

DOI: 10.11918/202004068

# 水稳碎石基层取芯临界强度与整体性质量评价时机

王 龙<sup>1</sup>, 姜凤霞<sup>2</sup>, 夏浩然<sup>1</sup>

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

**摘要:** 为了确定水稳碎石基层合理的整体性质量评价时机, 消除养生条件、级配类型和设计强度(水泥剂量)的影响, 弥补采用固定龄期法则评价施工质量的局限性, 采用振动成型方法成型3种类型级配、3种水泥剂量的大型试件, 并采用3种养生路径养生后进行钻芯和劈裂强度试验, 建立成熟度与劈裂强度的关系。结果表明: 水泥剂量(质量分数)对取出完整芯样的龄期有很大的影响, 5.5%水泥剂量的试样, 3种级配在7 d龄期均能取出完整的芯样, 而水泥剂量为4.5%时, 悬浮-密实级配在14 d才能取出完整芯样, 当水泥剂量为3.5%时, 3种级配类型的水泥稳定碎石均不能在7 d取出完整致密芯样; 级配越趋于悬浮-密实, 芯样侧壁越不致密, 悬浮-密实级配水泥剂量必须达到5.5%以上, 才能在7 d龄期取出致密芯样, 否则需增加养生龄期; 水泥稳定碎石能否取出完整致密芯样与其劈裂强度密切相关, 当劈裂强度达到取芯临界劈裂强度时, 则能取出完整致密芯样; 不同养生路径下的水稳碎石劈裂强度与成熟度曲线有较好的双曲线关系。基于取芯临界劈裂强度及劈裂强度与成熟度的关系曲线, 提出了取芯临界成熟度标准。采用取芯临界成熟度科学地确定水泥稳定碎石基层的整体性评价时机是可行的。

**关键词:** 道路工程; 水泥稳定碎石; 质量评价; 取芯临界强度; 取芯临界成熟度; 评价时机

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2021)03-0026-07

## Coring critical strength and integrity quality evaluation time of cement-treated aggregate base layers

WANG Long<sup>1</sup>, JIANG Fengxia<sup>2</sup>, XIA Haoran<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Changchun Jianye Group Co., Ltd., Changchun 130022, China)

**Abstract:** To determine the reasonable integrity quality evaluation time of cement-treated aggregate base (CTAB) layers, eliminate the influences of curing conditions, gradation types, and design strengths (cement dosage), and make up the limitations of using fixed age to evaluate CTAB construction quality, large specimens with three types of gradations and three kinds of cement dosages were molded by vibration method for experiment. After using three kinds of curing paths to preserve, the coring and splitting strength tests were carried out, and the relationship between maturity and splitting strength was established. Experiment results show that cement dosage (mass fraction) had a great influence on the age at which an intact core could be taken out. When the cement dosage was 5.5%, intact cores could be taken out from specimens of all three gradation types in seven days; when the cement dosage was 4.5%, intact cores could be taken out from specimens with suspend-dense structure grading until 14 days; as the cement dosage dropped to 3.5%, intact cores were failed to be taken out under the three gradation types in seven days. When the gradation tended to suspend-dense structure, the side walls of cores were less dense. Intact dense cores could be taken out in seven days, only when the cement dosage was above 5.5% under suspend-dense structure grading, otherwise the curing age must be increased. Whether the intact cores of CTAB could be taken out was closely related to splitting strength, when the splitting strength reached the coring critical strength, intact dense cores could be taken out. There was a hyperbolic relationship between the splitting strength of CTAB and the maturity curve under different curing paths. Based on the coring critical splitting strength and the relationship between splitting strength and maturity, the critical maturity standard of coring was put forward. It is feasible to use coring critical maturity to scientifically determine the integrity quality evaluation time of CTAB.

**Keywords:** road engineering; cement-treated aggregate base (CTAB); quality evaluation; coring critical strength; coring critical maturity; evaluation time

水泥稳定碎石基层现场钻芯试验是评价基层整体性(施工质量)的重要手段, 规定龄期下芯样的状

态可以反映基层的压实、厚度和板体性质量。文献[1]中规定“7 d应取出完整芯样, 否则应进行返工处理”, 可见芯样状态的重要性。但不分地域、气候、材料设计强度和材料级配特征统一在7 d龄期时间

收稿日期: 2020-04-13

作者简介: 王 龙(1968—), 博士, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 姜凤霞, 1453910101@qq.com

节点取芯进行评价,不具有科学性.就全国范围来讲,地理位置的差异气温差别巨大,如华南地区4、5月份平均气温为20~30℃,而东北地区则小于10℃,如此之大的温差下基层均养生7d,其强度和取芯芯样的状态会有很大差别;不同设计强度的水泥稳定碎石基层,水泥剂量不同,相同的养生龄期下(7d),设计强度高的基层则很容易取出完整芯样,而设计强度低的基层,可能取不出完整芯样;而且,级配类型、集料的强度和养生条件也会影响到芯样致密程度.

固定龄期法作为评价基层整体性质量评价时机不具有合理性,文献[2-4]研究了养生温度、龄期对强度的影响,按照施工期温度的差异,提出了一些水泥稳定碎石基层施工质量评价的方法.因此,取芯龄期需根据水泥稳定基层施工地域的气候特征和材料特性综合给出,为了确定水稳碎石基层整体性质量合理的评价时机,体现施工质量评价的公平性原则,本文通过室内钻芯试验,提出不同级配类型和设计强度下能取出完整芯样的取芯临界劈裂强度,建立成熟度曲线与劈裂强度间的关系模型,根据取芯临界强度提出基于成熟度理论确定取芯时机的方法和标准,旨在体现基层施工质量评价的科学性和公平性.

## 1 成熟度理论

### 1.1 成熟度理论模型

成熟度是水泥混凝土养护时间和等效养护温度的乘积,成熟度是由英国 Saul<sup>[5]</sup>于1951年提出,对于水泥混凝土材料,当养生的成熟度相同,其达到的强度也基本相同,而与养生期间的温度路径无关,成熟度计算公式为

$$M_s = \sum (T - T_0) \Delta t.$$

(1)

式中:  $M_s$  为混凝土成熟度,℃·h;  $T$  为  $\Delta t$  时间内混凝土内部的平均温度,℃;  $T_0$  为基准温度,  $T_0$  取0℃;  $\Delta t$  为养生时间间隔,h.

文献[6]规定,水泥混凝土路面的切缝时机以成熟度为250℃·h进行控制,不会发生啃边.对于同为水泥基的水泥稳定碎石基层,其强度增长与水泥混凝土相类似,因而,建立水泥稳定碎石强度与养生成熟度的关系,及其养生成熟度与取芯质量的关系,则可以提出基于强度相等原则不同养生路径下水泥稳定碎石基层的合理质量评价时机,改善不分气候特征和材料设计强度统一采用固定龄期法则(7d)评价施工质量的不合理性.

### 1.2 成熟度与强度模型

成熟度的主要应用是预测水泥混凝土的早期强

度,成熟度与强度的关系模型主要有3种<sup>[7-9]</sup>,分别为对数模型、双曲线模型和指数模型,对数模型由于没有极限,强度具有无限大的趋势,仅在成熟度一定范围内有效,采用指数或双曲回归模型预测混凝土强度存在极限,与实际相符<sup>[10-11]</sup>,因此《建筑工程冬期施工规程》<sup>[12]</sup>附录B中指出“宜按照指数或双曲线模型预测混凝土的强度”.成熟度  $M_s$  与强度的 Carino 双曲线函数模型为

$$R = R_u \frac{k(M_s - M_0)}{1 + k(M_s - M_0)}.$$

(2)

式中:  $M_0$  为初始硬化时的成熟度,℃·h;  $k$  为速率常数,1/(℃·h);  $R_u$  为极限抗压强度,MPa.

## 2 研究方法

### 2.1 室内试验基层材料配比

为探讨水泥剂量和级配类型对取芯质量的影响,试验级配以文献[1]中C-B-1为基础,设计出4.75mm筛孔的通过率分别为30%(级配1)、40%(级配2)和50%(级配3)3种级配,分别代表骨架-空隙、骨架-密实和悬浮-密实3种级配类型.水泥剂量(质量分数)采用3.5%、4.5%和5.5%共3种,代表不同的设计强度,水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;以此研究在标准养生条件下不同对比对取出完整芯样的临界成熟度(龄期)和取芯临界强度的影响,材料比例见表1.

表1 3种类型试验级配和材料比例

Tab.1 Three types of test gradations and material proportions

| 级配类型 | 不同筛孔下碎石质量分数/% |           |             |           |
|------|---------------|-----------|-------------|-----------|
|      | 9.5~26.5 mm   | 9.5~19 mm | 4.75~9.5 mm | 0~2.36 mm |
| 级配1  | 15            | 27        | 29          | 29        |
| 级配2  | 12            | 22        | 24          | 42        |
| 级配3  | 10            | 19        | 21          | 50        |

### 2.2 试验方法

为了能进行室内钻芯试验,必须成型水泥稳定碎石大型试件,试件模具无底圆柱形对开形式,内径为30cm,高为20cm,圆形压头直径为29.5cm,模具构造及实物如图1所示.

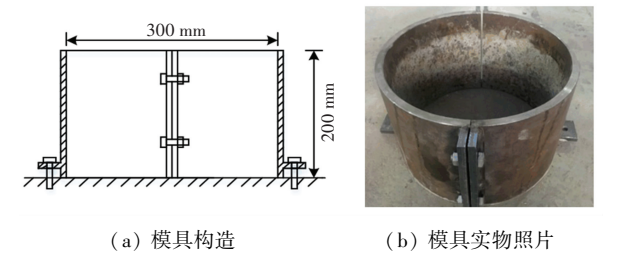


图1 取芯试件成型模具构造图  
Fig.1 Structure of forming mold of core specimen

按照重型击实最佳含水量和压实度的 98% 配料,采用振动成型仪在图 1 模具内成型高度为 15 cm 不同配比下的水泥稳定碎石试件,塑料薄膜密封覆盖 24 h 后拆模,放入标准养生箱(温度 20 ℃±2 ℃,相对湿度 ≥ 95%) 养生至预定的龄期之后,采用 HZ-20 混凝土取芯机进行钻芯试验,取芯直径为 15 cm,观察芯样状态,根据养生时间和温度,计算第 1 次能取出完整芯样的成熟度,并对芯样进行劈裂强度试验,确定出取芯临界劈裂强度.

3 取芯临界劈裂强度与芯样状态分析

取芯试验主要研究对于不同级配类型和不同水泥剂量下的水泥稳定碎石在标准养生情况下何时能取出完整芯样;芯样状态分析主要研究芯样的质量状态,芯样质量状态包括两方面内容:一是芯样的完整性,是指芯样的高度应不小于设计厚度的 90%;二是芯样的致密性,是指集料颗粒不会因取芯机扭矩的作用沿试件侧面产生脱落.

3.1 取芯临界劈裂强度

3.1.1 取芯规则

取芯试验从最高水泥剂量(5.5%,质量分数)的试件开始,初次取芯时机为 7 d 龄期,若取不出,则延后 3~4 d 再取,直至能够取出完整芯样;对于相

同级配类型,如果高水泥剂量在养生 7 d 取不出,则低一档水泥剂量的试件初始取芯龄期从第 10 d 开始,以此类推;对第 1 次取出的完整芯样,进行劈裂强度试验. 此外每种配比的试件均在 28 d 龄期进行取芯,以确定芯样的完整性和致密性标准,不同配比取出完整芯样的最短龄期见表 2.

表 2 取出完整芯样的最短龄期

| Tab.2 Minimum age of taking out intact cores |                 |        |        |
|----------------------------------------------|-----------------|--------|--------|
| 级配类型                                         | 4.75 mm 筛孔通过率/% | 水泥剂量/% | 最短龄期/d |
| 级配 1                                         | 30              | 5.5    | 7      |
|                                              |                 | 4.5    | 7      |
|                                              |                 | 3.5    | 14     |
| 级配 2                                         | 40              | 5.5    | 7      |
|                                              |                 | 4.5    | 7      |
|                                              |                 | 3.5    | 17     |
| 级配 3                                         | 50              | 5.5    | 7      |
|                                              |                 | 4.5    | 14     |
|                                              |                 | 3.5    | 17     |

1) 级配 1 取芯状况. 级配 1 不同龄期室内取芯芯样状态如图 2 所示,当水泥剂量不小于 4.5% 时,标养 7 d 均能取出完整芯样,而水泥剂量为 3.5% 时,标养 14 d 后才能取出完整芯样.



图 2 级配 1 不同标养龄期取芯芯样状态

Fig.2 Core states under gradation 1 at different standard curing ages

2) 级配 2 取芯状况. 级配 2 不同龄期室内取芯芯样状态如图 3 所示,当水泥剂量不小于 4.5% 时,标养 7 d 均能取出完整芯样,当水泥剂量 3.5% 时,则需标养 17 d 后才能取出完整芯样.

3) 级配 3 取芯状况. 该级配不同龄期下室内试验取芯状态如图 4 所示,当水泥剂量为 3.5% 时,标养 17 d 后才能取出完整芯样,当水泥剂量为 4.5% 时,标养 14 d 后才能取出完整芯样,当水泥剂量为

5.5% 时,标养 7 d 就能取出完整芯样.

3.1.2 取芯临界状态

定义在标准养生条件下能取出完整致密芯样的最短龄期为取芯临界龄期,对应该龄期芯样的劈裂强度为取芯临界劈裂强度.

1) 取芯临界龄期. 表 3 是 3 种级配类型、3 种水泥剂量下水稳碎石基层材料取芯临界龄期和芯样劈裂强度汇总. 从表 3 中可以看出,随着水泥剂量升

高,能取出完整芯样所需的龄期变短. 在水泥剂量为 5.5%时,3 种级配均能在标养 7 d 时取出完整芯样,当水泥剂量为 4.5%时,级配 3 只有在标养 14 d 时才能钻出完整芯样,当水泥剂量降低至 3.5%时,3 种级配均不能在标养 7 d 时取出芯样. 级配类型对可取出完整芯样的龄期也有很大影响,相同的水泥剂量,级配 1 取芯临界龄期最短,级配 3 取芯临界龄期最长. 可见悬浮-密实型级配基层材料的板体性

不如骨架型级配,因为当水泥剂量相同时,筛孔 4.75 mm通过率越高,比表面积越大,单位体积上的水泥水化物越少,胶浆强度越低,对粗颗粒的约束性差,钻芯过程中出现大量“返浆”和集料颗粒脱落现象,使芯样不完整、破碎和侧壁不致密. 可见,不同配比的水泥稳定碎石取芯的临界龄期不同,不考虑基层设计强度(水泥剂量)和级配类型的区别,统一采用 7 d 龄期取芯来评价施工质量具有不合理性.

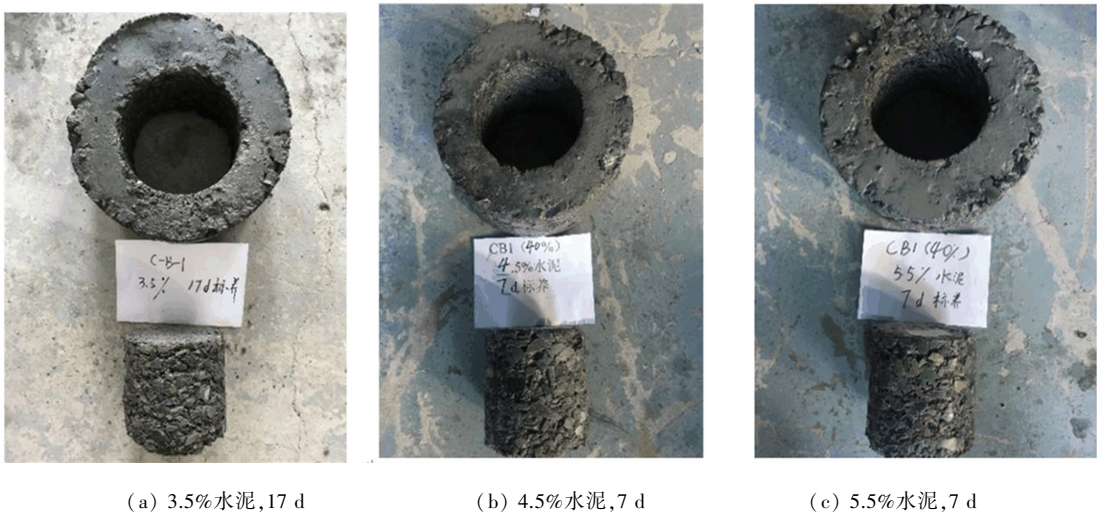


图 3 级配 2 不同标养龄期取芯芯样状态图

Fig.3 Core states under gradation 2 at different standard curing ages



图 4 级配 3 不同标养龄期取芯芯样状态图

Fig.4 Core states under gradation 3 at different standard curing ages

表 3 标准养生下取芯临界龄期与劈裂强度

Tab.3 Critical age of coring and splitting strength under standard curing methods

| 级配类型 | 水泥剂量 3.5% |          | 水泥剂量 4.5% |          | 水泥剂量 5.5% |          |
|------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|      | 临界龄期/d    | 劈裂强度/MPa | 临界龄期/d    | 劈裂强度/MPa | 临界龄期/d    | 劈裂强度/MPa |
| 级配 1 | 14        | 0.37     | 7         | 0.41     | 7         | 0.51     |
| 级配 2 | 17        | 0.35     | 7         | 0.35     | 7         | 0.40     |
| 级配 3 | 17        | 0.39     | 14        | 0.37     | 7         | 0.66     |

2)取芯临界劈裂强度. 由表 3 中劈裂强度数据可知,对于级配 1 而言,水泥剂量为 3.5%和 4.5%

时,级配 1 能取出芯样试件的劈裂强度分别为 0.37 MPa和 0.41 MPa,平均为 0.39 MPa,临界龄期

由 14 d 减少到 7 d;而级配 2 水泥剂量由 3.5%增加到 4.5% 时,能取出芯样试件的劈裂强度均为 0.35 MPa,而临界龄期为由 17 d 减少到 7 d;对于级配 3,当水泥剂量为 3.5%和 4.5%时,取出芯样试件的劈裂强度分别为 0.37 MPa 和 0.39 MPa,平均为 0.38 MPa,临界龄期由 17 d 减少到 14 d. 也就是说,相同级配类型不同水泥剂量下的水泥稳定碎石基层,存在一个能取出完整芯样的临界强度,当水泥稳定碎石基层养生后强度增长到该强度时,即能取出完整芯样. 从上面的分析可知,一般情况下,取芯临界强度只受级配类型影响,级配类型影响强度(取芯临界强度)的大小,而水泥剂量主要影响取出完整芯样的龄期(取芯临界龄期). 3 种级配的取芯临界劈裂强度见表 4. 可以看出级配 2 取芯临界强度最小,是骨架-密实级配效应发挥的结果,但级配效应的影响并不大,差异在 0.04 MPa 左右.

表 4 标准养生下取芯临界劈裂强度

Tab.4 Critical splitting strength of coring under standard curing methods

| 级配类型 | 取芯临界劈裂强度/MPa |           |           |
|------|--------------|-----------|-----------|
|      | 水泥剂量 3.5%    | 水泥剂量 4.5% | 水泥剂量 5.5% |
| 级配 1 | 0.39         | 0.39      | 0.39      |
| 级配 2 | 0.35         | 0.35      | 0.35      |
| 级配 3 | 0.38         | 0.38      | 0.38      |

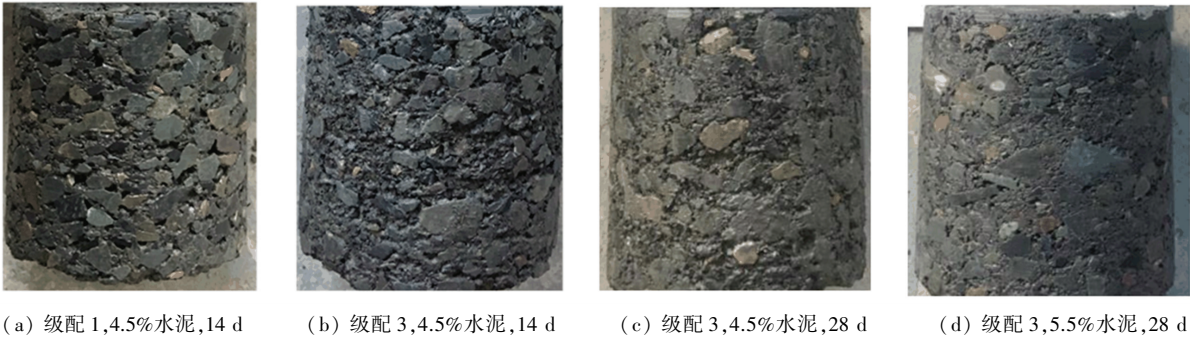


图 5 不同级配和水泥剂量下取芯芯样外观质量对比

Fig.5 Comparison of appearance quality of cores under different gradation types and cement dosages



图 6 芯样侧壁构造深度激光扫描

Fig.6 Depth laser scanning of core side structure

3.2 芯样表现状态分析

级配类型、养生时间和水泥剂量这 3 种因素,对取芯芯样的外观质量有很大的影响. 就级配类型而言,级配 1 粗集料和细集料的比例适当,骨架良好,细集料填充较密实,取出的芯样侧壁平整光滑,细集料脱落少;而级配 3 粗细比失调,细集料多,取芯时,在水和钻头的双重扰动下细集料和粗颗粒均有脱落,导致芯样侧壁不光滑不密实. 相同龄期下二者芯样对比如图 5(a) 和 5(b) 所示. 就养生时间而言,芯样的外观质量对养生时间同样敏感,标养时间不同,芯样侧壁光滑致密性程度也不同,标养 14 d 试件的侧壁比 28 d 的粗糙,完整性差,如图 5(b) 和 5(c) 所示. 就水泥剂量而言,水泥用量越大,胶浆及其裹覆粗集料的强度就越高,即使 4.75 mm 通过率为 50%(级配 3)的水稳碎石,在相同龄期下(标养 28 d),水泥剂量为 5.5%取出的芯样比水泥剂量为 4.5%的芯样更致密、光滑和完整,接近极限状态,如图 5(c) 和 5(d) 所示.

为了定量描述芯样侧壁的构造深度,评估试件的致密性,采用激光构造深度仪对每个芯样侧壁对径扫描 4 条高度线<sup>[13-14]</sup>,扫描试样中部位置,扫描长度 10 cm,步长为 0.5 mm,取 4 次扫描构造深度的平均值作为该芯样侧壁的构造深度,试验过程和检测结果见图 6 和图 7.

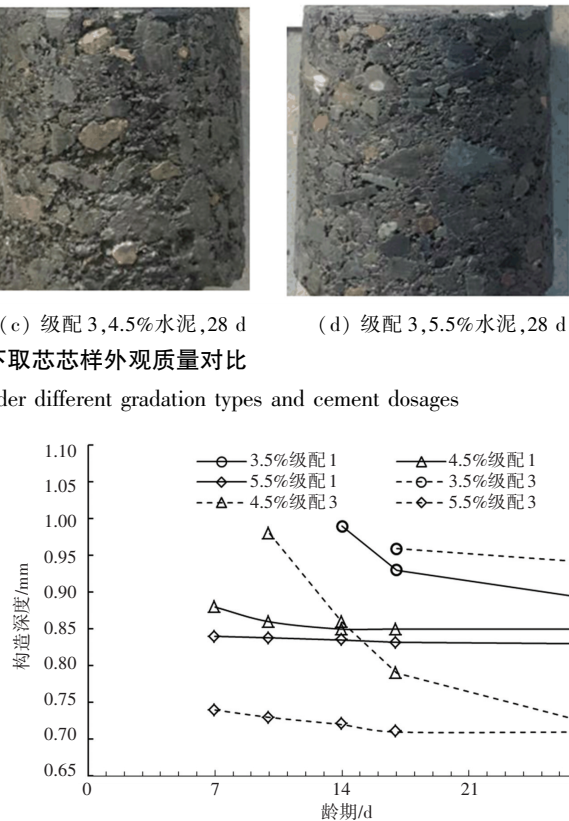


图 7 芯样侧壁构造深度与龄期的关系

Fig.7 Relationship between side structure depth and curing age

由图7显示可见,当标养龄期增加时,芯样侧壁构造深度在减小,芯样的完整和致密性在提高,其原因在于随着龄期的增加,试件的强度增加,集料颗粒抵抗取芯扭矩的能力在增加.但不同的级配具有很大的差异性.就级配1而言,在水泥剂量为3.5%时,构造深度随龄期大幅度减小,在试验龄期范围内,构造深度由1.0 mm减小到0.88 mm,而当水泥剂量增至4.5%和5.5%,构造深度处于稳定状态,随龄期的变化很小,处于0.85 mm左右;而对于级配3来讲,当水泥剂量为3.5%,构造深度一直处于高位,养生龄期的增加对芯样致密性的提升较小;当水泥剂量为4.5%时,构造深度则随龄期的增加呈大幅度下降趋势,在试验龄期范围内,构造深度由0.98 mm下降到0.75 mm,只有在水泥剂量提高到5.5%时,构造深度才大幅度降低并处于稳定状态,构造深度在0.72~0.75 mm之间,芯样的致密性才大幅度提高.

当水泥稳定碎石养生到28 d后,其强度基本稳定,取芯过程中侧壁“脱粒”现象也不再变化,因此,定义龄期为28 d时取芯芯样侧壁的构造深度为极限构造深度 $h_{\min}$ ,代表该配比芯样最光滑致密状态,该配比临界龄期时芯样侧壁的构造深度为 $h$ ,图8为不同级配芯样 $h_{\min}$ 、 $h$ 与水泥剂量的关系,从图中可以看出,对于骨架型级配1,当水泥剂量大于4.5%时,芯样侧壁的构造深度 $h$ 基本上与极限构造深度 $h_{\min}$ 相当,即7 d取出的芯样达到了致密性的要求;对于悬浮-密实型级配3,只有水泥剂量达到5.5%, $h$ 才与 $h_{\min}$ 基本相当,即对于该级配,只有水泥剂量到5.5%以上,才能取出致密性芯样.以上的研究说明,对于骨架型和悬浮型级配,若想在7 d龄期能取出致密性芯样,水泥剂量必须分别达到4.5%和5.5%以上,否则必须增加养生龄期.

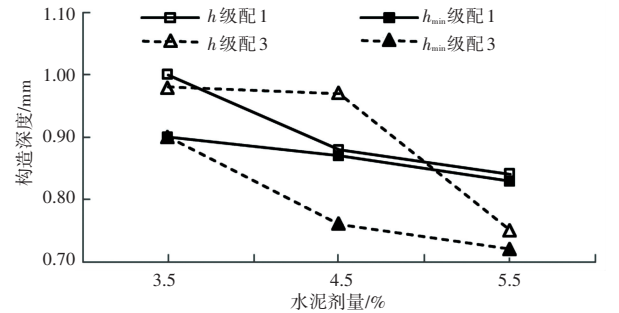


图8 不同级配芯样 $h_{\min}$ 、 $h$ 与水泥剂量的关系

Fig.8 Relationship between  $h_{\min}$ ,  $h$ , and cement dosage under different gradation types

4 水泥稳定碎石基层整体性评价时机的确定

建立不同养生路径下成熟度与劈裂强度的关系,根据取芯临界劈裂强度,确定取芯临界成熟度,

进而确定水泥稳定碎石基层整体性评价时机.

4.1 水泥稳定碎石成熟度与劈裂强度的关系

在级配类型一定时,水泥稳定碎石强度增长主要受养生龄期、温度和湿度3个因素的影响,在湿度恒定时,前两个因素可以采用成熟度单一指标表示.为研究水泥稳定碎石试件养生成熟度与劈裂强度的关系,对3种养生路径下(温度和龄期的组合)的试件进行劈裂强度试验.养生路径为:湿度 $\geq 95\%$ ,养生温度为15、20、25℃和养生时间为7~28 d;级配类型3种,水泥剂量均为4.5%.成熟度的计算基准温度取-10℃<sup>[15]</sup>,根据计算的成熟度,按级配类型绘制成熟度 $M_s$ 与劈裂强度 $R_i$ 的关系,如图9所示.

采用双曲线函数建立成熟度 $M_s$ 与劈裂强度 $R_i$ 的关系,3个级配的关系方程参数见表5,相关系数 $R^2$ 均大于0.99,说明双曲线函数适用于水泥稳定碎石 $R_i$ 和 $M_s$ 之间关系的表达;对比反应速率常数 $k$ 可知,级配2的 $k$ 值最大,说明其强度增长速度最快,其次是级配1,而级配3的最慢;从极限劈裂强度来看,骨架型的级配1极限强度最大,在0.38~0.70 MPa之间变化,而悬浮型的级配3的最小,在0.27~0.53 MPa之间变化.

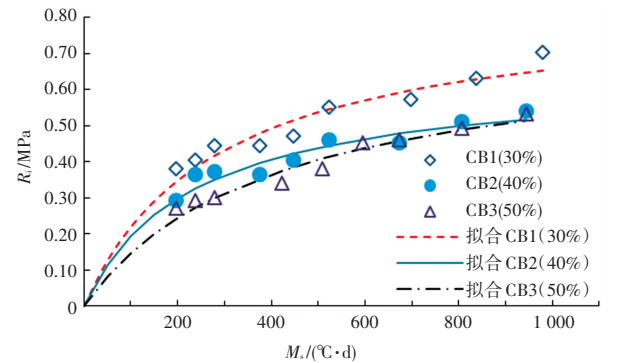


图9 不同养生路径下水稳试件劈裂强度与 $M_s$ 的关系

Fig.9 Relationship between splitting strength and  $M_s$  under different curing paths

表5 不同级配劈裂强度与 $M_s$ 双曲线方程拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of splitting strength and  $M_s$  hyperbola equation

| 级配类型 | $R_u$ | $k$     | $M_0$ | $R^2$ |
|------|-------|---------|-------|-------|
| CB1  | 0.843 | 0.003 5 | 0     | 0.99  |
| CB2  | 0.644 | 0.004 2 | 0     | 0.99  |
| CB3  | 0.728 | 0.002 5 | 0     | 0.99  |

4.2 现场施工质量评价(取芯)的成熟度标准

上面的研究表明不同养生路径下水稳碎石强度达到取芯临界强度时,可以取出完整芯样,因此可以把不同配比的取芯临界劈裂强度输入成熟度 $M_s$ 与劈裂强度 $R_i$ 的回归公式,计算出不同配比水泥稳定碎石基层的取芯临界成熟度,用取芯临界成熟度确定水泥稳定碎石基层的取芯龄期.

把表 4 中 3 种级配的取芯临界强度代入表 5 的方程参数,可以计算出 3 种级配在 4.5%水泥剂量下的取芯临界成熟度,见表 6. 由于没有水泥剂量为 3.5%劈裂强度与成熟度的回归方程,其取芯临界成熟度可通过表 3 取芯试验数据确定,而 5.5%水泥剂量的水泥稳定碎石,在 7 d 均能取出完整芯样,取芯临界成熟度按照 7 d 计算,略偏于保守. 根据表 6 取芯临界成熟度的标准,结合养生的温度,可以反算出合理的起始取芯龄期.

表 6 不同级配取芯临界成熟度指标

Tab. 6 Coring critical maturity under different gradation types

| 级配类型 | 取芯临界成熟度 $M_s / (^\circ\text{C} \cdot \text{d})$ |           |           |
|------|-------------------------------------------------|-----------|-----------|
|      | 水泥剂量 3.5%                                       | 水泥剂量 4.5% | 水泥剂量 5.5% |
| CB1  | 420                                             | 245       | 210       |
| CB2  | 510                                             | 280       | 210       |
| CB3  | 510                                             | 440       | 210       |

从表 6 中可以看出,不同配比下的取芯临界成熟度差别很大,最大的为  $510\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,最小的为  $210\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,前者为后者的 2.4 倍,即相同的养生稳定下,可取芯的龄期相差 1.4 倍,因此,规范给出的固定龄期取芯法则具有一定的可探讨性,应采用固定强度法则,根据不同配比的取芯临界强度,确定其取芯临界成熟度,进而确定取芯龄期,若在此龄期下取不出完整芯样,则说明水泥稳定碎石基层施工质量存在缺陷,责令施工单位返工处理,采用该方法,可以更加科学客观地评价基层的施工质量.

5 结 论

1) 水泥稳定碎石的水泥剂量和级配类型不同,能取出完整芯样所需的龄期不同,当水泥剂量为 3.5%时,3 种级配类型均不能在 7 d 取出完整芯样;级配类型不同,芯样致密性有很大差异,相同水泥剂量下骨架型级配芯样致密性优于悬浮型级配.

2) 水泥稳定碎石取芯的完整性存在临界强度,通过试验提出了不同配合下的取芯临界强度标准,取芯临界强度一般只受级配类型影响,而与水泥剂量无关,级配影响取芯临界强度的大小,水泥剂量影响取出完整芯样的龄期.

3) 提出了基于水泥稳定碎石取芯临界成熟度确定整体性质量评价时机的方法,其核心是固定强度原则.

参考文献

[1] 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

[2] 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

[3] 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

[4] 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

[5] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure[J]. Magazine of Concrete Research, 1951,2(6):127

[6] 中华人民共和国交通运输部. 公路水泥混凝土路面施工技术细则: JTG/T F30—2014[S]. 北京: 人民交通出版社股份公司, 2014  
Ministry of Transport of the People’s Republic of China. Technical guidelines for construction of highway concrete pavement: JTG/T F30—2014[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd.,2014

[7] 权磊,田波,冯德成,等. 基于成熟度理论的水泥混凝土早期强度预测模型研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012(2):35  
QUAN Lei, TIAN Bo, FENG Decheng, et al. Research on early strength prediction model of cement concrete based on maturity theory[J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Edition), 2012(2):35

[8] 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

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

[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] 钮长仁,王剑,朱卫中. 广义度时积概念的提出及其与冻结损伤关系的探讨[J]. 低温建筑技术, 2001(3):5  
NIU Changren, WANG Jian, ZHU Weizhong. Discussion on generalized maturity and the relationship with early-age frost damage[J]. Low Temperature Architecture Technology,2001(3):5

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程冬期施工规程: JGJ/T 104—2011[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2011  
MOHURD. Specification for winter construction of building engineering: JGJ/T 104—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011

[13] 蒋超.水泥混凝土路面纹理构造表征技术研究[D].西安:长安大学,2009  
JIANG Chao. Research on the evaluation methods for concrete pavement texture[D]. Xi’an: Chang’an University, 2009

[14] 周兴林,蒋难得,肖旺新,等. 基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法[J].中国公路学报, 2014, 27(3):11  
ZHOU Xinglin, JIANG Nande, XIAO Wangxin, et al. Measurement method for mean texture depth of asphalt pavement based on laser vision[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(3):11

[15] MOHSEN J P, ROACH B L, KESSINGER D T. Maturity method applied to highway construction[J] Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004,1900(1):79

(编辑 魏希柱)