

泥浆零排放处理技术及分离土的工程特性研究

张忠苗¹, 房凯¹, 王智杰¹, 骆嘉成²

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 温州浙南地质工程有限公司, 浙江 温州 325006)

摘要: 建筑垃圾已经引起社会越来越多的关注, 针对城市建设中泥浆处理所面临的难题, 介绍了一种工程钻孔泥浆处理技术, 该分离技术以实现污染物零排放为目的, 包括泥浆净化, 化学絮凝和压滤处理 3 部分, 经过处理, 泥浆成功分离为土和水; 对经过泥水分离后的土的物理力学特性以及土的微观结构进行了分析, 结果表明分离土结构致密, 压缩模量达到 23 MPa, 计算承载力是沉渣土的 7 倍, 说明泥浆分离后有好的强度和变形特性, 已由工程垃圾变为工程材料, 具备了再次利用的可能, 分离的砂可用于砂浆制备, 分离的土饼可用于回填、制砖等。

关键词: 泥浆; 固液分离; 再利用; 工程特性

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)09-1456-06

作者简介: 张忠苗(1961-), 男, 浙江宁海人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学、检测工作。E-mail: zjuzzm@163.com。

Zero discharge treatment technology for slurry and engineering properties of separated soil

ZHANG Zhong-miao¹, FANG Kai¹, WANG Zhi-jie¹, LUO Jia-cheng²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Wenzhou South Zhejiang Geological Engineering Co., Ltd., Wenzhou 325006, China)

Abstract: Construction wastes have attracted more and more public attention with the development of the urban construction. A waste drilling slurry treatment process is introduced to solve the problem of slurry treatment. The process, with the aim of zero discharge of pollutants, includes three steps: slurry purification, flocculation and pressure filtration, after which the slurry is separated into soil and water. The engineering properties and microstructure of the separated soil are studied. The experimental results show that the separated soil, with a compact structure, has a modulus of compressibility of 23 MPa and a calculated bearing capacity seven times that of the sediment. It is demonstrated that the separated soil has good properties of deformation and strength. Thus, the waste slurry has changed from the construction waste to the construction material and can be recycled. The separated sand can be used as the raw material for cement mortar while the separated soil can be used for backfill or brick production.

Key words: slurry; solid-liquid separation; recycle; engineering property

0 引言

随着我国城市化进程的加快, 钻孔灌注桩得到广泛的应用, 但钻孔泥浆已成为城市污染物的重要来源之一, 引起了社会的广泛关注。

泥浆(如图 1)作为钻孔桩护壁材料, 主要起平衡桩侧土压力, 保护开挖面, 携带钻渣, 冷却钻头等作用。但多余泥浆的处理一直是困扰工程施工的一个难题, 一方面大面积的泥浆池占用了宝贵的施工场地, 为后续施工带来不便, 另一方面使得现场施工环境恶劣。现行的处理方式是用槽罐车把泥浆运到郊外使其自然干化, 这种处理方式原始落后, 效率低, 费用高,

在运输过程中常因泥浆的漏洒而污染市容, 而更严重的是, 有的建筑工地趁监管漏洞, 将建筑泥浆偷排乱排, 产生了非常严重的后果: 污染环境, 建筑泥浆的乱排放污染水源, 破坏自然植被, 板结土壤, 影响环境美观; 淤塞河道, 偷排入江河的泥浆不仅使江河浑浊, 破坏水质, 同时使河道淤塞; 破坏市政设施, 偷排入下水道等设施的泥浆极易造成市政工程的破坏, 阻塞管道; 同时建筑泥浆也加剧了水土流失。另一方面, 对于外运的泥浆, 目前主要是运输到指定的消纳

点进行消纳, 这种处理泥浆的方法并没有完全的处理泥浆的污染, 只是将污染进行了转移, 而没有消除, 只是将泥浆当作垃圾处理, 而没有发现泥浆本身的再利用价值, 这种处理方式原始落后而且费用高, 效率低, 严重制约着经济社会的发展, 与高效率低能耗的可持续发展战略相违背, 因此, 推广应用一种高效率, 低能耗, 无污染的泥浆处理方式已经成为社会发展的必然趋势。

目前国内外对泥浆处理的研究主要集中在石油钻井领域, 取得了一定的科研成果^[1-5], 但是石油钻井泥浆与桩基钻孔泥浆有很大的不同, 其处理方式并不能直接应用于桩基钻孔泥浆中; 在盾构施工中, 泥浆是通过振动筛和旋流器进行初步处理, 然后循环利用^[6], 但这种处理方式不能彻底的对泥浆进行处理, 最终废弃的泥浆仍要外运, 分离物含水率很高, 即使添加水泥等固化剂重新利用^[7], 其再利用成本也很高; 在桩基工程钻孔泥浆的研究中, 龙莉波^[8]介绍了类似于盾构施工中除砂技术泥浆净化装置的应用; 范英宏等^[9]等研究了不同絮凝剂絮凝效果的实验; 胡承雄等^[10]研究了絮凝剂处理后的泥浆对环境及农作物的影响, 但仅是从化学角度研究絮凝剂的作用, 其处理后的底泥仍是高含水率的工程垃圾; 万玉刚等^[11]进行化学絮凝和物理脱水相结合的室内试验, 但并未详细介绍脱水方式以及研究脱水的效果, 也未考虑到分离物的再利用问题。



图 1 钻孔泥浆

Fig. 1 Drilling slurry

本文介绍了一种工程钻孔泥浆处理技术, 该技术通过固液分离, 将泥浆分离为砂、土和清水, 通过分离的土、砂的室内物理力学指标的试验, 分析了其工程应用特性, 试验表明: 分离出的土、砂强度和变形特性良好, 有很好的工程应用前景, 通过该分离技术, 不仅可以实现了泥浆的无污染处理, 同时分离出的土、砂可进行工程再利用, 已经将原来的工程垃圾转化为工程材料, 是一种值得推广应用的泥浆处理方式。

1 泥浆分离原理及工艺流程

本文所介绍的泥浆固液分离技术是在借鉴了石油工程、废水处理工程以及盾构施工中相关技术的基础上, 并结合了桩基钻孔泥浆本身的特点提出的一种适合于广泛推广应用的环保处理工艺。钻孔泥浆主要由水和固体颗粒组成, 能够维持长时间的悬浊体系, 固体颗粒的粒组成分对泥浆的性质有很大的影响, 其中砾粒和砂粒由于颗粒较大很容易沉淀分离, 而黏土颗粒表面带有负电荷, 在黏土颗粒四周形成一个电场, 相互土颗粒之间产生斥力, 而在电场的作用下, 水中的阳离子被吸引分布在颗粒周围, 水分子是一种极性分子, 在电场中发生定向排列, 形成双电层结构 (如图 2), 颗粒之间不容易絮凝沉淀, 因此泥浆能长时间保持悬浊而不易分离。絮凝剂的作用就是改变泥浆中黏土颗粒表面性质, 让细的颗粒产生聚结, 破坏泥浆的稳定性, 在机械辅助分离的条件下更容易被分离出去。

絮凝剂主要包括无机絮凝剂和有机絮凝剂, 无机絮凝剂主要是通过改变分子间的相互作用力使泥浆絮凝, 黏土颗粒间的斥力无法使颗粒相互吸引成大颗粒而沉淀, 若向泥浆中加入带正电的金属阳离子, 就可以中和部分黏土颗粒表面负电, 降低其电位, 使颗粒间斥力减少, 从而使颗粒絮凝沉淀; 有机絮凝剂是通过絮凝分子与土颗粒之间的相互作用完成絮凝, 常用的有机絮凝剂主要是通过有机分子对固体颗粒的吸附而形成架桥作用, 同时高分子链自身能保持伸展, 当分子链吸附的固体颗粒越来越多时, 在重力作用下产生沉淀, 形成分离。

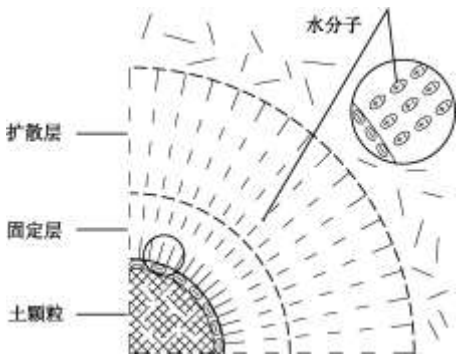


图 2 土的双电层结构

Fig. 2 Structure of electrical double layer of soil

在泥浆脱水方面, 目前主要是应用机械脱水方式, 常用的脱水装置有板框压滤机, 真空吸滤机, 带式压滤机, 离心脱水机等, 相对于其他脱水方式, 板框压滤机可适用于各种性质的泥浆, 不会出现黏性颗粒堵机和粗颗粒的磨损现象, 在所有的处理方式中, 其处

理后的泥浆含水率最小，处理效果好，另外板框压滤机耗电量小，主机功率仅为 3~5 kW^[12]，虽然其不能进行连续处理作业，但通过实践表明，在进行泥浆净化循环的基础上，现有的处理效率完全能够满足现场废弃泥浆处理的要求。

机械处理分为两个阶段，首先将废弃的泥浆通过振动筛进行筛分，直径较大的砂颗粒被留在振动筛上面，然后排出回收，这样一方面减少了后续分离的工作量，另一方面分离出工程特性较好的砂，可继续进行再利用；处理后的泥浆按比例加入适量的絮凝剂（有机絮凝剂用阴离子聚丙烯酰胺，无机絮凝剂用熟石灰）进行絮凝，用量按照使泥浆达到最佳絮凝效果及分离效果确定，充分搅拌后使其静置沉淀，剩下的泥浆通入板框压滤机（见图 3）进行压滤，板框压滤机由交替排列的滤板和滤框构成一组滤室，滤室内部包裹着滤布，泥浆被填充在滤室中，在压力作用下，泥浆经过滤布，固体被留在滤布上，并逐渐在滤布上堆积形成过滤泥饼（见图 4），而水则渗透过滤布排出，经过一段时间的压滤之后，泥浆分离为硬度很高的泥饼和不含固体的清水，经过两步处理后，废弃泥浆实现了固液分离。钻孔泥浆处理的工艺流程图如图 5 所示，如上所述，分离过程共包括三部分：振动筛分，化学絮凝和压滤处理。

该工艺的处理费用包括机械费、人工费、材料费、电费约为 45~55 元/m³，而泥浆外运的成本包括运输费、人工费、管理费等约为 50~60 元/m³，处理费用略小于外运费用，但是分离处理后的土有一定的再利用价值，而外运或排放的泥浆所带来的后期的治理费用以及环境污染所产生的损失是无法估量的。

本处理工艺通过筛分净化了泥浆使泥浆得到了循环利用，通过压滤实现了固液分离，使污染的泥浆变成了可进行工程利用的土，不仅将用于其他领域的工艺成功的用于钻孔桩泥浆处理中，针对泥浆本身的特点实现了处理工艺的专有化，同时提出了分离土再利用的设想。为了验证处理效果，同时更好的实现土的再利用，本文从工程利用角度对土的特性进行了分析。



图 3 固液分离板框压滤机

Fig. 3 Plate and frame filter press used for solid liquid separation



图 4 分离出的泥饼

Fig. 4 Separated mud cake

2 分离土的物理指标

作者对工程分离土进行了土的物理力学指标的试验，本实验所用泥渣以及分离土均取自温州鹿城广场钻孔灌注桩施工场地，该场地为滨海平原地貌类型，上部以滨海、冲积、湖积递呈沉积为主，下部为风化基岩，中风化基岩埋深在 100 m 以下，上部主要地层为淤泥质黏土和淤泥夹粉砂，中下部以黏土为主，并含有一定厚度的卵石层。泥浆分离土包括两次分离出的砂土和以黏性土为主的泥饼，为了更好的说明分离效果和分离后土的工程特性，本实验另外选取了沉淀池中未分离的泥渣（含水率 68%）和经过完全重塑的黏性土土样（含水率同分离黏性土）进行了对比。分离砂土和分离黏性土的基本物理指标见表 1^[13-14]。

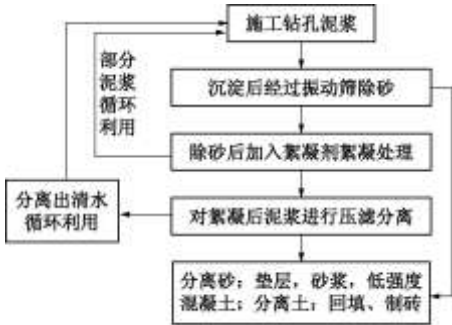


图 5 钻孔泥浆处理工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of slurry treatment

为了分析分离土和未分离土的粒径分布情况，分别对分离黏性土和未分离泥渣进行了颗粒分析实验（图 6），对分离出的砂土进行了筛分试验（表 2）。

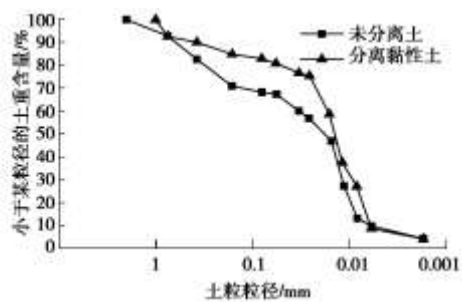


图 6 分离黏性土和未分离土的颗粒级配曲线
Fig. 6 Grading curves of separated soil and unseparated soil

表 1 分离砂土和分离黏性土的物理指标

Table 1 Physical parameters of separated sandy soil and cohesive soil						
土样名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	渗透系数 $k/(\text{cm s}^{-1})$
分离砂土	17.9	16.7	0.8			0.015
分离黏性土	18.2	25.1	0.9	15	0.1	5×10^{-4}

由分离土的基本物理参数指标可以看出：分离黏性土属于粉质黏土，含水率低，处于硬塑状态，且渗透性良好，是很好的回填材料。同时由于分离土为黏性土可用于填埋场的覆盖层或制作黏土砖等用途。

由分离黏性土和未分离土的颗粒级配分析实验曲线可以算得：分离黏性土的不均匀系数为 C_u 为 1.8，未分离土的不均匀系数 C_u 为 5.6，可见相对于分离前的土而言，分离后黏性土的粒径相差不大，土粒较均匀，主要颗粒含量为粉粒和黏粒，分离砂土中的主要颗粒为中砂和粗砂，按砂土的分类属于中砂，可在施工现场直接用于垫层，砂浆制备以及低强度混凝土的制备等，实现再利用。

表 2 分离砂土的颗粒百分比含量

Table 2 Percentage composition of different particles of separated sandy soil

粒组名称	圆(角)砾	粗砂粒	中砂粒	细砂粒	粉(黏)粒
含量百分比/%	19	28	32	7	14

3 分离土的力学指标

3.1 土的压缩性能试验

本文分别研究了分离后压干黏性土，压干黏性土的完全重塑土和泥浆池中沉淀的沉渣土进行了土的压缩试验，各种土的 $e-p$ 曲线如图 7。

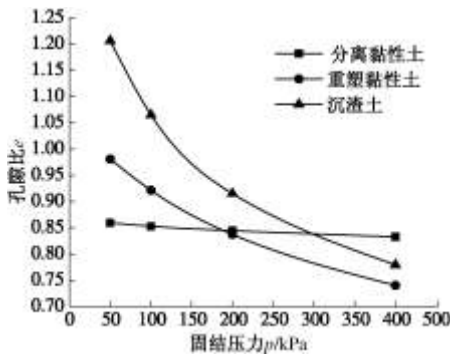


图 7 3 种土的压缩试验曲线

Fig. 7 Compression curve of three different soils

由土的压缩试验可以得出，3 种土的压缩模量分别为 23，2.5，1.3 MPa，可以看出经过压干后的分离黏性土属于低压缩性土，重塑后的分离土和泥浆池沉渣土为高压缩性土，可见压实力对土的变形有重要影响，其中，经过压干后的分离黏性土由于其先期固结压力很大，在 400 kPa 时其压缩量仍然很低，说明分离后的土有很好的压缩性能，可用作地基土，特别是在一些表层含软弱土层的地区，用分离土进行换填能很好的减少沉降。

3.2 土的力学性能试验

本文分别进行了分离后经过压实的黏性土，经过重塑的黏性土，分离后砂土和未分离泥浆池中泥渣的直剪试验，分别得到的 4 种土样在 50 kPa 和 100 kPa 竖向压力的情况下的剪应力位移曲线如图 8 和图 9。

由 4 种土的直接剪切试验曲线得到的工程中常用的土的固结快剪强度指标（峰值强度），并由固结快剪指标计算了宽 1 m 埋深 1 m 条形地基的承载力，计算结果见表 3。

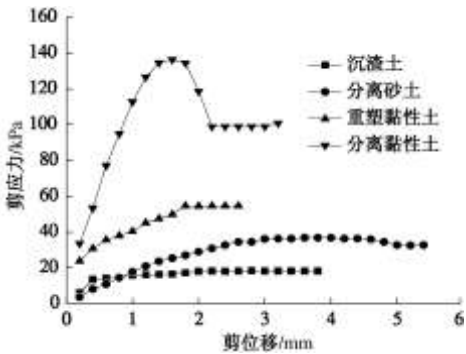


图 8 50 kPa 竖向压力作用下土的剪应力位移曲线

Fig. 8 Relationship between shearing stress and displacement under vertical stress of 50 kPa

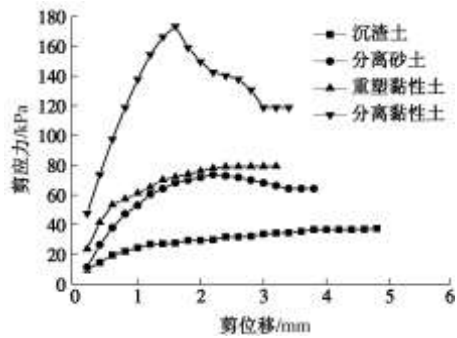


图 9 100 kPa 竖向压力作用下土的剪应力位移曲线

Fig. 9 Relationship between shearing stress and displacement under vertical stress of 100 kPa

表 3 3 种土的剪切强度指标

Table 3 Shear strength indices of three different soils

土类名称	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	计算承载力 /(kN m^{-2})
分离黏性土	93	31	410
分离砂土	0	36	106
重塑黏性土	29	26	172
沉渣土	1	20	60

由几种土的直剪试验曲线以及计算的承载力表格可以看出：沉渣土的强度很低，在很小的剪应力作用下就发生破坏，而经过固液分离后的砂土和黏性土均具有很高的强度，特别是经过机械压实的黏性土，其计算承载力是沉渣土的近 7 倍，可见该分离工艺在短时间内将工程垃圾转变为高强度的可以再利用的工程材料，达到了很好的分离效果。另一方面，黏性土的重塑虽然完全破坏了经过机械压实的结构，但重塑土仍具有很高的强度，是沉渣土的 3 倍，完全可以满足工程再利用的要求。

4 分离黏性土的扫描电镜试验

电子显微镜已广泛应用于对土的微观结构及工程性质的研究中^[15-16]。为了研究分离黏性土的微观结构，用扫描电子显微镜（SEM）对分离黏性土进行了扫描分析，同时为了分析对比，也对同一施工场地取得的原状黏性土进行了扫描，扫描结构见图 10 和图 11。

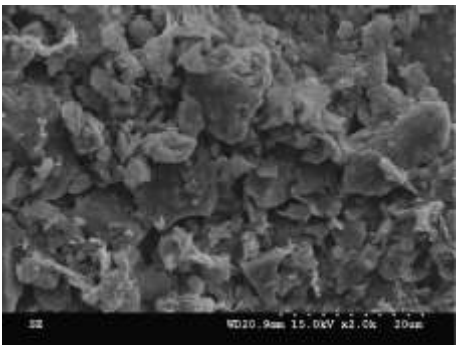


图 10 原状黏性土微观结构图像（2000 倍）

Fig. 10 Microstructural images of separated natural clay (2000 times)

由图 10 可以看出，原状黏土的结构基本上是由松散的颗粒堆积相互连结而成的，颗粒之间的连结不紧密，颗粒之间的孔隙相对较大。

由图 11 可以看出，分离黏性土以棱角状碎屑颗粒为主，处于不规则的排列状态，由于絮凝剂使得黏土表面的双电层结构变薄，以及在机械力的压实作用下，大量的微碎屑和黏粒胶结成团粒，颗粒间接触紧密（注：图中的孔洞是由于试样制作时分离土样造成的，并不是试样本身的空隙），团粒成凝块状，连结较稳定，相对于松散排列的原状黏性土而言，压实的分离黏性土结构致密，特别是对黏粒和细小的粉粒而言，形成了更稳定的团粒结构，使土体的强度得到增强，当土体重塑后，只要该团粒结构不被破坏，该土体在压实力作用下仍可以达到很高的强度。这从微观上说明了分离土有良好的压缩、强度特性的原因，为土的再利用提供了理论依据。

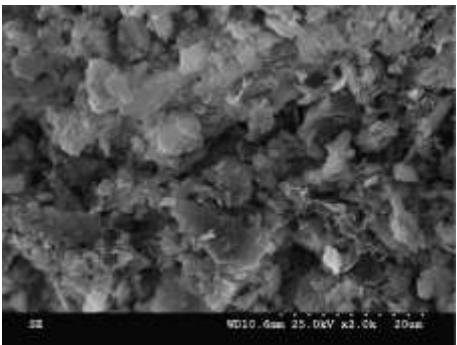


图 11 分离黏性土微观结构图像（2000 倍）

Fig. 11 Microstructural images of separated cohesive soil (2000 times)

5 结 论

通过上面分析，本文得到以下主要结论：

（1）废弃钻孔泥浆通过振动筛分，化学絮凝和压滤分离三项工艺实现了固液分离，成功处理了泥浆，减

少了对环境的污染。

(2) 分离砂土以粗砂和中砂为主; 分离黏性土为渗透性良好的硬塑土, 有很好的工程特性, 其压缩模量达到 23 MPa; 其计算承载力是沉渣土的近 7 倍, 即使是完全重塑土的计算承载力也能达到沉渣土的 3 倍。

(3) 分离黏性土颗粒间形成了较紧密的团粒结构, 使得土的结构致密, 强度增强。

(4) 该分离工艺成功的处理了废弃泥浆, 分离后泥浆由工程垃圾变为工程材料, 具备了再次利用的可能。

参考文献:

- [1] 彭 园, 杨 旭, 孙长健. 废弃泥浆无害化处理方法研究[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(4): 102 - 104. (PENG Yuan, YANG Xu, SUN Chang-jian. The overview of the way to recycle municipal domestic refuse[J]. Environmental Science and Management, 2007, **32**(4): 102-104. (in Chinese))
- [2] 叶雅文, 张建国, 邓 皓. 对国内废泥浆固液分离及后处理的研究[J]. 江汉石油学院学报, 1990, **12**(1): 46 - 51. (YE Ya-wen, ZHANG Jian-guo, DEN Hao. An experimental study on solid-liquid separation of some China's waste drilling muds and their follow-up treatment[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1990, **12**(1): 46 - 51. (in Chinese))
- [3] 董娅玮. 废弃钻井泥浆固化处理技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009. (DONG Ya-wei. Study on solidification treatment technology of waste drilling mud[D]. Xi'an: Changan University, 2009. (in Chinese))
- [4] 董仕明, 王平全, 陈志勇, 等. 油气田钻井废弃泥浆处理技术[J]. 天然气工业, 2008, **28**(2): 87 - 89. (DONG Shi-ming, WANG Ping-quan, CHEN Zhi-yong, et al. Treatment technology of oil and gas fields waste drilling muds[J]. Tianranqi Gongye, 2008, **28**(2): 87 - 89. (in Chinese))
- [5] KAWACHI T, DUE P T, KATSUMI T, et al. Treatment and utilization of waste sludge/slurry from construction works in Japan[C]// Environmental Geotechnics, 1996: 832 - 837.
- [6] 薄 利. 泥水处理技术在泥水盾构隧道施工中的应用[J]. 隧道建设, 2007, **27**(6): 66 - 70. (BO Li. Application of slurry treatment technology in construction of tunnels bored by slurry shield machines[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **27**(6): 66 - 70. (in Chinese))
- [7] HELMUT GROHS. Cost-efficient regeneration of bore slurry for driving of Weser tunnel[J]. Aufbereitungs Technik/Mineral Processing, 2002, **43**(11): 30-37.
- [8] 龙莉波. 泥浆净化装置在钻孔灌注桩施工中的应用[J]. 建筑施工, 2007, **29**(6): 392 - 394. (LONG Li-bo. Application of slurry depuration device to bored cast-in-place pile construction [J]. Building Construction, 2007, **29**(6): 392 - 394. (in Chinese))
- [9] 范英宏, 潘 智, 刘建华, 等. 高速铁路桥梁施工废弃泥浆处理工艺研究[J]. 铁道建筑, 2009(12): 21 - 23. (FAN Ying-hong, PAN Zhi, LIU Jian-hua, et al. Study and application of solidification treatment technology of waste drilling mud in high speed railway bridge construction[J]. Railway Engineering, 2009(12): 21 - 23. (in Chinese))
- [10] 胡承雄, 马华滨. 京沪高速铁路废弃泥浆处理现场试验[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2009, **36**(3): 112 - 115. (HU Cheng-xiong, MA Hua-bin. Field experiment on waste drilling field treatment of Beijing Shanghai high speed railway[J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2009, **36**(3): 112 - 115. (in Chinese))
- [11] 万玉纲, 余学海. 桩基工程泥浆水处理技术[J]. 环境工程, 1999, **17**(1): 14 - 15. (WAN Yu-gang, YU Xue-hai. Treating technology of waste slurry from pile foundation engineering[J]. Environmental Engineering, 1999, **17**(1): 14 - 15. (in Chinese))
- [12] 魏治海, 娄秀清, 刘长志. 带式压滤机在转炉尘泥脱水中的应用[J]. 科学与工程, 2010, **10**(14): 3549 - 3553. (WEI Zhi-hai, LOU Xiu-qing, LIU Chang-zhi. The application of belt pressure filter in dehydration of converter residue sludge[J]. Science Technology and Engineering, 2010, **10**(14): 3549 - 3553. (in Chinese))
- [13] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GONG Xiao-nan. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [14] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (ZHANG Zhong-miao. Pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 施 斌. 黏性土微观结构研究回顾与展望[J]. 工程地质学报, 1996, **4**(1): 39 - 44. (SHI Bin. Review and prospect on the microstructure[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, **4**(1): 39 - 44. (in Chinese))
- [16] 陈嘉鸥, 叶 斌, 郭素杰. 珠江三角洲黏性土微观结构与工程性质初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(5): 674 - 678. (CHEN Jia-ou, YE Bin, GUO Su-jie. Primary exploration on engineering properties of softground microstructure in Zhujiang Delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 674 - 678. (in Chinese))

