

· 地基与基础 ·



水力吹填砂土地基加固处理现场试验及 方案优化

程林¹, 邢佩旭², 吴院生¹, 代占平¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 分析了绞吸式挖泥船水力吹填形成陆域后的地基处理方法, 通过对吹填砂颗粒成分分析、地基试夯处理和静力触探检测的综合分析, 针对不同使用功能区域分别采取振冲和强夯地基处理, 经检测各项技术指标达到设计要求。根据调整和优化的加固处理方案顺利完成地基处理工作, 为港区陆域后续基础设施的施工开展创造了条件, 取得良好的经济效益。该工程的成功实施为类似吹填造地沙漠地基工程建设提供了有益的借鉴和经验。

关键词: 吹填造地; 地基处理; 静力触探检测; 振冲处理; 强夯处理

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0138-06

Field test & optimization of soil improvement in reclamation area by cutter suction dredger

(1. CHENG Lin¹, XING Pei-xu², WU Yuan-sheng¹, DAI Zhan-ping¹)

China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. CCCC Water Transport Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The paper analyses the method statements of the soil improvement in the reclamation area by the cutter suction dredger. According to the sand analysis, CPT and preliminary dynamic compaction, the combination method of vibro-flotation and dynamic compaction are carried out for different reclamation areas. CPT and in-situ density test are used to verify the densities of the structural fill and the degree of compaction for the first metre thick fill layer respectively after ground treatment. After ground treatment, not only the bearing capacity of the proposed structural fill is increased, but also ground settlement on these locations is limited. The successful implementation of this project provides instructive reference and valuable experience for similar engineering cases.

Key words: reclamation; ground treatment; cone penetration test; CPT; vibro-flotation; dynamic compaction

1 工程概况

水力吹填砂土地基加固处理项目位于沙特东部海岸线的Ras Al-Khair半岛, 规划港区场地属于未开发的沙漠地区, 是原始的沙丘和萨布哈盆地, 海岸陆域地面高程为海拔8.85~1.36 mLAT, 滨海岸线为平缓砂质地貌, 拟建港区位于岸边浅海潮间带, 海图高程为0.0~—5.0 mLAT^[1]。

全港区陆域均以大型绞吸式挖泥船通过水力吹填造地形成, 造地面积约630万m², 回填深度从5.5~11 m。吹填造地回填区总平面布置见图1,

回填区分为结构区和非结构区, 结构区拟新建道路、地下管线、房建和堆场等基础配套设施; 非结构区暂不考虑使用功能。按合约技术规格书要求, 结构区技术指标需满足面层1.5 m最大压实度达到95%, 下一层1.5 m达到90%, 再往下到海床面静力触探值(CPT)达到7.5 MPa。根据现场实测数据分析, 水力吹填所能达到的最大压实度约为90%, 加上场地整平设备的扰动影响, 结构回填区最大干密度和静力触探值不能达到规范要求, 需要考虑相应地基加固处理措施。

收稿日期: 2012-09-26

作者简介: 程林(1980—), 男, 工程师, 从事工程设计和EPC项目管理。

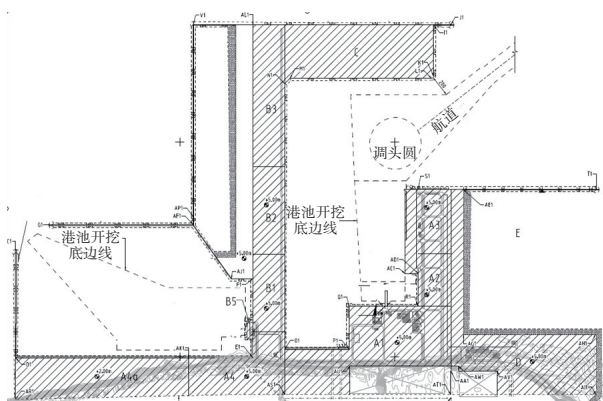


图1 港区吹填造地回填区总平面图

2 工程地质条件

2.1 原始陆域工程地质概况^[1]

原始陆域地层以砂土为主,地表下3 m左右较为松散,3 m以下中密到密实,18 m以下为泥质砂岩。

2.2 拟建港区工程地质条件

根据已有地质勘察资料^[1],拟建码头、护岸和港池区地层以砂质土为主。顶层0.3~0.5 m分布一层不均匀砂岩帽;往下5~10 m地层主要为中砂,含贝壳、珊瑚碎片,呈中密-密实状态,含有少量透镜状粗砾砂夹层,局部有钙质胶结,标贯击数范围 $N=7\sim 50$ 击,平均击数 $N=30$ 击。下部地层主要为细砂,钻探揭露厚度约10~25 m,含贝壳碎片,局部夹少量透镜状黏性土和中砂层,细砂中含较多的互层状黏性土薄夹层(夹层地层比例约占50%),呈密实-极密状,大部分为半胶结状态,标贯击数范围 $N=18\sim 100$ 击,平均击数 $N=45$ 击。

2.3 吹填砂颗粒成分分析

回填砂以指定港池、航道、调头圆区域疏浚料为主,通过绞吸式挖泥船水力吹填形成陆域。按合约要求仅适合回填料方能用于回填,其它不适合料需完全外抛入指定区域,具体要求为:回填料最大颗粒粒径不超过200 mm,最小颗粒粒径不小于 $63\ \mu\text{m}$,且含量均不超过10%。所有回填料以中细砂为主(图2)。

3 地基处理技术指标

根据合约技术规格书要求,为了提高地基

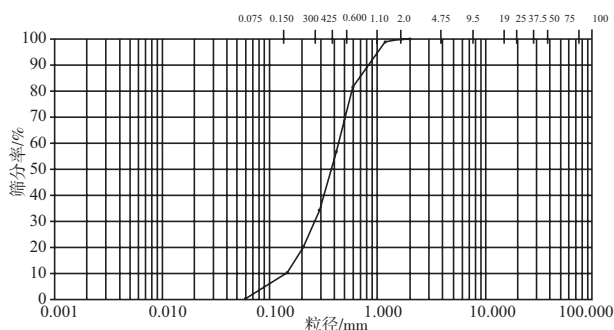


图2 吹填砂颗粒筛分分析

承载力并减小地基沉降的不利影响,在拟建结构物、道路、堆场等区域即结构区,要求对场地地基进行加固处理,其加固处理要求见表1。

表1 吹填造地区地基处理要求

地基处理深度/m LAT	地基处理后要求
5.0~3.5	干密度>最大干密度的95%
3.5~2.0	干密度>最大干密度的90%
2.0到天然海床面	静力触探检测值 $q_c \geq 7.5\ \text{MPa}$

注:1.最大干密度执行标准为Clauses 3.5 & 3.6 of BS1377:Part 4:1990, 2.静力触探执行标准为CIRIA (1987), "Cone Penetration Testing - Methods and Interpretation"^[2], 3. LAT(Lowest Astronomy Tide)为项目地中海平面最低天文潮高程,即设计相对正负零高程($\pm 0.00\ \text{m}$),吹填造地完成面控制高程为5.0 mLAT。

4 地基处理方案比选

对于拟建结构区,地基加固处理面积约为 $45\ \text{万}\ \text{m}^2$ 。如何有效完成地基处理并达到设计标准又满足工程进度需要是摆在工程技术人员面前的一道难题。从回填砂土质分析看,所有适合回填料质地均匀,均为中细砂,这首先排除了填料置换和预压处理等地基处理方案,同时结合总平面布置图的结构区分布和地基CPT检测结果的分析,考虑到不同区域的海床高程差异,决定采取强夯和振冲两种处理措施,考虑因素主要有:1)强夯加固设备简单,施工方便、快捷,经济易行和节省材料,利于环境保护,可实行流水作业,对处理砂土有较好的适用性。该方法主要应用于道路、管线和建筑地基区域的地基加固处理。2)考虑振冲产生的冲击波可能对码头结构和防波堤的不利影响,对码头后方堆场区域采取振冲挤密地基处理方案。

4.1 强夯施工方案设计

在大面积进行地基处理前,为确定强夯试验

的设备配置和施工工艺参数，包括夯击能、布点方式、夯点间距、夯击遍数、每点的夯击次数和夯沉量以及表层松散层的处理工艺等技术参数，采取在典型区域进行试夯处理^[3]。分别在A1区和D区选取两块拟建结构建筑物地基为试夯试验段，每个区域均为25 m×20 m，试验区地基顶面平均高程为5.0 mLAT，海床高程为-1.2~-0.5 mLAT，强夯加固应达到海床顶部，设计加固深度范围为5.5~6.2 m，据此确定夯击能为3 000 kN·m，根据规范要求选取两种夯锤，分别为夯锤质量20 t和12 t，起吊高度分别为15 m和25 m。试验区采用两种布点方式，一种为正方形布点，间距为4 m×4 m；一种为等边三角形布点，夯点间距为5 m。试夯过程中采取隔行夯击的方式完成整个区域的点夯，每点的夯击数按最后两击的平均夯沉量不大于5 cm来确定，夯击完成后推平场地，采用12 t的夯锤对表层进行低能量满夯，根据夯击效果满夯1~2遍，使表层密实。现场施工工作流程见图3^[4-6]。

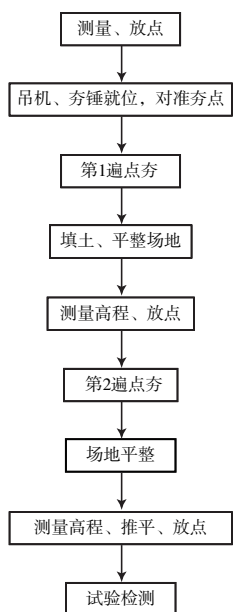


图3 强夯地基处理施工流程

对以上试验区域采取各种不同组合施工参数进行试夯处理，从吊车的最大起吊高度、操作效率、夯击次数、夯沉量来看，当采用20 t夯锤15 m落距时单点一般夯击到7次后夯沉量基本满足规范要求^[3]，综合效率最高，间距4 m的正方形布点方式能较好地发挥履带式吊车的运行效率。对部分出现夯沉量大、提锤困难的区域进行局部加密夯

点处理，必要时增加夯击次数。

4.2 振冲施工方案设计

按照设计要求并结合地勘报告，选取造地区A3区（泊位后方区）有代表性的3个区域作为试验区，试验区海床高程为-3.2~-4.2 mLAT，吹填后地面高程为4.2~5.0 mLAT，每个试验区面积为900 m²（30 m×30 m）。采用无外加填料振冲施工方案，振冲挤密布点采取正三角形布点方式，间距定为3.2 m，3.5 m，4.0 m共3种，处理深度控制在吹填高程以下10 m。现场施工工作流程见图4。

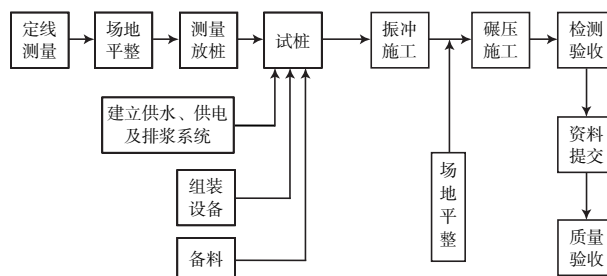


图4 振冲挤密与碾压施工流程

振冲挤密施工工艺^[3]为：

- 1) 灌水：在振冲施工前3~4 h对将要施工的区域进行灌水，提高表面干砂层的饱和度，以便改善上部砂土的振冲效果。
- 2) 定位：对准振冲孔位，误差不超过半个振冲器直径。
- 3) 造孔：慢速振冲下沉至地表以下设计深度。造孔过程中振冲器应处于悬垂状态。振冲下沉至原海床的较硬土层时即可终孔并进行下道工序。
- 4) 振冲挤密：造孔至预计深度后，留振60 s，之后慢速振冲上拔0.5~1.5 m，留振25~30 s，依次类推。
- 5) 振冲直至孔口处，再留振60 s（在上拔过程中用机械辅以人工向桩孔内填入地表砂土材料，保证不形成孔洞）。
- 6) 成桩结束，关闭水泵及振冲器，移至下一组点位。

现场共完成振冲挤密点284个，振冲挤密点统计数据见表2，处理总面积2 700 m²，振冲处理平均沉降量约为650 mm。通过对3个试区的振冲处理，发现码头后方吹填砂在水力吹填成型过程中已达到较好的密实效果，按间距4 m的三角形方式

布置振冲点即能达到较好的振冲挤密处理效果, 考虑到码头后方堆场施工的需要, 在进行上述振冲处理后, 对规划的场地进行整平处理并回填级配较好的砂石土, 采取分层振动碾压使表层设计厚度的密实度和承载力达到设计要求。

表2 150 kW振冲器试桩数据统计

部位	振冲挤密 点数/个	平均 沉降量/m	造孔平均 时间/min	加密平均 时间/min	制桩平均 时间/min
A-1区	111	0.71	3.59	28.93	32.54
A-2区	96	0.67	4.02	24.84	28.97
A-3区	77	0.60	4.39	24.32	28.73

5 地基处理效果分析

地基处理检测主要采取CPT检测和最大干密度试验, 现场通过核子密度仪法与灌砂法测试最大干密度。CPT主要测试地基承载力^[2,7], MDD测试地基密实度, 同时对部分结构区采取了浅层平板载荷试验, 以验证地基承载力是否满足建筑物地基基础承载力设计要求。

5.1 CPT检测结果

采取强夯和振冲地基处理后, 地基承载能力得到有效的提高。对比典型区域地基处理前后的检测值, 地表以下1.5 m深度范围内比较松散, 1.5 m以下至设计海平面(0.93 mLAT)深度范围由于吹填过程中土颗粒沉积密实效果较好, CPT检测锥端阻力基本达到或超过7.5 MPa; 海平面以下至原海床面深度范围, 由于吹填时颗粒处于海水悬浮状态自然沉积, 密实度比较差, 锥端阻力普遍低于7.5 MPa; 局部回填区在海床硬壳层以上有1层小于1 m厚度的软弱夹层, CPT检测值很低, 大部分小于3.0 MPa; 当探头达到硬壳层时, 锥尖阻力突然增大到10 MPa以上, 局部达到20 MPa。通过采取地基处理之后, 在吹填形成的深度范围内CPT值普遍有提高, 这种提高对地基的后期沉降起到较好的降低作用。两种方法处理前后CPT检测结果的典型对比曲线见图5, 随着原海底基床的高程不同, CPT检测结果呈现基本相同的分布规律。

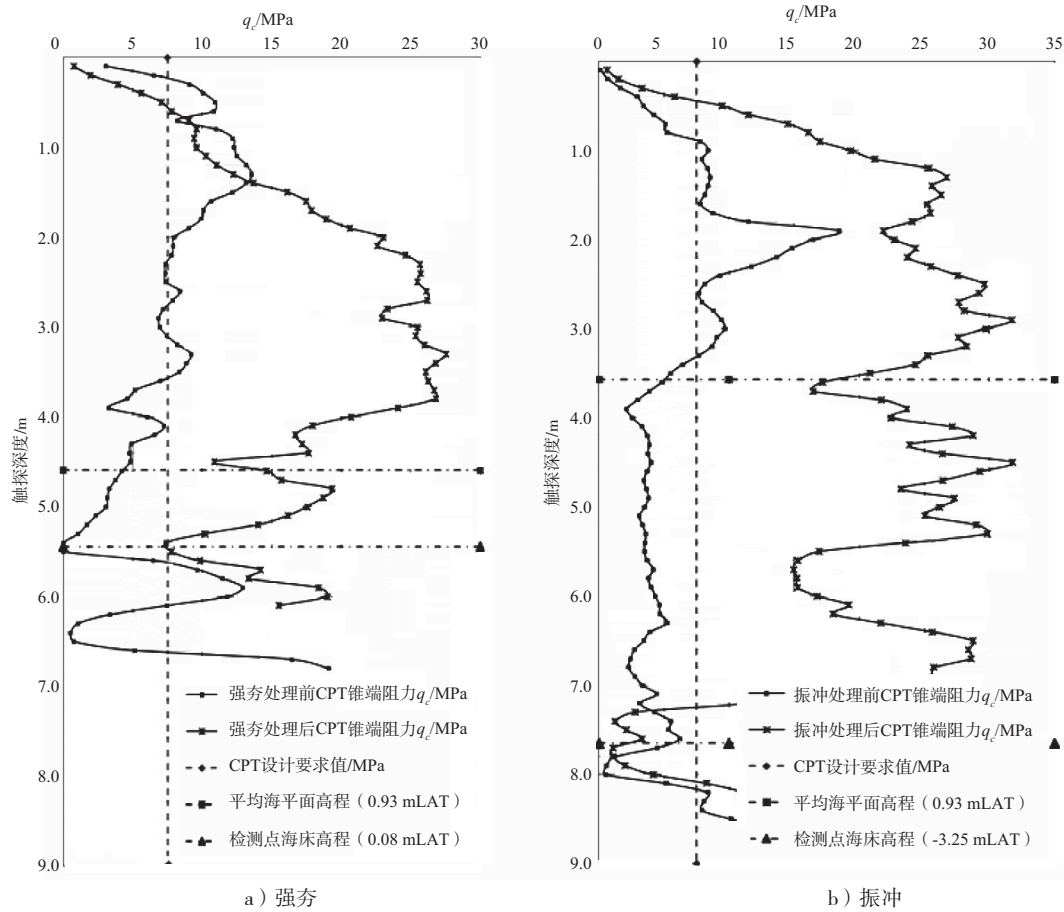


图5 强夯和振冲处理前后CPT检测结果典型曲线对比

5.2 压实度检测

地基压实度系数是地基处理效果的重要指标，也是工程验收的重要参数。核子密度仪法，是一种非破坏性测定方法，能快速测定湿密度和含水量，满足现场快速、无破损的要求，并具有操作方便，显示直观的优点。考虑到施工现场检测的面积较大，检测频率较高，干密度检测方法采用核子密度仪法，并定期与灌砂法进行对比标定，确保每批次的检测数据可靠有效。

本工程实际共检测干密度点达3 200点次，检

测结果满足验收评定要求的点数占到95%以上，结构区地基加固效果达到预定设计要求。

5.3 平板载荷试验检测

港区所有建筑物基础采取柱下独立基础形式，设计图纸要求的地基承载力特征值为120 kPa，为验证处理后地基承载力是否满足设计要求，选取典型的房屋结构区域进行了地基承载力浅层平板载荷试验，试验委托当地有资质的第三方检测机构进行，执行标准为ASTM D1194-94^[8]。试验现场见图6。

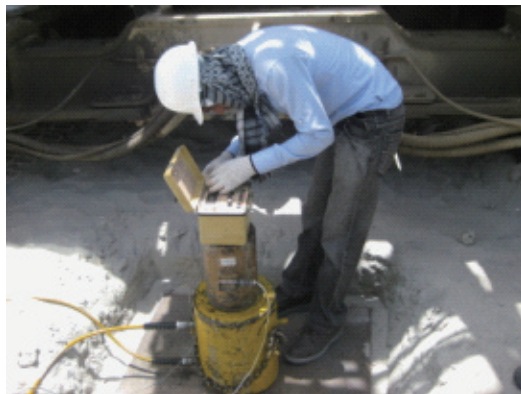


图6 现场平板载荷试验

典型载荷试验数据如表3所示，相应的加载和卸载沉降曲线如图7所示。试验中当加载到第7级时承压板周围土体明显侧向挤出，即视为加载终止，峰值荷载为426 kPa时，最大观测沉降值为4.5 mm。从检测结果来看，强夯后地基承载力特征值满足基础荷载设计承载力要求，且地基加固处理比较均匀。

表3 分级加载试验数据

加/卸荷载分级	测点1		测点2		测点3	
	荷载/kPa	沉降值/mm	荷载/kPa	沉降值/mm	荷载/kPa	沉降值/mm
1	61	0.3	61	0.3	61	0.3
2	122	0.8	122	0.7	122	0.7
3	183	1.3	183	1.3	183	1.3
4	244	2.0	244	1.9	244	1.8
5	304	2.6	304	2.6	304	2.3
6	365	3.3	365	3.0	365	3.2
7	426	4.5	426	3.9	426	4.2
8	183	2.3	183	2.5	183	2.6
9	61	1.5	61	1.6	61	1.6
10	0	0.5	0	0.8	0	0.7

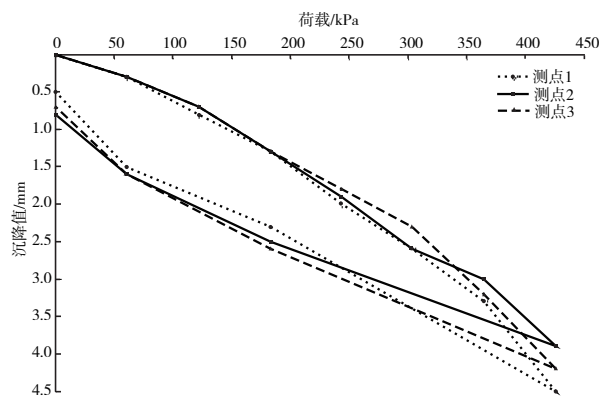


图7 现场典型平板试验加/卸荷载P-S曲线

6 地基处理几点建议

基于地基处理后的CPT钻孔资料进行分析，由于砂层不同深度的含水率、砂层中含有的砾石等成分不一致，经地基处理后表层1.0 m深度范围内不同钻孔CPT值差异较大，因此很难用同一标准CPT值与MDD的关系曲线来判断MDD。针对后期不同区域的使用功能的不同，对地基处理控制参数进行优化调整。

1) 对于建筑结构、停车场等结构区，由于

表层约1.2~1.8 m深度在施工结构基础时需要挖除,从3.2~5.0 mLAT砂层干密度不必考虑;从3.5~2.0 mLAT,检测到CPT锥端阻力 $q_c \geq 7.5$ MPa满足设计要求。结构基础开挖后,在基础垫层施工前进行表层碾压,再进行表层压实度检测以达到95%,确保基础底部密实度。

2) 在道路、堆场、地下管线等结构区,基础底高程一般在4.0~4.6 mLAT,地基处理后结构层施工前都要将表层挖掉,施工垫层之前仍然需要对表层进行压实度检测,检测深度在300 mm以上。因此,建议该类结构物区域在地基处理后表层1.0 m的压实度不必考虑,按照CPT值依次满足设计要求即可,为保证结构层基础的密实度,避免因开挖造成的扰动影响,挖到结构层底高程后进行分层碾压,在结构层施工前检测表层压实度达到95%。

3) 从以上试验区域的不同处理方法和处理后效果分析,对本工程大面积采取强夯和振冲处理的施工参数建议如表4和5所示。

表4 强夯处理方案施工技术建议参数

夯点布置	点距/m	夯锤落距/m	夯锤质量/t	夯击次数	夯击遍数
梅花形	4	15	20	7~9	点夯一遍,普夯一遍

表5 振冲处理方案施工技术建议参数

布桩方式	点距/m	造孔水压/MPa	加密水压/MPa	加密电流/A	留振时间/s	加密段/cm
正三角形	4	0.6	0.2	110~130	30~60	50~100

7 结语

1) 通过绞吸式挖泥船水力吹填形成的陆域,尽管在吹填过程中存在分层沉积和自密实效果,但由于吹填深度、后期整平扰动等因素,其地基

承载能力一般较难达到设计要求,需要进行地基加固处理,采用强夯和振冲处理方法可以有效地改善地基工程性能,以保证处理后的地基强度、变形、地基均匀性满足后期使用要求。

2) 对于处理面积大、地质分布不均匀的场地选取典型区域进行试验处理,并根据试验处理效果制定技术可行、经济合理的施工方案能有效提高工程效率,节省成本。

3) 强夯法在处理分布均匀的吹填砂地基是可行的,且施工工序简单,易于流水作业;振冲处理对沙土地基处理效果明显,尤其是地基含淤泥质层时能有效提高地基承载力和减小沉降。考虑成本因素可根据实际处理要求综合两种方法对不同地质、不同地基要求的区域分别采用。

参考文献:

- [1] EGS (Asia) Limited. Ground investigation, site specific data requirement for engineering studies – geotechnical surveys[R]. Hong Kong: EGS (Asia) Limited, 2009.
- [2] Meigh A C. Cone Penetration Testing – Methods and Interpretation[M]. London: Butterworths, 1987.
- [3] JGJ 79—2002, J 220—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [4] 张海生. 强夯法施工的技术参数研究[J]. 工程建设与设计, 2011(4): 61–64.
- [5] 周铸. 强夯法在码头地基处理中的应用[J]. 中国水运: 理论版, 2006(6): 70–71.
- [6] 陈怀科, 汪国林, 程金明, 等. 强夯法处理巴德格雷天然气处理厂沙漠地基[J]. 矿产与地质, 2009, 23(6): 584–587.
- [7] CECS 04:88 静力触探技术标准[S].
- [8] ASTM D1194–94: Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings[S].

(本文编辑 武亚庆)