

围垦筑堤新材料与新工艺研发与应用

刘斯宏¹ 蒋亚清²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 研究与开发围垦筑堤“土代石”新材料与新工艺,以土工袋技术为支撑,充分利用围垦区的开挖土及吹填的高含水量淤泥(质)土,代替砂石料等围垦筑堤的常规材料。同时,采用海砂、低温熟料水泥及共聚型-缩聚型复合减水剂,研发“土代石”围垦筑堤的防护材料。通过试验分析“土代石”新材料及其防护材料的工程特性,研发相应的施工新工艺,解决沿海开发中砂石料匮乏的技术难题,使海岸带环境得到一定的保护。

关键词 围堤; 土代石; 水泥基材料; 海水腐蚀

中图分类号 :TV41

文献标识码 :A

文章编号 :1003-9511(2012)03-0035-05

1 国内外研究现状

在江苏省漫长的海岸线上,分布着大面积由软黏土形成的浅海滩,以连云港等地区为例,海滩地基表层的 20~30 m 均为淤泥及淤泥质黏土,含水率高,压缩性大,承载力低。目前,在软黏土形成的浅海滩地区修建护岸、海堤进行围海造地大多采用抛石斜坡堤和吹填砂坡堤,这些结构都需要使用大量的砂石料,对于砂石料资源贫乏的地区,不得不投入较多的资金用于砂石料采购与运输。而且即便对于砂石料资源较丰富的地区,随着人们环境资源保护意识的逐渐提高,也不再提倡进行砂石料资源的开采。另一方面,港口航道工程开挖的大量淤泥堆放、运输等均存在增加工程投资和形成环境污染的隐患。因此,研究和开发“土代石”和防护材料,利用各地区廉价丰富的淤泥质黏土资源及工业副产品,代替砂石料等常规材料围垦筑堤,同时对淤泥筑堤进行防护,具有节约工程投资、保护环境等重要意义。

“土代石”,顾名思义就是以土代石,将土装入一定规格编织袋而成,由于其强度接近混凝土的 1/10 甚至更高,故而得其名,通常也被称为土工袋。

早期的土工袋,也被称作砂肠,以充填海砂、河砂为主,用于修筑临时堤防、防洪抢险。自 1957 年,美国人使用内充水泥混凝土的高强合成纤维袋来保

护堤岸^[1],标志着土工袋开始进入水利工程应用的行列。20 世纪 60 年代以来,土工袋在国内外的海河岸防护以及港口建设等水利工程中得到了一定程度的推广应用^[2-4]。欧洲中部的易北河腹股沟在 1969 年之前由于防护措施的局限性,河道两岸受到很大的生态破坏,当地居民就地取材制作 1 m³ 土工袋 2960 只和 0.5 m³ 土工袋 3670 只,以此修筑了 430 m 长河堤面,并覆盖 60 cm 厚的堆石,减轻河水的侵蚀,至今河堤依然完整。德国人借鉴先例,意识到土工袋的施工灵活性和可修复性,分别设计 0.05 m³ 和 0.25 m³ 等小规格土工袋用于海岸的冲刷防护工程中。近 20 年来,澳大利亚人也认识到传统工程材料的高成本和负面作用,在海工结构中大力推广使用土工袋^[5],同时在材料的耐久性、设计方法和施工工艺等方面也有了一定研究和发 展^[6-8]。在国内,土工袋在水利工程中的应用不多,常见于长江流域的河岸冲刷防护中。

“土代石”修筑堤坝,在低潮位或退潮时利用围垦区的开挖土或高含水量淤泥(质)土,直接装入编织袋,封装完毕即时铺填形成海堤,或用于堤面防护。与管袋筑坝技术相比,土工袋用于围堤建设的优势在于:袋内材料限制少,不存在可灌、充填性问题,编织袋具有良好的滤水保土作用,袋内土体排水固结速度快,施工灵活、可控制性强;土工袋可以陆

基金项目 国家科技支撑计划课题(2012BAB03B02)

作者简介 刘斯宏(1964—),男,浙江江山人,教授,博士,主要从事粒状体力学、土石坝工程及软土地基础处理研究。

上预先施工,实现海上快速施工,改善施工条件。国外常用的土工管袋一般采用近乎圆形的横截面,导致施工时很难进行管袋堆叠,影响筑堤高度。而土工袋可大可小,形状扁平,便于铺填,适应在不平整的基础面施工,可立性较好,结构缝隙处可用小土工袋进行插补^[9],亦可与国内研究的扁平状管袋搭配使用。

作为围堤新材料,“土代石”能解决沿海地区土石匮乏的问题,袋内充填开挖土或吹填土,减少使用土石材料,具有良好的经济效益。1991年澳大利亚在加纳黄金海岸用土工袋修建了400 m×200 m的水下人工暗礁,没有使用一块石头,使工程成本降低到常规施工方法的一半,并未对环境产生任何不利影响^[10]。

土工袋在海岸防护、堤坝修筑的应用中值得关注的问题是复杂风浪环境下土工袋的水力稳定性。土工袋的自身变形对其整体结构的水力稳定性影响很大,Recio等^[7]在原型试验的基础上,测试了动态波浪土工袋的作用,并用FEM与DEM模拟土工袋及袋内土体的位移变形,发现静水面以下的土工袋最容易受到破坏。当水位快速下降时,在波浪的拉拽力下,部分土工袋会向外滑移,故而需要对正常潮位与低潮位之间的土工袋进行加筋处理。袋内土体的变形也会导致土工袋的位移,同样影响土工袋护堤的稳定性。Recio推导出适合土工袋防浪堤的水力稳定公式,并将土工袋的变形作为其中一个影响参数,反映土工袋受力变形对稳定性的影响,但是未考虑渗透的不利因素,渗透性主要取决于袋子尺寸、几何形状、布置方式的选择。水主要通过土工袋之间的空隙,而在袋内土体中的水流可以忽略,因为土工袋在受压的情况下,排水容易透水难。合理的布置方式可以避免土工袋间隙的直通性,减少水的渗透,增加堤体的稳定性。

土工袋之间的摩擦作用也是一个控制因素,除了通过减少土工袋的变形来避免摩擦阻力的降低,还可以通过增加土工袋的摩擦系数。而土工袋的摩擦系数与袋子的材料类型有关,研究发现浸水前后土工袋的摩擦系数有明显差别。

土工袋的耐久性也是土工袋堤坝结构安全性的一个指标。普通的编织袋在紫外线的照射和海水的腐蚀作用下,性能将会显著降低,当极限强度降低到一定程度就会发生撕裂或穿透现象,袋内土体则被海浪冲走,堤体局部脱空,如不及时进行修补,会进一步被海水掏空,影响整个堤体的稳定性。表征耐久性的因素主要有^[11]:①抗破性。土工袋袋子伸长

率越大,抗破性能越好。Koerner^[12]提出用CBR试验得到的冲击能来判断袋子的可伸长性,同样的CBR强度下,冲击能越大,袋子抗破性越好。2001年一种在外层包有粗糙纤维的复合土工布开始得到应用,能够有效防止土工袋意外受损。②紫外线退化特性。目前常用ASTM D4355对袋子进行室内长期测试,一般将500h后袋子残余强度值作为抗紫外线能的一个指标。③耐磨性。土工袋的磨损来自于海浪中的砂石、贝壳或者珊瑚碎片等,一般发生在堤体迎水面的底部,局部可以采用抗磨性能较好的土工布材料或者进行堤脚结构设计。

近几年国内有关学者也开始关注土工袋在工程应用中的研究。早在1989年,河海大学进行过编织土工袋充泥筑堤的研究,其充泥袋采用水力水下充填的方式,袋子尺寸直径1 m,长3 m。胡景安等^[13]在拉连河利用编织袋装砂代替块石沉排护岸,充分利用了当地资源,投资少,施工简便,工期短,效果好。刘汉中等^[14]在长江口北港水深较大的潮位变动区采用抛填袋装砂双棱体斜坡堤的新型结构,作为青草沙水库深水段堤坝结构,并针对抛填沙袋的保砂性、砂袋材料强度的可靠性、施工期砂袋在波浪水流作用下的稳定性以及抛填堤身的密实性等关键技术,提出了相应的控制性指标要求。刘斯宏研究团队近年来对土工袋进行了较为深入的研究^[15-17],阐明了土工袋的力学加固机理及工程特性,其研究的土工袋加固地基技术于2004年获得日本土木工程学会技术开发奖。土工袋强度提高的根源在于袋子张力引起的附加黏聚力。土工袋用于围垦区公路基础或建筑物基础,不仅能提高地基承载力,还能有效缓解动力荷载如机车、风浪等对建筑物的干扰。近几年,在南京市多处路段进行了土工袋路基的现场试验,验证了土工袋的承载能力、稳定性、减振隔振性、经济性等。同时,通过模型试验^[18]比较了有土工袋和无土工袋加固时边坡的破坏形态及其承载力情况,利用极限分析上限法得到边坡的极限高度上解,对土工袋用于护堤结构有一定的理论指导意义。

为保证土工袋堤坝结构的安全,堤身表面的防护尤为重要。水泥基材料因材料来源广泛、造价低廉,可作为筑堤防护材料使用。但由于长期处于氯盐、硫酸盐环境,并遭受干湿循环和海水冲蚀作用,水泥混凝土或砂浆的服役环境十分恶劣。氯盐环境下钢筋混凝土的耐久性是土木工程领域的重要研究课题。因钢筋锈蚀引起的桥梁、建筑物提前破坏,造成了巨大的经济损失。为解决混凝土结构中钢筋锈

蚀问题,提高结构使用寿命,常采用低水胶比混凝土、掺用矿物外加剂、对钢筋进行防腐处理、掺用阻锈剂推迟钢筋锈蚀始发时间等技术措施。Thomas等^[19]研究了100 mm×100 mm×100 mm的C25~C45粉煤灰混凝土棱柱体在海工环境下的服役性能,发现掺用粉煤灰能显著提高混凝土抗氯离子渗透性能。Cheewaket等^[20]研究了以15%~50%粉煤灰取代P.I.硅酸盐水泥对混凝土结合氯离子能力的影响,经3~7 a海水浸泡的混凝土试件中,被固化的氯离子量随粉煤灰用量的增加而增加,但3~4 a以后,混凝土固化氯离子的能力有所下降,被固化的氯离子量几乎为恒定值。Chalee等^[21]的研究结果表明,采用50 mm的钢筋保护层,粉煤灰对水泥的质量取代率为25%~50%,水胶比为0.65的混凝土暴露在海工环境中7 a的钢筋防腐能力与水胶比为0.45的混凝土同样良好。但是,已有的研究多集中于提高混凝土抗氯离子侵蚀能力,采取的技术措施主要是掺用粉煤灰、磨细矿渣微粉等矿物外掺料,对复杂离子作用下的混凝土耐久性、混凝土微观结构设计涉及较少。蒋亚清研究团队对水泥基材料微观-亚微观设计与增强改性进行了系统研究,利用低温熟料水泥中的铝酸盐与海水中的氯离子反应,生成水化氯铝酸钙,从而使氯离子固化。通过掺用减水率为40%以上的共聚型-缩聚型复合减水剂,促进水泥水化硫铝酸钙形成,提高水泥基材料抗硫酸盐侵蚀能力。

采用纤维增强树脂(FRP)筋代替钢筋使用是提高海工环境下水泥基材料耐久性的又一技术途径。与钢筋相比,FRP筋具有轻质、高强等特点,尤为重要的是FRP筋在恶劣环境中具有高耐腐蚀性,是一种应用前景广阔的结构材料。以FRP筋全部或部分代替钢筋,将延长混凝土结构使用寿命,大幅度降低结构使用期维修费用和成本,已成为工程界热门的研究课题^[22-26]。国外在FRP筋混凝土结构研究领域十分活跃,美国、英国、加拿大、挪威和日本等国已制定了FRP筋混凝土结构与施工规范或指南。我国对FRP筋混凝土结构的研究时间较短,国家标准还在制订之中,但我国的研究者对FRP筋增强混凝土结构的静动力特性和各种环境条件下的耐久性及其劣化机理与寿命评估等重大问题给予了高度关注。虽然FRP最大的优点是其在恶劣环境特别是氯盐环境中的腐蚀问题,但在水泥混凝土高碱度条件下使用的劣化机理研究尚不深入,且少见FRP材料性能劣化的量化模型,可供参考的FRP筋在海水环境中的耐久性研究资料较少。蒋亚清研究

团队近年来对FRP筋在海工混凝土中的应用进行了较全面的研究,基于微观力学和水泥化学,探讨了高性能FRP筋混凝土的微结构设计方法,以及界面区孔隙率、水泥水化产物定量技术,为开展本专题研究奠定了基础。以FRP筋增强的混凝土结构和构件,除了上述技术、经济优势外,还可采用海砂作为混凝土细集料使用。FRP筋海砂混凝土亦已成为FRP筋应用中的热点研究问题^[27-28]。但是,国内外在海砂混凝土工程应用方面均走过很多弯路,付出过沉重代价。鉴于海砂与化学外加剂的相容性问题会导致拌合物性能不稳定,《JGJ206—2010《海砂混凝土应用技术规范》》推荐使用聚羧酸减水剂。然而,聚羧酸减水剂品种繁杂,以大单体分类至少可分为甲基丙烯酸聚乙二醇单甲醚、马来酸聚乙二醇单甲醚、烯丙基聚氧乙烯醚(APEG,非酯化大单体)等^[29-33];羧酸单体主要有(甲基)丙烯酸、马来酸或二者嵌段共聚,市售聚羧酸减水剂中通常含有甲基丙烯磺酸钠,其功能是提高减水剂的静电斥力作用,在合成时充当分子量调节剂。因此,研究适用的减水剂及其应用技术也是保障FRP筋应用的关键技术之一。蒋亚清研究团队长期从事混凝土外加剂研发与成果转化,合成了硫酸盐相容型聚羧酸减水剂、减缩型聚羧酸减水剂,可与萘系等缩聚型减水剂配伍使用,实现了共聚型-缩聚型复合减水剂,正常掺量下复合减水剂的减水率可达40%,已申请发明专利(专利受理号:201010177818.2),并基于聚羧酸减水剂-水泥相互作用,研究了聚羧酸减水剂对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能的影响,研究成果已实施产业化,为规模化应用提供了保障。

2 研究目标

针对沿海开发围堤工程“有泥无石”的现实问题,研究与开发围垦筑堤“土代石”新材料与新工艺,以土工袋技术为支撑,回收再利用围垦区的开挖土及吹填的高含水量淤泥(质)土,代替砂石料等常规的围垦筑堤材料,并通过现场试验和模型数值分析,得到土代石围堤结构稳定性和可靠性的计算方法;改善施工机械,研发新的施工工艺,对未来的土代石围堤施工具有一定的指导意义。

针对提高海工环境下筑堤防护材料的耐久性,对“土代石”筑堤防护材料的关键问题开展系统深入的研究,提出按性能设计海工混凝土的方法,实现FRP筋混凝土在筑堤防护工程中的应用;提出低温熟料改性硅酸盐水泥固定化氯离子技术,实现海砂在砂浆、混凝土中的应用。

3 研究内容

a. “土代石”新材料(土工袋)工程特性研究。包括用于装袋的现场开挖土及吹填的高含水量淤泥或淤泥质土本身的物理力学特性,土工编织袋的强度、变形、特性及土工袋的变形与摩擦特性试验研究,研究成果可为断面设计及相关计算提供原始参数。

b. 海水环境中土工编织袋材料的抗老化、抗腐蚀性性能研究。土工袋直接浸泡于海水或者在海洋地区地下水水位变动范围之内,长期经受干湿循环作用,需研究海水环境中编织袋的老化及抗腐蚀性性能。

c. “土代石”新材料(土工袋)工程应用研究。土工袋用于围垦筑堤。海洋环境中,土工袋频繁受到涨潮和退潮时波浪脉动压力的作用,围堤的变形和整体稳定性受此影响。土工袋围堤是一个复杂的多体接触系统,需研究土工袋围堤的稳定计算方法,建立这类复杂结构的变形计算模型,并根据稳定与变形计算分析结果,对围堤断面结构形式进行优化。土工袋用于围垦区道路及建筑物基础,需研究土工袋加筋区域的承载力和变形计算方法,以合理反映土工袋的加筋效果。

d. 筑堤防护新材料制备工艺和技术研究。基于研究化学外加剂-水泥相互作用机理,研发共聚型-缩聚型复合减水剂,研究低温熟料改性硅酸盐水泥对氯离子的固定化能力,研究高耐久性筑堤防护材料微观设计方法和 FRP 筋混凝土制品制备工艺。

e. 海砂资源化应用技术研究。研发以淤积砂为主要原料的围垦堤防及垦区道路透水性基层材料、引排工程高钠盐粉砂土边坡防护材料工艺参数和应用技术。

f. 筑堤防护材料耐久性研究。研究复杂因素对筑堤防护材料的腐蚀机理及其劣化模型,提出改善筑堤防护材料抗腐蚀性能的主要技术措施,研究在盐类和冻融循环耦合作用下筑堤防护材料抗冻融耐久性的评价方法、评价参数,并从宏观及微观上分析提高其抗冻融性能的措施及机理。

g. 研究土工袋围堤的施工工艺,提出土工袋围垦筑堤施工质量控制指标及检测方法。围垦堤防工程代石新材料应用示范。

4 技术路线

本项目研究的总体思路为:室内试验、现场试验、设计计算与依托工程相结合,在借鉴国内外经验和总结现有的基础上开展研究工作。具体研究程序

是:调研搜集资料→室内试验准备→室内试验→室内试验总结→施工工艺、施工机械研制→现场试验研究→依托工程施工→编写研究报告→鉴定推广利用。技术路线如图 1 所示。

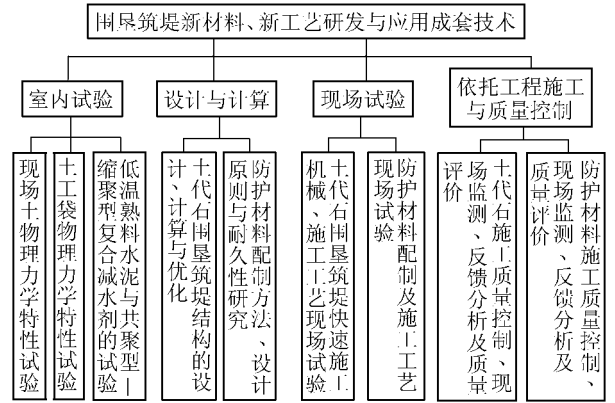


图 1 研究技术路线

5 预期成果

通过本项目研究,预期取得如下结果:

a. 形成利用土工袋处理及有效利用沿海淤泥(质)土的试验、设计、施工及监测成套技术,并将该技术在江苏省沿海及其他沿海开发项目中推广利用。

b. 利用海砂、低温熟料水泥及高效减水剂研发出淤泥筑堤的防护材料,确定该防护材料的配制方法及准则。同时评价淤泥筑堤防护材料的耐久性,得出改善其耐久性性能的技术措施及机理。专题研究成果将形成省级应用技术规程,将该材料在江苏省及全国类似地区进行推广应用。

参考文献:

- [1] SAATHOFF F, OUMERACI H, RESTALL S. Australian and German experiences on the use of geotextile containers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(4-5): 251-263.
- [2] SCHILDER R W. Das Kunststoffbewehrte Schotterbett[D]. Austria:Graz University of Technology, 1983.
- [3] HALSE Y, KOERNER R M, LORD JR A E. Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 1:Ca(OH)₂ solutions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1987, 5(4): 261-282.
- [4] OBERHAGEMANN K, HOSSAIN M M. Geotextile bag revetments for large rivers in Bangladesh[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4): 402-414.
- [5] RESTALL S J, JACKSON L A, HEERTEN G, et al. Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers:an Australian perspective[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20(5): 321-342.
- [6] HEINRICH S. Long-term Performance of Polypropylene

- Geosynthetics[C]//Durability and Aging of Geosynthetics. London :Elsevier ,1989 95-109.
- [7] RECIO J , OUMERACI H. Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers[J]. Geotextiles and Geomembranes ,2007 ,25(4-5) 278-292.
- [8] RECIO J , OUMERACI H. Hydraulic permeability of structures made of geotextile sand containers : laboratory tests and conceptual model[J]. Geotextiles and Geomembranes ,2008 , 26(6) 473-487.
- [9] YAN S , CHU J. Geo-Bag Method for Levee Construction and Rehabilitation[C]//Proceedings of Session of Geophysics Congress 2008. New Orleans :ASCE 2008 36.
- [10] HEERTEN G , JACKSON A , RESTALL S , et al. New Geotextile Developments with Mechanically-Bonded Nonwoven Sand Containers as Soft Coastal Structure[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering. Sydney :ASCE 2000 :183.
- [11] HORNSEY W P , CARLEY J T , COGHLAN I R , et al. Geotextile sand container shoreline protection systems : design and application[J]. Geotextiles and Geomembranes ,2011 ,29(4) 425-439.
- [12] KOERNER R M. Designing with Geosynthetics[M]. USA : Prentice Hall ,1991.
- [13] 胡景安 , 佟伟 , 张德臣. 砂袋代替块石沉排在拉林河护岸中的应用[J]. 黑龙江水利科技 ,1998(1) :103-105.
- [14] 刘汉中 , 吴彩娥. 青草沙水库深水段抛填砂袋筑堤关键技术研究与实践[J]. 中国水利 ,2011(3) 37-41.
- [15] 刘斯宏 , 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学 ,2007(8) :1665-1670.
- [16] 刘斯宏 , 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. 岩土工程技术 ,2007(5) 221-225.
- [17] MATSUOKA H , LIU S. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. London :Taylor & Francis Group 2006.
- [18] 王艳巧 , 刘斯宏 , 杨俊杰 , 等. 土工袋加固砂性土质边坡模型试验与上限解[J]. 岩石力学与工程学报 ,2009 ,28(S2) 4006-4013.
- [19] THOMAS M D A , MATTHEWS J D. Performance of PFA concrete in a marine environment :10-year results[J]. Cement & Concrete Composites 2004 ,26(1) 5-20.
- [20] CHEEWAKET T , JATURAPITAKKUL C , CHALEE W. Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment[J]. Construction and Building Materials 2010 ,24(8) :1352-1357.
- [21] CHALEE W , AUSAPANIT P , JATURAPITAKKUL C. Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis[J]. Materials and Design ,2010(31) :1242-1249.
- [22] ZHANG C , WANG J L. Viscoelastic analysis of FRP strengthened reinforced concrete beams [J]. Composite Structures 2011 ,93(12) 3200-3208.
- [23] NA H Y , JIN W N , SUNG B K. Evaluation of material and structural performances of developed Aqua-Advanced-FRP for retrofitting of underwater concrete structural members[J]. Construction and Building Materials 2010 ,24(4) 566-576.
- [24] WANG H Z , ABDELDELJELIL B. Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars [J]. Construction and Building Materials 2011 ,25(5) 2391-2401.
- [25] DONNA C , RAAFAT E H. Behaviour of hybrid FRP-UHPC beams in flexure under fatigue loading[J]. Composite Structures 2011 ,94(1) 253-266.
- [26] PERERA R , BARCHIN M , ARTEAGA A , et al. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks[J]. Composites : Part B 2010 ,41(4) 287-298.
- [27] MAHSA T , JOAQUIM A O B , HAMIDREZA S. A design model for strain-softening and strain-hardening fiber reinforced elements reinforced longitudinally with steel and FRP bars [J]. Composites :Part B 2011 ,42(6) :1630-1640.
- [28] LIMEIRA J , ETXEBERRIA M , AGULLO L , et al. Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand[J]. Construction and Building Materials ,2011 , 25(11) 4165-4174.
- [29] HOSAM E D H , ALAA M R , BASIL A E S. Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures[J]. Construction and Building Materials ,2010 ,24(6) 878-884.
- [30] LIMEIRA J , AGULLO L , ETXEBERRIA M. Dredged marine sand in concrete : an experimental section of a harbor pavement[J]. Construction and Building Materials ,2010 ,24(6) 863-870.
- [31] PLANK J , SACHSENHAUSER B. Experimental determination of the effective anionic charge density of polycarboxylate superplasticizers in cement pore solution[J]. Cement and Concrete Research 2009 ,39(1) :1-5.
- [32] ANATOL Z , FRANK W , LORENZ H. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts[J]. Cement & Concrete Composites 2009 ,31(3) :153-162.
- [33] JOHANN P , HELENA K , PHILIP R A , et al. Novel organo-mineral phases obtained by intercalation of maleic anhydride-allyl ether copolymers into layered calcium aluminum hydrates [J]. Inorganica Chimica Acta 2006 ,359(15) 4901-4908.

(收稿日期 2012-04-06 编辑 陈玉国)