

地震和暴雨工况下边(滑)坡稳定性分析方法评价

何专, 姚令侃

(西南交通大学 土木工程学院 道路与铁道工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 地震和暴雨同时作用是自然界中引发边(滑)坡灾害的一种极端工况。在分析地震和暴雨同时作用于边(滑)坡的稳定性时, 现行规范只能采用将地震及暴雨影响简单叠加的方法。采用 GEO-SLOPE 软件, 对川藏公路和西攀高速公路上的典型边(滑)坡工点, 采用动力有限元与极限平衡理论相结合的方法, 分析它们在地震和暴雨共同作用下的稳定性, 探索采用将地震与暴雨工况简单叠加, 以及地震和暴雨耦合分析这两种方法评价边(滑)坡稳定性的差别, 并对现行规范计算方法的适用性作出评价。结果表明, 地震和暴雨的耦合作用对边(滑)坡稳定性的影响大于地震、暴雨单独作用的叠加对边(滑)坡稳定性影响。

关键词: 边坡; 滑坡; 地震; 暴雨; 稳定性评价

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2009)03—0178—05

中图分类号: X4, P315

Assessment on Methods of Analyzing Slope(Landslide) Stability Under Earthquake and Rainstorm

HE Zhuan, YAO Ling-kan

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The joint effect of earthquake and rainstorm is the extreme condition which causes landslide in nature. The current codes to evaluate the impacts of both earthquake and rainstorm on slope stability are just a simple addition of the two factors. By using the GEO-SLOPE software and employing dynamics element infinite and limit equilibrium theory, this paper evaluates the stability of the typical slope sites along the Sichuan—Tibet highway and Xichang—Panzhihua freeway under the coupling of earthquake and rainstorm, in order to find the difference of simple addition and the coupling analysis of earthquake and rainstorm, and also evaluates the applicability of regular computational methods. Research has found that the coupling of earthquake and rainstorm has more serious impacts to slope stability than the simple addition of impact of earthquake and rainstorm alone.

Key words: slope; landslide; earthquake; rainstorm; stability evaluation

暴雨是导致边(滑)坡失稳的常见因素。通过对全国 290 个县市区地质灾害调查结果显示, 暴雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90%^[1]。国内外地震地质与地震震害的研究表明, 在距强震震中 300 km 内和地震烈度区内均能造成大量崩塌滑坡。2008 年“5·12”汶川地震也在地震作用下直接引发了大量的重大崩塌、滑坡等次生灾害。如国道 213 线紫坪铺至茂县段, 长 135 km 的路段上, 分布了崩塌、滑坡灾害 334 个, 映秀—汶川段 40% 路基被崩塌、滑坡、泥石流冲毁或掩埋^[2-3]。由于多数地震常常伴随着暴雨, 故暴雨和地震同时作用对边(滑)坡稳定性的影响应成为

重要工程需要考虑的一种特殊工况。按照现行《公路工程抗震设计规范》和《建筑边坡工程技术规范》, 对边(滑)坡进行抗震稳定性验算时采用拟静力法, 即地震作用被概化为一水平地震荷载; 在边(滑)坡的稳定性需考虑地下水影响时, 水下部分岩土体重度取浮重度, 并计算岩土体的动水压力, 其值仅与水的重度、水下土体体积、滑面倾角及地下水水位面倾角有关。

当需计算地震和暴雨(其作用以地下水位升高体现)同时作用下的安全系数时, 由于现行公式中动水压力的计算与地震力无关, 这种算法相当于将地震力及地下水的影响简单地叠加^[4-7]。

收稿日期: 2008-09-11

修回日期: 2008-11-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(2008CB425802); 四川省交通厅科技项目“山区高速公路地质灾害信息系统及减灾决策技术”(SC20060090); 西藏自治区交通厅科技项目“川藏公路通麦至 105 道班地震诱发公路地质灾害机理及对策研究”(XZJ E2006-01)

作者简介: 何专(1985—), 女(汉族), 四川省剑阁县人, 硕士研究生, 研究方向为铁路、公路工程灾害防治。E-mail: hezhuan1121@163.com。

本文拟对这种简单叠加方法的适用性进行分析,并介绍利用 GEO-SLOPE 软件,采用动力有限元及拟静力法分析暴雨和地震耦合作用对边(滑)坡稳定性影响的程式。

1 GEO-SLOPE 分析方法

GEO-SLOPE 软件是加拿大 GEO-SLOPE International Ltd. 公司出品的土工软件,其中涉及到地震作用下边(滑)坡分析的有 QUAKE/W 和 SLOPE/W 两大模块,前者是地震动态分析模块,后者是边坡稳定分析模块。分析采用动力有限元和极限平衡理论相结合的方法,这与现行规范采用的方法有相通之处,值得一提的是,GEO-SLOPE 软件边(滑)坡稳定性分析的结果主要以安全系数体现,与现行设计理念相吻合,这也是我们选择该软件进行研究的重要原因。

1.1 地震作用对滑坡稳定性的影响

在 QUAKE/W 模块中地震作用考虑为在基岩底部输入水平地震加速度时程曲线。分析边(滑)坡在地震作用下的稳定性时,首先在 QUAKE/W 模块中建模采用线性土体模型进行静力计算,然后将静应力文件导入另一个 QUAKE/W 文件中采用等效线性土体模型采用有限元法计算(输入动力学参数、地震波时程曲线、地下水位线等)得到动应力文件,再将动应力文件导入 SLOPE/W 模块中采用极限平衡理论和 Newmark 法分别计算边(滑)坡的安全系数及永久位移^[8];其中地震作用引起的荷载如下。

$$\{F_g\} = [M]\{a_g\} \tag{1}$$

式中:[M]——质量矩阵; {a_g}——节点加速度。

1.2 暴雨作用对滑坡稳定性的影响

暴雨作用对滑坡稳定性计算的方法主要是考虑暴雨引起的高地下水位产生的静水压力及对坡体的浮托力的影响^[9]。单独暴雨作用考虑为将 QUAKE/W 的静力文件调入 SLOPE/W 模块(输入土体力学参数、地下水位线)的静力有限元法计算。本文将暴雨作用考虑为升至地面的地下水位线,在高水位的影响下,必然增加坡体内部的孔隙水压力,对边坡的稳定性造成不利的影。其中孔隙水压力 u_w 的计算如下

$$u(x, y) = a + bx + cy + \sum_{i=1}^N \{ (h_m - h_i)^2 \lg (h_m - h_i) \} \tag{2}$$

式中:x, y——计算点的坐标; h——两点间的距离,

$$h = h_m - h_i = (x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2;$$

a, b, c, 1, 2, n——加权系数,为下方程的解:

$$\begin{bmatrix} K_0 & K(h_1 - h_n) & 1 & x_1 & y_1 \\ & & & & \\ & & & & \\ & & 1 & x_N & y_N \\ & 0 & 0 & 0 & \\ & & & 0 & 0 \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \\ \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \\ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中: $K(h) = h^2 \lg h$ 。

1.3 地震和暴雨同时作用对滑坡稳定性的影响

在地震和暴雨同时作用于滑坡时,暴雨作用仍以地下水位升高体现,在 QUAKE/W 模块动力计算模型中,我们定义将地下水位线升至坡面的时候施加地震动荷载为地震和暴雨同时作用于边(滑)坡的模型,将其动应力文件导入 SLOPE/W 模块中得出边(滑)坡的安全系数及永久位移。在 QUAKE/W 模块中,坡体在循环震动作用下,导致土体内部的孔隙水压力上升,从而使土体的有效应力下降,当孔隙水压力的增加值等于初始的有效应力时,土体发生液化^[10]。由上可知,在地震和暴雨作用耦合作用时,地下水对边(滑)坡稳定性的影响体现为随地震力变化的动孔隙水压力与初始有效应力的关系,动孔隙水压力在 QUAKE/W 模块中的计算如下。

$$\frac{u_{excess}}{3c} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{a}} - 1 \right] \tag{3}$$

式中: u_{excess} ——超孔隙水压力; $3c$ ——侧向固结有效压力; N——循环荷载的循环次数; N_L ——引发液化现象需要的循环荷载循环次数; $\frac{1}{a}$ ——系数,取0.7。

图 1 为孔隙水压力比随加载循环比增长的关系曲线(图中点虚线为代表曲线)。

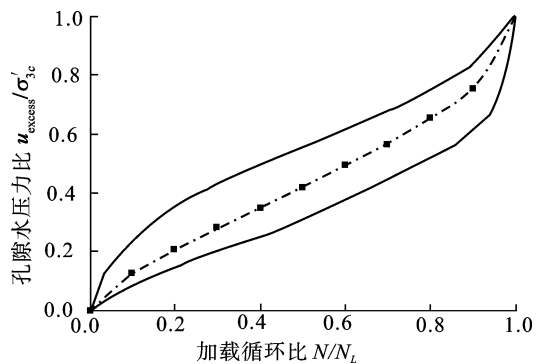


图 1 循环荷载作用下的孔隙水压力比

1.4 动力安全系数求解原理

GEO-SLOPE 应用有限元应力方法求安全系数,其安全系数(S.F.)定义为沿滑动面抗滑剪切力之和(S_r)与沿滑动面滑动剪切力之和(S_m)的比,如

下式：

$$S.F. = \frac{S_r}{S_m} \tag{4}$$

式中： $S_r = s$

$$= [c + (n - u_a) \tan a + (u_a - u_w) \tan b]$$

$S_m =$; s ——滑块底部中心土的有效剪应力;
 ——滑块底部的长度; n ——滑块底部中心正应力;
 c ——有效黏聚力; ——与法向应力 ($n - u_a$) 有关的内摩擦角; u_a ——孔隙气压力; u_w ——孔隙水压力; ($u_a - u_w$)——滑动面的基质吸力; b ——随基质吸力变化的内摩擦角。

其中, n, m 由 QUAKE/W 模块计算。

$$n = \frac{x + y}{2} + \frac{x - y}{2} \cos 2\alpha + xy \sin 2\alpha$$

$$m = xy \cos 2\alpha - \frac{x - y}{2} \sin 2\alpha$$

式中: x ——基底 x 方向的总应力; y ——基底 x, y 方向的总应力; xy ——基底 x, y 方向的剪应力;
 —— x 轴正方向与法向应力之间的夹角。

1.5 边(滑)坡稳定性评价方法

本文采用静力有限元计算边(滑)坡在暴雨作用下的稳定性,主要由安全系数评判边(滑)坡的稳定性。采用动力有限元和 Newmark 法计算边(滑)坡在地震作用及地震和暴雨同时作用时的稳定性。当动力有限元求解安全系数时程中有低于 1.0 的某些时刻,且 Newmark 法求解出的永久位移也存在,但是位移量级较小时,也可以认为有失稳的可能,但不一定完全破坏;当位移量级较大时,认为会发生破坏;因此综合考虑动力有限元求解的安全系数时程曲线图和最低安全系数,以及由 Newmark 法计算的永久性位移综合考虑判断地震作用及地震和暴雨共同作用下的稳定性^[11-12]。

2 典型工点分析

为详细说明本文采用的分析方法,下面选择位于西攀高速公路上德昌河东滑坡为典型工点,说明在地震及暴雨共同作用下滑坡稳定性分析的方法(图 2)。

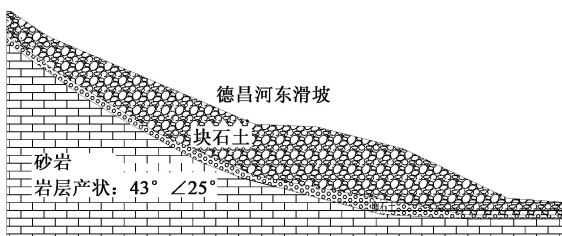


图 2 德昌河东滑坡地质剖面图

2.1 场地工程地质条件

2.1.1 地形地貌 滑坡区总体地势为东高西低,斜坡向西,斜坡坡向与岩层倾向相反,为逆向坡。滑坡体半坡上有一堰沟由北向南流经滑区,堰沟以上植被发育,柏树茂盛。滑坡区斜坡地带一般为残坡积或滑坡堆积之低液限黏土、块石土覆盖。斜坡南西面为坡洪积扇和安宁河二级阶地,地形平坦开阔,坡度 2°~5°,阶面高程高差 25 m。

2.1.2 地层岩性 第四系全新统人工填筑层(Q₄^{pl});第四系全新统滑坡堆积层(Q₄^{del});第四系全新统坡残积层(Q₄^{dl+el});第四系全新统冲洪积层(Q₄^{al+pl});更新统冰水堆积层(Q₃^{gl});中生界侏罗系中统新村组(J_{2x})。

2.1.3 地质构造及地震烈度 该区地震基本烈度为度,区域稳定性受安宁河断裂控制。滑坡区地表主要为松散—中密的块石、小块石质(夹)土,及含砾低液限黏土,其夹层厚度较小,呈软塑—硬塑状,地基承载力低,土的类型为软弱土,属软弱场地,地震动反应特征周期调整值为 0.90 s,地震动峰值加速度为 0.20 g。

2.1.4 水文地质条件 (1) 第四系松散堆积层孔隙潜水。赋存于 Q₄^{dl+el}, Q₃^{gl} 之小块石质土、卵石夹(质)土层中,地下水位受季节影响较大,前者透水性、富水性较差,水量小;后者透水性、富水性较好,水量较大。(2) 基岩风化裂隙水。主要赋存于砂岩风化带中,岩层的富水性和透水性均较好。地下水主要受大气降水及上覆地层地下水的补给。由于地下水补给有限,因此水量不丰,季节变化大。

2.2 稳定性分析

在 GEO-SLOPE 的 QUAKE/W 模块中,按照边坡剖面建立二维模型。滑坡后壁至左边界的距离应大于 5 倍滑坡厚度,滑坡剪出口至右边界距离应大于 3 倍滑坡厚度,模型高度应满足基岩有 3~6 m 的计算高度。网格划分时应尽量使用正方形网格,在边坡临空面处可使用三角形网格,但必须保证节点之间互相连接,网格边长为 2~4 m(根据计算精度及计算速度协调考虑)。模型左右添加黏弹性边界,底部设置为黏性边界。根据边坡的勘资料设置各土层材料参数,输入地震波曲线(地震加速度时程曲线)。建模示意图如图 3 所示。

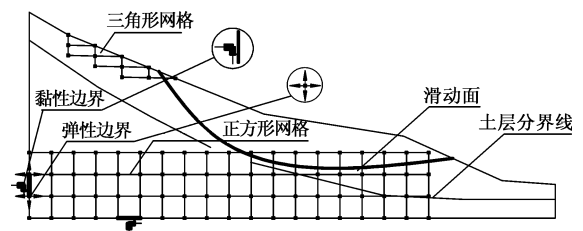


图 3 边坡稳定性分析建模示意图

通过建模分析,滑坡在各种工况下的稳定性分析结果用安全系数时程曲线和永久位移曲线图(见图 4)表示,具体如下(以大震为例)。

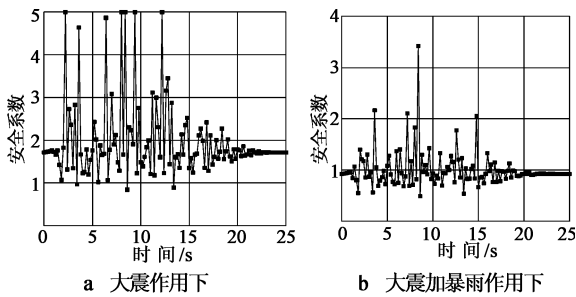


图 4 大震作用下安全系数时程曲线图

德昌河东滑坡在天然状态。大震作用下,动力有限元法得出最低安全系数略低于 1.0,Newmark 法得出将可能产生 2~9 mm 永久位移,可知,大震作用下稳定性较差,可能会发生破坏;中震和小震作用下,稳定性都较高,动力有限元法得出最低安全系数均大于 1.0,且无永久位移。在考虑地震和暴雨共同作用时,在大、中震和暴雨作用下,滑坡均不能保持稳定,安全系数小于 1,且分别产生 0.558,0.076 m 的永久位移,滑坡失去稳定性,在小震和暴雨作用时,安全系数为 0.974,出现约 1 mm 位移,滑坡接近于极限平衡状态(表 1—2)。

表 1 德昌河东滑坡最小安全系数

有限元法	大震 (0.4 g)	中震 (0.2 g)	小震 (0.2 g)	无震
地震工况	0.842	1.131	1.477	1.712
地震+暴雨	0.553	0.724	0.974	1.137

Newmark 法	大震 (0.4 g)	中震 (0.2 g)	小震 (0.2 g)	无震
地震工况	44.7	0	0	0
地震+暴雨	55.8	7.6	0.02	—

3 地震和暴雨作用叠加分析与耦合分析的差别研究

为了分析耦合计算和叠加计算两种方法是否存在差异,本文选取川藏公路通麦至 105 道班沿线典型 3 个工点及西昌至攀枝花高速公路沿线 7 个典型工点,分别采用上述耦合计算和叠加计算的方法进行分析。

川藏公路通麦至 105 道班路段位于青藏高原南部地震区,地震区划烈度为 Ⅴ度,区内地震活动频繁,新构造运动强烈,地质结构错综复杂,岩体破碎松散,易失稳,坡体多为松散堆积体,土体黏聚力较小。西攀高速公路全线 65 km 位于 Ⅴ度地震区,地质条件复杂,地形陡峻,沿线山体风化情况严重,气候条件潮湿多雨,汛期时间长,由暴雨、洪涝引发的山地灾害频繁发生,边坡多为坡积物堆积而成,属黏性土。在选择的两条线路中,边(滑)坡的规模、坡形、土体力学性质等均不尽相同,输入的地震波为当地地震部门给出的人工地震波时程曲线,震级为小震、中震、大震,对应的地震加速度为 0.067,0.2,0.4 g^[6]。因此本文选择的统计样本具有一定代表性^[13-14]。经过对 10 个典型工点在地震及暴雨作用下稳定性的分析,各边(滑)坡安全系数分析结果如表 3 所示。

表 3 分析工点计算结果统计

边(滑)坡名	无震		小震		中震		大震	
	无暴雨	有暴雨	无暴雨	有暴雨	无暴雨	有暴雨	无暴雨	有暴雨
K4096+603—662	1.206	1.015	1.111	0.766	0.922	0.545	0.757	0.413
K4103+041—263	1.301	0.921	1.269	0.664	1.124	0.589	1.051	0.584
K4097+450—578	1.221	1.051	1.160	0.725	1.064	0.528	0.882	0.493
K29+960	1.123	0.810	0.977	0.663	0.867	0.613	0.806	0.537
K33+150—400	1.712	1.137	1.477	0.974	1.131	0.724	0.842	0.553
K41+490	1.189	1.016	1.038	0.833	0.929	0.715	0.833	0.580
K47+500	1.121	1.009	1.072	0.959	0.948	0.831	0.861	0.727
K49+520	2.201	1.902	2.048	1.734	1.947	1.532	1.805	1.488
A K0+180—300	1.074	0.950	0.994	0.837	0.928	0.782	0.872	0.734
K108+642	1.846	1.492	1.681	1.336	1.336	1.071	1.050	0.840

通过对以上工点分析,得到如下统计结果(表 4)。(1)小震、中震、大震对滑(边)坡稳定性的平均影响程度分别为 7.5%,18.5%,27.6%。(2)暴雨作用对滑(边)坡稳定性的平均影响程度为 18.9%。(3)小震、中震、大震分别与暴雨同时作用时,对滑(边)坡稳定性的平均影响程度分别为 32.5%,41.7%,48.4%;分析发现地震作用与暴雨作用的耦合作用大于将地震与暴雨线性叠加作用,平均放大为 12%。

表 4 分析结果统计

项目	小震	中震	大震
线性叠加	26.4%	37.4%	46.5%
耦合作用	32.5%	41.7%	48.4%

在单独暴雨作用下,坡体中孔隙水压力的产生是根据已知点孔隙水压力的样条插值函数(如公式(2)所示)计算得到的,为一定值;在地震和暴雨的耦合作用过程中,孔隙水压力随着地震循环荷载的变化而波动,从而引起有效应力的下降[孔隙水压力值与有效应力的关系由公式(3)确定],这将导致安全系数呈现为一时程波动曲线如图 2,3 所示;在地震动力作用时程中,地震加速度值最大时刻的动孔隙水压力值必然大于按公式(2)计算出的静水压力值,这就是耦合方法所得安全系数小于叠加分析时计算值的根本原因。我们认为这种以地震和暴雨耦合作用评估边(滑)坡稳定性的物理概念更合理。从工程角度考虑,本文所得结论也更为安全。

4 结语

(1)研究发现,现行设计采用的将单独地震、单独暴雨对边(滑)坡稳定性的影响简单叠加并不能准确评价实际地震和暴雨同时作用的情况,这种传统的简化方法可能使某些工点存在安全隐患。因此在今后的研究中,条件许可的情况下应尽量采用动力耦合作用方法。若不能采用耦合计算时,也应该在叠加计算的基础上赋予一定的安全保障。

(2)本文定义的边(滑)坡工点在地震和暴雨共同作用的情况简化为边(滑)坡工点的地下水位与坡表面齐平的状况。在实际分析中,则应根据暴雨实际引发的地下水升高值来准确评估边(滑)坡的稳定性。

(3)本方法实质是分析地震稳定性时同时考虑地下水效应的一种方法。对处于高烈度地震区的库

岸工程、沿河线路工程及汛期较长的重点线路工点等均可适用。

(4)从学科趋势来看,基于地震反应分析的动力法是未来发展的方向,但动—静力学两种设计方法在相当长一个时期内会有一个协调过渡过程。GEO-SLOPE 软件是一种动力分析软件,但对边(滑)坡稳定性的计算结果能以安全系数来表征,与现行规范接轨。故在考虑拟静力法与动力分析方法的衔接过程中,是值得推荐的一种方法。

[参 考 文 献]

- [1] 魏丽,单九生,章毅之,等.暴雨型滑坡灾害形成机理及预测方法研究思路[J].江西气象科技,2005,28(3):17-22.
- [2] 林茂炳.汶川大地震与龙门山构造带[J].成都理工大学学报:自然科学版,2008,35(4):366-370.
- [3] 陈宁生,第宝锋,李战鲁,等.5·12汶川地震龙门山风景区地震次生山地灾害特征与处理[J].山地学报,2008,26(3):272-275.
- [4] 交通部公路规划设计院.公路工程抗震设计规范(JTJ044-89)[M].北京:人民交通出版社,1999:6-7.
- [5] 重庆市建设委员会.建筑边坡工程技术规范(CB 50330-2002)[Z].北京,2002:25-27
- [6] 庄儒新,杨向东,石光炬.基于剩余推力法的地震滑坡稳定性分析[J].西部探矿工程,2008(4):1-3.
- [7] 罗红明,唐辉明,胡斌,等.考虑地震力的刚体极限平衡法及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):3590-3595.
- [8] 尹紫红.地震作用下的滑坡稳定性分析[J].铁道建筑,2007(9):65-67.
- [9] 刘礼领,殷昆龙.暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J].岩土力学,2008,29(4):1061-1066.
- [10] CHEN Chuang-sheng, JIANG Xin, ZHANG Xu. Liquefaction susceptibility of soils with clay particles from earthquake-induced landslides[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,14(5):276-278.
- [11] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996:532-535.
- [12] 陈伟庆,孔书祥.土力学[M].北京:中国铁道出版社,2002:35-40.
- [13] 刘荣贵,石豫川.暴雨和地震触发滑坡滑速计算[J].地震灾害与环境保护,2007,18(4):20-22.
- [14] 松涛,任振球.用内外因耦合法预测特大自然灾害[J].中国创业投资与高科技,2004(9):64-65.