全系数的合理性进行了验证。

考察图 2 所示的均质边坡在重力作用下沿最危险滑面(图中虚线)的安全系数。

计算参数为: 重度 $\rho = 19 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 5 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 有限元应力场分析时, 材料本构选为线弹性, 试算表明基于应力积分法的安全系数对变形参数(弹性模量、泊松比)不敏感。表 1 给出各种极限平衡条分法(Slide 软件)与应力积分法计算值的对比。

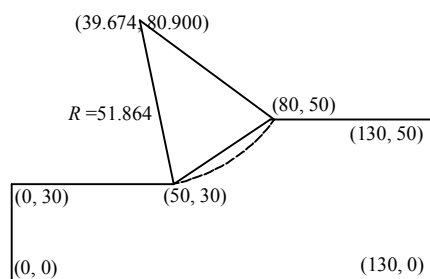


图 2 指定滑面的边坡模型 (单位: m)

Fig.2 Slope model with slip surface specified (unit: m)

通过表 1 的对比结果可以发现, 对于圆弧滑动, 利用有限元应力积分法计算所得的边坡稳定性安全系数与极限平衡条分法所得结果十分接近, 且安全系数数值稍大些, 说明本文所编制的应力积分法程序

求得的边坡稳定性安全系数是合理的, 可以用于下面的地震动力安全系数研究中。

表 1 不同方法计算所得的沿同一滑面的安全系数
Table 1 Comparison of slope safety factor for the same slip surface calculated using different methods

计算方法	Bishop simplified	Spencer	Janbu corrected	Corp of eng#2	Morgenstern price	应力积分法
安全系数	1.141	1.139	1.146	1.144	1.140	1.163

2.3 时程法地震动力分析模型的建立

时程分析法是用数值积分求解运动微分方程的一种方法, 数学上称之为逐步积分法。连续介质力学的基本运动方程经过有限元离散后, 公式为

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M][J]\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (4)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为坡体的有限元总体质量矩阵、阻尼矩阵和总体刚度矩阵; $\{\ddot{u}(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 、 $\{u(t)\}$ 分别为坡体结点加速度列阵、速度列阵和位移列阵; $\{\ddot{u}_g(t)\}$ 为输入地震地面加速度列阵; $[J]$ 为各项地震动分量的指示矩阵^[12]。

通过式(4)就可以输入地面地震加速度记录, 运用逐步积分法数值求解坡体运动方程, 本文在大型商业程序 DYNA3D 的基于显式积分方案的动力有限元程序平台上, 经过 2 次开发, 植入了本文编制的求解边坡安全系数的应力积分法程序, 可以得到坡体各点各个时刻的位移、速度、加速度、动应力和动应变等各种地震反应量, 还可以求得整个时间历程内的各种综合地震作用效应(如基于应力积分法的沿固定滑面的安全系数时程、坡体塑性区体积发展时程), DYNA3D 程序还可以方便地考虑各种动力边界条件, 如吸波边界等。

输入的地震波包括实测的地震加速度记录, 或拟合设计反应谱生成的人工地震加速度记录, 可以同时考虑水平向和竖向加速度输入。

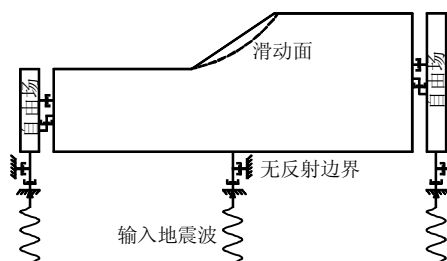


图 3 地震作用下边坡的时程法动力计算模型

Fig.3 Schematic outlook of slope dynamic model subjected to earthquake loading

本文计算所用地震动采用具有代表性的美国 EL Centro-NS 地震波, 首先进行整体调幅以调整加速度峰值至 0.15 g 。由于岩土类介质的阻尼效应起到低通滤波器的作用, 地震波的低频部分可以传播得很远, 而高频部分会迅速衰减。已有的地震波记录分析已表明, 地震波低频部分衰减相对高频部分要慢, 地震波主要包含中低频成分, 且有限元离散模型也不能准确地模拟高频波动的传播^[12]。基于这个观点, 本文通过对 El Centro(NS)波进行低通滤波, 滤除 15 Hz 以上的高频成分, 然后经过基线校正, 最后得到的加速度波时程, 如图 4 所示。

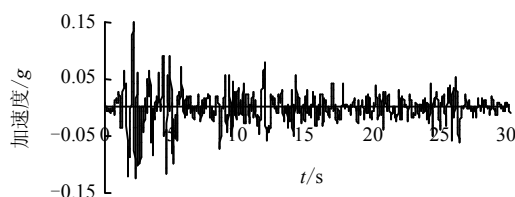


图 4 经滤波和基线校正的 EL Centro 地震波加速度时程
Fig.4 Filtered and Baseline corrected EL Centro accelerogram scaled to a peak acceleration of 0.15g

理论分析和震害资料表明地面下地震加速度随深度渐减, 《水工建筑物抗震设计规范》^[13]规定在地面下 50 m 及其以下部位处的设计地震加速度代表值减为地面的 50% , 基岩面下不足 50 m 处的设计地震加速度代表值可按深度作线性插值, 本文据此对加速度幅值折减 0.7 后用作输入地震动。

3 单向地震动的作用效应

为了考察竖向与水平向地震动在时间域的不同遇合模式对斜坡动力安全系数的影响, 先要考察单向地震动作用下的斜坡稳定性问题。

仍然考察图 2 所示的边坡模型, 计算所采用的动态物理力学参数如表 2 所列。

表 2 边坡动力分析模型的物理力学参数
Table 2 Dynamic physico-mechanical parameters of soil material of slope model

重度 (kN/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kN/m^2)	内摩擦角 ($^\circ$)	阻尼比
19	48.0	0.29	5.0	30.0	0.05

试算表明, 动力安全系数对材料变形参数不是十分敏感, 本文选用线弹性本构模型以尽量简化数值模型, 重点研究地震动的输入对安全系数的影响。

3.1 水平向地震动的作用效应分析

将图 4 所示的地震波作为水平剪切波施加在图

3 所示边坡模型底部的水平向上, 通过逐步积分法和应力积分法求出沿图中虚线所示滑面的滑动力、抗滑力(图 5)及动安全系数(图 6)的时程。

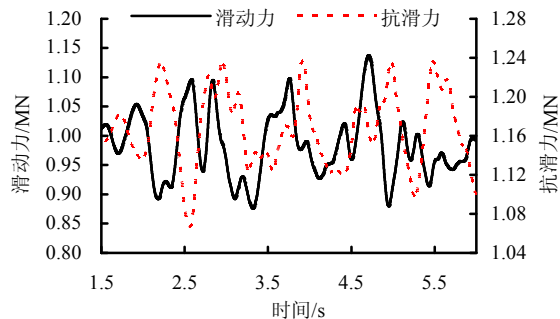


图 5 水平向地震单独作用下的总滑动力及总抗滑力时程
Fig.5 Time history of the total resisting shear force and the driving shear force along the specified slip surface of slope subjected to horizontal earthquake loading only

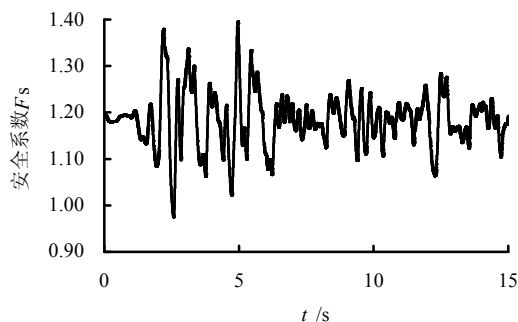


图 6 水平向地震单独作用下的安全系数时程
Fig.6 Time history of slope dynamic safety factor subjected to horizontal earthquake loading only

由于分析的起始点为静力状态, 从图 5、6 可以看出, 边坡在自重作用下的静力安全系数为 1.163 , 随着地震波的传播, 滑动力、抗滑力及安全系数上下宽幅振荡, 在 2.57 s 时刻, 由于滑动力与抗滑力出现最不利的对应关系, 安全系数达到最小值为 0.943 , 相对于静力状况, 下降了 19% , 可见水平向地震动显著地降低了边坡动安全系数。

3.2 竖向地震动的作用效应分析

为了考察竖向地震动单独作用时对边坡稳定性的影响, 将同样的地震波作为竖向纵波施加在边坡模型底部, 通过逐步积分法和应力积分法求出沿同一滑面的滑动力、抗滑力(图 7)及动安全系数(图 8)的时程。从图 7、8 可以看出, 边坡在自重作用下的静力安全系数为 1.163 , 与水平向作用情况相似, 随着地震波的传播, 滑动力、抗滑力及安全系数上下宽幅振荡, 安全系数时程形状与水平向地震作用的

情况十分相似,在 2.81 s 时刻达到最小值 0.990,相对于静力状况,下降了 15%,可见竖向地震动也显著地降低了边坡动安全系数,在输入波形相同的情形下,降低程度稍逊于水平向地震动。

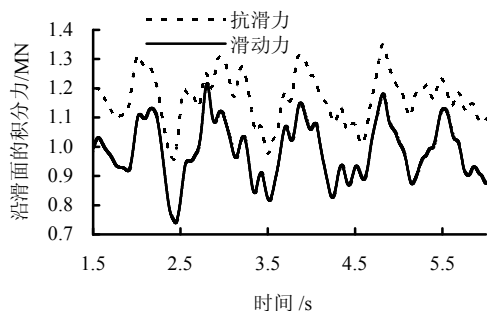


图7 竖向地震单独作用下的总滑动力及总抗滑力时程
Fig.7 Time history of the total resisting shear force and the driving shear force along the same slip surface of slope subjected to vertical earthquake loading only

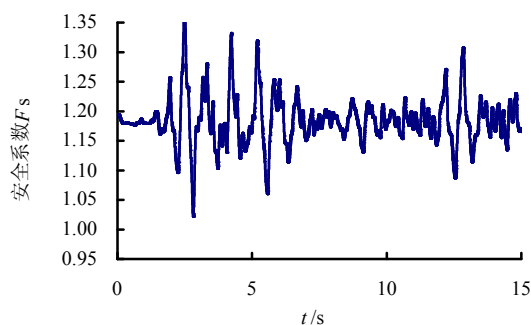


图8 竖向地震单独作用下的安全系数时程
Fig.8 Time history of slope dynamic safety factor subjected to vertical earthquake loading only

4 双向地震动的时间遇合讨论

由于水平向与竖向地震动对边坡地震稳定性都有显著的影响,所以在时程法的分析中,要同时输入 2 种地震波以考察它们的耦合效应。

在上文对单向地震动作用效应的研究基础上,下面讨论水平向与竖向地震动的时遇合模式对斜坡地震稳定性安全系数的影响。

4.1 水平向与竖向地震动的时相关性

理论研究与震害经验表明,地震时的地面运动是一复杂的多维运动,包括 3 个平动分量和 3 个转动分量,各分量之间的相关性一直是众多学者研究的重点。Penzien 等^[14]根据实际地震观测资料和理论推导证明,地震动存在主轴,不同主轴上的地震动完全不相干,最小主轴的方向接近垂直方向;水平向地震动与竖向地震动不相干或相关程度较低,

出现各种时遇合模式的可能性都存在。如果遇合模式选择不恰当,则很可能造成对双向地震动叠加效应的低估。现有的研究很少考虑这个特殊的问题,无论是选用天然地震波还是人工地震波加载,一般采用的都是随机遇合模式,再有就是加速度峰值遇合模式。下文将对讨论这 2 种常规遇合模式以及本文研究提出的最大作用效应遇合模式。

4.2 加速度峰值遇合模式

考虑多向地震同时作用,最常规的思路就是让水平向与竖向地震波的加速度峰值在时间上遇合,期望达到最大的组合作用效应。本文将图 4 所示的地震波同时施加在上述同样模型底部的水平向和竖向,通过逐步积分法求出沿相同滑面的动安全系数的时程,如图 9 所示。由图可以看出,动力安全系数时程总体上呈现出上下宽幅振荡的特征,在 2.58 s 时刻达到最小值 0.934,相对于静力状况,下降了 20%,可见降低程度只是略高于水平向地震动 (19%),竖向地震动的叠加效应并不明显,这与竖向地震动单独作用时具有明显作用效应的结果不相符,应深入研究其原因,否则,极易造成对安全系数的高估。

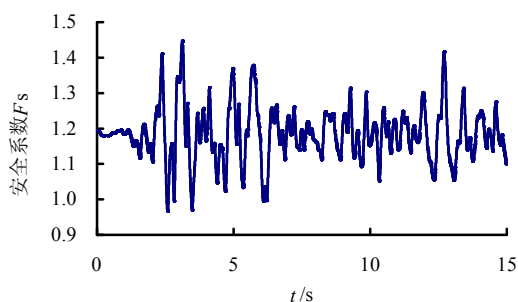


图9 水平向与竖向地震动峰值加速度遇合模式下动安全系数时程

Fig.9 Time history of dynamic safety factor of slope subjected to the combined effect of vertical and horizontal earthquake loading with peak acceleration values meeting in time domain

4.3 最大作用效应遇合模式

通过上述单向地震动作用效应的分析,得到了单向地震动作用达到安全系数极值的时间点。为了使得水平向与竖向地震动的最大作用效应在时间上遇合,以达到最大的综合地震作用效应(安全系数极值),将水平向地震动相对竖向地震动延迟 0.24 s 施加,图 10 为计算结果。

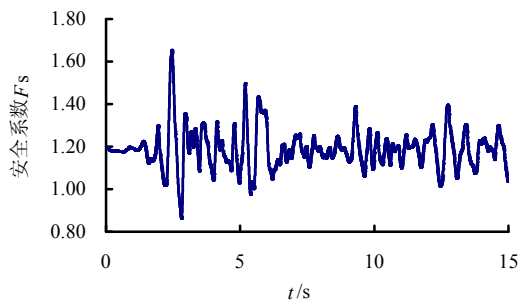


图 10 水平向与竖向地震动最大作用效应遇合模式下动安全系数时程

Fig.10 Time history of dynamic safety factor of slope subjected to the combined effect of vertical and horizontal earthquake loading with maximum action effects meeting in time domain

从图 10 可以看出, 动力安全系数 F_s 在 2.81 s 时刻达到最小值 0.830, 相对于静力状况下降了 29%, 降低程度明显高于水平向地震动(19%), 也明显高于加速度峰值遇合模式(20%), 竖向地震动作用效应的叠加效果十分显著。

4.4 随机遇合模式

在地震时程法分析中, 输入地震动的选择一般有 2 种情况, 一种是根据抗震规范的设计反应谱拟合生成人工地震波, 由于在生成过程中采用了均匀分布的随机相位角, 所生成的波形带有一定的随机性。另一种情况是选取具有相似地震地质条件的实测天然地震波, 天然地震本身就具有强烈的随机性, 不同的地震波对应不同的遇合关系。这 2 种情况下既不能保证多向地震动的峰值加速度遇合, 更不能保证最大作用效应遇合, 而是一种所谓的随机遇合模式, 所以得出的分析结果有可能不能充分体现出竖向地震动的叠加效果, 甚至可能部分抵消水平向地震动的作用效果, 以至造成对安全系数的高估。

4.5 计算结果对比分析

下面将上述计算结果表 3 中进行了对比分析。从表 3 列出的计算结果可以明显看出, 相对于水平向地震动, 竖向地震动对斜坡动力稳定性也有较大影响, 不能忽略, 所以在进行地震时程法分析时, 要同时考虑水平向与竖向地震波的作用; 但如果只考虑两者的时间遇合模式, 而只是想当然的通过加速度峰值遇合或随机遇合来进行耦合计算, 则不能充分体现出竖向地震动作用效应的叠加, 甚至有可能得出比单向地震动作用下更大的安全系数, 这在工程上是偏于危险的。

表 3 地震动不同遇合方式下的作用效应

Table 3 Action effects subjected to different earthquake loading combination pattern

遇合方式	单独作用		耦合作用	
	水平向	竖向	峰值遇合	最大效应遇合
最小安全系数	0.943	0.990	0.934	0.830
相对静力的降低程度/%	19	15	20	29

5 结 论

(1) 通过精细的时程积分法和沿滑面的应力积分法求解斜坡地震动安全系数时程发现, 竖向地震动可以显著地降低斜坡动力安全系数, 在输入地震动相同的条件下, 其作用效应只略小于水平向地震动。因此, 对斜坡的地震反应分析考虑水平与竖向地震的共同作用更为合理。

(2) 在斜坡的多维地震作用时程反应分析中, 如果以常规的峰值加速度遇合或随机遇合模式同时施加水平向与竖向地震动, 往往并不能完全体现出竖向地震动与水平向地震动的叠加效应, 有可能造成对坡体抗震稳定安全系数的过高估计, 或得出竖向地震动可以忽略的错误结论。

(3) 在单向地震动作用下的动安全系数时程分析的基础之上, 通过调整延迟时间的方法以最大作用效应遇合模式施加双向地震动, 可以明显地体现出双向地震动的叠加效应, 得到的安全系数极值更小。由于多维地震动的强随机性, 应该考虑这种最危险的地震动遇合模式对斜坡动力稳定性的影响。

参 考 文 献

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29—38.
YIN Yue-ping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 29—38.
- [2] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239—1249.
HUANG Run-qiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239—1249.
- [3] 刘红帅, 薄景山, 刘德东. 岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 164—171.

- LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, LIU De-dong. Review on study of seismic stability analysis of rock-soil slopes[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, 25(1): 164—171.
- [4] 栾茂田, 李湛, 范庆林. 土石坝拟静力稳定性分析与坝坡地震滑移量估算[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 224—236.
- LUAN Mao-tian, LI Zhan, FAN Qing-lai. Analysis and evaluation of pseudo-static aseismic stability and seismic-induced sliding movement of earth-rock dams[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 224—236.
- [5] 黄建梁, 王威中, 薛宏交. 坡体地震稳定性的动态分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 114—122.
- HUANG Jian-liang, WANG Wei-zhong, XUE Hong-jiao. Dynamic analysis of seismic stability of slopes[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1997, 17(4): 113—122.
- [6] LING H I, LESHCHINSKY D, YOSHIYUKI M. Soil slopes under combined horizontal and vertical seismic accelerations[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1997, 26(12): 1231—1241.
- [7] 李红军, 迟世春, 钟红, 等. 考虑时程竖向加速度的 Newmark 滑块位移法[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2385—2390.
- LI Hong-jun, CHI Shi-chun, ZHONG Hong, et al. Effects of vertical acceleration time-histories on Newmark sliding block analyses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2385—2390.
- [8] ROBERT SHUKHA, RAFAEL BAKER. Design implications of the vertical pseudo-static coefficient in slope analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35: 86—96.
- [9] ANDRZEJ SAWICKI, WLODZIMIERZ CHYBICKI, MAREK KULCZYKOWSKI. Influence of vertical ground motion on seismic-induced displacements of gravity structures[J]. **Computers and Geotechnics**, 2007, 34: 485—497.
- [10] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2225—2230.
- ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU De-fu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2225—2230.
- [11] 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.
- 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.
- [12] STAVROULA Kontoe, LIDIJA Zdravkovic, DAVID M Potts. An assessment of time integration schemes for dynamic geotechnical problems[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35: 253—264.
- [13] 中国水利水电科学研究院. DL5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [14] JOSEPH PENZIEN, MAKOTOWATABE. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1975, 3: 365—373.

《建筑科学与工程学报》2011 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学主办的学术性期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大 16 开本, 128 页。每期定价 10.00 元 (含邮寄费), 全年共 40.00 元; 国内外公开发行, 邮发代号: 52—140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地 址: 西安市南二环路段长安大学内

邮 编: 710064

电 话: (029)82334397

E-mail: jzxb@chd.edu.cn