



坦桑尼亚珊瑚土回填料试验的中英标准对比

冯光华, 刘良合, 周涛

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510420)

摘要: 坦桑尼亚某码头工程后方堆场采用吹填成陆, 主要用于暂存轻型小汽车, 采用珊瑚土作为基层回填料。通过对珊瑚土、珊瑚石以及珊瑚石添加水泥等3种回填料的室内泡水加州承载比(CBR)试验、现场CBR及压实度试验以及中英标准对比分析, 并总结其规律。结果表明, 采用英标设计的承载力要求较低的堆场, 可以采用掺黏土的珊瑚土作为基层; 珊瑚土在掺一定量的黏土后方可满足设计压实度要求下的室内泡水CBR值; 珊瑚土回填料因其孔隙率大、强度偏低、对于轻型集装箱堆场能满足要求, 重箱堆场则须另做调研。

关键词: 珊瑚土; 中英标准; 回填料; 加州承载比(CBR); 压实度试验

中图分类号: U 653.7; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0209-05

Comparison of Chinese and British standards for Tanzania coral back filler test

FENG Guang-hua, LIU Liang-he, ZHOU Tao

(The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: The stack yard of a terminal project in Tanzania uses blown-filled land, mainly for temporary storage of light cars, and applies coral soil as the base back filler. We carry out the comparative analysis of Chinese and British standards of water CBR (California bearing ration) test, on-site CBR and compaction test of the back fillers, such as coral soil, coral stone and coral stone adding cement, and summarize their rules. The results show that for stack yards with lower bearing capacity requirements designed by British standard, the coral soil mixed with clay can be used as the base layer. The coral soil mixed with a certain amount of clay can meet the indoor water CBR value under the design compaction requirements. The coral soil back filler can meet the requirements for light container yards due to its high porosity and low strength, while heavy container yards must be investigated separately.

Keywords: coral soil; Chinese and British standards; back filler; California bearing ration (CBR); compaction test

珊瑚礁岩土地基主要分布于热带、亚热带的海域和海岸带, 如红海西岸的苏丹沿岸基本都是珊瑚礁地基^[1]。国内学者对于不同区域分布的珊瑚土做了大量工程实践和试验研究, 汪云龙等^[2]的研究结果表明, 珊瑚土的工程性质具有显著的区域性; 贺迎喜等^[3]依托沙特红海门户集装箱码头工程分析红海地区珊瑚礁吹填料的压实效果和试验性能; 张文彬^[4]以南海某岛礁吹填珊瑚土为研究对象, 探究珊瑚土在单元试验中的饱和技术,

并以此为基础进行了珊瑚土液化特性试验, 对珊瑚土液化规律有初步认识。

坦桑尼亚达累斯萨拉姆港附近珊瑚石分布广泛, 当地每个土场均有供应, 是经历漫长岁月的珊瑚沉积岩的风化物, 珊瑚土经机械破碎后被当地人用作公路路基填料和民用房屋的混凝土集料。当地珊瑚石主要成分为碳酸钙, 呈红褐色, 珊瑚石带有细微孔洞, 强度在10~15 MPa。而当地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，在东非 4—6 月的雨季施工中能提高工效，因此可作为道路、堆场常用的回填料。中国企业在坦桑尼亚的道路工程施工中常采用珊瑚土作为地基回填料。在 20 世纪 60 年代，日本人在坦桑尼亚达累斯萨拉姆港建造码头时，码头混凝土面层结构下方采用珊瑚石作为填充料，运营 60 年后码头的拆除过程显示，其梁、板结构以及内部钢筋仍处于良好状态。但将坦桑尼亚当地的珊瑚石作为回填料的施工性能，却少见业界报道。

1 工程概况

坦桑尼亚达累斯萨拉姆港某老码头升级改造工程，后方为新建散货堆场，主要用于暂存来自世界各国的汽车，面积约 7.8 万 m^2 ，堆场为吹填造陆，采用港池疏浚砂作为底层，上方铺设基层珊瑚石填料，要求现场压实体度 $\geq 98\%$ ，现场 CBR 值 (California bearing ration, 加州承载比) $\geq 80\%$ ；压实体度 95% 时，要求室内泡水 CBR 值 $\geq 30\%$ 。在基层完成 CBR 及压实体度验收后再洒布沥青、铺设土工布及浇筑厚 200 mm 的 C35 混凝土面层，堆场设计荷载 30 kPa，面层结构剖面见图 1。

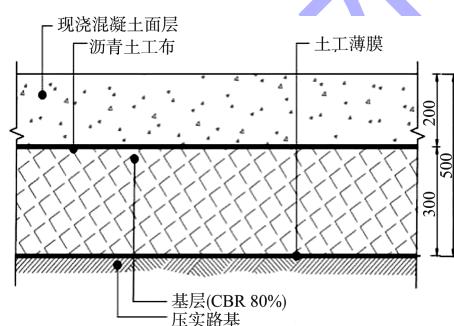


图 1 堆场面层结构剖面 (单位: mm)

堆场设计、施工和试验参考英标^[5-7]，其基层填料采用当地珊瑚石与 20% 黏性土的混合料。

2 室内试验

当地珊瑚石孔隙率为 5%~8%，吸水率约 4%，密度比花岗岩小，约 2.100 t/m^3 ，参考当地公路施工经验，珊瑚石级配碎石缺少细粒料，其黏性较低、高温下失水快、含水率低的地方碾压后容易

开裂，碾压效果不理想。为了得到更好的级配，珊瑚石破碎为小于 37.5 mm 的颗粒，破碎后的颗粒混合 10%~30% 当地细粒黏性土，组成珊瑚土，配制良好级配的填料，同时增加混合料黏结性，本文所述珊瑚土掺入 20% 黏性土。

2.1 筛分试验

破碎后的珊瑚石掺入 20% 粒径小于 4 mm 的黏性土，接近下限的珊瑚石级配得以改善，珊瑚土级配曲线位于限制曲线的中部，筛分曲线如图 2 所示。

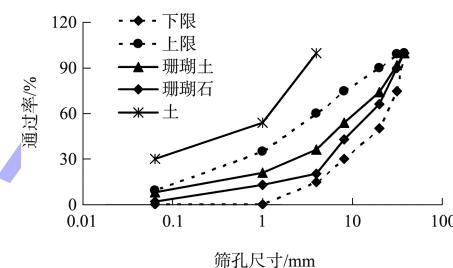


图 2 筛分曲线

2.2 压碎值及 10% 细粒值试验

压碎值试验能反映材料在逐渐增加的荷载下抵抗压碎能力，是衡量石料力学性质的指标。压碎值采用 9.5~19.5 mm 颗粒，在 400 kN 压力下样品破碎后通过 2.36 mm 筛的质量百分率。珊瑚石的压碎值比较高，达 45%，约为普通花岗岩压碎值的 2 倍。

10% 细粒值在英标 BS 812-111 中指采用 10~14 mm 颗粒材料，样品均匀加载作用力，使其在 $(10 \pm 0.5) \text{ min}$ 内达到一定的贯入度 (普通碎石为 20 mm)，压碎后通过 2.36 mm 筛的质量百分率为 10% 时所需的力值，珊瑚石 10% 细粒值约为 40 kN，而普通花岗岩约为 120 kN。由此可知，珊瑚石比普通花岗岩容易破碎，承压能力比花岗岩小很多。

2.3 室内击实试验

CBR 试件需要在最佳含水率下击实成型，英标 BS 1377-4 的击实方法与国标最明显的区别为击实次数，国标^[8]中轻型击实每层 27 和 59 击、重型击实每层 27、98 击共 4 种，英标只有 30、62 击两种。最大干密度试验时重型击实英标分 5 层，每

层 62 击, 国标分 3 层, 每层 98 击, 见表 1。击实得到的最大干密度只有微小区别, 按国标试验得到珊瑚土的密度为 2.026 t/m^3 , 最佳含水率 10%。按英标试验得到珊瑚土的最大干密度为 2.030 t/m^3 ,

最佳含水率 9.8%; 珊瑚石级配碎石最大干密度为 2.062 t/m^3 , 最佳含水率 8.6%; 珊瑚石掺 3% 水泥水稳料最大干密度为 2.096 t/m^3 , 最佳含水率 7.5%。干密度与含水率关系如图 3 所示。

表 1 中英标准击实方法对比

标准	类别	锤底直径/cm	锤质量/kg	落高/mm	试桶内径/cm	试桶高/cm	层数	每层击数	击实功/(kJ·m ⁻³)	最大粒径/mm
英标	I -1	5	2.5	30	10.0	12.7	3	62	514	20
	II -1	5	4.5	450	15.2	12.0	5	30	1 367	40
	II -2	5	4.5	450	15.2	12.0	5	62	2 826	40
国标	I -1	5	2.5	30	10.0	12.7	3	27	598	20
	I -2	5	2.5	30	15.2	12.0	3	59	598	40
	II -1	5	4.5	450	10.0	12.7	5	27	2 687	20
	II -2	5	4.5	450	15.2	12.0	3	98	2 677	40

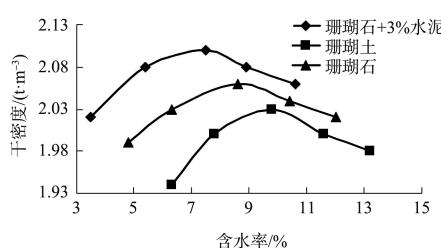


图 3 含水率-干密度曲线

2.4 CBR 室内试验及膨胀率试验

CBR 试验是一种评定基层材料承载能力的方法, CBR 值为标准试件在贯入量为 2.5 mm 时所施加的试验荷载与标准碎石材料在相同贯入量时所施加的荷载之比值, 以百分率表示。

英标 BS 1377-4 规定, 贯入 2.5 mm , 100% CBR 值时, 标准荷载力规定是 13.2 kN ; 贯入 5 mm , 英标 100% CBR 值时, 标准荷载力规定是 20 kN , 与国标相比有一些差异, 见表 2。

表 2 中英标准 CBR 试验仪器及贯入量及荷载力区别

标准	贯入杆直 径/mm	贯入杆面 积/mm ²	贯入量/ mm	作用力/ kN	标准压 力/MPa
英标	49.65	1 935	2.5 和 5	13.2 和 20	-
国标	50.00	1 965	2.5 和 5	-	7.0 和 10.5

英标 BS 1377-4 规定, CBR 试验在最佳含水率条件下成型 3 个试件; 而国标规定, CBR 试验在最佳含水率条件下成型 9 个试件; 两种方法试件浸泡时间 4 d, 但有细微区别, 见表 3。经过几次试验验证, 两种方法最终得到的 CBR 结果相差不到 2%, 影响不大。按照英标, 在最佳含水率条件下, 分别成型珊瑚石、珊瑚土、珊瑚石掺 2% 水泥 3 种材料各 3 个 CBR 试件, 进行 CBR 值测试。泡水 4 d 后测得的 CBR 结果与干密度关系曲线如图 4 所示。根据关系曲线分别算出 95% 压实度下, 珊瑚土泡水 CBR 值为 38%, 珊瑚石泡水 CBR 值为 44.8%, 珊瑚石掺水泥泡水 CBR 值为 65.4%。都满足压实度在 95% 时, 室内泡水 CBR 值 $\geq 30\%$ 的要求, 符合设计要求。

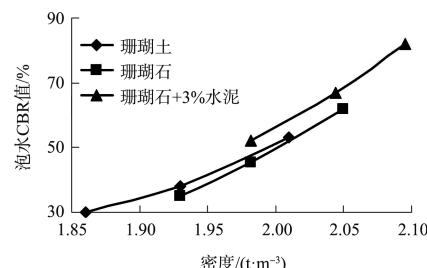


图 4 泡水 CBR 值及密度关系

表 3 中英标准成型 CBR 试件方法及数量

标准	试件数量	锤质量/kg	落高/mm	层数	每层击数	击实功/(kJ·m ⁻³)	浸泡方式及时间
英标	1	2.5	30	3	62	514	水面与试件顶面齐平浸泡 3 d, 高于试件顶面浸泡 1 d, 共 4 d
	1	4.5	450	5	30	1 367	
	1	4.5	450	5	62	2 826	
国标	3	4.5	450	3	30	820	水面高于试件顶面 25 mm 浸泡 4 d
	3	4.5	450	3	50	1 367	
	3	4.5	450	3	98	2 677	

测试 CBR 值之前,记录泡水试样的百分表读数,与泡水前读数对比,计算其膨胀率:珊瑚石膨胀率为 0.35%,珊瑚土膨胀率为 0.4%,珊瑚石+3%水泥膨胀率为 0.2%。由此可知,在泡水条件下材料的膨胀率较小,材料泡水后体积性能较为稳定。

3 现场施工及检测试验

在堆场大规模施工开始前,为测试不同的回填料特性,准备了 3 个边长为 20 m 的正方形试验段,材料分别为珊瑚石级配碎石、珊瑚土、珊瑚石掺 3%水泥。

3.1 拌和摊铺

经检测,珊瑚土最佳含水率为 9.8%,珊瑚石细小空隙较多,吸水性较大,闷料时间控制在 24 h 以上较为理想,由于坦桑尼亚常年温度较高,港口海边风大,珊瑚土失水较快,一般拌和含水率至少增加 1.5%,控制在 11.5%。摊铺参考公路基层方法,用摊铺机进行梯队作业,连续摊铺。

3.2 碾压参数确定

由于工程中首次使用珊瑚土做基层填料,参考国内砾石土的施工经验,在试验段松铺系数先控制在 1.5 左右,用 25 t 压路机静压 2 遍,再振压 3~5 遍,然后静压收面,分别测每次振压后的压实度。后根据沉降法修正松铺系数,珊瑚土松铺系数 1.45,珊瑚石松铺系数 1.38,珊瑚石+水泥松铺系数 1.36,碾压遍数及压实度结果见表 4。

表 4 碾压遍数及压实度结果

碾压遍数	压实度/%		
	珊瑚石	珊瑚石+20%黏土	珊瑚石+3%水泥
静压 2 遍	-	-	-
振压 1 遍	90.0	91.3	91.8
振压 2 遍	92.3	94.7	95.1
振压 3 遍	94.7	96.9	97.2
振压 4 遍	96.6	98.5	98.8
振压 5 遍	98.2	99.3	99.5
松铺系数	1.38	1.45	1.36

3.3 压实度及 CBR 检测

碾压完成后,检测试验段 CBR 值,见表 5。压力及贯入深度关系如图 5 所示,计算压力值与

贯入度分别为 2.5 及 5 mm 时的标准压力比值,算出 CBR 值,并在 CBR 检测点用灌砂法检测压实度,现场 CBR 与压实度结果见表 5。可以看出,压实度结果满足现场压实度 $\geq 98\%$,现场 CBR 值 $\geq 80\%$ 的设计要求。

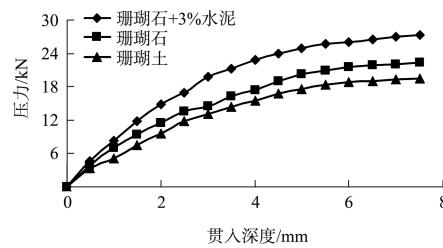


图 5 压力-贯入深度关系

表 5 3 种材料现场 CBR 与压实度

类别	CBR 值/%		压实度/%
	贯入 2.5 mm	贯入 5 mm	
珊瑚土	89.0	88.1	98.5
珊瑚石	103.3	101.1	98.2
珊瑚石+3%水泥	128.2	126.9	98.8

由图 5 可知,3 个试验段都出现前期压力增长率较大,后期趋缓的现象。珊瑚石在大于 20 kN 变化速率非常小,珊瑚土在接近 20 kN 也开始变化缓慢,分析其中原因,是由于珊瑚石含有较多空隙,强度在 10~15 MPa,当压力在 20 kN 时,考虑直径 50 mm 的贯入杆面积 1 962.5 mm²,可以算出基层材料强度约为 10 MPa,已接近珊瑚石破坏边缘。

3.4 碾压质量

碾压过程中发现,珊瑚石碾压后表面失水时容易起皮,且容易出现横向裂缝,特别在中午高温时,局部含水率较小,失水过多,缺少黏土的珊瑚石经压路机碾压后开裂现象较为明显。珊瑚石之间空隙率较大,振压 5 遍后,依然有约 10% 的点压实度小于 98%,需要继续碾压 1~2 遍才能满足要求。

珊瑚石掺 3%水泥水稳料碾压后质量得到一定改善,容易碾压平整,板结后具有较高强度,振压 4 遍,压实度和 CBR 值就可以满足要求,且 CBR 值远大于设计要求,碾压过后的表面平整度较好。

珊瑚土碾压后, 由于有黏性土, 级配较好, 填料碾压后容易密实, 振压4遍后压实度满足要求, CBR值也大于80%, 满足设计要求。

3.5 小结

分析3个试验段结果, 珊瑚土碾压次数比珊瑚石少, 不用掺入水泥, 成本较低, 碾压质量较好, 压实度和现场CBR值满足设计要求, 适合用作散装堆场基层填料。3种回填料中, 珊瑚土经济性较好, 碾压效果较好。为进一步了解珊瑚土性能, 实验室尝试掺入10%、30%黏性土, 发现掺入10%黏性土、95%压实度时, 室内泡水CBR达到43.2%, 相对珊瑚石泡水CBR值只降低1.6%, 现场压实后含水率低的地方依然有少量裂纹; 掺入30%黏性土、95%压实度时, 室内泡水CBR值一部分略大于30%, 一部分低于30%, 不符合设计要求, 掺入黏性土过多会降低材料承载力。

散货堆场已经移交运营, 目前情况良好, 并未出现沉降、破碎、明显的面层裂缝, 珊瑚土作为基层填料满足使用要求。

4 结论

1) 存放汽车的散装堆场承受荷载较小, 掺20%黏土的珊瑚土可以作为散货堆场基层填料, 满足设计要求。

2) 珊瑚土掺土不宜超过30%, 否则95%压实

(上接第152页)

- [13] 李林.三峡变动回水区广阳坝河段卵石不平衡-非连续输移特性及对航道影响研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [14] 刘天云.三峡库尾礁石急滩成因分析及航道整治[J].水运工程, 2019(10): 86-92, 192.
- [15] 蔡智清, 田进.三峡库尾小南海急滩整治数值模拟研究[J].人民珠江, 2018, 39(1): 81-87.
- [16] 曾施雨, 谢玲, 王艳芳, 等.三峡水库变动回水区重点河段洛碛河床演变分析[J].中国水运(航道科技), 2021(3): 1-8.
- [17] 中水东北勘测设计研究有限责任公司.大藤峡水利枢纽工程砂石料开采运输及加工专题报告[R].长春: 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 2015.

度时室内泡水CBR达不到80%。

3) 珊瑚土孔隙率较大、强度偏低, 是否适合用作其他重型集装箱堆场的基层材料还需要做进一步的研究。

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.
- [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.
- [3] 贺迎喜, 王伟智, 邱青长, 等.红海地区珊瑚礁吹填料的压实效果研究与分析[J].水运工程, 2010(10): 82-87, 92.
- [4] 张文彬.珊瑚土液化特性初探[D].哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [5] British Standards Institution. Testing aggregates-methods for determination of ten percent fines value(TFV): BS 812-111: 1990[S]. London: BSI, 1990.
- [6] British Standards Institution. Methods of test for soils for civil engineering purposes-part 4: compaction-related tests: BS 1377-4: 1990[S]. London: BSI, 1990.
- [7] British Standards Institution. Methods of test for soils for civil engineering purposes-part 9: in-situ tests: BS 1377-9: 1990[S]. London: BSI, 1990.
- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

(本文编辑 王璁)

- [18] 交通运输部天津水运工程科学研究院.内河航道与港口水流、泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-4—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [19] 广西交通设计集团有限公司.西江航运干线贵港至梧州航道工程初步设计[R].南宁: 广西交通设计集团有限公司, 2005.
- [20] 广西电力工业勘察设计研究院.长洲水利枢纽可行性研究报告[R].南宁: 广西电力工业勘察设计研究院, 2005.
- [21] 南京水利科学研究院.西江桂平至梧州航道整治工程羊栏滩Ⅱ级航道整治试验研究[R].南京: 南京水利科学研究院, 2005.

(本文编辑 王璁)