

DOI: 10.11779/CJGE201602017

裂隙对四分量钻孔应力 - 应变观测影响的数值模拟分析

姚 瑞¹, 杨树新¹, 王 迪^{1,2}

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 北方科技信息研究所, 北京 100089)

摘要: 钻孔围岩中存在裂隙是导致钻孔应力 - 应变观测中测试值不满足自洽关系的原因之一, 但缺乏理论依据。建立若干个二维有限元模型, 通过模拟计算相邻 45° 的各元件位移, 定性地研究裂隙与最大水平应力的角度、最大水平应力与最小水平应力比值、裂隙与孔壁距离、长度、宽度和材料属性几种典型要素对四分量钻孔应力 - 应变观测的影响。结果显示, 几种因素对钻孔应力 - 应变观测都有比较明显的影响, 当裂隙延展方向与最小水平应力方向一致或最大水平应力与最小水平应力比值越大、裂隙与孔壁距离越近、裂隙尺寸越大、裂隙的材料属性与围岩的差距越大时, 裂隙的存在对观测的影响越明显。

关键词: 裂隙; 四分量钻孔; 应力 - 应变观测; 数值模拟

中图分类号: TU 472.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)02-0331-05

作者简介: 姚 瑞(1985-), 女, 助理研究员, 主要从事地应力数据应用、构造应力场、数值模拟的研究。E-mail: yaorui_4123@163.com。

Numerical simulation analysis of effects of cracks on 4-component borehole observation of stress-strain

YAO Rui¹, YANG Shu-xin¹, WANG Di^{1,2}

(1. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China; 2. North Institute for Scientific and Technical Information, Beijing 100089, China)

Abstract: The existence of cracks in wall rock of borehole is one of the reasons for the fact that the test values do not meet the self-consistent relationship in borehole observation of stress-strain. However, there are few theoretical researches supporting the fact. The displacements of adjacent components of 45° are calculated using a series of two-dimensional finite element models to qualitatively study the effects of different kinds of cracks on observation. The factors include angles between cracks and the maximum horizontal stresses, ratios of the maximum to the minimum horizontal stresses, distances of cracks and the borehole, length, width and material properties of the cracks. The results show that all the factors have more obvious effects on the borehole stress-strain observation when the crack extension direction is in accordance with the minimum horizontal stress direction or when the ratios of the maximum to the minimum horizontal stresses are larger, the cracks and the borehole are closer, the sizes of cracks are larger, and the differences of the material properties of the cracks and the hole wall are larger.

Key words: crack; 4-component borehole; stress-strain observation; numerical simulation

0 引言

破坏性地震是地壳内长期积累的构造应力能量突然释放的结果, 监测构造应力场的变化是地震预报研究的基本任务和途径。

钻孔应变仪高频性能好, 观测精度达到 10^{-11} , 可记录到一般形变仪不能记录到的微震震波, 与 GPS 和地震仪在观测频段上互补^[1]。数十年来, 钻孔应力 - 应变观测技术和理论不断完善, 观测方法包括钻孔分量应变、体应变和差应变^[2]。对于平面问题, 有 3 个方向的测值就可求出应变状态, 四分量钻孔应变观测在 4 个方向上安装了元件, 4 组测试值满足自检条件,

即四分量钻孔应变仪中相邻 45° 依次排列的 1 号与 3 号元件测值之和应等于 2 号与 4 号元件测值之和^[3-4]。检验应变资料之间是否符合弹性力学的基本关系式是判断分量式钻孔应变仪观测数据是否可靠的重要依据^[5]。

近十多年来四分量观测仪器被广泛安装和应用。然而, 从“十五”期间安装和验收的钻孔分量应变数据看, 有些台站的观测资料可靠性较好, 其 1 号、3

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2013-14); 2014 年地震监测台网运行经常性项目资助

收稿日期: 2015-03-20

号元件测值之和与 2 号、4 号元件测值之和很接近，其相关系数都在 0.9 以上，而有些台站 1 号+3 号与 2 号+4 号观测曲线的相关系数很低，甚至为负^[6]。究其原因，自检公式是在若干理想条件下推导出来的，实际的观测环境要复杂得多，一些观测点失败的主要原因是钻孔条件不理想，即仪器安装深度岩石破碎，存在裂隙。从经验上来讲，钻孔周围存在裂隙会使围岩的压缩弹性模量和强度极限明显降低，因此钻孔周围岩石力学性质分布不均匀，会对观测产生一定的影响^[7]，这样的钻孔应该弃之不用，但是因为钻孔费用高，即使钻孔后发现岩石条件没有达到要求，往往也只能勉强安装仪器^[8]。

形态各异的裂隙究竟对钻孔应变观测有怎样的影响，目前尚缺乏理论研究。目前积累的四分量钻孔应力 - 应变观测资料还十分有限，若想利用实际资料来研究裂隙对观测的影响还不太现实，而数值模拟方法可以通过建立多个模型从不同角度模拟裂隙对观测的影响。本文考虑了裂隙与最大水平应力的角度、最大水平应力与最小水平应力比值、裂隙与孔壁距离、长度、宽度和材料属性的影响，建立若干个二维有限元模型，根据收集的物性参数取值范围合理赋予模型单元几何属性和材料属性，加载边界条件，模拟计算相邻 45° 的各元件方向上的孔径相对变化值。

1 模型建设

1.1 模型尺寸

地应力测量常以平面应力状态为基础，将地应力测量钻孔看成是无限大薄板中的圆孔，孔壁径向位移为

$$u = \frac{a}{E} [\sigma_1 + \sigma_2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta] , \quad (1)$$

式中， a 是圆孔半径， E 是周围岩石的杨氏模量， σ_1 ， σ_2 分别表示最大、最小水平应力， θ 是从 θ_1 转到 u 所经过的角度^[9]。

当板的边长 L 够大时，有限板和无限板的应力应变分布状态几乎没有差别。为保证模型真实可靠，又节省运算量，需要选取合适的模型尺寸。本文先建立一个边长为 100 倍于孔直径的模型，依次截取不同长度的边长作为模型的外边界，模拟计算不同尺寸模型中各个相邻 45° 的元件两端孔壁上两点（图 1）的相对位移 $S_{\text{模拟}}$ 与上述理论径向位移 $S_{\text{理论}}$ 的差值。本节主要目的为确定合理的模型尺寸，暂不考虑不同的应力比值对模拟值的影响，而是在模型边界上加载相等的应力值作为边界条件，孔的直径 d 取 130 mm，示意图如图 2 所示，结果如图 3 所示。由图 3 可见，当板

边长 L 与孔直径 d 的比值 $L/d=8$ 时，模拟值与理论值已经非常接近。

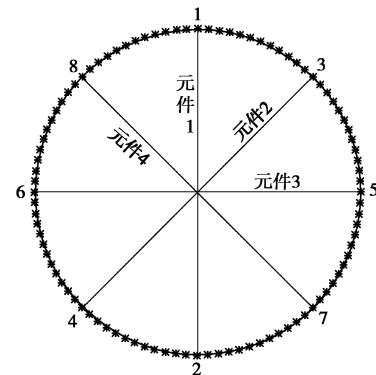


图 1 模拟点与观测元件的分布

Fig. 1 Distribution of simulation points and components

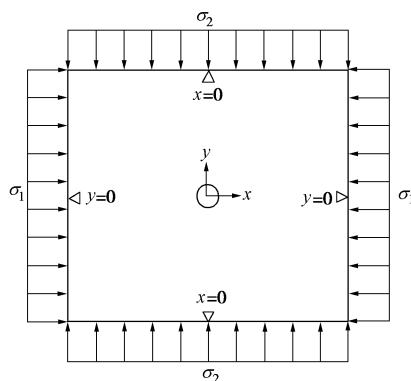


图 2 模型设计示意图

Fig. 2 Sketch map of model design

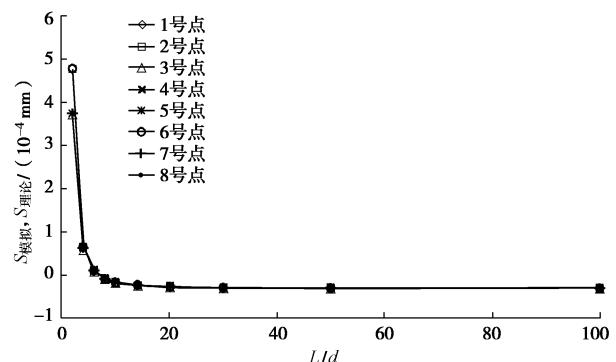


图 3 模型尺寸对模拟结果准确性的影响

Fig. 3 Effect of sizes of models on accuracy of modeling results

1.2 模拟方案设计

本文主要考虑裂隙与最大水平应力的角度、最大水平应力与最小水平应力比值、裂隙与孔壁的距离、长度、宽度和材料属性对四分量钻孔应力 - 应变观测的影响。其中，除最大水平应力与最小水平应力比值这一因素外，其他模型计算时边界条件均采用 $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$ MPa 的方式加载，以避免此因素的干扰。

除裂隙的材料属性这一因素外, 围岩材料属性参照文献[10, 11], 取密度 $\rho=2.95 \text{ g/cm}^3$, 弹性模量 $E=81 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.13$, 裂隙参数取围岩的一半。由每个模型分别模拟出元件 1, 2, 3, 4(见图 1) 的长度变化值 S_1, S_2, S_3, S_4 。在观测环境理想的情况下, $S_1+S_3=S_2+S_4$, 本文通过计算孔径变化差值 $S=(S_1+S_3)-(S_2+S_4)$ 的绝对值 $|S|$ 来研究裂隙对观测的影响。

2 裂隙各因素对四分量钻孔应力-应变观测的模拟

2.1 裂隙与 σ_1 夹角对观测值的影响

考虑到实际观测中裂隙的分布形态各异, 本文分 3 种情况模拟, 分别是裂隙贯穿钻孔且对称分布(对称裂隙)、裂隙与孔壁相隔一定距离且对称分布(分离裂隙)、裂隙展布于孔壁的一侧(单侧裂隙)。裂隙与 σ_1 夹角 φ 从 0° 变化到 90° , 各组裂隙相隔 15° 。 $|S|$ 随 φ 变化的曲线如图 4 所示。

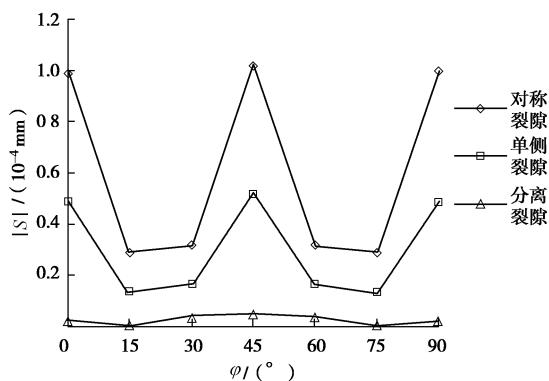


图 4 裂隙与 σ_1 的夹角 φ 对观测的影响

Fig. 4 Effect of φ on the observations

总体来看, 对于同样尺寸的裂隙, 当裂隙贯穿钻孔时, 裂隙对观测的影响最大。由于边界条件加载 $\sigma_1=\sigma_2=1 \text{ MPa}$, 裂隙的 3 种分布情况下, $|S|$ 随 φ 变化的曲线在 $0\sim90^\circ$ 范围内都相对 45° 对称。在 $0\sim45^\circ$ 范围内, 不同 φ 对观测值的影响程度不同, φ 为 0° 和 45° 时, 对观测值的影响最大, 15° 时, 对观测值的影响最小。

2.2 σ_1/σ_2 对观测值的影响

实际观测环境中, $\sigma_1 \neq \sigma_2$, 本文通过设置最大、最小水平应力的不同比值来研究应力环境对观测值的影响。取 σ_1/σ_2 从 1 到 20, 应用上述对观测影响较大的对称裂隙的模型进行计算, 不同比值情况下, $|S|$ 随 φ 变化的曲线如图 5 所示。

当 $\sigma_1 \neq \sigma_2$ 时, φ 在 $0\sim180^\circ$ 之间变化时 $|S|$ 的曲线不再相对 45° 对称, 而是相对 90° 对称, 且在 90°

时, 即裂隙与 σ_2 方向一致时, 对观测值的影响最大。当 $\sigma_1/\sigma_2 \geq 6$ 时, φ 在 60° (120°) 时, 对观测值的影响最小。总体来看, σ_1/σ_2 越大, 裂隙的存在对观测值的影响越大。

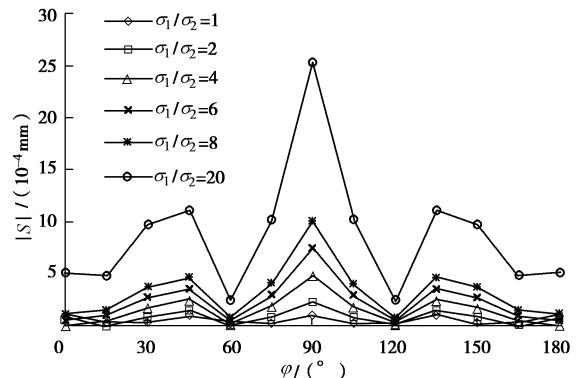


图 5 σ_1/σ_2 对观测值的影响

Fig. 5 Effect of σ_1/σ_2 on observations

2.3 裂隙与孔壁距离对观测值的影响

裂隙长度取为 $2d$, 与孔壁的距离 D 取 $0\sim5$ 倍 $1/4$ 孔径, $|S|$ 随 D 变化的曲线如图 6 所示。可见, 裂隙与钻孔相距越近对观测值的影响越大。变化曲线随裂隙与孔壁距离的增大起初下降较快, $1/4$ 孔径距离以外, $|S|$ 随距离的变化平稳, 一个孔径距离以外, 变化趋于恒定, 对观测基本没有影响, 说明实际观测中, 如果裂隙远离钻孔, 可以忽略裂隙的影响。

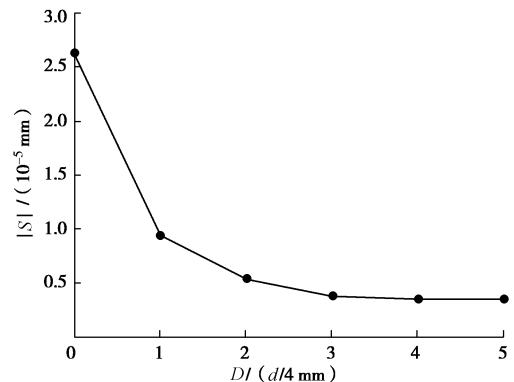


图 6 裂隙与孔壁距离 D 对观测值的影响

Fig. 6 Effect of distance between crack and borehole on observations

2.4 裂隙长度对观测值的影响

取裂隙长度 l 范围为 $1/8 d\sim6/8 d$, 计算 φ 为 0° 和 45° 两种情况, $|S|$ 随 l 变化的曲线如图 7 所示。可见, 裂隙越长对观测值的影响越大。

2.5 裂隙宽度对观测值的影响

在模型计算中, 孔壁分为 96 个单位, 每个单位长度为 $1/96 \pi d$ 。在裂隙宽度影响中, 将裂隙宽度 W 从 1 个单位取到 6 个单位, $|S|$ 随 W 变化的曲线如图 8

所示。可见，裂隙越宽对观测值的影响越大。

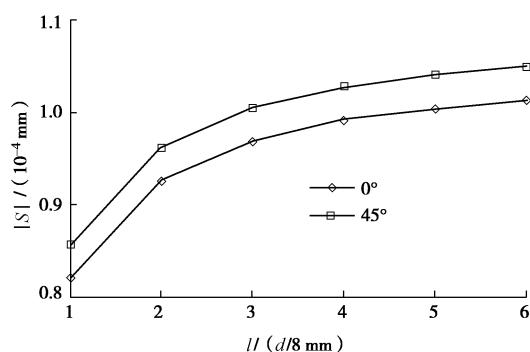


图 7 裂隙长度对观测值的影响

Fig. 7 Effect of lengths of cracks on observations

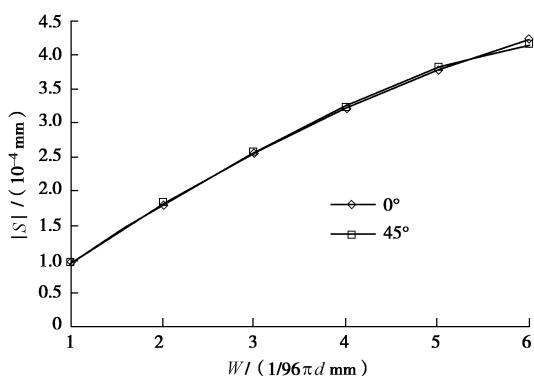


图 8 裂隙宽度 W 对观测值的影响

Fig. 8 Effect of W on observations

2.6 裂隙材料属性对观测值的影响

将裂隙的弹性模量分别赋予围岩的 $1/10 \sim 1$ ，间隔为 $1/10$ 。变化曲线如图 9 所示，可见，裂隙材料属性与围岩相差越大对观测值的影响越大。这说明实际观测中，裂隙越破碎，越不能忽略其对观测值的影响。

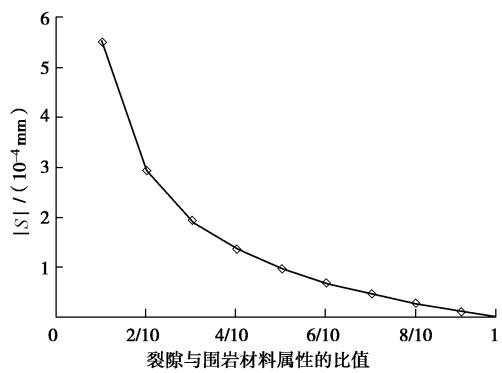


图 9 裂隙材料属性对观测值的影响

Fig. 9 Effect of material attributes of cracks on observations

3 结 论

从模拟结果来看，裂隙与最大水平应力的角度、最大水平应力与最小水平应力比值、裂隙与孔壁距离、

长度、宽度和材料属性几种因素对钻孔应力 - 应变观测都有明显的影响。从裂隙分布形态来看，对称裂隙对观测值的影响最大，其次是单侧裂隙，再次是分离裂隙。 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时， $|S|$ 随裂隙与 σ_1 夹角 φ 的变化曲线在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内相对 45° 对称并且在 0° 和 45° 时，裂隙对观测值的影响最大，夹角在 15° 时，对观测值的影响最小。当 $\sigma_1 \neq \sigma_2$ 时，变化曲线相对 90° 对称，且裂隙与 σ_2 方向一致时，对观测值的影响最大。当 $\sigma_1 / \sigma_2 \geq 6$ 时，裂隙与 σ_1 角度在 60° (120°) 时，对观测值的影响最小。总体来看，当裂隙与最小水平应力方向一致、 σ_1 / σ_2 越大、裂隙与钻孔相距越近、裂隙尺寸越大、裂隙的材料属性与围岩差距越大时，裂隙的存在对观测值的影响越大。

参 考 文 献:

- [1] 池顺良, 艾学民, 池亮, 等. 钻孔应变观测技术发展方向探讨[J]. 地震地磁观测与研究, 1998, 19(5): 23~29. (CHI Shun-liang, AI Xue-min, CHI Liang, et al. The discussion of developing trend of borehole strain observation technology[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1998, 19(5): 23~29. (in Chinese))
- [2] 邱泽华, 张宝红. 我国钻孔应力 - 应变地震前兆监测台网的现状[J]. 国际地震动态, 2002, 283(6): 5~9. (QIU Ze-hua, ZHANG Bao-hong. The present situation of the monitoring network of borehole strain-stress for earthquake precursors in China[J]. Recent Development of World Seismology, 2002, 283(6): 5~9. (in Chinese))
- [3] 邱泽华. 中国分量钻孔地应力 - 应变观测发展重要事件回顾[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(5): 42~47. (QIU Ze-hua. A review of component borehole observation of stress-strain in China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(5): 42~47. (in Chinese))
- [4] 苏恺之. 地应力相对测量方法[C]// 全国地应力专业会议论文选编(上). 芜湖, 1977: 42~61. (SU Kai-zhi. Methods of relative measurement of ground stress[C]// Selected papers of the National Conference on Stress Measurement(Part 1). Wuhu, 1977: 42~61. (in Chinese))
- [5] 王勇, 杨选辉, 刘福生, 等. 昌平台钻孔应变观测资料的可靠性研究[J]. 中国地震, 2005, 21(2): 291~294. (WANG Yong, YANG Xuan-hui, LIU Fu-sheng, et al. Study on the data quality of borehole strain observation in the Changping Station[J]. Earthquake Research in China, 2005, 21(2): 291~294. (in Chinese))
- [6] 张国红, 王勇, 杨选辉, 等. 钻孔应变资料的可靠性分析

- [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(增刊 1): 62 - 66, 73. (ZHANG Guo-hong, WANG Yong, YANG Xuan-hui, et al. Reliability analysis of borehole strainmetry observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(S1): 62 - 66, 73. (in Chinese))
- [7] 安 鸥. 当代钻孔地应力测量的主要问题[J]. 西北地震学报, 1989, 11(2): 43 - 51. (AN Ou. Principal questions of geostress measurement in borehole at present time[J]. Northwestern Seismological Journal, 1989, 11(2): 43 - 51. (in Chinese))
- [8] 邱泽华, 张国宏, 张宝红, 等. 用高密度电法勘探预判钻孔应变观测点岩石完整性[J]. 地震地质, 2013, 35(4): 805 - 816. (QIU Ze-hua, ZHANG Guo-hong, ZHANG Bao-hong, et al. Prospecting underground condition for borehole strain-monitoring location by means of resistivity imaging survey[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4): 805 - 816. (in Chinese))
- [9] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991. (WANG Lian-jie, PAN Li-zhou, LIAO Chun-ting, et al. Stress measurement and application in engineering[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [10] 常士骠, 张苏民, 项 勃, 等. 工程地质手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. (CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min, XIANG Bo, et al. The engineering geology manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [11] 苏恺之. 地应力测量方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985. (SU Kai-zhi. In-situ stress measurement method[M]. Beijing: Earthquake Press, 1985. (in Chinese))

第九届全国青年岩土力学与工程会议（第 2 号通知）

2016 年 11 月 4 日—6 日，中国 重庆

会议简介：本届会议是继在浙江大学（1992 年）、大连理工大学（1995 年）、河海大学（1998）、中科院武汉岩土所（2001 年）、西安交通大学（2004 年）、同济大学（2007 年）、清华大学（2011 年）、南昌航空大学（2013 年）召开的前八届会议之后全国青年岩土工程科技工作者的又一次学术盛会。热忱欢迎本领域的专家教授、学者、工程技术人员、博士后、在校研究生积极参与！

主办单位：①中国土木工程学会土力学及岩土工程分会；②中国力学学会岩土力学专业委员会；③中国水利学会岩土力学专业委员会；④中国建筑学会地基基础分会；⑤中国振动工程学会土动力学专业委员会。

承办单位：重庆交通大学；重庆大学；招商局重庆交通科研设计院有限公司。

会议主题：本次会议以“岩土工程灾害与控制”为主题，对我国近年来岩土力学与岩土工程领域中的相关研究进展进行广泛的学术交流。

会议英文文章征文范围仅限于“岩土工程灾害与控制”；中文文章征文内容涵盖岩土力学与岩土工程的各研究领域，包括但不限于以下内容：①土的本构关系及强度理论；②土工测

试及仪器；③岩土工程数值模拟；④非饱和土与特殊土；⑤软土工程；⑥高边坡与危岩；⑦地下水渗流；⑧土工合成材料；⑨库岸再造与防治；⑩桩基础；⑪地基处理；⑫土石坝工程；⑬航道整治工程；⑭港口码头工程；⑮土动力学与地震工程；⑯环境岩土工程；⑰岩土工程设计与施工；⑲地下空间开发与利用；⑲岩土工程风险与管理；⑳重大岩土工程实例分析。

重要日期：2015 年 06 月 01 日接受论文全文投稿；2015 年 11 月 30 日中文稿件提交全文截止；2015 年 12 月 30 日英文稿件提交全文截止；2016 年 02 月 29 日通知论文是否录用；2016 年 03 月 31 日提交修改后论文；2016 年 11 月 4 日—6 日：会议召开。

联系方式：王俊杰教授（电话：023-62896924；13883116938），梁越副教授（电话：023-62459033；18983369809），钟祖良副教授（电话：13594058380），朱根桥副主任（电话：18008377813），叶四桥教授（电话：13627647292），黄锋副教授（电话：15808075278）。通讯地址：重庆市南岸区学府大道 66 号，重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心。邮政编码：400074，投稿邮箱：nycgge2016@163.com，会议网址：nycgge2016.cqjtu.edu.cn。

（重庆交通大学 供稿）