

大型复杂堆积边坡稳定性的离散元分析*

崔 激 刘学昆 戚 蓝

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室 天津 300072)

摘 要 与一般高边坡相比,堆积边坡在物质组成、边界条件、力学特性上具有明显差异,其变形与破坏表现出明显的非连续介质特性,传统的边坡稳定分析方法难以反映其失稳方式与破坏过程,而离散元法在分析非连续介质的变形和破坏方面具有较好优越性。以某一大型复杂堆积边坡为依托,首先模拟边坡土体室内三轴试验过程,通过与试验结果对比确定边坡土体的细观力学参数,进而通过建立堆积边坡离散元模型研究其失稳机制,预测其失稳方式和变形过程。结果表明:未开挖前该边坡处于稳定状态,一期开挖完成后边坡上部存在2个潜在滑动体,且表现为沿下伏基岩面的深层滑动;二期开挖完成后,下部存在一较明显滑动体,其失稳会进一步加剧上部两潜在滑动体的变形破坏;整个堆积边坡的失稳表现为沿基岩的自下而上牵引式渐进破坏。

关键词 堆积边坡 稳定 离散元 破坏机制 变形过程

中图分类号:TU452 **文献标识码:**A

DISCRETE ELEMENT ANALYSIS OF A LARGE-SCALE COMPLEX SLOPE IN DEBRIS DEPOSIT

CUI Wei LIU Xuekun QI Lan

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract Compared to general high slopes, there is an obvious difference in the material composition, boundary condition and mechanical character for deposit slopes. Because of the obvious discontinuity character of deposit slopes in terms of deformation and failure, it is difficult to reveal its failure mode and process for conventional stability analysis method. The discrete element method (DEM) can provide an optimum solution to problems such as deformation and failure of discontinuity. Firstly, based on a large-scale complex slope in debris deposit, a numerical test is carried to simulate triaxial test of deposit soil. Micromechanics parameters are determined through comparison to the laboratory test results. A general study on its failure mechanics was carried out using DEM. Failure mode and deformation process were also involved. The results show: the slope before excavation is stability. There are two potential slides mass on the upside of slope after first step of excavation showing deep sliding along bedrock underlying debris deposit. There is an obvious slide mass at the bottom of slope after second step of excavation. Its failure will speed deformation and sliding of two potential slides. For the whole slope in debris deposit, its failure mechanics mainly shows in a gradual deformation and failure mode along contact surface from bottom to upside.

Key words Slope in debris deposit, Stability, Discrete element method, Failure mechanics, Deformation process

* 收稿日期: 2011-06-25; 收到修改稿日期: 2011-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004), 国家自然科学基金(50809046)资助.

第一作者简介: 崔激, 从事工程地质研究. Email: cuiwei@tju.edu.cn

1 引言

高边坡稳定是工程界关注的焦点问题之一,其定量分析方法主要有极限平衡法、数理统计法和数值分析法3类。对于相对均质材料的边坡而言,经典的极限平衡理论如 Bishop 法、Janbu 法和 M-P 法,其曲线型、折线型算法已被工程界普遍采用^[1]。但在特定假定的基础上仅能给出边坡稳定安全系数,不能揭示边坡在失稳前后的变形和应力发展规律。由于影响边坡稳定的各种因素,如强度指标,地下水条件等,具有可变性和随机性,数理统计概率方法应运而生,但可靠度分析需要大量的试验测试数据来确定变量的分布,资金和时间投入相对较多^[2]。为了更好地模拟失稳机制,以有限元为代表的数值模拟方法逐渐发展成为一种通用边坡稳定分析方法。但是,目前广泛应用的有限元法都是基于某种岩土体的应力应变关系,而现有的较为成熟的岩土本构模型在模拟非线性、大变形、黏弹塑性的非连续介质的变形特性都存在困难,导致在估算边坡失稳方式、失稳后边坡发展等方面存在不准确性。为了解决这些困难,新的数值分析方法不断被提出和应用。其中,焦健^[3]采用数值流形法、王书法^[4]采用 DDA 法、雷远见^[5]采用 UDEC 对非均质岩质边坡稳定性进行了初步探讨,但在失稳后边坡发展等方面依然存在明显不足。离散元法以显式数值算法为基础,通过定义颗粒间的各种接触关系来描述颗粒介质的运动及相互作用,同时允许颗粒彼此分离并在计算过程中重构新的接触,因此对于非连续介质的变形模拟具有较好优越性,并已应用于简单节理岩质边坡^[6]和均质土质边坡^[7]的稳定分析。

堆积边坡是在近代地质历史上主要由岩体崩塌后产物经搬运沉积后形成的边坡,与一般的土质或岩质高边坡相比存在较为明显的特征。在物质组成上,与均质高边坡相比,堆积边坡以岩质边坡的崩塌产物碎石、块石、特大孤石并夹泥组成,各组分在几何形态、尺寸和所占比例上差别较为明显^[8];在边界条件上,堆积边坡滑坡周界和滑动面边界较为清晰,历史上曾有滑动,滑痕较明显;在力学特性上,堆积体的力学特性受物质组成控制,主要取决于颗粒组成、细粒含量及其本身力学性质。总体来看,与一般的高边坡相比,堆积边坡物质组成更为复杂,力学属性差异较大,滑坡边界较明显,一旦受到诸如开挖、降雨等外环境作用,极易产生失稳^[9],且极限平

衡理论和常规数值分析方法在揭示失稳节理和破坏过程上存在较大难度。

本文以某水电工程中的大型复杂堆积边坡为工程依托,采用 PFC 颗粒流法研究堆积边坡失稳机制,预测其失稳方式和变形过程,以为处治工程设计和施工提供参考。

2 堆积边坡土体属性模拟

2.1 颗粒接触模型

离散元以刚度模型、滑移模型和黏结模型来建立颗粒之间的相互作用,进而宏观的表现出岩土体的受力和变形特性^[10, 11]。

刚度模型描述接触力和相对滑移之间的1种弹性关系,滑移模型建立剪切和法向接触力之间关系,用来描述两个接触颗粒之间的相对滑移,黏结模型则定义了限制总法向力和剪切力的黏结极限强度,可分为两类,即接触黏结模型和平行黏结模型。接触黏结可以看作作用在接触点上的具有常量法向和剪切刚度的一对弹簧。接触拉力的大小由法向和切向接触黏结强度限制。平行黏接模型描述赋存于颗粒间有限范围内的胶结材料的本构关系,可同时传递力和力矩。平行黏接可被设想为一系列作用于颗粒间、以接触点为中心方圆形截面上的系列弹簧,且法向刚度与切向刚度为常数,并可与接触弹簧一起使用。在数值分析之前,应首先以岩土体常规室内试验强度参数为基础,通过数值模拟试验来确定接触类型及模型细观参数。

对于堆积土体而言,由于颗粒之间存在较为明显的摩擦和胶结联系,因此刚度模型采用线性刚度模型,滑移模型采用库伦摩擦模型,黏结模型采用平行黏结模型,在确定其基础模型之后,进而确定其具体的细观力学参数。

2.2 细观力学参数的确定

某大型堆积边坡位于某拱坝左岸坝前,其平面形态似舌形,自然山坡坡度约 $32^{\circ} \sim 35^{\circ}$,局部地段有陡坎。堆积体前缘高程约 1240m,后缘高程约 1650m,前缘宽度较小,后缘宽度较大,平均宽约 190m,长约 400m,堆积体下岸坡陡立,基岩裸露,对堆积边坡整体稳定影响不大。堆积体铅直厚度一般为 30~37m,最大为 60.63m,总体积约 $540 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。高程 1590m 以上地形平缓。堆积边坡物质组成主要为块石夹碎石质土或碎石层或砂质粉土。块石直

表 1 堆积土体的细观力学参数

Table 1 Micro-properties used to represent debris deposit soil

参数	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	法向接触 刚度/Pa	切向接触 刚度/Pa	摩擦 系数	法向黏结 刚度/ $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	切向黏结 刚度/ $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	法向黏结 强度/Pa	切向黏结 强度/Pa
数值	2200	$3.5\text{e}7$	$3.5\text{e}7$	0.5	$3.8\text{e}8$	$3.8\text{e}8$	$2.5\text{e}4$	$2.5\text{e}4$

径一般为 0.2 ~ 0.8m, 最大可达 1.0m, 块石含量在 5% 以下。碎石粒径一般为 1 ~ 15cm, 最大可达到 20cm, 碎石含量在 70% 以上。堆积边坡细粒组分主要填塞在特大块体缝隙之间, 并呈不成层分布。堆积体物质组成总体上较密实, 但在局部地段较为疏松, 少部分区域存在架空现象。经过大量的室内试验和参数反演分析, 确定了堆积土体的主要力学指标 (表 2)。

为了确定堆积边坡离散元模型的细观参数, 在数值模拟之前需先设计一个标准试样以模拟堆积土体的室内三轴试验过程, 并通过与室内试验结果对比确定最终细观参数。由于实际堆积边坡颗粒组成粒径分布范围很大, 且颗粒含量难以计算, 计算中完全按组分、尺寸、数量模拟是不可能的, 因此, 实际模拟中对颗粒尺寸进行放大, 而在宏观力学属性上则尽量一致, 研究表明, 这种近似在揭示边坡失稳过程和失稳机制上是可以接受的^[6, 7]。试样颗粒的几何特征与离散元模型中的堆积土体相似, 试样尺寸为 $70\times 25\text{cm}$ 的矩形, 四周为墙体包围, 在对该试样中的颗粒赋予不同的细观参数指标后分别进行围压为 5, 10, 30kPa 的三轴压缩试验的数值模拟, 当试验结果获得的参数值与对应的常规力学参数试验值充分接近时, 此时的颗粒细观参数即为模型中模拟需要的参数值^[12]。

与传统的室内试验类似, 数值试验通过一套数值伺服系统来施加试样荷载, 为保持试样的围压 σ_x 恒定, 试验过程中, 顶部和底部墙体作相对运动, 并同时调整两侧墙体的位移。在整个加载历程中, 程序自动记录试样的水平应变 ε_x 和竖向应变 ε_y , 水平应力 σ_x 和竖向应力 σ_y ^[7]。以 σ_y 和 ε_y 的记录作图便可得到试样的应力 - 应变关系曲线 (图 1, 图 2), 此即 $\sigma_1 \sim \sigma_3 \sim \varepsilon_3$ 关系曲线。表 2 为数值模拟试验得出的力学参数值与常规室内试验力学参数值的对比, 二者相近, 故可认为该组细观参数值符合要求。

3 堆积边坡的离散元模型

由于堆积边坡下伏基岩断面复杂, 存在明显的

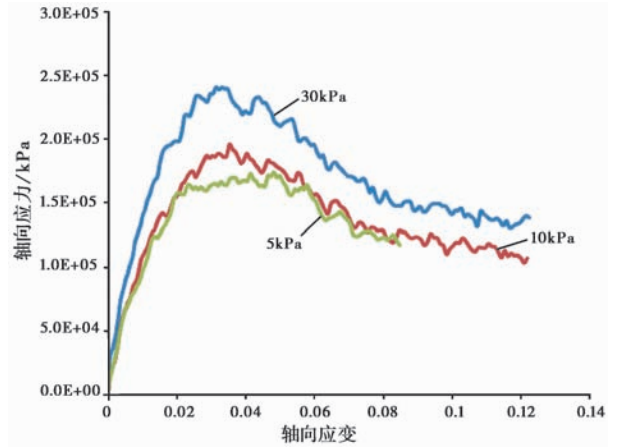


图 1 数值试样的应力应变关系

Fig. 1 Stress-strain behavior of numerical sample

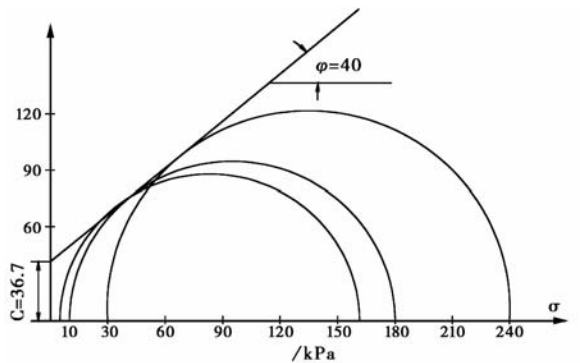


图 2 摩尔圆破坏包线

Fig. 2 Mohr failure envelope for the sample soil

表 2 试样与实际堆积土体的宏观力学参数

Table 2 Properties of sample soil and debris deposit soil

	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
数值试样	2200	36.7	40
原始堆积土体	2200	35 ~ 38	39 ~ 42

波浪式起伏, 且基岩物理力学属性较好, 不存在失稳可能, 同时为节省计算资源, 离散元模型不包含下伏基岩, 而仅包含堆积土体部分。堆积边坡离散元模型中 (图 3) 共包含颗粒 58650 个, 粒径在 0.1 ~ 0.5m 之间, 其中红色为一期开挖部分, 从 1650 高程开挖至 1389 高程, 绿色为二期开挖部分, 从 1389 高程开挖至 1244 高程, 蓝色为开挖后边坡, 开挖后边坡形态如 (图 4, 表 1)。

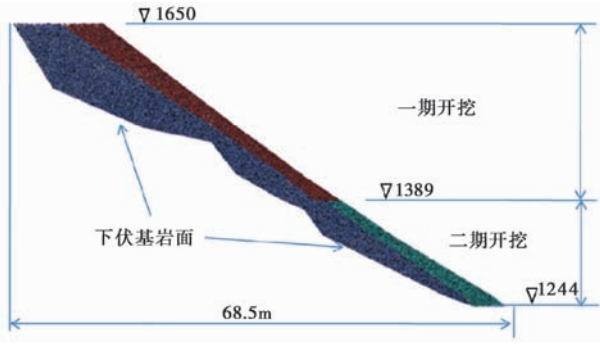


图3 堆积边坡的离散元模型

Fig. 3 Discrete element model of slope



图4 边坡开挖后形态

Fig. 4 Profile of slope after excavation

a. 一期开挖后; b. 二期开挖后

4 堆积边坡的稳定性分析

从一期开挖后边坡形态和变形矢量图(图5)

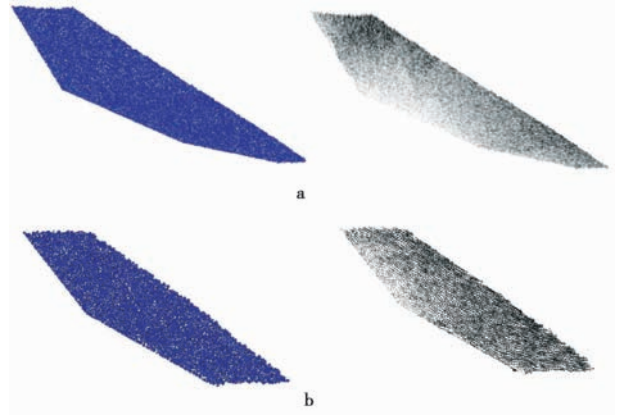


图5 一期开挖完成后边坡形态及变形矢量图

Fig. 5 Profile and deformation vector of slope

after first step excavation

a. 边坡上部; b. 边坡中部

中可以看出,边坡上部和中部均无明显变形,表明一期开挖后边坡尚处于稳定状态。从变形矢量图可以看出,边坡上部和中部分别存在一个潜在的滑动体,两个滑动体都为沿下伏基岩面的折线滑动。

二期开挖完成后,边坡下、中、上部变形发展过程、破坏形态和最终变形矢量图如图6所示。从图6中可以看出,边坡下部形成明显滑动体,滑动形式为沿下伏基岩面的深层圆弧滑动,滑动体前缘在高

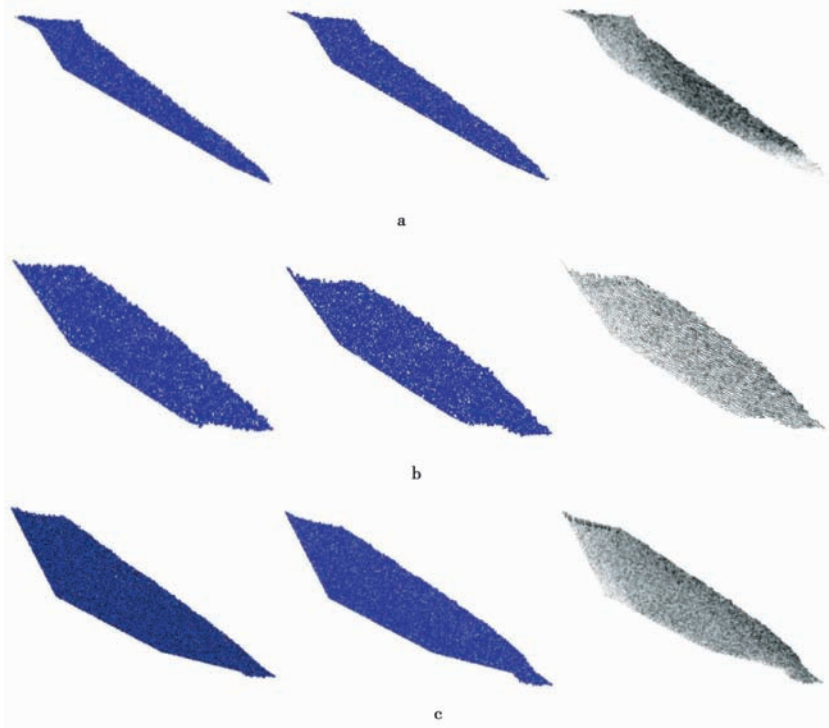


图6 二期开挖后边坡破坏过程及最终变形矢量图

Fig. 6 Failure process and deformation vector of slope after second step excavation

a. 边坡下部滑动体; b. 边坡中部滑动体; c. 边坡上部滑动体

程 1280 附近,并存在较为明显隆起现象,整个滑动无明显的裂缝出现,呈整体塑性流动破坏;边坡中部亦形成明显滑动体,为沿下伏基岩面的深层折线滑动,滑动体前缘在高程 1389 附近,并呈现较明显的前探趋势;边坡上部形成第三个较明显滑动体,滑动面上部贯穿堆积体,中部和下部沿下伏基岩面,滑动形式为折线滑动,滑动体前缘在高程 1460 附

近,并呈现较为明显的向下流动趋势。

采用极限平衡理论进行稳定分析的结果(图 7)表明,整个堆积边坡亦存在 3 个较明显滑动体,滑动形式与离散元分析成果具有较好一致性,下、中、上 3 个滑动体的安全系数分别为 1.16, 1.20, 1.13。

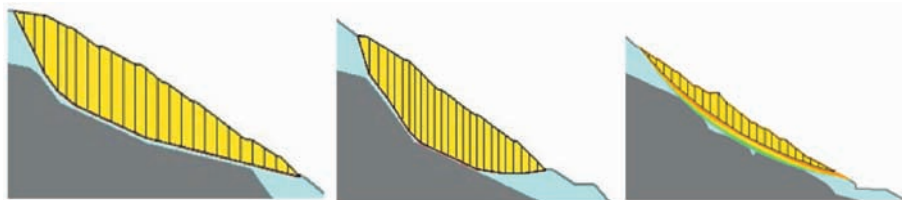


图 7 极限平衡理论分析结果

Fig. 7 Analysis result by limit equilibrium method

综合一、二期开挖后稳定分析成果可以看出,由于一期开挖后边坡处于稳定状态,因此,最终边坡失稳主要由于二期开挖引起下部滑动体失稳破坏,进而导致中部滑动体坡脚处抗滑力不足而失稳,上部滑动体也随之发生破坏。整个堆积边坡的失稳表现为沿基岩的自下而上牵引式渐进破坏。

5 结 论

(1)对于边坡稳定分析而言,离散元法不要假定破坏面,不需要假定本构关系,可以较好的模拟堆积边坡的破坏过程、破坏形式和破坏形态,可以很好的揭示大型复杂堆积边坡的失稳机制;

(2)离散元分析的重点是确定颗粒接触模型及其细观力学参数。应根据实际土体的摩擦和黏结特性确定其颗粒接触模型,通过数值模拟试验,并与其室内三轴试验成果进行对比确定其细观力学参数。

(3)就本次分析而言,整个大型复杂堆积边坡存在 3 个较明显滑动体,3 滑动体的破坏类型存在差别,整个堆积边坡的失稳表现为沿基岩的自下而上牵引式渐进破坏。

(4)离散元分析尚不能给出确切工程意义的安全系数,其难点在于确定土体细观与宏观力学参数间的关系。

analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **7**: 577 ~ 596.

[2] 杨继红,刘汉东,秦四清,等.考虑土性参数空间变异性的边坡可靠度分析[J].*工程地质学报*,2007,**15**(2):205~211.

Yang Jihong, Liu Handong, Qin Siqing, et al. Reliability analysis of slope stability taking into consideration of spatial variability of soil parameters. *Journal of Engineering Geology*, 2007, **15**(2): 205 ~ 211.

[3] 焦健,乔春生.弹塑性数值流形方法在边坡稳定分析中的应用[J].*工程地质学报*,2009,**17**(1):119~125.

Jiao Jian, Qiao Chunsheng. Elasto-plastic based numerical manifold method for stability and deformation analysis of rock slopes. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(1): 119 ~ 125.

[4] 王书法,李树忱,李术才,等.节理岩质边坡变形的 DDA 模拟[J].*岩土力学*,2002,**23**(3):352~354.

Wang Shufa, Li Shuchen, Li Shucai, et al. Numerical simulation of deformation of jointed rock slope by discontinuous deformation analysis. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, **23**(3): 352 ~ 354.

[5] 雷远见,王水林.基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J].*岩土力学*,2006,**27**(10):1693~1698.

Lei Yuanjian, Wang Shuilin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(10): 1693 ~ 1698.

[6] C Wang, DD Tannant, PA Lilly. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slope using PFC2D. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, **40**: 415 ~ 424.

[7] 周健,王家全,曾远,等.土坡稳定分析的颗粒流模拟[J].*岩土力学*,2009,**30**(1):86~90.

Zhou Jian, Wang Jiaquan, Zong Yuan, et al. Simulation of slope stability analysis by particle flow code. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 86 ~ 90.

[8] 张永双,曲永新,王献礼,等.中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨[J].*工程地质学报*,2009,**17**(5):581

参 考 文 献

[1] Duncan JM. State of the art: limit equilibrium and finite-element

~ 589.

Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Wang Xianli, et al. On the engineering geological classification of Quaternary glacial deposits in southwestern mountain area of China. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(5): 581 ~ 589.

- [9] 朱颖彦, 崔鹏, 陈晓晴. 泥石流堆积体边坡失稳机理的试验与稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(21): 3927 ~ 3931.

Zhu Yingyan, Cui Peng, Chen Xiaoqing. Experiment on mechanism

of slope failure of debris flow fan and stability analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(21): 3927 ~ 3931.

- [10] Cundall PA, Strack ODL. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, **29**: 47 ~ 65.
- [11] Cundall PA, Hart RG. Numerical modeling of discontinuum. *Engineering Computations*, 1992, **9**(2): 101 ~ 113.
- [12] Zhang L, Thornton C. A numerical examination of the direct shear test. *Geotechnique*, 2007, **57**(4): 343 ~ 354.

11th International Symposium on Landslides (ISL) and the 2nd North American Symposium on Landslides

The address of the symposium:

the Banff Springs Hotel in Banff, Alberta, Canada from

The time of the symposium:

June 2 to 8, 2012

Conference organizers:

The Canadian Geotechnical Society, the Association of Environmental and Engineering Geologists and the Joint Technical Committee on Landslides (JTC-1)

Erik Eberhardt, P. Eng.

Chair, ISL/NASL 2012 Technical Program

techchair@isl-nasl2012.ca

Wayne Gibson, P. Eng.

Conference Manager

info@isl-nasl2012.ca

c/o Gibson Group Association Management

8828 Pigott Rd

Richmond BC V7A 2C4

(604)241-1297

(604)241-1399 (fax)

Corey Froese, P. Geol.

Chair, ISL/NASL 2012 Organizing Committee

chair@isl-nasl2012.ca