

文章编号:1671-6833(2018)04-0001-06

砂层注浆模型试验水泥含量检测方法研究

潘荣凯¹, 杨平¹, 陈亮², 蒋兴起²

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 常州市轨道交通发展有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 地铁建设中预注浆加固是常用的加固方式, 为研究预注浆工程中浆液扩散规律及分布情况, 研制一套由加压稳定系统、模型箱系统和注浆系统组成的注浆模型试验装置. 采用改进型 EDTA 二钠滴定检测水泥土中水泥含量的试验方法, 在注浆影响范围内分块取样, 与滴定检测结合形成分块滴定法并进行一次完整注浆试验验证. 研究表明, 注浆模型试验装置效果良好, 改进型 EDTA 二钠滴定法能准确检测水泥土中水泥含量, 分块滴定法能直观地显示浆液分布情况和扩散范围, 为类似模型试验研究浆液分布提供一种合理可行的试验方法.

关键词: 注浆; 装置研发; 改进型 EDTA 二钠滴定法; 分块法; 浆液分布

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.030

0 引言

冻结法施工联络通道后融沉现象会对周边环境产生不良后果, 控制工后融沉已成为软弱地层冻结需要解决的难题^[1]. 施工前进行预注浆加固可有效抑制融沉. 采用注浆模型试验研究浆液分布情况及扩散规律, 可为地下工程预注浆设计与工艺参数确定提供依据, 并可对现场施工进行指导.

国内外很多学者都开展了注浆模型试验研究, 张家奇等^[2]、田多等^[3]研制高压注浆试验装置以研究高压条件下浆液扩散机制; Gothäll 等^[4-5]、Gustafson 等^[6]、王腾等^[7]研究了浆液在单裂隙和多裂隙下的扩散规律; 周茗如等^[8]、钱自卫等^[9]、Wang 等^[10]、Bezuijen 等^[11]、Eisa^[12]基于不同土层进行注浆试验; 在注浆效果检测方面, 曹兆虎等^[13]基于人工合成透明土材料和 PIV 图像处理技术, 开展楔形管桩沉桩及桩端后注浆施工过程的可视化模型试验; 程盼等^[14]通过动力触探原位测试和地质雷达等方法对松散土体注浆后加固效果进行检测; 姜春露等^[15]采用大型有机玻璃模型对弱胶结多孔岩石注水饱和及注浆过程中电阻率变化进行室内模拟试验; 胡熠等^[16]采用微型电极进行不同地下水条件注浆检测试验. 以上

试验均采用物理方法检测, 对仪器和操作要求较高, 取样量较大, 而在室内模型试验中应用化学滴定方法检测注浆效果的研究很少, 笔者通过设计研发注浆模型试验装置, 改进水泥土中水泥含量的化学滴定检测方法, 结合分块法研究浆液扩散和分布规律, 取得了良好的效果.

1 注浆模型试验装置研发

注浆模型试验装置如图 1 所示, 由加压稳定系统、模型箱系统、注浆系统组成.

1.1 加压稳定系统

加压稳定系统由一台液压机提供, 如图 1(a) 所示. 油箱上面是电动机, 液压油通过两根油管输送到液压缸, 液压缸既可提供压力, 也可提供拉力, 压盘通过控制器下降或上升. 顶板和底板尺寸为 700 mm × 700 mm × 30 mm, 4 根立柱高 1 280 mm, 如图 1(b) 所示, 顶板和底板各通过 4 个螺母与立柱固定, 底板上平行焊接两条导轨将模型箱定位并限制其位移.

1.2 模型箱系统

根据本试验前期模拟注浆所得结果, 浆液扩散范围在距离注浆口 120 mm 之内, 为减小或避免尺寸效应产生的影响, 注浆管伸入土体中长度

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478226); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD); 常州市轨道交通科技计划项目(GD-GC-16006)

通信作者: 杨平(1964—), 男, 江西樟树人, 南京林业大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程教学与研究, E-mail: yangping@njfu.edu.cn.

为 140 mm,注浆孔 A 和 F 到模型箱顶(底)部和侧边距离均不小于 150 mm,如图 1(b)所示. 模型箱由 4 块大小相同的钢板组合而成,尺寸为 500 mm×550 mm×8 mm,每两块板垂直焊接,形成两个 L 形钢板,在两个侧面对称开注浆孔,注浆孔直径 10 mm,内部为螺纹状,用来与注浆管连接. 为模拟实际工程中冻结管布置方式,注浆孔布置采用方形和梅花形两种方式,其中 C、D、E、F 4 个孔组成方形布置,B、C、D 3 个孔组成梅花形布置,工程中冻结孔间距为 800 mm,按 10:1 比例缩小,则模型箱上孔间距为 80 mm. 孔 A 与 F 距离为 283 mm,单孔试验时可使用这两个孔同时注浆,减少模型填筑次数. 将 M 12 螺丝前端切割成 10 mm 长的螺杆,在注浆孔不使用时将螺丝拧进.

为固定模型箱并提高模型箱刚度,制作 3 组抱箍,每组抱箍两端用长 100 mm 的螺丝收紧. 同时制作一个 490 mm×490 mm×20 mm 的压板,在装料

结束后将压板置于砂样上,加压时与压盘接触.

1.3 注浆系统

注浆系统由注浆机和注浆管组成,注浆机为 JBY 618 型高压双液注浆机,如图 1(c)所示,既可进行单液注浆,也可进行双液注浆. 注浆机由电钻提供压力,将浆液从高压管输送到前端混合器中,经过注浆管进入土体. 注浆管为使用外径 14 mm、内径 4 mm、壁厚 5 mm 的小口径钢管设计制作而成,如图 2 所示. 注浆管分为 3 个部分:第 1 部分为 50 mm 长、外径 8 mm 注浆段,浆液从注浆口注入土体中,注浆段末端为 3 个外径 7 mm、厚 1.5 mm 的橡胶皮圈,防止浆液回流;第 2 部分为 105 mm 长、外径 12.5 mm 螺纹段与模型箱中注浆孔连接,螺纹段末端为螺母,可向前旋进,螺母前面为一个外径 12 mm、厚 2 mm 的橡胶皮圈,可密封注浆孔与螺母之间的空隙;第 3 部分为英制螺纹段,与注浆机上的混合器连接,内口做成漏斗形状,方便浆液流进.

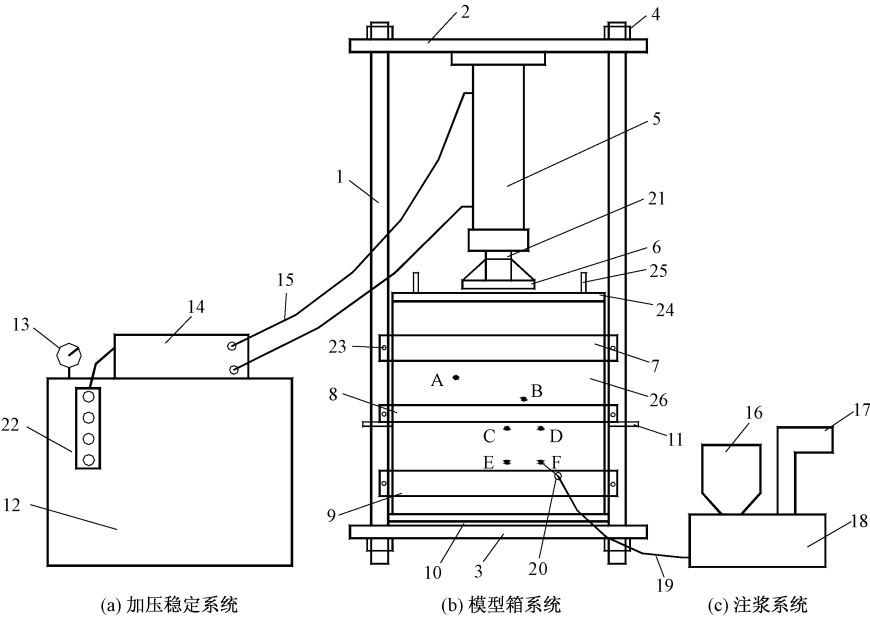


图 1 试验装置图

Fig.1 View of test device

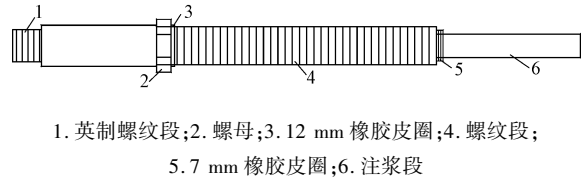


图 2 注浆管结构图

Fig.2 Structure of grouting pipe

1.4 注浆模型试验步骤

注浆模型试验分为 8 个步骤,如图 3 所示. 其

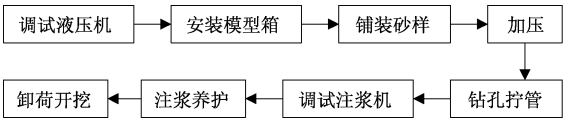


图 3 注浆模型试验步骤

Fig.3 Steps of grouting model test

中铺装砂样时根据容积和密度计算值预先称重,分层填装压实. 钻孔拧管需根据试验要求打开指定注浆孔上的螺丝,并在注浆管中放置一根铁芯,

防止细砂在钻孔过程中进入管内导致注浆管进入土体中的距离无法达到规定长度. 注浆管拧至设定位置后抽出铁芯,同时将螺纹段末端的螺母向前拧进并通过橡胶皮圈与模型箱侧壁紧密贴合达到密封效果.

2 改进型 EDTA 二钠滴定法

EDTA 是乙二胺四乙酸的简称,EDTA 二钠滴定法在施工现场检测水泥土搅拌桩中水泥含量的应用较多,同时也可用来判断水泥与土混合的均匀性. 此检测方法精确度较高,误差在 0.1 mL 之内,且检测成本相对较低,操作简便,但取土质量过大易导致水泥不能完全反应,且土样含水率的变化对滴定结果有一定影响,因此需对此法进行改进.

2.1 试验所需器材及药品

50 mL 酸式滴定管;滴定架;10 mL 移液管;200 mL 锥形瓶;250 mL 烧杯;1 L 容量瓶;3 mL 塑料滴管;25 mL、50 mL 比色管;玻璃棒;分析天平;研钵;20 mL 棕色广口瓶(装钙红指示剂);5 L 聚乙烯桶(装氯化铵溶液);1 L 聚乙烯容量瓶(装氢氧化钠溶液).

0.1 mol/L 乙二胺四乙酸二钠(简称 EDTA 二钠)溶液;体积分数为 10% 氯化铵溶液;体积分数为 1.8% 氢氧化钠溶液(内含三乙醇胺);钙红指示剂(内含硫酸钾).

2.2 改进型 EDTA 二钠滴定法

将配制好的水泥土试样放入烘箱中烘干,取出试样放入研钵中研磨成极细颗粒并使其充分混合,称取等量试样放入烧杯中进行滴定. 因本试验注浆所用硅酸盐水泥水化后会产生 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子,在采用 EDTA 二钠滴定法进行水泥含量检测时,加入氯化铵溶液溶出 Ca^{2+} 后,需加入 NaOH 溶液使 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等干扰离子沉淀,同时 NaOH 溶液中加入少量三乙醇胺溶液起掩蔽作用. 反应后的溶液加入钙红指示剂可与 Ca^{2+} 形成红色络合物,加入 EDTA 二钠溶液后 EDTA 二钠夺取络合物中的 Ca^{2+} ,使指示剂被释放出来,溶液由络合物的颜色转变为游离指示剂的颜色,用以指示滴定终点的到达.

改进后的 EDTA 二钠滴定法避免了试样取出后含水率变化对滴定产生的影响,以往 EDTA 二钠滴定法在取样后需密封存放,使得试验时与原含水率一致,但在运输和试验过程中难以保证含水率不发生变化. 采用将取出试样烘干的方式,将

含水率降为 0,这样即使在先前操作过程中含水率发生变化也对后期试验没有影响. 同时,经研磨后试样中的水泥与砂样充分混合,所有试样称取同样质量水泥与砂样混合物进行滴定,减少了在取样过程中由于试样质量损失引起的误差. 同时因开挖分块时块体较小,各类药品消耗量也大大减少,采用少量试样分析法可以更好地适应试验要求.

2.3 EDTA 二钠消耗量与水泥含量关系标定

为研究砂性土层注浆后水泥土中水泥含量与 EDTA 二钠溶液消耗量之间的关系,制作水泥含量分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 的 6 个试样. 注浆试验采用干砂,则制作试样的砂样含水率为 0%,水泥水灰比为 1.5:1,砂土颗粒级配曲线见图 4,水泥、水和砂样配比见表 1.

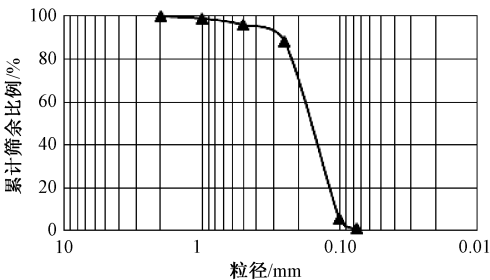


图 4 颗粒级配曲线

Fig.4 Grading curve

表 1 试样配比表

Tab.1 Sample proportion

水泥含量/%	水泥质量/g	水质量/g	砂样质量/g
5	2	3	100
10	4	6	100
15	6	9	100
20	8	12	100
25	10	15	100
30	12	18	100

将配制好的试样按上述滴定法进行滴定试验,得水泥含量与 EDTA 二钠溶液消耗量关系曲线如图 5 所示. 由图中曲线可见水泥含量在 5% ~ 30% 之间时与 EDTA 二钠消耗量线性关系极好,可做检测用标定曲线. 此曲线只适用于本试验用土,若采用其他级配的砂土或其他类别的土,因土的性质有差别,需按上述方法重新制作标定曲线.

3 分块滴定法研究注浆后浆液分布规律

传统的注浆试验在注浆完成后通常采用整体开挖的方法取出结石体,观察结石体的形状和分布情况,由于少部分浆液会通过裂隙渗透到结石

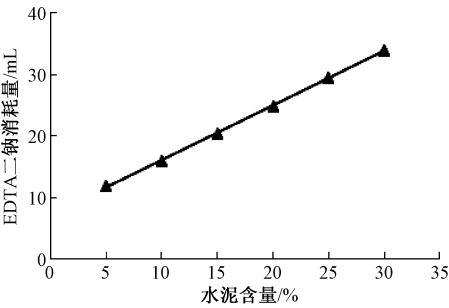


图5 水泥含量与 EDTA 二钠消耗量关系曲线

Fig.5 Relationship between cement content and sodium EDTA consumption

体以外的地方,因此在取出结石体时不能完全包含该部分浆液.为获得完整的浆液扩散范围,本试验中采用分块法结合 EDTA 二钠滴定法来确定浆液扩散规律,具体思路为:

(1)根据前期试验初估的浆液扩散范围,确定一个注浆管管口上方 80 mm,下方 60 mm,左边和右边各 120 mm,前面 110 mm 的长方体,即长方体的尺寸为 240 mm×240 mm×140 mm.

(2)确定每个分块大小,本模型为 40 mm×40 mm×20 mm,将长方体分为 7 层,并给每层编号,由上往下依次为 A、B、C、D、E、F、G.从注浆方向将每 1 层分成 6 行 6 列,给每 1 块编号,则第 1 层第 1 行第 1 列为 A11,第 1 层第 1 行第 2 列为 A12,第 2 层第 1 行第 1 列为 B11,依次类推.从上往下逐层分块,将每 1 块土样分别切割取出,放入对应编号的塑料杯中,对于水泥含量过高、强度过大导致无法切割的位置则不分块,在后期处理时用红色标记.

(3)将所有土样用改进型 EDTA 二钠滴定法检测水泥含量,根据 EDTA 二钠消耗量与水泥含量关系曲线确定每个分块中的水泥含量.

(4)在 AutoCAD 中建立与分块时所选取的长方体尺寸相同的模型,并同样进行分层分块操作,得到如图 6 所示的黑色线框图.

(5)根据 AutoCAD 中不同颜色对应的色号,如表 2 所示,建立水泥含量与色号之间的关系,如图 7 所示,将水泥含量代入曲线中计算,得到相应的色号,四舍五入精确取整到整十,再由表 2 查到对应的颜色,即可得到各个编号土样在 AutoCAD 中对应的颜色.

(6)依据各个编号对应的颜色和位置逐个逐层给线框图上色,其中水泥含量超过 16% 的结石体部分色号默认为 10(本试验重点检测水泥含量 <16% 的分布),全部上完色后根据颜色分布

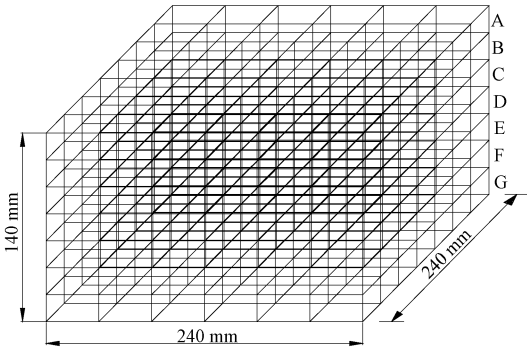
















图6 分块线框图

Fig.6 Block diagram

表 2 AutoCAD 中颜色与色号对应表

Tab.2 Different color and color number comparison in AutoCAD

颜色							
色号	10	20	30	40	50	60	70

颜色							
色号	90	100	110	120	130	140	150

色号	160
----	-----

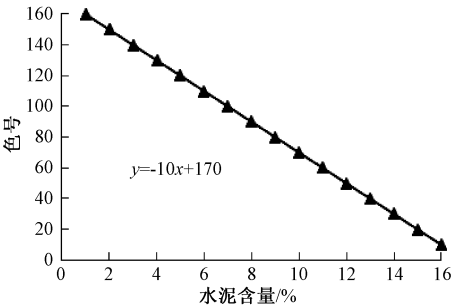


图7 水泥含量与色号关系曲线

Fig.7 Relationship between cement content and color number

研究浆液扩散规律.

4 注浆试验结石体形状及浆液扩散特性

本次试验注浆材料为水泥,水灰比 1.5:1,注浆量 400 mL,注浆压力 0.3 MPa,养护 1 d,采取模型上部不加压条件下注浆,模型箱中填料为干砂.按上述步骤完成注浆试验后进行分块法开挖并取出结石体,清理附着在结石体上的松散砂粒,得如图 8 所示形状,其长 76 mm、宽 46 mm、高 83 mm.大部分浆液位于注浆管上方,将结石体分成两部分,主体近似为长方体,长 65 mm、宽 53 mm、高 60 mm.表面有明显凹陷和凸起,另一部分为长方体外延展出的小块结石体,大致为较扁平的椭球体,其长 38 mm、宽 22 mm、高 23 mm.

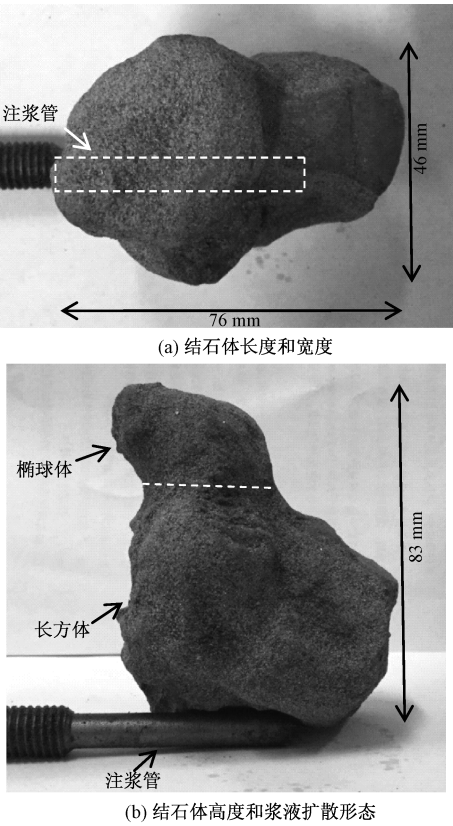


图8 结石体形状
Fig.8 Stone body shape

按分块滴定法进行滴定和绘图,得到分层分块图如图9所示。由图9可知,共有96个分块中含有水泥,根据每个分块体积为 32 cm^3 得到浆液最大扩散范围约为 $3\,072\text{ cm}^3$,与注浆量比值为7.68,说明渗透性良好,且注浆管上部扩散范围大于下部,原因是分层压实时,下部填料压实后再进行上部填料压实,上部压实对下部填料也有作用,使得下部密实度更高,注入浆液时,浆液往密实度较小的地方运动,且因上部未加荷载,浆液向上运动受到的阻力小于向下的阻力。同时,在钻孔时对土体产生扰动,上部砂土在重力作用下部分流失,使上部存在裂隙,注浆时浆液优先进入上方裂隙中并产生劈裂效果,后续浆液沿劈裂通道继续填充扩散,导致上部浆液较多。分层分块图清楚地显示了浆液分布情况,总体上,每层中间位置色号较高,说明浆液较多,往外逐渐减少,靠近注浆口的分层浆液扩散范围较大,越往外的分层扩散范围越小,水泥含量也越少。由图9(h)可以看出浆液分布范围较广,不同水泥含量的分块数量没有较大差异,说明从注浆口往外扩散时浆液减少较为缓慢,浆液渗透效果较好。同时B、C、D、E层红色块体位置分布较为零碎,说明结石体形状不规则,与实际开挖出的结石体基本一致。

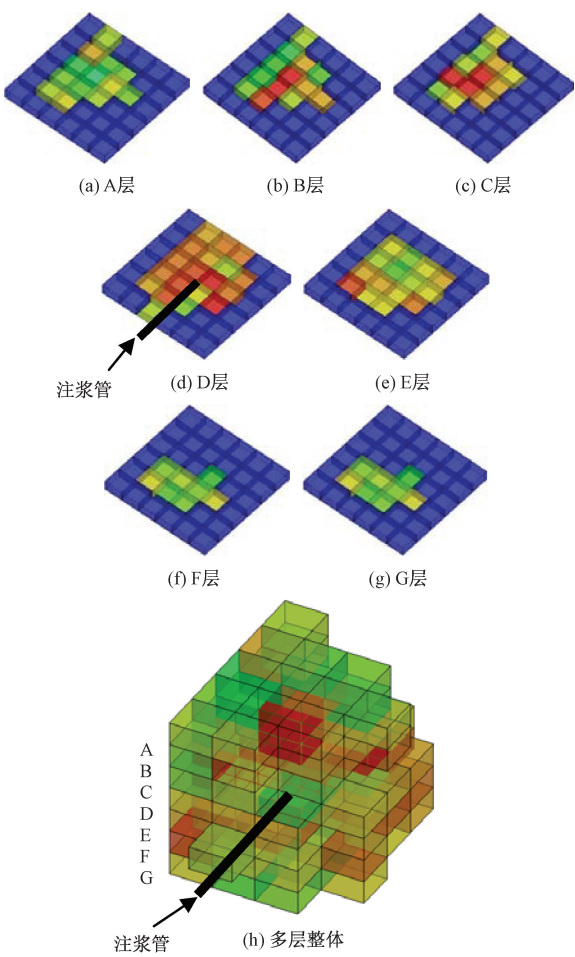


图9 分层分块色号图
Fig.9 Hierarchical block diagram

5 结论

- (1) 研制的砂性地层注浆模型试验装置及注浆试验方法合理可行,给出了模型试验方法。
- (2) 笔者提出了适合模型试验水泥含量检测的改进型EDTA二钠滴定法,改进后的滴定法可避免含水率对滴定产生的影响,减少在取样过程中由于试样质量损失引起的误差,采用少量试样分析法能很好适应试验要求。
- (3) 笔者提出了分块法研究浆液分布规律的思路,并给出了具体方法。
- (4) 通过试验验证了笔者提出的注浆体水泥含量检测方法正确合理,可为类似研究提供新方法。

参考文献:

[1] 庄惠敏,杨平,何文龙. 人工冻融软弱土融沉特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 62-66.
[2] 张家奇,李术才,张霄,等. 一种新型综合注浆加固试验系统的研制及应用[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1268-1277.

- [3] 田多,师皓宇. 高压密封注浆试验系统的研制与应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(10): 111-113.
- [4] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture dilation during grouting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2009, 24(2): 126-135.
- [5] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture-fracture interaction during grouting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 25(3): 199-204.
- [6] GUSTAFSON G, CLAESSON J, FRANSSON A. Steering parameters for rock grouting[J]. Journal of applied mathematics, 2013, 22(5): 1643-1652.
- [7] 王腾,周茗如,马连生,等. 基于断裂理论的湿陷性黄土劈裂注浆裂纹扩展[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1472-1481.
- [8] 周茗如,彭新新,苏波涛,等. 普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1673-1678.
- [9] 钱自卫,曹丽文,姜振泉,等. 孔隙砂岩多次化学注浆试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2226-2230.
- [10] WANG S Y, CHAN D H, LAM K C, et al. A new laboratory apparatus for studying dynamic compaction grouting into granular soils[J]. Soils and foundations, 2013, 53(3): 462-468.
- [11] BEZUIJEN A. Compensation grouting in sand-experiments [D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [12] EISA K. Compensation grouting in sand[D]. London: University of Cambridge, 2008.
- [13] 曹兆虎,孔纲强,文磊,等. 楔形管桩沉桩及桩端后注浆可视化模型试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 922-927.
- [14] 程盼,邹金锋,罗恒,等. 松散填土层中注浆效果检测方法试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3800-3806.
- [15] 姜春露,姜振泉,刘盛东,等. 多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4202-4207.
- [16] 胡熠,谢强,陈子龙,等. 高密度电法岩溶路基注浆质量检测模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 86-91.

Study on Cement Content Detection of Experimental Investigation of Grouting Model Test into Sand Stratum

PAN Rongkai¹, YANG Ping¹, CHEN Liang², JIANG Xingqi²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Changzhou Rail Transit Co., Ltd., Changzhou 213001, China)

Abstract: Pre-grouting reinforcement was a common reinforcement pattern in subway construction. The grouting model test equipment with an assembly of stable pressurization system, model box system and grouting system was developed to study diffusion and distribution of the slurry in pre-grouting projects. Sodium EDTA titration method was improved to detect the cement content in cement soil. And this was combined with cutting samples in the range of the grouting influence to develop a block titration method and implement a complete grouting test. Results showed that the grouting model test equipment worked well, improved sodium EDTA titration method could detect the cement content in cement soil accurately, a visually clearer and more presentable distribution and diffusion range of slurry can be obtained by block titration method, a reasonable and feasible test method has been established to study the distribution of slurry for similar tests.

Key words: grouting; device development; improved sodium EDTA titration method; partition method; distribution of grouting