

文章编号:1671-8879(2018)03-0034-09

# 植石水泥混凝土路面成型工艺试验

高振鑫<sup>1,2</sup>, 郭平<sup>3</sup>, 李俊<sup>4</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 陕西省交通运输厅, 陕西西安 710075; 3. 西安公路研究院, 陕西西安 710065; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:**为了研究植石水泥混凝土表面纹理与碎石压入效果的关系, 针对压入时间、压入深度与压入荷载等碎石压入效果关键成型工艺控制参数, 采用路面材料强度试验机模拟植石水泥混凝土室内成型工艺, 分析不同因素对成型工艺参数的影响。首先选取水泥混凝土、水泥砂浆、水泥净浆 3 种拌合物, 分别测试不同压入条件下的压入荷载, 分析拌合物材料组成对成型工艺参数的影响。然后根据不同稠度水泥混凝土拌合物的初凝时间, 推荐了碎石的最迟压入时间, 并在不同的压入深度条件下分析混凝土稠度、碎石粒径、碎石撒布面积、压入时间等因素对压入荷载的影响, 并推荐植石水泥混凝土适宜的成型工艺参数。同时通过计算压入荷载的极差, 分析不同因素对成型工艺参数影响程度的差异。试验结果表明: 植石水泥混凝土碎石压入荷载主要来自于水泥混凝土拌合物中粗集料的阻碍作用, 此外细集料影响了碎石与水泥混凝土拌合物接触界面的摩擦特性, 也对其产生一定的影响; 水泥混凝土拌合物流动性越好, 碎石越易压入, 但是流动性过大时碎石易被完全压入, 推荐采用稠度为塑性水泥混凝土作为植石技术的嵌入层材料; 碎石宜采用单粒径, 其压入荷载与碎石撒布面积成正相关关系, 碎石撒布面积过小无法形成丰富的表面纹理, 碎石撒布面积过大则易脱落, 撒布面积宜为 60%~70%; 压入时间过迟, 水泥混凝土早期强度逐渐形成, 碎石压入可能会造成水泥混凝土塑性破坏, 压入时间不宜超过 75 °C·h; 混凝土稠度对植石水泥混凝土碎石压入荷载的影响最为突出, 碎石粒径与压入时间次之, 碎石撒布面积影响最小。

**关键词:**道路工程; 水泥混凝土; 植石技术; 成型工艺; 压入时间; 凝结时间; 混凝土稠度

**中图分类号:** U416.21 **文献标志码:** A

## Experimental on molding process for chip-sprinkling cement concrete pavement

GAO Zhen-xin<sup>1,2</sup>, GUO Ping<sup>3</sup>, LI Jun<sup>4</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Transport of Shaanxi Province, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Xi'an Highway Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Aimed at the relationship between the surface texture of chip-sprinkling cement concrete and the pressing-in effect of crushed aggregates, the key molding process parameters, including the pressing-in time, pressing-in depth, and pressing-in load, which control the pressing-in effect of crushed aggregates, were studied. The road material strength tester was

收稿日期: 2017-12-29

基金项目: 陕西省交通运输厅交通科研项目(09-05K)

作者简介: 高振鑫(1975-), 男, 陕西榆林人, 陕西省交通运输厅高级工程师, 长安大学工学博士研究生, E-mail: gaozhenxin1975@sina.com.

used to simulate a laboratory molding process of chip-sprinkling cement concrete, and the effects of different factors on the molding process parameters were analyzed. Three kinds of mixes, including cement concrete, cement mortar, and cement paste, were chosen. Moreover, pressing-in loads were measured, respectively, under different pressing-in conditions. The latest pressing-in time of the crushed aggregates was recommended on the basis of the initial setting times of the cement concrete mix with different consistencies, and the effects of certain factors, such as concrete consistencies, aggregate particle sizes, aggregate spreading areas, and pressing-in time, on pressing-in loads, were analyzed under different pressing-in depths. The appropriate molding process parameters of chip-sprinkling cement concrete were recommended. The effect differences of different factors on the molding process parameters were analyzed by calculating appropriate ranges. The results show that the impeding effects of coarse aggregate in the cement concrete play a major role in pressing-in load sources. Fine aggregate affects the friction characteristics of the contact interface between the crushed aggregate and cement concrete, and the friction resistance has a certain effect on pressing-in load. The better the workability of cement concrete, the more easily implanted it is for crushed aggregates; however, crushed aggregates are easily entirely implanted if the workability is too large. The cement concrete with a plasticity consistency is recommended as the implanted layer material for chip-sprinkling technology. The crushed aggregates of chip-sprinkling technology should be single particle size. The pressing-in loads positively correlate with the spreading area of the crushed aggregates. A spreading area that is too small could result in bad surface texture, and a spreading area that is too large could result in crushed aggregates falling off. The spreading area should be distributed within a range of 60% to 70%. A pressing-in time that is too late could result in the plastic failure of the cement concrete, due to the gradual forming of early strength. The pressing-in time should not exceed 75 °C · h. Cement concrete consistency is the most prominent influence on molding process parameters for chip-sprinkling cement concrete, followed by the effects of the crushed aggregate particle size and the pressing time. The crushed aggregate spreading area has a minimal impact on molding process parameters. 4 tabs, 9 figs, 27 refs.

**Key words:** road engineering; cement concrete; chip-sprinkling technology; molding process; pressing-in time; setting time; concrete consistence

## 0 引言

传统的水泥混凝土在振捣成型之后会在表面形成一层浮浆,浮浆层的强度、耐磨性等较差,在环境和外力作用下易发生破坏或磨损,因此水泥混凝土路面的抗滑性能及抗滑耐久性一直是关注的焦点<sup>[1]</sup>。水泥混凝土桥面的表面纹理状况是导致桥面铺装结构发生层间失稳病害的原因之一。水泥混凝土路面作为刚性路面,行车噪声大也是影响其推广应用的制约因素之一。通过在水泥混凝土表面构造丰富的纹理,可以改善水泥混凝土路面的抗滑、降噪性能,也可以提高水泥混凝土桥面沥青铺装结构的层间黏结性能<sup>[2-3]</sup>。

在传统的水泥混凝土表面纹理技术中,制毛法、

制槽法最为常用,通过该方法可以在水泥混凝土表面形成良好的初始表面纹理,但是由于浮浆层的强度、耐磨性较差,表面纹理的持久性较差<sup>[4]</sup>。Ahmed等针对北美197条水泥混凝土路面进行长期观测,分析了8种表面纹理水泥混凝土路面的抗滑性能,认为锯齿或刻槽水泥混凝土路面抗滑性能较好,但其也存在抗滑性能和耐久性差的问题<sup>[5]</sup>。Chon等采用加速磨耗试验对刻槽水泥混凝土路面的抗滑性能进行研究,建立了抗滑性能衰减模型<sup>[6]</sup>。多孔水泥混凝土通过将雨水下渗至路面结构内部再横向排出,具有优异的雨天抗滑性能,而且多孔特性使其具有良好的降噪功能,但是其空隙易堵塞、抗冻性以及结构强度等问题一直未能得到良好解决<sup>[7-9]</sup>。Jongprateep等采用扫描电镜分析了铝粉对多孔水泥混凝土微观结构的影

响,推荐掺入质量分数为0.15%的铝粉以提高多孔水泥混凝土的结构强度<sup>[10]</sup>。露石水泥混凝土具有良好的宏观和微观构造,是一种水泥混凝土表面纹理新技术<sup>[11]</sup>。韩森等介绍了露石水泥混凝土的材料选择、冲洗时间、双层摊铺等关键技术,并研究了其抗滑、降噪、反光等路用性能<sup>[12-13]</sup>。徐鸥明等将露石技术应用于水泥混凝土桥面,并分析了桥面铺装结构的层间黏结性能<sup>[14-16]</sup>。

植石是基于嵌入碎石工艺的水泥混凝土表面纹理处理新技术,其通过在新浇水泥混凝土上撒布一层碎石,并使用专用机械设备按照设定深度压入,从而使水泥混凝土表面纹理丰富化<sup>[17-18]</sup>。比利时最先开展植石技术研究,认为碎石粒径应为14~20或10~14 mm,磨光值应不低于50,推荐碎石撒布量为6~8 kg/m<sup>2</sup>,并建议碎石撒布前应润湿,从而与混凝土面层黏结良好,也研发了专用植石机,修筑了植石水泥混凝土路面达数十万平方米,植石技术在美国、英国和法国均有应用,但是由于碎石撒布均匀性问题,并未得到广泛的推广应用<sup>[19-22]</sup>。将植石技术应用于水泥混凝土路面时,可以在路表形成丰富的纹理,有利于减小轮胎/路面噪声<sup>[23]</sup>。Ren等采用洛杉矶磨耗试验机分析了植石水泥混凝土抵抗磨耗掉粒的能力,并与光面水泥混凝土进行对比,认为植石水泥混凝土还具有良好的抗盐侵蚀能力,并推荐了抗磨耗性能较佳的碎石粒径、碎石撒布面积、碎石压入深度等植石参数<sup>[24]</sup>。考虑到碎石撒布均匀性和嵌入效果不十分理想,中国开展了将植石技术应用于水泥混凝土桥面铺装结构的研究。任万艳等通过开展植石水泥混凝土桥面沥青铺装结构层间抗剪性能研究,推荐了适宜的植石参数,并与传统表面纹理的桥面铺装结构进行对比,分析了植石桥面铺装结构在不同荷载和环境作用下的层间抗剪特性<sup>[25-26]</sup>。

综上所述,目前国内外已开展了将植石技术应用于水泥混凝土路面结构和桥面铺装结构的前期研究工作,但是关于植石水泥混凝土成型工艺研究的内容仍较少。为此,本文通过室内试验分析了混凝土材料组成、混凝土稠度、碎石粒径、碎石撒布面积等对植石水泥混凝土成型工艺参数的影响,推荐了适宜的成型工艺参数,并研究了其不同影响因素的差异。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料

水泥采用冀东水泥厂生产的PO 42.5普通硅

酸盐水泥,其主要技术指标如表1所示。水泥混凝土采用的粗集料为石灰岩,细集料为河砂,拌合水为自来水。压入碎石为辉绿岩,选取(9.5 mm, 13.2 mm)的单粒径碎石(以下简称9.5 mm碎石)、[13.2 mm, 16 mm)的单粒径碎石(以下简称13.2 mm碎石)2个粒径级别。以上原材料均能满足《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014)的技术要求。

表1 水泥主要技术性质

Tab. 1 Main technical properties of cement

指标	检测结果	规范值	试验方法
细度(80 μm筛余)/%	1.2	≤10	T 0502—2005
标准稠度用水量/%	28.9	≤30	T 0505—2005
凝结时间/h	初凝时间	≥0.75	
	终凝时间	≤10	
安定性(雷氏法)/mm	0.5	≤5	T 0553—2005 T 0558—2005
强度/MPa	3 d 抗压强度	≥17.0	
	28 d 抗压强度	≥42.5	
	3 d 抗折强度	≥4.0	
	28 d 抗折强度	≥7.0	

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 水泥混凝土初凝时间试验

水泥混凝土达到初凝时间后,拌合物开始失去塑性,此时由于水化反应持续进行,浆体和集料之间开始形成网状结构,因此碎石压入应在水泥混凝土初凝时间之前,以免造成水泥混凝土结构破坏。采用《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTGE30—2005)中T 0527—2005水泥混凝土拌合物凝结时间试验方法,确定不同稠度混凝土拌合物的初凝时间。但是与规范相比,本文试验在试样制备方法上进行改进,即取混凝土拌合物为代表样,用4.75 mm筛尽快地筛出砂浆,再经人工翻拌后,装入一个试模。考虑到碎石在实际压入过程中,混凝土拌合物中粗集料会对碎石压入产生极大的影响:一方面粗集料阻碍碎石的压入,另一方面在压入过程中粗集料向四周推挤,可能会造成混凝土拌合物的隆起破坏。因此,采用混凝土拌合物测得的初凝时间更具实际施工的指导性,故本文试验不再筛出砂浆,而是直接采用混凝土拌合物进行初凝时间试验,其他试验条件均与规范试验方法保持一致<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.2 碎石压入试验

植石水泥混凝土的关键成型工艺参数包括压入时间、压入深度与压入荷载。压入荷载由路面材料强度试验仪测定。水泥混凝土自加水拌合开始计时,至压入碎石计时结束,所经历的时间即为压入时间,考虑到碎石压入效果与压入时间、环境温度均有

关系,本文采用邵氏成熟度指标( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ )进行控制,可由式(1)计算<sup>[27]</sup>

$$M = \sum (T_i + 10)t_i \quad (1)$$

式中: $M$ 为压入时间,即成熟度( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ); $t_i$ 为第 $i$ 阶段的养生时间(h); $T_i$ 为 $t_i$ 时间内平均养生温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

压入深度参数由碎石层的压入深度与初始高度的比值,即压入深度比 $H$ 控制,该比值最大为1,即将碎石全部压入水泥混凝土内部。结合路面材料强度试验机加载平台的空间大小,采用的试件尺寸为15 cm(长) $\times$ 15 cm(宽) $\times$ 10 cm(高)。试验过程中,压入深度由百分表经换算测得;压入荷载由测力环经换算测得,如图1所示。

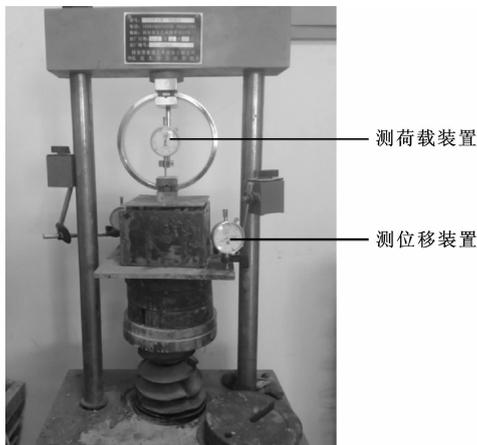


图1 碎石压入试验设备

Fig. 1 Crushed aggregate pressing-in test equipment

### 1.3 试验设计

#### 1.3.1 混凝土材料组成对成型工艺参数的影响

为了分析混凝土拌合物中细集料或粗集料存在对碎石压入的影响,采用水泥净浆、水泥砂浆以及水泥混凝土分别制备植石水泥混凝土试件。通过测定试件在成型过程中的压入荷载,分析其材料组成对植石水泥混凝土成型工艺参数的影响。水泥混凝土是由水、水泥、细集料以及粗集料拌制而成的材料,为了减少各组成材料用量差异对压入荷载的影响,以水泥混凝土配合比为基准,水泥砂浆去掉粗集料,其他组成材料用量保持不变;水泥净浆扣除粗集料和细集料,其他组成材料用量保持不变。

#### 1.3.2 最迟压入时间的确定

水泥与拌合水接触之后,水化反应就一直在进行,混凝土拌合物随之硬化,且强度也在逐渐形成。碎石压入过早时,易被完全压入水泥混凝土而无法

形成表面纹理,而且混凝土拌合物表面泌水蒸发后会使碎石与水泥混凝土的接触界面形成缝隙,造成碎石黏结不良、易脱落。碎石压入过迟时,水泥混凝土已发生凝结现象,一方面需要更大的压入荷载才能达到期望的压入深度,另一方面强制压入可能会破坏初步形成的水泥混凝土结构,造成水泥混凝土的塑性破坏<sup>[17]</sup>。适宜压入时间时的碎石压入效果如图2所示。

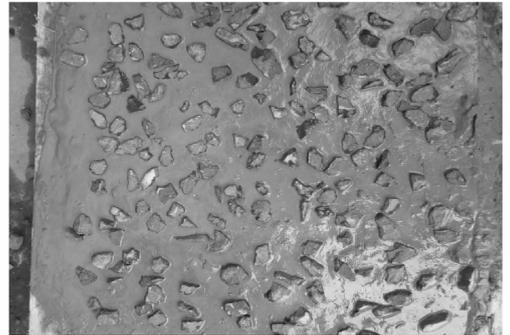


图2 适宜压入时间时的碎石压入效果

Fig. 2 Pressing-in effect of crushed aggregate in appropriate pressing time

根据水泥混凝土的稠度分级,选取干稠、低塑、塑性、流态4个稠度的水泥混凝土,即对应采用的坍落度范围分别为20~30、50~60、100~120、160~170 mm,根据其初凝时间的分布特点确定植石水泥混凝土成型的最迟压入时间。

#### 1.3.3 成型工艺参数的影响因素分析

采用正交试验设计方法确定成型工艺参数影响因素分析的试验方案。首先,分析不同水平下各因素对植石水泥混凝土成型工艺参数的影响,然后通过计算其压入荷载的极差,确定各因素对植石水泥混凝土成型工艺参数的影响效果。正交试验因素和水平如表2所示。表2中, $m_{9.5}$ 为9.5 mm碎石的质量, $m_{13.2}$ 为13.2 mm碎石的质量, $m_{9.5}:m_{13.2}$ 即为2种粒径碎石质量的比值。

表2 正交试验因素和水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal experiment

因素水平	影响因素			
	混凝土稠度	碎石粒径 ( $m_{9.5}:m_{13.2}$ )	碎石撒布 面积/%	压入时间/ ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ )
1	干稠	1:0	50	15
2	低塑	0:1	60	45
3	塑性	1:1	70	60
4	流态	2:1	80	75

## 2 混凝土材料组成对成型工艺参数的影响

碎石压入过程中受到水泥混凝土中粗、细集料阻碍,可能会对成型效果产生不利影响。水泥净浆、水泥砂浆、水泥混凝土在不同的压入时间、压入深度条件下压入荷载的试验结果如图3~图5所示。

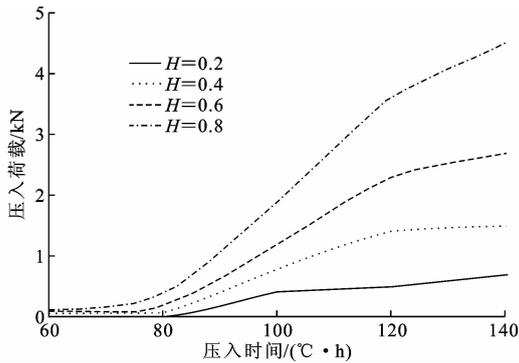


图3 水泥净浆压入试验结果

Fig. 3 Pressing-in test results for cement paste

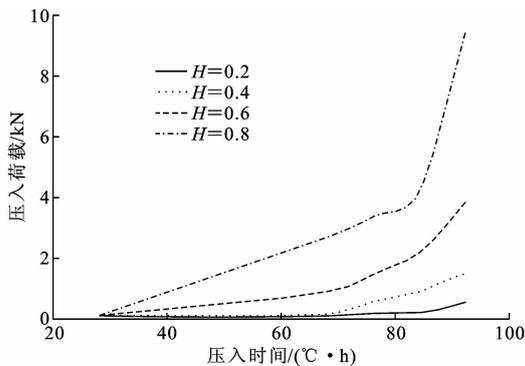


图4 水泥砂浆压入试验结果

Fig. 4 Pressing-in test results for cement mortar

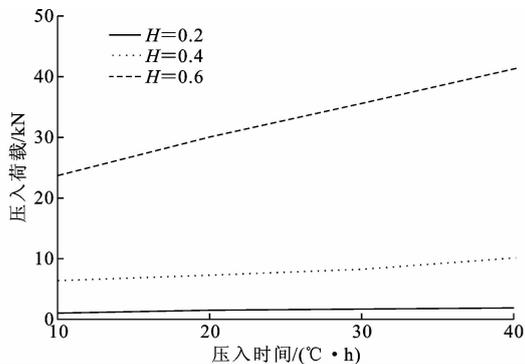


图5 水泥混凝土压入试验结果

Fig. 5 Pressing-in test results for cement concrete

由图3~图5可知,在相同的压入时间和压入深度条件下,碎石压入水泥混凝土所需的荷载远大于水泥砂浆和水泥净浆。这表明水泥混凝土中粗集

料阻碍,以及碎石与水泥混凝土接触界面的摩擦特性(主要受细集料影响)会对碎石压入产生极大的影响,且粗集料起到主导作用<sup>[17]</sup>。此外水泥混凝土材料组成不同,其水化反应的进程亦不同,由此带来的强度差异同样会对碎石压入产生一定影响。

对于3种材料组成的拌合物,压入深度增大均会造成压入荷载增大。主要原因在于:碎石压入过程中所受摩阻力与接触面积呈正相关,压入深度越大,碎石与水泥混凝土拌合物的接触面积越大,压入荷载亦越大;水泥混凝土拌合物在压入过程中的泌水现象使得拌合物更加密实,且缺少自由水的润滑作用,导致碎石压入更加困难。混凝土材料组成不同,压入过程中的泌水程度也不同,水泥混凝土拌合物压入过程中的泌水现象最为明显。因此需要结合混凝土材料组成的情况动态调整碎石的成型工艺。

此外对于水泥混凝土,当压入深度比  $H$  达到 0.6 时,碎石已经很难继续压入,尤其是压入时间过迟时,压入荷载接近了测力环最大量程,故其后续试验也采用  $H=0.6$  时的最大压入深度。碎石压入深度直接影响到植石水泥混凝土的表面纹理,因此选取适宜的碎石压入深度至关重要,需要结合植石工艺的用途(应用于混凝土桥面铺装结构或混凝土路面结构),并且综合考虑植石技术的抗滑、降噪等路用性能以及耐磨耗性能、抗冲击性能等力学性能确定。

## 3 最迟压入时间的确定

为了验证成熟度作为压入时间控制指标的适用性,本文对于不同稠度的水泥混凝土均设计了2组试验:1组置于标准养生室养生,1组置于室外自然环境养生作为对照。不同稠度的水泥混凝土初凝时间测定结果如表3所示。

表3 不同稠度水泥混凝土初凝时间

Tab. 3 Initial setting time for cement concrete with different consistence  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$

养生条件	不同稠度混凝土初凝时间			
	干稠	低塑	塑性	流态
标准养生	75~80	90~95	110~115	120~125
自然养生	70~75	85~90	105~110	115~120

由表3可知:不同稠度水泥混凝土的初凝时间也不同,其中干稠、低塑、塑性、流态的水泥混凝土初凝时间分别在75~80、90~95、110~115、120~125  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,混凝土拌合物初凝时间主要受水化反应进程和坍落度经时损失影响。标准养生和自然养生

下相同稠度水泥混凝土的初凝时间相差不大,表明成熟度可以作为不同工况下植石水泥混凝土压入时间的控制指标。

保持水泥混凝土配制强度一致,通过改变水泥砂浆比例可以调整其流动性。在不使用外加剂的前提下,水泥混凝土拌合物坍落度越大,水泥砂浆的比例越大,较多的自由水导致其水化进程延缓,一般坍落度大则坍落度经时损失较小。因此流动性越好的混凝土拌合物初凝时间亦越大。

为了便于分析不同稠度混凝土拌合物的成型工艺参数差异,并结合工程施工时间的实际情况,本文将压入时间上限选为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ,即认为不同稠度的混凝土拌合物碎石的压入时间不宜超过  $75\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 。

## 4 成型工艺参数的影响因素

### 4.1 混凝土稠度

不同的压入深度下混凝土拌合物稠度与压入荷载之间的关系如图6所示。

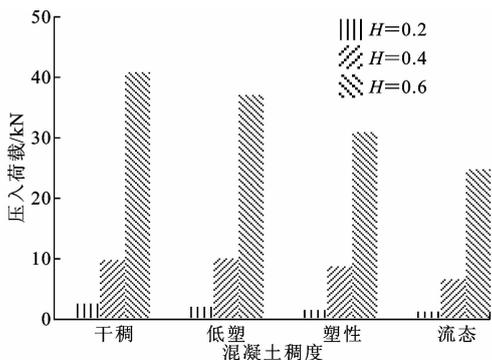


图6 混凝土稠度对压入荷载的影响

Fig. 6 Effects of concrete consistency on pressing-in loads

由图6可知,不同稠度的混凝土拌合物将碎石压入设定深度所需的压入荷载差异较大,且压入深度越大差异越明显。压入深度比  $H=0.2$  时干稠混凝土的碎石压入荷载为  $2.5\text{ kN}$ ,流态混凝土的压入荷载为  $1.4\text{ kN}$ 。当压入深度比  $H$  增大至  $0.6$  时,干稠混凝土的压入荷载为  $40.8\text{ kN}$ ,流态混凝土的压入荷载只有  $24.8\text{ kN}$ 。

流动性越好的水泥混凝土在相同的压入时间和压入深度下碎石压入所需的荷载越小,主要是因为压入过程中水泥混凝土可以适当流动,其对碎石压入的阻碍作用减小,但流动性过大会导致压入荷载过小,这对碎石压入是不利的。若碎石压入时间稍早,水泥混凝土表面撒布的碎石极有可能被全部压入水泥混凝土内部,从而无法形成丰富的表面纹理。

水泥混凝土流动性较差时可塑性也相对较差,这增加了碎石压入的难度,而且碎石压入也可能造成水泥混凝土结构的塑性破坏。综合考虑,本文推荐采用稠度为塑性的水泥混凝土作为植石技术的下承层材料。

### 4.2 碎石粒径

不同的压入深度下碎石粒径与压入荷载之间的关系如图7所示。

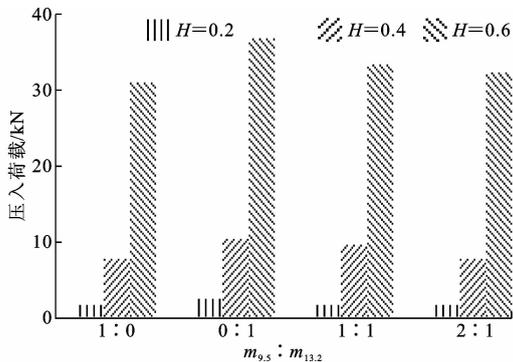


图7 碎石粒径对压入荷载的影响

Fig. 7 Effects of crushed aggregate particle size on pressing-in loads

由图7可知,碎石粒径对植石水泥混凝土压入荷载同样影响显著,当采用相同的压入深度时,较易压入的碎石粒径为  $[9.5\text{ mm}, 13.2\text{ mm})$ ,较难压入的碎石粒径为  $[13.2\text{ mm}, 16\text{ mm})$ ,复掺碎石压入难度处于二者之间。水泥混凝土中粗集料阻碍作用对碎石压入荷载的贡献最大,小粒径碎石颗粒与水泥混凝土的接触面积相对较小,因此在压入过程中受到粗集料阻碍作用的可能性也较低。考虑到复掺碎石的颗粒大小相差较大,对碎石压入效果不利,不推荐采用复掺碎石,并基于不同的功能需求,推荐植石水泥混凝土路面采用  $9.5\text{ mm}$  的单粒径碎石,推荐植石水泥混凝土桥面采用  $13.2\text{ mm}$  的单粒径碎石<sup>[25-26]</sup>。

### 4.3 碎石撒布面积

不同的压入深度下碎石撒布面积与压入荷载之间的关系如图8所示。

由图8可知,当压入深度相同时,压入荷载与碎石撒布面积成正相关关系,但是不同碎石撒布面积之间的差异并不明显。碎石在压入初期的压入荷载主要来自于粗集料的阻碍作用,考虑到单颗粒碎石与水泥混凝土接触面积较小,因此在压入过程中,不同撒布面积下受到粗集料阻碍的颗粒数量可能相差不大,所以碎石撒布面积对压入荷载虽存在影响,但并不显著。考虑到碎石撒布较少时无法形成丰富的表面纹理,若碎石撒布面积过大,施工过程中碎石易

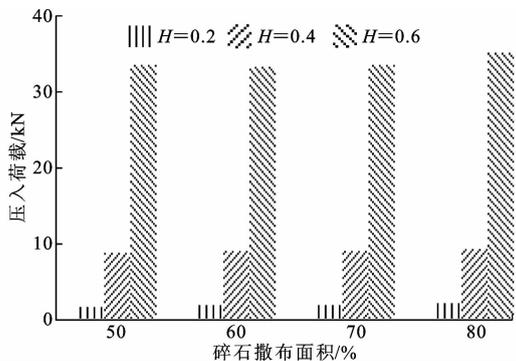


图8 碎石撒布面积对压入荷载的影响

Fig. 8 Effects of crushed aggregate spreading area on pressing-in loads

堆积,施工效果很难得到保证,因此推荐适宜的碎石撒布面积为60%~70%。

#### 4.4 压入时间

不同的压入深度下压入时间与压入荷载之间的关系如图9所示。

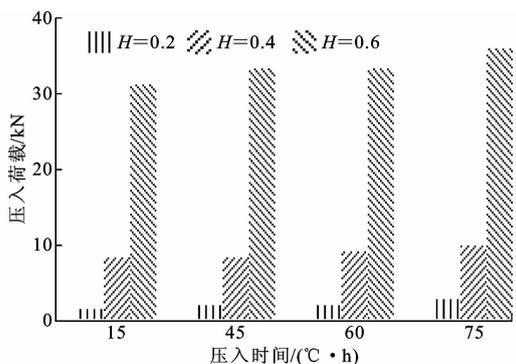


图9 压入时间对压入荷载的影响

Fig. 9 Effects of pressing time on pressing-in loads

由图9可知,当采用相同的压入深度时,压入荷载与压入时间同样成正相关关系。这是因为随着压入时间的延后,水泥混凝土的坍落度不断损失,混凝土拌合物的流动性和可塑性均变差;此外随着水泥混凝土压入时间延后,其早期强度逐渐增长,亦会造成压入荷载增大。对于本文推荐采用的塑性水泥混凝土,虽然其初凝时间约为110 °C·h,考虑到碎石压入需要耗费一定的时间,成型时间需要考虑一定的富余度,以免压入过迟导致无法成型植石水泥混凝土,因此推荐压入时间不宜超过75 °C·h。

#### 4.5 压入荷载极差分析

不同因素对压入荷载试验结果的影响程度可由压入荷载极差表征。各影响因素的压入荷载极差越大表明对试验结果影响程度越大,通过对其压入荷载极差进行排序,可以用于区分不同因素的影响主次<sup>[25]</sup>。通过对不同影响因素下植石水泥混凝土成

型工艺参数的压入荷载正交试验结果进行压入荷载极差计算,分析不同影响因素对成型工艺参数的影响程度,如表4所示。

表4 正交试验结果的压入荷载极差分析

Tab. 4 Range analysis of orthogonal experiment results

压入深度 比 H	不同因素下的压入荷载极差/kN			
	混凝土稠度	$m_{9.5} : m_{13.2}$	碎石撒布面积	压入时间
0.2	1.1	0.8	0.4	1.2
0.4	3.4	2.5	0.4	1.7
0.6	16.0	5.9	1.9	4.6

由表4可知,对于选取的影响因素,其压入荷载极差从大到小依次为混凝土稠度、碎石粒径、压入时间、碎石撒布面积,表明对成型工艺参数影响最大的因素为混凝土稠度,且其压入荷载极差要明显大于其他影响因素。碎石撒布面积对成型工艺参数的影响最小,这与不同碎石撒布面积下压入荷载差异不大的结果对应。碎石粒径和压入时间对成型工艺参数影响差异不大。

## 5 结语

(1)植石水泥混凝土压入荷载主要来自于水泥混凝土中粗集料的阻碍作用,此外细集料影响了碎石与水泥混凝土接触界面的摩擦特性,亦对碎石压入荷载产生一定的影响,推荐采用稠度为塑性的水泥混凝土作为植石技术的下承层材料。

(2)通过分析碎石粒径、碎石撒布面积以及压入时间对成型工艺参数的影响,推荐植石水泥混凝土采用单粒径碎石,碎石撒布面积宜为60%~70%,并且压入时间不宜超过75 °C·h。

(3)通过对不同影响因素下的正交试验结果进行压入荷载极差分析发现,混凝土稠度对植石水泥混凝土成型工艺参数影响最为突出,碎石粒径与压入时间次之,碎石撒布面积影响最小。

(4)本文采用室内试验研究植石水泥混凝土成型工艺,采用的路面材料强度试验仪与现场施工时采用三辊轴机组有所差异,文献[18]中已经公开了一种植石机用于现场施工,后续将进行植石水泥混凝土室内专用成型设备研发。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 霍明. 水泥混凝土路面抗滑功能衰减规律及评价方法研究[D]. 西安:长安大学,2009.  
HUO Ming. Research on skid resistance function attenuation and evaluation method of cement concrete

- pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [2] 刘英,田波,牛开民.不同纹理水泥混凝土路面降噪与抗滑特性[J].公路交通科技,2012,29(1):28-33.  
LIU Ying, TIAN Bo, NIU Kai-min. Skid-resistance and denoising propertied of cement concrete pavement with different surface texture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1):28-33.
- [3] 黄晓明.水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J].交通运输工程学报,2014,14(1):1-10.  
HUANG Xiao-ming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1):1-10.
- [4] 李波,韩森,滕旭秋.混凝土路面的表面纹理与抗滑性[J].交通标准化,2008(7):154-157.  
LI Bo, HAN Sen, TENG Xu-qiu. Surface texture and resistance of concrete pavement[J]. Communications Standardization, 2008(7):154-157.
- [5] AHAMMED M A, TIGHE S. Concrete pavement surface textures and multivariable frictional performance analysis: A North American case study[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(35):727-738.
- [6] CHON B, LEE S W. Skid resistance loss of plastic-grooved concrete roadways[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, 2008, 161(2):65-70.
- [7] 郑木莲,王崇涛,王秉纲.路用多孔混凝土排水性能[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):6-10.  
ZHENG Mu-lian, WANG Chong-tao, WANG Bing-gang. Drainage ability of porous concrete in road[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5):6-10.
- [8] 郑木莲.多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J].交通运输工程学报,2006,6(4):41-46.  
ZHENG Mu-lian. Permeability coefficient and test method of porous concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(4):41-46.
- [9] 郑木莲,陈拴发,王崇涛.多孔混凝土的强度特性[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):20-25.  
ZHENG Mu-lian, CHEN Shuan-fa, WANG Chong-tao. Strength character of porous concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 6(4):20-25.
- [10] JONGPRATEEP O, JAROONVECHATAM N, STIEN-KIJUMPAI S, et al. Effects of aluminum concentrations on microstructure and compressive strength of porous concrete[J]. Key Engineering Materials, 2017, 751:563-569.
- [11] 韩森,李志玲,张东省,等.露石水泥混凝土路面关键技术研究[J].中国公路学报,2004,17(4):17-20.  
HAN Sen, LI Zhi-ling, ZHANG Dong-sheng, et al. Key technology of exposed-aggregate cement concrete pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4):17-20.
- [12] 韩森,李志玲,张东省,等.露石水泥混凝土路面性能[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):6-9.  
HAN Sen, LI Zhi-ling, ZHANG Dong-sheng, et al. Performance of exposed-aggregate cement concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4):6-9.
- [13] 韩森,董雨明,陈海峰,等.露石水泥混凝土路面降噪特性[J].交通运输工程学报,2005,5(2):32-34.  
HAN Sen, DONG Yu-ming, CHEN Hai-feng, et al. Noise reduction performance of exposed-aggregate cement concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2):32-34.
- [14] 徐鸥明,韩森,于静涛.层间界面对混凝土桥面铺装结构性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(5):17-20,53.  
XU Ou-ming, HAN Sen, YU Jing-tao. Effect of interlayer on structural performance of concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(5):17-20,53.
- [15] 徐鸥明,韩森,于静涛.露石混凝土改善桥面铺装结构稳定性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(1):22-24,69.  
XU Ou-ming, HAN Sen, YU Jing-tao. Research on improvement of structural stability for concrete bridge deck pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1):22-24,69.
- [16] 程道虎,韩森,李娜,等.混凝土桥面防水粘层材料最佳用量与层间抗剪强度分析[J].世界桥梁,2010(2):55-58.  
CHENG Dao-hu, HAN Sen, LI Na, et al. Analysis of optimal usage of waterproof binding materials and interlayer shearing strength of concrete bridge deck[J]. World Bridges, 2010(2):55-58.
- [17] 李俊.植石水泥混凝土路面关键技术研究[D].西安:长安大学,2015.  
LI Jun. Study on key technologies of planted-aggregate cement concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [18] 李娜,韩微微,盛青福,等.一种植石机:中国,CN

- 204570430U[P]. 2015-04-10.
- LI Na, HAN Wei-wei, SHENG Qing-fu, et al. A kind of chip-sprinkling machine; China, CN204570430U [P]. 2015-04-104.
- [19] DESCORNET G, FUCHS F. Concrete paving texture [J]. *Schriftenreihe Strassenforschung*, 1992, 409: 54-60.
- [20] DESCORNET G, FUCHS F, BUYS R. Noise-reducing concrete pavements[C]//TRB. International Conference on Concrete Pavement Design & Rehabilitation. Washington DC: TRB, 1993: 93-98.
- [21] CACKLER E T, HARRINGTON D S, FERRAGUT T. Evaluation of US and European concrete pavement noise reduction methods[R]. Ames: Iowa State University, 2006.
- [22] HOERNER T, SMITH K, LARSON R, et al. Current practice of Portland cement concrete pavement texturing [J]. *Transportation Research Record*, 2003 (1860): 178-186.
- [23] 李俊, 韩森, 曹东伟, 等. 植石水泥混凝土路面噪声特性分析[J]. *中外公路*, 2017(4): 45-48.
- LI Jun, HAN Sen, CAO Dong-wei, et al. Noise characteristics analysis of chip-sprinkling cement concrete pavement[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017(4): 45-48.
- [24] REN Wan-yan, HAN Sen, LI Jun, et al. Investigation of the relative abrasion resistance of concrete pavement with chip-sprinkled surfaces [J]. *Wear*, 2017, 382: 95-101.
- [25] 任万艳, 韩森, 李俊, 等. 植石技术在混凝土桥面沥青铺装结构中的应用[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(2): 222-228.
- REN Wan-yan, HAN Sen, LI Jun, et al. Application of chip-sprinkling technique to concrete bridge asphalt pavement structure[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(2): 222-228.
- [26] 任万艳, 韩森, 李俊, 等. 植石混凝土桥面沥青铺装层间抗剪性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(1): 111-116.
- REN Wan-yan, HAN Sen, LI Jun, et al. Research on interlaminar shear properties of bridge deck asphalt pavement on chip-sprinkling cement concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1): 111-116.
- [27] 余概宁, 孙晓立. 利用成熟度方法预测水泥混凝土路面的早期强度[J]. *公路交通技术*, 2012(5): 15-18.
- YU Gai-ning, SUN Xiao-li. Prediction of early strength of cement concrete pavement by means of maturity method[J]. *Technology of Highway Transport*, 2012(5): 15-18.
- (上接第33页)
- [19] 许静, 朱涵, 刘春生, 等. 橡胶集料混凝土阻尼比的初步试验研究[J]. *混凝土*, 2005(11): 40-42.
- XU Jing, ZHU Han, LIU Chun-sheng, et al. Preliminary experimental studies on damping ratio of crumb rubber concrete[J]. *Concrete*, 2005(11): 40-42.
- [20] 张哲哲. 橡胶混凝土力学性能及阻尼特性试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- ZHANG Zhe-zhe. Experimental study on the mechanical properties and damping characteristics of rubber concrete[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [21] JGJ 51—2002, 轻骨料混凝土技术规程[S].
- JGJ 51—2002, Technical specification for lightweight aggregate concrete structures[S].
- [22] 梁朝锋, 刘铁军, 肖建庄, 等. 再生混凝土悬臂梁阻尼性能与损伤关系的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(7): 100-106.
- LIANG Chao-feng, LIU Tie-jun, XIAO Jian-zhuang, et al. Experimental study on relationship between damping capacity and damage degree of recycled concrete cantilever beam [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 100-106.
- [23] 柯国军, 郭长青, 胡绍全, 等. 混凝土阻尼比研究[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(1): 35-40.
- KE Guo-jun, GUO Chang-qing, HU Shao-quan, et al. Study on the damping ratio of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(1): 35-40.
- [24] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. 3rd ed. London: CRC Press, 2003.
- [25] 万泽青. 高阻尼混凝土的试验研究及其在结构耗能减震中的应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
- WAN Ze-qing. Experimental research and application of high damping concrete in structural energy dissipation and vibration mitigation[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2005.
- [26] RODRIGUEZ-GOMEZ S, CAKMAK A S. Evaluation of seismic damage indices for reinforced concrete structures [R]. Buffalo: State University of New York, 1990.