

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.11.007

半刚性基层材料抗冲刷性能影响因素研究

朱唐亮, 谈至明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:以水泥稳定土、水泥稳定碎石和石灰-粉煤灰稳定碎石三种典型半刚性基层材料为例,从材料的组成和配合比设计方面考虑,研究了对材料抗冲刷性能影响较大的几个因素,包括胶结料的含量及比例、胶结料的等级、细集料含量、混合料结构类型、养生龄期、含水量、压实度。研究结果能为今后半刚性基层材料的选择和配合比设计提供一些参考。

关键词:道路工程;半刚性基层;试验研究;抗冲刷性能;影响因素

中图分类号:U416.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2014)11-0041-06

Research on Influencing Factors of Erosion-resistance Performance of Semi-rigid Base Materials

ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Taking 3 typical types of semi-rigid base materials (cement-stabilized soil, cement-stabilized macadam and lime fly-ash stabilized macadam) for example, considering material's composition and design of mix proportion, several influencing factors which have major effect on erosion-resistance performance of these materials are studied. These influencing factors include content, proportion and grade of binder, fine aggregate content, mix structure type, curing age, moisture content and compactness. The result can be a reference for the choice and design of semi-rigid base materials in the future.

Key words: road engineering; semi-rigid base; experimental research; erosion-resistance performance; influencing factor

0 引言

大量的路况调查表明,我国目前路面使用状况不佳,使用寿命低于预期,尤其是在一些重交通干道上路面早期损坏现象严重。基层材料抗冲刷能力不足是其主要原因之一,它会导致水泥路面板底脱空、唧泥乃至结构性断裂以及沥青路面发生坑槽、裂缝、沉陷等破坏^[1]。虽然我国的公路路面设计规范^[2-3]对基层材料提出了抗冲刷能力要求,但仅限于定性建议,材料组成与结构设计中并未提出定量的指标。

随着国家经济的快速发展,运输车辆的轴重和作用次数迅速增加,对路面的使用功能提出了更为严格的要求,有必要对半刚性基层材料抗冲刷性能影响因素进行研究。从半刚性基层材料的材料组成和配合比设计可以发现,对其抗冲刷性能影响较大的因素有:胶结料的含量及比例^[4-5]、胶结料的等级^[6]、细集料含量^[7]、混合料结构类型^[8]、养生龄期^[9]、含水量^[10]、压实度等^[11]。本研究利用自主研发的可控制冲刷动水压力、流速的数字化道路材料冲刷试验仪^[12],开展了3类典型半刚性基层材料室内冲刷试验,研究对象包括水泥稳定土、水泥稳定

收稿日期:2013-10-09

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2007 318 223 01-9)

作者简介:朱唐亮(1986-),男,上海宝山人,博士。(ztl19861106@sina.com)

碎石和石灰-粉煤灰稳定碎石,通过冲刷试验结果结合理论分析研究每个因素的影响规律,为今后不同条件下半刚性基层材料的选择和配合比设计提供一些参考。

1 半刚性基层材料力学性能试验研究

1.1 原材料和配合比

原材料为水泥、石灰、粉煤灰、土、碎石,其中,水泥:海螺牌 P. O32.5 普通硅酸盐水泥;石灰:Ⅱ级熟石灰;粉煤灰:湿排Ⅱ级粉煤灰;土:上海地区的黄褐色黏土;碎石:石灰岩,颗粒级配如表1所示。水泥稳定类基层材料的配合比共有6个,3个为水泥稳定土,水泥含量分别为4%,8%,12%,另3个为水泥稳定碎石,水泥含量分别为3%,5%,6%;二灰碎石的配合比三个,石灰与粉煤灰的质量比分别为5:15,7:13,10:20。

表2 击实试验和力学强度试验结果

Tab. 2 Result of compaction test and mechanical strength test

半刚性基层材料	胶结料含量/ %	$\rho_{\max}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$w_0/\%$	R_{cD}/MPa			R_{tD}/MPa		
				7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
水泥稳定土	4	1.64	11.9	0.44	0.80	1.13	0.026	0.05	0.08
	8	1.66	11.3	0.98	1.42	1.87	0.058	0.09	0.12
	12	1.68	11.5	1.51	2.14	2.63	0.088	0.148	0.20
水泥稳定碎石	3	2.17	5.5	1.36	2.07	2.84	0.123	0.19	0.26
	5	2.19	5.4	2.82	3.95	5.21	0.226	0.357	0.46
	6	2.20	5.4	3.63	5.39	6.73	0.337	0.486	0.59
二灰碎石	5:15	2.05	8.7	0.85	2.06	4.36	0.059	0.19	0.39
	7:13	2.07	8.3	0.95	2.33	4.84	0.067	0.237	0.48
	10:20	1.93	9.5	0.76	1.86	4.10	0.052	0.17	0.35

2 半刚性基层材料抗冲刷性能影响因素研究

2.1 标准冲刷试验结果

按照上述力学性能试验中试件的成型和养护方法制备冲刷试验的标准试件。冲刷试验方法的细节见文献[13]。冲刷深度 d 采用深度卡尺量测,以5 mm为目标,同一龄期条件下每种基层材料各采用了5种冲刷动水压力 p ,每种试验条件下3个试件。利用文献[14]中的式(1):

$$\frac{N}{N_5} = \left(\frac{d_N}{5}\right)^b, \quad (1)$$

式中, N 为冲刷次数; d_N 为冲刷次数为 N 次时的冲刷深度; N_5 为冲刷深度为5 mm时的冲刷次数; b 为

表1 碎石级配

Tab. 1 Gradation of macadam

筛孔直径/mm	31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
水泥稳定碎石/%	100	96.7	59.5	42.2	29	16.5	11.2	3.3
二灰碎石/%	100	85.7	62.4	34.2	15.0	6.9	4.2	1.2

1.2 击实和强度试验

将上述9种配合比的基层材料按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的击实试验方法进行重型击实,测得各种配合比的最佳含水量 w_0 和最大干密度 ρ_{\max} ,试验结果列于表2中。按表2中的最佳含水量及取98%压实度用静压法制备无侧限抗压强度试验与劈裂强度试验的试件,试件高和直径均为100 mm。试件从脱模后放置在恒温(25 ± 2)℃、恒湿(湿度 $>90\%$)的养生室中,试验前泡水1 d,分别测量7,28 d和90 d的无侧限抗压强度 R_{cD} 与劈裂强度 R_{tD} ,每种条件三个平行试验,三个试验结果的平均值列于表2。

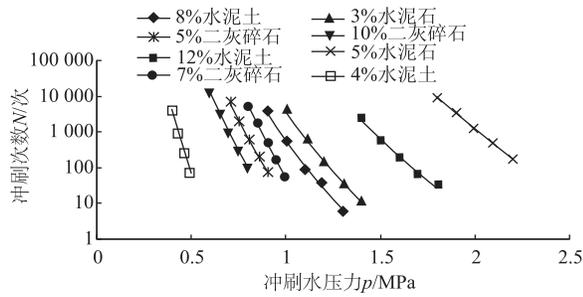
回归系数,具体数值见文献[14]。将预估冲刷次数 N 换算成对应于5 mm标准冲刷深度的冲刷次数 N_5 (简称标准冲刷次数),7 d龄期时 N_5-p 的关系列于图1中。

尽管不同材料的冲刷水压力 p 的取值范围不同,但是八种材料的 N_5-p 关系曲线大体上是相互平行的,从左至右按其力学强度的大小排列,力学强度越高所需的冲刷水压力越大, N_5-p 关系曲线也越平坦,说明基层材料的标准冲刷次数 N_5 对冲刷水压力 p 变化的敏感程度随着其力学强度的增大而减小。

2.2 胶结料与冲刷性能的关系

(1) 胶结料含量

半刚性基层材料胶结料含量对其抗冲刷性能的

图 1 半刚性基层材料 $N_5 - p$ 关系图Fig. 1 $N_5 - p$ curves of semi-rigid base materials

影响由图 1 可知。当冲刷深度 d 为 5 mm 时, 随着水泥稳定土和水泥稳定碎石配合比中水泥含量的增加, 相同冲刷次数 N 条件下, 所需的冲刷水压力 p 明显增加, 即水泥稳定类基层材料的抗冲刷性能随着水泥含量的上升而上升; 相反, 二灰碎石混合料没有这样的性质, 当集料的级配保持不变的情况下三个配合比中石灰 - 粉煤灰含量为 7:13 时抗冲刷性能最好, 而石灰 - 粉煤灰含量为 10:20 时的抗冲刷性能最差, 主要是由于后者的配合比中细集料含量过高且二灰混合料前期强度成长过慢引起的。因此, 二灰碎石的抗冲刷性能与胶结料的含量没有线性关系, 应该是存在一个最佳的胶结料含量和灰石比, 使得其抗冲刷性能达到最大值。

水泥稳定土的抗冲刷性能远低于水泥稳定碎石, 其主要原因是水泥稳定土中细集料含量过高, 单位体积条件下材料的表面积要比水泥稳定碎石大很多, 水泥含量相同时单位颗粒上黏附的水泥砂浆数量要小的多, 所以材料的黏结力差, 力学强度不佳导致其抗冲刷性能不佳。如果要使水泥稳定土的抗冲刷性能提高则需加入大量水泥, 这对于一般用作路堤或底基层改性作用的材料而言是不大合适的, 综合考虑其抗冲刷性能要求推荐最低水泥用量为 5%。

水泥稳定碎石作为目前常用的路面基层材料, 试验结果显示当水泥含量低于 3% 时其力学性能和抗冲刷性能有明显的下降, 而当水泥含量大于 5% 以后出现冲刷破坏的可能大大减小, 对于其抗冲刷性能的提高贡献不大。随着混合料中水泥含量的增加, 水泥水化后产生的水泥砂浆数量增加, 集料之间的有效黏结面积增加, 提高了集料的黏结力, 从而提高混合料的抗冲刷性能。但是水泥含量过高易产生收缩裂缝, 导致沥青面层产生反射裂缝。单纯考虑材料抗冲刷性能要求后推荐其最低水泥用量为 3%, 最大掺量不宜超过 5%。

石灰 - 粉煤灰稳定碎石中胶结料的含量并不是

越高越好, 试验结果可知当灰石比为 3:7 时其抗冲刷性能反而低于灰石比为 2:8 时的抗冲刷性能, 预估灰石比的下限不得低于 2.5:7.5, 同时石灰含量不得低于 5%。此外由于石灰粉煤灰在水中易溶解, 且其早期的抗冲刷性能较差, 因此在潮湿多雨地区不宜使用。对于二灰碎石而言, 构成强度的因素包括两方面, 即由矿质颗粒之间的内摩阻力和嵌挤力, 以及二灰结合料及其与矿料之间的黏结力和内聚力所构成。当胶结料含量适中时, 混合料中既有粗集料相互嵌挤形成的骨架结构, 又有足够的胶结料通过水化后形成灰浆使得混合料中颗粒与颗粒之间的连接加固, 形成固化黏聚力, 混合料的强度由粗集料的嵌挤力和胶结料的黏结力组成, 前者的作用更大一点, 此时混合料中二灰的比例称为最佳比例, 混合料的强度最高, 抗冲刷性能最好。

(2) 胶结料的等级

采用安徽省海螺牌普通硅酸盐水泥, 强度标号分别为 P. O. 32.5 和 P. O. 42.5, 在水泥稳定类基层材料中选择 7 d 龄期的 8% 水泥稳定土与 5% 水泥稳定碎石为研究对象进行冲刷试验, 试验条件如下: 冲刷次数 N 取 1 800 次, 前者冲刷水压力 p 取 1 MPa, 后者取 2 MPa, 考虑到水稳碎石的抗冲刷性能较高, 将其先经过 3 次冻融后再进行冲刷试验, 两种水泥的混合料冲刷试验结果及劈裂强度见表 3。

表 3 水泥标号与混合料冲刷深度及劈裂强度的关系

材料类型	P. O. 32.5		P. O. 42.5	
	d/mm	R_{t7}/MPa	d/mm	R_{t7}/MPa
8% 水泥稳定土	6.2	0.059	4.6	0.062
5% 水泥稳定碎石	12.1	0.22	8.8	0.24

在相同水泥含量条件下, 随着水泥标号的提高, 材料的抗冲刷性能有所提高, 其主要原因是高标号的水泥熟料中硅酸盐的活性物质含量较高, 混合料成型后形成的强度也较高, 颗粒间的黏聚力提高所致。

2.3 养生龄期与冲刷性能的关系

文献 [14] 中已经详细研究了 7, 28 d 和 90 d 龄期时三类半刚性基层材料的冲刷试验参数间的相互关系。随着龄期的增长, 半刚性基层材料的抗冲刷性能随着力学强度的增长而增长, 二者基本保持同步。不同龄期时标准冲刷次数 N_5 、冲刷深度 d 和冲刷应力比 λ 的回归关系保持不变: $N_5 =$

$$\left(a_d \times \frac{Rt_D}{p}\right)^c \lambda = \frac{Rt_D}{p}, \text{ 回归式中材料的抗冲刷系数 } a_d$$

随着龄期的增加逐渐下降并趋于稳定,冲刷应力比指数 c 受龄期影响较小,可以认为是不变的。

2.4 混合料结构类型与冲刷性能的关系

半刚性基层材料按结构类型可以划分悬浮密实结构(XM)、骨架密实结构(GM)和骨架空隙结构(GK)三种结构,不同的结构类型对材料的抗冲刷性能影响很大,对水泥稳定碎石和二灰稳定碎石的三种典型结构进行冲刷试验研究,两种碎石混合料采用相同的级配。

三种典型结构的级配均采用现行 JTG D50-2006《公路沥青路面设计规范》中推荐的水泥稳定碎石的集料级配,骨架密实、悬浮密实、骨架孔隙结构的具体级配见表4,水泥稳定碎石与二灰稳定碎石采用的配合比见图2,试验条件如下:冲刷次数 N 均为1800次,水泥稳定碎石的冲刷水压力 p 为2 MPa,三个龄期时的冻融次数分别为2,4,6次;因为二灰碎石随着龄期的增长抗冲刷性能变化很大,所以需要分开单独设定冲刷试验条件,通过试验摸索初步决定将7 d时二灰碎石的冲刷水压力 p 定为1 MPa,冻融次数为0,28 d和90 d时冲刷水压力 p 定为1.5 MPa,冻融次数为1和2次,在图2中给出不同结构类型的两种半刚性基层材料在不同龄期下的冲刷深度 d 。

表4 不同结构类型的级配

Tab.4 Gradations of different structure types

筛孔尺寸/ mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	3.61	1.8	0.6	0.3	0.15	0.075
XM/%	100	95	84	75	65	41	26	22	15	10	6	3
GK/%	86	63	53	41	26	11	7	6	4	3	1	0
GM/%	90	74	65	58	46	27	26	18	9	4	2	1

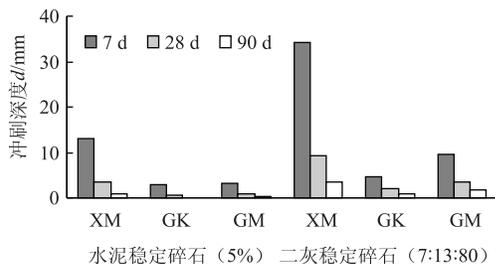


图2 不同结构类型冲刷试验结果

Fig.2 Results of erosion test on different structure types

相同龄期条件下无论是水泥稳定碎石还是二灰稳定碎石,三种典型结构中都是骨架空隙结构抗冲刷性能最好,骨架密实结构次之,悬浮密实结构最差。造成这个结果的主要原因如下:悬浮密实结构

的冲刷抗力主要由胶结料水化后与细集料结合形成的砂浆组成,而粗集料之间没有形成骨架,对冲刷抗力几乎没有贡献,在冲刷过程中一旦粗集料周边黏结的细集料被一点点剥离后,粗集料之间由于没有相互的嵌挤作用,也会逐渐脱落下来,冲刷损坏的程度比较严重。对于骨架密实结构而言,冲刷抗力由粗集料间的嵌挤力与包裹细集料的砂浆共同组成,两者对集料提供了一个较强的约束,这个约束随着龄期的增长而增长,因此在受到冲刷作用后,即使一部分细集料颗粒会被冲刷带走,但粗集料颗粒之间仍然存在良好的骨架嵌挤作用,整体强度不会迅速消散,为内部未受到冲刷的细集料提供屏障保护作用,因此不会在短时间发生明显的长驱直入式的冲刷破坏,并且如果能够及时用水泥砂浆进行养护和修补的话,可以明显减小路面的早期损坏。骨架空隙结构的冲刷抗力主要由骨架间的嵌挤力组成,由于结构中细集料含量较少,导致试件表面空隙率较大,高压水流进入其中时,压力很快得以消散,冲刷效果不明显,并且试件表面本身就存在一定构造深度,由于结构中细集料含量较低,冲刷深度变化值较小,因此在本文的判定标准中其抗冲刷性能最佳。但在路面结构的实际使用过程中,基层材料会受到车辆荷载和环境因素的反复作用,骨架空隙结构的高空隙率使其力学强度下降速度远大于骨架密实结构,因此抗冲刷性能也下降较快。

对三种典型结构的水泥稳定碎石和二灰稳定碎石的抗冲刷性变化规律进行分析后发现,不同结构中细集料(<4.75 mm)的含量对其抗冲刷性能影响很大。由表4可以得出,悬浮密实结构中水泥稳定碎石的细集料(包含水泥)含量为45%,二灰稳定碎石的细集料含量(包含粉煤灰及石灰)为50%以上,因此二者在标准冲刷试验条件下冲刷深度最大;骨架密实结构中水泥稳定碎石的细集料含量为32%,二灰稳定碎石的细集料含量为40%以上,前者的冲刷深度较小,后者相对较大;骨架空隙结构中水泥稳定碎石的细集料含量为16%,二灰稳定碎石的细集料含量为30%不到,前者的冲刷深度并没有因为细集料含量的减少而明显减小,后者随着细集料含量的减小冲刷深度却有大幅减小。总结以上试验结果后可知,当细集料含量在30%左右时,材料的抗冲刷性能最好,一旦含量超过40%就会大大降低其抗冲刷能力,而细集料含量低于30%后再减小其含量几乎不会增加其抗冲刷能力。

但是,由于三种结构中的粗细集料各自的级配

不同, 也就是说粗集料松散堆积时的空隙率不同, 因此最佳细集料含量是不同的, 以上试验结果只是表明细集料含量对这两种材料的抗冲刷性能起了很重要的影响作用, 存在明显的变化规律, 但这个最佳细集料含量还要依照不同的级配而定, 不能一概而论。

2.5 含水量与冲刷性能的关系

三种半刚性基层材料的试件养生龄期为 7 d, 配合比见图 3, 含水量、干密度以表 2 中的最佳含水量为基准, 左右各再取两个点。冲刷试验条件如下: 冲刷次数 N 均为 1 800 次, 水泥稳定碎石的冲刷水压力 p 为 2 MPa, 冻融次数为 2 次, 二灰碎石的冲刷水压力 p 为 1 MPa, 冻融次数为 0, 水泥稳定土的冲刷水压力 p 为 1.5 MPa, 冻融次数为 0。在图 3 中给出三种材料冲刷深度与含水量的散点图。

三类半刚性基层材料取最佳含水量时的抗冲刷性能最好, 在最佳含水量的基础上不管增加还是减少用水量都会降低材料的抗冲刷性能。最佳含水量是指在一定功能的压实作用下能使填土达到最大干密度时相应的含水率, 此时材料的空隙率较低, 力学性能较好, 所以抗冲刷性能也较好。当含水量低于最佳含水量时, 会导致胶结料不能完全水化, 或者集料间比较干燥, 难以压实成型并且容易压碎集料, 尽管混合料结构表面密实, 但实际容易松散, 无整体强度可言, 材料的抗冲刷性能大大减弱。当含水量高于最佳含水量时, 试件内部未用于胶结料水化的水份过多, 粗集料间的一部分空隙是由水分子填满, 试件经过养生后内部残留的水份蒸发, 形成大量空隙, 并且干缩变形较大, 整体强度有所下降。此外, 水份过多会使得胶结料凝结硬化速度减慢, 集料间的摩擦力减小, 粗集料难以牢固嵌挤在一起, 成型过程中容易散架, 因此抗冲刷性能降低。但是需要注意的是在试件成型过程中会有部分水量的损失, 因此在拌和的时候实际加水量应在最佳含水量的基础上增加 1% ~ 2%, 天气特别干燥取高值, 正常条件下取低值, 但潮湿天时可适当减小 1%。

2.6 压实度与冲刷性能的关系

半刚性基层材料的试件在成型时由于胶结料尚未凝结硬化, 其强度来源主要是压实机械对其做功, 通过外部做功克服材料之间的黏聚力和内摩擦力, 排除其内部的气体和水份, 迫使材料颗粒之间产生位移, 相互楔紧, 使之达到一定的密实度, 形成具有一定强度和稳定性的整体结构。各类材料的配合比、级配、最佳含水量以及试验条件与 2.4 节中一

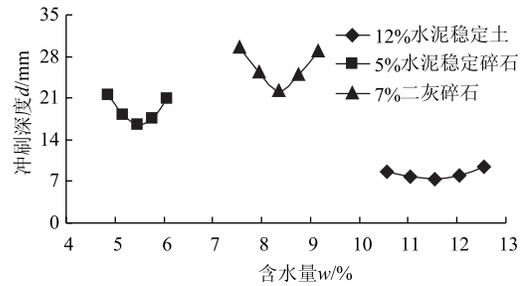


图 3 冲刷深度与含水量的关系

致, 试件养生龄期为 7 d, 压实度 (YSD) 取 95%, 98% 和 100%, 在图 4 中给出了三种基层材料不同压实度与冲刷深度 d 的柱状图。

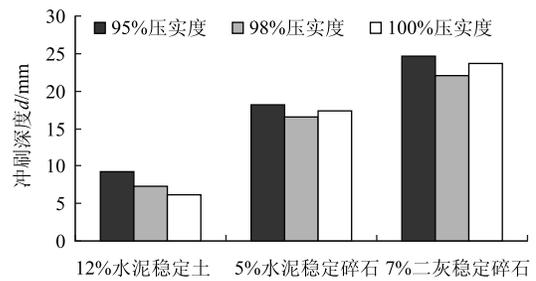


图 4 冲刷深度与压实度的关系

Fig. 4 Relation between erosion depth and compactness

水泥稳定土在 100% 的压实度时冲刷深度 d 最小, 而两种稳定碎石材料在 98% 的压实度时冲刷深度 d 最小。这个差别是由于不同的材料级配组成导致的, 水泥稳定土是由细集料组成的, 压实过程中不会发生集料被压碎的现象, 压实度越高集料越紧密, 成型时消耗的压实功越大, 抗冲刷性能越好, 而水泥稳定碎石和二灰稳定碎石在压实度达到 100% 时出现了过压现象, 一部分粗集料被压碎, 试件的整体性反而减弱, 抗冲刷性能有所下降。因此, 在施工过程中要针对不同集料的性质, 控制好基层材料的压实度, 不得出现集料被压碎的情况, 严禁超压。

影响半刚性基层材料抗冲刷性能的因素还有许多, 但影响作用没有上述几个因素那么重要, 包括集料的特性如集料的种类、压碎值、形状、含泥量等, 还有养生条件如养生的温度、湿度等, 不再一一详细讨论了。

3 结论

(1) 水泥稳定类基层材料的抗冲刷性能随着胶结料含量的上升而增强, 水泥含量增幅相同的情况下, 水泥稳定碎石的抗冲刷性能提高更明显。二灰碎石的抗冲刷性能与胶结料含量关系不明显, 存在

一个最佳胶结料比例和灰石比使得其抗冲刷性能最好。胶结料等级越高,即活性物质含量越高,基层材料的抗冲刷性能越好。推荐了三类半刚性基层材料基于冲刷性能的胶结料含量范围。

(2) 半刚性基层材料的抗冲刷性能随着力学强度的增长而增长,即随着龄期的增长而增长。

(3) 相同龄期条件下无论是水泥稳定碎石还是二灰稳定碎石,三种典型结构中都是骨架孔隙结构抗冲刷性能最好、骨架密实结构次之、悬浮密实结构最差。细集料含量在30%左右时,材料的抗冲刷性能最好。

(4) 三类半刚性基层材料取最佳含水量时的抗冲刷性能最好;水泥稳定土在100%的压实度时冲刷深度 d 最小,而两种稳定碎石材料在98%的压实度时冲刷深度 d 最小。

参考文献:

References:

- [1] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
SHA Ai-min. Structure and Performance of Semi-rigid Pavement Materials [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [2] JTG D40—2002, 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].
JTG D40—2002, Specifications of Cement Concrete Pavement Design for Highway [S].
- [3] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [4] SCULLION T, SEBESTA S, HARRIS J P. A Balanced Approach to Selecting the Optimal Cement Content for Soil-cement Bases, 404611 - 1 [R]. Austin: Texas A&M University, 2000.
- [5] 孙兆辉, 王铁斌, 许志鸿. 水泥稳定碎石强度影响因素的试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9 (3): 285 - 290.
SUN Zhao-hui, WANG Tie-bin, XU Zhi-hong. Trial Study on Influence Factors of Cement-stabilized Macadam Strength [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9 (3): 285 - 290.
- [6] VAN WIJK A J. Rigid Pavement Pumping Subbase Erosion and Economic Modeling [D]. West Lafayette: Purdue University, 1985.
- [7] 蒋应军, 李明杰, 张俊杰. 水泥稳定碎石强度影响因素 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30 (4): 1 - 7.
JIANG Ying-jun, LI Ming-jie, ZHANG Jun-jie. Influence Factors of Strength Properties of Cement Stabilization of Crushed Aggregate [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30 (4): 1 - 7.
- [8] 孙兆辉. 水泥稳定碎石基层材料的集料级配优化 [J]. 建筑材料学报. 2006, 9 (6): 675 - 680.
SUN Zhao-hui. Aggregate Gradation Optimum Design of Cement Stabilized Macadam [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9 (6): 675 - 680.
- [9] 李立寒, 谈至明, 姜爱峰. 二灰碎石强度特性影响因素试验研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31 (4): 424 - 427.
LI Li-han, TAN Zhi-ming, JIANG Ai-feng. Test Research on Factors Affecting on Strength Behavior of Lime-fly Ash Aggregate [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003, 31 (4): 424 - 427.
- [10] 林毅, 丁青, 桑明丽, 等. 基于正交试验的水泥稳定碎石基层强度影响分析 [J]. 中国水运, 2007, 5 (9): 51 - 52.
LIN Yi, DING Qing, SANG Ming-li, et al. Analysis of Influence of Cement Stabilized Crushed Stone Base Intensity Based on Orthogonal Experiment [J]. China Water Transport, 2007, 5 (9): 51 - 52.
- [11] 刘登普. 半刚性基层材料压实度与强度的关系 [J]. 公路与汽运, 2002 (3): 42 - 44.
LIU Deng-pu. Relationship between Compactness and Strength of Semi-rigid Base Materials [J]. Highway and Automotive Applications, 2002 (3): 42 - 44.
- [12] 谈至明, 朱唐亮. 道路材料冲刷试验仪: 中国, CN201876409 [P]. 2011 - 06 - 22.
TAN Zhi-ming, ZHU Tang-liang. Erosion Test Equipment for Road Materials: China, CN201876409 [P]. 2011 - 06 - 22.
- [13] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 水泥稳定类基层材料抗冲刷性能的试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15 (4): 565 - 569.
ZHU Tang-liang, TAN Zhi-ming, ZHOU Yu-min. Experimental Research on Erosion-Resistance Performances of Cement Stabilized Base Materials [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (4): 565 - 569.
- [14] 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.