

# 水泥稳定碎石室内振动击实曲线优化研究

裘友强<sup>1,2</sup>,张留俊<sup>1</sup>

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075;2.北京科技大学,北京市 100083)

**摘要:**为获取规律良好的二次凸形振动击实曲线,减少对击实曲线的补点试验,依托国道110呼和浩特至毕克齐段一级公路的两个路面合同段,采用振动击实仪对水泥稳定碎石进行室内振动击实试验,探讨预定的含水率间距对不同水泥剂量下振动击实曲线的影响,并与重型击实曲线进行比较分析。试验结果表明:预设的振动击实含水率间距与水泥剂量之间存在一定的联系,将直接影响振动击实曲线成形的好坏。当预定的含水率间距为1%时,高水泥剂量(>5%)下的振动击实曲线随含水率增加而逐渐呈现试验点“聚积”现象,而低水泥剂量(≤5%)条件下仍能形成规律良好的振动击实曲线。反之,预定较小的含水率间距(0.5%)时,在合理的水泥剂量条件下,振动击实曲线呈现出规律更良好的二次凸形曲线特征,从而能够快速准确地获得水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率。通过与重型击实试验的比较,验证振动击实下的水泥稳定碎石的干密度对含水率敏感性更高,并提出水泥稳定碎石室内振动击实曲线绘制的优化方法。该项研究不仅能快速准确地为振动压实下的水泥稳定碎石配合比设计提供控制指标,而且填补了室内振动击实曲线绘制经验的空白。

**关键词:**振动击实曲线;水泥稳定碎石;水泥剂量;含水率间距;重型击实曲线

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

在实体工程中,水泥稳定碎石是中国公路基层和底基层应用最广泛的一种填料,其铺层成型方式主要采用振动压路机碾压而成。多年来,针对水泥稳定碎石的配合比设计和压实标准,国内外主要通过室内重型击实、静压成型的试验方法确定;但由于

重型击实实质上是模拟钢轮压路机,在静压成型过程中忽略了水泥稳定碎石与碾压工艺的相互作用,显然与现场振动碾压的相互作用机理不吻合,试验结果既不能有效地真正揭示水泥稳定碎石组成结构和性能,也不能科学地指导现场施工。大量研究成果表明<sup>[1-7]</sup>:采用室内振动击实、振动成型的试验方法能够更好地模拟水泥稳定碎石基层或底基层的现场实际碾压工况,从而为现场施工提供更好的技术支

- [8] ZHANG Y, LI H, ABDELHADY A, et al. Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121074.
- [9] ZHONG R, WILLE K. Material design and characterization of high performance pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 51-60.
- [10] 梁永哲,陈毅,刘大翔,等.外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2016,36(2):136-139,145.
- [11] 陈毅,梁永哲,刘大翔,等.植物纤维加筋对植被混凝土抗冻耐久性的影响[J].湖北农业科学,2015,54(19):4840-4844.
- [12] 赵治广.聚丙烯纤维透水混凝土的实验研究与应用[J].实验技术与管理,2007,24(9):26-28.
- [13] 上海嘉洁生态科技有限公司,北京万澎科技有限公司.生态混凝土应用技术规程:CECS 361—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [14] 中国建筑科学研究院有限公司.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

收稿日期:2022-01-29(修改稿)

基金名称:国家重点研发计划项目(编号2016YFC0802203);中国交建科技研发项目(编号:2014-ZJKJ-PTJS07)

作者简介:裘友强,男,硕士,工程师.E-mail:1450312182@qq.com

持与指导。

为了最大程度地模拟现场碾压工艺,并进行水泥稳定碎石的配合比设计,首先需要通过室内击实试验确定水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率,以此作为施工质量控制的依据<sup>[8-12]</sup>。目前,在中国现行的各类土工试验规程中,普遍采用5点击实法绘制击实曲线,但处理试验数据时常遇到击实曲线线形不理想,需要进行补点试验甚至重做试验,显然击实试验是一种费时、费工、费料的试验。此外,现行的土工试验规程涉及的击实试验主要是指室内重型击实试验,而振动击实试验中击实曲线的绘制是参照重型击实试验进行的。针对振动击实试验的研究,一些学者已取得了一定的研究成果。李明杰<sup>[13]</sup>系统地研究了振动参数对水泥稳定碎石基层压实的影响,提出了合理的振动参数配置;于新等<sup>[14]</sup>结合杭长高速公路两个路面合同段,通过室内试验分析了集料吸水率对水泥稳定碎石最大干密度、最佳含水率的影响程度;王龙等<sup>[15]</sup>对比分析了两种成型方法(静压法、振动法)对水泥稳定碎石基层材料配合比设计的影响。就研究现状而言,多数学者主要从振动参数的选取、试验结果的影响因素以及不同成型方法(静压法、振动法)之间的对比等方面进行探索研究,而关于振动击实曲线绘制的研究较少。因此,如何快速准确地绘制规律良好的振动击实曲线,同时又能保证试验数据的可靠性、合理性,是一个值得探索的问题。

鉴于此,依托国道110呼和浩特至毕克齐段一级

公路的2个路面合同段,采用室内振动击实仪对水泥稳定碎石进行振动击实试验,探讨预定的含水率间距对不同水泥剂量下振动击实曲线的影响;并通过与重型击实曲线的对比分析,进一步提出水泥稳定碎石室内振动击实曲线绘制的优化方法。

## 1 试验

### 1.1 原材料性质

(1) 水泥。2个路面合同段分别采用内蒙古生产的千峰牌和天皓牌P.C32.5水泥,其主要技术指标均满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)<sup>[16]</sup>的要求,如表1所示。

表1 水泥的物理力学性质指标

水泥品牌	安定性	细度/ %	3 d强度/MPa		凝结时间/min	
			抗压	抗折	初凝	终凝
千峰牌(1标)	合格	1.8	20.7	2.7	185	370
天皓牌(2标)	合格	1.1	19.0	3.8	278	376
规定值	合格	≤10.0	≥10	≥2.5	≥180	≤600

(2) 集料。2个路面合同段分别采用内蒙古2个不同料场生产的碎石作为试验所用粗、细集料,其中粗集料规格分为20~25 mm、10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm 4档,细集料规格为0~3 mm,其主要技术指标均满足《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)<sup>[17]</sup>要求,如表2所示。

表2 集料的主要技术指标

集料规格	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		针片状颗粒含量/%		含泥量/%		压碎值/%		砂当量/%	
	1标	2标	1标	2标	1标	2标	1标	2标	1标	2标	1标	2标
粗集料	20~25 mm	2.912	—	2.827	—	11.6	0.79	—	13.9	11.4	—	—
	10~20 mm	2.937	2.933	2.807	2.803	7.9	0.81	0.94				
	5~10 mm	2.953	2.971	2.763	2.762	4.2	0.65	0.70				
	3~5 mm	2.929	2.975	2.665	2.740	—	0.89	0.91				
细集料	0~3 mm	2.804	2.810	—	—	—	—	—	—	—	80	64
规定值	≥2.6		—		基层≤18 底基层≤20		≤2		基层≤22 底基层≤30		≥50	

### 1.2 集料级配组成设计

《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20—2015)<sup>[16]</sup>指出:C-B-1级配既可用于基层,也可用于底基层;C-B-2级配宜用于基层。在此次试验中,1标基

层采用C-B-1级配,其粒径范围包括20~25 mm、10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm、0~3 mm共5种规格,压实度控制为97%;而2标基层采用C-B-2级配,其粒径范围包括10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm、

0~3 mm共4种规格,压实度控制为98%。根据筛分试验结果,得出2个路面合同段C-B-1、C-B-2级配各规格集料组成情况,如表3所示。

表3 集料级配组成

路面 合同段	层位	级配 类型	各档集料(mm)质量百分比/%				
			20~25	10~20	5~10	3~5	0~3
1标	基层	C-B-1	18	28	17	8	29
2标	基层	C-B-2	—	35	25	13	27

1.3 试验方法和试验仪器

依托国道110呼和浩特至毕克齐段一级公路的2个路面合同段,按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)<sup>[18]</sup>中相关方法,在确定水泥剂量和预定的5~6个不同含水率的前提下,首先以外掺法依次加入水泥和预定的5~6个含水率于混合料中进行人工搅拌,搅拌均匀后按四分法制备5~6个不同含水率圆柱体试件( $\phi 15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ );然后采用振动击实仪对水泥稳定碎石混合料进行室内振动击实试验,测定其含水率和干密度,绘制相应的振动击实曲线,用以确定不同水泥剂量条件下水泥稳定碎石混合料的最大干密度和最佳含水率,并探讨预定的含水率间距对不同水泥剂量下振动击实曲线的影响。此外,为了研究击实方法对击实曲线的影响,采用重型击实仪对水泥稳定碎石进行室内重型击实试验,将重型击实曲线与振动击实曲线进行比较,进一步提出水泥稳定碎石室内振动击实曲线的优化方法。

振动击实仪参数设置为:工作频率30 Hz,名义振幅1.3 mm,工作质量3.0 kN(上车系统1.2 kN、下车系统1.8 kN),振动击实时间120 s,振动击实设备如图1所示。



图1 振动击实仪

2 试验结果与分析

2.1 预定含水率间距对振动击实曲线的影响

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)<sup>[18]</sup>中振动压实试验方法,针对2标段水泥稳定碎石混合料,采用振动击实仪对其进行室内振动击实试验,选取的水泥剂量依次为4%、5%、6%、7%;此外,基于以往室内振动试验结果估计水泥稳定碎石的最佳含水率为4.5%~6%,因此,参照规范要求以外掺法依次添加3.5%、4.5%、5.5%、6.5%、7.5%的含水率于混合料中进行搅拌,即预定的含水率间距为1%。在此次试验中,共制备20个圆柱体击实试件( $\phi 15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ );并结合试验结果,采用二次拟合法绘制2标段不同水泥剂量下水泥稳定碎石基层(C-B-2)的振动击实曲线,如图2所示。

从图2可以看出:

(1) 在预定含水率间距1%的前提下,不同水泥剂量下水泥稳定碎石基层的振动击实曲线呈现不同的曲线特征。显然,除4%、5%水泥剂量外,高水泥剂量(6%、7%)下的振动击实曲线难以形成规律良好的二次凸形曲线特征,并且随着含水率增加而逐渐呈现试验点“聚积”现象。

(2) 实际测得的水泥稳定碎石混合料的含水率与预定的含水率之间存在较大的差距,预定的含水率和水泥剂量越大时,这种差距表现得越明显,将直接影响到振动击实曲线成形的好坏。其原因主要在于:随着水泥掺量和含水量的增加,水泥与混合料中的水分所形成的水泥浆含量增多,在振动击实功作用下,水泥浆大量溢出,导致实际测得的含水率较小,与预定的含水率存在较大的差距,从而在振动击实曲线后半段出现试验点“聚积”现象。反之,当水泥掺量较低时,在振动击实功作用下,水泥浆的溢出量显著减小,说明低水泥掺量下的水泥稳定碎石对含水率的敏感性更小。因此,在水泥稳定碎石振动击实试验中,水泥掺量和预定含水率间距的选取十分重要,应合理控制水泥掺量和预定含水率的间距。

鉴于此,为了避免水泥掺量过多和含水率间距过大对振动击实曲线成形产生的不利影响,继续以2标段水泥稳定碎石基层为研究对象,通过改变水泥掺量和含水率间距,进一步研究预定含水率的间距

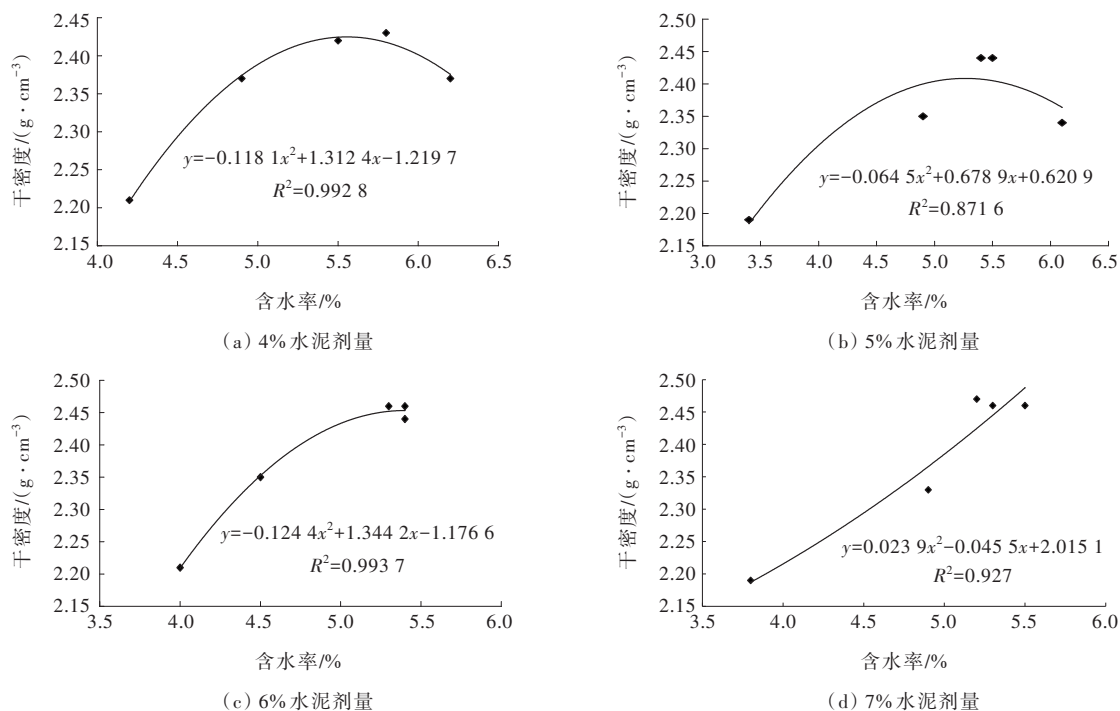


图2 2标段振动击实曲线(预定的含水率间距1%)

对不同水泥剂量下振动击实曲线的影响。在此次试验中,按外掺法依次添加4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%的含水率于水泥掺量分别为3.5%、4.5%的混合料中,即预定的含水率间距为0.5%,基于试验结果绘制3.5%、4.5%水泥剂量下水泥稳定碎石的振动击实曲线,如图3所示。此外,为了保证试验方法的可

靠性,针对1标段水泥稳定碎石基层,同样按外掺法依次添加4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%的含水率于不同水泥掺量(3.5%、4.0%、4.5%、5.0%)的混合料中,采用振动击实仪对其进行室内振动击实试验,进一步验证试验方法的可行性,并绘制相应的振动击实曲线,如图4所示。

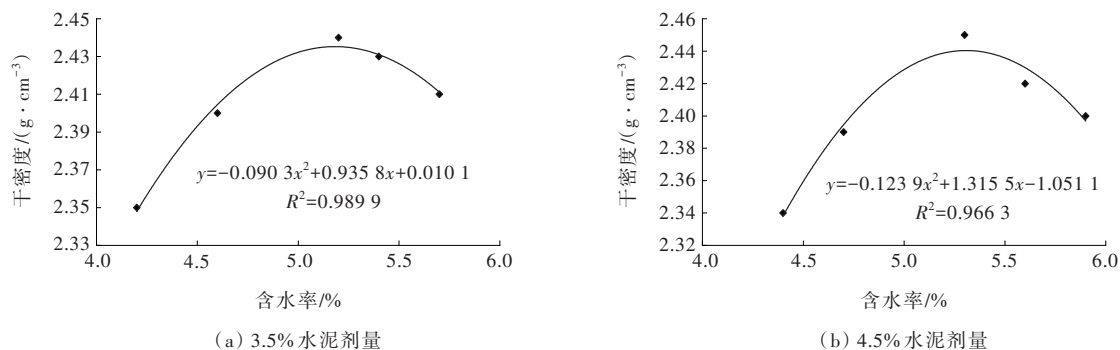


图3 2标段振动击实曲线(预定的含水率间距0.5%)

从图3、4可以看出:当预定的含水率间距为0.5%时,在合理的水泥剂量下,水泥稳定碎石振动击实曲线均呈现出规律更良好的二次凸形曲线特征,能够有效地避免击实曲线的补点试验或重做试验,从而能够快速准确地获得水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率,具有较强的实用性。对比图2~4还可以得知:预定的含水率间距对不同水泥剂量下

振动击实曲线的影响程度不一,说明预设的振动击实含水率间距与水泥剂量之间存在一定的联系,即高水泥剂量下的水泥稳定碎石对预定的含水率间距的适用范围更小、敏感性更大,同时反映了预定较小的含水率间距有利于绘制规律更良好的振动击实曲线。

## 2.2 击实方法对击实曲线的影响

为了对比分析重型击实法和振动击实法对击实



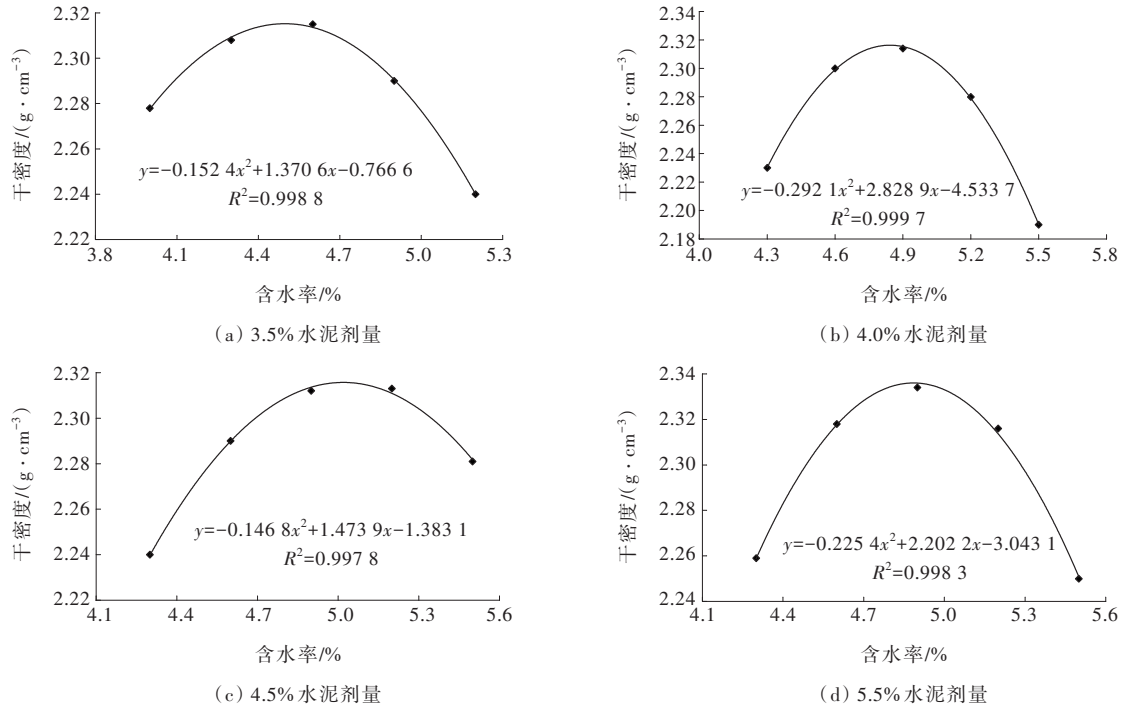


图4 1标段振动击实曲线(预定的含水率间距0.5%)

曲线的影响,以2标段水泥稳定碎石基层为研究对象,按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)<sup>[18]</sup>中相关方法,基于预定的含水率间距相同(1%)原则,但考虑到重型击实法获取的最佳含水率通常大于振动击实法所得值,按外掺法依次添加4.5%、5.5%、6.5%、7.5%、8.5%的含水率于

不同水泥剂量(4%、5%、6%、7%)下的混合料中进行搅拌,然后采用重型击实仪对其进行室内重型击实,基于试验结果绘制相应的重型击实曲线,如图5所示,并将获取的重型击实曲线(图5)与相同条件(水泥掺量、含水率间距)下的振动击实曲线(图2)进行比较分析。

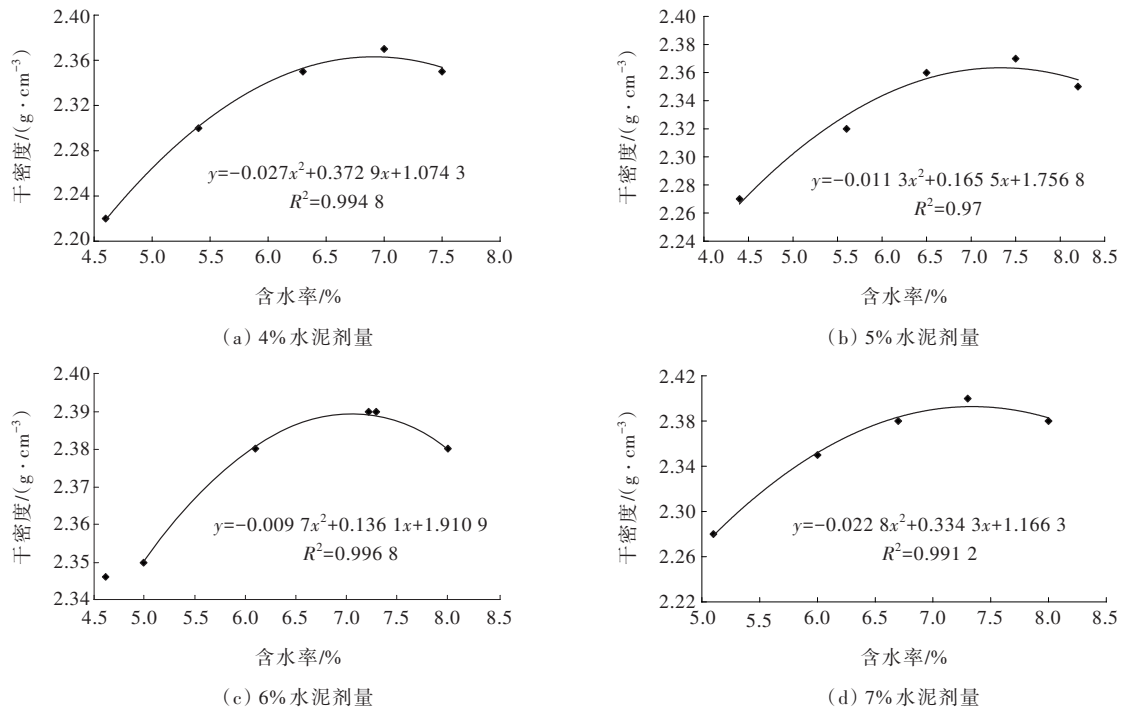


图5 2标段重型击实曲线(预定的含水率间距1%)

从图 5 可以看出:当预定的含水率间距为 1% 时,即使在高水泥剂量(6%、7%)条件下,水泥稳定碎石重型击实曲线均形成规律较好的二次凸形曲线特征,从而获取基于重型击实下的水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率。对比图 2 和图 5 还可以得知,相较于振动击实法,采用重型击实法确定的水泥稳定碎石的干密度对含水率敏感性较小,同时说明不同水泥剂量下重型击实曲线受预定的含水率间距的影响较小,主要是因为振动击实功远大于重型击实功,在振动击实功作用下,水泥稳定碎石混合料被振动击实得更密实。因此,在实际应用中,当采用不同的击实方法(重型击实法和振动击实法)确定水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率时,应注意区别这两种击实方法对击实曲线的影响,尤其应注意预定的含水率间距和水泥剂量的选取。

### 3 结 论

(1) 通过改变预定的含水率间距,揭示了预定的含水率间距对不同水泥剂量下振动击实曲线的影响:当预定的含水率间距为 1% 时,高水泥剂量下的振动击实曲线随含水率增加而逐渐呈现试验点“聚积”现象,而低水泥剂量条件下仍然能形成规律良好的振动击实曲线;当预定的含水率间距为 0.5% 时,在合理的水泥剂量条件下能够形成规律更良好的二次凸形振动击实曲线。

(2) 基于室内振动击实试验,说明预设的振动击实含水率间距与水泥剂量之间存在一定的联系,即高水泥剂量下的水泥稳定碎石对预定的含水率间距的适用范围更小、敏感性更大。

(3) 通过与重型击实试验的比较,验证了振动击实下的水泥稳定碎石的干密度对含水率敏感性更高,并提出了振动击实曲线绘制的优化方法,即预定的含水率间距为 0.5%、水泥剂量不宜过大时,有利于绘制出规律更良好的振动击实曲线,从而能够快速准确地获得水泥稳定碎石的最大干密度和最佳含水率。

#### 参考文献:

[1] 李明杰,蒋应军,张俊杰,等.半刚性基层材料振动试验方

法[J].交通运输工程学报,2010,10(1):6-12.

- [2] 蒋应军,曹帆,陈浙江,等.垂直振动成型水泥稳定碎石疲劳特性及应用[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4): 1-6.
- [3] 胡力群,沙爱民.室内振动压实机结构及利用振动法确定水泥稳定碎石压实标准应注意的问题[J].公路,2010, 55(6): 132-135.
- [4] 李明杰.水泥稳定碎石振动试验方法研究及应用[D].西安:长安大学,2010.
- [5] WANG L, XIE X G, LUAN H. Influence of laboratory compaction methods on shear performance of graded crushed stone[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(10): 1483-1487.
- [6] 周娟,李娟燕.水泥稳定再生碎石混合料的振动试验研究[J].中外公路,2019,39(5):250-256.
- [7] 王洪国,苏纪壮,张民,等.振动搅拌对掺铁尾矿砂水泥稳定碎石混合料的影响研究[J].硅酸盐通报,2021,40(12): 4209-4216.
- [8] 王将,龚辉,郭娜娜,等.土石混合料的大型击实试验研究[J].公路,2021,66(1):297-302.
- [9] 邹海味,熊越,陈学军.土石混合料的压实与力学性能研究[J].公路,2019,64(6):32-38.
- [10] 孙雅珍,李凯翔,迟凤霞,等.基于含水率变化宕渣土石混合料回弹模量的试验研究[J].中外公路,2017,37(2):223-227.
- [11] 薛振华,关博文,樊兴华.掺玄武岩纤维水泥稳定再生碎石基层性能研究[J].中外公路,2021,41(5):269-273.
- [12] 杨善东,王笑风,游鹏,等.土凝岩胶凝材料稳定碎石基层路用性能研究[J].中外公路,2021,41(6):275-280.
- [13] 李明杰.水泥稳定碎石强度影响因素的试验研究[J].公路交通科技,2010,27(4):6-11,43.
- [14] 于新,杜银飞.考虑集料吸水率的水泥稳定碎石最大干密度及最佳含水量理论计算方法[J].公路交通科技, 2012, 29(3): 17-21.
- [15] 王龙,解晓光,于立泽.成型方法对半刚性基层材料配合比设计的影响[J].公路交通科技,2013,30(2):32-37.
- [16] 交通运输部公路科学研究院.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有限公司,2015.
- [17] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [18] 交通运输部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.