

DOI:10.11918/202302018

水泥稳定碎石基层取芯芯样分类与整体性评价技术标准

王 龙¹, 解晓光¹, 王 政², 姜凤霞³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 长春润德投资集团有限公司, 长春 130001;
3. 长春建业集团股份有限公司, 长春 130022)

摘要: 为了实现水泥稳定碎石基层整体性质量客观和公正的评价, 消除7 d取芯芯样质量评判的随意性、弥补因不考虑气候条件和公路等级等因素对施工质量评价的局限性, 选择高速、一级、二级和三级共5条公路, 对7 d龄期的水泥稳定粒料类基层进行了大量的取芯试验, 系统地取芯芯样的形态进行了调研、统计和分析, 根据芯样的完整程度, 将其分为完整类、残缺类和松散类3类, 芯样完整性的差异代表其扩散荷载应力能力的不同, 根据芯样的致密程度, 将芯样进一步分成8级, 芯样致密性的不同体现服役功能性差别, 提出了评价路段芯样完整率的计算方法, 确定了芯样完整率技术标准的确定原则, 对于季冻区宜采用 $F(I + II)$ 作为评价指标, 对于非季冻区宜采用 $F(I)$ 作为评价指标, 并根据回归曲线, 提出了不同区域不同等级道路7 d龄期内的芯样完整率技术标准。结果表明: 芯样完整率与道路等级呈线性关系, 道路等级对其影响幅度为2%~9%, 养生模式的影响幅度为10%左右, 气候因素的影响幅度为5%左右。研究成果实现了对半刚性基层取芯芯样质量和整体性质量的定量化评价。

关键词: 道路工程; 水泥稳定碎石; 芯样分类; 整体质量; 定量评价; 完整率

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)07-0019-09

Technical standard for cores classification and integrity quality evaluation of cement-treated aggregate base layer

WANG Long¹, XIE Xiaoguang¹, WANG Zheng², JIANG Fengxia³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Changchun Runde Investment Group Co., Ltd., Changchun 130001, China;
3. Changchun Jianye Group Co., Ltd., Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieve an objective and fair evaluation of the integrity quality of cement-treated aggregate base layers (CTAB), eliminate the randomness of quality evaluation of 7 d core samples, and make up for the limitations of construction quality evaluation due to the lack of consideration of climatic characteristics and highway grade, five highways, including expressway, primary, secondary and third-grade roads are selected, a large number of core tests are carried out on CTAB at 7 d age, and the condition of cores are systematically investigated, statistically analyzed, according to the influence on pavement structural performance, cores category and grade are classified. According to the integrity degree of the core, it can be divided into three categories: integral class, incomplete class and loose class, the difference in the integrity of the core represents the difference in its diffusion load stress capacity, based on the density, the cores are further divided into eight grades, the difference in core density reflects the difference in using function, the calculation method of core integrity rate is proposed, and the principle of determining the technical standard of core integrity rate is determined, $F(I + II)$ should be used as the evaluation index for seasonal frozen area, and $F(I)$ should be used as the evaluation index for non-seasonal frozen area. according to the regression curve, the technical standard of core integrity rate for different grades of roads in different areas within 7 days is proposed. The results show that the core integrity rate and road grade showed a linear trend, and the influence range of road grade is 2% - 9%, the influence range of coring-mode is about 10%, and the influence range of climate is about 5%. The research results achieve the quantitative evaluation of cores quality and integrity properties of semi-rigid base.

Keywords: road engineering; cement-treated aggregate base (CTAB); core classification; integrity quality; quantitative evaluation; integrity rate

收稿日期: 2023-02-10; 录用日期: 2023-03-18; 网络首发日期: 2024-06-26

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240625.1444.005>

基金项目: 国家自然科学基金(51878229)

作者简介: 王 龙(1968—), 博士, 副教授

通信作者: 王 龙, 289214921@qq.com

水泥稳定碎石基层养生 7 d 龄期后,需进行钻芯试验,根据现场钻取芯样的“光滑密实”程度来评判其是否满足整体性要求。众所周知,现场取芯芯样的质量状态是各种因素的综合反映,既包括原材料状态^[1]、混合料设计强度、水泥剂量等设计因素^[2],又包含压实程度和养生状态等施工因素^[3],其中,材料设计强度、压实度控制和养生条件最为关键,是水泥稳定碎石基层形成整体的主导因素。关于水泥稳定基层整体性评价的规定,文献[4]指出“7 d 应取出完整芯样,且芯样必须光滑密实,如在规定的养生期内(7 d)取不出完整的芯样,应找出实际路段相应的范围,进行返工处理”。可以看出,7 d 龄期芯样状态是水泥稳定碎石基层质量是否满足要求和是否返工处理的唯一判据,如此重要的技术要求却存在如下问题:一是对取芯芯样完整性的定义过于简单化,“芯样的高度应不小于摊铺厚度的 90%”和“芯样顶面、四周应均匀致密”,这只是一个模糊的描述,并没有结合工程取芯实际给出分类,导致在芯样的质量评价过程中具有主观性,抹杀了不同等级道路、不同设计强度下水泥稳定碎石 7 d 龄期所能到达整体性的区别,易对基层整体性是否合格产生误判,使评价结果缺乏客观性;二是没有考虑区域气候特征对 7 d 取芯芯样质量的影响,文献[5]研究表明养生温度愈高,水泥稳定碎石强度增加越快,而文献[6]研究表明,完整致密的芯样必须在水泥稳定碎石基层达到临界强度下才能得到,由此可见,在统一 7 d 龄期条件下,相同的水泥稳定碎石,季冻区与非季冻区的取芯芯样状态必然不同,在 7 d 龄期,采用统一的芯样质量评价不同气候条件下的

水泥稳定碎石基层施工质量,缺乏公平性^[7]。因此,需要对规定龄期的半刚性基层芯样进行调研,确定芯样缺陷类别,分析缺陷对基层服役性能的影响,确定芯样的分类和分级,提出芯样质量的量化表征方法,并给出不同等级道路芯样质量的技术要求,使半刚性基层施工质量的评价方法具有量化、评价结果具有客观性、返工处理具有公正性。

1 水泥稳定碎石取芯芯样质量调研

由于不同等级道路水泥稳定材料设计强度具有差异性,不同地理区域水泥稳定碎石的养生条件具有差异性以及不同施工单位在水泥稳定碎石基层施工质量控制的差异性,致使在规定龄期内水泥稳定碎石基层取芯芯样形态具有差别,因此调研项目的选择应在设计强度、气候差异和施工控三方面具有代表性。

1.1 芯样质量调研项目的选取

表 1 为水泥稳定集料(底)基层 7 d 龄期取芯芯样状态各调研项目汇总,包含了材料设计强度 R_d 、水泥剂量 q_c 、最佳含水量 w_{opt} 和最大干密度 ρ_{max} 基本技术数据,项目的选取具有如下 3 个特征:一是调研路段的选择涵盖了各等级道路,包括高速、一级、二级和三级公路,目的是体现材料设计强度的差别;二是各项目采用的基层材料分为水泥稳定碎石、水泥稳定砂砾和水泥稳定砂砾碎石 3 类,包括了常用的水泥稳定集料类材料,目的是体现材料类型差别;三是涵盖了黑龙江、内蒙古和吉林季冻区典型地区,其目的是体现 7 d 龄期内养生环境的差别。

表 1 各项目基层材料技术数据汇总

Tab. 1 Summary of base materials technical data of the projects

公路等级	层位	材料类型	R_d/MPa	$q_c/\%$	$w_{opt}/\%$	$\rho_{max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
抚长线(高速)	底基层	水稳碎石	3.0	5.3	5.1	2.379
	基层	水稳碎石	5.0	6.4	5.5	2.384
黑大线(一级)	底基层	水稳砂砾碎石	2.5	5.0	4.8	2.294
	基层	水稳碎石	4.0	4.5	5.0	2.305
阿库线(一级)	底基层	水稳砂砾	2.5	5.5	5.2	2.304
	基层	水稳碎石	4.0	5.0	5.6	2.304
呼玛线(二级)	底基层	水稳砂砾碎石	2.0	5.0	4.8	2.308
	基层	水稳碎石	3.5	4.5	5.2	2.322
亚雪线(三级)	底基层	水稳砂砾	2.0	5.0	5.4	2.260
	基层	水稳碎石	3.0	4.5	5.8	2.320

1.2 芯样质量的调研方法

1) 芯样的龄期。根据规范对水泥稳定类基层取芯龄期的要求和保证不同项目调研结果的横向可

比性,只对养生龄期 7 d 的芯样进行调研。

2) 调研的内容。调研的内容包括芯样的完整性和致密性,完整性为芯样的高度不小于设计厚度

h 的某一个阈值,即芯样上下表面的缺损高度不应大于某一个阈值;芯样的致密性为侧壁光滑密实,不存在因颗粒脱落而产生的空隙。

3)调研的方法。完整性的判定采用游标卡尺法,采用游标卡尺测量芯样的高度并与设计厚度对比;致密性采用对比法,采用室内标准压实度芯样的侧壁光滑状态与取芯芯样进行对比,确定致密程度。

2 水泥稳定碎石取芯芯样的分类与分级

在水泥稳定碎石基层施工过程中,由于级配、拌合、摊铺、碾压和养生过程中存在各种变异因素,导致最后成型的半刚性基层整体性存在缺陷,芯样的完整性是形成整体的度量,作为第一级指标,用于芯样的技术分类;芯样的致密性为整体性强弱的表征,作为第二级指标,用作芯样的技术分级。

2.1 取芯芯样的分类

2.1.1 第 I 类(完整类)

完整类是指芯样顶面和底面较完整、破损总高度小于设计厚度的 10%。表明混合料在施工过程

中拌和均匀,摊铺离析少,压实度满足要求,养生及时,整体性好,第 I 类芯样状态如图 1 所示。

2.1.2 第 II 类(残缺类)

残缺类是指芯样的顶面或底面至少有一面为残缺,但缺损总高度处于设计厚度的 10% ~ 20%。根据试件缺损的位置,分为顶面残缺和底面残缺两种情况。

芯样顶面残缺产生的原因是养生存在缺陷,或者顶面出现离析,当基层顶面裸露,或洒水不及时、养生湿度不够,致使在规定龄期表层强度不足,取芯过程顶面出现破损;当表面出现粗集料分布集中,取芯机的钻头带动离析集料运动,对其周边的骨料产生附带扰动,致使表面产生扰动性破损,当下钻到一定深度后,扰动减弱,破损区域截止,如图 2(a)所示。

芯样底面残缺产生的原因有 3 个:一是混合料摊铺过程中竖向离析,粗集料集中在底层,细集料无法填充骨架空隙;二是摊铺层过厚,底层无法压实;三是下承层不平整,坑洼处存水或者坑洼处压实不足,导致上层芯样出现“烂根”现象,如图 2(b)所示。

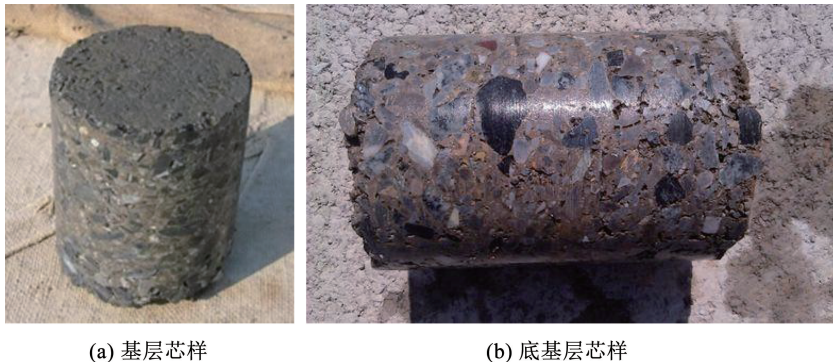


图 1 水泥稳定碎石第 I 类芯样的状态

Fig. 1 Cores state of CTAB type I

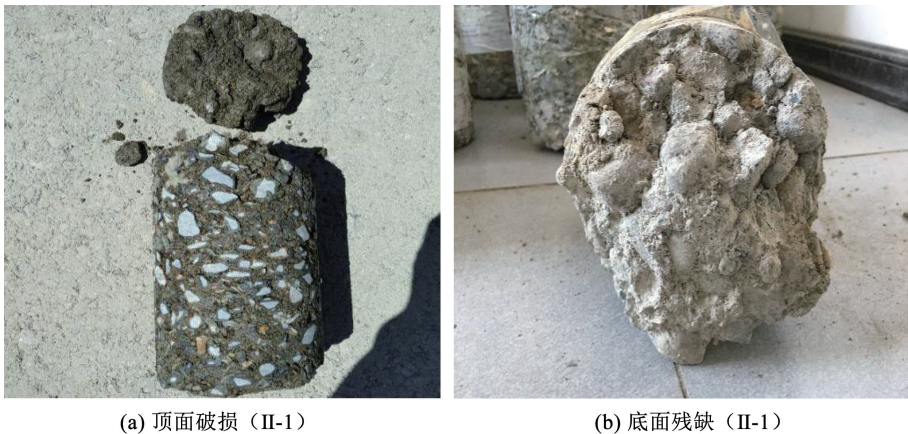


图 2 水泥稳定碎石第 II 类芯样的状态

Fig. 2 Cores state of CTAB type II

2.1.3 第 III 类(松散类)

松散类是指芯样的顶面或底面缺损总高度大于

20% 设计厚度,或处于半松散或完全松散状态,不足以整体形式分散交通荷载。该类型芯样产生的原因

有 3 种:一是结合料剂量严重不足,可能是水泥布料器卡顿,水泥无法按计量要求输送;二是摊铺时出现粗集料窝料,当取芯位置恰好位于窝料区,则出现松散状态;三是局部断面严重漏压,材料的强度仅靠水泥的黏结作用,缺失压实度提升产生的附加强度。这 3 种缺陷出现的概率很低,即使出现,缺陷的面积也很小。此类芯样无法形成板体,属质量缺陷问题,第 III 类芯样状态如图 3 所示。

2.2 水泥稳定碎石取芯芯样的分级

芯样的外观形态分类,主要考察了完整性指标(顶面完整性、底面完整性或松散),不同的芯样种类代表不同的施工质量水平,完整性指标主要体现力学性能,其差异代表其不同的整体性和扩散应力

的能力;致密性指标主要体现功能性,其差异则体现了基层在抗疲劳和抗冻融损伤等方面的不同。因此,根据在应力扩散能力对芯样分类的基础上,综合考虑致密性对功能性的影响,提出不同类型芯样的技术分级。

致密性不足产生的主要原因有两个:一是结合料剂量偏少、细集料过多,虽然细集料填充了粗集料骨架空隙,但结合料不足以使粒料形成整体,钻芯过程中细集料被冲刷脱落;二是因为级配为骨架-空隙型,细集料过少,在规定的压实度下,水泥和细集料形成的胶浆无法填满骨架空隙。芯样侧壁致密性不足的状态如图 4 所示。



(a) 芯样破损高度大于20% (b) 芯样松散

图 3 水泥稳定碎石第 III 类芯样的状态

Fig. 3 Cores state of CTAB type III



(a) 基层致密性不足芯样 (b) 底基层致密性不足芯样

图 4 芯样侧壁致密性不足的状态

Fig. 4 Insufficient compactness condition of cores sidewall

2.2.1 第 I 类芯样的分级

第 I 类芯样为完整类,其状态代表养生后的基层形成了良好弹性板体,全厚度参与应力扩散,但致密性的芯样具有良好的抗疲劳性能,而非致密性芯样的抗疲劳和抗冻性能较差,为区分二者差异,把第 I 类芯样细分为两级,完整且致密的命名为 I-1 级,完整非致密的命名为 I-2 级。即: I-1 级,芯样顶、底面完整,侧壁光滑致密; I-2 级,芯样顶、底面完整,侧壁不光滑致密。

2.2.2 第 II 类芯样的分级

第 II 类芯样状态代表局部厚度形成良好的弹性板体,局部厚度参与应力扩散,等同于半刚性基层厚度的减薄,对于上部破损的 II-1 级芯样来讲,其对路面结构的影响是当有水渗入基层顶面,会产生唧泥返浆,进而产生沥青层底部脱空,提前产生疲劳破坏,但并不是路面结构性损伤,从维修角度来讲,通过铣刨沥青面层重新铺筑,即可消除病害;而对基层底部松散的 II-2 级来讲,等同于半刚性基层有效厚

度减薄,承载力大幅度下降,基层易疲劳开裂,产生的损伤属结构性损伤,维修时需开挖除基层重新铺筑,其对交通的阻碍作用明显大于前者。因此,对第Ⅱ类芯样状态共划分为4个级别:Ⅱ-1-1级,芯样顶面缺损,底面完整,侧壁光滑致密;Ⅱ-1-2级,芯样顶面缺损,底面完整,侧壁不光滑致密;Ⅱ-2-1级,芯样顶面完整,底面缺损,侧壁光滑致密;Ⅱ-2-2级,芯样顶面完整,底面缺损,侧壁不光滑致密。

2.2.3 第Ⅲ类芯样的分级

第Ⅲ类型芯样表明半刚性基层没有形成板体,处于松散粒料阶段,类似柔性级配碎石,该种状态的

基层已不是半刚性状态。根据芯样的两种状态,分为两级:Ⅲ-1级,半松散类,芯样顶、底面缺损,侧壁不光滑不致密;Ⅲ-2级,完全松散类,芯样全部松散。

至此,根据芯样的形态,把芯样分为3大类,分别用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ表示。根据芯样状态对半刚性基层服役性能影响的大小,把芯样细分为8级,采用阿拉伯数字1、2表示,数字越大,代表芯样的质量越差,对路面结构的服役性能的影响越大。图5为不同类型和级别芯样的状态,表2为水泥稳定碎石现场取芯芯样分类与分级汇总。



图5 不同类型和级别芯样的状态

Fig.5 State of different type and classification of cores

表2 水泥稳定碎石现场取芯芯样分类与分级汇总

Tab.2 Summary of core types and classifications of CTAB

芯样类别	芯样类别状态	芯样级别	芯样级别状态	对结构的影响
第Ⅰ类	完整	Ⅰ-1级	顶底完整侧致密	无影响
		Ⅰ-2级	顶底完整侧粗糙	影响小
第Ⅱ类	顶破损	Ⅱ-1-1级	顶面破损侧致密	略有影响
		Ⅱ-1-2级	顶面破损侧粗糙	稍有影响
	底破损	Ⅱ-2-1级	底面破损侧致密	影响大
		Ⅱ-2-2级	底面破损侧粗糙	影响较大
第Ⅲ类	松散	Ⅲ-1级	顶、底破损侧粗糙	非半刚性结构
		Ⅲ-2级	全厚度松散	柔性结构

2.3 基于芯样状态的整体质量评价方法

室内试验表明,只有水泥稳定碎石基层养生到规定的成熟度后才能取出完整致密的芯样^[8]。取芯调研试验表明,并不是所有的 7 d 龄期取芯芯样均能达到规范的技术要求,特别是在季冻区 5—6 月份和 9—10 月份施工的基层,由于气温较低,强度提升速度较慢,7 d 龄期的成熟度达不到临界成熟度,因而芯样的合格率较低,但有研究^[9-10]表明,低温养生水泥稳定碎石的后期强度反而更高,因此,需要根据地理区域、道路等级确定 7 d 龄期下取芯芯样的技术要求。

2.3.1 7 d 龄期取芯芯样完整率

定义检测评价路段芯样完整率 F 为检测路段取芯合格芯样(第 I 类或者第 I 类 + 第 II 类)数量

W 与取芯总数 Z (第 I 类 + 第 II 类 + 第 III 类)比值的百分数。合格芯样对于非季冻区,采用第 I 类芯样,对于季冻区采用第 I 类和第 II 类芯样, F 的计算公式为

$$F = \frac{W}{Z} \times 100\% \quad (1)$$

2.3.2 取芯芯样质量分布规律

根据 7 d 龄期水泥稳定碎石芯样的分类和分级,对 5 个季冻区不同等级公路芯样进行了分类和统计,表 3 为调研结果汇总。其中,芯样完整率 $F(I)$,是以第 I 类芯样为完整芯样计算得出的;芯样完整率 $F(I + II)$,是以第 I 类和第 II 类为完整芯样计算得出的;芯样不完整率 $F(III)$,是以第 III 类为不完整芯样计算得出。

表 3 调研项目芯样分级数量与完整率

Tab. 3 Cores classification quantity data and integrity rate of investigation projects

公路等级	芯样数量								$F(I)/\%$	$F(I + II)/\%$	$F(III)/\%$
	I-1	I-2	II-1-1	II-1-2	II-2-1	II-2-2	III-1	III-2			
抚长线(高速)	18	2	0	0	1	1	0	0	90.9	100	0
黑大线(一级)	65	12	2	2	3	3	2	1	85.6	96.7	3.3
阿库线(一级)	62	21	5	10	4	5	7	4	70.3	90.7	9.3
呼十线(二级)	90	34	4	8	4	5	5	2	81.6	95.4	4.6
亚雪线(三级)	55	18	10	12	6	8	5	3	62.4	93.2	6.8

从表 3 中可以看出,在实体工程中,不同道路 3 类 8 级的芯样的数量具有一定的差异,影响因素主要有设计因素、施工因素和养生环境因素^[11]。图 6 为调研工程芯样完整率 $F(I)$ 的对比,可以看出,抚长线的 $F(I)$ 最大,为 90.9%,而亚雪线的最低,为 62.4%,其原因在于以下 3 点:其一是环境因素的影响,在基层的施工时间方面,抚长线为 8 月中旬,环境温度在 25 ~ 32 °C 之间,且多雨,保湿好;而亚雪线为五月中旬,养生的环境温度为 10 ~ 20 °C,二者相差 10 °C 以上。其二是设计因素的影响,抚长线的设计强度为 3.0 ~ 5.0 MPa,水泥剂量在 5.2% ~ 6.3% 之间,剂量大,强度高;而亚雪线为三级公路,基层设计强度在 2.0 ~ 3.0 MPa 之间,水泥剂量为 4.5% ~ 5.0%;在材料方面,抚长线均采用水泥稳定碎石,而亚雪底基层采用的是天然砂砾。其三是施工因素的影响,对于高速公路的抚长线,底基层的压实度为 97%,基层为 98%;而作为三级路的亚雪公路,底基层要求为 96%,基层为 97%,压实度绝对值相差 1%。

以上 3 个因素,影响了不同等级道路在 7 d 龄期的芯样完整率 $F(I)$ 的大小,特别是对低等级道路,第 I 类芯样的数量比例较少,这不仅仅是施工因

素、环境因素的影响,更主要是设计因素,因此不同等级道路的 7 d 芯样的完整率应分别给出。

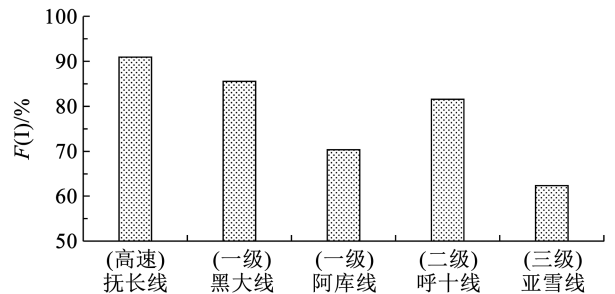


图 6 不同调研项目芯样完整率 $F(I)$ 的对比

Fig. 6 Comparison of cores integrity ratio $F(I)$ of investigations projects

对于黑大线和呼十线的 $F(I)$ 的分布规律,则充分体现了道路等级和环境的影响,黑大线为一级路,呼十线为二级路,在设计强度方面,黑大线高于呼十线,且黑大线位于黑龙江省中南部,而呼十线处于黑龙江省北部,两条线相距 700 km,6 月初的平均温度相差 6 °C 左右,因而黑大线的 $F(I)$ 比呼十线的 $F(I)$ 高 4%。

对于阿库线一级路,其 $F(I)$ 为 70.3%,小于黑大一级路的 85.6% 和呼十二级路的 81.6%,其原

因在于养生因素模式不同,阿库线为节省洒水养生作业工序,采用塑料薄膜覆盖养生,致使7 d龄期芯样完整率较低,其原因在于该地区昼夜温差较大,塑料薄膜在高温毛细和低温凝露作用下,使基层内的水分上移凝集在薄膜的表面,导致基层内部养生缺水,7 d龄期强度低,因而第Ⅲ类芯样较多,而呼十公路采用土工布苫盖洒水保湿养生,能保证基层内水泥水化的用水量,强度增长均匀,因此 $F(I)$ 较

高。阿库线与黑大线均为一级路,二者 $F(I)$ 相差15.3%,其原因在于气候因素和养生模式的差别,而阿库线和呼十线均在大兴安岭地区,气候条件相当,二者 $F(I)$ 相差11.3%,是由养生模式的不同而产生的差别。因此可知,养生模式因素的差别在10%左右,而气候因素的差别在5%左右,薄膜覆盖养生模式不适合早晚温差较大的地区或季节^[12]。薄膜苫盖养生的缺点如图7所示。



(a) 薄膜苫盖不严, 破损无法恢复



(b) 水分凝结, 失水养生

图7 薄膜覆盖养生的缺点

Fig. 7 Disadvantages of plastic film coverage for curing

在季冻区的5月中旬至6月中旬施工的半刚性基层或底基层,在7 d龄期内全部取出完整致密芯样的可能性较小,导致第Ⅰ类芯样数量少,存在第Ⅱ类芯样数量较多,除非大幅度提高设计强度水平,但会增加其他早期病害的产生。既然在季冻区初春或秋末施工的水泥稳定碎石基层7 d取芯过程中不可避免地出现第Ⅱ类芯样,且第Ⅱ类芯样随着取芯龄期的延长或者成熟度的增加,其形态会向第Ⅰ类芯样转变,因此,半刚性基层的取芯质量状态可采用芯样完整率 $F(I+II)$ 进行评价,图8为不同等级道路 $F(I+II)$ 的分布。

整率均处于优良状态。

对于第Ⅲ类芯样,其产生的原因既不是设计问题,也不是环境因素问题,主要是施工质量问题,即该芯样下的半刚性基层,随着养生龄期的增加也不会形成板体,属施工质量缺陷,该类状态必须加以控制。

图9为基于第Ⅲ类芯样不完整率 $F(III)$ 的分布,从图中可以看出,抚长线不可接受的芯样不完整率为“零”,最大的为阿库线,为9.3%,其他各线的 $F(III)$ 均随着道路等级的降低而有所提升。 $F(III)$ 的分布符合道路等级越高质量控制越严格的变化规律。

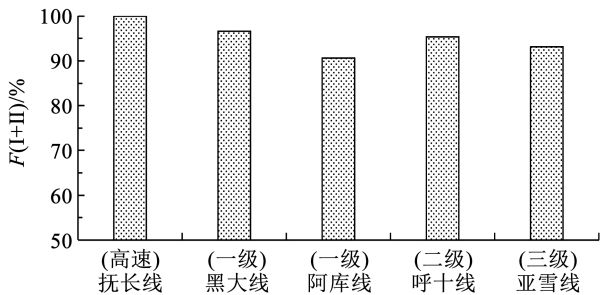


图8 不同等级道路 $F(I+II)$ 的对比

Fig. 8 Comparison of cores integrity ratio $F(I+II)$ of different grades road

从图8中可以看出,芯样完整率 $F(I+II)$ 最高的为抚长线,为100%,最低的为阿库线,为91%,其他工程体现了道路等级的差别,随着道路等级的下降, $F(I+II)$ 呈下降趋势。总体来讲,第Ⅱ类芯样的 $F(I+II)$ 均超过90%,各等级道路的芯样完

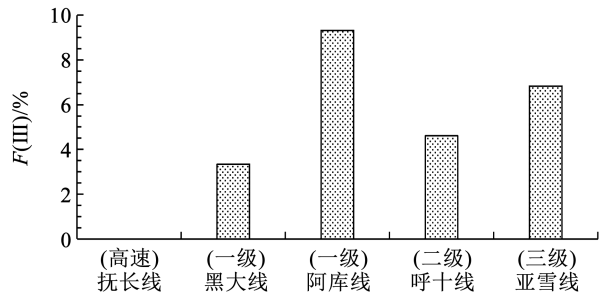


图9 不同等级道路芯样不完整率 $F(III)$ 的分布

Fig. 9 Comparison of cores incomplete ratio $F(III)$ of different grades road

3 不同等级道路芯样完整率技术标准

由于设计因素、环境因素和施工因素的影响,3种形态的芯样的分布存在差异,而规范规定水泥稳定类基层材料“7 d取不出完整致密的芯样”,即

认定为施工质量存在问题,具有一定的武断性,没有考虑基层材料的设计和养生环境因素对芯样状态的影响规律^[13-14]。应结合调研分析结果,提出基层芯样完整率的技术要求,芯样完整率的技术要求确定原则:1)要体现道路等级的差别;2)要体现地域的差别;3)要体现因材料设计和施工要求的差异。

对于第一条原则,图 10 为 7 d 龄期芯样完整率 F 与道路等级的关系,可以看出,无论是 $F(I)$, 还是 $F(I+II)$ 均随着道路等级的降低呈下降关系,道路等级对芯样完整率的影响幅度为 2%~9%,其原因在于随着道路等级的提高,半刚性基层材料设计强度、水泥剂量和施工控制水平均高于低等级道路,芯样的完整率高,因此,不同等级道路水泥稳定碎石的芯样完整率要求必须体现道路等级的区别。

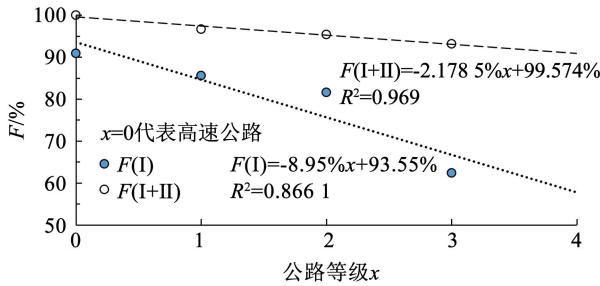


图 10 芯样完整率 F 与道路等级 x 的关系

Fig. 10 Relationship between core integrity ratio F and road grade x

对于第 2 条原则,规范规定的 7 d 龄期取芯,并没有指出是在什么温度条件下的龄期,对于相同的水泥稳定基层材料,养生环境温度的高低对芯样质量有巨大的影响,7 d 龄期下的质量评价并不是一个公平的尺度,研究表明,当采用成熟度标准确定评价时机,评价相对公平,但计算成熟度的温度参数应采用养生温度 T_c 而不是环境温度 T_a 。

图 11 为采用养生监控系统采集的环境温度 T_a 与养生的温度 T_c 的差值 ΔT 曲线。可以看出, ΔT 的在 2.0~5.5 °C 之间变化, ΔT 的变化受养生湿度的影响,当湿度大时, ΔT 就大,当养生湿度与外界环境湿度一致时, $\Delta T = 0$ 。而规范规定,水泥稳定类材料养生湿度应保持 95% 以上,因此,实际的养生温度要低于环境温度。对该湿度范围内的 ΔT 取平均,此时, $\Delta T = 4.5$ °C,说明半刚性基层在用土工布洒水苫盖养生时,其实际养生温度比气温平均低 4.5 °C 左右,这进一步说明,在季冻区的 5 月中旬至 6 月中旬气温较低时,7 d 龄期的水泥稳定碎石基层芯样完整率较低的原因。

对于第 3 条原则,图 12 为 7 d 龄期芯样不完整率 $F(III)$ 与道路等级的关系,可以看出, $F(III)$ 随道

路等级的降低呈线性增加的趋势,当道路等级较低时,材料设计存在天生缺陷,材料设计强度低,水泥剂量少,压实度要求低,再加上施工工艺差,使其松散类芯样比例要明显偏高,对于高速和一级公路,第 III 类芯样为致命缺陷, $F(III)$ 应为 0,而对其他等级公路,应尊重事实,给出 $F(III)$ 合理的技术要求。

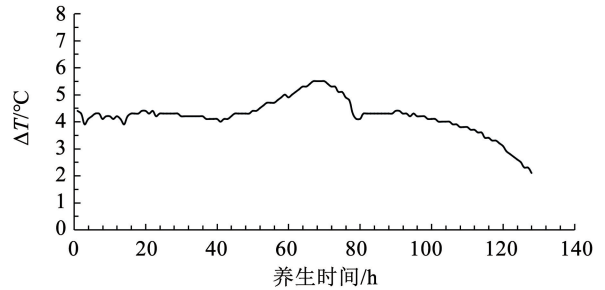


图 11 环境温度 T_a 与养生温度 T_c 差值曲线

Fig. 11 The difference curve between ambient temperature T_a and curing temperature T_c

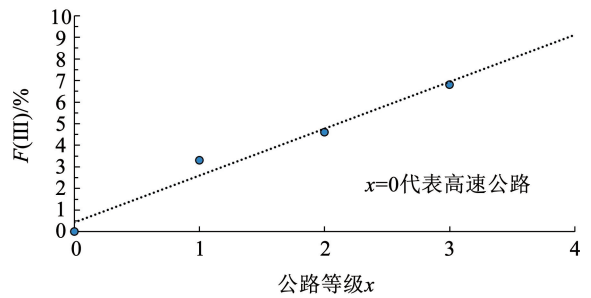


图 12 芯样不完整率 $F(III)$ 与道路等级的关系

Fig. 12 Relationship between core incomplete ratio $F(III)$ and road grade

文献[4]规定道路等级越高,设计使用年限越长,对于道路结构层的质量要求就高^[15],基于此提出不同地域、不同等级道路 7 d 取芯芯样完整率技术要求见表 4。

表 4 不同公路等级水泥稳定碎石取芯芯样完整率技术标准
Tab.4 Technical standard of core integrity rate of CTAB for different highway grades %

公路等级	季冻区		非季冻区	
	$F(I+II)$	$F(III)$	$F(I)$	$F(II)$
高速、一级	100	0	100	0
二级公路	≥95	<5	≥98	<2
三级公路	≥93	<7	≥95	<5
四级公路	≥91	<9	≥93	<7

对于季冻区,由于气候原因,第 I 类芯样的比例较低,但随着养生时间的增加,第 II 类芯样会向第 I 类芯样转变,因此,技术指标采用 $F(I+II)$ 或 $F(III)$ 给出,二者具有等效性,合格芯样包括完整类和残缺类,各等级道路的技术标准来源于图 10 的回

归曲线。

对于非季冻区,由于环境温度高,水泥稳定碎石7 d的强度易于达到能取出完整芯样的临界强度^[16],因此,采用 $F(I)$ 作为技术指标,同时,采用 $F(II)$ 约束残缺类芯样的数量,不容许第Ⅲ类芯样的出现。

在公路等级方面,高速和一级公路承担荷载大,服役时间长,芯样的合格率必须100%满足要求,而其他等级道路,由于基层设计强度、水泥剂量和压实度要求均有所降低,因此,芯样的完整率也可适当地降低^[17]。

4 结 论

1)通过对7 d龄期芯样的调研和其对半刚性基层服役的影响,提出了水泥稳定碎石芯样分类和分级的方法,并对芯样进行了分类和分级。

2)芯样的完整性主要体现力学性能,其差异代表扩散应力能力的差别,致密性主要体现功能性,其差异则体现了水泥稳定碎石基层在耐久性和抗冻融损伤等方面的不同。

3)养生温度监控表明,水泥稳定碎石基层实际的养生温度比气温平均低4.5℃,这是季冻区7 d龄期的基层芯样完整率较低的主要原因。

4)根据取芯芯样类别的统计分析,定义了基于芯样质量的水泥稳定碎石基层整体性评价指标——芯样完整率,芯样完整率与道路等级呈线性增加趋势,提出了不同区域不同等级道路在7 d龄期内的芯样完整率技术标准。

参考文献

[1]苏丹. 原材料对水稳碎石强度及芯样完整性的影响分析[J]. 交通标准化, 2010(21): 185
SU Dan. Raw materials' influence on cement stabilized macadam strength and core integrity[J]. Transport Standardization, 2010(21): 185

[2]丁献阳,朱孝春,仓基阳,等. 对水泥稳定碎石无侧限抗压强度及芯样完整性的分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2006(11): 54
DING Xianyang, ZHU Xiaocun, CANG Jiyang, et al. Analysis of unconfined compressive strength and core integrity of cement stabilized crushed stone [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Edition), 2006(11): 54

[3]刘波,申亮亮,王均. 如何提高水泥稳定碎石一次取芯合格率[J]. 砖瓦, 2021(12): 156
LIU Bo, SHEN Liangliang, WANG Jun. How to improve the qualified rate of cement stabilized macadam primary coring [J]. Brick-Tile, 2021(12): 156

[4]中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份公司, 2015
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015

[5]吴玉浩,张家兵. 水泥稳定粒料基层结构强度与龄期、温度关系的探讨[J]. 中南公路工程, 2003, 28(3): 47
WU Yuhao, ZHANG Jiabing. Relationships between strength and age, and strength and temperature of cement stabilized aggregate base [J]. Central South Highway Engineering, 2003, 28(3): 47

[6]赵秀云,陈亮亮,赵银. 寒冷地区道路基层取芯时间的探讨[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(8): 99
ZHAO Xiuyun, CHEN Liangliang, ZHAO Yin. Investigation on coring time of road base course in cold region [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(8): 99

[7]王龙,姜凤霞,夏浩然. 水稳碎石基层取芯临界强度与整体性质量评价时机[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(3): 26
WANG Long, JIANG Fengxia, XIA Haoran. Coring critical strength and integrity quality evaluation time of cement-treated aggregate base layers [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(3): 26

[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
WANG Cheng. Strength prediction and integrity evaluation of cement stabilized graded macadam base [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020

[9]郭成举. 混凝土成熟度的理论和应用[J]. 混凝土与加筋混凝土, 1987(10): 21
GUO Chengju. Theory and application of concrete maturity [J]. Concrete and Reinforced Concrete, 1987(10): 21

[10]邱亚. 成熟度法预测冬期施工混凝土的强度[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
QIU Ya. Maturity method to predict the strength of concrete in winter construction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016

[11]ASTM. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method: C1074-11 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2011

[12]郭东锋,张海军,陈宁. 高寒地区抗裂水稳基层养生方法探讨[J]. 现代交通技术, 2013, 10(4): 12
GUO Dongfeng, ZHANG Haijun, CHEN Ning. Discussion on curing measures for cement stabilized macadam base in cold area [J]. Modern Transportation Technology, 2013, 10(4): 12

[13]刘振铎,李晨辉,孙涛,等. 乳化再生废旧水稳碎石基层芯样完整性影响因素分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2019, 19(1): 12
LIU Zhenduo, LI Chenhui, SUN Tao, et al. Analysis of factors affecting core sample integrity of emulsive regeneration old cement stabilized macadam base [J]. Journal of Jiangsu Vocation Institute of Architecture Technology, 2019, 19(1): 12

[14]刘红轲. 水泥稳定碎石基层强度控制与铺筑质量研究[D]. 西安: 长安大学, 2011
LIU Hongke. Study on cement stabilized crushed stones base construction quality and strength control [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011

[15]李炜光,范文东,韩庆,等. 整体性基层水泥稳定碎石结构使用现状研究[J]. 公路, 2011(9): 38
LI Weiguang, FAN Wendong, HAN Qin, et al. Research on the application status of integrated base cement stabilized macadam structure [J]. Highway, 2011(9): 38

[16]张亚涛,秦岭,徐良,等. 钻芯法检测水泥稳定碎石层质量的探讨[J]. 山西建筑, 2022, 48(17): 140
ZHANG Yatao, QIN Lin, XU Liang, et al. Discussion on testing the quality of cement stabilized crushed stone layer by drilling core method [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(17): 140

[17]张洋. 水泥稳定碎石基层芯样检验与评定分析[J]. 交通世界, 2017(2): 60
ZHANG Yang. Test and evaluation analysis of cement stabilized macadam basecore [J]. Transport Word, 2017(2): 60