

掺入矿渣骨料对混凝土铺路砖磨损性能的影响

Ahmed Abdelbary¹, Ashraf Ragab Mohamed²

1 埃及 亚历山大 亚历山大大学工程学院机械工程系

2 埃及 亚历山大 亚历山大大学工程学院结构工程系

摘要: 近年来, 连锁混凝土砌块路面作为混凝土和沥青路面的替代品在许多国家得到了广泛应用。它已成为停车场、人行道、交通路口和道路的良好选择。混凝土路面的耐磨性取决于其抵抗摩擦磨损的能力。抗压强度和骨料类型是影响混凝土磨损性能的两个重要因素。在本研究中, 用电弧炉矿渣 (EAFS) 代替天然粗骨料, 以改善混凝土路面砌块的力学性能。评估了 EAFS 的不同混合比对耐磨性、抗压强度和吸水率的影响。连锁混凝土摊铺机的磨损和其他要求根据 ASTM 标准进行评估。结果表明, EAFS 是正常可用骨料的良好替代品。

关键词: 矿渣骨料; 摊铺机块; 耐磨性

The Impact of Incorporating Slag Aggregates on the Abrasion Behavior of Concrete Paver Blocks

Ahmed Abdelbary¹, Ashraf Ragab Mohamed²

1. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egypt

2. Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egypt

Abstract: Recently, the interlocking concrete block pavement has been extensively used in many countries as an alternative to concrete and asphalt pavements. It has become a good choice for paving of parking areas, pedestrian walks, traffic intersections, and roads. The abrasion resistance of concrete pavement is defined by its ability to resist being worn away by friction and rubbing. The compressive strength and the aggregate type are two important factors that affect the abrasive behavior of concrete. In this study, the natural coarse aggregate was replaced by Electrical Arc Furnace Slag (EAFS) in order to improve mechanical properties of concrete pavement blocks. The effect of different mixing ratios of EAFS on abrasion resistance, compressive strength, and water absorption is evaluated. Abrasion and other requirements for interlocking concrete pavers are evaluated according to ASTM standards. Results suggested that EAFS is a good alternative to the normal available aggregates.

Keywords: Slag aggregate; Paver block; Abrasion resistance

1. 引言

混凝土路面在五十年代首次被引入, 作为铺路砖的替代品。块体的形状已从非连锁到部分连锁, 再到完全连锁到多重连锁形状, 稳步发展。与沥青或混凝土相比, 由于其高质量和较低的生命周期成本, 它已成为几乎任何应用的完美解决方案。

大多数混凝土主要由波特兰水泥、粗细骨料和水组成。这种混凝土是在压力或振动下用专用制造设备模制而成的。因此, 混凝土摊铺机被视为一种颗粒复合材料, 因为它由多种材料组成, 这些材料结合在一起形成了这种通用材料。

摊铺机表面的恶化是由于各种形式的磨损造成的, 如侵蚀、气穴和各种暴露引起的简单磨损^[1]。根据形成的碎屑重量对磨损的定义不适用于有变形但很少或没有碎屑的情况; 因此, 根据滑动磨损试验的结果, 提出了磨损的定义^[2]。具体而言, 混凝土的耐磨性是根据其抵

抗摩擦磨损的能力来定义的^[3]。

混凝土路面的耐磨性是一种表面特性, 主要取决于表层特性的质量。混凝土的磨损主要取决于其抗压强度、水泥含量、水灰比 (w/c)、水泥类型、骨料类型和许多其他因素^[4]。对于具有高耐磨性的混凝土, 最好使用具有低孔隙率和高强度的硬质表面材料、骨料和水泥^[5]。粗骨料的硬度在这里很重要。据报道, 通过在大多数磨损模式下使用较硬的骨料类型, 可以延长混凝土砌块的使用寿命^[6]。

废物管理已成为影响世界环境的最复杂和最具挑战性的问题之一。据证明, 含有至少 20% 的废料作为骨料的混凝土被称为“绿色混凝土”^[7]。从这一观点出发, 已经进行了几项研究, 以研究用替代粗骨料代替石灰石骨料生产混凝土路面砌块的可行性。至于用陶瓷粗骨料替代传统粗骨料, 结果很有希望, 但在吸水率和透水性方面稍逊^[8]。^[9]进行了一项先驱性工作, 其中提出

了不同的矿渣类型来代替粗骨料, 以生产水泥砖和铺设联锁装置。研究了三种不同的炉渣置换水平, 即: 33%、67% 和 100%。结果表明, 所有铺路联锁组的抗压强度均高于参考组。碱性氧气炉矿渣 (BOFS) 和电弧炉矿渣 (EAFS) 组的抗压强度均高于规定的 ASTM 值 55.2MPa, 而高炉矿渣组达到该极限的 82%。与对照组使用的白云石相比, 所有类型的矿渣的耐磨性值都更高。然而, 在高替换水平下, BOFS 和 EAFS 组的耐磨性值与典型商业装置的耐磨性相当。还评估了用矿渣代替骨料 (粗骨料和细骨料) 对各种混凝土性能的影响^[10]。M20、M30 和 M40 级混凝土的水灰比分别为 0.55、0.45 和 0.40, 用于用矿渣替代 0、30、50、70 和 100% 骨料 (粗骨料和细骨料)。结果表明, 在用结晶矿渣替代普通粗骨料的所有水平上, 混凝土的抗压强度都提高了 4% 至 7%。此外, 与对照混合料相比, 100% 矿渣骨料 (粗骨料) 的更换使混凝土密度增加了约 5% 至 7%。密度的提高是由于矿渣骨料的单位重量较高, 比天然骨料重 9%。

本研究旨在评估钢渣替代粗骨料在联锁砌块生产中的影响。将根据现行 ASTM C936^[11] 讨论表面不规则性对联锁混凝土摊铺机磨损要求的影响。测试了样品的耐磨性、抗压强度、堆积密度、吸水率和宏观结构深度。在两种不同的炉渣置换水平下进行了试验; 50% 和 100% 以及三种不同的混合比。

2. 材料和方法

2.1 水泥

根据 ESS 4756-1/2007^[12], 普通硅酸盐水泥用于制造所有混凝土铺路砖。

2.2. 沙子

使用细度模数为 1.75 的无杂质的清洁天然沙漠砂作为细骨料。

2.3. 骨料

本研究中使用的天然粗骨料为标称最大尺寸为 12mm 的石灰石。另一方面, 采用电弧炉矿渣 (EAFS) 代替天然骨料。矿渣由哈迪德工业、贸易和建筑有限公司 (Hadid Co.for Industry, Trading&Construction CONTRASTEEL S.A.E) 提供, 最大粒径为 12.50 mm。研究中使用的矿渣的化学性质如表 1 所示。

(Fe)	(SiO ₂)	(CaO)	(Al ₂ O ₃)	(MgO)	(MnO)
22.78	21.99	37.90	7.90	7.53	2.24

表 1. EAF 炉渣的化学分析 (%)。

2.4. 样品制备和测试

准备了五组混合物, 以评估矿渣替代水平和水泥 / 矿渣混合比的影响。第一种混合物是对照混合物, 其中使用了天然骨料。根据当地生产商提供文献^[9, 13], 确定并调整了联锁装置的主要二和第三种混合料中, 分别使用矿渣代替的天然骨料。在第四和第五种混合料中混合比例使用 100% 矿渣。将水灰比固

group	Cement (kg)	Sand (kg)	Limestone (kg)	Slag (kg)	Rep. %	Mix ratio (Cement : F.A: C.A)
1	21.6	64.8	32.4	-	--	1 : 3 : 1.5
2	21.6	64.8	16.2	16.2	50	1 : 3 : 1.5
3	21.6	64.8	-	32.4	100	1 : 3 : 1.5
4	21.6	64.8	-	64.8	100	1 : 3 : 3
5	20	40	-	60	100	1 : 2 : 3

F. A fine aggregate, C. A coarse aggregate

表 2. 铺路联锁组的配合比。

根据骨料能力调整摊铺单元的含水量^[13]。调整每种混合物的水灰比 (w/c), 以保持几乎为零的坍落度。如图 1 所示, 每组包含 18 个尺寸为 20 x 23 x 8 cm 的 M-40 六角块。测试前, 所有试样均进行空气固化, 而非水固化, 以模拟行业遵循的固化实践。

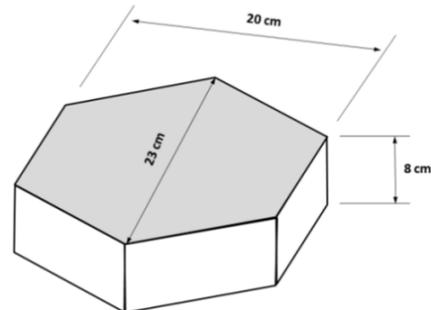


图 1. 铺筑联锁试样的典型尺寸。

根据 ASTM C241-90 测试试样的耐磨性。还测量了所有试验组的抗压强度、吸水率和体积密度, 表 3 中给出了每批试块的数量。根据 ASTM C 936^[11]、is-15658^[14] 和 ESS 4382^[15], 规范涵盖了联锁混凝土摊铺机的要求, 汇总在表 4 中。

Property	Testing method	Number of paver blocks for each test
Abrasion Resistance	ASTM C241	5
Compressive Strength	ASTM C140	5
Water Absorption	ASTM C936	5
Bulk Density	ASTM C 29/C 29M	1

表 3. 根据 ASME C936 测试的样品。

Test	ASME C 936	IS-15658:2006	ESS 4382-1/2004
Abrasion Resistance	The average thickness loss not exceed 3 mm	The average thickness loss not exceed 6 mm	The average thickness loss not exceed 3 mm
Compressive Strength	55 - 50 MPa	40 MPa	50 MPa Heavy duty 30 MPa Medium duty 30 MPa Normal duty
Water Absorption	5 %	6 %	5% Heavy duty 6% Medium duty 8% Normal duty

表 4. 联锁混凝土摊铺机的建议要求。

3. 结果和讨论

3.1 换渣水平的影响

表 5 和表 6 给出了所有实验结果。结果表明, 试验组 (1、2 和 3) 的耐磨性高于对照组。这些组的磨损系数远低于 ASTM 限值 15 cm³/50cm²。混合物 2 和 3 (含 50% 和 100% 矿渣骨料) 的耐磨性分别比对照混合物高 11% 和 58%。

Group	Original wt. (gm)	Final wt. (gm)	Weight loss (gm)	Thickness loss (mm)	Abrasion resistance, H _s	Abrasion coefficient (cm ³ /50cm ²)
1	412	394	18	1.57	1.50	7.85
2	419	403	16	1.46	1.66	7.30
3	448	436	12	1.07	2.37	5.34
4	444	432	12	1.06	2.51	5.31
5	482	472	10	0.77	3.29	3.86

表 5. 磨损试验结果。

根据 ASTM C 241^[16] 估算平均耐磨性。

Compressive Strength ^a (MPa)	Water Absorption (%)	Bulk Density(gm/cm ³)
39.4	4.24	2.199
46.2	4.01	2.245
51.0	3.2	2.328
48.1	2.89	2.469
42.2	2.92	2.662

表 6. 抗压强度、吸水率和体积密度的平均值。

如图 2 所示, 矿渣置换水平与摊铺机的磨损行为之间存在直接的比例关系。增加矿渣置换水平会提高耐磨性。

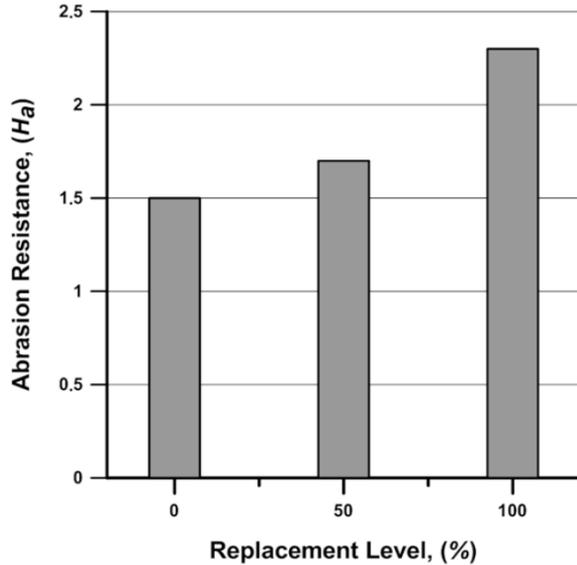


图 2. 矿渣置换水平对耐磨性的影响 (混合比 1:3:1.5)。

这可能与矿渣赋予混凝土的硬度有关; 硬度被认为是控制混凝土中骨料磨损的最重要因素。硬质骨料应保护较软的浆糊, 前提是有足够的骨料 / 浆糊粘结强度, 足以在“攻击性”磨损荷载面前牢固地保持骨料^[2]。对试样磨损表面的调查 (图 3) 表明, 基质中的硬矿渣骨料可防止磨粒更多地渗透到混凝土中。另一方面, 观察到对照混合物中石灰石的磨损。这一发现与矿渣骨料的物理性质一致, 其中矿渣的硬度约为石灰石硬度的 50%^[17]。

结果还表明, 矿渣置换可提高摊铺机砌块的抗压强度, 见表 6。与对照混合料相比, 在 100% 置换水平下, 强度显著提高, 平均值为 29%。这种改善是由于矿渣骨料表面粗糙, 矿渣骨料与水泥浆之间具有良好的粘附性。尽管所有混合组均不符合 ASTM 的要求, 但几乎所有混合组都满足 SI 和 ESS (正常和中等负荷) 的限制, 如图 4 所示。

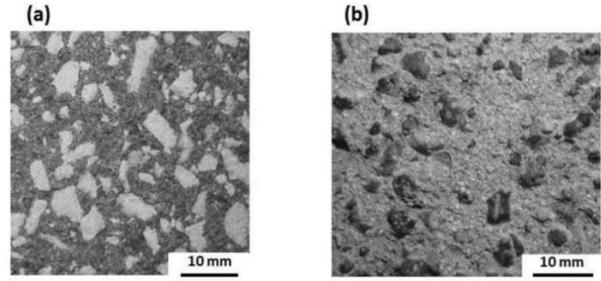


图 3. 磨损表面的照片; (a) 石灰石试样 (混合组 1) 和 (b) 炉渣。

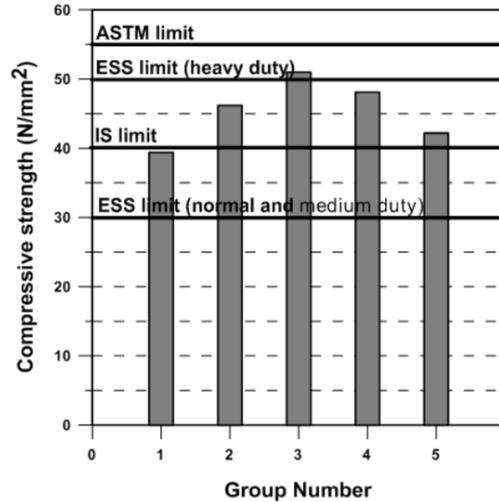


图 4. 联锁组的抗压强度。

3.2. 配合比的影响

众所周知, 粗骨料在混凝土摊铺机中起着重要作用, 因为它至少占混凝土总体积的四分之一。结果表明, 混合比和矿渣骨料含量的变化会改变摊铺单元的耐磨性, 如表 7 所示。

Group	Mix ratio	Slag content (%)	Abrasion resistance (Ha)
1	1 : 3 : 1.5	0	1.50
2	1 : 3 : 1.5	0.13	1.66
3	1 : 3 : 1.5	0.27	2.37
4	1 : 3 : 3	0.43	2.51
5	1 : 2 : 3	0.50	3.29

表 7. 混合料设计的耐磨性。

图 5 表明, 矿渣含量与耐磨性之间存在明显的相关性。与许多颗粒复合材料一样, 填料颗粒的性质和含量在决定其磨损和磨损行为方面起着控制作用。因此, 预计在矿渣含量最高时, 耐磨性最高。

结果表明, 与对照混合物相比, 第 4 组和第 5 组的抗压强度提高了 7 至 22.1%。这种改善可能是由于矿渣表面粗糙, 矿渣骨料和水泥浆之间具有良好的粘合。然而, 从结果中无法推断出抗压强度与矿渣含量之间的明确相关性。对于第 3、4 和 5 组的抗压强度差异, 没有可用的解释。

然而, 另一项先前的研究^[13]讨论了骨料与水泥 (A/C) 比和骨料类型对预制混凝土砌块性能的影响。研究发现, 随着 A/C 比的增加, 铺路砖的抗压强度降低。结果表明,

强度与骨料的压碎强度成正比。研究还发现, 陶瓷废料混凝土的抗压强度随陶瓷废料含量的增加而增加, 最佳强度为细陶瓷替代率为 50%。我们建议需要进行更多的研究, 以找到最佳的矿渣含量 (或混合比) 来改善混凝土铺路砖的强度性能。

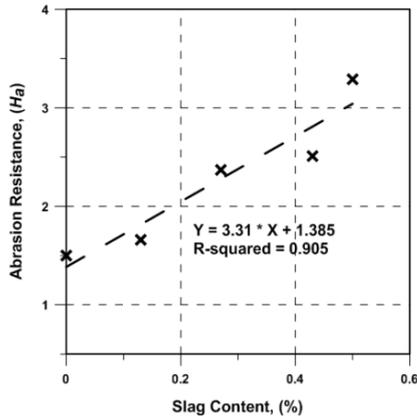


图 5. 耐磨性随炉渣含量的变化。

3.3 堆积密度和吸水率

表 6 显示了所有铺路联锁组的平均堆积密度和吸水率结果, 图 6 显示了矿渣骨料对吸水率的影响。所有试验组的体积密度值与对照组相当或略高于对照组。炉渣含量最高的第 5 组 (炉渣占总含量的 50%) 显示出最高的堆积密度值, 而第 2 组 (炉渣总量的 13%) 导致了较低的堆积密度。矿渣含量与铺路联锁的堆积密度之间的直接关系归因于 EAFS 的堆积密度高于天然骨料。第 2 组和对数组的堆积密度值接近可能是由于炉渣含量低。

根据 ESS 4382, 正常工作的摊铺机的平均吸水率不应大于 8%, 单个砌块的吸水率不得大于 10%。而 ASTM C936 规定, 试样的平均吸收率不得大于 5%, 单个单位不得大于 7%^[11, 15]。

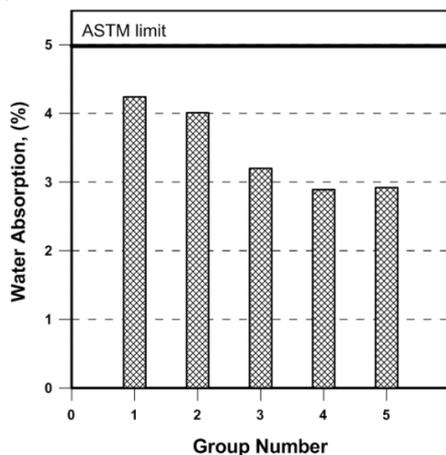


图 6. 矿渣骨料对吸水率的影响。

因此, ASTM 没有将铺面单元的吸水性分类为 ESS。然而, 发现所有试验组的吸水率均低于 ASME 和 ESS 限值, 如表 4 所示。需要指出的是, 所有试样的吸水率都低于对照组。结果表明, 吸水率随矿渣骨料含量的增加而降低, 反之亦然。与石灰石相比, 矿渣组相对

较低的吸水率可能直接归因于 EAFS 的孔隙率较低。由于粗骨料占混凝土路面砌块组成材料重量的 25% 以上, 它们对其整体孔隙率有很大影响。

3.4. 表面纹理特征

路面纹理是路面的特征, 它直接影响摩擦、防滑性、轮胎路面噪音、轮胎磨损和滚动阻力^[18]。路面纹理定义为路面表面上偏离理想、完全平坦表面的不规则部分^[19]。世界道路协会 (PIARC) 已建立了纹理的标准类别, 按波长 (λ) 和峰峰值振幅 (A) 进行分类, 包括^[20]:

微观结构 ($\lambda < 0.5$ mm, $A = 1$ 至 $500 \mu\text{m}$)。

宏观纹理 (0.5 mm $\leq \lambda < 50$ mm, $A = 0.1$ 至 20 mm)。

巨型纹理 (50 mm $\leq \lambda < 500$ mm, $A = 0.1$ 至 50 mm)。

特别是, 路面表面的宏观结构由混合料中的粗骨料颗粒产生, 并在潮湿天气摩擦中发挥关键作用^[21]。定量测量路面宏观结构深度的基本原理是通过沙斑试验^[18, 22]。沙斑试验是一种测量路面的体积方法, 通过用已知体积 (V) 的砂均匀填充路面表面的孔隙以形成圆形。

测量铺有砂料的圆的直径 (D), 并使用以下公式 (1) 计算平均纹理深度 MTD。

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1)$$

由于得出的路面纹理测量结果有限, 而且埃及没有足够的测量数据进行相应分析。因此, 路面纹理值的使用建议及其极限值的确定主要基于国外经验和现有文献。

一些欧洲国家规定了所需的最小宏观结构。例如, 当前英国规范要求横向纹理表面的最小 MTD 为 0.65mm。俄亥俄州和法国规范建议的体积 MTD 为 ≥ 0.40 毫米至 ≥ 1.00 毫米^[23]。同样, 据报道, 路面 MTD 的建议值应不小于 0.4 mm, 不大于 0.9 mm^[19]。

关于本研究, 在磨损试验结束时, 根据 ASTM E965 对所有摊铺机进行了测量。表 8 总结了 MTD 平均值, 图 7 显示了与推荐要求相比的计算 MTD。

Group	D (mm)	MTD (mm)
1	52.7	0.69
2	46.8	0.87
3	47.9	0.83
4	45.6	0.92
5	45.2	0.93

表 8. 混合设计的平均纹理深度 MTD。

表中给出的 MTD 是 5 个样品的平均值, $V = 1500$ mm³。

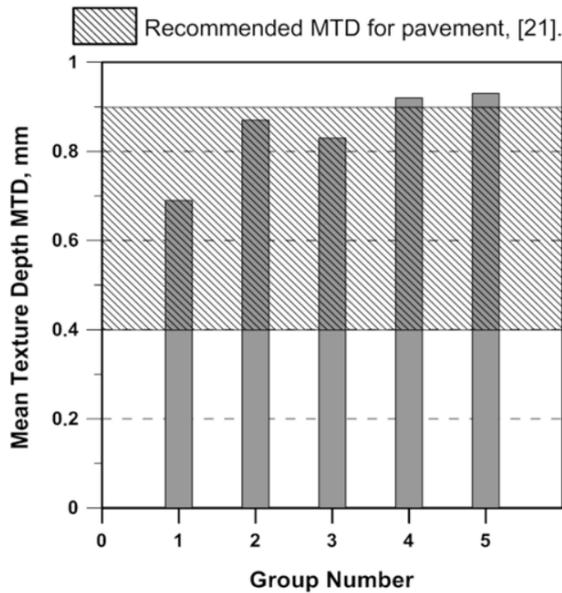


图 7. 计算的 MTD 值与推荐要求的比较。

由于石灰石与矿渣相比硬度相对较低, 第 1 组 (含 100% 天然 (石灰石) 骨料的对照混合物) 的最低 MTD 为 0.69 mm。对该组磨损表面的检查表明, 粗骨料的磨损程度与摊铺机基质相同。另一方面, 由于硬矿渣的高耐磨性, 含有 100% 矿渣骨料的摊铺机的 MTD 值相对最高, 分别为 0.92 和 0.93。

矿渣骨料和摊铺机基质之间的耐磨性对比导致了相对不规则的磨损表面, 如图 3 (b) 所示。然而, 所有测试组的 MTD 均在 0.69 mm 至 0.93 mm 之间, 与上述调查结果相当。

4. 未来工作

将根据现行 ASTM 标准, 广泛调查和讨论表面不规则性对联锁混凝土摊铺机磨损要求的影响。

5. 结论

当前的研究阐明了电弧炉渣 (EAFS) 作为粗骨料用于生产铺路联锁装置。根据上述结果, 可以得出以下结论:

1. 所有由钢渣制成的砌块路面样品均满足 ASTM 和 ESS 的大部分要求。
2. 与用于对照组的白云石相比, 引入矿渣骨料导致更高的耐磨性值 (高达 119%)。
3. 所有矿渣混合物的抗压强度均高于对照组 (7 至 29%)。
4. 熔渣联锁样品显示了可接受的 MTD 值。
5. 实验室测试表明, 所有熔渣互锁样品的 MTD 值都是可接受的。然而, 由于石灰石与矿渣相比硬度相对较低, 在对照混合物中发现 MTD 值最低。

致谢

作者感谢

Hadid Co. for Industry, Trading & Construction

CONTRASTEEL S. A. E. 提供的财务和后勤支持。特别感谢 Eng. Mohamed H. Habib。

参考文献

- [1] El Nouhy, H. A., Zeedan, S.: Performance evaluation of interlocking paving units in aggressive environments. HBRC J. 8, 81-90 (2012).
- [2] Gencil, O., Sabri Gok, M., Brostow, W.: Effect of metallic aggregate and cement content on abrasion resistance behaviour of concrete. Mater. Research Innov. 15(2), 116-123 (2011).
- [3] Erdogan, T. Y.: Materials of construction. Ankara: Middle East Technical University Press (2005).
- [4] Shackel, B.: Developments in the specification of concrete segmental pavers for Australian conditions. in CBP Second International Workshop, Oslo-Norway (1994).
- [5] Gurpreet Singh, Rafat Siddique, Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS), Construction and Building Materials, 28(1), 421-426, (2012), ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.087>.
- [6] Cement and Concrete Institute: The manufacture of concrete paving blocks. Midrand, South Africa, <http://www.cnci.org.za> (2001).
- [7] Caijun Shi, Yake Li, Jiake Zhang, Wengui Li, Linlin Chong, Zhaobin Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review, Journal of Cleaner Production, 112(1), 466-472, (2016), ISSN 0959-6526, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.
- [8] Senthamarai, R. M., Manoharan, P. D., Gobinath, D.: Reusing ceramic wastes in concrete. Constr. Build. Mater. 25, 2413 - 2419 (2011).
- [9] A. Gonzalez-Corominas, M. Etxeberria, Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates, Construction and Building Materials, 68(15), 618-626, (2014), ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>.
- [10] Korany, Y., El-Haggag, S.: Using slag in manufacturing masonry bricks and paving units. TMS 19, 97-106 (2001).
- [11] Nadeem, M., Pofale, A. D.: Experimental investigation of using slag as an alternative to normal aggregates (coarse and fine) in concrete. Int. J. of Civil and Struct. Eng. 3, 118-127 (2012).
- [12] ASTM C 936: Standard specification for solid concrete interlocking paving units. West Conshohocken, USA (2002).
- [13] ESS 4756: The Egyptian code for design and

construction of concrete structures, Cairo, Egypt, (2007).

[14] Sadek, D. M., El Nouhy, H. A.: Properties of paving units incorporating crushed ceramic. *HBRC J.* 10, 198–205 (2014).

[15] IS 15658: Precast concrete blocks for paving. New Delhi, India (2006).

[16] ESS 4382: The Egyptian code for Concrete Interlocking Paving Units, Cairo, Egypt, (2004).

[17] ASTM C 241: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Stone Subjected to Foot Traffic. West Conshohocken, USA (1997).

[18] Wang, G. W.: Properties and utilization of steel slag in engineering applications. Wollongong: Ph.D. Thesis, University of Wollongong (1992).

[19] ASTM E 965: Measuring pavement macrotexture depth using volumetric technique. West Conshohocken, USA (2001).

[20] Aavik, A., Kaal, T., Jentson, M.: Use of pavement surface texture characteristics measurement results in Estonia. in *International Baltic Road Conference*, Vilnius, Lithuania, 26–28 August (2013).

[21] Hall, J. W., Smith, K. L., Littleton, P.: *Texturing of Concrete Pavements*, Transportation Research Board. NCHRP Report 634, Washington, D.C. (2009).

[22] Flintsch, G. W., de Leon, E., McGhee, K. K., Al-Qadi, I. L.: *Pavement Surface Macrotexture Measurement and Applications*. In *Transportation Research Record No. 1860*, TRB, National Research Council, Washington, D.C. (2003).

[23] Chamberlin, W., Amsler, D.: *Measuring surface texture by the sand-patch method,* in *Pavement Surface Characteristics and Materials*. American Society of Testing and Materials, ASTM STP 763, 3–15, Philadelphia (1982).

[24] Ahammed, M. A., Tighe, S. L.: Asphalt pavements surface texture and skid resistance — exploring the reality. *Canadian J. of Civil Eng.* 391–9 (2012).