

充气锚杆的研究现状及展望

彭文祥, 曹佳文

中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083

摘要 充气锚杆是一种全新概念的新型锚杆,它是充分利用软土在压力作用下可产生挤压变形的特性研发而成的。本文论述了充气锚杆的独有特点,对充气锚杆的研究现状、锚杆荷载传递机制,以及岩土锚固机制进行了论述。总结了充气锚杆的一些规律:① 充气锚杆的抗拔承载力主要与砂的密实度、软土的液限指数、锚杆长度、充气压力大小、橡胶膜的厚度、橡胶膜外表的粗糙度、充气扩大头体积、锚杆埋设深度等因素有关,其中,锚杆长度是最主要的影响因素;② 充气锚杆的极限抗拔承载力是螺旋锚杆的4倍,在软土的排水与不排水对比试验中,充气锚杆极限抗拔承载力相差3~4倍;③ 在充气压力一定时,不同土体,锚杆的抗拔承载力差别很大,短锚杆100mm时几乎全长受力,长锚杆200~300mm时只在锚杆充气段上部分受力。

关键词 充气锚杆;拉拔;承载力;橡胶模

中图分类号 U451

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)05-0111-05

A Review of Studies on Inflatable Anchor

PENG Wenxiang, CAO Jiawen

School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Inflatable anchor is a new type of anchor, developed based on the soil-anchor characteristics. Under compressive loading, the soft soil will be greatly deformed. Inflatable anchor makes a full use of this feature of soft soil. This paper discusses the characteristics of inflatable anchor and reviews the present state of development of inflatable anchor, the mechanism of load transferring and the anchoring mechanism. It is shown that the limit tensile load of inflatable anchor is related to many factors, including soil density, soft soil liquidity index, anchor length, inflatable air pressure, rubber thickness, rubber friction, air inflatable volume and the anchoring depth. Among those factors, the anchor length is the most important. The limit tensile load of inflatable anchor is 4 times of that of helical plate anchor. The limit tensile load in the drainage test is 3~4 times of that in undrainage test. If the air pressure is constant, the limit tensile load varies greatly in different soils. The short anchor (about 100mm in length) will be loaded along the whole shaft. The long anchor (about 300mm in length) will be loaded only in the inflatable part.

Keywords inflatable anchor; tensile; limit load; rubber

0 引言

随着中国经济的高速发展,城市建设、城市交通不断向地下发展,各类地下工程项目数量急增,基坑的开挖深度不断刷新。城市多为软土地区,这种软土工程地质条件与地下工程建设发展之间的矛盾日益突出,深基坑开挖的工程事故明显增多,软土地基中深基坑支护与锚固技术已成为软土地区地下工程建筑的难点和热点。因此,为确保软土地区深基坑工程的安全,研究和探讨软土锚固方法与机制及分析计算方法已成为软土基坑工程领域中一项势在必行的工作^[1-5]。

充气锚杆是一种全新概念的新型锚杆,它是充分利用软土在压力作用下可产生挤压变形的特性研发而成的。简单地说,充气锚杆就是在锚杆端部外套0.3~1.0m长的橡胶膜,锚杆采用钢管,外表粗糙的橡胶膜套在钢管外部,上下两端用钢环紧固在钢管上,在包橡胶段的钢管部分钻适量小孔(供充气用),将锚杆安置在软土中后,对其进行高压充气,锚杆端部橡胶膜(膜厚为2~4mm)在高压气体下膨胀,挤压周围土体形成一个腰鼓状的空腔,再将空腔内充满水,形成一个不可压缩的扩大头,示意图如图1所示,实物图如图2所示。在

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介: 彭文祥,博士后,研究方向为岩土工程,电子信箱:csu2009@126.com

锚头受拉过程中,充气锚杆橡胶膜的变形如图 3 所示。与其他类型锚杆相比,充气锚杆有其自身特点,主要表现为:① 可广泛应用于软土工程地质条件中,且能提供较大的抗拔力;② 施工简便,快捷,易操作;③ 用材简单,并可回收利用,大大节约工程成本;④ 锚杆施工完毕可立即提供全部锚固,不必像其他注浆锚杆那样需一定时间才能达到所需强度,缩

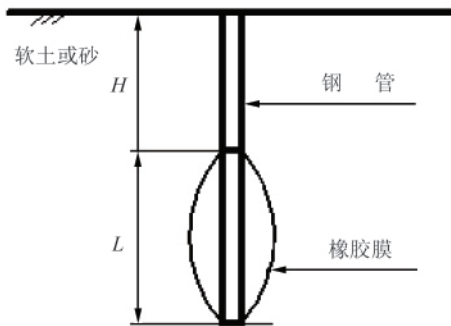


图 1 充气锚杆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inflatable anchor



图 2 充气锚杆实物图

Fig. 2 An inflatable anchor

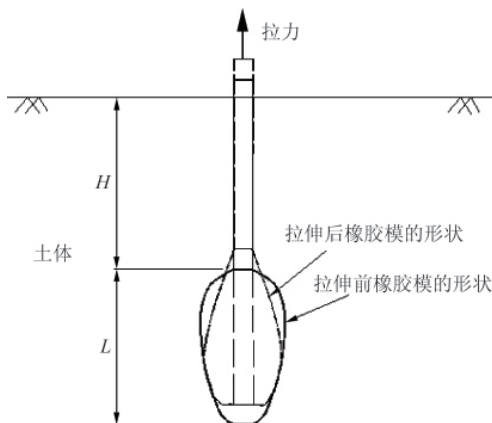


图 3 受拉过程中充气锚杆橡胶膜的变形

Fig. 3 Deformation of the rubber of the inflatable anchor during pullout

短了施工工期;⑤ 无废液、废气、噪音,施工环保;⑥ 橡胶膜在受拉过程会产生较大拉伸变形,对其进行预张拉,消除其大部分变形,这样可以将被动的支护体系变为主动的支护体系,同时可根据变形控制需要对锚杆进行多次张拉,以满足工程安全;⑦ 可在水下施工,为海洋、港口水下作业机器提供抗浮锚固力。本文通过总结对比相关研究成果,就充气锚杆目前存在的一些问题和发展趋势进行阐述和讨论,为该领域内的相关研究提供一定的参考。

1 充气锚杆承载力研究现状

充气锚杆的提出源于海洋工程,为在海底施工作业和为机器(机器人)提供抗浮锚固力,澳大利亚 Dundee 大学土木工程系 Tim Newson 和 Stephen T. Gallacher^[1]于 2000 年开始进行充气锚杆的室内试验,其试验主要包括 3 个方面:① 与螺旋锚杆进行对比试验;② 进行了一系列软土和砂的充气锚杆小比例模型试验(对锚杆不同的埋设深度、长度、不同特性的软土(砂)、不同粗糙度的橡胶膜、不同的充气压力);③ 对充气锚杆抗拔承载力的试验值和计算值进行比较分析。

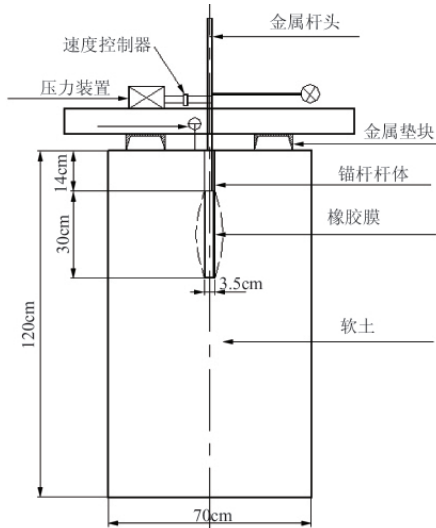
Tim Newson 采用图 4 的试验仪器,通过试验研究得出充气锚杆的抗拔承载力主要与以下几个因素有关:砂的密度、软土的液限指数、锚杆长度、充气压力大小、橡胶膜的厚度、橡胶膜外表的粗糙度、充气扩大头体积、锚杆埋设深度。同时, Tim Newson 通过进行充气锚杆与旋转锚杆的对比研究试验,在相当条件下(同种砂,锚杆埋深相同,充气锚杆长橡胶膜段长 200mm,螺旋锚杆螺旋段长 200mm),得到充气锚杆的极限抗拔承载力是螺旋锚杆的 4 倍;并进行了在软土中的排水与不排水对比试验,得到的充气锚杆极限抗拔承载力相差 3~4 倍。

Stephen T. Gallacher 运用 Meyechof and Adams 理论得出了充气锚杆抗拔承载力与锚杆长度、埋深、摩擦间表面积充气压力等相关的经验公式。澳大利亚 Dunkee 大学土木工程系的 T. A. Newson 和 F. W. Smith 以及澳大利亚 Scolt Offshore MS 公司的 P. Brunning 于 2003 年进行了充气锚杆在近海岸软土中的试验研究^[2],试验对在排水与不排水条件下及锚杆充气与不充气条件下,抗拔力与位移的关系进行了较深入的研究,对超孔隙水压力对锚杆抗拔力的影响也进行了试验研究,得出超孔隙水的消失可以使锚杆承载力提高 30%,并根据腔体膨胀理论^[3]得出了充气锚杆的极限充气压力公式和抗拔承载力估算公式。

2007 年加拿大西安大略大学地质研究中心的 S. Hinchberger 和 Y. Lang 利用 Tim Newson 的试验数据,用 PLAXIS 有限元程序对充气锚杆进行数值分析^[4](图 5),得出锚杆长度、埋设深度、充气压力、土体密度、橡胶膜外表粗糙度等诸多影响锚杆抗拔力的因素中,锚杆长度是最主要的影响因素,这一分析结论与试验所得出的结果吻合。同时,数值分析也表明:在充气压力一定时,不同土体,锚杆的抗拔承载力差别很大;短锚杆 L 长为 100mm 时几乎全长受力,长锚杆



(a) 试验装置
(a) Testing device



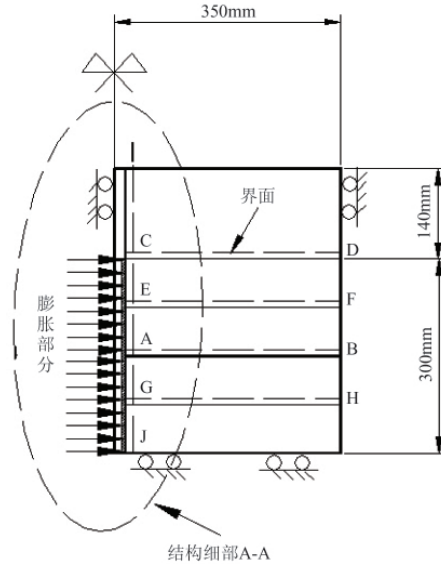
(b) 示意图
(b) Schematic diagram of the device

图 4 试验装置

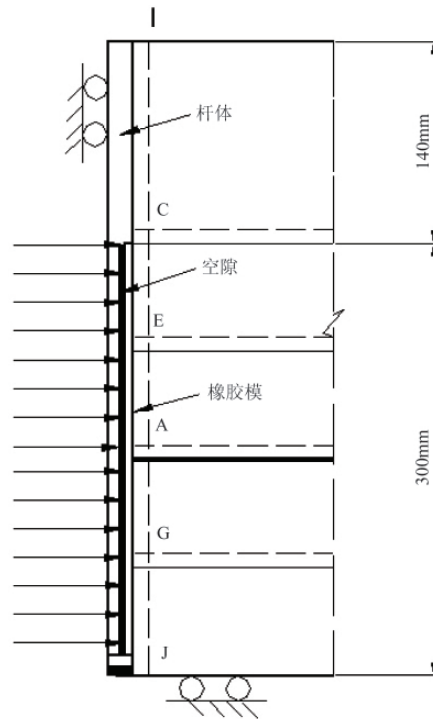
Fig. 4 Testing device

L 长为 200~300mm 时,只在锚杆充气段上部分受力,进而提出了锚杆的有效长度问题。

目前,在国内尚未见有对充气锚杆进行研究的报道,但近年来中国对软土锚固取得了重大突破,可以说,中国软土锚固技术与世界先进水平相比毫不逊色,主要表现在以下几个方面:① 采用可重复灌浆技术,大幅度提高了软土中锚杆的承载力,借助密封袋,灌浆套管,注浆枪等特殊结构构造,能在一次灌浆体强度达到 5MPa 后,实现二次或多次重复高压(3.5~4.0MPa)劈裂灌浆,使水泥浆液能较均匀地沿锚固段全长向周围土体渗透挤压扩散,以显著提高加固土层的抗剪强度,从而使灌浆体与土层界面上的粘结强度及锚杆承载力提高 0.6~1.0 倍。可重复灌浆型锚杆技术已在天津、上海、



(a) 计算模型
(a) Calculation model



(b) A-A 放大图
(b) A-A zoom-in

图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical calculation model

深圳、厦门等地的软土基坑工程中得到了广泛的应用;② 基本上掌握了软土中锚杆蠕变变形和预应力值变化的规律,尤其对塑性指数大于 17 的软土在锚杆作用下的蠕变变形及锚杆荷载随时间的变化特性进行了深入的研究;③ 在实践中总结出了软土工程开挖、支护控制周边位移的一些有效方法,如设置止水帷幕、锚杆成孔采取“跳钻”、土方开挖分层实施

等方法。

2 锚杆荷载传递机制的研究现状

对锚杆荷载传递机制的研究,英国、美国、加拿大、法国、澳大利亚等国处于国际领先地位。主要内容为荷载从锚杆(索)转移到灌浆体力学机制研究及灌浆体与钻孔孔壁间力学机制研究。Lutz等^[5]、Hanson^[6]、Goto等^[7]都研究了荷载从锚杆传到灌浆体的力学机制;Fuell等^[8]也研究了荷载由锚杆(索)向粘结砂浆传递的情况;Stillborg^[9]对影响全长粘结式锚杆(索)承载力的因素进行了系统研究;Nakayama和Beaudion^[10]进行了水泥砂浆和钢筋的粘结强度研究;Goris等^[11]进行了锚杆支护的试验研究。近年来,Heytt等^[12]、Kaiser^[13]等一些学者进行了大量研究,其中以Heytt等的研究最为系统。他们通过现场和室内试验得出影响锚杆(索)承载力的主要因素是:水泥砂浆特性、锚固长度和围压。Jarred等^[14]通过室内仿真模拟实验,研究了注浆锚杆的侧限刚度、注浆长度及膨胀水泥含量对杆体与注浆界面力学性质的影响,认为杆体与注浆界面剪切强度随侧限刚度的增大而增大。程良奎^[15]对上海太平洋饭店和北京京城大厦两个深基坑工程的拉力型锚杆锚固段粘结应力的分布形态进行了测定,得到了一些规律性的认识。

3 岩土锚固机制的研究现状

对于岩土锚固机制,普遍认识可概括为:悬吊理论、支撑理论、组合梁理论、增强理论、销钉理论等,这些反映了在特定条件和锚固方式下锚杆的加固作用,但相应的力学模型还显粗糙,与实际情况出入较大,只是由于计算方法简单,物理概念明确,在目前岩土锚固工程中仍被广泛应用。随着岩土锚固工程中由支撑概念向加固概念的转变,许多研究人员通过室内模型试验、数值仿真模拟、现场试验等手段对锚固作用机制进行了深入研究^[14-16]。

唐湘民^[17]通过模型块试验模拟洞室加固围岩的变形破坏,认为锚杆倾斜交叉布置可以提高锚固效果;长短结合使用锚杆比单独使用长或短锚杆有利;锚固形成承载拱,产生应变强化。邹志晖等^[18]通过相似模拟试验研究了锚杆在不同岩体中的工作机制,得到了一些规律性的认识。葛修润等^[19]通过室内模拟试验和理论分析,着重探讨了锚杆对节理面抗剪性能的影响以及杆体阻止节理面发生相对错动的“销钉”作用机制。张玉军^[20]对全长粘结型锚杆锚固试件进行常规和蠕变单轴压缩试验,根据试验结果对锚杆加固效果进行评价,给出了有关经验公式,深入研究了锚固体的流变特性,对锚固体提出了6种黏弹-黏塑性模型,并根据相关本构方程进行了数值分析。

近年来,国内外学者对锚杆数值模拟计算进行了不少研究,贺若兰等^[21]采用一种能够真实模拟锚杆和岩土体界面闭合、滑移及张开等实际变形性能的摩擦-接触面型界面单元,对照实测工程,建立拉拔工况下全长粘结锚杆的数值模型,并验证了模型的精度,对拉拔工况进行全过程仿真分析,再

现锚杆、界面及岩土体力学特性随施工全过程发展的变化规律,定量揭示这一工况下全长粘结锚杆的工作机制。蔡永昌等^[22]结合三角形、四边形等实体单元的位移插值函数和一维轴力杆单元刚度矩阵,推导出了一种用于锚杆支护数值模拟的单元列式,可以在地下结构有限元计算中的任何开挖步自由地加设或拆除锚杆,而且,不必在划分初始网格时事先考虑或预留锚杆的结点位置,大大简化了有限元的前处理或网格划分过程。贾金青等^[23]基于改进的杆系有限元法,通过实际工程对预应力锚杆柔性支护技术进行了数值分析计算,得到了预应力值对位移的影响曲线及锚杆轴力的分布规律,并与现场监测进行比较,验证程序计算的正确性。Hema J. Sirrimwardane^[24]运用三维方法对锚杆在土体中的力学行为进行了较深入的研究。彭文祥等^[25]运用基于强度折减的拉格朗日差分法,建立数值模型,分别改变注浆锚杆的6个支护参数,采用FLAC3D软件计算边坡的安全系数及影响因素的灵敏度,分析了锚杆长度、锚杆直径、垂直间距、锚杆倾角、布设位置、砂浆强度等参数对锚固效果的影响。

目前,锚固理论研究工作取得了一定的进展,但仍存在不少问题:①理论研究明显滞后于应用研究;②对锚固体力的传递只有定性的描述,在设计中大都采用粘结应力均匀分布的形式;③对锚杆加固机制没有统一的认识,缺乏行之有效和合理的计算方法;④理论分析和数值分析与实际情况出入较大。

4 结语

充气锚杆这种全新的锚杆在中国沿海软土地区地下工程项目中有广阔的应用前景,对其进行的研究还刚刚起步,其荷载传递机制,对软土的锚固机制和对其进行数值模拟分析都有待深入进行。

本文总结了充气锚杆的一些规律。

1) 充气锚杆的抗拔承载力主要与以下几个因素有关:砂的密实度、软土的液限指数、锚杆长度、充气压力大小、橡胶膜的厚度、橡胶膜外表的粗糙度、充气扩大头体积、锚杆埋设深度,其中锚杆长度是最主要的影响因素。

2) 充气锚杆的极限抗拔承载力是螺旋锚杆的4倍;在软土中排水与不排水对比试验中,充气锚杆极限抗拔承载力相差3~4倍。

3) 在充气压力一定时,不同土体,锚杆的抗拔承载力差别很大;短锚杆长 L 为100mm时几乎全长受力,长锚杆 L 长为200~300mm时只在锚杆充气段上部分受力。

参考文献 (References)

- [1] Gallacher T S. Novel anchoring systems for remotely operated vehicles [D]. Department of Civil Engineering of the University of Dundee, 2000.
- [2] Newson T A, Smith F W, Brunning P, et al. An experimental study of inflatable offshore anchors[C]//ISOPE2003 Conference. Honolulu, Hawaii, USA, 2003:345-356.
- [3] Carter J P, Booker J R, Yeung S K. Cavity expansion in cohesive friction



- soils[J]. *Geotechnique*, 1986, 36(3): 349-358.
- [4] PLAXIS Version 8.0. PLAXIS finite element code for soil and rock analyses [EB/OL]. <http://www.plaxis.nl/>
- [5] Lutz L, Gereley P. Mechanics of band and slip of deformed bars in concrete[J]. *Journal of American Concrete Institute*, 1967, 64(11): 711-721.
- [6] Hansor N W. Influence of surface roughness of prestressing strand on band performance [J]. *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 1969, 14(1): 32-45.
- [7] Goto Y. Cracks formed in concrete around deformed tension bars [J]. *Journal of American Concrete Institute*, 1971, 68(4): 244-251.
- [8] Fuller P G, Cox R H T. Mechanics load transfer from steel tendons of cement based grouted [C]//Fifth Australialasian Conference on the Mechanics of Structure and Materials. Melbourne: Australialasian Institute of Mining and Melallurgy, 1995.
- [9] Stillborg B. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock[D]. Sweden: Lulea University of Technology, 1984.
- [10] Nakayama M, Beaudoin B B. A novel technique determining bond strength developed between cement paste and steel [J]. *Cement and Concrete Research*, 1987, 22(3): 478-488.
- [11] Goris J M, Conway J P. Grouted flexible tendons and scaling Investigations [C]//Proceeding of the 13th World Mining Congress. Sweden: Potterdam, Balkema, 1987.
- [12] Hyett A J, Bawden W F, Reichert R D. The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts [J]. *Int J Roc Mech Min Sic and Geomin Abstr*, 1992, 29(5): 503-524.
- [13] Indraratna B, Kaiser P K. Bond strength of grouted cable bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1992, 29(3): 279-292.
- [14] Jarred D J, Haberfied C M. Tendon/grout interface performance in grouted anchors [C]//Proc Ground Anchorages and Anchored Sturtures. London: London Thomas Telford, 1997.
- [15] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3): 7-16.
Cheng Liangkui. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7-16.
- [16] 张乐文, 汪稳. 岩土锚固理论研究之现状 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 627-631.
Zhang Lewen, Wang Ren. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 627-631.
- [17] 唐湘民. 岩体锚固效应模型试验研究及解析计算[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1987.
Tang Xiangmin. Testing study and analytical solution for the rock mass anchoring effect [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1987.
- [18] 邹志晖, 汪志林. 锚杆在不同岩体中的工作机理 [J]. *岩土工程学报*, 1993, 16(5): 71-78.
Zou Zhihui, Wang Zhilin. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 16(5): 71-78.
- [19] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究 [J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(1): 8-19.
Ge Xiurun, Liu Jianwu. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 10(1): 8-19.
- [20] 张玉军. 锚固岩体流变特性的模拟试验及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 1992.
Zhang Yujun. The simulation test and analytical study on the creep characteristic of anchoring rock mass [D]. Shanghai: Tongji University, 1992.
- [21] 贺若兰, 张平, 李宁, 等. 拉拔工况下全长粘结锚杆工作机理[J]. *中南大学学报*, 2006, 37(2): 401-407.
He Ruolan, Zhang Ping, Li Ning, et al. *J Cent South Univ*, 2006, 37(2): 401-407.
- [22] 蔡永昌, 朱合华, 李晓军. 一种用于锚杆支护数值模拟的单元处理方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): 1137-1140.
Cai Yongchang, Zhu Hehua, Li Xiaojun. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1137-1140.
- [23] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(21): 1231-1138.
Jia Jinqing, Zheng Weifeng. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(21): 1231-1138.
- [24] Sirrimwardane H J. Numercial analysis of anchors in soil[J]. *Internation Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, 13: 427-433.
- [25] 彭文祥, 赵明华, 袁海平, 等. 基于拉格朗日差分法的全长注浆锚杆支护参数优化[J]. *中南大学学报*, 2006, 37(5): 1002-1007.
Peng Wenxiang, Zhao Minghua, Yuan Haiping, et al. *J Cent South Univ*, 2006, 37(5): 1002-1007.

(责任编辑 岳臣)

“好玩的数学”参考答案

我们介绍一下斐波那契的解答思路。

设三人原来共有钱数为 x , 三人退回的总钱数为 $3a$ 。因为退回的总钱数是平均分给三人, 因此每人分得钱数 a 。于是, 由分完后“他们手中所得恰好是他们原有的钱币”的条件, 可知在未分得这一钱数之前, 三人手中各自的钱数分别为: $\frac{x}{2}-a, \frac{x}{3}-a, \frac{x}{6}-a$ 。而这些钱数分别是“甲退回所拿的 $\frac{1}{2}$, 乙退回所拿的 $\frac{1}{3}$, 丙退回所拿的 $\frac{1}{6}$ ”之后的钱, 因此甲、乙、丙三人从钱堆中拿出

的钱数分别为: $2\left(\frac{x}{2}-a\right), \frac{3}{2}\left(\frac{x}{3}-a\right), \frac{6}{5}\left(\frac{x}{6}-a\right)$ 。而这些钱的总和显然就是三人原来共有的钱币 x , 于是有方程: $2\left(\frac{x}{2}-a\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{x}{3}-a\right)+\frac{6}{5}\left(\frac{x}{6}-a\right)=x$, 化简后得到 $7x=47a$ 。斐波那契取一特解 $x=47, a=7$ 。因此三人原来共有钱币 47。

把 $x=47, a=7$ 分别代回 $\frac{x}{2}-a, \frac{x}{3}-a, \frac{x}{6}-a$, 又可得三人从钱堆中所取钱币数分别为: 甲取 33, 乙取 13, 丙取 1。

