

## 废瓷砖在路面底基层中的应用

董焯<sup>1</sup>,迟连阳<sup>2\*</sup>,王发强<sup>3</sup>,管清泳<sup>3</sup>,王正文<sup>3</sup>,宋志超<sup>4</sup>

1. 中铁二十三局集团第一工程有限公司,山东 济南 276800; 2. 山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357;  
3. 山东舜都路桥工程有限公司,山东 潍坊 262200; 4. 山东东方路桥建设有限公司,山东 临沂 276002

**摘要:**为研究废瓷砖颗粒和石灰土作为填料用于路面底基层的性能,采用低塑性黏土、石灰土、废瓷砖颗粒和水制备试件,对石灰土(替换黏土)质量分数为12%、不同废瓷砖颗粒质量分数下的试件分别进行加州承载比试验、无侧限抗压强度试验、击实试验和固结试验。试验结果表明:添加废瓷砖颗粒提高了试件的最大干密度和最大加州承载比,废瓷砖颗粒质量分数由0增至30%时,最大干密度从1 616 kg/m<sup>3</sup>增至1 751 kg/m<sup>3</sup>,最大加州承载比从83.01%增至89.26%;试件的最佳含水量、膨胀率、无侧限抗压强度及孔隙比减小,最佳含水量从17.5%减至12.8%,膨胀率从2.29%减至1.08%,无侧限抗压强度从1 138 kPa减至868 kPa,废瓷砖颗粒质量分数为30%时,孔隙比从0.500减至0.473。综合考虑该混合料的性能,低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料不适合用作路面基层材料,可用作底基层材料。

**关键词:**路面;底基层;废瓷砖;低塑性黏土;加州承载比;无侧限抗压强度

**中图分类号:**U416.1<sup>+</sup>1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)04-0116-06

**引用格式:**董焯,迟连阳,王发强,等.废瓷砖在路面底基层中的应用[J].山东交通学院学报,2023,31(4):116-121.

DONG Xuan, CHI Lianyang, WANG Faqiang, et al. Application of waste ceramic tiles in the subbase layer of road pavement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 116-121.

## 0 引言

近年来,我国建筑陶瓷行业发展较快,建筑陶瓷的产量多年稳居全球第一<sup>[1]</sup>。瓷砖由含有高比例黏土矿物的天然材料完成脱水程序,并在700~1 000℃下烧制而成,具有烧制黏土的抗压特性<sup>[2]</sup>。废瓷砖在自然环境中不易分解,长期堆放易对周围环境造成不良影响。道路路面路基施工对填筑材料的需求不断增大,通常选用资源相对欠缺的碎石作为路面底基层填料<sup>[3-4]</sup>,造价较高,可从工业垃圾、生活垃圾及可回收材料中寻找替代的填筑材料。如果废瓷砖可广泛应用于高速公路建设,则可减少不可再生资源的消耗和废瓷砖的堆放,实现资源循环利用,减少环境污染,促进可持续发展<sup>[5-7]</sup>。

陶瓷颗粒不受水泥水化影响,可采用废陶瓷颗粒替换水泥混凝土中的骨料。Medina等<sup>[8]</sup>、王长远等<sup>[9]</sup>采用废陶瓷颗粒替代混凝土的天然粗骨料,发现陶瓷颗粒的质量分数为25%时可提高水泥混凝土的抗压强度。Lopez等<sup>[10]</sup>、Binici<sup>[11]</sup>、黄宏等<sup>[12]</sup>采用细陶瓷骨料替代天然细骨料,发现混凝土的抗压强度随细陶瓷骨料置换率的增大而降低。Debieb等<sup>[13]</sup>测试细再生陶瓷骨料和天然骨料的吸水率,发现陶瓷骨料因孔隙率较高表现为吸水率较高。Ayn等<sup>[14]</sup>发现细再生陶瓷骨料的密度(2 496 kg/m<sup>3</sup>)比细天然骨料(2 978 kg/m<sup>3</sup>)小,适合掺入生水泥混合料中。采用再生陶瓷骨料生产混凝土是废陶瓷再利用的可行性

收稿日期:2022-10-05

基金项目:山东交通科技创新计划项目(2022B17)

第一作者简介:董焯(1968—),男,山东莱阳人,高级工程师,主要研究方向为路桥工程建设,E-mail:674286468@qq.com。

\*通信作者简介:迟连阳(1999—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为路基路面结构,E-mail:1621679917@qq.com。

选择,但目前废陶瓷颗粒和石灰土同时掺入在黏土中用作路面底基层填料的研究较少。

本文将废弃瓷砖颗粒和石灰土掺入黏土用作路面底基层材料,采用低塑性黏土、石灰土、废瓷砖颗粒和水制备试件,分析其路用性能,以期提高废瓷砖的再利用率,减少工业垃圾对环境的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验原材料包括低塑性黏土、废瓷砖颗粒、石灰土和水。低塑性黏土的塑性指数、液限分别为 24%、49%,黏土颗粒的密度为  $2.61 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,内摩擦角  $\varphi = 22^\circ$ ,内聚力  $c = 15 \text{ kPa}$ 。废瓷砖颗粒的密度为  $2.42 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。废瓷砖颗粒累计粒度分布数分别为 10%、30%、50%、60% ( $D_{10}$ 、 $D_{30}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{60}$ )时,对应的粒径分别约为 1.0、3.8、7.5、9.5 mm。计算均匀度系数  $C_u = 2.5$ ,曲率系数  $C_c = 1.52$ 。98%以上的石灰土可通过孔径为 0.15 mm 的孔筛,根据文献[15],选择质量分数为 12%的石灰土提高混合料的抗压强度。废瓷砖颗粒的级配为 0.075~19.0 mm。黏土和废瓷砖颗粒的粒度分布如图 1 所示。

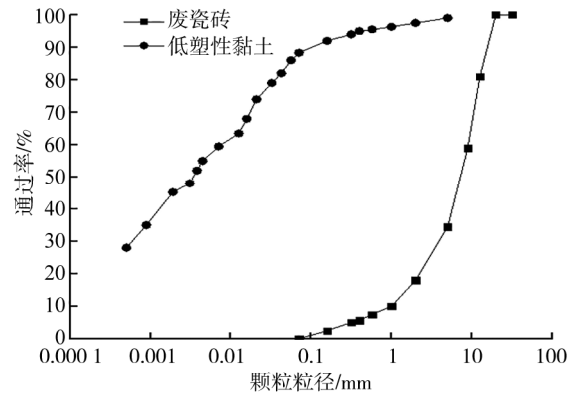


图 1 黏土和废瓷砖颗粒的粒度分布

### 1.2 试验方法与结果

根据文献[16]制备试件,进行加州承载比(California bearing ration, CBR)、无侧限抗压强度(unconfined compressive strength, UCS)、击实和固结试验测试。为满足每个测试标准的要求,4个试验过程均采用废瓷砖颗粒质量分数不同的试件。

对试件进行标准击实试验<sup>[16]</sup>,分3层击实,每层25击,每层试件高度相等,对2层交界处的土面进行刨毛处理。对不同含水量的试件依次击实,得到废瓷砖质量分数不同试件的最大干密度和最佳含水量。

采用30 kN的测力环进行加州承载比试验,百分表读数精度为0.01 mm。按最佳含水量制备试件,浸泡4 d,计算试件的膨胀率,再通过贯入试验分别计算不同含水量下各试样的最大加州承载比。

采用最佳含水量  $w_{opt}$  制备试件,浸泡4 d,进行无侧限抗压强度试验<sup>[16]</sup>。保持加载速率约为1 mm/min,记录试件破坏时的最大压力。试件的无侧限抗压强度为试件破坏时最大荷载与试件面积之比。

不同废瓷砖颗粒质量分数下试件的试验结果如表1所示。由表1可知:随废瓷砖颗粒质量分数的增大,最佳含水量、膨胀率、无侧限抗压强度减小,最大干密度和最大加州承载比增大。

表 1 不同废瓷砖颗粒质量分数下试件的试验结果

废瓷砖颗粒质量分数/%	最大干密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	最佳含水量/%	膨胀率/%	最大加州承载比/%	无侧限抗压强度/kPa
0	1 616	16.71	2.29	83.01	1 138
5	1 668	16.32	2.01	84.13	1 108
10	1 689	15.33	1.85	85.27	1 037
15	1 707	15.11	1.65	86.12	1 020
20	1 711	13.52	1.47	87.65	925
30	1 751	12.73	1.08	89.26	868

根据文献[16]对试件进行标准固结试验,确定废瓷砖混合料孔隙比的变化。施压荷载不同时,不同废瓷砖颗粒质量分数下各试件的孔隙比如表2所示。由表2可知:施压荷载相同时,孔隙比随废瓷砖颗

粒质量分数的增大而略减;废瓷砖颗粒质量分数  $w$  相同时,孔隙比随施压荷载的增大而略减。

表2 不同施压荷载、不同废瓷砖颗粒质量分数下试件的孔隙比

施压荷载/kPa	孔隙比					
	$w=0$	$w=5\%$	$w=10\%$	$w=15\%$	$w=20\%$	$w=30\%$
25	0.517	0.514	0.512	0.508	0.505	0.500
50	0.515	0.513	0.511	0.507	0.504	0.499
100	0.513	0.512	0.510	0.505	0.500	0.497
200	0.508	0.507	0.505	0.500	0.495	0.492
400	0.500	0.498	0.495	0.491	0.486	0.484
800	0.485	0.482	0.481	0.479	0.475	0.473

## 2 试验结果分析

### 2.1 塑性指数及液限

低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料的性能受含水量影响较大,在道路施工中需控制此类混合料的含水量。干燥的混合料中加入水,每个颗粒先被吸附的水包裹;继续加水时,水膜厚度增大,颗粒易滑动。采用塑性指数表示细粒土的力学特性和变形。测试不同废瓷砖颗粒质量分数试件的塑性指数和液限变化,结果如图2所示,其中A线是粉质土与黏质土的分界线,B线是高液限与低液限的边界。

由图2可知:随废瓷砖颗粒的加入,液限和塑性指数均减小;废瓷砖颗粒质量分数由0增至30%,塑性指数由24%降至19%,原因是废瓷砖颗粒代替细粒黏土颗粒,黏土减少,混合料结合水的能力下降。液限和塑性指数减小更有利于混合料用于底基层的施工。

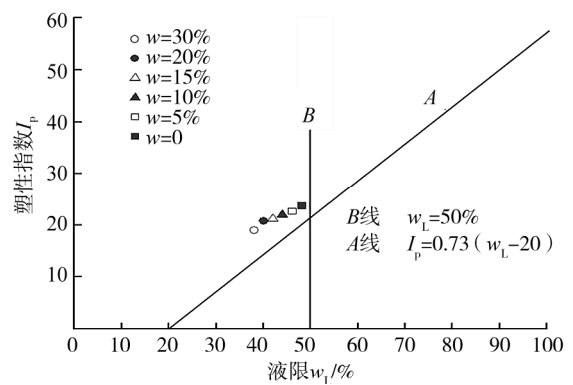


图2 试样塑性指数和液限的变化图

### 2.2 最大干密度及最佳含水量

不同废瓷砖颗粒质量分数试件的干密度-含水量关系如图3所示。由图3可知:废瓷砖颗粒质量分数相同时,干密度随含水量的增大先增大后减小;含水量相同时,干密度随废瓷砖颗粒质量分数的增大而增大;废瓷砖颗粒质量分数从0增至30%,试件的最大干密度从  $1616 \text{ kg/m}^3$  增至  $1751 \text{ kg/m}^3$ ,原因是密度较大的废瓷砖颗粒取代了密度相对较小的黏土颗粒。

废瓷砖颗粒质量分数从0增至30%,最佳含水量从17.5%减至12.8%。废瓷砖颗粒的吸水性比低塑性黏土差,随废瓷砖颗粒质量分数的增大,黏土颗粒相对减少,试件能吸纳的水减少,最佳含水量随之减小。综合考虑废瓷砖颗粒对最大干密度与最佳含水量的影响,低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料可作为路面底基层材料。

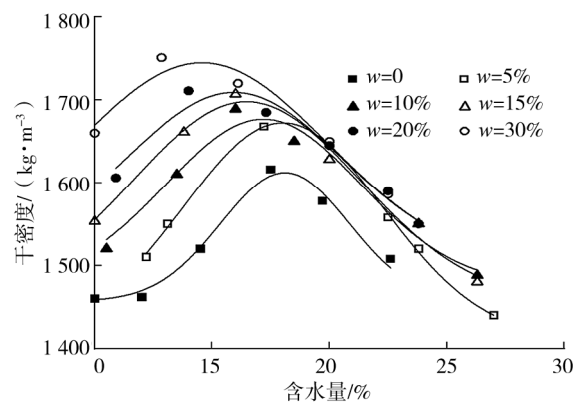


图3 不同废瓷砖颗粒质量分数下试件的干密度-含水量关系曲线

### 2.3 膨胀率

膨胀率为试件高度的变化量与原始高度之比。由表1可知:膨胀率随废瓷砖颗粒质量分数的增大而

减小,加入废瓷砖颗粒可有效控制膨胀率。原因是废瓷砖颗粒的膨胀率比黏土小<sup>[17-18]</sup>;试件膨胀压力向各方向发展,低塑性黏土颗粒与废瓷砖颗粒间的界面力变化,界面力可抵消膨胀压力,减小膨胀率。

## 2.4 加州承载比

不同废瓷砖颗粒质量分数试件的加州承载比随含水量的变化曲线如图4所示。

由图4可知:废瓷砖颗粒质量分数由0增至30%,混合料的最大加州承载比由约83.01%增至89.26%;不同废瓷砖颗粒质量分数下,各试件的加州承载比均随含水量的增大而先增大后减小,废瓷砖颗粒质量分数较大的试件在含水量变化较小的情况下达到最大加州承载比,废瓷砖颗粒质量分数较小的试件在含水量变化较大的情况下达到最大加州承载比。主要原因是试件中低塑性黏土颗粒吸水能力较强,随废瓷砖颗粒质量分数的增大,低塑性黏土颗粒减少,试件的吸水能力减小。

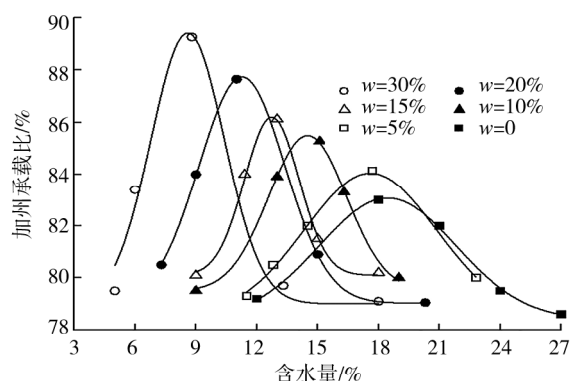


图4 各试件加州承载比随含水量的变化曲线

随废瓷砖颗粒质量分数的增大,试件的加州承载比增大,原因是试件的最大干密度增大,混合料的机械强度增大。压实混合料的机械强度与废瓷砖颗粒与黏土颗粒间的摩擦与嵌合、废瓷砖颗粒较高的刚度、黏土塑性降低及废瓷砖颗粒的级配有关。在低塑性黏土-石灰土混合料中掺加废瓷砖颗粒可获得较大的加州承载比。因此,废瓷砖可应用于路面工程中,节约筑路成本,实现废料再利用。

## 2.5 无侧限抗压强度

对最佳含水量下的试件进行无侧限抗压强度试验,添加废瓷砖颗粒显著影响了试件的应力-应变关系,试件的无侧限抗压强度随废瓷砖颗粒质量分数的增大而减小。因为掺加废瓷砖颗粒后的混合料非均质性较高,试件的破坏面一般出现在试件抗压强度最弱的区域,导致试件的抗压强度较小。剪切时,废陶瓷颗粒从混合料的侧面脱落,可承受荷载的试件横截面面积减小,抗压强度减小。

对最佳含水量下的试件施加荷载,废瓷砖颗粒质量分数为30%的试件的无侧限抗压强度比不掺加废瓷砖颗粒试件减小24%。采用强度衰减指数 $E_{SDI}$ 评估强度损失率随废瓷砖颗粒质量分数的变化,计算公式为:

$$E_{SDI} = (Q_1 - Q_2) / Q_1,$$

式中: $Q_1$ 为纯低塑性黏土的无侧限抗压强度, $Q_2$ 为掺加废瓷砖颗粒的低塑性黏土混合料的无侧限抗压强度。

废瓷砖颗粒质量分数分别为0%、5%、10%、15%、20%、30%时,低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料的强度衰减指数分别为0.2.6%、8.9%、10.4%、18.7%、23.7%。掺加废瓷砖颗粒对混合料抗压强度有不利影响,应严格控制黏土中废瓷砖颗粒的质量分数。综合考虑该混合料的抗压强度,低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料不适合用作路面基层材料,可用作底基层材料。

## 2.6 孔隙比

绘制不同废瓷砖颗粒质量分数的试件的孔隙比随固结压力的变化曲线,如图5所示。

由图5可知:各试件的初始孔隙比有较大差异,废瓷砖颗粒质量分数越大,试件的孔隙比越小;施加最大固结压力后,与未掺加废瓷砖颗粒的混合料相比,掺加废瓷砖颗粒混合料的孔隙比变化较小,废瓷砖颗粒质量分数为30%时,孔隙比由0.500减至0.473。原因是掺加废瓷砖颗粒使试件的压缩性降

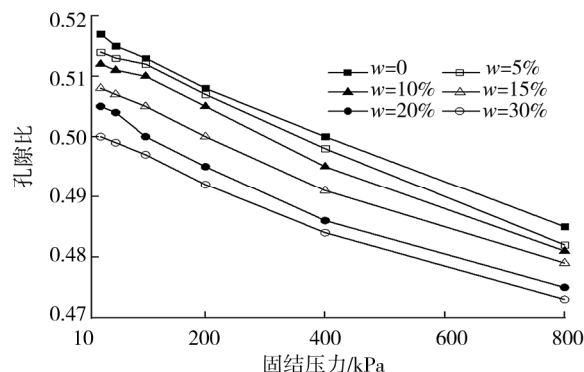


图5 不同废瓷砖颗粒质量分数试件的孔隙比随固结压力的变化曲线

低<sup>[19-20]</sup>。掺加废瓷砖颗粒可提高底基层的稳定性。

### 3 结论

通过加州承载比试验、无侧限抗压强度试验、击实试验及固结试验研究低塑性黏土-石灰土-废瓷砖颗粒混合料的性能,结果表明此混合料的物理力学性能满足公路底基层材料的要求。随废瓷砖颗粒质量分数由0增至30%,试件的最大干密度从1 616 kg/m<sup>3</sup>增至1 751 kg/m<sup>3</sup>,混合料的最大加州承载比由约83.01%增至89.26%,塑性指数由24%降至19%,最佳含水量从约17.5%减至12.8%,膨胀率减小,孔隙比减小,可压缩性降低,试件的无侧限抗压强度从1 138 kPa减至868 kPa。

废瓷砖可替代黏土应用在路面底基层,下一步将对废瓷砖颗粒的最佳质量分数及废瓷砖能否应用于路面基层进行相关研究,扩展废瓷砖颗粒在道路工程中的应用领域。

#### 参考文献:

- [1] 裴启文,王功勋,沈阳,等.废瓷砖再生骨料对砂浆及砼性能的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(3):797-802.  
PEI Qiwen, WANG Gongxun, SHEN Yang, et al. Effect of waste ceramic tile recycled aggregate on mortar and concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3): 797-802.
- [2] 许爱民,曾令可.陶瓷废料的综合利用[J].中国陶瓷工业,2006,13(6):16-20.  
XU Aimin, ZENG Lingke. Comprehensive utilization of ceramic wastematerial [J]. China Ceramic Industry, 2006, 13(6): 16-20.
- [3] 程小苏,李佳,曾令可,等.添加剂对卫生陶瓷注浆成型石膏模性能影响的研究[J].人工晶体学报,2013,42(8):1631-1636.  
CHENG Xiaosu, LI Jia, ZENG Lingke, et al. Influence of additives on properties of slip casting plaster mould in sanitary ceramics [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(8): 1631-1636.
- [4] 张国俊,高裕民,张涵.高炉重矿渣替代碎石在道路基层中的适用性分析[J].中国资源综合利用,2006,24(6):36-38.
- [5] 王保群,李志,郝志刚.高速公路二灰碎石废料的再利用[J].山东交通学院学报,2007,15(3):34-37.  
WANG Baoqun, LI Zhi, HAO Zhigang. Recycling of waste calcareousness and detritus in constructing highway [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2007, 15(3): 34-37.
- [6] 唐庆黔,凌天清,董满生.工业废料磷石膏在路基路面工程中的应用[J].山东交通学院学报,2002,10(2):49-52.  
TANG Qingqian, LING Tianqing, DONG Mansheng. Application of phosphogypsum to road base course construction [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2002, 10(2): 49-52.
- [7] 赵卫琪,方睿,周浩,等.工业废料稳定路基土的无侧限抗压强度及环境影响评价[J].硅酸盐通报,2021,40(11):3865-3875.  
ZHAO Weiqi, FANG Rui, ZHOU Hao, et al. Unconfined compressive strength and environmental impact assessment of industrial waste stabilized roadbed soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11): 3865-3875.
- [8] MEDINA C, DE ROJAS M I S, FRÍAS M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(1): 48-54.
- [9] 王长远,王功勋,裴启文,等.全组分利用废瓷砖制备混凝土及其耐久性[J].混凝土,2017(11):181-184.  
WANG Changyuan, WANG Gongxun, PEI Qiwen, et al. Preparation and durability of concrete using the whole component of waste ceramic tile [J]. Concrete, 2017(11): 181-184.
- [10] LOPEZ V, LLAMAS B, JUAN A, et al. Eco-efficient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete [J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 559-564.
- [11] BINICI H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1191-1197.
- [12] 黄宏,曾建涛,王伊.取代率对再生陶瓷粗骨料混凝土抗压强度的影响[J].华东交通大学学报,2022,39(2):27-34.  
HUANG Hong, ZENG Jiantao, WANG Yi. Influence of replacement rate on compressive strength of recycled ceramic coarse

- aggregate concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2):27-34.
- [13] DEBIEB F, KENAI S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22:886-893.
- [14] AY N, ÜNAL M. The use of waste ceramic tile in cement production[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30:497-499.
- [15] 曹培,王芳,严丽雪,等. 石灰改良黏性土 CBR 值的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1):305-308.  
CAO Pei, WANG Fang, YAN Lixue, et al. Experimental study on CBR value of improved clay with lime[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl. 1):305-308.
- [16] 中华人民共和国交通运输部,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, 2020.
- [17] 庞庆庄. 聚丙烯纤维混合黏土的力学性能试验研究[J]. 吉林水利, 2021(11):43-47.  
PANG Qingzhuang. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber mixed clay[J]. Jilin Water Resources, 2021(11):43-47.
- [18] 邵倩,余永泽,朱海琼,等. 植物纤维用于红黏土改良研究建议[J]. 企业技术开发, 2013, 32(28):14-15.  
SHAO Qian, YU Yongze, ZHU Haiqiong, et al. Research proposals of red clay modified by plant fibers[J]. Technology Development of Enterprise, 2013, 32(28):14-15.
- [19] CABALAR A F. Applications of the oedometer, triaxial and resonant column tests to the study of micaceous sands[J]. Engineering Geology, 2010, 112:21-28.
- [20] CABALAR A F, HASAN R A. Compressional behaviour of various size/shape sand-clay mixtures with different pore fluids[J]. Engineering Geology, 2013, 164:36-49.

## Application of waste ceramic tiles in the subbase layer of road pavement

*DONG Xuan<sup>1</sup>, CHI Lianyang<sup>2\*</sup>, WANG Faqiang<sup>3</sup>,  
GUAN Qingyong<sup>3</sup>, WANG Zhengwen<sup>3</sup>, SONG Zhichao<sup>4</sup>*

1. China Railway 23th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Jinan 276800, China;

2. School of Civil Transportation Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

3. Shandong Shundu Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Weifang 262200, China;

4. Shandong Dongfang Road and Bridge Construction Co., Ltd., Linyi 276002, China

**Abstract:** To study the performance of waste ceramic tile particles and lime soil as fillers for road subbase, specimens are prepared using low-plasticity clay, lime soil, waste ceramic tile particles, and water. The specimens with a mass fraction of lime soil (replacing clay) at 12% and different mass fractions of waste ceramic tile particles are subjected to California bearing ratio tests, unconfined compressive strength tests, compaction tests, and consolidation tests. The test results show that the addition of waste ceramic tile particles increases the maximum dry density and maximum California bearing ratio of the specimens. As the mass fraction of waste ceramic tile particles increases from 0 to 30%, the maximum dry density increases from 1 616 kg/m<sup>3</sup> to 1 751 kg/m<sup>3</sup>, and the maximum California bearing ratio increases from 83.01% to 89.26%. The optimum moisture content, swell, unconfined compressive strength, and void ratio of the specimens decreases. The optimum moisture content decreases from 17.5% to 12.8%, swell decreases from 2.29% to 1.08%, and unconfined compressive strength decreases from 1 138 kPa to 868 kPa. When the mass fraction of waste ceramic tile particles is 30%, the void ratio decreases from 0.500 to 0.473. Considering the overall performance of the mixed material, the low-plasticity clay-lime soil-waste ceramic tile particle mixture is not suitable for use as road surface base material but can be used as subbase material.

**Keywords:** road pavement subbase layer; waste ceramic tile; low plastic clay; California bearing ratio; unconfined compressive strength

(责任编辑:王惠)