

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.03.001

半刚性基层表面抗冲刷性能试验与分析

高伟¹, 崔巍¹, 李秀凤²

(1. 黑龙江省交通科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:路面面层与基层界面之间积存的自由水因压力变化而高速流动并产生泵吸效应, 将冲刷基层表面并导致路面损坏。为评估半刚性基层表面抗冲刷性能和防冲刷措施效果, 基于半刚性基层材料的冲刷原理, 利用混凝土振动台、沥青混合料车辙试验机进行振动水流冲刷和轮碾冲刷试验。通过两种基层材料、3种防冲刷措施的试验对比, 确认水泥稳定级配碎石的抗冲刷性能优于水泥稳定砂砾; 乳化沥青透层、土工布对减少半刚性基层材料的表面冲刷有较好的效果, 冲刷量可下降60%~80%以上, 最高降低94.4%; 按抗冲刷效果排序, 乳化沥青透层+土工布>土工布>乳化沥青透层; 与未冻融的试件相比, 冻融试件的冲刷量稍有增大; 冻融循环条件下, 所采用的三种抗冲刷措施效果保持良好。对于水泥混凝土路面, 设置缩缝传力杆时, 相对无传力杆路面, 冲刷量可减少40.7%~66.3%。试验结果表明: 振动水流冲刷试验的基层材料冲刷量总体大于轮碾冲刷试验结果, 但总体规律一致。在无法定量分析半刚性基层材料抗冲刷性能的情况下, 两种冲刷试验方法能够对基层材料的抗冲刷性能和防冲刷效果进行对比分析。

关键词:道路工程; 半刚性基层抗冲刷性能; 对比试验; 防冲刷措施; 轮碾冲刷试验

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)03-0001-07

Experiment and Analysis of Anti-erosion Performance of Semi-rigid Base Surface

GAO Wei¹, CUI Wei¹, LI Xiu-feng²

(1. Heilongjiang Research Institute of Transport, Harbin Heilongjiang 150080, China;

2. Heilongjiang Polytechnic, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: The free water accumulated between pavement surface and base can flow at high speed due to differential pressures, producing a pumping effect. This may scour surface of base, causing damage to the road surface. In order to evaluate the anti-erosion performance and anti-scouring effect of semi-rigid base, based on the principle of the scouring of semi-rigid base material, the vibrating water flow erosion test and wheel rolling scouring tests are carried out by using concrete shaking table and asphalt mixture rutting tester. Through comparison of the tests on 2 kinds of base materials and 3 anti-erosion measures, it is confirmed that the erosion resistance of cement stabilized graded crushed stone is superior to that of cement stabilized gravel. The use of emulsified asphalt penetration treatment and geotextiles can produce a good effect on reducing the surface erosion of semi-rigid base material, and the scouring mass of the base material can usually be reduced by 60% to 80% or more, in one case up to 94.4%. In terms of the anti-erosion effect, "emulsified asphalt permeation treatment + geotextiles" is the most superior solution, followed by applying geotextiles alone then the use of emulsified asphalt permeation treatment alone. Compared with the non-frozen-thawed specimen, the scouring mass of the frozen-thawed specimen increased slightly. Under the condition of freeze-thaw cycle, the effects of the 3 anti-erosion measures remain promising. For the cement concrete pavement, applying dowel bar of contraction joints can reduce erosion by 40.7% to 66.3%. The test result shows that (1) the

收稿日期: 2017-04-09

基金项目: 交通运输部科技项目(2009318774052)

作者简介: 高伟(1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授级高级工程师。(251688382@qq.com)

scouring mass of the base material in the vibration water flow scouring test is larger than that of the wheel rolling scouring test, while the overall trend remains constant; (2) under the condition of unable conduct the anti-erosion performance quantitative analysis of anti-erosion performance of semi-rigid base materials, either one of the 2 erosion test methods can be utilized to analyze and compare the erosion resistance and anti-erosion effect of the base materials.

Key words: road engineering; anti-erosion performance of semi-rigid base; comparative experiment; anti-erosion measure; wheel rolling scouring test

0 引言

公路路面不可避免地存在一定数量的缝隙,水分可能由此渗入路面结构内部,使缝隙附近的基层材料逐渐吸水饱和,并在面层和基层之间形成能够流动的自由水。在行车荷载尤其是较大吨位轮载的作用下,面层和基层界面间的自由水会产生较高的动水压力,使基层材料中的细料部分受到冲刷侵蚀^[1]。虽然每一次的冲刷量很小,但积少成多,将在面层和基层之间形成细料浆,随着细料浆的不断增加,再加上行车荷载的震动和压、吸作用,细料浆被逐渐挤出路面接缝或裂缝形成唧泥、沉陷、开裂或错台等病害,使路面损坏进程加快,损坏程度也越来越重^[1-4]。

20世纪80年代,美国普渡大学的 G. Mashan 和 S. Diamond 研究了水泥稳定土和石灰稳定土的抗冲刷性能;伊利诺伊大学的 B. J. Dempsey 则通过室内试验证明密级配沥青稳定碎石基层在动态荷载作用下会发生唧泥现象;佛罗里达大学的 E. C. Hansen 通过现场试验,发现动水压力高达 70 kPa,水流流速可达 0.9 m/s;澳大利亚的 P. Nixon, A. I. Robertson 采用加速加载设备进行了足尺路面加载试验,结果表明,当水分积聚在路面的裂缝内或没有结合的层间交接面上,轮载每通过一次,唧泥就有可能发生。

国外代表性的基层材料抗冲刷性能试验方法主要有旋转刷和振动台法。旋转刷是较早用于路面基层材料抗冲刷性能试验的装置,其原理是采用钢丝刷对试件表面进行旋转刷扫,以刷离材料的数量来评价抗冲刷能力的强弱,在一定程度上模拟了基层的冲刷过程,但是在整个试验过程中都没有流动水的参与^[3]。因此,该试验方法更近似于半刚性基层材料的耐磨性能试验。实际基层冲刷过程中更多的是当水渗入基层材料的细小孔隙后,在材料内部发生的一些复杂的界面效应,另外还有基层材料饱水后在行车荷载作用下产生的“泵吸”效应。旋转刷试验无法模拟这些因素的影响。

振动台冲刷试验装置主要由振动台、盛水容器两大部分组成。澳大利亚的振动台在试件上附加了配重,目的是增加压力。与旋转刷比较,振动台的设计更合理一些,有自由水参与试验过程,并且能够通过水的相对运动,在一定程度上模拟冲刷时的“泵吸作用”。

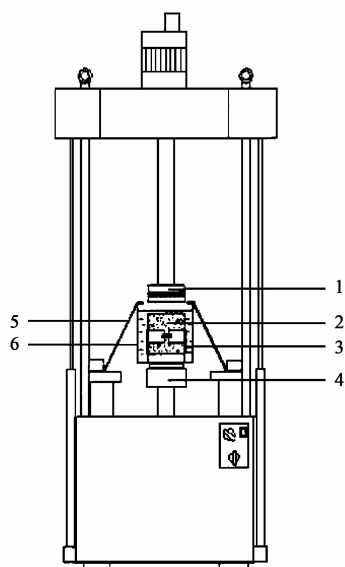
国内近年也开始了半刚性基层材料抗冲刷性能的试验研究。沈阳建筑大学的张敏江等分析了半刚性基层材料冲刷机理,提出以 10 min 内的材料冲刷速率作为半刚性基层材料的抗冲刷性能指标^[1];长安大学滕旭秋等对二灰碎石混合料抗冲刷性能进行试验研究,推荐以单位时间冲刷率作为二灰碎石基层材料的抗冲刷性能评价指标^[2];长安大学沙爱民等采用 MTS 材料试验系统模拟路面基层的实际冲刷状态,对不同的半刚性基层材料进行了抗冲刷性能试验^[3];交通运输部公路科学研究院傅智等对常用的半刚性基层材料进行了抗冲刷试验研究,提出了基于抗冲刷性能的配合比优化设计方案^[4]。

交通运输部早在 1985 年颁布的《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034—85)中对基层材料的抗冲刷能力就已经有所考虑,规定了无机结合料稳定粒料中细料的粒径大小及其含量,并对抗冲刷能力较弱的无机结合料稳定细粒土的适用范围作出了一定的限制。但目前国内外尚无通用的基层材料抗冲刷性能试验方法或技术标准。在此基于半刚性基层表面冲刷机理,对水泥稳定砂砾、水泥稳定级配碎石两种半刚性基层材料及防护措施的抗冲刷性能进行试验探讨。

1 抗冲刷试验方案设计

1.1 半刚性基层材料抗冲刷试验装置

国内现阶段用于路面基层材料抗冲刷性能试验的装置主要有振动台、MTS 试验机冲刷试验装置(见图1)、沥青路面基层冲刷作用模拟试验机等^[3]。特点是对基层材料的压、吸作用,仿真效果显著提升。



1—压头 2—试件 3—水 4—MTS压力传感器
5—固定钢条 6—冲刷桶

图1 MTS冲刷试验装置

Fig. 1 MTS erosion experiment device

MTS冲刷试验是利用MTS试验机的加载及控制系统,实现冲刷时冲击压力的施加及其随试件高度变化的适时调整,即利用压头的上下运动,配合水流来实现对基层表面的冲刷、泵吸效果。在试验过程中,当MTS压头向下对试件顶面进行加压的同时,压头底面与试件顶面之间的细料浆被迅速挤出;当MTS压头上升时,在压头底面与试件顶面之间形成负压,将水迅速吸入的同时,其泵吸作用还会将试件表面材料中的细粒吸出并将冲刷下来的碎屑带起。沥青路面基层冲刷作用模拟试验机的结构类似于MTS冲刷试验装置,主要区别是在试件顶面放置了一个中部开有细长缝隙的橡胶垫板,通过钢制平板压头,在橡胶垫板上循环加载、卸载,来模拟轮载对有缝隙沥青路面的碾压与基层冲刷。

结合目前实验室可以利用的设备,我们借鉴振动台、MTS冲刷试验装置和沥青路面基层冲刷作用模拟试验机的原理^[5-8],设计了两种冲刷对比试验装置,在现阶段无法定量分析抗冲刷性能的情况下,能够对基层材料抗冲刷性能和防冲刷措施的效果进行对比分析。

1.2 抗冲刷性能试验方法

方法1,是利用混凝土振动台的方法,通过振动水流实现对基层材料的冲刷^[8]。

方法2,是借鉴MTS冲刷试验和沥青路面基层冲刷作用模拟试验机的泵吸原理^[7-13],利用沥青混

合料车辙试验机模拟车轮荷载在接缝附近的重复作用。

根据黑龙江省的实际工程,采用6%水泥稳定砂砾、5%水泥稳定级配碎石两种基层材料做抗冲刷试验,原材料由前嫩公路五大连池至嫩江段施工现场提供。冲刷试验方案如下。

1.2.1 振动水流冲刷试验

(1) 试件成型

振动冲刷试验采用 $\phi 150$ mm、高度 $h = 150$ mm的无侧限抗压强度试件(见图2),材料配合比按基层材料相关技术规范的规定和设计要求。



(a) 振动冲刷试件



(b) 振动冲刷试验

图2 振动冲刷试件

Fig. 2 Vibration scouring specimens

(2) 养生

在标准养生室中养生28 d。

(3) 试验方法

按基层表面性状,将试件分为4种:原状试件、乳化沥青透层防冲刷试件、土工材料防冲刷试件和乳化沥青+土工材料防冲刷试件。

① 试验准备:

本试验属于同等条件下的对比试验,故除表面性状(抗冲刷措施)之外,其他条件均相同,将试件(基准试件、做好防护的试件)置于容器中浸泡24 h后开始试验。

为防滑和缓冲,将圆形容器底部以粗砂纸打磨一遍,垫双层土工布,置于振动台中部。然后将试

件放入容器中（每次试验放1组，共3个试件），向容器内加水，水位以刚刚没过试件顶面为准（试验过程中若水位低于试件顶面，可适当补水）。

② 试验操作：

建议试验水温约22℃（室温）。开启振动，持续1 min，间断30 s，如此循环30次。振动台的频率为2 860次/min，振幅为0.3~0.6 mm。

注意事项：试件在放置及试验过程中避免与容器侧面接触，也不要互相触碰。同时各试件在容器中的边界位置条件应基本相同；容器位于振动台中部。

③ 称重：

将完成冲刷试验的试件在容器水中悬空漂洗（有防冲刷土工布的试件，在去除土工布后，将试件、防冲刷土工布均放在容器水中悬空漂洗）。

每组试验后，将容器中的水收存起来（分组记录），留作过滤之用（容器中的掉落颗粒收集干净）；如时间允许，也可以直接过滤。将容器中的水用预先裁好、编号并烘干、称重的土工布过滤，冲刷下来的基层材料保留在土工布上等待烘干。将过滤后的土工布、冲刷下来的基层材料置于烘干器皿内，放在烘箱内烘干、称重，称重读数准确至1 g，其与原烘干称重的土工布质量之差即为冲刷下来的材料质量。

在该试验方法中，考虑到试件底部与容器接触位置的振动磨损，另备相同组数的试件（所有试件均同期成型、养生，分成各组），以同样方法分组放在容器内（容器内不加水），底部垫上浸湿后稍加拧干的双层土工布（以拿起不滴水为准），振动试验后测定松散的材料质量，在前述试验的称重数据中扣除。

1.2.2 轮碾冲刷试验

轮碾冲刷试验装置如图3所示，可利用加载轮的往复作用，实现轮碾压力泵吸和冲刷的模拟。

（1）试件成型

利用车辙试验试模制作轮碾冲刷试件。在试模的内侧贴上铝箔，便于试验后脱模，试件的尺寸为300 mm×300 mm×47 mm。首先将拌好的基层材料筛除大于19.0 mm的颗粒，利用振动、振捣、垫有机玻璃板（300 mm×300 mm×10 mm）碾压的方式，通过试成型，计算与成型厚度相匹配的材料质量。然后统一称重入模，成型试件并保留在试模之中。

成型后的试件表面处理方式分为：保持原状、

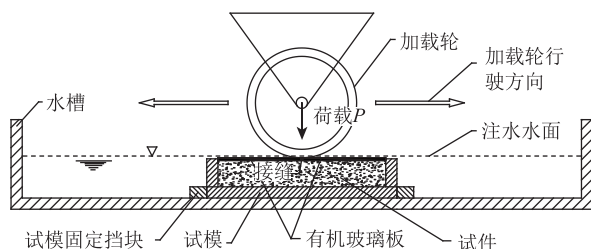


图3 轮碾冲刷试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of wheel rolling scouring test device

涂刷乳化沥青、敷设土工布和乳化沥青+土工布。

（2）传力杆的模拟

用 $\phi 0.5$ mm、长35 mm的截断钢针模拟传力杆。取两块300 mm×149.5 mm×5 mm有机玻璃板，将其拼接侧面用 $\phi 0.4$ mm的钻头各打一排间距2.7 cm、深1.7 cm的细孔，两侧细孔的位置需对齐。然后一侧用 $\phi 0.45$ mm的钻头，另一侧用 $\phi 0.5$ mm的钻头适当扩孔。将截断钢针偏细的一端插入 $\phi 0.45$ mm的细孔，然后用电烙铁轻压并调齐；再对齐另一侧 $\phi 0.5$ mm的细孔，轻轻敲打，直到两块板之间保留1 mm的间隙。

（3）养生

试件表面垫上2块300 mm×149.5 mm×5 mm的有机玻璃板（见图4）。因尺寸方面可能存在的误差，有机玻璃板在装入试模时，可用砂纸打磨、修整后嵌入，两块有机玻璃板拼接处保留1 mm宽的接缝。然后适当配重，放在标准养生室中养生28 d（最后一天浸水）。

（4）试验方法

将试件放置在车辙试验机上，再向试槽内注水并漫过试模顶面。以试件接缝为中心，利用车辙试验机的试验轮往复加载碾压。试验轮轮压为 (0.7 ± 0.05) MPa、外径200 mm、轮宽50 mm、行程 (230 ± 10) mm。一式3联的车辙试验机可以同时放置1~3个试件（见图5）。本次试验对每个试件分别进行冲刷试验，试件置于中间轮位置加载，同时将两侧加载轮升起。

试验操作：试验水温22℃，采用“加载行驶3 h+卸载静止2 h”的方式完成2个循环，加载次数为7 750次。试验结束后，将每个试件的有机玻璃板、防冲刷土工布取下，用水将有机玻璃板、防冲刷土工布、试模与试件在容器内逐一漂洗过滤，水槽中的水也收集起来用提前裁好的土工布分别过滤。其他试验准备、过滤、称重等与振动冲刷试验相同。



图4 轮碾冲刷试件(原状试件)

Fig. 4 Wheel rolling scouring specimens (undisturbed specimens)

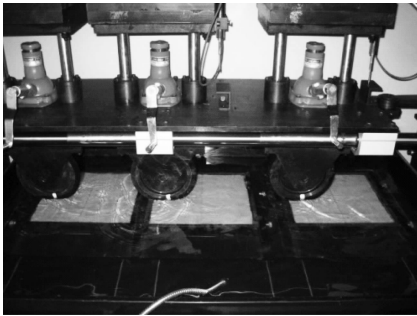


图5 三联轮碾冲刷试验(敷土工布试件)

Fig. 5 Triple wheel rolling scouring test (specimens laying geotextile)

2 试验分析

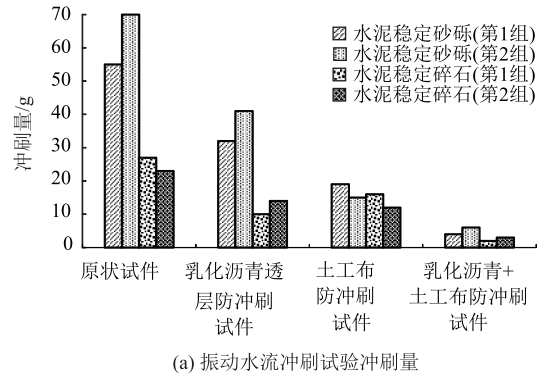
分别进行振动水流和轮碾冲刷试验。试验结果如图6所示。

振动水流冲刷试验采用 $\phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的圆柱体冲刷试件,轮碾冲刷试验采用 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 47\text{ mm}$ 的板块试件。板块试件分1 mm接缝无传力杆和1 mm接缝有传力杆两种情况。

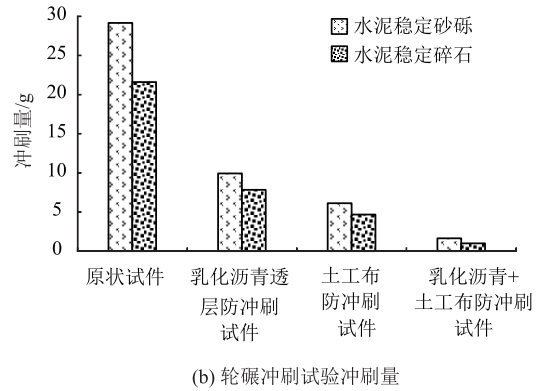
根据冲刷对比试验结果见图6(a)、(b),对于基层表面的不同处理方式,振动冲刷试验的冲刷量总体大于轮碾冲刷试验结果,但总体规律一致。从冲刷作用的方式考虑,利用车辙试验机进行轮载重复碾压的试验方法比较符合实际情况下的路面冲刷作用机制。

其中,常用半刚性基层材料(水泥稳定砂砾)的振动冲刷量约在50~70 g左右;采用乳化沥青透层、土工布等防冲刷措施后,冲刷量可下降50%~80%以上;另外,水泥稳定级配碎石基层材料的冲刷量明显小于水泥稳定砂砾。

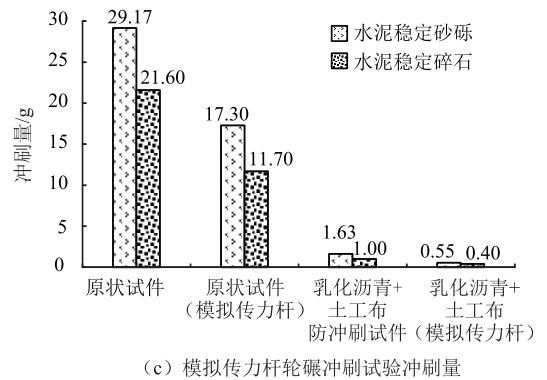
轮碾冲刷试验中,水泥稳定砂砾的冲刷量约在27~32 g左右。采用乳化沥青透层、土工布等防冲



(a) 振动水流冲刷试验冲刷量



(b) 轮碾冲刷试验冲刷量



(c) 模拟传力杆轮碾冲刷试验冲刷量

图6 半刚性基层材料冲刷试验对比

Fig. 6 Comparison of scouring experiments of semi-rigid base material

刷措施后,冲刷量可下降60%~80%以上,最高降低94.4%,防冲刷效果比较明显;另外,土工材料的防冲刷效果要好于乳化沥青透层效果,组合措施防冲刷效果更加显著。在轮碾冲刷试验中,水泥稳定级配碎石基层材料的冲刷量也小于水泥稳定砂砾,但相比振动冲刷,两种材料冲刷量的差别较小。

根据模拟传力杆的轮碾冲刷试验对比结果,见图6(c),相对无传力杆情况,有传力杆时,冲刷量可减少40.7%~66.3%。

冻融试件冲刷量的对比试验结果如图7所示。冻融条件为:试件养生28 d后,用气压壶向原状或有防护试件的表面喷水,每次喷水30 s,停10 min,

共4次。然后“置于-30℃环境冷冻6h,取出在室温环境放置6h”,为一个循环,如此循环15次。与未冻融的试件相比,冻融试件的冲刷量均稍有增大,在冻融循环的作用下,抗冲刷措施效果发挥良好。

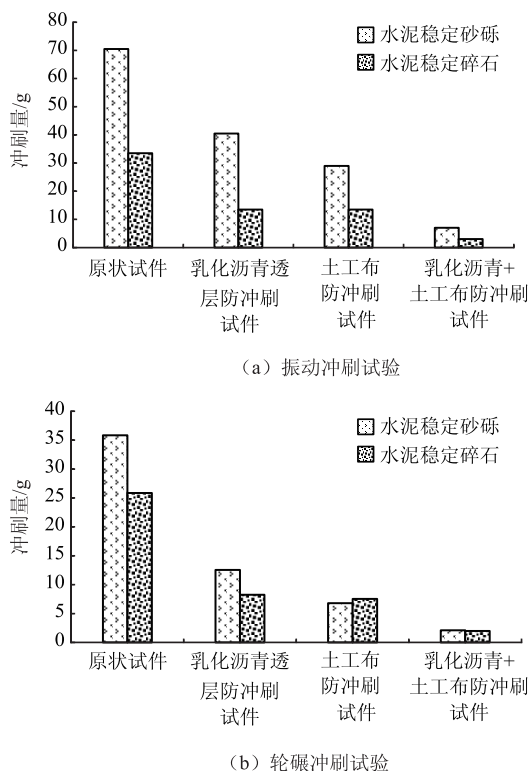


图7 冻融循环试件冲刷量对比

Fig. 7 Comparison of scouring masses of freeze-thaw cycle specimens

从长期的实践经验和研究资料来看,沥青路面和水泥混凝土路面基层都存在着不同程度的冲刷,尤以水泥混凝土路面更加常见,其对水泥混凝土路面使用功能和使用耐久性的影响更大。通过冲刷试验评价基层材料的抗冲刷性能、选择基层表面抗冲刷措施,对稳定路面基础、提高路面结构的耐久性将会起到良好效果^[14-18]。本次采用的振动和轮碾两种冲刷试验装置各有优点,前者设备简单、普及程度很高,缺点是试验方法较为单一、振动加载的准确度不易控制;后者的试验冲刷原理贴近实际、自动化程度高,加载精度高,设备也较为常见,缺点是冲刷物的收集比较繁琐,另外,如采用特制试模,即将试模的深度提高到8~10cm,可以适应一般半刚性基层材料的成型,优点较多。

3 结论

通过振动冲刷、轮碾冲刷两种试验方法,进行了两种基层材料、3种防冲刷措施的对比试验。得到

以下结论:

(1) 水泥稳定级配碎石的抗冲刷性能显著优于水泥稳定砂砾;

(2) 乳化沥青透层、土工布对减少半刚性基层材料的表面冲刷有较好的效果,且施工简便、相对经济;

(3) 按抗冲刷效果,乳化沥青透层+土工布>土工布>乳化沥青透层。

(4) 综合考虑冲刷、路面板的温度翘曲作用,长远来看,高速公路和一级公路水泥混凝土路面,其基层表面建议采用稀浆封层或沥青混合料联接层(夹层)、沥青粒料类柔性基层等,不仅能够有效减少板下冲刷,而且还有利于减小路面板的应力,有助于降低水泥混凝土路面的全寿命周期成本。

参考文献:

References:

- [1] 张敏江,关贺,梁鸿颀. 半刚性基层材料抗冲刷性能的研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2006, 22(3): 371-374.
ZHANG Min-jiang, GUAN He, LIANG Hong-jie. The Study on the Anti-brushing Performance of Semi-rigid Base Course [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2006, 22(3): 371-374.
- [2] 滕旭秋,陈忠达,任伟. 二灰碎石混合料抗冲刷性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 27-30.
TENG Xu-qiu, CHEN Zhong-da, REN Wei. Laboratorial Study on Anti-brushing Performance of Lime-fly Ash Stabilized Aggregates Mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10): 27-30.
- [3] 沙爱民,胡立群. 半刚性基层材料抗冲刷性能试验方法研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2): 4-7.
SHA Ai-min, HU Li-qun. Study of the Testing Method for Anti-erosion Properties of Semi-rigid Base Materials [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 4-7.
- [4] 傅智,杨东来,王成皿,等. 防治水泥混凝土路面的水冲刷破坏[J]. 公路, 2001(6): 67-70.
FU Zhi, YANG Dong-lai, WANG Cheng-min, et al. Preventing Water Eroding Damages in Cement Concrete Pavements [J]. Highway, 2001(6): 67-70.
- [5] 朱唐亮,谈至明. 半刚性基层材料抗冲刷性能影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 41-46.
ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming. Research on Influencing

- Factors of Erosion-resistance Performance of Semi-rigid Base Materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (11): 41-46.
- [6] 朱唐亮, 谈至明. 沥青混合料抗冲刷性能的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5): 7-12.
ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming. Research on Erosion-resistance Performance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (5): 7-12.
- [7] 黄俭才, 王峰, 熊永松, 等. 水泥稳定碎石基层抗冲刷性能的试验研究 [J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37 (9): 57-61.
HUANG Jian-cai, WANG Feng, XIONG Yong-song, et al. Experimental Study on Anti-erosion Performance of Cement Stabilized Macadam Base [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37 (9): 57-61.
- [8] 吴超凡, 吴雄飞, 台电仓. 贫混凝土基层水泥混凝土路面层间隔离封层的抗冲刷性能研究 [J]. 公路, 2008, 37 (7): 104-107.
WU Chao-fan, WU Xiong-fei, TAI Dian-cang. Study on Anti-erosion Performance of Layered Sealing Layer of Cement Concrete Pavement with Poor Concrete Base [J]. Highway, 2008, 37 (7): 104-107.
- [9] 盛燕萍. 基于抗冲刷性能的水泥混凝土路面半刚性基层材料组成设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
SHENG Yan-ping. Study on Mix Design of Semi-rigid Base for Concrete Pavement Based on Anti-erosion Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10] 李野, 高伟. 水泥混凝土路面板底脱空压浆材料研究 [J]. 低温建筑技术, 2007, 29 (6): 20-21.
LI Ye, GAO Wei. Research of the Material of Mud Jacking of the Cement Concrete Pavement Where There Is Voids under the Slab [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2007, 29 (6): 20-21.
- [11] HANSEN E C, JOHANNESSEN R, ARMAGHANI J M. Field Effects of Water Pumping Beneath Concrete Pavement Slabs [J]. Journal of Transportation Engineering, 1991, 117 (6): 679-696.
- [12] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 半刚性基层材料抗冲刷性能的试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16 (4): 608-613.
- ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming, ZHOU Yu-min. Experimental Research on Erosion-resistance Performances of Semi-rigid Base Materials [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16 (4): 608-613.
- [13] 胡力群, 沙爱民. 沥青路面水泥稳定类基层材料抗冲刷性能试验及机理研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (1): 15-18.
HU Li-qun, SHA Ai-min. Experiment and Mechanism Analysis for Anti-erosion of Cement Stabilized Soil Material Base-course of Bituminous Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (1): 15-18.
- [14] 何小兵, 杨庆国, 何国基. 聚丙烯纤维增强水泥稳定碎石基层材料的抗冲刷性能 [J]. 建筑材料学报, 2010, 13 (2): 263-267.
HE Xiao-bing, YANG Qing-guo, HE Guo-ji. Anti-erosion Property of Polypropylene Fiber Reinforced Cement-Stabilized Macadam Base Material [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13 (2): 263-267.
- [15] 沙爱民, 胡力群. 路面基层材料抗冲刷性能试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (3): 276-280.
SHA Ai-min, HU Li-qun. Experimental Study on the Anti-erosion Properties of Pavement Base Materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (3): 276-280.
- [16] 黎霞. 公路基层材料抗冲刷试验研究 [J]. 公路工程, 2007, 32 (6): 98-101.
LI Xia. Research on the Anti-erosion Test of Base Material [J]. Highway Engineering, 2007, 32 (6): 98-101.
- [17] 郝培文, 胡长顺, 张炳乾, 等. 半刚性基层材料抗冲刷性能的研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20 (2): 9-11.
HAO Pei-wen, HU Chang-shun, ZHANG Bing-qian, et al. Study on Anti Brushing Performance of Semi Rigid Base Course [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20 (2): 9-11.
- [18] 李振霞, 陈渊召. 不同类型半刚性基层材料性能的试验与分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32 (1): 41-46.
LI Zhen-xia, CHEN Yuan-zhao. Test and Analysis of Properties for Different Types of Semi-rigid Base Materials [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32 (1): 41-46.