

DOI: 10.11779/CJGE201406021

# 基于 BQ 的破碎岩体注浆加固强度增长理论

许宏发, 耿汉生, 刘伟东, 王晨

(解放军理工大学国防工程学院爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 正确评估破碎岩体注浆加固后的强度对于岩石工程设计十分重要。基于莫尔库仑强度准则, 建立了注浆前后破碎岩体强度增长理论, 推导出单轴抗压强度增长率、单轴抗拉强度增长率、内摩擦系数增长率和内聚力增长率之间的关系方程。根据已有的基于 BQ 的岩体内聚力和内摩擦角的经验公式, 推导出注浆后破碎岩体内摩擦系数增长率和内聚力增长率随岩体质量指标增长量 ( $\Delta BQ$ ) 变化的表达式。再根据已有的注浆后破碎岩体单轴抗压强度增长率的经验公式和各强度增长率之间的关系方程, 得到隐含  $\Delta BQ$  的非线性方程, 可通过数值解法求出了  $\Delta BQ$  的值, 进而很容易求得各强度增长率的值。分析表明, 随着岩体质量指标由小到大变化, 注浆后强度增长率开始较大, 并很快减小, 而后趋于平缓; 一般情况下, 内聚力增长率约为摩擦系数增长率的 2~5 倍, 单轴抗压强度增长率约为单轴抗拉强度增长率的 2~3 倍。

**关键词:** 破碎岩体; 注浆加固; 强度估计; 岩体质量; BQ

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)06-1147-05

作者简介: 许宏发(1964-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士研究生导师, 从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: Xuhongfa126@126.com。

## Theory of strength increment of grouting-reinforced bodies for broken rock mass based on BQ

XU Hong-fa, GENG Han-sheng, LI Wei-dong, WANG Chen

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, College of Defence Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Properly evaluating strength of grouting-reinforced broken rock mass is very important for rock engineering design. Based on the Mohr-Coulomb strength criterion, a theory of strength increment of broken rock mass before and after grouting is established. Equations for the relations among the growth rates of uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, internal friction coefficient and cohesion (CTFC) are deduced. On the basis of the existing empirical formulas of cohesion and internal friction angle expressed by rock mass basic quality index (BQ), the equations for the growth rate of internal friction coefficient or growth rate of cohesion varying with the increment of rock mass basic quality index ( $\Delta BQ$ ) of broken rock mass before and after grouting are derived respectively. According to the existing empirical formula for the growth rate of uniaxial compressive strength of broken rock mass after grouting and the equations for the relations among the growth rates of CTFC, a nonlinear equation for the implicit variable  $\Delta BQ$  is established. Using the numerical method of nonlinear equations, the value of  $\Delta BQ$  can be calculated, thus the values of growth rates of CTFC can be easily obtained. The results show that the initial strength growth rates are larger, rapidly decrease and tend to be gentle with the rock mass quality index BQ from 200 to 350. Generally, the growth rate of cohesion is about 2 to 5 times that of friction coefficient, and the growth rate uniaxial compressive strength is about 2 to 3 times that of uniaxial tensile strength.

**Key words:** broken rock mass; grouting reinforcement; strength estimation; rock mass quality; BQ

## 0 引言

注浆加固是岩土工程中针对破碎岩体的一项常用措施。目前国内外在岩体注浆技术、注浆效果检测等方面已取得不少成果。如1970年美国军队技术手册《注浆方法和设备》<sup>[1]</sup>中详细介绍了不同的岩土条件

下, 注浆的技术措施和使用设备。Ann等<sup>[2]</sup>对瑞典地下核废料储库围岩注浆的技术、扩散和风险管理等问题进行了详细研究。Xu等<sup>[3]</sup>基于岩体各种注浆扩散半径

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)项目(2010CB732003)

收稿日期: 2013-11-26

的经验公式，总结出破碎岩体注浆扩散半径中值计算公式。

关于注浆后岩体强度问题，已有一些学者通过现场和室内试验，对注浆前后岩体的强度开展了一系列研究。宗义江等<sup>[4]</sup>采用自制注浆系统对破裂岩样进行了承压注浆加固和固结体的力学特性试验，并利用KH-3000视频仪对注浆加固前后岩样的微观结构进行了观测和分析，分析了围压对加固效果的影响；韩贵雷<sup>[5]</sup>研究了节理面JRC-JCS模型，从试验和理论分析的角度进一步证明了裂隙岩体注浆加固后强度提高的机理；韩立军等<sup>[6]</sup>通过破裂岩样结构面注浆加固的剪切试验，分析了注浆对结构面强度和刚度等力学特性参数的影响；张农等<sup>[7]</sup>通过测试不同加载状态的应力-应变曲线，分析了破坏岩体固结后强度及变形性能，通过描述侧向变形及轴向变形的相对变化趋势，进一步揭示了固结块体的变形协调性及巷道围岩注浆加固机理。国外学者对岩体注浆结石体强度也开展了相关研究，Evdokimov等<sup>[8]</sup>对注浆岩体的裂隙进行了抗剪强度试验，比较了注浆前后的剪切强度参数，增强效果明显；Swedeborg等<sup>[9]</sup>比较了注浆和未注浆硬岩节理的力学特性。但这些研究主要是定性的研究，尚没有一个普遍的用于准确预测破碎岩体注浆后强度增长率的理论分析。许宏发等<sup>[10]</sup>在已有试验资料的基础上，总结得到了破碎岩体注浆后强度增长率的经验公式，但对注浆后强度增长理论问题没有涉及。

以破碎岩体（一般为岩体等级IV和V级）为研究对象，假定岩体强度满足莫尔库仑强度准则，推导出各强度增长率之间的关系方程。再结合已有的单轴抗压强度增长率公式、基于BQ的抗剪强度参数经验公式，推导出破碎岩体注浆后岩体质量指标增长量（ $\Delta BQ$ ）的非线性方程，利用求方程根数值法求出 $\Delta BQ$ 的值。最后对注浆后岩体强度增长率进行了影响分析，得到了有工程意义的结论。

## 1 破碎岩体注浆加固强度增长理论

本文研究对象为破碎岩体。对破碎岩体作如下假定：①岩体被多组结构面切割，成裂隙块状、碎裂状或散体状结构；②按BQ进行岩体质量评价，岩体等级为IV或V，一般BQ小于350；③应力水平不高时，假定注浆前后岩体强度均满足莫尔-库仑强度准则；④岩体的强度可以采用岩体质量等级BQ进行评估；⑤注浆后改善了岩体质量，使岩体质量指标BQ增长了 $\Delta BQ$ 。

根据莫尔-库仑原理<sup>[11]</sup>，有

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} , \quad (1)$$

式中， $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为破坏时的最大主应力和最小主应

力。

可以推导得到岩体各种强度之间的关系为

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{S_c S_t} , \quad (2)$$

$$f = \tan \varphi = \frac{S_c - S_t}{2\sqrt{S_c S_t}} , \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{S_t}{S_c} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} . \quad (4)$$

式中， $S_c$  为单轴抗压强度（以下简称抗压强度）； $S_t$  为单轴抗拉强度的绝对值（以下简称抗拉强度）； $c$  为内聚力； $f$  为内摩擦系数； $\varphi$  为内摩擦角； $\alpha$  为岩体抗拉强度和抗压强度的比值。

注浆后岩体质量得到改善。定义破碎岩体注浆前后强度增长率如下：抗压强度增长率为

$$\xi_c = \frac{\Delta S_c}{S_{cb}} = \frac{S_{ca} - S_{cb}}{S_{cb}} ; \quad (5)$$

抗拉强度增长率为

$$\xi_t = \frac{\Delta S_t}{S_{tb}} = \frac{S_{ta} - S_{tb}}{S_{tb}} ; \quad (6)$$

内聚力增长率为

$$\xi_{coh} = \frac{\Delta c}{c_b} = \frac{c_a - c_b}{c_b} ; \quad (7)$$

内摩擦系数增长率为

$$\xi_f = \frac{\Delta f}{f_b} = \frac{f_a - f_b}{f_b} . \quad (8)$$

式中， $S_{cb}$  为注浆前岩体抗压强度； $S_{ca}$  为注浆后抗压强度； $\Delta S_c$  为抗压强度增长量； $S_{tb}$  为注浆前抗拉强度， $S_{ta}$  为注浆后抗拉强度， $\Delta S_t$  为抗拉强度增长量； $c_b$  为注浆前内聚力， $c_a$  为注浆后内聚力， $\Delta c$  为内聚力增长量； $f_b$  为注浆前内摩擦系数； $f_a$  为注浆后内摩擦系数， $\Delta f$  为内摩擦系数增长量。

将式(2)代入式(7)，可得到内聚力的增长率和抗压强度增长率、抗拉强度增长率之间的关系：

$$\begin{aligned} \xi_{coh} &= \frac{\sqrt{S_{ca} S_{ta}}}{\sqrt{S_{cb} S_{tb}}} - 1 \\ &= \sqrt{(\xi_c + 1)(\xi_t + 1)} - 1 , \end{aligned} \quad (9)$$

或写成

$$\xi_t = \frac{(\xi_{coh} + 1)^2}{\xi_c + 1} - 1 . \quad (10)$$

将式(3)代入式(8)，可得到内摩擦系数与抗压强度增长率、抗拉强度增长率之间的关系式：

$$\begin{aligned} \xi_f &= \frac{S_{ca} - S_{ta}}{S_{cb} - S_{tb}} \cdot \sqrt{\frac{S_{cb} S_{tb}}{S_{ca} S_{ta}}} - 1 \\ &= (\xi_c + 1) \frac{1 - \alpha_a}{1 - \alpha_b} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\xi_c + 1)(\xi_t + 1)}} - 1 \end{aligned}$$

$$= \frac{k(\xi_c + 1)}{\xi_{coh} + 1} - 1 , \quad (11)$$

式中,  $\alpha_b$  为注浆前岩体抗拉强度和抗压强度的比值,  $\alpha_a$  为注浆后岩体抗拉强度和抗压强度的比值。

由式(4)可得

$$k = \frac{1 - \alpha_a}{1 - \alpha_b} = \frac{\sin \varphi_a (1 + \sin \varphi_b)}{\sin \varphi_b (1 + \sin \varphi_a)} , \quad (12)$$

$k$ 一般介于1.1~1.5之间。

## 2 岩体注浆抗剪强度参数增长率估计

文献[12]根据国标工程岩体质量指标BQ, 构建了用BQ估计岩体内摩擦角、内聚力的经验公式, 可得到注浆前后剪切强度参数为

$$\left. \begin{aligned} c_b &= \frac{2.42}{1 + 335 \exp(-0.014BQ)} , \\ c_a &= \frac{2.42}{1 + 335 \exp[-0.014(BQ + \Delta BQ)]} , \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_b &= \frac{0.4\pi}{1 + 8.69 \exp(-0.0062BQ)} , \\ \varphi_a &= \frac{0.4\pi}{1 + 8.69 \exp[-0.0062(BQ + \Delta BQ)]} . \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(7)、(13)可以得到内聚力的增长率为

$$\xi_{coh} = \frac{c_a}{c_b} - 1 . \quad (15)$$

由式(8)、(14)可以得到内摩擦系数的增长率为

$$\xi_f = \frac{\tan \varphi_a - \tan \varphi_b}{\tan \varphi_b} = \frac{\tan \varphi_a}{\tan \varphi_b} - 1 . \quad (16)$$

## 3 破碎岩体注浆后质量指标增长量

文献[10]根据已有试验资料, 通过无量纲分析, 发现岩体注浆后单轴抗压强度增长率与原岩-浆液结石强度比之间存在很好的相关性, 并通过非线性拟合, 得到了破碎岩体注浆后抗压强度增长率的经验公式:

$$\xi_c = \frac{3.2543}{[2.45 + \lg_{10}(S_{cb}/q_c)]^2} , \quad (17)$$

式中,  $q_c$  为注浆液结石28 d单轴抗压强度。

根据莫尔-库仑准则, 注浆前岩体抗压强度为

$$S_{cb} = \frac{2c_b \cos \varphi_b}{1 - \sin \varphi_b} . \quad (18)$$

将式(17)代入式(11)可得

$$\frac{3.2543}{[2.45 + \lg_{10}(S_{cb}/q_c)]^2} - \frac{(\xi_{coh} + 1)(\xi_f + 1)}{k} + 1 = 0 , \quad (19)$$

式(19)为隐含未知变量 $\Delta BQ$ 的非线性方程, 可通过

数值方法求解。本文利用MATLAB软件编制了程序求解 $\Delta BQ$ 。然后, 很容易通过式(15)~(17)、(10)求解得到注浆后岩体强度的增长率。

## 4 注浆加固岩体强度增长率规律分析

影响破碎岩体注浆加固体强度的因素较多, 如注浆材料、注浆压力、注浆时间、岩体的破碎程度、岩体的渗透系数等。但概括起来, 主要是注浆质量和注浆前岩体质量这2个方面。实际上, 在构建岩体注浆加固强度增长率经验公式的过程中, 已将注浆质量隐含附加到了浆液结石体抗压强度指标中。因此, 可用注浆浆液结石体抗压强度 $q_c$ 表征注浆的质量。用BQ表征注浆前岩体的质量。假定浆液结石抗压强度 $q_c$ 的变化范围为5~40 MPa, 破碎岩体质量指标BQ的变化范围为200~350 MPa。

### 4.1 抗剪强度参数增长率分析

由式(19)非线性方程, 通过数值解法, 可求得 $\Delta BQ$ , 再根据式(15)、(16)很容易得到抗剪强度参数内摩擦系数增长率和内聚力增长率的值, 如图1, 2所示。

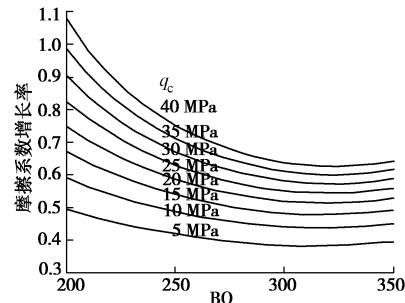


图1 BQ和 $q_c$ 对摩擦系数增长率的影响

Fig. 1 Effect of BQ and  $q_c$  on growth rate of friction coefficient

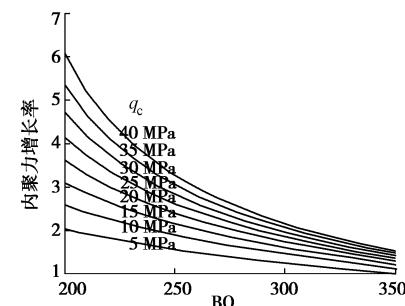


图2 BQ和 $q_c$ 对内聚力增长率的影响

Fig. 2 Effect of BQ and  $q_c$  on growth rate of cohesion

由图1, 2可以看出, 岩体质量和注浆质量对注浆后抗剪强度参数的增长有显著影响。一般岩体质量较差时, 注浆加固效果很好, 随岩体质量指标增大, 抗剪强度参数增长率减小。具体规律为: ①随着岩体质量指标BQ增大, 抗剪强度参数的增长率逐渐减小, 且逐渐平缓; ②随着注浆质量 $q_c$ 的增大, 抗剪强度参数

的增长率增大，且在岩体质量等级较低时较为显著；③内聚力的增长率远大于内摩擦系数的增长率，一般内聚力的增长率是内摩擦系数增长率的2~5倍。

#### 4.2 单轴抗拉和抗压强度增长率分析

同样由式(10)、(17)容易得到抗拉强度增长率和抗压强度增长率的值，如图3、4所示。

由图3、4可以看出，岩体质量和注浆质量对注浆后单轴抗压和抗拉强度增长也有显著影响。岩体质量较差时，对抗压和抗拉强度的提高较大，随岩体质量指标增大，抗拉和抗压强度增长率减小。具体规律为：①随着岩体质量指标BQ增大，抗拉和抗压强度增长率逐渐减小，且逐渐平缓；②随着注浆质量 $q_c$ 的增大，抗拉和抗压强度增长率增大，且在岩体质量等级较低时较为显著；③抗压强度增长率大于抗拉强度增长率，一般抗压强度增长率是抗拉强度增长率的2~3倍。

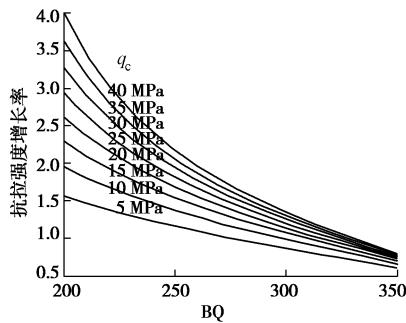


图 3 BQ 和  $q_c$  对单轴抗拉强度增长率的影响

Fig. 3 Effect of BQ and  $q_c$  on growth rate of uniaxial tensile strength

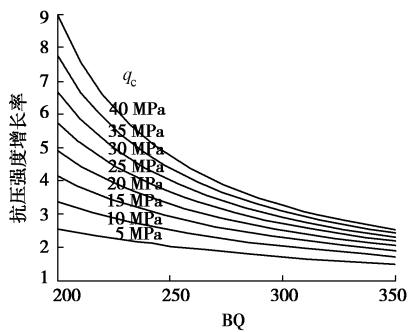


图 4 BQ 和  $q_c$  对单轴抗压强度增长率的影响

Fig. 4 Effect of BQ and  $q_c$  on growth rate of uniaxial compressive strength

## 5 结 论

(1) 根据莫尔-库仑强度理论推导出抗拉强度增长率、抗压强度增长率、内摩擦系数增长率和内聚力增长率之间的关系方程。

(2) 根据已有的用BQ估计岩体内摩擦角和内聚力的经验公式，可以得到破碎岩体注浆后内摩擦系数增长率和内聚力增长率随岩体质量指标增长量 $\Delta BQ$ 变化的表达式。

(3) 根据已有的破碎岩体注浆后单轴抗压强度增长率的经验公式及各强度增长率之间的关系，通过非线性方程组的数值解法，可得到注浆后岩体质量指标增长量 $\Delta BQ$ 的值。这样很容易求得抗拉强度增长率、抗压强度增长率、内摩擦系数增长率和内聚力增长率的值。

(4) 岩体质量和注浆质量对注浆后岩体各强度的增长率有显著影响。岩体质量较差时，注浆对各强度的提高较大，随岩体质量指标增大，各强度增长率逐渐减小，且趋于平缓。一般情况下，内聚力的增长率是内摩擦系数增长率的2~5倍，抗压强度增长率是抗拉强度增长率的2~3倍。

## 参 考 文 献:

- [1] TM5-818-6, AFM88-32. Grouting methods and equipment[S]. 1970.
- [2] EMMELIN A, BRANTBERGER M, ERIKSSON M, et al. Rock grouting-Current competence and development for the final repository[R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2007.
- [3] XU H F, WANG C, LI C, et al. Estimating diffusion radius grouting into broken rock mass[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 353: 44 - 49.
- [4] 宗义江, 韩立军, 韩贵雷. 破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 483 - 488. (ZHONG Yi-jiang, HAN Li-jun, HAN Gui-lei. Mechanical characteristics of confined grouting reinforcement for cracked rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 483 - 488. (in Chinese))
- [5] 韩贵雷. 裂隙岩体注浆后结构面粗糙度及刚度变化分析[J]. 金属矿山, 2012, 41(4): 43 - 46. (HAN Gui-lei. Roughness and stiffness analysis on grouting structural surface of fractured rock[J]. Metal Mine, 2012, 41(4): 43 - 46. (in Chinese))
- [6] 韩立军, 宗义江, 韩贵雷, 等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2570 - 2576. (HAN Li-jun, ZONG Yi-jiang, HAN Gui-lei, et al. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2570 - 2576. (in Chinese))
- [7] 张农, 候朝炯, 陈庆敏, 等. 岩石破坏后的注浆固结体的力学性能[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 50 - 53. (ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, CHEN Qing-min, et al. Mechanical properties of the body after the destruction of the grouting rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3): 50 - 53. (in Chinese))

- [8] EVDOKIMOV P D, ADAMOVICH A N, FRADKIN L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting[J]. Hydrotechnical Construction, 1970, 4(3): 229 - 233.
- [9] SWEDENBORG S, DAHLSTRÖM L O. Rock Mechanics effects of cement grouting in hard rock masses[C]// Proceedings of the 2003 Specialty Conference on Grouting at the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans: Grouting and Ground Treatment, ASCE, 2003, GSP120: 1089-1102.
- [10] 许宏发, 耿汉生, 李朝甫, 等. 破碎岩体注浆加固体强度估计[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2018 - 2022. (XU Hong-fa, GENG Han-sheng, LI Chao-fu, et al. Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2018 - 2022. (in Chinese))
- [11] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Maklen: Blackwell Publishing, 2007.
- [12] 许宏发, 陈 锋, 王 斌, 等. 岩体分级 BQ 与 RMR 的关系及其力学参数估计[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 195 - 198. (XU Hong-fa, CHEN Feng, WANG Bin, et al. Relations between RMR and BQ for rock mass classification and estimation of mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 195 - 198. (in Chinese))

## 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 2014 年度开放课题申请指南

本重点实验室自 2007 年 2 月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来, 按照教育部重点实验室的开放要求, 自 2008 年起面向国内外征集开放基金项目, 连续五年批准了约 35 项国内外访问学者的申请, 取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究, 本年度继续设立专项开放研究基金, 资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

### 1. 资助范围

开放课题应紧密围绕本重点实验室的主要研究方向, 资助意义重大、具有重要科学意义和应用前景的研究项目。本年度开放课题主要资助的研究方向如下: ①土体渐进破坏理论与软土工程; ②土体宏观理论与环境土工灾变防治; ③土体多场耦合理论与灾害控制; ④地下工程安全理论与风险控制; ⑤城市地下空间与岩体地下工程。

### 2. 申请资格

同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

### 3. 资助金额

申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额, 开放基金的资助强度一般每项不超过 4 万元。原则上每个方向批准一项, 合计共资助 5 项左右。

### 4. 项目执行期限

每个项目实施期限为两年, 即 2014 年 9 月 1 日至 2016 年 8 月 31 日。

### 5. 考核标准

每个开放基金资助课题应在国际学术期刊发表 1 篇被 SCI 检索的论文(有正式的检索号), 且同济大学合作者需列为论文的共同作者, 作者单位之一必须标注为本重点实验室, 并注

明课题批准号。

### 6. 项目的实施与管理

批准的开放课题资助经费实行一次核定, 两批拨款。项目批准后, 即拨付课题资助经费的 50% 至课题负责人所在单位; 其余 50% 待课题结题验收后即拨付。

项目负责人应当按照项目计划书组织开展研究工作, 做好资助项目实施情况的原始记录, 填写项目中期报告。

自项目资助期满之日起 60 日内, 项目负责人应当撰写结题报告、编制项目资助经费决算; 取得研究成果的, 应当同时提交研究成果报告。

如由于客观原因不能按期完成研究计划的, 项目负责人应当于项目资助期限届满 90 日前提出延期申请, 申请延长的期限不得超过 1 年。

### 7. 申报程序

(1) 开放基金申请人应认真阅读有关申请说明, 申报课题必须符合本实验室的研究方向, 属于 2014 年资助研究内容的范畴, 并具有本重点实验室固定研究人员合作。同济大学有关研究人员的介绍, 可查阅: <http://geotec.tongji.edu.cn/keylab>。

(2) 本年度开放课题申请截止时间为 2014 年 6 月 30 日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式 2 份寄给: 上海市四平路 1239 号(邮政编码 200092), 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 马险峰 老师 收(电话: 021-65984993, E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn)。

除纸质申请材料, 申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF 格式), 并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。

(3) 最终结果将于 2014 年 9 月前公布。

(同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 马险峰供稿)