

文章编号: 1000-7598-(2005)11-1722-05

坡面松散砾石土侵蚀过程及其特征研究

胡明鉴, 汪 稔, 孟庆山, 刘观仕

(中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 砾石土因其含砾、粉细砂和粘性土, 具有级配宽、不均匀系数大、透水性强等特点, 在土石坝防渗体土料和工程防渗墙中得到广泛应用。目前的研究多针对砾石土在工程应用方面, 对于坡面松散砾石土降雨淋滤作用导致土体细粒成分流失、土体结构改变以至影响土体力学性质变化以及坡面物质稳定性变化等研究并不多见。利用人工降雨装置, 进行了人工降雨坡面松散砾石土降雨淋滤试验, 开展了砾石土侵蚀过程及其特征初步试验研究。试验表明, 降雨作用下砾石土斜坡表面土体形态变化具有明显的阶段性特征, 随着坡长的增加, 产流率和侵蚀模数成线性增加, 径流量随降雨时间跳跃和波动性增加, 径流泥沙含量随降雨时间的增加以近似幂函数曲线关系递减。

关 键 词: 砾石土; 人工降雨; 径流量; 泥沙含量

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Research on erosion process and features of loose gravelly soil slope

HU Ming-jian, WANG Ren, MENG Qing-shan, LIU Guan-shi

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Gravelly soils are made up of gravel, cobble, sand and cohesive soils. They have been widely used in engineering applications such as earth-rock dams impervious fillings and stub cutoff walls. Present researches are mainly aiming at these engineering applications; researches on fine grained soils of the loose gravelly slopes running off under rainfalls, making structures of the soils alteration and affecting their mechanical properties or even affect the slope stability, are few order to study the erosion process and features of the gravelly slope soil under rainfall conditions, this essay carried out a sort of artificial rainfall local and model experiments; and the water content and sediment content of the runoff is monitored in the experiment. Result shows that the shapes of the slope surface transformed phasicly; runoff producing rate and erosion modulus increases linearly with lengthening of slope length. Runoff quantity increases along with the time of the rainfalls with the character of hopping and fluctuating, sediment content descents adapt to the rainfall time with the character of approximate power function.

Key words: gravelly soil; artificial rainfall; runoff; sediment content

1 前 言

砾石土是一种含有砾石、砂砾、粉细砂和粘性土的混合料, 具有级配宽、级配范围广、不均匀系数大、透水性强等特点, 在我国云南、贵州、四川等地区均广泛分布。目前砾石土在土石坝防渗体土料和工程防渗墙中已得到广泛应用, 不少学者对此开展过相应的研究。刘令瑶^[1]结合瀑布沟高堆石坝防渗土料问题对宽级配砾石土水力劈裂特性进行研究, 认为含砾量是决定宽级配砾石土是否发生水力劈裂的主要因素。保华富^[2]对多项工程砾质土防渗

材料的大量室内外试验成果进行了分析研究, 指出只要将砾质土中砾石和细粒含量控制在某一界限范围时, 砾质土的渗透系数就能满足防渗要求, 并提出了砾质土最大干密度经验公式的建议。薛兴祖^[3]也进行过砾质土渗透变形试验。饶锡保^[4]研究粗粒含量对砾质土工程性质的影响, 指出砾质土的工程性质受粗粒含量的影响, 砾质土压实性和渗透性除与粗粒含量有关外, 还与细粒特性有关。这些研究成果促进了砾石土体在土石坝和工程防渗墙等方面的应用, 但对于坡面型松散砾石土体在降雨淋滤作用下导致土体细粒成分流失、土体结构改变、影响

收稿日期: 2004-12-01

修改稿收到日期: 2005-03-01

基金项目: 中国科学院岩土力学重点实验室开放课题(No. Z000402)和中国科学院武汉岩土力学研究所重大探索项目(No. Q110303)资助。

作者简介: 胡明鉴, 男, 1974年生, 在职博士研究生, 从事岩土力学与岩土工程方面的工作。E-mail: humingjian@yeah.net

土体力学性质变化，进而影响坡面稳定性等方面的系统研究并不多，仅有少许文章发表^[5-6]。开展松散砾石土斜坡因降雨淋滤冲刷导致细粒流失，引起土体力学性质的改变，进而引发坡面物质失稳的系统研究，对砾石土斜坡滑坡、泥石流灾害研究具有重要的意义。为此，笔者选择典型的砾石土斜坡，利用现场人工降雨试验和模型试验，开展砾石土斜坡降雨侵蚀过程和特征的初步研究。

2 人工降雨侵蚀试验

2.1 试验土物理性质

试验土为云南省东川泥石流观测研究站后院坡地的老崩滑堆积体，是前期崩塌、溜滑的老滑坡体等和松散破碎的板岩或页岩碎屑的混合物，根据现场取样分析土体不均匀系数 $C_u=1\ 005\sim1\ 228$ ，曲率系数 $C_c=33.5\sim41.0$ ，细粒（粒径小于 0.074 mm）成分含量不足 15%，粒径小于 0.001 mm 含量不足 5%，为级配不良微含细粒砾，简称砾石土。土体整体结构松散，粘结力弱。根据现场取样分析，其粒径累积曲线图如图 1 所示，室内试验所得的部分土体参数见表 1。

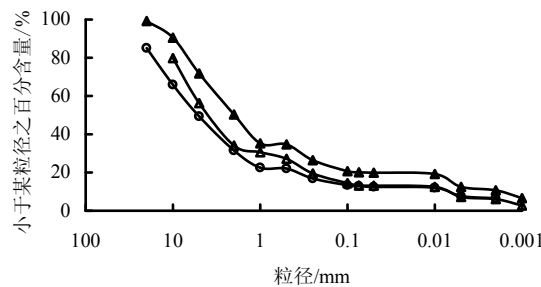


图 1 试验土级配累积曲线
Fig.1 Grain size distribution curves

表 1 土体部分参数

Table 1 Some parameters of the experiment soil

参数名称	G_s	W_{sat} /%	e /%	n /%	S_r /%	ρ_d / $g\cdot cm^{-3}$	ρ_{sat} / $g\cdot cm^{-3}$
1	2.77	18.7	0.515	34.00	32.35	1.82	2.16
2	2.76	19.0	0.508	33.70	30.15	1.77	2.11
3	2.78	18.9	0.497	33.90	31.25	1.79	2.13
平均值	2.77	18.9	0.507	33.87	31.25	1.79	2.13

2.2 试验布置与实施

2.2.1 现场人工降雨试验

将待试斜坡加以修整，除去场地内的杂草、植物根茎以及表面树叶，并对实验区土体进行适当翻松。修整出坡度为 25°，长 3 m；坡度为 30°，长 4 m；坡度为 35°，长 5 m，宽度均为 1 m 的 3 个斜坡，坡脚设盛水槽，用以收集降雨试验的挟沙流水。试验前在坡面不同位置、不同深度取土样测定

含水量，在斜坡表面不同位置放置量雨杯定时测定量雨杯内水体积求取降雨量和雨强。试验时开通人工降雨器进行降雨，测定量雨杯内降水体积、定期测定盛水槽内水的体积，并在斜坡下端汇流口取挟沙水流测定其含沙量。试验结束后各取与试验前相同位置的土样测定含水量。

2.2.2 人工降雨模型试验

将供试斜面整形并翻松修整而成 3 个坡度分别为 25°，30°，35°，长 3，4，5 m，宽 1 m 的斜坡。斜坡两边深插白铁皮，径流出口处设汇流孔（图 2），挟沙水流直接由汇流孔排入与之连接的径流桶中，见图 4。径流桶由 2 个直径分别为 30 cm(1[#])和 40 cm(2[#])，高 60 cm 的铁桶组成。其中 1[#]径流桶桶口处有 9 个 $\phi 5$ cm 的分流孔。当 1[#]径流桶水满时，径流通过其中一个分流孔流入 2[#]径流桶。挟沙水体积计算公式为： $V=V_1+V_2\times 9$ ，其中 V_1 为 1[#]径流桶水满至分流孔时的容积， V_2 为 2[#]径流桶的容积。

降雨器由大小不同规格的降雨侧喷头、输水管、分水箱、塑胶水管及支架等组成（图 2）。实验时，通过控制喷头大小和降雨时间来控制实验的雨强和降雨量，并通过试验斜坡上放置的量雨杯测定实际雨强。由于高处的水槽可以提供降雨所需的水压力，因此降雨时无须其他的动力设备。实验前后测定实验区不同位置和深度的土体含水量，在不同部位放置量雨杯记录降雨开始和结束时间、产流开始和结束的时间；侵蚀沟槽形成的时间及长度、大小等，定期取径流试样测定泥沙含量，测定径流桶水深，获取计算侵蚀模数、径流量和泥沙含量等原始资料。

每场实验结束后深翻试验场地，使下部未淋滤土体直接暴露于地表，经晾晒后改变降雨雨量、雨强进行下一场实验。

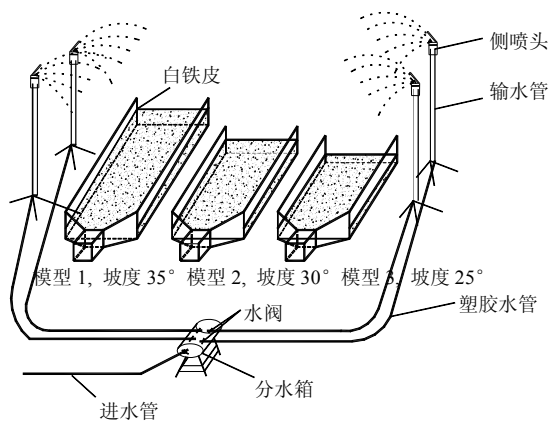


图 2 人工降雨侵蚀模型试验布置图
Fig.2 Arrangement plan of the artificial rainfall erosion model experiment

3 试验过程与分析

根据当地降雨资料的统计分析, 实验选择短历时、大雨强的降雨模式, 进行雨强分别为 0.5, 0.8, 1.1 mm/min 和降雨时间为 50, 70, 100 min 不等的交叉人工降雨坡面侵蚀实验。整个降雨实验过程坡面土体形态和径流泥沙含量随降雨时间发生阶段性变化(图 3): ①表面泥沙严重流失阶段。由于试验前表面土体经过适当松翻晾晒, 土质十分疏松。降雨作用使土体中的细粒成分很快在雨水的作用下形成极其浑浊的高含沙水流向下流失。从图 3 可以明显看出, 该阶段的泥沙含量比后期任一时刻都高。随着降雨的进行和土体中细粒含量的流失, 颗粒较大的砾石和岩屑被镶嵌在试验坡面上, 使平整的坡面凹凸不平(图 4)。该过程大约持续 10~15 min。②表面结皮, 稳定径流阶段。随着土体细粒的流失和坡面砾石、岩屑的镶嵌, 坡面侵蚀逐渐进入相对稳定期。土体表面变得密实, 仅有少量前期未流失的细粒随水流流失, 降雨在坡面上形成平稳的径流并逐渐变得澄清。此时的含沙水流中的泥沙成分也多为细砂、粉砂等。该阶段持续时间较长, 大约 25~35 min。③片蚀、沟蚀阶段。随着局部壤中流(或层间流)的产生, 流水携带细砂, 冲刷近饱和的表面土体形成细小沟槽; 随着细沟侵蚀的持续沟槽逐渐加宽加深, 加之粗大砂砾或碎屑的镶嵌, 使表面越发凹凸不平。该阶段持续大约 10 min。④沟蚀引发泻溜、崩滑阶段。随着沟蚀加强并逐渐掏空沟脚, 沟脚粗大颗粒架空, 使沟槽及周边土体容易发生崩塌或溜滑。崩塌发生后层间水沿溜滑后壁流出, 携带崩滑体中的细粒物质再形成浑浊的高含沙水流。崩塌、溜滑持续大约 5 min, 以后坡面将逐渐稳定, 径流逐渐变澄清。试验后期将进入细沟侵蚀、崩滑反复阶段。泥沙含量也随着试验现场出现跳跃现象。单场试验连续测试的径流泥沙含量随降雨时间关系如图 3 所示。

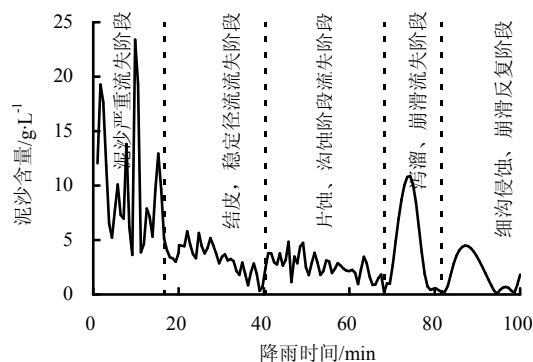


图 3 泥沙含量随降雨时间的阶段性变化
Fig.3 Sediment content changes with the rainfall time

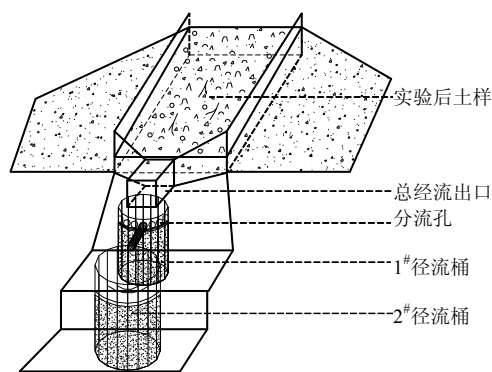


图 4 侵蚀试验后坡面表面形态
Fig.4 Shape of the slope surface after erosion experiment

经试验资料的分析整理后发现, 不同坡长、不同雨强下产流率和侵蚀模数平均值见表 2, 侵蚀模数是用以表征土壤侵蚀强度和泥沙流失程度的量, 以单位时间(一般为年, a)单位面积内的泥沙流失质量来表示。产流率和侵蚀模数随坡长变化关系如图 5、图 6 所示, 由图可知, 在相同坡长的情况下雨强越大, 对应的产流率和侵蚀模数也越大; 相同雨强下产流率和侵蚀模数随坡长的增加成线性增加; 大雨强作用下的对应指标随坡长的增长率高于低雨强。

表 2 不同坡长降雨试验结果
Table 2 Result of the rainfall experiments

坡长 /m	雨强 /mm·min ⁻¹	产流 /L·min ⁻¹	侵蚀模数 /(kg·m ⁻²)·a ⁻¹
3	0.8	0.762	11.096
	1.1	0.977	12.155
4	0.8	1.298	16.214
	1.1	1.817	24.136
5	0.8	1.150	21.718
	1.1	2.672	36.683

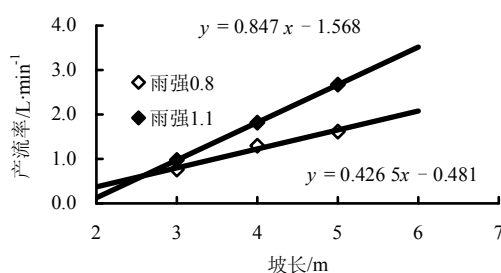


图 5 产流率随坡长变化关系
Fig.5 Runoff producing rates change with slope-length

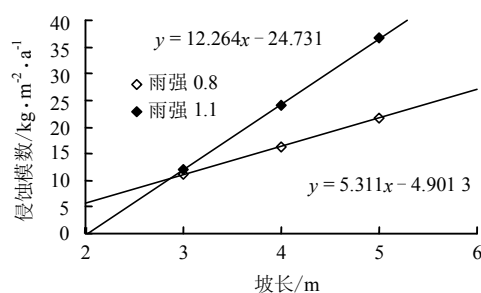


图 6 侵蚀模数随坡长变化关系
Fig.6 Erosion modulus changes with slope-length

试验发现, 径流量和泥沙含量在试验过程中具有跳跃性和波动性变化特征, 表现为整个降雨侵蚀试验过程中径流量随降雨时间跳跃和波动性增加(图 7), 对应的泥沙含量随降雨时间而跳跃和波动性减小, 平均泥沙含量随降雨时间也呈现明显的跳跃和波动性(图 8), 试验进行到大约 20 min 后, 泥沙含量降低到 10 g/L, 其间泥沙含量虽有波动, 但幅度比试验初期明显减弱。

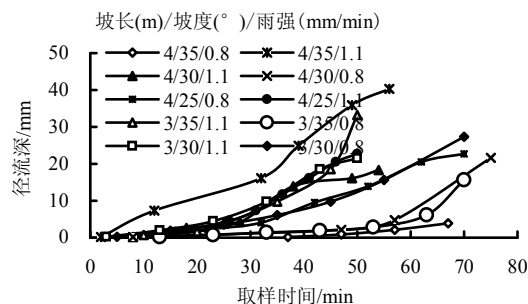


图 7 径流与降雨关系

Fig.7 Relationship between runoff and rainfall

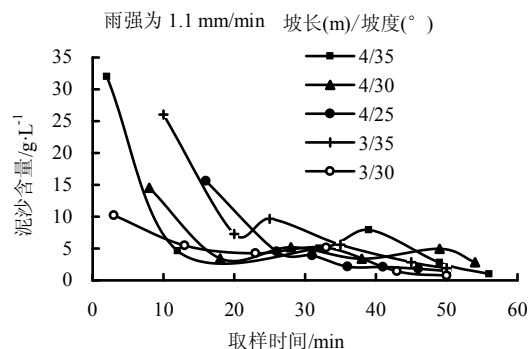


图 8 泥沙含量与降雨关系雨强 1.1 mm

Fig.8 Relation of sediment content and rainfall

为分析砾石土降雨侵蚀过程中泥沙流失特征, 对径流的泥沙含量随降雨时间变化关系进行局部衰减 B-Spline 插值分析, 发现降雨作用下砾石土细粒流失率具有很强的 B-Spline 局部衰减特征(图 9)。

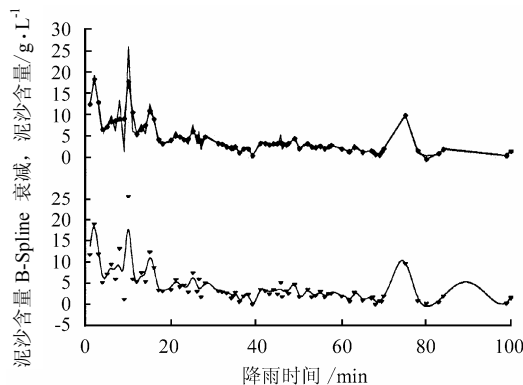


图 9 泥沙含量和降雨时间 B-Spline 插值局部衰减分析

Fig.9 Sediment content B-Spline interpolation analysis and its local degenerate features

除去试验过程中部分受风力影响很大的场次外, 将所有 30 多场人工降雨试验过程中砾石土坡面径流泥沙含量随时间变化关系绘制成图, 拟合后发现松散坡面砾石土降雨侵蚀过程中泥沙含量随降雨时间的增加而递减的关系具有幂函数曲线特征, 拟合曲线方程为 $y = 72.49x^{-0.76}$, $R^2 = 0.94$ (图 10)。

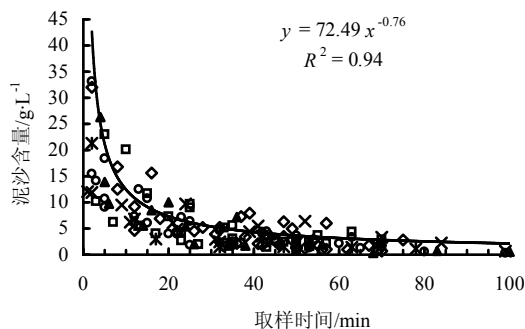


图 10 泥沙含量随降雨时间拟合关系

Fig.10 The sediment content varied with rainfall time

4 结 语

试验过程中砾石土斜坡表面土体形态变化具有明显的阶段性特征, 根据坡面形态和径流状态可将其分成 4 个具有显著特征的侵蚀过程。

在相同坡长的情况下, 雨强越大, 对应的产流率和侵蚀模数也越大。随着坡长的增加, 产流率和侵蚀模数成线性增加, 大雨强作用下的对应指标随坡长的增长率高于小雨强降雨模式。

径流量随降雨时间跳跃和波动性增加, 对应的泥沙含量随降雨时间而减小, 试验进行到大约 20 min 后泥沙含量降低至 10 g/L 以下, 其间泥沙含量虽有波动, 但幅度比试验初期明显减弱。砾石土细粒降雨条件下的流失率具有很强的 B-Spline 局部衰减特征, 砾石土坡面径流泥沙含量随时间之间有近似幂函数曲线关系, 拟合曲线方程为 $y = 72.49x^{-0.76}$ ($R^2 = 0.94$)。

参 考 文 献

- [1] 刘令瑶, 崔亦吴, 张广文. 宽级配砾石土水力劈裂特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 10—13.
LIU Ling-yao, CUI Yi-hao, ZHANG Guang-wen. The property of hydraulic fracture of wide grading gravelly soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 10—13.
- [2] 保华富, 尹志伟. 砾质土做为土石坝防渗体的研究[J]. 岩土工程技术, 1999, (4): 34—38.

- [3] 薛兴祖, 赵先冷. 浅谈砾质土渗透变形试验[J]. 吉林水利, 2004, (2): 6—8.
- [4] 饶锡保, 何晓民, 刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(1): 21—25.
RAO Xi-bao, HE Xiao-min, LIU Ming. Influence of coarse—grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1999, 16(1): 21—25.
- [5] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 831—1 834.
HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Cause of frequent occurrence of gravel slope landslide and experiment simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22002, 21(12): 1 831—1 834.
- [6] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 蒋家沟流域坡面侵蚀特征试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 645—648.
HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Experiment analysis of the erosion character on slope surface in Jiang-jia valley[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 645—648.

第九次全国岩石力学与工程学术大会

1 号通知 (征文通知)

2006 年 9 月 13~15 日中国沈阳

主办: 中国岩石力学与工程学会

承办: 中国岩石力学与工程学会东北分会 东北大学 煤炭科学研究总院抚顺分院 辽宁工程技术大学 黑龙江科技学院

协办: 哈尔滨工业大学 大连理工大学 鞍山科技大学 大连大学 大庆石油学院 中冶沈勘工程技术有限公司 通钢板石矿业责任有限公司 欧美大地责任有限公司沈阳分公司

会议邀请及主题: 东北作为重要的自然资源开采型的老工业基地对全国的经济发展做出了重大贡献。目前国有重点老矿区生态环境破坏严重, 开采难度提高, 开采诱发的矿震、岩爆或冲击地压、瓦斯突出与爆炸等重大岩石工程灾害十分严重, 已经威胁着东北资源型城市和人民生命财产安全, 严重影响着东北老工业基地的振兴进程。本次会议是以东北老工业基地振兴为中心主题, 面向东北老工业基地振兴中众多岩土工程基础设施、面向国家重大需求, 就岩土力学与工程的国际前沿课题和创新成果, 以及重大工程实例开展研讨与交流, 以期促进学科发展和重大工程技术的解决。

会议专题: 东北老工业基地振兴中的岩土工程与生态环境; 岩土工程中的重大力学问题; 岩土工程中监测和加固新技术; 岩土力学的基础理论、试验和数值模拟方法; 地下工程与基础及边坡工程; 地质灾害及灾害环境重大工程安全性; 其它岩石力学与工程问题

论文要求: 论文稿件经大会学术委员会会议审查通过者, 将由科学出版社出版。反映我国当前岩土力学与工程领域的最新研究成果及工程实录的论文优先录用。要求论文版面为 4 页或 6 页, 格式参照《岩石力学与工程学报》投稿要求, 文稿不分栏。

组织机构:

大会主席: 钱七虎 大会顾问委员会主任: 孙 钧 王思敬

委员: 谢和平 宋振骐 王梦恕 顾金才 李焯芬 葛修润 郑颖人 张超然 白世伟 黄鼎成 刘同有 杨林德 朱可善 刘正光 林俊德 周丰峻 哈秋龄 傅冰骏 程良奎 梁炯望 徐小荷 王泳嘉 林韵梅 郑雨天 章梦涛 郑炳旭 江拔其

大会组织委员会:

主席: 唐春安 副主席: 赵 文 杨志法 王建国 潘一山 孙广义

委员: 郑双良 宋 力 李希平 凌贤长 马世民 王来贵 栾茂田 张向东 张成金 张国建 周英操 赵德深 阎 铁 徐曾和 王述红 杨天鸿 朱万成 芮勇勤 贾 蓬

大会学术委员会:

主席: 钱鸣高 副主席: 冯夏庭 周维垣

委员: 方祖烈 卓家寿 朱维申 李仲奎 何满潮 蔡美峰 金丰年 余诗刚 岳中琦 康红普 李 宁 张永兴 尚彦军 黄润秋 黄宏伟 吕爱钟 刘汉龙 陈 勉 范秋雁 李永盛 郭爱清 盛 谦 白 云

大会秘书处 杨天鸿 贾 蓬 王述红 朱万成 赵兴东 徐 涛 梁正召 张黎黎

重要日期: 2006 年 1 月 30 日前提交全文 2006 年 3 月 30 日录用通知 (2 号通知) 2006 年 5 月 30 日前提交修改后的全文 2006 年 7 月 30 日会议通知 (3 号通知) 2006 年 9 月 13~15 日开会。会后考察 (略)。

主办单位通讯地址: 北京 9825 信箱中国岩石力学与工程学会 (100029) 联系人: 方祖烈 郑双良

网址: www.csrme.com E-mail: csrme@vip.sin.com 电话: (010) 62007256, 62007351 传真: (010) 62008462

会议秘书处通讯地址: 110004 沈阳 东北大学 138 信箱 中国岩石力学与工程学会东北分会

联系人: 杨天鸿 贾蓬 网址: www.rfpa.cn 电话: (024) 83687705 传真: (024) 83671626

E-mail: crsr@mail.neu.edu.cn yang_tianhong@126.com