

· 地基与基础 ·



## 坦桑尼亚珊瑚土全包封底基层铺面结构设计

陈志锋<sup>1</sup>, 吴国鑫<sup>2</sup>, 廖晨彦<sup>2</sup>, 贝建忠<sup>2</sup>

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100010;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 坦桑尼亚地区当地存在大量的珊瑚土, 其材料强度加州承载比值  $C$  可达 80% 以上、压实度可达 98% 以上, 但遇水后极易软化,  $C$  值迅速降低至约 30%。依托某改扩建项目, 针对其干燥强度高、遇水软化后强度显著降低的问题, 对原设计联锁块铺面结构方案进行优化, 利用珊瑚土作基层(底基层)材料替代传统的水泥稳定类或粒料类基层(底基层)材料, 并提出全包封底基层铺面结构设计, 采用有限元计算理论建模分析、室内试验研究及现场典型试验进行验证。结果表明, 全包封沥青泡水后多数  $C$  值在 70%~85%, 有效地改善了基层回填料的水稳性, 且混凝土板内力小于设计采用的 C28/35 混凝土面层设计抗拉强度和抗剪强度, 满足使用要求, 大大降低工程造价。研究成果可为类似项目提供参考。

**关键词:** 坦桑尼亚珊瑚土; 全包封; 底基层; 铺面结构

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0211-06

### Design of sole-covered sub-base of pavement structure with Tanzania coral soil

CHEN Zhifeng<sup>1</sup>, WU Guoxin<sup>2</sup>, LIAO Chenyan<sup>2</sup>, BEI Jianzhong<sup>2</sup>

(1. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100010, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** There is a large amount of coral soil in Tanzania, and the  $C$  value of California bearing ratio as well as the compaction degree can reach more than 80% and 98% respectively, but it is easy to soften after encountering water, and the  $C$  values quickly decreases to about 30%. Based on a renovation and expansion project, aiming at the problems of coral soil with high dry strength and softening in contact with water, this paper optimizes the original design of interlock block pavement structure, adopting the coral soil as the base (base) material instead of the traditional cement stabilized or granular base (base) material, and proposes the design of the sole-covered sub-base of pavement structure with Tanzania coral soil, makes checking and analysis based on the finite element calculation theory together with laboratory test research and field typical construction research. The results show that the  $C$  values of sole-covered sub-base are most between 70% and 85%, which effectively improves the water stability of coral soil, and the internal force of the concrete slab is less than the tensile strength and shear strength of the designed C28/35 concrete surface layer, which meets the application requirements, and greatly reduces the project cost. The research results can provide reference for similar projects.

**Keywords:** Tanzania coral soil; sole-covered; sub-base; pavement structure

珊瑚礁岩土地基主要分布于热带、亚热带的海域或海岸带, 其矿物成分主要是方解石( $\text{CaCO}_3$ ), 其颗粒具有易破碎、高孔隙比的特点<sup>[1]</sup>。国内学者对于不同区域分布的珊瑚土进行了工程实践和试验研究, 汪云龙等<sup>[2]</sup>的研究结果表明, 珊瑚土

的工程性质具有显著的区域性; 张晋勋等<sup>[3]</sup>依托印度洋马尔代夫维拉纳国际机场改扩建工程, 采用室内试验和原位测试对珊瑚砂填料的物理特性、击实特性、渗透特性、剪切特性、压缩特性、颗粒破碎等岩土工程特性进行试验测定, 为工程设

收稿日期: 2024-08-23

作者简介: 陈志锋(1992—), 男, 工程师, 从事港口、航道工程生产及技术管理工作。

计和施工质量控制提供详细的基础数据。

坦桑尼亚达累斯萨拉姆港附近珊瑚土分布广泛，其完全风化的珊瑚沉积物呈细颗粒状，渗透能力强、压实性能较好<sup>[4]</sup>，当地规范 *Standard Specification for Road Works*<sup>[5]</sup> 依据材料的不同 C 值 (California bearing ratio, 加州承载比)，对路面基层 (底基层) 材料进行分类，如 G80、G45、G15、G7 等 (对应材料 C 值不小于 80%、45%、15% 和 7%)，对于级配良好的珊瑚土，其材料强度 C 值可达 80% 以上，压实度也可达 98% 以上，常作为道路、堆场常用的回填料。

### 1 项目背景

坦桑尼亚达累斯萨拉姆港某改扩建项目为世界银行贷款的现汇竞标项目，其工作范围包括新建滚装泊位和堆场、改扩建原有 1#~7# 泊位，满足 7.0 万 DWT 多用途及集装箱船舶停靠。现场考察时发现，珊瑚土作为基层材料广泛用于道路基层建设中，如图 1 所示。



图 1 珊瑚土在道路工程中的应用

Fig. 1 Application of coral soil in road engineering

考虑到堆场主要用于存放滚装汽车，设计荷载相对较小，设计提出将珊瑚土作基层 (底基层) 材料用于滚装泊位堆场的设计方案。对比原设计方案采用传统的水泥稳定类或粒料类基层 (底基层) 材料，其具有显著的经济性，涉及基层材料用量约 3.6 万 m<sup>3</sup>，因珊瑚土的单价大幅低于素混凝土水稳层的单价，综合评估节省工程造价约人民币 2 000 万元。

### 2 原设计方案

无论是中国标准，还是英国或美国标准，其设计原理都是以弹性层状体系理论为基础，以基层层底拉应变作为有效控制约束条件。在计算方法上，英、美标准与我国标准不同之处在于计算荷载时还需要考虑轮胎靠近系数及动力系数的综合影响<sup>[6]</sup>。

英国港口铺面设计执行 *the Structural Design of Pavements for Ports and other Industries*<sup>[7]</sup> (简称《重型铺面》)，其以弹性层状理论体系为基础，采用理想化的轴对称模型分析，建立一个直径 12 m、深 6 m、包括 480 个三维轴对称有限元单元的圆柱形层状模型 (图 2)，通过有限元计算得到不同工况下的设计图表。

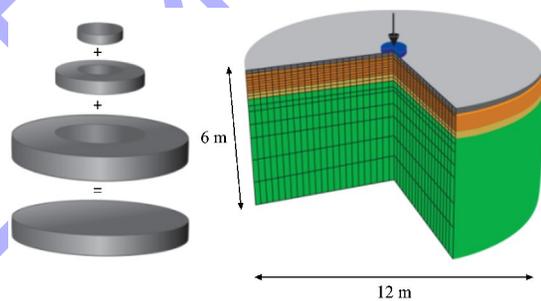


图 2 铺面有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pavement

铺面有限元模型由 24 个同心有限元单元形成每层直径 12 m 的铺面层，深 6 m。其中面层 (连锁块+垫层材料) 为单层、基层为 8 层、底基层为 2 层、地基模型为 7 层，每层均由 24 个轴对称有限元单元构成。

每个模型周边节点受水平方向约束，每个模型在最低层的节点同时受水平和垂直方向约束。一个局部荷载施加于模型顶部的中心，通过在最里面的 2 个有限元单元施加压力，并调整其几何尺寸以确保第 2 个有限元单元的外半径与轮胎的接触面或假定的集装箱箱角接触面相一致。

在英标和美标的设计理论中均以连锁块铺面为基准模型，通过材料的等效系数转换不同的基层或面层材料，从而实现不同类型铺面的设计。连锁块铺面结构中，基层是受力层，因此主要的

计算也是围绕着基层的受力状态进行, 其中的主要参数有考虑车轮靠近系数和不同工况下的等效轮压, 以及基于不同轮压进行换算得到的重复作用次数, 通过这 2 个关键参数即可查表得到所需的 C8/10 基层厚度。

项目原设计方案依据《重型铺面》设计, 规范默认采用的常规铺面结构为连锁块作为面层、CBGM C8/10 作为基层、级配碎石作为底基层。依据滚装泊位的车辆荷载的确定方法, 考虑拖挂车荷载(图 3), 其主要参数为: 设计年限 20 a, 最大轴压 140 kN, 动态系数 0.4(考虑刹车与转向同时发生), 靠近系数为  $300 \times \sqrt[3]{35\ 000/C}$ , 考虑相邻车轮靠近系数及动态系数后的最大标准轮压为 141 kN, 换算车轮作用次数约为 800 万次。根据规范查图 4, 得到所需 C8/10 基层厚度为 280 mm。因此, 滚装泊位堆场的原设计铺面结构为高强连锁块加砂垫层+280 mmCBGM C8/10+级配碎石底基层, 见图 5。

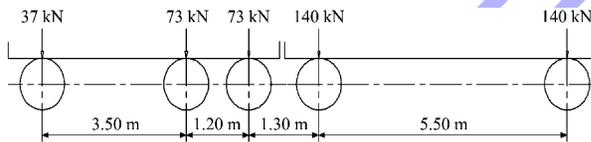


图 3 滚装泊位的车辆荷载及轴距  
Fig. 3 Vehicle loads and wheelbases of ro-ro berth

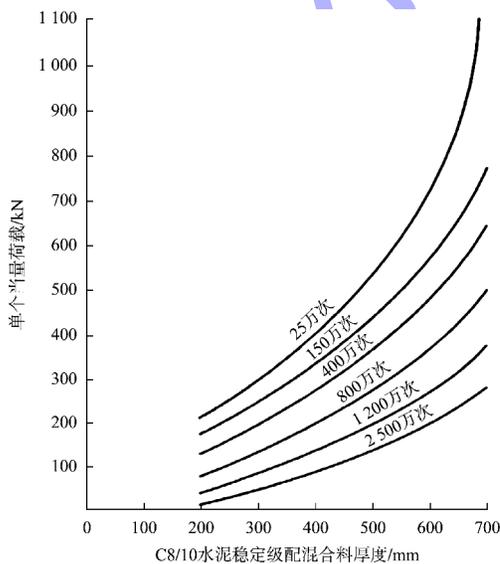


图 4 流动机械荷载作用下基层厚度设计  
Fig. 4 Design of base thickness under flowing mechanical loads

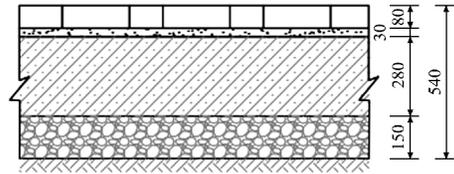


图 5 滚装堆场铺面原设计方案 (单位: mm)  
Fig. 5 Original design scheme of pavement for ro-ro stacking yard (unit: mm)

### 3 方案优化及有限元计算验证

结合坦桑尼亚当地地材情况及珊瑚土的优良路用性能, 设计考虑将其作为基层和底基层材料使用, 替代传统的 CBGM 材料和级配碎石材料, 从而节约工程造价。同时考虑到面层的耐久性和使用方便, 采用 C28/35 现浇混凝土作为面层, 优化后的铺面结构方案如图 6 所示。

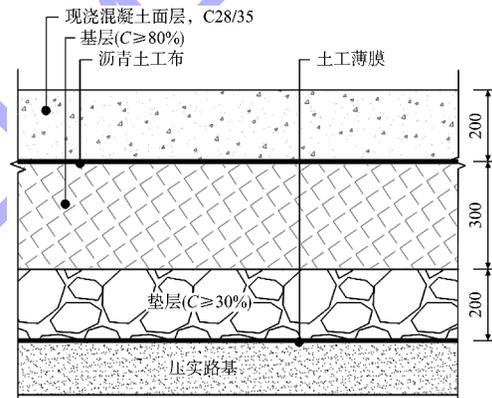


图 6 滚装堆场优化后铺面设计方案 (单位: mm)  
Fig. 6 Optimized design scheme of pavement for ro-ro stacking yard (unit: mm)

JTS 168—2017《港口道路与堆场设计规范》<sup>[8]</sup>提及水泥混凝土铺面结构分析可采用不等平面尺寸双层板模型。面层与基层的层间接触状况可假设为竖向受压连续、受拉脱开, 水平向光滑无摩擦; 地基可采用文克勒地基假设。面层板块间传递荷载效应可采用剪切弹簧模拟。流动机械轮载可简化为均布矩形或圆形荷载。

本项目采用有限元软件 SAP2000 进行铺面结构建模: 根据混凝土面层板分缝原则, 建立 4 m×4 m 的铺面结构模型, 混凝土面层和珊瑚土基层均采用实体板单元, 底基层和土基则简化为弹簧, 结合现场典型施工实测数据, 输入弹簧刚度值,

为上部铺面结构提供支撑。其中，针对珊瑚土基层非完全弹性体的特性，截面类型设置时勾选非协调模式，有限元模型如图 7 所示。

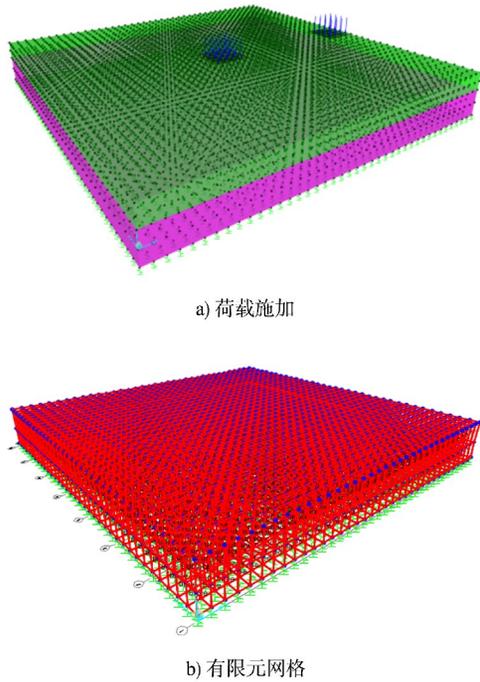


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

1) 荷载组合。验算铺面结构是否能够满足使用要求，主要是验算混凝土面层板在承载能力极限状态弯矩和剪力是否超过混凝土板的允许应力值。根据英标 BS 6349 和欧标 EN 1997 规定，对应的荷载组合及分项系数见表 1。

表 1 荷载组合  
Tab. 1 Load combinations

设计状态	组合	工况	组合
承载能力	1	最不利轴作用在混凝土板边缘	$\gamma_F L_D + \gamma_F L_V$
极限状态	2	最不利轴作用在混凝土板中心	$\gamma_F L_D + \gamma_F L_V$

注： $L_D$  为恒载； $L_V$  为可变荷载；分项系数  $\gamma_F = 1.35$ 。

2) 结果分析。组合 1 的弯矩产生应力和剪应力分别为 1.26、0.91 MPa，组合 2 的弯矩产生应力和剪应力分别为 1.05、0.56 MPa。如图 8 所示，组合 1 混凝土板最大拉应力为 1.26 MPa、最大剪应力为 1.05 MPa，小于 C28/35 混凝土面层的设计抗拉强度 1.57 MPa 和设计抗剪强度 3.5 MPa，设计方案满足规范要求。

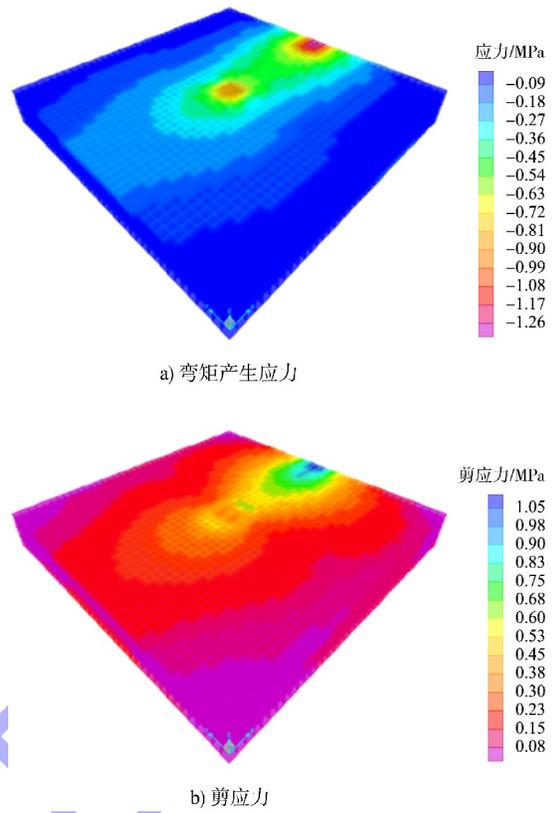


图 8 组合 1 不利工况有限元模型内力云图

Fig. 8 Internal force nephogram of finite element model under unfavorable conditions for Combination 1

#### 4 珊瑚土材料性能分析

珊瑚土具有较强的地域分布特性，不同地区的珊瑚土由于其颗粒组成、矿物组成及工程力学特性均存在较大的差异，在应用于工程项目时应提前对项目周边料场的珊瑚土进行材料性能分析，才能最终确定材料的使用范围和效果，保证工程施工质量。

搅拌洒水之前，应先在堆料区珊瑚土取样进行含水率测试，根据测试结果确定搅拌洒水量，以保证一定的含水率，最终达到压实度要求。在珊瑚土摊铺过程可能产生弹簧土，其性质特殊，即便采取多洒水、多静压及振动结合的碾压方法，也较难满足压实度和平整度的要求，摊铺过程中应谨慎处理，建议采取局部挖除、换填新珊瑚土并分层碾压的处理方法。

项目实施阶段多次对当地珊瑚土物理、力学性能等指标进行试验<sup>[9-11]</sup>，如压碎值、C 值、压实度、液限、塑性指标等，珊瑚土最大干密度为

2.117 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为9.5%。常规标准压实状态下,压实度98%时CBR可达80%,但遇水后极易软化,强度显著降低,C值迅速降低至约30%。

考虑到当地雨季存在暴雨等不可抗力因素,珊瑚土存在较大的泡水风险,为避免材料遇水后C值强度降低导致铺面结构层不均匀沉降和水泥混凝土面层开裂,设计提出全包封的设计理念,要求除了对基层顶部采用沥青封层+土工布的防护措施外,还要对基层四周及其底部采用防水薄膜进行包封,以提高珊瑚土基层的耐久性和稳定性。

## 5 泡水试验结果分析

### 5.1 基层表层铺设沥青

在堆场已完成碾压的基层上方选择50 cm×50 cm的区域,表层铺设沥青及土工布,周边用混凝土砖围闭。对比回填料泡水试验前后C值,结果见表2。由表可知,采用沥青土工布防水后,可有效阻止基层材料泡水软化,基层C值较泡水前略有降低,但仍大于80%,可满足设计要求。

表2 基层回填料泡水试验前后C值对比  
Tab.2 Comparison of C value before and after water soaking test of sub-base

随机检测点	泡水前基层 C 值/%	泡水后基层 C 值/%
1	116	107
2	109	101
3	98	91

### 5.2 基层全包封

在堆场选择10 m×10 m的区域作为典型试验段,并随机选取检测点,见图9。撒布沥青、铺设土工布后,四周挖沟(深度200~500 mm)进行泡水,底部和外侧边铺设彩条布用于蓄水,并使用1台潜水泵保证24 h不间断供水,确保侧边和顶部一直处于泡水状态,保证泡水效果。对比泡水前后C值,结果见表3。

从实测数据可看出,全包封沥青泡水后多数C值在70%~85%,有效地改善了基层回填料的水稳性能,从而验证了全包封设计的可行性。而边角区域受场地所限碾压不到位,导致C值不满足

要求,后期施工时应采取一定措施,加强边角部位的碾压,以达到压实度和C值的检测要求。



图9 现场典型试验段施工

Fig.9 Typical construction on site

表3 基层回填料全包封泡水试验前后C值检测对比  
Tab.3 Comparison of C value before and after water soaking test of sole-covered sub-base

随机检测点	泡水前基层 C 值/%	泡水后基层 C 值/%
居中1	84	71.2
居中2	98	80.3
居中3	82	81.8
边角1	87	40.9
边角2	93	71.2
边角3	101	85.6

## 6 结论

1) 针对滚装堆场主要用于存放滚装汽车、设计荷载相对较小的特点,设计对原铺面结构设计方案进行优化,利用珊瑚土作基层(底基层)材料替代传统的水泥稳定类或粒料类基层(底基层)材料,采用200 mm厚混凝土面层+300 mm厚浸沥青土工布全包封珊瑚土基层( $C \geq 80%$ )+200 mm厚珊瑚土粒料底基层( $C \geq 30%$ )+防水薄膜的铺面结构形式,具有显著的经济性;基于有限元建模分析验算,得到的混凝土板内力小于设计采用的C28/35混凝土面层设计抗拉强度和抗剪强度,满足使用要求。

2) 常规标准压实状态下,珊瑚土压实度98%时C值可达80%,但遇水后极易软化,强度显著降低,C值迅速降低至30%左右。考虑到当地雨

季存在局部暴雨等不可抗力因素,珊瑚土存在较大的泡水风险,为避免材料遇水后 $C$ 值强度降低导致铺面结构层不均匀沉降和水泥混凝土面层开裂,设计提出全包封的设计理念,除对基层顶部采用沥青封层+土工布的防护措施外,还对基层四周及其底部采用防水薄膜进行包封,以提高珊瑚土基层的耐久性和稳定性。根据珊瑚土基层回填料的表层铺设沥青泡水试验和全包封沥青泡水试验 $C$ 值检测结果,全包封沥青泡水后多数 $C$ 值在70%~85%,有效地改善了基层回填料的水稳性能,验证了全包封设计的可行性。

3) 珊瑚土摊铺过程中,人工修补的边角位置及重型压路机无法达到的区域不得采用小型打夯机、小型压路机进行碾压,小型机械无法使珊瑚土达到 $C$ 值80%、压实度95%的要求,可以采用液压破碎锤的锤头安装一块3 cm厚的铁板进行动力冲击。液压破碎锤的冲击动能量较大,可对边角进行冲击压实,从而达到压实度和 $C$ 值的检测要求。

4) 滚装堆场已经移交运营,目前状况良好,并未出现沉降、破碎和明显的面层裂缝,珊瑚土作为基层填料满足使用要求。东部非洲地区广泛分布有大量珊瑚土材料,虽然不同地区的珊瑚土性质存在一定差异性,但其在坦桑尼亚海港堆场铺面工程中的成功应用对整个东非地区的建港工程均具有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 蔡泽明,罗新华,刘自闯,等.珊瑚土地基抗剪强度交流与探讨[J].港工技术,2017,54(6):104-108.  
CAI Z M, LUO X H, LIU Z C, et al. Interchange and discussion of shear strength of coral soil foundation[J]. Port engineering technology, 2017, 54(6): 104-108.
- [2] 汪云龙,袁晓铭,孙锐,等.珊瑚吹填土初始剪切模量试验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(10):36-41.  
WANG Y L, YUAN X M, SUN R, et al. Experimental investigation on initial shear modulus of coral reclaimed soil[J]. Periodical of ocean university of China, 2017, 47(10): 36-41.
- [3] 张晋勋,李道松,张雷,等.印度洋吹填珊瑚砂岩土工程特性试验研究[J].施工技术,2019,48(4):23-27.  
ZHANG J X, LI D S, ZHANG L, et al. Study on geotechnical engineering characteristics of dredged coral sand[J]. Construction technology, 2019, 48(4): 23-27.
- [4] 冯光华,刘良合,周涛.坦桑尼亚珊瑚土回填料试验的中英标准对比[J].水运工程,2022(2):209-213.  
FENG G H, LIU L H, ZHOU T. Comparison of Chinese and British standards for Tanzania coral back filler test[J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 209-213.
- [5] Standard specification for road works 2000[S]. Norway: Novum Grafisk AS, Skjetten, 2000.
- [6] 廖源,袁静波.中美英港口重型铺面结构设计差异分析[J].水运工程,2014(2):20-26.  
LIAO Y, YUAN J B. Analysis of design difference for heavy-duty pavement at port of China, America and Britain[J]. Port & waterway engineering, 2014(2): 20-26.
- [7] KNAPTON J. Heavy duty pavements: the structural design of heavy duty pavements for ports and other industries[M]. 4th ed. UK: Interpave, 2007.
- [8] 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.  
Design code of road and storage yard for port area: JTS 168—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [9] Testing aggregates-methods for determination of ten percent fines value (TFV): BS 812-111: 1990[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [10] Methods of test for soils for civil engineering purposes-part 4: compaction-related tests: BS 1377-4: 1990[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [11] Methods of test for soils for civil engineering purposes-part 9: in-situ tests: BS 1377-9: 1990[S]. London: British Standards Institution, 1990.

(本文编辑 王传瑜)