



基于孟加拉国规范砖渣混合料在 港区重载铺面结构中的应用

范学勇, 马强, 邓雪莹

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 孟加拉国由于缺乏天然石材, 部分构筑物普遍采用砖渣混合料代替石料, 为降低港区铺面结构中碎石的用量, 基于孟加拉国规范进行港区铺面结构设计, 以破碎率为控制指标通过泰勒 n 法对规范级配进行优化; 根据加州承载比 (CBR)、无侧限抗压强度和干燥收缩检测对材料性能进行分析。研究表明: 砖渣混合料在压实过程中易发生二次破碎, 影响级配组成, 需对砖渣混合料的级配进行优化; 砖渣混合料抗压强度及 CBR 值与水泥掺量呈正相关性, 建议港区重载铺面结构中水泥掺量不宜低于 6%; 砖渣混合料的干燥收缩较大, 可通过二次搅拌降低拌和用水以减小材料收缩应变。基于孟加拉国规范砖渣混合料的应用使造价显著降低, 具有良好的工程应用性。

关键词: 水稳砖渣混合料; 无侧限抗压强度; 加州承载比; 干缩应变

中图分类号: U653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0301-06

Application of brick slag mixture in heavy duty pavement structure based on Bangladesh standard

FAN Xueyong, MA Qiang, DENG Xueying

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Due to the lack of natural stone in Bangladesh, some structures generally use brick slag mixture instead of stone. To reduce the amount of crushed stone in the pavement structure of the port area, this paper designs the pavement structure of the port area based on the Bangladesh standard, and optimizes the standard gradation by the Taylor n method with the crushing rate as the control index. The material properties are analyzed according to California bearing ratio (CBR), unconfined compressive strength and dry shrinkage test. The results show that during the compaction process, the brick slag mixture is prone to secondary crushing, which affects the gradation composition. It is necessary to optimize the gradation of the brick slag mixture. The compressive strength and CBR value of brick slag mixture are positively correlated with the cement content. It is recommended that the cement content in the heavy duty pavement structure of the port area should not be less than 6%. The drying shrinkage of the brick slag mixture is large, and the mixing water can be reduced by secondary stirring to reduce the shrinkage strain of the material. Based on Bangladesh standard, the application of brick slag mixture significantly reduces the cost and has good engineering applicability.

Keywords: water stabilized brick slag mixture; unconfined compressive strength; CBR; dry shrinkage strain

海外港口工程港区内部铺面结构设计过程中, 针对基层材料欧洲标准主要采用 CBGM (cement bound granular mixture) 类材料, 美国标准主要采用

CTB (cement treated base) 类材料, 其本质均为水泥稳定碎石类材料, 铺面结构建设需要消耗大量的碎石。孟加拉国地处恒河和布拉马普特拉河冲积

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 范学勇 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口铺面和道路工程设计。

三角洲,该地区天然石材资源较匮乏,当地部分建筑物和构筑物通常采用破碎的烧结红砖砖渣代替石料。若港区建设结合当地特点采用砖渣代替石料,可显著降低工程造价,并减少对当地生态环境的影响和破坏。

砖渣主要为烧结完成的红砖经二次破碎后形成的粒料,表面粗糙棱角性较强、质地较脆、内部含有大量孔隙,化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等^[1]。针对砖渣混合料以及砖混凝土再生混合等材料,国内外学者进行了大量研究。Arisha 等^[2]针对不同回收砖混凝土掺量的再生混合料路用性能进行研究,结果表明一定掺量的回收砖混凝土再生混合料的回弹模量和加州承载比(CBR)满足路面基层的性能指标;Liang 等^[3]通过砖渣代替水稳碎石中的细集料,当砖渣掺量为50%时水稳材料的无侧限抗压强度达到最高值,继续增加砖渣掺量将使混合料强度降低;胡利群等^[4]通过强度和收缩试验研究废砖掺量对水稳碎石路用性能的影响,废砖掺量增加导致水稳材料的强度、收缩和抗冻性能降低,为满足规范指标要求,水稳碎石中砖渣代替粗骨料的比例不应大于70%;刘勇超^[5]对石灰稳定黏土砖再生混合料进行研究,与传统石灰稳定粒料相似,再生黏土砖的无侧限抗压强度随石灰掺量及龄期的增加而增加,且在较低石灰掺量和早期强度增长幅度较大。掺加石灰有利于提高再生混合料的水稳定性和抗收缩性,通过微观分析证明烧结砖再生混合料在击实情况下,可与石灰直接发生火山灰反应,进而改善再生混合料的性能;郑明博^[6]分析级配类型对红砖再生混合料的影响,采用骨架密实型结构的再生混合料强度最高,且满足基层强度要求,由于红砖砖渣自身强度较低,导致骨架空隙型结构强度最低。

表2 砖渣基本物理性能

杂物含量/%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎值/%	自由膨胀率/%	有机质含量/%	易溶盐含量/%	含水率/%
<1	2 507.5	1 247.3	39	0	0	<0.2	0.27

将砖渣置于 105 °C 烘箱中烘干至恒重,研磨后以 0.075 mm 为控制筛孔对试样进行提取。通过

本文以孟家拉国某集装箱码头为依托,对水稳烧结砖渣混合料应用于港口铺面基层结构的路用性能进行研究,并对其工程经济性进行分析。

1 烧结砖渣特性及混合料配合比

1.1 烧结砖渣特性

与国内砖混凝土再生混合料不同,孟加拉当地烧结砖渣不是从建筑垃圾中回收的材料,而是新烧结完成的红土砖直接进行机械或人工破碎形成的单质粒料,内部基本不含其他杂质,且砖渣本身不存在老化以及因拆除引起的内部裂隙,见图1。根据规范的试验方法对新生产的砖渣混合料的物理力学特性进行分析,检测结果见表1、2。



图1 孟加拉当地砖渣生产过程及存料场

表1 烧结普通砖外观及抗压强度检测结果

长度/ mm	宽度/ mm	最大 荷载/kN	单块 强度/MPa	强度/MPa		标准差 s	变异 系数 δ
				平均值	标准值		
235	111	121.58	10.9				
235	111	134.26	12.0				
234	111	142.47	12.7				
234	112	128.73	11.5				
235	112	138.36	12.4	11.7	10.4	0.72	0.06
235	112	118.05	10.5				
235	112	125.14	11.2				
234	113	134.16	12.0				
235	113	140.07	12.5				
235	112	131.41	11.7				

X射线荧光能谱仪分析试样的化学成分,结果表明砖渣化学组成主要为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 见表3。

表 3 砖渣化学成分含量

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	其他
62.1	16.3	1.7	8.67	2.4	0.8	0.9	1.1	2.53	1.5

1.2 砖渣混合料级配设计

由于砖渣质地较脆、承载能力低于碎石的特点,若采用传统骨架密实型或骨架空隙型结构,完全由粗颗粒提供骨架支撑,砖渣粗骨料形成的骨架结构难以承受较大荷载;而采用悬浮密实型结构,由胶结材料提供主要强度,胶结材料掺量增加将导致混合料收缩变形较大。根据最大密度曲线理论以泰勒 n 法设计砖渣混合料的级配,各级粒料通过率为:

$$P_x = 100 \times \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (1)$$

式中: d 为第 x 级集料粒径, mm; D 为砖渣混合料的最大粒径, mm; n 为递减系数; P_x 为第 x 级集料的通过百分率, %。

由于粒径大于 4.75 mm 的粗集料是混合料中骨架的主要组成部分,结合欧标对材料粒径的分类,本文以 4 mm 粒径作为粗、细集料的分界;通过泰勒 n 法对混合料级配进行设计,根据已有研究将 n 值控制为 0.25~0.50^[7]。结合欧标 BS EN 13242 中对 CBGM 类材料级配的要求,设计级配和规范级配的上限、中值、下限级配见图 2。

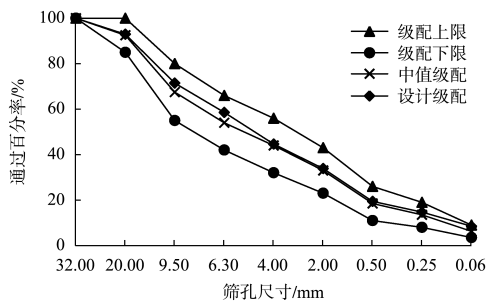


图 2 设计级配与规范推荐级配

由计算结果可知,通过泰勒 n 法得出的设计级配符合欧标要求,且在规定的级配范围内适当降低了大粒径集料的占比,并提高细集料的含量,在保证混合料形成承载骨架结构的前提下,控制粗集料的粒径,增加细集料填充内部空隙,提高混合料的整体密实度和承载能力。

1.3 砖渣混合料压实特性

通过对砖渣混合料的压实特性进行研究,分析施工碾压过程对砖渣混合料的影响,进一步检验设计级配的性能。为模拟施工过程中振动压路机压实特点,采用振动击实法成形 150 mm×150 mm 标准尺寸试件,然后进行破碎,烘干至恒重后对试件集料进行筛分。对比压实成形前后粗颗粒的含量变化,分析压实过程对混合料的级配影响以及集料的破碎情况。以 4 mm 筛孔对粗细集料进行区分,破碎率计算方法为:

$$B_4 = \frac{\Delta P_4}{P_4} \times 100\% \quad (2)$$

式中: B_4 为以 4 mm 为控制筛孔的集料破碎率; ΔP_4 为压实前、后粗颗粒(粒径 ≥ 4 mm)含量变化量,%; P_4 为压实前粗颗粒(粒径 ≥ 4 mm)含量, %。

击实后混合料破碎率 B_4 计算结果见图 3。

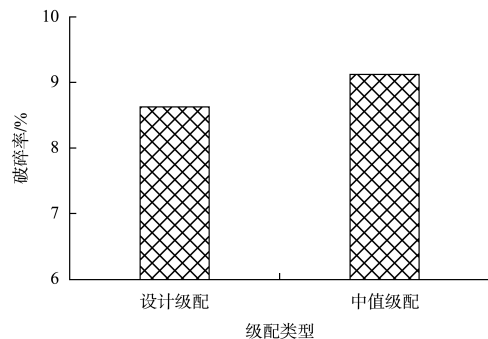


图 3 各级配砖渣混合料破碎率

由图 3 可知,振动压实后 2 种级配的混合料均有不同程度的破碎,设计级配的破碎率较规范中值级配降低了 5.5%,说明在混合料压实过程中,设计级配中粒径在 4 mm 以上的粗集料的破碎比例明显低于中值级配混合料。通过泰勒 n 法设计的级配适当降低部分大粒径集料含量,从而降低击实过程对部分大粒径集料的破碎作用,对增加的细集料含量进行逐级填充,减少骨架结构之间的空隙,提高了混合料的密实度以及混合料整

体的承载能力。由此可验证，通过泰勒 n 法设计的混合料的级配更适用于砖渣混合料，可有效提高混合料的整体强度。

2 水泥稳定砖渣混合料强度

2.1 无侧限抗压强度

根据规范方法成型试件，在达到养生龄期浸水 24 h 后对各试件强度值进行检测。以混合料无侧限抗压强度代表值对各养生龄期的水稳砖渣混合料的抗压强度进行分析，不同水泥掺量水稳砖渣混合料 7 d 无侧限抗压强度结果见图 4，各龄期无侧限抗压强度结果见图 5。

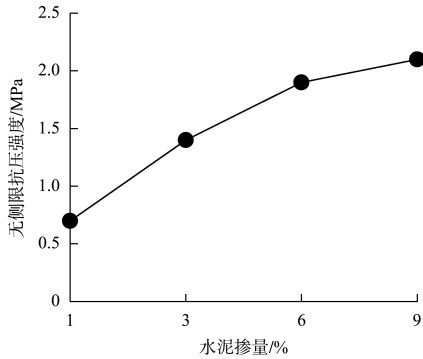


图 4 7 d 无侧限抗压强度

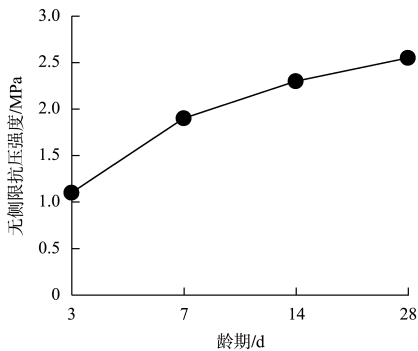


图 5 各龄期 (6%水泥) 无侧限抗压强度

与传统水稳类材料强度增长规律类似，在低水泥剂量时随水泥剂量增加水稳砖渣混合料强度的增幅较大，随着水泥剂量的持续增加，混合料强度的增幅逐渐降低，以混合料 7 d 抗压强度为例：水泥剂量 1%~3% 增加时，强度提高 90% 以上；当水泥剂量 6%~9% 增加时，强度仅提高 11%，且水稳砖渣混合料在养生龄期前期的强度涨幅较

大，随着龄期的增加强度涨幅逐渐降低。以 6% 水泥掺量的水稳砖渣混合料 28 d 强度检测结果为例，3~7 d 混合料强度增长 70%，而 14~28 d 混合料强度增长仅为 11%。由此可知，水泥稳定砖渣混合料的最佳水泥掺量略高于普通水稳类材料，从经济性角度出发应用过程中水泥剂量不宜过大；水稳砖渣混合料在养生前期强度增长较为明显，因此需严格控制材料前期养生环境和质量。

2.2 加州承载比 (CBR)

结合对水稳砖渣混合料强度的分析，对 1%~9% 水泥含量的水稳砖渣混合料的 CBR 值进行检测，结果见图 6。

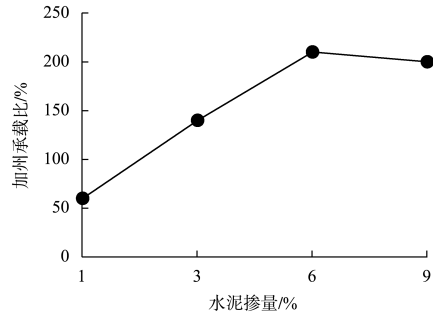


图 6 加州承载比 (CBR)

由图 6 可知，水稳砖渣混合料的承载比发展规律与抗压强度增长基本一致，承载比在水泥剂量较低时强度随掺量增长幅度较大，且随着水泥剂量的持续增加，承载比涨幅逐渐降低^[8]。这是由于材料承载能力主要由集料承载能力和胶结材料黏结力组成，在低水泥剂量时水泥全部参与水化反应产生胶结作用，提高混合料的整体强度，使得检测时贯入相同位移需要更大的压力；而随着水泥剂量的持续增加，增加的水泥未能及时完成水化反应，以细集料的形式存在于混合料中，导致混合料承载比涨幅降低，甚至引起混合料承载比降低。

欧标规范采用无侧限抗压强度指标对 CBGM 类材料强度进行控制，结构厚度与基层材料强度呈反比，根据 *The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries-4th Edition*^[9] 中抗压强度最小的材料为 C1.5/2.0 CBGM，即基层材料的 28 d 圆柱体试件无侧限抗压强度 ≥ 1.5 MPa。

而孟加拉国规范 *Pavement Design Guide for Roads & Highways Department*^[10] 中要求基层材料 CBR 值应 $\geq 80\%$ 。根据对水稳砖渣混合料无侧限抗压强度和承载比 (CBR) 的检测结果, 水稳砖渣混合料的强度指标满足欧标和孟标的使用要求, 且在实际应用过程中水泥稳定砖渣混合料的水泥掺量不宜小于 6%。

3 抗收缩性能

水稳类材料普遍存在干缩变形和温缩变形的问题, 本项目地处孟加拉国, 为亚热带季风气候, 全年温差幅度较小, 因此以干缩应变为主对水稳砖渣混合料的收缩性能进行研究。由于砖渣表面粗糙, 且内部含有大量孔隙, 致使其吸水率较高, 而混合料含水量较大将导致较大的干缩变形。针对此问题, 采用混合料、水泥和水一起拌和的常规拌和方式, 以及先由水泥和集料进行预拌和 (干拌), 再按最佳含水率加水拌和的二次拌和方式进行对比, 水泥稳定砖渣混合料的干缩形变检测结果见图 7。

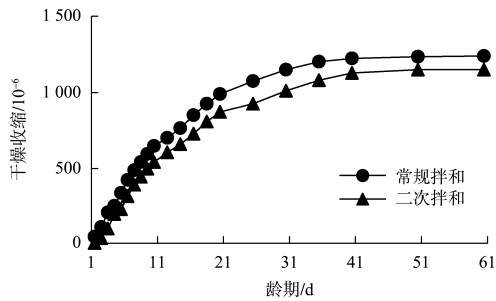


图 7 两种拌和方式水稳砖渣混合料干缩变形

与传统水稳碎石相比, 水稳砖渣混合料的干缩应变明显增大, 由于砖渣本身粗糙多孔, 需要更多拌和用水, 结合水参与水泥水化反应后, 混合料中自由水含量更高, 导致混合料整体干缩应变较大。水稳砖渣混合料干缩应变在早期增长速度较快, 且干缩变形较大, 2 种拌和方式下混合料

7 d 累计干缩变形约为 430×10^{-6} , 占 60 d 内总干缩应变的 38%; 随着龄期的增加, 干缩应变的增长幅度逐渐降低, 混合料 40 d 累计干缩应变已基本达到总变形的 98%。因此, 在水稳砖渣混合料应用过程中, 需保证前期养生条件和养生质量。

与常规拌和方式相比, 经二次拌和的混合料含水率明显低于常规拌和方式, 且二次拌和的混合料干缩应变明显较低, 二次拌和混合料 7 d 累计干缩应变较常规拌和方式降低了 8.8%, 60 d 累计干缩变形降低了 7.4%。通过集料和水泥进行预拌和, 使水泥均匀分布于混合料内部, 降低了拌和过程中起润滑作用的自由水的需求量, 从而水泥水化作用消耗结合水后, 材料内部的自由水含量降低, 进而有效减小水稳砖渣混合料的干缩变形。

4 铺面结构设计及经济性

以孟加拉国吉大港某集装箱码头为依托, 对水稳砖渣混合料在工程中应用的经济性进行分析。该港区主要流动机械为集装箱拖挂车, 轮压为 I 轴 20 kN/轮、II 轴 70 kN/轮、III 轴/IV 轴 56 kN/轮。集装箱拖挂车轴距及轮距分布见图 8。

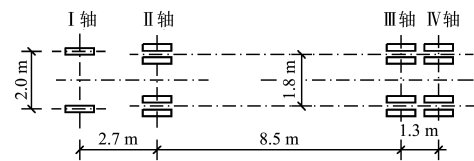


图 8 集装箱拖挂车轴距分布

根据孟加拉国规范 *Pavement Design Guide for Roads & Highways Department* 进行铺面结构设计, 地基 CBR $\geq 5\%$ 时可不设提高地基强度的附加层 (additional layer) 这与欧标对覆盖层 (capping layer) 的设置要求一致。现场地基 CBR $\geq 8\%$, 因此不需要对地基进行额外处理。当采用联锁块铺面时, 在集装箱拖挂车荷载作用下, 欧标和孟标铺面结构厚度见表 4。

表 4 铺面结构及造价对比

	面层	基层	底基层	工程单价/(美元·m ²)
欧标铺面结构	80 mm 混凝土联锁块+30 mm 砂垫层	400 mm C8/10 CBGM	180 mm 级配碎石	127.12
孟标铺面结构	80 mm 混凝土联锁块+30 mm 砂垫层	720 mm 水泥结合碎砖 (cement bound broken brick)	200 mm 砖渣砂粒料	79.75

由表 4 可知, 虽然孟标计算的结构厚度明显厚于欧标计算结果, 但其基层采用水稳砖渣材料, 底基层采用砖渣粒料代替碎石类材料, 每平方米材料单价降低了 37%, 工程成本显著降低, 在贫石地区的港口工程建设中具有较好的应用前景。

5 结论

1) 砖渣混合料质地较脆, 在压实过程中存在二次破碎的情况, 且破碎率与混合料中粗集料含量成正比; 通过泰勒 n 法和破碎率进行砖渣混合料级配, 适当降低混合料中大粒径集料含量, 可有效提高混合料整体强度。

2) 水泥稳定砖渣混合料的无侧限抗压强度和承载比(CBR)与水泥剂量呈正相关, 且在水泥剂量较低时, 强度涨幅对水泥剂量增加最敏感, 结合欧标及孟标对基层强度的相关要求, 在港区重载铺面结构中水稳砖渣基层的水泥掺量不宜低于 6%。

3) 水稳砖渣混合料累计干缩变形在早期增长较快, 工程应用过程中应严格控制混合料早期养生质量; 通过二次拌和的方式可有效降低砖渣混合料的拌合用水, 从而降低混合料因自由水散失所引起的收缩变形。

4) 孟标采用水稳砖渣混合料作为基层, 其造价明显低于常规水稳碎石类基层结构, 在石料贫乏地区的港口铺面结构建设中具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 杨敏. 再生建筑集料用于路面粒料层的工程特性试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.

[2] ARISHA A, GABR A, EL-BADAWY S, et al. Using blends of construction and demolition waste materials and recycled clay masonry brick in pavement [J]. *Procedia engineering*, 2016, 143: 1317-1324.

[3] LIANG C Y, WANG Y, SONG W Z, et al. Potential activity of recycled clay brick in cement stabilized subbase [J]. *Applied sciences*, 2019, 9(23): 5208.

[4] 胡力群, 沙爱民. 水泥稳定废粘土砖再生集料基层材料性能试验[J]. *中国公路学报* 2012, 25(3): 73-79, 86.

[5] 刘勇超. 再生填料在市政道路的应用研究及生命周期评价[D]. 南京: 东南大学, 2020.

[6] 郑明博. 建筑废弃物再生混合料试验研究及路用性能分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.

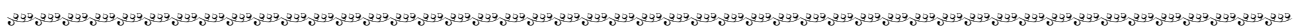
[7] 彭波, 李龙刚, 尹光凯, 等. 低水泥剂量稳定碎石级配组成设计与性能研究[J]. *公路* 2018, 63(5): 26-33.

[8] 王成. 水泥稳定级配碎石基层强度预估和整体性评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[9] The Precast Concrete Paving and Kerb Association. *The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries-4th Edition*[S]. London: Interpave, 2007.

[10] Government of the People's Republic of Bangladesh Ministry of Communications Roads and Railways Division. *Pavement Design Guide for Roads & Highways Department*[S]. Dhaka: [s: n], 2005.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 300 页)

参考文献:

[1] TSOKAS G N, TSOURLOS P I, VARGEMEZIS G N, et al. Using surface and cross-hole resistivity tomography in an urban environment: An example of imaging the foundations of the ancient wall in Thessaloniki, North Greece[J]. *Physics & chemistry of the earth*, 2011, 36(16): 1310-1317.

[2] NICULESCU B M, ANDREI G. Application of electrical resistivity tomography for imaging seawater intrusion in a coastal aquifer[J]. *Acta geophysica*, 2021, 69(2): 613-630.

[3] CHANG P Y, CHEN C C, CHANG S K, et al. An investigation into the debris flow induced by Typhoon

Morakot in the Siaolin Area, Southern Taiwan, using the electrical resistivity imaging method [J]. *Geophysical journal international*, 2012(3): 1012-1024.

[4] BRUNET P, Rémi C, BOUVIER C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT): A case study in the Cevennes area, France [J]. *Journal of hydrology*, 2010, 380(1/2): 146-153.

[5] OCKETT R, KANG S, HEAGY L J, et al. SIMPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications [J]. *Computers & geosciences*, 2015, 85: 142-154.

(本文编辑 王传瑜)